

Chaque locomotive porte deux moteurs série compensés de 1 250 chevaux avec chacun un transformateur séparé et l'équipement nécessaire, de façon à permettre la marche indépendante d'un seul moteur s'il était nécessaire. Les moteurs sont disposés de façon à pouvoir développer la puissance annoncée pendant un fonctionnement d'une heure et demie sans échauffement dangereux. La vitesse normale est de 49,6 kilomètres à l'heure, et la vitesse maxima de 73 kilomètres. La commande se fait par engrenage d'arbre intermédiaire, puis par bielles et manivelles suivant la disposition adoptée dès l'origine par OERlikon. Cette commande a été choisie principalement par suite de la supériorité qu'elle a au démarrage.

La régulation de la vitesse est obtenue par l'intermédiaire de crans reliés au bobinage secondaire du transformateur et on emploie au lieu de contacteurs un contrôleur commandé par moteur. L'effort de traction normal de 10 tonnes a été fixé d'après les exigences résultant des règlements suisses relatifs aux voies ferrées.

Le prochain grand travail d'électrification sera sans doute celui de la section Chiano-Lucerne du chemin de fer du Gothard sur une distance de 148 kilomètres. La Commission fédérale d'études a estimé que la dépense totale de l'électrification du St-Gothard sera approximativement de 70 millions, divisés de la façon suivante :

Stations hydroélectriques et lignes de transmission. — Matériel roulant et dépôts. — Ligne de prise de courant (aérienne).

Le coût annuel d'entretien est beaucoup plus bas qu'avec la vapeur.

On estime finalement que la dépense d'exploitation tombera avec l'énergie électrique à 0,7 centimes par tonne kilomètre, tandis qu'en 1908, avec la vapeur, on est arrivé à 0,94 centimes.

La Commission estime qu'une puissance de 500 000 chevaux hydroélectriques trouverait son utilisation si tous les chemins de fer suisses étaient électrifiés.

Les deux usines alimentant la ligne du Sothord auront à elles seules une puissance de 95 000 chevaux. Les ressources hydrauliques largement suffisantes existent pour satisfaire aux exigences de cette électrification.

Le chemin de fer Rhétique qui est une ligne à voie étroite équipée à 10 000 volts, 16 2/3 périodes, courant monophasé, a récemment commandé aux Ateliers d'OERlikon, en plus de la locomotive de 600 HP de l'AEG, à deux essieux qu'elle possédait déjà, deux locomotives de 52 tonnes portant chacune deux moteurs d'une vitesse angulaire de 620 tours par minute qui sont accouplés par engrenage au même arbre et développent 600 chevaux aux roues (puissance unihoraire) avec une vitesse de 27,6 kilomètres à l'heure ; la vitesse maxima peut atteindre 49,6 kilomètres. Chaque locomotive d'une longueur de 10^m65 possède 4 essieux moteurs. Ceux voisins des roues porteuses, c'est-à-dire à l'avant et à l'arrière, possèdent un petit jeu latéral. Nous allons décrire plus en détail les particularités des locomotives des chemins de fer Rhétiques. L'équipement de la ligne caténaire a été fourni par la Compagnie Siemens-Schuckert.

Le courant est recueilli par deux pantographes capables de s'adapter à une hauteur de fil de trolley variant entre 4^m08 et 6^m21. La présence d'un double pantographe se justifie par la nécessité d'éviter toute interruption de courant qui aurait effectivement les plus fâcheux effets. Tout d'abord en provoquant des surtensions dangereuses dans

les enroulements du transformateur et ensuite en provoquant des remises en route, car un disjoncteur saute chaque fois que la tension n'est plus appliquée aux moteurs. Des darh-spots à huile sont prévus pour éviter des mouvements trop rapides du pantographe. Les isolateurs cannelés supportant les pantographes en les isolant du toit de la locomotive, sont essayés à une tension de 50 000 volts. Le transformateur d'une puissance de 100 KVA est du type à refroidissement à l'air. Il transforme le courant de 10 000 à 390 volts. L'enroulement secondaire est partagé en douze fractions, telles que la tension de chacune d'elles est de 37 volts. L'organe régulateur de la tension est monté directement sur le transformateur, il est commandé à distance depuis la cabine de manœuvre de la locomotive. Il n'y a donc pas de contacteurs. La Compagnie d'OERlikon assure que c'est là une innovation pour des courants de cet ordre. Une bobine de self est employée pour éviter toute interruption de courant en passant d'une touche à la voisine et en même temps toute mise en court circuit momentanée. La commande mécanique s'opère par arbre intermédiaire et bielle.

Les deux moteurs sont du type série-compensé. La partie qui contient le matériel à haute tension est soigneusement isolée lors des fermetures, on n'y peut pénétrer qu'avec une clef qui a pour effet de provoquer la vidange des cylindres du pantographe, de façon que celui-ci s'abaisse et que toute communication est coupée avec la ligne haute tension, et réciproquement il est impossible de relever le pantographe, à moins que la chambre de la haute tension n'ait été refermée.

De fort intéressants essais comparatifs des divers types de locomotives ont été faits entre Saint-Moritz et Schuls, du 1^{er} au 10 octobre 1913. La Compagnie OERlikon, sans vouloir anticiper sur les résultats complets de ces essais qui seront rapportés d'une façon officielle ultérieurement, a fait connaître cependant que la locomotive du type « Rhétique » est celle qui a donné lieu à la plus faible consommation d'énergie, toutes choses égales d'ailleurs ; les moteurs ont fonctionné sans étincelles dans les conditions de démarrages les plus difficiles.

Une des caractéristique du système est qu'une chute de tension en ligne même très notable, peut-être rachetée en connectant quelques touches plus haut le moteur ; les variations de fréquence sont aussi sans influence.

P. BOURGUIGNON,

Ingénieur de l'Union des Tramways de France.

L'INFLUENCE DU MONTAGE DES MOTEURS

Répondant à une note de M. Swyngedauw, communiquée à l'Académie des Sciences, M. André BLONDEL reprend une étude du plus haut intérêt, sur l'influence du montage des transformateurs triphasés dans les transports d'énergie à haute tension. — Voici cette étude, extraite des *Comptes Rendus* de l'Académie (séance du 16 février 1914).

**

Il y a actuellement deux procédés pour transformer les courants triphasés : l'emploi de trois transformateurs monophasés et l'emploi d'un seul transformateur à trois noyaux magnétiques et trois enroulements triphasés.

Dans les deux cas, on est généralement obligé de grouper les enroulements à haute tension en étoile pour éviter l'emploi de fils trop fins (qu'exige le montage en triangle) et pour diminuer les difficultés d'isolement ; car avec le

montage en étoile, on peut se contenter, pour les différentes bobines haute tension, d'un isolement à la masse croissant à partir du centre de l'étoile.

Le cas de trois transformateurs séparés présente une différence importante par rapport au cas du transformateur à trois branches ; c'est que, quel que soit le rang d'un terme harmonique dans les trois courants, les flux que ceux-ci produisent se ferment normalement par le noyau de fer doux comme le flux de l'harmonique principal ; au contraire, dans le transformateur unique, les seuls flux qui puissent se fermer de cette manière sont ceux dont la somme totale est constamment nulle. Tel est le cas, par exemple, pour les harmoniques 1, 5, 7, et généralement pour tous les harmoniques non multiples de 3 ; au contraire, les flux produits par les harmoniques multiples de 3, étant constamment de phases concordantes dans les trois branches, ne peuvent se fermer les uns sur les autres, mais se ferment seulement par des fuites à travers l'air.

De là, naissent des courants de Foucault intenses dans les bacs métalliques contenant ce genre de transformateurs, si l'on n'a pas soin d'établir des joints isolants verticaux dans le métal de ces bacs.

I. *Alternateur alimentant directement une ligne aboutissant à un poste transformateur.* — Lorsqu'un réseau est alimenté par un alternateur triphasé pour produire des forces électromotrices sinusoïdales pures de pulsation ω , les flux dans les transformateurs devraient être tels qu'ils produisent également des forces électromotrices sinusoïdales dans chaque phase ; si le couplage des transformateurs est fait en triangle, le flux dans chaque noyau devrait être lui-même parfaitement sinusoïdal. Par suite de la saturation variable du fer pendant une alternance et des phénomènes d'hystérésis, le courant nécessaire pour produire un flux sinusoïdal ne peut pas être lui-même sinusoïdal, mais est une fonction de Fourier :

$$i = I_1 \sin \omega t + I_3 \sin (3 \omega t - \varphi_3) + I_5 \sin (5 \omega t - \varphi_5) + \dots$$

contenant toute une série de termes harmoniques dont l'importance relative varie suivant les propriétés du fer employé. Par exemple, d'après des relevés oscillographiques, que M. Blondel a fait faire récemment sur un transformateur moderne de 100 kilowatts, on peut avoir pour un courant harmonique 1, égal à l'unité, un courant harmonique 3 de 18 pour 100, un courant harmonique 5 de 22 pour 100 et d'autres harmoniques supérieurs plus faibles (d'autres transformateurs donnant des résultats différents, cet exemple n'est donné que pour indiquer un ordre de grandeur).

Les courants harmoniques 3 sont produits par des flux parasites, qu'ils étouffent dans le transformateur.

Si les bobines de transformateurs à trois branches ou des groupes de trois transformateurs monophasés sont groupées en étoile, mises à la terre aux points neutres du transformateur et de l'alternateur, les conditions restent analogues puisque l'harmonique 3 peut circuler librement entre l'alternateur et le transformateur ; le flux de chaque branche reste sinusoïdal, si l'on peut négliger les chutes de tension des harmoniques 3 dans l'alternateur. Sinon, ces variations mettent un peu la capacité en jeu, comme l'a suggéré M. Swyngedauw.

Si l'on vient à supprimer la mise à la terre de l'étoile du transformateur (ou des transformateurs), les courants harmoniques multiples de 3 ne peuvent exister (sauf les petits courants dus à la capacité des enroulements par rapport à la terre), puisqu'ils sont de même phase ; les seuls courants qui puissent circuler sont ceux des autres harmoniques,

grâce au fait que leur somme est toujours nulle. Il en résulte que les flux de chaque branche, étant produits par la série de Fourier précédente diminuée des termes harmoniques multiples de 3, ne seront plus sinusoïdaux, mais contiendront des termes harmoniques de tous les indices multiples de 3 ; ce sont ceux qui auraient été compensés par les courants magnétisants qui manquent. Il en résulte dans chaque branche de l'étoile des forces électromotrices harmoniques multiples de 3, mais qui n'apparaissent pas entre les fils de phase, parce qu'elles sont détruites deux à deux dans les deux branches de l'étoile. Ces forces électromotrices ne donnent lieu à aucun courant sensible, parce que le centre de l'étoile transformatrice est isolé ; elles ne sont donc pas dangereuses.

Les conditions changent quand on isole le point neutre de l'alternateur et qu'on met à la terre celui du ou des transformateurs ; alors les forces électromotrices, dues à l'absence des courants harmoniques peuvent produire dans chaque branche un échange de courant entre la terre et les fils conducteurs par suite de la capacité entre la terre et ces fils, qui constitue une fermeture du circuit ; il y a des oscillations de courant de fréquence 3 ou multiples de 3 entre la terre et la ligne, et l'intensité de ces courants dépend de la capacité mise en jeu et de la self-induction du ou des transformateurs. Cette self-induction est très grande si l'on emploie trois transformateurs séparés, bien plus petite si l'on emploie des transformateurs uniques à trois noyaux. C'est dans ce cas surtout qu'on peut considérer les transformateurs comme des générateurs d'harmonique 3.

II. *Alternateur alimentant la ligne par un transformateur élévateur.* — C'est le cas traité par M. Swyngedauw⁽¹⁾ Si l'alternateur est en étoile non reliée à la terre, son transformateur se comporte comme le transformateur récepteur considéré ci-dessus.

Si l'étoile de l'alternateur est reliée à celle du transformateur, l'harmonique 3 est amorti, si la self de l'alternateur est négligeable. Dans le cas contraire, tout se passe comme si les circuits haute tension du ou des transformateurs élévateurs, ayant du côté haute tension une self de fuite L_s entre enroulements en harmonique 3, étaient reliés à la terre, chacun par l'intermédiaire d'une réactance égale à celle d'une phase de l'alternateur L_a multipliée par le carré du rapport de transformation, soit donc $L_a \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$; soient C la capacité d'un des fils de ligne par rapport à la terre, ω la pulsation, L la self-induction totale (induction mutuelle comprise) de chaque fil de ligne, les condensateurs pouvant être supposés placés au milieu de cette dernière, la condition de résonance sera :

$$(3\omega)^2 \left[\frac{L}{2} + L_s + L_a \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \right] C = 1.$$

Pour éviter les inconvénients de ces harmoniques, il paraît difficile de recourir à la mise en triangle des circuits haute tension pour les motifs indiqués plus haut ; d'autre part, la mise à la terre des deux points neutres augmente dans une certaine mesure les chances d'interruption de service lors d'accidents à l'isolement des lignes ; enfin la mise à la terre du point neutre de l'alternateur seul a l'inconvénient déjà signalé de faire résonner les harmoniques 3 de l'alternateur.

Il en résulte que les deux meilleurs moyens de protéger sans ces inconvénients les transports d'énergie contre les harmoniques 3 sont :

1° Le montage américain employé actuellement dans la plupart des bonnes installations existantes et qui consiste

(1) Voir la *Houille Blanche* 1914.

dans l'emploi de transformateurs (ou groupe de transformateurs) de départ et d'arrivée ayant tous deux leurs circuits de basse tension couplés en triangle et leurs circuits haute tension couplés en étoile. Les circuits basse tension, dans lesquels les flux harmoniques 3 (ou multiples de 3) produisent des forces électromotrices concordantes, jouent le rôle de véritables amortisseurs par rapport à ces flux (1).

2° L'emploi d'un fil d'équilibre métallique isolé, réunissant les points neutres des enroulements haute tension du poste de départ et du poste d'arrivée. Ce fil d'équilibre rend

(1) L'emploi, à la station de départ d'un transformateur de ce genre, a en outre l'avantage de court-circuiter sur ce transformateur les harmoniques multiples de 3 de la force électromotrice de l'alternateur quand ce dernier est en triangle; ce court-circuitage est surtout efficace lorsque le transformateur est du type unique à trois noyaux, qui réduit beaucoup l'impédance par rapport à ces harmoniques.

indépendants les flux des trois noyaux et leur permet d'être sinusoïdaux; il court-circuite, d'autre part, les forces électromotrices harmoniques 3 ou multiples de 3. Il a donc tous les avantages de la double mise à la terre sans en avoir les inconvénients.

Si l'on a soin que l'alternateur ne présente que de très faibles harmoniques 3 (ou multiples de 3), ce qui est facile en formant, par exemple, chaque phase d'un nombre d'encoches multiple de 3, les courants harmoniques 3 seront assez peu intenses pour n'exiger qu'un fil de retour de section beaucoup plus réduite que celle des fils de phase.

Ce fil de retour peut être placé soit dans l'axe du câble triphasé, soit sous forme d'une armature de cuivre entourant le câble sous l'armature en fer, la self-induction du câble par rapport à l'harmonique 3 est alors réduite et n'est influencée en rien par l'armature de fer.

REVUE DES SOCIÉTÉS SAVANTES ET DES PUBLICATIONS TECHNIQUES

ACADÉMIE DES SCIENCES

ÉLECTRICITÉ

Influence du diamètre sur la différence de potentiel aux bornes des tubes au néon. Observation relative aux aurores boréales. Note de M. Georges CLAUDE, présentée par M. d'ARSONVAL. Séance du 16 février 1914.

M. Claude a montré précédemment qu'à densité de courant égale, la chute de potentiel, le long de la colonne lumineuse des tubes à néon fonctionnant sous une pression voisine de 2^{mm} de mercure, est sensiblement inversement proportionnelle à leur diamètre.

Ce résultat lui a paru assez digne d'intérêt pour que dans une nouvelle série d'essais, il se soit proposé de le confirmer, d'une part en étendant les limites entre lesquelles il a opéré dans son premier travail, d'autre part en mesurant directement la chute de potentiel aux extrémités de la colonne lumineuse, au lieu de la déduire de la différence de potentiel totale. Il a à cet effet muni chacun de ses nouveaux tubes d'électrodes auxiliaires constituées par de gros fils de platine pénétrant jusque dans la colonne lumineuse et placées à quelques centimètres des électrodes principales.

Il a opéré cette fois sur 5 tubes de 5^m entre les électrodes principales, et dont les diamètres moyens respectifs étaient 67^{mm}, 41^{mm}, 21^{mm}, 10^{mm}, 7 et 5^{mm}, 6. Le rapport entre les diamètres extrêmes expérimentés, qui était précédemment de $\frac{45}{5,2} = 8,6$, a

donc été porté cette fois à $\frac{5,6}{67} = 12$.

La disposition des 5 tubes sur un récipient à charbon refroidi unique et sur une jauge de MacLeod était la même que précédemment et les mesures s'effectuaient aussi de la même façon, sauf qu'un électromètre était branché entre les électrodes auxiliaires.

La pression du néon était ici de 2^{mm},9 à froid. L'alimentation du tube de 67^{mm} par un courant de 2^{amp},1, le plus intense employé, ne faisait passer la pression qu'à 3^{mm},3.

Les intensités correspondant à des densités de courant égales, en partant de 2^{amp},1 pour le gros tube, étaient :

Tube de.....	67 ^{mm}	41 ^{mm} ,5	21 ^{mm}	10 ^{mm} ,7	5 ^{mm} ,6
Courant correspond.	2 ^{amp} ,1	0 ^{amp} ,82	0 ^{amp} ,21	0 ^{amp} ,053	0 ^{amp} ,015

Ces intensités équivalentes ont été employées effectivement, sauf pour le tube de 5^{mm},6, pour lequel l'intensité de 0,015 était insuffisante pour assurer la stabilité de la lumière et a dû être poussée à 0,030, ce qui est de peu d'inconvénient, la différence de poten-

tiel pour les petits tubes variant relativement peu avec le courant, comme il l'a déjà remarqué.

Les résultats ont été les suivants :

Diamètre du tube.	Intensité du courant.	Différence de potentiel		Chute de potentiel par mètre de tube.
		totale aux bornes.	entre électrodes auxiliaires.	
mm	amp	volts	volts	v : m
67	2,10	645	315	63
41,5	0,82	790	510	102
21	0,21	1575	1260	252
10,7	0,053	2600	2300	460
5,6	0,015	4750	4450	890

Certes, il convient de ne considérer cette loi de l'inverse du diamètre que comme approximative. D'une part, la mesure directe de la différence de potentiel entre électrodes auxiliaires n'est peut-être pas absolument correcte, bien qu'il ne s'agisse pour elles que de transporter le courant de charge de l'électromètre. D'autre part, les différences de potentiel sont très notablement fonction du degré de formation des tubes, de sorte que des écarts notables existent souvent d'un tube à l'autre, ou d'une série de mesures à la suivante. Enfin, une variation de pression agit différemment sur les tubes de divers diamètres, une augmentation de la pression 2^{mm},9, employée ici, relevant les différences de potentiel des tubes de 67 et de 41, et réduisant au contraire celles des tubes 10,7 et 5,6, ce qui montre bien que la loi de l'inverse ne pourrait tout au plus être rigoureuse que pour une certaine pression. Mais, en dépit de toutes ces restrictions, elle reste très suffisamment exacte pour qu'on puisse tirer des conclusions qui seront ultérieurement développées.

Il est même remarquable à cet égard que le tube de 67^{mm} présente une chute inférieure à celle qui correspondrait à son diamètre, ce qui donne plus de probabilité encore à l'exactitude de la conclusion formulée dans ma Note du 1^{er} septembre, à savoir : que la chute de potentiel dans des tubes de très gros diamètre deviendrait nulle ou très faible.

Or, à supposer que ce fait soit valable pour tous les gaz, il entraîne une conséquence importante au point de vue de la connaissance d'un des phénomènes les plus intéressants de la physique du globe.

Ainsi que me l'a fait observer M. d'Arsonval, en effet, ce fait faciliterait la compréhension du phénomène des aurores boréales, qui ne sont que des décharges électriques d'énorme section et qui, en conséquence, malgré leur fantastique longueur, pourraient être produites sans exiger les différences de potentiel infinies dont l'existence serait bien difficile à concevoir.