

et d'amortissement exigés par l'appareillage automatique sont de beaucoup inférieurs à ceux demandés par l'entretien d'un personnel de surveillance.

A ce premier avantage vient s'en ajouter un autre, non moins important. Suivant les circonstances, les sous-stations automatiques peuvent en effet donner lieu à des économies plus ou moins sensibles de matériel des machines et des canalisations de l'installation principale. Car, à l'encontre des sous-stations à surveillance personnelle qui doivent être situées dans des endroits déterminés par les conditions de service plutôt que par des considérations techniques, les sous-stations automatiques peuvent être réparties d'une façon bien plus rationnelle, le long du réseau récepteur. Les sous-stations automatiques peuvent donc être établies au voisinage immédiat des points d'alimentation du réseau à courant continu. Il s'ensuit en général une diminution de matériel de la ligne d'alimentation et une moins grande valeur de la chute de tension. En même temps, on peut réduire fortement les dispositifs de réglage de la tension toujours relativement très onéreux pour les com-

mutatrices et nécessaires pourtant dans les installations non automatiques pour compenser les grandes chutes de tension. Nous citons par exemple des bobines de self de réglage, des régulateurs d'induction, des machines additionnelles, etc. On comprend donc toute l'importance qu'il y a à fixer dès le début, dans des projets d'installations à courant continu si la transformation du courant est faite ou non dans des sous-stations automatiques ; car dans ces conditions seulement on peut apporter à l'installation les simplifications que nous venons de signaler.

Il ressort de ce qui précède qu'en raison de leurs avantages, tant économiques que techniques, les sous-stations automatiques de transformation joueront à l'avenir un rôle important dans la transformation et la distribution de l'énergie électrique. C'est la raison pour laquelle nous avons jugé à propos de présenter aux lecteurs de la *Houille Blanche* les principes généraux posés à la base des installations automatiques de transformation.

V. SYLVESTRE,
Ingénieur A.M. et I.E.G.

CALCUL PRATIQUE

D'UNE

LONGUE LIGNE DE TRANSPORT DE FORCE

A l'heure actuelle, puisque de toute part on s'occupe de la construction du superréseau, il devient indispensable de pouvoir calculer rapidement une longue ligne de transport de force, afin de pouvoir se rendre compte des rapports entre les tensions au départ et à l'arrivée, dans différentes conditions de marche.

Les formules que Peek (1) et Lewis (2) ont données dans la *General Electric Review* sont très pratiques quand on veut calculer rapidement une ligne de transport de force donnée.

Formules de Peek. — Les formules de Peek tiennent compte de la résistance, de la réactance et de la capacité distribuée de façon uniforme. Elles ont été établies en développant une équation compliquées en série rapidement convergente, dont on peut négliger la plupart des termes. Elles sont plus exactes et d'un emploi plus facile que les méthodes dites « approximatives ».

Ces formules sont :

$$(1) \quad E_1 = E_0 \left(1 + \frac{ZY}{2} \right) \pm ZI_0 \left(1 + \frac{ZY}{6} \right)$$

$$(2) \quad I_1 = I_0 \left(1 + \frac{ZY}{2} \right) \pm YE_0 \left(1 + \frac{ZY}{6} \right)$$

En ce qui concerne le double signe + s'applique si E_0 et I_0 sont la tension et le courant à l'arrivée et — s'ils sont la tension et le courant au départ.

Nous désignerons dans ce qui suit :

- E_g tension au départ (usine génératrice) entre phases.
- E_r tension à l'arrivée (usine réceptrice) entre phases.
- I_g courant au départ, par fils.
- E_s courant à l'arrivée, par fils.
- e_r tension entre phase et neutre à l'arrivée.

e_g tension entre phase et neutre au départ.

i_1 courant watté.

i_2 courant déwatté.

I_L courant de charge.

I_C courant de capacité de la ligne.

Pour calculer la ligne, il est plus facile de prendre la tension entre une phase et le neutre ; en triphasé.

$$e_r = E_r / \sqrt{3}$$

$$I_r = \frac{\text{Puissance}}{E_r \sqrt{3} \cos \varphi}$$

$I_r = i_1 + j i_2$ si le courant est décalé en arrière.

$I_r = i_1 - j i_2$ si le courant est décalé en avant.

r = résistance ohmique en ohms par klm.

x = réactance d'un conducteur en ohms par klm par rapport au neutre. $x = 2 \pi f L$ ($L = 0.4605 \cdot \text{Log}_{10} \frac{S}{\frac{d}{2}} + 0.05$).

(S distance entre conducteurs, d diamètre de ceux-ci.

(L en millihenrys par klm.

b = capacité de la ligne par klm. = $2 \pi C$.

g = pertes par isolateurs, pertes par corona, etc., en pratique il est négligeable.

$Y = g - jb = -j 2 \pi f C$.

C = capacité en farads d'un seul conducteur par rapport au neutre.

$$C = \frac{0.02413}{\log_{10} \left(\frac{S}{\frac{1}{2}d} \right)} \text{ par klm}$$

En introduisant ces valeurs dans les formules 1 et 2 après les avoir multipliées par la longueur de la ligne en klm., on peut facilement calculer la ligne.

Nous allons traiter un exemple :

Soit une ligne de transmission triphasée de 385 klm. de longueur composée de 3 câbles de 244 m/m² de section, ayant un diamètre de 20.3 mm., et distant les uns des autres de 6100 m/m.

La résistance au kilomètre d'une telle ligne est de :

En Cuivr :	En Aluminium
$r = 0.08$ ohms	$r = 0.146$

(1) *General Electric Review*, juin 1913, volume 16, n° 6.

(2) *General Electric Review*, novembre 1919, vol. 22, n° 11.

Cuivre

$$x = 0.615$$

$$b = 4,3 \cdot 10^{-6}$$

$$g = 0.0936 \cdot 10^{-3} \text{ environ}$$

$$R = 385 \times 0.08 = 30.8 \text{ ohms}$$

$$X = 385 \times 0.615 = 236.5$$

$$Y = 385 \times (0.0936 - j 4,3) \cdot 10^{-6}$$

$$= 0.000036 - j 0.001655$$

$$Z = R - j X = 30.8j - 236.5$$

$$ZY = (30.8 - j 236.5) (0.000036 - 0.001655j) = 0.00112 - 0.391j + (-0.051 - 0.00085)j$$

$$ZY = -0.390 - 0.0595j$$

$$I + \frac{ZY}{2} = 0.805 - 0.0297j$$

$$I + \frac{ZY}{6} = 0.935 - 0.01j$$

$$Z \left(I + \frac{ZY}{6} \right) = (30.8 - 236.5j) (0.935 - 0.01j) = 26.4 - 221j$$

$$Y \left(I + \frac{ZY}{6} \right) = 0.0000176 - 0.00154j$$

Aluminium

$$x = 0.615$$

$$b = 4,3 \cdot 10^{-6}$$

$$g = 0.0936 \cdot 10^{-6}$$

$$R = 385 \times 0.146 = 56.2 \text{ ohms}$$

$$X = 236.5$$

$$Y = 0.000035 - j 0.001655$$

$$Z = 56,2 - j 236.5$$

$$ZY = (56.2 - j 236.5) (0.000036 - 0.001655j) = 0.00202 - 0.391j + (-0.6927 - 0.0085)j$$

$$ZY = -0.390 - 0.1012j$$

$$I + \frac{ZY}{2} = 0.805 - 0.0506j$$

$$I + \frac{ZY}{6} = 0.935 - 0.017j$$

$$Z \left(I + \frac{ZY}{6} \right) = (56.2 - 236.5j) (0.935 - 0.017j) = 48.5 - 222j$$

$$Y \left(I + \frac{ZY}{6} \right) = 0.0000054 - 0.00154j$$

$$P = 3 (93.000 \times 2.035 + 3440 \times 178.3) = 3 (188 + 612) = 2.400 \text{ kws}$$

$$\cos \varphi = \frac{2400}{55.800} = 0.432$$

Rendement = 0

P = 3.300 kws

$$\cos \varphi = \frac{3300}{55.800} = 0.6665$$

Rendement = 0

Supposons maintenant une charge de 1.000 kws à cos = 0.85 en retard à l'arrivée.

$$I_{1000} = \frac{4000}{200 \sqrt{3} \times 0.85} = 3.4 = 2.89 + 1.85j$$

Cuivre

$$Eg = 93.000 - 3440j + (2.89 + 1.85j) (26.4 - 221j) = 93.486 - 4029j = 93.600 \text{ volts}$$

$$Ig = 2.05 - 178.4j + (2.89 + 1.85j) (0.805 - 0.0297j) = 4.44 - 177.6j = 178 \text{ ampères}$$

Kva = 49.400
Kws = 3180
Cos φ = 0.0644
Rendement = 26.8 %

Aluminium

$$Eg = 93.000 - 5850j + (2.89 + 1.85j) (48.5 - 222j) = 93.574 - 6405j = 93.700 \text{ volts}$$

$$Ig = 0.625 - 178.3j + (2.89 + 1.85j) (0.805 - 0.0506j) = 3.058 - 177j = 177.4 \text{ ampères}$$

Kva = 49.400
Kws = 4420
Cos φ = 0.09
Rendement = 19.3 %

Soit une tension entre phase de 200.000 volts et une tension entre conducteurs et neutre de 115.000 volts.

A VIDE

Cuivre

$$I_r = 0$$

$$Eg_0 = 115.500 (0.805 - 0.0297j) = 93.000 - 3440j = 93.080 \text{ volts}$$

$$Ig_0 = 115.500 (0.0000176 - 0.00154j) = 2.035 - 178.3j = 178.4 \text{ ampères}$$

Kva = 178.4 × 93.080 × 3 = 55.800

Aluminium

$$Eg_0 = 115.500 (0.805 - 0.0506j) = 93.000 - 5850j = 93.100 \text{ volts}$$

$$Ig_0 = 115.500 (0.0000054 - 0.00154j) = 0.625 - 178.3j = 178.3 \text{ ampères}$$

Kva = 55.800

On peut calculer les kilowatts par la formule :

$$P = 3 (e_1 i_1 + e_2 i_2)$$

j ne doit pas être considéré, mais la multiplication et la somme algébrique doivent être faites comme ci-dessous.

Admettons maintenant une charge de 1.000 kws à cos. φ = 1.

$$I_{1000} = 3.4$$

Un calcul analogue au précédent nous donne :

Cuivre

$$Eg = 93.075 - 4070j = 93.200$$

$$Ig = 4.40 - 178.4j = 178.5$$

Kva = 49.800
Kws = 3.600
Cos φ = 0.0722
Rendement = 27.8 %

Aluminium

$$Eg = 93.110 - 6690j = 93.300 \text{ volts}$$

$$Ig = 2.95 - 178.5j = 178.6 \text{ ampères}$$

Kva = 49.900
Kws = 4450
Cos φ = 0.089
Rendement = 22.5 %

Pour relever à l'unité le cosinus de cette ligne de transmission ayant une valeur à l'arrivée de 0.85 et une charge de 1000 kva, il faut un condensateur synchrone donnant une puissance de 640 kva.

En calculant de même pour diverses charges, on trouve les valeurs données dans les tableaux suivants :

TABEAU I. — Calcul de la Ligne en Cuivre (cos φ = 0.85)

KVA		KILOVOLTS			AMPERES		Kws	Cos φ		RENDEMENT
Arrivée	Départ	Arrivée tension composée	Départ tension simple	Départ tension composée	Arrivée	Départ	Départ	Arrivée	Départ	
0	55.800	200.000	93.080	161.000	0	178.4	2.400	0.85	0,0432	0
1.000	49.400	200.000	93.600	162.000	3.4	178,0	3.180	0,85	0,0644	26,8 %
10.000	48.800	200.000	98.000	170.000	34,0	166	12.180	0,85	0,25	65,8
20.000	48.800	200.000	103.000	178.500	68	158	22.000	0,85	0,45	77,3
40.000	54.000	200.000	115.000	199.000	136	156	42.700	0,85	0,79	79,6
60.000	66.500	200.000	128.400	222.500	204	172,5	63.900	0,85	0,964	79,7
80.000	86.000	200.000	141.600	245.000	272	204,5	85.700	0,85	0,999	79,3
100.000	112.800	200.000	154.000	267.000	340	244	108.200	0,85	0,975	78,8
145.000	190.000	200.000	186.000	322.000	493	342	170.000	0,85	0,895	72,4

Du tableau I, il ressort clairement que la ligne étudiée fonctionne le plus économiquement, avec un cosinus de 0.85 à l'arrivée, pour une charge de 60.000 kva ; la perte en ligne est alors de 20,3 % ; la tension nécessaire à l'usine génératrice est encore très admissible, 222.000 volts.

Supposons maintenant que nous installons à l'usine réceptrice un condensateur synchrone capable de ramener à l'unité le cosinus à l'arrivée.

Un calcul identique au précédent nous donne le tableau II.

TABLEAU II. — Calcul de la Ligne en Cuivre (cos φ = 1)

KVA		KILOVOLTS			AMPÈRES		Kws	Cos φ		RENDEMENT	KVA condensateur
Arrivée	Départ	Arrivée tension composée	Départ tension simple	Départ tension composée	Arrivée	Départ	Départ	Arrivée	Départ		
0	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
1.000	49.800	200.000	93.200	161.500	3,4	178,5	3.600	1,00	0,0722	27,8 %	640
10.000	51.000	200.000	94.200	163.000	34,0	180,5	12.420	1,00	0,244	80,5	6.400
20.000	53.600	200.000	96.000	166.000	68	186,5	22.600	1,00	0,423	88,5	12.800
40.000	61.500	200.000	100.000	173.000	136	205	43.200	1,00	0,703	92,5	25.680
60.000	73.500	200.000	106.000	188.500	204	231	64.410	1,00	0,876	93,2	38.600
80.000	89.900	200.000	113.500	196.500	272	264	86.000	1,00	0,958	93,2	51.000
100.000	107.800	200.000	120.000	208.000	340	300	107.800	1,00	1,00	92,5	64.400
145.000	162.000	200.000	141.000	245.500	493	380	159.000	1,00	0,98	91	93.500

Du tableau II, il ressort qu'avec un condensateur synchrone capable de relever le cosinus à l'unité, on peut transmettre par la même ligne une puissance double, sans qu'il soit nécessaire d'avoir une tension plus élevée à l'usine génératrice. Si l'on admet que l'on puisse monter à cette

usine à 250.000 volts, on peut transmettre à la ligne 145.000 kws avec une chute en ligne inférieure à 10 %.

Avec la même ligne en aluminium, nous avons les tableaux suivants (tableaux III et IV).

TABLEAU III. — Calcul de la Ligne en Aluminium (cos φ = 0,85)

KVA		KILOVOLTS			AMPÈRES		Kws	Cos φ		RENDEMENT
Arrivée	Départ	Arrivée tension composée	Départ tension simple	Départ tension composée	Arrivée	Départ	Départ	Arrivée	Départ	
0	55.800	200.000	93.100	161.100	0	178,3	3.300	0,85	0,0665	0
1.000	49.400	200.000	93.700	161.500	3,4	177,4	4.420	0,85	0,09	19,3 %
10.000	50.000	200.000	100.000	173.000	34	167	12.945	0,85	0,259	65,5
20.000	50.600	200.000	105.000	187.000	68	160,5	24.360	0,85	0,481	69,9
40.000	56.000	200.000	118.200	205.000	136	158,0	44.000	0,85	0,786	77,4
60.000	69.500	200.000	131.500	228.000	204	176	66.450	0,85	0,958	78
80.000	90.500	200.000	145.000	251.000	272	208	90.450	0,85	0,999	75,2
100.000	118.500	200.000	160.000	277.000	340	247	116.000	0,85	0,98	74,4
145.000	201.000	200.000	194.000	336.000	493	392	188.200	0,85	0,90	65,5

Cette ligne en aluminium, avec un cosinus de 0.85 à l'arrivée ne peut donc transporter que 50.000 kva, sans que la tension de l'usine génératrice ne dépasse les limites admissibles. On voit que cette puissance n'est pas sensiblement

inférieure à celle de la ligne de cuivre comparativement au coût des deux lignes. Le cosinus au départ est sensiblement le même dans les deux cas.

TABLEAU IV. — Calcul de la Ligne en Aluminium (cos φ = 1)

KVA		KILOVOLTS			AMPÈRES		Kws	Cos φ		RENDEMENT	KVA condensateur
Arrivée	Départ	Arrivée tension composée	Départ tension simple	Départ tension composée	Arrivée	Départ	Départ	Arrivée	Départ		
0	»	200.000	»	»	»	»	»	»	»	»	»
1.000	49.900	200.000	93.300	161.500	3,4	178,6	4.450	1,00	0,089	22,5 %	640
10.000	52.200	200.000	95.600	166.000	34	181,5	13.350	1,00	0,256	75	6.400
20.000	54.800	200.000	97.500	169.000	68	188,8	24.100	1,00	0,455	78,9	12.800
40.000	63.500	200.000	103.000	179.000	136	206,5	45.150	1,00	0,715	88,5	25.680
60.000	76.800	200.000	110.000	191.000	204	232,5	67.500	1,00	0,878	89	38.600
80.000	94.600	200.000	118.500	205.000	272	266	89.500	1,00	0,945	89,4	51.000
100.000	115.500	200.000	127.500	221.000	340	302	115.500	1,00	1,00	86,6	64.400
145.000	176.500	200.000	150.000	260.000	493	392	176.200	1,00	0,999	82,3	93.500

Cette ligne avec un cosinus égal à un, à l'arrivée, peut donc transporter environ 90.000 kva avec une tension admissible au départ et une perte en ligne d'environ 10 %. Elle ne peut donc transmettre que les trois quarts de la puissance de la ligne en cuivre. Il est probable que même dans ce cas, elle se compara favorablement avec la ligne de cuivre, au point de vue du rapport entre la puissance

transportée et le coût de la ligne.

Il est à noter, que soit avec la ligne de cuivre, soit avec celle en aluminium, quand le cosinus est égal à un ou 0.85 à l'arrivée, celui du départ a sensiblement la même valeur.

(A suivre).

Henry de WATTEVILLE,
Ingénieur E.P.Z.