

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIVERS SYSTÈMES DE TRANSFORMATION

de courant alternatif à haute tension en courant continu
(SUITE)

CHAPITRE PREMIER ENCOMBREMENT

Au point de vue de la surface exigée en plan, pour leur installation, les différents systèmes peuvent être classés approximativement comme suit, à vitesse égale.

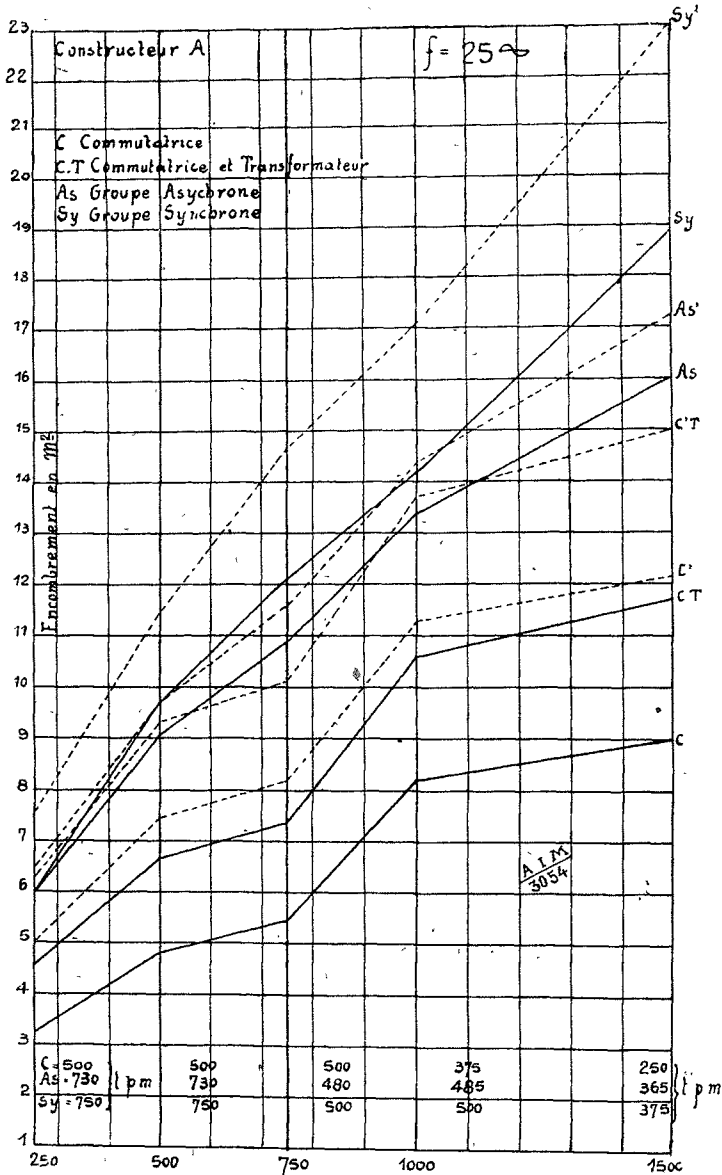


Fig. 1

La commutatrice, avec son transformateur triphasé, occupe l'emplacement minimum.

Le groupe moteur synchrone-dynamo à trois paliers exige un espace supérieur d'environ 100 % ou 75 % à celui de la commutatrice, selon qu'il comporte ou non une excitatrice en bout d'arbre. Comme la surface occupée par le transformateur statique varie entre 30 % et 50 % de celle qui correspond à la commutatrice, cela revient à dire que : rapporté à l'encombrement global de l'ensemble de la commutatrice et de son transformateur, l'encombrement du groupe ci-dessus lui est à peu près supérieur respectivement de 45 % et de 25 % dans les deux cas envisagés.

Quand la commutatrice doit être utilisée avec des bobines de self ou avec un survoltteur en bout d'arbre, il faut compter que ce dernier a pour effet d'augmenter ⁽¹⁾ d'environ 15 % la longueur totale de la machine et que les bobines de self exigent un espace à peu près égal à la moitié de celui qui est occupé par le transformateur.

Le groupe moteur asynchrone-dynamo et la commutatrice en cascade, à même nombre de paliers, ont un encombrement légèrement inférieur à celui du groupe « synchrone » avec excitatrice.

Les encombrements relatifs des différents groupes de

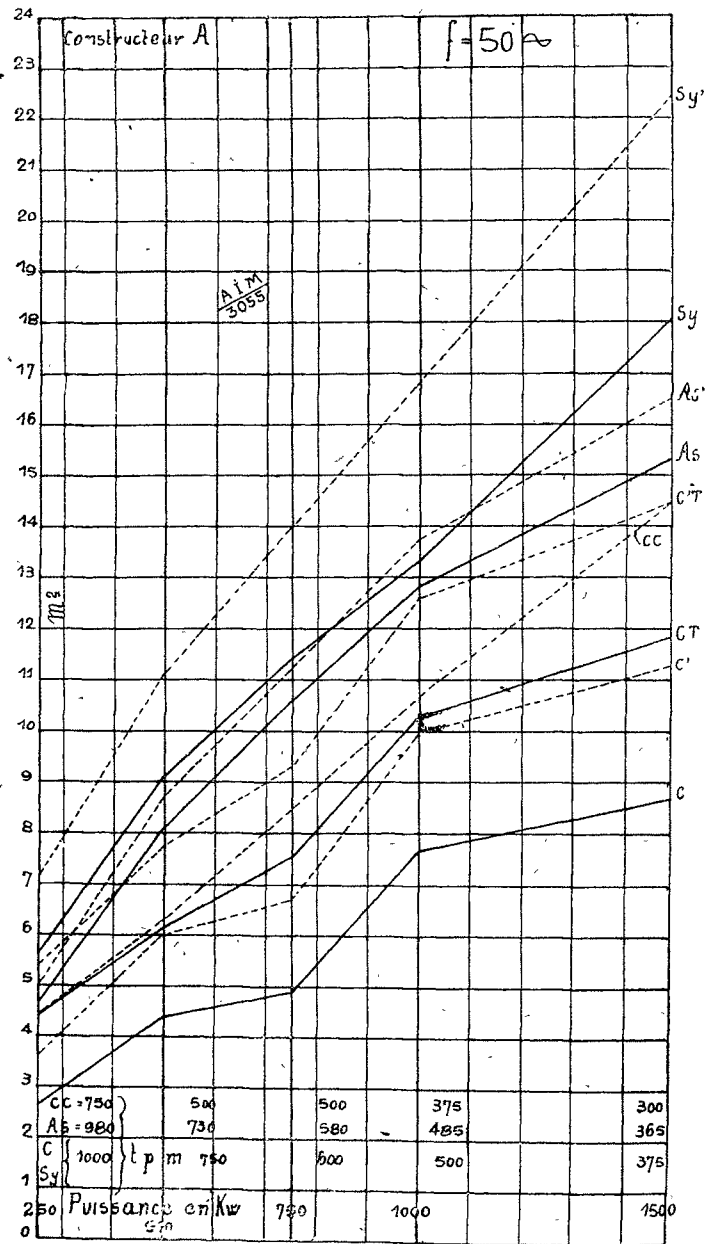


Fig. 2

transformation varie évidemment quelque peu suivant les constructeurs ⁽²⁾.

(1) 10 à 15 % pour des commutatrices de 1.500 à 500 K. W.

(2) Les figures (1) et (2) ci-dessus représentent, suivant les données reçues d'un constructeur [A], les emplacements occupés en plan, à vitesse égale (à la valeur du glissement près pour le moteur asynchrone), par les groupes moteur-générateurs et l'ensemble commutatrice-transformateur, pour des puissances de 250, 500, 750, 1.000 et 1.500 kilowatts et respectivement pour des fréquences de 25 et de 50 périodes par seconde ; (les moteurs étant supposés alimentés directement en haute-tension, de 5.000 à 10.000 volts). Les commutatrices comportent un moteur de lancement en bout d'arbre et les groupes moteurs synchrone-dynamo, un moteur de lancement et une excitatrice.

A chaque système correspondent, sur ces diagrammes, deux lignes

Les rapports ci-dessus, déduits de l'ensemble de la documentation que nous avons reçue des constructeurs et des exploitants, nous ont paru cependant traduire avec une approximation suffisante les conditions moyennes les plus généralement réalisées pour des puissances comprises entre 250 et 1.500 kilowatts. Ils font ressortir le très sensible avantage que possède la commutatrice sur les moteurs-générateurs, au point de vue considéré, surtout quand la tension primaire est trop élevée pour permettre l'alimentation directe des moteurs. Même lorsque cette dernière est possible, la

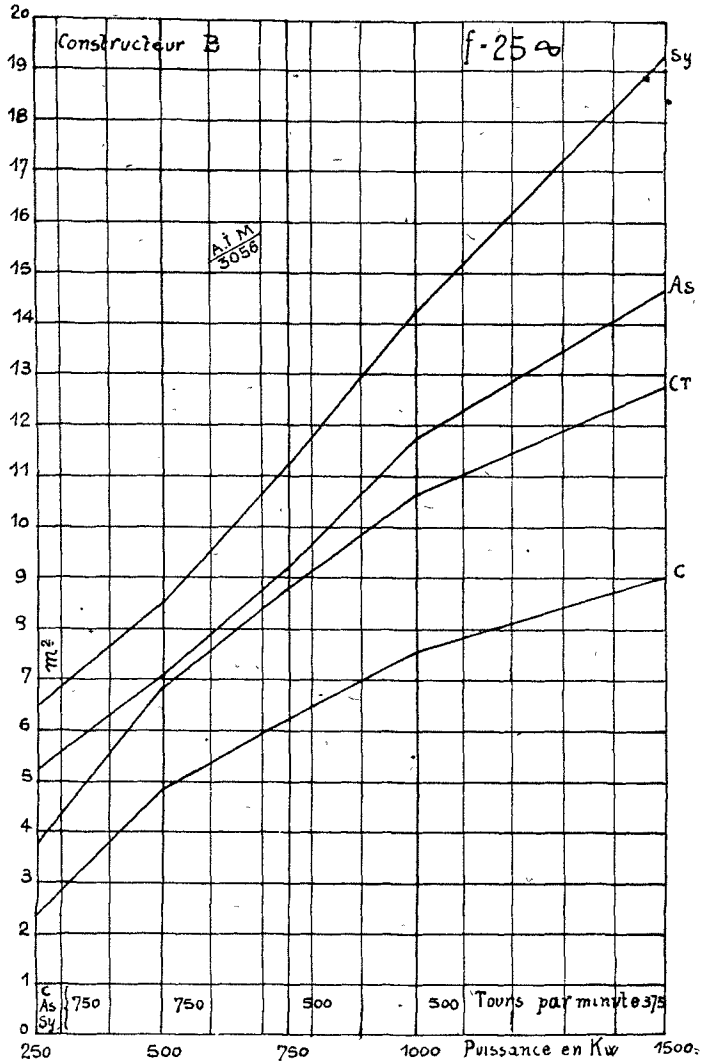


Fig. 3

commutatrice peut être la seule machine utilisable si l'on ne dispose dans la salle des machines que d'un espace très restreint et si l'on a, par contre, le moyen de loger dans un emplacement annexe, galerie ou sous-sol ou terrain contigu, les transformateurs nécessaires.

Mais, en général, cette question d'encombrement est d'or-

l'une, en traits pleins, réunit entre eux les points relatifs à l'encombrement du bâti ; l'autre, en traits discontinus, se réfère à l'encombrement total obtenu en multipliant la largeur de la machine par la longueur de l'arbre.

Les fig. (3) et (4) se rapportent aux encombrements, (bouts d'arbres non compris) donnés par un autre constructeur [B] pour des groupes des mêmes puissances que ci-dessus, mais de vitesses un peu différentes en ce qui concerne les unités de 250 et 750 K. W. (voir tableau III et IV annexés) ; l'excitatrice en bout d'arbre se trouve comprise dans l'encombrement du groupe moteur synchrone-dynamo.

Enfin, nous avons reporté sur la fig. (4), à titre de simple indication, suivant les données reçues d'un troisième constructeur [C], les encombrements, (points reliés par la ligne en traits pointillés), de convertisseurs en cascade tournant à des vitesses quelque peu différentes de celles des groupes précédents (voir tableau V annexé). Nous avons pu constater au sujet de ces derniers encombrements, qu'il y avait concordance complète entre les indications reçues de deux constructeurs différents.

dre secondaire, et, à part le cas particulier ci-dessus envisagé, elle ne prend de réelle importance que pour les sous-stations à établir en pleine ville où le terrain a une grande valeur.

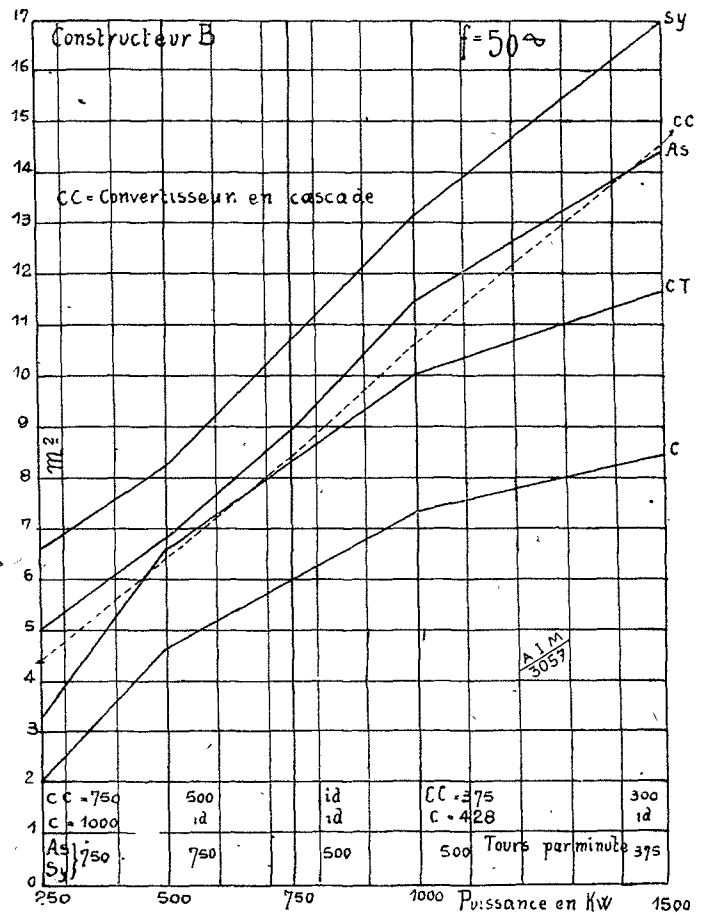


Fig. 4

CHAPITRE II

RENDEMENT

C'est à ce point de vue que la commutatrice présente incontestablement, sur les groupes moteur-générateurs, son plus grand avantage.

Nous savons qu'elle doit sa supériorité, à cet égard, aux différentes causes suivantes, dont les premières sont évidentes : économie des pertes magnétiques et électriques d'une des machines du groupe moteur-générateur ; moindres pertes mécaniques, en raison du moindre nombre de paliers et du plus faible poids de l'armature ; enfin moindre dissipation d'énergie, par effet Joule, dans l'induit que, si ce dernier débitait la même puissance dans une dynamo grâce à la compensation partielle qui se produit, dans cet enroulement, entre les deux espèces de courant : alternatif et continu, qui le parcourent.

Cette compensation est d'autant plus marquée que l'induit de la commutatrice est à un plus grand nombre de phases. Avec l'accroissement de ce dernier s'améliore, en même temps, l'inégale répartition de l'échauffement dans l'enroulement induit, ce qui permet une meilleure utilisation du cuivre employé à la construction de cet enroulement et rend la machine plus apte à supporter les surcharges (1).

(1) - Il peut être intéressant, à ce sujet, de rappeler ci-dessous les valeurs indiquées par M. Steinmetz, (dans l'hypothèse d'une distribution sinusoïdale du champ), pour le rapport des pertes Joule dans un même induit, suivant que ce dernier est utilisé dans une commutatrice ou dans une dynamo.

Les rapports K_M , K_m et K du tableau qui suit, se réfèrent, les deux

C'est pour ces deux raisons que les commutatrices hexaphasées sont maintenant à peu près exclusivement employées, de préférence aux commutatrices triphasées, pour des puissances supérieures à 300 kilowatts. Il faut remonter, en effet, à des installations exécutées il y a une dizaine d'années pour trouver encore des commutatrices de plus de 400 kilowatts dont l'induit soit à trois phases.

Pour les puissances plus faibles, on s'en tient généralement à ce dernier type, pour plus de simplicité, puisqu'on réduit ainsi de moitié le nombre des bagues et des câbles de connexion nécessaires. Il est à remarquer cependant que, pour une même puissance, la somme des intensités efficaces entrant dans la commutatrice est la même, que la machine soit hexaphasée ou triphasée, et qu'en conséquence la section totale des câbles d'interconnexion n'est pas diminuée dans ce dernier cas.

Nous avons représenté dans les deux séries de diagrammes ci-dessous (fig. 5 à 9) et (fig. 10 à 14), suivant les données reçues de deux constructeurs [A] et [D], les rendements aux quatre régimes : 1/4, 2/4, 3/4 et 4/4, des trois groupes de machines suivants : commutatrice hexaphasée avec son transformateur, groupe moteur-synchrone-dynamo, groupe

premiers aux bobines médianes et terminales de chaque phase et le troisième à l'ensemble de l'induit.

Les trois séries de valeurs renseignées pour chaque commutatrice se rapportent respectivement aux conditions suivantes :

1° : ($i_n = 0$; $\cos \varphi = 1$) — 2° : ($i_n = 4\%$; $\cos \varphi = 1$) — 3° : $i_n = 4\%$; $\cos \varphi = 0,95$ ou $\operatorname{tg} \varphi = 0,3$.

VALEURS DE K_m , K_M , K , $\frac{1}{\sqrt{K}}$

	Dynamo	COMMUTATRICE								
		triphasée			tétraphasée			hexaphasée		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
K_m	1	0,225	—	—	0,20	—	—	0,19	—	—
K_M	1	1,2	—	—	0,73	—	—	0,42	—	—
K	1	0,555	0,585	0,702	0,37	0,385	0,483	0,26	0,267	0,354
$\frac{1}{\sqrt{K}}$	1	1,34	1,31	1,19	1,64	1,61	1,44	1,96	1,94	1,68

Le tableau suivant, dû à MM. Kapp et Guilbert, complète les indications précédentes en ce qui concerne les valeurs de K pour différentes valeurs de $\cos \varphi$ et du rapport de l'arc polaire au pas polaire, le courant à vide étant négligé.

VALEUR DE K

Rapport de l'arc polaire au pas polaire	COMMUTATRICE								
	triphasée			tétraphasée			hexaphasée		
	$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,9$	$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,9$	$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,9$	$\cos \varphi = 0,8$
1	1,34	1,09	0,90	1,64	1,28	1,03	1,96	1,44	1,14
$\frac{2}{3}$	1,38	1,13	0,95	1,67	1,34	1,09	1,98	1,49	1,20
$\frac{1}{2}$	1,44	1,21	1,02	1,70	1,38	1,15	1,99	1,53	1,26

Entre autres indications, on peut voir sur ces tableaux :

1° Que dans le cas théorique d'un flux sinusoïdal, d'un décalage et d'un courant à vide nuls, le même induit peut fournir, à échauffement total égal, suivant qu'il est alimenté par du courant triphasé ou hexaphasé, une puissance supérieure de 34 % ou 96 % à celle qu'il pourrait débiter dans une dynamo, (ces chiffres s'abaissant respectivement à 19 % et 68 % pour $i_n = 4\%$ et $\cos \varphi = 0,95$) ;

2° Que le rapport de l'échauffement maximum à l'échauffement minimum tombe du quintuple au double quand on passe de la commutatrice triphasée à la commutatrice hexaphasée.

moteur-asyncrone-dynamo (moteurs alimentés directement à 5.000 volts), pour chacune des cinq puissances : 250 kw., 500 kw., 750 kw., 1.000 kw. et 1.500 kw. déjà envisagées,

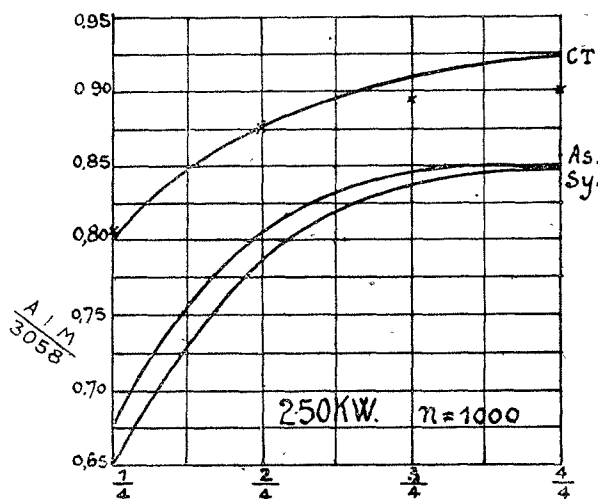


Fig. 5

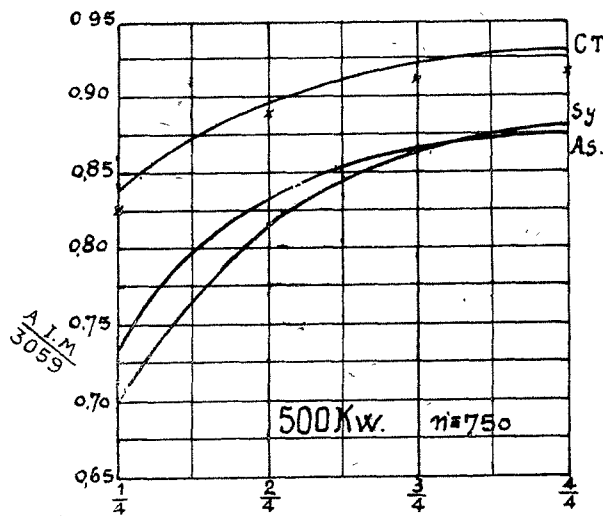


Fig. 6

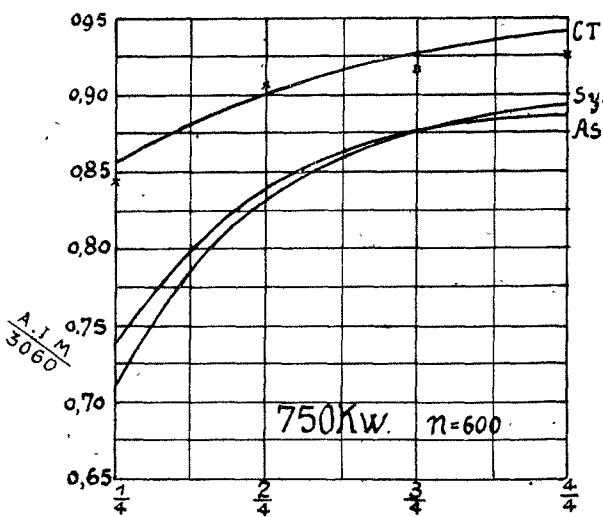


Fig. 7

la fréquence du courant alternatif étant de 50 périodes (1). Les vitesses de ces groupes généralement les mêmes à puissance égale, pour un même constructeur, mais un peu dif-

(1) Les rendements correspondant à la fréquence de 25 périodes seraient sensiblement les mêmes.

férentes d'un constructeur à l'autre, sont données par des diagrammes.

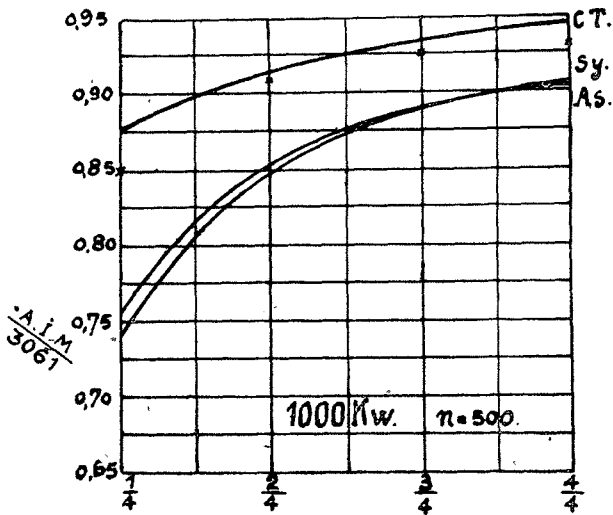


Fig. 8

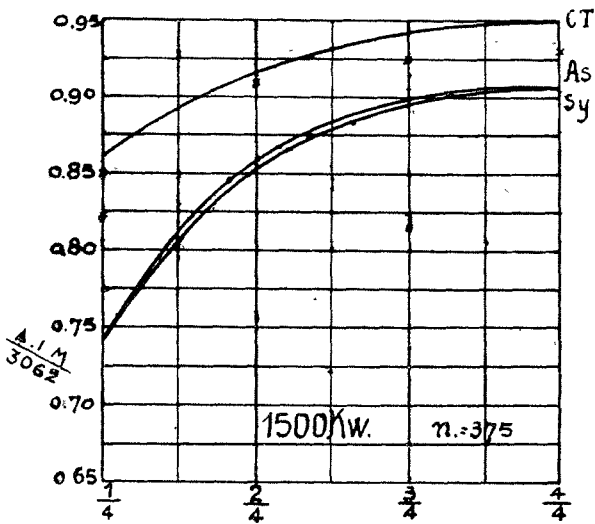


Fig. 9

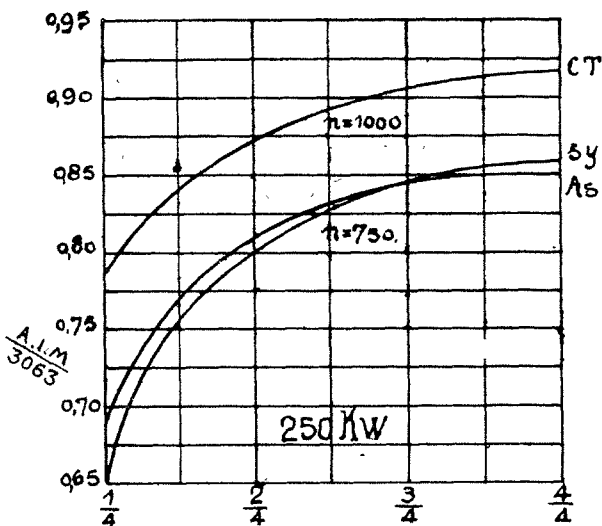


Fig. 10

Ces derniers sont surtout intéressants par les indications qu'ils fournissent concernant les différences existant, selon le régime et la puissance de l'unité, entre les valeurs des rendements des divers systèmes considérés.

Nous y voyons que le rendement du groupe « synchrone » légèrement supérieur à pleine charge, à celui du groupe

« asynchrone », lui devient sensiblement équivalent au voisinage du régime de 3/4 de charge. A demi-charge, le rendement du premier groupe devient un peu inférieur (0.5 à 1.5 pour cent) au rendement du second, par suite des pertes de l'excitatrice et aussi du fait que les pertes dans le rotor du moteur synchrone ne diminuent que très peu quand la charge décroît tandis qu'avec le moteur asynchrone les pertes rotoriques baissent proportionnellement au carré de la charge.

Si nous comparons, d'autre part, le rendement de l'ensemble de la commutatrice et de son transformateur au rendement moyen des deux groupes moteur-générateurs, nous observons que l'excès du dernier sur le premier, aux différents régimes, varie, selon la puissance, entre les valeurs extrêmes (correspondant respectivement à des unités de 250 kw. et 1.500 kw.), consignées dans le tableau ci-dessous.

DIFFERENCE

entre les rendements du groupe commutatrice-transformateur et du groupe moteur-générateur

Régime	CONSTRUCTEUR [D]	CONSTRUCTEUR [A]
	de 250 kw à 1500 kw	de 250 kw à 1500 kw
4/4	6 ‰ à 5 ‰	7 ‰ à 4,25 ‰
3/4	6,5 ‰ à 5,5 ‰	6,5 ‰ à 4,5 ‰
2/4	7,25 ‰ à 6,75 ‰	8 ‰ à 6,25 ‰
1/4	13,5 ‰ à 11,5 ‰	14 ‰ à 11,75 ‰

Ces deux séries de valeurs sont, comme on le voit, assez concordantes ; nous les avons trouvées d'ailleurs à peu près vérifiées par les différences correspondantes résultant des rendements qui nous ont été donnés par quelques exploitants, sauf peut-être en ce qui concerne les grandes puissances (800 à 1.500 kw.), pour lesquelles ces derniers apprécient plutôt entre 3,5 % et 4 %; à pleine charge, la différence considérée. Sous cette dernière réserve, les susdites valeurs paraissent donc pouvoir être prises comme bases dans la comparaison des systèmes envisagés, au point de vue qui nous occupe (1).

L'importance de l'avantage qui résulte, pour la commutatrice, de son meilleur rendement, se détermine évidemment dans chaque cas, par la valeur des kilowatts-heures supplémentaires dont cette machine permet l'économie. Celle-ci, très faible pour les sous-stations alimentées par des centrales hydrauliques, devient au contraire très sensible quand l'énergie provient d'usines à vapeur brûlant un combustible d'un coût élevé, et surtout quand cette énergie doit être achetée à une société étrangère.

Ainsi, sur la base d'un prix de 8 centimes par kw.-h., une commutatrice de 500 kw. travaillant au régime moyen de 3/4 de charge, pendant 4.000 heures par an, permet d'éco-

(1) La commutatrice permet encore, par l'emploi de paliers à billes, de réduire à peu près de moitié les pertes par frottement correspondant aux paliers lisses ; mais ces dernières pertes ne représentent que 0,0012 à 0,0010 de la puissance nominale, pour des machines de 500 à 1.000 kw. ; le gain ainsi réalisé est peu intéressant. (Ces chiffres résultent de déterminations très précises effectuées par M Perret, chef de service aux Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont ; les essais de cet ingénieur ont montré que le coefficient de frottement des fusées, avec paliers rodés, varie très peu et est de l'ordre de 0,005) Aussi bien l'utilisation de paliers à billes ne paraît pas s'être beaucoup répandue jusqu'à présent dans la pratique. Seule la Société des Tramways de Leeds nous a signalé l'essai qu'elle a fait de ce système sur une commutatrice de 325 kw., essai qu'elle a dû d'ailleurs abandonner par suite des ennuis occasionnés, en service, par le bris des billes.

nomiser annuellement sur la consommation d'un groupe moteur-générateur, une somme de :

$0.75 \times 0.05 \times 500 \times 4.000 \times 0.08 = 6.000$ francs, soit près du quart de la valeur d'achat de l'ensemble de la commutatrice et de son transformateur.

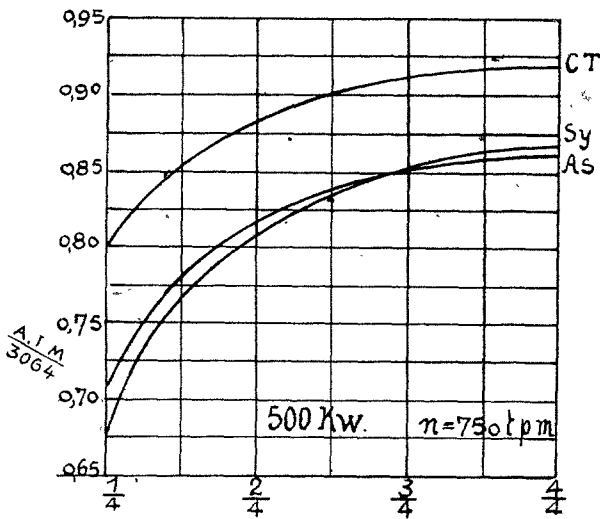


Fig. 11

Grâce à l'absence de bagues collectrices, l'induit à courant continu peut être facilement alimenté en courant à 12 phases et, dans la pratique, il en est presque exclusivement ainsi (1). Dans ces conditions, contrairement à ce qui se passe pour la commutatrice simple, les pertes ohmiques se

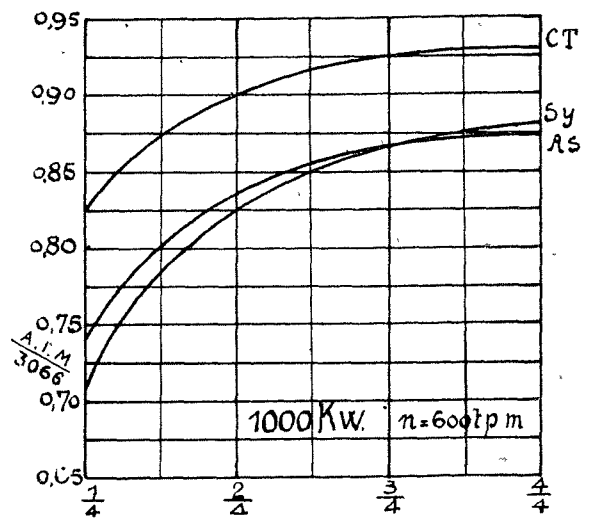


Fig. 13

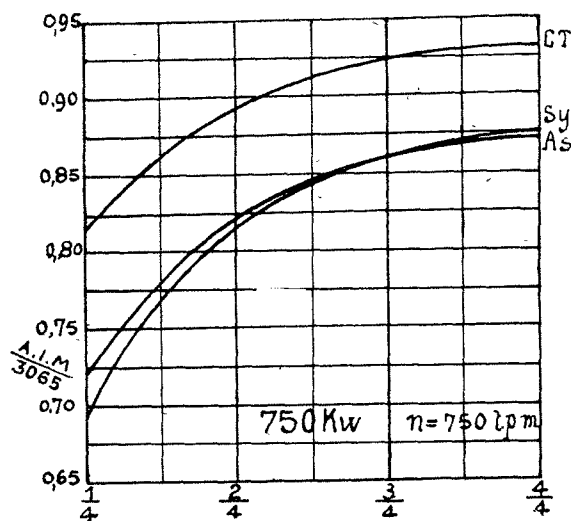


Fig. 12

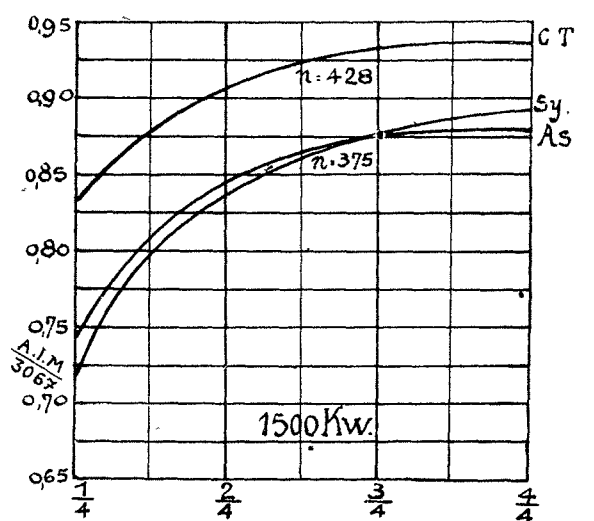


Fig. 14

Ce simple exemple explique l'unanimité avec laquelle toutes les sociétés utilisant des commutatrices ont indiqué, dans leur réponse au questionnaire, le rendement très élevé de ces machines comme la principale des raisons ayant déterminé leur choix.

Quant au convertisseur en cascade, il doit, comme l'on sait, à la nature mixte de sa constitution, de réaliser un moyen terme entre la commutatrice et le moteur-générateur (1).

(1) Si les deux machines qui le composent ont le même nombre de pôles, le côté alternatif travaille moitié comme moteur asynchrone, moitié comme transformateur ; le côté continu moitié comme génératrice à courant continu, moitié comme commutatrice. Si les nombres de paires de pôles, p_a du côté alternatif et p_c du côté continu, sont différents, la fraction :

$$\frac{p_a}{p}, \text{ ou } p = p_a + p_c$$

de l'énergie amenée à la machine asynchrone est transformée en énergie mécanique et la fraction complémentaire $\frac{p_c}{p}$ de cette même énergie est transmise du stator au rotor, comme énergie électrique s'écoulant directement dans la machine à courant continu

Le rapport $\frac{p_c}{p_a}$ a généralement pour valeur 1 ou $4/3$.

distribuent d'une manière sensiblement uniforme dans tout l'enroulement de l'induit (2). La compensation des courants dans ce dernier s'effectue cependant d'une manière moins complète que dans la commutatrice ordinaire et c'est pourquoi les pertes par effet Joule correspondantes sont un peu

(1) Pour les machines de puissance moyenne, quelques constructeurs se contentent pourtant de n'utiliser que 9 phases, le gain réalisé en passant de 9 à 12 phases n'étant pas considérable

La plupart des convertisseurs en cascade ont été construits jusqu'à présent, à deux paliers jusqu'à 600 K. W. et à trois paliers pour les puissances supérieures. Mais il y a maintenant une tendance à peu près générale à supprimer le palier médian pour toutes les puissances jusqu'à 1.500 K. W. Cette disposition n'a pas seulement pour avantages de réduire au minimum l'encombrement du groupe et de faciliter les connexions entre les deux enroulements tournants ; elle se prête aussi à la constitution d'un ensemble cuirassé susceptible d'être aisément refroidi par circulation d'air insufflé par la partie centrale dans les deux machines. Ce qui permet, moyennant une très faible dépense d'énergie, (le moteur du ventilateur consomme, en effet, moins de 0,001 de la puissance du groupe), de tirer une meilleure utilisation du convertisseur.

(2) C'est ce qu'indique le tableau ci-dessous dû à M. Hallo, où la commutatrice en cascade et la commutatrice simple se trouvent comparées, (dans les deux cas $\frac{p_c}{p} = 0,5$ et $\frac{p_c}{p} = 0,6$), pour différents décalages et différents nombres de phase m , au point de vue de la valeur du rapport de

plus élevées, surtout à faible décalage (1). Les pertes dans le fer du même induit sont, par contre, moins grandes que pour la commutatrice puisque la fréquence relative y est moitié moindre. Enfin, les pertes dues aux harmoniques sont plus considérables pour la commutatrice simple que pour la commutatrice en cascade, de sorte que le rendement global de celle-ci est, en définitive, beaucoup plus rapproché du rendement du groupe transformateur-commutatrice que de celui du groupe moteur-générateur, surtout aux faibles charges.

Le diagramme (fig. 15) ci-dessous, tracé au moyen des valeurs données par le constructeur « C », montre comment varie, aux différents régimes, suivant la puissance de l'unité, le rendement de ce système de machines. Le convertisseur en cascade présente cette particularité intéressante que l'écart entre son rendement et celui de la commutatrice avec transformateur, loin d'augmenter quand la charge baisse, tend plutôt à diminuer avec elle (2) ; constructeurs et

l'échauffement maximum K à l'échauffement minimum Km des spires de l'induit.

VALEURS de $\frac{K_m}{K}$						
	Commutatrice			Convertisseur en cascade		
	$\frac{P_c}{p} = 1$			$\frac{P_c}{p} = 0,5$	$\frac{P_c}{p} = 0,6$	
	m = 3	m = 4	m = 6	m = 9	m = 12	m = 12
0	5,5	3,8	2,2	1,13	1,07	1,11
10	6,8	5,1	3,1	1,26	1,21	1,31
15	7,4	5,8	3,7	1,4	1,31	1,5
20	7,9	6,4	4,3	1,6	1,4	1,6
25	8,2	7,0	4,9	1,8	1,5	1,8
30	8,3	7,5	5,5	2,0	1,7	2,0
40	7,7	7,0	5,3	2,3	1,9	2,2
45	7,0	6,8	4,7	2,6	2,0	2,3
50	6,1	5,4	4,0	2,8	2,1	2,3
60	4,3	4,0	2,8	2,7	2,1	2,1

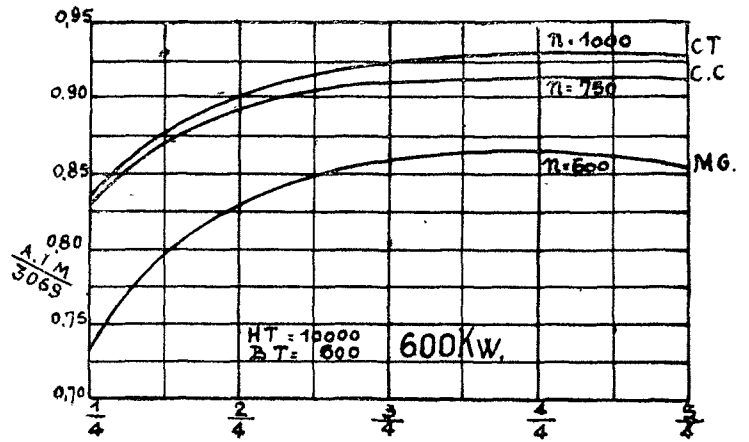
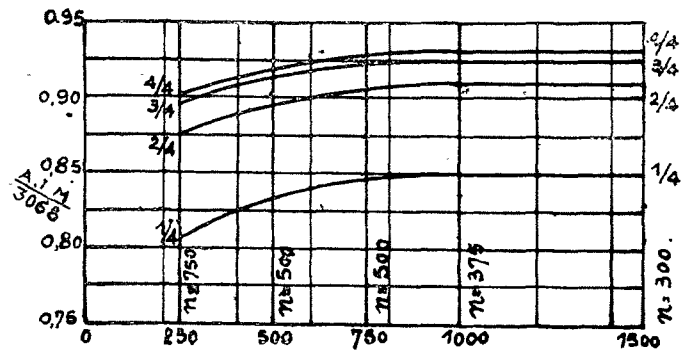
(1) Le tableau suivant, du même auteur, donne la comparaison des puissances qu'un même induit peut fournir dans les deux machines, à échauffement total égal, dans les diverses conditions indiquées dans ce tableau (φ = angle de décalage entre la tension et le courant du réseau ; Ψ = angle de décalage interne dans la commutatrice en cascade ; courant magnétisant du moteur supposé égal à 20 %). Les valeurs renseignées sont celles de la quantité $\frac{1}{\sqrt{K}}$ précédemment définie.

Commutatrice			Conv. en cascade			Commutatrice			Conv. en caoc.	
φ	$\cos \varphi$	Cour. dév. en %	φ	$\cos \varphi$	Cour. dév. en %	m = 3	m = 4	m = 6	$\frac{P_c}{p} = 0,5$	$\frac{P_c}{p} = 0,6$
0	1,0	0	11	0,98	20,0	1,33	1,62	1,93	1,57	1,73
5	0,996	8,75	16	0,96	28,8	1,32	1,60	1,90	1,55	1,70
10	0,985	17,6	20	0,94	36,4	1,29	1,56	1,84	1,53	1,66
15	0,966	26,8	25	0,906	46,6	1,24	1,49	1,73	1,50	1,60
20	0,94	36,4	30	0,866	57,8	1,17	1,41	1,61	1,46	1,54

On voit sur ce tableau que la commutatrice en cascade, pour $\frac{P_c}{p} = 0,6$, devient à peu près équivalente à la commutatrice hexaphasée, quand toutes deux doivent fournir au réseau un courant dév. d'environ 30 %.

(2) C'est ce qui ressort des fig. 5 à 9 sur lesquelles nous avons représenté par une croix les points correspondant aux rendements C sus-indiqués,

exploitants nous ont paru d'accord pour estimer entre 1 % et 2 % la valeur de cette différence (1) au régime de pleine charge.



D'après le constructeur précité, le rendement du convertisseur en cascade serait, d'autre part, supérieur à celui du groupe moteur générateur de : 2,5 % à pleine charge, 4 % à 3/4 de charge et 8 % à demi-charge. Cette dernière valeur nous semble cependant un peu forte et nous pensons que la différence correspondante est en général, plutôt voisine de 5,5 %. Quoiqu'il en soit, les chiffres qui précèdent font suffisamment apparaître l'économie sensible d'énergie que permet de réaliser, aux faibles régimes, la commutatrice en cascade, par rapport aux groupes moteurs générateurs.

CHAPITRE III

PRIX

Les rapports des prix des différents groupes de transformation varient beaucoup selon les constructeurs, et cela n'a rien que de très naturel, chacun de ceux-ci s'étant, en général, plus particulièrement spécialisé dans la construction d'un système déterminé et ayant atteint par suite, dans la réalisation de ce dernier, une perfection plus grande qu'en ce qui concerne les machines des autres systèmes. Ainsi s'expliquent les discordances qui peuvent être constatées entre

non pas pour tirer de ce rapprochement une comparaison entre les valeurs des rendements des machines considérées, mais seulement pour pouvoir comparer, au point de vue de leur allure générale, les courbes figurant la variation du rendement de ces machines en fonction de la charge.

(1) Cette différence est de 1,5 % sur le diagramme (fig. 16) relatif à la comparaison faite par un constructeur E, des rendements des trois groupes suivants : commutatrice avec transformateur, convertisseur en cascade, groupe moteur-générateur, d'une même puissance, 600 kilowatts, mais de vitesse différentes respectivement égales à 1.000, 750 et 600 tours par minute.

les tableaux VI et VII ci-annexés (1), où se trouvent indiqués suivant les données de deux constructeurs « B » et « D », les prix (n) des groupes moteur-générateurs rapportés au coût de l'ensemble commutatrice-transformateur, pris pour unité.

Il semble cependant que l'on puisse déduire de ces tableaux, en ne considérant que celles de leurs indications qui concordent sensiblement entre elles, la comparaison approximative suivante.

A conditions égales, le groupe moteur-générateur (1), coûte de 15 à 25 % plus cher que l'ensemble commutatrice

(1) Les prix indiqués dans ces tableaux s'entendent pour une tension voisine de 5 000 volts, directement appliquée aux bornes des moteurs, les groupes moteurs-synchrone-dynamo comprenant une excitatrice en bout d'arbre.

Nous avons réuni d'autre part, à titre documentaire, dans les tableaux IX, X, XI et XII ci-annexés, les prix qui nous ont été donnés par quelques sociétés exploitantes pour les machines utilisées dans leurs installations. Ces prix sont trop peu nombreux et se rapportent en général à des dates d'acquisition et à des conditions trop différentes pour qu'il soit possible de tirer de leur comparaison quelque conclusion précise au sujet des prix relatifs des systèmes considérés, à conditions égales.

On peut constater cependant sur le diagramme fig 17 qui donne la représentation graphique de ces prix avec l'indication, près de chaque point, de la vitesse du groupe correspondant, combien le prix du groupe moteur asynchrone dynamo est toujours supérieur à celui de la commutatrice avec transformateur. Les prix relatifs à ce dernier ensemble, en ne considérant que les commutatrices shunt se groupent, assez bien dans le voisinage de la ligne A-B (250 kw / 15.600 francs et 1 000 kw / 39 800 francs) et se confondent à peu près, ainsi qu'on peut le constater, avec les prix donnés par le constructeur B (voir tableau VI).

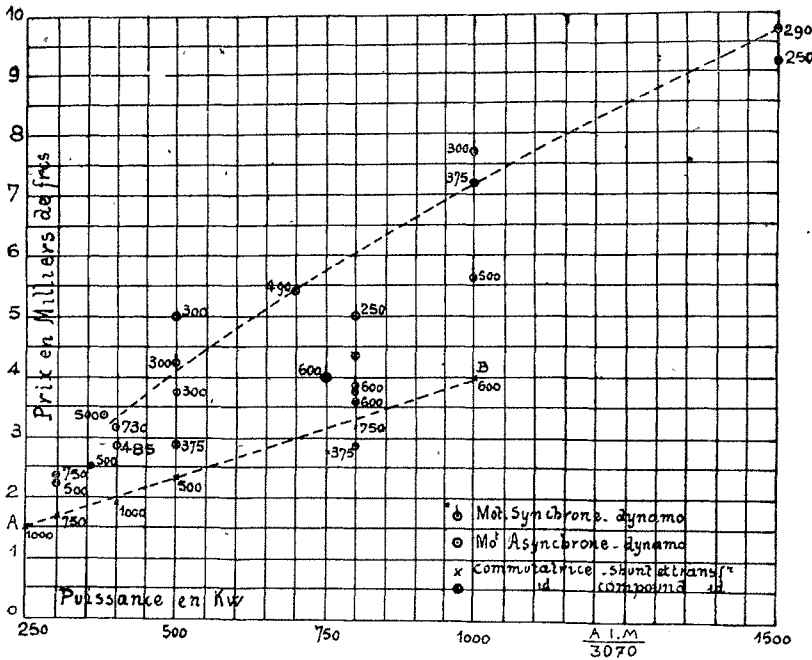


Fig. 17

(1) Les indications des susdits tableaux sont particulièrement discordantes en ce qui concerne les prix relatifs des deux catégories de moteur-générateurs. Pour le constructeur B, le groupe « asynchrone » coûte de 5 à 18 % plus cher que le groupe « synchrone » tandis que, suivant le constructeur D, c'est au contraire ce dernier groupe qui coûterait de 10 à 18 % plus cher que le premier.

En réalité les prix de ces deux groupes doivent être sensiblement équivalents. Le moteur-synchrone, dont les enroulements sont mieux dégagés, permet l'emploi de densités plus fortes dans le cuivre ; de plus la construction de son rotor exige beaucoup moins de main-d'œuvre que celle du rotor du moteur asynchrone ; de ce fait, son prix est généralement inférieur à celui de ce moteur de 10 % environ, soit $10 \times 0,45 = 4,5 \%$ de la valeur du groupe. Comme d'autre part, l'excitatrice en bout d'arbre entraîne une majoration de près de 6 % du prix du groupe synchrone, la différence qui peut subsister entre les prix globaux des deux groupes considérés paraît ainsi devoir être d'un ordre tout à fait négligeable.

et transformateur pour des puissances comprises entre 250 et 500 kw. Cette différence atteint environ 30 % pour des puissances de 800 à 1.000 kw. ; elle augmente encore de valeur pour des puissances plus élevées au point d'atteindre et même dépasser 40 % pour 1.500 kw.

Toutes ces différences doivent être réduites d'environ 5 % (en valeur absolue) à cause de la dépense supplémentaire que détermine pour la commutatrice le câblage de raccordement de cette machine à son transformateur. D'autre part, la comparaison qui précède se rapporte au cas d'une tension fixe. Si celle-ci doit pouvoir varier de 10 % avec la charge, il faut tenir compte de ce que cette condition entraîne, selon la puissance, une majoration de prix d'environ 6 à 3 % pour le moteur générateur et de 20 à 12 % pour la commutatrice (s'il s'agit d'une excitation compound avec self ou d'un survolteur en bout d'arbre) (1).

Les différences ci-dessus deviennent alors respectivement :

- 0 à 5 % de 250 à 500 kw. ;
- 12 % de 800 à 1.000 kw. ;
- 25 % vers 1.500 kw.

On peut observer enfin que la commutatrice exige moins de pièces de rechange que les groupes moteur-générateurs et que le convertisseur en cascade, mais qu'elle nécessite par contre un appareillage plus compliqué que ce convertisseur et que le groupe moteur-asynchrone-dynamo, ce qui détermine, en faveur de ce dernier, une légère réduction des pourcentages ci-dessus.

En résumé, il résulte de ce qui précède que l'économie de premier établissement que la commutatrice permet de réaliser, par rapport aux moteur-générateurs, généralement peu sensible pour de faibles puissances, devient, au contraire, un élément important à prendre en considération lorsqu'il s'agit de puissances élevées (2).

En ce qui concerne les convertisseurs en cascade, leur prix, de l'avis des exploitants, est pratiquement équivalent à celui des groupes moteur-générateurs, pour la fréquence de 50 périodes. Pour 25 périodes, ces convertisseurs sont, naturellement beaucoup plus coûteux que ces derniers groupes, à cause de la vitesse trop faible à laquelle ils doivent tourner et il est clair que la différence relative des prix s'accroît d'autant plus qu'il s'agit de puissances moins grandes.

(A suivre.)

F. SARRAT,
 Ingénieur à la Cie G^{le} de Railways et d'Electricité de Bruxelles.

(1) Dans le cas de l'emploi d'un régulateur d'induction, la majoration correspondante ne descend guère au-dessous de 20 %, de sorte que les différences considérées se réduisent alors à peu près aux valeurs suivantes :

- 9 % vers 1.000 kw.
- 17 % vers 1.500 kw.

(2) Il est évident, d'autre part, que l'importance de cette économie s'accroît encore davantage, pour des tensions primaires supérieures à 12 000 ou 15 000 volts, puisque les groupes moteurs-générateurs exigent alors, comme la commutatrice, l'emploi de transformateurs statiques pour abaisser la tension.

Voici, à ce sujet, les indications que nous ont fournies deux constructeurs différents concernant la valeur du rapport :

$$\frac{\text{Prix (groupe asynchrone BT. dynamo + Transform.)}}{\text{Prix (groupe moteur asynchrone HT. Dynamo)}}$$

Suivant le constructeur D, pour des tensions de 5.000 à 10.000 volts et pour des puissances comprises entre 250 et 1.500 kw., ce rapport varie progressivement de 1,36 à 1,27.

D'après le constructeur B, le même rapport varie selon la puissance de 1,35 à 1,22 pour une tension de 5 000 volts et de 1,40 à 1,28 pour une tension de 10.000 volts.

Ces deux séries d'indications sont, comme on voit, très concordantes.