

ques il y aurait actuellement en exploitation ou en construction les fours suivants :

Colby	1	} soit au total 7 jours à induction.
Hjorth	1	
Frick	2	
Schneider	1	
Gin	1	
Wallin	1	

Avec les 17 fours Kjellin et Röchling-Rodenhauser cela fait en tout 24 aciéries électriques avec fours à induction.

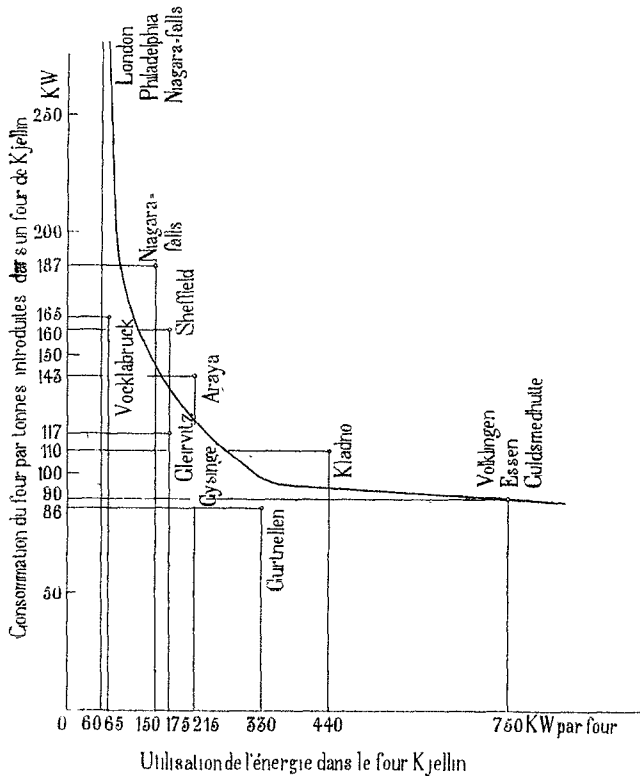


Fig. 48

L'auteur espère par les précédents exposés avoir donné un aperçu sur une question offrant le plus grand intérêt pour l'électrotechnicien et avoir apporté la preuve que la préparation de l'acier dans le four à induction, ne révolutionnera pas sans doute l'industrie sidérurgique, mais améliorera tant au point de vue économique qu'au point de vue technique les conditions de production de l'acier en général et permettra d'étendre notablement les limites d'emploi des aciers spéciaux.

W. ENGELHARDT.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS
DES
DIVERS SYSTÈMES DE TRANSFORMATION
de courant alternatif à haute tension en courant continu
(SUITE)

CHAPITRE IV
ENTRETIEN

Au point de vue des frais d'entretien nécessités par les organes collecteurs du courant, la commutatrice doit être logiquement la machine la plus coûteuse (1), puisqu'elle comporte, en plus des autres groupes, des bagues et des frotteurs pour la captation du courant alternatif. La dépense

(1) En admettant, bien entendu, que la commutation soit également bonne pour toutes les machines, ce qui est généralement le cas.

relative à ces divers organes est souvent aussi élevée que celle qui correspond au côté continu ; elle peut même lui être supérieure, particulièrement dans le cas de balais métalliques quand il s'agit de bagues insuffisamment dimensionnées ou défectueusement établies.

D'autre part, l'entretien mécanique de la commutatrice est évidemment moins onéreux que celui des groupes moteur-générateurs, de sorte qu'il s'établit entre les différences que présentent ces deux natures de dépenses dans les deux systèmes, une certaine compensation. C'est pourquoi la plupart des sociétés exploitantes utilisant à la fois les deux catégories de machines, ont émis l'avis qu'il n'existe pas, pratiquement, entre elles, de différence bien sensible, au point de vue des frais que nécessite leur entretien normal.

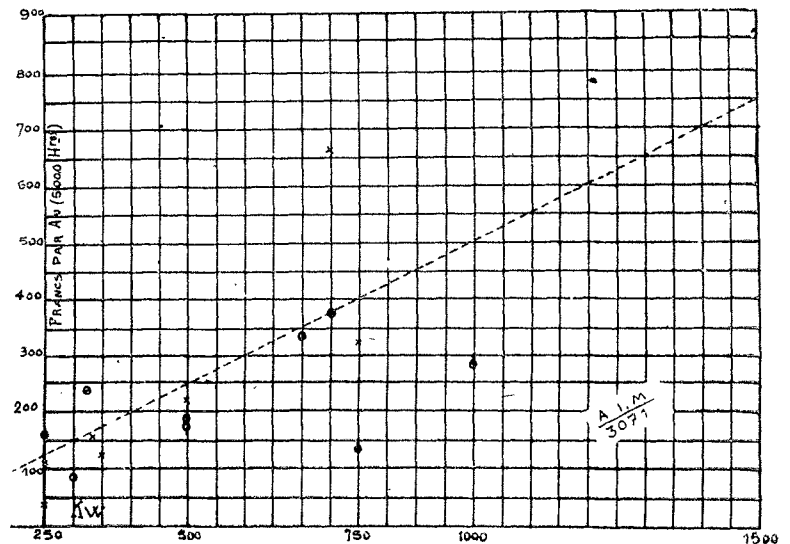


Fig 18.

A titre de simple indication, nous avons porté dans le diagramme ci-contre (fig. 18) après les avoir ramenées à une même durée de service de 5.000 heures, les consommations annuelles de matières (balais, huile et divers), que nous ont données dans leur réponse diverses sociétés. Ces valeurs, un peu disparates, sont visiblement en trop petit nombre pour pouvoir servir de base à une comparaison systématique ; elles suffisent cependant à nous montrer que les dépenses considérées sont généralement d'un ordre assez accessoire, puisqu'elles ne dépassent pas le plus souvent fr. 0.000 par kilowatt-heure.

En ce qui concerne les frais de renouvellement, les indications que nous avons reçues sont insuffisantes pour nous permettre de marquer une distinction entre les différents systèmes. Ceux-ci sont vraisemblablement, à cet égard, sensiblement équivalents. Les induits doivent être ordinairement rebobinés au bout de quinze ans environ et les collecteurs remplacés au bout de quinze à vingt ans. Quant aux bagues des commutatrices, lorsqu'elles sont bien établies et qu'elles comportent des balais bien appropriés, elles peuvent atteindre aisément 80.000 heures de service (dans les installations sur lesquelles nous avons été renseignés, cette durée a varié entre quatre et douze ans).

Enfin, on peut observer qu'en raison de la constitution plus simple de la commutatrice, une même avarie est plus facile à réparer pour celle-ci que pour les autres groupes (le convertisseur en cascade étant à cet égard le moins commode). De plus, la commutatrice est incontestablement la machine dont toutes les parties sont le plus directement et le plus aisément accessibles et par suite, celle qui se prête le mieux à un nettoyage à la fois rapide et complet de ses enroulements.

CHAPITRE V

DÉMARRAGE ET COUPLAGE

La rapidité et la sûreté des manœuvres nécessaires pour la mise en charge d'un groupe à partir de l'arrêt, constituent des facteurs d'autant plus importants de la régularité du service d'une sous-station qu'il y a plus d'intérêt à réduire au strict minimum la durée de toute interruption éventuelle.

Le groupe moteur-asynchrone-dynamo est, évidemment, de toutes les machines, celle qui réalise le plus simplement et le plus commodément ces desiderata. Démarrant, en effet, directement sur le réseau, grâce à l'insertion dans le circuit du rotor d'un simple rhéostat, il peut toujours être mis en service au bout d'un même temps, absolument indépendant des fluctuations qui peuvent affecter la fréquence du courant alternatif ou la charge du côté continu. Ce temps varie d'ordinaire entre 45" et 2' pour des puissances de 100 à 1.000 kw. et pour un courant de démarrage généralement compris entre 40 % et 70 % du courant de pleine charge.

Le convertisseur en cascade offre l'avantage de pouvoir être démarré comme le groupe précédent, en conduisant au moyen de bagues collectrices, trois phases du rotor asynchrone vers une résistance. La manœuvre, cependant, présente certaines difficultés. Malgré les réglages que l'on peut effectuer sur le rhéostat d'excitation et la résistance de démarrage, la machine en général ne tend pas d'elle-même à se synchroniser ; elle oscille autour de la vitesse synchrone et il faut nécessairement tâtonner quelque peu avant de pouvoir saisir le moment propice pour la fermeture du court-circuiteur, ce qui exige de la part du personnel une certaine habileté.

Un dispositif récemment breveté (1) a permis de lever complètement ces difficultés pour les convertisseurs comportant un même nombre de pôles du côté alternatif et du côté continu.

Ce dispositif, basé sur la propriété bien connue que possèdent les machines à stator polyphasé et à rotor monophasé, d'avoir une seconde vitesse synchrone stable égale à la demi-vitesse de rotation du champ primaire, consiste à court-circuiter progressivement deux phases du rotor, au moyen d'une résistance entre deux bagues, ce qui a pour effet de provoquer la formation de courants wattés tendant à ramener la machine au synchronisme parfait lorsqu'elle s'en écarte légèrement.

Grâce à ce procédé, le convertisseur en cascade peut être démarré, pratiquement (1), aussi rapidement et aussi facilement qu'un groupe moteur asynchrone-dynamo. C'est ainsi que nous avons pu voir mettre en service par ce moyen, dans une sous-station des Tramways Bruxellois, un convertisseur de 800 kw. en moins de 1 $\frac{1}{2}$ à partir de l'arrêt.

Le groupe moteur synchrone-dynamo est de tous les systèmes, au point de vue qui nous occupe, le moins avantageux.

Si la sous-station ne comporte pas de batterie, il exige, pour être démarré, soit un moteur de lancement calé en bout d'arbre, soit un petit groupe auxiliaire destiné à produire

(1) Brevet belge n° 243.527 des Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi.

(2) Les manœuvres à effectuer sont les suivantes :

On fixe le rhéostat d'excitation à la position qui correspond approximativement à la production de la tension normale, à la vitesse du synchronisme, et on intercale entre les bagues une résistance telle que la machine absorbe juste le courant nécessaire au démarrage, soit de 30 à 40 % du courant normal. On enclanche alors l'interrupteur principal et, dès que le groupe s'est mis en mouvement, on intercale entre deux bagues la résistance monophasée dont on diminue ensuite progressivement la valeur ; avant qu'elle ne soit court-circuitée, le synchronisme parfait s'est établi de lui-même.

le courant continu nécessaire à la mise en marche de la première machine.

Dans les deux cas, le groupe ne peut être connecté au réseau qu'après réglage du synchronisme. Or, ce dernier est parfois délicat à réaliser. Par exemple, quand le démarrage se fait par le courant pris aux barres du tableau, si les génératrices subissent des variations rapides de vitesse, celles-ci se répercutent sur la fréquence du réseau et il peut devenir laborieux d'adapter la vitesse du moteur à cette fréquence instable (1). Le même inconvénient peut encore se manifester, malgré une stabilité parfaite de la fréquence du réseau, lorsque, sous l'effet de brusques changements de charge, la tension continue subit d'importantes variations (qu'il s'agisse de dynamos fortement hypercompoundées ou de dynamos shunt à forte réaction) ; les variations continuelles de la tension d'alimentation faisant alors obstacle à l'ajustage précis de la vitesse (2).

En pareil cas, malgré l'emploi d'appareils spéciaux (fréquence-mètre ou synchronoscope, capables de donner très nettement le moment exact du synchronisme), le couplage d'un groupe peut exiger un temps relativement long : 10 minutes et même davantage, d'après plusieurs exploitants.

En l'absence de ces difficultés particulières, le couplage d'un groupe synchrone démarré par moteur de lancement ou par courant continu, suivant le mode le plus généralement employé (3), demande normalement de 2 à 4 minutes pour des puissances comprises entre 100 et 1.000 kilowatts.

La commutatrice donne lieu exactement aux mêmes difficultés que le groupe synchrone en ce qui concerne les deux moyens ci-dessus envisagés. C'est pourquoi le démarrage par courant continu, après avoir été presque exclusivement employé jusqu'en ces dernières années pour cette machine, tend de plus en plus à être remplacé, même pour les plus fortes unités, par le démarrage direct du côté alternatif (4).

Ce dernier procédé a l'avantage d'être plus simple, de n'exiger aucune habileté spéciale de la part du personnel et

(1) Ces variations de fréquence ont évidemment moins d'effet quand la dynamo du groupe de transformation est alimentée par un petit groupe auxiliaire, car le moteur de ce dernier se trouvant couplé asynchroniquement avec le réseau, suit ses variations de fréquence.

(2) Il est recommandable dans ces deux cas de laisser une certaine résistance insérée dans le rhéostat de démarrage, pendant la mise en parallèle, afin de permettre un ajustage final plus rapide de la vitesse que par l'action sur le rhéostat de champ ; cette résistance empêche, d'autre part, le courant d'armature de devenir trop intense en cas de mauvais couplage.

(3) Le moteur de lancement est peu utilisé pour les groupes moteurs synchrone-dynamo à cause de l'augmentation qu'il détermine pour l'encombrement déjà grand, de ces derniers. (Il augmente en effet la longueur de ceux-ci de 20 à 25 %). C'est ainsi que sur les 15 sociétés utilisant des groupes « synchrones », qui ont répondu à notre enquête, une seule a employé ce système de démarrage dans ses installations.

(4) Voici exactement comment se répartissent entre les 23 sociétés employant des commutatrices, qui ont répondu au questionnaire, les différents systèmes de démarrage utilisés :

1° Six sociétés emploient normalement le courant continu pour des puissances variables de 250 kw. à 1.000 kw., deux d'entre elles recourent en cas d'urgence au courant alternatif et deux autres étudient l'application de ce dernier moyen à des machines de 400 kw. et 1.000 kw.

2° Dix-sept sociétés utilisant exclusivement le courant alternatif, se divisent comme suit :

a) Huit sociétés emploient uniquement le démarrage direct en moteur asynchrone sous tension réduite pour des puissances comprises entre 100 kw. et 1.500 kw. et une autre utilise, à la fois, ce dernier système pour des unités de 350 kw. et le moteur de lancement pour une machine de 800 kw.

b) Cinq sociétés font usage exclusif du moteur de lancement pour des puissances de 350 kw. à 1.500 kw.

c) Enfin quatre sociétés emploient le système Rosenberg pour des puissances variant de 500 à 1.500 kw. ; deux d'entre elles utilisent en même temps le démarrage direct du côté alternatif, mais en manifestant nettement leur préférence pour le premier système.

de permettre un coupage plus rapide puisqu'il supprime la nécessité d'une synchronisation préalable. Il offre cependant l'inconvénient (comme la commutatrice démarre en moteur d'induction), d'exiger un courant dévatté assez considérable qui, se superposant au courant en service, à chaque changement de machine peut, dans certains cas (mauvaise régulation du voltage à l'usine ou ligne à forte chute de tension), provoquer des perturbations dans le fonctionnement des autres récepteurs du réseau (1). C'est pour atténuer cet à-coup qu'il est d'usage constant de n'appliquer tout d'abord que la moitié ou le tiers de la tension de service, une résistance étant même parfois intercalée entre la machine et le transformateur. Pour des puissances de l'ordre de 800 kw. et au-dessus, on applique de préférence la tension par trois degrés successifs : 1/3, 2/3 et 3/3 de sa valeur normale. Au lieu d'utiliser un transformateur spécial de démarrage, on prévoit plus simplement tous les transformateurs avec les bornes supplémentaires nécessaires à la réalisation de ces différentes tensions, et la liaison de chacun d'eux à la commutatrice correspondante est effectuée soit au moyen d'un inverseur à commande par levier, soit par l'intermédiaire d'un contrôleur à bain d'huile.

Accessoirement, on peut encore reprocher au système considéré les petits inconvénients suivants :

1° Le circuit d'excitation doit être sectionné en autant de parties qu'il y a de pôles ou de paires de pôles, pour éviter les surlensions dangereuses quand les inducteurs sont coupés. Cette dernière disposition est toutefois maintenant de plus en plus abandonnée, le démarrage des commutatrices modernes s'effectuant presque toujours avec les inducteurs en circuit.

2° Des étincelles se produisent, au départ, sous les balais, par suite des courants induits par le champ tournant dans les sections court-circuitées ; ces crachements pourraient être évités en relevant les balais, mais on préfère renoncer à cette complication, les dites étincelles n'ayant pas en général, de l'avis des exploitants, d'effet nuisible sensible sur le collecteur.

3° La polarité, après accrochage, est quelquefois inversée ; d'où pour la rétablir, quelques tâtonnements qui ne sont pas cependant de longue durée.

Le temps nécessaire pour coupler une commutatrice, par ce procédé varie généralement de 1' à 3' pour des puissances de 100 à 1.500 kilowatts et peut atteindre au maximum 4' à 5', quand la polarité n'est pas dans le bon sens.

Une autre méthode dont l'usage se trouve particulièrement répandu en Angleterre (système Rosenberg) (2), consiste à démarrer la commutatrice au moyen d'un moteur asynchrone dont l'enroulement du stator est mis en série avec l'induit de celle-ci, entre les bagues et le transformateur. Dès que la machine arrive à la vitesse voulue, elle entre automatiquement en synchronisme et il n'y a plus qu'à mettre graduellement en court-circuit le stator du moteur.

Cette méthode évite les désavantages du système précédent. Le voltage aux bagues étant très faible au commencement du démarrage, aucun crachement ne se produit au collecteur. Le courant nécessaire, réduit au minimum, ne provoque aucun à-coup ; il peut même être rendu si faible par une disposition appropriée des enroulements du moteur, qu'il ne risque plus de supprimer le magnétisme rémanent

(1) Aucune des réponses reçues ne nous a toutefois signalé rien de particulier à ce sujet.

(2) Ce système (voir brevet français n° 455.664 de la Société Westinghouse) est également applicable au démarrage des groupes moteur synchrone-dynamo.

de la commutatrice (1), de sorte que celle-ci s'excite toujours d'elle-même à la polarité convenable.

D'après les exploitants qui l'utilisent, ce système ne demande pas plus d'une à deux minutes pour démarrer des commutatrices de 800 à 1.500 kilowatts. Il permet donc de réaliser par rapport au précédent, dans les cas défavorables, un gain de temps d'environ 3'. Ce gain justifie la préférence généralement accordée, en Angleterre, à ce procédé, dans les sous-stations d'éclairage (2). Pour les sous-stations de traction, cette économie de temps ne présente pas naturellement une aussi grande importance ; cependant, malgré la complication qu'il entraîne d'un moteur par machine, le système en question a été choisi, pour l'ensemble de ses avantages, dans quelques installations de traction des plus importantes (3). D'une manière générale, l'emploi du dit système se trouve, évidemment, tout particulièrement indiqué lorsqu'il s'agit de démarrer des commutatrices relativement puissantes par rapport aux génératrices qui doivent les alimenter.

CHAPITRE VI

RÉGLAGE, STABILITÉ ET DIVISION DE LA TENSION

Les moteur-générateurs sont naturellement très supérieurs aux commutatrices aux deux premiers points de vue. Ils ont, en effet, le grand avantage de réaliser l'indépendance complète des deux circuits sur lesquels ils travaillent et de soustraire ainsi aux influences du voltage alternatif, le voltage continu qui ne dépend plus alors que de la vitesse (4). Ils permettent de plus, de faire varier graduellement et dans de très larges limites, le voltage continu, soit automatiquement par le compoundage, soit par la manœuvre d'un simple rhéostat d'excitation.

C'est à ces deux qualités dominantes : élasticité et stabilité de la tension, particulièrement précieuses en matière d'éclairage, que les moteur-générateurs doivent certainement le plus grand nombre de leurs applications.

Pour la commutatrice, la tension alternative et la tension continue étant entre elles dans un rapport constant, toute variation de la première affecte la seconde proportionnellement, ce qui est un réel inconvénient quand la tension du réseau primaire ne présente pas une stabilité suffisante (5). On ne peut, d'autre part, faire varier la tension continue qu'en modifiant la tension aux bagues par l'un des artifices plus ou moins compliqués ci-après rappelés :

1° Alimentation de la commutatrice au moyen d'un trans-

(1) En pratique on préfère ne pas pousser si loin la réduction du courant de démarrage afin d'accélérer la mise en vitesse. On maintient alors la polarité voulue par le moyen suivant : l'enroulement inducteur de la commutatrice étant muni d'un inverseur on met la machine en marche avec cet enroulement inversé ; (on empêche ainsi l'armature de développer un voltage élevé pendant la période de démarrage). La vitesse s'élève presque jusqu'au synchronisme et un voltmètre relié aux balais à courant continu ou bien un ampèremètre monté dans le circuit d'excitation indiquent une inversion chaque fois que l'armature passe au pôle. On attend que cette inversion se produise à des intervalles suffisamment longs et, lorsque l'armature à la polarité convenable, on amène l'interrupteur d'excitation à la position voulue ; la commutatrice s'excite immédiatement et reste en synchronisme (voir brevet ci-dessus).

(2) Centrales électriques des Villes de Glasgow et de Manchester.

(3) Tramways municipaux de Glasgow ; Tramways municipaux de West-Ham.

(4) Condition favorable à la fixité de ce voltage, car les variations de fréquences sont toujours, évidemment, d'un ordre de grandeur très inférieur à celui des variations de tension.

(5) La commutatrice se comporte, d'autre part, beaucoup mieux que le moteur générateur en cas de pénurie de vapeur à l'usine centrale, car sa tension reste fixe, malgré la diminution de la périodicité, si la tension des alternateurs est maintenue constante.

formateur à rapport de transformation variable, par l'intermédiaire d'un commutateur rotatif susceptible d'être manœuvré pendant la marche.

2° Insertion d'une réactance dans le circuit d'alimentation de la commutatrice ;

3° Mise en série avec la commutatrice d'un petit alternateur calé sur le même arbre et dont on règle à volonté le sens et la valeur du courant d'excitation.

4° Insertion dans le circuit alternatif d'un régulateur d'induction, transformateur spécial dont le secondaire mobile permet de faire varier le taux de transformation. (Un tel régulateur est ordinairement commandé du tableau au moyen d'un servo-moteur).

Le premier procédé, un peu terre à terre, n'a guère été utilisé qu'à l'origine de l'emploi des commutatrices. Il est aujourd'hui totalement abandonné à cause de son défaut de continuité et de la complication entraînée par le câblage et le contrôler qu'il exige.

Le second moyen est le plus généralement employé dans les sous-stations de traction parce qu'il permet, en munissant les pôles d'un inducteur série, de faire varier automatiquement la tension avec la charge de manière à rendre la machine compound ou hypercompound.

Son application se trouve toutefois pratiquement limitée aux cas où le surcompoundage nécessaire n'excède pas + 5 %. Le surcompoundage ainsi réalisé résulte, en effet, du produit de la réactance par le courant déwatté. Or, si la réactance, au-delà d'une certaine limite, nuit à la stabilité de fonctionnement, les courants déwattés d'autre part affaiblissent le facteur de puissance et augmentent l'échauffement. Réactance et enroulement série doivent donc être très bien proportionnés. Pour une variation totale de tension de 10 %, on ne s'écarte guère en général d'une réactance d'environ 15 % dans le circuit. Celle-ci peut être obtenue dans les transformateurs eux-mêmes, en superposant alternativement les bobines à haute et basse tension. Mais cette disposition n'est pas aussi favorable à la réalisation d'un parfait isolement entre les deux enroulements primaire et secondaire du transformateur que celle qui consiste à séparer complètement ces derniers et à les placer concentriquement l'un à l'autre ; c'est pourquoi les exploitants préfèrent, en général, employer des selfs additionnelles.

Le système considéré a cet inconvénient que les courants déwattés dont il nécessite la production ont une répercussion sur la tension de tous les autres récepteurs du réseau. On peut aussi lui reprocher de compliquer un peu l'installation, d'entraîner un sensible accroissement de dépense (1) et de réduire de 1/2 à 1 % environ le rendement global à pleine charge. Il rend, d'autre part, plus délicate à réaliser l'égalité répartition des charges entre commutatrices en parallèle, et favorise quelquefois la production de phénomènes d'oscillations de flux par suite de la paresse d'une ou plusieurs machines à répondre aux variations de l'excitation (2). Aucun de ces deux derniers inconvénients toutefois, ne nous a été signalé dans les réponses que nous avons reçues.

(1) D'après le constructeur B, le prix d'une commutatrice compound avec self (pour une variation de tension maximum de 5 %) excéderait le prix de la commutatrice shunt de même puissance de 15 % à 7 % pour des puissances comprises entre 250 et 1 500 kw. (La majoration de prix due à la commutatrice elle-même intervenant dans ces valeurs respectivement pour 5 % et 2,5 %).

(2) Les inducteurs étant en acier massif, le flux ne peut varier brusquement et il peut y avoir, de ce fait, un décalage de temps sensible entre la variation de voltage et la variation de charge qui lui donne naissance ; si la machine est compound le résultat est plus satisfaisant car la tendance naturelle des pôles massifs est de maintenir le flux et la tension constants

Cependant, comme la chute de tension dans une commutatrice shunt n'a qu'une valeur très faible (τ à 2 %), il est évident qu'il convient, pour les raisons qui précèdent, de préférer ce dernier type de machine toutes les fois que le réseau à desservir est assez compact pour qu'il n'y ait pas lieu de s'inquiéter de compenser les chutes dans les feeders d'alimentation. C'est ainsi que sept sociétés (sur 23), parmi celles qui ont répondu à notre enquête, s'en sont tenues à l'emploi exclusif de commutatrices shunt dans leurs installations.

Le troisième procédé ci-dessus indiqué offre sur le précédent deux avantages : d'une part, il permet d'opérer le réglage de la tension d'une manière plus précise et dans des limites beaucoup plus étendues ; d'autre part, il permet de maintenir le facteur de puissance pratiquement égal à 1 à toutes charges.

C'est pour ces deux raisons et plus particulièrement pour la première, qu'il est surtout employé dans les sous-stations assurant un service mixte (3), les mêmes machines pouvant ainsi alimenter indifféremment soit un réseau de traction à 500 ou 550 volts, soit un réseau d'éclairage à 440 volts. Le même système a été utilisé aussi dans quelques sous-stations de traction (4) où l'on a voulu conserver un $\cos \varphi$ très voisin de l'unité, malgré de fortes variations de tension du côté continu ou du côté alternatif.

Il ne semble pas qu'il y ait de différence sensible entre ce système et le précédent au point de vue de l'abaissement du rendement global, à survoltage égal. Quant à la dépense supplémentaire nécessitée, il paraît résulter des renseignements reçus, qu'elle est en général un peu supérieure à celle qui correspond au système précédent.

On peut reprocher d'autre part au système considéré :

a) de n'être pas toujours aisément applicable, l'alternateur devant avoir le même nombre de pôles que la commutatrice ; b) de nuire à l'accessibilité des enroulements de la commutatrice du côté alternatif ; c) d'obliger cette dernière à produire du travail mécanique, quand la machine additionnelle est sous tension.

Il résulte de ce dernier effet, que les champs d'induit du courant alternatif et du courant continu ne se compensent plus exactement. La zone neutre se déplace ainsi suivant la charge de la petite machine et, malgré l'existence de pôles auxiliaires ordinaires, des étincelles tendent à se produire au collecteur. Ces étincelles ne paraissent pas cependant s'être manifestées dans les installations réalisant des survoltages de ± 5 % à ± 15 %, sur lesquelles nous avons été renseigné. Mais il est bien certain qu'elles ne manqueraient pas de se produire pour des survoltages plus élevés.

On a cherché à obvier à cet inconvénient par différents moyens tendant à donner aux pôles auxiliaires, indépendamment de leur excitation normale proportionnelle au courant débité (et suffisante pour compenser la tension de réactance de la bobine commutée), une seconde excitation proportionnelle à la charge du petit alternateur additionnel ou au champ d'induit résultant de la commutatrice, notamment

(1) Centrale de la Ville de Glasgow (survoltage de ± 6 % ; perte supplémentaire à pleine charge 1 1/2 %).

Centrale de la Ville de Manchester (survoltage de ± 10 %).

Usine d'Electricité et Tramways d'Offenbach (survoltage de ± 15 % et $\pm 7,5$ %).

(2) Tramways municipaux de Leeds (survoltage de ± 5 % ; coût du survolteur rapporté aux prix de la commutatrice de 800 kw. et de son transformateur = 20 % ; réduction du rendement global à pleine charge environ 1/2 %).

Tramways municipaux de West-Ham (survoltage de ± 10 % ; coût relatif du survolteur par rapport au même groupe que ci-dessus = 20 % ; réduction du rendement global à pleine charge, environ 1 1/2 %).

en munissant ces pôles auxiliaires d'un second enroulement alimenté par des balais calés à 90° des balais principaux sur le collecteur de la commutatrice. Mais ces moyens, objet de brevets récents, n'ont pas encore été suffisamment expérimentés pour qu'on ait pu juger de leur valeur pratique.

Le quatrième dispositif de réglage précité permet de faire varier la tension par degrés insensibles dans des limites encore plus étendues que le précédent. Mais la *f. e. m.* du rotor du régulateur peut affecter un décalage de phase quelconque sur le courant d'alimentation, variable entre la mise directe en série et l'opposition. En dehors de ces deux cas extrêmes, cette *f. e. m.* change donc le décalage et on ne peut éviter cet inconvénient qu'en employant un régulateur double.

L'encombrement du dispositif considéré, son prix relativement élevé et la complication qu'il introduit dans l'installation font que son application se trouve à peu près exclusivement limitée aux commutatrices des sous-stations d'éclairage (1).

En dehors des systèmes précédents, qui tous agissent par modification de la tension aux bagues de la commutatrice, on peut naturellement régler aussi la tension de service au moyen d'un survolteur mis en série du côté continu (2). Ce dernier donne lieu aux mêmes observations que le survolteur alternatif au sujet du couple mécanique dont il détermine la production sur l'arbre de la commutatrice. Mais il présente deux autres inconvénients qui font généralement renoncer à son emploi ; il augmente sensiblement les frais d'entretien du groupe par suite du nouveau collecteur qu'il introduit dans celui-ci et il nuit à l'accessibilité du collecteur de la commutatrice, beaucoup plus importante à ménager, évidemment, que celle des bagues à courant alternatif.

Il est à noter cependant que ce système est le seul qui permette d'alimenter plusieurs groupes de fédérés avec des survoltages différents, appropriés aux développements respectifs de ces derniers, au moyen de commutatrices marchant en parallèle sur les mêmes barres.

Enfin, en ce qui concerne le convertisseur en cascade, le réglage de la tension peut être effectué aussi aisément que pour les groupes moteurs-générateurs par variation de l'excitation shunt (1) ou par le moyen d'un enroulement compound. Cette variation de l'excitation entraîne toutefois une modification du décalage du courant alternatif, mais beaucoup plus faible pourtant que celle qui se produit dans les mêmes conditions pour la commutatrice, à cause de la plus grande réactance que présente naturellement le moteur du convertisseur en cascade. Quand ce dernier est à excitation compound, on peut lui donner encore une réactance supplémentaire aux faibles charges, et réduire ainsi considérable-

ment les courants dévattés, même si le facteur de puissance à pleine charge doit être égal à 1, en employant, pour l'enroulement du stator, des encoches complètement fermées. Les ponts de ces encoches étant complètement saturés par le flux de dispersion, au voisinage de la pleine charge, la capacité de surcharge de la machine ne s'en trouve pas affectée.

D'autre part, le convertisseur en cascade partage avec la commutatrice l'inconvénient de l'instabilité de la tension continue provenant du rapport constant qui existe entre celle-ci et la tension alternative pour $\cos \varphi = 1$.

Au point de vue de l'alimentation d'un réseau à trois fils, le convertisseur présente, comme la commutatrice simple, l'avantage de pouvoir réaliser, sans aucune complication, la division de la tension continue. L'induit à courant continu étant déjà connecté à l'enroulement du rotor en étoile, il suffit, en effet, de relier le fil d'équilibre soit aux bagues, par l'intermédiaire d'un commutateur, soit au point neutre du démarreur (la première disposition, qui évite de faire traverser au courant d'équilibre les contacts du démarreur et distrait de plus ce dernier appareil du circuit pendant le fonctionnement, est évidemment la plus recommandable).

La différence des tensions des deux ponts est plus faible avec le convertisseur en cascade, à cause du plus grand nombre de phases du rotor. Cette différence varie généralement de 0,5 % à 1 % de la tension entre conducteurs extrêmes pour un courant d'équilibre de 20 % à 50 % du courant de pleine charge.

CHAPITRE VII

FACTEUR DE PUISSANCE ET RÉACTION SUR LE CIRCUIT ET LES GÉNÉRATRICES

Le groupe moteur synchrone-dynamo, la commutatrice et le convertisseur en cascade ont en commun cet avantage de pouvoir, par une adaptation appropriée de leur excitation, travailler avec un facteur de puissance égal à l'unité. Mais, alors que ce réglage, une fois accompli, se maintient sensiblement à toutes charges pour la commutatrice et le convertisseur en cascade excités en dérivation (1), il doit être établi spécialement pour chaque régime avec le moteur synchrone (2).

Le réglage considéré peut être réalisé à toutes charges, quelle que soit la tension du côté continu, avec le groupe moteur synchrone-dynamo ; par contre, il ne peut être obtenu avec les deux autres machines, si le *voltage continu doit pouvoir être réglé*, que pour une charge déterminée. Ces machines ne peuvent alors maintenir un facteur de puissance sensiblement égal à 1, à toutes charges, que si elles sont munies d'un survolteur (3). Le groupe « synchrone »

(1) Parmi les sociétés ayant répondu au questionnaire, deux d'entre elles seulement ont fait l'application du régulateur d'induction dans les conditions ci-dessous indiquées :

1° Centrale Electrique et tramways de Königsberg régulateur permettant d'utiliser des commutatrices de 1.000 kw. soit à la tension de 550 volts pour le réseau de traction, soit à la tension de 440 volts pour un réseau d'éclairage à 5 fils.

2° Tramways de Munich. Champ de variation de tension réalisé : 650 à 730 volts. Coût du régulateur = 20 % du prix du groupe transformateur de 1.000 kw. Abaissement du rendement global . 0,75 % à 1,5 % respectivement pour les régimes de pleine charge et de quart de charge. Encombrement en plan : 0,75 m (soit un quart de la surface occupée par le transformateur). Hauteur = 2.113 m/m.

(2) Une seule société, la Compagnie des Tramways de Marseille, nous a signalé l'emploi de ce système dans ses installations. Les survoltages réalisés sont de ± 30 , ± 50 et ± 60 volts suivant les sous-stations (Tension de service : 550 volts pour la ville ; 650 volts pour la banlieue).

(3) C'est ainsi qu'à la centrale de la ville de Manchester, notamment, des convertisseurs sont utilisés aussi bien sur un réseau d'éclairage à 450 volts que sur un réseau de traction de 500 à 550 volts.

(1) Les deux fig 19 et 20 ci-dessus, empruntées à une étude de M. H. S. Hallo (Revue Electrique, n° 148, tome XIII), et reproduites ici à titre d'exemple, représentent : l'une, la constance du facteur de puissance d'un convertisseur shunt de 500 kw pour éclairage, et l'autre, la variation des courants dévattés d'un convertisseur hypercompound de même puissance, pour traction, dont le \cos est rendu égal à 1 au régime de 3/4 de charge.

(2) En effet, la commutatrice n'exerçant pas de couple appréciable sur l'arbre, son facteur de puissance est pratiquement indépendant de la charge. Au contraire, pour le moteur synchrone, en raison du couple résistant à vaincre, il existe, pour chaque valeur du flux, une seule valeur de la charge pour laquelle le courant est en phase avec la d.d.p. aux bornes. On ne peut donc maintenir une valeur constante pour le facteur de puissance qu'en réglant continuellement le courant d'excitation. Ce réglage, d'autre part, ne peut être réalisé automatiquement, le moteur synchrone ne se prêtant pas au compoundage.

(3) Ce survolteur, eu égard à sa faible puissance, est évidemment plus facile à construire pour un convertisseur en cascade que pour une commutatrice (à 50 périodes) à cause du moindre nombre de pôles.

est donc, à cet égard, plus souple, mais il ne faut pas cependant s'exagérer cet avantage, car, dans la pratique, on ne peut pas s'astreindre à modifier constamment l'excitation suivant la charge momentanée du groupe (à moins que celle-ci ne soit stabilisée par une batterie-tampon) : de sorte que le facteur de puissance n'est, en réalité, égal à l'unité que pour les conditions moyennes correspondant au réglage établi.

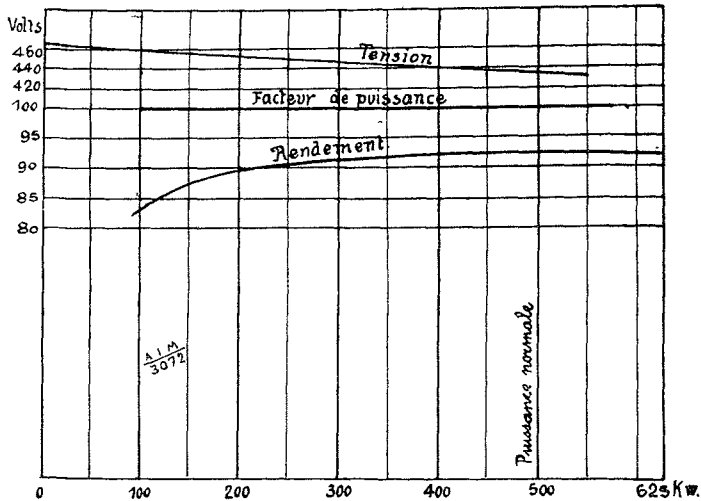


Fig. 19

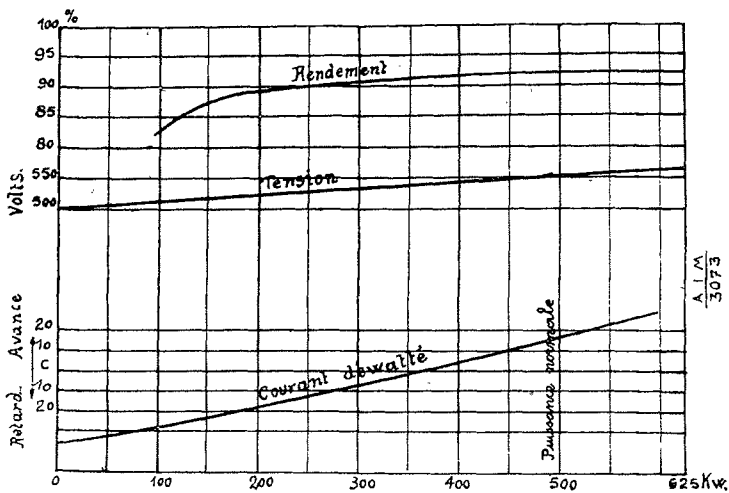


Fig. 20

Dans le même ordre d'idées, les trois groupes ci-dessus permettent encore de régler, par simple variation du champ, le sens et la valeur de la composante déviant du courant absorbé. Cette propriété, dont on ne peut user librement avec la commutatrice (à moins qu'elle ne soit alimentée par un circuit sans réactance sensible), ni surtout avec le convertisseur, à cause de la répercussion des courants décalés sur la tension, rend le groupe moteur synchrone-dynamo particulièrement précieux pour les usages suivants :

1° pour renforcer l'excitation d'alternateurs dont les inducteurs sont un peu trop justes.

2° pour relever le facteur de puissance d'alternateurs alimentant beaucoup de transformateurs ou de moteurs asynchrones à faible charge (1).

(1) Une telle application des groupes moteurs synchrone-dynamo a été faite notamment : 1° à l'usine centrale de la Société d'Electricité et de Tramways de Linz-Urfahr ; 2° à l'usine centrale électrique de Dresde ;

3° pour diminuer et même rendre négative la chute de tension provoquée par la self-induction de la ligne d'alimentation.

Quant au groupe moteur-asynchrone-dynamo, il est évidemment, au point de vue du facteur de puissance, très inférieur à tous les autres systèmes, et c'est là, comme l'on sait, son inconvénient fondamental.

Si le $\cos \varphi$ des gros moteurs d'induction (2) (de l'ordre de 1.000 kw.) peut atteindre au maximum 0.92 à pleine charge et 0.87 à demi-charge, il ne dépasse guère, en général, les valeurs 0.88 et 0.80 pour des moteurs de moins de 500 kw. quand ils sont alimentés directement à haute tension et que leur entrefer ne descend pas au-dessous de 1 1/2 mm.

Le fort courant décalé en arrière absorbé par ces moteurs détermine les fâcheux effets bien connus, rappelés ci-après, qui forment, point par point, la contre-partie des avantages cités plus haut à l'actif du moteur synchrone.

1° Affaiblissement de l'excitation des alternateurs, nuisible à la stabilité de la tension de ces derniers (3), inconvénient surtout important s'il s'agit d'alimenter en même temps un réseau d'éclairage. Une bonne régulation intérieure de la génératrice, obtenue par une excitation puissante et une faible réaction d'induit, est alors d'autant plus nécessaire que les moteurs sont relativement forts par rapport à la génératrice.

2° Diminution du rendement et de la puissance utile des alternateurs ; ces derniers doivent être prévus plus largement, non seulement comme inducteurs, mais aussi comme circuit d'induit, ce qui augmente nécessairement leur prix. (On peut compter qu'à égale puissance à débiter sous $\cos \varphi = 0.85$ ou sous $\cos \varphi = 1$, les premières conditions entraînent une majoration du prix de l'alternateur d'environ 7 à 8 %).

3° Augmentation considérable de la chute en ligne due à la self-induction. Cette raison, jointe à celle d'une plus grande dépense nécessaire pour les conducteurs, suffit à proscrire l'emploi des groupes moteur-asynchrone-dynamo pour les sous-stations situées au bout de longues lignes.

Par contre, le fait que le personnel ne peut avoir aucune action sur le courant absorbé par un moteur asynchrone en régime ni sur la *f. e. m.* du circuit qui l'alimente, peut être considéré dans certains cas particuliers, assez rares il est vrai, comme un avantage du groupe moteur-asynchrone-dynamo.

(A suivre.)

F. SARRAT,

Ingenieur à la C^o G^o de Railways et d'Electricité de Bruxelles.

3° à l'usine centrale des Tramways Municipaux de West-Ham ; la puissance fournie, en courant alternatif pour la traction, par chacune de ces trois usines représentant seulement environ le 1/3 de la puissance absorbée par le réseau d'éclairage et de force motrice correspondant.

De même un groupe moteur synchrone-dynamo de 700 kw. a dû être installé aux Tramways de Zurich pour améliorer le $\cos \varphi$ du réseau, ce dernier se trouvant exclusivement alimenté jusque là par douze groupes asynchrones d'une puissance totale de 3 000 kw.

(2) Pour les gros moteurs, la self induction des conducteurs se trouve en effet réduite par l'emploi d'un nombre plus élevé de rainures par pôles et par phase.

(3) S'il s'agit de groupes de transformation établis dans l'usine centrale même, l'inconvénient signalé présente évidemment beaucoup moins d'importance. Le courant déviant du moteur d'induction varie, en effet, très peu avec la charge ; il ne peut donc provoquer de sérieuse perturbation dans la tension des machines qu'à l'arrêt ou à la mise en marche d'un groupe. Or l'électricien de l'usine, qui a ces groupes sous les yeux ou tout au moins leurs appareils de contrôle, peut effectuer de suite les réglages nécessaires aux panneaux d'excitation des alternateurs.