

ROGER MOREL

**Contribution à l'étude rationnelle des machines
électrostatiques**

Annales de l'université de Grenoble, tome 23 (1947-1948), p. 155-357

<http://www.numdam.org/item?id=AUG_1947-1948__23__155_0>

© Annales de l'université de Grenoble, 1947-1948, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales de l'université de Grenoble » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

**CONTRIBUTION A L'ÉTUDE
RATIONNELLE DES MACHINES
ÉLECTROSTATIQUES**

par

Roger MOREL.

(Grenoble).

PRÉFACE

par **N.-J. FÉLICI.**

Laboratoire d'électrostatique du Centre National de la Recherche Scientifique
à Grenoble.

L'homme n'a pas coutume, dans son effort, de suivre une voie directe et logique. S'il en est ainsi dans les sciences exactes, que dire du domaine technique, où chaque tentative de raisonnement doit s'appuyer sur le fondement incertain d'une connaissance objective toujours imparfaite ! Combien de procédés techniques, qui paraissent aujourd'hui d'une évidence élémentaire, n'ont été acquis que par les chemins tortueux de l'empirisme, après avoir échappé à d'innombrables générations d'hommes instruits et civilisés ! C'est ainsi que toutes les inventions qui sont à l'origine de la civilisation moderne — harnais à cheval, navire à gouvernail, imprimerie, etc. — sont sorties du labeur obscur de compagnons du moyen âge, et non de la clairvoyante intelligente des Anciens.

De même en Électricité. Des physiciens illustres ont, en peu de temps, résolu tous les problèmes de l'Électricité théorique. De Coulomb à Faraday, il n'y a qu'un demi-siècle, et, dans ce court intervalle, les principales lois, suffisantes pour la compréhension de la technique moderne, ont été découvertes et fixées dans une formulation mathématique définitive. On pourrait supposer que les années suivantes allaient voir un merveilleux essor de la technique électrique, qui possédait désormais la clef ouvrant le livre de la connaissance. Et pourtant, pendant 50 ans encore, l'Électricité industrielle ne fit que des progrès misérables ; il fallut aux techniciens, pour arriver à s'assimiler les lois, plus de temps qu'aux physiciens pour les découvrir.

Et l'on sait que la connaissance profonde des lois n'est pas à l'origine des applications de l'Électricité. Gramme et Edison étaient

pour une large part des empiriques. On connaît l'anecdote qu'on montre Gramme s'endormant pendant une savante conférence sur les dynamos et protestant au réveil qu'il n'aurait jamais inventé sa machine s'il lui avait fallu s'embarrasser des « trous de violon » qui couvraient le tableau noir. On connaît aussi l'histoire célèbre de la découverte fortuite de la dynamo motrice à l'exposition de Vienne, à la suite d'une erreur de branchement.

Que dire de l'Électrostatique ! Aucune autre partie de l'Électricité n'est susceptible de s'exprimer en des lois plus simples et en même temps plus exactes, à tel point que toute théorie de l'Electro-magnétisme est forcément imparfaite, qui ne s'attache pas à suivre, en le généralisant par le moyen de la Relativité, l'exposé classique de l'Électrostatique.

Et pourtant, y a-t-il un domaine de l'Électricité industrielle où les empiriques aient plus sévi, et où leur effort immense ait été plus stérile ? Je n'en veux pour preuve que cet extrait d'une autre préface à un autre ouvrage traitant de machines électrostatiques :

« Les machines électrostatiques ont tout ce qu'il faut pour être dédaignées par le physicien moderne. Elles se prêtent mal au calcul, encore moins aux mesures de précision ; leur théorie ne fait entrevoir aucune généralisation utile, enfin, on n'en a jamais tiré parti pour une application industrielle de quelque importance... Si l'on en croit Poggendorf « ... nous ne devons rien à la théorie telle qu'elle s'est faite jusqu'à présent. Tout, la première découverte comme les perfectionnements et les développements successifs, a été l'œuvre de la seule expérience du « *provando e riprovando* » des anciens Académiciens de Florence » (V. Schaffers, « La Machine à Influence », Louvain, 1908).

Comment imaginer qu'un pareil discours, reflétant fort bien, au reste, l'opinion courante, ait pu être tenu 97 ans après le Mémoire illustre où Poisson établissait que toutes propriétés des conducteurs électrisés se peuvent déduire exactement de la seule loi de Coulomb ? Tout au plus comprendrait-on que Schaffers ait tenté d'expliquer pourquoi les possibilités de son époque rendaient illusoire toute tentative de réaliser des machines électrostatiques industrielles. Il n'en était rien d'ailleurs. De son temps, aussi bien que du nôtre, on connaissait non seulement la théorie de Poisson, mais aussi l'influence surprenante qu'exerce sur une machine électrostatique la compression de l'air (Hempel, 1886). On savait réaliser sans peine des chaudières supportant des dizaines d'atmosphères ; notre parc

de locomotives ne date-t-il pas de cette heureuse époque ? Rien, aucune contingence pratique, ne s'opposait à ce que, dès 1890 ou 1900, se développât une technique électrostatique des hautes tensions, parallèlement à la technique électromagnétique. La bobine d'induction n'aurait pas encombré inutilement d'innombrables livres, et les noms injustement oubliés de Toepler et d'Hempel auraient connu une célébrité aussi méritée que celle de Gramme, d'Édison et de Ruhmkorff.

Depuis lors, non seulement les techniciens et les physiciens, mais les professeurs eux-mêmes ont tourné le dos à la science de l'ambre, de la résine et de la peau de chat. Vingt ans après Schaffers on pouvait être bachelier sans savoir un mot des charges statiques et de la loi de Coulomb.

Cette éclipse prolongée aura été salutaire. Elle a précipité dans l'oubli un monstrueux fatras et, par contraste, révélé la haute signification des travaux théoriques de Coulomb, de Poisson, de Maxwell. L'Électrostatique a cessé d'être une science expérimentale ridicule pour redevenir un des beaux domaines de la physique déductive. La peau de chat et les boules de sureau ont été remplacées par l'équation de Laplace et les réseaux harmoniques.

Tout conspirait dès lors à suggérer le contraire des opinions de Schaffers. Et si l'initiative de repenser cet ensemble de problèmes n'avait pas été prise dans notre pays, comme il était naturel qu'elle le fût par une nation où l'enseignement des mathématiques est porté au plus haut degré de perfection, il n'est pas douteux qu'elle aurait surgi ailleurs au bout de plusieurs années, suivant des voies moins directes peut-être, mais finalement aussi efficaces.

Ce qui semblait impensable est devenu réalité. On sait maintenant construire couramment des génératrices électrostatiques industrielles donnant des dizaines de kilovolts avec un rendement de 80 pour 100, et dont l'encombrement ou le poids est dix fois plus faible que celui de l'ensemble transformateur-redresseur-filtre qu'elles remplacent.

C'est le compte rendu fidèle des deux premières tentatives dans ce sens que M. Morel présente dans sa thèse. C'est pourquoi il importe que le lecteur puisse y distinguer ce qui était contingent et conditionné par les possibilités du moment et ce qui, au contraire, garde une valeur définitive.

Il faut se remémorer un instant la période défavorable pendant laquelle M. Morel a fait tout son travail. 1942 à 44, c'était l'occupa-

tion de Grenoble, l'époque où la tranquillité publique et la sécurité des personnes étaient sans cesse menacées : S. T. O., râfles, déportations sévissaient particulièrement dans notre région ! Dans l'ordre matériel, que dire des conditions de travail quand tout manque et que vis et écrou deviennent des objets précieux, nécessitant pour leur conquête tous les artifices de la diplomatie ? On s'étonnera moins, à ce souvenir, de l'imperfection relative des appareils de M. Morel, dont la réalisation est au contraire un beau résultat. Il faut savoir que l'ébonite de la première machine a été trouvée après de longues recherches dans le « cimetière » de l'Institut Fourier, sorte de dépotoir où s'entassaient des débris d'appareils de physique. Pour la seconde machine, on eut la chance de découvrir une planche d'ébonite d'un mètre carré, oubliée depuis longtemps dans un dépôt de la Société Industrielle des Téléphones, à l'autre bout de la France. Cette planche était trop mince et contraignit à des assemblages peu mécaniques, mais quelle chance inouïe de l'avoir rencontrée ! Car il n'était guère possible de prendre pour ébonite les produits noirs proposés sous ce nom, souvent bien plus conducteurs que le bois. On conserve encore, au Laboratoire, un stock d'une de ces soi-disant ébonites, qui s'est révélée très utile pour fabriquer des résistances.

Depuis lors, il y a eu la Libération, la possibilité de sortir de nos frontières, et l'ébonite est allée rejoindre le sureau et la peau de chat au royaume des vieilles lunes. Nous disposons maintenant d'isolants remarquables, à commencer par la Cibanite, supérieure à la meilleure ébonite, supportant 120° C et pouvant donner des pièces de 80 millimètres d'épaisseur. Le bâti de certains types de machines modernes comprend des flasques fort compliqués entièrement faits en cibanite, ce qui illustre assez la confiance mise dans ce matériau. Mais ces facilités d'aujourd'hui ne doivent pas faire mépriser les moyens rudimentaires d'hier.

De même, en ce qui concerne les modalités d'application des principes généraux, les appareils de M. Morel ne représentent que des prototypes que l'on s'est gardé de compliquer inutilement. Il importait de reconnaître à coup sûr la valeur des idées de base, et non de rechercher des performances exceptionnelles. Il était essentiel de démontrer, par une épreuve décisive, que les machines électrostatiques, contrairement à l'opinion de Schaffers, étaient susceptibles de puissances spécifiques élevées, de prévisions précises, d'une analyse détaillée de leur fonctionnement et de mesures exactes de

leurs performances. Dans ces buts, un appareil trop perfectionné, et partant trop complexe, aurait plutôt gêné l'observation. C'est ainsi que la première machine de M. Morel est d'une simplicité élémentaire. C'est une copie pure et simple de la machine de Toepler, sauf naturellement en ce qui concerne l'épaisseur des pièces et leur profil. Les résultats de cet appareil ayant été remarquables — champ de travail de 620 kilovolts par centimètre, puissance multipliée par 240 dans 37 atmosphères d'air — on est passé à un appareil plus perfectionné, mais très simple encore. L'étude de l'excitation, des régulateurs, de la polarité a été abordée avec fruit, mais non pas menée jusqu'à son terme. Elle est encore un des sujets de recherches du Laboratoire.

On peut en dire autant des performances énergétiques. La première machine n'a donné que quelques watts. On pourrait en sourire, quand on pense au chaudron de 25 kilogrammes qui l'enfermait. Mais l'essentiel était que ces watts résultassent de la multiplication par 200 de quelques milliwatts et non pas de l'accumulation de plateaux et de peignes. La seconde machine n'a pas dépassé 200 à 250 watts à la vitesse, modérée il est vrai, de 1 500 tours/minute. Mais elle était handicapée par l'imperfection de sa construction et une puissance plus grande n'aurait pas été plus démonstrative. On sait, actuellement, multiplier par 2,5 ou 3, le débit d'une machine, à vitesse constante, par le procédé du double transport. Notre second prototype, sans changement de taille, aurait ainsi donné 600 watts à 1 500 tours, et par l'emploi d'hydrogène à 70 atmosphères, aurait pu voir sa vitesse doublée et donner 1 200 watts avec un rendement aussi bon sinon meilleur. Tous ces perfectionnements, rendus possibles par les recherches ultérieures du Laboratoire, n'ont pas été appliquées à la machine de M. Morel. Ceci ne change absolument rien à l'exactitude des calculs dont elle a été l'objet, calculs dont les prévisions se sont révélées rigoureusement conformes à l'expérience. Les calculs se transposent d'ailleurs sans aucune peine au cas de machines plus perfectionnées, de telle sorte que si l'objet traité est particulier, la méthode employée est absolument générale et garde tout son intérêt. Les notions de capacités parasites, de commutation, de calage des balais, de facteur de multiplication, les conditions d'amorçage, les contrôles de polarité, les méthodes d'essais, tout ceci est exposé dans le plus grand détail pour le cas de l'exemple proposé. Mais toutes ces généralités s'appliquent sans effort à des appareils quelconques, de telle sorte que la valeur et

l'intérêt en restent aussi grands qu'au premier jour, malgré les progrès réalisés depuis.

C'est dans cet esprit qu'il est souhaitable de parcourir le travail de M. Morel. A propos de deux appareils particuliers les principes des machines électrostatiques sont repris à la base et leur application poussée jusqu'au dernier détail. J'avais d'ailleurs conseillé à M. Morel de ne rien négliger, dans l'exposé théorique, de ce qui pouvait être utile à l'intelligence des résultats effectivement obtenus, mais de s'abstenir de toute digression qui ne serait pas supportée par une réalisation matérielle. Cette limitation sévère a été scrupuleusement respectée ; si elle a obligé M. Morel à supprimer bien des aperçus intéressants, elle a donné à son travail une valeur et une solidité incomparables. Aucune prévision qui n'ait été vérifiée, aucune observation qui n'ait été interprétée et généralisée, et le tout quantitativement. Voilà, je pense, un travail digne à la fois d'un ingénieur et d'un physicien.

Mais la technique n'est pas seulement affaire de raison et de calcul. Il est vain et prétentieux de dire que tout est possible à qui veut. Nos forces et notre temps sont peu de chose devant la résistance et la permanence des objets. Aussi toute réalisation est-elle autant affaire de jugement que de persévérance. Combien se sont lancés dans des voies sans issue, contre des obstacles dépassant leurs forces ! Semblables aux anciens alchimistes, ils ont dû se contenter de pauvres résultats. C'est que la nature est toujours la plus forte, et qu'il faut savoir proportionner nos prétentions à notre faiblesse.

Je veux à ce propos exprimer ma gratitude à M. le P^r Néel, Directeur du Laboratoire d'Électrostatique. Non seulement il a rendu possibles les travaux expérimentaux en m'accueillant ainsi que M. Morel dans son Laboratoire, mais il a surtout, par une sagesse qui paraît, à la lumière des résultats acquis, incomparable, guidé nos recherches vers le succès, en nous éloignant de vaines utopies et en nous exhortant, s'il le fallait, à rester très près des réalités matérielles. C'est avec ce même sens des réalités que M. Weil, Maître de conférences, nous a donné à maintes reprises les avis si pertinents dont je tiens à le remercier également.

On mentirait, en effet, en affirmant que personne n'avait pensé auparavant à des machines électrostatiques puissantes, et n'avait à tout le moins entrevu les moyens d'y parvenir. Mais l'échec de ces tentatives est dû presque autant aux prétentions exorbitantes de leurs auteurs qu'à leur ignorance théorique. Les uns ne voulaient

point de machines qui donnassent moins de 1 000 kilovolts; les autres attendaient des champs de 2 000 kilovolts par centimètre! Toutes choses possibles sans doute, mais par lesquelles il est surprenant de vouloir commencer. Bien loin de révolutionner la technique des courants forts, M. Morel a commencé par quelques watts et 50 kilovolts. Peu de chose, pourrait-on dire, en comparaison des anciennes machines elles-mêmes. Wommelsdorf, qui exagérait quelquefois, n'avait-il pas annoncé une machine donnant 150 kilovolts et 4 mA? Mais ces modestes résultats ont été la base solide des recherches du Laboratoire. Car il est vrai que la technique, comme toute activité humaine, est avant tout l'Art du Possible. Ce n'est que par une soumission constante qu'a été surmontée la nature rebelle, et non par la prétentieuse affirmation que « rien n'est impossible ».

Noël J. FÉLICI.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE RATIONNELLE DES MACHINES ÉLECTROSTATIQUES

par Roger MOREL.

Le sujet dont il est question dans cette étude a fait l'objet, depuis fort longtemps, de recherches et de discussions d'ailleurs peu nombreuses et n'ayant apporté aucun résultat positif et essentiel.

Il vient d'être renouvelé entièrement, en vue d'applications pratiques immédiates, par M. Felici, avec qui nous avons eu l'honneur de travailler. Nous lui devons l'essence même de ce travail et nous tenons à lui exprimer nos bien sincères remerciements, tant pour les enseignements dont nous avons pu profiter que pour la liberté qu'il nous a accordée d'étudier et de publier ses idées originales.

Tous les essais que comporte cette étude ont été effectués à la Faculté des Sciences de Grenoble, dans le laboratoire de M. le P^r Néel, à qui nous présentons notre respectueuse reconnaissance pour l'intérêt constant qu'il a bien voulu porter à ce travail.

Nous exprimons d'autre part à M. Fortrat, doyen de la Faculté des Sciences, et à M. Esclangon, directeur de l'Institut Polytechnique, notre gratitude respectueuse pour l'aide bienveillante que nous avons souvent trouvée auprès d'eux.

PRÉAMBULE

Les machines électrostatiques furent les premiers générateurs mécaniques d'énergie électrique, et elles donnent une image caractéristique de la science et de la technique de leur époque. Oubliées depuis, ou mentionnées à titre de souvenir, quelquefois dans des buts pédagogiques, il n'en reste de nos jours, outre les échantillons poudreux des vitrines, que de rares exemplaires affectés aux besoins très spéciaux de la recherche scientifique et orientés dans ce sens.

Précurseurs, venues trop tôt, à une époque où rien autour d'elles ne permettait de les faire prospérer, elles ont peu à peu disparu, anéanties par les possibilités de l'électromagnétisme. Il semblerait intéressant de reprendre leur étude à une époque plus avancée que celle où elles vécurent, afin que leur principe bénéficiât des idées et des techniques acquises depuis, et que l'insuffisance générale de leur temps se trouvât réparée.

*
* *

Le présent travail a pour but de faire une mise au point des machines dites « électrostatiques », d'étudier dans quel sens il convient de les améliorer, de juger la place éventuelle à laquelle elles pourraient prétendre en vue d'applications pratiques.

Après une réforme générale des machines employées jusqu'à ce jour, nous montrerons, par l'étude théorique de quelques points particuliers, la possibilité de traiter ces machines au moyen de calculs d'une précision comparable à ceux de l'électrotechnique courante. Puis nous tenterons leur étude expérimentale en nous attachant plus spécialement à un exemple concret, apte à caractériser la technique à suivre.

Il est possible d'utiliser de différentes manières les principes éner-

gétiques propres aux machines électrostatiques, sous forme soit de courant continu, soit de courants alternatifs — même polyphasés — comme on l'a parfois proposé. Mais un fait est déjà certain : seuls les appareils à courant continu peuvent présenter un intérêt pratique. Le domaine de la machine électrostatique se trouvant à priori dans la très haute tension, c'est là que résideront ses possibilités originales et intéressantes, si elles sont associées à l'emploi du courant continu.

L'obtention du courant continu à très haute tension, d'une utilisation de plus en plus courante — rayons X, optique électronique, physique nucléaire, précipitation de particules et même transport de force à longue distance — présente un certain nombre de difficultés. Les dynamos n'ont pu dépasser des tensions relativement basses — 5 à 10 KV — et ne semblent pas susceptibles d'améliorations dans ce sens, même sous la forme du « transverter ». Leur mise en série est très aléatoire. Les méthodes actuelles utilisent l'intermédiaire du courant alternatif, et développent la technique des redresseurs et des mutateurs. Les premiers, généralement des kénotrons, ne donnent que des puissances et des rendements médiocres ; les seconds, des tensions très limitées. Leur installation est complexe — transformateurs, condensateurs de filtrage —.

Il est donc permis de se demander si la machine électrostatique rénovée, par l'heureuse coïncidence de ses particularités avec le but recherché, ne pourrait pas rendre de nouveaux services. Mais alors, elle devrait répondre aux exigences de la pratique : sécurité de fonctionnement, rendement suffisant, possibilité de puissances considérables jointe à un encombrement raisonnable. Autant de qualités qui n'ont jamais été rencontrées sur des machines de ce genre.

En résumé, il serait désirable que cette catégorie réadaptée de machines, par sa caractéristique bien personnelle et unique de la très haute tension continue, complétât heureusement l'arsenal déjà vaste de l'électrotechnique moderne.

PREMIERE PARTIE

ETUDE THÉORIQUE D'UNE MACHINE ÉLECTROSTATIQUE

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS

I. — HISTORIQUE

Nous n'entreprendrons pas un long historique des machines électrostatiques, et nous ne rapporterons pas les discussions incertaines dont elles furent l'objet. Avec les anciens modèles, le fonctionnement reste souvent obscur et soumis à des lois imprécises.

Ne citons que pour mémoire les machines dites à frottement, simple mécanisation du bâton d'ambre des anciens, et dont le représentant le plus connu est celle de Ramsden. Il serait superflu d'énumérer tous les appareils qui sont nés d'un principe sans intérêt, incertain, irréversible et peu recommandable. Mais c'était alors le seul connu.

Un deuxième principe conduisit peu à peu aux machines à influence dont l'électrophore fut le prototype et qui, repris et mécanisé lui aussi, donna une nouvelle lignée de machines aux apparences très variées, mais semblables dans leur principe. Le frottement prenait encore, parfois, une certaine part au fonctionnement, en intervenant en particulier à l'amorçage et en maintenant ensuite la machine excitée. Mais ce n'était là qu'un rôle accessoire.

L'influence est le seul phénomène électrostatique à la fois énergétique et réversible, et ce sont les solutions auxquelles ce principe à conduit qui devront être étudiées et rationalisées comme il convient.

Les premiers appareils à influence furent à excitation séparée, nécessitant une machine auxiliaire, et le transport des charges électriques fut assuré par des « transporteurs » métalliques conducteurs.

La machine de Toepler [1], qui fut la première génératrice à influence digne d'intérêt, mérite une mention toute spéciale (1865). Ce fut aussi la plus logique. Une étude moderne et directe de la question ramène effectivement à de telles machines dont la réalisation primitive apparaît alors irrationnelle et à la mesure de la science électrique de leur époque.

Puis, par raison de commodité d'ailleurs toute relative, on créa des dispositifs variés, en général symétriques, en vue d'obtenir l'autoexcitation (¹). L'excitation séparée, cependant, demeure la plus intéressante, tant pour la clarté du fonctionnement auquel elle conduit que pour la sécurité et la souplesse beaucoup plus grandes qu'elle permet.

On a parfois tenté d'améliorer la machine de Toepler, mais des solutions irrationnelles n'ont toujours apporté qu'un succès réduit (²).

Peu après l'apparition de cette machine, l'emploi des transporteurs conducteurs, qui était une caractéristique essentielle, devint de moins en moins fréquent : ils furent remplacés par des transporteurs isolants, plus simples à construire. La machine de Holtz fut le premier exemple de cette nouvelle technique, et toutes les machines électrostatiques utilisées à l'heure actuelle ne sont que l'aboutissement des transformations qui y furent apportées. Les transporteurs conducteurs tombèrent dans un tel discrédit que l'on en vint à contester l'utilité des secteurs métalliques habituellement collés sur les plateaux isolants. Wommelsdorf [3, pp. 655 et 656] affirme qu'ils ne servent qu'à capter l'électricité présente sur l'isolant, qu'il convient de réduire leur surface au minimum, et qu'il faut les munir de dents et d'arêtes pour faciliter la sortie de l'électricité... Ces conceptions assez étonnantes furent toutefois abandonnées par Wommelsdorf lui-même, qui créa ensuite des machines à secteurs métalliques noyés dans un diélectrique solide et où les transporteurs conducteurs jouaient visiblement le rôle essentiel [4].

Donc, les machines à transporteurs isolants prirent une place prépondérante, et c'est sous cette forme qu'elles se développèrent surtout depuis. C'est encore sous cette forme que se présentent les seules génératrices électrostatiques employées actuellement sur une échelle relativement importante ; ces génératrices sont affectées aux besoins de la recherche scientifique et plus spécialement de la phy-

(¹) Wimshurst, Wommelsdorf.

(²) Hempel, Wommelsdorf, H. Chaumat (1930). Voir pages suivantes.

sique nucléaire. L'utilisation de tensions exceptionnellement élevées — de l'ordre des mégavolts — les a conduites à revêtir des formes inaccoutumées. Afin de limiter le gradient de potentiel au long du transporteur, le mouvement de rotation a été remplacé par un mouvement de translation, permettant un ample développement du parcours. Les plateaux tournants ont été abandonnés, et c'est ainsi que l'on a créé les génératrices à courroie ou à poussières. Leur puissance est toujours modérée — de l'ordre du KW — et leur rendement faible.

Depuis quelques années, on essaie de faire fonctionner les génératrices à courroie dans une atmosphère comprimée [13], [14] mais, comme nous aurons l'occasion de le montrer (II, § 3), il est impossible d'obtenir de cette manière une amélioration notable ; la nature même de la machine s'y oppose. Et là encore, les succès ont été réduits.

Ce fut H. Chaumat qui, consacrant une partie de son activité aux machines électrostatiques, tenta le dernier de revenir au système de Toepler à transporteurs conducteurs (1930). Mais il se heurta sans cesse à sa puissance spécifique dérisoire et, en outre, à l'impossibilité corrélative d'atteindre les hautes tensions :

« En effet, la tension montant à mesure que la capacité diminue, pour éviter les décharges disruptives intérieures, on est amené à écarter notablement les plateaux fixe et mobile, c'est-à-dire les éléments des capacités variables. Et il est visible qu'alors, les variations de capacité ne peuvent être que très faibles ; elles tendent vers zéro, à la limite, lorsque les plateaux fixe et mobile sont de plus en plus distants » [11, p. 1176].

En d'autres termes, comme on le verra plus loin, la rigidité du diélectrique interposé et la densité d'énergie qu'il permettait d'obtenir étaient trop faibles ; il ne chercha pas à les accroître. Devant ses insuccès, il revint encore aux machines à plateaux isolants auxquelles il apporta quelques modifications de détails ; elles restèrent cependant sans intérêt. La puissance spécifique de ses machines est presque identique à celle des appareils créés par Wommelsdorf, vingt ans auparavant. Une génératrice de Chaumat comportant un plateau de 40 centimètres de diamètre et tournant à 2500 t/m. débite 120 microampères en court-circuit, la tension de fonctionnement pouvant atteindre par ailleurs 200 KV ; Wommelsdorf [7, p. 491] avait établi une machine possédant un plateau de 45 centimètres et qui, tournant à une vitesse comparable, débitait 140 microampères

en court-circuit, la tension de fonctionnement étant supérieure à 115 KV. Ultérieurement [8, p. 1206], il parvint, toujours avec un plateau de 45 centimètres de diamètre — la vitesse non précisée est certainement du même ordre de grandeur —, à faire débiter 380 microampères, la « longueur d'étincelle » de 260 millimètres étant donnée dans des conditions mal définies, mais laissant cependant supposer une tension voisine de celle des génératrices de Chaumat. Ainsi, les appareils de Chaumat ne représentent aucun progrès sur ceux de Wommelsdorf.

En fait, la technique des machines électrostatiques tournantes, sous sa forme classique, a donné son maximum depuis quarante ans déjà. Aucune amélioration notable n'a été enregistrée depuis ; nous en verrons bientôt les raisons.

II. — CARACTÈRES D'UNE MACHINE PUISSANTE ET A BON RENDEMENT

Nous examinerons les conditions essentielles requises pour le bon fonctionnement d'une machine électrostatique et, en éliminant les solutions insuffisantes adoptées jusqu'à ce jour, nous aboutirons à une conception rationnelle, développée ultérieurement.

1. Le rôle du diélectrique : nécessité d'une grande densité d'énergie.

Physiquement, l'intensité du courant débité par toute machine électrostatique est proportionnelle à la charge électrique transportée — pour une vitesse donnée — donc à l'induction $D = \epsilon E$ régnant dans son diélectrique actif, de pouvoir inducteur spécifique ϵ et soumis au champ E ; d'autre part, la tension à ses bornes est proportionnelle à ce même champ électrique E (circulation de ce vecteur le long d'une ligne donnée). La puissance maxima qu'il est possible de mettre en jeu, égale au produit des deux facteurs, intensité et tension, est donc proportionnelle au terme ϵE^2 .

D'une manière plus générale, la puissance d'une machine électrostatique est essentiellement proportionnelle à la densité d'énergie accumulable dans son diélectrique actif, donc au terme $\frac{\epsilon E^2}{8\pi}$.

Une machine ne peut être intéressante que dans la mesure où elle

met en jeu une puissance spécifique — rapportée à l'unité de volume d'encombrement — assez considérable, avec pour conséquence la possibilité de puissances unitaires élevées, d'encombrements raisonnables et de bons rendements. Il convient donc, avant tout, de chercher à augmenter par tous les moyens utilisables le terme ϵE^2 caractérisant le diélectrique employé. Le champ intervenant par son carré, il est particulièrement intéressant d'accroître la rigidité diélectrique du milieu isolant.

Cette première notion fondamentale se trouvera précisée ultérieurement.

2. Le problème du diélectrique : nécessité d'un gaz comprimé.

Une machine construite rationnellement (voir les § suivants) met en jeu une puissance essentiellement fonction du diélectrique dans lequel le phénomène électrostatique d'influence a lieu. Si la machine est bien conçue, seul le diélectrique doit limiter la puissance possible à atteindre ; et selon ses qualités, un même appareil peut être intéressant ou dérisoire.

Le problème est à comparer à celui des machines électro-dynamiques basées sur le phénomène d'induction magnétique. Ces machines n'ont pris l'ampleur qu'elles connaissent actuellement qu'en raison des possibilités offertes par les matériaux ferromagnétiques, permettant une densité d'énergie $\frac{\mu H^2}{8\pi}$ (μ : coefficient de perméabilité ; H : champ magnétique) très élevée. Elles seraient encore d'inutiles curiosités si, en vue d'appliquer le principe général, la technique n'avait pas eu à sa disposition ces matériaux particulièrement précieux.

a) *Cas des diélectriques solides.* — On pourrait être tenté par le pouvoir inducteur spécifique relativement élevé de ces isolants, joint à une rigidité diélectrique parfois considérable. En fait, ces prétendus avantages ne sont pas exploitables. Il faudrait, en effet, prévoir une coupure du volume de diélectrique actif pour permettre l'obligatoire déplacement relatif des organes producteurs et transporteurs de la machine (analogie avec les circuits magnétiques). Or, si E est le champ régnant dans le diélectrique de pouvoir inducteur spécifique ϵ , le champ E' dans la coupure, remplie d'un isolant de p. i. s. ϵ' , serait $E' = \frac{\epsilon}{\epsilon'} E$. Pratiquement, ce milieu inter-

médiaire devrait être gazeux — pertes mécaniques inadmissibles avec un liquide —. Donc ϵ' serait voisin de l'unité. Par contre on voudrait, par hypothèse, choisir ϵ aussi élevé que possible, au moins de l'ordre de quelques unités ; quant au champ E , il devrait être également considérable. Par conséquent, E' étant encore supérieure à E , aucun gaz, dans les conditions normales d'emploi, ne le supporterait sans ionisation. Si, d'autre part, on voulait alors utiliser un gaz comprimé — voir plus loin —, l'intérêt du diélectrique solide disparaîtrait et il serait préférable de l'enlever totalement, afin que le gaz occupât seul la place. En effet, ce gaz comprimé devrait supporter le champ $E' = \epsilon E > E$. La densité d'énergie, primitivement égale à $\frac{\epsilon E^2}{8\pi}$, deviendrait, en utilisant le gaz seul $\frac{E'^2}{8\pi} = \frac{\epsilon^2 E^2}{8\pi} > \frac{\epsilon E^2}{8\pi}$. La densité serait donc ϵ fois plus grande, dans le cas où le gaz occuperait tout l'espace.

L'utilisation d'un diélectrique solide de grand p. i. s., que quelques auteurs ont suggérée, par analogie avec le fer des machines magnétiques, est donc absurde. Wommelsdorf [4] qui essaya, nous l'avons dit, d'enrober les transporteurs d'une machine de Toepler dans un diélectrique solide, n'obtint aucune amélioration notable.

b) Cas des diélectriques liquides. — Ils ne sont pas à envisager, en raison des pertes par frottement inadmissibles auxquelles ils conduiraient.

c) Cas des diélectriques gazeux. — C'est donc, finalement, aux diélectriques gazeux qu'il faut avoir recours.

Comme aucun gaz, dans les conditions ordinaires, ne présente de qualités suffisantes (champ disruptif trop réduit), nous pouvons déjà affirmer, à priori, qu'il est impossible d'envisager une machine électrostatique de grande puissance spécifique fonctionnant à la pression atmosphérique (avec l'air, la densité d'énergie ne dépasserait pas, alors, $4 \cdot 10^{-5}$ joule par cm^3). D'autre part, tous les gaz ayant un p. i. s. voisin de l'unité, c'est uniquement l'accroissement de leur rigidité qu'il faut chercher à réaliser.

L'idée d'utiliser le vide pour diélectrique est très séduisante en apparence puisqu'elle permettrait, outre la grande rigidité obtenue, d'atteindre des rendements exceptionnels, voisins de 100 pour 100. Les pertes par frottement gazeux, les seules affectant notablement les machines électrostatiques, seraient en effet radicalement supprimées. Cependant il n'est pas possible, actuellement, d'envisager

une telle technique. Les qualités isolantes du vide sont très aléatoires et un dégazage intégral de tous les matériaux constituant la machine serait une première nécessité, qu'il est encore impossible de satisfaire.

La dernière solution qui s'offre, enfin, est l'utilisation des gaz comprimés. Cette solution montre la voie vers laquelle il convient d'orienter en conséquence la technique des machines électrostatiques. Comme nous l'avons signalé, des essais de génératrices en atmosphère comprimée — en général de l'air — ont déjà été tentés [13], [14]. Ils ont échoué, au moins partiellement, parce que les machines utilisées étaient irrationnelles. La puissance atteinte n'a pas été limitée par les possibilités du diélectrique gazeux, comme on a pu le croire, mais bien par la machine elle-même. En conséquence, personne n'a cru bon d'augmenter la pression au delà d'une valeur très limitée puisque, déjà, à 5 kg/cm^2 la puissance semblait atteindre un maximum ; en fait, cette saturation n'était qu'une apparence.

Dans la mesure où la loi de Paschen est vérifiée, la puissance doit croître à peu près proportionnellement au carré de la pression du gaz. C'est dire l'importance de pressions relativement élevées.

Encore faut-il pouvoir profiter intégralement des possibilités ainsi offertes, par une construction judicieuse de la machine elle-même. Les paragraphes suivants doivent préciser cette question.

3. Le problème des transporteurs : nécessité de transporteurs conducteurs.

Nous avons dit qu'une fois la machine de Toepler abandonnée, la technique s'orienta définitivement vers les machines à transporteur isolant. Or, il est bien certain, à l'heure actuelle, que les possibilités de ces machines sont essentiellement limitées par les conditions d'adhérence des ions transportés, sur le support matériel qui les véhicule. Le champ longitudinal, autrement dit le gradient de potentiel tout au long de la trajectoire de ces ions, ne doit pas dépasser une valeur relativement faible, au-dessus de laquelle des étincelles se produisent à la surface du transporteur. Et, dès cet instant, l'utilisation d'artifices en vue d'augmenter le champ E , tel que l'emploi de l'air comprimé, devient inopérante. Par exemple, des essais de génératrices à courroie effectués dans l'air comprimé à 5 ou 6 kg/cm^2 ne semblent pas avoir permis de dépasser un gradient

de potentiel d'environ 10 KV par centimètre de courroie [14]. C'est à peu près cette valeur que l'on retrouve dans les appareils fonctionnant à la pression ordinaire. Et cependant, l'air comprimé à 5 kg/cm² devrait permettre l'obtention de champs d'environ 150 KV/cm. On voit l'importance de l'adhérence insuffisante des ions. Le champ longitudinal étant limité, il a fallu, pour obtenir de très hautes tensions, allonger la trajectoire des ions ; les machines à plateaux rotatifs ont été remplacées par les génératrices à courroie et à poussières.

Avec ces dernières, pour que l'entraînement des poussières dans le champ électrique puisse se faire, le courant d'air qui les véhicule doit être rapide et il dissipe une puissance considérable ; le rendement devient très faible. L'air, circulant à 50 ou 100 m/sec., atteint une température de plus de 100° C.

De toute façon, les machines à transporteurs isolants ne sont pas susceptibles de profiter des milieux diélectriques à grande densité d'énergie.

Il faut donc avoir recours aux transporteurs conducteurs.

4. Conception des transporteurs conducteurs. Nécessité d'électrodes judicieusement épaisses.

Les machines à transporteur isolant apparurent lorsque le système de Toepler sembla impossible à améliorer. Hempel [2], qui essaya de faire fonctionner cette machine dans l'air comprimé, ne sut pas tirer parti des résultats encourageants qu'il obtint. Il ne remarqua que l'augmentation de l'intensité du courant débité, oubliant l'accroissement corrélatif de la tension. Wommelsdorf [4], critiquant ce procédé bien qu'il fût le bon, eut moins de succès avec ses transporteurs enrobés dans un diélectrique solide.

Si la machine de Toepler semblait avoir atteint le maximum de ce qu'elle était susceptible de donner, c'est qu'elle conservait, dans toutes les études que l'on en fit, une tare sérieuse. On sembla toujours, en fait, ne pas comprendre le rôle exact attribué aux pièces métalliques formant les transporteurs des charges électriques. On s'imagina qu'elles n'avaient d'autre but actif que celui de présenter, vis-à-vis des électrodes fixes ou « producteurs », une certaine capacité, variable avec le mouvement. On eut donc soin, pour accroître cette capacité, d'augmenter la surface latérale des transporteurs et des producteurs qui se présentèrent sous forme de feuilles métalliques

minces, simplement collées sur un support isolant. Et l'on négligea ainsi la troisième dimension de la machine électrostatique qui, comme toute machine énergétique, engendre pourtant une puissance proportionnelle à un volume, et non à une surface.

Il est courant d'expliquer le fonctionnement des machines électrostatiques en les assimilant à un système de condensateurs variables dont la capacité, en se modifiant, à charge ou à potentiel constant, entraîne la transformation d'une énergie mécanique en énergie électrique. Cette explication possible, la première venue à l'esprit, rend très mal compte de la réalité énergétique parce que la notion de capacité ne dépend qu'indirectement de celle d'énergie. Elle est peut-être une des raisons pour lesquelles les machines ont eu à souffrir d'anomalies conservées au cours de leur évolution, et en particulier de celle dont il est question dans ce paragraphe.

Il est préférable d'opérer différemment, de partir de la véritable réalité physique : l'énergie, et de la forme matérielle sous laquelle elle se manifeste.

a) *Pression électrostatique. Forces actives.* — Il est essentiel de voir que, dans le cycle de fonctionnement, le fait qu'une puissance soit mise en jeu conduit nécessairement à l'existence de forces mécaniques agissant sur des corps électrisés, autrement dit à une pression électrostatique. Dans le cas des machines à transporteurs conducteurs, des forces agissent partout, sur les électrodes fixes et mobiles.

Elles dérivent de la pression électrostatique $\frac{2\pi\sigma^2}{\epsilon}$ ou $\frac{\epsilon E^2}{8\pi}$ (σ : densité électrique superficielle). Mais les seules forces utiles sont celles qui présentent une composante parallèle au sens de déplacement des transporteurs : on voit immédiatement que, de toute la surface des électrodes, seule la « tranche » est soumise à de telles forces utiles. Sur les faces latérales, les forces n'ont qu'un rôle parasite.

La tranche des secteurs apparaît donc bien comme une surface active. Pour une puissance donnée, réduire l'épaisseur, donc la surface de la tranche, revient à exiger une pression $\frac{\epsilon E^2}{8\pi}$ plus grande,

donc finalement un champ électrique E , au voisinage, plus considérable. Si ce champ avait déjà la valeur limite permise par les possibilités du diélectrique environnant, une réduction de l'épaisseur des électrodes revient à une diminution de la puissance possible à mettre en jeu.

Voici maintenant une autre considération, liée d'ailleurs à la première, mais dont la forme explicite bien certains côtés du problème.

b) Énergie emmagasinée dans le diélectrique. — Tout se passe comme si l'énergie interne de la machine était accumulée dans le diélectrique actif avec une densité $\frac{\epsilon E^2}{8\pi}$. Tout déplacement relatif des électrodes, produisant une variation dv du volume actif, conduit à une variation d'énergie $\frac{E\epsilon^2}{8\pi}dv$, sans préjuger de son sens puisque le phénomène est réversible.

Ces deux considérations identiques montrent bien l'importance égale des trois dimensions du système énergétique d'une machine électrostatique.

Outre l'utilité d'accroître, par un diélectrique convenable, le terme $\frac{\epsilon E^2}{8\pi}$, on voit la nécessité de répartir cette densité d'énergie uniformément dans tout le volume disponible, autour des électrodes métalliques fixes et mobiles. Pour que la solution devînt parfaite, il faudrait que ce champ conservât partout une valeur uniforme. Cela est moins facile à réaliser aux environs de la tranche des électrodes qu'entre ces électrodes elles-mêmes, loin des bords, et alors que le condensateur formé se ramène à une figure simple — généralement un condensateur plan —. Il y aurait lieu, par conséquent, de rechercher quelle est la forme de la surface de la tranche considérée, conduisant à un champ homogène (Voir chap. III, § 3).

Il est intéressant de constater que le problème énergétique relatif aux machines électrostatiques a toujours été mal posé, malgré son évidente simplicité. On a sans cesse conservé, dans leur construction, les traditionnelles feuilles métalliques minces, collées sur un disque isolant et dont la figure, depuis, est passée à la postérité. La tranche des feuilles métalliques constituait un point faible suffisant, à lui seul, par les fuites et décharges prématurées auxquelles il conduisait, à limiter les possibilités de l'isolant gazeux environnant.

Cette anomalie n'a jamais été entrevue. Elle se retrouve sur toutes les machines à influence à transporteurs conducteurs, et, aux environs de 1930, H. Chaumat ne la soupçonna encore point.

Voici expliqués les échecs rencontrés dans les tentatives faites en vue d'améliorer la machine de Toepler. Répétons pour terminer que

Wommelsdorf, dont les idées étaient erronées, poussa l'illogisme jusqu'à revêtir volontairement et artificiellement les transporteurs d'arêtes vives et de pointes [3] sous prétexte de capter les charges électriques et de les fixer sur le diélectrique solide qui les supportait...

5. Nécessité d'un fonctionnement électriquement réversible.

Les machines électrostatiques, trop tôt apparues et trop rapidement abandonnées, ont rarement bénéficié, au cours de leur évolution, des principes généraux et essentiels qui ont permis le développement correct d'autres appareils destinés à effectuer des transformations énergétiques.

En particulier, la question primordiale de la réversibilité du fonctionnement a presque toujours été délaissée ; cependant, elle était connue non seulement du point de vue thermique, mais encore d'une façon très générale.

Maxwell⁽³⁾, bien qu'il ne l'appelât point de ce nom, en donnait déjà une idée précise, à propos des machines électrostatiques : « ... il se produit des étincelles toutes les fois que le véhicule⁽⁴⁾ vient en contact avec un conducteur qui est à un potentiel différent du sien. Or, nous avons montré que, toutes les fois qu'il en est ainsi, il y a perte d'énergie ; ... ». Il proposait même une solution pratique afin de montrer comment, « pour éviter les pertes de travail, on pourrait appliquer aux machines électriques ce que l'on appelle un régénérateur dans les machines thermiques ».

Mais ses idées intéressantes tombèrent dans l'oubli ; jamais, par la suite, la notion de réversibilité ne fut considérée lors de l'étude des machines électrostatiques.

Dans toute transformation énergétique, la réversibilité est une condition de bon fonctionnement et de pertes réduites au minimum. Dans une machine importante, elle devient une nécessité absolue, en dehors même de la question du rendement ; les étincelles de commutation détruiraient rapidement le collecteur d'une machine électrostatique puissante dans le cas où cette commutation serait mal

(3) MAXWELL. *Traité d'électricité et de magnétisme*, traduit de l'anglais sur la deuxième édition par G. Séligmann-Lui, Gauthier-Villars, édit., 1885, t. I, p. 379, § 213.

(4) Il s'agit du transporteur.

étudiée et donnerait lieu, au moment des contacts, à des irréversibilités se manifestant sous forme d'étincelles.

D'autre part, une réversibilité parfaite permet de fonctionner indifféremment en générateur ou en moteur.

On peut donc prévoir, dans l'étude rationnelle d'une machine électrostatique, un chapitre consacré à la recherche d'une bonne réversibilité, nécessitant l'analyse détaillée du cycle de fonctionnement et de la commutation.

6. — Conclusions.

Nous pouvons résumer ce qui vient d'être dit en quelques lignes qui donneront une première idée de la voie logique dans laquelle nous nous engagerons ultérieurement.

Une machine électrostatique de puissance spécifique notable et à bon rendement fonctionnera nécessairement dans un gaz comprimé, dont il conviendra de déterminer la nature et les conditions d'emploi (faute de pouvoir employer le vide pour diélectrique).

Afin de pouvoir utiliser rationnellement et complètement les possibilités ainsi offertes, la machine devra comporter des transporteurs conducteurs, rappelant le système de Toepler.

Mais ces transporteurs auront une épaisseur judicieusement dimensionnée, au même titre que la surface latérale qu'ils présenteront. Le champ électrique sera rendu aussi uniforme que possible dans tout le volume du diélectrique actif prenant part à la transformation énergétique, afin que partout ce diélectrique soit utilisé au maximum. A cet effet, la tranche des électrodes aura un profil convenable.

Enfin, la commutation sera étudiée et réglée pour prévenir toute irréversibilité au cours du fonctionnement.

*
* *

C'est à partir de ces considérations que nous avons établi le type de machine dont il va être question et qui nous a semblé répondre logiquement et simplement aux desiderata exposés.

Après une étude d'ensemble, destinée à présenter cette machine et à donner une idée sommaire de sa constitution et de son fonctionnement, nous ferons une première étude théorique, suffisante pour permettre l'établissement d'un avant-projet et pour montrer la nature

des problèmes qui se posent. Nous déterminerons plus particulièrement les conditions optima du fonctionnement. Les principes du calcul n'avaient jamais été réellement posés et il convenait de le faire.

Enfin, dans une deuxième partie, essentiellement pratique, nous décrirons nos deux premiers prototypes réalisés et nous donnerons quelques résultats intéressants obtenus. Ce sont bien souvent, d'ailleurs, les essais effectués qui nous ont porté à compléter l'étude théorique rassemblée dans les chapitres suivants.

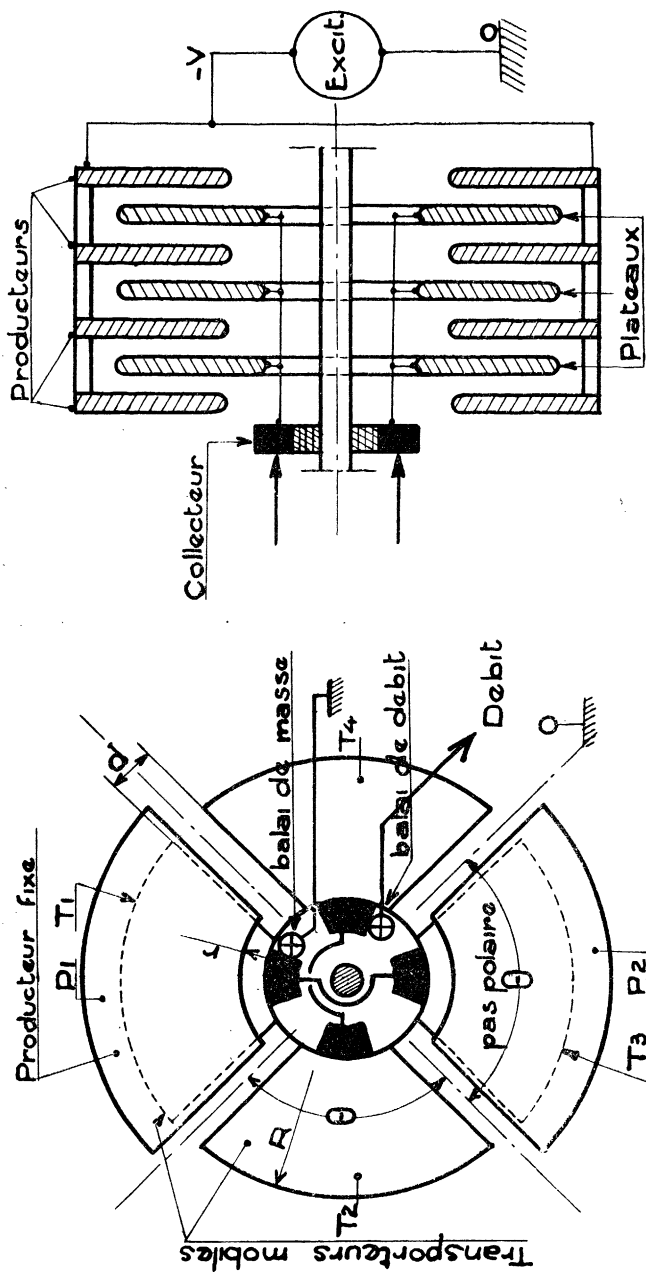
CHAPITRE II

ÉTUDE D'ENSEMBLE

1. — Présentation de la machine et fonctionnement simplifié.

Toute machine électrostatique à influence se ramène à un système de condensateurs dont la capacité est susceptible de se modifier, et cette modification entraîne la mise en jeu d'une énergie. Pour répéter indéfiniment le cycle de ces variations, il est naturel de prévoir un système rotatif (voir fig. 1). Le condensateur variable sera constitué par une série de secteurs métalliques, en nombre pair, formant deux familles isolées l'une de l'autre et composant, dans leur ensemble, un plateau circulaire qui tournera entre deux rangées de secteurs fixes analogues mais disposés en nombre moitié dans chaque rangée. L'une des familles comprendra les secteurs pairs, l'autre les secteurs impairs, et tous les secteurs d'une même famille joueront le même rôle. Suivant la position du « rotor » ainsi constitué par rapport au « stator », la capacité entre un secteur mobile (transporteur) et les secteurs fixes (producteurs) entre lesquels il se trouvera, pourra varier et sera fonction de l'angle fixant la position relative des deux organes. Alors que les secteurs mobiles se succéderont sans discontinuités autres que celles nécessitées par l'isolement des deux familles de transporteurs alternés, les secteurs fixes laisseront entre eux un intervalle correspondant à l'angle occupé par un secteur quelconque, grâce auquel la variation de capacité pourra atteindre son maximum. Un plateau du rotor sera entouré par deux rangs de secteurs fixes, de manière à utiliser les deux faces de chaque secteur mobile.

Les secteurs fixes, jouant le rôle de producteurs, seront tous portés à un certain potentiel que nous supposerons négatif par rapport à la masse, et de valeur absolue V_0 . Une machine auxiliaire, faisant



4 transporteurs chacun

Schema d'une machine à $\left\{ \begin{array}{l} 4 \text{ pôles } (T_1, T_3) (T_2, T_4) \\ 3 \text{ plateaux} \end{array} \right.$

FIG:1

fonction d'excitatrice, assurera l'établissement de ce potentiel, donc créera entre les armatures fixes et mobiles le champ électrique qui permettra de mettre en jeu l'énergie recherchée. Elle n'aura d'ailleurs aucune puissance à fournir et devra seulement compenser les pertes éventuelles par défaut d'isolement, tout à fait comme une excitatrice de machine à induction ne fournit que la puissance perdue par effet Joule dans l'enroulement inducteur.

Supposons le rotor dans une position telle qu'une famille de secteurs mobiles, composée par exemple des secteurs pairs, se trouve exactement dans l'intervalle laissé entre deux producteurs consécutifs. La capacité mutuelle est minimum et la famille de transporteurs envisagée est mise en relation avec la masse.

Le mouvement de rotation amène les transporteurs à entrer progressivement entre les producteurs portés au potentiel $-V_0$, leur capacité mutuelle augmente peu à peu, de même que la charge prise par le condensateur ainsi formé. Lorsqu'ils sont complètement entrés, la capacité mutuelle totale de l'ensemble est maximum, soit C_0 . La charge totale prise est $Q_0 = C_0 V_0$, positive.

La communication avec le sol est alors rompue et dans son mouvement de rotation, la famille de secteurs envisagée sort peu à peu des producteurs. Leur capacité mutuelle diminue mais la charge Q_0 restant constante, le potentiel v de la famille de transporteurs croît, sa valeur étant positive, avec les conventions fixées. Cette première période que nous appellerons période d'élévation du potentiel est énergétique. L'énergie interne de la machine soit $W = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_0^2}{c}$

(c = capacité mutuelle à un instant donné) croît : $dW = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_0^2}{c^2} dc$,

en valeur absolue. Parallèlement, le potentiel s'élève : $dv = \frac{Q_0}{c^2} dc$.

Lorsque le potentiel v atteint une certaine valeur U qui est celle sous laquelle la machine doit fonctionner, la famille de transporteurs est mise en relation avec le circuit extérieur de débit, aux bornes duquel règne précisément la tension ci-dessus ⁽⁵⁾. Le rapport entre les valeurs absolues de la tension U d'utilisation d'une part, et de la tension d'excitation V_0 d'autre part, est un coefficient caractéristique

(5) En l'absence d'autres génératrices, le circuit est supposé assez capacitif pour que cette tension demeure constante entre deux périodes de débit.

de la machine, fonction de l'instant d'établissement du contact de débit. Nous l'appellerons facteur de multiplication et nous poserons

$$k = \frac{U}{V_0}.$$

Ce facteur est d'une importance capitale et il interviendra très souvent par la suite. Nous le qualifierons encore de statique, pour le différencier ultérieurement.

Lorsque le contact de débit est établi, la capacité mutuelle des secteurs fixes et mobiles continuant à décroître, la charge Q_0 doit s'écouler à l'extérieur sous la tension constante $U = kV_0$, et de manière parfaitement réversible. Cette deuxième période constitue la période de débit et c'est à ce moment que la puissance mécanique à fournir est maximum : $\frac{dW}{dt} = \frac{1}{2}(U + V_0)^2 \frac{dc}{dt}$. La charge Q_0 , en s'écoulant sous la tension constante U , fournit le travail $Q_0 U = kC_0 V_0^2$.

Lorsque la famille des transporteurs est totalement sortie des producteurs, la capacité mutuelle est devenue petite et il ne reste sur les transporteurs qu'une charge réduite.

Toute la charge possible a été utilisée, et la liaison au circuit extérieur est rompue ; après cette rupture du contact de débit, le contact masse se produit à nouveau. La famille envisagée est alors prête à recommencer un cycle identique, un secteur mobile donné s'appêtant à pénétrer entre les deux secteurs fixes suivant ceux qu'il vient de quitter.

Pendant ce temps, l'autre famille de transporteurs — impaire — effectue un cycle semblable mais décalé par rapport à la famille paire de l'angle formé par un secteur, c'est-à-dire, dans le temps d'une demi-période ou, dans l'espace, d'un pas polaire (voir plus loin).

Nous voyons que tous les secteurs d'une même famille sont appelés à jouer simultanément le même rôle, et se trouvent, à un instant quelconque au même potentiel. Ils pourront en conséquence être réunis électriquement entre eux, ce qui permettra la construction de transporteurs solidaires mécaniquement.

Quant au jeu des contacts à établir, c'est-à-dire à la commutation, elle se fera à l'aide d'un collecteur, tournant avec le rotor, et portant autant de touches qu'il existe dans une rangée, ou plateau, de secteurs transporteurs, autrement dit que la machine comporte de « pôles » suivant la définition donnée un peu plus bas. Sur ce col-

lecteur frotteront deux séries de balais convenablement calés, les uns réalisant la liaison au sol, les autres au circuit extérieur de débit. De leur calage dépendra la réversibilité du système.

Nombre de secteurs mobiles, ou « pôles ».

Nombre de plateaux mobiles. Balais.

Par une analogie d'ailleurs lointaine avec les machines à induction, nous conviendrons d'appeler nombre de pôles d'une machine électrostatique le nombre de secteurs mobiles répartis dans le cercle et formant une rangée ou plateau. La machine la plus élémentaire comportera deux secteurs demi-circulaires. Nous la dirons bipolaire. Une machine multipolaire sera à $2n$ pôles lorsqu'elle comportera $2n$ secteurs mobiles répartis dans un plateau (voir figure 1). Au point de vue vitesse et puissance, en effet, ce nombre de secteurs joue un rôle analogue au nombre de pôles d'une machine magnétique.

Il y aurait intérêt, afin d'augmenter la puissance et comme nous le verrons, à accroître le nombre de pôles d'une machine. Cependant, la distance d'isolement entre deux transporteurs successifs est imposée et doit conserver une valeur supérieure à un minimum. Cet intervalle d'isolement constitue une perte dans l'utilisation de l'espace disponible. Et la perte relative est d'autant plus grande que le nombre de pôles est élevé; elle devient rapidement intolérable. De plus, la construction comporte des difficultés croissantes.

Soit R le rayon extérieur du rotor, r le rayon intérieur des producteurs, d la distance d'isolement entre deux transporteurs successifs et $2n$ le nombre de pôles d'une machine. La surface perdue par isolement entre transporteurs, soit $2nd(R - r)$ conduit à un coefficient d'utilisation de l'espace disponible $1 - \frac{\pi r^2 + 2nd(R - r)}{\pi R^2}$. Le

rayon interne r est imposé par des raisons d'isolement et de construction. On voit, à cet égard, l'influence néfaste d'un nombre de pôles élevé. D'autre part, les capacités parasites dont nous parlerons ultérieurement, et en particulier la capacité mutuelle entre les deux familles de transporteurs, qui diminue la puissance, croissent rapidement lorsque le nombre de pôles augmente. Enfin, il pourrait sembler intéressant d'augmenter le rayon extérieur R du rotor afin d'accroître le coefficient d'utilisation. Mais, là encore, des raisons de pertes par frottement gazeux — ainsi que la force centrifuge — interdisent l'emploi de rayons trop grands (cf. chap. VI, § 5).

En conséquence, le nombre de pôles d'une machine sera forcément

très limité et sera déterminé par un compromis judicieux entre les considérations contradictoires ci-dessus.

Si une machine comporte $2n$ pôles, chacun occupe, y compris ses deux demi-intervalles d'isolement, un angle $\theta = \frac{2\pi}{2n}$ qui représente le pas polaire. Si N est la vitesse de rotation en tours par seconde, un transporteur accomplit un cycle de fonctionnement complet dans un angle 2θ , c'est-à-dire dans le temps $\frac{1}{Nn}$, figurant ainsi la période du cycle. Cette machine comporte d'autre part n secteurs fixes producteurs par rangée, mais le plateau du rotor tourne entre deux rangées de producteurs.

On pourra évidemment disposer sur l'arbre de la machine, les uns à côté des autres, autant de plateaux transporteurs que l'on voudra et qui travailleront en parallèle. La puissance maximum donnée par un seul plateau étant connue, on mettra autant de plateaux qu'il faudra pour atteindre la puissance totale désirée (Voir fig. 1). De cette manière, les deux faces des secteurs producteurs seront elles aussi utilisées — sauf en ce qui concerne les secteurs des deux rangées extrêmes dont la face extérieure sera nécessairement perdue.

Tous les secteurs, fixes et mobiles, auront la même épaisseur, calculée comme nous le dirons (cf. chap. III, § 2).

Indépendamment de la question de puissance, il y aura intérêt à multiplier le nombre de plateaux d'une machine car nous verrons que certaines capacités parasites augmentent moins vite que la capacité utile, leur importance relative diminuant en conséquence (cf. chap. IV, § 6).

Une machine à $2n$ pôles et p plateaux comporte donc $2pn$ secteurs transporteurs répartis dans deux familles alternées, et $(p+1)$ rangées de producteurs, possédant chacune n secteurs, soit au total $n(p+1)$ secteurs fixes.

Le collecteur doit comporter, en principe, autant de touches que la machine possède de pôles, ces touches étant reliées alternativement à l'une et à l'autre famille de transporteurs. Si tous les transporteurs d'une même famille sont réunis électriquement entre eux, deux balais seulement sont nécessaires : l'un assurant le contact masse, l'autre le contact débit. En fait, le temps de contact de chacun d'eux devant être différent, il faudra soit placer deux collecteurs distincts — un pour la masse, l'autre pour le débit — et munis de touches en conséquence, soit multiplier le nombre des balais afin d'obtenir

entre eux des effets cumulatifs dans le temps (cf. chap. v, n° 111).

Au cas où les transporteurs d'une même famille ne seraient pas tous interconnectés, il conviendrait de disposer autant de balais qu'il serait nécessaire pour assurer la commutation simultanée de tous ces transporteurs, c'est-à-dire, au maximum, autant de groupes de balais — masse et débit — que de pôles.

EN RÉSUMÉ : une machine ordinaire comprend un certain nombre de plateaux formant le rotor, tous calés sur l'arbre commun, et chaque plateau étant composé par l'ensemble des secteurs mobiles formant tour à tour, dans leur ordre de succession, deux familles distinctes jouant des rôles identiques mais décalés. Tous les secteurs mobiles d'une même famille peuvent être réunis électriquement et mécaniquement entre eux, leur réunion électrique étant souhaitable afin de simplifier le système de balais. Les deux familles sont au contraire soigneusement isolées l'une de l'autre. Tous les plateaux travaillent en parallèle et cumulent leurs effets. Ils tournent entre les secteurs producteurs fixes. Aux extrémités du rotor, deux collecteurs qui peuvent être rassemblés en un seul assurent la commutation, grâce à deux séries de balais convenablement calés.

Le potentiel d'excitation est fourni par une excitatrice auxiliaire, montée par exemple en bout d'arbre, et d'une puissance très faible par rapport à celle de la machine principale.

Enfin, le tout est renfermé dans un réservoir à gaz comprimé destiné à contenir le diélectrique gazeux sous pression. Le moteur d'entraînement — dans le cas d'une génératrice — peut être renfermé lui aussi dans le réservoir, au moins tant que la puissance du groupe ainsi formé est réduite. En cas de puissance notable, ou encore si la nature du moteur ne se prête pas à une telle combinaison, il faudra prévoir une presse-étoupe pour réaliser une sortie hermétique de l'arbre, le moteur étant laissé à l'extérieur.

D'autre part, des traversées isolantes H. T. convenables permettent la jonction de la machine avec le circuit extérieur, ainsi que le réglage de son excitation.

2. — Diélectrique.

Comme nous l'avons dit, la question du diélectrique est d'une importance capitale, et nous avons montré qu'il convenait d'utiliser à cet effet un gaz sous pression.

En aucune façon, le pouvoir inducteur spécifique ne pourra différer pratiquement de l'unité, et nous rechercherons seulement à accroître la rigidité diélectrique du gaz employé afin d'augmenter le champ électrique utilisable. La puissance mise en jeu est, répétons-le, proportionnelle au carré de ce champ.

Qualités requises pour le gaz comprimé. — Une importante liste de gaz divers, susceptibles d'être utilisés, se présente, parmi laquelle il convient de faire un choix judicieux.

Deux qualités essentielles à exiger permettent ce choix :

a) La rigidité diélectrique du gaz, pour des pressions raisonnables, doit être la plus élevée possible et doit croître normalement avec la pression, sans saturation prématurée.

b) Il ne doit pas donner lieu à des pertes par frottement trop élevées, c'est-à-dire que sa densité doit être aussi faible que possible (cf. chap, VI, § 5).

Ces deux qualités sont d'ailleurs contradictoires. Pour obtenir une grande rigidité, il suffirait d'élever la pression aussi haut que les possibilités de construction du réservoir le permettraient. Mais en augmentant la pression, on augmente aussi la densité du gaz, donc les pertes de la machine. Il faut, on le conçoit déjà, trouver un compromis quant au gaz choisi et à ses conditions d'utilisation. Enfin, on pourrait exiger de nombreuses qualités secondaires : absence d'actions chimiques et caractère non oxydant vis-à-vis des contacts au collecteur, où les étincelles ne seront pas complètement évitées ; stabilité suffisante et décomposition impossible par les étincelles.

Accroissement de la rigidité. — Une première approximation de la loi de croissance de la rigidité des gaz en fonction de leur pression est donnée par la loi de Paschen, qui admet la proportionnalité entre ces deux facteurs. Cette approximation est assez grossière. Pour des pressions un peu élevées (au-dessus de 15 kg/cm^2 en général) ou pour des gaz ne suivant pas la loi de Mariotte-Gay-Lussac, elle devient erronée. De très nombreuses études ont été faites à ce sujet mais aucune n'apporte la solution certaine du problème qui nous intéresse. Peu de questions, en effet, comportent autant de causes d'indétermination que celle-là. Les essais, en général, ont été effectués pour des pressions ou des champs relativement faibles, et les résultats ne sont pas extrapolables. Ou bien

ils ont porté sur des champs élevés mais obtenus entre électrodes très rapprochées ; et il est prouvé que les résultats dépendent de l'écartement des électrodes.

On ne possède aucun document certain sur l'influence de la nature des électrodes, et ce facteur semble cependant important. De plus, le mécanisme de l'arrachage des électrons d'un métal sous l'influence de champs électriques très élevés, tels que ceux qui peuvent être créés dans les gaz comprimés, est encore mal connu.

Les seuls faits établis laissent beaucoup d'indéterminations sur le problème capital de la machine électrostatique et il se peut que des études minutieuses, dans cet ordre d'idée, arrivent à transformer complètement les possibilités de ces appareils.

Actuellement, dans un avant-projet, il faudra compter sur des valeurs moyennes et se réserver une marge de sécurité suffisante.

Un point essentiel, dont nous parlerons dans la partie expérimentale mais qui doit être déjà noté, réside dans l'état de la surface des électrodes. Les expériences sont en parfait accord pour prescrire un poli poussé à l'extrême, permettant des champs plus considérables.

Et pour montrer l'incertitude à laquelle on se heurte, dans ce domaine, disons tout de suite que nous avons constamment observé, dans nos machines, un phénomène de « formation » des électrodes, le champ admissible augmentant notablement après un certain temps de fonctionnement durant lequel des décharges se sont produites⁽⁶⁾.

Choix du gaz. — On peut définir, pour caractériser un gaz, un coefficient tenant compte quantitativement des deux qualités essentielles signalées, et donnant une idée de son aptitude à être utilisé comme diélectrique.

D'une part, un gaz convient d'autant mieux que, pour une pression donnée, il tolère une plus grande densité d'énergie $\frac{\epsilon E^2}{8\pi}$. Ce terme caractérise la puissance possible à mettre en jeu par la machine.

D'autre part, nous verrons que les pertes par frottement gazeux — qui sont les seules pertes affectant sérieusement la machine — sont à peu près proportionnelles à la densité d du gaz dans les conditions de son emploi (Chap. VI, § 5).

⁽⁶⁾ Un phénomène identique a été signalé par Gangster [16]. Voir deuxième partie (Résultats).

Par conséquent, le rendement de la machine est proportionnel au quotient $\frac{\epsilon E^2}{d}$, ou pratiquement à $\frac{E^2}{d}$, et le facteur ainsi défini caractérise les qualités du gaz. Il n'est fonction, par ailleurs, que de sa pression p . Comme la densité en fonction de la pression est bien connue, il suffirait de posséder les courbes $E=f(p)$, pour déterminer les meilleures conditions d'utilisation ou pour faire un choix.

L'air comprimé, outre sa simplicité d'emploi, semble présenter de bonnes qualités, largement comparables à celles de gaz moins courants⁽¹⁾.

L'hydrogène, cependant, peut être à retenir car sa densité exceptionnellement faible compense et au delà sa rigidité inférieure de moitié à celle de l'air. Il devrait, par contre, être employé sous de fortes pressions, ce qui alourdirait notablement le réservoir appelé à le contenir.

Il se pourrait que des gaz ou mélanges de gaz présentent un facteur $\frac{E^2}{d}$ particulièrement intéressant, mais cette éventualité est peu probable. Par exemple, il existe une catégorie de fluides dont les plus représentatifs sont les fréons, très en faveur dans l'industrie frigorifique, et qui jouissent, en plus de leurs particularités thermodynamiques, de qualités diélectriques intéressantes ; leur champ disruptif est en effet très élevé. Mais leur densité est grande et ces gaz, peu stables, sont décomposés par les étincelles. Ainsi le « fréon 12 » (dichlorodifluorométhane CCl_2F_2) peut supporter des champs de l'ordre de 350 KV par centimètre à 6 atmosphères, mais sa densité à la pression ordinaire est déjà supérieure à 4. D'ailleurs, il se liquéfie au-dessus de 6 atmosphères, donne des dépôts carbonneux sous l'effet des étincelles et présente, dans son étendue d'application, un facteur $\frac{E^2}{d}$ inférieur à celui de l'air. Son seul avantage serait l'emploi possible d'un réservoir d'épaisseur réduite.

Après beaucoup d'essais (adjonction d'un gaz inerte, utilisation d'hydrocarbures à substitutions fluorées, plus volatils) on a aussi proposé⁽⁸⁾, au lieu des fréons, des composés fluorés ou oxyfluorés du soufre, en particulier l'hexafluorure SF_6 . Mais ces composés sont

(1) Il est parfois nécessaire, pourtant, de l'appauvrir en oxygène afin de limiter les dangers d'oxydation.

(8) Compagnie française pour l'exploitation des procédés Thomson-Houston. Brevet 857 480, année 1940.

appelés à assurer des isollements statiques et ne donnent pas lieu à des facteurs $\frac{E^2}{d}$ intéressants.

Finalement, c'est à l'air comprimé que nous avons eu recours le plus souvent, après des expériences tentées dans l'azote, le gaz carbonique, l'hydrogène et l'ammoniac.

L'air présente des qualités honorables. Dans nos avant-projets, nous avons tablé, avec l'air comprimé à 30 kilogrammes par centimètre carré, sur un champ utile de 450 KV par centimètre. Mais certains auteurs [16] prétendent avoir obtenu des champs de 720 KV par centimètre pour cette même pression, et de 930 KV/cm pour 40 kilogrammes par centimètre carré.

3. — Puissance. Pertes. Rendement.

En comptant sur des champs de l'ordre de 500 KV/cm, la densité d'énergie $\frac{E^2}{8\pi}$ pourrait atteindre, de cette manière, une valeur 100 à 200 fois plus considérable qu'à dans l'air à la pression atmosphérique, dont la rigidité moyenne est seulement de 30 KV/cm⁽⁹⁾. Cette densité d'énergie aurait un ordre de grandeur de 10^5 ergs par cm³, soit 10^{-2} joule par cm³, valeur intéressante.

Au point de vue des pertes, les machines électrostatiques semblent favorisées. Contrairement aux machines à induction, elles ne sont le siège d'aucune perte par effet Joule, courants de Foucault ou hystérésis. Les pertes par irréversibilité électrique doivent être inexistantes et la puissance nécessaire à l'excitation est négligeable.

Les seules pertes sérieuses affectant la machine sont donc les pertes par frottements. Les frottements solides (paliers, collecteurs, presse-étoupe éventuel) n'excèdent pas notablement les pertes équivalentes d'une machine à induction.

En conséquence, seules, les pertes d'origine gazeuse (frottement des secteurs sur le gaz comprimé, brassage de celui-ci, tourbillons, sillages) sont importantes. Contrairement au vide, inutilisable malheureusement, les gaz comprimés donnent lieu, en fait, à des pertes notables, beaucoup plus considérables qu'on ne se l'imagine à priori. Le souci d'un rendement acceptable limite par conséquent les possibilités de puissance d'une machine, la pression du gaz et

(9) Pour un écartement entre électrodes voisin d'un centimètre.

la vitesse de rotation devant être, comme nous le dirons, également limitée pour cette raison (Chap. VI, § 5).

Il y aurait lieu, enfin, d'inclure dans les pertes l'énergie dépensée pour comprimer le gaz diélectrique. Mais cette perte est négligeable, l'étanchéité du réservoir pouvant être assurée d'une manière parfaite.

4. — Capacités parasites.

Seule la capacité mutuelle entre producteurs et transporteurs joue dans la machine un rôle utile. Cependant, de nombreuses capacités parasites apparaissent, qui viendront réduire sensiblement la puissance prévue. Des précautions doivent être prises, en conséquence, afin de diminuer au minimum ces capacités parasites par une construction convenable. D'autre part, il est utile de prévoir leurs effets afin de parer aux inconvénients qui pourraient en découler, plus particulièrement dans la commutation. Cette commutation n'est nullement affectée si l'on a soin de caler convenablement les balais.

Les capacités parasites interviendront souvent par la suite et il convenait de les mentionner dès maintenant (cf. en particulier le Chap. IV).

CHAPITRE III

ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE SOMMAIRE

1. — Puissance de la machine.

Considérons une machine possédant $2n$ pôles et p plateaux. Soit c_0 la capacité utile entre un secteur transporteur mobile et les deux secteurs producteurs fixes entre lesquels il est supposé complètement entré. Cette valeur est, à ce moment, maximum. Soit V_0 le potentiel d'excitation, en valeur absolue, et U la tension de débit, établie aux bornes du circuit extérieur. On a déjà posé $U = kV_0$, k étant le facteur de multiplication de la machine, fonction du calage du balai de débit.

La charge prise par un transporteur, soit c_0V_0 , en s'écoulant réversiblement sous la tension U , fournit l'énergie $c_0V_0U = kc_0V_0^2$. La machine comporte $2n$ pôles, chacun actif n fois par tour, et p plateaux travaillant en parallèle. Si, d'autre part, la vitesse de rotation est de N tours par seconde, la puissance développée a pour valeur $P = 2pn^2Nkc_0V_0^2$. Le terme pnc_0 représente la capacité utile totale et maximum, soit C_0 , présentée par une famille de transporteurs complètement entrée dans les producteurs. Donc,

$$P = 2kC_0V_0^2Nn \quad \text{en U. E. S. C. G. S.}$$

En exprimant C_0 en cm, V_0 en kilovolts, la puissance, en watts, a pour expression

$$P = \frac{10^{-5}}{4,5} kC_0V_0^2Nn.$$

D'autre part, soit s_0 l'aire d'une seule face d'un transporteur et e l'écartement inter-électrodes laissé entre ce transporteur et le produc-

teur voisin (Voir le § suivant et la fig. 2). La capacité $c_0 = 2 \frac{s_0}{4\pi e}$, et la puissance prend pour expression, en U. E. S. C. G. S. :

$$P = \frac{4s_0 pn}{4\pi e} Nn k V_0^2.$$

Le terme $4s_0 pn$ représente la surface totale S_0 que l'on peut mettre en jeu dans la machine.

Un point caractéristique essentiel de cette machine est la valeur du champ maximum admissible dans le diélectrique gazeux utilisé, soit E_m . Pratiquement, il convient de travailler avec un champ E_0 inférieur, de manière à s'assurer un coefficient de sécurité $\sigma = \frac{E_m}{E_0}$.

La différence de potentiel maximum entre électrodes fixes et mobiles étant $V_0 + U = V_0(k+1)$, l'écartement e doit être, en supposant résolu le problème de la répartition uniforme du champ :

$$e = \frac{V_0}{E_0}(k+1) = \frac{U}{E_0} \cdot \frac{k+1}{k},$$

e est en cm si V_0 (ou U) est en KV et E_0 en KV/cm.

D'où la puissance : $P = \frac{s_0 pn}{\pi} \cdot Nn \cdot \frac{k}{k+1} V_0 E_0$. Or $V_0 = \frac{e E_0}{k+1}$;

donc $P = \frac{s_0 p n e}{\pi} \cdot Nn \cdot \frac{k}{(k+1)^2} \cdot E_0^2$. Le terme $2s_0 p n e$ représente le volume total de diélectrique utile contenu dans la machine, soit V_d , prenant part à la transformation énergétique, et soumis au champ E_0 .

Donc, la puissance devient, en U. E. S. C. G. S. :

$$P = \frac{1}{2\pi} \cdot Nn \frac{k}{(k+1)^2} E_0^2 V_d.$$

L'expression $\left(\frac{1}{2\pi} \cdot Nn \cdot \frac{k}{(k+1)^2} E_0^2 \right)$ représente la puissance spécifique de la machine, rapportée à l'unité de volume de diélectrique actif. Nous verrons ultérieurement (§ 4) quelle est la part de diélectrique actif dans le volume total du système énergétique.

On note l'intérêt d'augmenter le nombre de pôles d'une machine, afin d'accroître sa puissance spécifique. Mais, nous l'avons dit, ce nombre de pôles est limité, par ailleurs, pour de nombreuses raisons.

Nous poserons, enfin

$$K = \frac{4k}{(k+1)^2}.$$

Ce facteur K , fonction du calage du balai de débit effectué en vue d'assurer un certain facteur de multiplication, se présentera souvent par la suite. Nous l'appellerons facteur de puissance de la machine. Il peut varier entre zéro et l'unité (Voir fig. 6).

Si E_m est exprimé en KV/cm, V_d en cm³, N en t/sec., la puissance, en watts, devient :

$$P = \frac{10^{-5}}{72\pi} \cdot N n K E_0^2 V_d.$$

Cette expression met bien en relief la notion de densité d'énergie et de puissance spécifique rapportée au volume de diélectrique actif.

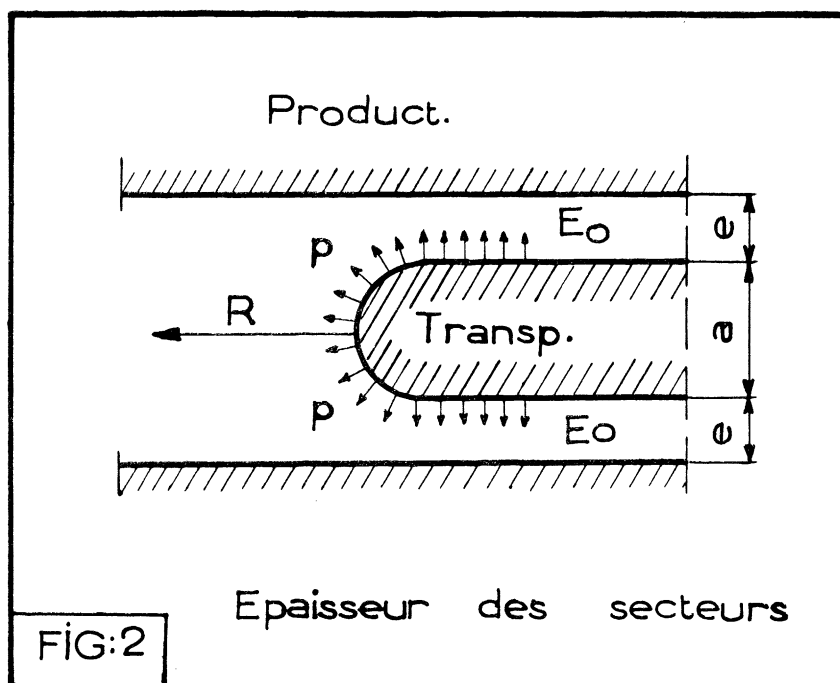
2. — Détermination de l'épaisseur optimum à donner aux électrodes.

Les seules forces utiles vont s'exercer sur la tranche des secteurs fixes et mobiles, ainsi que nous l'avons signalé. Et il convient de donner aux plaques métalliques constituant ces secteurs une épaisseur suffisante, afin que l'apparition de la puissance prévue ne nécessite pas, à cause de surfaces de tranches réduites, une pression électrostatique inadmissible.

Il ne faut pas, non plus, augmenter au delà d'une certaine valeur la surface en question. Si le champ à son voisinage devenait inférieur à la valeur E_0 normalement fixée, la puissance spécifique serait diminuée. Après avoir, dans le paragraphe précédent, calculé la puissance mise en jeu à partir de la notion de capacité, faisant intervenir la surface latérale passive des électrodes, nous allons maintenant déterminer la surface active optimum qu'elles doivent présenter et en déduire leur épaisseur. Il est naturel de faire cette détermination de telle sorte que la puissance calculée soit engendrée par un champ d'intensité constante et de valeur maximum, compte tenu du coefficient de sécurité, soit E_0 . On suppose que l'intensité constante du champ est réalisée, sans faire encore d'hypothèse sur le profil de la tranche active des secteurs (Voir le paragraphe suivant).

Soit e l'écartement inter-électrodes dont il a déjà été question. Soit a l'épaisseur des secteurs métalliques qu'il s'agit de déterminer

(Voir fig. 2). Exprimons le travail mis en jeu de deux manières différentes : d'abord par l'intermédiaire de la capacité, ensuite à



partir de la pression électrostatique. Il en résultera, de cette manière, une relation entre les trois dimensions de la machine.

a) Soit c la capacité producteurs-transporteurs à un instant quelconque. Pendant la période de débit, la d. d. p. entre les électrodes est constante, soit $V_0(k+1)$, et la capacité c contient l'énergie $\frac{1}{2} c V_0^2 (k+1)^2$. Une rotation élémentaire $d\psi$ du rotor fait varier la capacité de dc et il apparaît un travail $dW = \frac{1}{2} V_0^2 (k+1)^2 dc$. Si ds est la variation de surface utile correspondante, le travail élémentaire mis en jeu est

$$dW = \frac{1}{2} V_0^2 (k+1)^2 \frac{ds}{4\pi e} \quad (I)$$

b) Ce travail est, d'autre part, développé matériellement à partir de la pression électrostatique $p = \frac{E^2}{8\pi}$ s'exerçant sur la tranche,

E étant le champ supposé constant au voisinage de cette tranche ; nous ne lui assignons pas de valeur particulière pour l'instant.

Soit v le volume de diélectrique actif à un instant donné. Une rotation élémentaire $d\psi$ du rotor entraîne une variation dv de ce volume, donc l'apparition d'une énergie $dW = p \cdot dv = \frac{E^2}{8\pi} dv$.

Or, durant la rotation $d\psi$, la surface des électrodes en regard a varié de ds soit, sur une seule face, de $\frac{ds}{2}$. Le volume balayé a été $dv = \frac{1}{2} \cdot a \cdot ds$, a étant l'épaisseur à calculer.

Donc, l'énergie élémentaire mise en jeu a aussi pour seconde expression ;

$$dW = \frac{E^2}{8\pi} \cdot \frac{a}{2} \cdot ds. \quad (\text{II})$$

En égalant alors (I) et (II), on tire :

$$\frac{1}{2} V_0^2 (k+1)^2 \cdot \frac{ds}{4\pi e} = \frac{E^2}{8\pi} \cdot \frac{a}{2} \cdot ds,$$

soit

$$\frac{V_0^2 (k+1)^2}{e} = E^2 \cdot \frac{a}{2}.$$

Or $V_0 = \frac{eE_0}{k+1}$. D'où finalement :

$$E = E_0 \sqrt{\frac{a}{2e}}.$$

Mais le fait d'avoir admis, par homogénéité, un champ sur la tranche E de même valeur que le champ inter-électrodes E_0 , conduit au dimensionnement capital suivant ⁽¹⁰⁾ :

$$a = 2e.$$

Conclusion : Dans une machiné électrostatique rationnellement conçue, les secteurs producteurs et transporteurs auront une épaisseur double de l'intervalle e , inter-électrode, qui les sépare. e étant déterminé : $e = \frac{V_0}{E_0} (k+1)$, on en déduit immédiatement a .

⁽¹⁰⁾ Dans le cas où une seule face des secteurs serait active (producteurs extrêmes par exemple), il suffirait d'avoir $a = e$.

Cette relation essentielle est pleine d'intérêt ; elle montre les anomalies des anciennes machines dont les secteurs étaient des feuilles métalliques minces.

Et déjà, on conçoit qu'une machine à très haute tension gagnera à posséder des secteurs creux.

3. — Réalisation d'un champ uniforme. Tranche des secteurs.

Tous les calculs précédents, établis en vue d'obtenir une puissance spécifique aussi élevée que possible, supposent une répartition uniforme du champ électrique dans l'espace. Entre les électrodes fixes et mobiles, cette condition est bien réalisée. Mais au voisinage des bords, à proximité de la tranche des secteurs, le problème reste à étudier.

Il convient de rechercher la forme à donner à la méridienne de cette tranche, pour remplir la condition voulue. Une solution rigoureuse répond à ce problème qui peut sembler délicat à priori, et cette solution a déjà été déterminée à propos des écoulements de fluides autour d'obstacles⁽¹⁾. Les résultats de l'hydrodynamique sont immédiatement transposables, et applicables au problème électrostatique, par analogie des champs de vecteurs.

Nous ne tiendrons pas compte, au moins pour l'instant, de l'action, sur la tranche du secteur intéressé, du secteur immédiatement voisin. Cette influence, d'ailleurs, ne sera pas néfaste (voir les remarques).

Ceci étant, lorsqu'une électrode centrale, plane, mince et finie, au potentiel $+3V$, se trouve centrée entre deux électrodes indéfinies, au potentiel $-V$, la courbe équipotentielle $+V$ est définie paramétriquement par les deux équations :

$$\begin{cases} \frac{x_1}{z} = -\frac{2}{\pi} \operatorname{Log} \sqrt{2(1 - \cos 2\varphi)} \\ \frac{y_1}{z} = 1 - \frac{2\varphi}{\pi} \end{cases}$$

L'axe O_1x_1 est confondu avec la plaque centrale et l'origine O_1 se trouve sur le bord de cette plaque. Les axes sont rectangulaires. φ est le paramètre et $4z$ représente l'écartement entre les deux électrodes extérieures indéfinies (Voir fig. 3. plus loin partie supé-

⁽¹⁾ Cette solution nous a été aimablement suggérée par M. Danel, à qui nous adressons nos bien sincères remerciements.

rieure). Cette équipotentielle $+V$ présente la propriété remarquable que, tout au long de son contour, le champ est constant. Il suffit donc de la matérialiser par le secteur métallique dont nous recherchons le profil pour que, la répartition du champ restant identique, le problème soit ainsi résolu (fig. 3, partie inférieure).

Loin de la tranche, l'équipotentielle $+V$ passe évidemment à égale distance entre l'électrode centrale et les électrodes extérieures, de potentiels respectifs $+3V$ et $-V$. Le secteur métallique qui la matérialise répond donc bien à la condition d'épaisseur déterminée précédemment. On a en effet $a = 2x$. La première équation peut s'écrire :

$$\frac{x_1}{\alpha} = -\frac{2}{\pi} \text{Log} \sqrt{4 \sin^2 \varphi} = -\frac{2}{\pi} \text{Log } 2 - \frac{2}{\pi} \text{Log} \sin \varphi$$

ou

$$x_1 = -\frac{2}{\pi} \alpha \text{Log } 2 - \frac{2}{\pi} \alpha \text{Log} \sin \varphi.$$

Le terme $-\frac{2}{\pi} \alpha \text{Log } 2 = -0,437 \alpha$ est une constante. Pour $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $y_1 = 0$ et $x_1 = -0,437 \alpha$. Cette constante représente l'abscisse du sommet de l'électrode recherchée, par rapport à l'origine O_1 . En transportant l'origine des axes sur le sommet de cette électrode, soit en O (v. fig. 3), la première équation devient

$$\frac{x}{\alpha} = -\frac{2}{\pi} \text{Log} \sin \varphi,$$

soit, en utilisant les logarithmes décimaux : $\frac{x}{\alpha} = -1,47 \log \sin \varphi$.

Et comme le terme $\alpha = e$, écartement inter-électrodes, soit $\alpha = \frac{a}{2}$, les deux équations paramétriques définissant la méridienne cherchée sont (v. fig. 3, partie inférieure)

$2 \frac{x}{a} = -1,47 \log \sin \varphi$ $2 \frac{y}{a} = 1 - \frac{2\varphi}{\pi}$
--

étant bien entendu que, cette fois, l'origine des axes se trouve sur le sommet de la méridienne.

Lorsque x croît, y tend rapidement vers une limite. L'asymptote est $y = \frac{a}{2}$, et l'écart entre cette valeur et l'ordonnée réelle a pour expression $\frac{a}{2} \cdot \frac{2\varphi}{\pi}$. L'erreur relative commise en confondant à partir d'une certaine abscisse la courbe et l'asymptote, est donc $\varepsilon\% = \frac{2\varphi}{\pi} \cdot 100$. En se fixant une erreur inférieure à 1%, on trouve $\varphi = \frac{\pi}{200}$ radian et on en déduit $x = 2,65 \frac{a}{2}$. Donc, pratiquement, on peut admettre qu'au delà de $x = 1,5a$, la courbe théorique est confondue avec l'asymptote, et adopter cette valeur pour abscisse du point de raccordement. En ce point, le profil variable sera donc tangent aux bords parallèles de la plaque métallique constituant le secteur (v. fig. 4).

La dérivée $\frac{dy}{dx} = \frac{y'\varphi}{x'\varphi} = \operatorname{tg} \varphi$ montre que le paramètre φ représente l'inclinaison de la tangente à la courbe, par rapport à l'axe des abscisses. D'où une construction possible par point et tangente.

Pratiquement, on devra s'efforcer de se rapprocher du profil théorique. Une méridienne demi-circulaire ne conviendrait pas et il faudrait au moins l'étirer en forme d'ellipse (ou d'anse de panier) suivant l'axe longitudinal ⁽¹³⁾. D'ailleurs, en un point quelconque, le rayon de courbure est :

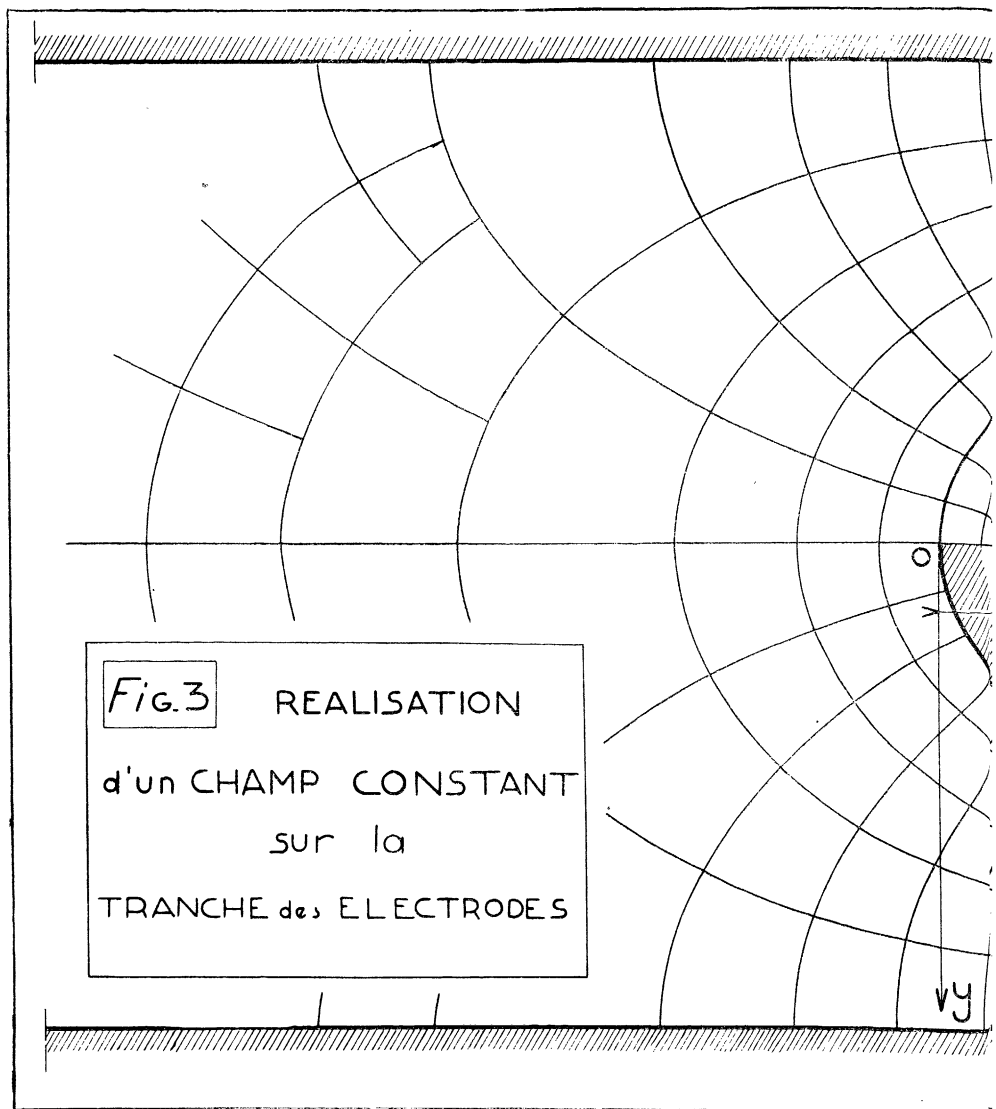
$$\rho = \frac{[x'^2 + y'^2]^{3/2}}{-y'x''} = \frac{a}{\pi} \cdot \frac{[\cotg^2 \varphi + 1]^{3/2}}{\sin^2 \varphi},$$

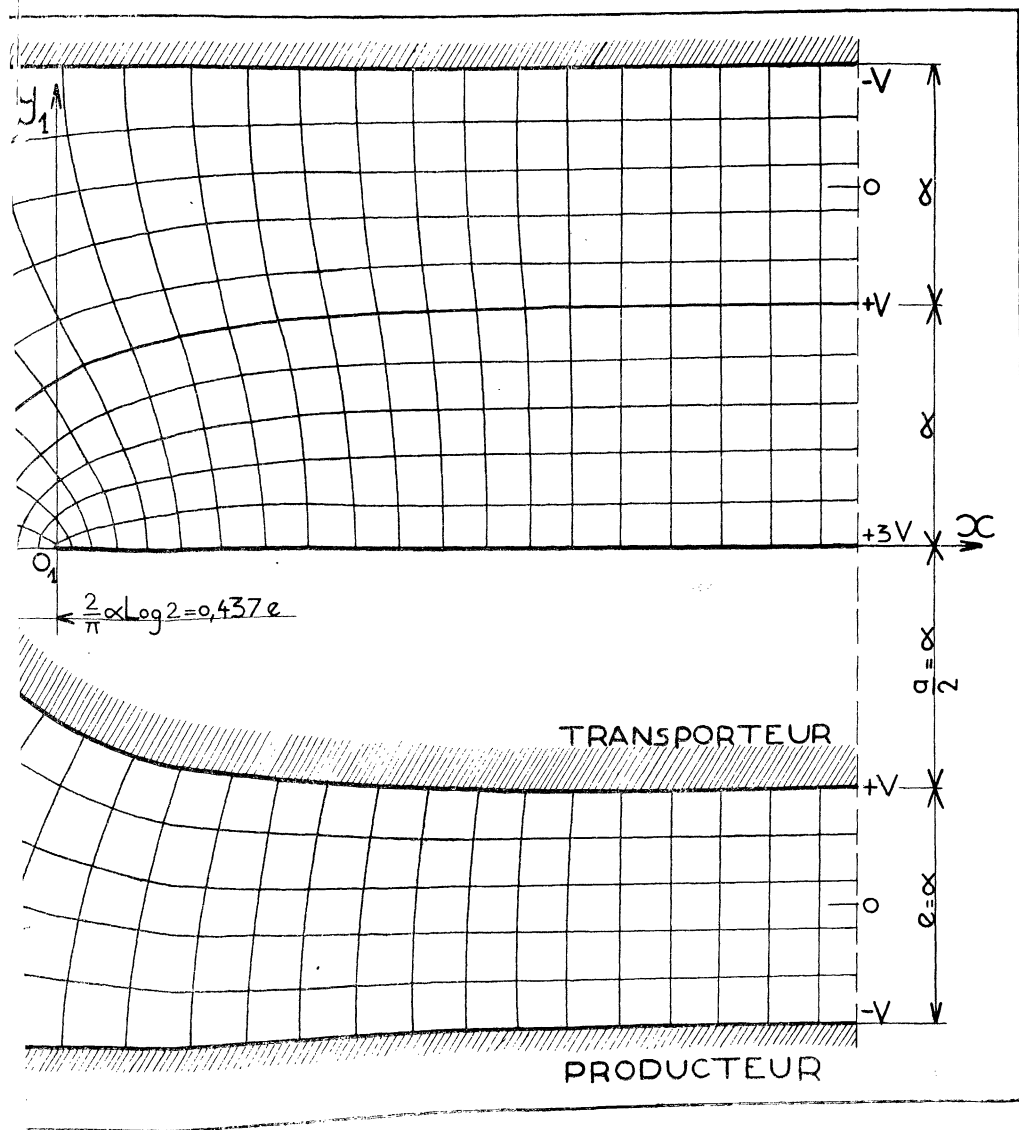
donc

$$\rho = \frac{a}{\pi \sin \varphi}.$$

A l'infini, $\varphi = 0$, le rayon de courbure est évidemment infini, puis il décroît, d'une manière pratiquement imperceptible jusqu'au point de raccordement signalé et d'abscisse $1,5a$, plus rapidement ensuite. Il décroît sans cesse et atteint son minimum sur la tranche,

⁽¹³⁾ Dans le cas où une seule face des secteurs serait active (producteurs extrêmes) et où l'on prendrait $a = e$, le profil à donner à ces électrodes pour obtenir sur leur tranche un champ constant pourrait être déterminé par un procédé analogue. Ce profil serait dissymétrique.





pour $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Cette valeur minimum est $\varphi_0 = \frac{a}{\pi} = 0,318 a$. Une portion de cercle de rayon φ_0 peut donc constituer les environs immédiats de l'arête.

REMARQUES. — a) On peut également déterminer la répartition du champ électrique par la méthode graphique des réseaux de petits

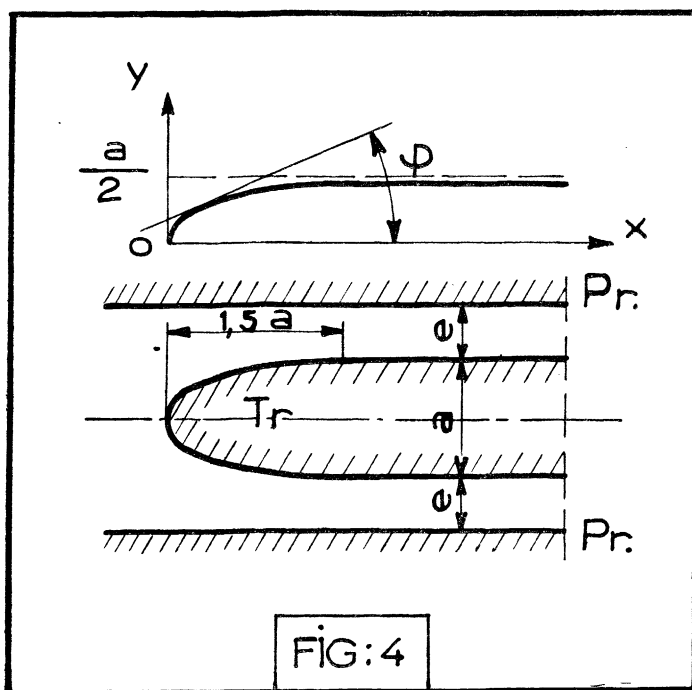


FIG: 4

carrés. La méthode analytique, cependant, a permis une recherche beaucoup plus rapide du profil. Le procédé graphique, à son tour, sera précieux pour déterminer les perturbations éventuelles apportées dans la répartition du champ par un détail qui n'avait pas été prévu : profil de la tranche non rigoureux, voisinage d'une autre électrode⁽¹³⁾.

b) On peut se rendre compte, par une construction graphique, que le voisinage près de la tranche du secteur en débit, d'un autre secteur porté à un potentiel nul, ne constitue pas un danger. A condition que ces deux secteurs ne soient pas trop rapprochés (leur écartement étant par exemple supérieur à l'épaisseur a), le champ près de la tranche considérée du secteur en période de débit ne peut

⁽¹³⁾ Voir par exemple la figure 25.

que se trouver quelque peu diminué, et ne laisse pas d'inquiétude à ce sujet.

D'autre part, la machine étant dimensionnée compte tenu de la d. d. p. maximum qui s'établit entre les électrodes fixes et mobiles, soit $V_0(k+1)$, pendant la période de débit, le coefficient de sécurité est à fortiori plus grand durant les autres périodes du cycle.

Enfin, il y aurait lieu d'examiner le champ au voisinage des coins arrondis présentés par les secteurs mais alors, le problème à trois dimensions serait complexe. L'expérience montre d'ailleurs qu'il suffit de ne pas diminuer les rayons de courbure au-dessous d'une certaine limite et de respecter, approximativement, un profil à rayon de courbure décroissant depuis les faces parallèles jusqu'au sommet de la tranche. Enfin, il est connu que le champ disruptif auquel résiste un diélectrique augmente lorsque le rayon de courbure des électrodes diminue, ce qui tend à compenser l'accroissement du champ qui se produit alors au voisinage de ces électrodes. Ce phénomène augmente, dans une certaine mesure, la sécurité du fonctionnement et permet justement l'usage de profils non rigoureux.

4. — Volume et puissance spécifique des machines électrostatiques.

Dans le premier paragraphe, nous avons déterminé la puissance d'une machine en fonction du volume de diélectrique actif utilisé.

Ensuite, la détermination de l'épaisseur optimum des secteurs peut fournir une relation bien définie entre le volume de diélectrique et le volume total de la partie active de la machine.

Soit donc V_t le volume total occupé par l'ensemble de cette partie active — électrodes métalliques et diélectrique intermédiaire —, sans tenir compte évidemment de tous les accessoires. Nous avons déterminé la relation $e = \frac{a}{2}$.

Dans une machine à p plateaux, la proportion du volume de diélectrique total V'_d , par rapport au volume occupé par les électrodes ou rendu inutilisable du fait de leur présence, soit V_e , est $\frac{1}{2} \cdot \frac{2p}{2p+1}$ ou, si p est grand, simplement $\frac{1}{2}$. Donc $V_e = 2V'_d$. Le volume total, ou encombrement, est la somme

$$V_t = V_e + V'_d = 3V'_d.$$

Or, le volume de diélectrique réellement actif, V_d , intervenant dans l'expression de la puissance n'est que la moitié de V'_d . En effet, il n'existe que n producteurs par rangée au lieu de $2n$ transporteurs et un transporteur n'est actif que n fois par tour. Par conséquent, $V_t = 6V_d$. Le volume de diélectrique actif d'une machine n'est que le sixième de l'encombrement de son système énergétique. En fonction de cet encombrement V_t , la puissance possible à mettre en jeu a donc pour expression :

$$P = \frac{10^{-5}}{432\pi} \cdot NnKE_0^2V_t,$$

P en watts,

N en tours/seconde,

E_0 en KV/cm,

V_t en cm^3 .

Autrement dit, la puissance spécifique rapportée au cm^3 d'encombrement est :

$$p = 7,36 \cdot 10^{-9} \cdot NnKE_0^2,$$

les unités étant les mêmes que précédemment.

Pratiquement l'encombrement total de la machine est nettement plus considérable que le volume V_t défini. L'expression établie de la puissance spécifique peut cependant donner des ordres de grandeur intéressants.

Enfin, pour un calcul de poids, on détermine facilement le volume réellement occupé par le métal, soit v_m . Par rapport à V_t , on a :

$$v_m = \frac{1}{2} V_t, \text{ avec une bonne approximation.}$$

5. — Facteur de multiplication optimum.

La valeur du facteur k est déterminée par le calage du balai de débit, établissant le contact en temps opportun et alors que le potentiel des transporteurs a atteint la valeur prévue, soit $U = kV_0$. On pourrait être tenté de donner à ce facteur une valeur élevée, afin d'obtenir de hautes tensions moyennant un potentiel d'excitation réduit. En fait, cela ne présenterait aucun intérêt, l'excitation étant toujours facile à assurer même sous potentiel élevé, grâce à la faible puissance demandée. Il est préférable, au contraire, de donner à k une valeur pour laquelle la puissance utile de la machine est

maximum. En l'absence de capacités parasites, le facteur de puissance $K = \frac{4k}{(k+1)^2}$ intervenant dans l'expression de la puissance, passe par un maximum pour $k=1$. Un $k < 0$ supposerait les potentiels des transporteurs et des producteurs de même signe, ce qui est impossible.

Par conséquent, la mise en jeu d'une puissance maximum exige un facteur de multiplication unité

$$k_0 = 1.$$

Autrement dit, le potentiel d'excitation, par rapport à la masse, a la même valeur que la tension normale de débit.

Si cette condition est remplie, le facteur de puissance maximum $K_M = 1$, et la puissance maximum qui pourra être mise en jeu par une machine sera :

$$P_M = 7,36 \cdot 10^{-9} N n E_0^2 V_t,$$

P_M en watts,

N t/s.,

E_0 KV/cm,

V_t cm³,

n = nombre de paires de pôles.

6. — Ordre de grandeur des puissances.

Prenons pour diélectrique l'air comprimé à 30-35 kg/cm² en comptant sur un champ de 450 à 500 KV/cm⁽¹⁴⁾. La densité d'énergie atteint près de 10⁻² joule par cm³, et la pression électrostatique correspondante est voisine de 100 g/cm². (Densité d'énergie et pression ont mêmes dimensions physiques.)

La puissance spécifique maximum ($k=1$) d'une machine électrostatique atteindrait, dans ces conditions : $p = 308 \cdot N n \cdot 10^{-7}$ watts par cm³. Pour une vitesse classique de 1 500 t/min soit $N = 25$ t/s, une machine à deux pôles seulement mettrait en jeu une puissance d'environ 45 KW par m³ de partie active. Le kilowatt occuperait 22 litres, le cheval 17 litres. La puissance atteindrait 90 KW/m³

(14) Un tel champ est facilement réalisable (voir deux. partie) et il pourrait être accru sensiblement.

pour une machine à 4 pôles, 180 KW/m³ pour 8 pôles, 360 KW/m³ pour 8 pôles également mais pour une vitesse de 3 000 t/min. Dans ce dernier cas, le cheval encombrerait moins de 2,5 litres.

Si les électrodes étaient en aluminium plein ($d = 2,6$), la partie active pèserait 30 kilogrammes par KW pour une machine à deux pôles et avec $N = 25$ t/s. Avec 8 pôles et cette même vitesse, le KW ne pèserait déjà plus que 7,5 kilogrammes.

Tous ces chiffres montrent que, théoriquement, rien ne s'oppose à la construction de machines électrostatiques de puissances spécifiques considérables et comparables à celles obtenues avec les appareils électrodynamiques à induction.

Nous verrons cependant que ces puissances doivent être quelque peu réduites à cause des capacités parasites. Mais l'ordre de grandeur reste le même.

CHAPITRE IV

INFLUENCE DES CAPACITÉS PARASITES

1. — Capacités parasites.

Nous avons supposé, dans l'étude précédente, que seule la capacité utile C_0 , entre producteurs et transporteurs, existait. Le fonctionnement de la machine était idéal et la puissance maximum.

Cependant, il faut aussi considérer, en dehors de C_0 , diverses capacités entre électrodes qui rendent le cycle de fonctionnement moins simple et surtout diminuent la puissance de la machine. Ce sont des capacités parasites.

La machine comporte quatre groupes d'éléments conducteurs pouvant être à des potentiels différents et s'influençant mutuellement. Nous ne parlerons pas, dans ce qui va suivre, des coefficients d'influence absolus de ces éléments, comme on le fait souvent dans les calculs théoriques. S'ils conduisent automatiquement à des équations, ils montrent mal, par contre, le phénomène physique tel qu'il se présente. Nous considérerons, au contraire, les *capacités* d'un élément par rapport à un autre, et ces grandeurs, essentiellement positives, interpréteront mieux la réalité⁽¹⁵⁾. Suivant le sens

(15) Étant donné un système de N conducteurs $A, B, \dots, N$, on écrit généralement :

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_{11}V_1 + C_{12}V_2 + \dots + C_{1n}V_n, \\ Q_2 &= C_{21}V_1 + C_{22}V_2 + \dots + C_{2n}V_n, \\ &\vdots \\ Q_n &= C_{n1}V_1 + C_{n2}V_2 + \dots + C_{nn}V_n. \end{aligned}$$

$Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ étant les charges portées respectivement par les conducteurs $A, B, \dots, N$ et $V_1, V_2, \dots, V_n$ étant les potentiels correspondants.

Un coefficient tel que C_{nn} est appelé capacité du conducteur N ; ces coefficients sont essentiellement positifs.

Un coefficient tel que $C_{n1} = C_{1n}$ est le coefficient d'influence entre les conducteurs A

- d) Capacité entre les transporteurs sortant et la masse, soit c_{sm} ,
- e) Capacité entre les transporteurs entrant et la masse, soit c_{em} ,
- f) Capacité entre les producteurs et la masse, soit c_{pm} .

REMARQUE : Au point de vue énergétique, dont nous nous occupons tout d'abord, les capacités définies ci-dessus interviennent par

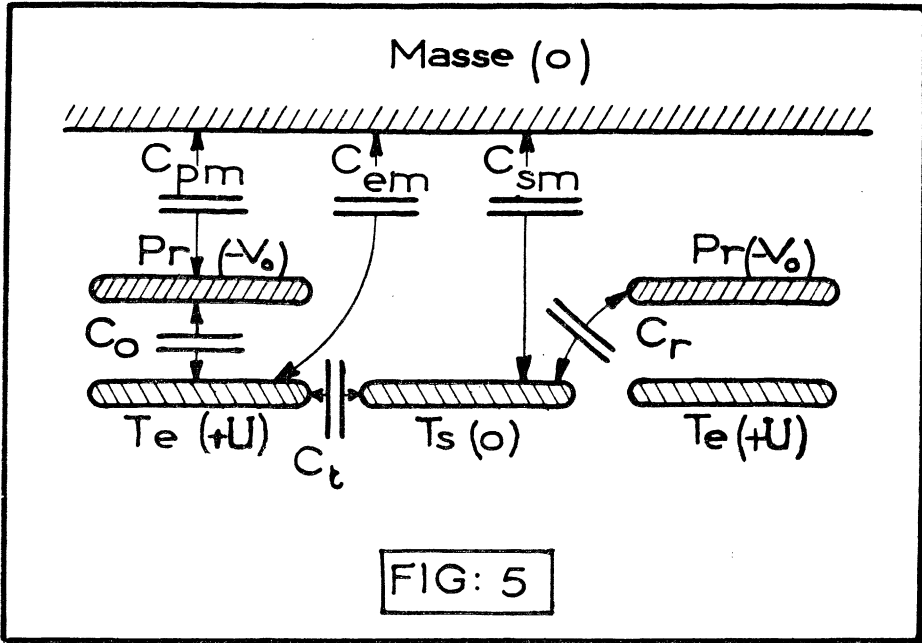


FIG: 5

leur valeur particulière prise en fin — ou début — de cycle, alors que la famille des transporteurs entrant est complètement entrée dans les producteurs, et celle des transporteurs sortant complètement sortie d'entre eux. Au point de vue énergétique, peu importe eu effet les lois de variation de chaque capacité en fonction de la position relative stator-rotor. Seuls, l'état initial et l'état final interviennent.

Ces valeurs particulières sont (voir fig. 5) :

- a) Capacité utile maximum C_0 ,
- q) capacité résiduelle C_r ,
- c) capacité entre les deux familles de transporteurs C_t ,
- d) capacité entre transporteurs sortis et masse C_{sm} ,
- e) capacité entre transporteurs entrés et masse C_{em} ,
- f) capacité entre producteurs et masse C_{pm} .

Dans ces conditions, le potentiel des producteurs est $-V_0$, celui des transporteurs sortis $+U = kV_0$, et les transporteurs entrés, comme la masse, sont à un potentiel nul.

Si l'on voulait déterminer, par contre, la forme réelle de l'onde de tension aux bornes, du courant débité, du couple résistant (ou moteur), etc., il faudrait connaître la loi de variation des diverses capacités au cours de la rotation.

Pour les calculs énergétiques qui suivent, quatre des valeurs particulières ci-dessus sont indispensables. Leur détermination théorique exacte étant pratiquement impossible (excepté le cas de C_0 , la capacité utile étant bien déterminée), il faudra avoir recours aux mesures. De toute façon, les rapports entre les diverses capacités parasites d'une part et la capacité utile d'autre part, ne varieront guère d'une machine à une autre. L'usage pourrait donc établir la valeur probable de ces rapports, pour des machines de construction et de caractéristiques diverses. Il serait alors possible de prévoir, dans un avant-projet, l'influence des capacités parasites à partir de chiffres empiriques, comme cela se pratique souvent dans les calculs industriels (Voir par exemple les coefficients α et β , au paragraphe suivant.)

2. — Puissance réelle.

Lorsqu'une famille de transporteurs est complètement entrée dans les producteurs, la charge maximum prise alors n'est pas $Q_0 = C_0V$ mais seulement $Q'_0 = C_0V_0 - C_tU$, l'autre famille de transporteurs au potentiel $+U$ induisant une charge négative $-C_tU$. De même, en fin de débit, les transporteurs complètement sortis conservent une charge résiduelle $q_0 = C_r(V_0 + U) + C_tU + C_{sm}U$. La charge réellement mise en jeu, durant le cycle envisagé, est donc seulement :

$$Q'_0 - q_0 = C_0V_0 - kC_tV_0 - C_rV_0(k+1) - kC_tV_0 - kC_{sm}V_0 \\ = V_0[(C_0 - C_r) - k(2C_t + C_{sm} + C_r)].$$

La nouvelle puissance P' de la machine est donc, par rapport à l'ancienne, puisque seules les charges utilisées ont varié :

$$\frac{P'}{P} = \frac{Q'_0 - q_0}{Q_0} = \frac{C_0 - C_r}{C_0} - k \frac{2C_t + C_r + C_{sm}}{C_0}.$$

Posons

$$\boxed{\alpha = \frac{C_0 - C_r}{C_0}} \quad \boxed{\beta = \frac{2C_t + C_r + C_{sm}}{C_0}}.$$

Ces deux coefficients, sans dimensions, interviendront souvent par la suite ; ils représentent les rapports entre les capacités parasites et la capacité utile.

Par conséquent, la puissance réelle d'une machine, par rapport à sa puissance théorique calculée sans tenir compte des capacités parasites, est :

$$P' = [\alpha - \beta k] P < P.$$

Si $\beta = 0$, donc $\alpha = 1$ (pas de capacités parasites) on retrouve $P' = P$. De toute façon, $[\alpha - \beta k]$ est inférieur à 1.

On peut encore poser $K' = K[\alpha - \beta k] = \frac{4k}{(k+1)^2} [\alpha - \beta k] \leq 1$.

Ce terme, fonction du calage des balais et des capacités parasites de la machine, est le nouveau facteur de puissance. L'expression de la puissance réelle d'une machine est donc :

$$P' = 5,56 \cdot 10^{-7} N n K' C_0 e^2 E_0^2$$

$$p' = 7,36 \cdot 10^{-9} N n K' E_0^2$$

P' est la puissance utile en watts,

p' est la puissance spécifique rapportée au cm^3 d'encombrement de la partie active (électrodes et diélectrique) en watts/cm^3 ,

E_0 est le champ électrique admis dans le diélectrique, en KV/cm ,

C_0 est la capacité utile maximum, en cm ,

e est l'écartement inter-électrodes, en cm : $e = \frac{V_0}{E_0} (k+1)$,

N est la vitesse de rotation en tours/s,

$2n$ est le nombre de pôles de la machine,

K' est le facteur de puissance réel, soit $K' = \frac{4k}{(k+1)^2} [\alpha - \beta k]$, k étant le facteur de multiplication,

α et β les deux coefficients précédemment définis.

3. — Facteurs de multiplication et de puissance.

Puissance maximum.

Le facteur de puissance K' s'annule pour $k=0$, mais aussi pour $k = \frac{\alpha}{\beta}$. Il est donc impossible, pratiquement, d'augmenter le facteur de multiplication d'une machine au delà d'une certaine valeur.

d'autant plus petite que les capacités parasites sont plus importantes.

Pour $k > \frac{\alpha}{\beta}$, $P' < 0$, on ne peut plus atteindre la tension désirée et

la machine ne peut pas débiter. Elle fonctionne même en moteur.

Il est important de rechercher quel est le nouveau facteur de multiplication optimum k'_0 rendant K' — donc aussi P' — maximum, pour une machine donnée.

La dérivée $\frac{dK'}{dk} = 4 \frac{\alpha - k(2\beta + \alpha)}{(k + 1)^3}$ s'annule pour :

$$k'_0 = \frac{\alpha}{\alpha + 2\beta} \leq 1.$$

Si $\beta = 0$, donc $\alpha = 1$, $k'_0 = 1$. Mais la présence des capacités parasites conduit à diminuer le facteur de multiplication d'une machine sensiblement au-dessous de l'unité, afin de conserver le bénéfice d'un maximum de puissance. La tension d'excitation est donc supérieure à la tension sous laquelle s'effectue le débit.

Pour $k = k'_0 = \frac{\alpha}{\alpha + 2\beta}$, le facteur de puissance prend la valeur maximum :

$$K'_M = \frac{\alpha^2}{\alpha + \beta}.$$

D'où les puissances, utile et spécifique, qu'il est possible d'obtenir dans ces conditions (les notations étant les mêmes que précédemment) :

$$\begin{aligned} P'_M &= 5,56 \cdot 10^{-7} N n C_0 e^2 E_0^2 \frac{\alpha^2}{\alpha + \beta} \\ p'_M &= 7,36 \cdot 10^{-9} N n E_0^2 \frac{\alpha^2}{\alpha + \beta} \end{aligned}$$

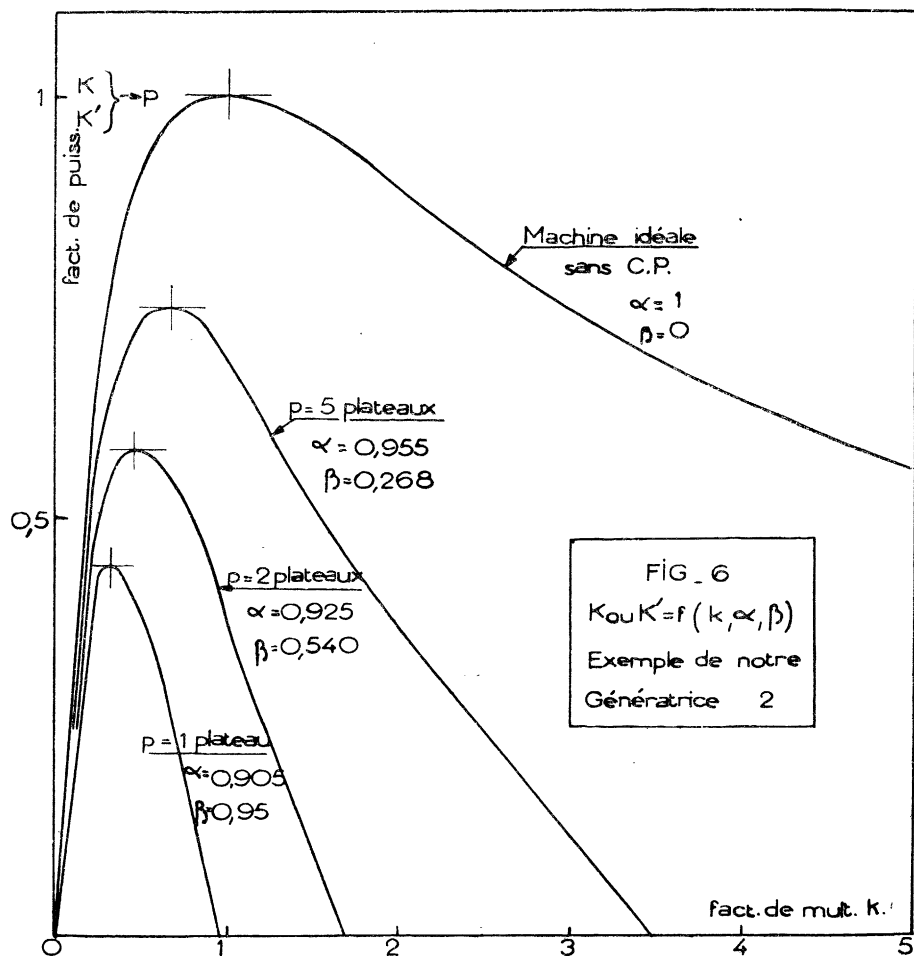
Le rapport des puissances entre une machine idéale sans C. P. et une machine réelle, supposées toutes les deux à puissance maximum est, par conséquent :

$$\frac{P'_M}{P_M} = \frac{K'_M}{1} = \frac{\alpha^2}{\alpha + \beta}.$$

Les capacités parasites provoquent donc une perte minimum en puissance de :

$$\pi \% = \left[1 - \frac{\alpha^2}{\alpha + \beta} \right] \cdot 100.$$

La figure 6 montre les variations du facteur de puissance en fonction du facteur de multiplication, pour quelques valeurs des coefficients α et β . Ces valeurs sont précisément celles rencontrées dans notre machine n° 2, équipée successivement avec 1, 2 et 5 plateaux



(On note déjà l'utilité d'un nombre de plateaux élevé). Les courbes représentent, à l'échelle près, la variation de la puissance obtenue, toutes choses égales par ailleurs.

On se rend compte, également, de la nécessité de réaliser un facteur de multiplication se rapprochant de la valeur optimum, et de

l'erreur de vouloir accroître ce facteur sous prétexte de pouvoir diminuer le potentiel d'excitation ⁽¹⁶⁾.

4. — Tension maximum. — Conditions limites.

Si l'on cherchait, en partant d'une excitation donnée, à atteindre la tension de débit maximum, on se heurterait encore à la présence des capacités parasites venant limiter l'élévation de tension.

Lorsque les transporteurs sortant ont complètement quitté les producteurs, et si le débit n'a pas encore commencé, on peut déterminer la tension maximum V_m atteinte. La charge des transporteurs n'ayant pas varié, on a :

$$C_0 V_0 - C_t V_m = C_r (V_0 + V_m) + C_t V_m + C_{sm} V_m.$$

D'où l'on tire

$$V_m = V_0 \frac{C_0 - C_r}{2C_t + C_{sm} + C_r} = V_0 \cdot \frac{\alpha}{\beta}.$$

On pouvait prévoir ce résultat à priori puisque le facteur de multiplication maximum k_M possible à réaliser a précisément pour valeur

$$\boxed{k_M = \frac{\alpha}{\beta}}, \text{ valeur au-dessus de laquelle la puissance } P' \text{ serait négative, le circuit extérieur débitant dans la génératrice transformée en moteur.}$$

Cependant, un réglage des balais donnant au facteur de multiplication la valeur k_M , ne permettrait pas à la machine de débiter puisque, après le contact, la capacité utile c , réduite alors à sa valeur résiduelle C_r , ne pourrait plus diminuer. On aurait donc bien $P' = 0$. La machine serait seulement susceptible d'un débit irréversible sur un circuit extérieur aux bornes duquel, en l'absence de débit, la tension serait nulle ; cette simple décharge ne mettrait en jeu que l'énergie accumulée sous forme potentielle, dans la machine, et se ferait irréversiblement.

⁽¹⁶⁾ H. Chaumat ne voyait, au contraire, que l'intérêt d'ailleurs inexistant de l'élévation de tension, réalisée entre l'excitation et le débit et qu'il cherchait à rendre maximum. Le souci d'un débit réversible sous tension constante et d'une puissance spécifique aussi grande que possible était étranger à ses préoccupations.

Une génératrice électrostatique est cependant un transformateur d'énergie mécanique en énergie électrique, et non un simple élévateur de potentiel.

(Voir C. R. Académie des Sciences, 188, 1929, p. 1490.)

D'autre part, si la machine fonctionnait à vide et en l'absence d'un régulateur (voir chap. VI, § 2), le potentiel des transporteurs sortant tendrait vers la valeur V_m , quel que soit le facteur k . Cependant, ce potentiel serait limité bien avant, car une décharge disruptive se produirait entre les électrodes, l'écartement de celles-ci n'étant prévu que pour une d. d. p. normale, soit $(V_0 + U)$.

5. — Détermination expérimentale des capacités.

Il est impossible de faire des mesures directes. Pour déterminer les six capacités dont il a été question, intervenant entre les quatre éléments de la machine (trois groupes d'électrodes — transporteurs entrés, transporteurs sortis, producteurs — et la masse), il faut effectuer six mesures, par un procédé quelconque, en groupant les quatre éléments suivant six combinaisons différentes. On en déduit six équations d'où il est possible de tirer les grandeurs cherchées.

Le rotor est calé dans la position voulue, généralement en fin — ou début — de cycle, de manière à déterminer les valeurs particulières des capacités intervenant dans la puissance. Il faut veiller à ne pas inclure, lors des mesures, les accessoires n'intervenant pas dans l'effet parasite, tels que les balais et porte-balais.

On mesure par exemple successivement les capacités de chacun des trois groupes d'électrodes, quand on réunit les deux autres à la masse, puis la capacité des systèmes formés de deux groupes d'électrodes réunis ensemble quand le groupe restant est relié à la masse. Au total, six combinaisons.

Soient P les producteurs, T_e les transporteurs entrés, T_s les transporteurs sortis (Voir fig. 5). Il suffit de procéder par permutation circulaire. Dans le premier cycle de combinaisons, on détermine les capacités suivantes :

1. P par rapport à $T_e + T_s$ réunis à la masse. Soit γ_1 la capacité mesurée.

2. T_e par rapport à $T_s + P$ réunis à la masse. Soit γ_2 la capacité mesurée.

3. T_s par rapport à $P + T_e$ réunis à la masse. Soit γ_3 la capacité mesurée.

et dans le deuxième cycle :

4. $P + T_e$ réunis, par rapport à T_s réuni à la masse. Soit γ_4 la capacité mesurée.

5. $T_e + T_s$ réunis, par rapport à P réuni à la masse. Soit γ_5 la capacité mesurée.

6. $T_s + P$ réunis, par rapport à T_e réuni à la masse. Soit γ_6 la capacité mesurée.

D'où les six équations :

$$\begin{array}{ll} \gamma_1 = C_{pm} + C_r + C_0 & \gamma_4 = C_{pm} + C_{em} + C_t + C_r \\ \gamma_2 = C_{em} + C_0 + C_t & \gamma_5 = C_{em} + C_{sm} + C_r + C_0 \\ \gamma_3 = C_{sm} + C_t + C_r & \gamma_6 = C_{sm} + C_{pm} + C_0 + C_t \end{array}$$

qui donnent les six valeurs des capacités élémentaires recherchées :

$$\begin{array}{ll} C_{em} = \frac{1}{2} [(\gamma_4 + \gamma_5) - (\gamma_3 + \gamma_1)] & C_0 = \frac{1}{2} (\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_4) \\ C_{sm} = \frac{1}{2} [(\gamma_5 + \gamma_6) - (\gamma_1 + \gamma_2)] & C_t = \frac{1}{2} (\gamma_2 + \gamma_3 - \gamma_5) \\ C_{pm} = \frac{1}{2} [(\gamma_6 + \gamma_4) - (\gamma_2 + \gamma_3)] & C_r = \frac{1}{2} (\gamma_3 + \gamma_1 - \gamma_6). \end{array}$$

Enfin, à titre de vérification, on peut mesurer la capacité entre les trois groupes d'électrodes réunis ensemble d'une part et la masse d'autre part, soit $\gamma_7 = C_{em} + C_{sm} + C_{pm}$. On doit avoir :

$$\gamma_7 = (\gamma_4 + \gamma_5 + \gamma_6) - (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3).$$

6. — Grandeur des différentes capacités.

Si la capacité utile C_0 peut être calculée avec une précision suffisante, il est par contre bien difficile d'avoir une idée a priori de la valeur des capacités parasites. Seule l'expérience peut fournir des indications précises.

— Cette expérience montre que la capacité la plus gênante est celle existant entre les deux familles de transporteurs, soit C_t . Elle peut atteindre, sans précautions, le quart de la capacité utile, et intervient d'autre part affectée du coefficient 2. Les deux familles de transporteurs, alternées et enchevêtrées, voisinent en effet inévitablement. Les touches correspondantes du collecteur et les connexions, également voisines, contribuent d'autant plus à accroître C_t qu'elles se trouvent séparées par un diélectrique solide de pouvoir inducteur spécifique supérieur à l'unité.

— La capacité résiduelle C_r est notablement inférieure, de l'ordre, par exemple, du vingtième de C_0 . Le coefficient $\alpha = \frac{C_0 - C_r}{C_0}$ est, en général, peu différent de l'unité, voisin de 0,9.

— Quant à la capacité des transporteurs sortis vis-à-vis de la masse, soit C_{sm} , elle est intermédiaire entre C_r et C_t .

D'une manière générale, les capacités parasites sont dues à l'influence des groupes d'électrodes et de leurs accessoires entre eux. Mais il convient de remarquer que ces accessoires s'arrêtent au collecteur, *balais non compris*. Tous les conducteurs se trouvant au delà des touches dudit collecteur font déjà partie du circuit extérieur et ne peuvent, par le fait de la commutation, nuire au fonctionnement.

Cependant, la capacité C_{pm} entre producteurs et masse comprend également l'action de tout le dispositif d'excitation : connexions, traversée éventuelle du réservoir à gaz comprimé, excitatrice séparée. Cette capacité n'est d'ailleurs nullement gênante et présente au contraire souvent un caractère utile, ainsi que nous le verrons.

Précautions à prendre dans la construction. — Il faut avant tout réduire le terme C_t et prévoir la construction de la machine en conséquence. Indépendamment de la question d'isolement, les transporteurs successifs seront écartés suffisamment, mais il est difficile d'aller très loin dans cette voie. C'est surtout dans les parties accessoires que l'on peut agir. Il convient de réduire les connexions allant au collecteur et ce collecteur doit être lui-même réduit à sa plus simple expression (on diminue en même temps C_{sm}). On doit enfin, et cette prescription est générale, utiliser des diélectriques solides supportant les électrodes et composant le collecteur, ayant un pouvoir inducteur spécifique aussi réduit que possible.

— La résiduelle C_r ne peut guère être diminuée, le voisinage des transporteurs sortis avec les producteurs étant déjà déterminé par les autres dimensions acquises. Ce terme est d'ailleurs assez faible.

— Quant au terme C_{sm} , il peut être réduit en évitant les voisinages de grande surface entre le rotor et la masse. Un procédé indirect et très efficace pour diminuer ce terme consiste à faire pénétrer le rotor, dès sa sortie des producteurs, dans un écran électrostatique faisant office de cage de Faraday. Cet écran est relié au balai de débit de la machine et se trouve au potentiel $+U$. Un tel système de « portefeilles » serait utile dans le cas où l'on désirerait un facteur de multiplication élevé, pour certains usages très spéciaux, et en particulier pour la construction des excitatrices (Cf. chap. vi, § 4 et voir la réalisation de l'excitatrice de notre deuxième génératrice).

Influence du nombre de pôles et de plateaux. — L'augmentation

du nombre de pôles d'une machine en vue d'accroître sa puissance spécifique est, nous l'avons dit, rapidement limitée.

Outre les raisons déjà exposées (diminution du coefficient d'utilisation de l'espace disponible, difficultés de construction) il faut remarquer que certaines capacités parasites croissent rapidement avec le nombre de pôles. C'est le cas du terme très nuisible C_t qui doit augmenter presque proportionnellement à ce nombre de pôles, les surfaces de voisinage entre les deux familles de transporteurs se trouvant accrues dans la même proportion. Il en est de même pour la résiduelle C_r .

Donc, l'augmentation du nombre de pôles provoque, outre une légère diminution de la capacité utile, une nette augmentation de C_t et de C_r . Il se peut alors que l'accroissement espéré de la puissance spécifique soit compromis.

Cette puissance doit passer par un maximum pour un certain nombre de pôles, puis décroître ensuite. De toute façon, nous pouvons conclure qu'il est inutile de compliquer la construction mécanique du rotor ; le nombre de pôles doit être limité, en principe, à ce qu'une construction aisée et robuste permet.

Pour augmenter la puissance globale d'une machine, il faut alors monter autant de plateaux qu'il est nécessaire. De cette manière, la puissance spécifique n'est pas accrue, mais l'action des capacités parasites est très atténuée. En effet, la capacité utile est proportionnelle au nombre de plateaux, alors que les capacités parasites s'accroissent moins vite. Leur importance relative diminue en conséquence.

A titre d'exemple, dans notre machine n° 2, la puissance perdue à cause des capacités parasites était de 56 pour 100 avec un seul plateau, 42 pour 100 avec deux plateaux et elle a été réduite à 26 pour 100 avec cinq plateaux⁽¹⁷⁾.

(17) Voir deuxième partie, prototype n° 2, tableau n° 2.

CHAPITRE V

ANALYSE DU CYCLE DE FONCTIONNEMENT ⁽¹⁸⁾. COMMUTATION. COLLECTEUR.

Dans tout ce qui suit, nous considérons une seule famille de transporteurs, l'autre famille effectuant un cycle semblable mais décalé dans l'espace d'un pas

polaire $\theta = \frac{\pi}{n}$ radian et dans le temps d'une demi-période $\frac{T}{2} = \frac{1}{2Nn}$ seconde.

NOTATIONS. — Soit c la capacité, à un instant donné, existant entre les producteurs et les transporteurs qui s'en éloignent (fig. 7). Nous définirons, à chaque instant, la position relative de ces organes par l'expression :

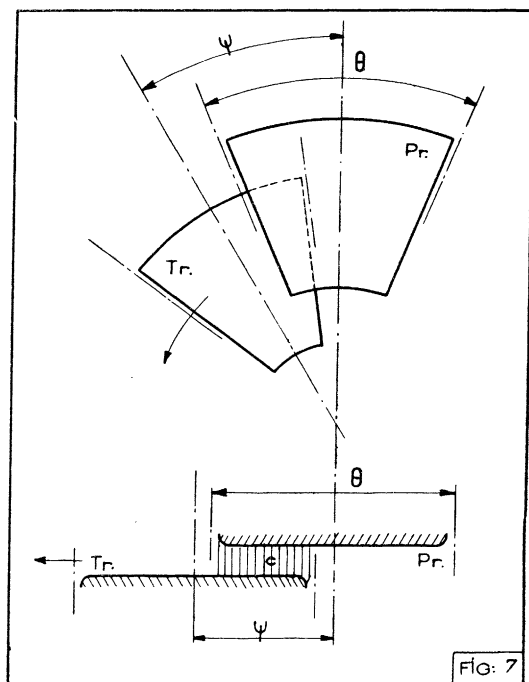
$$x = 1 - \frac{c}{C_0},$$

qui a l'avantage de ne pas faire d'hypothèse

sur la loi de variation de c en fonction de cette position.

Lorsque la famille des transporteurs envisagée est complètement

⁽¹⁸⁾ De nombreux contrôles à l'oscilloscope cathodique ont été effectués sur nos machines.



entrée dans les producteurs, on a $x=0$ (origine). Lorsqu'ils sont complètement sortis, $x=1$, en l'absence de capacités parasites.

Cependant, il pourra être plus commode, parfois, de définir cette position par l'angle ψ , formé à un instant donné par les axes d'un secteur producteur et du secteur transporteur qui s'en éloigne (fig. 7).

En général, la loi de variation de c en fonction de ψ sera linéaire. Pour $\psi=0$, $c=C_0$, C_0 étant, nous le répétons, la capacité maximum totale de la famille des transporteurs complètement entrés dans les producteurs, compte tenu des n secteurs par plateau et des p plateaux. D'autre part, pour $\psi=\theta=\frac{\pi}{n}$, on a $c=0$, si la résiduelle est supposée nulle. D'où la loi de variation :

$$c = C_0 \left(1 - \frac{\psi}{\theta} \right).$$

En réalité, pour $\psi=\theta$, $c=C_r$, capacité résiduelle. Mais la loi de variation ne se trouve perturbée qu'en fin de cycle ; elle demeure linéaire le reste du temps et son coefficient angulaire n'est pas affecté.

En identifiant avec la première notation employée ci-dessus, on a :

$$x = \frac{\psi}{\theta}, \quad \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\theta} \frac{d\psi}{dt} = 2Nn.$$

1. — FONCTIONNEMENT A POTENTIEL D'EXCITATION CONSTANT

A. — *Machine idéale sans capacités parasites.*

Dans ce cas, le cycle est très simple. Supposons les transporteurs complètement entrés dans les producteurs et la charge maximum prise.

1. — Rupture du contact de masse. Période d'élévation du potentiel.

La capacité transporteurs-producteurs est maximum, soit C_0 , et la charge $C_0 V_0$ complète. On coupe alors la liaison des transporteurs avec la masse. Leur potentiel reste nul et aucune étincelle ne peut apparaître. Mais à partir de cet instant, le rotor continuant sa course, ce potentiel s'élève.

La charge des transporteurs se maintenant constante, leur potentiel v est tel que :

$$V_0 + v = \frac{C_0 V_0}{c} = \frac{V_0}{1-x}, \quad \text{d'où l'on tire} \quad v = V_0 \frac{x}{1-x}.$$

La tension s'élève donc suivant une loi hyperbolique. Lorsque le potentiel atteint la valeur $U = kV_0$, le contact de débit doit avoir lieu. A ce moment, x a pour valeur :

$$x_c = \frac{k}{k+1},$$

x_c représente le calage du balai de débit ⁽¹⁹⁾.

Au moment de la rupture du contact masse, la tangente à l'origine de la courbe $v(x)$ a pour coefficient angulaire V_0 , alors qu'au moment du contact débit ce coefficient angulaire est $V_0(k+1)^2$. Si $k=1$, l'accroissement du potentiel en fin de période est quatre fois plus rapide qu'au début.

Cette période d'élévation de potentiel, caractérisée par la charge Q_0 constante, est une période énergétique. Une rotation élémentaire $d\psi$ entraîne un accroissement d'énergie potentielle

$$dw = \frac{1}{2} \frac{Q_0^2}{c^2} dc = \frac{1}{2} C_0 V_0^2 \frac{dx}{(1-x)^2}.$$

Le travail accompli pendant cette période est donc, en valeur absolue :

$$W_1 = \frac{1}{2} C_0 V_0^2 \int_0^{x_c} \frac{dx}{(1-x)^2} = \frac{1}{2} k C_0 V_0^2.$$

La puissance instantanée a pour valeur :

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{1}{2} C_0 V_0^2 \frac{1}{(1-x)^2} \frac{dx}{dt} = C_0 V_0^2 \frac{Nn}{(1-x)^2}$$

et le couple résistant ;

$$\Gamma = \frac{p}{\omega} = \frac{1}{2\pi} C_0 V_0^2 \frac{n}{(1-x)^2}.$$

⁽¹⁹⁾ En supposant la variation de capacité linéaire, on aurait pu de même définir l'angle de calage du balai ψ_c , compté à partir de la position de capacité utile maximum et dans le sens de la rotation :

$$\psi_c = \frac{k}{k+1} \theta$$

Il croît rapidement entre le début et la fin de la période envisagée, depuis $\frac{n}{2\pi} C_0 V_0^2$ jusqu'à $\frac{n}{2\pi} C_0 V_0^2 (k+1)^2$.

2. — Contact de débit. Effet d'un erreur de calage.

Lorsque le potentiel v a atteint la valeur $U = kV_0$, tension aux bornes du circuit extérieur, le contact débit doit se fermer ; le calage du balai correspondant est x_c , déjà déterminé.

Si, au moment du contact, le potentiel des transporteurs est exactement égal à celui du circuit extérieur, aucune irréversibilité n'a lieu.

Le calage x_c , dont dépend le facteur de multiplication, doit assurer cette égalité. Examinons l'effet d'une petite erreur dans ce calage, afin d'avoir une idée de la précision avec laquelle il convient d'établir le système collecteur. Soit Δx_c l'erreur absolue de calage commise, d'un côté ou de l'autre de la valeur théorique x_c . Le potentiel des producteurs $v = V_0 \frac{x}{1-x}$ différera de la valeur théorique $U = kV_0$ d'une quantité :

$$\Delta U = V_0 \frac{1}{(1-x_c)^2} \Delta x_c = V_0 k(k+1) \frac{\Delta x_c}{x_c}.$$

ΔU est positif si le contact s'établit en retard et négatif dans le cas contraire.

Au moment du contact, la capacité a pour valeur exacte :

$$C' = C_0 [1 - (x_c + \Delta x_c)].$$

Immédiatement avant le contact, l'énergie accumulée dans la machine est $\frac{1}{2} C'(V_0 + U + \Delta U)^2$. Un instant après, C' n'ayant pas varié sensiblement, elle est devenue $\frac{1}{2} C'(V_0 + U)^2$. La différence $\frac{1}{2} C'(\Delta U)^2 + C'V_0 \Delta U(k+1)$ représente l'énergie mise en jeu au moment du contact. Une partie, soit $C'V_0 \Delta U(k+1)$ correspond à un écoulement d'énergie, dans un sens quelconque, suivant le signe de ΔU . Cette énergie n'est pas perdue et elle se retrouve soit dans le circuit extérieur si $\Delta U > 0$, soit dans la machine si $\Delta U < 0$.

Par contre, le terme $\frac{1}{2} C'(\Delta U)^2$ représente l'énergie dégradée par

irréversibilité au moment du contact, sous forme d'étincelle au collecteur, et constitue bien une perte w_c . On a donc :

$$w_c = \frac{1}{2} C' (\Delta U)^2 = \frac{1}{2} C_0 V_0^2 k^2 (k+1)^2 [1 - (x_c + \Delta x_c)] \left(\frac{\Delta x_c}{x_c} \right)^2,$$

soit :

$$w_c = \frac{1}{2} C_0 V_0^2 k^2 (k+1) \left(\frac{\Delta x_c}{x_c} \right)^2 - \frac{1}{2} C_0 V_0^2 k^3 (k+1) \left(\frac{\Delta x_c}{x_c} \right)^3.$$

Or, l'énergie totale mise en jeu durant le cycle complet d'une famille de transporteurs aurait été, en supposant le calage parfait $w = Q_0 U = C_0 V_0^2 k$. La perte relative est, par conséquent :

$$\frac{w_c}{w} = \frac{1}{2} k(k+1) \left(\frac{\Delta x_c}{x_c} \right)^2 - \frac{1}{2} k^2 (k+1) \left(\frac{\Delta x_c}{x_c} \right)^3.$$

Pour $k=1$, ce qui est généralement réalisé en l'absence de capacités parasites :

$$\frac{w_c}{w} = \left[\frac{\Delta x_c}{x_c} \right]^2 - \left[\frac{\Delta x_c}{x_c} \right]^3.$$

Cette expression représente également la perte relative affectant la puissance totale de la machine, soit $\frac{p_c}{P}$, p_c étant la puissance dégradée au collecteur sous forme d'étincelles.

En négligeant le terme $\left[\frac{\Delta x_c}{x_c} \right]^3$ devant $\left[\frac{\Delta x_c}{x_c} \right]^2$, on peut écrire, approximativement :

$$p_c = \left[\frac{\Delta x_c}{x_c} \right]^2 P.$$

La fraction de puissance dégradée au collecteur par irréversibilité est proportionnelle au carré de l'erreur relative de calage du balai de débit.

On peut déjà prévoir une puissance dégradée assez faible, l'erreur intervenant par son carré.

Si le contact a eu lieu en avance, la puissance est dégradée aux dépens du circuit extérieur. Dans le cas contraire, cette puissance provient directement de l'énergie accumulée dans la machine avant le contact. Dans les deux cas, cette puissance est perdue et devra être compensée par la machine. La diminution de rendement qui peut en résulter est négligeable, mais un danger certain est à consi-

dérer, car cette puissance perdue se dégrade sous forme d'étincelles au collecteur. Si, pour une petite machine, l'inconvénient est réduit, le collecteur d'une machine puissante serait rongé et rapidement détruit dans le cas d'une erreur de calage importante. De plus, la puissance dégradée ainsi calculée est une *puissance moyenne* dans le temps. Cette moyenne est obtenue, en fait, par de brusques pointes de courant qui durent, à chaque contact, un temps très court. La puissance instantanée peut être considérable. Chaque fois, également, l'étincelle n'intéresse que l'aire très restreinte du collecteur située dans la zone de pré-contact, ainsi que le balai lui-même.

Cette concentration de la puissance p_c , à la fois dans le temps et dans l'espace, est un danger auquel il faut veiller.

Pratiquement, ce danger peut être évité soit par un calage des balais suffisamment précis (pour une petite machine), soit par un système de double-balai, soit enfin par une « soupape » assurant automatiquement la fermeture du contact au moment précis où le potentiel v atteint la valeur U . Ce dernier système, beaucoup plus élégant, permet en outre des variations de régime sans que le fonctionnement de la machine en soit affecté. Ces procédés qui, pratiquement, présenteraient une importance certaine, sont expliqués en détail au chapitre VI, § 3.

A titre d'exemple, considérons une machine pour laquelle $k = 1$, donc $x_c = \frac{1}{2}$, et dont la capacité varie linéairement au cours de la rotation. Supposons le collecteur ayant un diamètre actif de 20 cm.

Une erreur de position du balai d'environ 0,8 mm (erreur de calage : 1 pour 100) conduirait à dégrader au collecteur 0,1 watt seulement par kilowatt de puissance utile. Avec une erreur de 4 mm (5 pour 100), la dégradation, sous forme de pointes, de 2,5 watts par KW pourrait être excessive dans une machine importante.

Quoi qu'il en soit, le danger peut être réduit suffisamment grâce à une précision de calage facilement réalisable. D'ailleurs, le système de la soupape décrit ultérieurement rendrait inutiles ces préoccupations.

3. — Période de débit.

Le contact de débit étant effectué, le rotor continue sa course et la capacité producteurs-transporteurs diminue toujours. Cette diminution a tendance à entraîner une augmentation du potentiel des transporteurs, mais ceux-ci étant maintenant couplés sur un récepteur

supposé à potentiel constant, l'équilibre est rétabli à tout moment par un écroulement convenable de la charge des transporteurs. Cet écoulement est parfaitement réversible puisque, à chaque instant, il y a égalité de tension entre le générateur et le récepteur.

Soit q la charge restant à un instant quelconque, la capacité utile correspondante étant c . On a :

$$q = c(U + V_0) = cV_0(k + 1) = \dot{C}_0 V_0(k + 1)(1 - x).$$

L'intensité du courant débité est (en U. E. S. C. G. S.),

$$i_0 = \frac{dq}{dt} = C_0 V_0(k + 1) \frac{dx}{dt}.$$

Si c varie linéairement au cours de la rotation, le courant débité est théoriquement constant :

$$i_0 = 2C_0 V_0(k + 1)Nn.$$

Mais la période de débit ne représente que la fraction $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{k + 1}$ de la période du cycle complet. Donc, l'intensité moyenne débitée par une seule famille de transporteurs est :

$$i_{\text{moy}} = C_0 V_0 Nn$$

et l'intensité totale du courant débité par la machine, compte tenu des deux familles de transporteurs :

$$I_{\text{moy}} = 2C_0 V_0 Nn,$$

ce qui était évident à priori.

La puissance totale moyenne a bien pour expression :

$$P = kV_0 I_{\text{moy}} = 2C_0 V_0^2 k Nn. \quad (\text{U. E. S. C. G. S.})$$

Pendant la période de débit, le travail moteur qu'il a fallu fournir a pour valeur :

$$W_2 = \frac{1}{2} C_0 V_0^2 (k + 1)^2 \int_{x_c}^1 dx = \frac{1}{2} C_0 V_0^2 (k + 1),$$

tandis que l'énergie recueillie dans le circuit extérieur est $C_0 V_0^2 k$.

Durant le débit, le couple résistant reste constant si la variation de c est linéaire.

4. — Rupture du contact de débit et contact de masse.

Pour $x = 1$, la capacité utile de la machine s'est théoriquement annulée et toute la charge des transporteurs s'est écoulée. La touche intéressée du collecteur doit alors échapper du balai de débit, le contact se rompant sans étincelle puisque, à ce moment, le courant débité est nul. Peu après, le contact de masse a lieu.

5. — Période de charge.

La charge des transporteurs qui entrent alors dans les producteurs se fait encore d'une manière réversible, puisque l'accroissement de la capacité utile est progressif. Durant la charge, l'excitation fournit un courant, donc une énergie qu'elle récupère ultérieurement — lors de la diminution de c —, de telle manière qu'un véritable courant alternatif circule sans cesse dans le circuit d'excitation.

La période de charge est donc une période *motrice*, le travail moteur fourni étant $\frac{1}{2} C_0 V_0^2$, et cette énergie étant par la suite exactement compensée.

6. — Bilan des énergies au cours du cycle de fonctionnement.

— Pendant la période d'élévation du potentiel, le travail fourni a pour valeur $\frac{1}{2} C_0 V_0^2 k$.

— Durant la période de débit, il faut encore fournir un travail $\frac{1}{2} C_0 V_0^2 (k + 1)$.

— Enfin, pendant la période de charge, qui est motrice, on recueille mécaniquement le travail $-\frac{1}{2} C_0 V_0^2$.

— D'autre part, dans le circuit extérieur, on retrouve l'énergie utile $Q_0 \times k V_0 = C_0 V_0^2 k$. On a bien :

$$\frac{1}{2} C_0 V_0^2 k + \frac{1}{2} C_0 V_0^2 (k + 1) - \frac{1}{2} C_0 V_0^2 = C_0 V_0^2 k.$$

Après un cycle complet de fonctionnement, l'état final se retrouve identique à l'état initial.

La puissance moyenne fournie à l'excitation est nulle et tout le travail mécanique absorbé est converti en énergie électrique.

B. — Machine avec capacités parasites.

Modification des temps de contact.

Les capacités parasites rendent le cycle de fonctionnement plus complexe que celui dont il a été question. Une étude exacte nécessiterait la connaissance des lois de variation de toutes les capacités en fonction de x et ces lois ne pourraient être déterminées qu'expérimentalement. Des constructions graphiques permettraient alors de résoudre tous les problèmes.

Cependant, il importe de prévoir, déjà, les effets des capacités parasites et de déterminer, pour un avant-projet, les nouveaux calages à donner aux balais.

On pourra estimer que les valeurs de ces capacités parasites restent approximativement constantes ; les calculs ne supposent souvent qu'une variation limitée de la position du rotor et les résultats obtenus sont à peu près corrects dans ce domaine de variation.

Le terme c_i ne varie pratiquement pas à l'intérieur du cycle et subit seulement une modification à ses extrémités, alors qu'une famille de transporteurs est complètement sortie des producteurs. Le terme C_i , mesuré précédemment, correspond à cette valeur, mais on pourrait toujours faire une autre mesure, pour une position moins particulière du rotor. Le terme c_{sm} doit augmenter au fur et à mesure de la sortie des transporteurs, mais comme cette capacité est due pour une part importante à l'action constante des accessoires vis-à-vis de la masse, ses variations relatives provenant des secteurs mobiles sont suffisamment étouffées.

Quant à la résiduelle C_r , elle n'apparaît qu'aux extrémités du cycle ; enfin, le fait de supposer c_{sm} constant conduit également à poser $C_{em} = C_{sm}$, ces termes étant identiques.

1. — Modification du contact masse.

En l'absence de C. P., le contact masse devait s'effectuer au moment où la capacité utile c était minimum (soit, dans ce cas, nulle) donc au début du cycle. La charge précédemment détenue par les transporteurs sortant s'était entièrement écoulée.

Or, la famille des transporteurs considérés présente, même dans cette position, une capacité résiduelle C_r vis-à-vis des producteurs, une capacité C_{sm} vis-à-vis de la masse et C_t à l'égard de l'autre famille de transporteurs. Elle conserve donc une charge résiduelle, au potentiel kV_0 :

$$q_0 = C_r V_0 (k + 1) V + k_0 (C_t + C_{ms}).$$

Cette charge a déjà eu pour effet de diminuer la puissance utile de la machine.

De plus, si le contact masse se produisait à ce moment, elle donnerait lieu à la mise en jeu irréversible d'une énergie $\frac{1}{2} q_0 (kV_0)$ qui se dégraderait sous forme d'étincelle au collecteur. Cette énergie constituerait, d'une part une perte affectant le rendement de la machine, d'autre part un danger sérieux pour le collecteur.

Mais ce phénomène parasite peut être évité très simplement, en faisant travailler la charge q_0 . Il suffit pour cela de décaler le balai-masse dans le sens de la rotation, afin d'apporter un retard au contact. De cette manière, les transporteurs isolés, primitivement au potentiel kV_0 , pénètrent à nouveau entre les producteurs au potentiel $-V_0$. La charge q_0 fournit un travail moteur, et son potentiel diminue.

Lorsque ce potentiel s'est annulé, l'énergie potentielle de q_0 est également nulle et le contact masse peut s'établir. L'énergie $\frac{1}{2} q_0 (kV_0)$, autrefois dégradée en pure perte, est maintenant récupérée ; elle a fourni un travail moteur. La puissance électrique produite par la machine n'a pas augmenté mais la puissance mécanique absorbée a diminué, allégée du terme $\frac{1}{2} q_0 (kV_0)$; le rendement est devenu meilleur. Mais surtout, les étincelles au collecteur sont évitées, car aucune irréversibilité n'a eu lieu ; c'est là le point intéressant.

Il est curieux de remarquer ce procédé d'amélioration de la commutation par modification du temps de contact, et de le rapprocher de l'opération semblable effectuée sur les dynamos dépourvues de pôles de commutation. Dans les deux cas, on désire prévenir une irréversibilité qui dégraderait, dans le premier, une énergie électrostatique de la forme $\frac{1}{2} cv^2$ (v est le potentiel des transporteurs au moment du contact masse, égal, sans précautions spéciales, à la

tension aux bornes de la machine soit U ; c représente une capacité fictive, telle que $q_0 = cv$, q_0 étant la charge résiduelle portée), et dans le second, une énergie électromagnétique de la forme $\frac{1}{2} \mathcal{L} i^2$, $\mathcal{L}$ étant le coefficient de self-induction de la section d'induit en commutation, et i le courant dans cette même section.

Pour la machine électrostatique, le problème revient à établir un contact au moment où le potentiel v s'est annulé ; pour la dynamo, il faudrait rompre une liaison lorsque le courant i serait également nul. Cette annulation, dans ce dernier cas, est obtenue artificiellement en créant dans la section d'induit intéressée une f. é. m. s'opposant à la tension de réactance développée au moment de la rupture du contact. Un simple décalage des balais peut conduire à un tel résultat. Mais ce décalage, pour conserver une action optimum, devrait être fonction du courant débité ; il faut donc se contenter d'une amélioration moyenne. Dans une machine électrostatique, au contraire, le décalage optimum est fonction de la tension aux bornes ; comme cette tension est en général un paramètre constant, le décalage effectué d'une manière définitive convient à tous les régimes.

Ceci étant, le problème revient à trouver, dans le cas de notre machine électrostatique, le décalage à apporter au balai de masse, soit Δx_M , dans le sens de la rotation, et de telle manière que le contact se produise au moment précis où le potentiel des transporteurs s'est annulé (V. fig. 8).

Soit $c = C_0(1 - x)$ la capacité entre les producteurs et les transporteurs sortant dont le potentiel est v , fonction de x . Soit v' le potentiel des transporteurs entrant — qu'il faut chercher à annuler — dont la capacité vis-à-vis des producteurs est $C_0 - c = C_0x$. Par rapport à la masse, la capacité est $C_{em} = C_{sm}$. Près du point de commutation, $v > v' > 0$ et l'on peut écrire :

$$\begin{aligned} q_0 &= C_r V_0 (k + 1) + k V_0 (C_t + C_{sm}) \\ &= C_0 x (V_0 + v') - C_t (v - v') + C_{sm} v', \end{aligned}$$

d'où l'on tire :

$$v' = V_0 \frac{k(C_t + C_{sm} + C_r) + C_r + C_t \frac{v}{V_0} - C_0 x}{C_0 x + C_{sm} + C_t}.$$

En faisant apparaître les coefficients :

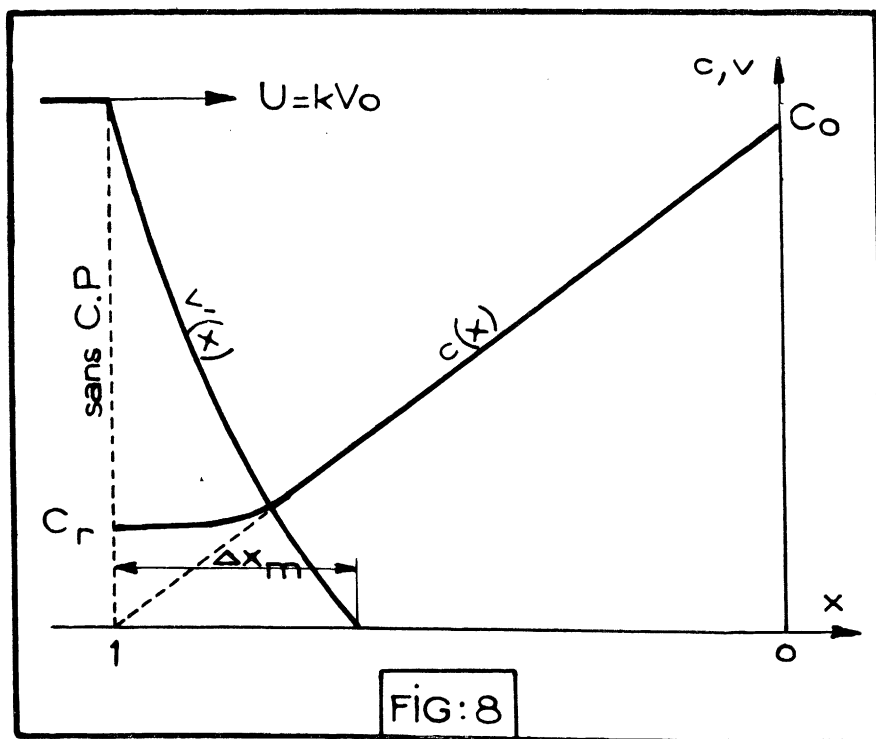
$$\alpha = \frac{C_0 - C_r}{C_0} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{2C_t + C_r + C_{sm}}{C_0},$$

$$v' = V_0 \frac{k\beta - \alpha + \frac{C_t}{C_0} \left[\frac{v}{V_0} - k \right] + 1 - x}{x + \frac{C_{sm} + C_t}{C_0}}.$$

Pour $x = \Delta x_M$ et en posant alors $v = v_M$, on doit avoir $v' = 0$.
Donc :

$$\Delta x_M = k\beta - \alpha + \frac{C_t}{C_0} \left[\frac{v_M}{V_0} - k \right] + 1.$$

La détermination rigoureuse de Δx_M suppose connue la variation



du potentiel v des transporteurs sortant, variation qui est elle-même fonction du potentiel v' et définie par :

$$C_0 V_0 - C_t k V_0 = c(V_0 + v) + C_t(v - v') + C_{sm}v,$$

ce qui donne :

$$\frac{v}{V_0} = \frac{x + \frac{C_t}{C_0} \left[\frac{v'}{V_0} - k \right]}{1 - x + \frac{C_{sm} + C_t}{C_0}},$$

soit, pour $x = \Delta x_M$ et $v' = 0$:

$$\frac{v_M}{V_0} = \frac{\Delta x_M - k \frac{C_t}{C_0}}{1 - \Delta x_M + \frac{C_{sm} + C_t}{C_0}}.$$

On aurait pu poser $v_M = \mu V_0$ et alors :

$$\Delta x_M = \frac{C_t}{C_0} (\mu - k) - (\alpha - \beta k) + 1,$$

équation possible à résoudre en se fixant approximativement μ , ou par approximations successives.

Afin de simplifier, on peut admettre pour v une variation indépendante des capacités parasites et de la forme $v = V_0 \frac{x}{1 - x}$. Dans ces conditions, en posant $P = \frac{C_t}{C_0} (k + 1) + (\alpha - \beta k) - 2$, le décalage Δx_M est donné par l'équation du second degré :

$$[\Delta x_M]^2 + P[\Delta x_M] + \frac{C_t}{C_0} - P - 1 = 0.$$

La seule racine à considérer est celle conduisant au plus faible retard dans le contact.

A noter que le retard exigé est une conséquence heureuse car il permet de séparer la fin de contact débit du commencement de contact masse. Les décharges qui, sans cela, arriveraient à se produire entre la touche du collecteur subitement réunie à la masse et le balai de débit qu'elle vient de quitter, pourront être évitées⁽¹⁹⁾. Le potentiel de cette touche ne diminue que progressivement, et la d. d. p. qu'elle présente avec le balai de débit n'augmente qu'au fur et à mesure de leur éloignement mutuel.

⁽¹⁹⁾ Si le retard demandé par les C. P. est trop petit pour éviter ces décharges, on peut l'augmenter facilement en disposant un écran-portefeuille porté au potentiel du débit, qui ralentit l'abaissement du potentiel des transporteurs.

Pour plus de rigueur, on pourrait retoucher le réglage du balai une fois la machine terminée, en s'aidant par exemple d'une construction graphique nécessitant la détermination expérimentale des lois de variations de chaque capacité. Une telle méthode serait fastidieuse et il est beaucoup plus logique, alors, de terminer le calage expérimentalement, la machine étant essayée à la pression ordinaire. Pour une petite machine, il suffirait de faire disparaître au mieux les étincelles au collecteur. Mais le meilleur réglage sera obtenu au moyen de l'oscillographe cathodique branché aux bornes d'une résistance insérée entre le balai de masse et la masse proprement dite. Au moment du contact, aucune pointe de courant ne devra être observée, ni dans un sens ni dans l'autre⁽²⁰⁾.

Une fois le contact masse établi, la charge s'effectue normalement et réversiblement. L'instant de rupture de ce contact n'est pas modifié, le temps de charge se trouve donc réduit.

2. — Modification du contact de débit.

Le problème est toujours de donner à la machine un certain coefficient de multiplication k . En l'absence de C. P., le contact de débit devait avoir lieu après une rotation correspondant au calage

$$x_c = \frac{k}{k+1}.$$

Maintenant, les C. P. ralentissent l'élévation du potentiel des transporteurs sortant, et le calage x_c doit être augmenté. Il devient x'_c .

Soit v le potentiel des transporteurs sortant à un instant quelconque. Nous avons déjà trouvé :

$$v = V_0 \frac{x + \frac{C_t}{C_0} \left[\frac{v'}{V_0} - k \right]}{1 - x + \frac{C_{sm} + C_t}{C_0}}.$$

Mais une fois le contact masse effectué pour la famille des transporteurs entrant, $v' = 0$ et le potentiel de l'autre famille s'élève alors suivant :

$$v = V_0 \frac{x - k \frac{C_t}{C_0}}{1 - x + \frac{C_{sm} + C_t}{C_0}}.$$

(20) Voir à ce propos 2^e partie, prototype n° 2, VI.

Lorsque $v = kV_0$, le contact de débit doit se produire et les transporteurs forment alors, avec leur position origine, un angle correspondant au calage x'_c cherché. On tire :

$$x'_c = \frac{k}{k+1} \left[1 + \frac{2C_t + C_{sm}}{C_0} \right],$$

soit, en fonction de l'ancien calage x_c :

$$x'_c = x_c \left[1 + \frac{2C_t + C_{sm}}{C_0} \right],$$

soit encore, en fonction des coefficients α et β :

$$x'_c = x_c [\alpha + \beta].$$

Ce nouveau calage $x'_c > x_c$ étant effectué, aucune irréversibilité n'apparaît lors du contact de débit. Le débit a lieu, maintenant, pendant un temps plus court.

3. — Période de débit. — Forme du courant.

Fin de contact.

A un instant quelconque, la charge q que possède encore la famille des transporteurs sortant est :

$$q = C_0 V_0 (k+1) (1-x) + C_t k V_0 + C_{sm} k V_0.$$

Une rotation, modifiant le calage rotor-stator de dx , entraîne la variation :

$$dq = C_0 V_0 (k+1) dx.$$

L'intensité débitée, soit i'_0 , est donc :

$$i'_0 = C_0 V_0 (k+1) \frac{dx}{dt} = i_0.$$

Les capacités parasites n'ont aucune influence sur la valeur du courant maximum débité par une machine, ce qui était évident à priori puisque nous avons fait l'hypothèse que ces C. P. demeuraient constantes. Donc, la diminution de puissance due aux capacités parasites se traduit physiquement par le fait que la période de débit doit être rendue plus courte, et à l'exclusion de toute diminution du courant maximum débité. Ceci n'est pourtant vrai que dans la mesure où les C. P. restent constantes.

Si le rotor tourne à la vitesse uniforme N et que la variation de la capacité utile soit linéaire au cours de la rotation, le rapport des temps de débit, avec et sans C. P., soit

$$\frac{t'}{t} = \frac{1 - x'_c}{1 - x_c} = 1 - k \frac{2C_t + C_{sm}}{C_0} < 1,$$

devrait donc représenter également le rapport des puissances $\frac{P'}{P} = \alpha - \beta k$. La différence entre les résultats provient de la capacité résiduelle C_r qui n'est qu'une valeur particulière de la capacité utile c . A la fin du débit, c ne peut poursuivre sa variation linéaire et tend vers la valeur C_r , la charge expulsée dq , donc l'intensité du courant débité, tendant vers zéro. L'intensité diminue, par conséquent, en fin de cycle.

On avait d'ailleurs $\frac{t'}{t} = [\alpha - \beta k] + \frac{C_r}{C_0} (k + 1)$, au lieu de $\frac{P'}{P} = [\alpha - \beta k]$. Pour $C_r = 0$, on retrouve $\frac{P'}{P} = \frac{t'}{t}$.

Le débit ne se fait plus sous forme de dents de courant rectangulaires d'intensité i_0 et de durée $\frac{1}{2Nn} \cdot \frac{1}{k+1}$. Les dents réelles, de même hauteur, sont plus brèves et s'infléchissent en fin de course (V. fig. 9).

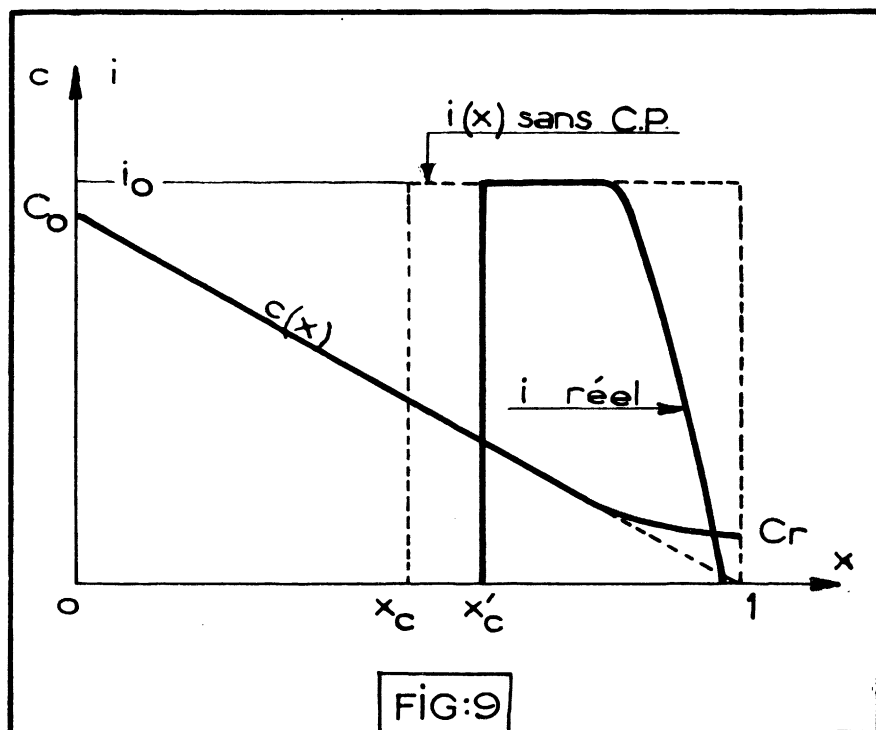
II. — FONCTIONNEMENT A POTENTIEL D'EXCITATION NON FIXE

Pour maintenir le potentiel des producteurs constant, comme nous l'avons supposé, il faudrait en principe disposer en parallèle avec eux un condensateur de forte capacité. Cette solution étant peu commode, il convient d'examiner comment le fonctionnement de la machine est modifié si la charge des producteurs reste constante, leur potentiel étant soumis à des fluctuations dues au fonctionnement lui-même.

La charge des producteurs, soit Q_p en valeur absolue, reste en effet à peu près constante car l'excitatrice a un débit réduit et les fluctuations qui interviennent sont très rapides. L'élément essentiel entrant alors en jeu est la capacité C_{pm} de tout le système producteur vis-à-vis de la masse. Cette capacité n'est nullement parasite mais

apparaît au contraire comme indispensable, tout au moins dans une certaine mesure. Nous poserons $\frac{C_{pm}}{C_0} = a$ et plus a sera grand, plus le fonctionnement se rapprochera du cas étudié précédemment (potentiel d'excitation constant).

Nous appellerons $-V_x$ le potentiel des producteurs à un instant quelconque, correspondant à la position relative rotor-stator définie



par le calage x . Pour $x=0$, on a $c=C_0$, et nous poserons à ce moment $V_x=V_0$. V_0 est le potentiel normal d'excitation, qui était établi d'une manière constante dans le cas précédent mais qui, maintenant, va subir des fluctuations.

Remarque : Si pour $x=0$ on a $V_x=V_0$ = ancienne valeur de l'excitation constante, il est évident que la puissance d'une machine donnée n'est pas modifiée par le fait que le potentiel d'excitation subit des fluctuations, et elle reste identique à ce qu'elle serait si un condensateur de forte capacité, branché sur les producteurs, main-

tenait ce potentiel constant. En effet, la charge mise en jeu pendant un temps donné n'a pas changé, les états extrêmes du cycle restant les mêmes. D'autre part, cette charge se trouve toujours expulsée sous le même potentiel kV_0 .

Donc, la puissance reste constante, que la machine, affectée ou non de capacités parasites, travaille à potentiel d'excitation fixe ou variable.

Au cours du cycle de fonctionnement, le potentiel des producteurs ne peut que diminuer et à aucun moment la d. d. p. entre secteurs producteurs et transporteurs ne dépasse le maximum

$$V_0 + U = V_0(k + 1).$$

Il n'y a donc aucun inconvénient à ce que pour $x = 0$, on fasse $V_x = V_0$.

Étudions maintenant le fonctionnement plus en détail.

A. — Machine idéale sans capacités parasites.

La charge Q_p des producteurs, que l'on suppose constante, est telle que : — $Q_p = C_{pm}V_0 + C_0V_0$.

Le potentiel des transporteurs sortant s'élève suivant une loi différente de l'ancienne et il faut, en conséquence, modifier le calage des balais de débit afin que, au moment du contact, ce potentiel ait atteint exactement la valeur kV_0 .

D'autre part, le courant débité n'est plus constant. La charge initiale des producteurs — $Q_p = (C_{pm} + C_0)V_0$ restant constante, on a, à un moment quelconque (les transporteurs sortant étant alors au potentiel v , tandis que l'autre famille est déjà à la masse) :

$$-Q_p = c(V_x + v) + C_{pm}V_x + (C_0 - c)V_x.$$

D'où l'on tire :

$$V_x = V_0 - \frac{v}{a + 1} [1 - x].$$

Rappelons que

$$a = \frac{C_{pm}}{C_0}.$$

Pour $x = 0$, $v = 0$ et $V_x = V_0$. De même, pour $x = 1$ (transporteurs sortis), on retrouve $V_x = V_0$. Entre ces deux positions extrêmes, $V_x < V_0$.

1. — Période d'élévation de potentiel. Contact débit.

On a, durant cette période :

$$V_x + v = \frac{C_0 V_0}{c}, \quad \text{donc} \quad v = V_0 \frac{1}{1-x} - V_x.$$

En reportant cette valeur dans l'expression donnant le potentiel des producteurs :

$$V_x = V_0 \frac{a}{a+x} \leq V_0.$$

V_x diminue lorsque x augmente, depuis V_0 jusqu'au minimum obtenu au moment du contact de débit. Quant au potentiel des transporteurs sortant, il a pour valeur :

$$v = V_0 \frac{x}{1-x} \cdot \frac{a+1}{a+x}.$$

Dans le fonctionnement précédent, à potentiel d'excitation constant, on avait trouvé :

$$v = V_0 \frac{x}{1-x}.$$

Le rapport entre ces deux expressions, soit $\frac{a+1}{a+x} \geq 1$, montre que l'élévation de potentiel des transporteurs sortant se fera plus rapidement que dans le cas de l'excitation à potentiel constant. En effet, $a > 0$ et $0 < x < 1$. On peut donc prévoir la nécessité d'une *avance* à donner au contact de débit.

Soit x_{cv} le nouveau calage du balai de débit assurant le début de ce contact. Au moment du contact, on devra avoir $v = kV_0$. Donc :

$$k = \frac{x_{cv}}{1-x_{cv}} \cdot \frac{a+1}{a+x_{cv}}.$$

La valeur de x_{cv} , définissant le calage cherché, est alors donnée par l'équation du second degré :

$$k[x_{cv}]^2 + [a(k+1) - (k-1)][x_{cv}] - ak = 0.$$

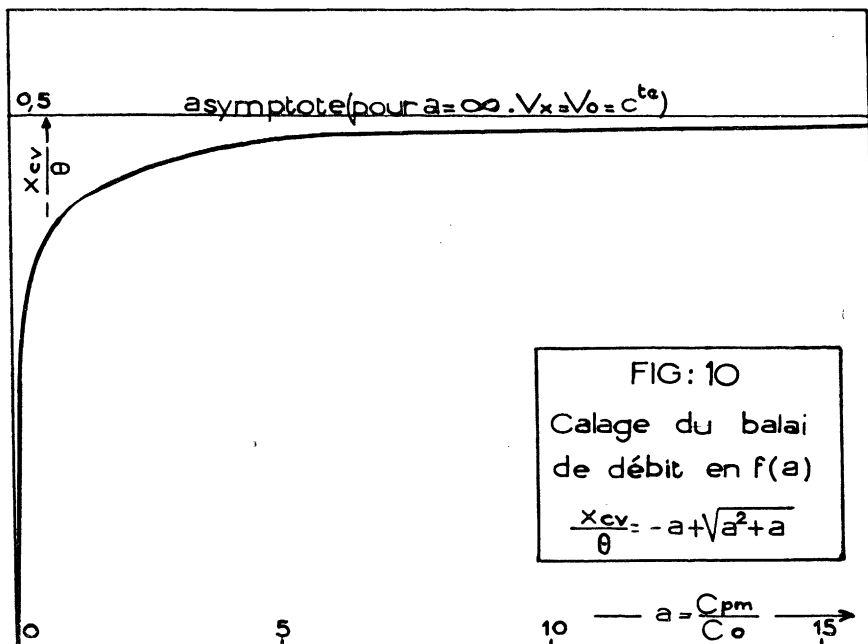
Pour $k = 1$, il reste

$$[x_{cv}]^2 + 2a[x_{cv}] - a = 0.$$

La seule racine convenant au problème est alors :

$$x_{cv} = -a + \sqrt{a^2 + a}.$$

La figure 10 montre la variation du calage x_{cv} qu'il convient de donner au balai de débit lorsque le coefficient a varie. Cette fonc-



tion est toujours croissante. Pour $a = 0$, $x_{cv} = 0$ et pour $a = \infty$, x_{cv} tend vers la limite supérieure $\frac{1}{2}$.

Interprétons ces résultats.

Pour $a = 0$, l'élévation du potentiel des transporteurs sortant se ferait brusquement, dès la rupture du contact terre. Le terme C_{pm} intervient heureusement, et représente une capacité utile. Cette capacité ne doit pas être trop petite. Néanmoins, le calage x_{cv} prend une valeur acceptable dès que a n'est plus très petit, et supérieur par exemple à 0,5. Dans cette région, en effet, la croissance de la fonction est très rapide.

D'autre part, dans l'hypothèse où $V_x = V_0 = C^{te}$, le calage était $x_c = \frac{k}{k+1}$, donc $x_c = \frac{1}{2}$ si $k = 1$. Le rapport

$$\frac{x_{cv}}{x_c} = 2[-a + \sqrt{a^2 + a}]$$

tend bien vers l'unité lorsque a augmente indéfiniment, ce qui est évident. En effet, lorsque C_{pm} augmente, le fonctionnement étudié, à potentiel d'excitation variable, tend vers le premier fonctionnement à potentiel fixe et $x_{cv} \rightarrow x_c = \frac{1}{2}$.

Si C_{pm} est de l'ordre de grandeur de C_0 , le décalage relatif à effectuer, par rapport à l'ancienne position $x_c = \frac{1}{2}$, est d'environ 20 pour 100, pour $C_{pm} = 10 C_0$, il n'est déjà plus que de 2,5 pour 100 et pour $C_{pm} = 100 C_0$, il devient de l'ordre de 0,5 pour 100. Pour notre prototype n° 2 (5 plateaux), $a = 0,25$ et le décalage atteindrait 40 pour 100. Mais les C. P. modifient grandement tous ces résultats.

2. — Période de débit. Forme du courant.

Pendant le débit, on a toujours $v = kV_0 = C^{te}$.

Le potentiel des producteurs varie alors suivant :

$$V_x = V_0 \left[1 - \frac{k}{a+1} (1-x) \right].$$

Donc, après avoir passé par un minimum et sitôt le contact de débit effectué, V_x croît à nouveau, linéairement cette fois en fonction de x , et pour $x = 1$, on retrouve $V_x = V_0$.

A un instant quelconque, la position rotor-stator est définie par le calage x et la charge restant sur les transporteurs est :

$$q = C_0(1-x)(V_x + kV_0) = C_0V_0(1-x) \left[k+1 - \frac{k}{a+1} (1-x) \right].$$

Donc, une variation dx entraîne la charge (en valeur absolue) :

$$dq = \left[C_0V_0(k+1) - C_0V_0 \frac{2k}{a+1} (1-x) \right] dx.$$

Le courant i débité à cet instant par la machine est donc, si l'on suppose que c varie linéairement :

$$i = \frac{dq}{dt} = 2C_0V_0(k+1)Nn - 2C_0V_0 \frac{2k}{a+1} (1-x)Nn.$$

Or, le premier terme, soit $2C_0V_0(k+1)Nn$ représente le courant constant i_0 débité dans le fonctionnement à potentiel d'excitation fixe (voir I, A, § 3).

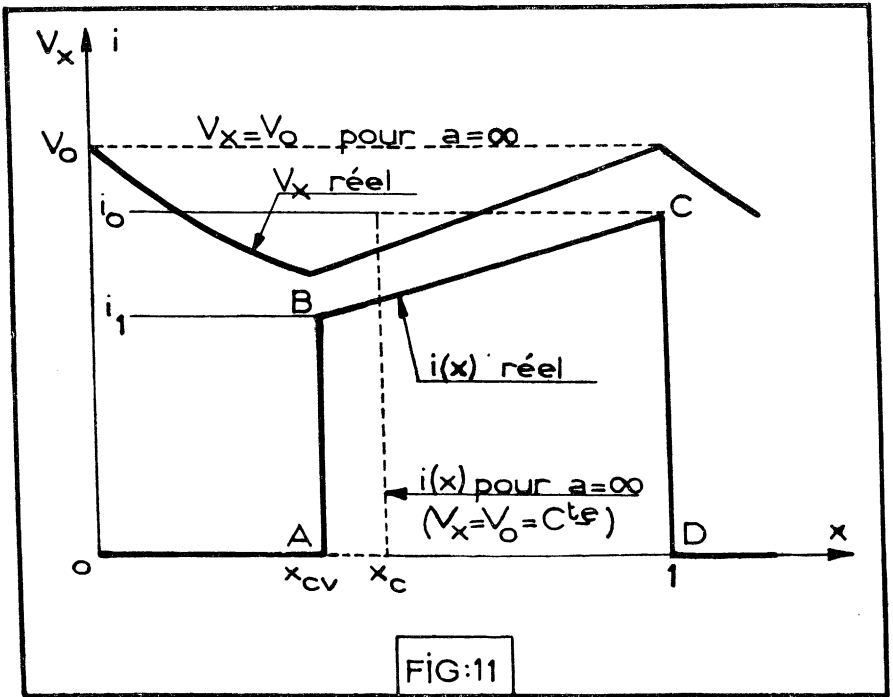
Quant au deuxième terme, il peut encore s'écrire :

$$2C_0V_0(k+1)Nn \cdot \frac{2k}{k+1} \cdot \frac{1}{a+1} (1-x) = i_0 \left[\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{1}{a+1} (1-x) \right]$$

Par conséquent, le courant débité maintenant est de la forme :

$$i = i_0 \left[1 - \frac{2k}{k+1} \cdot \frac{1}{a+1} (1-x) \right].$$

L'intensité du courant n'est donc plus constante durant la période de débit, mais croît sans cesse linéairement depuis une valeur mini-



mum i_1 (pour $x = x_{cv}$) jusqu'à l'ancienne valeur i_0 atteinte seulement en fin de débit, pour $x = 1$ (voir fig. 11).

Là encore, pour que i devînt constant, il faudrait $a = \infty$. Pratiquement, si C_{pm} est très supérieur à C_0 , on peut se rapprocher d'un débit constant. La fluctuation maximum relative du courant débité est :

$$\varepsilon = \frac{i_0 - i_1}{i_0} = \frac{2k}{k+1} \cdot \frac{1}{a+1} [1 - x_{cv}].$$

Si $k = 1$, donc $x_{cv} = -a + \sqrt{a^2 + a}$, cette fluctuation devient :

$$\varepsilon\% = \left[1 - \sqrt{\frac{a}{a+1}} \right] \cdot 100.$$

Si C_{pm} est de l'ordre de C_0 , la fluctuation est de 30 pour 100.

Si C_{pm} était seulement le dixième de C_0 , elle atteindrait 70 pour 100.

Mais pour $a = 10$, elle est réduite à 5 pour 100 et enfin pour $a = 100$, elle deviendrait négligeable (0,5 pour 100).

REMARQUES. — 1. La valeur du courant débité est, sauf en fin de cycle, inférieure à ce qu'elle était dans le premier type de fonctionnement ($V_x = C^{te}$). Mais le débit a lieu durant un temps plus grand puisque $x_{cv} < x_c$, la fin du contact, par ailleurs, étant conservée. C'est pourquoi, finalement, la puissance de la machine n'est pas modifiée, comme nous l'avons dit, la valeur moyenne du courant demeurant constante.

Si $k = 1$, il est facile de vérifier cette propriété en calculant les surfaces des courbes de débit $i(x)$, surfaces proportionnelles aux quantités d'électricité mises en jeu et aux puissances. Dans l'ancien type de fonctionnement, la dent rectangulaire a pour surface $\frac{1}{2} i_0$. Maintenant, elle devient un trapèze ABCD de surface

$$\frac{1}{2} (1 - x_{cv}) (i_0 + i_1) = \frac{1}{2} i_0.$$

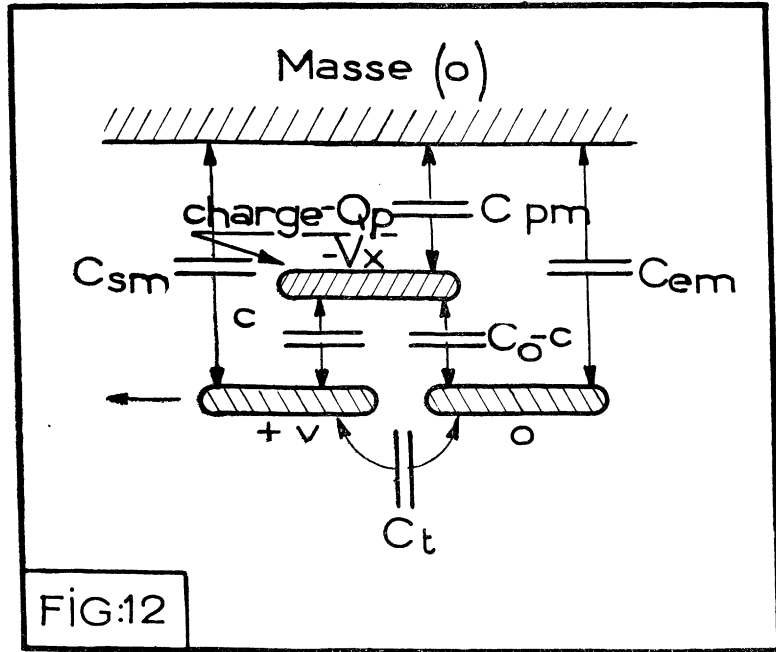
2. Dans le cas où la forme du courant débité importe peu, il est inutile d'ajouter en parallèle sur l'excitation un condensateur nécessairement encombrant, puisque la puissance de la machine et son rendement ne varient pas. Il suffit donc de prévoir le réglage du contact de débit en conséquence.

Dans le cas où l'on désirerait un courant constant, il faudrait non seulement le niveler pendant la période de débit, mais encore combler les périodes sans débit, entre les dents de courant. La solution rationnelle consisterait alors à caler sur l'arbre de la machine deux rotors identiques mais décalés entre eux d'un demi-pas polaire. Leurs fonctions se superposeraient et ils débiteraient chacun à leur tour, en créant un courant sans discontinuités. Dans ces conditions, de plus, les fluctuations du potentiel des producteurs (le

système de producteurs est commun électriquement aux deux rotors) seraient très atténuées, les rotors compensant leurs effets. Le courant débité serait approximativement constant sans qu'il soit utile d'ajouter un condensateur extérieur.

B. — Machine avec capacités parasites.

La puissance, là encore, n'est pas modifiée par le fait que le



potentiel d'excitation varie. La charge initiale des producteurs, pour $x = 0$, est :

$$-Q_p = C_{pm} V_0 + C_0 V_0 + C_r (V_0 + k V_0).$$

A un instant quelconque, cette charge se retrouve sous la forme :

$$-Q_p = C_{pm} V_x + c(V_x + v) + (C_0 - c)V_x.$$

Toujours en posant $\frac{C_{pm}}{C_0} = a$, on en déduit :

$$V_x = V_0 \left[1 + \frac{C_r}{C_0} \cdot \frac{k+1}{a+1} \right] - v \frac{1-x}{1+a}.$$

1. — Période d'élévation de potentiel. Contact débit.

La charge Q_0 des transporteurs se conservant, on a :

$$Q'_0 = C_0 V_0 - k C_t V_0 = C_0(1 - x)(V_x + v) + C_t v + C_{sm} v,$$

d'où :

$$v = \frac{V_0 \left(1 - k \frac{C_t}{C_0}\right) - V_x(1 - x)}{1 - x + \frac{C_t + C_{sm}}{C_0}}.$$

En remplaçant V_x par sa valeur calculée précédemment, on détermine la fonction $v(x)$. Le contact de débit doit se produire pour $v = kV_0$, ce qui fixe la valeur particulière de x , soit x'_{cv} , donnant le calage exact du balai de débit.

x'_{cv} est tiré de l'équation du second degré :

$$k[x'_{cv}]^2 + \left[a(k+1) - (k-1) + \frac{C_r}{C_0}(k+1) \right] x'_{cv} - \left[k(a+1) \frac{2C_t + C_{sm}}{C_0} + \frac{C_r}{C_0}(k+1) + ak \right] = 0,$$

soit, en introduisant à nouveau les coefficients α et β :

$$k[x'_{cv}]^2 + [2 + (k+1)(a-\alpha)] x'_{cv} - [k(a+1)\beta + (ak-1)\alpha + 1] = 0.$$

En l'absence de C. P., $\alpha = 1$, $\beta = 0$, et l'on retrouve bien l'équation déterminée au paragraphe précédent.

Là encore, l'effet des capacités parasites est de ralentir l'élévation du potentiel des transporteurs sortants. Le contact de débit devra donc être décalé dans le sens de la rotation, car $x'_{cv} > x_{cv}$ ⁽²²⁾.

2. — Période de débit.

Le courant débité est, cette fois, de la forme :

$$i' = \frac{dq}{dt} = 2C_0 V_0 N n \left[(k+1) - \frac{2k}{a+1} + \frac{C_r}{C_0} \cdot \frac{k+1}{a+1} + \frac{2k}{a+1} x \right].$$

⁽²²⁾ Dans notre deuxième machine ($p=5$ plateaux), le calage x'_{cv} correspond à un angle $\psi'_{cv} = 16^{\circ},5$ alors qu'en l'absence de capacités parasites on aurait eu $\psi_{cv} = 9^{\circ}$ seulement (voir le tableau n° 3).

Or, $2C_0 V_0 Nn(k+1) = i_0$. Donc :

$$i' = i_0 \left[1 + \frac{C_r}{C_0} \cdot \frac{1}{a+1} - \frac{2k}{(k+1)(a+1)} (1-x) \right].$$

L'expression $i_0 \left[1 - \frac{2k}{(k+1)(a+1)} (1-x) \right] = i$, valeur du courant débité en l'absence de capacités parasites.

Finalement :

$$i' = i + i_0 \left[\frac{C_r}{C_0} \cdot \frac{1}{a+1} \right] = i + i_0 \left[\frac{1-x}{1+a} \right].$$

La C. P. C_r aurait donc pour effet de déplacer parallèlement à elle-même et dans le sens d'une augmentation, la crête de la dent trapézoïdale du courant débité. Cependant, nous avons supposé les C. P. constantes; en fait, cette crête ne resterait pas rectiligne, s'infléchirait et, pour $x=1$, rejoindrait comme précédemment la valeur i_0 qui ne peut être dépassée. La résiduelle C_r , en effet, est une valeur particulière de c , n'apparaissant qu'en fin de cycle.

De toute façon, la puissance de la machine reste encore identique à ce qu'elle serait dans le cas d'un fonctionnement à potentiel d'excitation fixe.

III. — COLLECTEUR

Les modifications déterminées précédemment, à faire subir à l'instant des débuts de contact masse et débit, ne peuvent se réaliser par un simple décalage des balais sur le collecteur. Il convient, en fait, de réaliser une modification du temps que dure le contact, la fin de celui-ci restant toujours invariable. Ce sont donc les touches du collecteur qui devraient être adaptées à l'angle durant lequel le contact doit avoir lieu. Le réglage, par ce procédé, serait compliqué, et des problèmes d'isolement se poseraient, deux touches consécutives étant très rapprochées.

Comme il s'agit d'ajuster indépendamment le début et la fin de chaque contact, il est normal, par contre, de doubler chaque balai. Le balai « de début » commencera à entrer en jeu, seul, et permettra le réglage de l'instant de contact. Avant qu'il n'ait cessé de toucher, le balai « de fin » entrera en jeu à son tour et, après une période de recouvrement, le balai de début se trouvera mis hors de cause. Seul, le second assurera la période de fin de contact.

REMARQUES. — Ce système du double balai peut être indispensable pour d'autres raisons :

a) Il permet d'utiliser des touches de collecteur dont l'angle est très inférieur à ce qu'il aurait dû être sans cela, par suite de l'action cumulative dans l'espace et dans le temps des deux balais préposés à une même fonction.

En conséquence, deux touches consécutives pourront être suffisamment éloignées pour qu'un isolement convenable soit assuré entre elles.

b) D'autre part, une seule série de touches pourra assurer à la fois le contact masse et le contact débit, bien que les durées respectives de chacun de ces contacts soient différentes.

L'action cumulative des deux balais permet une marge relativement grande de réglage. Il suffit que leur écartement ne devienne pas supérieur à la largeur donnée aux touches, afin d'éviter toute interruption de contact.

Dans le cas où tous les secteurs transporteurs d'une même famille sont réunis électriquement entre eux, il peut être suffisant d'employer deux couples de balais, l'un affecté à la masse, l'autre au débit. Sinon, il faudrait autant de couples qu'il serait nécessaire pour assurer la commutation simultanée de tous les transporteurs.

Ces couples de balais peuvent être disposés dans une région quelconque, au long du collecteur, suivant les facilités de logement. Une machine à $2n$ pôles comporte en effet, à ce point de vue, n régions identiques ; les calages dont il a été question sont définis par rapport à l'un quelconque des n producteurs.

CHAPITRE VI

FONCTIONNEMENT. — DIVERS

1. — Conditions de fonctionnement. Résistance de charge optimum.

Quel que soit le récepteur sur lequel une génératrice électrostatique débite, il est toujours possible de définir, au point de fonctionnement, une certaine résistance de charge dans laquelle se dissipe l'énergie créée. Or, cette énergie, pour une machine donnée, fonctionnant à vitesse constante, est essentiellement fonction de la résistance de charge.

Tous les calculs précédents font intervenir l'important facteur de multiplication k . Ce facteur, tel qu'il a été défini, est une valeur en quelque sorte géométrique, ou « statique », ne dépendant que du calage du balai de débit. D'autre part, on a supposé que la machine débitait sur un circuit aux bornes duquel règne précisément la tension $U = kV_0$. Le contact de débit a lieu sans irréversibilité, et les constantes du circuit extérieur sont en somme adaptées au facteur k , ou inversement. En l'absence d'autres génératrices, cette condition suppose le circuit extérieur présentant une résistance telle qu'elle permette le fonctionnement ci-dessus et la mise en jeu intégrale de la puissance maximum calculée. En d'autres termes, le débit de la machine est lié à sa tension aux bornes par une relation immuable, provenant de la constitution même du générateur ; la relation entre ces deux quantités doit d'autre part satisfaire, par rapport au circuit extérieur, à la loi d'Ohm. La puissance débitée est donc fonction de la résistance de charge de ce circuit extérieur, et l'on prévoit déjà l'existence d'une résistance optimum qui, s'adaptant exactement à la caractéristique interne de la machine (voir plus loin la notion de résistance interne) permettra à celle-ci

de donner le maximum de puissance, déterminé dans les calculs précédents.

Si la résistance de charge ne présente pas cette valeur optimum, la tension aux bornes ne peut plus se fixer à la valeur $U = kV_0$ et la puissance mise en jeu est inférieure. La machine présente donc, associée à un certain circuit de débit, un facteur de multiplication réel ou « dynamique » soit k_1 , différent de k . En conséquence, le commencement du débit ne se fait plus réversiblement. On peut cependant, au moyen des systèmes régulateurs dont il est question au § 3, se préserver d'un tel inconvénient. Le coefficient de multiplication statique peut être automatiquement modifié et sans cesse rendu égal au facteur de multiplication dynamique exigé par la charge extérieure. Dans ces conditions, les irréversibilités sont supprimées, mais la puissance débitée reste toujours, évidemment, fonction du facteur de multiplication ainsi créé, donc de la résistance extérieure du circuit.

Le circuit extérieur est supposé assez capacitif pour que la tension à ses bornes ne varie pas sensiblement entre deux périodes de débit consécutives de la machine. Même avec une machine ordinaire — sans les deux rotors décalés — il est facile de réaliser cette condition.

— Nous allons déterminer la puissance débitée par une génératrice donnée, en fonction de sa résistance de charge.

Soit une machine à $2n$ pôles, de capacité utile maximum C_0 et tournant à la vitesse constante de N t/sec. Le circuit de débit fixe le facteur de multiplication dynamique à la valeur k_1 , et l'on peut, automatiquement, régler le facteur statique k à cette valeur, afin de se préserver des irréversibilités.

Quelle que soit la résistance de charge, on règle l'excitation à la valeur maximum au-dessus de laquelle il y aurait danger de décharge entre les électrodes de la machine, *c'est-à-dire que l'on maintient constamment le champ électrique utile, inter-électrodes, à sa valeur maximum de sécurité soit E_0* , précédemment adoptée. Dans ces conditions, quel que soit le régime de charge, on obtiendra la puissance maximum compatible avec ce régime et par conséquent seule, la résistance de charge constituera une variable dont sera fonction la puissance.

Si V est alors le potentiel d'excitation, la d. d. p. maximum entre les secteurs fixes et mobiles est $V(k_1 + 1)$ ⁽²³⁾.

⁽²³⁾ Pour une machine ne comportant pas la régulation du contact de débit, ceci ne serait vrai que dans le cas d'une résistance de charge trop forte, conduisant à avoir $k_1 > k$. Dans l'éventualité contraire, si $k_1 < k$, le potentiel des transporteurs sortant atteindra,

Si e est l'écartement entre secteurs, on a donc constamment : $V(k_1 + 1) = E_0 e$. La tension aux bornes de la résistance de charge R a pour valeur :

$$U = k_1 V = (E_0 e) \frac{k_1}{k_1 + 1}. \quad (\text{I})$$

Quant à la puissance débitée par la machine et dissipée dans R , elle est, I étant l'intensité du courant :

$$P = k_1 VI = 2k_1 V^2 C_0 N n = 2(E_0 e)^2 C_0 \cdot N \cdot n \frac{k_1}{(k_1 + 1)^2}, \quad (\text{II})$$

soit, en tenant compte des capacités parasites :

$$P' = 2(E_0 e)^2 C_0 \cdot N \cdot n \frac{k_1}{(k_1 + 1)^2} [\alpha - \beta k_1]. \quad (\text{III})$$

En éliminant k_1 entre (I) d'une part, (II) et (III) d'autre part, on détermine la fonction $P(U)$:

$$\begin{array}{ll} P = 2C_0 N n \cdot U [(E_0 e) - U] & \text{sans C. P.} \\ \text{et } P' = 2C_0 N n \cdot U [\alpha(E_0 e - U) - \beta U] & \text{avec C P.} \end{array}$$

Nous poserons :

$$\boxed{2C_0 N n = \Omega}.$$

Ce terme représente la capacité utile mise en jeu par seconde, autrement dit, la vitesse de variation de la capacité utile. En U. E. S. C. G. S., Ω s'exprimera en cm/sec.

Les puissances P et P' passent par un maximum respectivement pour $U = \frac{E_0 e}{2}$ et $U = \frac{E_0 e}{2} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$. Ceci conduit aux facteurs de multiplication optima, déjà déterminés d'ailleurs :

$$k_0 = 1 \quad \text{et} \quad k'_0 = \frac{\alpha}{\alpha + 2\beta}.$$

Mais nous supposons précisément que le facteur de multiplication a une valeur quelconque, fonction de la résistance de charge R . La

avant le contact débit, une valeur $kV > k_1 V$, la d. d. p. entre secteurs étant alors $V(k + 1) > V(k_1 + 1)$ et il pourra y avoir décharge disruptive entre ces secteurs.

Pour une machine possédant la régulation du contact de débit (voir § 3) le raisonnement reste vrai dans tous les cas. Le facteur statique k est, par principe même, égal au facteur dynamique k_1 .

puissance mise alors en jeu et dissipée dans cette résistance a pour valeur $\frac{U^2}{R}$. Donc $U = \sqrt{\frac{P}{R}}$, c'est-à-dire :

$$U = E_0 e \cdot \frac{R\Omega}{1 + R\Omega} \quad \text{sans C. P.}$$

$$U = E_0 e \cdot \frac{\alpha R\Omega}{1 + R\Omega(\alpha + \beta)} \quad \text{avec C. P.}$$

D'où enfin les puissances en fonction des résistances de charge :

$$P = (E_0 e)^2 \cdot \frac{R\Omega^2}{(1 + R\Omega)^2} \quad \text{sans C. P.}$$

$$P' = (E_0 e)^2 \cdot \frac{\alpha^2 R\Omega^2}{[1 + R\Omega(\alpha + \beta)]^2} \quad \text{avec C. P.}$$

RÉSISTANCE DE CHARGE OPTIMUM :

a) *Sans capacités parasites* : la dérivée $\frac{dP}{dR} = (E_0 e)^2 \frac{1 - R\Omega}{(1 + R\Omega)^3} \Omega^2$ s'annule pour $R\Omega = 1$. D'où la résistance de charge optimum :

$$R_0 = \frac{1}{\Omega} = \frac{1}{2C_0 N n}.$$

La résistance de charge optimum est égale à l'inverse de la vitesse de variation de la capacité utile présentée par la machine.

(En U. E. S., R a bien les dimensions de l'inverse d'une vitesse, C_0 étant exprimée en cm). Si C_0 est en μF , on obtient directement R en mégohms. La résistance de charge optimum, pour une machine donnée, est donc inversement proportionnelle à sa vitesse de rotation.

b) *Avec capacités parasites* : on obtient alors

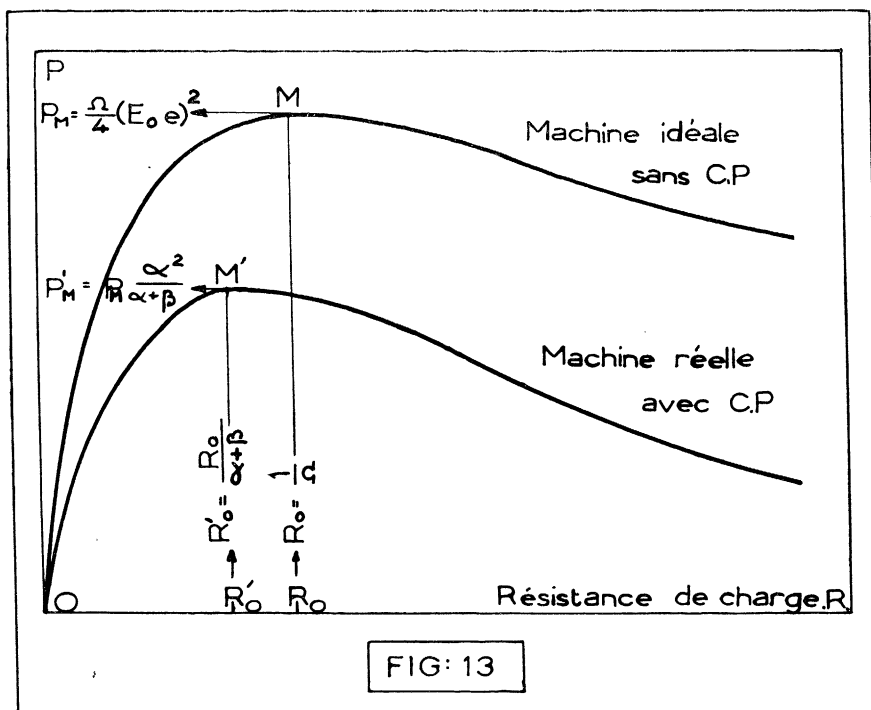
$$R'_0 = \frac{1}{\Omega(\alpha + \beta)}.$$

Donc $R'_0 = \frac{R_0}{\alpha + \beta} \leq R_0$ car $\alpha + \beta = 1 + \frac{2C_t + C_{sm}}{C_0} \geq 1$ et de même

$$P'_{\max} = P_{\max} \cdot \frac{\alpha^2}{\alpha + \beta} \leq P.$$

Les capacités parasites ont pour effet de diminuer la résistance de charge optimum d'une machine.

La figure 13 représente l'allure des fonctions $P(R)$ et $P'(R)$. Ces fonctions sont semblables à celles que l'on rencontre en électrotechnique, lorsque l'on fait une étude analogue des générateurs



quelconques. Au paragraphe suivant, nous généraliserons d'ailleurs ces considérations en définissant une résistance interne fictive, propre aux machines électrostatiques.

Si la résistance de charge R diffère de la résistance optimum R_0 d'une valeur ΔR , la puissance fournie par la machine est seulement

$$P = P_{\max.} \cdot 4 \frac{1 + \frac{\Delta R}{R_0}}{\left(2 + \frac{\Delta R}{R_0}\right)^2} = P_{\max.} \cdot 4 \frac{\frac{R}{R_0}}{\left(1 + \frac{R}{R_0}\right)^2}.$$

Pour $R = 2R_0$, $P = \frac{8}{9} P_{\max.}$. Si $R = 1,2 R_0$, la perte en puissance est inférieure à 1 %.

2. — Caractéristique en charge d'une génératrice.

Résistance interne fictive. — Régulation du fonctionnement.

Par nature même du phénomène qu'elle met en jeu, une génératrice électrostatique posséderait des caractéristiques de fonctionnement peu conformes aux besoins ordinaires. Si la tension de fonctionnement doit rester constante, une machine donnée ne peut adapter la puissance qu'elle met en jeu à la puissance demandée par le circuit extérieur, le fonctionnement naturel se faisant à charge transportée — donc intensité débitée — également constante.

Si la puissance demandée varie, il conviendra de faire varier artificiellement et en conséquence le débit de la machine, afin d'obtenir l'adaptation sous tension constante.

Il ne faut pas songer à obtenir cette régulation par une variation de la vitesse de rotation. Cette vitesse, comme la tension, est en général constante et l'inertie de la partie tournante s'opposerait à toute régulation immédiate.

Par contre, on pourrait très bien réduire en quelque sorte la capacité réellement utile de la machine, en modifiant le temps de contact des balais sur le collecteur. Supposons, par exemple, que la fin du contact masse soit retardée. Lorsqu'une famille de transporteurs commence à sortir des producteurs, la liaison à la masse n'est pas rompue immédiatement. Une partie de la charge $C_0 V_0$ prise auparavant s'écoule réversiblement et la rupture du contact masse doit avoir lieu lorsque la charge restante est telle que l'intensité du courant auquel elle donnera naissance soit adaptée à la consommation. Par conséquent, la capacité utile figurant dans l'expression de la puissance serait la capacité transporteurs-producteurs au moment de la rupture du contact masse. Parallèlement, il conviendrait de modifier le contact de débit dont le commencement devrait être retardé.

On pourrait imaginer une quantité de systèmes régulateurs, modifiant correctement le calage des balais de fin du contact masse d'une part, et de commencement de débit d'autre part, ceci en fonction de la puissance à fournir.

Ce procédé de décalage, essentiellement mécanique, ne serait pas sans inconvénients. Son inertie, en particulier, serait notable.

Il est donc préférable de ne lui confier qu'un rôle d'approximation, obtenu par exemple manuellement, et de répondre aux variations accidentelles et incessantes du régime par un système statique. C'est un tel dispositif auquel nous allons aboutir.

Caractéristique en charge U(I). — Résistance intérieure fictive.

Si le potentiel d'excitation était constant, la tension aux bornes partirait de zéro (court-circuit) et tendrait à monter indéfiniment lorsque la résistance de charge augmenterait. Elle ne serait limitée que par les décharges qui ne manqueraient pas de se produire entre les électrodes de la machine.

Mais, dans l'étude précédente de la fonction $P(R)$, nous avons supposé que le potentiel d'excitation V était tel que le champ inter-électrodes conservait une valeur constante E_0 , quelle que soit la charge. Moyennant quoi, nous avons trouvé la relation entre la puissance débitée et dissipée dans la résistance de charge, et la tension aux bornes de cette résistance.

$$\begin{array}{ll} \text{Soit :} & P = \Omega U [E_0 e - U] \quad \text{sans C. P.} \\ & P' = \Omega U [\alpha (E_0 e - U) - \beta U] \quad \text{avec C. P.} \end{array}$$

Or, I étant l'intensité du courant débité (valeur moyenne), on a $P = UI$, d'où l'on tire la fonction $U(I)$ caractérisant le fonctionnement en charge de la génératrice :

$$U = E_0 e - \frac{1}{\Omega} I = U_0 - rI \quad \text{sans C. P.}$$

$$U' = E_0 e \frac{\alpha}{\alpha + \beta} - \frac{1}{\Omega(\alpha + \beta)} I = U'_0 - r'I \quad \text{avec C. P.}$$

En l'absence de débit, $I = 0$ et le terme $E_0 e = V(k_1 + 1)$ représente donc la tension à vide, soit U_0 , d'une machine sans capacités parasites. Ce terme $E_0 e$ représente également la d. d. p. entre les secteurs fixes et mobiles de la machine. Les capacités parasites ont pour effet

de réduire cette tension à vide à la valeur $U'_0 = E_0 e \cdot \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$.

D'autre part, tout se passe comme si la génératrice possédait une certaine *résistance intérieure fictive* dont la valeur serait :

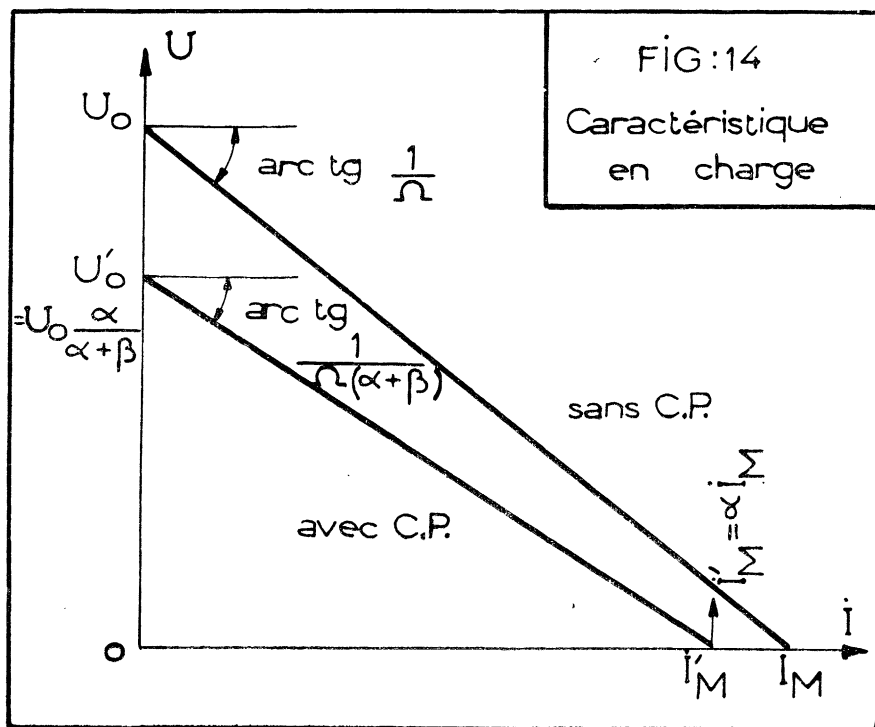
$$r = \frac{1}{\Omega} \quad \text{sans C. P.}$$

$$r' = \frac{1}{\Omega(\alpha + \beta)} \quad \text{avec C. P.}$$

Dans une machine idéale sans C. P., la résistance intérieure fictive est égale à l'inverse de la vitesse de variation de la capacité utile.

Les capacités parasites ont pour effet de diminuer cette résistance interne : $r' = \frac{r}{\alpha + \beta} \leq r$.

REMARQUE : Moyennant ces considérations, nous constatons que la génératrice électrostatique suit la loi générale selon laquelle un générateur quelconque fournit la puissance maximum lorsqu'il



débite sur une résistance de charge égale à sa propre résistance intérieure.

La résistance de charge optimum déterminée précédemment a bien pour valeur, respectivement, $\frac{1}{\Omega}$ et $\frac{1}{\Omega(\alpha + \beta)}$.

La génératrice possède, par conséquent, une caractéristique en charge analogue à celle d'une dynamo shunt (voir fig. 14). La tension à vide U_0 ou U'_0 décroît linéairement lorsque le débit augmente.

Le terme rl^2 ne correspond cependant pas à une perte qui rappellerait la perte par effet Joule dans une dynamo ; à l'intérieur de la génératrice, ce sont des courants de déplacement et non de conduction qui interviennent. Rappelons enfin que l'obtention d'une telle caractéristique est subordonnée à l'hypothèse que nous avons faite d'un champ inter-électrode E_0 constant.

Régulation électrique de la génératrice.

Le fonctionnement précédent semble idéal puisqu'il permet une adaptation de la puissance engendrée à la puissance demandée, et conduit à une caractéristique en charge très convenable, devant permettre une marche stable.

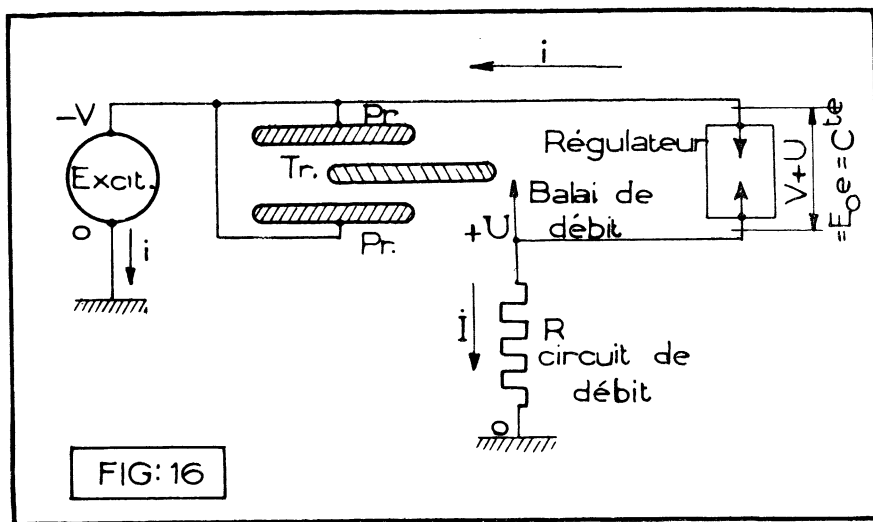
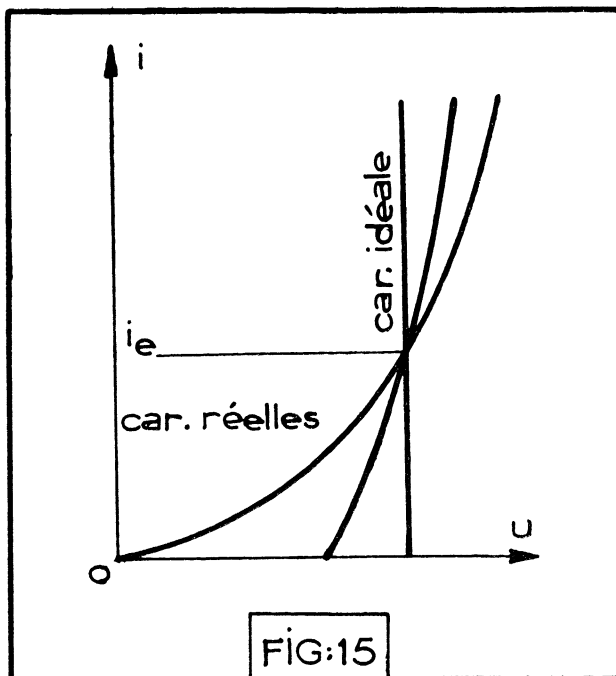
Le problème revient donc à le réaliser pratiquement. Or, la seule hypothèse à laquelle il convient de satisfaire est de maintenir le champ électrique entre secteurs producteurs et transporteurs à une valeur *constante*, E_0 , assurant la meilleure utilisation du milieu diélectrique. *Il suffit donc, pratiquement, de maintenir constant le terme $E_0 e$, donc la somme des potentiels d'excitation et de débit, soit $V + U = V(k_1 + 1) = E_0 e$.*

Pour cela, il faudra « piloter » le potentiel d'excitation en conséquence.

Le problème de la régulation électrique des génératrices revient finalement à créer un appareil régulateur capable de maintenir la tension $(V + U)$ constante. Il suffit pour cela de considérer un appareil électrique statique, ne suivant pas la loi d'Ohm sous sa forme simple, et possédant une caractéristique $u(i)$ — u étant la tension à ses bornes et i le courant qui le traverse — spéciale ; à partir d'une certaine tension, l'intensité doit croître très rapidement lorsque la tension u varie quelque peu (Voir fig. 15).

En plaçant un tel appareil entre les secteurs producteurs et le balai de débit d'une machine, de manière à établir entre ses bornes la tension $(V + U)$ à stabiliser, on conçoit immédiatement son action régulatrice (Voir fig. 16). Supposons que U augmente. La somme $V + U$ tend à augmenter mais le régulateur réagit en laissant passer un courant plus intense et dans un sens tel qu'il tend à décharger les producteurs, donc à abaisser leur potentiel. La somme $(V + U)$ est rétablie à sa valeur primitive. L'action inverse a lieu si U diminue.

L'action du régulateur est d'autant plus énergique que la caractéristique $i(u)$ représentée sur la figure 15 se rapproche d'une droite parallèle à oi , d'abscisse $(V + U) = E_0 e$.



Pour que l'excitatrice ne s'opposât pas à la régulation, il serait souhaitable qu'elle fonctionnât à débit constant et indépendant de la

tension à ses bornes, Si au contraire, à la manière de la machine principale, ce débit est proportionnel à la tension, l'action du régulateur sera plus ou moins étouffée et sa sensibilité devra être accrue.

D'autre part, outre la régulation apportée, ce système donnera à la génératrice une bonne stabilité de marche, doublée d'une protection à l'égard de toute perturbation. En particulier, aucune décharge ne pourra se produire entre les secteurs fixes et mobiles.

Enfin, un tel régulateur permettra de régler la tension aux bornes de la machine à la valeur désirée, comprise entre zéro et U . Il suffira de produire une translation de la caractéristique $i(u)$ parallèlement à elle-même, de manière à modifier l'abscisse du point de fonctionnement. Cette translation est simple, pratiquement, à réaliser. Elle fournira un moyen de réglage commode.

Appareil régulateur.

La caractéristique désirée fait immédiatement songer aux tubes de décharge à atmosphère gazeuse, et en particulier aux tubes ou « éclateurs » au néon, qui présentent des propriétés analogues à celles que l'on voudrait utiliser. Les tubes au néon sont en effet couramment utilisés comme stabilisateurs de tension. Mais les d. d. p. ainsi stabilisées sont très faibles vis-à-vis des tensions rencontrées dans les machines électrostatiques. Il faudrait disposer en série un nombre important de cellules élémentaires, et la translation de la caractéristique, donc le réglage de la tension aux bornes, s'effectuerait simplement en faisant varier le nombre de ces cellules.

Mais d'autres phénomènes, et en particulier celui de l'effluve, peuvent permettre d'établir des appareils semblables. Des para-foudres, destinés à protéger les installations électriques à H. T., ont été réalisés et présenteraient des caractéristiques convenant à notre problème⁽²⁴⁾. L'association de cellules élémentaires en série est toujours un moyen commode de régler la tension de la machine, et le problème est facilité par le fait que l'intensité du courant à mettre en jeu est très faible.

(24) Par exemple, une matière spéciale, semi-conductrice, nommée « thyrite » et employée dans ce but est telle que le produit de sa résistance par l'intensité qui la traverse à la puissance 0,72 demeure approximativement constante : $RI^{0,72} = K$. Le phénomène semble dû, précisément, à la formation d'effluves à l'échelle des cristaux composant ce matériau.

Dans nos essais, nous avons toujours utilisé comme régulateur une simple effluve établie entre l'excitation de la machine et son débit, effluve créée entre une pointe et une électrode quelconque. La caractéristique obtenue est relativement convenable, surtout si l'on tient compte de la simplicité d'un tel système. La translation de caractéristique, donc le réglage de la tension, se fait en modifiant l'écartement entre la pointe et la deuxième électrode. A courant constant, la tension est à peu près proportionnelle à cet écartement, tout au moins tant que celui-ci reste réduit.

3. — Régulation automatique du contact de débit.

Une réversibilité parfaite dans le fonctionnement suppose le couplage des transporteurs sur le circuit extérieur effectué au moment précis où l'égalité des potentiels est réalisée. Pour une petite machine, nous avons dit que la précision du contact obtenue mécaniquement pouvait être suffisante, alors qu'une machine importante risquerait de voir son collecteur dégradé par les pertes inadmissibles qui pourraient avoir lieu.

D'autre part, le réglage des balais, assurant un certain facteur de multiplication statique, n'est convenable que pour un régime bien déterminé, conduisant à un facteur dynamique identique. Les périodes transitoires, les fluctuations diverses et inévitables, et surtout les variations du régime de charge apporteront autant de perturbations sérieuses dans le bon fonctionnement de la machine. Il convient donc d'assurer une régulation automatique du contact de débit, qui permettra d'une part d'attacher moins d'importance à la précision mécanique du contact, et d'autre part de stabiliser en permanence le fonctionnement.

Le problème revient à rendre le facteur de multiplication statique de la machine sans cesse égal au facteur dynamique imposé par le circuit extérieur.

Il serait difficile de réaliser, pour cela, une variation automatique du calage des balais de débit, par servo-moteur; la complication apportée serait considérable, la précision douteuse, et l'inertie d'un tel système bien trop grande pour permettre de suivre les fluctuations rapides du régime. Nous décrirons donc un procédé statique, résolvant le problème en toute rigueur, et qui pourrait être appliqué avantageusement.

Il s'agit surtout de rendre le fonctionnement parfait dans les limites admises pour les variations du régime, et d'obtenir une régulation automatique rigoureuse autour d'un point de fonctionnement donné, en se réservant de part et d'autre une zone suffisante de régulation, par exemple ± 20 pour 100. Le fonctionnement serait ainsi stabilisé dans une plage qui se montrerait suffisante dans bien des cas.

Si le régime était appelé à varier dans de larges mesures, il faudrait ajouter à ce dispositif statique un système de modification du calage des balais. Ce système pourrait être alors sommaire, de précision très réduite, d'inertie notable, et même comporter une commande manuelle. Il ne ferait que changer radicalement le calage afin de placer la machine dans une autre zone de fonctionnement ; le système de régulation automatique et statique reprendrait son action autour du nouveau point de fonctionnement obtenu, « figeant » le réglage et stabilisant la marche.

Soupape régulatrice.

De même que, dans un compresseur, une soupape sensible à une différence de pression s'ouvre lorsque la pression atteinte dans le cylindre compresseur est égale à celle régnant dans le réservoir (circuit extérieur), permettant le refoulement du fluide sous pression constante, il serait désirable, ici, qu'une véritable soupape, sensible cette fois à une différence de tension, assurât automatiquement le contact de débit et l'écoulement de la charge électrique sous tension constante, au moment précis où le potentiel des producteurs atteindrait celui du circuit extérieur.

Le collecteur et ses balais déterminent, en effet, un moment de contact immuable dans le temps, et ne tenant aucun compte du facteur essentiel dont il doit être fonction.

Le problème revient donc à établir une soupape sensible à une d. d. p., différence entre le potentiel du circuit de débit et celui des transporteurs, établissant le contact lorsque cette différence est nulle, et restant fermée tant que les transporteurs sont à un potentiel inférieur à celui du débit. De cette manière, le contact serait toujours établi en temps utile, le facteur de multiplication statique de la machine étant sans cesse rendu égal au facteur dynamique exigé, et toute irréversibilité étant éliminée.

En fait, la soupape présentera une certaine raideur car son fonc-

tionnement ne pourra pas être déclenché, par les moyens physiques ordinaires, au moment même de l'égalité des tensions, mais seulement lorsque le potentiel des transporteurs deviendra légèrement supérieur à celui du circuit de débit, la d. d. p. ainsi créée, avec ce sens voulu, étant alors le facteur agissant sur la soupape. La sensibilité de l'appareil sera d'autant plus grande qu'il suffira d'une plus petite d. d. p. pour déclencher le contact. Pour que la perte due à l'égalité non rigoureuse des tensions soit négligeable, cette sensibilité devra être suffisante.

Un autre point à considérer est la d. d. p. maximum qui pourra s'établir, à certains moments, aux bornes de la soupape. Pendant la période de charge des transporteurs, cette d. d. p. serait égale à la tension normale aux bornes du circuit extérieur et, d'une manière générale, il en résulterait un inconvénient certain ; la soupape devrait être établie pour supporter une telle tension, caractéristique difficilement conciliable avec une grande sensibilité. Cet inconvénient serait particulièrement grave dans le cas d'une soupape électronique dont il sera parlé ultérieurement. Mais la solution de la *commutation mixte par collecteur et soupape* apporte la clé du problème.

Il suffira, en effet, de conserver le collecteur normal et ses balais, en réglant ceux-ci pour que, même à la limite extrême admise pour la diminution de tension aux bornes du circuit extérieur, le contact s'établisse toujours un peu trop tôt. A ce moment, la soupape est mise en circuit et commande l'instant de débit exact. Mais au moment de sa mise en service, le potentiel des transporteurs avait déjà atteint une valeur notable, et la d. d. p. maximum qui peut s'établir à ses bornes est limitée à l'écart extrême admis pour la variation de tension. Ainsi, en admettant une zone de régulation de ± 10 pour 100, la soupape n'aura à supporter, au maximum, qu'une d. d. p. égale à 20 pour 100 de la tension normale de fonctionnement. Le problème est considérablement simplifié.

Au point de vue réalisation, on pourrait tout d'abord concevoir une soupape électromécanique à contact solide, et mue, par exemple, directement ou indirectement par action électrostatique. Un tel système, compliqué, présenterait de graves défauts. A moins d'une amplification notable, source d'inconvénients, sa sensibilité serait réduite. Son inertie resterait considérable, et sa précision sans doute aléatoire.

Mais l'électronique apporte, une fois de plus, une solution intéressante.

Soupape électronique ⁽²⁵⁾.

Il suffit en effet d'utiliser une valve électronique, du genre kénotron ou phanotron. Les avantages d'un tel système sont évidents. Sa sensibilité est grande, la chute de tension réduite, et la réversibilité assurée à peu près parfaitement. Son inertie réduite au maximum permet une promptitude d'action exceptionnelle, et ce procédé a enfin l'avantage d'être statique.

Il convient cependant de remarquer que, sans le système de la commutation mixte, tous ces avantages auraient été rendus aléatoires en raison de la tension maximum qu'aurait dû supporter la soupape. Les tensions inverses de pointe que peuvent tenir, dans un montage redresseur, les kénotrons fabriqués actuellement sont limitées, et il semble difficile d'aller loin dans cette voie.

Dans notre montage en soupape, toutefois, le courant étant déjà continu, la situation est plus favorable que dans un montage en redresseur où la tension inverse de pointe atteint, au moment des alternances négatives, plus du double de la tension continue de fonctionnement. Un kénotron prévue pour une tension redressée donnée aurait, dans son utilisation en soupape, ses possibilités approximativement doublées.

De toute façon, la commutation mixte doit permettre l'emploi de tubes électroniques de modèle courant, même établis pour des tensions relativement basses. Quant à leur débit, il suffirait pour assurer la régulation des plus puissantes machines.

Soit, par exemple, une génératrice fonctionnant sous 100 KV. En se fixant une plage de régulation de ± 10 pour 100, la tension maximum aux bornes de la soupape serait de 20 KV et l'on pourrait employer un tube courant prévu pour une tension redressée de 10 KV. Un kénotron de 50 KV permettrait ici une zone de régulation supérieure à ± 50 pour 100, ou encore de ± 10 pour 100 dans le cas d'une machine de 500 KV.

Enfin, si la machine est munie d'un système de décalage automatique des balais de débit, la plage de régulation demandée à la soupape peut être très réduite, et d'autant plus réduite que le système mécanique est plus rapide et plus précis dans son action.

⁽²⁵⁾ Nous avons expérimenté ce système sur notre deuxième prototype de génératrice ; le succès obtenu confirme l'intérêt pratique du procédé.

A ce moment, un tube électronique quelconque — même un phanotron — prévu pour une tension assez basse, peut assurer la régulation rigoureuse de la machine. Son rôle n'en demeure pas moins essentiel.

Protection du collecteur.

Pour une petite machine, sur laquelle les systèmes précédents ne sont pas employés, il peut être utile de protéger le collecteur contre les étincelles inévitables qui ne manqueraient pas de se produire. Un usage prolongé pourrait le dégrader ⁽²⁶⁾.

Au lieu d'un seul balai — ou groupe de balais — assurant le commencement du contact, il suffit de le faire précéder par un balai auxiliaire auquel il est relié par l'intermédiaire d'une résistance. Avant de toucher le balai principal relié au circuit extérieur, une touche du collecteur entre d'abord en contact avec le balai auxiliaire et, si un déséquilibre a lieu, à ce moment, entre le potentiel des transporteurs et celui du circuit de débit, l'énergie qui, autrefois, se serait dégradée sous forme d'étincelle, se dissipe maintenant en partie dans la résistance. Les étincelles, sans être évitées, sont moins dangereuses. Même avec une résistance élevée, la constante de temps du circuit intéressé par la décharge est très faible (la capacité utile c est toujours assez réduite, surtout au moment du contact) et le balai auxiliaire peut précéder le balai principal de très près. Lorsque celui-ci entre en fonction, l'équilibre des potentiels a eu le temps de se faire. Un décalage entre les deux de l'ordre du degré serait suffisant, et ces balais pourraient être réunis en un seul, sous forme de balai spécial muni d'un pré-contact.

On pourrait aussi ne conserver que les balais ordinaires, et faire au contraire précéder la touche, sur le collecteur, d'une touche-amorce en matière semi-conductrice et en tout cas résistant bien aux étincelles.

4. — Excitation des génératrices. Auto-amorçage.

Une source quelconque peut établir le potentiel d'excitation des producteurs. Il suffit de compenser les pertes par défaut d'isolement,

⁽²⁶⁾ Le collecteur et les balais de notre deuxième machine se rongent assez rapidement. Il faut remarquer, d'ailleurs, que les divers usages de cette génératrice ne correspondent nullement à un fonctionnement optimum, stable, et bien déterminé.

et la puissance à fournir est très réduite par rapport à la puissance de la machine principale.

Le potentiel d'excitation étant, par rapport à la masse, de signe contraire à celui du débit, l'auto-excitation est impossible. Seules deux machines identiques, fonctionnant avec des polarités inverses, pourraient s'exciter mutuellement. Mais alors, le facteur de multiplication ne pourrait pas descendre au-dessous de l'unité et un tel système ne serait utilisable que dans des cas particuliers.

Il est par contre naturel d'utiliser une excitatrice séparée, en particulier une petite génératrice électrostatique que l'on peut monter en bout d'arbre de la machine principale. L'ensemble est renfermé à l'intérieur du réservoir à gaz comprimé et le réglage s'effectue simplement en faisant sortir du réservoir, outre la traversée reliée aux balais de débit, une autre traversée connectée aux producteurs de la machine principale, donc au débit de l'excitatrice.

Extérieurement, on place entre ces deux sorties le régulateur dont il a été question. Si l'on désirait alors fonctionner avec une excitatrice extérieure, il suffirait de brancher celle-ci entre la masse et la deuxième sortie reliée aux producteurs.

D'autre part, il est tout indiqué de constituer l'excitatrice par une petite génératrice de même principe que la machine principale, et dont les dimensions pourront être exceptionnellement réduites. Le seul inconvénient est que cette excitatrice ne fonctionne pas à débit constant, la régulation étant en conséquence moins bonne. Moyennant certaines modifications, on pourrait d'ailleurs parer à ce défaut.

Les producteurs de l'excitatrice sont reliés au débit de la machine principale, alors que les producteurs de celle-ci sont raccordés au débit de l'excitatrice (voir fig. 17).

Si k est le facteur de multiplication de la génératrice principale, celui de l'excitation doit être, on le voit immédiatement, $k_e = \frac{1}{k}$.

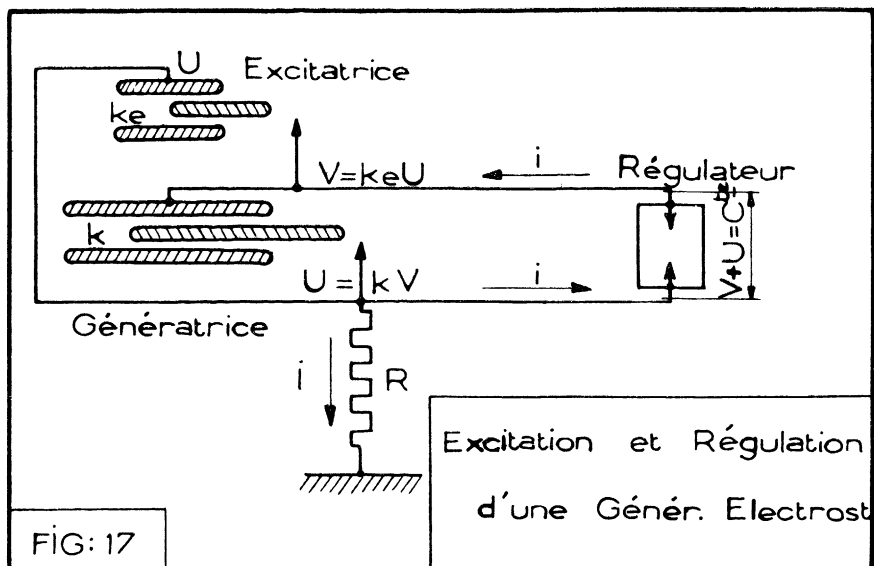
Les potentiels respectifs d'excitation et de débit sont en effet permutés. Si le régime de charge varie, les facteurs de multiplication dynamiques seront toujours reliés entre eux par cette condition immuable. Comme en principe $k < 1$, il faut $k_e > 1$ et l'excitatrice fonctionne inévitablement dans des conditions qui ne sont pas optima. Ce fait n'a aucune importance puisque la puissance de l'excitatrice est insignifiante.

Lorsque le débit de la machine principale augmente, son facteur

de multiplication dynamique décroît, donc celui de l'excitatrice augmente. Lorsque ce dernier atteint la valeur maximum qu'il ne peut dépasser, à cause des capacités parasites, le groupe commence à se désamorcer. Cette valeur maximum est $k_{eM} = \frac{\alpha_e}{\beta_e}$, α_e et β_e étant les coefficients classiques tenant compte des capacités parasites de l'excitatrice.

Afin d'augmenter k_{em} , il peut être intéressant de diminuer artificiellement ces capacités parasites, ainsi que nous le dirons à propos de nos réalisations pratiques. Le système de l'écran porte-feuille diminuant C_{sm} est tout indiqué dans la construction des excitateurs.

Par ailleurs, la puissance de cette machine auxiliaire doit être supérieure à ce que la simple compensation des pertes exigerait, afin



de pouvoir disposer d'une certaine marge permettant de régler le potentiel d'excitation. L'excédent de puissance est dissipé dans le régulateur.

La d. d. p. entre les secteurs fixes et mobiles est la même à la fois pour la machine principale et pour son excitatrice. Ces deux génératrices doivent donc avoir un écartement inter-électrodes égal, l'épaisseur des secteurs étant également identique.

Auto-amorçage.

Nous dirons, dans la partie expérimentale, que l'excitation mutuelle des deux machines se produit spontanément dès la mise en marche ; la tension aux bornes, partant de zéro, croît rapidement suivant une loi exponentielle jusqu'à ce que l'équilibre fixé par le régulateur soit atteint. Cet auto-amorçage rappelle tout à fait celui des dynamos. La cause primitive d'excitation, ainsi que nous le verrons, provient principalement des charges résiduelles conservées par les isolants solides ; il n'est pas exclu, cependant, que les f. e. m. de contact aux balais jouent un certain rôle (Voir 2^e partie, prototype n° 2, III).

5. — Pertes et rendement.

Dans la mesure où les pertes par irréversibilité électrique sont nulles ou à peu près, ce qui est toujours réalisable, nous avons dit que les seules pertes sérieuses affectant la machine étaient celles provenant du frottement gazeux.

Le gaz étant comprimé, sa viscosité cinématique est très diminuée et son mouvement est turbulent. La loi donnant les pertes subies, dans de telles conditions, par un disque qui tournerait dans une atmosphère comprimée, peut donner une idée de ce qui se passe à propos du rotor de la génératrice.

On peut admettre que la force de frottement par unité de surface du disque est de la forme $c_f \rho \frac{u^2}{2}$, c_f étant un coefficient, en général voisin de $2,5 \cdot 10^{-3}$, et se comportant approximativement comme une constante ; ρ est la masse spécifique du fluide comprimé et u la vitesse linéaire du disque au point considéré. La viscosité du gaz n'intervient pratiquement pas dans ce mouvement turbulent, seule la masse spécifique jouant un rôle important.

Soit ω la vitesse angulaire du disque et $dS = 2\pi r dr$ la surface élémentaire d'une zone en forme de couronne concentrique de rayon r et de largeur dr . Pour cette surface, $u = r\omega$. Donc :

$$dF = c_f \cdot \rho \cdot \frac{r^2 \omega^2}{2} dS = c_f \cdot \rho \cdot \pi \omega^2 r^3 dr.$$

D'où le couple

$$d\Gamma = c_f \cdot \rho \cdot \pi \omega^2 r^4 dr.$$

Si R est le rayon du disque, le couple total est, par conséquent :

$$\Gamma = \pi c_f \cdot \rho \cdot \omega^2 \frac{R^5}{5}$$

et la puissance correspondante dissipée :

$$P = \Gamma \omega = \pi c_f \cdot \rho \cdot \omega^3 \frac{R^5}{5}.$$

On peut donc approximativement prévoir, pour ce genre de perte, une puissance dissipée *proportionnelle à la masse spécifique du gaz comprimé, au cube de la vitesse, et à la cinquième puissance du rayon de la partie tournante.*

En fait, chaque plateau du rotor est assimilable à un disque portant $2n$ fentes radiales. Ces fentes font apparaître un sillage ou centrifugent l'air, et les pertes sont considérablement augmentées. Des expériences, effectuées à ce sujet, montrent qu'elles sont à peu près doublées. On pourrait évidemment remplir ces fentes par un diélectrique solide de pouvoir inducteur spécifique ϵ , de manière à obtenir un disque continu. Mais le champ dans le diélectrique serait au moins égal à $\frac{E}{\sqrt{\epsilon}}$, E étant le champ inter-électrodes⁽²⁷⁾ et il est

visible qu'aucun diélectrique solide connu ne serait susceptible de supporter un tel champ avec sécurité. Pour le ramener à une valeur acceptable, il faudrait augmenter le rapport $\frac{a}{e}$ de l'épaisseur des électrodes à leur écartement, ce qui provoquerait une diminution de la puissance spécifique et augmenterait considérablement les capacités parasites.

D'autre part, l'assemblage de plusieurs disques formant le rotor conduirait à une perte relative moindre, dans la mesure où la masse du gaz comprise entre deux disques pourrait tourner elle aussi. Mais la présence des secteurs producteurs fixes ne permet pas cette amélioration. Cependant, le fait que la masse gazeuse soit renfermée dans un réservoir restreint peut provoquer une diminution de

(27) A puissance égale, les pressions électrostatiques sur la tranche des secteurs devraient être identiques dans les deux cas. Si E est le champ dans le gaz ($\epsilon = 1$), en l'absence de diélectrique et E' le champ dans le diélectrique introduit (p. i. s. = ϵ), il faudrait : $E^2 = \epsilon E'^2$ d'où $E' = \frac{E}{\sqrt{\epsilon}}$. En fait, E' atteindrait des valeurs locales supérieures, la constance du champ sur la tranche étant impossible à réaliser.

pertes. Une partie du gaz est plus ou moins entraînée par le rotor et le frottement relatif du rotor sur le gaz d'une part, du gaz sur le réservoir ou sur les pièces fixes d'autre part, peut conduire à une perte totale inférieure (ω intervient par son cube).

Conclusion. — Ces considérations de pertes par frottement gazeux montrent la nécessité de rotors de faible diamètre (p proportionnel à R^5). Les machines auront une forme naturelle rappelant celle d'un cylindre allongé, le nombre de plateaux pouvant seul être augmenté sans inconvénient.

La vitesse, également, pourra être limitée par la considération de rendement, la puissance utile étant proportionnelle à cette vitesse alors que les pertes croissent comme son cube. Cependant, si l'on parvient à donner au rapport $\frac{E_0^2}{\rho}$ une valeur assez considérable, la vitesse de rotation sera avant tout limitée par les effets de la force centrifuge, et non par des considérations de pertes. C'est le cas lorsqu'on fait travailler une machine dans l'hydrogène.

6. — Effets mécaniques parasites.

Les seules forces utiles sont celles qui s'exercent sur la tranche des secteurs. Mais les faces latérales de ces secteurs vont être également sollicitées, statiquement, par des forces normales à leur surface, donc au déplacement, et qui constituent des forces parasites.

Dans la mesure où la symétrie du système actif est parfaite, le centrage des transporteurs au milieu des producteurs étant en particulier rigoureux, ces forces s'exercent également sur les deux faces de chaque secteur, s'équilibrent et ne sont nullement gênantes. Seuls les producteurs des deux rangées extrêmes, dont une seule face est utilisée, ont à supporter un effort de flexion.

Cette condition de bonne symétrie est également nécessaire afin d'éviter toute action transversale sur l'arbre du rotor, action qui devrait être équilibrée par les paliers jouant alors le rôle de butée. Ces paliers ne doivent d'ailleurs tolérer aucun jeu transversal et les montages sur billes sont indiqués,

Cependant, une symétrie parfaite n'est jamais réalisée, soit que le rotor ait été mal centré, soit qu'il existe des inégalités d'épaisseur ou des convergences entre les secteurs fixes et mobiles, soit enfin que le rotor présente un léger gauchissement.

Il est utile de prévoir les effets d'une telle dissymétrie.

a) *Diminution de la puissance.*

L'écartement théorique entre secteurs est e . Soit Δe l'erreur maximum que présente, pour une raison quelconque, cet écartement. Même si cette erreur n'apparaît qu'en un point restreint des parties actives ou pendant une fraction seulement de la période de débit, elle suffit à limiter les possibilités de la machine et diminue sa puissance spécifique.

Les capacités ne sont pas sensiblement affectées par la dissymétrie, mais la d. d. p. maximum qui peut s'établir entre secteurs fixes et mobiles se trouve réduite dans le rapport $\left(1 - \frac{\Delta e}{e}\right)$. La puissance de la machine est donc seulement $\left(1 - \frac{\Delta e}{e}\right)^2$ fois ce qu'elle était en l'absence de dissymétrie.

Une dissymétrie de 10 pour 100 conduit ainsi à une diminution de puissance de l'ordre de 20 pour 100 et un seul point défailant des secteurs suffit à provoquer cette perte.

On conçoit la nécessité d'une construction précise⁽²⁸⁾, surtout si l'on tient compte du faible écartement inter-électrodes. Par exemple, dans l'air à 30 kg/cm², e est voisin de 2 mm pour une tension aux bornes de 50 KV et pour $k=1$. Une dissymétrie de 10 pour 100 ne représente qu'une erreur absolue de 2/10 de mm et provoque pourtant une perte en puissance de 20 pour 100.

A ce point de vue, les machines à très haute tension seraient d'une réalisation plus commode, l'écartement entre plateaux étant plus considérable.

b) *Forces parasites.*

La pression électrostatique agissant sur les secteurs est proportionnelle au carré du champ électrique établi au voisinage. Ce champ, en un point, est lui-même inversement proportionnel à l'écartement, e , des électrodes en cet endroit, en admettant que la répartition du champ reste homogène donc que la dissymétrie soit relativement faible. La pression électrostatique est donc inversement proportionnelle au carré de l'écartement e . Si e varie de Δe , la variation relative de la pression, en valeur absolue, est $\frac{\Delta p}{p} = 2 \frac{\Delta e}{e}$.

(28) Nos essais ont été gênés, pour cette raison, dans une large mesure.

Mais chaque secteur a deux faces sollicitées. Sur la face se rapprochant de l'électrode voisine, la pression s'accroît, $\frac{\Delta p}{p}$ est positif, alors que sur la face opposée, $\frac{\Delta p}{p}$ est négatif. Les actions s'ajoutent et il apparaît sur le secteur un déséquilibre des forces tel que $\frac{\Delta p}{p} = 4 \frac{\Delta e}{e}$. Ce déséquilibre conduit à la naissance d'une force parasite qui tend à faire fléchir davantage le secteur.

En admettant pour p une valeur de 100 g/cm^2 , on en déduit qu'une dissymétrie de 10 pour 100 fait apparaître des forces de flexion résultant d'une pression d'environ 40 g/cm^2 . Si la dissymétrie est générale, les forces parasites peuvent être assez considérables.

Toutefois, le champ maximum, donc la force parasite ainsi calculée, n'est atteint que pendant la fraction $\frac{1}{2(k+1)}$ de chaque cycle (sans C. P.), et dans le cas où la dissymétrie ne provient que d'un défaut local variable en cours de rotation, la valeur moyenne de cette force peut être réduite encore.

D'autre part, il convient de signaler un fait pouvant avoir une certaine importance pratique. Les secteurs fixes et mobiles se présentent comme des lames encastrées, plus ou moins parfaitement, à une extrémité, et par ailleurs en porte à faux. Ils possèdent une certaine période propre de vibration et un amortissement qui peut être assez réduit. On peut donc craindre des dangers de résonance entre leur fréquence propre et la fréquence de sollicitation des forces parasites éventuelles, pouvant amener des elongations très supérieures à Δe . La force parasite de déviation est proportionnelle à l'elongation atteinte par le secteur, ce qui complique le problème. La détermination des conditions de stabilité d'un tel système est, en fait, très complexe.

Remarques : 1° En ce qui concerne le rotor, la force centrifuge agissant sur les secteurs mobiles, de la forme $F = M\omega^2 r$, intervient et tend à ramener les secteurs déviés dans leur position normale. Mais seule la composante $F \operatorname{tg} \delta$, δ étant l'angle de déviation du secteur, est active à cet égard. δ étant très petit, l'action de F est négligeable.

Par contre, cette force centrifuge est, en elle-même, assez considérable et la construction du rotor doit être prévue en conséquence. Un bon équilibrage, statique et dynamique, est désirable.

2° La fixation des secteurs est beaucoup plus aisée dans le cas des producteurs que dans celui des secteurs mobiles. Pour ces derniers, la section d'encastrement est nécessairement réduite et les dangers de fléchissement sont à craindre plus particulièrement.

3° Enfin, dans le cas d'une machine puissante ne comportant qu'un seul rotor, le couple, essentiellement pulsatoire, peut aussi conduire à des résonances fâcheuses entre sa fréquence propre et la fréquence de vibration à la torsion de l'arbre. D'où la nécessité de prévoir une vérification éventuelle ⁽²⁹⁾.

7. — Réservoir à gaz comprimé.

La machine étant de forme générale cylindrique, par nature même, elle peut être disposée à l'intérieur d'un réservoir également cylindrique, avec un minimum d'espace mort.

Son diamètre intérieur ne sera guère plus grand que le diamètre extérieur d'encombrement de la machine. Il suffit de prévoir, entre le bord extérieur des secteurs producteurs et la paroi du réservoir, un espace suffisant pour assurer l'isolement.

Dans le cas de pressions modérées et de diamètres restreints, l'enveloppe est déterminée par le procédé classique. Son épaisseur,

ε , en cm, est $\varepsilon = \frac{p\rho}{T}$, p étant la pression d'utilisation du gaz, en kg/cm², ρ le rayon intérieur du réservoir en cm et T le taux de travail admissible pour le métal employé, en kg/cm².

Les fonds, sphériques, auront un rayon 2ρ , afin qu'une même épaisseur ε conduise au même taux de travail. Si L est la longueur du réservoir (les fonds étant supposés plats), le volume de métal nécessaire à la constitution de l'enveloppe est :

$$v = 2\pi\rho\varepsilon L + 2\pi\rho^2\varepsilon = 2\pi\rho L\varepsilon \left(1 + \frac{\rho}{L}\right).$$

Le volume intérieur utile étant $V = \pi\rho^2 L$, le rapport

$$\frac{v}{V} = \frac{2\varepsilon}{\rho} \left(1 + \frac{\rho}{L}\right) = 2 \frac{p}{T} \left(1 + \frac{\rho}{L}\right).$$

On voit l'intérêt de réduire le terme $\frac{\rho}{L}$, afin d'amoindrir le

⁽²⁹⁾ Le fonctionnement en charge de notre deuxième machine se manifeste par l'apparition d'un ronflement important, dont la fréquence correspond bien à celle du couple pulsatoire qu'elle oppose.

volume — donc le poids — du métal constituant le réservoir, tout en conservant un volume utile intérieur donné. Ce point de vue, encore, conduit par conséquent aux machines de faible diamètre mais allongées, que nous avons déjà, pour plusieurs raisons, trouvées les plus avantageuses.

Si l'accroissement en volume occasionné par le réservoir est négligeable, le poids mort ainsi apporté est plus important. En supposant les secteurs de la machine en aluminium et remplissant la moitié de son volume actif, la densité fictive de la partie active serait de l'ordre de 1,3, contre une densité de 8 pour le réservoir en acier.

Supposons une pression d'utilisation de 30 kg/cm², l'acier employé travaillant aux environs de 12 kg/mm². L'épaisseur est $\varepsilon = \frac{\rho}{40}$ et le rapport des volumes $\frac{v}{V} = 5 \left(1 + \frac{\rho}{L} \right) 10^{-2}$. Le volume de l'enveloppe est donc au minimum les 5 pour 100 du volume utile, et cette proportion atteint 10 pour 100 pour $\rho = L$. Avec les densités admises précédemment, l'accroissement de poids dû à la présence du réservoir serait au minimum de 30 pour 100 et atteindrait 60 pour 100 pour $\rho = L$. L'enveloppe contribuerait au poids total de la machine pour une part de 23 à 37 pour 100.

Dans le cas de l'utilisation de l'hydrogène pour diélectrique, ces circonstances seraient plus défavorables, à cause des pressions élevées alors nécessaires (70 à 100 kg/cm²). Les réservoirs très épais verraient d'ailleurs leur épaisseur augmenter plus vite que la pression.

De toute façon, le rapport $\frac{v}{V}$ montre l'inconvénient de l'utilisation de pressions trop élevées.

8. — Traversées haute tension. — Utilisation du gaz comprimé.

Le réservoir à gaz comprimé est, en général, traversé par deux sorties H. T. : l'une reliée à l'excitation de la machine, l'autre à son débit.

Comme le facteur k est assez voisin de l'unité, ces deux sorties auront à supporter des d. d. p. du même ordre et seront de constitution analogue.

La particularité de ces traversées réside dans le fait qu'elles doivent,

mécaniquement, supporter la pression intérieure et assurer l'étanchéité du réservoir. D'autre part, il est possible d'utiliser judicieusement les qualités du gaz comprimé en lui faisant jouer un rôle utile, au point de vue électrique.

Pour l'instant, nous ne ferons pas d'hypothèses sur les détails de construction de ces traversées, et nous envisagerons leur cas au seul point de vue électrique.

En principe, une tige de section circulaire traverse un trou de diamètre convenable pratiqué dans le réservoir. Entre la tige et le réservoir se trouvent une ou plusieurs gaines concentriques, constituées par des diélectriques bien choisis, tant en ce qui concerne leur rigidité diélectrique que leur p. i. s. et de manière à obtenir une utilisation rationnelle de l'ensemble, comme cela se pratique couramment. La résistance mécanique à la traction ou au cisaillement, ainsi que l'étanchéité, sont les seuls facteurs nouveaux qui demandent, dans ce cas d'espèce, une fabrication particulière de la traversée.

Dans le cas de l'utilisation d'une gaine isolante unique, le champ maximum, près de la tige interne de rayon r , et auquel le diélectrique

est soumis, a pour valeur $\frac{U}{r \operatorname{Log} \frac{R}{r}}$, R étant le rayon du trou pratiqué

dans le réservoir et U la d. d. p. appliquée. Si E_d est le champ maximum que peut supporter le diélectrique, il faut $r \operatorname{Log} \frac{R}{r} \geq \frac{U}{E_d}$

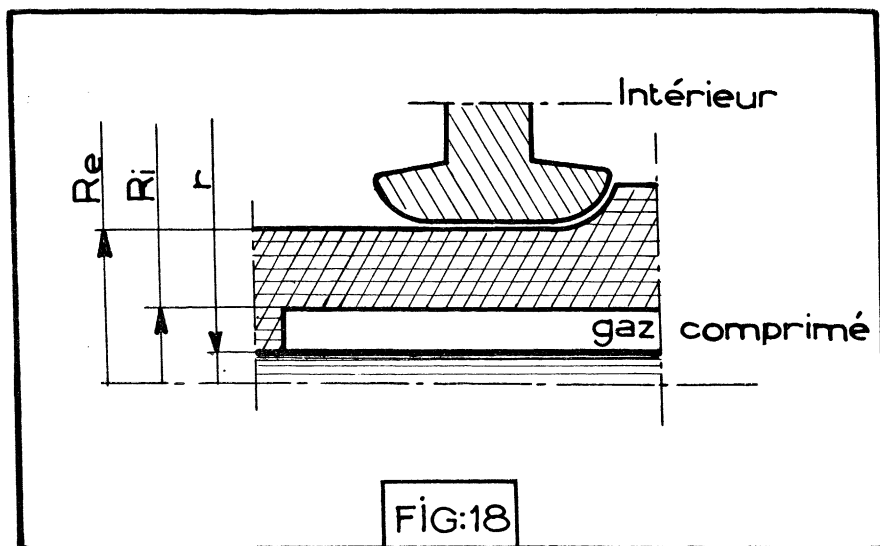
et l'on sait que cette expression passe par un maximum pour $\frac{R}{r} = e = 2,7$.

Une telle traversée serait peu avantageuse.

Il existe, par contre, une solution à la fois simple et efficace, résolvant le problème. Elle consiste à ménager, dans l'ensemble diélectrique isolant la tige centrale, et près de celle-ci, donc dans la région de champ maximum, une gaine concentrique évidée qui se remplira de gaz comprimé, diélectrique idéal.

Il est logique de contraindre le gaz comprimé, dont on dispose librement, à supporter une partie de la d. d. p. totale, allégeant d'autant le diélectrique solide de qualité toujours très inférieure et dont le but principal devient alors d'assurer la tenue mécanique et l'étanchéité de la traversée. Au point de vue électrique, le gaz comprimé peut satisfaire aux demandes les plus exigeantes.

Si R_e est le rayon du trou pratiqué dans le réservoir (V. fig. 18), donc le rayon extérieur de la traversée, R_i le rayon intérieur de la gaine solide, c'est-à-dire le rayon externe de la gaine gazeuse, et r le rayon de la tige centrale, si d'autre part le pouvoir inducteur spécifique du



diélectrique solide utilisé est ϵ , le champ électrique dans le gaz comprimé est maximum près de la tige et a pour valeur, en cet endroit,

$$E_1 = \frac{1}{r} \cdot \frac{U}{\text{Log} \frac{R_i}{r} + \frac{1}{\epsilon} \text{Log} \frac{R_e}{R_i}}$$

De même, dans l'isolant solide et près de la face interne, le champ prend la valeur maximum :

$$E_2 = \frac{1}{\epsilon R_i} \cdot \frac{U}{\text{Log} \frac{R_i}{r} + \frac{1}{\epsilon} \text{Log} \frac{R_e}{R_i}}$$

En raison de la différence des p. i. s., l'air pourrait supporter la plus grande partie de la d. d. p. U , quand bien même l'évidement interne aurait une épaisseur réduite n'affectant guère la tenue mécanique de la traversée.

Pour que le champ ne présente pas, en certains points, de valeurs

anormalement élevées, il est nécessaire de donner aux arêtes du trou percé dans le réservoir un profil arrondi, répartissant bien le champ. Il serait même souhaitable que les lignes de force pénétrant dans le diélectrique solide normalement à sa surface extérieure, afin d'éviter, sur cette paroi externe, la présence d'une composante longitudinale du champ.

La paroi interne du trou de traversée, ainsi que la tige centrale, seront à peu près polies au droit de leur voisinage, suivant la prescription générale.

D'autre part, il est à peu près impossible d'éviter la présence d'une pellicule d'air à la pression ordinaire entre la paroi du réservoir et la paroi externe de la traversée. Cet air peut être ionisé sans grand inconvénient, les ions qui s'accumulent rétablissant, en courant continu, un état d'équilibre stable. L'expérience montre que la traversée se comporte très bien et que, si elle dépasse d'une longueur suffisante à l'extérieur du réservoir, les décharges rampantes éventuellement amorcées par l'ionisation dont il est question ne sont pas à craindre (En courant alternatif, le comportement est beaucoup moins heureux). C'est à ce sujet qu'il peut être intéressant d'éviter la présence d'une composante longitudinale du champ électrique au long de la paroi externe de la traversée ; une telle composante tendrait à déplacer les ions et à favoriser les décharges.

Ces généralités ne font d'autre hypothèse sur la traversée que la présence des deux gaines, l'une solide assurant la tenue mécanique, l'autre gazeuse supportant la plus grande partie de la d. d. p. On trouvera un exemple de réalisation très simple et cependant efficace dans la partie expérimentale de cette étude⁽³⁰⁾.

9. — Machines à écartement inter-électrodes variable.

L'écartement e , inter-électrodes, a été déterminé en tenant compte de la d. d. p. maximum qui s'établit durant la période de débit, soit $V_0(k+1)$. Cet écartement reste constant même pendant la période de charge et d'élévation du potentiel, alors que la d. d. p. entre les secteurs fixes et mobiles est inférieure à la valeur ci-dessus, et varie depuis V_0 jusqu'à son maximum.

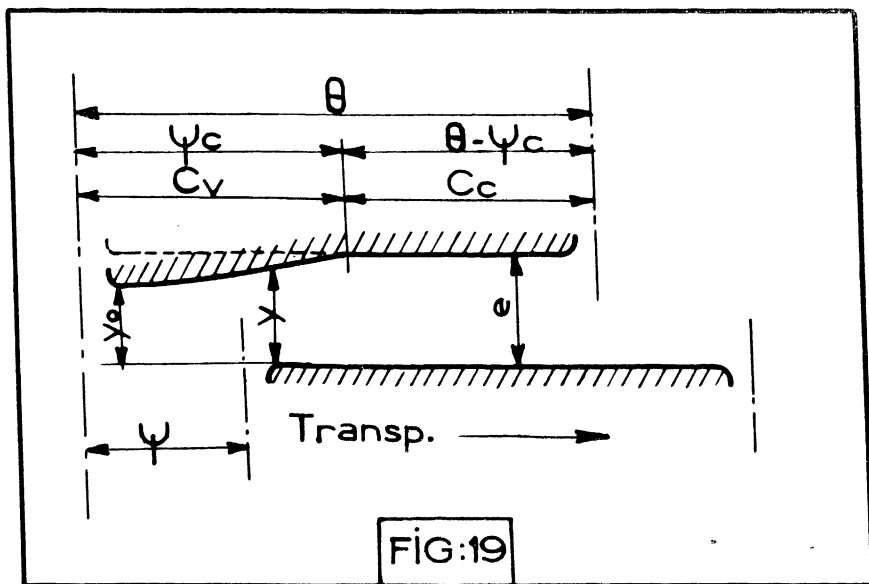
Il serait logique, pour utiliser plus complètement le diélectrique, de le faire travailler à son maximum tout au long du cycle, c'est-à-

⁽³⁰⁾ Voir 2^e partie, prototype n° 2, description.

dire de donner aux électrodes une épaisseur variable et telle que, à un instant quelconque, l'écartement minimum soit en rapport avec la d. d. p. établie à cet instant. La capacité utile C_0 serait accrue ou, en d'autres termes, le volume de diélectrique balayé serait plus considérable. D'où augmentation de la puissance de la machine, à tension constante.

Il ne faut pas songer à obtenir un écartement variable et général des électrodes, mais se contenter du gain apporté par des électrodes d'épaisseur non constante, le point d'écartement minimum entre un secteur producteur et le transporteur sortant se trouvant sur le bord le plus épais de ces secteurs. C'est en ce point qu'il faut veiller à ce que le champ, tout en ne dépassant pas le maximum prévu, soit E_0 , conserve cependant cette valeur au cours du cycle.

On pourrait chercher la solution théorique optimum de ce problème, en partant précisément de l'hypothèse que le champ au point d'écartement minimum reste constant et égal à E_0 . Dans ces conditions, le gain réalisé serait maximum. Déterminons le profil variable à donner aux électrodes, supposées coupées suivant une circonférence



de rayon quelconque. La surface des secteurs dans l'espace s'en déduirait immédiatement. Soit y l'écartement variable entre les secteurs fixes et mobiles, au point d'écart minimum, c'est-à-dire dans la région située près du bord épais des secteurs (V. fig. 19).

Nous supposons, par exemple, que le transporteur reste d'épaisseur constante, la variation étant uniquement reportée sur le producteur. Mais on pourrait tout aussi bien répartir cette variation sur les deux électrodes à la fois.

L'écartement minimum y est fonction de la position relative des électrodes, donc de l'angle ψ défini précédemment. La valeur minimum de y , soit y_0 , reste en jeu durant toute la période de charge et l'on a $y_0 = \frac{V_0}{E_0}$, V_0 étant toujours le potentiel supposé constant des producteurs. Pendant la période d'élévation du potentiel, c'est-à-dire suivant un angle ψ_c (angle de calage du balai de débit), l'écartement y s'accroît. Au delà de ψ_c , la d. d. p. inter-électrodes devenant maximum et constante, l'écartement reste aussi constant et égal à la valeur primitive $e = \frac{V_0}{E_0}(k+1) = y_0(k+1)$.

Donc, la capacité utile entre les secteurs fixes et mobiles se compose d'une partie variable soit c_v , fonction de ψ , dont le maximum C_v a lieu pour $\psi = \psi_c$, et aussi d'une partie constante C_c , correspondant à l'angle $(\theta - \psi_c)$.

Pour un angle ψ compris entre 0 et ψ_c , on a :

$$c = c_v + C_c.$$

Ceci étant, la loi de variation de l'écartement y est telle que $y = \frac{u}{E_0}$, u étant la d. d. p. inter-électrodes au moment considéré.

Appelons C'_0 la nouvelle capacité utile maximum que l'on pourra atteindre, grâce au profil variable. On a :

$$u = \frac{Q_0}{c} = \frac{C'_0 V_0}{C_c + c_v}, \quad \text{donc} \quad y = \frac{V_0}{E_0} \cdot \frac{C'_0}{C_c + c_v} = y_0 \frac{C'_0}{C_c + c_v}.$$

Donc enfin :

$$c_v = \frac{y_0}{y} C'_0 - C_c. \quad (1)$$

D'autre part, appelons R le rayon extérieur des secteurs transporteurs et r le rayon intérieur des producteurs. Une rotation $d\psi$ entraîne une diminution de capacité :

$$dc = -\frac{dS}{4\pi y}, \quad \text{donc} \quad dc = -\frac{R^2 - r^2}{8\pi y} d\psi$$

Mais, d'après (1), on a aussi :

$$dc = -C'_0 y_0 \cdot \frac{dy}{y^2}.$$

Donc :

$$C'_0 y_0 \frac{dy}{y^2} = \frac{R^2 - r^2}{8\pi y} d\psi \quad \text{ou} \quad C'_0 y_0 \frac{dy}{y} = \frac{R^2 - r^2}{8\pi} d\psi.$$

En intégrant

$$C_0 y_0 \text{Log } y = \frac{R^2 - r^2}{8\pi} \psi + \gamma.$$

Pour $\psi = 0$, $y = y_0$ et la constante γ a pour valeur

$$\gamma = C'_0 y_0 \text{Log } y_0.$$

Donc

$$C'_0 y_0 \text{Log } \frac{y}{y_0} = \frac{R^2 - r^2}{8\pi} \psi,$$

ou

$$\boxed{y = y_0 e^{\frac{R^2 - r^2}{8\pi C'_0 y_0} \psi}}.$$

L'écartement doit croître exponentiellement, depuis y_0 pour $\psi = 0$ jusqu'à $e = (k + 1)y_0$ pour $\psi = \psi_c$.

Cherchons le gain réalisé de cette manière sur la capacité utile totale de la machine.

La partie variable, seule, est telle que $dc_v = \frac{R^2 - r^2}{8\pi} \cdot \frac{d\psi}{y}$.

$$\begin{aligned} \text{Donc :} \quad C_v &= \frac{R^2 - r^2}{8\pi y_0} \int_0^{\psi_c} e^{-\frac{R^2 - r^2}{8\pi C'_0 y_0} \psi} d\psi, \\ C_v &= C'_0 \left[1 - e^{-\frac{R^2 - r^2}{8\pi C'_0 y_0} \psi_c} \right]. \end{aligned}$$

Mais, d'autre part :

$$C_v = C'_0 \frac{k}{k + 1}.$$

On en déduit

$$\frac{R^2 - r^2}{8\pi C'_0 y_0} = \text{Log } (k + 1),$$

donc :

$$C'_0 = \frac{R^2 - r^2}{8\pi y_0} \cdot \frac{\psi_c}{\text{Log } (k + 1)}.$$

Sans le profil variable, la capacité utile était seulement :

$$C_0 = \frac{R^2 - r^2}{8\pi e} \theta = \frac{R^2 - r^2}{8\pi y_0(k+1)} \theta.$$

Le gain obtenu s'exprime donc par le rapport :

$$\frac{C'_0}{C_0} = \frac{\psi_c}{\theta} \cdot \frac{k+1}{\text{Log}(k+1)}.$$

Il faut maintenant déterminer la valeur de $\frac{\psi_c}{\theta}$. La région des électrodes à écartement constant présente une capacité :

$$C_c = \frac{C'_0}{k+1} = \frac{R^2 - r^2}{8\pi e} (\theta - \psi_c) = \frac{R^2 - r^2}{8\pi y_0(k+1)} (\theta - \psi_c).$$

On en tire :

$$C'_0 = \frac{R^2 - r^2}{8\pi y_0} (\theta - \psi_c).$$

Comme d'autre part

$$C'_0 = \frac{R^2 - r^2}{8\pi y_0} \cdot \frac{\psi_c}{\text{Log}(k+1)},$$

il vient :

$$\frac{\theta}{\psi_c} = 1 + \frac{1}{\text{Log}(k+1)}.$$

En reportant dans le rapport des capacités utiles :

$$\left[\frac{C'_0}{C_0} = \frac{k+1}{1 + \text{Log}(k+1)} \right].$$

Cherchons alors le gain réalisé sur la puissance de la machine, en fonction du facteur de multiplication. Soient K et K' , dans chaque cas, les facteurs de puissance maxima :

$$\frac{P'}{P} = \frac{C'_0}{C_0} \cdot \frac{K'}{K} = \frac{k+1}{1 + \text{Log}(k+1)} \cdot \frac{4k}{(k+1)^2} = \frac{4k}{k+1} \cdot \frac{1}{1 + \text{Log}(k+1)}.$$

Cette expression est maximum pour :

$$\text{Log}(k+1) = k-1.$$

Cette dernière équation est satisfaite lorsque $k = 2,15$ environ.

Par conséquent, l'intérêt, au point de vue puissance obtenue, de rendre l'écartement inter-électrodes variable est maximum pour :

$$k_0 = 2,15.$$

(La machine est supposée sans capacités parasites.)

Dans ces conditions, le gain réalisé sur la puissance, à *encombrement total égal*, est

$$\frac{P'_M}{P_M} = \frac{4}{k+1}, \quad \text{soit environ} \quad P'_M = 1,27 P_M.$$

Le gain maximum que peut apporter une machine à écartement variable ne dépasse donc pas 27 pour 100.

Pour une petite machine, ce gain ne justifierait pas la complication apportée à la construction. Mais pour une machine puissante et à tension élevée, la question pourrait être étudiée de plus près. Le facteur de multiplication optimum est supérieur au double de ce qu'il serait dans une machine ordinaire ; et surtout, la très haute tension, conduisant à des écartements inter-électrodes plus grands, permettrait une moindre précision absolue dans la confection du profil variable.

D'ailleurs, ce profil pourrait être simplifié et rendu plus facile à usiner, dans la mesure où l'on consentirait un gain inférieur à 27 pour 100.

REMARQUE. — Dans une machine réelle, avec capacités parasites, le gain réalisé grâce au profil variable serait plus considérable. Les C. P. n'augmentent pas sensiblement, en effet, alors que la capacité utile bénéficie d'un accroissement très appréciable (47 pour 100 pour $k=2,15$).

DEUXIÈME PARTIE

CONSTRUCTION ET ESSAIS DE GÉNÉRATRICES ÉLECTROSTATIQUES

Une étude méthodique et approfondie devrait commencer par la détermination expérimentale des propriétés diélectriques de différents gaz comprimés, employés avec des électrodes de nature diverse. Il conviendrait d'effectuer une classification, au point de vue électrique, des deux matériaux essentiels entrant dans la construction des machines. Ainsi que nous l'avons dit, il ne semble pas que des lois simples régissent ces phénomènes et jusqu'à ce jour, aucun travail complet et méthodique n'a été fait à ce sujet. L'influence de la nature et de la surface des électrodes reste le point le plus mystérieux à élucider.

Une telle étude, bien que longue et fastidieuse, serait fondamentale : il n'était cependant pas dans notre but de l'entreprendre et nous nous sommes bornés, dans ce domaine, à quelques essais sommaires. Des améliorations éventuelles ne changeraient en rien la théorie ou la réalisation de nos machines dont la puissance spécifique serait alors accrue.

On trouvera dans les pages suivantes la description de deux prototypes de génératrices électrostatiques, répondant dans la mesure du possible aux théories précédentes.

Le premier prototype est une machine de très faible puissance (quelques watts), réduite à sa plus simple expression et destinée à fournir une première idée sur les résultats qu'il est possible d'obtenir. Elle a également servi de modèle pour la construction de l'excitatrice de la machine suivante.

La seconde génératrice, à son tour, a été réalisée sous une forme plus industrielle. Sa puissance toujours assez limitée (quelques centaines de watts) est suffisante pour des essais.

Après un certain nombre d'observations générales sur la construction, nous donnerons la description des deux machines, sans toutefois nous arrêter aux nombreuses étapes par lesquelles cette construction a passé. A la suite de la description, nous indiquerons quelques résultats pratiques obtenus, choisis parmi les plus significatifs, et nous résumerons enfin les conclusions à tirer de cette étude.

OBSERVATIONS GÉNÉRALES SUR LA CONSTRUCTION. ISOLEMENT ÉLECTRIQUE. DIÉLECTRIQUES SOLIDES.

Le fonctionnement dans un gaz comprimé permet de réduire dans de fortes proportions les intervalles d'isolement et donne une allure particulière à la réalisation des machines.

L'espace inter-électrodes est la région où doit régner le champ électrique maximum et partout ailleurs il faudra se réserver des coefficients de sécurité beaucoup plus élevés. Cependant, la petitesse de l'écartement inter-électrodes — par exemple 2,5 mm pour une d. d. p. entre producteurs et transporteurs de 100 KV — donne une première idée de la réduction possible de tous les intervalles d'isolement. La d. d. p. inter-électrodes est la plus élevée que l'on puisse rencontrer dans une machine ; même en tenant compte, partout ailleurs, de coefficients de sécurité convenables, la machine pourra revêtir une forme très ramassée et très comprimée.

L'expérience montre d'ailleurs que l'isolement dans le gaz comprimé, diélectrique homogène de haute rigidité, est particulièrement aisé et efficace. Partout où ce fluide s'interpose, le problème de l'isolement se résoud facilement et sûrement. Les intervalles d'isolement peuvent descendre à des valeurs exceptionnellement faibles par rapport aux d. d. p. supportées ; ces valeurs auxquelles l'esprit n'est pas habitué paraissent étonnantes et la construction ramassée des machines semble très hardie, par rapport aux tensions mises en jeu.

Supports isolants. — Cependant, le diélectrique idéal qui, par ses vertus, permet ces prouesses, doit être parfois remplacé par un isolant beaucoup moins avantageux au point de vue électrique, mais présentant des propriétés mécaniques le rendant apte à servir de support. Alors, le problème de l'isolement est moins facile à résoudre et les dimensionnements doivent être plus généreux.

Une méthode générale, particulièrement efficace, consiste à alléger le travail du diélectrique solide en faisant participer le gaz comprimé à l'isolement (procédé employé dans les traversées H. T. par exemple). Il est souvent possible de limiter le rôle des isolants solides à celui de supports mécaniques — au moins de les alléger considérablement au point de vue électrique — et de confier encore au gaz comprimé la fonction d'isolement.

A cet effet, de nombreux artifices de construction peuvent être employés. Pour éviter les dangers de rupture dans la masse du diélectrique solide, il suffit de ménager, si possible dans la région de champ maximum, une rainure ou une cavité de largeur suffisante qui, remplie de gaz comprimé, constitue un véritable fossé et oppose une barrière infranchissable. Le p. i. s. ϵ du diélectrique solide, toujours supérieur à celui du gaz, amène une part importante de la d. d. p. totale à s'établir dans la coupure gazeuse. Le champ supposé uniforme, dans une coupure étroite, est en effet ϵ fois plus grand que dans le diélectrique solide. Mais la rigidité du gaz est supérieure, en général, à ϵ fois celle du solide. Contrairement à leur réputation habituelle, les couches de gaz comprises entre les isolants ne constituent plus ici des points faibles ; le gaz, en passant de la pression atmosphérique à la pression d'utilisation normale pour nos machines, voit ses qualités croître rapidement et son rôle s'inverser par rapport à celui du solide. Il devient l'élément de choix, qu'il faut employer partout où on le peut.

Mais la cause la plus commune de défaillance est l'amorçage de décharges rampantes le long des isolants solides, bien avant que ceux-ci ne se trouvent soumis à des champs dangereux. Les « aérations » du diélectrique dont il vient d'être question sont encore un remède radical, prévenant ce genre de décharges. Dans le cas où un évidement complet de l'isolant est impossible, il suffit d'allonger le chemin de fuite superficiel en creusant des rainures bien placées et perpendiculaires aux lignes de force.

Les décharges rampantes qui se produisent lors des essais de la machine laissent des traces superficielles sur les isolants et indiquent au démontage quelles sont les régions qu'il convient de modifier ainsi. Ces régions ne sont pas toujours celles qu'on aurait pu prévoir à priori. Après quelques essais suivis de retouches, tous les points faibles sont éliminés et les décharges rampantes deviennent extrêmement rares.

L'expérience montre qu'il est plus efficace de pratiquer une série de petits canaux parallèles, plutôt que de réduire leur nombre et d'augmenter leurs dimensions.

Remarques sur les diélectriques solides employés.

Outre la bonne tenue électrique qu'ils doivent présenter, ces isolants sont des supports et comme tels doivent joindre des qualités mécaniques intéressantes à un usinage facile.

Cependant, il semble regrettable de devoir confier des rôles mécaniques parfois essentiels à des matériaux isolants. Tel est le cas des joues maintenant le rotor, devant définir sa position avec précision, et pouvant avoir à supporter des efforts mécaniques divers, assez intenses.

Dans nos réalisations, nous avons employé à peu près exclusivement de l'ébonite de bonne qualité dont la résistivité était considérable ⁽³¹⁾. Des essais de rigidité ont montré, d'autre part, qu'elle supportait au maximum des champs de l'ordre de 150 KV/cm (pour des épaisseurs de 2 à 3 mm). Dans l'air comprimé à 30 kg/cm², deux tiges filetées de 8 mm dont les écrous hexagonaux voisinaient, sur angle et sur l'ébonite, à moins de 10 mm, ont supporté des d. d. p. de 100 KV sans que des décharges rampantes apparaissent.

Ces qualités coïncident d'ailleurs avec un pouvoir inducteur spécifique peu considérable [3, 7].

⁽³¹⁾ Depuis, l'ébonite s'est montrée totalement insuffisante et impropre à la construction de machines poussées. Cet isolant, déjà ancien et qui a rendu de nombreux services, a été détrôné par une gamme variée de matières plastiques modernes dont certaines présentent des qualités exceptionnelles.

La « Cibanite » (résine d'aniline) semble l'une des meilleures. Sa rigidité diélectrique atteint 500 à 600 KV/cm (pour une épaisseur de quelques mm) et sa résistivité est très grande. Au point de vue mécanique, on peut compter sur une résistance à la traction supérieure à 600 kg/cm² et le fluage est minime. Il est seulement regrettable que ce matériau soit fragile, délicat à usiner et difficile à mouler.

PROTOTYPE N° 1

GÉNÉRATRICE ÉLECTROSTATIQUE DE TRÈS FAIBLE PUISSANCE

Tension de fonctionnement: 50 KV.

Puissance dans l'air à 30 kg/cm²: 5 watts.

$2n = 2$ pôles. $N = 1\,500$ t/min.

Cette machine est de construction très sommaire. Cependant, les résultats obtenus sont intéressants, les champs réalisés dans l'espace inter-électrodes ayant été considérables. Nous ne la décrirons que superficiellement, car le prototype n° 2 présente beaucoup plus d'intérêt au point de vue de la réalisation.

1. — Description.

Le dessin sommaire de la figure 20 donne une idée de la construction simplifiée.

La machine est du type à deux pôles et ne comporte qu'un seul plateau. Dans leur forme définitive, les secteurs fixes sont en duralumin et les secteurs mobiles en aluminium. Le rotor de cette machine a été placé en porte à faux sur l'axe robuste d'une ancienne génératrice montée sur billes : du côté en porte à faux, l'axe est de fort diamètre et le roulement particulièrement renforcé. Ce montage était immédiat ; et nous pensions, aussi, utiliser la partie courant continu basse tension de la génératrice en moteur — nous avons dû y renoncer pour une raison signalée ultérieurement.

Les deux secteurs transporteurs [1], demi-circulaires, sont maintenus au moyen de boulons [2] entre deux joues en ébonite [3] ajustées sur l'axe [4], et dont la position longitudinale est fixée au moyen de manchons [5] également en ébonite. Un écrou d'extrémité [6] bloque le rotor sur l'axe. Le roulement à billes, côté porte

à faux, est serré longitudinalement ; la position de l'axe, donc du rotor, par rapport au bâti est ainsi bien définie.

Ce bâti porte alors à son tour une plaque isolante [7] en ébonite supportant elle-même le stator à l'aide de quatre tiges filetées [8]. L'écartement nécessaire est donné aux deux secteurs fixes [9] du stator à l'aide d'entretoises tubulaires [10]. Des écrous [11] serrent les secteurs fixes ainsi entretoisés et le centrage définitif de l'ensemble rotor-stator est réalisé simplement en déplaçant le stator entre ces écrous qui le maintiennent ; la position du rotor reste évidemment immuable. L'écartement inter-électrodes peut être modifié facilement en faisant varier la longueur des entretoises tubulaires ; il suffit, en fait, d'ajouter de petites rondelles supplémentaires pour augmenter cet écartement à volonté.

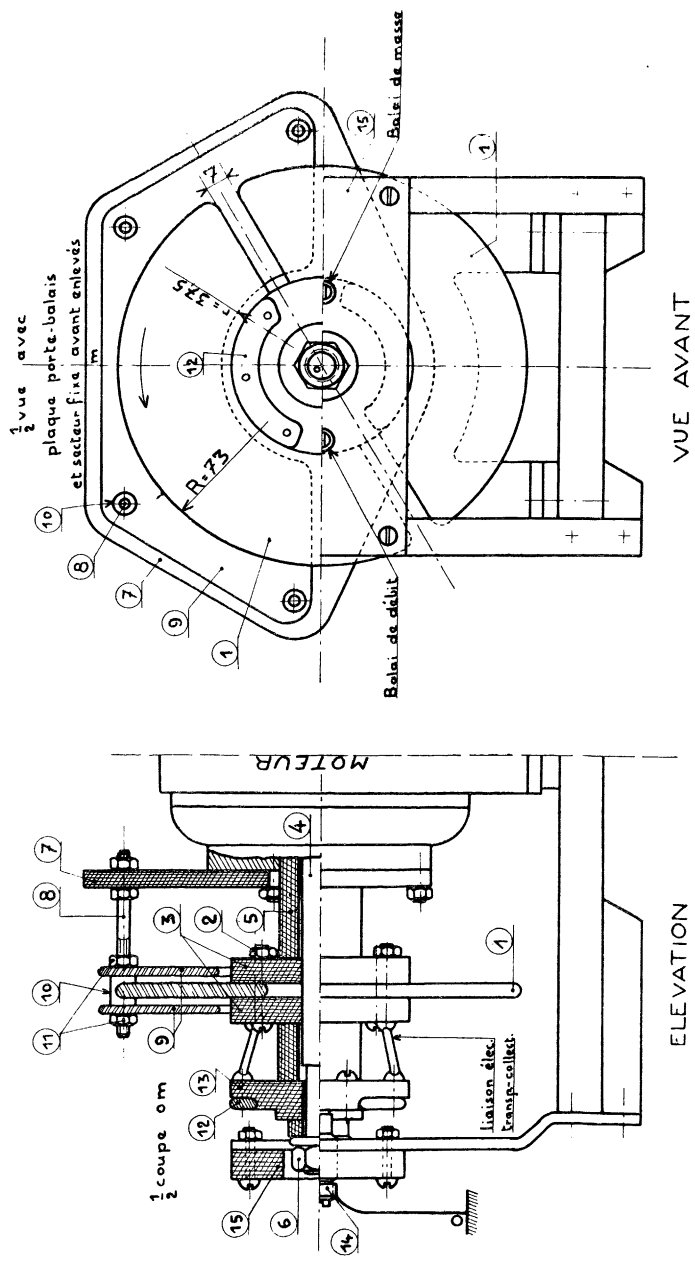
Le collecteur, très simplifié lui aussi, comporte deux touches [12] en acier, encastrées dans le support en ébonite [13]. Il est du modèle plan, les balais devant par conséquent appuyer parallèlement à l'axe de la machine. Ce collecteur est bloqué avec le rotor lui-même, par l'écrou d'extrémité. Les deux balais [14], de débit et de masse, sont du modèle employé dans le prototype n° 2 et décrits alors. Ils sont fixés dans une plaque [15] en ébonite, elle-même adaptée au bâti.

Après montage, les faces des secteurs mobiles transporteurs, ainsi que la partie active du collecteur, ont pu être dressées au tour.

Moteur d'entraînement : Comme nous l'avons dit, nous pensions utiliser à cet effet la génératrice à courant continu B. T. sur laquelle notre machine avait été montée. Son fonctionnement en moteur shunt était très satisfaisant. Le réservoir à gaz qui devait renfermer le groupe moteur-générateur électrostatique ainsi constitué avait donc été percé de deux trous taraudés, lesquels avaient reçu deux bougies ordinaires de moteur à explosion. Ces deux traversées isolantes constituaient, avec la masse d'autre part, trois jonctions permettant l'alimentation du moteur shunt et le réglage de sa vitesse par modification de son excitation. Cependant, et bien que dans l'air à la pression atmosphérique la commutation fût assez bonne, le fonctionnement de ce moteur se trouva compromis dès qu'il eut à tourner dans un gaz comprimé de nature oxydante, tel que l'air. Les contacts au collecteur devinrent défectueux⁽³²⁾.

⁽³²⁾ C'est pour cette raison que notre deuxième machine fut équipée avec un moteur asynchrone, et non avec un moteur C. C., qui cependant aurait eu un fonctionnement plus souple pour des essais.

FIG. 20 GENERATRICE ELECTROSTATIQUE



Nous avons dû, par conséquent, renoncer à l'emploi d'un moteur à collecteur, et accoupler à notre groupe un petit moteur asynchrone triphasé de faible puissance, avec induit en court-circuit.

Ce moteur asynchrone était à quatre pôles, mais nous avons pu disposer de sa vitesse en l'alimentant par le groupe convertisseur de fréquence dont il est question dans la description du prototype n° 2.

Réservoir à gaz comprimé : Il avait été prévu beaucoup plus vaste que ce premier stade ne l'exigeait, en vue de la création d'une machine plus importante. Le prototype n° 2 a été établi en vue d'utiliser au mieux ce réservoir dont on trouvera la description avec celle de cette deuxième machine.

Excitation : Nous avons utilisé comme excitatrice séparée une génératrice électrostatique du type H. Chaumat à laquelle on ne demandait qu'une puissance négligeable.

Le potentiel était réglé très simplement au moyen d'une effluve établie entre pointe et sphère, ces deux électrodes étant reliées respectivement à la masse et au débit de l'excitatrice. En modifiant l'écartement pointe-sphère, on faisait varier le potentiel d'excitation depuis zéro jusqu'au maximum permis par la machine. Comme nous le verrons, le fonctionnement de l'effluve est beaucoup plus stable lorsque la pointe est négative (formation de l'étoile) plutôt que positive (aigrette).

Traversées haute tension : Le réservoir devait livrer passage à deux sorties H. T., l'une permettant d'établir le potentiel d'excitation sur les producteurs, l'autre assurant le débit de la génératrice. Ces deux sorties sont décrites avec le prototype n° 2 pour lequel elles ont été conservées sans changement.

Cependant, au début, nous avons employé des traversées pleines, en ébonite, sans aménagement d'une gaine de gaz comprimé. Un premier modèle comportait une tige interne de 7 mm de diamètre, le trou pratiqué dans le réservoir ayant 21 mm $\left(\frac{R}{r} = 3, \text{ voisin de } e\right)$.

Toutes les traversées de ce modèle ont claqué, au droit de la paroi du réservoir, pour des d. d. p. de l'ordre de 60 KV. Le champ théorique maximum $E_m = \frac{1}{r} \cdot \frac{U}{\text{Log} \frac{R}{r}}$ devait être alors de 160 KV/cm

et il est normal que le claquage soit survenu.

Une augmentation des diamètres, portés respectivement à 10 mm et 29 mm $\left(\frac{R}{r} = 2,9, E_m = 120 \text{ KV/cm pour une d. d. p. de } 60 \text{ KV}\right)$ ne permet pas encore aux traversées de se comporter avec sécurité.

C'est alors que, nous bornant aux dimensions précédentes, nous avons aménagé la gaine de gaz comprimé et réalisé les traversées décrites ultérieurement. Le problème de l'isolement fut alors définitivement résolu.

2. — Caractéristiques de la génératrice.

Cette génératrice avait été établie pour fonctionner dans l'air comprimé aux environs de 30 kg/cm^2 ; le champ électrique maximum, adopté comme base, était estimé à 450 KV/cm .

Le débit devait se faire sous une tension U de 40 à 50 KV, le facteur de multiplication k étant voisin de l'unité.

Écartement inter-électrodes. — $e = \frac{U}{E_0} \cdot \frac{k+1}{k}$; $e = 2 \text{ mm}$ pour $E_0 = 450 \text{ KV/cm}$, $U = 45 \text{ KV}$ et $k = 1$.

Cet écartement a été porté, en fait, à 2,15 mm.

Épaisseur des électrodes. — $a = 2e$; les secteurs mobiles sont constitués par des plaques en aluminium de 4,8 mm d'épaisseur (après usinage).

Quant aux secteurs fixes, une seule de leur face est active, les forces sur leurs tranches sont réduites de moitié, et il était théoriquement possible de réduire leur épaisseur dans ce même rapport. Cependant, le problème se pose alors de conserver un champ à peu près constant au voisinage des tranches, malgré la symétrie qui n'existe plus. L'épaisseur adoptée pour les secteurs fixes a été de 3,2 mm, l'arrondi de la tranche affectant toujours une forme d'ellipse, à rayon de courbure progressivement décroissant. Les résultats obtenus ont été très satisfaisants, aucune étincelle n'ayant laissé de point d'impact sur les tranches, au cours des essais.

Profil de la tranche des transporteurs. — Elle a été amenée approximativement au profil théorique, comme les électrodes du deuxième prototype (voir les caractéristiques de ce dernier).

Capacité utile. — Avec les dimensions adoptées (voir dessin), la surface active d'un seul des transporteurs (compte tenu des deux faces) est voisine de 120 cm^2 . Pour $e = 2,15 \text{ mm}$, la capacité maximum utile doit être $C_0 = 45 \text{ cm}$.

Puissance théorique (sans C. P.) ⁽³³⁾

$$P_{\text{watts}} = \frac{10^{-5}}{4,5} k C_0 V_0^2 N n.$$

Pour une vitesse de 1 500 t/min. et un champ utile de 450 KV/cm, on obtiendrait donc théoriquement :

$$P = 5,8 \text{ watts.}$$

$$\left. \begin{array}{l} k = 1. \\ C_0 = 45 \text{ cm.} \\ V_0 = 48,5 \text{ KV maximum.} \\ N = 25 \text{ t/s.} \\ 2n = 2. \end{array} \right\}$$

Il s'agit d'une puissance limite ; les C. P. doivent la réduire sensiblement.

3. — Essais et résultats.

Les mesures ont été effectuées comme nous l'indiquons au sujet du deuxième prototype, mais le débit n'a pas été assuré d'une manière réversible ; la puissance engendrée par la machine a été dissipée sous forme d'étincelles ⁽³⁴⁾ produites entre deux sphères. Nous avons mesuré l'intensité moyenne *I* du courant ainsi débité ⁽³⁵⁾, à l'aide d'un microampèremètre à cadre mobile inséré entre la masse et une sphère, et d'autre part, nous avons pu déduire la tension maximum de débit *U*, à partir de la longueur d'étincelle obtenue. Le produit *UI* ne représentait qu'une puissance fictive, de laquelle nous avons pu cependant déduire le champ inter-électrodes. En fait, pour avoir une idée de la puissance réelle, il convenait de considérer le produit $\frac{UI}{2}$; la valeur de *I* était en effet une valeur moyenne, mais la tension mesurée *U* représentait un maximum, décroissant aussitôt une étincelle établie, cette étincelle se comportant alors comme un véritable court-circuit.

Ce mode d'essai n'est pas très heureux et il est bien préférable d'utiliser une résistance de charge permettant un débit réversible et une mesure rigoureuse de la puissance engendrée ⁽³⁶⁾. Il serait d'ailleurs impossible d'essayer ainsi une machine puissante ; les étin-

⁽³³⁾ Voir Prem. Partie, ch. III, § 1.

⁽³⁴⁾ Les anciennes machines électrostatiques étaient essayées d'une manière analogue.

⁽³⁵⁾ Cette intensité est inférieure à la valeur que l'on obtiendrait si la machine fonctionnait en court-circuit, à cause des capacités parasites.

⁽³⁶⁾ On peut également faire débiter la génératrice sur une effluve.

celles au collecteur deviendraient intolérables. D'autre part, le circuit de débit formant un circuit oscillant, les décharges y font naître des courants de haute fréquence très intenses qu'il est pratiquement impossible d'éliminer ; les effets d'induction sur le circuit d'alimentation du moteur d'entraînement sont particulièrement fâcheux.

Cependant, les capacités parasites de cette première machine étaient beaucoup trop considérables, par rapport à sa capacité utile (le nombre de plateaux étant trop réduit) pour qu'un débit réversible, sur résistance de charge, pût être réalisé pratiquement.

L'essai irréversible mentionné nous a néanmoins permis d'effectuer des mesures comparatives intéressantes ; c'était le seul résultat que nous attendions de cette petite génératrice. D'autre part, nous avons pu calculer indirectement la grandeur essentielle que représente le champ électrique inter-électrodes accessible.

Détermination du champ électrique. — La puissance théorique de la machine, pour un champ de 450 KV/cm est au maximum, nous l'avons vu, de 5,8 watts. Pour une puissance P , obtenue dans les mêmes conditions de vitesse, le champ E doit être $E = 450 \sqrt{\frac{P}{5,8}}$.

On peut donc calculer le champ *minimum* de pointe créé dans la machine à partir de la puissance fictive UI mesurée précédemment (et non $\frac{UI}{2}$ car on obtiendrait alors un champ moyen ; U est une valeur maximum qui donne lieu au champ réellement atteint).

Le tableau 1 résume un essai effectué dans l'air comprimé, la machine ayant alors sa forme définitive⁽³⁷⁾. Il comprend, en fonction de la surpression π de l'air, en kg/cm² (pression relative), et pour une vitesse constante de 1 500 t/min. :

— La distance explosive maximum d , en mm, réalisée entre sphères de 100 mm de diamètre.

— La différence de potentiel correspondante, qui représente la tension maximum de débit U , en KV.

— L'intensité moyenne I , en microampères, débitée par la machine.

— Le champ électrique minimum E , en KV/cm, réalisé dans la machine, et calculé comme nous l'avons dit.

⁽³⁷⁾ Les valeurs portées ont été obtenues après un certain temps de fonctionnement, les électrodes étant « formées » (voir plus loin).

TABLEAU N° 1.

π kg/cm ²	0	10	15	20	25	28	37
d mm.	»	10	15	20	24,5	27	30,5
U KV.	»	31,5	46	59	69,5	76	83
i μ A.	»	»	72	86	106	112	128
E KV/cm. . . .	40 ⁽¹⁾	»	340	420	505	555	610

(¹) Valeur admise ordinairement pour l'écartement de 2,15 mm.

La courbe $E(\pi)$ a été figurée en pointillé, pour les pressions élevées, sur la figure 27 représentant les champs obtenus avec le prototype n° 2, dans des conditions approximativement comparables (écartement entre électrodes de 2,4 mm au lieu de 2,15).

Les champs obtenus ici (ce sont, nous le répétons, des minima) sont considérables et ils croissent avec la pression sans qu'une véritable saturation se produise (la croissance est cependant de moins en moins rapide et la loi de Paschen n'est vérifiée que pour des pressions assez basses). Dans le prototype n° 2, équipé avec des électrodes de même nature (aluminium et duralumin de même provenance) et pour des écartements à peine supérieurs, les champs sont beaucoup moins élevés car une saturation se produit au-dessus de 20 kg/cm² (voir fig. 27, courbe n° 1).

Il semble, en fait, que les risques de rupture diélectrique soient proportionnels à la surface des électrodes.

Influence de l'état des électrodes. — Ainsi que nous le montrerons en détail pour le prototype n° 2, le champ admissible croît considérablement lorsque la surface des électrodes est de mieux en mieux polie ; après polissage, les résultats s'améliorent encore notablement et progressivement au cours des essais, dans les débuts du fonctionnement, et alors que des décharges se produisent entre électrodes : un véritable phénomène de « formation » des électrodes peut s'observer.

Influence du gaz diélectrique. — Nous avons fait fonctionner cette machine dans différents gaz comprimés relativement courants : air, azote, mélange variable d'azote et d'oxygène, hydrogène, gaz carbonique et ammoniac.

L'air comprimé a donné les meilleurs résultats.

L'azote, bien que de rigidité supérieure à celle de l'air pour la pression atmosphérique, perd rapidement ce privilège et devient de qualité inférieure lorsque la pression s'élève. Mais une très faible introduction d'oxygène, à pression constante, améliore immédiatement sa rigidité dans une grande proportion. Nous préciserons ces résultats au sujet du prototype n° 2.

Seul, l'hydrogène semble intéressant en raison de sa très faible densité, mais il faudrait l'employer sous de fortes pressions (70 à 100 kg/cm²) ; notre réservoir ne pouvant pas les supporter, nous n'avons pas dépassé 35 kg/cm². Jusque là, l'accroissement de la rigidité semble satisfaisant ; pour cette pression de 35 kg/cm², le champ disruptif est déjà voisin de 350 KV/cm. En extrapolant les résultats, on peut conclure que ce gaz permettrait l'établissement de machines à rendement particulièrement élevé ; le seul inconvénient serait la nécessité d'un réservoir très lourd.

Par la suite, tous nos essais ont été effectués dans l'air comprimé. Enfin, des observations diverses ayant été faites à nouveau pour le prototype n° 2, elles seront groupées, afin d'éviter les redites, avec les résultats relatifs à cette deuxième machine.

PROTOTYPE N° 2

GÉNÉRATRICE ÉLECTROSTATIQUE

200 watts. — 50 KV.

BUT PROPOSÉ :

Établir une génératrice d'une puissance de quelques centaines de watts sous une tension de 40 à 50 KV. Le réservoir à gaz nous était imposé et il s'agissait d'y loger la génératrice et son moteur d'entraînement (l'utilisation d'un presse-étoupe pour moteur extérieur ne pouvait pas être encore envisagée simplement). En conséquence, nous avons prévu une machine à nombre de pôles assez élevé : $2n = 8$; la vitesse devait être également assez grande : $N = 3\,000$ t/min. Cette vitesse élevée conduisait par ailleurs à un moteur d'entraînement de volume moindre et plus facile à loger.

Au début, la machine était dépourvue d'excitatrice, mais une place suffisante avait été ménagée dans le réservoir ; une excitatrice montée en bout d'arbre fut effectivement ajoutée par la suite.

La place restant enfin disponible pour la génératrice a permis de l'équiper avec cinq plateaux montés les uns à côté des autres.

I. — DESCRIPTION

La figure 21 donne une idée d'ensemble, à l'échelle, du groupe moteur-générateur réalisé. La planche 1 et sa nomenclature fourniront les détails de construction de la génératrice proprement dite (sans son excitatrice).

Dans son ensemble, la machine est de forme cylindrique, profitant au maximum de l'espace offert à l'intérieur du réservoir. Elle comprend deux flasques — dont un flasque principal (2) servant de

référence au montage — assemblés à l'aide de quatre entretoises. Le flasque principal porte d'une part le roulement à billes essentiel, bien bloqué, et d'autre part, une semelle destinée à recevoir le moteur d'entraînement ; l'ensemble moteur-générateur forme un

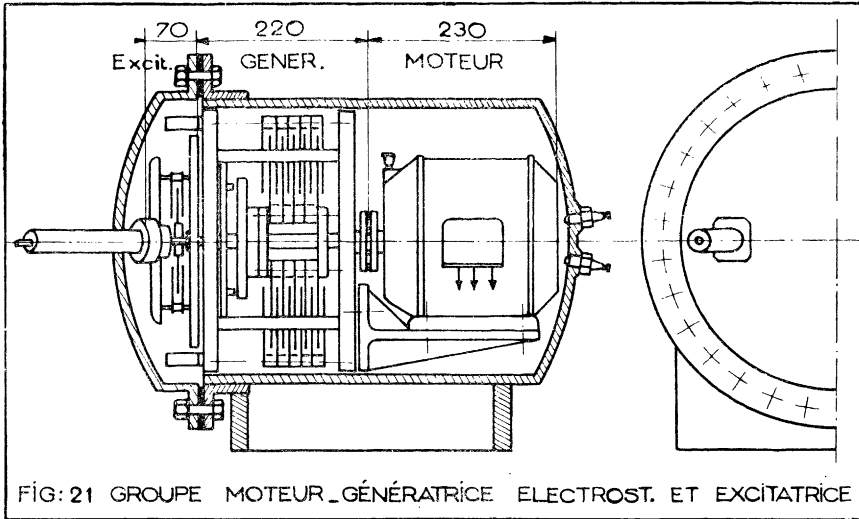


FIG. 21 GROUPE MOTEUR_GÉNÉRATRICE ELECTROST. ET EXCITATRICE

groupe compact. L'autre flasque porte le roulement secondaire, libre longitudinalement. Le roulement principal a été choisi de fort calibre, à gorge profonde, tandis que l'autre est à rotule et d'un modèle beaucoup plus réduit.

Les flasques, circulaires dans leur ensemble, ont un diamètre presque égal au diamètre intérieur du réservoir à gaz afin que la machine, en s'emboîtant, se trouve calée radialement. Quatre encoches pratiquées sur leur périphérie comportent des supports isolants sur lesquels, par l'intermédiaire de tiges filetées, viennent se fixer les secteurs producteurs, qui forment ainsi quatre groupes distincts, réunis électriquement entre eux.

Le collecteur est encore du type à contact latéral et vient se placer directement en bout du rotor, jouant à son égard le rôle de joue de maintien. Il convenait de ne pas perdre de place longitudinalement, la longueur du réservoir, encombrée en partie par le moteur, s'étant trouvée particulièrement limitée ; le montage réalisé l'utilise au mieux. Un plateau isolant fixé sur le flasque secondaire peut porter tous les balais désirés. Ce flasque est évidé en conséquence pour permettre le logement des balais et pour alléger l'ensemble.

1. — **Rotor et Stator.** — Le nombre de plateaux étant assez élevé (5), nous avons adopté un montage des secteurs fixes et mobiles par entretoises. Chaque secteur, tant au stator qu'au rotor, revêt la forme d'une plaque surfacée ; il est séparé de son voisin par une entretoise bien calibrée et rectifiée, dont l'épaisseur fixe de manière définitive l'écartement inter-électrodes. Les divers groupes d'électrodes ainsi entretoisées entre elles, sont serrés par leurs extrémités et forment un bloc compact.

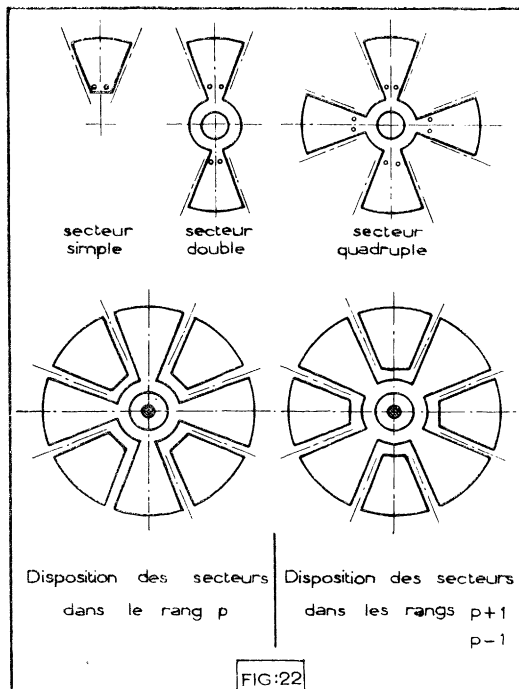
Le centrage rotor-stator se réalise très simplement. Le rotor est fixe par rapport au flasque principal, et il suffit d'ajuster la position longitudinale de chacun des quatre groupes de secteurs fixes, en faisant coulisser chacun d'eux, en bloc, sur les tiges filetées qui les supportent ; une fois réglés, on les serre entre leurs écrous.

Le rotor a bénéficié, de son côté, d'un montage un peu particulier et très ingénieux ⁽³⁸⁾. Il était désirable que des secteurs jouant le même rôle électrique fussent réunis mécaniquement entre eux, autrement dit qu'une même famille de transporteurs formât, au moins dans la limite d'un plateau, une électrode unique. Il convenait en effet de parer aux effets de la force centrifuge. Les deux joues solantes supportant le rotor devaient être en ébonite, donc incapables d'assurer un travail mécanique considérable ; de plus, les plateaux du centre, éloignés des joues, pouvaient faire fléchir leurs tiges de fixation. Il était donc absolument nécessaire que deux secteurs opposés, appartenant à une même famille, fussent solidaires entre-eux mécaniquement afin que la force centrifuge, s'exerçant sur chacun d'eux, s'équilibrât sans faire travailler un autre organe que la propre jonction mécanique des secteurs opposés.

Cependant, cette jonction devait respecter l'isolement électrique entre les deux familles de transporteurs d'une part, entre ces familles et l'axe de la machine d'autre part (cet axe traverse complètement le rotor). La solution adoptée, ayant donné entièrement satisfaction, est la suivante. Les transporteurs sont de deux sortes ; ou bien ils sont simples, revêtant alors la forme d'un secteur proprement dit $\left(\text{d'angle } \theta = \frac{2\pi}{2n}, \text{ soit ici } 45^\circ \right)$, ou bien ils sont découpés dans une même tôle sous forme de secteurs doubles, ou mieux de secteurs quadruples résultant de l'association de deux secteurs doubles en croix (Voir fig. 22). Un secteur quadruple constitue donc une famille

⁽³⁸⁾ Dû à M. le Professeur Néel.

complète de transporteurs. Ces secteurs multiples, ou « lames maîtresses » sont percés, au centre, d'un trou de diamètre suffisant, dont les bords sont convenablement arrondis ; l'axe de la machine traverse ce trou concentriquement, et la différence des diamètres doit être assez grande pour assurer l'isolement mutuel. Dans notre machine, pour une d. d. p. de 50 KV., le trou pratiqué dans les lames maîtresses a un diamètre de 28 mm, alors que l'axe est de 13 mm ; l'écartement restant entre ces deux pièces est donc de 7,5 mm, mais il est certain qu'il pourrait être réduit sans crainte à 5 mm seulement, ce qui permettrait d'employer un axe plus fort.



Ceci étant, pour constituer le rotor, ces divers secteurs, simples ou multiples, sont empilés avec interposition des entretoises, suivant une répartition alternée, comme l'indique la figure 22. Chaque plateau comprend donc une lame maîtresse en croix, constituant une des familles de transporteurs, et entre les bras de laquelle sont intercalés quatre secteurs simples formant l'autre famille. Les plateaux immédiatement voisins, de part et d'autre de celui-ci, sont de constitution identique mais se trouvent décalés d'un pas polaire (45°) ; de cette manière, la lame maîtresse appartient maintenant à la famille qui, dans le plateau précédent, était formée de secteurs séparés. Le plateau suivant est encore décalé, donc coïncide avec le premier et ainsi de suite ; l'unique lame maîtresse d'un plateau appartient donc tour à tour à l'une et à l'autre famille de transporteurs.

Les secteurs voisins de deux plateaux successifs sont séparés par une cale-entretoise dont il a été question. Lorsque tous les plateaux

sont en place, l'ensemble est serré et maintenu entre les deux joues isolantes, par l'intermédiaire de tiges (deux par secteur simple) assurant à la fois la fixation des secteurs et le serrage du rotor ; après un montage facile, le rotor forme alors un bloc compact résistant par lui-même aux actions de la force centrifuge (en supposant toutefois l'ensemble équilibré, ce que nous avons réalisé au moins statiquement à l'aide de masselottes de plomb, serrées en bout des tiges).

Dans un plateau donné, la moitié des secteurs sont simples et n'équilibrent pas la traction centrifuge dont ils sont l'objet ; mais cette traction se reporte de part et d'autre, dans les deux plateaux voisins dont les secteurs correspondants sont, cette fois, associés sous forme de lames maîtresses. La partie annulaire de la jonction des lames maîtresses (ou la base de celles-ci, dans la région de plus faible section) doit donc pouvoir résister au double de l'effort centrifuge qui sollicite ses propres secteurs, afin de tenir compte de l'appui que prennent sur elles les secteurs simples des plateaux voisins.

Cette disposition assure d'autre part l'interconnexion électrique de tous les secteurs d'une même famille, à la fois dans tous les plateaux ; deux couples de balais peuvent donc suffire, pour rendre la commutation complète.

On peut enfin remarquer que ce mode de construction est applicable à toute machine comportant un nombre de pôles au moins égal à quatre (le nombre de pôles est normalement pair). Dans une machine à $2n$ pôles, les lames maîtresses possèdent n branches. Lorsque n est impair, les branches de ces lames ne sont plus opposées deux à deux, mais la résultante des efforts centrifuges est nulle, de toute façon.

Dans notre machine, nous avons dit que cinq plateaux étaient prévus. Une des joues isolantes supportant le rotor (la plus proche du roulement principal) est fixée de façon définitive sur l'axe et tournée au montage. A partir de cette joue, on peut donc monter le rotor, comme il a été dit, par empilage convenable des éléments. La seconde joue d'extrémité vient ensuite s'appliquer ; elle est fixée radialement par une clavette parallèle (pour la faire participer à l'entraînement du rotor) mais elle est libre longitudinalement et peut coulisser. Cette joue porte également le collecteur dont les touches, percées à la manière des secteurs mobiles, s'empilent à la suite. Les écrous de serrage du rotor appuient directement sur elles.

La liaison électrique entre les secteurs mobiles et les touches du collecteur est donc assurée simplement. D'autre part, l'espace situé entre les touches est occupé par le « cache », en ébonite, qui rend plane la surface active du collecteur. Le rotor et son collecteur ne forment ainsi qu'un seul bloc.

Enfin, ce montage permet encore de n'utiliser qu'un nombre de plateaux inférieur à cinq, et quelconque. Il suffit en effet, une fois le nombre de plateaux voulus empilés, de remplacer les plateaux manquants par des entretoises supplémentaires de longueur convenable, de manière que la joue d'extrémité et le collecteur se trouvent néanmoins dans leur position longitudinale normale. Le serrage du rotor peut alors s'effectuer comme auparavant. Quatre séries de huit entretoises de remplacement nous ont permis de faire fonctionner la génératrice successivement avec 1, 2, 3 et 4 plateaux.

Défauts du montage. — Ce montage du rotor, par empilement des secteurs et des entretoises, n'est pas sans inconvénients. Une construction peu soignée laisse souvent aux plateaux du rotor un gauche appréciable, local ou général ; en outre, il n'est pas possible d'usiner définitivement les faces des plateaux, une fois le montage effectué.

Tous les éléments empilés — secteurs et entretoises — doivent être surfacés et calibrés dans leur épaisseur avec une précision importante, surtout lorsque le nombre de plateaux est grand. La joue isolante principale doit être tournée, après son montage, et elle devrait donner sans fléchir une bonne définition aux secteurs empilés. Il faudrait pour cela qu'elle soit parfaitement rigide.

Notre machine fut équipée, dans une première phase, avec des secteurs en aluminium et duralumin dont le surfacage était sommaire ; le gauche dépassait 5/10 de mm, à la périphérie des secteurs. Dans une deuxième phase, tous les secteurs furent remplacés et fabriqués cette fois en acier doux, tant à cause de la possibilité de surfacage au plateau magnétique que dans l'espoir d'une amélioration du champ électrique admissible. Ils furent rectifiés, ainsi que les cales-entretoises, au 1/100 de mm. Le gauche conserva des valeurs locales de deux ou trois dixièmes. La joue principale avait dû, pour manque de matière première convenable, être fabriquée avec une épaisseur trop faible (10 mm). Ultérieurement, un accroissement appréciable de cette épaisseur (non figuré sur le dessin) atténua encore un peu le gauche.

En fait, la précision mécanique du centrage rotor-stator n'a jamais été parfaite. Un gauchage de 2,5/10 de mm sur l'écartement inter-électrodes amenait une erreur relative de 10 pour 100, donc une perte en puissance d'environ 20 pour 100 (Voir première partie, ch. VI, § 6). Nous avons dû, dans nos essais, tenir compte de cette cause importante de diminution de puissance ; on trouvera, dans les résultats donnés plus loin, des corrections établies dans ce but.

Isolement. — L'écartement entre deux tiges de serrage consécutives du rotor, appartenant respectivement à chaque famille de transporteurs, est particulièrement réduit (à cause du nombre de pôles assez élevé et afin de perdre radialement le moins de place possible). Bien que ces tiges consécutives soient disposées à des distances différentes du centre, le chemin de fuite entre leurs écrous cylindriques, sur l'ébonite des joues, ne dépasse pas 10 mm (la d. d. p. atteint 50 KV). Pour éviter l'amorçage de décharges rampantes, nous avons dû pratiquer une série de rainures (5 mm de largeur et autant de profondeur) à la surface de toutes les pièces en ébonite supportant le rotor et le collecteur ; une saignée circulaire isole les tiges de l'axe, et huit saignées radiales sont interposées entre les tiges voisines appartenant à l'une et à l'autre famille de transporteurs,

La distance d'isolement, dans l'air, de deux secteurs transporteurs successifs, est en principe de 8 mm. Cet écartement aurait pu être réduit, sans crainte, de moitié. On remarquera aussi, sur le dessin, la forme excentrée de la périphérie externe des secteurs mobiles, l'inclinaison donnée au bord interne des secteurs fixes producteurs, et le profil spécial des cales-entretoises du rotor ; au fur et à mesure de la sortie des secteurs mobiles hors des producteurs, l'écartement entre le bord des électrodes et les cales voisines augmente, de cette manière, en même temps que la d. d. p. existant entre elles, contribuant à accroître la sécurité. En fait, toutes ces précautions étaient inutiles ; le seul diélectrique interposé étant le gaz comprimé, l'isolement aurait été très suffisant en limitant la distance électrodes-cales à moins de 8 ou 10 mm sur tout le parcours.

En ce qui concerne le stator, on pourra remarquer, d'une part, la légère entaille pratiquée sur la périphérie externe des plaques-support en ébonite, rendant impossible toute décharge entre les écrous de serrage des tiges de fixation et le réservoir à gaz ; d'autre part,

l'interposition de rondelles isolantes sous certains des écrous de serrage, allongeant le chemin de fuite vers le flasque.

2. — Collecteur et balais. — Le collecteur adopté, à contact latéral, est le plus simple à réaliser et le moins encombrant longitudinalement ; les balais appuient suivant une direction parallèle à l'axe de la machine.

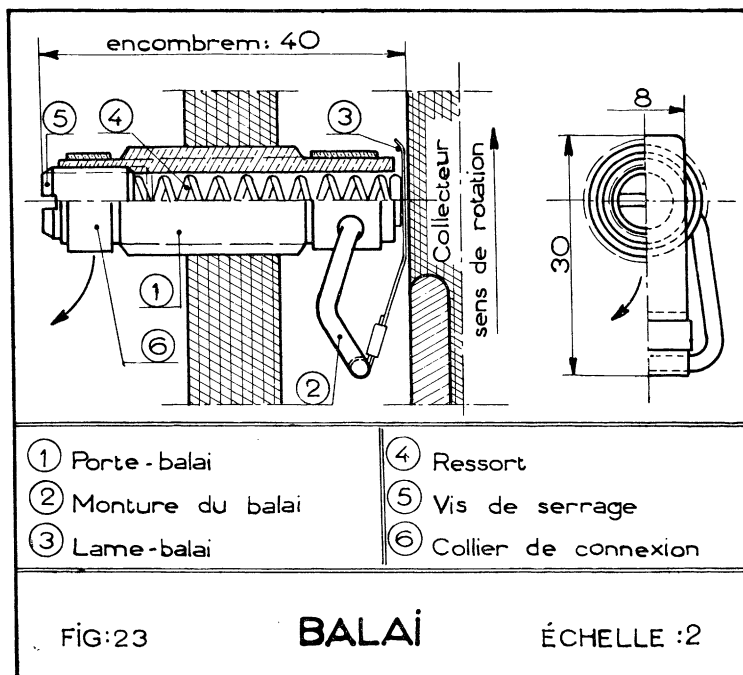
Contrairement à l'idée que l'on pourrait se faire, à priori, en raison des hautes tensions et faibles intensités mises en jeu, les contacts sont souvent une cause d'ennuis ; le bon fonctionnement des balais est assez difficile à obtenir. Les difficultés s'accroissent d'autant plus que le collecteur n'est pas tourné parfaitement, présente un léger gauché, ou possède à sa surface des irrégularités telles qu'un ressaut au passage d'une plage isolante sur la touche métallique suivante. Les plages isolantes occupent une région importante par rapport aux touches (contrairement aux collecteurs des dynamos) ; il conviendrait que le diélectrique qui les constitue résistât parfaitement à l'usure mécanique, d'une manière comparable aux touches elles-mêmes, et afin que le collecteur demeurât plan. Ce diélectrique ne doit pas favoriser les décharges rampantes, particulièrement à craindre ici, et il devrait enfin ne pas se dégrader sous l'effet des étincelles de commutations éventuelles. Le cache en ébonite que nous avons utilisé n'est qu'une solution provisoire⁽³⁹⁾.

La figure 23 montre le modèle de balai définitivement adopté, après un grand nombre d'essais. Ce balai présente une faible inertie, possède une zone de contact suffisante, et réduit au minimum l'usure du collecteur. Les cotes sont relatives au modèle normal ; lorsque la place longitudinale disponible est restreinte (excitatrice), le porte-balai est prévu avec une longueur moindre.

C'est une simple lame en acier bleui de 8/100 de mm, en forme de palette, qui s'applique sur le collecteur, dans le sens de la rotation. Elle est agrafée sur une monture (il est très facile de la remplacer) et cette monture est ajustée à frottement dur sur l'extrémité du corps de porte-balai, vissé lui-même dans la plaque-support en ébonite. La palette en acier est poussée par un ressort ; une vis sert d'arrêt et permet le réglage de la pression. La position longitudinale du balai, par rapport au collecteur, est réglée en vissant plus ou moins le porte-balai dans le support isolant, et la monture est

(39) L'emploi du quartz semblerait intéressant.

orientée correctement, afin que la lame en acier soit approximativement tangente à la trajectoire du collecteur, au point de contact,



L'épaisseur de la lame étant réduite, le ressort doit porter régulièrement sur elle afin de répartir la pression.

Ce balai ne permet qu'un sens déterminé de rotation, la lame devant être « tirée ». Si la machine doit fonctionner en moteur, il suffit de tourner toutes les montures de 180° ; en cas de marche dans les deux sens, il serait facile d'imaginer une monture double, et une lame-balai maintenue de deux côtés à la fois.

3. — Réservoir à gaz comprimé. — Son établissement fut antérieur à celui de la génératrice et la réalisation de celle-ci fut subordonnée, nous le répétons, aux dimensions du réservoir. Il est constitué par un tube en acier doux de 8 mm d'épaisseur et de 350 mm de diamètre intérieur, auquel sont soudés, d'une part un fond sphérique, d'autre part une bride circulaire en forme de cornière cintrée, sur laquelle vient se visser un couvercle également sphérique. Le serrage est effectué par 30 boulons de 16 mm et un joint en caoutchouc assure l'étanchéité. La longueur totale, utile, est

d'environ 500 mm. Pour une pression de 30 kg/cm², le taux de travail de l'enveloppe est d'environ 6,6 kg/mm²; compte tenu du serrage préliminaire, les boulons supportent une contrainte approximative de 13 kg/mm².

Le réservoir porte latéralement deux robinets (remplissage et vidange), ainsi qu'un manomètre métallique, gradué de 0 à 50 kg/cm²; ce manomètre a été utilisé pour la mesure des pressions, au cours de nos essais. Le remplissage a été effectué au moyen de tubes de gaz comprimés du commerce.

Le fond du réservoir est traversé, sur des pièces de renforcement soudées, par deux bougies classiques de moteur à explosion, permettant l'alimentation du moteur d'entraînement. Le couvercle, de son côté, porte deux trous qui livrent passage aux traversées H. T.

4. — Traversées haute tension. — Après essais, nous avons adopté le modèle de traversée représenté par la figure 24, donnant pleine satisfaction, tant au point de vue mécanique qu'électrique. Il s'agit évidemment d'une traversée composée (voir première partie, ch. XI, § 8), avec gaine de gaz comprimé et dont le corps est en ébonite.

Au point de vue mécanique, la simplicité est extrême; le maintien de la traversée et l'étanchéité sont assurés par la pression même du gaz qui tend à appliquer la collerette contre le couvercle du réservoir, surfacé en cet endroit, et moyennant l'interposition des joints en caoutchouc. La tige interne de traversée, portant aussi une collerette, est elle-même appliquée contre un épaulement du corps en ébonite, un autre joint plastique assurant l'étanchéité en cet endroit. La force d'application des joints est proportionnelle à la pression du gaz dans le réservoir, et l'étanchéité de ce système reste parfaite.

Ces traversées sont donc essentiellement amovibles. Elles portent d'autre part, en bout de la tige centrale et du côté intérieur du réservoir, un manchon télescopique poussé par un ressort, ayant pour fonction d'assurer le contact électrique avec la génératrice. Celle-ci est munie, à cet effet, de deux oreilles sur lesquelles viennent s'appliquer les manchons des deux traversées, lorsque le couvercle du réservoir est mis en place. Les deux oreilles sont reliées respectivement aux balais de débit et aux producteurs de la génératrice.

Avec ce modèle de traversée, l'ébonite travaille d'une part à la traction (longitudinale et transversale) dans la région tubulaire et extérieure au réservoir, d'autre part au cisaillement suivant deux

surfaces cylindriques respectivement égales à $2\pi R_e a$ et $2\pi R_i b$ (voir fig. 24). Les rayons r , R_i et R_e doivent d'autre part satisfaire aux conditions électriques.

Dans la traversée représentée, par exemple, on a $2r = 6$ mm, $2R_i = 12$ mm et $2R_e = 29$ mm. Pour une pression de 30 kg/cm², la contrainte de l'ébonite ne dépasse guère 20 kg/cm² à la traction et 8 kg/cm² au cisaillement; des essais ont donné, pour charge de rupture, 110 kg/cm².

Au point de vue électrique, une d. d. p. de 50 KV entre la tige centrale et le réservoir conduit à un champ maximum de 175 KV/cm dans le gaz comprimé et de 25 KV/cm dans l'ébonite de p. i. s. $\epsilon = 3,5$. Les coefficients de sécurité sont donc voisins, respectivement, de 3 et de 6 .

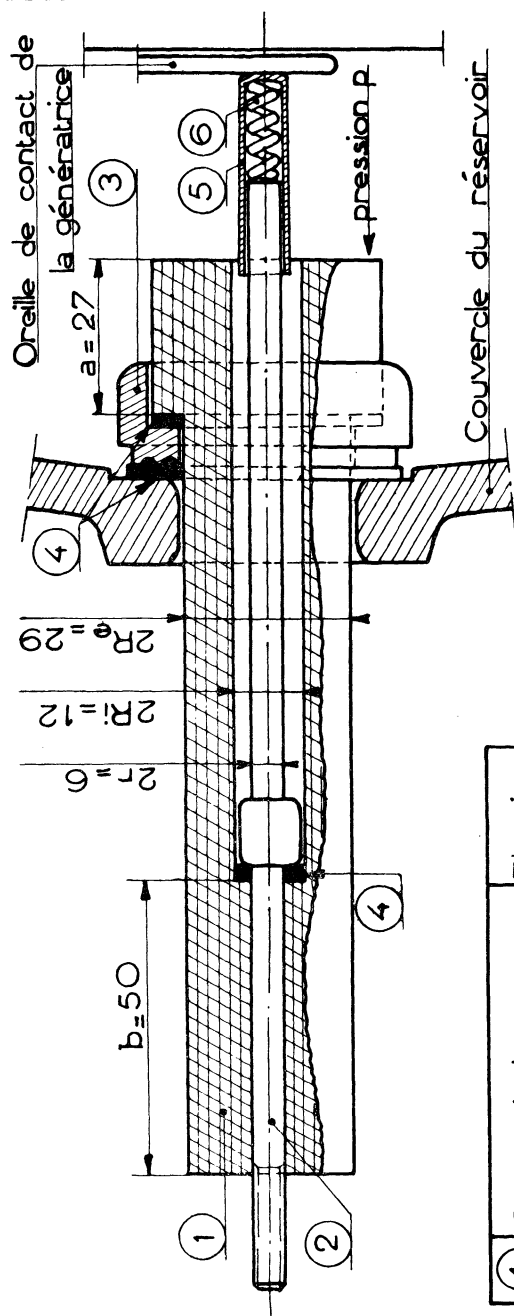
En l'absence de la gaine gazeuse, à égalité d'encombrement (même trou dans le réservoir) et même en choisissant pour la tige interne de traversée un rayon optimum $\left(r = \frac{R_e}{2,7} \text{ soit, ici, environ } 5 \text{ mm}\right)$, le champ dans l'ébonite aurait atteint 100 KV/cm pour la même d. d. p. supportée. Ainsi, l'évidement intérieur, bien que réduit et n'affectant pas sensiblement la résistance mécanique, améliore considérablement la sécurité.

A l'extérieur du réservoir, la traversée doit dépasser d'une longueur suffisante pour conserver un chemin de fuite superficiel appréciable (à l'intérieur, aucune crainte n'est à avoir). Avec de l'ébonite de bonne qualité, une longueur de dépassement extérieur de 100 mm suffit largement pour 50 KV. Certains matériaux (brautite) avaient demandé, par contre, un chemin de fuite supérieur à 250 mm. Ce chemin peut être d'ailleurs allongé par une série de gorges circulaires.

5. — Moteur d'entraînement. Alimentation à fréquence variable.

— Pour éviter le comportement défectueux d'un collecteur dans l'air comprimé, nous avons dû entraîner la génératrice par un moteur asynchrone triphasé, à cage d'écureuil.

En vue d'utiliser éventuellement des vitesses de rotation élevées et dans le but de diminuer son encombrement, nous avons adopté un moteur à deux pôles ($f = 50$). D'autre part, dans l'incertitude de la puissance demandée, deux chevaux ont été prévus. Cette puissance élevée tient compte, d'ailleurs, du mauvais refroidissement, le moteur tournant dans une atmosphère échauffée à cause



TRAVERSÉE HAUTE-TENSION

FIG:24

①	Corps isolant.	Ebonite.
②	Tige interne.	Ac. d.x
③	Collerette.	Ac. d.x
④	Joints plastiques.	Caoutchouc
⑤	Manchon de contact.	Laiton.
⑥	Ressort.	Ac. sp.

des pertes par frottements gazeux de la génératrice ; la seule surface de refroidissement du groupe est celle du réservoir à gaz.

D'autre part, il était nécessaire de disposer d'une vitesse variable, d'autant plus que les essais ont été souvent effectués à 1 500 t/min. et non à 3 000 t/min. comme prévu. Le moteur asynchrone devait être alimenté, par conséquent en fréquence variable (la tension d'alimentation variant simultanément, afin que l'induction conservât une valeur convenable). A cet effet, le moteur est alimenté par l'intermédiaire d'un groupe convertisseur de fréquence, réalisé très simplement au moyen d'un moteur asynchrone possédant un rotor bobiné, à bagues, et accouplé à une machine à courant continu. Cette machine, couplée sur une batterie d'accumulateurs, fonctionne normalement en génératrice-frein (vitesses hyposynchrones pour le groupe électrostatique). Le rotor du moteur asynchrone est alimenté par le secteur triphasé à 50 p. p. s. et son stator alimente à son tour le moteur du groupe électrostatique. Il se comporte comme un transformateur de tension et de fréquence. Finalement, la vitesse d'entraînement de la génératrice électrostatique est égale, au glissement près, à la différence entre les vitesses de synchronisme d'une part (3 000 t/min.) et du groupe convertisseur d'autre part. Cette dernière vitesse étant variable suivant l'état de la machine à courant continu, un rhéostat d'excitation, monté sur son inducteur shunt, permet donc indirectement le réglage de la vitesse du groupe électrostatique (on peut agir également sur un rhéostat placé en série avec l'induit et servant de rhéostat de démarrage au groupe convertisseur). La tension délivrée est, par ailleurs, d'une valeur convenable, proportionnelle à la fréquence.

Enfin, cette installation a dû être protégée contre les oscillations de haute fréquence prenant souvent naissance au cours du fonctionnement ; les étincelles subsistant au collecteur de la génératrice électrostatique en sont la cause essentielle, le circuit de débit se comportant comme un circuit oscillant. Le circuit alternatif d'alimentation est alors le siège de courants induits, parfois intenses et particulièrement gênants ; les premières spires du moteur asynchrone convertisseur ont souvent été court-circuitées par des ondes à front raide.

Des selfs à air et des condensateurs au papier ont été placés aux bornes des moteurs asynchrones, convertisseur et d'entraînement. A l'intérieur du réservoir à gaz, les connexions allant des bougies d'entrée au moteur ont dû être blindées, à la suite d'accidents.

Mais le moyen de protection le plus efficace consiste à insérer dans le circuit H. T. de la génératrice électrostatique, le plus près possible des balais de débit, une résistance d'assez forte valeur (100 000 ohms par exemple); en régime normal, cette résistance ne crée qu'une chute de tension négligeable, alors qu'elle amortit avec efficacité les oscillations H. F. éventuelles. En cas de fonctionnement parfaitement réversible, aucune onde H. F. n'est d'ailleurs produite; seules les étincelles au collecteur (on les remarque très bien à leur bruit caractéristique) leur donnent naissance.

II. — CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE LA GÉNÉRATRICE

Établie pour fonctionner, en principe, dans l'air comprimé à 30 kg/cm², le champ électrique étant estimé à 450 KV/cm.

- Nombre de pôles $2n = 8$.
- Nombre de plateaux p variable de 1 à 5.
- Écartement inter-électrodes $e = 2,4$ mm.
- Épaisseur des électrodes $a = 4,8$ mm.
- Facteur de multiplication : prévu égal à l'unité, ce facteur a dû être diminué sensiblement à cause des C. P. (voir tableau n° 2).
- Tension de débit : $U = eE_0 \frac{k}{k+1}$; pour $k = 1$, on devrait

obtenir une tension d'environ 50 KV. Mais la diminution du facteur de multiplication (de l'ordre de 0,6) a ramené la tension normale aux environs de 40 KV.

— Profil de la tranche des électrodes : la tranche des secteurs transporteurs et producteurs a été amenée approximativement au profil théorique, au moyen d'une fraise de forme.

La figure 25 représente le profil théorique pour une épaisseur d'électrodes de 5 mm ($e = 2,5$ mm), et montre que la présence, au voisinage de la tranche, d'une cale-entretoise qui serait rapprochée de $1,5e$ (3,75 mm) conduirait à un accroissement de champ d'environ 10 pour 100 au sommet de la tranche. Mais dans notre machine, cet écartement varie, au cours de la rotation, entre 8 et 14 mm; cette valeur aurait pu être réduite sans danger.

Pratiquement, la fraise de forme a été taillée pour donner un profil simplifié, en anse de panier, mais dont le contour ne s'écarte pas sensiblement du profil théorique.

D'autre part, les tranches de deux secteurs transporteurs successifs appartenant, dans un même plateau, à chacune des deux familles, sont écartées entre elles et en principe de 8 mm. Cette valeur aurait pu être réduite notablement.

Capacité utile maximum théorique. — Avec les dimensions adoptées, la surface active d'un seul des transporteurs (compte tenu des deux faces) est d'environ 80 cm².

Pour $e = 2,4$ mm, la capacité élémentaire $c_0 = 26,5$ cm. Compte tenu des n secteurs d'une famille et des p plateaux, la capacité utile, maximum et totale, devrait donc être

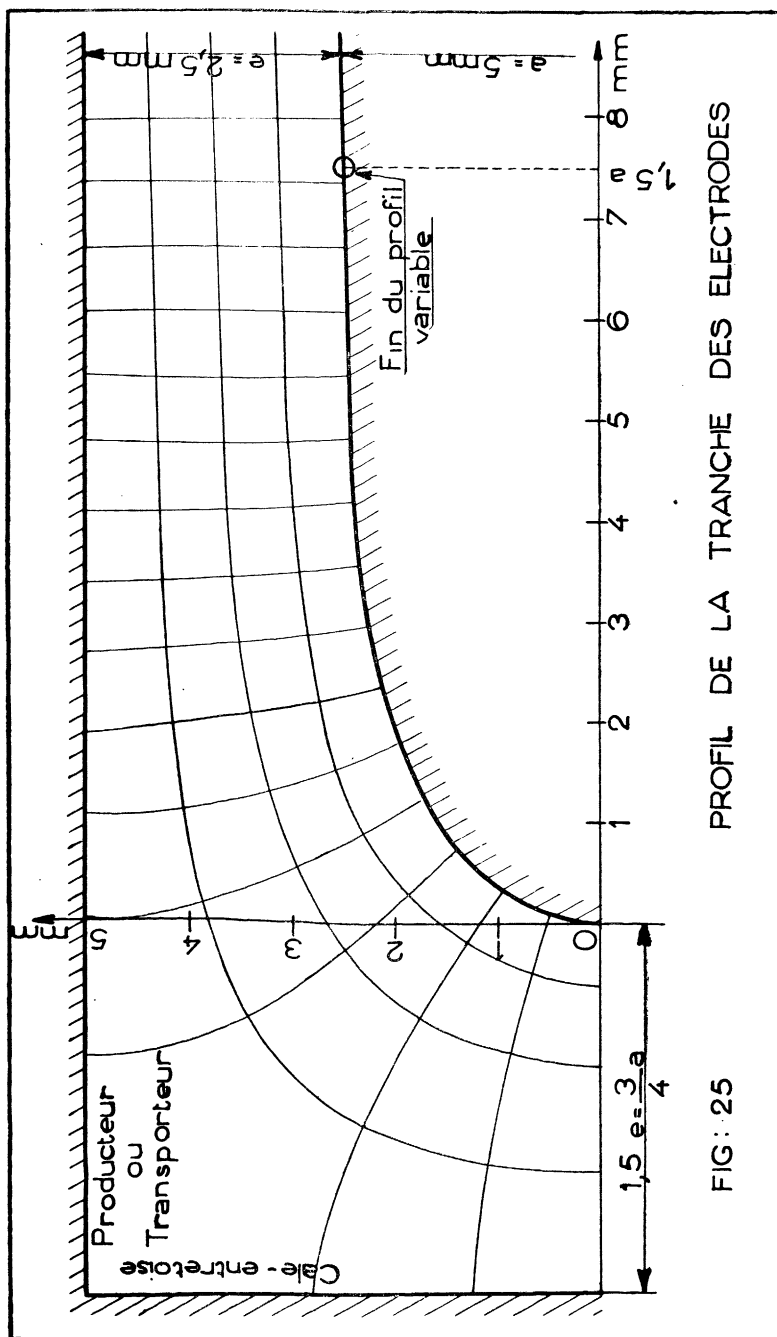
$$C_0 = 530 \text{ cm pour } p = 5 \text{ plateaux.}$$

Les tranches des électrodes conduisent, en fait, à une augmentation de cette capacité. Des mesures effectuées avec précision ont donné $C_0 = 600$ cm (voir tableau n° 2).

III. — MONTAGE D'UNE EXCITATRICE

En vue de réaliser un groupe générateur autonome et d'étudier les possibilités d'excitation et d'auto-amorçage de nos machines, nous avons ajouté à la génératrice précédemment décrite une petite excitatrice électrostatique bipolaire, d'un type analogue, et montée directement en bout d'arbre, en porte à faux.

Au préalable, nous avons effectué des essais à la pression atmosphérique, en utilisant comme excitatrice notre premier prototype. Les résultats furent encourageants ; cependant, le facteur de multiplication maximum de cette machine, soit $\frac{\alpha_e}{\beta_c}$, était faible (Prem. partie, ch. iv, § 4). L'auto-amorçage demandait plusieurs secondes pour se produire, même en l'absence de débit. Pour améliorer les caractéristiques de cette petite machine fonctionnant en excitatrice, nous avons donc augmenté son facteur de multiplication maximum, en diminuant artificiellement la capacité parasite C_{sm} (transporteur sorti-masse). Pour cela, nous avons ajouté deux secteurs fixes analogues aux producteurs et disposés symétriquement à eux, formant deux écrans entre lesquels les transporteurs pénétraient dès leur sortie des producteurs. Ces écrans, reliés électriquement au balai de débit, donc se trouvant au même potentiel que le transporteur sorti, évitaient toute influence électrostatique avec la masse. De cette manière, l'excitation était notablement améliorée ; l'auto-amorçage devenait instantané et énergique.



PROFIL DE LA TRANCHE DES ELECTRODES

FIG: 25

A la suite de ces essais, l'excitatrice proprement dite fut construite à l'image de notre premier prototype. Les dimensions actives furent conservées (une puissance de quelques watts étant très suffisante pour assurer une excitation stable) mais l'encombrement longitudinal fut réduit au minimum : la longueur totale de l'excitatrice ne dépasse pas 70 mm, tous accessoires compris. Enfin, on a eu soin de prévoir les secteurs fixes formant écran et dont la nécessité était apparue précédemment.

1. Description. — La planche 2 donne les détails d'exécution.

Les secteurs transporteurs sont serrés entre deux joues en ébonite au moyen de boulons ; ce sont les touches mêmes du collecteur qui, percées et taraudées, jouent l'office d'écrous, et ces touches sont fixées et connectées électriquement du même coup. De cette manière, l'encombrement est réduit. Le rotor ainsi constitué est monté de force sur un manchon en acier. Ce manchon est lui-même ajusté à frottement doux sur l'extrémité de l'axe, en porte à faux, de la machine (un épaulement lui sert d'arrêt), et le serrage est obtenu par un écrou d'extrémité. Le montage et le démontage du rotor sont donc immédiats ; de plus, il est possible de lui donner un calage quelconque par rapport au rotor de la génératrice principale.

Le stator, de son côté, est supporté par un plateau isolant, fixé directement sur le flasque de la génératrice. Les secteurs fixes semi-circulaires (deux producteurs et deux écrans) sont maintenus par des tiges filetées ; des entretoises tubulaires fixent leur écartement, comme dans le prototype n° 1. Le centrage rotor-stator se fait aussi de la même façon.

Quatre des tiges filetées maintenant les secteurs fixes supportent également la plaque porte-balais. Les balais sont du modèle normal déjà décrit, mais leur longueur a été réduite.

Un tel montage de l'excitatrice s'est révélé à la fois simple et pratique, surtout pour une machine ayant à être démontée très fréquemment. Il suffit d'ôter les quatre vis maintenant le plateau-support sur le flasque d'une part, l'écrou de serrage du rotor d'autre part, pour que l'excitatrice puisse être tirée en bloc et sortie de la machine.

2. Caractéristiques. — L'écartement inter-électrodes est de 2,4 mm, comme pour la génératrice principale, et dans la région de sortie des transporteurs, une entretoise légèrement plus longue

que les autres donne à cet écartement une valeur maximum de 2,75 mm⁽⁴⁰⁾.

Les secteurs-écrans présentent également un écartement de 2,4 mm avec les transporteurs (la d. d. p. maximum qui peut s'établir entre eux ne dépasse d'ailleurs pas la tension de débit de l'excitatrice, donc le potentiel d'excitation de la machine principale, soit V_0). Ils sont identiques aux secteurs transporteurs.

Le facteur de multiplication statique est voisin de l'unité ; il devrait être théoriquement supérieur (inverse du k de la génératrice, soit $\frac{1}{0,64}$ pour 5 plateaux), mais la puissance mise en jeu étant infime, les irréversibilités n'ont que peu d'importance. Les secteurs du collecteur participent au serrage du rotor et c'est pourquoi leur dimension n'a pas été diminuée.

Quant au calage relatif du rotor par rapport à celui de la génératrice principale, il peut être absolument quelconque. En principe, on l'a fixé de telle manière que les contacts de débit de l'excitatrice et de la génératrice se produisent en même temps ; à ce moment, en effet, le potentiel des producteurs passe par un minimum (Prem. partie, ch. v, II) et l'excitatrice peut commencer à débiter avec un facteur de multiplication moindre. En fait, toutes les positions du rotor permettent une bonne excitation.

3. Résultats. — Dès la mise en marche du groupe ainsi réalisé, l'amorçage s'est produit instantanément et spontanément. Une effluve régulatrice établie comme il a été dit (Prem. partie, ch. vi, § 2) permet de faire varier progressivement la tension de débit, depuis zéro jusqu'au maximum compatible avec la machine principale.

L'excitatrice donne une puissance très suffisante et assure, avec l'effluve, une marche stable à toutes les pressions (la pression relativement la plus défavorable se situe entre 10 et 15 kg/cm² pour laquelle toute la puissance de l'excitatrice est nécessaire).

Le désamorçage ne se produit que pour des résistances de charge inférieures au mégohm, alors que la résistance optimum est voisine de 10 MΩ (3 plateaux, 1 500 t./min.),

A titre d'exemple, la tension aux bornes varie de 48 à 21 KV entre la marche à vide et la marche sur résistance de charge optimum

(40) Il était désirable que l'excitatrice ne limitât pas, par des décharges prématurées, les possibilités de la machine principale.

($i = 2,5 \text{ mA}$ pour 3 plateaux et 1500 t/min.), le régulateur étant modifié entre temps pour conserver un champ inter-électrodes maximum. L'effluve, en effet, ne présente pas une caractéristique idéale et d'autre part, l'excitatrice ne peut pas fonctionner à débit constant.

Si le régulateur n'est pas modifié entre temps et qu'il soit réglé définitivement afin que la marche à vide ne conduise qu'à la tension limitée de 48 KV, le champ inter-électrodes diminue sensiblement lorsque la charge augmente ; pour une résistance de charge optimum, l'intensité débitée n'est que de 2 mA , au lieu des $2,5 \text{ mA}$ précédents (perte en puissance : 36 pour 100). Une caractéristique plus efficace serait pratiquement désirable.

Auto-amorçage. — Le fait le plus curieux est que l'amorçage se produise spontanément, aussitôt le groupe mis en marche, et sans qu'aucune f. e. m. extérieure n'intervienne. L'auto-amorçage se produit pour de très faibles vitesses de rotation (il suffit de faire tourner le groupe à la main pour le réaliser et voir apparaître des étincelles au collecteur). Cependant, le délai d'amorçage augmente au fur et à mesure que la résistance de charge diminue. A vide, il est pratiquement instantané ; pour une résistance de charge voisine de l'optimum (une dizaine de $\text{M}\Omega$), on peut suivre sur un milli-ampèremètre la croissance exponentielle du courant débité — rappelant l'auto-amorçage des dynamos — et l'état permanent est atteint, en moyenne, au bout de 5 à 10 secondes, la vitesse de rotation étant de 1500 t.-min. ⁽⁴¹⁾. Si la résistance de charge est plus faible, ce délai augmente encore ; enfin, l'auto-amorçage ne se produit plus si la résistance devient inférieure à $2 \text{ M}\Omega$.

Le temps et l'état de la machine n'influent nullement sur la promptitude de l'amorçage ; le groupe peut rester longtemps au repos, être démonté, transformé ; à chaque remise en route, l'amorçage est aussi sûr.

Sens de l'amorçage. — Si le groupe s'excite d'une manière certaine, la polarité prise spontanément est cependant variable ; la tension de débit est soit positive soit négative par rapport à la masse.

La polarité ainsi adoptée n'obéit cependant pas aux lois du

⁽⁴¹⁾ Toepler [9, p. 275] qui avait essayé d'adjoindre à une de ses machines une excitatrice de même principe, avait constaté leur auto-amorçage. Cependant, même à vide, celui-ci demandait cinq ou six minutes pour se produire.

hasard : elle est essentiellement conditionnée par l'état électrique antérieur du groupe.

Causes de l'auto-amorçage. — De nombreuses expériences nous ont montré que le germe primitif d'excitation se trouve principalement dans les charges résiduelles, portées par les isolants solides du groupe. La f. e. m. qui en résulte est amplifiée progressivement entre la génératrice et son excitatrice, par conséquent suivant une loi exponentielle dans le temps, et jusqu'à ce que l'état d'équilibre de l'ensemble (déterminé ici par l'effluve régulatrice) soit atteint.

Les charges résiduelles sont suffisantes, quand bien même les machines n'ont pas tourné depuis longtemps, ou ont eu leurs divers organes court-circuités. C'est pourquoi une machine ayant déjà fonctionné s'amorce, en principe, toujours dans le même sens ; sa polarité ne s'inverse que pour une cause déterminée.

Ainsi, une comparaison pourrait être établie, sur ce point, entre les machines électrostatiques et les dynamos ; les charges électriques résiduelles portées par les isolants des unes, le rémanent du circuit magnétique des autres, sont les germes provoquant l'auto-amorçage de ces appareils.

Il serait également possible que la f. e. m. de contact au collecteur, entre balais et touches, possédât une certaine action sur l'amorçage. Cette f. e. m., en effet, peut être amplifiée dès la rupture du contact, et par la variation même des capacités. De nombreux essais effectués à ce sujet, avec des balais de nature diverse, ne nous ont pas permis d'affirmer cette possibilité qui, en tout cas, ne serait qu'accessoire.

Il en est de même pour une éventuelle électrisation par frottement, qui serait développée dès la mise en route ; aucune action prépondérante n'a pu être observée.

Finalement, il semble que, seules, les charges résiduelles interviennent essentiellement dans l'amorçage et fixent la polarité prise par le groupe.

Stabilité de la polarité. — Une fois la machine amorcée dans un certain sens, aucune inversion spontanée de polarité n'est à craindre au cours du fonctionnement (contrairement à certains types d'anciennes machines symétriques, auto-excitatrices, où les inversions sont systématiques).

Cependant, il arrivait dans nos essais qu'une décharge, acciden-

telle ou non, se produisît entre le débit de la génératrice d'une part et son excitation d'autre part (décharge entre un secteur fixe et un secteur mobile par exemple). De telles décharges n'ont en elles-mêmes aucune gravité, mais la capacité du circuit de débit étant en général beaucoup plus considérable que celle du circuit d'excitation (surtout si un condensateur de filtrage est branché aux bornes de la génératrice), la charge du débit non seulement neutralisait celle de l'excitation, mais encore chargeait les producteurs avec un signe opposé à celui qu'ils possédaient auparavant. D'où une inversion générale de la polarité du groupe.

Nous avons paré à cet inconvénient de la manière suivante : les quatre groupes de secteurs producteurs de la génératrice ont été réunis entre eux non plus directement, mais par l'intermédiaire d'une chaîne de résistances au graphite (au total, une dizaine de mégohms entre deux groupes de secteurs producteurs). En régime permanent, le potentiel d'excitation se répartit uniformément sur tous les groupes ⁽⁴²⁾. Mais de cette manière, chaque groupe possède une certaine autonomie électrique et si une décharge vient à se produire, en un point quelconque intérieur ou extérieur à la machine, un seul groupe en est réellement affecté. Les résistances de liaison aux autres groupes sont trop considérables (ainsi que la constante de temps, de l'ordre de 1/100 de seconde) pour qu'un courant arrive à décharger complètement et à inverser le signe des trois autres groupes. Avant que cette inversion se soit produite, l'étincelle parasite cesse et les trois groupes de producteurs, encore peu affectés, continuent comme par le passé à imposer le signe de leur potentiel ; ils rechargent correctement le groupe dont la charge avait pu être un instant inversée.

L'efficacité de ce simple remède est parfaite. Aucune décharge ne renverse la polarité.

D'autre part, quelles que soient les perturbations volontaires apportées en cours de fonctionnement (décharges entre divers points, court-circuits francs), les réamorçages s'effectuent indéfiniment dans le même sens, toujours avec la même promptitude. La polarité reste stable.

Imposition du sens d'amorçage. — Il était intéressant de déterminer, d'une part l'ordre de grandeur de la f. e. m. primitive

⁽⁴²⁾ L'autonomie qui en résulte, pour chaque groupe, peut seulement diminuer son coefficient « a » personnel et accroître sans inconvénient les fluctuations de son potentiel au cours du fonctionnement (1^{re} partie, ch. v, 11).

pouvant imposer son sens d'amorçage, d'autre part de résoudre le problème pratique consistant à amorcer un groupe électrostatique avec le sens désiré, d'intervertir à volonté sa polarité même en cours de fonctionnement et, en un mot, de se rendre maître de ce facteur. Ce problème peut se résoudre facilement.

Lorsque l'on se contente d'appliquer une f. e. m. extérieure entre la masse et un seul point du groupe électrostatique (balais de débit ou producteurs de l'une quelconque des deux machines), une f. e. m. minimum d'une centaine de volts est nécessaire pour favoriser un sens d'amorçage ; quant à l'inversion de la polarité en cours de fonctionnement, elle exige une tension de l'ordre de 300 volts.

Mais la nature même du groupe et la symétrie de l'interconnexion des deux machines qui s'excitent mutuellement, à des potentiels du même ordre de grandeur, mais de signes opposés par rapport à la masse, montre qu'il est logique de polariser chaque groupe d'éléments, en effectuant une double application de f. e. m. En conséquence, nous avons utilisé une batterie d'accumulateurs présentant un point médian réuni en permanence à la masse du groupe. Avec les deux bornes extrêmes, symétriques mais de signes opposés par rapport à la masse, on pouvait toucher d'une part le balai de débit, d'autre part les producteurs de la génératrice — donc respectivement les producteurs et le débit de l'excitatrice —. En permutant les deux connexions venant de la batterie, on inversait symétriquement les f. e. m. appliquées.

Une batterie de 80 volts, utilisée en deux groupes de 40 volts chacun, eut les mêmes effets que le générateur unique dont la f. e. m. était supérieure à 300 volts. Avec ± 40 volts, donc, il est possible de commander infailliblement le sens d'amorçage du groupe, quel que soit l'état dans lequel il se trouve. Même en cours de fonctionnement, l'inversion de la polarité se produit d'une manière certaine, aussi souvent qu'on le désire. Le fait de brancher la batterie provoque le désamorçage de la machine, et dès que les contacts sont enlevés, le réamorçage suit immédiatement, dans le sens que l'on vient d'imposer.

Un minuscule redresseur à contact solide, adjoint à un groupe électrostatique, suffirait pratiquement à en asservir la polarité, sans autre source de courant que le réseau alternatif⁽⁴³⁾.

(43) Pour éviter d'avoir à brancher et débrancher ensuite les connexions de la source extérieure de polarisation, il est plus simple d'incorporer celle-ci d'une manière définitive entre le balai de masse et la masse proprement dite de l'une des machines.

Emploi d'une diode. — Ultérieurement, nous avons imposé et stabilisé le sens d'amorçage de notre groupe par un procédé différent et également très efficace, ne nécessitant aucune manœuvre.

Nous avons inséré une diode redresseuse (6H6 métallique) entre le balai de masse de l'excitatrice et la masse proprement dite. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la machine s'amorce dans tous les cas et toujours dans le sens correspondant au sens de conduction de la diode. Il semble qu'une véritable sélection des germes d'amorçage s'opère ; seules les charges résiduelles ou les causes d'électrisation ayant tendance à provoquer l'amorçage dans le sens de la diode peuvent agir utilement, les autres restant sans action.

En inversant les connexions cathode et plaque, on renverse à volonté le sens d'amorçage.

Ce procédé est très efficace, à la seule condition que l'isolement soit bon, de telle sorte que la diode ne soit pas shuntée par une résistance de fuite trop faible. Lorsque la diode n'est pas chauffée, l'amorçage ne doit pas se produire ou tout au moins doit être très lent, afin que la dissymétrie de conduction puisse rester considérable quand on la chauffe.

En insérant la diode dans le contact masse de la machine principale, la sélection s'opère également mais l'amorçage devient plus laborieux. Comme dans ce cas, la diode est traversée par le courant de la machine principale, beaucoup plus important que celui de l'excitatrice, ce montage n'a pas d'intérêt.

Le dispositif s'est montré, à l'usage, efficace et robuste. Il a l'avantage de ne nécessiter qu'une source de courant pour chauffer la diode.

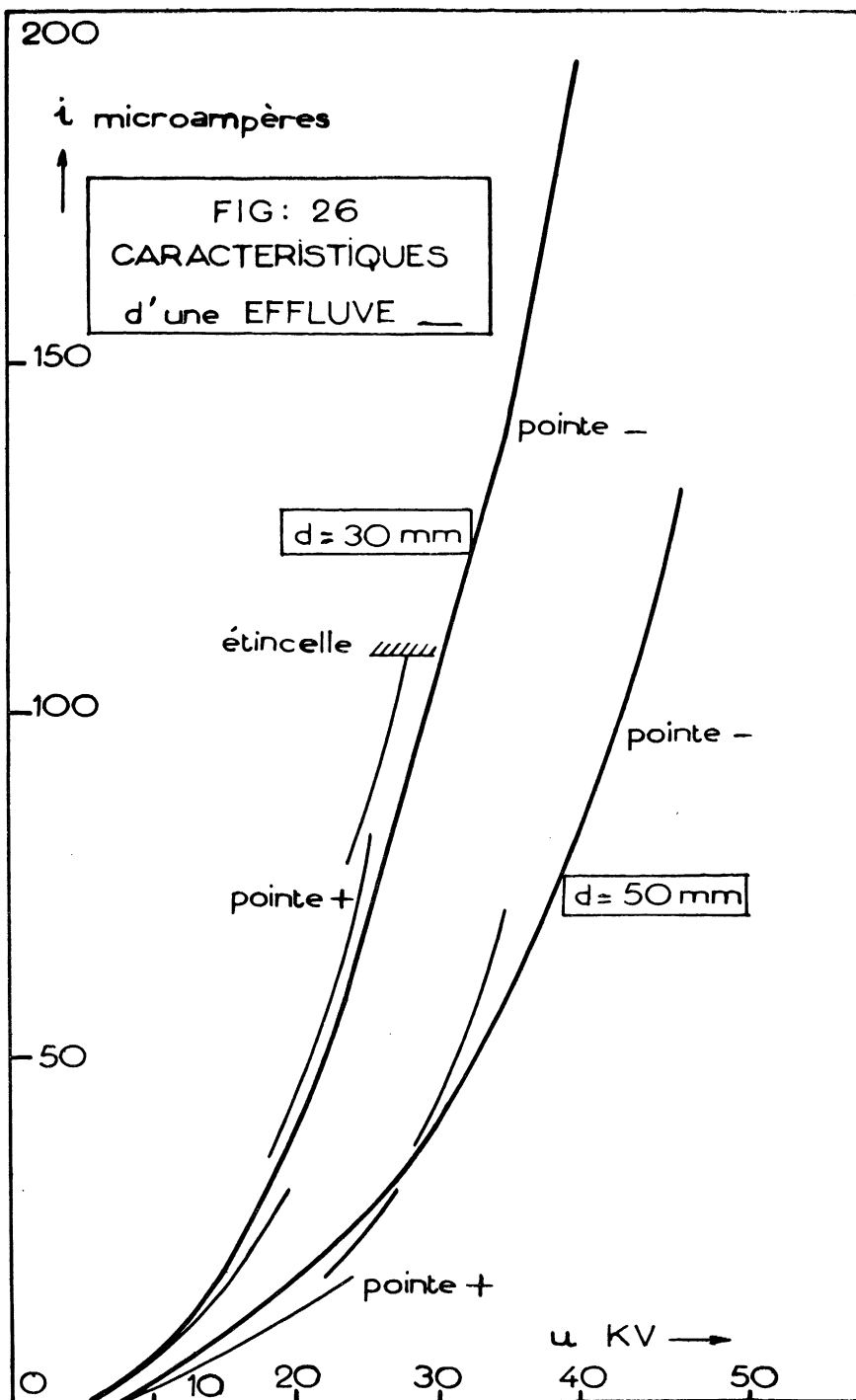
NOTE : CARACTÉRISTIQUE D'UNE EFFLUVE

(Première partie, ch. VI, § 2.)

La caractéristique de l'effluve établie entre pointe et sphère ne permet pas un fonctionnement idéal du groupe, d'autant plus que l'excitatrice ne fonctionne pas à débit constant ; il convient de modifier l'écartement pointe-sphère pour rattraper les variations de tension qui se produisent avec la charge.

La figure 26 représente les caractéristiques $i(u)$ d'une telle effluve, relevées expérimentalement pour deux écartements pointe-sphère (30 et 50 mm, la sphère ayant un diamètre de 100 mm) et pour les deux polarités.

Lorsque la pointe est négative (formation de l'étoile), la stabilité de l'effluve est parfaite et sa caractéristique bien reproductible.



Par contre, lorsque la pointe est positive (aigrette), trois régimes de fonctionnement peuvent être observés suivant la valeur de l'intensité du courant qui passe ; le passage d'un régime à l'autre se fait brusquement, à des moments imprécis. Enfin, une étincelle se déclare pour des d. d. p. (ou des courants) encore peu élevés.

Pratiquement, il convient donc de rendre la pointe négative.

A intensité constante, la d. d. p. entre pointe et sphère est proportionnelle à leur écartement, tant que celui-ci est réduit tout au moins.

IV. — ESSAIS DE LA GÉNÉRATRICE. PROCÉDÉS DE MESURES

a) *Mesures des tensions.* — Dans l'impossibilité de nous procurer un voltmètre électrostatique pour très hautes tensions, nous avons dû avoir recours au spintermètre. Pour des d. d. p. inférieures à 50 KV — ce fut le cas général — le spintermètre utilisé comportait des sphères de 50 mm de diamètre, l'écartement maximum ne dépassant pas, alors, 20 mm. En série avec la sphère masse, une résistance de 10 M Ω limitait le courant de décharge et évitait la formation d'un arc.

Un telle méthode ne permettait pas une mesure commode et très précise de la tension ; elle était néanmoins suffisante, d'autant plus que ces mesures n'ont eu souvent qu'un rôle secondaire (voir c, mesure des puissances).

La d. d. p. ainsi déterminée est une valeur maximum ; aucune ambiguïté ne se présente lorsque la tension à mesurer est parfaitement continue (condensateur de filtrage sur le débit des machines).

b) *Mesure des intensités.* — Contrairement à la précédente, cette mesure a pu être très précise, grâce à l'emploi de bons milliampèremètres — ou microampèremètres — à cadre mobile. Ces appareils ont toujours été shuntés, au cours des essais, par un condensateur au papier de quelques microfarads, afin que les courants de haute fréquence, souvent engendrés, soient dérivés et n'amorcent pas d'étincelles entre les spires du cadre. Le milliampèremètre a été inséré, en principe, dans le retour des circuits, du côté masse ; son isolement était inutile.

c) *Mesure de la puissance d'une génératrice. Résistance de charge.* — Ce sont aux résistances de charge liquides, à eau, que nous avons eu recours pour absorber et dissiper la puissance engendrée par la génératrice.

Un réservoir à eau supérieur, monté sur un support isolant,

alimente un circuit constitué par quelques tubes de verre, de diamètre convenable (2 à 5 mm), placés en série; l'extrémité du dernier d'entre eux plongeant dans un réservoir inférieur. La machine est reliée à une électrode placée dans le réservoir supérieur, alors que l'électrode du réservoir inférieur est ramenée à la masse, moyennant l'insertion du milliampèremètre destiné à la mesure de l'intensité du courant. Un robinet permet de régler le débit de l'eau à une valeur suffisante, suivant la puissance dissipée, afin que cette eau ne s'échauffe pratiquement pas au cours de son trajet. Nous avons constaté que l'eau de la ville présente une résistivité toujours comparable, de l'ordre de $3000 \Omega \cdot \text{cm}$ à la température ordinaire; c'est en partant de cette valeur que nous avons déterminé la section des tubes de verre à employer, ainsi que leur longueur. Au cours des essais, la résistance peut être modifiée facilement en combinant des tubes de diamètres et de longueurs divers, ou en introduisant dans le tube inférieur un fil métallique qui en court-circuite une longueur plus ou moins grande.

Deux thermomètres, placés respectivement dans les réservoirs supérieur et inférieur, permettent de juger si le débit de l'eau est suffisant. Éventuellement, une correction de la résistance peut être faite, pour tenir compte de la température exacte.

Ceci étant, nous avons trouvé avantageux de déterminer la puissance engendrée par la machine électrostatique en mesurant d'une part la valeur exacte de la résistance de charge (loi d'Ohm), d'autre part en notant l'intensité du courant débité; il importe pour cela de connaître la valeur efficace de cette intensité, alors que le milliampèremètre à cadre mobile, placé en série avec la résistance de charge, en donne la valeur moyenne. Mais un condensateur de filtrage, branché en parallèle sur le circuit de débit, rend le courant suffisamment constant pour que les valeurs moyenne et efficace soient égales⁽⁴⁴⁾; si R est la résistance de charge, I l'intensité indiquée par le milliampèremètre, la puissance engendrée par la machine est évidemment RI^2 . La valeur de R étant déterminée et présentant une bonne stabilité (seules les variations de température

(44) En l'absence d'un condensateur de filtrage, le débit a lieu sous forme de dents approximativement rectangulaires. Soit i_0 la valeur maximum du courant et x_c le calage du balai de débit; les intensités moyenne et efficace ont respectivement pour valeur :

$$i_{\text{eff}} = i_0 \sqrt{1 - x_c}, \quad i_{\text{moy}} = i_0(1 - x_c).$$

Un condensateur de filtrage de 1500 cm ($3C_0$) suffit à confondre ces valeurs avec une grande précision.

peuvent rendre nécessaire une correction facilement réalisable d'ailleurs), il suffit de suivre les indications du milliampermètre.

Par ce procédé, on évite une mesure de tension, délicate et longue. De plus, l'intensité qui intervient par son carré peut être déterminée avec une grande précision (c'est la grandeur la plus facile à mesurer).

Enfin, la tension sous laquelle la génératrice débite est obtenue du même coup ($U=RI$). A titre de vérification, cependant, le spintermètre a été monté aux bornes de la résistance de charge, afin qu'une mesure directe pût être effectuée. Les valeurs obtenues par les deux procédés ont toujours été en bonne concordance (à moins de 2 pour 100 près).

En général, dans les essais réalisés et dont on trouvera quelques exemples plus loin, nous avons recherché la puissance maximum de la génératrice, correspondant à un champ électrique inter-électrodes limite (coefficient de sécurité = 1). De cette façon, tous les essais sont comparables entre eux.

d) *Mesure des vitesses.* — Le groupe électrostatique n'étant pas accessible directement, nous avons déterminé au tachymètre la vitesse du groupe convertisseur de fréquence ; au glissement du moteur asynchrone près, la vitesse cherchée est égale à la différence des vitesses, de synchronisme d'une part (3 000 t/min.) et du groupe convertisseur d'autre part. En connaissant approximativement la valeur du glissement en fonction de la charge et de la vitesse théorique, il est facile, au besoin, de corriger cette dernière ; la vitesse réelle est obtenue avec une précision très suffisante.

Cependant, il peut être utile de connaître cette vitesse avec une précision supérieure, lors de la détermination des pertes par frottements gazeux (N intervient par son cube). Il est alors possible de se baser sur la fréquence de variation de la capacité utile présentée par la génératrice électrostatique ; un oscillographe cathodique permet facilement de déterminer cette fréquence, ou de la maintenir constante par comparaison (avec la fréquence du secteur alternatif par exemple).

e) *Mesure de la pression du gaz diélectrique.* — Ainsi que nous l'avons mentionné, un manomètre métallique de bonne construction (0-50 kg/cm²) donnait la pression du gaz renfermé dans le réservoir.

f) *Mesure des capacités parasites.* — Pour leur détermination,

nous avons utilisé un générateur H. F., débitant sur un circuit oscillant composé d'une self fixe et d'un condensateur variable soigneusement étalonné ; en parallèle sur ce condensateur, on pouvait brancher l'élément de capacité à mesurer. La résonance était indiquée par un voltmètre à lampes (générateur H. F. et voltmètre étaient couplés et montés sous forme de Q-mètre particulièrement stable). Deux mesures, avec et sans introduction de la capacité inconnue, donnaient, par différence des lectures faites sur le condensateur variable, la valeur de l'élément cherché.

V. — ESSAIS DE LA GÉNÉRATRICE RÉSULTATS

1. — Capacités utiles et parasites. — Facteurs divers.

Réduction de puissance. — Influence du nombre de plateaux.

Voici les valeurs obtenues pour la machine équipée successivement avec 1, 2 et 5 plateaux.

Les capacités parasites ont été déterminées par la méthode exposée dans la première partie de cette étude⁽⁴⁵⁾ et pour la position particulière du rotor (fin ou début de cycle, une famille de transporteurs étant complètement sortie des producteurs et l'autre complètement entrée).

Nous en avons déduit les coefficients essentiels α et β , le facteur de multiplication optimum k'_0 de la génératrice, le facteur de multiplication maximum k_M possible à réaliser, le facteur de puissance maximum K'_M correspondant à k'_0 ; enfin, nous avons indiqué la diminution de puissance π pour 100, minimum, provoquée uniquement par les capacités parasites⁽⁴⁶⁾.

On voit l'intérêt d'augmenter le nombre de plateaux : lorsque ce nombre passe de 1 à 5, la capacité utile croît rigoureusement dans ce rapport (119 à 600 cm) alors que C_r est multiplié par 2,3, C_t par 1,35 et C_{sm} par 1,25. Le facteur de multiplication optimum se trouve en conséquence doublé, le facteur de multiplication maximum est 3,7 fois plus grand et surtout la puissance inutilisée par la faute des C. P. est réduite de 56 pour 100 à 26 pour 100 seulement.

Les cinq plateaux semblent être, à cet égard, un minimum indispensable. Lorsque ce nombre de plateaux augmente, la perte de puis-

⁽⁴⁵⁾ Voir ch. IV, § 5.

⁽⁴⁶⁾ Voir Prem. partie, ch. IV, §§ 1, 2, 3, 4, 5.

sance provoquée par les C. P. tend asymptotiquement vers une limite assez réduite.

TABLEAU N° 2.

NOMBRE DE PLATEAUX	1	2	5
C_o cm.	119	238	600
C_r cm.	11,5	18,4	27
C_t cm.	36,5	40	49
C_{sm} cm.	28,5	30,5	35,5
C_{pm} cm. ⁽¹⁾	77	95	106
α .	0,905	0,925	0,955
β .	0,95	0,54	0,268
$k'_o = \frac{\alpha}{\alpha + 2\beta}$.	0,32	0,46	0,64
$k_M = \frac{\alpha}{\beta}$.	0,95	1,7	3,5
$K'_M = \frac{\alpha^2}{\alpha + \beta}$.	0,44	0,58	0,74
π pour 100.	56 pour 100	42 pour 100	26 pour 100
⁽¹⁾ Producteurs seuls, sans traversée H. T. ni excitatrice.			

Enfin, signalons que pour 3 plateaux, le facteur de puissance maximum K'_M est égal à 0,66 ; pour 4 plateaux, ce facteur est égal à 0,72. Ces valeurs nous seront utiles par la suite.

En passant de 4 à 5 plateaux, le facteur de puissance maximum ne s'accroît plus que de 0,72 à 0,74.

2. — Calage des balais ⁽⁴⁷⁾.

Nous avons cherché à tirer de la machine une puissance utile maximum et pour cela, le facteur de multiplication devait être réglé à sa valeur optimum (0,64 pour 5 plateaux).

Le tableau 3 résume les calculs d'angles de calage, effectués en vue de prévenir toute irréversibilité lorsque la machine débite sur une résistance optimum.

Pour le fonctionnement à potentiel d'excitation fixe (peu employé), on trouvera : l'angle de calage théorique ψ_c ⁽⁴⁸⁾ du balai de débit qui

⁽⁴⁷⁾ Voir Prem. partie, ch. v.

⁽⁴⁸⁾ Voir Prem. partie, ch. v, « Notations ».

assurera, en l'absence de C. P., le facteur de multiplication k'_0 ; l'angle de calage réel ψ'_c assurant effectivement ce facteur et modifié à cause des C. P.; enfin, l'angle de retard $\Delta\psi_M$ à donner au contact masse.

TABLEAU N° 3.

NOMBRE DE PLATEAUX		1	2	5
C_{pm} total, cm ⁽¹⁾ .		120	145	156
$a = \frac{C_{pm}}{C_0}$.		1	0,6	0,25
$\theta = \frac{360}{2n}$ degrés.		45°		
V_0 fixe	Ψ_c degrés.	11	14	17,5
	Ψ'_c degrés.	20	20,5	21,5
	$\Delta\Psi_M$ degrés.	» ⁽²⁾	15	8
V variable	Ψ_{cv} degrés.	7	8,5	9
	Ψ'_{cv} degrés.	17,5	19,5	16,5
⁽¹⁾ Y compris la traversée H. T. et l'excitatrice (valeurs approchées). ⁽²⁾ L'équation donnant $\Delta\Psi_M$ n'a pas de solution réelle lorsque la machine ne comporte qu'un seul plateau; le potentiel des transporteurs entrant ne parvient plus à s'annuler.				

Pour le fonctionnement à potentiel non fixe, nous avons indiqué l'angle de calage ψ_{cv} du balai de débit en l'absence de C. P., puis ce même angle modifié à cause des C. P. et devenu ψ'_{cv} .

Tous les angles mentionnés sont comptés à partir de la position de capacité utile maximum et dans le sens de rotation, ainsi que nous l'avons fait dans l'étude théorique.

Pour réaliser pratiquement ces calages, il convient de tenir compte de la largeur des touches du collecteur ainsi que de la largeur propre des balais.

Pratiquement, nous avons effectué le calage des balais de notre machine pour cinq plateaux et pour le fonctionnement à potentiel d'excitation fluctuant (pas de condensateur à ajouter sur l'excitation). Deux groupes de balais ont été prévus, conformément au procédé

indiqué dans la première partie (ch. v, III). Chaque groupe comprend donc un balai de début et un balai de fin de contact. Un groupe est affecté à la masse, l'autre au débit.

Le débit commence après une rotation d'environ 16° , mais nous avons plutôt veillé à ce qu'il se termine lorsque la capacité utile est devenue exactement minimum (résiduelle). Quant au contact masse, il devrait se produire après une pénétration d'environ 8° si le potentiel d'excitation était fixe ; une valeur un peu supérieure a été adoptée⁽⁴⁹⁾, mais la fin de ce même contact a été réglée exactement pour coïncider avec la position de capacité utile maximum.

D'autre part, il est possible de supprimer, dans chaque groupe, les balais entrant les premiers en action, sans qu'il en résulte un dérèglement notable. Il convient simplement de respecter la fin des contacts, afin de ne pas diminuer inutilement la puissance de la machine.

Un contrôle à l'oscillographe cathodique a montré que les calages réalisés étaient suffisamment convenables. En fonctionnement normal, sur résistance de charge optimum, les irréversibilités sont pratiquement nulles (Voir VI).

3. — Résistances internes ou résistances de charge optima⁽⁵⁰⁾.

Le tableau 4 renferme successivement, pour les vitesses de rotation de 1500 et 3000 t/min. : la vitesse de variation de la capacité utile, soit Ω , en mètres par seconde (U. E. S.) ; la résistance internethéorique r (ou résistance de charge optimum R_0), en l'absence de C. P. ; enfin, cette même résistance modifiée par les C. P.

Les essais de puissance ont été effectués sur des résistances de charge à peu près optima. On peut d'ailleurs s'écarter sensiblement de cette valeur sans que la puissance recueillie soit affectée notablement.

⁽⁴⁹⁾ La séparation entre la fin du contact de débit et le commencement du contact de masse n'est pas très marquée. Des décharges peuvent se produire entre la touche du collecteur réunie à la masse et le balai de débit qu'elle vient de quitter. Le retard $\Delta\psi_M$ à apporter au contact de masse est, nous l'avons dit, une circonstance heureuse ; mais il est à peine suffisant dans ce cas.

⁽⁵⁰⁾ Voir Prem. partie, ch. vi, §§ 1, 2.

TABLEAU N° 4.

NOMBRE DE PLATEAUX	2		3		4		5	
N. t/min.	1 500	3 000	1 500	3 000	1 500	3 000	1 500	3 000
Ω m/s.	480	960	720	1 440	960	1 920	1 200	2 400
R_0 M Ω .	19	9,5	12,5	6,25	9,5	4,75	7,6	3,8
R'_0 M Ω .	13	6,5	9	4,5	7,6	3,8	6,2	3,1

4. — Puissance. — Champ inter-électrodes. Influence des électrodes.

Nous donnons ici quelques résultats obtenus, en utilisant l'air comprimé comme diélectrique, et la machine étant équipée successivement avec les électrodes suivantes :

- ① Aluminium et duralumin, poli excellent
- ② Acier doux, poli grossier.
- ③ — — poli moyen.
- ④ — — poli excellent.

Le tableau n° 5 renferme les résultats obtenus dans des conditions variées (vitesse et nombre de plateaux différents) ; les difficultés matérielles — de polissage en particulier — ne nous ont pas permis d'utiliser uniformément les cinq plateaux de la machine. D'autre part, les vitesses adoptées sont très inférieures aux 3 000 t/min. prévus ; l'usinage sommaire du collecteur a rendu les contacts défectueux pour les vitesses élevées et il a été plus sûr d'opérer aux environs de 1 500 t/min.⁽⁵¹⁾ Ultérieurement, nous ramènerons les résultats obtenus à des conditions semblables, afin de pouvoir les comparer entre eux.

Les quatre parties du tableau n° 5, affectées respectivement aux différentes séries d'électrodes utilisées, comprennent chacune :

— en marge, l'état des électrodes, le nombre de plateaux utilisés et la résistance de charge R , en mégohms, mesurée soigneusement et éventuellement corrigée en fonction de la température,

⁽⁵¹⁾ Il peut être d'ailleurs intéressant, dans certains cas, de se limiter à cette vitesse, afin de conserver un rendement plus élevé.

TABLEAU N° 5.

① $p = 4.$ $R = 10 \text{ M}\Omega.$	$\pi \text{ kg/cm}^2.$	0	5	10	15	20	25	30	
	N t/min.	1 500							
	I mA.	0,32	1,4	2,3	2,8	3,4	3,7	3,8	
	P watts. (1500)	1	21	53	82,5	113	130	140	
	U KV.	»	15	23	29,5	33	35	37	
② $p = 5.$ $R = 9,7 \text{ M}\Omega$	$\pi \text{ kg/cm}^2.$	0	5,5	10	15	20	25	30	
	N t/min.	1 500	1 500	1 450	1 450	1 400			
	I mA.	0,4	1,6	2,35	2,80	3	} accroissement négligeable.		
	P watts.	1,55	25	53	76	87			
	P ₁₅₀₀ W.	1,55	25	56	79	94			
	U KV.	»	15,5	23	27	30			
③ $p = 3.$ $R = 13,4 \text{ M}\Omega.$	$\pi \text{ kg/cm}^2.$	0	5	10	15	20	25	30	
	N t/min.	1 040	1 050	1 020	1 020	990	970	1 000	
	I mA.	0,215	0,93	1,58	1,96	2,16	2,32	2,40	
	P watts.	0,62	11,5	33,5	51,5	63	72	77	
	P ₁₅₀₀ W.	0,9	16,5	50	75	96	111	115	
	U KV.	»	12	20	25	30	31	32	
④ $p = 3.$ $R = 11 \text{ M}\Omega.$	$\pi \text{ kg/cm}^2.$	0	5	10	15	18	20	22	30
	N t/min.	1 460	1 440	1 420	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400
	I mA.	0,275	1,1	1,95	2,75	3,15	3,4	3,55	3,85
	P watts.	0,85	13,3	42	83	109	128	138	163
	P ₁₅₀₀ W.	0,87	13,9	44	89	117	137	148	175
	U KV.	»	13	22	30	36	38	40	43

— la surpression π du gaz diélectrique (dans ce cas l'air comprimé), en kg/cm^2 ,

— la vitesse exacte de rotation N , en t/min. ,

— l'intensité continue (après filtrage) soit I , en milliampères, débitée dans la résistance de charge et lue sur le milliampèremètre à cadre mobile,

— la puissance P , en watts, dissipée dans la résistance de charge, donc engendrée par la machine ($P = RI^2$),

— cette même puissance ramenée à la vitesse uniforme de $1\,500\text{ t/min.}$, dans le cas où la vitesse réelle n'a pas été maintenue à cette valeur. La puissance est proportionnelle à la vitesse et l'on peut effectuer cette transformation en toute rigueur ; si P est la puissance mesurée à la vitesse N , la puissance à $1\,500\text{ t/min.}$ est

$$P_{1\,500} = P \frac{1\,500}{N},$$

— la tension de débit U , en kilovolts, mesurée au spintermètre, à titre de vérification par rapport au produit RI .

NOTES. — Toutes les valeurs exposées correspondent au champ électrique maximum que nous avons pu obtenir, à la limite de rupture (coefficient de sécurité $= 1$), et après un temps suffisant de formation des électrodes (voir plus loin).

Les résistances de charge utilisées se rapprochent des valeurs optima.

a) Détermination du champ inter-électrodes. Accroissement en fonction de la pression.

Au lieu de déterminer le champ à partir de mesures de tensions et de longueurs, il est plus précis de calculer l'accroissement qu'il subit, en fonction de la pression, à partir de l'accroissement constaté sur la puissance utile de la machine et dont la valeur est déterminée avec précision. Cette puissance croît rigoureusement comme le carré du champ électrique. Le rapport des rigidités du gaz, pour deux pressions différentes, est donc égal à la racine carrée du rapport des

$$\text{puissances correspondantes : } \frac{E_1}{E_2} = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}}.$$

Pour obtenir des valeurs absolues, il suffit de prendre comme base de comparaison la rigidité bien connue de l'air à la pression atmosphérique et de mesurer avec précision la puissance engendrée par

la machine à cette pression de référence. Pour l'écartement inter-électrodes employé ici, la rigidité de l'air à la pression atmosphérique peut être prise égale à 39 KV/cm. Ce chiffre est une valeur certaine, parfaitement reproductible, et indépendante pratiquement de la nature des électrodes. Si P_0 est la puissance à la pression atmosphérique, le champ électrique E correspondant à la puissance P a

$$\text{pour valeur : } E = 39 \sqrt{\frac{P}{P_0}}.$$

Le tableau 6 renferme les valeurs des champs disruptifs ainsi établis, en fonction des surpressions π , et pour les quatre cas d'électrodes envisagés.

TABLEAU N° 6.

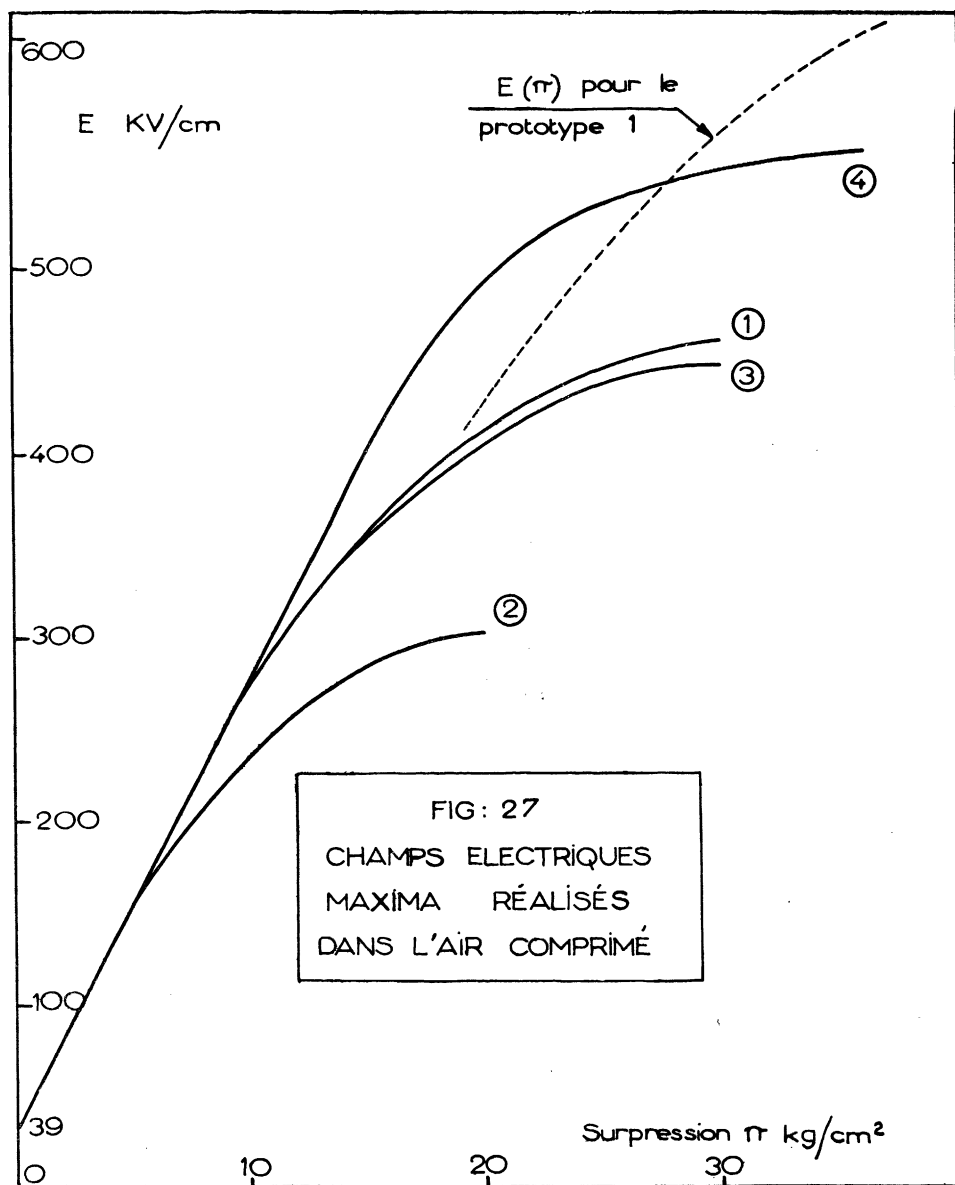
π kg/cm ²		0 (base)	5	10	15	20	25	30
Champs maxima E KV/cm.	①	39	180	285	355	415	445	460
	②	39	155	235	280	300	saturation.	
	③	39	155	280	355	400	440	445
	④	39	155	280	400	495	530 ⁽¹⁾	555
(1) Valeur interpolée.								

La figure 27 montre l'allure des fonctions $E(\pi)$.

Jusqu'à la pression de 10 kg/cm², la loi de Paschen est vérifiée ; la croissance est linéaire. A partir de cette valeur, le champ croît moins vite que la pression et un véritable phénomène de saturation se produit. Cette saturation est d'autant moins précoce que la surface des électrodes est mieux polie. On peut remarquer les différences considérables entre les champs obtenus avec les mêmes électrodes de fer, mais présentant trois degrés de poli divers (cas 2, 3 et 4). Entre les deux états extrêmes envisagés (2 et 4), le champ est approximativement doublé (la puissance multipliée par quatre). Dans le cas le plus favorable (n° 4), la saturation n'apparaît même que pour une pression de 17 kg/cm², la fonction $E(\pi)$ restant linéaire jusque-là.

Enfin, à poli sensiblement identique, on constate que les électrodes en acier doux (n° 4) permettent un champ supérieur à celui obtenu

avec des électrodes en aluminium-duralumin (n° 1). Nous avons observé ce fait, au préalable, au cours d'essais statiques directs.



On remarquera que les champs obtenus avec le premier prototype et également portés sur la figure 27 ont été plus élevés que ceux

réalisés ici (cas n° 1). La nature des électrodes (aluminium-duralumin) était cependant identique ; de très faibles différences de constitution pourraient suffire à changer radicalement les résultats ; ou bien, les risques d'amorçage, provoqués par des germes de nature quelconque, seraient proportionnels à la surface des électrodes utilisées.

REMARQUES :

1. — Des accidents de surface qui n'avaient pas disparu au polissage n'ont pas paru favoriser les décharges entre électrodes. Les points d'impact de ces décharges, relevés après chaque essai, semblent répartis au hasard et à peu près uniformément. Les risques d'amorçage et les champs admissibles paraissent plutôt dépendre d'une question de probabilité ; quelques accidents locaux, même très marqués, à la surface des électrodes, n'ont pas d'action particulière comme on pourrait le croire. L'essentiel est de réduire au minimum, par un polissage intégral, les chances d'amorçage.

2. — « Formation » des électrodes.

Quelles que soient les électrodes utilisées (ou le gaz diélectrique employé) nous avons remarqué, dans tous les cas, que ces électrodes fraîchement nettoyées et polies subissaient un phénomène de formation ; le champ électrique admissible — donc la puissance de la machine — croît notablement dans les débuts du fonctionnement, alors que des décharges disruptives se produisent entre électrodes. Ce phénomène avait déjà été signalé pour le prototype n° 1.

Le champ s'accroît, en une demi-heure de fonctionnement, d'environ 10 pour 100 (et la puissance de 20 pour 100). Par exemple, la machine munie de cinq plateaux en acier doux récemment polis, tournant dans l'air comprimé à 25 kg/cm² et dans les mêmes conditions de vitesse et de résistance de charge, donne les puissances suivantes : 175 watts après cinq minutes de fonctionnement, 185 watts après 15 minutes et 210 watts au bout d'une demi-heure.

Gänger [16], qui avait observé un phénomène analogue sur des électrodes de cuivre chromées, l'attribuait à la destruction des traces d'humidité contenues dans l'air comprimé, grâce aux décharges disruptives. Cependant, lorsqu'une série d'électrodes est formée, elle conserve le bénéfice de cette formation même si l'on vient à changer

le gaz diélectrique⁽⁵²⁾. Il faut retoucher la surface des électrodes, par un nouveau polissage par exemple, pour que le phénomène de formation puisse à nouveau se manifester. Les germes éventuels d'amorçage qui semblent détruits par les décharges, paraissent plutôt se trouver à la surface même des électrodes.

Quoi qu'il en soit, cette formation a joué un rôle important puisqu'elle a conduit à un accroissement de puissance d'environ 20 pour 100.

NOTE : A titre de comparaison, nous reproduisons ici le tableau des résultats obtenus par Gänger [16], et relatifs à des essais de rigidité diélectrique de l'air comprimé. Le champ a été créé entre des plateaux de cuivre chromés, dans l'air sec et dépoussiéré. Le tableau comporte : la surpression π en kg/cm², la distance e , en cm, des deux plateaux-électrodes, la tension U , en KV, supportée sans rupture, et le champ maximum correspondant, E , en KV/cm.

TABLEAU N° 7.

π kg/cm ² .	0	1	2,5	5	10	15	20	25	30	40
e cm.	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,307	0,277	0,215
U KV.	13,9	27	40	68	120	166	205	200	200	200
E KV/cm.	35	68	100	170	300	420	510	650	720	930

A la pression de 30 kg/cm² et pour des écartements comparables (2,77 et 2,4 mm), le champ obtenu par Gänger est notablement supérieur à celui réalisé dans notre machine (720 KV/cm au lieu de 555). Il conduirait à une augmentation de puissance utile d'environ 70 pour 100.

Influence de la nature du gaz diélectrique.

Après les essais du prototype n° 1 dont les résultats furent favorables à l'emploi de l'air comprimé comme diélectrique, ce gaz a été employé à peu près exclusivement pour notre deuxième machine.

⁽⁵²⁾ D'autre part, des essais effectués dans l'air parfaitement desséché nous ont permis d'observer ce phénomène avec la même netteté.

Cependant, des essais ont été effectués dans l'azote ; les résultats, semblables à ceux obtenus pour le premier prototype, ont montré que ce gaz ne présentait pas d'avantages.

Une légère introduction d'oxygène, à pression constante, améliore considérablement la rigidité diélectrique de l'azote, ainsi qu'en témoignent les chiffres rassemblés dans le tableau n° 8. Ce tableau est relatif à la machine (5 plateaux en acier doux polis correctement) tournant dans un diélectrique de pression constante et égale à 15 kg/cm^2 , mais dont la composition varie depuis 0 pour 100 d'oxygène (100 pour 100 d'azote) jusqu'à 11 pour 100 d'oxygène (89 pour 100 de N). La vitesse a été maintenue constante afin que les résultats soient comparables. Le tableau 8 comprend, en fonction de la composition du mélange azote-oxygène : la puissance utile mesurée, soit P , en watts (dont l'intérêt n'est que comparatif) ; l'accroissement en pour cent réalisé sur la puissance et rapporté au fonctionnement dans l'azote pur ; enfin, l'accroissement correspondant réalisé sur le champ E .

TABLEAU N° 8.

Oxygène pour 100.	0	2,7	5	7	11
P watts.	53	80	100	120	125
$\frac{\Delta P}{P}$ pour 100.	»	50	90	125	135
$\frac{\Delta E}{E}$ pour 100.	»	23	37	50	54

On constate le gain important réalisé. Cependant, lorsque la teneur en oxygène augmente, l'accroissement devient de moins en moins sensible et une saturation apparaît. La teneur correspondant à l'air n'a pas lieu d'être dépassée ; au delà, d'ailleurs, le mélange serait trop oxydant (étincelles au collecteur).

b) Résumé des puissances obtenues dans l'air comprimé et rapportées à cinq plateaux.

Soit P la puissance utile engendrée par la machine équipée avec p plateaux, le facteur de puissance maximum correspondant étant K_M (déterminé par les capacités parasites : $K_M = \frac{\alpha^2}{\alpha + \beta}$). La puis-

sance P' obtenue avec cette machine équipée de p' plateaux lui donnant un nouveau facteur de puissance maximum K'_M est évidemment ⁽⁵³⁾ :

$$P' = P \cdot \frac{p'}{p} \cdot \frac{K'_M}{K_M}.$$

Le tableau 9 résume les puissances précédemment données pour $N = 1\,500$ t/min. (le nombre de plateaux étant variable) et ramenées cette fois au cas de la machine comportant ses cinq plateaux. Les quatre cas correspondant aux électrodes diverses sont reportés.

Rappelons que les facteurs de puissance maxima ont pour valeur : 0,66 avec 3 plateaux, 0,72 avec 4 plateaux et 0,74 avec 5 plateaux.

TABLEAU N° 9.

π kg/cm ² .		0	5	10	15	20	25	30
P watts.	①	1,29	27	68	106	145	167	180
	②	1,55	25	56	79	94	»	»
	③	1,68	31	93	140	180	208	215
	④	1,63	26	82	166	256	300	328

c) Puissances comparées en l'absence de gauche.

Les valeurs précédentes ne sont pas encore comparables entre elles et ne correspondent pas à des maxima, à cause du gauche assez important présenté par les plateaux du rotor. Nous allons rapporter ces puissances, dans les quatre cas, à une machine bien centrée et tournant parfaitement rond.

Il est possible de mesurer le gauche affectant la machine, lors de chaque montage, en mesurant au moyen de jauges d'épaisseur l'écartement inter-électrodes minimum. Mais nous avons aussi déterminé cette valeur par le procédé précis (bien qu'indirect) suivant. Les caractéristiques de la génératrice étant connues (les capacités utile et parasites ont été mesurées soigneusement) et le champ inter-électrodes maximum, à la pression atmosphérique, pouvant être estimé

⁽⁵³⁾ Prem. partie, ch. IV, §§ 2, 3.

sûrement à 39 KV/cm, on peut déterminer avec précision la puissance théorique P_0 de la machine à la pression ordinaire (quelles que soient les électrodes utilisées). On a (Prem. partie, ch. iv, §§ 2, 3) :

$$P_0 = 5,56 \cdot 10^{-7} N n C_0 e^2 E_0^2 K'_M.$$

en supposant que le facteur de puissance maximum K'_M soit réalisé.

Pour notre machine équipée avec cinq plateaux et tournant à la vitesse de 1500 t/min., à la pression atmosphérique, on a :

$$N = 25, \quad n = 8, \quad e = 0,24 \text{ cm}, \quad K'_M = 0,74,$$

$$C_0 = 600 \text{ cm}, \quad E_0 = 39 \text{ KV/cm}.$$

On en déduit la puissance théorique :

$$P_0 = 2,17 \text{ watts}.$$

Si, à la pression atmosphérique, nous n'avons pas pu obtenir une telle puissance, la faute devait être attribuée au gauche du rotor, diminuant la différence de potentiel maximum susceptible de s'établir entre les électrodes. Nous nous étions assurés, en effet, que les pertes par irréversibilité étaient pratiquement nulles et n'intervenaient pas.

Si e est l'écartement théorique auquel correspond la puissance P_0 précédemment déterminée, l'écartement minimum e' , compte tenu du gauche, auquel correspond la puissance P'_0 effectivement mesurée est tel que :

$$\frac{e}{e'} = \sqrt{\frac{P_0}{P'_0}}.$$

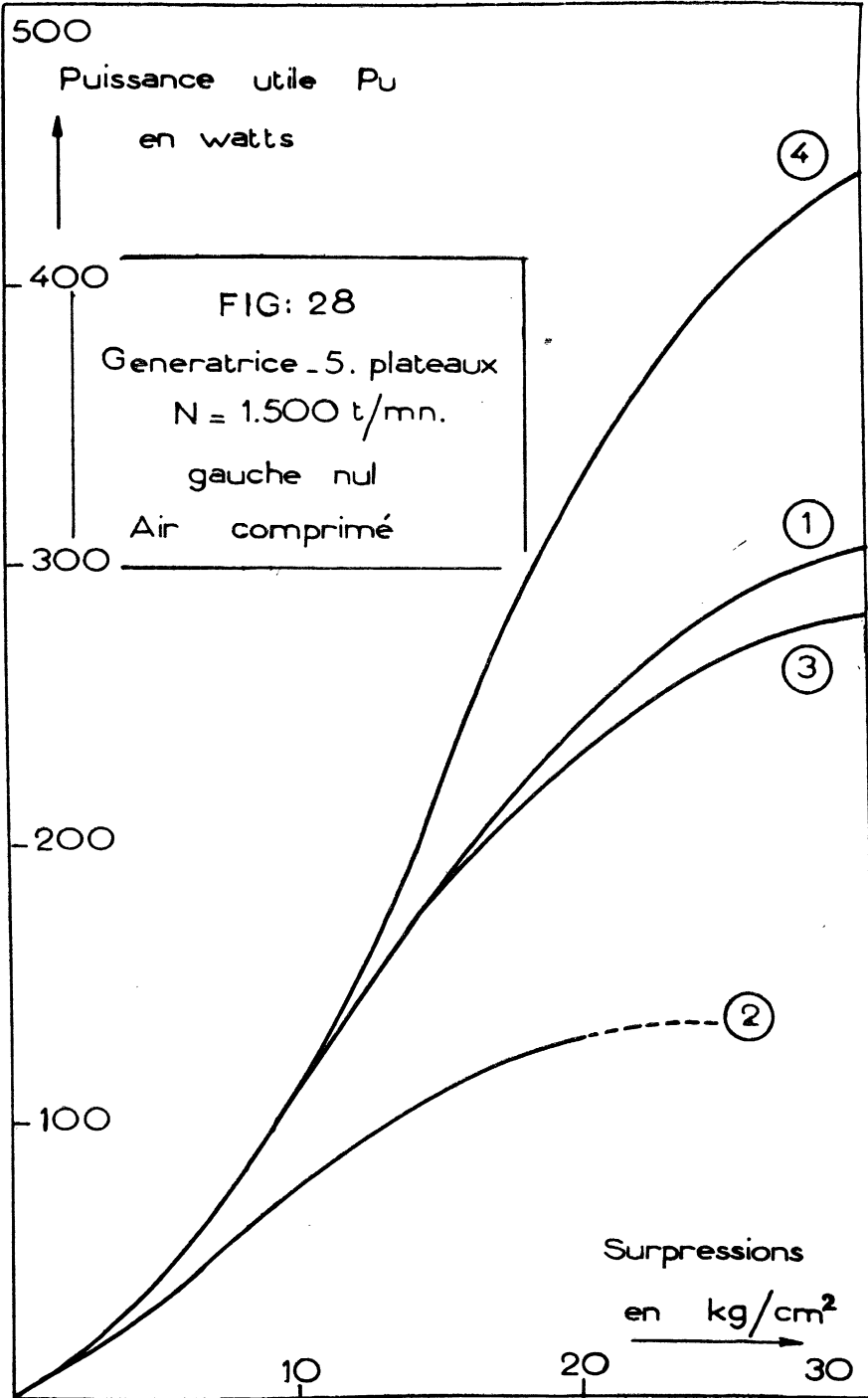
Le gauche maximum est :

$$\Delta e = e - e' = e \left(1 - \sqrt{\frac{P'_0}{P_0}} \right) = 2,4 \left(1 - \sqrt{\frac{P'_0}{2,17}} \right) \text{ en mm.}$$

Nous avons déterminé cette valeur et nous l'avons contrôlée par une mesure directe, pour chaque montage de la génératrice.

D'autre part, il devient facile de ramener toutes les puissances précédemment mesurées avec des gauches différents, au cas idéal d'une machine bien construite et tournant parfaitement rond. A la pression π , quelconque, la puissance P' mesurée aurait en fait pour valeur, en l'absence de gauche : $P = P' \frac{P_0}{P'_0}$.

Le tableau n° 10 résume les puissances pour les quatre cas d'élec-



trodes envisagés, rapportées à des conditions de fonctionnement identiques ($N = 1500$ t/min., $p = 5$ plateaux, gauche nul). Ces puissances sont donc comparables entre elles et correspondraient à une machine bien construite mécaniquement.

Au début, on trouvera les valeurs du gauche Δe mm, affectant la machine, dans chaque essai, ainsi que l'erreur relative ε pour 100 qui en résulte sur l'écartement inter-électrodes. Les valeurs calculées et mesurées sont en parfaite coïncidence.

Les puissances sont toujours données en watts.

TABLEAU N° 10.

Δe mm.	ε pour 100.	kg/cm ² .	0 (Théor.)	5	10	15	20	25	30
0,55	23	Cas n° ①.	2,17	45	115	180	245	280	305
0,37	15	Cas n° ②.	2,17	35	78	110	130	saturation.	
0,29	12	Cas n° ③.	2,17	40	120	180	230	270	280
0,31	13	Cas n° ④.	2,17	35	110	220	340	400	440

Avec les secteurs en aluminium-duralumin (n° 1), mal surfacés, le gauche atteint une valeur considérable. Les secteurs en acier, rectifiés, ont permis de le diminuer sensiblement.

La figure 28 montre l'accroissement de la puissance utile en fonction de la pression de l'air. Si la loi de Paschen était vérifiée, les courbes devraient être des paraboles ; elles en affectent la forme jusqu'à une pression de 10 kg/cm². Les observations faites au sujet des champs électriques pourraient être répétées ici.

5. — Pertes et rendement à pression variable et vitesse constante.

Le rendement de la génératrice a été établi par la méthode indirecte.

Les pertes de la machine ont été déterminées en mesurant la puissance absorbée par le moteur asynchrone préalablement taré (par essais directs, sur charge mécanique connue). Nous avons séparé les pertes par frottements solides et les pertes par frottements

gazeux ; les premières sont proportionnelles à la vitesse mais indépendantes de la pression, alors que les secondes croissent comme le cube de la vitesse et comme la première puissance de la pression.

D'autre part, nous avons contrôlé que les pertes par irréversibilité électrique étaient négligeables et n'avaient pas à être prises en considération dans ces calculs. Les pertes par excitation, inférieures à deux watts, sont également négligeables.

Voici les résultats obtenus⁽⁵⁴⁾ pour une vitesse de 1 500 t./m., la machine étant supposée équipée avec 5 plateaux sans gauche et fonctionnant dans l'air comprimé à pression variable ; les rendements correspondent aux valeurs de la puissance utile précédemment déterminées avec les meilleures électrodes (n° 4). Le tableau 11 comprend, en fonction de la pression :

— les pertes par frottements gazeux soit p_g , en watts, mesurées avec cinq plateaux et éventuellement interpolées,

— les pertes par frottements solides soit p_s , en watts, dues principalement au frottement des balais sur le collecteur (mesurées à 1 500 t./min. et supposées constantes) ;

— les pertes totales affectant la machine $p = p_g + p_s$, en watts (irréversibilités et excitation négligées) ;

— la puissance utile P_u , en watts, que l'on obtiendrait en l'absence de gauche et pour 5 plateaux (cas n° 4 du tableau n° 10) ;

— le rendement de la génératrice $\eta \% = \frac{P_u}{P_u + p} \times 100$.

TABLEAU N° 11.

π kg/cm ² .	0	5	10	15	20	25	30
p_g watts.	17	38	60	80	100	120	140
p_s watts.	60						
p watts.	77	98	120	140	160	180	200
P_u watts.	2,17	35	110	220	340	400	440
η pour 100.	2,7	26	48	61	68	69	68,5

⁽⁵⁴⁾ Ces résultats ne sont qu'approximatifs, en raison surtout des difficultés de tarage du moteur asynchrone, mais ils donnent néanmoins des indications suffisantes au point de vue industriel.

La figure 29 montre la variation des différentes grandeurs en fonction de la pression de l'air.

Les pertes par frottements gazeux sont effectivement proportionnelles à la pression et, comme la puissance utile croît de moins en moins vite, le rendement passe par un maximum pour une pression voisine de 25 kg/cm². Ce rendement maximum est honorable (près de 70 pour 100).

6. — Pertes et rendement à vitesse variable et pression fixe.

Le tableau n° 12 comprend, en fonction de la vitesse et pour la pression constante de 25 kg/cm² (air comprimé) :

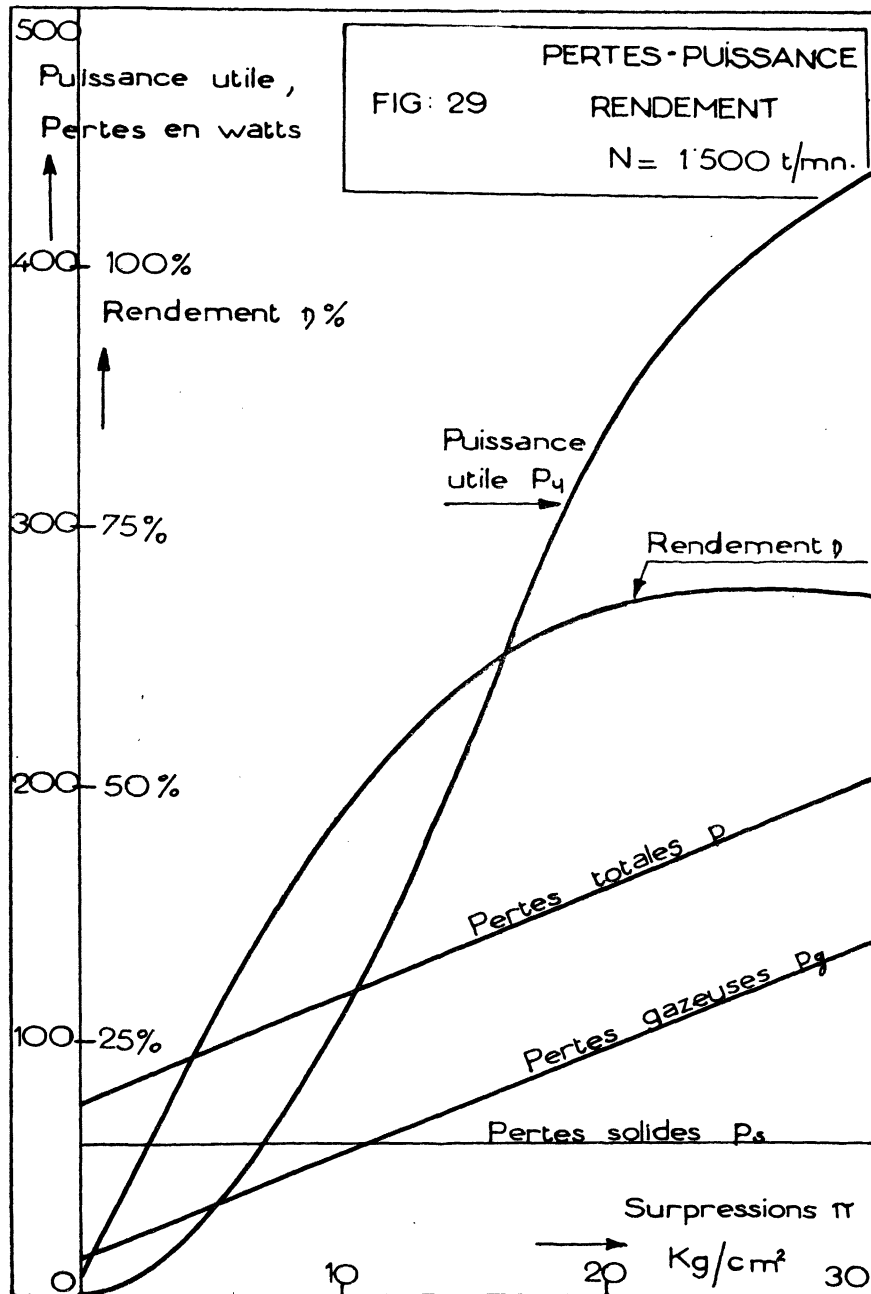
TABLEAU N° 12.

N t./min.	100	500	1 000	1 500	2 000	3 000	4 000
P_u watts.	27,6	133	276	400	535	800	1 070
p_g watts.	0,037	4,6	37	120	296	1 000	2 370
p_s watts.	4	20	40	60	80	120	160
p watts.	4	25	77	180	376	1 120	2 530
η pour 100.	86	84	78	69	58	42	28
(P_s, η) W/dm ³ (1).	3,7	17,3	33	42	48	52	46
(1) Voir explication ultérieure							

— la puissance utile P_u de la génératrice équipée avec cinq plateaux sans gauche, électrodes en acier doux poli soigneusement (cas n° 4) ; pour $N=1\,500$ t/min. et $\pi=25$ kg/cm², on avait obtenu $P_u=400$ watts. A la vitesse N on obtiendrait :

$$P_u = 400 \frac{N}{1\,500}^{(55)} ;$$

(55) En supposant la résistance de charge maintenue à sa valeur optimum (inversement proportionnelle à la vitesse).



— les pertes par frottements gazeux, p_g , calculées à partir d'une mesure effectuée pour $N = 3\,000$ t/min., $\pi = 25$ kg/cm², et pour laquelle on avait trouvé $p_g = 1\,000$ watts exactement. A une vitesse N , quelconque, on aurait $p_g = 1\,000 \left(\frac{N}{3\,000} \right)^3$;

— les pertes par frottements solides, p_s , calculées à partir de la valeur trouvée pour $N = 1\,500$ t/min., soit 60 watts. A la vitesse N , on a $p_s = 60 \frac{N}{1\,500}$;

— les pertes totales affectant la machine : $p = p_g + p_s$ (irréversibilités et excitation négligées) ;

— le rendement $\eta \% = \frac{P_u}{P_u + p} \cdot 100$.

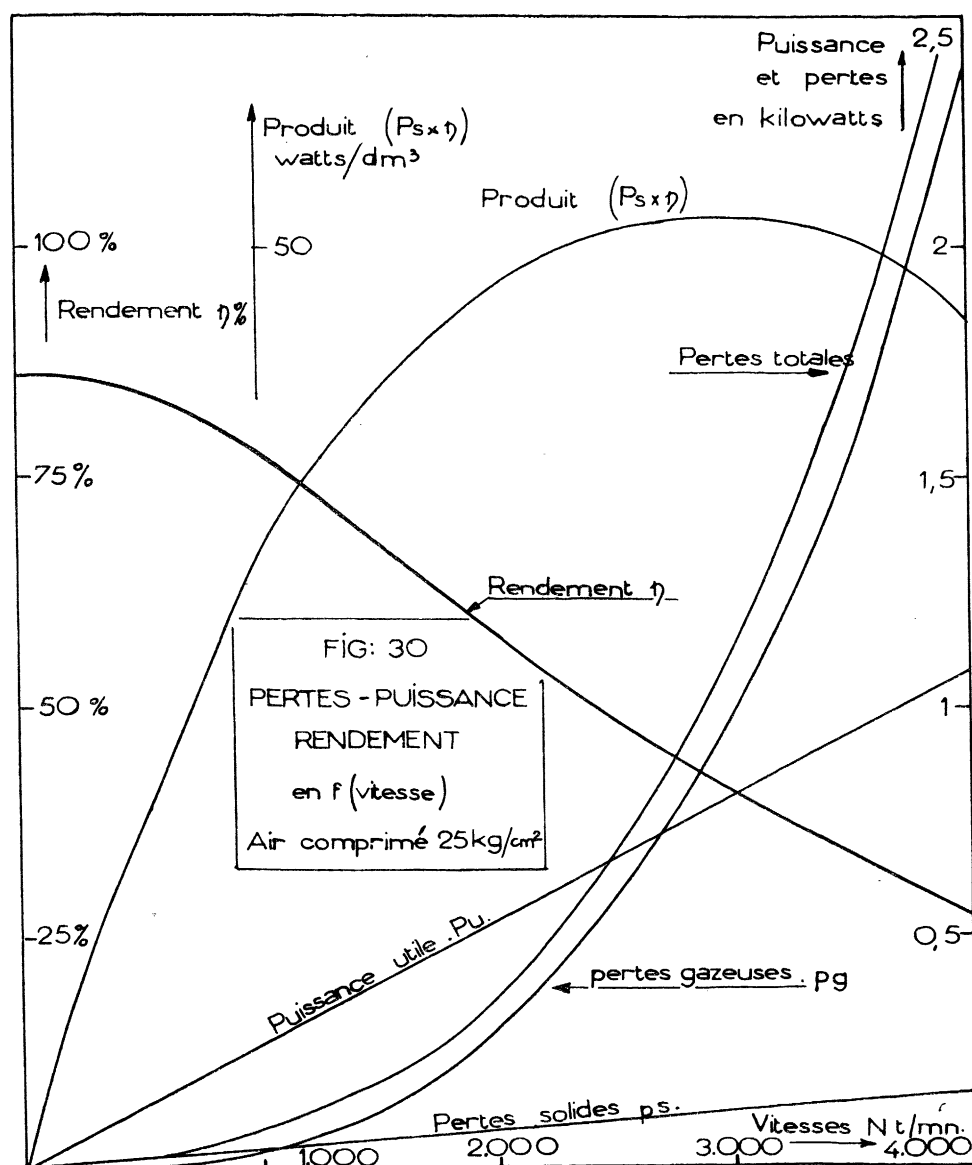
La figure 30 illustre ces résultats.

Un caractère particulier des machines électrostatiques réside dans l'importance des pertes par frottements gazeux dont elles sont affectées, qui croissent exceptionnellement vite lorsque la vitesse augmente. Ce caractère ne se retrouve dans aucune machine rotative classique.

Alors que les pertes totales croissent, en première approximation, comme le cube de la vitesse (les pertes solides deviennent rapidement négligeables devant les pertes par frottements gazeux), la puissance utile n'augmente que proportionnellement à elle. Aussi, le rendement décroît-il constamment lorsque la vitesse augmente. Pour N très petit, η est maximum (ici, environ 87 pour 100) ; il diminue ensuite et, après un point d'inflexion, tend asymptotiquement vers zéro lorsque N augmente indéfiniment.

En ne considérant que le rendement des machines, il y aurait donc intérêt à fonctionner à des vitesses de rotation très faibles pour lesquelles le rendement est élevé ; cependant, la puissance utile de la machine est alors réduite et sa puissance spécifique dérisoire ne présenterait aucun intérêt. Il faut donc se fixer un compromis heureux entre les facteurs rendement et puissance spécifique ; ce compromis peut être inspiré par les raisons particulières de certains cas d'espèce.

Il peut être aussi intéressant de considérer le produit ($P_s \times \eta$) de la puissance spécifique d'une machine par son rendement ; si ce produit n'a, en lui-même, aucun sens physique, il présente l'avantage de tenir compte de deux facteurs industriellement intéressants et de passer par un maximum en fonction de la vitesse de rota-



tion ⁽⁵⁶⁾. Ce maximum peut guider dans le choix d'une vitesse.

Le produit $(P_s \times \eta)$ relatif au présent essai a été consigné au bas du tableau 12. P_s est la puissance spécifique rapportée au dm^3 de parties actives (estimées à $6,5 \text{ dm}^3$, ce chiffre n'ayant d'ailleurs aucune importance pour la présente question). Ce produit a été porté sur la figure 30. On voit qu'il passe par un maximum aux environs de 3 000 t./min.

Suivant les cas, il pourrait être intéressant d'affecter chaque facteur de ce produit d'un exposant, dicté par des conditions économiques ou autres.

7. — Observations diverses.

a) *Puissance nécessaire à l'excitation.* — Le courant maximum demandé à l'excitatrice par la génératrice proprement dite et le régulateur n'a pas dépassé $50 \mu\text{A}$; sous 60 KV, l'excitatrice a donc dû fournir une puissance de l'ordre de 3 watts, soit environ 1 pour 100 de la puissance utile.

On peut aussi remarquer que le régulateur absorbe la puissance $(V + U)i$, V étant le potentiel d'excitation de la machine principale, U sa tension de débit et i le courant traversant le régulateur. La fraction Vi , fournie par l'excitatrice, est incluse dans le chiffre ci-dessus; quant à la puissance Ui , elle est empruntée à la génératrice principale mais est absolument négligeable (de l'ordre, ici, de 2 watts).

b) *Influence de la tranche des électrodes.* — L'expérience a montré que le profil de la tranche des secteurs peut s'écarter assez sensiblement du profil théorique sans être la cause de décharges prématurées. Des secteurs usinés imparfaitement se sont bien comportés, à condition toutefois que le profil de leur tranche ait affecté une

⁽⁵⁶⁾ On a $P_u = AN$, $p_s = BN$, $p_g = CN^3$.

A, B et C étant des constantes pour une machine donnée. Le rendement

$$\eta = \frac{A}{(A + B) + CN^2}$$

est toujours décroissant. Mais le produit $(P_u \times \eta) = \frac{A^2 N}{(A + B) + CN^2}$ passe par un maximum pour

$$N = \sqrt{\frac{A + B}{C}}.$$

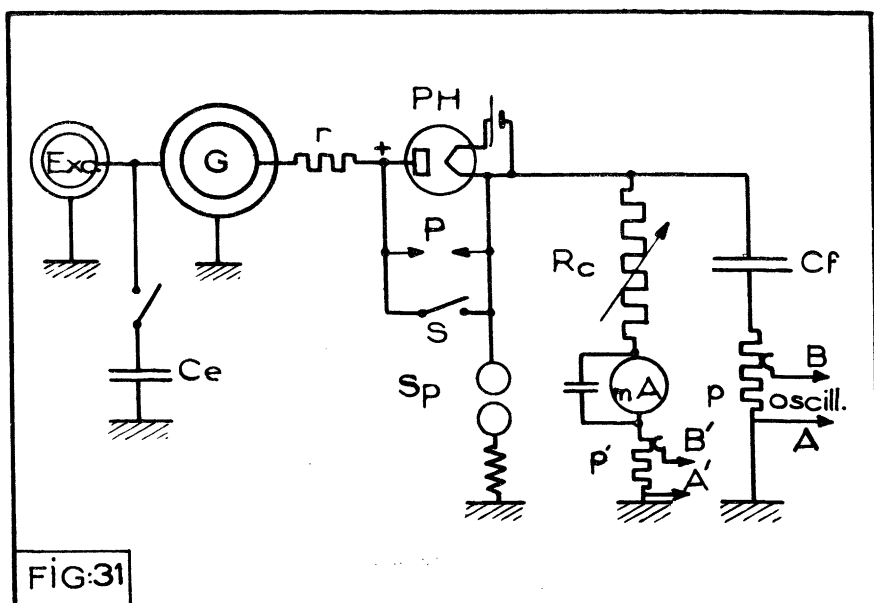
forme de demi-ellipse ; la région à faible rayon de courbure doit se trouver à l'extrémité de la tranche, loin des électrodes voisines.

En conséquence, l'usinage de la tranche des électrodes peut être grandement simplifié.

VI. — ÉTUDE A L'OSCILLOGRAPHE CATHODIQUE. RÉGULATION AUTOMATIQUE DU CONTACT DU DÉBIT

Des essais à l'oscillographe cathodique nous ont permis de vérifier la forme du courant débité par la machine, de contrôler les irréversibilités au collecteur et de constater l'action heureuse d'un phanotron inséré, tel une soupape, dans le circuit de débit⁽⁵⁷⁾. La figure 31 donne une idée du montage utilisé.

La génératrice débite sur la résistance de charge R_c , variable de 0



à plus de 20 M Ω , l'intensité du courant étant indiquée par le milliampèremètre monté dans le retour masse de cette résistance. En parallèle peut être branché un condensateur de filtrage C_f (10^3 à 10^6 cm), relié à la masse par le potentiomètre p (50 000 Ω).

⁽⁵⁷⁾ Voir première partie, ch. VI, § 3.

L'oscillographe, attaqué par la d. d. p. développée entre les points A et B du potentiomètre, montre l'allure de la partie variable du courant tel qu'il est engendré par la machine. En plaçant ce potentiomètre en série avec la résistance de charge, du côté masse, l'oscillographe donne au contraire l'allure du courant pratiquement obtenu, grâce à l'action filtrante de C_f .

Le phanotron PH⁽⁵⁸⁾ est inséré dans le circuit de débit, dès la sortie de la génératrice et avec le sens convenant à la polarité de celle-ci ; il peut être court-circuité et éliminé, au moyen d'un sectionneur, afin que les fonctionnements, avec et sans phanotron, puissent être comparés.

1. — *Fonctionnement sans phanotron.*

Le potentiel aux bornes de la résistance de charge est maintenu à une valeur constante au moyen du condensateur C_f , alors que le potentiel d'excitation subit les fluctuations propres au fonctionnement.

Si le régime de fonctionnement ne correspond pas au calage des balais, on distingue très bien les irréversibilités qui se produisent au moment du contact de débit et qui se traduisent par une brusque pointe de courant, dirigée dans un sens ou dans l'autre, suivant le sens du déséquilibre des potentiels au moment du contact. Si, à ce moment, le potentiel des transporteurs est inférieur au potentiel du circuit extérieur, ce dernier se décharge partiellement dans la machine et l'on observe une pointe de courant très brève, dirigée en sens inverse du courant normal, débité sous formes de dents (fig. 32, *c*). Dans ce cas, le contact est prématuré ; ou bien, pour un calage de balais et une vitesse de rotation donnés, la résistance de charge est trop grande. On a $R_c > R_0$, ou $k_1 > k$ ⁽⁵⁹⁾. Si, au contraire, c'est le potentiel des transporteurs qui est supérieur, au moment du contact, à celui du circuit de débit, il se produit une brusque décharge irréversible de la machine, qui rétablit l'équilibre des potentiels et qui se traduit à l'oscillographe par une pointe de courant dirigée dans le même sens que le courant normal (fig. 32, *b*). Le contact a lieu trop tard ; ou bien, pour une machine et une

⁽⁵⁸⁾ Nous avons employé soit un phanotron classique PH.28, soit un thyatron TY.74 monté en phanotron (grille au + filament).

⁽⁵⁹⁾ Voir première partie, ch. VI, §§ 1, 2.

vitesse données, la résistance de charge est trop faible. On a $R_c < R_0$ ou $k_1 < k$.

En faisant varier la résistance de charge, on passe ainsi par tous les cas d'oscillogrammes représentés à gauche de la figure 32 (Le calage des balais et la vitesse de rotation sont fixes).

Lorsque la résistance tend vers la valeur optimum correspondant au calage des balais, l'amplitude des pointes de courant diminue ; pour $R_c = R_0$, ces pointes sont très réduites et sont réparties dans les deux sens (fig. 32, a). Pour une résistance de charge donnée et une vitesse de rotation bien déterminée, il serait possible de régler avec précision le calage du balai assurant le commencement du débit ⁽⁶⁰⁾ : ce procédé est très sensible.

Nous avons vérifié, sur notre machine, que le calage était correct, la machine étant équipée avec cinq plateaux et fonctionnant à potentiel d'excitation non fixe ; ainsi que nous le désirions, ce fonctionnement optimum et réversible correspond bien avec une puissance utile débité maximum ⁽⁶¹⁾. Ainsi, les pointes de courant relevées à l'oscillographe passent par un minimum (et se répartissent dans les deux sens) pour une résistance $R_c = 8\text{M}\Omega$; c'est pour cette même valeur que la courbe $P(R_c)$, relevée et tracée, passe par un maximum (P, puissance débitée ; R_c , résistance de charge). D'autre part, la valeur théorique de la résistance optimum est, dans ces conditions, $\frac{1}{\Omega(\alpha + \beta)} = 7,6\text{M}\Omega$; la concordance est bonne (la vitesse est maintenue constante à 1 500 t./m.).

En résumé, le facteur de multiplication statique est bien égal au facteur de multiplication dynamique correspondant à la puissance maximum recherchée.

2. — *Fonctionnement avec phanotron.*

Tous les essais ont parfaitement vérifié les vues théoriques esquissées dans la première partie de cette étude (voir ch. VI, § 3).

⁽⁶⁰⁾ En opérant à la pression atmosphérique.

⁽⁶¹⁾ Ce qui n'est évidemment pas indispensable. La réversibilité peut être assurée quel que soit le facteur de multiplication dynamique — donc R_c —, à la seule condition que le facteur statique lui soit égal ; il suffit que le calage des balais soit adapté à la résistance de charge.

Par contre, l'obtention d'une puissance maximum impose, pour une machine donnée, les facteurs de multiplication ; la résistance de charge doit être égale à la « résistance interne fictive » de la génératrice (Première partie, ch. IV, § 3 ; ch. VI, §§ 1 et 2).

La régulation automatique du contact de débit est assurée comme on pouvait le prévoir.

Si la résistance de charge est supérieure ⁽⁶²⁾ à la valeur optimum et quelle que soit sa valeur, le débit est automatiquement déclenché au moment opportun. Aucune pointe de courant ne peut plus s'observer dans le sens correspondant à cet état ($R_c > R_0$, donc pointe inversée par rapport à la dent normale du courant); au contraire, une petite pointe apparaît dans le sens de la dent et semble due à la d. d. p. nécessaire pour amorcer le phanotron.

D'autre part, dans le cas de résistances de charge trop faibles, le phanotron conserve son action heureuse en absorbant lui-même les à-coups au moment du contact au collecteur. Les pointes de courant sont effacées à peu près complètement, même pour de très faibles résistances.

Le sectionneur S permet de passer immédiatement du fonctionnement sans, au fonctionnement avec phanotron, rendant la comparaison particulièrement aisée et démonstrative.

La suppression des pointes de courant est corrélative au calibrage automatique, que l'on observe lors de l'introduction du phanotron, de la largeur des dents de courant dont la hauteur reste par ailleurs constante. Plus la résistance de charge augmente, plus la dent se rétrécit; la fin du contact reste invariable mais le début en est retardé ⁽⁶³⁾. A la limite, la dent se réduit à une simple pointe puis disparaît ⁽⁶⁴⁾. La partie droite de la figure 32 montre le rétrécissement progressif de la largeur des dents observées à l'oscillographe, lorsque R_c augmente. En haut (cas n° 1), l'oscillogramme est relatif à un fonctionnement sans phanotron; il figure à titre de comparaison.

REMARQUES. — a) Pour protéger le phanotron contre les tensions inverses excessives, nous avons monté à ses bornes un parafoudre P

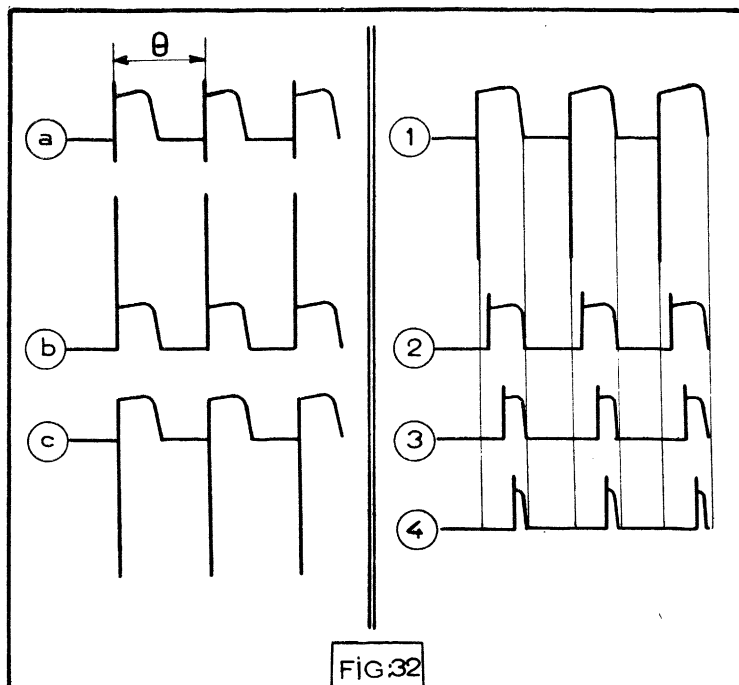
(62) Rappelons que la commutation mixte par collecteur et phanotron demande que le contact au collecteur s'établisse toujours un peu trop tôt; pour un calage donné — c'est le cas ici — la résistance de charge doit être trop grande.

(63) La différence des énergies correspondant au rétrécissement des dents représente la perte par irréversibilité — étincelles au collecteur — qui se manifestait en l'absence du phanotron et qui s'accusait à l'oscillographe par une pointe de brève durée mais de très grande amplitude; la surface de cette pointe devrait être égale à la diminution de surface de la dent.

(64) Dès que le facteur de multiplication atteint sa valeur maximum $k_M = \frac{\alpha}{\beta}$, le débit ne peut plus se faire (Voir première partie, ch. iv, § 4). Ici, k_M est de l'ordre de 3,5.

(voir fig. 31) réglé pour une d. d. p. voisine de la tension inverse maximum que le phanotron peut supporter (en général 6 KV, pour emploi du phanotron PH. 28). Un tel système de protection s'est révélé parfaitement efficace.

b) Lorsque l'intensité du courant débité est trop faible, le phanotron ne permet plus une décharge continue de la machine pendant la période correspondant à une dent de courant. Le contact assuré



par le phanotron est soumis à un phénomène de relaxation et la dent de courant normale est remplacée par une suite de petites dents qui correspondent à des décharges partielles, interrompues et successives. Cependant, dès que l'intensité du courant dépasse une certaine valeur (ici, environ 0,5 mA), la charge à éjecter est suffisante pour assurer un débit continu et éviter toute relaxation ⁽⁶⁵⁾.

⁽⁶⁵⁾ Lorsque cette charge est insuffisante, en effet, la d. d. p. aux bornes du phanotron s'abaisse brusquement aussitôt le contact déclenché ; le phanotron s'éteint, interrompant le débit ; la d. d. p. augmente à nouveau, le phanotron se rallume et une nouvelle décharge partielle se produit, abaissant à nouveau la d. d. p. ; il est évident qu'une relaxation apparaît, la d. d. p. aux bornes du phanotron oscillant entre la tension d'allumage et la tension d'extinction de celui-ci.

Une résistance r (voir fig. 31) placée à la sortie de la machine peut d'ailleurs amortir et empêcher radicalement les oscillations dans tous les cas ; sa valeur doit être d'autant plus grande que le courant débité est plus faible⁽⁶⁶⁾.

Dès que l'intensité devient supérieure à 0,5 mA, cette résistance peut être supprimée ; nous l'avons cependant conservée, avec une valeur très faible (1 000 Ω) dans un but de protection.

c) Il y a intérêt à placer le phanotron aussi près que possible du balai de débit et à réduire au maximum les capacités se trouvant en amont, afin d'éviter, au collecteur, les étincelles provoquées par leur charge.

3. — *Forme des dents de courant.*

a) *Potentiel d'excitation fixe.* — Un condensateur C_e (de l'ordre de 10⁴ cm) peut être branché en parallèle sur l'excitation afin d'en maintenir le potentiel fixe. L'intensité maximum débitée ne demeure pas constante et diminue au long de la dent de courant car la variation $c(\psi)$ n'est pas linéaire ; la périphérie excentrée des transporteurs provoque, au cours de la rotation, une diminution plus rapide de la capacité utile.

D'autre part, le calage des balais n'étant pas convenable pour ce genre de fonctionnement, des irréversibilités importantes apparaissent (étincelles au collecteur) lorsque la résistance de charge est réglée à l'optimum, en vue de recueillir un maximum de puissance. La perte de puissance, dans ces conditions, est d'environ 20 pour 100. Les irréversibilités ne disparaissent que pour une résistance de charge de 4 M Ω seulement, la perte de puissance étant alors de 75 pour 100 par rapport à la valeur maximum. Il conviendrait, nous l'avons vu, de retarder le contact de débit (Première partie, ch. v).

b) *Potentiel d'excitation non fixe.* — Dès que le condensateur C_e est supprimé, le fonctionnement redevient normal et tel qu'il avait été prévu. D'autre part, le courant croît, maintenant, au fur et à mesure du débit, et bien que la loi de variation $c(\psi)$ tende à s'y opposer. Cette croissance est très atténuée par la forme de cette loi non linéaire, mais elle subsiste partiellement. Les dents de courant affectent la forme générale représentée sur la figure 32.

⁽⁶⁶⁾ Et afin que la chute de tension qu'elle produit soit de l'ordre de grandeur de la chute de tension constante dans le phanotron.

Enfin, les dents disparaissent prématurément après une brusque inflexion, à cause des capacités parasites (Première partie, ch. v, 1, B, § 3).

c) *Filtrage du courant débité.* — En branchant l'oscillographe en A'B', on peut se rendre compte de la forme du courant débité dans la résistance de charge. En l'absence de condensateur de filtrage, le débit se fait évidemment sous la forme des dents dont il vient d'être question (la résistance de charge est sans self). Pour $C_f = 1500 \text{ cm}$ (3 fois C_0), la composante variable du courant est réduite de plus de 80 pour 100. Pour $C_f = 0,01 \mu\text{F}$ (environ 20 fois C_0), aucune ondulation n'est plus perceptible.

Rappelons que, dans le cas où l'on désirerait un courant constant, il serait plus logique d'utiliser une machine comportant deux rotors décalés ; le condensateur de filtrage deviendrait à peu près inutile.

Rappelons également que, dans nos essais de détermination de la puissance, le condensateur de filtrage utilisé a eu principalement pour but de rendre égales les valeurs efficace et moyenne du courant débité.

BIBLIOGRAPHIE ⁽⁶⁷⁾.

- [1] TÖPPLER. — Poggendorf Ann. 1865, 125, p. 469.
- [2] HEMPEL. — Ann. d. Physik u. Ch., 1885, 25, p. 487.
- [3] WOMMELSDORF. — Ann. d. Physik u. Ch., 1902, 9, p. 651.
- [4] WOMMELSDORF. — Ann. der Physik, 1904, 15, p. 1019.
- [5] WOMMELSDORF. — Ann. der Physik, 1905, 16, p. 334.
- [6] WOMMELSDORF. — Ann. der Physik, 1907, 23, p. 609.
- [7] WOMMELSDORF. — Ann. der Physik, 1907, 24, p. 483.
- [8] WOMMELSDORF. — Ann. der Physik, 1912, 39, p. 1201.
- [9] MASCART. — Traité d'électricité statique, Masson édit., 1876, T. second.
- [10] H. CHAUMAT. — C. R. Ac. Sc., 1929, 188, pp. 1096, 1232, 1490.
- [11] H. CHAUMAT et E. LEFRAND. — C. R. A. Sc., 1931, 193, p. 1176.
- [12] H. CHAUMAT. — Bulletin S. F. E., 1933, série 5, T. III, p. 907.
- [13] J. G. TRUMP and R. J. Van de GRAAFF. — Physical Review, 1939, 55, p. 1160.
- [14] T. LAURITSEN, C. C. LAURITSEN and W. A. FOWLER. — Phys. Review, 1941, 59, p. 241.
- [15] PALM. — Elektrotechnische Zeitschrift, 1926, H. 31, p. 904.
- [16] GÄNGER. — Archiv für Elektro., 1940, T. 34, H. 11, p. 633.

⁽⁶⁷⁾ Les références [15] et [16] sont relatives à la rigidité des gaz comprimés ; les précédentes se rapportent aux machines électrostatiques proprement dites.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
PRÉFACE.	157
PRÉAMBULE.	167

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE THÉORIQUE D'UNE MACHINE ÉLECTROSTATIQUE

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS

I. — HISTORIQUE.	171
II. — CARACTÈRES D'UNE MACHINE PUISSANTE ET A BON RENDEMENT :	
1. — Le rôle du diélectrique.	174
2. — Le problème du diélectrique.	175
3. — Le problème des transporteurs.	177
4. — Conception des transporteurs conducteurs.	178
5. — Réversibilité.	181
6. — Conclusions.	182

CHAPITRE II

ÉTUDE D'ENSEMBLE

1. — Présentation de la machine. Fonctionnement simplifié.	184
2. — Diélectriques.	190
3. — Puissance. Pertes. Rendement.	194
4. — Capacités parasites.	195

CHAPITRE III

ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE SOMMAIRE

1. — Puissance de la machine.	196
2. — Détermination de l'épaisseur optimum à donner aux électrodes.	198
3. — Réalisation d'un champ uniforme.	201
4. — Volume et puissance spécifique des machines électrostatiques.	207
5. — Facteur de multiplication optimum.	208
6. — Ordre de grandeur des puissances.	209

CHAPITRE IV

INFLUENCE DES CAPACITÉS PARASITES

	Pages.
1. — Capacités parasites.	211
2. — Puissance réelle.	214
3. — Facteurs de multiplication et de puissance. Puissance maximum.	215
4. — Tension maximum. Conditions limites.	218
5. — Détermination expérimentale des capacités.	219
6. — Grandeur des différentes capacités.	220

CHAPITRE V

ANALYSE DU CYCLE DE FONCTIONNEMENT
COMMUTATION. COLLECTEUR

I. — FONCTIONNEMENT A POTENTIEL D'EXCITATION CONSTANT.

A. — *Machine idéale sans capacités parasites.*

1. — Rupture du contact de masse. Période d'élévation du potentiel.	224
2. — Contact de débit. Effet d'une erreur de calage.	226
3. — Période de débit.	228
4. — Rupture du contact de débit et contact de masse.	230
5. — Période de charge.	230
6. — Bilan des énergies au cours du cycle de fonctionnement.	230

B. — *Machine avec capacités parasites. Modification des temps de contact.*

1. — Modification du contact de masse.	231
2. — Modification du contact de débit.	236
3. — Période de débit. Forme du courant. Fin de contact.	237

II. — FONCTIONNEMENT A POTENTIEL D'EXCITATION NON FIXE.

A. — *Machine idéale sans capacités parasites.*

1. — Période d'élévation de potentiel. Contact de débit.	241
2. — Période de débit. Forme du courant.	243

B. — *Machine avec capacités parasites.*

1. — Période d'élévation de potentiel. Contact de débit.	247
2. — Période de débit.	247

III. — COLLECTEUR. 248

CHAPITRE VI

FONCTIONNEMENT. DIVERS

1. — Conditions de fonctionnement. Résistance de charge optimum.	250
2. — Caractéristique d'une génératrice. Résistance interne fictive. Régulation du fonctionnement.	255
3. — Régulation automatique du contact de débit.	261
4. — Excitation des génératrices. Auto-amorçage.	265
5. — Pertes et rendement.	268
6. — Effets mécaniques parasites.	270
7. — Réservoir à gaz comprimé.	273
8. — Traversées haute tension. Utilisation du gaz comprimé.	274
9. — Machines à écartement inter-électrodes variable.	277

DEUXIÈME PARTIE
CONSTRUCTION ET ESSAIS DE GÉNÉRATRICES
ÉLECTROSTATIQUES

	Pages.
Observations générales sur la construction.	286
PROTOTYPE 1	
1. — Description.. . . .	289
2. — Caractéristiques.	293
3. — Essais et résultats.. . . .	294
PROTOTYPE 2	
I. — DESCRIPTION.	
1. — Rotor et stator.	300
2. — Collecteur et balais.	305
3. — Réservoir à gaz comprimé.	306
4. — Traversées haute tension.	307
5. — Moteur d'entraînement.	308
311	
II. — CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES.	
III. — MONTAGE D'UNE EXCITATRICE.	
1. — Description.. . . .	314
2. — Caractéristiques.	314
3. — Résultats. Auto-amorçage.	315
Note : Caractéristique d'une effluve.	320
322	
IV. — ESSAIS DE LA GÉNÉRATRICE. PROCÉDÉS DE MESURES.	
V. — ESSAIS DE LA GÉNÉRATRICE. RÉSULTATS.	
1. — Capacités utiles et parasites. Facteurs divers. Réduction de la puissance. Influence du nombre de plateaux.	325
2. — Calage des balais.	326
3. — Résistances internes ou résistances de charge optima.	328
4. — Puissance. Champ inter-électrodes. Influence des électrodes.	329
5. — Pertes et rendement à pression variable et vitesse constante.. . . .	340
6. — Pertes et rendement à vitesse variable et pression fixe.	342
7. — Observations diverses.	346
347	
VI. — ÉTUDE A L'OSCILLOGRAPHE CATHODIQUE. RÉGULATION AUTOMATIQUE DU CONTACT DE DÉBIT.	
BIBLIOGRAPHIE.	354

(Parvenu aux Annales le 15 décembre 1947.)