

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 17 (1926)
Heft: 3

Artikel: Descriptions et essais de a ligne à 120 000 volts Chancy-Pougny à Jeanne-Rose
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058859>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke } REDAKTION { Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité
Zürich 8, Seefeldstr. 301

Verlag und Administration } Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A-G. } Editeur et Administration
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet | Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XVII. Jahrgang
XVII^e Année

Bulletin No. 3

März 1926
Mars

Description et essais de la ligne à 120 000 volts Chancy-Pougny à Jeanne-Rose.

Par la Banque Suisse des Chemins de fer, Bâle.

Der vorliegende Artikel wird eingeleitet durch die Beschreibung der 141 km langen 120 000 Volt-Leitung, welche, erstellt unter Leitung der Schweizerischen Eisenbahnbank in Basel, von Chancy-Pougny ins Innere Frankreichs führt. Hierauf erfolgt eine vollständige Zusammenfassung der Messungen und Versuche, die an der Leitung, vor deren Unterspannungsetzung, vorgenommen wurden: Messung des Widerstandes mit Gleichstrom, sowie mit hoch- und niedergespanntem Wechselstrom, Bestimmung des Selbstinduktionskoeffizienten, der Betriebskapazität, der Kapazitäten zwischen den Phasen und zwischen Phase und Erde, Prüfungen der Isolation, Aufnahme der charakteristischen Daten der Transformatoren, soweit sie zur Bestimmung der Ableitungsverluste benötigt werden. Letztere wurden an Hand der Messergebnisse berechnet, die bei Anlass der ebenfalls kurz beschriebenen Unterspannungsetzung der Leitung gewonnen wurden.

Cet article débute par une description générale de la ligne à 120 000 volts de 141 km de longueur, construite sous la direction de la Banque Suisse des Chemins de fer à Bâle et partant de l'usine frontière de Chancy-Pougny pour se diriger vers le centre de la France. Vient ensuite un résumé complet des mesures et essais effectués avant la mise sous tension de la ligne et comprenant: mesures de la résistance en courant continu et en courant alternatif haute et basse tension, détermination du coefficient de self-induction ainsi que de la capacité de service et de celle entre phases et entre phase et terre, vérification de l'isolement, relevé des caractéristiques des transformateurs de l'usine de Chancy-Pougny nécessaires à la détermination de la perditance. Celle-ci est calculée d'après les mesures effectuées lors de la mise sous tension de la ligne dont on trouvera également un résumé.

L'énergie de l'usine frontière de Chancy-Pougny étant actuellement entièrement utilisée en France, en grande partie dans la région du Creusot (Département de Saône et Loire), le transport en est assuré par la ligne à 120 000 volts, allant de Chancy-Pougny à Jeanne-Rose, de la Société l'Energie Electrique Rhône et Jura à Paris. Cette ligne a été mise en exploitation régulière le 5 mai 1925.

De même que pour l'usine de Chancy-Pougny, la Banque Suisse des Chemins de fer, à Bâle, a assumé pour la ligne à 120 000 volts la tâche d'ingénieur et d'architecte en élaborant les projets, en passant les commandes de matériel et en dirigeant et surveillant l'exécution des travaux. A ce titre, elle a eu à établir le programme des essais de contrôle et de mise sous tension de la ligne; l'exécution en a été assurée par ses ingénieurs et ceux des Etablissements Schneider & Cie.

Il nous a paru intéressant de donner un résumé du résultat de ces essais.

A. Caractéristiques de la ligne.

Le poste élévateur de Chancy-Pougny est équipé avec trois groupes transformateurs 11 000/120 000 volts de 14 000 kVA, composés chacun de trois transformateurs monophasés à bain d'huile avec circulation d'eau de réfrigération, montés en triangle sur la basse tension et en étoile sur la haute tension, avec neutre directe-

ment à la terre. Du poste partent deux lignes triphasées sur pylônes communs, les conducteurs étant disposés sensiblement aux sommets d'un hexagone.

Au départ de l'usine de Chancy-Pougny, à 365 m d'altitude, la ligne se dirige directement vers le Jura dont elle franchit la première chaîne au Col du Sac, à l'altitude de 1360 m, entre le massif du Credo et le Reculet. Elle se maintient ensuite sur un parcours de 33 km, entre 600 et 1000 m en traversant successivement les divers chaînons du Jura, pour arriver dans la vallée de l'Ain, à Cize-Bolozon, à l'altitude de 275 m. De là elle passe dans la plaine de la Bresse pour atteindre la Saône qu'elle traverse un peu en aval de Tournus, à l'altitude de 175 m, à 100 km de Chancy-Pougny environ. Le tracé s'engage ensuite dans les collines du département de Saône et Loire sur un parcours de 40 km, entre 200 et 400 m; le poste terminus de Jeanne-Rose est à l'altitude de 330 m. La longueur totale de la ligne est de 141 km.

A Cize-Bolozon sur l'Ain, et à Lacrost, au bord de la Saône, se trouvent deux postes de coupure permettant d'effectuer toutes manœuvres nécessaires pour éliminer, en cours d'exploitation, une des deux lignes sur l'un des trois tronçons ainsi formés. Chacun de ces tronçons est encore divisé en deux secteurs par des sectionneurs montés sur un portique, de manière à pouvoir localiser un défaut de ligne dans une zone de 20 à 25 km, environ le sixième de la longueur totale de la ligne.

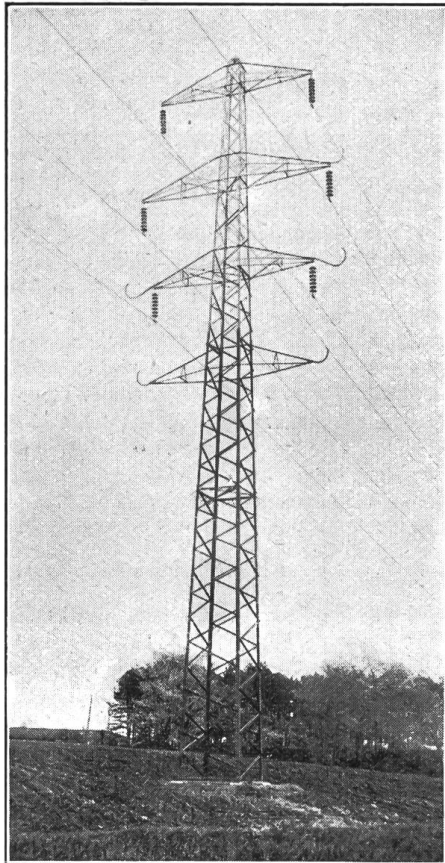


Fig. 1.

Pylône normal d'alignement avec console et pièces de garde à une traversée de voie publique. Hauteur totale au-dessus du sol 23,9 m; poids sans pièces de garde 2200 kg.

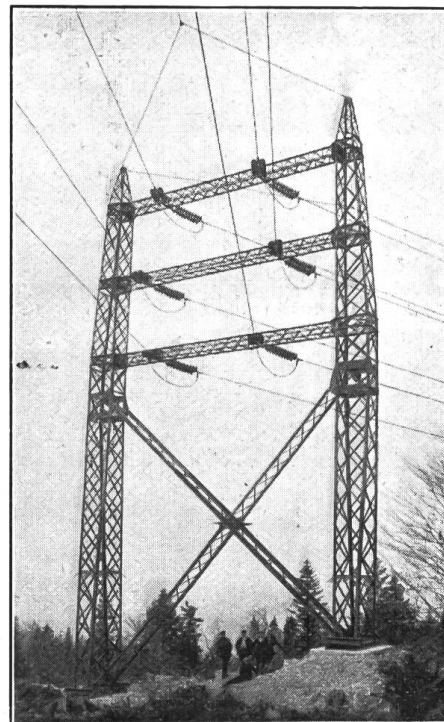


Fig. 2.

Portique d'angle au Col du Sac à l'altitude de 1360 m. Angle de la ligne 53°, portées adjacentes 170 m.

De Jeanne-Rose partent des lignes à 45 000 volts pour alimenter les usines des Établissements Schneider de la région du Creusot et se raccorder à un réseau local de distribution, ainsi que deux lignes à 120 000 volts de raccordement avec d'autres réseaux du centre de la France.

Les pylônes sont entièrement métalliques; le type normal d'alignement (fig. 1) a 23,9 m de hauteur au-dessus du sol. Il est dimensionné pour une portée moyenne de 265 m et pèse 2200 kg. Les consoles ont des écartements différents pour éviter que les trois conducteurs superposés ne se trouvent dans un même plan vertical en prévision des surcharges de givre et de neige. Les pylônes d'angle sont à doubles croisillons et calculés pour supporter les efforts de torsion en cas de rupture de conducteurs. Pour les forts angles ou les angles encadrés par de grandes portées, on a fait usage de portiques afin d'augmenter la sécurité (fig. 2). Les fondations sont du type à dalle dans les terrains ordinaires, à simples scellements dans le rocher, toutes deux de prix de revient réduit, et à massif évidé, aux endroits où la nature du terrain ne pouvait être reconnue avec précision à l'avance.

La ligne proprement dite est constituée par 6 conducteurs aluminium-acier, montés sur isolateurs suspendus, et d'un câble de terre en acier galvanisé, fixé au sommet des pylônes dans l'axe du fût. Les conducteurs aluminium-acier ont les caractéristiques suivantes:

37 brins de 2,95 mm de diamètre, dont 7 d'acier, section 47,8 mm ² , et 30 d'aluminium, section 205 mm ² , section totale 252,8 mm ²	
diamètre extérieur	20,6 mm
charge de rupture	32 kg/mm ²
module d'élasticité	$8,68 \cdot 10^5$ kg/cm ²
coefficient de dilatation thermique	$1,725 \cdot 10^{-5}$
poids spécifique	$3,85 \cdot 10^{-3}$ kg/cm ³
poids par km	960 kg
résistance électrique 0,141 Ω /km à 20 ^o C pour du courant continu.	

Les caractéristiques du câble de terre en acier sont:

12 brins de 2,30 mm de diamètre, section totale 50 mm ²	
diamètre extérieur	9,5 mm
charge de rupture	85 kg/mm ²
module d'élasticité	$2,20 \cdot 10^6$ kg/cm ²
coefficient de dilatation thermique	$1,15 \cdot 10^{-5}$
poids spécifique	$8,1 \cdot 10^{-3}$ kg/cm ³
poids par km	426 kg

Les chaînes d'isolateurs d'alignement ont 8 éléments en montagne, 7 éléments en plaine. Les chaînes d'amarrage sont doubles et comprennent chacune 9 éléments. La fourniture des isolateurs a été répartie entre la société américaine Ohio Brass & Cie. et la Compagnie Générale d'Electrocéramique à Ivry (France). Les types d'éléments choisis sont les modèles normaux de 4000 kg de charge de rupture. En montagne, c'est-à-dire au-dessus de 600 m d'altitude, les amarrages sont équipés avec des chaînes doubles d'éléments du type renforcé ayant 9000 kg de charge de rupture. Leur fourniture a été confiée à la Compagnie Générale d'Electrocéramique.

La portée moyenne en plaine est de 230 m; pour la traversée du Jura, elle a été réduite à 190 m. La plus grande portée est de 552 m en projection horizontale.

Pour faciliter l'exploitation, les lignes ont été caractérisées par les couleurs „blanche“ et „rouge“. Les phases sont désignées par 1, 2 et 3 pour la ligne blanche et 1', 2' et 3' pour la ligne rouge. Entre Chancy-Pougny et Jeanne-Rose, les 3 phases de chacune des lignes subissent une rotation complète. Celle-ci s'effectue partiellement dans chacune des portées adjacentes aux postes de coupure de Cize-Bolozon et Lacrost, selon le schéma de la fig. 3.

La capacité de transport de la ligne est de 50 à 60000 kVA en prévision du raccordement d'usines hydro-électriques de la région du Jura. La puissance installée à Chancy-Pougny est de 35000 kVA.

B. Essais de contrôle et de mise sous tension.

Les essais effectués sur la ligne avant sa mise en exploitation avaient pour but:

- 1^o de contrôler les caractéristiques admises pour les calculs électriques, à savoir: résistance, self-induction, capacité, perdite,
- 2^o de vérifier l'état de la ligne avant de la remettre au service d'exploitation; ceci comprend un essai d'isolement et une mise sous tension progressive,
- 3^o de relever un certain nombre d'oscillogrammes pour vérifier que les ondes du courant et de la tension ne contiennent pas d'harmoniques dangereux.

Les conditions atmosphériques jouant un rôle important pour tous ces essais, on a disposé le long de la ligne 4 postes de mesure, dont un à chaque terminus, un autre à Lacrost, le point le plus bas, et le dernier dans le Jura, à l'altitude de 1000 m environ. Chaque poste comprend les trois appareils: baromètre, thermomètre et hygromètre enregistreurs.

Tous les appareils et transformateurs de mesure utilisés au cours des essais étaient des appareils de précision.

a) Mesure de résistance.

La résistance des conducteurs a été mesurée en les bouclant successivement deux à deux à Jeanne-Rose et pour chaque ligne séparément. Les extrémités libres à Chancy-Pougny sont alimentés successivement avec du courant continu 110 volts, du courant alternatif à basse tension à 220 volts et haute tension à 11000 volts. On mesure donc les résistances R_{1+2} , R_{2+3} et R_{3+1} et les mêmes valeurs pour les phases 1', 2' et 3'. On en tire la résistance moyenne d'une phase:

$$R = \frac{R_{1+2} + R_{2+3} + R_{3+1} + R_{1'+2'} + R_{2'+3'} + R_{3'+1'}}{12}$$

Pour une phase donnée, on a:

$$R_1 = \frac{R_{1+2} - R_{2+3} + R_{3+1}}{2}$$

et des formules analogues obtenues par permutation circulaire des indices.

Mesures de résistance en courant continu.

Tableau No. 1

Groupement des phases		Tension U Volts	Courant I Amp.	Puissance P Watts	Résistance		R moyen Ω
					$R = \frac{U}{I}$ Ω	$R = \frac{P}{I^2}$ Ω	
Ligne blanche	1-2 {	92,8	2,47	235	37,6	38,6	} $R_{1+2} = 38,1$
		108,0	2,86	314	37,8	38,4	
	2-3 {	90,0	2,35	217	38,1	39,0	} $R_{2+3} = 38,5$
		106,0	2,79	302	38,0	38,8	
	3-1 {	91,6	2,42	227	37,9	38,8	} $R_{3+1} = 38,3$
		106,2	2,80	302	37,9	38,6	
Ligne rouge	1'-2' {	82,0	2,25	188	36,5	37,2	} $R_{1'+2'} = 36,7$
		106,0	2,92	314	36,3	36,9	
	2'-3' {	81,0	2,24	185	36,1	36,9	} $R_{2'+3'} = 36,5$
		106,0	2,93	315	36,2	36,8	
	3'-1' {	81,5	2,25	187	36,3	36,9	} $R_{3'+1'} = 36,5$
		106,8	2,95	320	36,2	36,8	

Courant continu 110 volts.

On mesure la tension U , le courant I et la puissance P à l'aide du schéma ordinaire pour le montage des appareils, voltmètre, ampèremètre, wattmètre, avec une résistance réglable en série. La résistance d'un circuit peut se calculer à l'aide des deux formules :

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{et} \quad R = \frac{P}{I^2}.$$

La source de courant est une batterie d'accumulateurs.

Les grandeurs mesurées sont groupées dans le tableau No. 1. La résistance moyenne d'une phase est :

$$R = 18,70 \, \Omega$$

pour la température moyenne de 3^o C au cours des essais. Les différences entre les valeurs trouvées pour la ligne blanche et la ligne rouge sont dues principalement au changement de température survenu pendant les essais.

La résistance kilométrique à 3^o C est donc de :

$$r_{30} = \frac{18,70}{141} = 0,1325 \, \Omega/\text{km}$$

et à 20^o, en admettant un coefficient de température de l'aluminium de $\alpha = 0,0042$:

$$r_{20} = 0,1325 (1 + 17 \cdot 0,0042) = 0,1420 \, \Omega/\text{km}.$$

La valeur donnée par le fournisseur, en ne tenant compte que de la conductibilité de l'aluminium était de $r = 0,1410 \, \Omega/\text{km}$. La concordance est donc satisfaisante et montre que l'on est en droit de négliger la conductibilité de l'âme en acier du câble.

Courant alternatif 220 volts, 50 ~.

Le schéma est le même que pour la mesure en courant continu. La résistance d'un circuit a pour valeur :

$$R = \frac{P}{I^2}.$$

La source de courant est le réseau des services auxiliaires de l'usine de Chancy-Pougny.

Mesures de résistance et réactance en courant alternatif 220 Volts, 50 ~. Tableau No. 2.

Groupement des phases	Tension U Volts	Courant I Amp.	Puissance P Watts	Impédance $Z = \frac{U}{I}$ Ω	Résistance $R = \frac{P}{I^2}$ Ω	R moyen Ω	Réactance $\omega L = \frac{\omega L}{\sqrt{Z^2 - R^2}}$ Ω	ωL moyen Ω	
Ligne blanche	1-2	209	1,80	132,0	116,1	40,8	$R_{1+2} = 40,6$	108,7	$\omega L_{1+2} = 108,5$
		224	1,93	150,0	116,1	40,3		108,9	
	2-3	209	1,78	132,0	117,8	41,7	$R_{2+3} = 41,7$	110,1	$\omega L_{2+3} = 110,5$
		225	1,90	150,0	118,4	41,6		110,9	
	3-1	209	1,80	132,0	116,1	40,8	$R_{3+1} = 40,6$	108,7	$\omega L_{3+1} = 109,4$
		226	1,93	150,0	117,2	40,3		110,1	
Ligne rouge	1'-2'	209	1,80	130,5	116,1	40,2	$R_{1'+2'} = 40,8$	108,9	$\omega L_{1'+2'} = 109,1$
		223	1,91	150,0	116,8	41,3		109,3	
	2'-3'	208	1,78	127,5	117,0	40,3	$R_{2'+3'} = 39,7$	109,8	$\omega L_{2'+3'} = 111,1$
		226	1,90	141,0	118,9	39,1		112,4	
	3'-1'	209	1,80	132,0	116,1	41,8	$R_{3'+1'} = 41,3$	108,3	$\omega L_{3'+1'} = 108,7$
		224	1,92	150,0	116,6	40,8		109,2	

Le résultat des mesures est donné par le tableau No. 2. La résistance moyenne d'une phase est:

$$R_{\sim} = 20,42 \Omega$$

à la température moyenne de 7° C au cours des essais. La résistance kilométrique à 7° C est donc de:

$$r_{\sim 7^{\circ}} = \frac{20,42}{141} = 0,1450 \Omega/\text{km}$$

ou à 20° , comme ci-dessus:

$$r_{\sim 20^{\circ}} = 0,1450 (1 + 13 \cdot 0,0042) = 0,1529 \Omega/\text{km}.$$

L'augmentation de résistance entre le courant continu et le courant alternatif due à l'effet pelliculaire (Skin-Effekt) serait ainsi de:

$$\frac{0,1529 - 0,1420}{0,1420} 100 = 7,7 \ \%.$$

Courant alternatif 11000 volts, 50 \sim .

Il a paru intéressant de contrôler les valeurs de la résistance pour une intensité correspondant au courant normal en ligne pour la pleine puissance de l'usine de Chancy-Pougny. La tension requise pour cet essai correspond sensiblement à la tension des alternateurs, soit 11000 volts.

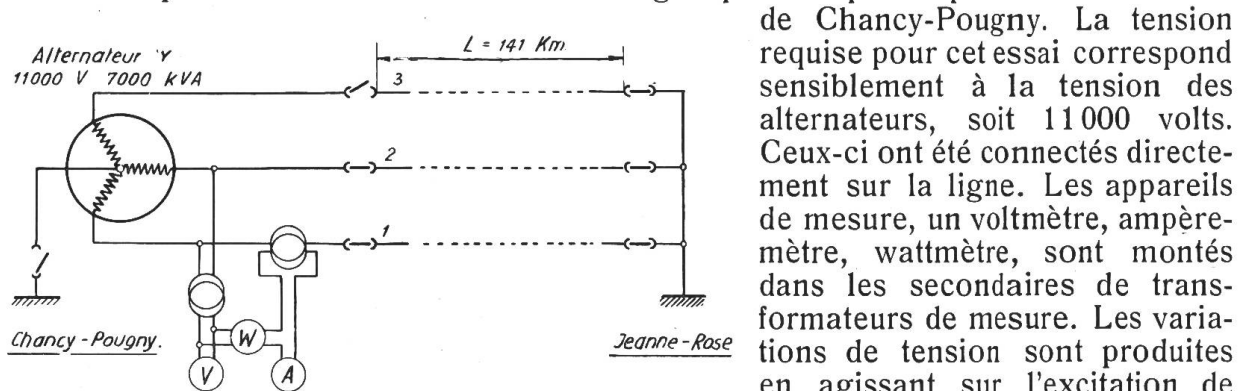


Fig. 4.

Schéma pour la mesure de la résistance et de la réactance avec du courant alternatif 11000 V.

de mise à la terre. A Chancy, les phases sont reliées deux à deux aux bornes de l'alternateur dont le neutre est isolé.

La disposition générale de l'essai est donnée par la fig. 4.

Les mesures font l'objet du tableau No. 3. La résistance moyenne se calcule comme ci-dessus, elle est de:

$$R_{\sim} = 22,18 \Omega$$

à la température moyenne de 20° pendant les essais.

Si l'on tient compte du courant de capacité qui atteint à Chancy-Pougny 1,10 A pour 11000 V, cette valeur de la résistance est trop grande de 1 %.

La résistance kilométrique à 20° C serait donc de:

$$r_{\sim 20^{\circ}} = \frac{22,18}{1,01 \cdot 141} = 0,1555 \Omega/\text{km}.$$

L'augmentation de résistance par rapport au courant continu atteindrait pour de fortes intensités:

$$\frac{0,1555 - 0,1420}{0,1420} 100 = 9,5 \ \%.$$

D'une manière générale, on a pu remarquer au cours de tous les essais, que la résistance a tendance à augmenter avec l'intensité du courant.

Mesures de résistance et réactance en courant alternatif 11000 Volts, 50 ~. Tableau No. 3.

Groupement des phases	Tension U Volts	Courant I Amp.	Puissance P kW	Impédance $Z = \frac{U}{I}$ Ω	Résistance $R = \frac{P}{I^2}$ Ω	R moyen Ω	Réactance $\omega L = \sqrt{Z^2 - R^2}$ Ω	ωL moyen Ω	
Ligne blanche	1-2	9 240	75,0	253,0	123,2	45,1	$R_{1+2} = 44,8$	114,6	$\omega L_{1+2} = 115,0$
		9 840	80,0	286,0	123,0	44,8		114,8	
		10 670	86,1	330,0	123,9	44,6		115,6	
	2-3	10 065	81,3	290,4	123,8	43,9	$R_{2+3} = 43,8$	115,3	$\omega L_{2+3} = 115,6$
		10 670	86,0	323,4	124,1	43,7		116,1	
		11 220	90,6	358,6	123,9	43,7		115,5	
	3-1	10 560	86,8	334,4	121,5	44,4	$R_{3+1} = 44,4$	113,1	$\omega L_{3+1} = 112,9$
		10 835	89,2	354,2	121,7	44,6		113,2	
		11 110	91,9	374,0	120,9	44,3		112,5	
Ligne rouge	1'-2'	9 350	76,0	257,5	122,9	44,7	$R_{1'+2'} = 44,8$	114,4	$\omega L_{1'+2'} = 115,0$
		10 010	81,0	292,5	123,8	44,6		115,5	
		10 615	86,0	333,0	123,7	45,1		115,2	
	2'-3'	10 395	84,0	308,0	123,9	43,7	$R_{2'+3'} = 43,7$	115,9	$\omega L_{2'+3'} = 115,6$
		10 780	87,5	334,4	123,2	43,7		115,2	
		11 165	90,2	354,2	123,8	43,6		115,8	
	3'-1'	9 735	80,0	286,0	121,7	44,7	$R_{3'+1'} = 44,7$	113,2	$\omega L_{3'+1'} = 113,3$
		10 395	85,5	326,0	121,8	44,6		113,6	
		10 780	88,6	352,0	121,7	44,8		113,1	

b) Mesure du coefficient de self-induction.

Pour les deux séries de mesures avec courant alternatif 50 périodes, l'impédance du circuit formé par deux conducteurs bouclés est $Z = \frac{U}{I}$ d'où l'on tire, connaissant la résistance ohmique R , la réactance $\omega L = \sqrt{Z^2 - R^2}$ et finalement le coefficient de self-induction L en henrys ($\omega = 314$ pour $f = 50$ périodes). Nous mesurerons successivement L_{1+2} , L_{2+3} et L_{3+1} et les mêmes coefficients pour 1', 2' et 3'. Le coefficient moyen par phase pour fonctionnement en courant triphasé est alors:

$$L = \frac{L_{1+2} + L_{2+3} + L_{3+1} + L_{1'+2'} + L_{2'+3'} + L_{3'+1'}}{12}$$

Pour une phase donnée on a :

$$L_1 = \frac{L_{1+2} + L_{3+1}}{4}$$

et des formules analogues obtenues par permutation circulaire des indices.

Entre deux points où s'effectue la rotation des conducteurs, les 3 phases d'une même ligne ont des coefficients de self-induction différents les uns des autres. Comme il s'agit ici de mesures pour la ligne entière, il ne sera pas possible de faire ressortir cette différence puisque le long de la ligne un conducteur occupe successivement, pendant chaque tiers du parcours, une des trois positions possibles sur les pylônes (voir la fig. 3).

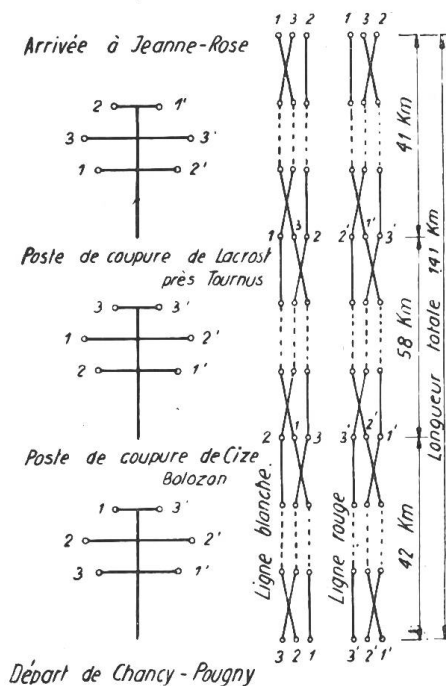


Fig. 3. Schéma de permutation des phases, le long de la ligne.

Courant alternatif 11000 volts, 50 \sim .

On obtient d'après le tableau No. 3:

$$\omega L = 57,46 \ \Omega ; \quad L = 0,1829 \text{ H.}$$

Le coefficient de self-induction kilométrique est de:

$$l = \frac{0,1829}{141} = 1,295 \cdot 10^{-3} \text{ H/km.}$$

Ces valeurs ne sont pas influencées d'une manière appréciable par le courant de capacité à la tension des essais.

Pour le calcul de la ligne, ce coefficient a été déterminé par la formule de Fischer-Hinnen (voir le Bulletin A. S. E., année 1917, page 344) qui donne en moyenne pour les 3 conducteurs: $l = 1,326 \cdot 10^{-3}$ H/km; la concordance est donc satisfaisante.

Avec le courant alternatif 220 volts (tableau No. 2) on arrive à une valeur légèrement plus faible, $l = 1,236 \cdot 10^{-3}$ H/km.

L'impédance moyenne d'une phase à 20° pour fonctionnement en courant triphasé, se trouve être de:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = \sqrt{22,18^2 + 57,46^2} = 61,59 \ \Omega.$$

c) Mesure de capacité.

Toute méthode directe pour la détermination de la capacité de service d'une phase, doit être éliminée comme ne présentant pas des conditions d'exactitude suffisante. On a donc eu recours à la méthode indirecte, utilisée habituellement dans la pratique, consistant à mesurer les capacités partielles d'où l'on déduit la capacité de service.

La méthode est basée sur les équations de Maxwell où l'on distingue les coefficients d'influence propre de chaque conducteur de la forme C_{nn} et les coefficients d'influence mutuelle de la forme C_{nm} , dans le cas de 3 conducteurs. Si l'on considère les 6 conducteurs des 2 lignes, il faudra en outre se préoccuper des coefficients de la forme $C_{nn'}$ et $C_{nm'}$. Tous ces coefficients sont assimilables à des capacités et comme tels peuvent se mesurer par l'une des nombreuses méthodes pratiques pour la mesure des capacités. Nous avons choisi l'une des plus simples, la méthode de comparaison consistant à décharger successivement dans un galvanomètre balistique la capacité à mesurer et un condensateur étalon. Le galvanomètre doit être pourvu d'un shunt afin de pouvoir rendre les élongations comparables. Le schéma de la méthode est représenté par la fig. 5. L'appareil dont nous avons fait usage pour ces mesures est l'ohmmètre universel de la Maison Geoffroy et Delore à Paris.

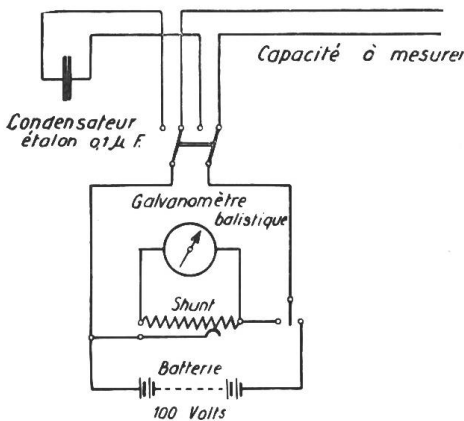


Fig. 5.

Schéma pour la mesure des capacités par la méthode de comparaison.

Étant donné la rotation des conducteurs le long de la ligne dont un des buts principaux est précisément d'équilibrer les capacités de chaque phase, on s'est contenté de mesurer les valeurs moyennes des coefficients d'influence de la ligne blanche. Pour la position relative des conducteurs sur les pylônes, il faut se reporter au schéma fig. 3. Pendant les mesures, toutes les phases, sauf celles en essai, ont été mises soigneusement à la terre à Chancy-Pougny comme à Jeanne-Rose.

Cas de 3 conducteurs (une ligne en service).

On a mesuré successivement la capacité entre chaque conducteur et la terre et entre les conducteurs pris deux à deux. Soit C_{nn} la moyenne des premières mesures, C' celle des secondes, on a alors:

$$C_{nm} = C_{nn} - 2C'$$

d'où l'on tire:

$$\begin{aligned} \text{capacité partielle par rapport à la terre} & C_e = C_{nn} + 2C_{nm} = 3C_{nn} - 4C', \\ \text{capacité partielle entre phases} & C_p = -C_{nm} = -C_{nn} + 2C', \\ \text{capacité de service} & C = C_e + 3C_p = 2C'. \end{aligned}$$

On constate donc que pour le calcul de la capacité de service, la connaissance de C' est seule suffisante.

Les mesures ont donné les résultats suivants:

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} \text{entre phase 1 et terre } C_{11} = 1,145 \mu\text{F} \\ \text{'' '' 2 '' '' } C_{22} = 1,178 \mu\text{F} \\ \text{'' '' 3 '' '' } C_{33} = 1,160 \mu\text{F} \end{array} \right\} C_{nn} = 1,161 \mu\text{F}, \\ \left. \begin{array}{l} \text{entre phases 1 et 2 } C'_{12} = 0,643 \mu\text{F} \\ \text{'' '' 2 '' 3 } C'_{23} = 0,630 \mu\text{F} \\ \text{'' '' 3 '' 1 } C'_{31} = 0,642 \mu\text{F} \end{array} \right\} C' = 0,638 \mu\text{F}. \end{aligned}$$

Ces chiffres montrent l'équilibrage presque parfait des capacités réalisé par la rotation des phases.

$$\begin{aligned} \text{Capacité partielle par rapport à la terre} & C_e = 0,931 \mu\text{F}. \\ \text{Capacité partielle entre phases} & C_p = 0,115 \mu\text{F}. \\ \text{Capacité totale de service} & C = 1,276 \mu\text{F}. \end{aligned}$$

La capacité kilométrique moyenne est ainsi de:

$$c = \frac{1,276}{141} = 0,009049 \mu\text{F/km}.$$

La valeur admise pour les calculs d'après la formule de M. Petersen (voir E.T.Z., année 1916, page 516) était de: $c = 0,009006 \mu\text{F/km}$. Les résultats sont donc très concordants.

Cas de 6 conducteurs (2 lignes en service).

Il faut ici considérer, en plus des coefficients calculés ci-dessus, ceux de la forme $C_{nn'}$ et $C_{nm'}$; comme nous ne cherchions qu'une valeur moyenne de la capacité de service, on s'est contenté de mesurer la capacité C'' entre les phases 1 et 1' et C''' moyenne des mesures entre les phases 1 et 2', puis 1 et 3'. Les mesures entre les phases 2 et 3 d'une part, 1', 2' et 3' de l'autre auraient donné des résultats très peu différents de ceux obtenus, nous avons jugé inutile de les faire étant donné le temps restreint dont nous disposions pour ces essais.

$$C_{nn'} = C_{nn} - 2C'', \quad C_{nm'} = C_{nn'} - 2C''',$$

d'où l'on peut calculer:

$$\begin{aligned} \text{Capacité partielle par rapport à la terre} & \bar{C}_e = C_e + C_{nn'} + 2C_{nm'} \\ & = 6C_{nn} - 2(2C'' + C'' + 2C'''). \\ \text{Capacité partielle entre phase} & \bar{C}_p = C_p + C_{nn'} + 2C_{nm'} \\ & = -2C_{nn} + 2(C' + C'''). \\ \text{Capacité de service} & \bar{C} = \bar{C}_e + \bar{C}_p = 2(C' - C'' + C'''). \end{aligned}$$

Les mesures ont donné les résultats suivants:

$$\begin{aligned} \text{entre phases 1 et 1'} & C'' = 0,595 \mu\text{F} \\ \text{'' '' 1 '' 2'} & C'''_{12'} = 0,614 \mu\text{F} \\ \text{'' '' 1 '' 3'} & C'''_{13'} = 0,609 \mu\text{F} \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} \text{entre phases 1 et 1'} \\ \text{'' '' 1 '' 2'} \\ \text{'' '' 1 '' 3'} \end{aligned}} \right\} C''' = 0,612 \mu\text{F}.$$

Capacité partielle par rapport à la terre $\bar{C}_e = 0,776 \mu\text{F}.$

Capacité partielle entre phases . . . $\bar{C}_p = 0,178 \mu\text{F}.$

Capacité de service $\bar{C} = 1,310 \mu\text{F}.$

La capacité kilométrique moyenne est ainsi de:

$$\bar{c} = \frac{1,310}{141} = 0,009291 \mu\text{F/km}.$$

La valeur admise pour les calculs d'après la formule de M. Petersen était de $\bar{c} = 0,009286 \mu\text{F/km}$; la concordance avec les mesures est satisfaisante.

d) Isolement de la ligne.

Le contrôle de l'isolement entre phases et entre phase et terre a été fait par un temps pluvieux à l'aide d'un „Megger“ (ohmmètre à cadre mobile) capable d'une tension de 2500 volts et gradué jusqu'à 10 000 MΩ.

Les chiffres indiqués dans le tableau No. 4 sont la moyenne de plusieurs mesures.

L'écart important entre l'isolement des deux lignes est probablement dû à la différence des types d'isolateurs adoptés. Par temps sec, l'isolement entre phase et terre atteint jusqu'à 50 MΩ et se trouve être sensiblement le même pour les deux lignes.

Mesures d'isolement. Tableau No. 4.

Mesure d'isolement entre	Ligne blanche MΩ	Ligne rouge MΩ
Phase 1 et terre . .	11,0	6,8
Phase 2 et terre . .	8,2	6,5
Phase 3 et terre . .	11,0	6,8
Phase 1 et Phase 2 .	21,0	15,5
Phase 2 et Phase 3 .	21,0	15,5
Phase 3 et Phase 1 .	23,0	16,0

e) Caractéristiques des transformateurs.

Avant la mise sous tension de la ligne, on a procédé à un relevé complet des caractéristiques des transformateurs de l'usine de Chancy-Pouigny à l'aide des essais habituels à vide et en court circuit. Ils ont été faits séparément sur chaque transformateur monophasé; nous nous contenterons de donner ici les indications se rapportant à un groupe

complet de trois transformateurs. Nous rappelons qu'un groupe a une capacité de 14 000 kVA; rapport de transformation 11 000/120 000 volts. Les nombres de spires sont les suivants:

sur la basse tension $n_1 = 202$ sur la haute tension $n_2 = 1434.$

Le montage est en triangle sur la basse tension et en étoile avec neutre à la terre sur la haute tension. Le rapport de transformation exact est donc:

$$K = \sqrt{3} \frac{1434}{202} = 12,3.$$

Les résultats des essais à vide sont donnés par les courbes de la fig. 6 représentant les pertes dans le fer P_f en kW et le courant I_v à vide en A par phase de la basse

tension (courant dans les enroulements aux bornes 11000 volts.

Des essais en court circuit, on a déduit les constantes d'un transformateur rapportées à la haute tension, à savoir:

Résistance apparente à 22^o C¹)
 $R = 7,68 \Omega.$

Réactance . . . $X = \omega L = 133,0 \Omega.$

Impédance $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = 133,2 \Omega.$

Pour un courant I_2 par phase haute tension on a, pour un groupe triphasé:

Chute de tension . . . $\Delta U = \sqrt{3} Z I_2.$
 Pertes dans le cuivre $P_{cu} = 3R I_2^2.$

f) Mise sous tension de la ligne.

On a profité de la mise sous tension de la ligne pour déterminer avec le plus d'exactitude possible les pertes par isolement ou conductance. A cet effet, on a disposé dans le circuit primaire (11000 volts) les appareils et transformateurs de mesure nécessaires pour relever:

- 1^o les trois tensions entre phases (valeur moyenne U_1),
- 2^o le courant dans les phases 1 et 3 (valeur moyenne I_1),
- 3^o la puissance par la méthode des deux wattmètres (puissance totale P_1).

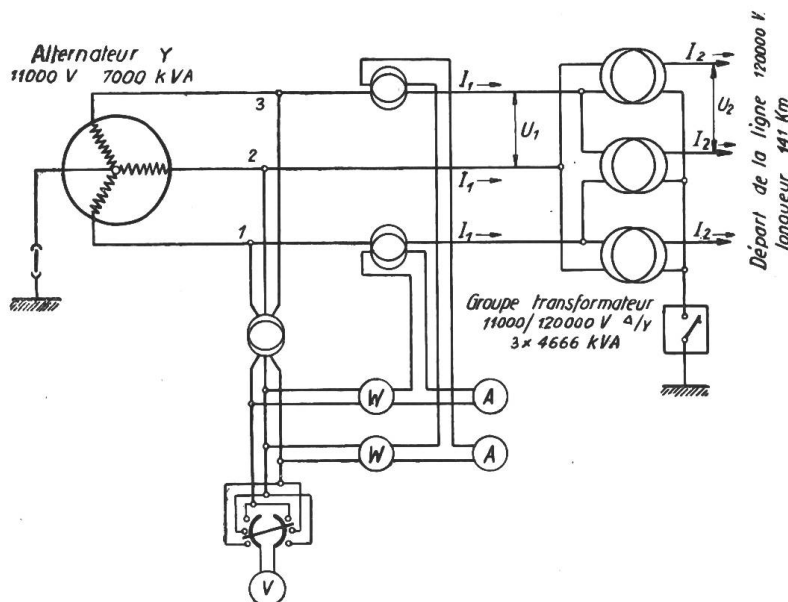


Fig. 7.

Schéma de mesure lors de la mise sous tension de la ligne.

Rose n'étaient pas connectés. Ceux de Chancy-Pougny avaient leur neutre directement mis à la terre, de même que les alternateurs. Pendant la durée des essais,

1) 22^o température des transformateurs lors de la mise sous tension de la ligne.

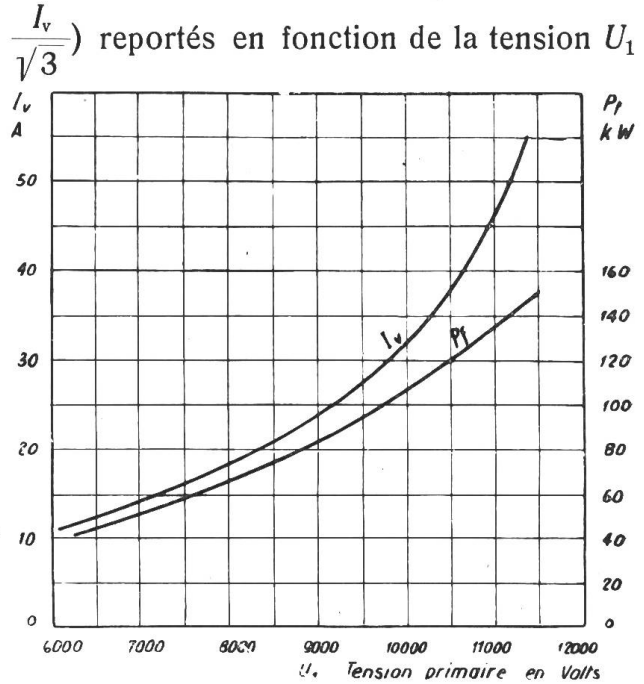


Fig. 6.

Caractéristiques à vide côté basse tension pour un groupe transformateur triphasé 3 x 4666 kVA, 11 000/120 000 volts, Δ/Y.

I_v Courant à vide par phase côté basse tension en A (courant dans les enroulements $\frac{I_v}{\sqrt{3}}$).

P_1 Pertes à vide en kW.

Le schéma était celui de la fig. 7.

Afin de réaliser une variation de tension très progressive, l'excitation de l'excitatrice de l'alternateur a été prise sur une batterie d'accumulateurs 110 volts. Chaque ligne fut mise séparément sous tension, car, comme nous le verrons plus loin, les 7000 kVA d'un alternateur sont insuffisants pour maintenir les deux lignes simultanément sous tension à vide. Pour les essais dont nous reproduisons les résultats dans le tableau No. 5, les transformateurs abaisseurs 120000/45000 V de Jeanne-

Mesures relevées pendant la mise sous tension

	Temps h/min.	Valeurs mesurées sur le 11000 volts				Caractéristiques des transformateurs				
		Tension U_1 V	Courant I_1 A	Puissance P_1 kW	Déphasage $\cos \varphi_1$ (en avant)	Courant magnétisant I_v A	Pertes dans le fer P_f kW	Chute de tension ΔU V	Pertes dans le cuivre P_{cu} kW	Pertes totales $P_t = P_f + P_{cu}$ kW
Ligne blanche	9 42	7 800	275,8	101,0	0,0271	- 17,3	61,0	5480	13,1	74,1
	9 46	8 750	313,0	176,0	0,0371	- 22,0	77,5	6270	17,1	94,6
	9 52	9 600	333,8	231,0	0,0417	- 27,7	95,5	6770	20,0	115,5
	9 55	10 900	381,5	427,0	0,0593	- 43,2	130,5	7950	27,5	158,0
Ligne rouge	15 44	7 510	273,5	88,0	0,0248	- 15,9	56,4	5420	12,8	69,2
	15 58	9 700	347,0	209,0	0,0359	- 28,4	98,0	7030	21,5	119,5
	16 11	10 410	364,0	319,0	0,0486	- 36,0	116,2	7500	24,5	140,7
	16 14	10 920	362,8	462,0	0,0676	- 43,3	131,0	7630	25,3	156,3

soit entre 9 et 16 heures, les conditions météorologiques le long de la ligne étaient en moyenne les suivantes:

Pression barométrique	725 mm
Température	7,5° C
Etat hygrométrique	84 %
Température de l'huile des transformateurs	22° C

Les grandeurs mesurées sont U_1 , I_1 et P_1 , c'est-à-dire la tension, le courant et la puissance sur la basse tension. Les mêmes grandeurs U_2 , I_2 et P_2 sur la haute tension pourront être calculées par la connaissance des caractéristiques des transformateurs. Les courants sont liés par l'équation vectorielle:

$$[I_2] = [I'_1] - [I'_v].$$

$I'_v = \frac{1}{K} I_v$ est le courant primaire à vide à la tension U_1 rapporté au secondaire.

$I'_1 = \frac{1}{K} I_1$ le courant primaire également rapporté au secondaire ($K = 12,3$ rapport de transformation). Or I_1 est fortement déphasé en avant, comme le montre le tableau No. 5 ($\cos \varphi_1 < 0,05$), tandis que I_v est déphasé en arrière ($\cos \varphi_v < 0,35$ pour $U_1 > 6000$ V). Il en résulte que sans erreur appréciable, on peut admettre que l'équation vectorielle est aussi valable pour les valeurs absolues, donc:

$$I_2 = \frac{1}{K} [I_1 - I_v].$$

On en conclut facilement que le déphasage φ_2 de I_2 est tel que $\cos \varphi_2 < \cos \varphi_1$.

Connaissant I_2 , on calcule la chute de tension ΔU par la formule du paragraphe précédent. La composante inductive de ΔU étant environ 18 fois plus grande que la composante ohmique, et comme en outre le déphasage φ_2 est pratiquement de 90° en avant, on pourra écrire avec une exactitude suffisante:

$$U_2 = K U_1 + \Delta U.$$

Les caractéristiques des transformateurs nous donnent les pertes P_f et P_{cu} correspondant à la tension U_1 et au courant I_2 . Nous avons ainsi:

$$P_2 = P_1 - (P_f + P_{cu}).$$

de la ligne. Calcul de la perdite.

Tableau No. 5.

Valeurs calculées, départ 120 000 volts			Pertes en ligne		Perdittance		
Tension $U_2 = KU_1 + AU$ V	Courant $I_2 = \frac{1}{K}(I_1 + I_v)$ A	Puissance $P_2 = P_1 - P_t$ kW	Effet Joule P_j kW	Conductance $P_g = P_2 - P_j$ kW	Pertes par conducteur et par km p_g Watt/km	g Mhos/km	Courant I_g A
101 380	23,8	26,9	11,8	15,1	36	$1,05 \cdot 10^{-8}$	0,09
113 870	27,2	81,4	15,5	65,9	156	$3,62 \cdot 10^{-8}$	0,33
124 770	29,4	115,5	18,1	97,4	230	$4,45 \cdot 10^{-8}$	0,45
141 950	34,5	269,0	24,8	244,2	578	$8,62 \cdot 10^{-8}$	0,99
97 720	23,5	18,8	11,6	7,2	17	$0,53 \cdot 10^{-8}$	0,04
126 230	30,5	89,5	19,4	70,1	166	$3,12 \cdot 10^{-8}$	0,32
135 500	32,5	178,3	22,1	156,2	368	$6,02 \cdot 10^{-8}$	0,67
141 830	33,1	305,7	22,9	282,8	668	$10,00 \cdot 10^{-8}$	1,15

P_2 = pertes totales à vide au départ de la ligne 120 000 volts. Elles se composent:

- 1^o de la perte P_j par effet Joule du courant à vide,
- 2^o des pertes P_g par conductance.

Ces premières pertes se calculent facilement si l'on admet que le courant à vide I_2 décroît linéairement à partir de Chancy-Pougny, pour arriver à être nul à Jeanne-Rose. Si L est la longueur totale de la ligne en km, I_x le courant à une distance x de Jeanne-Rose, $I_x = I_2 \frac{x}{L}$. Soit de plus R la résistance totale d'une phase, r la résistance kilométrique d'un conducteur, la perte par effet Joule est pour une ligne triphasée:

$$P_j = 3 \int_0^L \left(I_2 \frac{x}{L} \right)^2 r dx = R I_2^2$$

d'où la perte totale par conductance:

$$P_g = P_2 - P_j.$$

Le tableau No. 5 donne en outre, en fonction de la tension, la perte par conductance p_g en watts par kilomètre et par phase. La perdittance kilométrique g a pour valeur:

$$g = \frac{p_g}{\left(\frac{U_2}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad \text{ou} \quad g = \frac{P_g^2}{L U_2^2}.$$

Ceci suppose que l'on néglige l'élévation de tension le long de la ligne qui reste inférieure à 1 % de la tension au départ de Chancy-Pougny. g est exprimé en Mhos/km.

Le courant I_2 se compose du courant de capacité I_c en avance de 90° sur la tension (sous réserve que l'on néglige la composante wattée provenant des pertes par effet Joule) et du courant des pertes par conductance I_g en phase avec la tension. Ce dernier a pour valeur:

$$I_g = \frac{P_g^2}{\sqrt{3} U_2}$$

et figure également dans le tableau No. 5. I_g restant en moyenne inférieur à 1,0 A, on peut admettre sans erreur appréciable que le courant de capacité est égal à I_2 .

²⁾ P_g doit être exprimé en watts.

Les principaux résultats de cette mise sous tension sont mis en évidence par les courbes de la fig. 8. Les valeurs particulières pour la tension secondaire normale:

$$U_2 = 120\,000 \text{ volts}$$

sont les suivantes:

	Ligne blanche:	Ligne rouge:
Tension primaire U_1	9240 V	9240 V
Puissance primaire P_1	196 kW	163 kW
Puissance primaire apparente	5150 kVA	5360 kVA
Pertes dans les transform. $P_t = P_f + P_{cu}$	106 kW	106 kW
Courant à vide haute tension I_2 . .	28,6 A	28,8 A
Pertes totales en ligne P_2	90 kW	57 kW
Pertes par conductance P_g	73 kW	44 kW
Perdite g	$4,25 \cdot 10^{-8}$ Mhos/km	$2,15 \cdot 10^{-8}$ Mhos/km

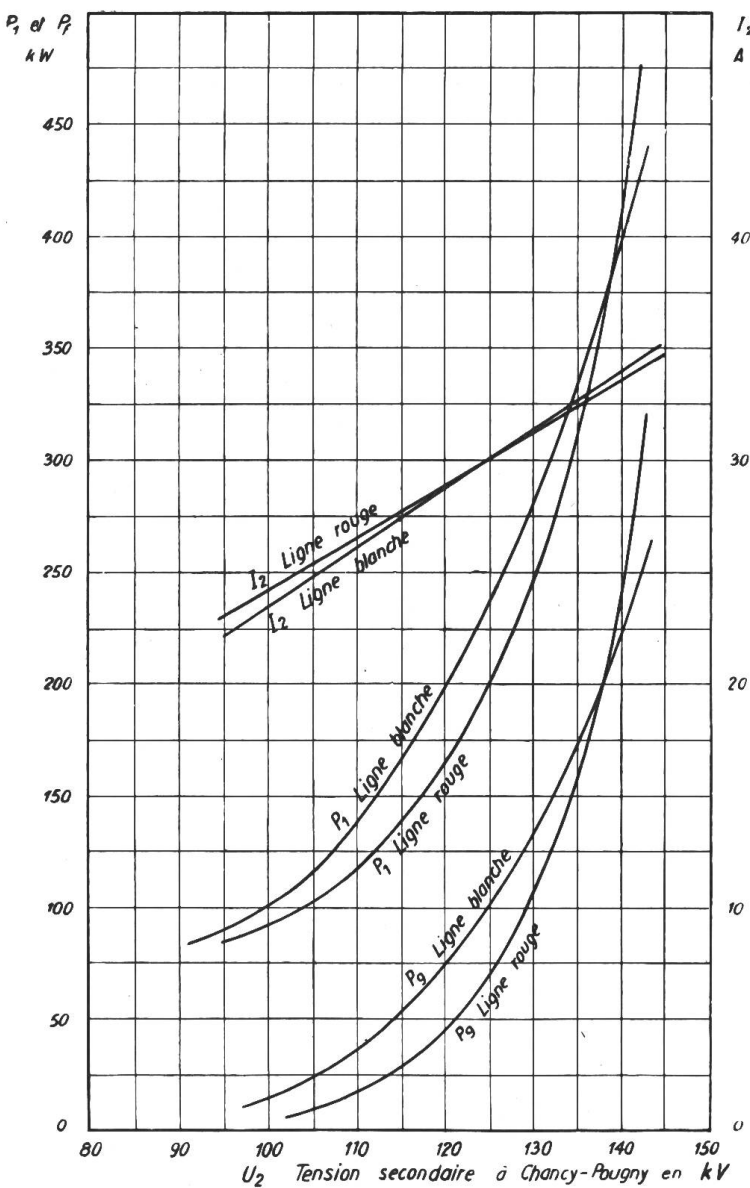


Fig. 8.

Caractéristiques principales relevées pendant les essais en fonction de la tension secondaire à Chancy-Pougny.

- P_1 = Pertes mesurées sur le primaire des transformateurs.
- P_2 = Pertes en lignes par conductance.
- I_2 = Courant haute tension au départ de Chancy-Pougny.

La puissance apparente sur le primaire, pour maintenir une seule ligne sous tension à vide, est de 5250 kVA environ pour une puissance réelle de 180 kW seulement. Le courant est déphasé en avant d'un angle voisin de 90° et entraîne une auto-excitation de l'alternateur. Ceci résulte d'ailleurs des valeurs de l'excitation de l'alternateur relevées pendant les essais. Pour une tension en ligne de 120 000 volts, tension primaire 9240 volts, l'excitation de l'alternateur correspondait à une tension à vide de ce dernier de 1800 volts. Ceci a été contrôlé en ouvrant les disjoncteurs de ligne à Chancy-Pougny, la ligne étant sous tension.

Pour mettre deux lignes simultanément sous tension à vide, il faudrait disposer de plus de 10 000 kVA qui n'auraient pu être fournis par le seul alternateur disponible au moment des essais.

Le courant de capacité théorique sur la haute tension devait être approximativement de:

$$\begin{aligned}
 I_c &= \frac{U}{\sqrt{3}} \omega C \\
 &= \frac{120000}{\sqrt{3}} 314 \cdot 1,276 \cdot 10^{-6} \\
 &= 27,8 \text{ A}
 \end{aligned}$$

où C est la capacité de service calculée précédemment. Les valeurs mesurées sont d'environ 1,0 A supérieures; l'écart est de 3,6 %.

La perditance g est très fortement influencée par les conditions atmosphériques, et c'est à cette raison que l'on peut attribuer l'écart des valeurs relevées pour chacune des deux lignes. Au cours d'essais spéciaux, nous avons vu la perditance doubler dans l'espace de moins d'une heure à la suite d'une chute de pluie et de neige sur le Jura, et atteindre plus de $20 \cdot 10^{-8}$ Mhos/km pour une tension de 120000 volts.

g) Relevés oscillographiques.

Une série d'oscillogrammes de courant et tension ont été relevés à Chancy-Pougny par les soins de la Station d'Etalonnage de l'Association Suisse des Electriciens à l'aide d'un oscillographe Siemens, et à Jeanne-Rose, par les soins du Laboratoire Central d'Electricité à Paris, à l'aide d'un oscillographe Blondel. Ces oscillogrammes comprennent ceux de tension et de courant des alternateurs à vide et en charge, des transformateurs à vide, de la ligne sous tension normale à vide, avec neutre simultanément ou séparément à la terre à Chancy-Pougny et à Jeanne-Rose, ou encore avec neutre isolé. On a également relevé les courants de terre à Jeanne-Rose.

Ces oscillogrammes ont fait l'objet d'une étude très approfondie de MM. Barrière et Josse, ingénieurs des Etablissements Schneider, parue dans la Revue Générale de l'Electricité du 16 janvier 1926, page 105. Les lecteurs que la question intéresserait pourront s'y rapporter avec profit. La décomposition de ces oscillogrammes en leurs harmoniques d'ordre supérieur a permis de constater qu'en régime normal il n'existe pas sur le réseau, d'harmoniques ayant une amplitude dangereuse.

Nous tenons à mentionner en terminant, la part active prise à ces essais et mesures par M. Bernard Jobin, ingénieur de la Banque Suisse des Chemins de fer.

Das $\cos \varphi$ - Problem beim Zusammenschluss mehrerer Kraftwerke.

Von Ing. H. C. Kloninger, Wettingen.

Der Autor knüpft an die Ausführungen des Herrn J. Kristen im Bulletin S. E. V. 1925, No. 10, an, und empfiehlt für Verbindungsleitungen zwischen zwei Kraftwerken an Stelle der Regulierung auf konstanten $\cos \varphi$ die Regulierung auf konstante Spannung gegebenenfalls unter Anwendung von Synchronmotoren.

L'auteur se réfère à l'exposé de M. J. Kristen, dans le Bulletin A. S. E. 1925, No. 10, et préconise pour les lignes de jonction entre deux centrales, au lieu de la régulation pour un $\cos \varphi$ constant, le réglage à tension constante, éventuellement au moyen de moteurs synchrones.

Unter diesem Titel hat Herr Ingenieur J. Kristen im Bulletin No. 10 des letzten Jahres einen ausserordentlich interessanten Artikel veröffentlicht, der die leider immer noch sehr verworrene $\cos \varphi$ -Angelegenheit um einen guten Schritt weiter bringt. Die veröffentlichten Diagramme werden gewiss vielen, die sich mit dieser Frage befassen, eine wertvolle Hilfe sein.

Wenn wir uns dennoch erlauben, Kritik zu üben, so soll damit der innere Wert der Veröffentlichung in keiner Weise berührt werden. Wir wollen einzig die Frage stellen: Ist das $\cos \varphi$ -Problem beim Zusammenschluss mehrerer Kraftwerke richtig gelöst, wenn auf konstanten $\cos \varphi$ geregelt wird? Wir glauben nicht.

Diese Antwort wird nur diejenigen überraschen, welche sich ausschliesslich mit der Energieverteilung in Sekundärnetzen und nicht mit dem Energieausgleich zwischen Kraftwerken befasst haben. Die Forderung nach Hochhaltung des Leistungsfaktors im Sekundärnetz ist derart allgemein, dass diese Forderung oft ohne eigentliche Notwendigkeit auf das Primärnetz übertragen wird.