ÉLECTRICITÉ

La transformation du courant alternatif en courant continu au moyen de redresseurs

Conférence donnée à Grenoble, le 23 Mai 1927, sous le patronage du Groupe Dauphinois de la Houille Blanche

par M. RICHER, Ingénieur de la Compagnie Electro-Mécanique

INTRODUCTION

Les premières applications industrielles de l'électricité, consécutives à la réalisation de la dynamo « Gramme », mirent en jeu le courant continu. Les réseaux de la première heure, équipés selon ce mode de distribution, virent leur clientèle s'accroître rapidement et ne tardèrent pas à se trouver en présence de difficultés

à courant continu qui subsistent encore se voient contraints de s'en accommoder par l'intermédiaire de postes de conversion.

Le même problème se pose fréquemment, quoique pour de moindres puissances dans certaines industries ou pour certains travaux qui ne peuvent employer que le courant continu. Les fabricants ou les possesseurs de batteries d'accumulateurs, les

Compagnie du Chemin de Fer Métropolitain de Paris. — Sous-station Nation. — 1.080 kW.

sérieuses résultant de cette extension et de l'obligation de produire directement l'énergie à sa tension d'utilisation.

Le courant alternatif s'avéra, par la suite, infiniment plus souple, et une nette évolution se dessina vers cette forme de l'énergie électrique qui, produite économiquement par des machines puissantes, peut être transportée à grande distance dans les meilleures conditions. L'utilisation rationnelle des richesses naturelles, et plus particulièrement de la houille blanche saisonnière, en nécessitant la réalisation de transports de force pour l'interconnexion des centres de production, vint par la suite confirmer cette orientation.

A l'heure actuelle, le courant alternatif triphasé à la fréquence de 50 périodes, est la forme la plus générale sous laquelle le courant électrique est engendré et consommé, et les réseaux

industriels qui ont recours à l'électrolyse ou aux bains galvaniques sont soumis à cette obligation.

D'autres encore qui sembleraient pouvoir s'en dispenser, se résolvent à la conversion du courant alternatif dont ils disposent pour profiter de particularités avantageuses, propres au courant continu.

L'usage des appareils qui conviennent à cette transformation, qu'il s'agisse d'unités puissantes ou de machines à faible débit, est donc relativement fréquent.

Nous supposons connues les propriétés générales des groupes constitués par l'accouplement d'un moteur et d'une génératrice, ainsi que celles des commutatrices qui en dérivent. Nous examinerons ainsi plus longuement une catégorie d'appareils dits « redresseurs », grâce auxquels l'énergie, sans passer par un

état intermédiaire, est empruntée directement au réseau à courant alternatif.

REDRESSEURS MÉCANIQUES

L'on conçoit aisément que ce résultat puisse être obtenu mécaniquement au moyen, par exemple, d'un tambour cylindrique en cuivre tournant au synchronisme et comportant une pellicule isolante sur une moitié de sa surface extérieure limitée par deux génératrices diamétralement opposées. Un balai fixe, convenablement calé, frottant sur ce collecteur à une seule lame, permettra de capter à chaque révolution la demi-période

propre du balai ou le retard dû à l'inertie de la lame vibrante ne permettent pas de faire exactement coïncider la commutation avec l'annulation de la tension. Le déphasage entre l'onde de cette dernière et celle du courant ajoute encore aux difficultés qui limitent à une très faible valeur la capacité des redresseurs mécaniques ainsi réalisés.

Nous ne citerons que pour mémoire les soupapes électrolytiques qui mettent en jeu un phénomène de polarisation, et qui semblent ne pouvoir assurer un service convenable d'une certaine durée par suite de l'échauffement de l'électrolyte et de l'usure des électrodes.

L'application des redresseurs à tambour cylindrique ou à lame vibrante qui ne redressent généralement qu'une demi-alternance semble localisée à la charge de petites batteries d'accumulateurs.

La satisfaction qu'ils donnent dans ce champ particulièrement limité, aurait fait regretter de ne pouvoir en étendre l'emploi aux cas plus fréquents dans la pratique, qui requièrent avec une puissance plus importante, un courant continu ininterrompu, si l'étude de phénomènes découverts fortuitement

Schéma général d'un groupe transformateur-redresseur.

- 1 Sectionneur ; 2 Interrupteur dans l'huile ; 3 Transformateur du redresseur ; 4 Bobine d'absorption ; 5 Redresseur ; 6 Ampèremètre ; 7 Disjoncteur à action rapide ; 8 Voltmètre ; 9 Transformateur auxiliaire ; 10 Coupe-circuit ; 11 Interrupteur à couteaux ; 12 Contacts auxiliaires montés sur 2 ; 13 Coupe-circuit ; 14 Ampèremètre ; 15 Transformateurs d'excitation ; 16 Bobine de self d'excitation ; 17 Résistance d'excitation ; 18 Relais d'amorçage ; 19 Coupe-circuit ; 20 Dispositif d'allumage ; 21 Résistance d'allumage ; 22 Interrupteur ; 23 Coupe-circuit ; 24 Pompe rotative à vide ; 25 Transformateur d'isolement ; 26 Pompe à vide élevée ; 27 Pompe à eau.

conventionnellement considérée comme positive, et interrompra le passage du courant pendant la durée de la demi-période négative.

Un dispositif équivalent réalise cette liaison intermittente au moyen d'une lame flexible soumise à l'action d'un électroaimant polarisé, connecté au réseau à courant alternatif. A la condition que l'organe mobile n'accuse aucune inertie et que sa fréquence propre d'oscillation soit voisine de celle du réseau primaire, un tel appareil sera équivalent au précédent.

Dans l'un comme dans l'autre cas, on remarque que l'ouverture et la fermeture du circuit sont réalisées au moment précis où la tension s'annule avant de changer de sens, ce qui, en principe, évite l'apparition d'étincelles. En réalité, l'épaisseur

Chambre de Commerce de Boulogne-sur-Mer.
Sous-station du Port.
550 kW. — Courant triphasé 15.000 V., 50 p.s.
Courant continu 575 V.

n'avait donné naissance au redresseur à vapeur de mercure dont la description est l'objet principal de cette communication.

REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE

Principe du fonctionnement. Il semble que ce soit à l'occasion de travaux sur le spectre de la lumière émise par l'arc au mercure en vue d'applications médicales ou photographiques des ultra-violets qu'elle contient, que l'américain Pierre Cooper-Hewitt, mit en évidence un phénomène en apparence singulier.

La lampe à courant continu qu'il utilisait pour ses recherches, s'amorçait aisément et fonctionnait avec une parfaite stabilité tant que l'électrode en mercure était reliée au pôle positif de la source. Par contre, toutes les autres conditions restant les mêmes, son fonctionnement ne pouvait être obtenu, même au prix d'une élévation de la tension mise en jeu, dès que les connexions étaient inversées.

Disons de suite que cette anomalie est, à l'heure actuelle, parfaitement expliquée. La théorie électronique admet en

effet que le passage du courant dans les gaz est favorisé par l'existence de charges élémentaires, positives ou négatives appelées « ions » ou « électrons », qui lui servent de véhicule. Dans le cas de la lampe « Cooper Hewitt », l'électrode positive vers laquelle se portent les ions liés à l'atome chimique et, par conséquent, doués d'une masse appréciable, subit un intense bombardement sous l'influence duquel elle libère un flux d'électrons. Ces derniers, à leur tour, contribuent à l'ionisation du milieu en dissociant les molécules neutres par influence et par choc, en leurs éléments positifs (ions) et négatifs (électrons).

Il s'ensuit que si l'une seule des deux électrodes est susceptible, sous l'influence du passage du courant, d'émettre un flux d'électrons, l'arc transporté par les ions positifs, ne peut franchir que dans un seul sens l'espace qui les sépare.

C'est sur ce phénomène fondamental que reposent les appareils

constitue l'organe principal d'un redresseur thermo-ionique très répandu, connu sous le nom de « Tungar ».

Le chauffage du filament est une condition essentielle du fonctionnement, le tungstène n'étant capable d'activité cathodique qu'au delà d'une certaine température. Il est assuré par une dérivation pratiquée sur le secondaire du transformateur d'alimentation contenu dans le châssis qui supporte l'ampoule. La seule opération requise pour la mise en service consiste dans la mise sous tension de ce transformateur au moyen d'un interrupteur inséré dans la ligne d'alimentation.

La simplicité de cet appareil le fait apprécier pour la charge de petites batteries d'accumulateurs. L'emploi simultané en parallèle de deux ampoules déphasées d'une demi-période permet, en redressant les deux alternances, de l'adapter également aux services qui n'exigent qu'une faible puissance et une

Chemins de fer de l'Etat. — Sous-station de Meudon-Val-Fleury (S.-et-O.).

Groupe redresseur 1.000 kW, triphasé 15.000 V. 25 p.s, continu 650 V., choisi pour le renforcement de la sous-station malgré l'excellent fonctionnement des commutatrices du deuxième plan.

que nous nous proposons de décrire. Les recherches entreprises pour son adaptation pratique motivèrent l'étude des propriétés d'émission électronique des corps simples usuels, bons conducteurs de l'électricité, car les seuls inactifs à ce point de vue pouvaient procurer la garantie cherchée d'irréversibilité de l'anode. Or, si leur résultat ne fut nullement absolu à cet égard, elles permirent néanmoins de retenir le fer pur et le graphite comme susceptibles de convenir jusqu'à concurrence toutefois d'un échauffement limite que l'on doit se garder de dépasser.

Redresseurs « thermo-ioniques ». — Nous ouvrirons ici une parenthèse pour l'examen d'un appareil, dit « thermo-ionique », parce que son fonctionnement exige le chauffage préalable de la cathode. Une ampoule en verre contenant du gaz argon et comportant deux électrodes : l'une en graphite, l'autre constituée par un filament de tungstène porté à l'incandescence

tension continue au plus égale à 75 volts. Des couplages en série de plusieurs unités semblables permettent en outre d'atteindre à des tensions continues multiples de cette valeur.

Il semble que l'inconvénient principal réside dans l'appauvrissement de la cathode par suite de l'émission d'électrons dont elle est le siège. La durée moyenne d'une ampoule atteint cependant un millier d'heures environ.

Redresseurs à vapeur de mercure. — *Appareils à ampoule de verre.* — L'organe principal de ces appareils est évidemment l'ampoule en verre, laquelle — aux perfectionnements de fabrication près — demeure comparable à la lampe de Cooper-Hewitt. Son débit est limité par les dimensions que la technique actuelle du soufflage permet d'atteindre industriellement et par la nécessité de condenser sur les parois le mercure vaporisé,

afin que la pression interne ne dépasse pas une valeur limite au delà de laquelle l'effet de soupape cesserait.

Les joints étanches aux entrées des conducteurs d'anodes et de cathode malgré les dilatations qui s'y produisent ont été obtenus par l'interposition de capotages susceptibles de se souder au verre de l'ampoule et à la tige en fer qui amène le courant. Ces trois considérations cumulées de rayonnement de la chaleur, de pression interne et de résistance des joints, fixent la charge normale qu'une ampoule peut assurer et l'importance des surcharges qu'elle est en mesure de supporter.

La cathode est constituée par une certaine quantité de mercure contenue, à la partie inférieure de l'ampoule, dans une cuvette ménagée au soufflage. Elle est surmontée d'une chambre hémisphérique offrant, aux vapeurs métalliques, une grande surface de condensation. Les anodes principales, au nombre de deux ou trois (redresseurs monophasés et triphasés), parfois de six (hexaphasés) sont situées à l'extrémité de bras cylindriques coudés dont la longueur est déterminée en fonction de la tension et qui sont rapportés par soudure sur le corps principal. Chaque ampoule comporte, en outre, deux anodes auxiliaires de dimensions plus réduites voisines de la cathode, dites « anodes

d'excitation » ou « d'entretien », et une électrode d'allumage affleurant le mercure.

Les anodes d'excitation alimentées par un transformateur spécial, constituent en quelque sorte un petit redresseur contenu dans l'appareil principal et ayant même cathode. Leur circuit est fermé sur une résistance et une self induction qui limitent le courant permanent dont le passage entretient l'activité électronique de la cathode. Le débit en courant redressé peut ainsi cesser, sans que l'ampoule soit sujette à se désamorcer.

Le procédé le plus fréquemment employé pour provoquer l'allumage, consiste dans la création d'un court-circuit entre la cathode et l'électrode auxiliaire prévue à cet effet au moyen d'une légère inclinaison de l'ampoule vers cette dernière. La rupture provoquée par un contre-poids qui ramène l'ampoule à la position verticale donne lieu à l'apparition d'une étincelle instantanée. Il suffit de répéter cette manœuvre jusqu'à ce que l'étincelle ait la polarité convenable, pour que les anodes d'excitation préalablement mises sous tension entrent en fonctionnement. Une variante consiste dans l'emploi d'une anode d'allumage flexible, dite « bi-lame » obtenue par la juxtaposition de deux lamelles de métaux différents. Sous l'effet du courant qui la traverse, elle s'incurve jusqu'à ce que son extrémité, en quittant le bain de mercure, donne lieu à l'étincelle recherchée.

Les ampoules, selon leur capacité, sont : soit à refroidissement naturel dans l'air ambiant, soit disposées dans un courant d'air ascendant produit par un ventilateur horizontal. Elles sont généralement fixées à l'intérieur d'un caisson parallélépipédique en fers profilés et à la partie supérieure de ce dernier. Tous les appareils accessoires tels que : le transformateur ou l'auto-transformateur, les résistances et inductances d'excitation et d'allumage, les réactances d'anodes nécessaires avec certains couplages en parallèle, etc... sont disposés à la base de ce caisson et concourent à assurer sa stabilité. L'une des parois verticales supporte un panneau de marbre ou de tôle qui reçoit les appareils de mesure ainsi que les organes de commande et de protection.

Ainsi réalisé, le redresseur constitue un ensemble dont toutes les connexions sont exécutées en ateliers. Le pôle positif du circuit redressé est fourni par la cathode de l'ampoule ; le pôle négatif par le point neutre du transformateur dans le cas de l'alimentation en triphasé ou en hexaphasé et par le point milieu de l'enroulement secondaire lorsque la source à courant alternatif est monophasée.

Ce type de redresseur convient particulièrement à la charge de batteries d'accumulateurs qui peut être réalisée automatiquement grâce à l'insertion dans les circuits d'anodes, de réactances convenablement calculées. Au début de la charge avec, par exemple, une tension de polarisation d'environ 2,1 volts, pour chaque élément d'une batterie au plomb, l'on devra obtenir le courant maximum admissible. La tension de charge s'élevant progressivement, le courant diminuera selon l'inclinaison de la caractéristique préalablement déterminée pour que la tension convenable coïncide avec l'intensité qui correspond à la fin de l'opération.

Grâce à l'emploi d'unités multiples, fonctionnant en parallèle, l'on pourra également réaliser des

Compagnie des Chemins de fer du Midi.

Sous-station de Lannemezan (H.-P.)

4.800 kW.— Courant triphasé 60.000 V., 50 p.s.— Courant continu 1.575 V.

sous-stations de moyenne puissance pour l'alimentation en des points convenables, de réseaux de lumière et force motrice ou de traction.

Signalons encore que les redresseurs à ampoule de verre permettent d'obtenir aisément les hautes tensions continues nécessaires à certaines applications particulières au nombre desquelles figure, par exemple, l'alimentation de postes radiotéléphoniques ou radiotélégraphiques d'émission.

La considération primordiale qui, en dehors d'autres avantages, conduira à les utiliser sera celle du rendement. On sait, en effet, que la chute de tension de l'arc principal dans l'ampoule et, par suite, le rendement propre de cette dernière pour une même tension continue, sont constants. Le rendement global du groupe redresseur, quoique influencé par les pertes du transformateur d'alimentation, ne variera en fonction de la charge, que dans des limites très restreintes.

D'autre part, du fait même de la constance de la chute de tension de l'arc, la transformation sera d'autant plus avantageuse que la tension du courant continu sera elle-même plus élevée. La comparaison avec les groupes convertisseurs ou les commutatrices sera ainsi, dans de nombreux cas, à l'avantage du redresseur.

L'ondulation qui subsiste du côté redressé est évidemment fonction du couplage. Le redresseur monophasé qui n'utilise, en une période, que deux demi-alternances à 180° et même le redresseur triphasé qui dans le même laps de temps recueille trois alternances décalées de 120° exigent l'insertion dans le circuit de cathode de bobines de self induction d'amortissement. Le redressement en hexaphasé au moyen d'un appareil à six anodes, ou de deux appareils à trois anodes combinés n'occasionne qu'une ondulation résiduelle de 7% sur circuit purement ohmique, qui est généralement réduite à 3 à 5% par la seule influence de la self induction du réseau.

Pour rester dans la vérité, nous devons également observer ici que l'ampoule de verre ne peut avoir qu'une durée limitée et qu'il est sage de tenir compte de son remplacement périodique. Malgré l'idée de fragilité qu'elle semble évoquer, les progrès réalisés dans cette fabrication grâce à une expérience de plus de vingt années, permettent d'atteindre à des durées de plusieurs milliers d'heures.

REDRESSEURS MÉTALLIQUES A GRAND DÉBIT

L'intérêt avec lequel les premiers redresseurs en verre furent accueillis malgré leur construction rudimentaire, fut la cause de nombreuses recherches orientées vers l'amélioration des ampoules ou l'augmentation de leur puissance. A notre connaissance, la Société Brown Boveri & Cie fut la première à se préoccuper de la mise au point d'appareils métalliques démontables munis de tous les accessoires nécessaires pour créer et maintenir le vide poussé indispensable à leur fonctionnement.

Si un tel programme devait procurer à chaque installation une indépendance absolue, les difficultés à surmonter étaient considérables. Il s'agissait, en effet, de réaliser un récipient rigoureusement étanche quoique constitué d'un grand nombre de pièces séparées sujettes à des déformations résultant d'échauffements locaux ou soumises, au point de

vue électrique, à des tensions différentes. En outre, il fallait adapter à une exploitation industrielle par un personnel non spécialisé, les appareils relativement délicats, jusqu'alors employés par des spécialistes qui pouvaient seuls permettre d'atteindre à un vide suffisant.

Disons de suite que ce programme audacieux fut entièrement rempli, ainsi qu'en témoignent environ 1200 redresseurs Brown Boveri, correspondant à une puissance globale que l'on peut estimer à 400.000 kW.

A l'heure actuelle, d'autres firmes, généralement allemandes et américaines, construisent — par des procédés différents — des appareils appelés à remplir le même but.

En raison de la réserve de la plupart des constructeurs sur ce sujet, nous nous limiterons à l'étude rapide, dans leurs grandes lignes, des cylindres redresseurs Brown Boveri, de beaucoup les plus répandus.

REDRESSEURS MÉTALLIQUES SYSTÈME « BROWN BOVERI »

La Société Brown Boveri & Cie construit actuellement une gamme de cinq types de redresseurs établis respectivement pour des débits de 500, 750, 1500 et 2000 ampères, à condition que la tension continue n'excède pas 750 volts. Les modèles

Compagnie des Tramways de Cambrai et de Saint-Quentin.
Sous-station de Saint-Quentin.

300 kW. — Courant triphasé 15.000 V., 50 p.s. — Courant continu 500 V.

de 500, 750 et 1500 ampères peuvent être utilisés au delà et jusqu'à concurrence d'une tension maximum de 5000 volts, au prix cependant d'une sensible réduction de leur débit.

Ces différents cylindres participent tous d'une même technique et sont, au nombre d'anodes et aux dimensions près, absolument semblables. Ils se composent d'un cylindre principal vertical, d'un diamètre d'environ 800 $\frac{m}{m}$ pour le redresseur 500 ampères, et de 1500 $\frac{m}{m}$ pour celui de 2000 ampères. La base de ce cylindre est raccordée à un fond tronconique qui canalise vers la cathode disposée en son centre, les gouttelettes de mercure condensé sur les parois. La cathode elle-même est constituée par un anneau de porcelaine maintenu énergiquement serré, avec interposition de joints étanches entre le corps principal et une plaque massive en acier qui constitue le fond de la cuvette à mercure. La partie supérieure du cylindre est close au moyen d'un plateau annulaire solidaire d'un cylindre de

de celle de la cathode sous l'effet de l'arc qui en lèche les parois, est supporté par six porcelaines fixées d'autre part à une plaque de base annulaire reposant sur le sol.

A l'intérieur de la partie active du redresseur et au voisinage des anodes, un certain nombre d'écrans et de chicanes obligent l'arc à suivre le parcours qui lui est assigné et évitent la condensation du mercure aux points particuliers où son accumulation pourrait donner lieu à des perturbations. Remarquons incidemment que l'arc, en passant d'une anode à la suivante tous les $\frac{1}{6}$ de période décrit à l'intérieur du cylindre un cône renversé dont le sommet est à la cathode. L'on peut ainsi le comparer à un balai tournant qui collecterait le courant redressé d'une façon comparable au redresseur à tambour cylindrique analysé précédemment.

Il va de soi qu'un certain nombre des conditions à remplir ont posé des problèmes très complexes et que les solutions

Compagnie du Chemin de fer Métropolitain de Paris. — Sous-station du Louvre.
3.000 kW. — Courant triphasé 10.000 V., 50 p.s. — Courant continu 600 V.

plus faible diamètre, dit « de condensation ». Les anodes principales, au nombre de six ou de douze, et les deux anodes d'excitation gainées d'un robuste isolateur, traversent cette plaque annulaire et présentent à leur partie supérieure, les cosses de raccordement et les organes de refroidissement par eau ou par air, selon les types. Le fond supérieur du dôme de condensation supporte un robinet étanche pour le raccordement à la conduite de vide, ainsi que le solénoïde d'amorçage qui commande le mouvement d'une anode mobile susceptible, après être venue au contact de la cathode, de rompre un circuit auxiliaire en provoquant ainsi l'apparition de la première étincelle.

Le cylindre principal et le dôme de condensation sont entourés de chemises de tôle communiquant entre elles par des canaux radiaux pratiqués dans le plateau porte-anodes. L'eau de réfrigération qui y circule est admise à la partie inférieure du redresseur et recueillie à sa partie supérieure. L'ensemble de l'appareil, porté en fonctionnement normal à une tension très voisine

différentes retenues par les divers constructeurs n'ont pas toutes, donné en exploitation les résultats attendus.

La recherche du métal d'anodes semble être l'une des questions capitales. La Société Brown Boveri l'a résolue par l'emploi d'un fer d'une composition particulière qu'elle usine en outre avec le plus grand soin. La chaleur dégagée au contact de l'arc avec l'anode, est transmise par conductibilité jusqu'à des radiateurs à ailettes en fonte, ou en tôle avec circulation d'eau, disposés au-dessus de la plaque d'anodes.

L'efficacité des joints est également un facteur essentiel du bon fonctionnement. Le joint Brown Boveri qui fait l'objet de brevets, comporte vers l'intérieur du redresseur un anneau d'amiante indifférent à l'action de la chaleur ou des vapeurs de mercure, et vers l'atmosphère, une rondelle en caoutchouc. L'intervalle qui les sépare est rempli de mercure au moyen d'un tube capillaire terminé par un niveau en verre placé en charge par rapport au joint auquel il correspond. Sous l'effet

de la pression, l'air contenu entre ces deux garnitures est expulsé avant le serrage complet du joint et n'y pourra plus pénétrer tant que l'anneau en amiante ne laissera pas filtrer le mercure à l'intérieur du redresseur. Il est à noter du reste qu'un défaut d'étanchéité ne se manifestera généralement que progressivement et qu'il pourra être décelé dès son origine par la constatation de l'abaissement d'un des niveaux. Il suffira ainsi dans un grand nombre de cas d'un serrage de quelques boulons pour remédier à la perturbation avant qu'elle n'ait pu acquérir la moindre gravité.

Les joints pratiqués pour le passage des anodes à travers leur plateau-support sont d'une réalisation plus délicate du fait de la présence d'isolateurs de traversée. Ils comprennent en réalité deux joints concentriques, pratiqués entre la tige d'anode et sa gaine de porcelaine, et entre cette dernière et la plaque.

plissage d'air du redresseur pour une réparation, la recombinaison des gaz ne s'effectuera également que très lentement, et par conséquent, les réparations éventuelles à condition d'être menées suffisamment rapidement pourront être suivies d'une remise en service presque immédiate.

ACCESSOIRES PARTICULIERS AUX REDRESSEURS

En dehors des appareils de contrôle ou de protection dont l'usage est général quel que soit le convertisseur utilisé, les redresseurs métalliques à grand débit sont toujours munis d'organes auxiliaires dont la présence est indispensable à leur exploitation convenable. Toujours en nous en tenant aux solutions de la Société Brown Boveri & Cie, nous les analyserons rapidement ci-après :

Dispositifs d'entretien du vide. — L'obtention de pressions aussi basses que celles sur lesquelles est fondé le principe même

Compagnie Centrale d'Énergie Électrique. — Sous-station de la Place du Vieux-Marché, à Rouen.
300 kW env. — Courant triphasé 5.500 V., 50 p.s. — Courant continu 270 V.

Formation des redresseurs. — Le redresseur étant achevé en usines, il semble qu'il suffit d'extraire l'air qu'il contient pour le rendre apte à assurer le service auquel on le destine. Il n'en est cependant pas exactement ainsi, et il est indispensable d'effectuer au préalable sa formation. Les organes métalliques qui constituent l'appareil contiennent, en effet, des gaz occlus à l'état de véritables combinaisons. Leur extraction très lente dans les conditions normales, est favorisée par un réchauffage des parois pratiqué en ateliers de différentes manières. On considère comme suffisamment formé le redresseur qui, chargé à son débit normal, ne donne pas lieu à un dégagement appréciable de gaz occlus. L'extraction de ces derniers, dont le volume pour un même courant débité, tend asymptotiquement vers zéro, est du reste poursuivie après la mise en service normal, par le fonctionnement constant du groupe de pompes, jusqu'à la cessation du dégagement même aux fortes surcharges.

Pour en terminer sur cette question, précisons que ce phénomène est partiellement réversible en ce sens que lors d'un rem-

du redresseur, exige l'emploi de pompes capables de conserver leur efficacité dans ces conditions très défavorables. La pompe à diffusion répond seule à cette condition. Elle comporte essentiellement une chambre conique à la base de laquelle une certaine quantité de mercure est distillée sous l'effet d'une plaque de chauffe constituée par une résistance absorbant environ 1000 watts. Les vapeurs de mercure refoulent vers la partie supérieure de cette chambre les molécules de gaz aspirées d'un ajutage débouchant au-dessus du mercure. Une réfrigération convenable assure leur condensation et leur retour à la chambre de vaporisation.

Cette pompe statique ne peut commencer à fonctionner qu'avec un vide préliminaire relativement important auquel on atteint par l'effet d'une pompe rotative à palettes fonctionnant immergée dans l'huile et montée en série avec la précédente. D'autre part, la pompe moléculaire cesse d'exercer son action, lorsque la contrepression au refoulement dépasse une certaine valeur. En raison de la faible consommation du moteur d'entraînement

de la pompe préliminaire l'on préfère généralement, pour assurer cette condition, lier son fonctionnement à l'alimentation de la plaque de chauffe de la pompe statique.

Un robinet à boisseau conique commandé par huile sous pression au moyen d'une pompe rotative auxiliaire calée sur l'axe de la pompe préalable fonctionne automatiquement à la mise en marche et à l'arrêt du dispositif de maintien du vide, et évite ainsi les perturbations qui pourraient résulter d'un arrêt imprévu de ce dernier.

La conduite métallique qui met en communication le redresseur avec le groupe d'entretien du vide a pour effet de porter ce dernier au même potentiel, par rapport à la terre, ce qui nécessite également son montage sur isolateurs-supports.

Ils sont alors enfermés tous deux dans une balustrade ou un entourage de protection destiné à en interdire l'accès au personnel.

Appareils de mesure du vide. — L'importance dans une instal-

une manœuvre relativement longue, et ne permet pas de suivre aisément les variations instantanées de l'état du vide à l'intérieur du cylindre.

Pour ces raisons, la Société Brown Boveri & Cie lui a récemment substitué un appareil spécialement mis au point, basé sur la variation du pouvoir de convection d'un milieu gazeux en fonction de la pression. Pour utiliser cette propriété, l'on soumet au passage d'un courant constant deux fils conducteurs placés dans une enceinte étanche communiquant avec la conduite de vide. La température de ces deux fils, et conséquemment leur résistance varient avec la quantité de chaleur dissipée par convection, et il suffit, au moyen d'un montage en pont de Wheatstone, de mesurer cette dernière par comparaison pour en déduire la pression. Le galvanomètre employé, monté sur le tableau général est gradué directement en millièmes et en dix-millièmes de millimètre de hauteur de mercure. Il peut être employé moyennant la seule adjonction

Société des Hauts-Fourneaux, Forges et Aciéries de Denain et Anzin. — Sous-station de La Chapelle (Nord).
1.800 kW. — Courant triphasé 5.500 V., 50 pts. — Courant continu 680 V.

lation de redresseurs des appareils affectés au contrôle du vide, est évidemment prépondérante. Le manomètre de « Mac-Léod » fut longtemps le seul utilisé par les divers constructeurs de redresseurs.

Il est basé sur la loi de Mariotte et comporte comme organe essentiel une sphère surmontée d'un tube capillaire vertical en verre clos à son extrémité supérieure. A l'état de repos, la sphère communique avec la conduite de vide et la pression qui y règne est la même que celle de cette dernière. Par le déplacement vertical d'un récipient à mercure communiquant avec le dispositif de mesure, l'on soumet les gaz qui y sont contenus à une pression déterminée et l'on obtient par l'application de la formule connue $p' = P \frac{v}{V}$ la pression initiale des gaz enfermés dans la sphère et le tube capillaire. Cet appareil séduisant par sa simplicité ne donne cependant que la pression des gaz parfaits, par suite de la condensation des vapeurs. D'autre part, il exige

de contacts, à la commande automatique du groupe de pompes.

Appareillage d'excitation et d'amorçage. — Les deux anodes auxiliaires d'excitation dont les redresseurs sont munis, sont alimentés, comme celles des redresseurs à ampoule de verre, au moyen d'un transformateur monophasé dont le point milieu du secondaire est relié à la cathode à travers une résistance et une self induction. Ces trois organes montés sur un bâti métallique, trouvent place dans le caisson du tableau de commande. Ils sont complétés par un jeu de deux relais qui dérivent le courant du transformateur sur le solénoïde et l'anode d'amorçage lorsque l'excitation n'est pas en service.

Il suffit donc de mettre sous tension le dispositif combiné d'amorçage et d'excitation pour que le redresseur soit prêt à débiter. Pour simplifier les manœuvres, on réalise cette opération par le jeu de contacts auxiliaires solidaires du disjoncteur général primaire et dont la fermeture est commandée par l'enclenchement de ce dernier.

TRANSFORMATEURS

Un redresseur ne possède aucune constante électrique qui lui soit propre, puisque son débit lui-même varie dans des limites importantes selon la tension d'utilisation.

Toutes les caractéristiques du groupe formé par sa liaison avec un transformateur dépendront essentiellement des particularités de ce dernier, depuis le mode d'enroulement qui détermine l'ondulation du courant redressé, jusqu'à la réactance, de laquelle dépend la chute de tension. Si l'on considère par ailleurs, tout en reconnaissant l'extrême rareté d'un pareil phénomène, que le fonctionnement en cathode de l'une quelconque des anodes équivaut à la réalisation d'un court-circuit au secondaire du transformateur, l'on conçoit toute l'importance qu'il y a lieu d'accorder au calcul et à l'exécution de cet organe capital.

La considération de robustesse a conduit la Compagnie Electro-Mécanique qui construit les transformateurs destinés aux ins-

gner une première amélioration consistant dans le fractionnement du secondaire en deux systèmes triphasés distincts comportant chacun un point neutre, dont la liaison inductive au moyen d'une bobine de self particulière, dite d'absorption, donne le pôle négatif. La théorie du fonctionnement de cet organe qui permet, du fait de la tension additionnelle développée à ses bornes, de porter à 1/3 de période la durée du débit de chaque anode, a été exposé en détail.

Nous nous bornerons à observer qu'en dessous d'une certaine intensité critique correspondant à la saturation du circuit magnétique de cette dernière, son action diminue jusqu'à devenir nulle pour la marche à vide du groupe. L'élévation de tension, d'environ 12 à 14 %, qui se révèle entre ces deux limites, constitue dans certains cas un sérieux inconvénient.

L'application récente de couplages secondaires en polygone ou en fourche permet, tout en simplifiant les installations, de réaliser des groupes dont la caractéristique de tension accuse

Compagnie Lorraine d'Electricité. — Sous-station de la rue Guerrier de Dumast, à Nancy.
1.200 kW. — Courant triphasé 5.000 V., 50 p.s. — Courant continu 2.235 V.

tallations françaises de redresseurs Brown Boveri, à adopter, sauf tensions primaires trop élevées, la construction à bobines alternées conjuguée avec un calage particulier des enroulements.

La diversité des couplages utilisés, et la justification des propriétés de chacun d'eux dépasserait par l'ampleur du sujet le cadre de cette communication. Disons seulement que le couplage du secondaire en hexaphasé simple conduit à une très mauvaise utilisation due au fait que chaque anode débite seule la totalité du courant continu pendant 1/6^e de période. La chute de tension du groupe du côté continu, qui atteint ainsi environ 15% est due à l'intensité élevée débitée par une seule phase, et à la dispersion magnétique supplémentaire qui résulte du déséquilibre du système. Ajoutons qu'un tel mode de connexion exige le couplage du primaire en triangle pour l'élimination des harmoniques impairs multiples de trois. Ces diverses considérations ont amené la Société Brown Boveri & Cie à ima-

une chute totale de 3,5 à 5% comparable à celle des machines à courant continu à excitation shunt.

MARCHE EN PARALLÈLE DES REDRESSEURS AVEC D'AUTRES UNITÉS

Il suffit de prédéterminer convenablement la chute de tension du groupe pour que la marche en parallèle avec des machines à caractéristique shunt soit permise dans les meilleures conditions. Un tel fonctionnement avec des groupes compoundés exige par contre un réglage automatique ou manuel de la tension que l'on réalise soit au moyen d'un régulateur d'induction, soit plus économiquement par le jeu d'un commutateur de prises à grand nombre d'échelons.

AUTOMATICITÉ

Il ressort clairement, du principe même du redresseur, que les manœuvres requises par sa mise en service sont des plus simples, puisqu'elles ne comportent ni démarrage progressif, ni recherche

du synchronisme. Il se prête donc parfaitement à la réalisation de sous-stations automatiques ou semi-automatiques, moyennant l'adjonction d'organes simples pour la commande des pompes à vide et le contrôle des réenclenchements des interrupteurs.

AVANTAGES DES REDRESSEURS MÉTALLIQUES A GRAND DÉBIT

Comme les appareils à ampoule de verre, les redresseurs métalliques sont caractérisés par leurs pertes à vide très réduites et leur rendement sensiblement constant entre $1/4$ et $5/4$ de leur charge nominale. Ils accusent de ce fait une grosse supériorité sur les commutatrices et à fortiori sur les groupes convertisseurs pour les services à consommation très variable.

Comme, d'autre part, ce rendement croît lui-même avec la tension continue, l'économie de courant qu'ils permettent, déjà sensible en certains cas pour des réseaux de force et lumière à 250 V., devient généralement importante pour des tensions plus élevées. Ils sont de ce fait presque toujours retenus dès maintenant pour l'équipement des sous-stations de traction, de métallurgie ou d'appareils de levage, généralement à 500 ou 600 volts, et dont le débit est essentiellement inconstant. Au delà de ces tensions, leur supériorité devient indiscutable, tant par la réduction des frais d'établissement rapportés au kilowatt installé qui résulte de leur augmentation de puissance pour un même prix, que par leur rendement, lequel atteint 2.500 volts par exemple, 95,7% toutes pertes comprises.

Si nous ajoutons qu'en raison de la simplicité des manœuvres à effectuer, la surveillance peut être assurée par un personnel non spécialiste, que du fait du fonctionnement statique dans le vide, l'usure et l'oxydation seront sensiblement nulles, nous sommes amenés à constater que la comparaison des frais d'entretien sera également et dans tous les cas en faveur du redresseur.

D'autres avantages non négligeables selon les cas particuliers à traiter proviennent :

- Du fonctionnement silencieux ;
- De la réduction considérable des fondations ;
- De l'insensibilité aux changements de fréquence ;
- De l'irréversibilité du fonctionnement ;
- Du facteur de puissance élevé.

Toutes ces considérations expliquent l'intérêt porté actuellement à ce système de convertisseur. En France seulement, 148 cylindres Brown Boveri, d'une puissance globale de 80.000 kW mis en fonctionnement depuis 1920, en témoignent.

L'on peut se demander si les résultats pratiques enregistrés ont confirmé l'heureux choix de leurs possesseurs. Nous pouvons affirmer qu'en toutes circonstances, les garanties ont été sensiblement dépassées. Pour nous en tenir ici, à la seule installation locale réalisée en 1925 pour le compte de la Société Hydro-Electrique de Fure & Morge et de Vizille dans sa sous-station de « La Galochère », nous nous bornerons à extraire de « La Houille blanche » l'appréciation ci-après qui constituera notre conclusion :

« Le rendement global de la sous-station déterminé au moyen des compteurs placés d'une part sur l'arrivée 10.000 V, et d'autre part sur les départs à courant continu 600 V., se tient régulièrement entre 91 et 90%.

« Il faut noter que dans la détermination de ce rendement entre en ligne de compte la consommation des services auxiliaires, pompes à vide, pompe de circulation d'eau, d'éclairage de la sous-station et des logements des deux agents affectés à la sous-station. »

Compagnie des Omnibus et Tramways de Lyon. — Sous-station de la Croix-Rousse à Lyon.
900 kV. — Courant triphasé 10.000 V., 50 p.s. — Courant continu 650 V.