

Titre général : L'Électricité à l'exposition de 1902

Auteur : Hospitalier, E.

Titre du volume : L'Électricité à l'Exposition de 1900. 6. Distribution, transmission et transport de l'énergie électrique

Mots-clés : Exposition internationale (1900 ; Paris) ; Électricité -- Distribution

Description : 1 vol. (42 p.) ; 32 cm

Adresse : Paris : Vve Ch. Dunod, 1902

Cote de l'exemplaire : 4 XAE 68.6

URL permanente : <http://cnum.cnam.fr/redir?4XAE68.6>

L'Électricité à l'Exposition de 1900

Publiée avec le concours et sous la direction technique de MM.

E. HOSPITALIER

Rédacteur en chef de *l'Industrie électrique*

J.-A. MONTPELLIER

Rédacteur en chef de *l'Électricien*

AVEC LA COLLABORATION

D'INGÉNIEURS ET D'INDUSTRIELS ELECTRICIENS

6^e FASCICULE

DISTRIBUTION, TRANSMISSION ET TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

PAR

E. HOSPITALIER

PARIS

V^e CH. DUNOD, ÉDITEUR

49, QUAI DES GRANDS AUGUSTINS, 49

TÉLÉPHONE 147-92

1902

L'ÉLECTRICITÉ

A

L'EXPOSITION DE 1900

SIXIÈME PARTIE

II. DISTRIBUTION, TRANSMISSION ET TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Considérations générales. — Le problème de la *distribution* de l'énergie électrique produite dans une usine centrale aux différents *consommateurs* ou *abonnés* comporte des solutions nombreuses et variables avec les circonstances.

Si les consommateurs sont répartis dans un petit rayon autour de l'usine génératrice ; on se contente de réaliser une distribution directe, généralement à courant continu et à potentiel constant.

Si la distance augmente, la distribution est *indirecte* et se complique d'une *transmission* de l'énergie à haute tension et transformation sur place à basse tension. On emploie le plus utilement, dans ce cas, les courants alternatifs simples, en effectuant la transmission à haute tension et la distribution à basse tension, à l'aide de transformateurs convenablement répartis sur le réseau.

Si, enfin, la distance entre l'usine génératrice et les points d'utilisation est très grande, et que les appareils d'utilisation forment des groupes, des agglomérations, on a recours à un véritable *transport*. On utilise dans ce but des courants alternatifs diphasés ou triphasés à haute tension (2 000 à 30 000 volts) ou des courants continus à intensité constante (système Thury). Le transport est caractérisé par ce fait — qui le distingue de la transmission — qu'il comporte toujours une ou plusieurs *sous-stations* dans lesquelles arrive le courant de transport, et où il se transforme pour alimenter un *réseau* à tension plus basse, et dans lequel le courant distribué a une forme souvent différente de celle du courant de transport. On en verra quelques exemples typiques par la suite.

L'ordre logique nous conduit donc à examiner successivement les *Distributions*, les *Transmissions* et les *Transports d'énergie électrique*.

La *Distribution de l'énergie électrique dans l'Exposition* fera l'objet d'un chapitre spécial.

— — — — —

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Généralités. — La distribution de l'énergie électrique, considérée comme système de distribution *directe*, se fait presque exclusivement avec des courants continus et à potentiel constant, ou sensiblement tel.

Le potentiel normal adopté jusqu'à ces dernières années était de 110 volts, permettant d'alimenter des lampes à incandescence de 5 à 100 bougies en dérivation, et des lampes à arc montées par deux et quelquefois par trois en tension entre elles et en dérivation sur le réseau.

Les distributions à *trois fils* fournissent deux fois 110 volts, et les distributions à *cinq fils* fournissent quatre fois 110 volts. Outre l'économie de cuivre qui permet de réaliser la combinaison, on peut utiliser directement la tension de 220 ou de 440 volts pour l'alimentation des moteurs d'une certaine puissance dont le bobinage à 110 volts est difficile et dont la mise en service déséquilibre les ponts. C'est ainsi que tous les moteurs d'ascenseur sont alimentés sur 220 volts ou sur 240 volts, tout en ayant leur excitation shunt à 110 volts en vue de la rendre plus économique de construction.

Par suite des perfectionnements apportés aux lampes à incandescence, on a pu, ces dernières années, les brancher directement sur 220 volts, et les stations centrales récentes sont toutes à trois fils, deux fois 220 volts.

Ce potentiel ne convient pas beaucoup aux lampes de 5 bougies, et même de 10 bougies; les premières sont impossibles à réaliser et les secondes peu économiques; mais, comme la tendance générale est d'employer des lampes d'au moins 16 bougies, l'inconvénient n'est pas très grand en pratique, et les nouvelles usines centrales de distribution s'établissent généralement avec deux ponts à 220 volts.

Distribution à deux fils. — La distribution à deux fils se fait à 110 volts ou à 220 volts avec des dynamos shunt ordinaires qu'il est facile de coupler en parallèle sur les barres de distribution et dont on égalise le débit en réglant individuellement l'excitation. Le système est trop connu pour que nous croyons utile d'insister, d'autant mieux qu'il n'y avait pas d'exemple, à l'Exposition, de distribution directe à deux fils par courant continu.

Distribution à trois fils. — La distribution à trois fils, préconisée dès 1882 par Édison et Hopkinson, est aujourd'hui l'une des plus répandues. On sait qu'elle comporte deux dynamos couplées en tension. Pour les installations importantes, les deux dynamos sont disposées de part et d'autre du moteur à vapeur qui les actionne directement. Dans des installations moins importantes, les deux dynamos sont placées à la suite l'une de l'autre sur le même bâti, ont un arbre commun, attaqué directement ou par courroie. Nous signalons, à titre d'exemple, les dynamos de la SOCIÉTÉ ANONYME DES ÉTABLISSEMENTS DECAUVILLE AINÉ dont l'une d'elles est représentée figure 2.

Distribution à trois fils par une seule dynamo. — Pour distribuer à trois fils avec une seule dynamo, la COMPAGNIE DE FIVES-LILLE emploie un dispositif ingénieux.

Si dans une génératrice ordinaire, établie pour une tension de 240 volts aux bornes, on relie à deux bagues, comme le montre schématiquement la figure 00, deux points A et B diamétralement opposés de l'enroulement, et si l'on fait communiquer les deux extrémités C et D d'une bobine de self-induction avec deux balais E et F appuyant sur ces bagues, en ayant soin de brancher le fil neutre de la distribution sur le milieu O de cette bobine, on aura réalisé une distribution par trois conducteurs à l'aide d'une seule dynamo.

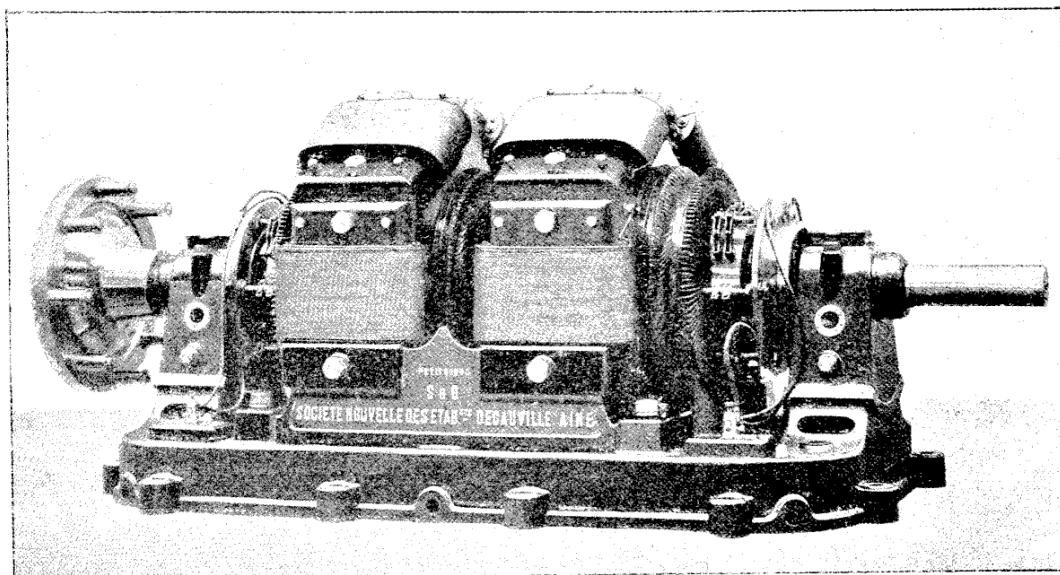


FIG. 1. — Dynamo pour distribution à 3 fils à accouplements directs pour distribution à 3 fils de la *Société nouvelle des Etablissements Decauville aîné*. (La partie du manchon d'accouplement, système Raffard, représenté sur la gauche, doit être retournée pour que les broches soient en saillie extérieurement et non intérieurement sur le plateau d'accouplement.)

On voit clairement que les bornes C et D de la bobine de self-induction se trouvent alimentées sous une tension alternative de 240 volts, dont la variation par rapport au temps peut être représentée par la courbe E — F de la figure 3.

Cette différence de potentiel fera circuler, dans la bobine égalisatrice, un courant qui retardera sur elle d'un quart de période. Ce courant alternatif, fourni par la génératrice, est des plus faibles et ne dépasse pas 1 pour 100 de la valeur normale du débit de la dynamo. Comme il est décalé d'un quart de période, il ne cause qu'une perte de puissance insignifiante, la résistance chimique de la bobine étant pratiquement négligeable.

Au moment même où le point A passe sous les balais positifs M, la tension aux bornes CD tend à faire circuler un courant allant de E vers D. Mais, dans toute bobine de self-induction, la force contre-électromotrice induite est égale et opposée à la différence de potentiel aux bornes. Cette force contre-électromotrice agissant seule ferait donc naître à l'instant considéré un courant dirigé de D vers C.

La force contre-électromotrice mesurée entre les points C et O est égale à la moitié de celle qui existe entre C et D et qui a 240 volts comme valeur maxima.

On pourrait donc représenter sa variation par rapport au temps par la courbe e_2 de la figure 3.

Si maintenant nous considérons le circuit d'alimentation MOCE, nous trouvons :

1^o Aux extrémités M et C une tension oscillante entre zéro et 240 volts, dirigée toujours dans le même sens et figurée par la courbe M — E :

2^o Dans l'intérieur de la bobine égalisatrice et entre les joints O, et C une force électromotrice alternative de self-induction représentée par la courbe *es*.

La résultante de ces deux forces électromotrices donne une tension constante de 120 volts indiquée dans la figure 8 par la droite *xy*.

Cette tension résultante, dont la valeur est de 120 volts, est précisément celle qui est nécessaire pour faire circuler, à travers le point le plus chargé, le courant *i*, qui n'est autre chose que la différence entre les intensités I_1, I_2 dans les deux branches de la distribution.

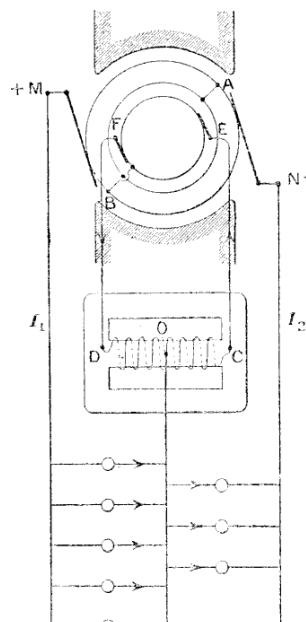


FIG. 2. — Génératrice à 3 fils.

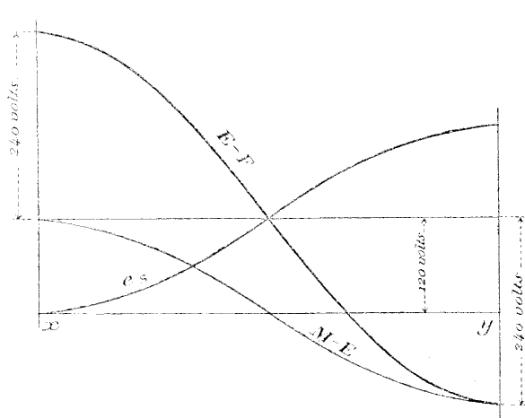


FIG. 3.

La façon dont agit la self-induction est des plus intéressantes. En effet, lorsque la tension entre les points M et A est nulle, elle se trouve égale à + 120 volts; quand cette tension entre M et A devient + 120 volts, la force électromotrice induite s'annule pour arriver ensuite à — 120^o, au moment précis où la différence de potentiel entre M et A atteint sa plus grande valeur + 240 volts.

Ainsi la self-induction s'ajoute ou se retranche de la tension entre les points M et A, de façon à produire une différence de potentiel constante, égale à la moitié de la tension aux balais de la dynamo génératrice.

Nous n'avons pas parlé de la seconde branche de la bobine égalisatrice, mais il est visible qu'elle travaille de la même façon que la première.

Dynamos à double enroulement induit. — Aux heures de faible charge, pendant la nuit, par exemple, il est peu avantageux de faire fonctionner deux dynamos pour alimenter les deux ponts d'une distribution à trois fils. On remédie à cet inconvénient en faisant alors le service à l'aide d'une seule dynamo dont l'induit porte deux enroulements identiques, imbriqués l'un dans l'autre, mais complètement distincts, et reliés chacun à un collecteur, disposés l'un d'un côté, l'autre de l'autre côté de l'induit. Ces deux induits sont couplés en tension entre eux par les balais, et reliés au réseau général de distribution. L'excitation shunt est alimentée par les fils

extrêmes et réglée pour fournir 220 volts. Comme la charge est faible, et que le réseau de distribution présente une action énorme eu égard au faible débit : la perte en ligne est pratiquement nulle, et la distribution assurée, malgré les inégalités de charge éventuelle des deux ponts.

Le SECTEUR ÉDISON utilise une dynamo de ce genre dans son usine du Palais-Royal, à Paris.

Distribution à cinq fils. — Ce système a été appliqué en 1890, par la SOCIÉTÉ ALSACIENNE DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES, sur le SECTEUR DE LA PLACE CLICHY, où il fonctionne depuis cette époque.

Les dynamos, du type à anneau Gramme à collecteur extérieur et à inducteurs intérieurs, produisent directement une tension variable de 450 volts à vide à 550 volts en charge et alimentant des feeders aboutissant à des boîtes de distribution disposées dans des sous-stations où des *régulatrices* ou *compensatrices* divisent la tension totale de 440 volts en quatre parties égales pour l'alimentation des quatre ponts.

Compensatrices et régulatrices. — Dans les distributions à trois fils et à cinq fils, le courant arrive aux boîtes de distribution par des feeders reliés aux fils extrêmes. Considérons une distribution à cinq fils, par quatre ponts de 110 volts, pour fixer les idées. L'usine centrale fournit une différence de potentiel supérieure à 440 volts, de façon qu'il y ait exactement 440 volts à la boîte de distribution, après la chute de tension produite par les feeders. Pour diviser les 440 volts en quatre parties égales, on emploie une régulatrice constituée par quatre dynamos égales couplées mécaniquement entre elles, excitées en dérivation sur les 440 volts, mais dont les excitations sont couplées entre elles en tension.

Les quatre induits sont également couplés en tension entre eux et montés en dérivation sur les 440 volts ; les trois fils intermédiaires déterminant les quatre ponts partent des points communs des balais des quatre machines. Ce dispositif permet à la machine disposée sur le pont le plus chargé de fonctionner en dynamo, tandis que la machine du pont le moins chargé fonctionne en moteur, par suite de l'inégalité des tensions que les charges différentes tendent à produire. Il en résulte que le pont le moins chargé verse de la puissance sur le pont le plus chargé, et tend ainsi à égaliser les charges et les puissances sur chacun des ponts. A vide ou à charge égale, sur les quatre ponts, les quatre dynamos formant régulatrice n'absorbent que le courant très faible nécessaire à leur fonctionnement à vide. Ce dispositif est employé par le SECTEUR ÉLECTRIQUE DE LA PLACE CLICHY.

Distribution avec accumulateurs. — La plupart des distributions à courant continu comportent comme complément naturel, presque indispensable, une ou plusieurs batteries d'accumulateurs établie en dérivation sur le réseau et ayant à remplir une double fonction : celle d'aider les dynamos de l'usine au moment de la *pointe* de consommation, ce qui permet d'employer une puissance génératrice plus faible que celle correspondant à la consommation maxima ; celle de faire le *service de nuit*, et de permettre ainsi l'arrêt de l'usine pendant une grande partie de la nuit, et même la matinée. La recharge se fait pendant la journée, aux heures de faible consommation, en utilisant la quantité de matériel générateur (moteurs et dynamos) suffisant pour le faire travailler dans les meilleures conditions de rendement et d'utilisation.

Dans les usines de tramways, la batterie d'accumulateurs joue un rôle plus spécial : elle a pour objet de parer aux variations brusques de charge du réseau, et de servir de *volant électrique*. Les dynamos travaillent à puissance constante, et la batterie fait l'appoint *positif* ou *négatif* de puissance, suivant que les voitures en service prennent une puissance *plus grande* ou *plus petite* que la puissance moyenne produite par les générateurs électriques. On leur donne, à cause de cette fonction spéciale, le nom de *batteries-tampon*.

Malheureusement, les conditions spéciales dans lesquelles s'est faite l'exploitation des services électriques de l'Exposition ne comportait pas l'emploi de ces batteries, et il n'y a figuré

que quelques *survolteurs* et *réducteurs* que nous avons décrits dans les fascicules respectivement consacrés à la *Transformation de l'énergie électrique* et à l'*Appareillage*. Nous n'avons donc pas à y revenir.

Dynamo à intensité constante de la Société Gramme. — Les règlements n'autorisent pas l'emploi dans les intérieurs des habitations de différences de potentiel supérieur à 500 volts; aussi la distribution en série n'est-elle pas employée, mais des machines à intensité constante fonctionnent à Paris pour l'éclairage des voies et des jardins publics. L'une de ces dynamos construites par la **SOCIÉTÉ GRAMME** et représentée figure 4 peut donner 40 ampères sous une tension variant entre 800 et 2 000 volts, suivant le nombre de foyers alimentés en tension.

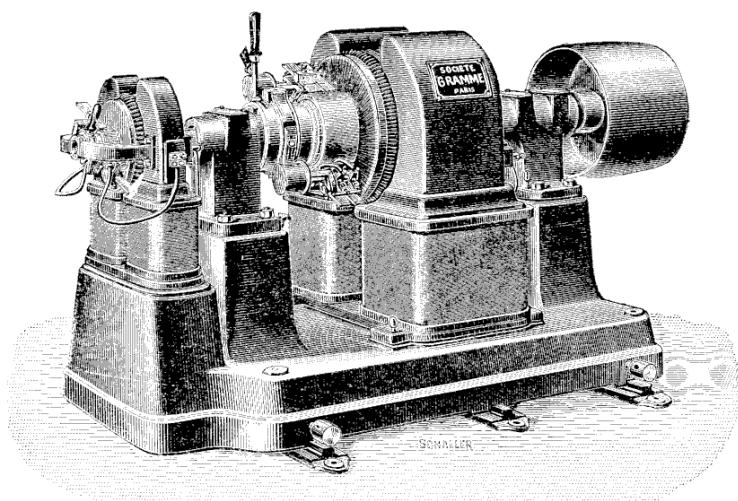


Fig. 4. — Dynamo à intensité constante de la Société Gramme.

L'excitatrice est placée sur le prolongement de l'arbre, et c'est en variant l'excitation de l'excitatrice que l'on maintient le courant constant. La dynamo de 2 000 volts peut alimenter 40 lampes à arc de 10 ampères.

Tableaux de distribution. — Les tableaux de distribution sont établis suivant deux principes bien distincts, suivant qu'ils sont destinés à des installations permanentes ou sensiblement telles, ou qu'ils sont établis dans des usines pour lesquelles il a été prévu un développement graduel et normal des unités génératrices et des feeders.

Dans les installations permanentes, le tableau est unique, et les appareils qui le composent sont montés à demeure sur une dalle de marbre blanc de dimension appropriée et maintenue verticalement dans un châssis en fer cornière. Les connexions entre les appareils se font toutes par la face postérieure du tableau, éloigné du mur d'une longueur suffisante pour que la surveillance, l'entretien et le remplacement éventuels puissent se faire facilement.

Les tableaux des grandes installations pour lesquelles des extensions sont prévues sont établis sur le principe général des panneaux individuels juxtaposés ou superposés. L'extension se fait en rajoutant des panneaux de chaque côté.

Nous reproduisons à titre d'exemple (fig. 5) un tableau de distribution à cinq panneaux de la **SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE D'ÉLECTRICITÉ, PROCÉDÉS WESTINGHOUSE**, pour distribution d'énergie jusqu'à 750 volts. Sur la gauche sont disposés deux panneaux de génératrices; le milieu est occupé par un panneau totalisateur, à droite sont deux panneaux de feeders.

Le panneau de *générateur* comporte une lampe avec support et abat-jour, un indicateur de terre, un ampèremètre, un voltmètre, un disjoncteur unipolaire, une prise de courant à fiche

de voltmètre et un interrupteur tripolaire dans le cas de dynamos compound. Sous le panneau de la génératrice est un panneau de rhéostat portant les plots de contact et la manette de manœuvre.

Le panneau *totalisateur* comprend un ampèremètre Weston et un voltmètre Weston, tous deux à cadran lumineux. Le voltmètre est monté sur un pivot pour que l'on puisse l'amener sur le devant du panneau et le mettre bien en vue au moment du couplage en parallèle de deux génératrices.

La partie inférieure est occupée par un panneau vide, ou, plus exactement, un panneau *plein* destiné à compléter le tableau.

Le panneau de *feeder* comprend une lampe avec support et abat-jour, un disjoncteur unipolaire et un interrupteur bipolaire. Dans les installations un peu importantes, on dispose un

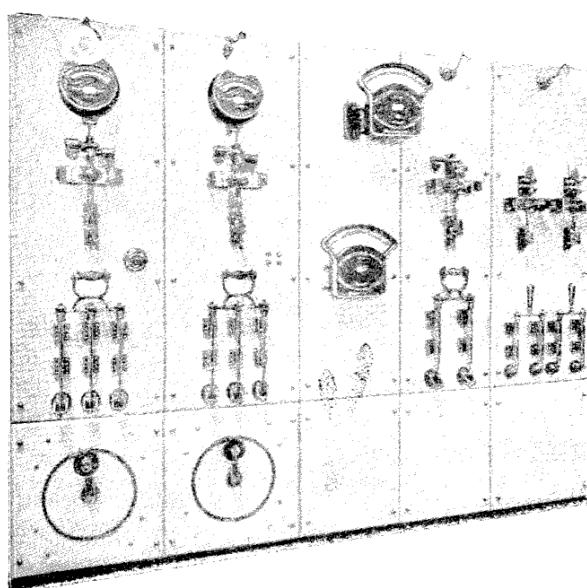


FIG. 5. — Tableau de distribution à 5 panneaux pour tramways de la Société industrielle d'Électricité.

ampèremètre sur un *feeder*. Dans certains cas, le panneau est double, avec ou sans ampèremètre.

La partie inférieure du panneau de *feeder* est occupée soit par un panneau *plein*, soit par un panneau de *fusibles*.

Colonnes de commande. — La mise en service des grosses unités génératrices se fait généralement non pas au tableau de distribution, mais par une *colonne de commande* disposée près de la dynamo, et constituée par une colonne enfoncée sur laquelle sont montés, dans le cas d'un courant continu, un ampèremètre et un voltmètre, un volant à axe vertical agissant sur l'excitation de la dynamo et un levier commandant l'interrupteur général. Le rhéostat et l'interrupteur sont placés sous la colonne.

Kiosque de commande de l'Elektrizitäts Aktiengesellschaft Vormals Schuckert und C°. — Le groupe électrogène de la maison Schuckert était constitué par une dynamo à courant continu (500 v 7500 A 150 kw) et un alternateur triphasé 5 000 v 98 A 150 kw. Les appareils de commande du groupe A à courant continu étaient disposés à l'intérieur d'un kiosque carré d'un goût bien allemand, représenté *fig. 6* sous deux de ses faces.

L'un des panneaux porte un voltmètre, un ampèremètre de 1 600 ampères pour le courant principal, un second ampèremètre de 60 ampères pour le moteur électrique du vireur¹ et le volant du rhéostat de champ. Le deuxième panneau porte un disjoncteur à minima pour 60 ampères et 500 volts, un interrupteur bipolaire de 60 ampères pour le moteur du vireur, deux coupe-circuits fusibles unipolaires pour 180 ampères et deux fusibles unipolaires pour 80 ampères et 220 volts. Le troisième panneau, en marbre comme les deux premiers, est un panneau d'annonces, et le quatrième, qui ne porte rien comme dans la chanson de Marlborough, est une porte par laquelle on accède facilement à l'intérieur du kiosque pour visiter les connexions.

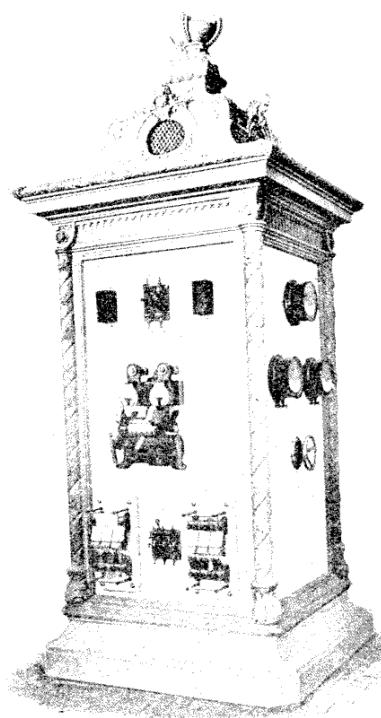


FIG. 6. -- Kiosque pour courant continu de l'Elektricitäts-Aktiengesellschaft.

brayant une commande mécanique. La rotation de l'axe dans un sens ou dans l'autre agit sur l'admission de vapeur ou sur la résistance de réglage jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli.

Dans le régulateur de la COMPAGNIE GÉNÉRALE ÉLECTRIQUE DE NANCY, le contact du relai est obtenu par la dilatation d'un fil de platine monté en dérivation sur la différence de potentiel à régler.

Réglage des effets de théâtre. — Les effets lumineux de théâtre exigent que les variations de lumière se fassent avec plus ou moins de rapidité, mais toujours graduellement. On obtient généralement ce résultat par l'intercalation en circuit de rhéostats comportant un nombre de touches assez élevées pour rendre les variations insensibles; mais ces rhéostats absorbent une certaine puissance dépensée en pure perte. Pour réduire cette perte et obtenir des effets gradués, M. DE COINCY employait un dispositif original, mais un peu compliqué, et qui consistait à utiliser le courant fourni par la distribution, non pas directement, mais en passant par un

1. Le dépassement de point mort des grands moteurs à vapeur à l'aide d'un vireur actionné par un moteur électrique suppose, en pratique, une installation comportant des accumulateurs. A l'Exposition de 1900, où l'on n'employait pas d'accumulateur, le moteur du vireur était alimenté par le réseau général de distribution à 220 volts.

transformateur spécial constitué par un moteur shunt à vitesse constante actionnant une dynamo à induit amovible longitudinalement sous les pièces polaires. Cette dynamo est excitée en shunt par le réseau de distribution. Lorsque l'induit est sous la pièce polaire, la force électromotrice développée par l'induit est maxima et les lampes reliées à cet induit fournissent leur plus

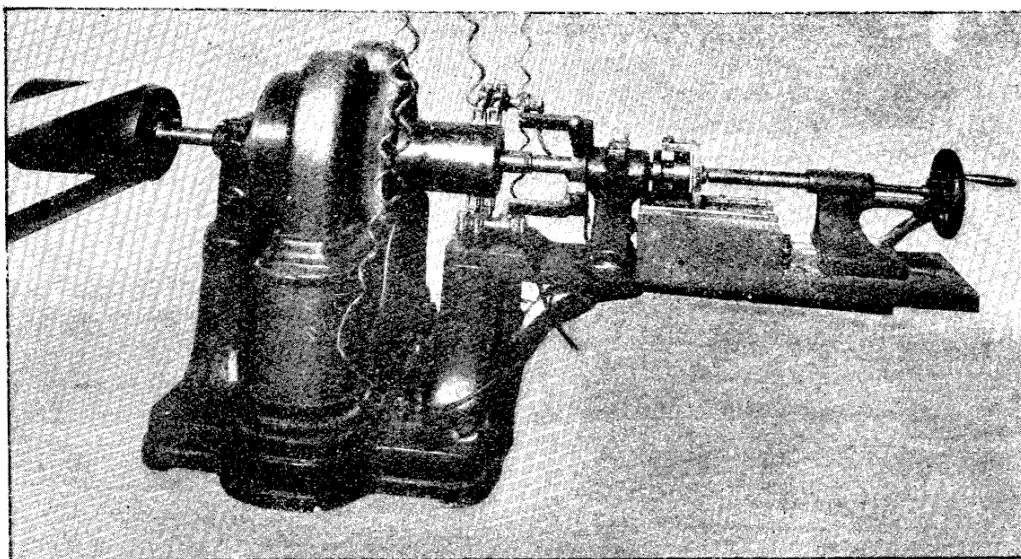


FIG. 7. — Dynamo à induit amovible de M. de Coincey.

grande intensité lumineuse. Si, en tournant le volant représenté à droite de la figure 7, on déplace longitudinalement l'induit, la force électromotrice diminue, et les lampes diminuent d'éclat jusqu'à extinction complète. Le système impose malheureusement l'emploi d'une dynamo spéciale commandée par courroie, portant un induit et un commutateur très long et par suite très encombrant et très coûteux; aussi ne signalons-nous ce système qu'à titre de curiosité.

TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Lorsque la surface sur laquelle doit se faire la distribution présente une grande étendue, et une faible densité de consommation, représentée par le quotient de la puissance à fournir par la surface sur laquelle elle doit être répartie, on a intérêt, en vue de réduire le prix de canalisation, à *transmettre* cette puissance sous une tension élevée, et à la *distribuer* à basse tension.

On emploie dans ce but des courants alternatifs simples et des transformateurs à basse tension.

Ces transformateurs eux-mêmes sont, suivant les cas, disposés de différentes façons :

1^o Lorsque les centres de consommation constituent des groupes isolés peu importants et distants les uns des autres, on dessert chacun de ces groupes par un transformateur isolé, dont la puissance est proportionnée à la consommation maxima du groupe;

2^o Lorsque chaque groupe présente une certaine importance et une certaine étendue, on dessert la zone entière par un *réseau secondaire* à basse tension alimenté par un transformateur ou un certain nombre de transformateurs;

3^o Enfin, si le groupe à alimenter est très important, les transformateurs sont disposés dans une *sous-station*, et mis en circuit au fur et à mesure des besoins, afin que tous les transformateurs travaillent à chaque instant à puissance normale et à rendement maximum. C'est à cette combinaison, la plus avantageuse lorsqu'elle est réalisable, que les Anglais ont donné le nom de *Banking*.

I. — TRANSFORMATEURS ISOLES

Ce système est appliqué à Paris par le SECTEUR DES CHAMPS-ÉLYSÉES et le SECTEUR DE LA RIVE GAUCHE qui, au terme du Règlement, figuraient comme exposants, ainsi que tous les secteurs de distribution de la Ville de Paris.

Les dispositifs de couplage et de protection de ces transformateurs ont été décrits dans le fascicule consacré à l'appareillage. Nous signalons seulement ici un dispositif exposé par la maison GANZ ET C^{ie}, de Budapest, destiné à mettre automatiquement en circuit, ou à retirer du circuit un transformateur isolé lorsque la charge augmente ou diminue.

Appareil automatique Schlatter. — Dans les réseaux à courant alternatif avec distribution de courant par transformateurs, une perte d'énergie importante résulte de l'aimantation du grand nombre de transformateurs qui, aux heures où les circuits secondaires sont ouverts, restent branchés sur les circuits primaires. C'est dans le but de réduire cette perte par la réduction de l'alimentation des noyaux des transformateurs, que cet appareil a été construit. Le principe sur lequel les manœuvres automatiques ont lieu est l'insertion d'un petit transformateur, dont le primaire est en série avec le transformateur de service, lorsque le circuit secondaire n'est pas chargé; ce résultat est obtenu par un électro-aimant excité par le courant secondaire, lorsque

le circuit secondaire est chargé, équilibré par un poids servant à mettre en série le transformateur de service avec le transformateur auxiliaire. L'enroulement de ce dernier est calculé de manière à réduire le courant d'excitation à une valeur minima quand il est en série avec l'enroulement primaire du transformateur; il est mis hors circuit dès que le circuit secondaire porte la moindre charge; le transformateur principal prend alors la tension totale.

Si la station contient plusieurs transformateurs, la mise en circuit de ces transformateurs s'effectue au fur et à mesure que la charge augmente, à l'aide d'une série d'appareils plus simples que celui qui vient d'être décrit. Cet appareil consiste essentiellement en un électro-aimant excité par le courant secondaire principal, grâce auquel le transformateur est inséré, lorsque le courant atteint une certaine intensité. Le dispositif exposé consistait dans les deux appareils décrits, deux transformateurs chacun de 2 500 watts et une série de lampes destinées à être mises en circuit successivement pour démontrer le fonctionnement des appareils.

II. — RÉSEAUX SECONDAIRES

Ces réseaux sont établis à 110 volts ou 220 volts, deux fois 110 volts, ou deux fois 220 volts suivant l'importance du réseau secondaire. Si l'Exposition de 1900 n'en présentait pas beaucoup d'exemples, c'est que la distribution par courants alternatifs simples n'y était pas employée.

Les deux secteurs parisiens de distribution par courants alternatifs simples n'en offrent pas non plus beaucoup d'exemples, pour des raisons d'ordre purement administratif. Les canalisations revenant à la Ville de Paris en fin de concession, les concessionnaires n'ont aucun intérêt à disposer dans le sol un réseau secondaire important et coûteux pour l'amortissement duquel le temps de la concession est insuffisant.

Sous-stations. — L'emploi de sous-stations desservant un réseau secondaire important à basse tension est relativement peu répandu avec les courants alternatifs simples. Nous le retrouverons, au contraire, très développé avec les courants alternatifs polyphasés. Les sous-stations constituent alors des portes de transformation non seulement des deux éléments de la puissance électrique fournie, tension et intensité, mais encore de la *forme* de ces courants, que l'on transforme en courant continu pour la traction et même pour l'éclairage.

Couplage en parallèle. — L'Exposition ne présentait aucun dispositif de couplage en parallèle des alternateurs à courants alternatifs simples, par l'excellente raison qu'il n'y figurait qu'*un seul* alternateur produisant des courants alternatifs simples.

Le SECTEUR DES CHAMPS-ÉLYSÉES et le SECTEUR DE LA RIVE GAUCHE, qui transmettent et distribuent tous deux l'énergie électrique à la fréquence de 42 périodes par seconde à 3 000 volts au primaire et 110 volts au secondaire, utilisent le dispositif bien connu de l'indicateur de phases avec transformateurs alimentant simultanément des lampes de phase et un voltmètre. Le couplage se fait à l'instant où la lampe passe par son éclat maximum et que le voltmètre indique la tension la plus élevée.

III

TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Le transport de l'énergie constitue le cas le plus complexe, car il implique à la fois la *production* de l'énergie électrique dans une usine centrale, la *transmission* de cette énergie à haute tension, sa *transformation* dans des sous-stations, et sa *distribution* aux appareils d'utilisation.

Le transport de l'énergie électrique se fait aujourd'hui par deux systèmes que nous examinerons successivement :

A. *Courants alternatifs polyphasés à potentiel constant.*

B. *Courant continu à intensité constante.*

Lorsque le transport de l'énergie doit se faire sans distribution, lorsqu'il s'agit, par exemple, de transposer une puissance mécanique de grandeur variable du point A au point B, on a fait souvent usage, avant 1892, de deux dynamos série à courant continu, reliées entre elles par une ligne de transport, et dont les bobinages étaient calculés pour que, si la génératrice placée en A tourne à vitesse constante, quelle que soit la charge, depuis la marche à vide jusqu'à la puissance normale maxima prévue. Le transport se fait alors à tension et intensité variables. On a renoncé aujourd'hui à cette combinaison qui limite la puissance transmise et rend le contact des machines dangereux. L'Exposition de 1900 n'offrait aucun exemple d'application de ce système à peu près abandonné aujourd'hui, bien que très employé en 1889.

A. — TRANSPORT PAR COURANTS ALTERNATIFS POLYPHASÉS A TENSION CONSTANTE

Généralités. — Les courants alternatifs polyphasés ont, depuis 1891, lors de leur première apparition sous forme industrielle d'électricité de Francfort-sur-le-Main, révolutionné les procédés de transport de l'énergie à distance.

En outre des difficultés de transformation de leurs éléments, tension et intensité, à l'aide de transformateurs dits statiques, c'est-à-dire ne comportant aucun organe en mouvement, ils se prêtent facilement à leur transformation en courant continu, à l'aide de *commutatrices* ou de *permutatrices*, les courants polyphasés et le courant continu ayant comme caractéristique commune que la puissance électrique mise en jeu à chaque instant est *constante*, tandis qu'elle est périodique dans les courants alternatifs simples. Cette périodicité impose l'obligation d'avoir recours à des procédés d'emmagasinement mécanique (volant) ou électrique (self-induction) pour transformer le courant alternatif simple en courant plus ou moins continu. En fait, cette transformation ne s'effectue jamais qu'à l'aide de moteurs-générateurs, et seulement lorsqu'on ne dispose pas de courants polyphasés.

En ce qui concerne le choix entre les courants *diphasés* ou *triphasés*, on préfère aujourd'hui généralement les courants triphasés qui, à puissance et tension égales, permettent d'économiser 25 pour 100 du cuivre de la canalisation.

Tensions. — Les tensions employées se sont élevées graduellement, en vue d'économiser le cuivre, avec la distance et la puissance à transporter.

Si l'Exposition de 1900 n'a montré que des transports à 5 000 volts, c'est que les distances à franchir n'étaient pas suffisantes pour que l'on ait recours à des tensions supérieures et que les règlements de l'Exposition limitaient d'ailleurs cette tension. La plupart des alternateurs produisent d'ailleurs *directement* cette tension. Pour des tensions plus élevées, on préfère avoir recours à des transformateurs élévateurs disposés à l'usine. Cependant on obtient directement 15 000 volts de tension composée avec les alternateurs BROWN BOVERI ET CIE.

Fréquences. — Les fréquences ont une tendance à l'unification. On a renoncé, en général, aux fréquences supérieures à 60 périodes par seconde, fréquences pour lesquelles on ne sait pas encore, d'ailleurs, construire de commutatrices fonctionnant convenablement.

Les deux fréquences que l'on peut considérer comme normales sont : 50 périodes par seconde pour les installations mixtes comportant à la fois des moteurs et de l'éclairage en courants alternatifs. 25 périodes par seconde pour les installations de moteur ou de traction, soit directe, soit par l'intermédiaire de commutatrices, ces commutatrices alimentant également les circuits d'éclairage.

Formes des courants alternatifs. — La force électromotrice développée par un alternateur destiné au transport de l'énergie doit se rapprocher le plus possible de la sinusoïde, afin d'éviter les effets de résonance de la capacité de la ligne et de la self-induction des appareils d'utilisation. Ces effets de résonance produisent des surélévations énormes de tension très nuisibles à la conservation des isolants des câbles, des machines, des tableaux et des appareils de mesure.

Il semble résultez des relevés faits à l'*Exposition de 1900*, par M. DONKÉVITCH avec l'oscillograph de M. BLONDEL, que bon nombre d'alternateurs donnent des courbes de tension qui s'éloignent beaucoup de la sinusoïde et pourraient, avec des tensions élevées et des câbles présentant un peu de capacité, donner naissance à des différences de potentiel dangereuses provoquées par des effets de résonance.

Alternateurs. — Nous ne dirons rien ici des alternateurs servant au transport de l'énergie dans l'Exposition. Ils sont décrits en détail dans le fascicule consacré aux générateurs électriques. Nous n'insisterons que sur les particularités relatives au transport lui-même, en dehors des machines et appareils utilisés dans ce transport et décrits dans les fascicules spéciaux (transformateurs, canalisation et appareillage, moteurs électriques, traction électrique, etc.).

Colonnes de commande. — Chaque groupe électrogène est relié au tableau de distribution en passant par un tableau de commande constitué par une colonne ou un kiosque. La colonne de commande porte, en général, les appareils de mesure, voltmètre, ampèremètre avec leurs appareils de transformation, un interrupteur à haute tension, et un volant agissant sur l'excitation de l'alternateur. La figure 8 représente, à titre d'exemple, la colonne de commande de l'alternateur des ATELIERS D'OERLIKON.

Dispositions générales des tableaux à haute tension pour courants alternatifs triphasés. — Un tableau pour courants alternatifs triphasés se compose, en général, de deux parties parallèles, constituées chacune par une série de panneaux individuels.

La partie antérieure est réservée aux alternateurs, la partie postérieure aux feeders ou aux conducteurs de transport. Ces deux parties sont reliées par trois conducteurs nus posés sur isolateurs en porcelaine et auxquels on donne respectivement les trois couleurs : bleu, blanc, rouge, afin de les distinguer et de faciliter les connexions. Ces trois conducteurs forment trois boucles fermées ; mais des interrupteurs à couteaux disposés entre les panneaux permettent d'effectuer une coupure de la boucle en un point quelconque et d'isoler ainsi à volonté de l'ensemble du réseau un organe quelconque, alternateur ou ligne, sans interrompre le circuit et sans arrêter le fonctionnement du transport. On peut alors procéder sans danger aux réparations et modifications.

Lorsqu'on emploie un *panneau général* pour la mesure du courant total et de la puissance totale, la boucle est ouverte du côté opposé à celui où se trouve ce panneau général, afin que tout le courant et toute la puissance passent par ce panneau général.

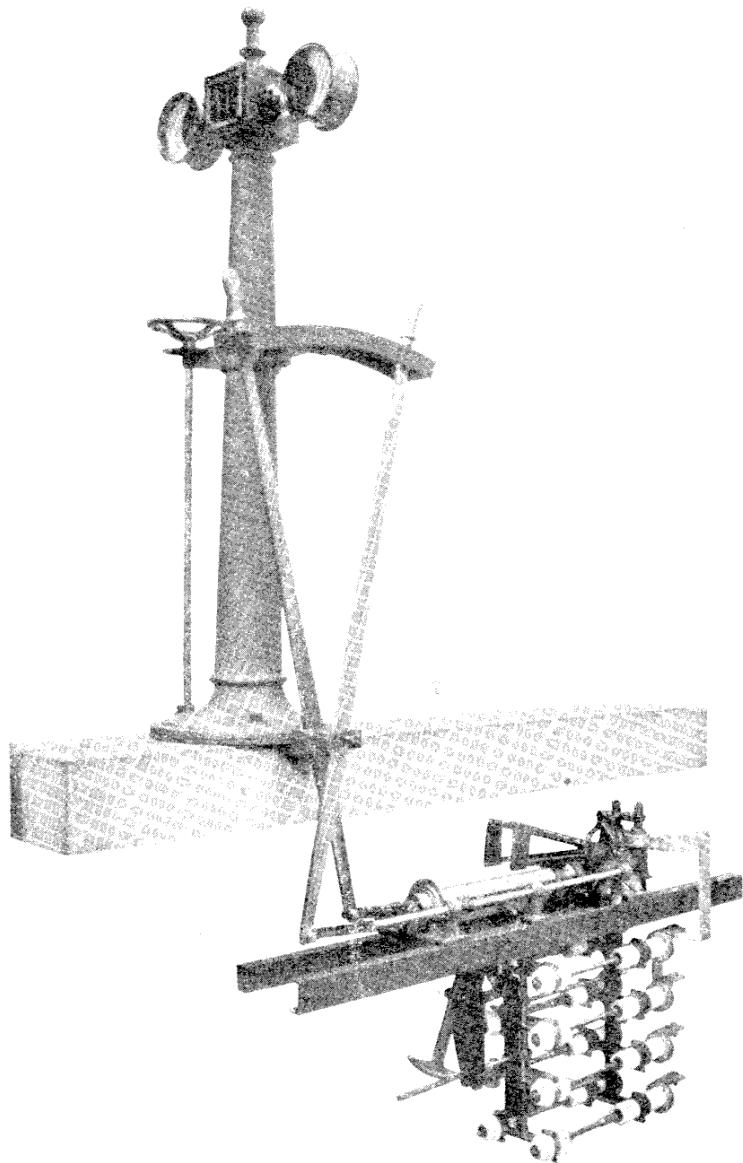


FIG. 8. — Colonne de commande et interrupteur pour courants triphasés à haute tension des ateliers d'Oerlikon.

Chaque *panneau de dynamo* comporte un interrupteur triple à haute tension, un ampèremètre sur l'une des phases ou quelquefois sur les trois phases, un voltmètre et un dispositif indicateur de phases pour permettre le couplage en parallèle. À la partie inférieure de ce panneau sont placés les organes de réglage de l'excitatrice, si celle-ci est montée en bout d'arbre de la dynamo, ou un rhéostat de réglage, si le circuit d'excitation est commun.

Chaque *panneau de feeder* comporte un interrupteur triple, trois ampèremètres, trois coupe-circuits, trois bobines de réaction sans fer et trois parafoudres.

Le but et les dispositions spéciales de ces appareils ont été examinés à propos de l'appareillage et nous n'y reviendrons pas ici.

Les barres de connexion des différentes parties d'un tableau se font généralement en cuivre; cependant les ATELIERS d'OERLIKON emploient l'aluminium pour cette application.

Kiosque de commande de l'Elektricitäts Aktiengesellschaft, normale Schuckert und C°, de Nuremberg. — Le kiosque de commande de l'alternateur à courants triphasés de la C° SCHUCKERT est d'une forme analogue à celui du courant continu précédemment décrit.

L'un des panneaux en marbre porte un voltmètre, deux ampèremètres, deux dispositifs de réglage et trois interrupteurs tripolaires. Les transformateurs des appareils de mesure sont disposés à l'intérieur du kiosque. Le premier dispositif de réglage commande les résistances d'excitation de l'alternateur disposées dans le sous-sol. Le second dispositif sert à faire démarrer et à régler un moteur-générateur.

Ce moteur-générateur qui peut transformer les courants alternatifs simples diphasés ou triphasés en courant continu, et réciproquement, était utilisé pour transformer le courant continu à 220 volts distribué par le service général de l'Exposition en courant triphasé à 135 volts entre deux fils.

Un transformateur triphasé alimenté par l'alternateur à 5 000 volts fournissait également du courant secondaire à 135 volts. On pouvait ainsi, en utilisant ces deux courants triphasés alimentés par deux sources distinctes, montrer le fonctionnement du *synchroniseur* décrit un peu plus loin. Le deuxième panneau du kiosque porte un interrupteur à haute tension, un compteur, un interrupteur et deux fusibles.

Le troisième panneau est consacré à l'annonce de la maison et le quatrième est une porte donnant accès dans le kiosque.

Connexions des appareils de mesure. — Pour ne pas amener de hautes tensions sur la face antérieure du tableau de distribution, la Société ANONYME d'ÉLECTRICITÉ ci-devant LANSMEYER et C° emploie un dispositif représenté schématiquement *fig. 10*. Ce dispositif consiste à séparer du circuit de chaque phase, à partir du point neutre de l'enroulement induit étoile de l'alternateur un certain nombre de spires de l'induit, une bobine par exemple, et à relier le circuit ainsi formé au primaire d'un petit transformateur triphasé, dont le rapport de transformation est égal à l'unité et dont la puissance par rapport à la puissance de la dynamo, dans le même rapport que le nombre de spires connectées au transformateur, un nombre *total* de spires de chaque circuit. Le circuit secondaire de ce transformateur est monté en série avec les trois phases de l'alternateur, et le point neutre de cet alternateur est relié à la terre. Comme le rapport de transformation de ce transformateur est égal à l'unité, il en résulte que l'intensité du courant dans les deux enroulements du transformateur est exactement égale à l'intensité du courant de la machine, tandis que la tension dans chacun des enroulements n'est qu'une partie proportionnelle de celle de la dynamo.



Fig. 9. — Kiosque pour courants triphasés.

Si l'on insère dans le circuit primaire des transformateurs des appareils de mesure, l'ampermètre donne directement l'intensité du courant de la machine, tandis que les voltmètres et les wattmètres indiquent une tension et une puissance proportionnelles à la tension et à la puissance de la dynamo. On étalonne ces deux derniers instruments de manière que le cadran indique directement la tension et la puissance réelles.

Mesures de précaution. — En cas d'accident à un alternateur, et pour éviter de couper le circuit inducteur, dont la self-induction énorme pourrait compromettre l'isolement de ce circuit inducteur, la maison SIEMENS ET HALSKE, de Berlin, dispose sur le pupitre de manœuvre de la machine un commutateur spécial qui met en court-circuit les inducteurs de l'excitatrice excitée elle-même en série. On évite ainsi la tension énorme qui se produirait à la rupture, puisque le circuit inducteur reste fermé sur lui-même.

La plupart des dispositifs de sûreté, tels que disjoncteurs, coupe-circuits, parafoudres, etc., ont été décrits dans le fascicule consacré à l'appareillage, et nous n'y reviendrons pas.

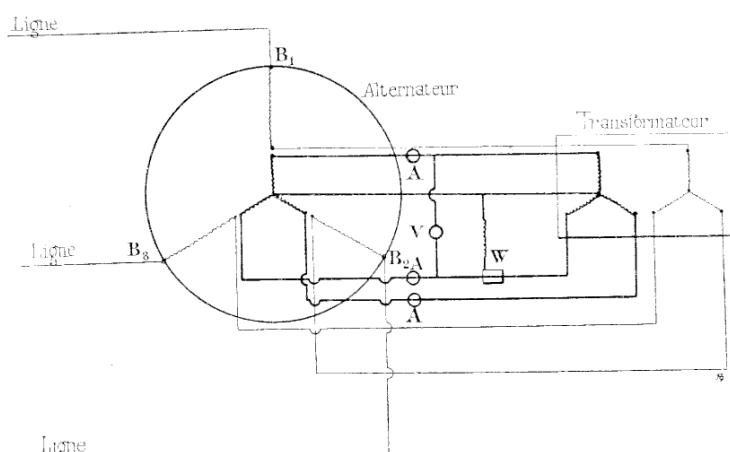


FIG. 10. — Connexions des appareils de mesures de la Société Lahmeyer.

Couplage des alternateurs en parallèle. — Par suite de la grande diversité des puissances, des services et des formes des courants produits par les alternateurs exposés, le service des installations a préféré ne pas coupler les alternateurs en parallèle, et combiner le tableau de distribution de façon à permettre l'alimentation de chaque feeder par plusieurs alternateurs différents. Le service de transport de l'énergie s'est ainsi fait par *substitution* d'une dynamo à une autre, sans aucun couplage.

De même, afin d'éviter les interruptions de service, chaque feeder était double et tronçonnable en plusieurs parties, ce qui permettait, en cas d'accident, de remplacer un tronçon en mauvais état par un autre, et de faire la réparation sans interrompre le service. Les connexions convenables se faisaient par des *boîtes de substitution* convenablement réparties sur les feeders.

Synchroniseur de l'Elektricitäts Aktien Gesellschaft, vormals Schuckert und C°. — Ce synchroniseur, dont le principe est représenté (fig. 11), est constitué par une série de lampes à incandescence disposées en cercle sur un panneau de marbre. Ces lampes sont couplées entre les deux circuits triphasés, de telle façon que le cercle se trouve divisé en trois parties brillantes et trois parties sombres. Les parties alternativement brillantes et sombres se déplacent sur le cercle et paraissent tourner avec lui dans un sens ou dans l'autre, suivant que la fréquence de l'un des courants est supérieure ou inférieure à l'autre, et d'autant plus vite que l'écart

des fréquences est plus grand. Lorsque le système paraît immobile, c'est que le synchronisme est atteint, et le couplage se fait alors sans inconvénient.

Indicateurs de terre. — La COMPAGNIE FRANÇAISE THOMSON-Houston emploie deux électromètres à deux paires de quadrants. Une des paires de quadrants de chaque électromètre est reliée à la terre par une résistance en graphite d'environ 6 000 ohms. Les deux autres quadrants de chaque électromètre sont en communication chacun avec un des conducteurs de la

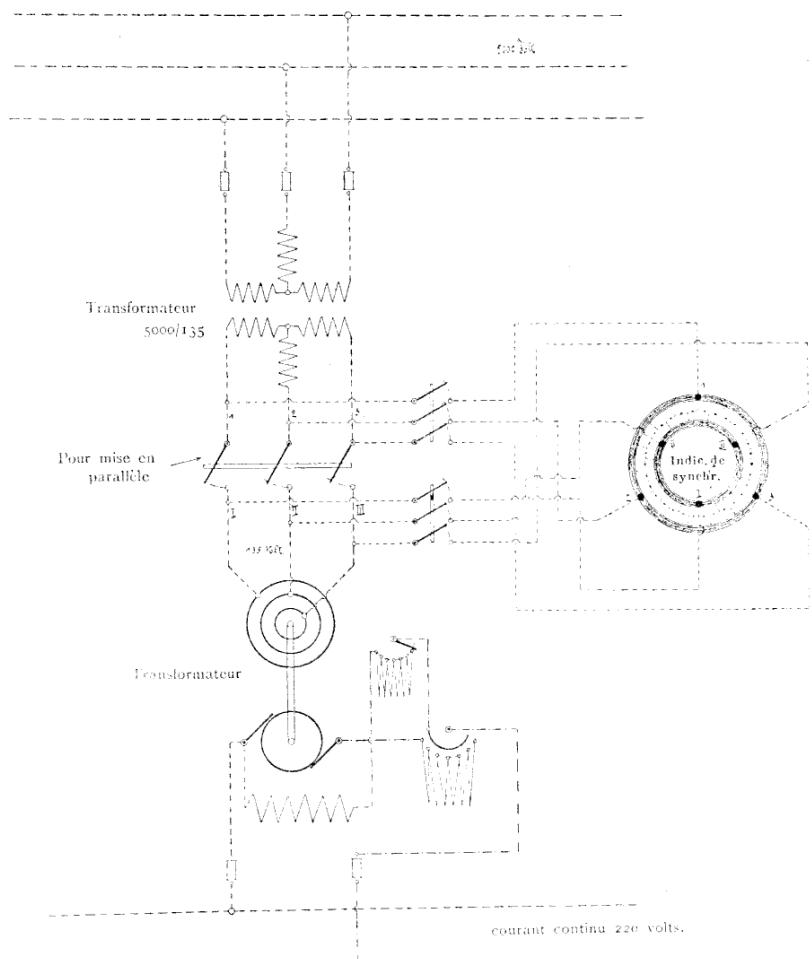


Fig. 41. — Synchroniseur de la Société Schuckert.

ligne, de façon que l'un de ces conducteurs se trouve en relation avec un quadrant de chaque électromètre, et les deux autres avec un seul quadrant de l'un des deux électromètres.

Tableaux de commutatrices. — L'énergie électrique, transportée sous forme de courants alternatifs à 3 000 volts, est transformée en courant continu à la tension de 250 volts ou 500 volts, à l'aide de transformateurs et de commutatrices reliées à un tableau sur lequel se font les connexions nécessaires, et composé de deux parties, l'une réservée aux courants alternatifs, l'autre au courant continu.

Nous signalerons, à titre d'exemple, le dispositif adopté par la COMPAGNIE FRANÇAISE THOMSON-Houston (fig. 42).

Les courants triphasés à 3 000 volts sont abaissés à 310 volts à l'aide de trois transformateurs à courants alternatifs simples, à refroidissement d'air à l'aide d'un ventilateur actionné par un petit moteur alimenté par la commutatrice. Sur les trois circuits secondaires des trans-

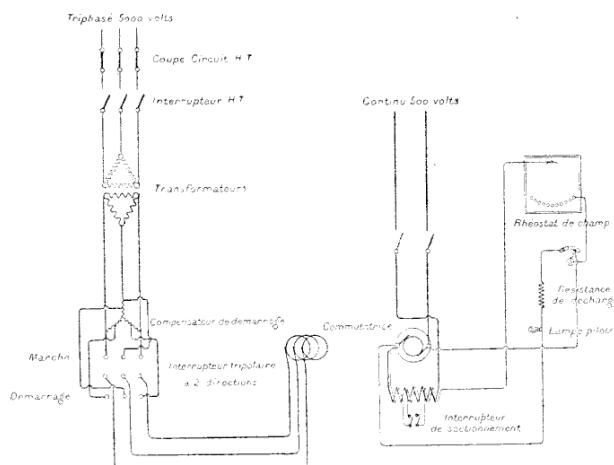


FIG. 12. — Schéma de démontage de la commutatrice de la Compagnie française Thomson-Houston.

formateurs sont intercalées trois bobines de self-induction, qui ont pour objet de régler la tension aux bornes de la commutatrice par variation du courant en quadrature.

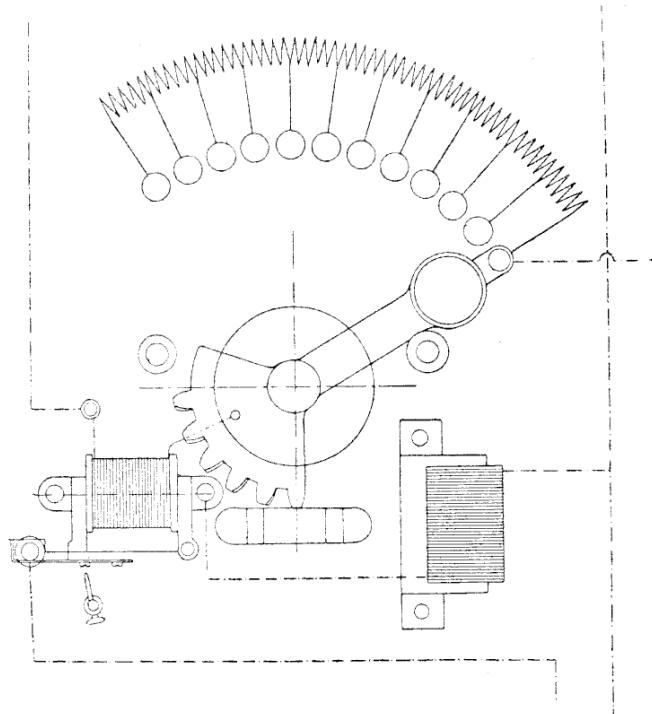


FIG. 13. — Rhéostat à relai de la Compagnie française Thomson-Houston.

Sur le panneau des courants alternatifs sont disposés les coupe-circuits et l'interrupteur tripolaire de la haute tension et les mêmes appareils pour la basse tension. L'interrupteur tri-

polaire est à deux directions pour faciliter le démarrage par les courants alternatifs, à défaut d'accumulateurs.

Pour démarrer, les circuits inducteurs de la commutatrice sont ouverts, et l'interrupteur tripolaire disposé pour n'envoyer aux bagues de la commutatrice qu'une partie de la tension totale produite par les transformateurs (fig. 12).

Lorsque la commutatrice est démarrée, on relève successivement les trois interrupteurs de façon à mettre la tension totale sur la commutatrice, et on supprime les bobines correspondantes du compensateur de démarrage qui s'opère avec un courant égal à la moitié du courant de pleine charge. La commutatrice amenée au voisinage du synchronisme s'accorde elle-même. Il suffit alors de fermer l'interrupteur de sectionnement des inducteurs et régler l'excitation par le rhéostat de champ.

Le petit moteur à courant continu, actionnant le ventilateur des transformateurs, est mis en marche à l'aide d'un rhéostat de démarrage à relais représenté figure 43.

Démarrage des commutatrices Alioth. — La SOCIÉTÉ D'APPLICATIONS INDUSTRIELLES (Procédés ALIOU ET Cie, de Bâle), exposait deux commutatrices, l'une diphasée de 300 kw, éclairant l'Esplanade des Invalides, l'autre hexaphasée, de 300 kw éclairant le Grand Palais.

La commutatrice de 200 kw était alimentée par deux transformateurs à courants alternatifs simples. Le démarrage se faisait par le courant continu, à l'aide d'un moteur asynchrone à courants diphasés alimenté par des transformateurs et accouplé directement à une génératrice à courant continu, par un manchon élastique. La commutatrice relevée à ce générateur démarre ce courant continu et elle est reliée aux courants diphasés comme moteur synchrone, dès que le synchronisme et la concordance des deux phases sont obtenus.

La commutatrice de 200 kw démarre de même par le courant d'une petite génératrice à 500 volts, accouplée directement à un moteur asynchrone à courants triphasés.

La maison SIEMENS ET HALSKE, de Vienne, fait démarrer la commutatrice exposée à l'aide d'un petit moteur asynchrone disposé en bout d'arbre de cette commutatrice et ayant deux pôles de moins que celle-ci. On peut donc facilement atteindre graduellement le synchronisme et le maintenir en introduisant des résistances variables dans le rotor. Ce moteur asynchrone est de faible puissance, car il ne doit que démarrer la commutatrice à vide, et son régime peut être forcé, car il ne travaille que quelques instants à chaque démarrage.

Démarrage des groupes moteur-générateur de la plate-forme mobile. — La plate-forme mobile de l'Exposition était actionnée par des moteurs série à courant continu, alimentés par de puissantes génératrices à potentiel constant, mues elles-mêmes par des moteurs asynchrones à cage d'écureuil de la SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE D'ÉLECTRICITÉ (Procédés WESTINGHOUSE), à 25 périodes par seconde, provenant de l'usine des Moulineaux.

Le démarrage de ce groupe moteur-générateur était fait d'une façon toute spéciale, la sous-station ne possédant pas de batterie d'accumulateurs. Pour effectuer ce démarrage, le poste de transformation disposait d'une commutatrice que l'on aménageait au synchronisme en l'actionnant par un moteur asynchrone ayant deux pôles de moins, ce qui permet d'amener la commutatrice à une vitesse un peu supérieure à celle du synchronisme. On supprime le courant alternatif, et on laisse tomber la vitesse jusqu'au synchronisme et à la coïncidence de phases que l'on constate avec un indicateur de phases relié à la commutatrice, d'une part, et aux transformateurs du réseau à haute tension, d'autre part. On couple au moment opportun, et la commutatrice produit alors un courant continu que l'on envoie dans la génératrice actionnée par le moteur asynchrone à cage d'écureuil, dont l'inducteur stator est isolé. Lorsque le moteur asynchrone a atteint la vitesse angulaire correspondant au synchronisme, vitesse que l'on observe à l'aide d'un tachymètre, on relie l'inducteur du moteur asynchrone au réseau. A partir de ce moment, le

moteur asynchrone actionne la dynamo à courant continu que l'on sépare de la commutatrice, et la dynamo ainsi lancée est prête à faire fonctionner la plate-forme mobile.

Démarrage de la plate-forme. — Le démarrage de cette plate-forme présente des particularités intéressantes. La dynamo tournant à vitesse angulaire constante sous l'action du moteur asynchrone, on ferme le circuit des moteurs sur la dynamo non excitée et on excite progressivement cette dynamo pendant qu'un électricien manœuvre les balais pour ne pas avoir d'éteintes. On arrive ainsi à produire le démarrage avec 200 volts seulement et un courant de 800 ampères, soit 160 kilowatts, alors que la plate-forme en dépense normalement environ 200. Le démarrage se produit donc avec une puissance *plus faible* que la puissance normale. Ce fait, paradoxal en apparence, est dû à ce que le démarrage se produit sans résistances intercalées autres que les résistances d'excitation. Une fois la plate-forme lancée, on continue à augmenter l'excitation jusqu'à ce que la différence de potentiel aux bornes de la dynamo atteigne environ 500 volts.

L'inertie de la plate-forme lancée à pleine vitesse est telle que son mouvement se continue pendant environ 54 à 55 secondes après l'interruption du courant qui l'actionne.

L'induit du moteur à courant triphasé et celui de la dynamo qu'il actionne tournent pendant 10 minutes après l'interruption du courant moteur et du courant d'excitation.

L'emploi d'un moteur à cage d'écureuil présentant un faible glissement se justifie, dans l'espèce, par la nécessité d'avoir une vitesse aussi uniforme que possible, malgré les variations accidentelles de la puissance absorbée par la plate-forme et le chemin de fer électrique. Un moteur synchrone aurait décroché un premier obstacle, une commutatrice également, tandis qu'un moteur asynchrone donne un coup de collier, ralentit, mais ne décroche pas, à moins que la résistance dure assez longtemps pour amener un abaissement très notable de la vitesse angulaire.

EXEMPLES D'INSTALLATIONS

En dehors des installations spéciales au service de l'Exposition et que nous décrivons plus loin, il y avait peu d'exemples d'installations de transport d'énergie. Nous n'avons remarqué, à ce point de vue, que la description, avec dessins et graphiques, des *Usines de la Vézère*, et les *Installations suisses*.

Société des Forces motrices et Usines électriques de la Vézère. — LA SOCIÉTÉ DES FORCES MOTRICES ET USINES ÉLECTRIQUES DE LA VÉZÈRE a exposé un tableau donnant quelques détails de l'installation de l'usine qu'elle installe sur la Vézère au lieu dit le Saut-du-Saumon (Corrèze) et indiquant le mode d'établissement de la ligne aérienne de transport d'énergie électrique alors en construction pour relier cette usine à la ville de Limoges, distante de 78 km.

Usine. — En aval de l'usine sont construits deux bâtiments destinés à recevoir les transformateurs et à servir de logement au directeur de l'exploitation.

Les eaux de la Vézère sont amenées à l'usine par un canal de dérivation à ciel ouvert construit à flanc de coteau dans le rocher granitique : la longueur du canal est d'environ 1 200 m, et la chute utile est de 43 m.

L'usine est aménagée pour recevoir sept turbines à axe horizontal de 600 chevaux, actionnant des alternateurs devant fournir du courant triphasé, et deux turbines de 100 chevaux commandant deux dynamos à courant continu, destinées à produire le courant nécessaire à l'excitation des alternateurs et à l'éclairage de l'usine.

Le courant est produit par les alternateurs sous la forme de courant triphasé à la tension de 8 000 volts (tension composée) à la fréquence de 50 périodes par seconde. Une partie de la production de l'usine destinée à être envoyée à Limoges est amenée à des transformateurs qui élèvent sa tension à 20 000 volts, tension adoptée en ligne.

Ligne de transport. — La ligne, dont le développement atteint 78 km, est prévue pour une tension de 20 000 volts et une puissance de 750 kw à recueillir à Limoges.

À la station réceptrice de Limoges, des transformateurs ramènent cette tension à 3 000 volts et envoient directement l'énergie dans le réseau de distribution. Toutefois l'installation a été prévue dans des conditions telles que, malgré la distance, on puisse accoupler les machines électriques de l'usine à vapeur de Limoges avec celles de l'usine du Saut-du-Saumon, afin d'alimenter le réseau de distribution simultanément par les deux usines marchant en parallèle.

Eu égard aux conditions particulières dans lesquelles se trouve la ligne, vu sa longueur et la tension adoptée, la Société a dû étudier un dispositif d'équipement des poteaux donnant toute facilité pour la pose et l'entretien de la ligne, en même temps qu'il assurait la sécurité de l'exploitation. De plus, ce dispositif devait être susceptible de subir certaines modifications permettant d'intercaler dans la ligne les appareils de sécurité reconnus nécessaires, sans qu'on fût obligé de changer l'aspect et la composition des ossatures prévues.

Équipement des poteaux. — Les conducteurs, formés chacun d'un câble en cuivre de 30 mm² de section, sont disposés symétriquement par rapport aux poteaux, aux trois sommets d'un triangle équilatéral de 1 m de côté. Ils reposent sur des isolateurs en porcelaine à triple cloche en forme d'ombrelle ayant 24 cm de diamètre à la base. Les tiges métalliques scellées dans ces isolateurs sont fixées sur une ossature en forme de T renversé, dont la branche verticale appliquée contre le poteau est maintenue par deux boulons. Un isolateur est fixé sur l'extrémité de la branche verticale; les deux autres sont supportés par la branche horizontale.

Mesures de sécurité. — La partie inférieure de cette ossature porte deux bras parallèles à la direction de la ligne, destinés à recevoir deux fils de fer tendus perpendiculairement à la ligne et disposés à 30 cm de chaque côté du poteau. Ces fils de fer constituent un filet partiel destiné à assurer la mise à la terre des fils de la ligne en cas de rupture de l'un d'eux.

De plus, des montants verticaux placés aux extrémités de la traverse de support des cloches inférieures s'opposent à la chute des conducteurs sur le sol, dans le cas où une ligature venant à céder, ils échapperaient des isolateurs.

Toute la charpente métallique formant paratonnerre pour le poteau est mise à la terre par un fil de fer de 6 mm relié à une plaque de métal de 0,25 m² noyée de 1 m dans le sol.

Dans la traversée des lieux habités et au droit des maisons rencontrées sur les routes, le dispositif de protection est complété par l'adjonction d'un filet continu tendu sous la ligne. Ce filet, mis à la terre à ses extrémités par l'intermédiaire des armatures sur lesquelles il s'attache, se compose de fils de fer disposés en forme de cuve et réunis transversalement par des fils, de même diamètre. Ils sont fixés à leurs extrémités sur la traverse inférieure de l'armature.

Chaque poteau porte en outre une garde en ronce artificielle à 2 m au-dessus du sol; de plus, il est muni d'un écritau avertissant le public du danger qu'il y a de toucher aux fils, même quand ils sont à terre.

Parafoudres. — À l'entrée et à la sortie de chaque village et dans le parcours, à des distances d'environ 2 km, sont prévus des parafoudres reliés successivement aux trois conducteurs de la ligne.

Ces parafoudres, du type Siemens, sont montés sur des isolateurs du même type que ceux de la ligne et situés à une hauteur permettant aux parties sous tension de rester hors des atteintes des passants. Ces parafoudres sont placés au sommet des poteaux, et le type courant n'a été modifié que par l'adjonction à la partie supérieure d'une pièce spéciale en forme de T. Sur la branche du T parallèle à la ligne sont fixées les cloches supportant le parafoudre : l'un des pôles est relié à l'un des fils de la ligne, l'autre est relié à l'armature métallique et mis ainsi en communication avec le sol.

Les plaques de terre des poteaux portant des parafoudres sont noyées dans une couche de charbon de bois pour assurer une bonne mise à la terre.

Interrupteurs. — Afin de permettre l'isolement complet d'un tronçon de ligne en cas d'accident, et pour faciliter le contrôle, la ligne est divisée en sections d'environ 3 km par des postes d'interrupteurs.

Ces appareils, montés sur des isolateurs du même type que ceux de la ligne, sont disposés

de telle sorte que l'interruption se fasse rapidement et que l'extinction de l'arc s'effectue d'une manière sûre. Un modèle de ces interrupteurs, dont le bâti a dû être modifié, comme l'indique le tableau, pour permettre de l'intercaler dans la ligne aérienne, était exposé par la **COMPAGNIE GÉNÉRALE D'ÉLECTRICITÉ DE CREIL**, chargée de leur construction.

De part et d'autre des interrupteurs, la ligne est arrêtée et les poteaux, espacés de 2,5 m qui encadrent ces appareils, portent des cloches d'arrêt. Les conducteurs sont fixés sur ces isolateurs par l'intermédiaire de colliers spéciaux en bronze, qui sont reliés par un fil souple aux phases de l'interrupteur.

L'appareil repose sur deux pièces en bois disposées parallèlement à la direction de la ligne et boulonnées sur les branches inférieures des armatures fixées sur les poteaux. Il se manœuvre du sol à l'aide d'un levier disposé à poste fixe. Ce levier, parfaitement isolé des parties sous tension, permet de couper les trois phases simultanément. La poignée de ce levier est enfermée dans une boîte métallique mise à la terre. Cette boîte fixée au poteau et soigneusement fermée, est disposée de telle sorte qu'on ne puisse manœuvrer le levier qu'après que la porte a été ouverte.

Installations suisses. — La Suisse a eu l'heureuse idée de remplir le salon d'honneur qui lui était réservé, au premier étage du *Palais de l'Électricité*, en y réunissant une magnifique collection de dessins à grande échelle montrant, sous une forme instructive et frappante, les progrès et la diversité des installations électriques de ce pays. M. le professeur F. PRASHI, de l'École polytechnique, s'était chargé de la direction des travaux relatifs aux installations hydrauliques. M. le professeur STRADOLY, de ce qui est relatif aux usines à vapeur, et le professeur WYSSLING de la partie électrique, ainsi que les dispositions de l'Exposition en particulier. M. E. MAYER, architecte à Paris, fut donner à l'ensemble un cadre décoratif très frappant.

Les établissements suivants étaient représentés sur 14 grands panneaux :

Usines électriques des villes de Zurich, Genève, Rheinfelden (pour la partie suisse), Hagnéck, Rathausen, la Kander, Berne et le chemin de fer électrique Berthoud-Thoune ; Installation électrique du chemin de fer de la Jungfrau ; usine électrique des Clées près Yverdon ; usine électrique de Combe-Garot et autre de la Chaux-de-Fonds et du Locle ; usine électrique Waser-Höngg.

Autour de chaque ou de plusieurs coupes principales, coloriées et exécutées à grande échelle, des usines en question, avec tous leurs détails de construction, étaient groupés les plans explicatifs ayant trait aux divisions et à la répartition, les plans des conduites dressés sur une échelle uniforme, les schémas de distribution, ainsi que de nombreuses vues, considérablement agrandies par la photographie. On a voulu par là fournir une reproduction aussi complète et harmonique que possible des stations typiques. On avait joint un certain nombre de vues d'autres usines connexes, ainsi que des reliefs d'installations hydrauliques pour forces motrices, telles que les turbines et générateurs électriques de la ville de Genève.

Une carte Dufour de la Suisse, établie au point de vue électrique par M. le professeur WYSSLING, occupant le centre, avait pour but d'illustrer l'extension que cette industrie a prise en Suisse.

L'ensemble couvrait environ 230 m² de la superficie murale employée et comprenait à peu près 230 dessins et agrandissements photographiques. Les maisons suivantes y avaient participé et en partagèrent les frais en commun avec le Commissariat général, tandis que la ville de Genève avait pris elle-même à sa charge l'établissement de ses propres reliefs :

BELL ET C^{ie}, Kriens ; BROWN, BOVERI ET C^{ie}, Baden : COMPAGNIE DE L'INDUSTRIE ÉLECTRIQUE, Genève ; ESCHER WYSS ET C^{ie}, Zurich ; SULZER FRÈRES, Winterthur ; FABRIQUE DE LOCOMOTIVES, Winterthur ; FABRIQUE DE MACHINES, Oerlikon ; PICARD-PICTET ET C^{ie}, Genève ; RIETER ET C^{ie}, Winterthur.

B. — TRANSPORT PAR COURANT CONTINU A INTENSITE CONSTANTE

C'est en mai 1890 que le système de transport et de distribution en série a été appliqué pour la première fois par M. RENÉ THURY, de Genève, à Gênes, sur un circuit de 48 km de développement et pour une puissance de 110 kilowatts. Depuis, le système s'est développé, et un grand nombre d'installations existent actuellement en Suisse, en France et en Italie ; mais, et c'est là un fait digne de remarque, il n'existe qu'une seule société, la COMPAGNIE L'INDUSTRIE ÉLECTRIQUE, de Genève, qui exploite ce système.

Principe. — La distribution, dans le système série, est formée d'un circuit formé parcouru par un courant continu d'intensité constante, dans lequel les génératrices qui produisent l'énergie électrique sont intercalées avec les moteurs qui l'utilisent, la différence de potentiel produite variant proportionnellement à la puissance utilisée.

Dans la marche à vide, le courant d'intensité constante a comme différence de potentiel la tension nécessaire pour vaincre la résistance du circuit lui-même, dont tous les moteurs sont alors exclus ; cette différence de potentiel augmente avec le nombre et la charge des moteurs mis en circuit. Les génératrices ont ainsi à fournir un courant d'intensité constante et une tension proportionnelle à la puissance à transmettre. La station génératrice effectue le réglage des dynamos, de manière à maintenir l'intensité du courant constante dans la ligne, quelle que soit la différence de potentiel absorbé par les appareils d'utilisation.

Pour que les moteurs puissent fonctionner pratiquement, au moyen d'un courant d'intensité constante, l'unique condition à réaliser est que la constance de leur vitesse soit maintenue automatiquement, d'une manière indépendante des variations de puissance, c'est-à-dire qu'ils soient disposés de telle sorte que la différence de potentiel entre bornes varie proportionnellement à la puissance à fournir.

Les avantages invoqués en faveur de ce système sont les suivants :

Le système série permet la production et l'utilisation des plus hautes tensions sans aucune transformation, c'est-à-dire sans les dépenses en capital et en courant que les transformations provoquent.

La haute tension est produite directement par des génératrices de tension moyenne auto-excitatriees, dont le rendement est égal, à conditions égales de puissance, à celui des alternateurs de puissance égale.

La production de courants de très hautes tensions, avec le système série, réalise l'économie complète de la perte due à la première transformation, toutes les fois que la force électromotrice nécessaire dépasse celle qui peut pratiquement être produite par les machines génératrices.

La ligne comporte avantageusement des conducteurs de la section totale nécessaire, puisqu'il n'y a pas à tenir compte de l'induction et de ses effets, et, par ce fait, la transmission par courants continus peut être réalisée, à section de cuivre égale, avec une perte de 15 à 20 pour 100 inférieure à celle qui serait provoquée dans une ligne inductive.

Les moteurs sont de simples moteurs à courant continu, excités en série et bobinés à basse ou moyenne tension, dont le rendement n'est pas altéré par leur montage en série. Le fait de leur alimentation directe par la ligne supprime la perte de la transformation.

Le rendement est maximum pendant les coups de collier, précisément quand cela est le plus utile ; aux faibles charges, son abaissement ne joue plus qu'un rôle secondaire, car il y a toujours un excès de puissance disponible.

La perte en ligne constante, à toutes les charges, ne présente pas d'inconvénient : si la force motrice hydraulique disponible est très limitée, à certaines époques de l'année, il suffit de se réservier la possibilité de réduire l'intensité, suivant les besoins, pour conserver toujours le même rendement élevé. La puissance de chaque moteur est alors réduite proportionnellement, ce qui fait que la force motrice est toujours également répartie à chacun des abonnés. Si l'un

des moteurs doit nécessairement pouvoir donner sa pleine puissance en toute saison, il est alors établi avec la marge nécessaire, obtenu par un enroulement spécial de l'inducteur à plus grand nombre de spires. C'est dans ce cas, comme en général, le régulateur de vitesse qui règle automatiquement la valeur du champ, suivant les besoins, que ce soit l'intensité ou la puissance qui varie.

Lorsque la force motrice est momentanément limitée par manque d'eau, la distribution en série, loin d'être défavorable, présente au contraire un avantage marqué sur les distributions à potentiel constant, qui réside dans le fait que tout moteur surchargé, loin de nuire à la bonne marche et au bon rendement de la distribution utilise en conséquence une intensité plus élevée. Les pertes en ligne augmentent, ainsi que celles des génératrices et de tous les moteurs, et le rendement s'abaisse parfois au point que toute la distribution est troublée profondément, aussitôt que la force motrice génératrice fait quelque peu défaut.

Dans une distribution série, le rendement augmente du fait de la surcharge et de l'abaissement de l'intensité qui en résulte, et chaque moteur surchargé, loin de troubler la distribution, l'améliore ; dans les mêmes circonstances, le rendement d'une distribution à potentiel constant s'abaisse et chaque moteur surchargé ne fonctionne qu'au détriment des autres et peut même provoquer un trouble général.

L'usine génératrice à courant continu d'intensité constante comprend plusieurs dynamos couplées en tension. La force électromotrice totale à créer se répartit entre ces diverses machines ; chaque dynamo sera construite pour pouvoir fournir la tension correspondant à sa puissance et à l'intensité admise.

Le fonctionnement prolongé d'installations exécutées a montré qu'on peut atteindre avec le courant continu, d'une manière absolument industrielle, jusqu'à 3 500 volts par génératrice.

La limite de tension pratiquement réalisable avec le système série est donc celle qu'opposent les difficultés d'isolement des lignes, les difficultés de production n'existant pas.

Simplicité excessive de l'appareillage accessoire, absence complète de tableaux généraux parcourus par les courants à haute tension, facilité avec laquelle s'effectue la mise en service ou hors service des génératrices du réglage.

La ligne série est formée d'un conducteur de section constante et peut être exécutée de manière à n'avoir qu'un seul pôle sur le même support. Si les deux pôles sont sur les mêmes poteaux, il est toujours facile de les placer à une distance suffisante pour éviter absolument les dangers des courts-circuits.

Le nombre de conducteurs étant limité d'une manière générale à deux, il est facile de prendre les plus grandes précautions au point de vue de l'isolement.

L'exploitation peut être faite par un personnel non technique recruté dans le pays même. Cette facilité d'exploitation tient, pour une bonne part, à la simplicité des manœuvres qui permettent la suppression complète du tableau général, remplacé par des tableaux partiels placés à proximité des machines, et dont le seul appareil de manœuvre est un interrupteur.

La mise en service d'un générateur s'opère en ouvrant le distributeur de la turbine jusqu'à ce que la génératrice, auto-excitée en court-circuit, produise l'intensité normale : l'interrupteur est alors ouvert et la machine se trouve sans autre insérée sur le réseau, sans aucune étincelle ni à-coup. La charge se répartit au degré voulu, en ouvrant plus ou moins le distributeur de la turbine, puis c'est au régulateur automatique à agir.

Pour retirer une génératrice du circuit, il suffit d'arrêter la turbine qui l'actionne, et une fois l'arrêt du groupe effectué, de fermer l'interrupteur de court-circuit. Les manœuvres sont donc simples et d'ordre purement mécanique ; il n'y a ni rhéostat à ajuster, ni mise en phase à effectuer, ni régulateur de turbine à surveiller.

Pour la mise en marche d'un moteur, il n'y a qu'un seul interrupteur pour tout appareil de manœuvre. Cet interrupteur rompt le court-circuit établi entre les deux bornes du moteur : celui-ci, parcouru dès lors par le courant, se met en marche graduellement jusqu'à ce que la vitesse normale soit atteinte. Le régulateur entre alors en jeu et maintient la vitesse angulaire constante.

Dans une distribution en série, il y a une grande unité dans les appareils employés du fait que le courant a partout la même intensité. Cette unité est un avantage incontestable dans un service d'exploitation, à tous les points de vue. L'appareillage, toujours le même, se compose donc au total d'un interrupteur de modèle unique, d'un by-pass, d'un ampèremètre et d'un voltmètre. Ces deux appareils de contrôle peuvent être supprimés et remplacés par de simples bornes permettant leur installation en cas de besoin momentané.

Les pertes de charge des lignes n'ont aucune influence sur le fonctionnement des réceptrices, puisque ce fonctionnement ne dépend que de l'intensité du courant et que, dans un circuit quelconque, bien isolé, l'intensité du courant est la même dans toutes ses parties. La perte en ligne, loin de nuire au fonctionnement général, lui est, au contraire, d'autant plus favorable qu'elle est plus forte, car les variations de tension causées par la marche des moteurs deviennent une fraction d'autant plus faible de la tension totale que celle-ci est elle-même plus élevée.

Le système série permet de grouper sur un seul circuit d'utilisation plusieurs forces motrices distinctes, ou encore de grouper en un seul circuit général plusieurs circuits rayonnant d'une station centrale, afin que l'une quelconque des machines génératrices puisse servir à alimenter sans manœuvres spéciales tous les circuits.

Pour éviter que la somme des forces électromotrices en jeu conduise à une tension trop élevée et conserver l'avantage du groupement en un seul circuit, il suffit de n'intercaler ordinairement, entre les points de départ et d'arrivée de chaque circuit de distribution, que le nombre de génératrices nécessaires en moyenne pour l'alimenter, de telle sorte qu'entre une production de force électromotrice donnée et une autre production il y ait utilisation d'une force électromotrice à peu près équivalente.

Un centre d'utilisation peut aussi être alimenté par une série de forces motrices situées dans des directions et à des distances variées, et la différence de potentiel la plus élevée vis-à-vis du sol ne sera alors que celle du circuit alimentaire le plus chargé et non pas les tensions additionnées de différents groupes de génératrices.

Disposition du système série. -- Les deux particularités de la distribution en série sont le réglage du courant primaire et celui de la vitesse des moteurs.

Les moteurs à intensité constante ont, par eux-mêmes, une marche instable et ne peuvent être utilisés sans réglage qu'à un nombre d'applications limité, dans lesquelles ils ont à vaincre un couple résistant constant : ventilateurs, pompes à piston, pompes centrifuges, dynamos pour éclairage public à intensité constante, etc. Lorsque le couple résistant est variable, la vitesse peut encore être maintenue constante, mais il faut alors recourir à des dispositions de réglage automatique.

Réglage de l'intensité constante du courant primaire. — En pratique, le réglage des génératrices peut s'opérer de deux manières différentes, si les moteurs qui actionnent les génératrices doivent nécessairement fonctionner à vitesse constante ou si leur vitesse peut sans inconvénient être variable.

a. GÉNÉRATRICES ACTIONNÉES À VITESSE CONSTANTE. — Le réglage des machines génératrices actionnées à vitesse constante peut s'opérer par variations du champ : variations qui peuvent se produire, avec une génératrice à excitation indépendante, par les variations convenables du courant d'excitation, ou, pour des machines génératrices auto-excitatrices, par le réglage du champ au moyen de rhéostats shunt.

Si les machines génératrices sont à excitation indépendante, le réglage consiste à varier automatiquement leur excitation de manière à faire monter ou baisser la tension dans la proportion voulue. Le service est assuré alors par une ou plusieurs excitatrices, commandées par des moteurs spéciaux, dont un régulateur automatique d'intensité provoque les variations de puissance nécessaires au réglage.

Une autre disposition consiste dans un réglage combiné, permettant le réglage indépen-

dant et direct de chacune des unités génératrices, qui agit à la fois ou séparément sur le champ magnétique et sur le calage des balais (*fig. 14*).

Réglage par variation du champ. -- Ce moyen a été employé en premier lieu au réglage automatique, appliqué à l'usine génératrice Volta, à Gênes : il y a donné les meilleurs résultats sous le rapport de la précision.

Le réglage est obtenu de la façon la plus simple, sans rhéostats, en faisant varier la puissance de l'excitatrice au moyen du régulateur d'intensité.

L'usine Volta comporte dans son ensemble 8 unités génératrices couplées en tension, dont les inducteurs sont branchés en parallèle sur les pôles de l'excitatrice. Chaque turbine est

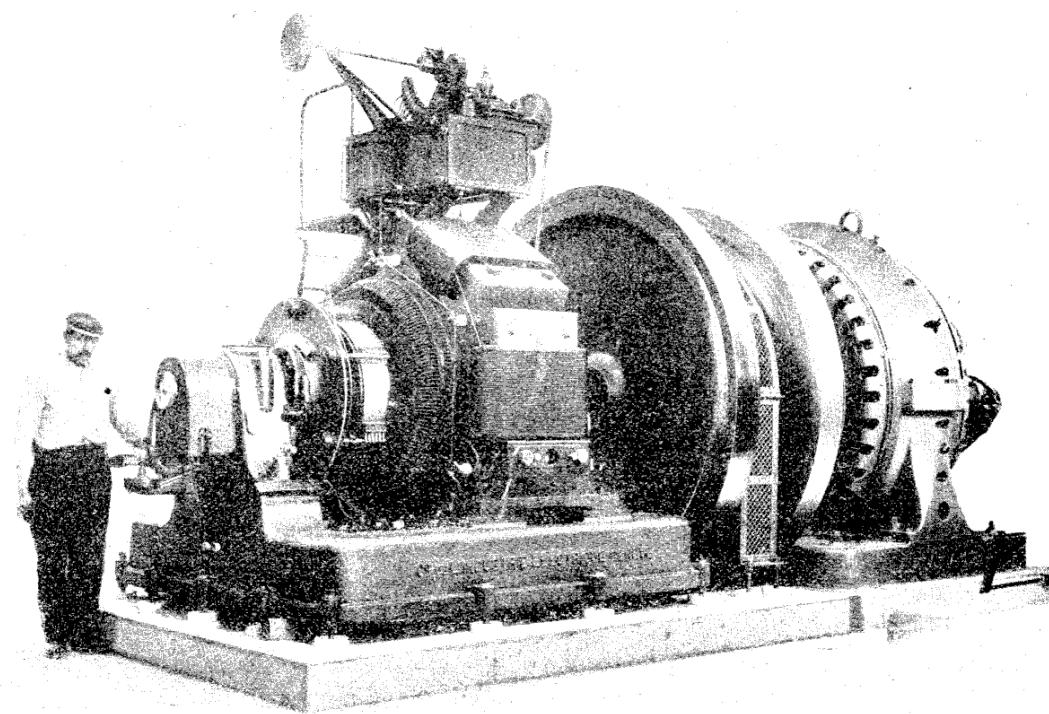


Fig. 14. — Dynamo Thury pour distribution à intensité constante. -- Réglage par variation d'excitation et décalage des balais.

munie d'un régulateur de vitesse très sensible dont le fonctionnement est facilité par deux forts volants qui servent en même temps de manchons d'accouplement.

Le service d'excitation est assuré par une excitatrice actionnée directement par une turbine à servo-moteur hydraulique.

La turbine excitatrice n'a pas de volant; le manchon d'accouplement est lui-même très léger, ainsi que la roue-turbine, qui n'a pas plus de 30 cm de diamètre, de telle sorte que l'énergie cinétique du système est très réduite.

Le régulateur de vitesse de cette turbine a été transformé en ce sens que le pendule conique a été remplacé par un fort cylindre en fer doux, du poids de 20 kg environ, tenu en équilibre par un solénoïde vertical parcouru par le courant primaire qu'il s'agit de régler.

Le fonctionnement se comprend de suite : si le courant dépasse la valeur normale, le noyau aspiré par le solénoïde agit sur le servo-moteur hydraulique dans le sens de la fermeture de la turbine : celle-ci ralentit, l'excitation baisse dès lors, et le courant primaire diminuant, reprend sa valeur normale. L'inverse se produit lorsque le courant primaire descend en dessous de sa valeur.

Pour assurer la parfaite mobilité du régulateur et son obéissance immédiate aux plus petites variations de courant, le cylindre de fer doux, ainsi que la petite soupape de distribution du servomoteur qu'il actionne, sont mis en rotation par une cordelette entraînée par la turbine elle-même. On a ainsi le mouvement « louvoyant », supprimant tout effort longitudinal dû aux frottements. La précision du réglage est très grande: les variations ne dépassent que rarement 2 pour 100 de la normale en plus ou moins, ce qui est plus que suffisant en pratique.

Le réglage de la station entière s'effectue donc par un seul appareil, quel que soit le nombre de génératrices en service. C'était là un moyen de triompher d'une des plus grandes difficultés de la transmission en série : la force électromotrice peut, en effet, varier dans de grandes proportions dans un espace de temps très court. Sur le circuit de la station Volta, par exemple, lors de l'arrêt d'un moteur de 60 HP, les 1200 volts qu'il empruntait à la ligne deviennent disponibles et l'intensité aurait de ce fait une tendance à augmenter; il faut donc que le régulateur corrige instantanément tout écart, ce qui serait irréalisable si la turbine excitatrice ne suivait pas immédiatement l'action du régulateur.

Ce système était parfaitement à sa place à Gênes, parce que la tension totale du courant ne devait pas dépasser 8 000 volts au plus: si, par contre, elle avait dû dépasser ce chiffre, les difficultés d'isolement des inducteurs auraient pris une importance pratiquement trop grande et y auraient fait renoncer. L'emploi de l'excitation séparée par excitatrice unique présente, en effet, le désavantage de réunir toutes les machines par un fil commun et d'obliger ainsi à isoler les circuits d'excitation pour la tension totale; il n'en est cependant, grâce aux précautions prises, jamais résulté d'accident.

Pour éviter de mauvaises conditions de marche des collecteurs aux faibles charges, il convient de ne laisser en marche que le nombre d'unités nécessaires pour assurer le service avec la marge voulue. Si les règles de construction des dynamos sont observées, le collecteur marche d'une façon irréprochable dès que la charge d'une génératrice atteint le quart de sa normale.

Réglage combiné. — Lorsque la tension doit dépasser 8 000 volts, le réglage par excitation séparée et excitatrice unique cesse d'être pratique, à cause des difficultés croissantes de l'isolement des inducteurs. On peut encore assurer un réglage général satisfaisant, au moyen de l'excitation séparée, mais en ayant soin alors de ne relier à chaque excitatrice que le nombre de génératrices qui correspond à la tension de 8 000 volts au maximum.

Un système qui permette de marcher en toutes circonstances, quelle que soit la puissance des unités génératrices et leur degré de charge, dans les meilleures conditions au point de vue des collecteurs, est cependant préférable.

Dans ce but, le réglage individuel des génératrices a été réalisé en agissant à la fois ou séparément sur le champ magnétique et sur le calage des balais. Pour permettre de marcher, même en complet court-circuit et à vitesse normale, sans étincelles, on met à profit la précieuse qualité des dynamos à courant continu de permettre, en se placant dans des conditions spéciales, de faire varier dans de très grandes limites la tension aux bornes, en décalant plus ou moins la ligne de commutation. La position des balais est, dans ces conditions, tout à fait indifférente au point de vue des étincelles, qui ne se produisent absolument plus.

Le réglage de chaque dynamo devient alors possible en appliquant un régulateur qui combine ainsi le réglage des balais avec le réglage du champ. Le réglage est instantané et peut être effectué dans les plus grandes limites depuis la marche en court-circuit jusqu'à celle au voltage le plus élevé.

En principe, ce système se compose d'un petit régulateur à mouvement mécanique, qui agit séparément sur le champ inducteur et sur le calage des balais et fait partie intégrante de la génératrice.

De la pleine charge aux 3/4 de charge, sur le régulateur n'agit que par le champ au moyen d'un rhéostat shunt. Du 3/4 de charge à la marche à blanc, le régulateur n'agit que par décalage des balais seul, sauf dans quelques cas spéciaux.

Le régulateur lui-même est fort simple: sa marche est entièrement mécanique, c'est-à-

dire que les contacts et relais sont supprimés. Il se compose d'un petit inducteur, parcouru par le courant de ligne, qui actionne une armature très légère; celle-ci, au moyen de deux buttoirs, agit sur un double encliquetage et permet à un renvoi de mettre en mouvement, dans un sens ou dans l'autre, soit la manette mobile du rhéostat de réglage, soit le porte-balais.

Ainsi donc le réglage du courant constant primaire peut être réalisé, dans une station génératrice dont les moteurs marchent à vitesse constante, au moyen de machines auto-régulatrices indépendantes et que l'on peut coupler en tension en nombre indéfini.

b. GÉNÉRATRICES ACTIONNÉES À VITESSES VARIABLES. — Régler l'intensité constante du courant primaire, lorsque les moteurs qui actionnent les génératrices peuvent marcher à vitesse variable, permet la solution la plus simple et la plus généralement employée. On est dispensé alors de toute espèce de réglage électrique; les rhéostats et les excitatrices sont supprimés, et les génératrices série subsistent seules, sans autre appareil de manœuvre qu'un simple interrupteur de court-circuit.

On réalise ce réglage à la main ou automatiquement.

Réglage à la main. — Le réglage à la main suffit souvent, car, en réalité, il se produit un autoréglage qui diminue beaucoup la surveillance. En effet, le couple résistant d'une dynamo excitée en série croît plus vite que le courant produit, parce que le champ inducteur se renforce ou s'affaiblit avec le courant. Si le circuit magnétique est peu saturé, ce couple croît sensiblement comme le carré du courant.

Lorsqu'une génératrice est actionnée par une machine à vapeur marchant sans réglage, c'est-à-dire à pression et détente constantes, le couple moteur de cette machine est constant et indépendant de la vitesse, le courant produit par la dynamo actionnée sera donc forcément d'intensité constante. Lorsque cette intensité tend à augmenter, le couple résistant augmente de même et la machine à vapeur, n'étant pas réglée, ralentit jusqu'au point où l'intensité aura repris sa normale, avec une tension plus faible. L'inverse se produit si l'intensité tend à faiblir: la machine à vapeur augmente de vitesse; le courant reprend dès lors en peu de temps son intensité normale, avec une tension plus élevée. La dépense de vapeur sera dès lors proportionnelle à la puissance extérieure fournie, et la marche sera des plus économiques puisque la détente sera constante à toutes les charges. Cette solution est adoptée pour l'usine à vapeur de la ville du Locle.

Les conditions sont les mêmes pour les turbines, avec cette différence toutefois que le réglage est moins précis, puisque le couple moteur d'une turbine varie avec sa vitesse. Mais, grâce au fait que le couple résistant croît beaucoup plus vite que l'intensité, le réglage approximatif ainsi obtenu suffit le plus souvent, et l'on ne règle à la main que lorsque les variations dépassent certaines limites.

Réglage automatique. — Dans certains cas, pour éviter la nécessité d'une surveillance continue, un réglage automatique est motivé; il peut être réalisé de deux manières différentes :

1^o Réglage simultané ou indépendant de plusieurs unités par un régulateur unique, système qui a été appliqué à la station Paccinotti;

2^o Réglage individuel de chaque unité par autant de régulateurs qu'il y a d'unités régulatrices (ce qui est le cas des distributions d'Aigle et de Zoug).

En principe, dans ces deux cas, les turbines ou moteurs sont pourvus de leurs organes normaux nécessaires au réglage automatique de la vitesse, sauf le pendule, tachymètre, dont l'action est remplacée par celle du régulateur électrique.

Les génératrices sont dans tous les cas auto-excitées en série, ce qui permet un calage fixe des balais et un fonctionnement absolument irréprochable des collecteurs.

Réglage simultané de plusieurs unités. — Pour permettre de régler plusieurs moteurs par un appareil unique, le régulateur doit actionner une transmission légère qui agit sur les servo-moteurs des turbines. Un embrayage permet de placer sous l'influence du régulateur le nombre d'unités nécessaires au bon réglage.

A Gênes, à la station Paccinotti, cette transmission est actionnée, par l'intermédiaire d'en-

grenages, au moyen d'un petit moteur électrique à réversion. Un solénoïde et un relai mettent en marche ce moteur dans un sens ou dans l'autre, suivant les besoins du réglage.

A la Chaux-de-Fonds, cette transmission est tubulaire et montée sur palier à billes. Sa mobilité est telle qu'elle a pu être actionnée directement par une armature, mobile dans un champ inducteur puissant, dont le torque est équilibré par des ressorts appropriés. Ce dispositif très simple donne de bons résultats.

Réglage individuel de chaque unité. — Pour le réglage individuel de chaque groupe, le tachymètre des turbines est remplacé par un cylindre en fer doux, qui constitue le noyau mobile d'un solénoïde parcouru par le courant à régler.

Il importe de déduire, dans la plus grande mesure possible, l'inertie des turbines, des manchons d'accouplement et des armatures des génératrices, qui s'oppose à la rapidité du réglage.

Réglage des moteurs. — A l'arrêt, un moteur est toujours maintenu en court-circuit par son interrupteur. Pour sa mise en marche, il suffit d'ouvrir l'interrupteur. Le courant traverse le moteur, dont la force contre-électromotrice s'élève peu à peu, proportionnellement à l'accélération. Un volant empêche le démarrage trop brusque et facilite l'action du régulateur de vitesse.

Normalement l'arrêt d'un moteur de faible importance se fait en court-circuitant le moteur par son interrupteur. Les moteurs puissants peuvent s'arrêter de même, mais pratiquement on préfère shunter graduellement le champ jusqu'à zéro, par le régulateur de vitesse. La force contre-électromotrice du moteur s'abaisse ainsi peu à peu, et lorsque le voltmètre accuse un abaissement suffisant, on ferme l'interrupteur. La possibilité d'un à-coup sur la ligne est ainsi évitée.

Le réglage de la vitesse peut s'obtenir pratiquement de trois manières principales, applicables suivant la puissance du moteur et ses conditions de fonctionnement :

1^o *Par le réglage du champ*, au moyen de résistance shunt, ou par un déplacement de la ligne des pôles, schéma de l'anneau Gramme. Ces deux moyens de réglage ont été adoptés dès le début pour les moteurs de la distribution de Genève :

2^o *Par déplacement des balais*, système combiné parfois avec le premier, utilisé dans ces conditions pour les moteurs principaux de la distribution de la Chaux-de-Fonds et du Locle :

3^o *Par le montage de couples secondaires en dérivation sur les balais*, système qui n'exige pas le réglage automatique.

RÉGLAGE PAR DÉCALAGE DU CHAMP. — Le réglage par décalage du champ a été adopté pour la plupart des moteurs faisant partie de l'installation de Genève, dont la puissance est supérieure à 25 chevaux. Il a reçu depuis quelques applications, mais a été généralement remplacé par le réglage shunt et par le réglage combiné.

Le schéma d'enroulement de l'inducteur est identiquement le même que celui d'un induit de

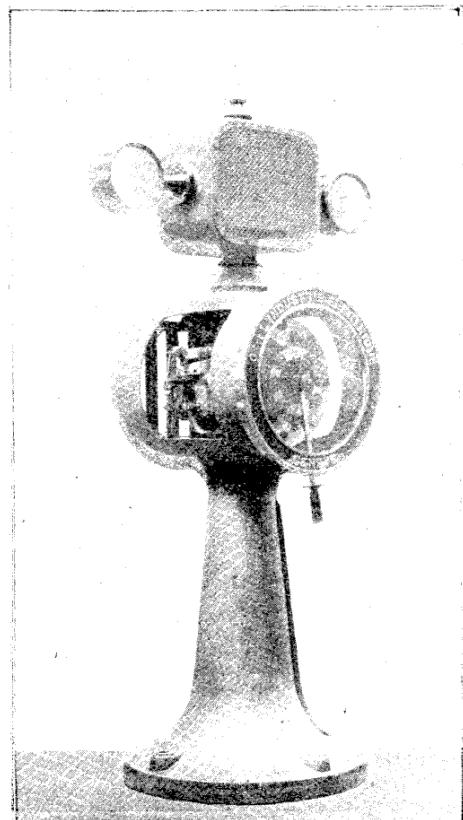


FIG. 15. — Colonne de commande de moteur pour transport de courant d'énergie par courant continu à intensité constante (système Thury) de la Compagnie l'Industrie électrique de Genève.

dynamo muni de son collecteur (Voir fig. 16). Le courant se bifurque en deux séries parallèles, subdivisées elles-mêmes en sections réunies entre elles, qui aboutissent à un collecteur sur lequel glissent deux contacts actionnés par le régulateur de vitesse. A une position déterminée, correspond le maximum de puissance du moteur; dans la position opposée, le courant circule le sens normal dans la moitié des spires, en sens inverse dans l'autre moitié; il en résulte dans l'annulation complète du champ, correspondant à la marche à blanc; entre ces deux positions extrêmes on admet un certain nombre de positions intermédiaires.

Le régulateur est ordinairement établi pour permettre le fonctionnement du moteur seulement en charge; on peut cependant, par ce procédé, produire l'inversion totale du champ et par conséquent le renversement du sens de rotation du moteur ou sa marche en frein.

RÉGLAGE PAR SHUNTING DE L'INDUCTEUR. — Le réglage par résistance shunt est le plus employé; mais il ne peut s'appliquer avantageusement à des moteurs de plus de 60 à 100 chevaux, à cause de l'entretien du collecteur, et cela spécialement lorsque les moteurs sont appelés à fonctionner souvent à vide.

Cette difficulté d'entretien n'existe pas pour les petits moteurs, parce que les différences de forces électromotrices entre les sections du collecteur sont négligeables. Le réglage s'opère alors par un shunting automatique des inducteurs, qui proportionne le couple moteur au couple résistant. Une marge suffisante dans l'excitation permet aux moteurs de vaincre les à-coups momentanés.

Les moteurs ont leur armature toujours traversée par le courant total. L'inducteur, shunté par une résistance variable, n'est traversé que par le courant d'excitation nécessaire pour la production du champ correspondant à la puissance du moteur.

Pour la marche à blanc, l'inducteur est shunté par un court-circuit complet. L'induction est presque nulle, et le nombre de volts absorbés est celui nécessaire pour vaincre la résistance ohmique de l'armature (environ 25 pour 100)

qui s'ajoute aux pertes par frottement des coussinets et par la résistance de l'air. La dépense par hystéresis et courants de Foucault est alors négligeable, à cause de l'extrême faiblesse du champ qui n'absorbe aucun travail. Le rendement du moteur reste ainsi toujours élevé et insensiblement le même à toutes les allures.

Aussitôt que l'on charge le moteur, le régulateur proportionne le courant d'excitation au couple moteur; la dépense d'excitation augmente, ainsi que les pertes par hystéresis et courant parasites.

Ce genre de réglage présente une difficulté, identiquement la même que celle que l'on éprouve dans le réglage de turbines installées à l'extrême de longues conduites. L'inertie de l'inducteur, comme celle de l'eau dans la conduite, cause un retard d'action qui tend à provoquer l'amorçage de périodes, c'est-à-dire de successions ininterrompues d'augmentation et de ralentissement de la vitesse. Cette difficulté a été levée par l'adoption d'un dispositif spécial, appliquée à l'asservissement du régulateur, qui consiste à employer un pourcentage suffisamment élevé, mais seulement momentanément.

On appelle pourcentage d'un régulateur la différence permanente entre la vitesse qu'il maintient à blanc et celle qu'il maintient à pleine charge. Plus cette différence est grande, plus le

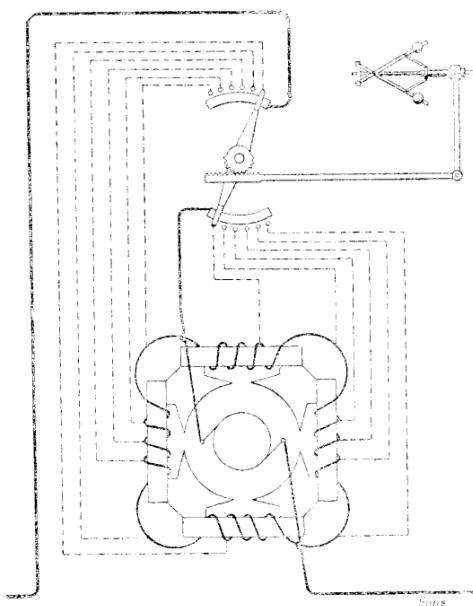


Fig. 16. — Réglage des moteurs par action sur l'enroulement des inducteurs.

régulateur est stable : mais comme, d'autre part, cette différence de vitesse est souvent un inconvénient, il y a lieu de chercher à l'annuler tout en conservant l'avantage de la stabilité de marche. Ce résultat a été obtenu au moyen d'un ressort additionnel dont une extrémité est attachée à la douille du pendule conique et l'autre est fixée, par l'intermédiaire d'une pompe à huile, sur un levier entraîné par le curseur mobile. Ce ressort est réglé de telle sorte qu'il ajoute plus ou moins sa tension à l'effort du tachymètre, créant ainsi le pourcentage recherché. Mais comme la fixation du ressort au levier est faite par l'intermédiaire d'une pompe à huile, celle-ci cède peu à peu, et le ressort reprend sa tension primitive. C'est ainsi qu'il a été possible de concilier une parfaite stabilité de marche avec une vitesse constante, quelle que soit la charge.

SHUNTAGE DES INDUCTEURS COMBINÉ AVEC DÉCALAGE DES BALAIS. — Ce mode de réglage s'applique surtout aux moteurs d'une puissance supérieure à 100 chevaux: son fonctionnement est irréprochable à vide, comme à pleine charge. La combinaison du décalage des balais avec le réglage des résistances shunt permet d'utiliser la pleine capacité des dynamos et leur donne l'élasticité nécessaire pour franchir les coups de collier sans ralentissement.

Le réglage automatique est obtenu par un tachymètre système Thury, agissant sur un double encliquetage qui commande le curseur du rhéostat shunt et en même temps le plateau porte-balais. Lorsque le décalage des balais produit par le régulateur correspond à la position normale de pleine charge, il s'arrête, et le réglage s'achève par le curseur du rhéostat seul, qui n'agit que lors des coups de collier pour permettre la surexcitation de l'inducteur (fig. 47).

RÉGLAGE PAR COUPLES SECONDAIRES. —

L'abonné qui a besoin d'une puissance moyenne de 5 chevaux, par exemple, mais qui possède des outils absorbant momentanément le double ou le triple de cette puissance, peut se munir d'un moteur de 10 ou 15 chevaux et ne s'abonner que pour 5 seulement. L'entreprise sera de son côté assurée que la puissance maxima empruntée à la ligne et à laquelle l'abonné a droit ne sera jamais dépassée.

PROPRIÉTÉS SPÉCIALES DES MOTEURS SÉRIE A INTENSITÉ CONSTANTE. — Les moteurs série ont comme propriétés caractéristiques, d'avoir un couple moteur indépendant de la vitesse; la différence de tension nécessaire à leur fonctionnement est égale à une constante représentée par leur résistance intérieure, à laquelle s'ajoute la force électromotrice du moteur, proportionnelle au nombre de tours.

Leur sens de rotation peut être inversé en passant par la marche à blanc et tous les degrés intermédiaires, sans rupture de courant ; comme conséquence immédiate de ce fait, ils peuvent fonctionner en génératrices et passer ainsi brusquement ou graduellement de la marche en moteur à la marche en frein, restituant de l'énergie électrique à la ligne primaire jusqu'à concurrence de leur pleine puissance.

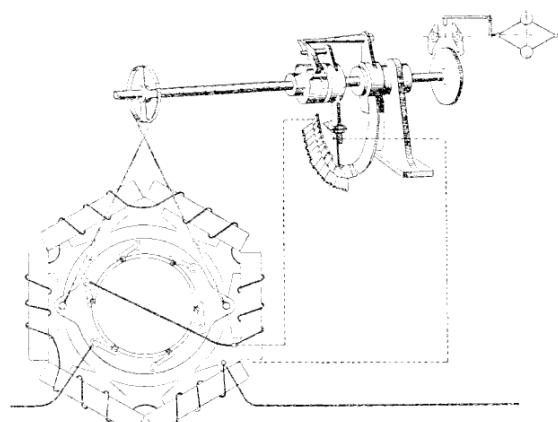


Fig. 17. — Schéma du réglage shunt combiné avec décalage des balais.

On déduit de ces propriétés les avantages suivants :

1^o Au démarrage d'un moteur série, la puissance empruntée à la ligne est, en plus de la constante du moteur (qui est de 5 pour 100 environ), proportionnelle au travail qu'il fournit effectivement. Il n'y a donc aucun à-coup sur le réseau du fait du démarrage, qu'il soit effectué sous charge ou à blanc ;

2^o En cas de surcharge, c'est-à-dire lorsque le couple résistant dépasse le couple moteur maximum, le moteur diminue de vitesse, tant que dure cette surcharge. Comme nous l'avons vu plus haut, cette marche en surcharge n'absorbe réellement que le travail fourni, lequel baisse proportionnellement au ralentissement. Il est donc impossible à un abonné d'abuser du courant primaire et de surcharger son moteur au-delà de la limite autorisée par les conventions passées. La surcharge d'un moteur ne cause pas d'échauffement anormal, puisque l'intensité du courant n'en est pas augmentée ; il n'est ainsi pas possible de brûler un moteur, même complètement arrêté ;

3^o Les variations de vitesses qu'on peut obtenir des moteurs série permettent de les utiliser dans tous les cas où la vitesse de rotation doit pouvoir varier dans de grandes limites comme, par exemple, pour certaines machines à imprimer les couleurs, des pompes de mine, etc. Dans l'application aux stations secondaires de distributions à potentiel constant, cette facilité est utilisée, dans une certaine mesure, pour permettre la charge directe des batteries d'accumulateurs par les génératrices secondaires. Le régulateur de vitesse est supprimé et le réglage de la puissance se fait une fois pour toutes à la main. La vitesse augmente peu à peu, au fur et à mesure de l'état d'avancement de la charge, l'ampérage secondaire diminuant en proportion de l'augmentation du champ inducteur de la génératrice secondaire et, l'on arrive à fin de charge tout naturellement, sans aucun réglage, avec une vitesse augmentée automatiquement dans la proportion voulue.

IV

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS L'EXPOSITION

Des fascicules spéciaux ont été consacrés aux services généraux de l'Exposition, aux groupes électrogènes et aux appareils spéciaux d'utilisation qu'ils alimentaient. Nous énumérons ici ce qui a plus spécialement rapport aux systèmes de distribution et aux résultats de l'exploitation d'après les renseignements communiqués par M. R.-V. Picou, ingénieur en chef des installations électriques à la *Société internationale des Électriciens*.

Systèmes de distribution. — Dès les premières études, la distribution a été projetée ainsi qu'il suit : Le courant continu devait être réservé aux palais du Champ-de-Mars dont les galeries, contenant presque toutes les expositions industrielles, devaient absorber une grande puissance. Le courant alternatif sous 2 000 volts était destiné aux parties extérieures les plus rapprochées : jardins du Champ-de-Mars, Trocadéro, partie des berges et des Invalides. Le courant sous 3 000 volts a été employé sur les berges, aux alentours du pont de l'Alma, rue de Paris, Horticulture, rue des Nations.

Enfin, sous 5 000 volts, étaient alimentés la partie éloignée des Invalides, tous les alentours du pont des Invalides, les Champs-Élysées et la Porte monumentale.

Toutefois il faut remarquer que ces courants alternatifs sous 3 000 et 5 000 volts étaient partiellement convertis en courant continu à 500 volts, pour la distribution de l'énergie motrice aux Invalides et pour l'éclairage par arcs des jardins des Champs-Élysées.

Telles étaient les grandes lignes de la distribution; mais un peu de détail peut être utile en ce qui concerne celle du Champ-de-Mars.

Elle y était faite à trois conducteurs, sous les différences de potentiel de 250 à 500 volts seulement, à l'exclusion de celle si universellement usitée de 120 volts.

Bien des raisons ont conduit à limiter à 250 volts la tension minimum disponible; la principale est que l'emploi de celle de 110 volts aurait exigé, soit une distribution à cinq fils, que l'on était en droit de considérer comme beaucoup trop compliquée pour une entreprise essentiellement temporaire, soit l'usage de conducteurs à sections très considérables, ce qui aurait conduit à des dépenses tout à fait disproportionnées.

Comme, d'autre part, les principaux emplois de cette forme de courant étaient l'alimentation des nombreux moteurs du Champ-de-Mars et celle des lampes à arc de l'éclairage public, les inconvénients de la distribution à 250 volts étaient réellement insignifiants en comparaison de l'économie qui s'ensuivait. L'expérience a prouvé qu'en effet le nombre de cas où une tension inférieure était nécessaire était infime.

Amenée du courant des groupes électrogènes aux tableaux de distribution. — Les générateurs électriques étaient reliés à leurs tableaux de distribution respectifs par une canalisation en câbles sous plomb isolés au jute, armés et placés souterrainement à côté des voies ferrées parcourant les galeries des groupes électrogènes. Cette canalisation fournie par la **COMPAGNIE FRANÇAISE DES CABLES ÉLECTRIQUES** comportait des câbles à un, deux et trois conducteurs. Leur

longueur atteignait 15 km, et leur section totalisée 53 dm² (plus d'un demi-mètre carré). Malgré les difficultés de toute sorte avec lesquelles ces câbles ont été posés, sur une longueur de moins de 500 m, au milieu de l'encombrement des voies ferrées et des colis de toute nature, aucun défaut notable ne s'y est manifesté, et le service n'en a rien souffert de ce chef.

Tableau de distribution à courant continu. — Ce tableau, construit par la SOCIÉTÉ GÉNÉRALE DE TRAVAUX D'ÉCLAIRAGE ET DE FORCE, était établi sur le principe de la mise en parallèle des machines de même tension, sur les trois barres générales du tableau. Les circuits qui en repartaient pour la distribution de l'énergie étaient reliés aux mêmes barres. Chaque circuit comprenait les appareils de mesure, d'interruption et de sécurité, mais aucun appareil de réglage. Ce réglage était assuré par les agents conducteurs des machines, avec lesquels l'inspecteur chef du tableau était en relations au moyen de communications téléphoniques constantes. Il comprenait dix-sept circuits d'arrivée de machines et dix circuits de départ de distribution. Ces derniers ont été augmentés, en cours d'exploitation, de deux circuits destinés spécialement aux sections allemande et suisse. Un panneau spécial portait les appareils généraux indiquant d'une manière continue la tension de la distribution. Très peu de jours après la mise en service, on a reconnu la nécessité de compléter cet ensemble par l'installation d'interrupteurs-disjoncteurs à maximum, sur les principaux circuits. Des appareils type *tramway* furent installés en arrière du tableau et furent des plus utiles, pendant que les gros plombs fusibles manifestaient une fois de plus leur inefficacité absolue.

Canalisation de distribution du courant continu. — Dans les galeries du Champ-de-Mars et des Invalides, la canalisation a été faite en câbles isolés au caoutchouc. Ils étaient posés dans les chemins de grande circulation parcourant transversalement les galeries de l'Alimentation et des groupes électrogènes, et longitudinalement dans celles des palais parallèles aux avenues de Suffren et de La Bourdonnais, et aux rues Fabert et de Constantine. Deux lignes aériennes également en câbles sous caoutchouc avaient été posées sur les toits, le long des corniches de l'encadrement intérieur des jardins du Champ-de-Mars. Elles étaient particulièrement destinées à l'éclairage des restaurants donnant sur ces jardins; mais, comme ces lignes devaient servir surtout le soir, tandis que les lignes souterraines parallèles des galeries devaient servir surtout le jour, on avait établi entre elles des jonctions réunissant leurs extrémités éloignées du tableau, et l'on a pu ainsi les faire contribuer toutes deux aux deux services. On a trouvé aussi la possibilité d'économiser environ un quart sur les sections qui auraient été nécessaires sans cette jonction. Les câbles souterrains étaient placés dans des tranchées peu profondes, en raison de la protection assurée par les parquets, et simplement protégés contre les pierres du remblai par une gaine commune en bois léger.

L'emploi, dans ces conditions, de câbles aussi peu protégés pour une distribution à 300 volts n'était pas sans une certaine hardiesse. Mais on a cru devoir y recourir en raison de la situation spéciale de cette canalisation faite en terrain sec (ou du moins devant rester tel), à l'abri de la pluie, et protégée par les parquets.

En fait, elle a rempli son but, moyennant un entretien très modéré. Les accidents partiels ont été dus à des causes diverses, dont la principale a été surtout l'abus de l'arrosage et, en général, de l'emploi de l'eau, pour laquelle le cuvelage de protection formait drain, et amenait l'inondation des boîtes de branchement où se trouvaient des parties dénudées.

Longueur totalisée des câbles.....	{	Champ-de-Mars.....	18 005 m	/	20 185 m.
		Invalides.....	2 180 m	\	
Section totalisée au départ.....	{	Champ-de-Mars.....	4 220 mm ²	/	4 620 mm ² .
		Invalides.....	400 mm ²	\	

Toute cette canalisation a été posée par la MAISON V^e CH. GIBAULT, adjudicataire pour la fourniture en location, la pose et le relèvement.

Tableau de distribution à courants alternatifs. — Ce tableau, construit par la SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE DES TÉLÉPHONES, était combiné en vue d'éviter d'une manière absolue la mise en parallèle des alternateurs. Cette opération n'est, en effet, possible que pour des groupes de machines à peu près identiques et remplissant certaines conditions spéciales. Aussi les dispositions suivantes avaient-elles été arrêtées pour la distribution à partir de ce tableau :

La surface à desservir avait été divisée en régions à chacune desquelles était affectée une ligne spéciale. Chaque ligne a été, par prudence, établie en double, c'est-à-dire composée de deux câbles identiques, dont on pût, à la rigueur, assurer seul le service pour un certain temps. Il comprenait vingt circuits d'arrivée de machines et dix-huit circuits de départ formés de neuf lignes doubles. A chaque ligne était affecté un groupe de deux ou même parfois trois machines, dont chacune pouvait desservir soit un seul câble, soit les deux ensemble si la puissance le permettait.

Le tableau comportait les appareils interrupteurs et commutateurs propres à assurer ce groupement, et les instruments de mesure destinés au contrôle de la marche. Comme pour le courant continu, aucun appareil de réglage n'y figurait.

Canalisation de distribution des courants alternatifs. — Cette canalisation a été faite exclusivement en câbles isolés au jute, armés et sous plomb. Partant du tableau, elle portait l'énergie électrique jusqu'aux parties les plus reculées de l'Exposition. Indépendamment des boîtes de jonction et de branchement, de types courants, il avait été demandé aux constructeurs de fournir des boîtes accessibles, de types peu usités dans les canalisations urbaines, mais qu'on avait cru devoir être utiles dans une exposition. C'étaient, spécialement, des boîtes de coupure et des boîtes d'interversion.

Les premières permettaient de mettre hors circuit des parties avariées de câble, limitant ainsi au minimum les régions privées de service à la suite d'un accident. Les secondes destinées à permettre au besoin l'alimentation complète du réseau malgré un accident survenu à l'un des deux câbles principaux parallèles de chaque ligne, en reportant toute la charge sur l'autre.

L'expérience a prouvé la grande utilité de ces dispositifs, dont l'usage a été assez fréquent. En effet, dans une exposition aussi importante, la voirie ne peut être réellement établie dans son état définitif qu'après la cessation des arrivages, c'est-à-dire, en fait, après l'ouverture. Or, du fait des remaniements de pavage, d'empierremens rechargés et roulés au cylindre à vapeur, etc., les canalisations sont extrêmement exposées. D'assez nombreuses réparations ont été ainsi nécessaires, qui, grâce aux précautions prises, doublement des lignes et pose des boîtes spéciales, n'ont pas troublé l'exploitation d'une manière notable.

Transformateurs. — Le courant de haute tension était ramené à la tension d'emploi 110 ou 220 volts, au moyen de transformateurs fournis par les constructeurs des dynamos à courant alternatif. Les demandes à eux faites l'avaient été avant que les projets d'éclairage eussent été arrêtés dans leur détail, et bien avant que les demandes d'abonnement aient pu permettre une appréciation exacte de la quantité nécessaire. Toutefois les prévisions se sont trouvées assez exactes, comme on le voit ci-dessous :

	Nombre.	Puissance totale.
Transformateurs reçus.....	298	6 150 kw.
— utilisés.....	246	5 310 kw.

Les 246 transformateurs utilisés l'ont été à raison de 140 pour le service public et 106 pour des demandes particulières. Les appareils de service public étaient répartis dans 43 postes principaux et 8 kiosques, distribués sur toute la surface de l'Exposition. Chaque poste comportait deux compartiments : l'un, réservé à tout ce qui était à haute tension et aux transformateurs, n'était accessible qu'aux seuls agents du service de l'Administration ; l'autre était destiné au

départ des circuits des différents entrepreneurs d'éclairage public. Malgré l'existence d'affiches signalant le danger de mort, il a été difficile de défendre l'accès des transformateurs; pendant les premiers mois, les portes en étaient fréquemment forcées. Néanmoins, aucun accident de personne n'est survenu dans aucune installation.

Éclairage électrique. — L'éclairage électrique comprenait l'éclairage public et l'éclairage privé.

Éclairage public. — L'éclairage public comprenait :

1^o L'éclairage journalier, normal, des voies de circulation;

2^o L'éclairage de certains locaux d'affectation publique, tels que les bureaux de poste, etc.;

3^o Les illuminations d'un certain nombre de bâtiments;

4^o Enfin un certain nombre de lampes de secours et de surveillance, alimentées sur des sources étrangères à l'Exposition, et ayant fonctionné de nuit ou pendant les heures d'arrêt des machines.

Pour l'alimentation de nombreux foyers électriques exigés par ces différents services, on a employé partout des canalisations soit souterraines, soit invisibles, afin de conserver à l'Exposition son caractère décoratif, auquel des lignes aériennes apparentes auraient porté une grave atteinte.

L'ensemble de ces foyers d'éclairage public représente un total d'environ 3 302 lampes à arc et 39 333 incandescentes, dont l'alimentation simultanée exigeait une puissance de 3 549 kilowatts, représentant 6 300 chevaux-vapeur indiquée. Mais, s'il s'en faut de beaucoup que ce chiffre représente le maximum auquel on ait eu à faire face, il faut y ajouter encore la consommation du Château d'Eau, celle des nombreux particuliers abonnés, enfin ce qui était requis par un certain nombre de moteurs qui restaient en fonction le soir.

Éclairages privés. — Il était à prévoir que la plupart des concessionnaires préféreraient la lumière électrique à toute autre, mais il était à peu près impossible *a priori* d'apprécier la quantité probable sur laquelle porteraient les demandes. Aussi, tout en se réservant de fournir sur ses propres ressources là où il ne serait pas possible de faire autrement, l'Administration de l'Exposition engagea, dès 1898, des pourparlers avec les Compagnies électriques concessionnaires de la Ville de Paris. Celles-ci avaient des canalisations posées tout autour des terrains occupés par l'Exposition et pouvaient facilement, et sans grandes dépenses, y pénétrer. De plus, elles avaient de puissants moyens de production dans des usines, où les conditions d'exploitation étaient infiniment plus favorables que celles de l'Exposition.

Le secteur de la rive gauche et le secteur des Champs-Élysées ont donc fourni l'éclairage électrique aux établissements privés de l'Exposition, et ont immobilisé, dans ce but, le matériel suivant :

	SECTEUR DE LA RIVE GAUCHE	SECTEUR DES CHAMPS-ÉLYSÉES	ADMINISTRATION
Longueur des câbles de haute tension, en m.....	4 000	2 453	"
Nombre de transformateurs.....	120	73	"
Puissance totale, en kw.....	2 620	960	"
Puissance des installations de force motrice, en kw.....	8	89	259
d'éclairage, en kw.....	2 400	900	2 000

Distribution de force motrice dans l'Exposition. — Les différents services de l'Exposition ont exigé l'installation de 677 moteurs représentant une puissance nominale totale de 3 535 kw reliés aux canalisations de l'Administration, plus 53 moteurs pour d'importants services publics.

Le fonctionnement de cette quantité considérable de moteurs n'a pas été sans créer, pendant les premières semaines, des difficultés notables dans le service de l'exploitation. L'expérience de la plupart des exposants avait pour résultat de créer des courts-circuits, auxquels les disjoncteurs sensibles placés aux tableaux ont toujours paré en interrompant la

ligne. La règle établie était de remettre la ligne en charge au bout de cinq minutes exactement après l'interruption. La cause du court-circuit était généralement disparue, et le service reprenait normalement sur la ligne interrompue. L'expérience s'est faite rapidement, et l'on a compté nombre de journées pendant lesquelles il ne s'est produit aucun saut de disjoncteur.

En eux-mêmes, les moteurs n'ont été l'objet que d'accidents infiniment rares, et c'est à peine si, pendant toute la durée de l'Exposition, on a eu à réparer une vingtaine d'avaries qui ont porté toutes, sauf une, sur des appareils installés par les exposants.

L'expérience si étendue de la distribution de l'énergie électrique dans l'Exposition a mis absolument hors de doute, s'il en était nécessaire, les qualités de commodité, de souplesse et d'universalité d'application du moteur électrique.

Résultats généraux d'exploitation. — Voici quelques résultats généraux de l'exploitation électrique :

	Heures.
Durée du service de distribution	2 736
— de l'éclairage public	909
— moyenne de marche des groupes électrogènes	713,5

Puissance totalisée des appareils reliés aux canalisations de l'Administration :

Éclairage public	3 710 kilowatts.
— privé	2 000 —
Force motrice	5 553 —
TOTAL	11 263 —

représentant un maximum de demande possible de 45 600 kw indiqués, très sensiblement.

L'émission journalière des groupes électrogènes s'est répartie de la façon suivante :

<i>Energie journalière</i> , en kilowatts-heures :				
		Courant continu.	Courant alternatif.	Total.
Moyenne		15 211	11 125	27 336
Maxima		16 822	21 750	38 572

<i>Puissance journalière</i> , en kilowatts :				
		1 632	1 561	3 392
Moyenne		2 330	3 390	5 720

La puissance totale des appareils électriques installés se répartit ainsi :

Appareils reliés aux canalisations de l'Administration	11 263 kilowatts.
— — secteurs	3 380 —
Installations autonomes	400 —
TOTAL	15 043 —

TABLE DES MATIÈRES

Considerations générales.....	3
I	
Distribution de l'énergie électrique	
Généralités.....	4
Distribution à deux fils.....	4
— trois fils.....	4
— — avec une seule dynamo	5
Dynamos à double enroulement induit.....	6
Distribution à cinq fils.....	7
Compensatrices et régulatrices.....	7
Distribution avec accumulateur	7
Dynamo à intensité constante.....	8
Tableaux de distribution.....	8
Colonnes et kiosques de commande.....	9
Réglage automatique de la tension du courant.....	10
Réglage des effets de théâtre.....	10
II	
Transmission de l'énergie électrique	
Transformateurs isolés.....	11
Réseaux secondaires.....	12
III	
Transport de l'énergie électrique	
Classification.....	13
A. — TRANSPORT PAR COURANTS ALTERNATIFS POLYPHASÉS A TENSION CONSTANTE	
Generalités.....	14
Tensions.....	14
Fréquences.....	15
Formes des courants alternatifs.....	15
Alternateurs	15
Colonnes de commande.....	15
Dispositions générales des tableaux à haute tension pour courants alternatifs triphasés.....	15
Kiosque de commande.....	17
Connexions des appareils de mesure.....	17
Mesures de précaution.....	18
Coupage des alternateurs en parallèle	19
Synchroniseur.....	19
Indicateurs de terre.....	19
Tableaux de commutatrices.....	19

Démarrage des commutatrices	21
Démarrage des groupes moteur-générateur de la plate-forme mobile	21
<i>Exemples d'installation.</i> — Société des forces motrices et Usines électriques de la Vézère	22
Installations suisses	24

B. — TRANSPORT PAR COURANT CONTINU A INTENSITÉ CONSTANTE

Principe	26
Disposition	27
Réglage de l'intensité constante du courant	27
Réglage des moteurs	31

IV

Distribution de l'énergie électrique dans l'Exposition

Systèmes de distribution	34
Au sein du courant des groupes électrogènes aux tableaux de distribution	35
Tableau de distribution du courant continu	35
Canalisation de distribution du courant continu	35
Tableau de distribution des courants alternatifs	36
Canalisation de distribution des courants alternatifs	36
Transformateurs	37
Éclairage public	37
Éclairages privés	37
Résultats généraux d'exploitation	38

