

coup de bélier les formules suivantes qui ont été données par M. de Sparre :

1° Dans le cas d'une fermeture brusque réduisant la vitesse de régime de  $v_0$  à  $v_1$  :

$$\xi_m = \frac{a}{g} \frac{v_0 - v_1}{1 + \frac{av_1}{2gy_0}}; \tag{12}$$

2° Dans le cas d'une fermeture brusque réduisant la durée T, si  $\frac{av_0}{2gy_0} < 1$ , on a :

$$\xi_m = \frac{2lv_0}{gT} \frac{1}{1 + \frac{av_0}{2gy_0} \left(1 - \frac{2L}{aT}\right)} \tag{13}$$

Si  $\frac{av_0}{2gy_0} > 1$ , on a :

$$\xi_m = \frac{lv_0}{gT} \frac{1}{1 - \frac{v_0L}{2gTy_0}} \tag{14}$$

Ces formules sont très utiles ; on les emploie constamment dans les projets de conduites.

6. Répartition du coup de bélier le long de la conduite. — Cette question est très importante dans la pratique, les ruptures de conduites se produisant parfois dans les parties hautes. Pour calculer les pressions qui se produisent en un point quelconque de la conduite, on peut employer la méthode suivante :

On commence d'abord par déterminer une fonction F (t) définie de la façon suivante :

Soit  $\tau < \Theta$  ; on a :

$$\begin{aligned} \text{époque } \tau, & \quad y_1 - y_0 = \xi_1 = F_1 \\ \text{époque } \tau + \Theta, & \quad y_2 - y_0 = \xi_2 = F_2 - F_1 \\ \text{époque } \tau + 2\Theta, & \quad y_3 - y_0 = \xi_3 = F_3 - F_2 \\ \text{époque } \tau + (k-1)\Theta, & \quad y_k - y_0 = \xi_k = F_k - F_{k-1} \\ \text{d'où : } F_k = & \quad \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_k \end{aligned}$$

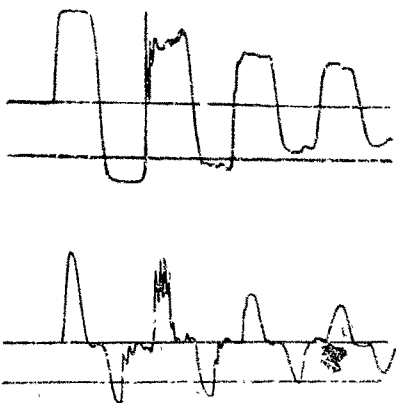


Fig. 4. — Transmission intégrale d'un coup de bélier. En haut, diagramme pris à l'extrémité aval, en bas, diagramme pris au premier tiers amont.

Pour avoir le coup de bélier  $\xi_x$  à une époque t et en un point de la conduite séparé du distributeur par une distance x, on applique la formule :

$$\xi_x = F\left(t - \frac{x}{a}\right) - F\left(t - \frac{2L - x}{a}\right).$$

L'expérience vérifie bien les résultats ainsi obtenus.

*Transmission intégrale.* — Il est facile de voir que, dans une conduite à caractéristique constante que l'on ferme en un temps égal à  $\frac{2L}{n\Theta}$ , le coup de bélier se transmet intégralement jusqu'à un point situé à une distance  $\frac{L}{n}$  de la chambre de mise en charge. La figure 4 montre un exemple de transmission intégrale.

(A suivre.)

C. CAMICHEL,  
Professeur à la Faculté des Sciences,  
Directeur de l'Institut électrotechnique de Toulouse.

D. EYDOUX,  
Ingénieur des Ponts et Chaussées,  
Ingénieur principal à la C<sup>ie</sup> du Midi.

## AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

DES

# DIVERS SYSTÈMES DE TRANSFORMATION

de courant alternatif à haute tension en courant continu

(SUITE)

## CHAPITRE VIII

### MOUVEMENTS PENDULAIRES

Le moteur synchrone et la commutatrice ont une commune tendance aux mouvements pendulaires. Les commutatrices, à cause de leur faible réactance, y sont toutefois plus particulièrement exposées, surtout aux fréquences voisines de 50 périodes.

Le pompage a l'inconvénient, lorsqu'il est trop accentué, de compromettre gravement la stabilité de marche des deux machines ; mais il a de plus, en ce qui concerne la commutatrice, un autre effet particulièrement fâcheux. Par la variation qu'il fait subir au flux transversal qui va de l'induit aux pôles, en passant par les cornes polaires, il provoque un déplacement de la zone neutre d'où peuvent résulter des étincelles et parfois même des coups de feu.

Des quatre principales causes <sup>(1)</sup> capables de donner nais-

<sup>(1)</sup> La commutatrice est encore sujette à pomper pour deux autres causes qui lui sont particulières.

Si les enroulements des différentes phases de l'induit ne sont pas exactement égaux et ne sont pas placés sur l'armature dans des positions exactement semblables et symétriques les unes par rapport aux autres, la charge ne se répartit pas également sur les différentes phases et la machine a une tendance à balancer. Mais il s'agit là d'un vice qui ne se rencontre plus guère dans les commutatrices actuelles, les constructeurs faisant toujours en sorte, pour obtenir le parfait équilibre des phases, que le nombre de celles-ci divise exactement, non seulement le nombre de lames du collecteur par paire de pôles, mais aussi le nombre de rainures par double pas polaire.

D'autre part, la commutatrice produit du côté continu une tension pulsatoire (de fréquence sextuple de celle du courant d'alimentation pour les machines triphasées et hexaphasées), due à la superposition des chutes ohmiques relatives aux courants continu et alternatif. Quand le circuit d'utilisation est constitué par une batterie d'accumulateurs, la tension pulsatoire représentant une fraction notable de la tension résultante, produit pendant une période de l'armature, plusieurs alternances sensibles de la charge se traduisant par des impulsions positives et négatives qui peuvent occasionner des balancements. Cet effet, toutefois, n'a pas été observé dans les installations sur lesquelles nous avons été documentés

sance aux phénomènes d'oscillation : irrégularité du couple moteur de la machine primaire, pompage du régulateur d'admission, grande fluctuation de charge et variations brusques de la tension aux bornes, la première n'existe évidemment pas pour les turbines. Avec les turbines à vapeur, qui, de plus, assurent la meilleure régulation de la vitesse, les phénomènes envisagés sont, naturellement, beaucoup plus rarement observés qu'avec les autres moteurs. Presque tous les cas de balancement qui nous ont été signalés dans les réponses au questionnaire se rapportent, en effet, à des installations comportant comme moteurs primaires, soit des turbines hydrauliques, soit des machines à vapeur (1) ; aucun de ces cas, toutefois, n'a présenté de réelle gravité, puisqu'il a été possible d'y porter remède par les moyens d'usage.

Il est intéressant de remarquer qu'aucune des réponses reçues n'a fait mention de difficultés spéciales observées avec des commutatrices à 50 périodes, bien que celles-ci aient été utilisées en très grand nombre et pour toutes puissances, entre 200 et 1.500 kilowatts. Ceci montre que, même pour cette périodicité, les commutatrices modernes offrent généralement toute sécurité, au point de vue qui nous occupe, si les groupes électrogènes et le réseau ne présentent rien de particulièrement anormal.

Les effets de balancement sont d'ailleurs, maintenant, de moins en moins observés, même avec les machines à vapeur, grâce aux faibles coefficients d'irrégularité imposés pour ces machines et au grand soin que l'on prend d'éviter que la période propre d'oscillation du rotor du groupe alimenté ne soit multiple de celle du mouvement pendulaire du groupe électrogène. On évite, de plus, les perturbations susceptibles d'être provoquées par le régulateur d'admission au moyen d'un asservissement convenable de ce dernier. Mais le danger dû aux grandes variations rapides du voltage appliqué subsiste pour toute machine dont le circuit magnétique présente un retard d'aimantation qui ne permet pas à son flux de suivre assez vite ces variations de tension ; les amortisseurs électriques sont alors seuls capables de parer à la situation (2).

Ces amortisseurs constituent, d'ailleurs, un moyen général de combattre les mouvements pendulaires qui peuvent

subsister pour une cause quelconque. C'est pourquoi la plupart des commutatrices en sont actuellement pourvues (60 % des installations ayant fait l'objet des réponses que nous avons reçues comportent, en effet, des machines ainsi prévues).

Leur réalisation affecte l'une des trois dispositions bien connues : grilles (3) en bronze noyées dans les pièces polaires, cadres entourant celles-ci ou plaque reliant entre elles les cornes polaires. Le premier dispositif est cependant le plus employé ; dans quelques cas, pour assurer un amortissement plus énergique encore, les barres de cuivre traversant les pièces polaires sont connectées entre elles par un cercle de bronze, de chaque côté des pôles, de manière à former cage d'écureuil (4).

Les moteurs synchrones, d'autre part, ne comportent généralement pas d'amortisseurs. Avec les moteurs enroulés pour de hautes tensions et munis par conséquent d'un petit nombre d'encoches, l'application du dispositif antipendulaire est, en effet, beaucoup plus difficile à réaliser que pour la commutatrice, à cause de la forte dissipation d'énergie que déterminent les courants de Foucault dans les amortisseurs. Ces derniers sont, d'ailleurs, loin d'avoir, pour le moteur synchrone, les mêmes raisons d'utilité que pour la commutatrice, les balancements éventuels de ce moteur n'ayant, en particulier, aucune action sur la commutation de la dynamo qu'il entraîne.

Pour les convertisseurs en cascade, comme il n'y a pas liaison directe entre le réseau et l'induit de la génératrice, les harmoniques du réseau n'ont pas, évidemment, au point de vue des crachements aux balais, les mêmes effets que pour la commutatrice. Cependant, afin d'améliorer leur fonctionnement à cet égard, en étouffant les harmoniques dus aux inégalités de forme des *f. e. m.* des deux induits du rotor, et aussi pour renforcer leur stabilité, ces machines sont, en pratique, presque toujours munies d'amortisseurs. Ces derniers sont constitués, le plus souvent, comme pour les commutatrices, par de fortes grilles en bronze, reliées ou non de pôle à pôle.

Enfin les groupes moteur-asynchrone-dynamo jouissent évidemment d'une immunité complète à l'égard des causes de perturbation ci-dessus envisagées.

A l'inverse du moteur synchrone et de la commutatrice,

#### B. — Moteurs synchrones.

1° Société d'éclairage et de transport de force à Mendoza — (Moteurs primaires : turbines hydrauliques)  $f = 50$ . Balancement dû à la paresse magnétique des inducteurs. Il y a été remédié par l'emploi d'amortisseurs (4 barres par pôle).

2° Société d'électricité de la ville de Prague —  $f = 49$  Phénomène de pompage très net observé à la sous-station surtout quand le câble d'alimentation était peu chargé. Cet effet a été supprimé en intercalant des bobines de réactance spéciales entre les machines.

3° Tramways de Vienne. —  $f = 48$ . Pompage observé pour des groupes installés au bout de longues lignes (12 kilomètres) en câbles souterrains. On a fait disparaître le phénomène en enlevant quelques bobines dans chaque phase du stator.

Dans aucun de ces deux derniers cas, les moteurs ne comportaient d'amortisseurs.

(1) Si le flux magnétique dû au courant alternatif se déplace par rapport au flux émanant des pièces polaires, les amortisseurs deviennent, en effet, le siège de courants parasites intenses qui réduisent l'amplitude des oscillations et forcent la machine à se conformer aux variations extérieures.

(2) On augmente l'efficacité de ces grilles en entaillant les pièces polaires au droit de chacun des trous dans lesquels passent les conducteurs constituant ces grilles.

(3) Les amortisseurs comportant des liaisons de pôle à pôle ne conviennent pas pour les commutatrices munies de pôles de commutation, car les courants induits dans ces amortisseurs par le flux émanant de ces derniers pôles contrarient l'action de ceux-ci.

(1) Voici les différents cas de pompage qui nous ont été renseignés pour des commutatrices et des moteurs synchrones :

##### A. — Commutatrices.

1° Tramways municipaux de Glasgow. — (Moteurs primaires : machines à vapeur).  $f = 25$ . Effets de pompage dus aux variations de vitesse des alternateurs et aux oscillations entre les groupes. Phénomène supprimé par le freinage des régulateurs d'admission.

2° The London County Council. — (Moteurs primaires : machines à vapeur).  $f = 25$ . Balancements auxquels il a été remédié par le renforcement des amortisseurs que comportaient déjà les pièces polaires.

3° Tramways de l'Est-Parisien. — (Moteurs primaires : machines à vapeur).  $f = 25$ . Oscillations se répercutant jusque dans l'usine, corrigées par le placement d'amortisseurs en forme de grille dans les pièces polaires.

4° Tramways de Marseille. —  $f = 25$  Phénomènes de pompage dus à l'irrégularité du couple, observés quand on utilisait les machines à vapeur. Ces effets ont disparu avec l'emploi des turbines hydrauliques.

5° Tramways de Bordeaux — (Moteurs primaires : turbines hydrauliques).  $f = 50$ . Légers balancements, sans inconvénients sensibles, dus à des variations dans la fréquence ; il n'a pas été jugé nécessaire de munir les commutatrices d'amortisseurs.

6° Tramways de Lille. — (Moteurs primaires : turbines à vapeur).  $f = 25$ . Léger pompage se manifestant par des piqûres aux collecteurs et par le noircissement de ces derniers. Le phénomène, observé avec une ancienne turbine à admission saccadée, est devenu beaucoup moins sensible avec une seconde turbine munie d'une régulation à huile ; les commutatrices n'ont pas d'amortisseurs.

le moteur asynchrone tend à absorber, en effet, les irrégularités des ondes non sinusoïdales simples. Il amortit les pulsations de la fréquence et peut, à cet égard, améliorer les conditions de fonctionnement d'un moteur synchrone ou d'une commutatrice en parallèle avec lui, en réduisant les balancements ; de plus, grâce au glissement, le mouvement du moteur est pratiquement indépendant des fluctuations rapides et périodiques de la génératrice.

## CHAPITRE IX

### STABILITÉ DE MARCHE

Les différents groupes de transformation peuvent être classés, à ce point de vue, comme suit par ordre de stabilité croissante : groupe « synchrone », commutatrice simple, convertisseur en cascade, groupe « asynchrone ».

La commutatrice et le moteur synchrone, en raison de leur liaison rigide avec la génératrice, courent en effet le risque de se décrocher, non seulement dans le cas de balancement ci-dessus considéré, mais encore dans les circonstances suivantes

1° Lorsque, par suite d'un accident quelconque, le voltage d'alimentation vient à baisser brusquement ; le risque est alors d'autant plus grand que la machine est plus chargée.

2° Quand la machine vient à subir une surcharge, même instantanée, au-dessus du couple limite.

3° Lorsqu'une trop grande accélération de vitesse de la génératrice survient à un moment où la machine est fortement chargée.

La commutatrice est toutefois supérieure au groupe moteur-synchrone-dynamo relativement aux surcharges considérables qu'elle peut supporter sans risquer de tomber hors phase ; elle peut être assimilée en effet, à un moteur synchrone de self pratiquement nulle et dont l'excitation, par le compoundage, croît automatiquement avec la charge ; d'autre part, à cause de la moindre inertie de son rotor, elle est aussi moins sujette à décrocher que le moteur synchrone du fait d'une brusque augmentation de la fréquence du réseau.

Pour ces raisons, et par suite de l'action énergique des amortisseurs dont elle peut être si facilement pourvue, la commutatrice présente donc, d'une façon générale, une stabilité plus grande que le groupe moteur-synchrone-dynamo.

Cependant, nous ne pouvons pas dire que les réponses que nous avons reçues des diverses sociétés d'exploitation aient fait apparaître, à cet égard, une différence bien sensible entre les deux espèces de machines. Peu nombreux sont, en effet, les décrochages qui nous ont été signalés. La plupart se sont d'ailleurs produits comme conséquence de court-circuits sur le réseau à courant continu. Or, de l'avis exprimé par la généralité des exploitants, de tels décrochages peuvent presque toujours être évités par l'emploi de bons disjoncteurs susceptibles d'un réglage précis, tant du côté continu que du côté alternatif.

Le convertisseur en cascade, d'autre part, possède un couple synchronisant très élevé et la haute stabilité qui en résulte pour son fonctionnement est une des qualités qui ont le plus fait apprécier cette machine par les exploitants qui l'ont utilisée.

Quant au groupe moteur-asynchrone-dynamo, il réalise évidemment, au point de vue envisagé, les conditions les

plus parfaites. Grâce à sa liaison élastique avec la génératrice, il peut supporter, sans s'arrêter, toute surcharge, à moins que celle-ci n'entraîne le déclenchement des appareils de protection ; il obéit aisément aux changements de vitesse de la génératrice et une baisse momentanée du voltage est sans inconvénient. C'est en raison de cette parfaite stabilité de fonctionnement que le groupe moteur-asynchrone-dynamo se trouve tout à fait désigné pour les circuits d'alimentation à voltage et fréquence très variables.

## CHAPITRE X

### COMMUTATION ET CAPACITÉ DE SURCHARGE

Le phénomène de la commutation est maintenant trop bien connu pour que toutes les machines modernes ne se comportent pas, à cet égard, d'une façon satisfaisante. C'est, en effet, ce qui résulte des réponses faites à ce sujet par tous les exploitants.

En l'absence de tout artifice, il est évident que la commutation serait très sensiblement meilleure pour la commutatrice que pour les dynamos ordinaires, par suite de la compensation qui s'établit, dans l'induit de cette machine, entre les flux transversaux dus respectivement aux courants continus et aux courants alternatifs. Mais les dynamos des groupes moteurs-générateurs modernes sont toujours munies de pôles auxiliaires qui leur assurent également, sur ce point, un très bon fonctionnement, tant qu'il ne s'agit pas de surcharges excessives.

Les pôles de commutation sont aussi devenus d'ailleurs d'un emploi général pour les commutatrices à 40 et 50 périodes, pour lesquelles presque tous les constructeurs les jugent indispensables.

Si le flux transversal total est nul pour une commutatrice, il n'en est pas de même, en effet, des champs locaux sur tout le développement du rotor. La répartition de la force magnétomotrice due au courant continu le long du pas polaire, étant de forme triangulaire, tandis que la courbe de la force magnétomotrice due au courant alternatif (1) varie avec la position relative des différentes phases par rapport aux pôles, il s'ensuit que le flux de réaction résultant varie en grandeur et direction avec la position du rotor.

La valeur moyenne du champ local dans le plan de commutation atteint, d'après M. Picou (2) le cinquième de la valeur du champ dû au courant continu, pour une commutatrice hexaphasée ; on conçoit donc qu'il soit absolument nécessaire, pour les commutatrices de fréquence élevée, de compenser au moyen de pôles auxiliaires, un champ réactant aussi considérable. Ces pôles ne peuvent être d'ailleurs, d'une efficacité complète que si la machine est munie d'amortisseurs capables de rendre sensiblement fixe, en valeur et direction, la réaction qu'il s'agit d'équilibrer.

Pour les commutatrices à 25 périodes, la compensation qu'on peut réaliser par certains artifices de construction, l'induit, est suffisante pour assurer un bon fonctionnement tels que l'emploi d'un enroulement à pas fractionné sur du collecteur. C'est pourquoi les pôles auxiliaires sont généralement considérés comme une complication inutile pour cette faible périodicité, et sont, en fait, très peu utilisés.

(1) Cette courbe ne se confond avec une sinusoïde que dans le cas théorique d'une réluctance uniforme et d'un nombre de phases infini.

(2) Voir la communication faite par M. Picou à la Société Internationale des Electriciens dans sa séance du 6 novembre 1913.

La commutatrice possède évidemment, d'autre part, sur les autres machines l'avantage d'une plus grande capacité de surcharge, celle-ci résultant, au point de vue de la commutation, de la compensation magnétique dont il vient d'être question (1), et, au point de vue de l'échauffement de l'induit, de la compensation partielle qui s'établit entre les courants de ce dernier. La charge maximum qu'elle peut supporter ne dépend pas, en outre, du couple mécanique puisqu'il n'y a pas de transmission de puissance du côté alternatif au côté continu, comme dans le groupe moteur-générateur.

Cette supériorité de la commutatrice, relative à sa plus grande élasticité puissancique, se trouve d'ailleurs soulignée dans la plupart des réponses que nous avons reçues des exploitants utilisant cette machine.

Les commutatrices, en raison de leur faible réaction d'induit, ont cependant le défaut d'être beaucoup plus exposées que les autres machines aux court-circuits violents ; ceux-ci peuvent déterminer des coups de feu très préjudiciables au collecteur, et ce danger, qui provient particulièrement de la faible distance entre tiges porte-balais et de la forte tension de la machine et la fréquence du courant alternatif : c'est pourquoi il se manifeste surtout pour les commutatrices à 50 périodes.

Par suite de la dépendance qui existe, pour la commutatrice, entre la vitesse et le nombre de pôles, le développement de l'arc de collecteur correspondant au pas polaire résulte, en effet, directement, pour une fréquence déterminée, de la vitesse périphérique (2). Pour 50 périodes, la longueur de cet arc est donnée, en centimètres, par le même nombre qui exprime la susdite vitesse en mètres par seconde. La vitesse périphérique ne pouvant guère excéder 25 m. p. s., la distance entre lignes de balais consécutives ne peut donc dépasser 25 centimètres. Comme il y a, d'autre part, une limite inférieure pour l'épaisseur d'une lame et de son isolant et qu'on ne peut, sans risquer de compromettre la sécurité, dépasser une certaine valeur pour la *d. d. p.* entre lames, on voit combien la tension susceptible d'être produite par les commutatrices à 50 périodes, se trouve étroitement bornée. C'est ainsi que, de l'avis de plusieurs constructeurs (3), consultés sur ce point, l'application de ces

(1) La valeur des surcharges susceptibles d'être supportées par une dynamo se trouve en effet limitée, à ce point de vue, par les trop grandes dimensions que prennent les pôles auxiliaires nécessaires.

(2) La longueur de cet arc est effectivement donnée par l'expression  $a = \frac{v}{2f}$  où *v* est la vitesse périphérique et *f* la fréquence du courant.

(3) British-Westinghouse (Manchester) Atelier de Constructions Electriques du Nord et de l'Est (Jeumont). Compagnie Schneider (Champagne-s.-Seine).

Ces mêmes constructeurs ont fixé, d'autre part, comme suit les valeurs-limites généralement observées pour chacun des trois éléments ci-dessus considérés :

|                          | v<br>MAX<br>EN M. P. S. | u<br>MAX<br>EN VOLTS | ε<br>MIN.<br>EN MILLIMETRES                   |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|---|
| British Westinghouse.... | 25                      | 15                   | 4,6   |
| Ateliers de Jeumont....  | 25                      | 25                   | 4,6 avec mica de 12/10<br>4 avec mica de 6/10 |
| Cie Schneider.....       | 25 à 30                 | 18                   | 4   |

Si nous rapprochons ces valeurs de celles (voir tableau précédent),

machines doit être, de préférence, limitée, dans l'état actuel de la technique, à des tensions au plus égales à 650 ou 750 volts.

Pour des tensions plus élevées, il est donc prudent de choisir entre le groupe moteur-générateur et le convertisseur en cascade (1). Ce dernier, qui se trouve alors placé dans les conditions les plus favorables à son application, apparaîtra dans la plupart des cas, pour les raisons précédemment énoncées, comme le groupe de transformation le plus avantageux, pourvu toutefois que la tension continue soit inférieure à 1.500 volts et que la répercussion sur cette dernière tension, des variations affectant la tension alternative ne présente pas de réel inconvénient.

| COMMUTATRICES A 50 PÉRIODES |                             |          |         |                          |                       |  |  |                               |
|-----------------------------|-----------------------------|----------|---------|--------------------------|-----------------------|--|--|-------------------------------|
| RÉSEAUX                     | Puissance de l'unité en kw. | t. p. m. | Tension | Diamètre du collecteur d | Nombre total de lames | Vitesse périphérique du collecteur en m. p. s. | Différence de potentiel moyenne entre lames u. | Epaisseur lame + mica en m/m. |
|                             | N                           | E        |         |                          |                       | v  |  | ε                             |
| Dortmund . . . . .          | 200                         | 1500     | 600     | 300                      | 216                   | 23,60  | 11,40  | 4,35                          |
| Leeds . . . . .             | 250                         | 1000     | 575     | 368                      | 360                   | 19,30  | 9,60   | 3,21                          |
| Offenbach . . . . .         | 300                         | 750      | 600     | 650                      | 384                   | 25,40  | 12,50  | 5,32                          |
| Nurnberg . . . . .          | 400                         | 1000     | 625     | 500                      | 324                   | 26,20  | 11,60  | 4,85                          |
| Barcelone . . . . .         | 500                         | 500      | 600     | 840                      | 625                   | 22.—   | 11,50  | 4,22                          |
| Leeds . . . . .             | 800                         | 500      | 575     | 840                      | 480                   | 22.—   | 14,40  | 5,50                          |
| Nürnberg . . . . .          | 800                         | 750      | 625     | 600                      | 384                   | 23,60  | 13.—   | 4,90                          |
| Köingsberg . . . . .        | 1000                        | 500      | 550     | 870                      | 396                   | 22,80  | 16,60  | 6,90                          |
| Valenciennes . . . . .      | 300                         | 750      | 600     | 600                      | 288                   | 23,60  | 16,65  | 6,55                          |

| COMMUTATRICES A 25 PÉRIODES |     |     |     |     |     |       |       |      |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|------|
|                             |     |     |     |     |     |       |       |      |
| Lille . . . . .             | 250 | 750 | 550 | 500 | 264 | 19,60 | 8,34  | 5,95 |
| Leeds . . . . .             | 325 | 500 | 575 | 565 | 480 | 14,70 | 16.—  | 8,20 |
| Est Parisien . . . . .      | 350 | 500 | 580 | 520 | 252 | 13,60 | 13,80 | 6,5  |
| Lille . . . . .             | 400 | 375 | 550 | 750 | 480 | 14,75 | 8,20  | 4,9  |
| Glasgow . . . . .           | 500 | 500 | 550 | 635 | 324 | 16,60 | 10,20 | 6,16 |

(A suivre.)

F. SARRAT,

Ingénieur à la Cie G<sup>le</sup> de Railways et d'Electricité de Bruxelles.

qui nous ont été fournies par quelques exploitants pour les commutatrices à 50 périodes utilisées dans leurs installations, nous voyons que la vitesse périphérique effectivement réalisée est toujours voisine de 25 m.p.s. Par contre la tension moyenne entre lames n'excède pas, dans ces exemples, 16,65 volts et l'épaisseur minimum (lame + mica) est alors voisine de 6 m/m dont 0 m/m 9 environ pour l'isolant. Pour une d.d.p. de 25 volts entre lames, l'épaisseur de mica devrait être portée à 1,20 m/m. et, comme le rapport des épaisseurs cuivre/mica ne doit guère descendre au-dessous de 5, pour permettre à la fois une usure bien égale du collecteur et une construction robuste de ce dernier, il en résulterait pour la valeur :  $0,12 \times 6 = 7 \text{ m/m } 20$ , et, par suite, avec la vitesse linéaire considérée :

$$\frac{250}{7,2} \times 25 = 865 \text{ v.}$$

Cette dernière valeur n'est pas très éloignée de la limite, pratique ci-dessus indiquée. Elle ne constitue pas cependant, ainsi que cela ressort, d'ailleurs, de la nature même des calculs dont elle résulte, une limite absolue. C'est ainsi que deux constructeurs nous ont signalé avoir eu déjà construit, exceptionnellement, des commutatrices à 50 périodes pour des tensions de 1.000 à 1.200 volts ; mais de leur propre aveu, l'emploi normal de telles machines ne doit pas être recommandé à cause de leur fonctionnement très délicat.

(1) Le moteur-générateur permet, en effet, de disposer librement du nombre de pôles de la dynamo et l'angle interpolaire de la génératrice du convertisseur en cascade est, à vitesse égale, à peu près double de celui de la commutatrice,

## TABLEAU XV

Décomposition entre les divers systèmes des puissances installées utilisées par les différentes Sociétés exploitantes :

## I. — Commutatrices.

| 1 <sup>o</sup> TRACTION                            |        |                                      |        | 2 <sup>o</sup> TRACTION ET ECLAIRAGE                    |        |
|--|--------|--------------------------------------|--------|---|--------|
| 25 périodes  |        | 50 périodes                          |        | 50 périodes   |        |
| Sociétés   | KW.    | Sociétés                             | KW.    | Sociétés  | KW.    |
| Tramways Bruxellois . . . . .                      | 11.550 | Tramways de Barcelone . . . . .      | 2.500  | Centrale électrique et Tramways de Königsberg . . . . . | 5.500  |
| Tramways de Glasgow . . . . .                      | 14.200 | Tramways de Munich . . . . .         | 1.000  | Centrale électrique de la ville de Liverpool . . . . .  | 4.500  |
| Tramways de Leeds . . . . .                        | 1.625  | Tramways de West Ham . . . . .       | 800    | Centrale électrique de la ville de Manchester . . . . . | 10.300 |
| Tramways de l'Est Parisien . . . . .               | 2.100  | Tramways de Leeds . . . . .          | 1.300  | Centrale électrique et Tramways d'Offenbach . . . . .   | 1.050  |
| Tramways de Lille . . . . .                        | 4.450  | Tramways de Nurnberg . . . . .       | 4.000  |   |        |
| The London County Council . . . . .                | 12.000 | Tramways de Bordeaux . . . . .       | 2.250  |   |        |
| Tramways de Marseille . . . . .                    | 9.225  | Tramways de Bonn Land . . . . .      | 700    |   |        |
| Tramways de Buda Pest (Dembins-trygasse) . . . . . | 2.500  | Tramways de Tunis . . . . .          | 2.400  |   |        |
| Omnibus de Paris . . . . .                         | 20.000 | Tramways de Dortmund . . . . .       | 800    |   |        |
|  |        | Tramways de Kôsin . . . . .          | 200    |   |        |
|  |        | Chemin de fer de Kattowitz . . . . . | 775    |   |        |
|  | 77.650 |                                      | 16.725 |   | 21.350 |

## II. — Groupes Moteur « Synchron-dynamo ».

|                                     |       |   |        |  |        |
|-------------------------------------|-------|---|--------|--|--------|
| The London County Council . . . . . | 9.100 | Tramways de Cologne . . . . .               | 5.400  | Chemin de fer Hessois (Darmstadt) . . . . .                | 1.800  |
|                                     |       | Tramways de Mannheim . . . . .              | 1.250  | Centrale électrique de Dresde . . . . .                    | 4.000  |
|                                     |       | Tramways de Munich . . . . .                | 4.150  | Tramways et Société d'Electricité de Linz-Urfahr . . . . . | 700    |
|                                     |       | Tramways de Zurich . . . . .                | 700    | Centrale de la ville de Manchester . . . . .               | 15.480 |
|                                     |       | Tramways de West Ham . . . . .              | 1.000  | Société électrique et transport force (Mendoza) . . . . .  | 890    |
|                                     |       | Tramways de la ville de Prague . . . . .    | 1.710  | Centrale électrique et Tramways d'Offenbach . . . . .      | 750    |
|                                     |       | Tramways électriques de Buda Pest . . . . . | 6.950  | Centrale électrique et Tramways de Vienne . . . . .        | 38.650 |
|                                     | 9.100 |   | 21.160 |  | 62.270 |

## III. — Groupes Moteur « Asynchrone-dynamo ».

|  |        |   |        |  |        |
|--|--------|---|--------|--|--------|
| The London County Council . . . . .          | 29.000 | Tramways de Buda Pest (Palfygasse) . . . . .      | 6.100  | Centrale électrique de Dresde . . . . .      | 250    |
| Tramways de Buda Pest (Palfygasse) . . . . . | 6.100  | Chemin de fer du Tatra (Palfygasse) . . . . .     | 200    | Centrale de la ville de Liverpool . . . . .  | 21.700 |
|  |        | Chemin de fer Montreux Oberland Bernois . . . . . | 2.520  | Centrale de la ville de Manchester . . . . . | 2.000  |
|  |        | Tramways de Zurich . . . . .                      | 3.000  | Tramways électriques de Saint-Gall . . . . . | 500    |
|  |        | Tramways de Cologne . . . . .                     | 250    |  |        |
|  | 35.100 |   | 12.070 |  | 24.450 |

## IV. — Commutatrices en cascade.

|  |  |   |       |   |        |
|--|--|---|-------|---|--------|
|  |  | Tramways de Munich . . . . .                        | 5.400 | Centrale électrique de la ville de Manchester . . . . . | 11.600 |
|  |  | Tramways de Tientzin . . . . .                      | 900   |   |        |
|  |  | Centrale électrique de la ville de Prague . . . . . | 3.650 |   |        |
|  |  |   | 9.950 |   | 11.600 |

3<sup>o</sup> ECLAIRAGE ET FORCE MOTRICE

| Sociétés  | Commutatrices      | Groupes « Asynchrones » | Convertis en cascade |
|---|--------------------|-------------------------|----------------------|
| Centrale électrique de la ville de Glasgow . . . . .    | $f = 25$<br>15.500 | 24.500                  | 1.000                |
| Centrale électrique de la ville de Manchester . . . . . | $f = 50$<br>4.650  | 2.560                   | 11.050               |



TABLEAU (XVI) a). — Résumé des réponses reçues concernant

| RÉSEAUX   | USINE GÉNÉRATRICE   |  |                                   |             | Services réalisés  | Fréquence   | Haute tension alternative — volts   | Tension continue — volts | Conditions d'exploitation moyennes sous 1 <sup>o</sup> |                  |       |
|---|---|--|-----------------------------------|-------------|--|-------------|-------------------------------------|--------------------------|--|------------------|-------|
|   | Puissance totale installée KW   | Services réalisés  | Variation de fréquence en service | Cos φ moyen |  |             |                                     |                          | Régime   | Rendement global | Cos φ |
|   |   |  |                                   |             |  |             |                                     |                          |  |                  |       |
| Les Tramways Bruxellois                         | <sup>(1)</sup> MV { 4 × 1250<br>1 × 1500<br><sup>(1)</sup> TV = 1 × 4000<br>Σ = 10.500  | Traction excl <sup>t</sup><br>P moy. { 7500 à 8000 Kw<br>P max. { 9000 à 9500 Kw | »                                 | 0,99        | Traction excl <sup>t</sup>   | 6200 à 6500 | 550 à 600                           | 0,82                     | 0,90   | »                |       |
|   |   |  |                                   |             |  |             |                                     | 0,91                     |  |                  |       |
| Tramways électriques de Lille et de sa Banlieue | MV { 2 × 1000<br>1 × 500<br>TV { 2 × 1500<br>1 × 3500<br>Σ = 9000   | Traction excl <sup>t</sup><br>P moy. = 1800 Kw                                   | 2 %                               | 0,99        | Traction excl <sup>t</sup>   | 5300        | 550 à 575                           | 0,66                     | 0,885  | 0,99             |       |
|   |   |  |                                   |             |  |             |                                     | 1/4 0,92<br>2/4 0,885    |  |                  |       |
| Tramways de l'Est Parisien                      | MV = 8 × 800<br>Σ = 6400  | Traction excl <sup>t</sup><br>Les variations de charge atteignent 30 % en 25".   | 1 %                               | 0,75 à 0,78 | Traction excl <sup>t</sup>   | 5250        | 580                                 | 0,60                     | 6,82   | 0,97             |       |
|   |   |  |                                   |             |  |             |                                     | 1/4 0,88                 |  |                  |       |
| Tramways de Marseille                           | Usines hydrauliques de la Société L'Energie Electrique du Littoral Méditerranéen<br>Usine à vapeur de secours :<br>MV = 5 × 1000<br>TV = 1 × 1000<br>Σ = 6000 | »  | négligeable                       | »           | Traction excl <sup>t</sup><br>P moy. { 4500 à 6000<br>Variations de charge peu importantes | 5500 ± 5 %  | Ville : 550<br>Banlieue : 600 à 650 | »                        | »  | 0,95             |       |
| Tramways municipaux de Glasgow                  | MV { 3 × 2500<br>2 × 600<br>TV { 2 × 5000<br>1 × 3000<br>Σ = 21700  | Fraction 8/9<br>Force motrice 1/9  | 1 %                               | 0,97        | Fraction excl <sup>t</sup>   | 6400 à 6600 | 500 à 550                           | 0,75                     | 0,915  | 1                |       |
|   |   |  |                                   |             |  |             |                                     | 1/4 0,926<br>2/4 0,897   |  |                  |       |

(1) Les abréviations MV, TV et TH sont employées respectivement pour « Machines à vapeur », « Turbines à vapeur » et « Turbines hydrauliques ».

(2) C'est à tort que la Société des Tramways de Marseille a désigné cette machine sous le nom de survolteur Pirani dans sa réponse.

Le survolteur différentiel à trois enroulements (shunt, série-machines et série-batterie ou série-feeders), a été imaginé, en effet, à la fois et tout à fait indépendamment par M. J. B. Entz en Amérique et par moi en Europe, ainsi que je l'ai établi, il y a onze ans, en donnant la théorie complète du fonctionnement de cette machine dans le fascicule 3-4 (1904) du Bulletin de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Institut Montefiore et dans le n° 2 de la *Revue Electrique* de cette même année.

## les Sous Stations de Commutatrices à 25 périodes

## SOUS-STATIONS DE TRANSFORMATION

| Nature et Puissance (en Kw)<br>des<br>Groupes de Transformation installés  | Puissance<br>totale<br>par réseau<br>Kw | I. Observations relatives à la justification des systèmes employés.<br>II. Observations diverses.  |
|--|---|--|
| Commutatrices hexaphasées compound<br>(1903)<br>$4 \times 550 + 2 \times 1100 + 7 \times 550$<br>$+ 6 \times 550 = \dots \dots \dots$  | 11.550                                  | I. A l'époque de l'installation des sous-stations, on n'avait le choix qu'entre les commutatrices et les moteurs-dynamos. Les moteurs à haute tension ne se construisaient pas encore avec sécurité. Les commutatrices ont été choisies à cause de leur meilleur rendement et de leur moindre encombrement. Pour une nouvelle sous-station en construction, les convertisseurs rotatifs en cascade ont été préférés en raison de leur faible encombrement, de l'absence de transformateurs statiques, de la simplicité des manœuvres et de la grande élasticité de ces groupes.<br>II. Démarrage du côté continu : à la mise en service par un groupe moteur asynchrone-dynamo ; en service par le courant des barres.   |
| Commutatrices hexaphasées hypercompound<br>(1900)<br>$3 \times 400 + 13 \times 250 = \dots \dots \dots$<br>(Ni amortisseurs ni pôles auxiliaires).   | 4.450                                   | I. Les commutatrices ont été adoptées à cause de leur rendement élevé et de leur grande capacité de surcharge.<br>II. Démarrage du côté continu comme ci-dessus. (Voir tabl. XIV)<br>A excitation shunt constante et pour une tension alternative fixe, la tension continue ne varie guère avec la charge, de plus de 2 % ; $I \cdot \cos \varphi$ varie de 0,98 à 1 (décalage en AV et en AR).<br>Des renouvellements de bagues ont été rendus nécessaires, soit par suite d'usure de ces bagues, soit par suite de ruptures de leurs isolants, au bout de 60.000 à 80.000 heures de service.<br>Accidents survenus : Légères avaries aux colerettes des collecteurs ; avaries d'induits vraisemblablement produites par des court-circuits extérieurs ; un éclatement de machine provoqué par l'emballlement.  |
| Commutatrices triphasées compound<br>(1901)<br>$6 \times 350 = \dots \dots \dots$<br>(Amortisseurs : 4 barres de 17 m/m de diamètre par pôle).   | 2.100                                   | I. Néant.<br>II. Démarrage par moteur de lancement. (Voir tabl. XIV).<br>Accidents survenus : Inversions de polarité ; arcs au collecteur en cas de court-circuits ; court-circuit dans un induit par mise à la masse d'une section.<br>Les bagues collectrices de quelques machines ont dû être remplacés au bout de 12 ans. (Heures de marche par an, environ 3600).<br>A excitation shunt constante et pour une tension alternative fixe, la tension continue varie avec la charge de 575 à 585 volts   |
| Commutatrices shunt, avec ou sans survolteur en bout d'arbre, du côté continu, et commutatrices compound.<br><br>La majorité de ces machines a été installée en 1899.<br>$5 \times 225 + 7 \times 300 + 13 \times 400$<br>$+ 1 \times 800 = \dots \dots \dots$<br>(Amortisseurs : barres traversant les pièces polaires. Pas de pôles auxiliaires) | 9.225                                   | I. Raisons du choix des commutatrices : robustesse et facilité de surcharge.<br>II. Démarrage du côté alternatif avec la demi tension ; système choisi à cause de sa commodité et de sa rapidité, bien qu'il ait pour inconvénients : l'ébranlement des transformateurs, l'échauffement des inducteurs et le risque d'inversion de leur polarité.<br>Accidents survenus : 1° Inversions de polarité dues à une forte surcharge du côté continu ou à une baisse importante de tension du côté alternatif. 2° Décrochages très rares dus aux variations de charge ; on les a évités en munissant les machines d'amortisseurs. 3° Un cas d'emballlement.<br>Les survolteurs en bout d'arbre, du côté continu, produisent suivant les sous-stations : $\pm 30$ V ; $\pm 50$ V ; et $\pm 60$ V.<br>Toutes les commutatrices travaillent en parallèle avec une batterie-tampon. Pour les commutatrices compound ce fonctionnement a été rendu possible par l'emploi d'un survolteur différentiel du système « Pirani » (?) comportant deux enroulements série et un enroulement en dérivation  |
| Commutatrices hypercompound<br>26 triphasées dont 24 installées en 1900<br>2 hexaphasées installées en 1908<br>$26 \times 500 + 2 \times 600 = \dots \dots \dots$<br>(Amortisseurs : cadre en laiton autour des pièces polaires. Pas de pôles auxiliaires).  | 14.200                                  | I. Néant.<br>II. Démarrage par le système Rosenberg préféré au démarrage en moteur asynchrone (Voir tabl. XIV).<br>Les commutatrices ont été utilisées accidentellement en parallèle avec les groupes moteurs-générateurs et les convertisseurs en cascade du Dépt d'Electricité de la Ville de Glasgow, sans aucune disposition spéciale. Elles ont aussi été employées à rebours pour la production de courant alternatif sans autre inconvénient qu'une légère variation de la fréquence de ce courant.<br>Accidents observés : 1° Court-circuits intenses déterminant habituellement l'inversion de la polarité et parfois un « flash-over » entre balais (l'exploitant préconise pour réduire au minimum l'intensité de ces « flash-over », de placer en permanence une résistance en parallèle avec l'excitation série). 2° Quelques décrochages occasionnés par des variations brusques de la tension d'alimentation.<br>Certaines machines n'ont demandé aucune réparation depuis leur premier établissement ; d'autres ont exigé le rebobinage de l'induit (£ 50 à £ 60 par groupe) au bout de 5, 7, 9, 10 et 12 années de service (durée annuelle de fonctionnement = 3.640 heures).<br>L'hypercompoundage des machines est tel que la tension monte de 50 volts entre zéro et plein charge. |

La « Société Alsacienne de Constructions mécaniques », qui avait été chargée par moi en 1902 d'exécuter, sur mes propres et uniques données, le premier survolteur de ce système pour la sous-station des « Tramways Nord-Parisiens » à Saint-Ouen, (où des commutatrices devaient pouvoir travailler en parallèle avec une batterie-tampon, malgré de fortes variations de la tension alternative), fit ensuite l'application de cette même machine aux « Tramways de Marseille », après avoir reconnu la grande efficacité de son fonctionnement dans la sous-station précitée. Ce sont ces circonstances qui ont provoqué, sans doute, la confusion que je viens de rectifier.

TABLEAU (XVI) — a). Résumé des Réponses reçues concernant

| RÉSEAUX                             | USINE GÉNÉRATRICE  |  |                                   |                   | Services réalisés | Fréquence   | Haute tension alternative — volts      | Tension continue — volts                 | Conditions d'exploitation moyennes sous 1° |                  |       |
|-------------------------------------|--|--|-----------------------------------|-------------------|-------------------|---|--|--|--|------------------|-------|
|                                     | Puissance totale installée KW  | Services réalisés  | Variation de fréquence en service | Cos φ moyen       |                   |   |  |  | Régime                                     | Rendement global | Cos φ |
|                                     |  |  |                                   |                   |                   |   |  |  |  |                  |       |
| <b>Tramways municipaux de Leeds</b> | TV = 2 × 1000<br><br>Σ = 2.000                                       | Tractism exclt<br><br>P moy = 500 Kw<br><br>La charge varie de 300 à 1200 Kw | 3 0/0                             | 0,80<br>à<br>0,97 | Traction exclt    | 6.300<br>à<br>6.700   | 550<br>à<br>575                        | 0,85                                     | 0,90                                       | 0,99             |       |
|                                     |  |  |                                   |                   |                   |   |  | Groupe de 250 Kw                         |  |                  |       |
|                                     |  |  |                                   |                   |                   |   |  | 4/4                                      | 0,924                                      | 1                |       |
|                                     |  |  |                                   |                   |                   |   |  | 2/4                                      | 0,891                                      | »                |       |
|                                     |  |  |                                   |                   |                   |   |  | Groupe de 325 Kw                         |  |                  |       |
|                                     |  |  |                                   |                   |                   |   |  | 4/4                                      | 0,932                                      | 1                |       |
| 2/4                                 | 0,906  | »  |                                   |                   |                   |   |  |  |  |                  |       |
| Groupe de 800 Kw                    |  |  |                                   |                   |                   |   |  |  |  |                  |       |
| 2/4                                 | 0,947  | 1  |                                   |                   |                   |   |  |  |  |                  |       |
| 4/4                                 | 0,924  | »  |                                   |                   |                   |   |  |  |  |                  |       |
| <b>Omnibus de Paris</b>             | Energie fournie par diverses usines n'appartenant pas à la Compagnie | »  | 15 0/0                            | »                 | Traction [exclt   | 9.700<br>à<br>13 100 ± 5 0/0<br>9 jeux de bornes de réglage sur la HT pour obtenir sur la BT neuf tensions échelonnées entre 403 et 481 volts | 600<br>avec écarts de l'ordre de 2 0/0 | Pour une sous-station type de 3 × 750 Kw |  |                  |       |
|                                     |  |  |                                   |                   |                   |   |  | 0,935                                    | 0,89                                       | 0,95             |       |
|                                     |  |  |                                   |                   |                   |   |  | Groupe de 1000 Kw                        |  |                  |       |
|                                     |  |  |                                   |                   |                   |   |  | 4/4                                      | 0,935                                      | 1                |       |
|                                     |  |  |                                   |                   |                   |   |  | 2/4                                      | 0,913                                      | »                |       |
|                                     |  |  |                                   |                   |                   |   |  | Groupe de 750 Kw                         |  |                  |       |
| 4/4                                 | 0,9185   | 1  |                                   |                   |                   |   |  |  |  |                  |       |
| 2/4                                 | 0,9005   | »  |                                   |                   |                   |   |  |  |  |                  |       |
| Groupe de 500 Kw                    |  |  |                                   |                   |                   |   |  |  |  |                  |       |
| 4/4                                 | 0,91   | 1  |                                   |                   |                   |   |  |  |  |                  |       |
| 2/4                                 | 0,907  | »  |                                   |                   |                   |   |  |  |  |                  |       |

TABLEAU (XVI) b). — Résumé des réponses reçues concernant

|  |  |   |  |                   |   |                       |     |                  |              |          |
|--|--|---|--|-------------------|---|-----------------------|-----|------------------|--------------|----------|
| <b>Tramways de Barcelone</b>                       | TV = 2 × 1600<br>Σ = 3.200   | Traction exclt<br>Kw<br>P moy = 1200  | négligeable                            | »                 | Traction exclt  | 5.960                 | 600 | 0,60             | 0,91         | »        |
| <b>Tramways électriques et Omnibus de Bordeaux</b> | Usine de Tuilières sur la Dordogne de la Société « Energie Electrique du Sud-Ouest »<br>TH = 9 × 1750<br>TV { 2 × 3000<br>1 × 6000<br>Σ = 27.750 | P moy. 10.000 Kw<br>Traction : 2.500 Kw<br>Eclairage : 3.000 Kw<br>Force motrice : 4.500 Kw | 2 0/0 pour variation brusque de 500 Kw | 0,80<br>à<br>0,85 | Traction exclt  | 12.900<br>à<br>13.500 | 600 | 0,72             | 0,85         | 0,98 à 1 |
|  |  |   |  |                   |   |                       |     | 4/4              | 0,9          | 1        |
|  |  |   |  |                   |   |                       |     | 1/2              | 0,82         | »        |
|  |  |   |  |                   |   |                       |     | Groupe de 500 Kw |              |          |
| <b>Tramways de Tunis</b>                           | TV { 1 × 800<br>2 × 1000<br>1 × 1500<br>Σ = 4.300  | Charge moyenne 1/2 Traction et 1/2 Eclairage et Force motrice                               | ± 3 0/0                                | 0,81<br>à<br>0,86 | Traction exclt<br><br>Le courant pour éclairage et force motrice est vendu à HT à une Compagnie de distribution | 10.000 ± 5 0/0        | 600 | »                | 0,85 environ | »        |
|  |  |   |  |                   |   |                       |     | 4/4              | 0,893        | 1        |
|  |  |   |  |                   |   |                       |     | 1/2              | 0,864        | »        |



## les Sous-Stations de Commutatrices à 25 périodes (SUITE).

## SOUS-STATIONS DE TRANSFORMATION

| Nature et Puissance (en Kw)<br>des<br>Groupes de Transformation installés  | Puissance<br>totale<br>par réseau<br>Kw | I. Observations relatives à la justification des systèmes employés.<br>II. Observations diverses.   |
|--|---|---|
| Commutatrices shunt ou compound<br>5 phases à 25 périodes (1903)<br>$5 \times 325 = \dots \dots \dots$<br>3 hexaphasées à 50 périodes (1911)<br>Alimentées par la Centrale d'Eclairage<br>de la Ville.<br>$2 \times 250 + 1 \times 800 = \dots \dots \dots$<br>(Amortisseurs en cage d'écureuil aux<br>machines de 250 et 325 Kw. Quelques ma-<br>chines ont des pôles auxiliaires). | 1.625<br><br><br><br><br><br>1.300      | I. Choix des commutatrices justifié par leur rendement élevé et la sécurité de leur fonctionnement.<br>II. Démarrage par le courant alternatif sous tension réduite (Voir tabl. XIV).<br>Une commutatrice shunt fonctionne en parallèle avec des dynamos compound commandées par des machines à piston à faible vitesse, ces dernières machines supportant ainsi toutes les variations de charge.<br>La commutatrice de 800 kw est munie d'un survolteur à courant alternatif monté sur l'arbre et capable de régler la tension continue de 550 à 600 volts tout, en maintenant le facteur de puissance égale à 1 à toutes charges. (Cette élévation de la tension est nécessaire aux moments de grande charge pour compenser la chute dans les feeders).<br>Accidents survenus : 1° Inversions de polarité consécutives à de forts court-circuits ; 2° flash-over autour du collecteur, entre les porte-balais, à la suite de courts-circuits intenses, quand une machine seule est en service ; quand plusieurs machines sont en marche simultanément, ce dernier phénomène est rarement constaté (La durée annuelle de service d'une machine est de 7 020 heures).   |
| Commutatrices hexaphasées shunt<br>(1911-13)<br>$3 \times 1500 + 10 \times 1000 + 6 \times 750$<br>$+ 2 \times 500 = \dots \dots \dots$<br>(Amortisseurs en cage d'écureuil à toutes<br>les machines. Pôles auxiliaires aux commu-<br>tatrices de 1500 Kw seules).   | 20 000                                  | I. L'adoption des commutatrices est résultée des considérations suivantes :<br>a) L'emplacement restreint réservé aux sous-stations exigeait des groupes de faible encombrement.<br>b) Les commutatrices ont un rendement plus élevé que les moteurs-générateurs et sont d'un prix moindre (l'exploitant évalue à 6 à 7 % du coût des commutatrices l'économie de premier établissement que celles-ci permettent de réaliser par rapport aux moteurs-générateurs.<br>c) Leur entretien mécanique est moins onéreux et leurs pièces de rechange moins nombreuses.<br>d) Leur surveillance et leur manœuvre sont plus simples ; le personnel réduit d'une sous-station peut ainsi visiter entièrement chaque unité pendant l'arrêt journalier et assurer par suite le service avec le maximum de sécurité.<br>II. Démarrage en moteur asynchrone, l'excitation n'étant fermée que lorsque la commutatrice est accrochée. (Voir tabl. XIV). Temps nécessaire pour la mise en charge = 2' 1/3 à 3'.<br>Aucun accident à signaler, sauf un simple décrochage provoqué par une variation excessive de la fréquence et de la haute tension.<br>Toutes les commutatrices sont munies d'un limiteur de vitesse à force centrifuge ouvrant le circuit de la bobine à manque de tension dont le jeu fait fonctionner le disjoncteur à courant continu. |

## les Sous-Stations de Commutatrices à 50 périodes.

|  |       |  |
|--|-------|--|
| Commutatrices (1909)<br>$5 \times 500 \text{ Kw} = \dots \dots \dots$  | 2.500 | I. Néant.<br>II. Démarrage du côté continu préféré (Voir tabl. XIV).<br>Accidents survenus : trois bobines de transformateurs brûlées.   |
| Commutatrices hexaphasées compound<br>sans selfs additionnelles (1906)<br>$3 \times 750 \text{ Kw} = \dots \dots \dots$<br>Pas d'amortisseurs. | 2.250 | I. La sous-station étant bien au centre du réseau et la perte dans les feeders étant peu importante, l'avantage du grand rendement des commutatrices compense l'inconvénient qu'elles présentent de donner au courant continu une tension subordonnée à celle de l'Usine centrale.<br>II. Démarrage en moteur asynchrone à l'aide d'un compensateur. (Voir tabl. XIV).<br>Pas de batterie-tampon.<br>Commutation des machines meilleure à plein régime qu'aux faibles charges.<br>Accidents survenus : Deux coups de feu avec sections brûlées depuis 3 ans 1/2 que la S <sup>s</sup> -station est en service ; quelques décrochages attribués à des variations de la fréquence du primaire, à des sur-tensions et quelquefois à des courts-circuits sur le réseau secondaire. (Pas d'inversions de polarité).<br>A excitation shunt fixe et pour une tension alternative constante, la tension continue varie de 600 à 590 V de zéro à pleine charge.<br>Durée annuelle de fonctionnement d'une machine 4.675 heures.   |
| Commutatrices hexaphasées compound<br>avec pôles auxiliaires (1907)<br>$6 \times 400 = \dots \dots \dots$<br>Pas d'amortisseurs.               | 2.400 | I. Les commutatrices ont été adoptées à cause de leur aptitude à supporter les surcharges et l'économie qu'elles permettent de réaliser sur les frais de premier établissement.<br>II. Démarrage en moteur asynchrone. (Voir tabl. XIV).<br>Les machines travaillent en parallèle avec une batterie-tampon en série, du côté négatif, avec un survolteur différentiel à trois enroulements. (La charge du réseau n'est, en effet, qu'une série de pointes, les trains de 100 tonnes se succédant à 15' d'intervalle).<br>Accidents survenus : Exceptionnellement, décrochages à la suite d'un court-circuit ou d'une forte chute de la tension primaire ; quelquefois inversion de la polarité après un court circuit (rare).<br>Les commutatrices ont été utilisées à rebours pour fournir du courant alternatif sur le réseau d'éclairage pendant l'arrêt des alternateurs, la nuit, lorsque la charge était très faible. Inconvénients observés : difficulté d'obtenir la tension voulue.<br>Il n'a pas encore été remplacé de pièces usagées depuis 5 ans.<br>Durée annuelle de fonctionnement d'une machine : 3.800 heures. |

TABLEAU (XVI) — b) Résumé des Réponses reçues concernant

| RÉSEAUX                                       | USINE GÉNÉRATRICE  |  |                                   |                                      | Services réalisés     | Fréquence | Haute tension alternative — volts | Tension continue — volts | Conditions d'exploitation moyennes sous 10 |  |       |               |       |   |
|---|--|--|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------|--|--|-------|---------------|-------|---|
|   | Puissance totale installée KW  | Services réalisés  | Variation de fréquence en service | Cos φ moyen                          |                       |           |                                   |                          | Régime                                     | Rendement global   | Cos φ |               |       |   |
|   |  |  |                                   |                                      |                       |           |                                   |                          |  |  |       |               |       |   |
| Tramways municipaux de Dortmund               | Energie fournie par la Centrale de la Ville  | »  | »                                 | «                                    | Traction exclt        |           | 10.200 à 10.400                   | 600                      | $\frac{1}{4}$                              | 0,907  | 1     |               |       |   |
| Centrale électrique et Tramways de Königsberg | TV $\left\{ \begin{array}{l} 1 \times 800 \\ 1 \times 4500 \\ 1 \times 2500 \end{array} \right.$<br>$\Sigma = 15\ 000$     | P moy. = 2000<br>$\frac{1}{2}$ Traction<br>$\frac{1}{2}$ Eclairage et force motrice              | négligeable                       | 0,96 const                           | Eclairage et Traction |           | 6.000                             | 550                      | »  | En service régulateur compris 0,85 en moy — à pleine charge 0,93 | «     |               |       |   |
| Tramways de Nürnberg                          | Energie fournie par l'Usine Centrale de Franken à la tension de 200 V  | »  | »                                 | «                                    | Traction exclt        |           | 19 700 à 20.600                   | 625                      | »  | »  | «     |               |       |   |
| Chemin de fer d'intérêt local Kattowitz       | »  | »  | »                                 | »                                    | Traction exclt        |           | 6 000                             | 570                      | »  | »  | »     |               |       |   |
|   |  |  |                                   |                                      |                       |           |                                   |                          |  |  |       | Groupe 800 Kw |       |   |
|   |  |  |                                   |                                      |                       |           |                                   |                          |  |  |       | $\frac{1}{4}$ | 0,94  | 1 |
| Tramways de Köslin et du Littoral             | Centrale de Belgard<br>TV $\left\{ \begin{array}{l} 1 \times 1200 \\ 1 \times 2400 \end{array} \right.$<br>$\Sigma = 3600$ | Charge moyenne 2500 à 3000 dont 100 à 200 pour Traction le reste pour Eclairage et Force motrice | $\mp 2\ 0/0$ au max               | Jour : 0,8 à 1<br>Nuit : 0,30 au max | Traction exclt        |           | 3.150 à 3.300                     | 600 à 630                | $\frac{1}{4}$                              | environ 0,82   | »     |               |       |   |
|   |  |  |                                   |                                      |                       |           |                                   |                          |  |  |       | Groupe 400 Kw |       |   |
|   |  |  |                                   |                                      |                       |           |                                   |                          |  |  |       | $\frac{1}{4}$ | 0,925 | 1 |
| Tramways de Bonn Land                         | Energie fournie par diverses Centrales   | »  | «                                 | »                                    | Traction exclt        |           | 10 500 à 11.500                   | 1000                     | »  | »  | »     |               |       |   |
|   |  |  |                                   |                                      |                       |           |                                   |                          |  |  |       | $\frac{1}{4}$ | 0,913 | 1 |
|   |  |  |                                   |                                      |                       |           |                                   |                          | $\frac{1}{2}$                              | 0,863  | »     |               |       |   |

TABLEAU (XVI) — c) Résumé des réponses reçues concernant les Sous-Stations

|   |   |  |                    |                   |                |    |                 |      |      |               |       |      |               |       |      |
|---|---|--|--------------------|-------------------|----------------|----|-----------------|------|------|---------------|-------|------|---------------|-------|------|
| Chemins de fer d'intérêt local de Buda Pest   | TV = 2 × 1500 Kw  | Charge moyenne Traction : 760 Kw<br>Force motrice : 300 Kw | $\frac{1}{2}\ 0/0$ | 0,89<br>0<br>0,90 | Traction exclt | 42 | 10.200 à 10.400 | 1050 | 0,60 | $\frac{1}{4}$ | 0,83  | 0,86 |               |       |      |
|   |   |  |                    |                   |                |    |                 |      |      |               |       |      | $\frac{1}{2}$ | 0,888 | 0,88 |
|   |   |  |                    |                   |                |    |                 |      |      |               |       |      |               |       |      |
| Chemins de fer électriques du Tatra Buda Pest | TV = 2 × 600 HP<br>MV = 1 × 150 HP<br>$\Sigma \times 1350$ HP | »  | »                  | »                 | Traction exclt | 42 | 3.300           | 1650 | »    | $\frac{1}{4}$ | 0,843 | 0,93 |               |       |      |

## les Sous-Stations de Commutatrices à 50 périodes (SUITE).

## SOUS-STATIONS DE TRANSFORMATION

| Nature et Puissance (en Kw)<br>des<br>Groupes de Transformation installés  | Puissance<br>totale<br>par réseau<br>Kw | I. Observations relatives à la justification des systèmes employés.<br>II. Observations diverses   |
|--|---|--|
| Commutatrices hexaphasées<br>avec amortisseurs (1913)<br>$2 \times 200 + 1 \times 400 = \dots$   | 800                                     | I. Les commutatrices ont été choisies parce qu'elles se prêtent à un démarrage facile du côté alternatif (sous-tension réduite), et parce que la tension primaire d'alimentation se trouve réglée à une valeur bien constante.<br>II. Ni décrochages, ni inversions de polarité n'ont été observés au cours de la demi-année de service que compte la sous-station.<br>La tension peut varier de $\pm 5\%$ , (550 V à 600 V), par le moyen de régulateur de champ, en modifiant $\cos \varphi$ jusqu'à 0,95 AV et AR.<br>A excitation constante et pour une même tension alternative, la tension continue varie de 1 % entre zéro et pleine charge.  |
| Commutatrices hexaphasées shunt<br>avec pôles auxiliaires (1912)<br>$3 \times 1.000 + 1 \times 500 = \dots$  | 5.500                                   | I. Néant.<br>II. Démarrage du côté continu. (Voir tabl. XIV).<br>Les commutatrices servent à alimenter soit un réseau d'éclairage à 5 fils (la division de la tension à $4 \times 110$ volts étant obtenue au moyen d'une batterie d'accumulateurs), soit le réseau de traction : 550 volts en même temps desservi par une batterie-tampon. Les transformateurs statiques comportent deux séries de bornes spéciales pour ces deux services. Un régulateur de potentiel constamment réglé entre chaque transformateur et sa commutatrice permet de régler la tension entre 430-500 volts et 540-640 volts. Aucun accident n'a été observé au cours de l'année de service que compte la sous-station. |
| Commutatrices hexaphasées shunt<br>avec pôles auxiliaires (1912-13)<br>$3 \times 800 + 4 \times 400 = \dots$   | 4.000                                   | I. Raisons du choix des commutatrices : Rendement élevé ; prix et frais d'exploitation réduits ; mise en marche simple.<br>II. Démarrage en moteur asynchrone. (Voir tabl. XIV).<br>Accidents survenus : Au début quelques porte-balais ont été brûlés lors de forts courts circuits. On a évité le retour de cet accident en modifiant les porte-balais ; des cloisons isolantes placées entre le collecteur, les barres collectrices et les parties mises à la terre (paliers) ont aussi constitué une protection efficace.<br>Il n'a été observé ni décrochages ni inversions de polarité depuis la mise en service (1 an).   |
| Commutatrices hexaphasées shunt<br>(1914-12)<br>$1 \times 175$<br>$1 \times 250$<br>$1 \times 350$ } Cette dernière avec pôles auxiliaires<br>et amortisseurs. | 775                                     | I. Néant.<br>II. Démarrage en moteur asynchrone. (Voir tabl. XIV).<br>Il n'est survenu ni décrochages ni inversions de polarité ni aucun accident grave depuis la mise en service (2 ans $\frac{1}{2}$ ).<br>A excitation constante et pour une même tension alternative, la tension continue tombe de 580 à 570 volts de zéro à pleine charge.<br>Durée annuelle de fonctionnement d'une machine : 3.500 à 4.300 heures.  |
| Commutatrices triphasées shunt<br>avec pôles auxiliaires (1913)<br>Pas d'amortisseurs.<br>$2 \times 100 = \dots$   | 200                                     | I. Les commutatrices ont été choisies pour leur rendement élevé, supérieur d'environ 15% à celui des moteurs générateurs, leur meilleure commutation, leur moindre encombrement et leur plus grande accessibilité.<br>II. Démarrage en moteur asynchrone. (Voir tabl. XIV).<br>Les commutatrices travaillent en parallèle avec une batterie tampon munie d'un survolteur Pirani.<br>Rien de particulier n'a été observé dans la marche des machines depuis leur mise en service qui ne remonte qu'à quelques mois.   |
| Commutatrices triphasées shunt<br>avec pôles auxiliaires et amortisseurs (1911)<br>$2 \times 350 = \dots$  | 700                                     | I. Raison du choix des commutatrices : Rendement supérieur à celui des moteurs-générateurs.<br>II. Démarrage par moteur de lancement. (Voir tabl. XIV).<br>Un transformateur de réglage sur le côté triphasé permet de varier la tension jusqu'à concurrence de 10%.<br>Les machines ont été utilisées exceptionnellement pour la production de courant alternatif ; le réglage de la fréquence présentait de grandes difficultés.<br>Aucun décrochage, ni inversion de polarité, ni accident quelconque n'a été observé.  |

## équipées exclusivement au moyen de groupes "moteur asynchrone-dynamos".

|  |       |  |
|--|-------|--|
| Moteur-dynamo shunt à pôles auxiliaires<br>(1910)<br>$3 \times 500 + 2 \times 500 = \dots$   | 2 500 | I. Néant.<br>II. Dans les deux sous-stations les groupes fonctionnent en parallèle avec une batterie-tampon munie d'un survolteur Pirani.<br>Les moteurs comportent des interrupteurs avec résistance de choc pour la mise sous tension progressive, l'alimentation se faisant directement à 10.000 volts. Durée du démarrage et de la mise en charge d'un groupe = 45".<br>Pas d'accident à signaler depuis 2 ans et demi que fonctionne l'installation.<br>Les balais de dynamos n'ont pas encore été changés.   |
| Moteur entraînant deux dynamos shunt à pôles<br>auxiliaires de 110 Kw en série (1914)<br>2 groupes de 220 Kw .....<br>(Excitatrice calée sur l'arbre de chaque<br>groupe). | 440   | I. On a choisi les groupes asynchrones à cause de leur robustesse, de leur facilité de démarrage, de leur souplesse et de leur accessibilité en vue des réparations éventuelles. Il a paru inutile d'installer des groupes asynchrones parce que, dans la suite, le facteur de puissance sera amélioré par l'éclairage dont on installe le réseau et dont le maximum de la charge aura lieu en même temps que celui du service de traction.<br>II. Démarrage par rhéostat liquide. Temps requis pour la mise en service jusqu'à excitation complète : 2".<br>Chaque groupe travaille en parallèle avec une batterie munie d'un survolteur Pirani. Les dynamos comportent un enroulement de contre compoundage destiné à être utilisé seulement en cas d'accident au survolteur.<br>La tension de 3.300 V a été choisie pour pouvoir alimenter au moyen des mêmes transformateurs un réseau de distribution d'énergie desservant plusieurs localités situées dans un rayon de 7 kilomètres. |