ÉLECTRICITÉ

Régulation des Transformateurs à 3 enroulements

Par M. BARRÈRE, Ingénieur aux Etablissements Schneider
Chef des Travaux Electrotechniques à l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures.

Ces transformateurs permettent d'avoir les deux enroulements principaux connectés en étoile, rendant ainsi possible la mise du neutre à la terre des 2 côtés et réalisant une économie appréciable sur la construction.

Le 3^{me} enroulement connecté en triangle permet la circulation du 3^{me} harmonique de courant magnétisant, supprimant ainsi le 3^{me} harmonique de tension ; de plus il permet l'alimentation soit des services auxiliaires, soit de condensateurs synchrones servant à la régulation de la tension du réseau.

Dans la plupart des cas, les 2 tensions principales de ces transformateurs sont trop élevées pour alimenter directement ces services, il faudrait donc avoir recours à des transformateurs abaisseurs dont le prix serait sensiblement plus élevé que l'augmentation de prix du transformateur due au 3^{me} enroulement.

Cependant certaines précautions sont à prendre dans la construction de ces transformateurs à cause de leur régulation et de la valeur du courant de court-circuit. Il faut que les chutes inductives entre 2 quelconques des 3 enroulements soient du même

Les transformateurs dont nous citons le cas ici ont les caractéristiques suivantes :

Caractéristique des transformateurs. :

- 3 monophasés de 3.000 KVA chacun (au secondaire)
- tension primaire : 67.550 V.
- secondaire : 26.000 V.
- tertiaire : 5.500 V.

montés comme l'indique la figure 1, ils forment un groupe triphasé abaissant la tension de 118.000 V. à 45.000 V. et les 3^{es} enroulements alimentent un condensateur synchrone pouvant débiter de 6.500 KVA à $\cos \varphi = 0$ (courant décalé en avant de la tension) à 3.500 KVA à $\cos \varphi = 0$ (courant décalé en arrière de la tension).

Les chutes ohmiques entre enroulements rapportées à 3.000 KVA et exprimées en % de la tension de base : 67.550 V., sont :

- % $IR_{ps} = 0,755 \%$
- % $IR_{pt} = 0,645 \%$
- % $IR_{st} = 0,850 \%$

Les chutes inductives entre enroulements sont :

- % $IX_{ps} = 11,5 \%$
- % $IX_{pt} = 8,85 \%$
- % $IX_{st} = 16,6 \%$

Nous supposons le circuit magnétique constitué par chaque transformateur monophasé analogue à un circuit électrique (figure 2) et en admettant :

$Z_p + Z_s = Z_{ps}$ (impédances)

Fig. 1— Schéma d'un groupe de 3 transformateurs monophasés

Fig. 2

ordre de grandeur, que l'une quelconque soit inférieure à la somme des 2 autres et qu'elles aient une valeur assez élevée pour ne pas avoir une valeur du courant de court-circuit exagérée

nous aurons :

$Z_p = \frac{Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}}{2}$ (équation vectorielle)

d'où nous concluerons pour les chutes ohmiques et inductives relatives à chaque enroulement :

$$\begin{aligned} \% IR_p &= \frac{0,755 + 0,645 - 0,850}{2} = 0,275 \% \\ \% IR_s &= \frac{0,850 + 0,755 - 0,645}{2} = 0,480 \% \\ \% IR_t &= \frac{0,645 + 0,850 - 0,755}{2} = 0,370 \% \\ \% IX_p &= \frac{11,5 + 8,85 - 16,6}{2} = 1,87 \% \\ \% IX_s &= \frac{16,6 + 11,5 - 8,85}{2} = 9,625 \% \\ \% IX_t &= \frac{8,85 + 16,6 - 11,5}{2} = 6,97 \% \end{aligned}$$

Le schéma correspondant à ce système est représenté par la figure 3.

Fig. 3

Nous nous proposons de calculer :

1) Les différentes régulations pour 3.000 KVA $\cos \varphi = 1$ débités par le secondaire pour différentes valeurs des KVA à $\cos \varphi = 0$ débités par le condensateur synchrone dans le 3^{me} enroulement.

2) Les différentes régulations pour condensateur synchrone = 6.500 KVA à $\cos \varphi = 0$ en avant, pour des charges variables à $\cos \varphi = 1$ au secondaire.

3) Les différentes régulations pour condensateur synchrone = 6.500 KVA à $\cos \varphi = 0$ en avant et 3.000 KVA au secondaire pour des facteurs de puissance différents.

I. — 3.000 KVA à $\cos \varphi = 1$ au secondaire. C. S. variable.

La régulation du secondaire de S à N est :

$$\% \text{Reg}_{sn} = 0,48 + \frac{(9,62)^2}{100} = +0,942 \quad (1)$$

(Nous appelons régulation la variation de tension en % et nous lui affectons le signe + si une chute de tension résulte d'une augmentation de charge et le signe — dans le cas contraire) autrement dit si nous écrivons Reg_{an} à positive nous entendrons que la tension monte de a vers n .

Pour calculer Reg_{tn} , nous remarquerons que la charge réelle sur le tertiaire est : $\frac{6,500}{3} = 2,166$ KVA, or les chutes ont toutes été rapportées à 3.000 KVA, donc celles relatives au tertiaire devront être multipliées par le rapport $\frac{2,166}{3,000} = 0,722$ et on a :

$$\% \text{Rég}_{tn} = \left(-6,97 + \frac{(0,37)^2}{200} \right) 0,722 = -4,95.$$

Pour calculer la régulation sur la branche N P, il faut connaître la charge résultante sur le primaire avec son facteur de puissance, pour cela nous allons composer les charges actives et réactives du secondaire et du tertiaire :

Débit du P au point N par phase.

Débit du S.	3.000	Débit du T.	— 2.166
Pertes dans le S. :		Absorbé dans le S.	
$3.000 \times 0,0048 = ..$	14,45	$3.000 \times 0,0966 \dots$	288
Pertes dans le T.:		Absorbé dans le T.:	
$3.000 \times 0,0037 \times$		$3.000 \times 0,0697 \times$	
$0,722^2 \dots \dots \dots$	5,72	$0,722^2 \dots \dots \dots$	107
	<u>3.020,17</u>		<u>— 1.771</u>

d'où KVA totaux = $\sqrt{3.020^2 + 1.771^2} = 3.501$

avec ces $\varphi = \frac{3.020,17}{3.501} = 0,891$ et $\sin \varphi = 0,454$.

Les impédances en % dans la branche P sont basées sur un débit de 3.000 KVA par phase, mais actuellement le débit est 3,501, soit $\frac{3,501}{3,000} = 1,166$ fois les valeurs données.

La puissance entrant dans P sera la somme des pertes dans P plus la puissance sortant de N.

Entrée dans P			
Kw		KVA réactifs	
Sortie de N.	3.020,17		— 1.771
Pertes dans P			
$0,00275 \times \left(\frac{3,500}{3,000^2} \right) =$	11,30	$0,0187 \times \left(\frac{3,501}{3,000} \right)^2 =$	76,5
	<u>3.031,47</u>		<u>— 1.695,5</u>

(1) Dans la figure ci-contre, on a en effet approximativement :

$$OS_n - OS_a = \pm a + \frac{b^2}{2}$$

En exprimant cette égalité en % de OS_a , avec

$$\begin{cases} a = \alpha \% \text{ de } OS_a \\ b = \beta \% \text{ de } OS_a \end{cases}$$

on a :

$$\% (OS_n - OS_a) = \pm \alpha \% + \frac{\beta^2}{200}$$

(Formule adoptée par l'American Institute of Electrical Engineers).

d'où KVA totaux = $\sqrt{3.031,5^2 + 1.695,5^2} = 3.473$
avec $\cos \varphi = 0,873$ et $\sin \varphi = 0,487$.

Donc la variation dans le primaire est :

$$\text{Rég}_{\text{np}} = \left(\frac{3.473}{3.501} - 1 \right) \times 100 = -0,800 \%$$

d'où

Régulation $\left\{ \begin{array}{l} \text{SP} = \text{Rég}_{\text{np}} + \text{Rég}_{\text{sn}} = -0,800 + 0,94 = 0,140 \% \\ \text{TP} = \text{Rég}_{\text{tn}} + \text{Rég}_{\text{np}} = -4,95 - 0,800 = -5,75 \% \\ \text{ST} = \text{Rég}_{\text{sn}} - \text{Rég}_{\text{tn}} = 0,94 - (-4,95) = +5,89 \% \end{array} \right.$

Si nous effectuons les calculs analogues pour C. S. = 50 % de 6.500 KVA, C. S. = 0 et C. S. = -25 % de 6.500 KVA nous trouvons les valeurs suivantes :

KVA du C. S. en %	100 %	50 %	0	- 25%
Rég SP en % .	+ 0.140	+ 0.78	+ 1.502	+ 1.90
Rég TP.....	- 5.75	- 2.636	+ 0.562	+ 2.197
Rég ST	+ 5.89	+ 3.415	- 0.94	- 0.297

II. — Charge variable avec $\cos \varphi = 1$ au secondaire et 2.166 KVA $\cos \varphi = 0$ avec condensateur synchrone.

Le cas de 100 % de 3.000 KVA au secondaire a déjà été vu ci-dessus.

En effectuant les calculs de la même manière que précédemment, nous trouvons :

KVA au secondaire à $\cos \varphi = 1$	100 % de 3.000 KVA	50 %	0
Rég SP en %	+ 0.140	- 0.53	- 1.28
Rég TP	- 5.75	- 5.95	- 6.23
Reg ST	+ 5.89	+ 5.42	+ 4.95

III. — 3.000 KVA à $\cos \varphi$ variable et 2.166 KVA au condensateur synchrone.

Pour $\cos \varphi = 1$ nous avons déjà trouvé les résultats.

Pour $\cos \varphi = 0,90$ et $0,80$ (courant décalé en arrière de la tension), la même méthode de calculs donne le tableau suivant :

Cos φ au Sec.	1	0.90	0.80
Rég SP en % ..	+ 0.140	+ 0.23	+ 0.730
Rég TP.....	- 5.75	- 5.66	- 5.15
Rég ST.....	+ 5.89	+ 4.89	+ 5.88

De ces résultats, nous concluons que la variation de tension entre PS s'étend au maximum de 1,90 % à - 1,18 % dans les cas extrêmes ; nous en concluons que si le C. S. a son fonctionnement contrôlé par un transformateur de tension dont le primaire est branché sur le 45.000 V., et si nous maintenons une tension constante sur le 45.000 V., la tension sur le primaire sera dans les limites normales de fonctionnement, constante à 1 % près.

Bien qu'à cause du prix très élevé on n'ait pas songé à contrôler le condensateur synchrone par un transformateur de tension 120.000 V., nous voyons cependant que la tension sur le réseau 120.000 V. sera pratiquement constante.

En revanche la tension sur bornes 5.500 V. pourra être élevée à 106 % de sa valeur normale et il faut que le condensateur puisse supporter cette surtension sans inconvénient.

Nous avons voulu montrer pour un cas pratique que l'on peut réaliser ces transformateurs spéciaux dans des conditions répondant aux nécessités de la régulation.

L'étude du courant de court-circuit de ces mêmes transformateurs fera l'objet d'un prochain article.

Ces transformateurs sont en cours d'exécution dans les usines de MM. Schneider et Cie et sont destinés au poste de Jeanne-Rose du réseau de Rhône et Jura.

Considérations économiques sur l'électrification des chemins de fer ⁽¹⁾

par M. DUPIN, Ingénieur des Ponts et Chaussées

On a déjà beaucoup écrit au sujet de l'électrification des chemins de fer, mais surtout au point de vue technique. Je voudrais seulement ici, après avoir sommairement précisé l'état actuel de la question en France, rechercher quels sont, au point de vue économique, les principaux résultats qu'il est permis d'attendre du développement de ce nouveau mode de traction.

Quatre grands réseaux français, l'Etat, le P.-L.-M., le P.-O. et le Midi procèdent actuellement, mais dans des mesures très différentes, à l'électrification d'une partie de leurs lignes.

Le programme actuel du réseau de l'Etat est de beaucoup le moins important des quatre ; il se borne, en effet, à l'électrification des lignes de la banlieue de Paris et porte sur un total d'un peu moins de 400 kilomètres ; il est vrai qu'il s'agit là de lignes ayant à assurer un trafic considérable.

Le P.-L.-M. sera vraisemblablement plus tard celui des réseaux français qui possédera le plus grand nombre de kilomètres de

lignes électrifiées ; cela tient à la grande étendue de ce réseau, riche à la fois en lignes à très gros trafic et en lignes de montagnes, et à ce que le Rhône, ses affluents et quelques autres cours d'eau descendant des Alpes ou du Massif Central, lui fourniront aisément toute l'énergie qui pourra lui être nécessaire. La Compagnie P.-L.-M. envisage dès maintenant l'électrification de plus de 2.000 kilomètres de ligne ; mais, avant de se lancer dans des travaux de cette envergure, elle désire effectuer quelques essais sur son propre réseau et, dans ce but, elle procède actuellement à l'électrification de la ligne de Culoz à Modane qui, sur une longueur totale de 140 kilomètres environ, présente un profil très varié se prêtant parfaitement aux expériences envisagées. L'équipement doit en être terminé dans un délai de trois ans.

L'énergie nécessaire pour assurer la traction entre Culoz et Modane sera achetée par le P.-L.-M. à la Société d'Electrochimie, d'Electrometallurgie et des Aciéries Electriques d'Ugine.

Le P.-L.-M. envisage également pour une date prochaine — 1928 vraisemblablement — l'emploi de la traction électrique sur deux lignes du littoral méditerranéen : Carnoules-Vintimille et Cannes-Grasse, ce qui représente une longueur totale de 174

(1) Extrait des *Annales des Ponts et Chaussées* (Novembre-Décembre 1923).