Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 18 (1927)

Heft: 9

Artikel: Les surtensions de déclenchement et particulièrement celles des transformateurs à vide

Autor: Kopeliovitch, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058634

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.08.2025

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 Zürich 8, Seefeldstr. 301 | Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union de Centrales Suisses d'électricité

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

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

XVIII. Jahrgang
XVIIIe Année

Bulletin No. 9

September
Septembre 1927

Les surtensions de déclenchement et particulièrement celles des transformateurs à vide*).

Par *J. Kopeliovitch*, Ingénieur à la Société Brown Boveri & Cie., Baden.

621.314.1 (C068)

L'auteur montre brièvement l'origine physique du phénomène et les différentes catégories de surtensions. Celles-ci sont dues à la rupture brusque du courant de magnétisation, au rallumage d'arc de coupure et aux oscillations engendrées par l'arc. Les recherches expérimentales décrites portent sur l'étude de l'influence de la saturation, de la fréquence d'alimentation et sur celles du nombre des points et de la vitesse de coupure sur l'amplitude des surtensions. L'effet des interrupteurs à résistances de choc, dont l'emploi s'est généralisé en Europe, a été étudié sur plusieurs transformateurs. En terminant, l'auteur effleure la question des surtensions produites aux bornes des transformateurs par le déclenchement des lignes à vide. Ces surtensions sont en premier lieu engendrées par les rallumages d'arc et les oscillations des enroulements des transformateurs. Par l'emploi de disjoncteurs à coupures multiples et suffisamment rapides, on peut éviter les rallumages d'arc et, par conséquent, les résistances de choc.

Der Verfasser gibt zunächst die physikalischen Ursachen der verschiedenen Ueberspannungsarten bei leerlaufenden Transformatoren an: Rasche Unterbrechung des Magnetisierungsstromes, Rückzündung des Abschalt-Lichtbogens, durch den Bogen bedingte Schwingungen. Die beschriebenen experimentellen Untersuchungen sollten den Einfluss der Sättigung, der Betriebsfrequenz, sowie der Anzahl Unterbrechungsstellen und der Abschaltgeschwindigkeit auf die Amplitude der Ueberspannungen ermitteln. Ferner wurde die Wirkung der mit Schutzwiderstand versehenen Schalter bei mehreren Transformatoren studiert. Zum Schlusse berührt der Verfasser die Frage der durch die Abschaltung leerlaufender Leitungen an den Transformatorklemmen verursachten Ueberspannungen. Letztere rühren in erster Linie von den Lichtbogenrückzündungen und von den Schwingungen der Transformerwicklungen her. Lichtbogenrückzündungen und infolgedessen die Schutzwiderstände können durch die Verwendung mehrfach und rasch unterbrechender Schalter vermieden werden.

Sommaire:

1° Au sujet de l'origine des surtensions de déclenchement;
2° Recherches expérimentales et leur but;
3° Résultats des essais;
4° Étude oscillographique qualitative;
5° Réduction des surtensions par l'emploi des interrupteurs à résistance de choc;
6° Surtensions par déclenchement des lignes à vide;
7° Conclusions.

1° Au sujet de l'origine des surtensions de déclenchement.

La question des régimes transitoires sur les lignes et machines électriques a fait, depuis des années, l'objet de nombreuses recherches théoriques et expérimentales et a fourni une documentation abondante.

Un grand nombre de problèmes ont pu être résolus, d'autres ne le sont pas encore complètement. Parmi les derniers, figure entre autres la question des surtensions produites par l'enclenchement ou le déclenchement des transformateurs à vide.

*) Rapport présenté à la IVe Session de la Conférence internationale des Grands Réseaux électriques à haute tension, du 23 juin au 2 juillet 1927, à Paris.

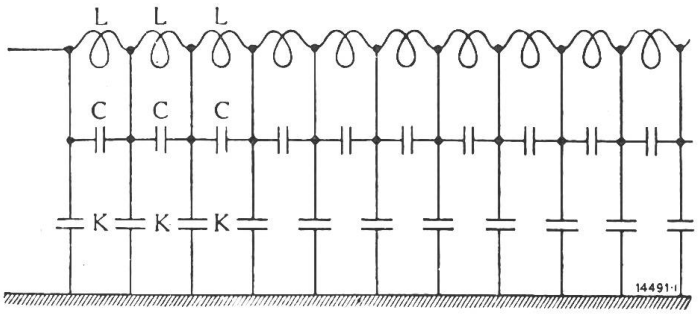

Fig. 1.
Représentation schématique d'un enroulement.
L = Inductance des spires
C = Capacité entre spires.
K = Capacité des spires par rapport à la terre.

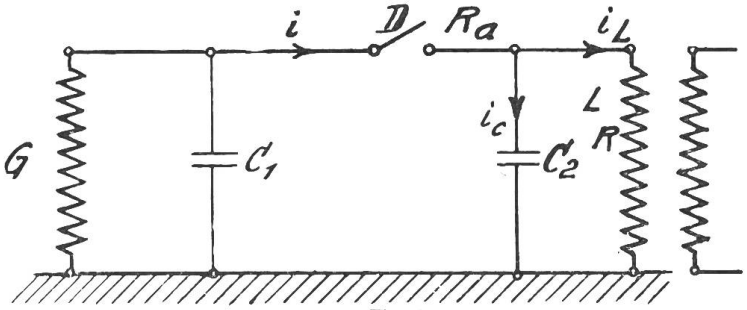

Fig. 2.

La discussion de l'utilité des résistances de choc, qui a fait le sujet de quelques publications récentes [1]), étant de nouveau à l'ordre du jour, nous croyons que les résultats des essais exposés ci-dessous présentent un intérêt général. Avant de passer à la partie expérimentale, je voudrais rappeler le côté physique du problème.

Si l'on coupe un circuit alimentant un transformateur à vide, des surtensions atteignant parfois des valeurs considérables se produisent généralement. Pour ne pas compliquer les considérations générales sur la nature et l'origine de ce phénomène, nous remplacerons le schéma bien connu d'un enroulement de transformateur, tel que le montre la figure 1, par celui de la figure 2 en désignant par C_2 la capacité des conducteurs de l'installation, des bornes d'entrée, ainsi que la capacité supposée concentrée de l'enroulement même par rapport à la masse. Le condensateur C_1 représente la capacité des conducteurs précédant l'interrupteur D et G désigne la source d'alimentation. Par L et R nous avons désigné l'inductivité apparente et la résistance ohmique du transformateur. Le schéma ainsi simplifié peut être appliqué avec une approximation suffisante pour les fréquences non supérieures à la fréquence propre de l'enroulement. Pour les fréquences élevées il n'est plus admissible, car il y a lieu

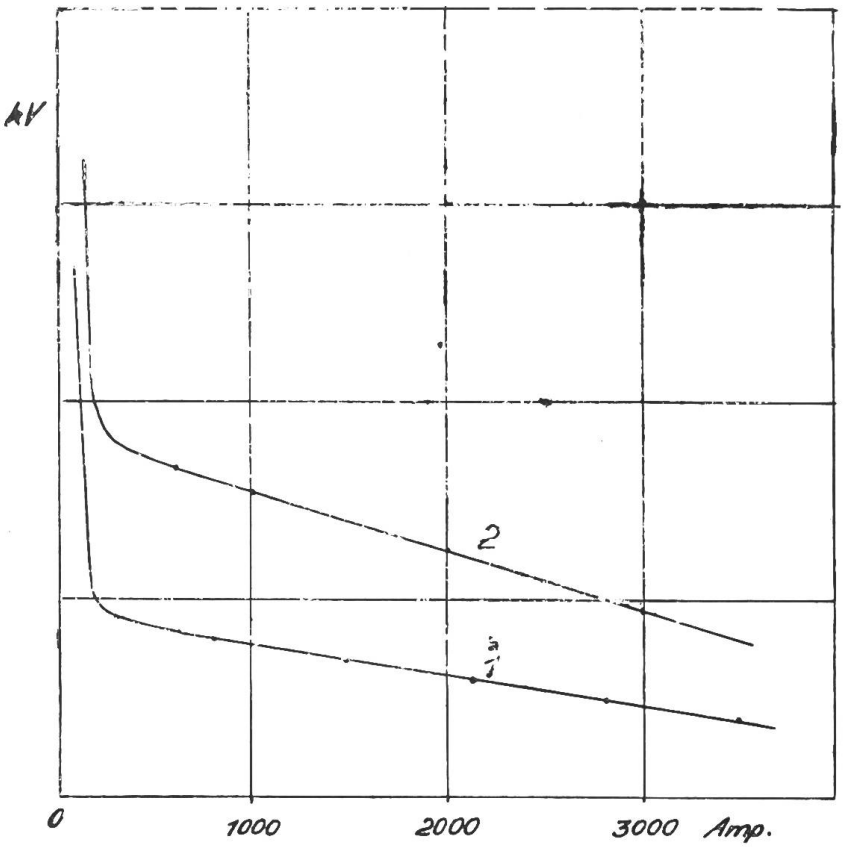

Fig. 3.
Caractéristique de l'arc alternatif dans l'huile pour deux longueurs d'arc.

[1]) *Biermanns:* Zur Frage des Vorstufenschalters, E. T. Z., 1926, H. 26, S. 776.
A. Mauduit: A propos d'essais effectués sur des interrupteurs à résistance de choc, R. G. E., 12 juin 1926, t. XIX, No. 24, p. 937.
Ledoux: —do—, R. G. E., 2 octobre 1926, t. XX, No. 14, p. 483.

de tenir compte de la capacité entre spires et de la capacité à la masse, cette dernière étant, contrairement à l'hypothèse précédente, uniformément répartie le long de l'enroulement. Le problème des oscillations libres du transformateur a été étudié par de nombreux auteurs et nous nous bornerons à renvoyer aux travaux parus à ce sujet[2]). Dans le schéma de la figure 2 nous avons désigné par R_a la résistance apparente de l'arc dans l'interrupteur, par i, i_L, i_c les courants de l'interrupteur, de l'inductance L et du condensateur C_2. Remarquons tout de suite que la résistance de l'arc étant fonction du courant, de sa longueur et, par là, du temps, ainsi que dans une certaine mesure du nombre de points de coupure, son introduction dans les formules se heurte à de grandes difficultés. La figure 3 représente deux courbes caractéristiques de l'arc alternatif brûlant aux électrodes d'un interrupteur à huile: la courbe représentative de la tension de l'arc en fonction de l'intensité, la longueur de l'arc étant un paramètre, ressemble à une hyperbole, mais son équation n'est point aussi simple.

Les équations différentielles du circuit s'écrivent:

$$u = \frac{L\,di_L}{dt} + Ri_L + R_a i = R_a i + \frac{1}{C_2}\int i_c dt$$

où u désigne la force électromotrice appliquée. La solution de ce système dépend de la fonction $R_a = F\,(i, t)$, dans l'introduction de laquelle réside toute la difficulté du problème. Sans vouloir compliquer les considérations par des hypothèses plus ou moins fondées sur cette fonction, on peut se proposer de chercher la valeur constante maximum de R_a déterminant une oscillation transitoire apériodique dans le cuircuit formé par L et C_2. Des calculs faciles à retrouver conduisent à l'expression:

$$R_a = \frac{1}{R^2\frac{C_2}{L} - 4}\left(R \pm 2\sqrt{\frac{L}{C_2}}\right)$$

ou bien, en admettant R très petit:

$$R_a = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C_2}}.$$

Tant que la résistance R_a reste au-dessous de cette valeur, le système formé de L et C_2 ne peut pas osciller. Pour les valeurs supérieures, tout régime troublé produira des oscillations dans le circuit de L et C_2 avec la fréquence:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_2}}.$$

Les surtensions de déclenchement peuvent être engendrées de différentes manières.

Si la coupure a lieu au moment où le courant I_L a une valeur $i_{L,0}$ la surtension maximum que produira l'énergie magnétique emmagasinée dans l'inductance L est donnée par l'équation bien connue:

$$u_{max} = i_{L,0}\sqrt{\frac{L}{C_2}}.$$

Dans le cas d'un système apériodique, le calcul de la tension aux bornes du transformateur, produite par la coupure, peut également se faire en partant de la loi de la conservation de l'énergie. En l'écrivant sous sa forme différentielle, on a:

[2]) *Steinmetz:* Theory and Calculation of transient el. phenomena and oscillations.
K. W. Wagner: Wanderwellen-Schwingungen in Transformatorenwicklungen. A. f. E., 1918, B d 6,5. 301.
W. Rogowski: Spulen und Wanderwellen. A. f. E., 1918, p. 265, 377, 33, 161; 1919, p. 320.
P. Bunet: Les transformateurs, 1923, p. 426, Paris.
Boucherot: Oscillations électromagnétiques et régimes troublés. Encyclopédie d'Électricité industrielle, Paris.

$$C_2 u du = L i_L di_L,$$

ceci en négligeant les pertes Joule dans l'arc et dans la résistance R. La quantité d'électricité étant:

$i_L dt = C_2 du$, on obtient pour la tension:

$$u = L \frac{di}{dt}.$$

Cette formule ne peut être appliquée que si l'on connaît l'allure de la courbe du courant au moment de la coupure. *Si par l'effet de l'arc, le courant est coupé sensiblement avant le passage normal du courant par zéro, des surtensions considérables peuvent en résulter.* Comme on verra plus loin, c'est à ce genre de surtensions qu'il faut attribuer les valeurs les plus hautes mesurées lors de nos essais de déclenchement des gros transformateurs à vide.

Un autre genre de surtensions peut se produire si le circuit composé par la capacité C_1 (capacité des barres, par exemple), C_2 et l'interrupteur, circuit qui contient généralement encore des inductances (par exemple, des bobines de relais, transformateurs d'intensité, etc.) entre *en oscillation du fait de l'arc* (expérience de l'arc chantant). Les oscillations de haute fréquence engendrées de la sorte pourraient présenter un certain danger pour l'isolation du transformateur surtout si la fréquence du circuit extérieur s'approche de la fréquence critique du transformateur[3]). Mais à cause du manque complet des données expérimentales sur ce genre de surtensions dans les gros transformateurs, il est difficile de se prononcer sur la réalité de leur danger. A en juger d'après les recherches faites sur un petit transformateur de 1,8 kVA[4]), il semblerait que les oscillations engendrées par l'arc chantant n'atteignent des valeurs considérables que dans le cas de coupure de courants faibles, dans des conditions appropriées bien connues de la technique des hautes fréquences. La tension aux bornes des transformateurs sera plus élevée que celle aux barres si la capacité C_1 est plus grande que C_2.

Le rallumage de l'arc après un court intervalle d'extinction, qui peut être dans le cas de déclenchement des lignes à vide la cause d'ondes à front raide de valeur 1,73 fois la tension de service dans des installations triphasées, ne semble pas être dangereux dans le cas de coupure d'un transformateur à vide. Le phénomène peut se produire de la manière suivante: le courant étant interrompu avant son passage naturel par zéro, une surtension se produit dans l'inductance qui, avec celle apparaissant à l'autre borne de l'interrupteur, peut atteindre la tension de rallumage et provoquer le rétablissement de l'arc, tout en engendrant des oscillations libres dans les circuits parcourus par le courant rétabli. Le rallumage se produisant presque tout de suite après l'extinction de l'arc et la désionisation de la gaîne gazeuse dans l'interrupteur n'étant pas encore très avancée, les ondes à front raide qui en résultent ne sont pas sensiblement supérieures à la tension de service et, par conséquent, pas dangereuses pour l'isolation de l'enroulement. La contrainte de l'isolation entre spires peut cependant dépasser celle provoquée par les surtensions des deux premiers genres. Une fois l'arc rallumé, son extinction définitive ne se produit qu'au bout d'une, voire de plusieurs demi-ondes du courant fondamental, le phénomène de rallumage pouvant se répéter dans certaines conditions plusieurs fois pendant une seule coupure.

Les surtensions qui se produisent à l'enclenchement des transformateurs sont dues en premier lieu à l'arc qui jaillit entre les contacts d'un pôle de l'interrupteur avant sa fermeture complète. L'enroulement et la capacité C_2 étant portés au

---

[3]) *Böhm:* Recherches mathématiques et expérimentales sur l'influence des ondes et oscillations sur l'enroulement des transformateurs. Thèse de doctorat, Berlin 1917.
J. Fallou: Nouvelle contribution expérimentale à l'étude des surtensions dans les transformateurs. B. S. F. E., t. VI, 1926, p. 237 et 1245.

[4]) *Hammerschmidt:* Ausgleichvorgänge beim Abschalten von Induktivitäten. A. f. E., 1922, Bd. X, p. 431.

potentiel du pôle correspondant, l'arc d'enclenchement peut s'éteindre un instant pour se rallumer de nouveau dès que la tension de rallumage sera atteinte. Ce phénomène est généralement de très courte durée. La tension des ondes à front raide envoyées dans le transformateur à chaque rallumage, part de la valeur de la tension de service et décroît rapidement. Elle est de toute façon plus faible que celle qui se produit en service par suite de percements d'isolateurs à la terre.

Au moment de l'établissement du courant permanent dans l'enroulement, une onde libre de fréquence propre de l'enroulement se superpose à lui. La grandeur de ce courant est déterminée par la valeur du courant permanent lors de l'allumage de l'arc et son amortissement, qui dépend des pertes dans le circuit, est généralement considérable. Le phénomène sera donc de courte durée, et les mesures montrent que les surtensions qui en résultent restent habituellement en dessous de celles provoquées par les déclenchements.

2⁰ Recherches expérimentales et leur but.

Ce qui précède ne donne qu'une idée approximative des phénomènes qui se produisent lorsqu'on enclenche ou déclenche un transformateur à vide. *L'influence de la saturation, de la fréquence d'alimentation, celle du nombre des points de coupure et de la vitesse d'ouverture, la forme de la caractéristique de l'arc* rendent le problème inaccessible à la théorie et ce n'est que par les mesures directes qu'on peut se rendre compte de l'ordre de grandeur des surtensions et des contraintes qui en résultent. C'est aussi par voie expérimentale qu'on devra rechercher, s'il y a lieu, les moyens pour y remédier.

C'est à l'aide d'un éclateur à sphères, dont le retard d'éclatement est supprimé par des moyens appropriés, que les valeurs maxima des surtensions peuvent être mesurées. La méthode employée par nous consiste à effectuer des séries de 30 à 40 essais comportant chacun un enclenchement et un déclenchement consécutifs en observant l'éclateur, dont la distance disruptive est fixée à une valeur donnée. Après chaque série de mesures cette distance est augmentée de 10 pour 100. On continue les opérations jusqu'à ce qu'on arrive à une série d'essais sans éclatements entre sphères. Comme tension mesurée on prendra la moyenne arithmétique des deux dernières tensions fixées à l'éclateur. Les tensions indiquées sont des valeurs maxima divisées par racine carrée de 2. L'erreur que comportent de telles mesures et de moins de 10 pour 100, comme le prouve la répétition des essais.

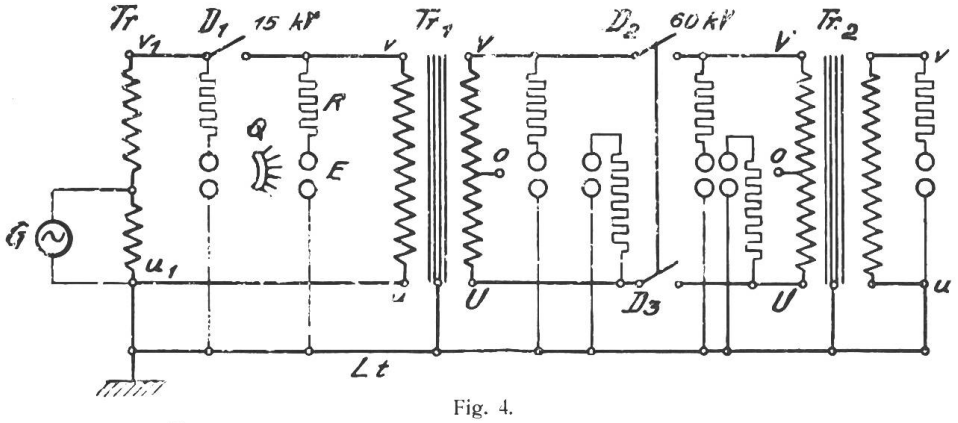

Fig. 4.

G = alternateur.
Tr = auto-transformateur 1730 kVA, 1330/15000 volts, 16,66 p : s.
Tr_1, Tr_2 = transformateurs monophasés 3000 kVA, 15000/60000 volts, 16,66 p : s.
D_1, D_2, D_3 = disjoncteurs monophasés.
E = éclateur à sphères éclairé par une lampe à mercure Q.
Lt = ligne de terre, 100 mm² 45 m.
R = résistance liquide 30000 ohms.
Il n'a jamais été employé à la fois qu'un des éclateurs dessinés.

Remarquons encore que nous n'avons jamais employé plusieurs éclateurs simultanément, afin d'éviter les erreurs dues à la modification éventuelle de la surtension

par suite de l'allumage de l'arc à l'un des éclateurs. *Par le terme surtension nous désignons par la suite la tension totale mesurée et non la tension au-dessus de la tension de régime.*

Les recherches faites à la plate-forme d'essais de la Société Brown, Boveri & Cie.[5]), ont pour objet l'étude de l'influence de la saturation, de la fréquence, du nombre de points de coupure et de la vitesse de rupture sur la grandeur des surtensions. On a également cherché à établir leur origine en essayant méthodiquement les différentes connexions des transformateurs triphasés. L'influence des capacités C_1 et C_2 ainsi que l'utilité des résistances de choc ont été étudiées sur différents types de transformateurs. L'emploi des résistances de choc comme amortisseur de l'à-coup d'enclenchement a fait l'objet d'une étude oscillographique approfondie.

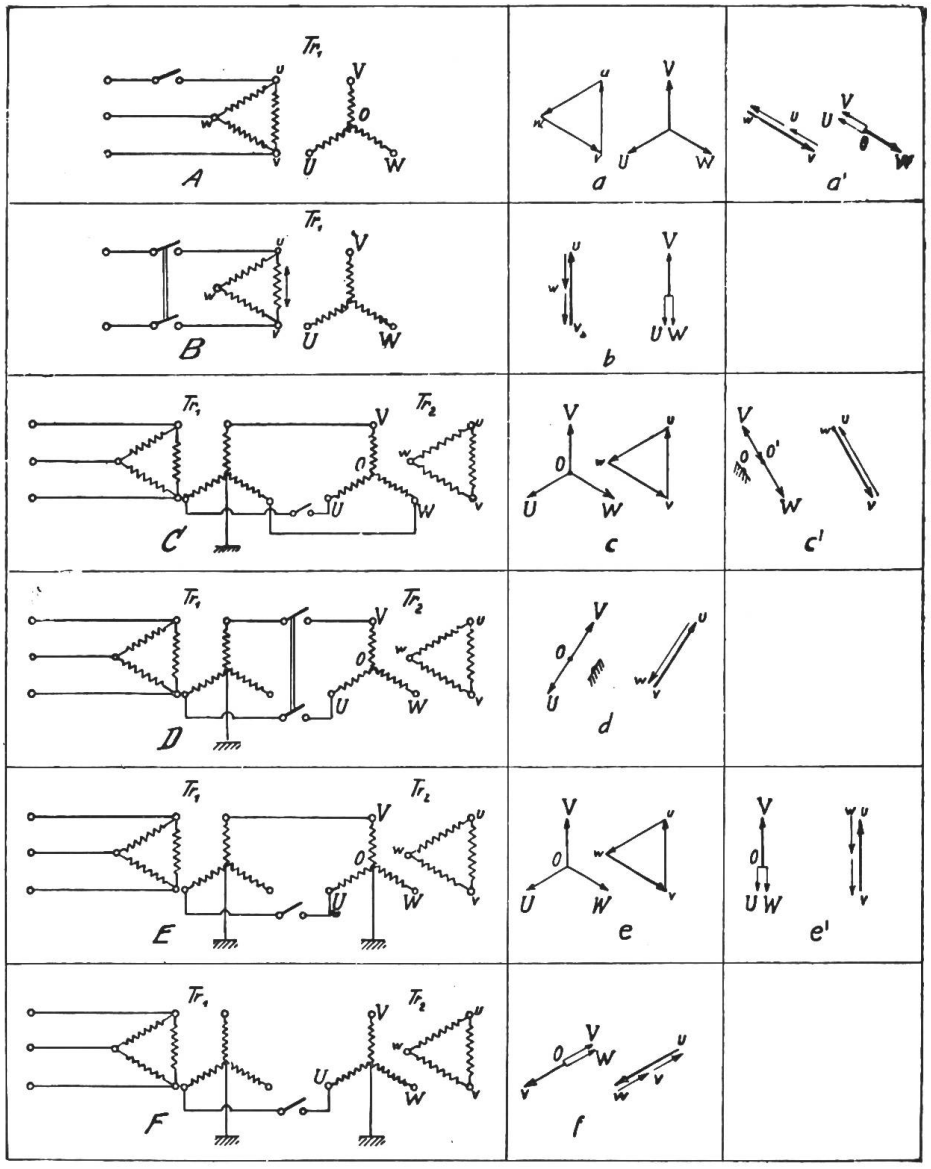

Fig. 5.
Schémas des connexions employées.
Tr_1, Tr_2 = transformateurs triphasés 6000 kVA, 12/34,65 kV, Δ/Y, 50 p:s.

Le schéma de la figure 4 représente la connexion employée lors des essais avec deux transformateurs monophasés de 3000 kVA, 15/60 kV, 16,66 p:s. La

[5]) Je tiens à remercier M. Matthey-Doret, ingénieur. qui a exécuté avec beaucoup de soins et précision une grande partie des essais décrits.

légende contient les données explicatives. Comme on le voit, toutes les surtensions ont été mesurées par rapport à la terre.

L'étude des surtensions produites par les enclenchements et déclenchements du côté basse tension a été faite en se servant du disjoncteur D_1, l'enroulement haute tension du transformateur Tr_1 étant ouvert. La phase u ainsi que la masse du transformateur ont toujours été reliées à la terre. Pour la mesure des surtensions provoquées par les manipulations du côté haute tension, on a employé le disjoncteur D_2 ou bien les deux disjoncteurs D_2 et D_3 couplés mécaniquement, les tensions étant mesurées aux bornes du transformateur Tr_2. Lors des prises oscillographiques la phase V a dû être mise à la terre. Pour mettre en évidence l'influence des capacités C_1 et C_2 du côté basse tension, les condensateurs du 0,05 μF ont été branchés selon le schéma de la figure 2.

Les mêmes essais ont été faits également avec deux transformateurs monophasés de 1730 kVA, 1330/15000 volts, 16,66 p : s.

La figure 5, A à F reproduit les différentes connexions employées pendant les essais faits avec deux transformateurs triphasés de 6000 kVA, 12/34,65 kV, $\Delta/\curlyvee$, 50 p : s. Les surtensions ont été mesurées entre les bornes u, v, w, d'une part et U, V, W, d'autre part. Les mesures ont été faites en outre entre U, V, W et le point neutre 0 haute tension. Les expériences A et B ont été répétées avec le neutre à la terre. Le courant a été fourni par le réseau de 8000 volts, 50 p : s de la fabrique ou bien par un alternateur de 350 kVA, 50 p : s par l'intermédiaire d'un transformateur de 300 kVA.

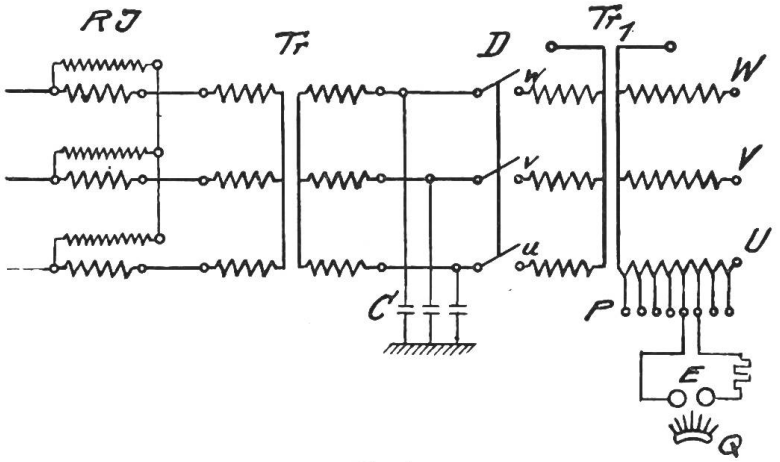

Fig. 6.
RI = régulateur d'induction.
Tr = transformateur 430/10 300 volts, 300 kVA.
Tr_1 = transformateur 6000 kVA, 8,4/57 kV, $\curlyvee/\curlyvee$, 50 p : s.
C = condensateur 0,1 μF.
D = disjoncteur.
E = éclateur à sphères éclairé par une lampe à mercure Q.

Sur un transformateur triphasé de 6000 kVA 8,4/57 kV $/\curlyvee\curlyvee$, 50 p : s, dont l'enroulement haute tension a été muni de prises, on a cherché à établir la distribution le long de l'enroulement de la tension entre galettes produite par la coupure. L'enroulement primaire a été alimenté en passant par un transformateur auxiliaire Tr, branché sur le réseau de 500 volts (fig. 6). Une batterie de trois condensateurs de 0,1 μF a été connectée entre les phases et la terre, dans le but de remplacer l'effet des barres omnibus.

3⁰ Résultats des essais.

Les figures 7, 9, 12, résument les résultats des mesures sur les transformateurs de 3000 et 6000 kVA. Les courbes sont portées en fonction de la tension efficace avant l'essai; par la légende et le schéma de la connexion employée on peut voir le genre d'essai. L'allure des courbes représentatives des surtensions absolues semble être la même dans les trois cas: un accroissement rapide au début, une inflexion vers l'axe des abscisses et une partie rectiligne. Les surtensions relatives (fig. 8, 10, 12) qui, à un tiers de la saturation normale, atteignent 300 à 350 pour 100, décroissent avec l'augmentation de la tension stationnaire pour atteindre 180 à 240 pour 100 à la tension normale. Des résultats analogues ont été obtenus sur un autre transformateur triphasé de 6000 kVA, 8,4/57 kV $\curlyvee/\curlyvee$ (voir fig. 6) qui a

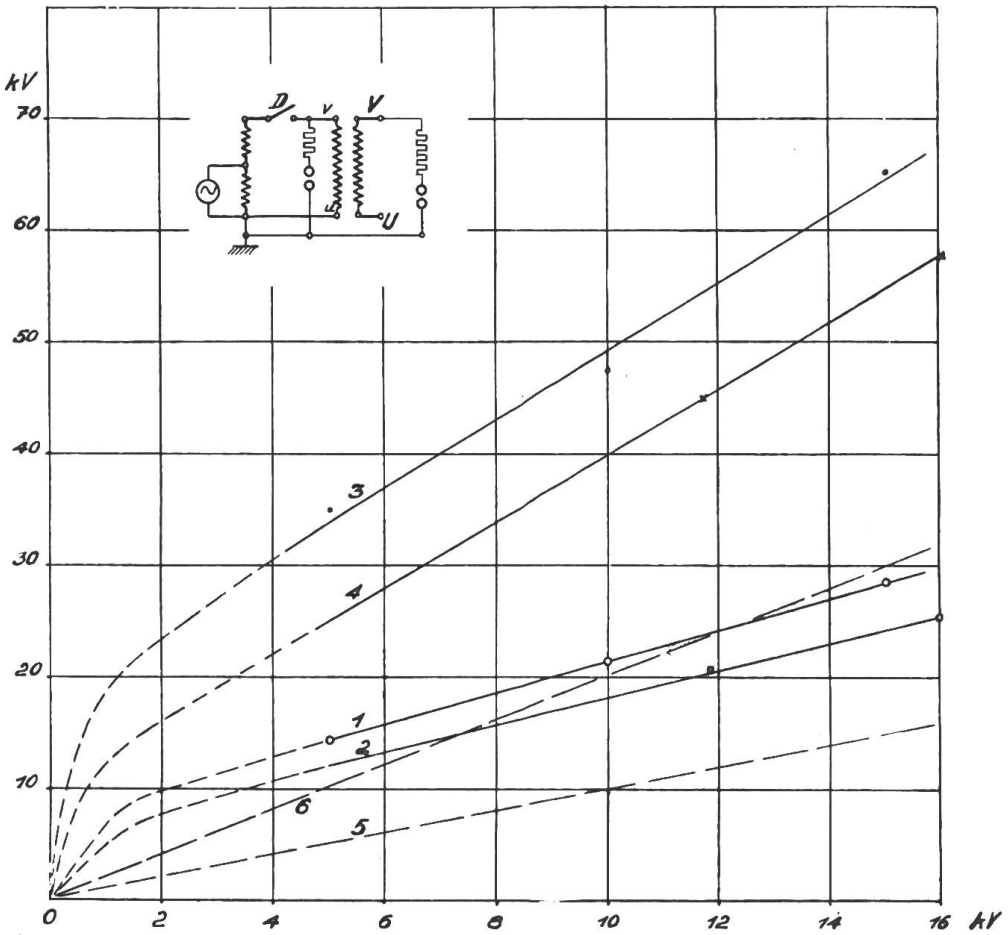

Fig. 7.
Surtensions de déclenchement d'un transformateur monophasé de 3000 kVA, 15/60 kV, 16,66 p : s.

1 Surtensions à la borne *v*, à 16,66 p : s
2 " " " " *v*, à 50 "
3 " " " " *V*, à 16,66 "
4 " " " " *V*, à 50 "
} en fonction de la tension de régime.
5 Tension de régime à la borne *v* avant la coupure.
6 " " " " " " *V* " " "

été connecté ou déconnecté simultanément sur les trois phases. Le tableau I contient les tensions maxima constatées de cette façon à la borne *W* par rapport à la terre:

Transformateur triphasé 6000 kVA, 8,4/57 kV, Y/Y 50 p : s.

Tableau I.

Tension de régime par phase	Surtensions de déclenchement par rapport à la terre		Surtensions d'enclenchement par rapport à la terre	
kV	en kV	en centièmes	en kV	en centièmes
7,9	24	303	—	—
15,8	42	266	21	133
23,8	48	202	28	117
33,0	50	151	—	—

L'effet de l'augmentation du courant de magnétisation est nettement favorable, l'inflexion de la courbe numéro 1 de la figure 12 se produisant par exemple pour un courant inférieur à 0,4 A.

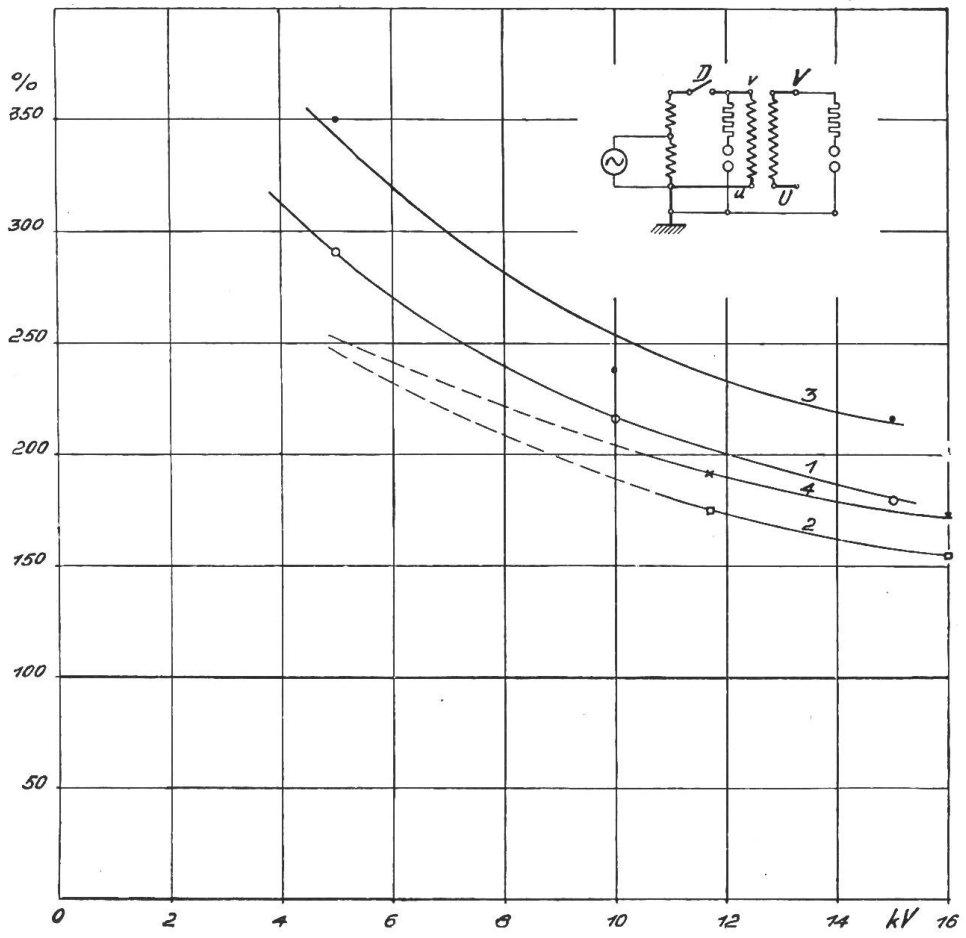

Fig. 8.
Surtensions en % de la tension avant la coupure, en fonction de cette dernière.
Transformateur monophasé 3000 kVA, 15/60 kV, 16,66 p:s.
1 à la borne *v*, alimentation avec 16,66 p:s.
2 „ „ „ *v*, „ „ 50 „
3 „ „ „ *V*, „ „ 16,66 „
4 „ „ „ *V*, „ „ 50 „

A la fréquence 16,66 p:s de la source d'alimentation les surtensions sont légèrement supérieures (voir fig. 7) à celles obtenues avec une source de 50 p:s, la puissance des alternateurs et l'installation d'essais étant les mêmes dans les deux cas. Un essai fait avec un transformateur monophasé de 1730 kVA, 15000/1329 volts, 16,66 p:s a donné le même résultat:

à 15 kV, 16,66 p:s la surtension a atteint 35 kV (233 pour 100);

à 15 kV, 50 p:s la surtension a atteint 22 kV (147 pour 100),

cet essai étant fait avec une borne reliée à la terre. La variation de l'inductance avant l'interrupteur par le changement de la puissance et de la connexion de la source d'alimentation n'a pas eu d'influence sur ces valeurs.

L'amplitude des *surtensions d'enclenchement* est restée pendant tous ces essais sensiblement au-dessous des surtensions de coupure: le tableau I contient des chiffres intéressants à ce sujet. Lors de l'essai à 16,66 p:s représenté sur la figure 7, on a mesuré à la borne *V* en déclenchant 65 kV (216 pour 100) en enclenchant 54 kV (180 pour 100) par rapport à la terre. Le tableau II (essai *B*, voir fig. 5), qui contient quelques valeurs des tensions d'enclenchement, confirme également ce résultat: ici la différence est encore plus marquée pour les deux enroulements (entre *u, v* en déclenchant 42 kV, c'est-à-dire 512 pour 100, en enclenchant 11,5 kV,

Surtensions de déclenchement et d'enclenchement d'un transformateur triphasé à vide de 6000 kVA aux 2/3 de la tension nominale, 50 périodes par seconde, 8 points de coupure par pôle d'interrupteur.

Tableau II.

Connexion (fig. 5)	Surtensions de déclenchement												Surtensions d'enclenchement				Remarques
	Bornes	kV	% *)	% **)	Bornes	kV	% *)	% **)	Bornes	kV	% *)	% **)	Bornes	kV	% *)	% **)	
A	*uv*	28	341	395	*OV*	48	350	406	*UV*	95	403	403					
	uw	34	415	480	*OU*	55	402	465	*VW*	45	191	380					
	vw	<10	<122	—	*OW*	24	175	—	*UW*	68	289	575					
	uv	29	353	408	*OV*	51	372	432	*UV*	95	403	403					Point neutre 0 mis à la terre.
	uw	32	390	450	*OW*	23	168	—									
B	*uv*	42	512	512	*OV*	69	503	503	*UV*	95	463	463	*uv*	11,5	140	140	
	uw	22	537	537	*OU*	38	560	560	*VW*	85	415	415					
	vw	20	488	488	*OW*	38	560	560	*UW*	20	—	—	*OV*	21	153	153	
					0—Terre	10	—	—									Point neutre 0 mis à la terre.
					OV	75	547	547									
C	*uw*	20	244	244	*OU*	34	248	248	*UV*	48	204	235					
	uv	11,5	141	280	*OV*	21	153	308	*UW*	55	243	268					
	vw	16	195	390	*OW*	24	175	352	*VW*	<30	<127	—					
					0—Terre	14,5	—	213									
	uv	20	244	244													Déclenchement de la phase *V* au lieu de *U*.
	vw	10,5	128	256	*OW*	20	146	294									
	uw	15,5	189	378	*OU*	26	190	382									
D	*uw*	23	324	324	*OV*	35	296	296	*UV*	68	288	288					
	vw	8,5	—	—	*OU*	35	296	296									
					OW	16	—	—					*OW*	16	—	—	Point neutre du transformateur d'alimentation non relié à la terre.
					0—Terre	20	294	—					0—Terre	20	294	—	
					OV	40	338	338									
E					*OU*	39	285	330									
					OW	46	336	390									
					OV	24	175	—									
F					*OU*	44	321	321									
					OW	24	353	353									
					OV	26	382	382									

*) Surtensions en centièmes de la tension de régime avant la manipulation.
**) Surtensions en centièmes de la différence géométrique entre les tensions avant et après l'opération.

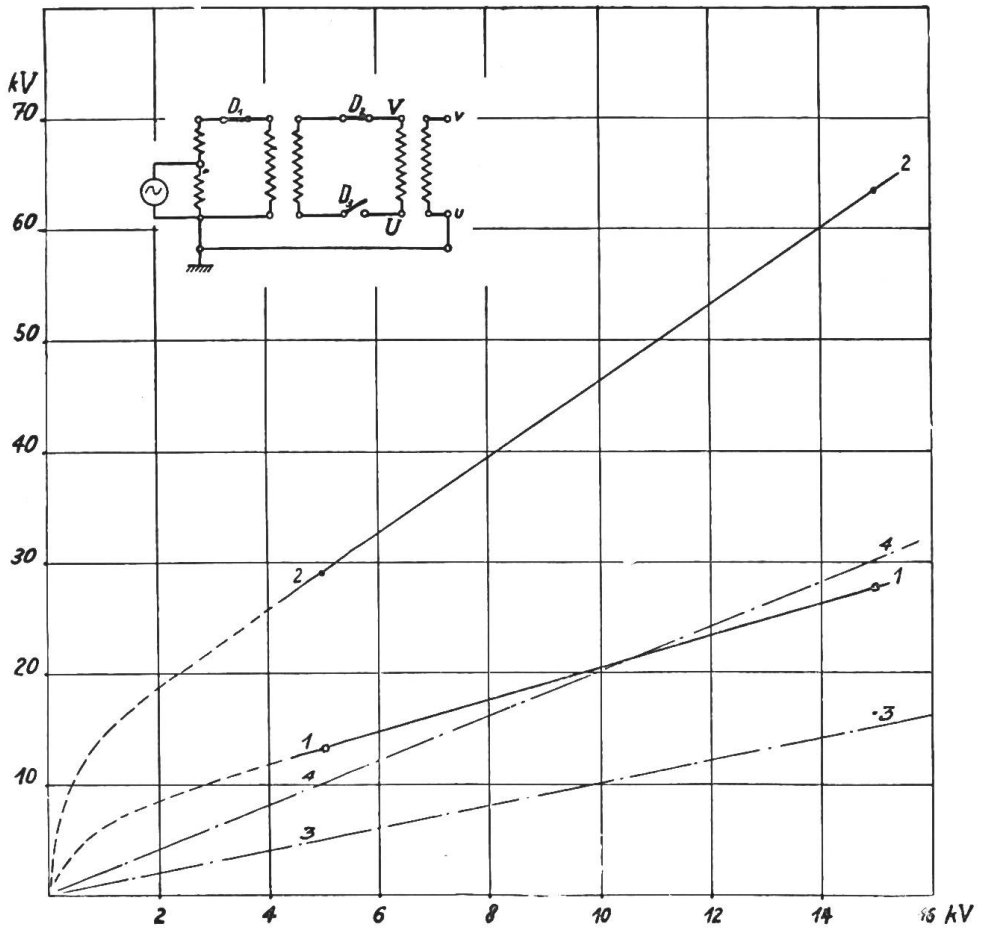

Fig. 9.
Surtensions de déclenchement d'un transformateur monophasé de 3000 kVA, 15/60 kV, 16,66 p:s.

1 Surtension à la borne *v*, à 16,66 p:s } en fonction de la tension de régime.
2 „ „ „ „ *U*, à 16,66 „ }
3 Tension de régime à la borne *v*.
4 „ „ „ „ „ „ *U*.

c'est-à-dire 140 pour 100, entre *UV* en déclenchant 69 kV, c'est-à-dire 503 pour 100, en enclenchant 21 kV, c'est-à-dire 153 pour 100).

Ce même tableau contient les résultats des essais faits sur deux transformateurs triphasés 6000 kVA, 12/34,65 kV, $\Delta/\curlyvee$, 50 p:s, suivant les connexions de la figure 5. Le but de ces recherches a été d'établir si les retards d'ouverture sur différents pôles de l'interrupteur, qui donnent lieu à différentes connexions de la figure mentionnée, ne causent pas des surtensions plus élevées. Dans la deuxième colonne de la figure 5, nous avons indiqué les diagrammes vectoriels des tensions de régime avant le déclenchement; la troisième colonne représente ces diagrammes après le déclenchement.

Remarquons de suite que toutes ces mesures ont été faites à 2/3 de la tension normale, ce qui explique en partie les valeurs élevées des surtensions en pour-cent; les chiffres très élevés de l'essai *B* en particulier sont dûs en outre, comme nous le verrons tout à l'heure, à la rupture trop rapide (8 interruptions par phase) qui, normalement, n'est pas employée à la tension de 8 kV.

Pour la comparaison des différents cas entre eux, il faut encore tenir compte, en plus des surtensions en pour cent, du rapport de la surtension mesurée à la différence géométrique des tensions avant et après le déclenchement : ces valeurs, également en pour-cent, sont inscrites dans la quatrième colonne du tableau II.

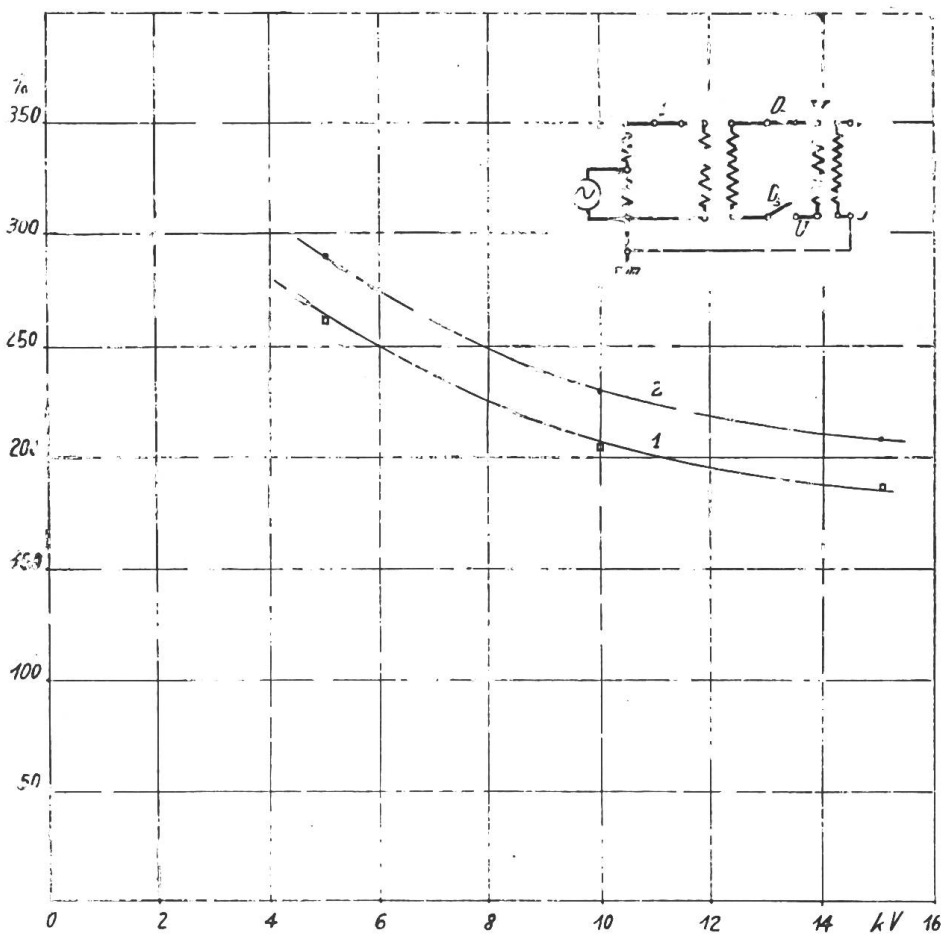

Fig. 10.
Surtensions en % de la tension avant la coupure, en fonction de cette dernière.
Transformateur monophasé 3000 kVA, 15/60 kV, 16,66 p : s.
1 à la borne *v*, alimentation avec 16,66 p : s.
2 „ „ „ *V*, „ „ 16,66 „

Même en tenant compte d'une rupture trop rapide employée à 8 kV, les déclenchements du côté basse tension provoquent des surtensions légèrement plus fortes que les déclenchements du côté haute tension. En comparant la figure 8 avec la figure 10, on arrive à la même conclusion. Ce fait est d'ailleurs connu des exploitants et nous connaissons un grand réseau de distribution, dans lequel les déclenchements des transformateurs à vide du côté basse tension sont défendus. Nous essayerons plus loin d'expliquer ce fait, paradoxal au premier abord.

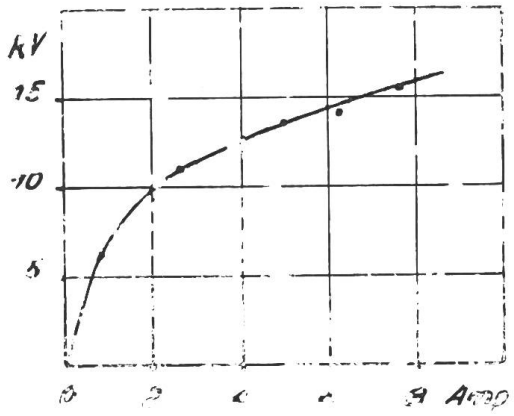

Fig. 11.
Courant de magnétisation, côté basse tension du transformateur 3000 kVA, 15/60 kV, 16,66 p : s.

L'étude des chiffres du tableau II conduit à la conclusion que, pendant un essai donné, les surtensions mesurées sur une même colonne du côté basse ou du côté haute tension ont les mêmes valeurs relatives. Cette constatation est de toute importance, car elle montre clairement que *les surtensions sont produites par les pulsations du flux commun aux deux enroulements.* Si le système effectue des oscillations, c'est avec l'inductivité produite par le flux commun qu'il faudra compter.

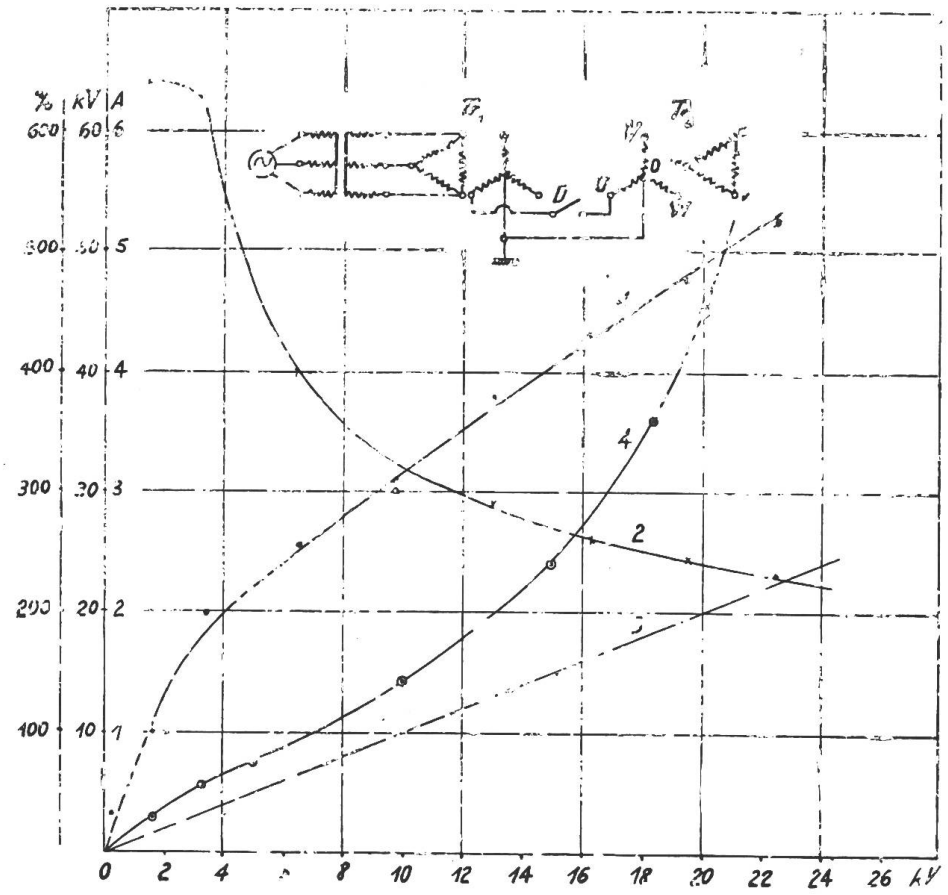

Fig. 12.
Surtensions de déclenchement à la phase *OU* d'un transformateur triphasé de 6000 kVA, 12/34,65 kV, Δ/Y, 50 p:s.

1 Surtensions en kV de la phase *OU* en fonction de la tension de régime.
2 Surtensions en % de la phase *OU* (100 % = tension de régime).
3 Tension de régime avant la coupure (en kV).
4 Courant de magnétisation.

Ce fait ressort également des essais *A* et *C* où une seule phase a été coupée, les deux autres restant sous tension. La figure 14 reproduit le cas de l'essai *C* : le déclenchement de la phase *OU* provoque la disparition du flux correspondant Φ_U et avec lui des deux flux $\Phi_1 = \frac{1}{2}\Phi_U$ dans les deux autres colonnes, ces dernières n'étant traversées dans l'état final que par le flux Φ_2. En négligeant la tension de régime à laquelle les surtensions se superposent, les colonnes *V* et *W* doivent produire une surtension sensiblement égale à la moitié de celle de la colonne *U*. La superposition de la tension de régime dissimule le vrai caractère du phénomène : on le constate en permutant l'ordre des phases *V* et *W* et en répétant le même essai. Le résultat obtenu est résumé dans le tableau III ci-après.

Essais faits sur le transformateur triphasé de 6000 kVA d'après la connexion C (fig. 3).

Tableau III.

	Surtensions mesurées à							
	OV		*OW*		*UV*		*UW*	
	kV	%	kV	%	kV	%	kV	%
Avant la permutation *V* et *W*	16	117	24,5	180	43	190	55	230
Après la permutation *V* et *W*	23	170	17,0	124	55	230	40	170

Tension de régime $OU = OV = OW = 13{,}7$ kV.

On voit qu'en changeant le sens de rotation des phases, on permute les surtensions des colonnes *V* et *W*. Le graphique de la figure 15 explique ce phénomène. *La disparition brusque du flux donne naissance à des surtensions de rupture représentées par les pointes qui se superposent aux tensions sinusoïdales.* Les oscillations libres des enroulements, qui peuvent être engendrées par ces pointes de tension n'ont pas été tracées, afin de laisser au dessin la forme la plus simple. Le diagramme supérieur représente les tensions des 3 phases et le courant de magnétisation de la colonne *U* avant le déclenchement de cette colonne. Un peu avant le passage normal du courant de magnétisation par zéro, le courant est coupé brusquement, ce qui provoque les surtensions dans les trois phases simultanément. On voit tout de suite que l'interversion de l'ordre des phases *V* et *W* doit modifier la grandeur des surtensions par rapport à la terre ou par rapport à la borne *U*, ce qui est confirmé par l'expérience précédente.

L'étude de l'influence du nombre de points de coupure sur la grandeur des surtensions à été faite avec le même transformateur triphasé que ci-dessus, en se servant de la connexion *B* de la figure 5. Le transformateur a été connecté et déconnecté du côté à basse tension au moyen de deux interrupteurs couplés mécaniquement. Chaque interrupteur possédait 8 points de coupure avec contacts à plots. Le nombre de points de coupure a été modifié de 2 à 16 en reliant entre eux les différents contacts, et en opérant avec un seul ou avec les deux interrupteurs simultanément. Les courbes de la figure 16 montrent les résultats des essais : les surtensions croissent tout d'abord rapidement, ensuite plus lentement avec le nombre d'arcs en série. Ce fait, facile à interpréter, donne l'explication de l'origine primaire des surtensions de déclenchement. L'extinction de l'arc étant facilitée par le refroidissement plus efficace de plusieurs contacts en série et surtout par un allongement rapide de l'arc total, la diminution du courant de magnétisation avant sa disparition est plus rapide, c'est-à-dire la dérivée $\frac{di}{dt}$ et par conséquent la tension $L \frac{di}{dt}$ est plus grande. *Le phénomène est tout à fait analogue à celui qui se produit quand on coupe un courant continu dans un circuit inductif, une fois avec un interrupteur à air, une autre fois avec un interrupteur à huile : dans ce second cas, les surtensions de déclenchement sont, à cause d'une rupture plus brusque, sensiblement plus fortes*[6]).

Remarquons que la rupture multiple telle qu'elle a été employée au cours des essais ci-dessus n'est utilisée que dans les réseaux à haute tension. Nous n'avons employé ce genre d'interruption que pour étudier l'influence des différents facteurs sur l'amplitude de la surtension. L'effet favorable de la rupture multiple sur l'extinction de l'arc résulte bien nettement des essais précédents.

Nous pouvons à présent expliquer les faits exposés au début, à savoir la différence entre les surtensions à 16,66 p:s et 50 p:s ainsi que les valeurs relativement plus fortes obtenues par les déclenchements du côté basse tension.

Les passages consécutifs par zéro d'un courant à 16,66 p:s, se produisent à des intervalles de 0,03 s, ceux d'un courant à 50 p:s à des intervalles trois fois inférieurs. A une vitesse de déclenchement donnée, si un arc brûlant dans un interrupteur à huile réussit à se rallumer après un premier passage du courant 16,66 p:s par zéro, il arrivera au bout de 0,03 s dans une zone beaucoup plus instable que cela n'aurait été le cas pour un courant à 50 p:s. La chute vers zéro sera par conséquent plus abrupte et les surtensions plus élevées. La même réflexion s'applique au cas où les déclenchements se font une fois du côté basse tension, une autre fois du côté haute tension : la longueur d'arc étant dans le premier cas généralement beaucoup plus courte que dans le second, toute demi-onde supplémentaire produit un allongement relatif plus considérable pour la basse que pour la haute tension. L'arc s'éteindra plus brusquement et la surtension sera plus forte lors d'un déclenchement à basse tension.

[6]) *Hammerschmidt:* Ausgleichvorgänge beim Abschalten von Induktivitäten. A. f. E., 1922, Bd. X, p. 431.

Toutes ces réflexions peuvent être vérifiées directement en faisant varier la vitesse de rupture de l'interrupteur et en répétant les essais. Nous avons étudié cette influence de la vitesse de rupture sur la grandeur des surtensions en nous servant d'un interrupteur spécial à deux points de coupure dont la vitesse d'ouverture pouvait être réglée à volonté dans les limites de 0,8 à 3,0 m:s. Nous indiquons ici la vitesse moyenne le long d'un chemin d'ouverture de 4 cm. La mesure a été faite avec un transformateur monophasé de 3000 kVA, 15/60 kV, 16,66 p:s, dont la phase v a été enclenchée et déclenchée du côté basse tension (fig. 4). Les surtensions constatées à 50 p:s et à 15 kV, tension de régime, sont les suivantes:

Influence de la vitesse de coupure sur les surtensions du transformateur monophasé de 3000 kVA, 15/60 kV, 16,66 p:s.

Tableau IV.

Vitesse d'ouverture m/s	Surtension à la borne v	
	en kV	en centièmes
1,35	45,6	305
2,6	51,0	340
3,1	57,5	385

Si l'on trace la courbe représentative de ces valeurs, il semblerait qu'avec une augmentation encore plus grande de la vitesse d'ouverture les surtensions croîtraient assez rapidement. *L'emploi des contacts d'extinction extra-rapides* (5 m:s) *peut donc être la cause d'une augmentation sensible des surtensions de déclenchement.*

La différence entre les surtensions de rupture à 16,66 p:s et 50 p:s aurait été encore plus prononcée, si le phénomène n'avait pas été dissimulé par l'effet contraire de la saturation qui, à une tension donnée, et pour le même transformateur, est plus faible pour la fréquence de 50 p:s. Le courant de magnétisation étant dans ce dernier cas plus petit, l'arc est plus instable et les deux effets se compensent en partie.

La forme de la courbe représentant les surtensions en fonction de la tension stationnaire peut être interprétée comme suit : pour les tensions faibles, le courant de magnétisation étant relativement petit, l'arc d'interruption est moins stable et se coupe brusquement. La coupure à tension basse provoque en outre, pour la raison exposée plus haut (chaque alternance prolonge l'arc d'une longueur relativement grande), des surtensions relatives plus élevées. Quand le courant atteint une certaine valeur, l'arc devient plus stable et les surtensions n'augmentent plus que tentement, linéairement avec la tension stationnaire; les surtensions se superposent visiblement à la tension qui existe au moment de la coupure. La divergence entre les deux droites s'expliquerait par le fait qu'avec la tension croissante la longueur de l'arc à l'extinction devient de plus en plus grande, le refroidissement de plus en plus intense, si bien que les conditions d'extinction de l'arc se trouvent remplies pour une valeur plus grande du courant. Il en résulte une rupture provoquant des surtensions de plus en plus fortes.

La figure 13 reproduit les surtensions mesurées sur un transformateur monophasé dans l'air de près de 100 kVA, 0,5/17 kV, 50 p:s; l'allure des courbes et l'ordre de grandeur des surtensions constatées sont sensiblement les mêmes que lors des mesures décrites précédemment. Ce transformateur étant improvisé pour l'essai, la capacité par rapport à la terre de son enroulement haute tension a été plus faible que celle des transformateurs à bain d'huile de construction usuelle.

L'étude de l'influence sur la surtension des condensateurs C_1 et C_2 (fig. 2), branchés aux bornes du transformateur d'alimentation d'une part, et aux bornes du transformateur déclenché, d'autre part, n'a pas été approfondie. En effet, ces condensateurs auraient dû remplacer l'effet des barres et des conducteurs qui restent

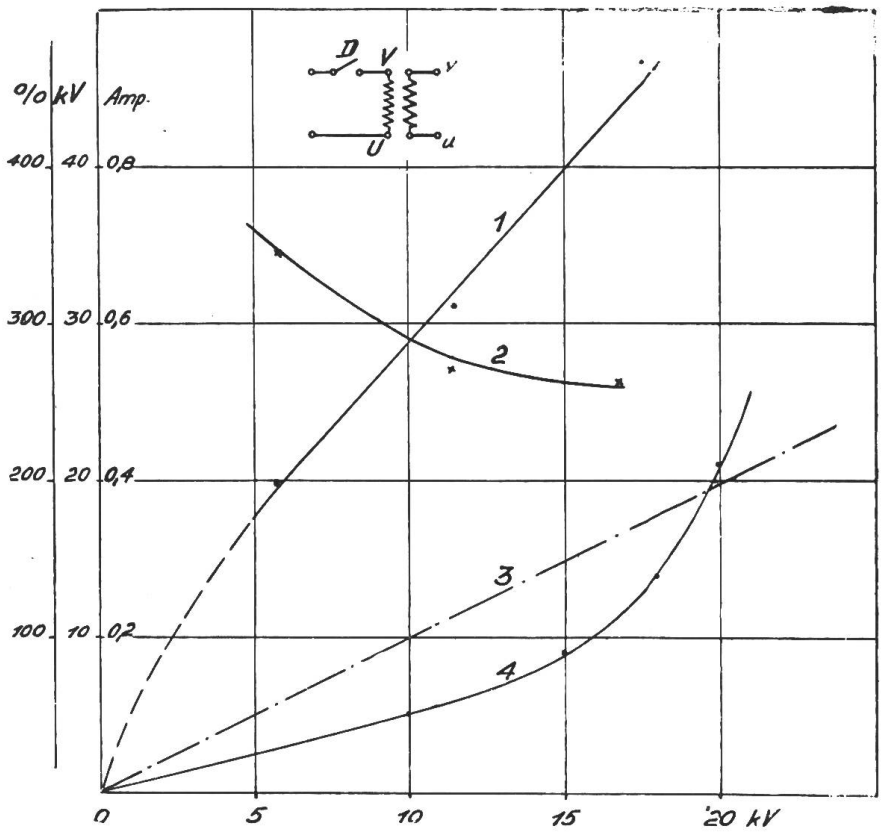

Fig. 13.
Surtensions de déclenchement d'un transformateur monophasé dans l'air, 100 kVA, 500/17 000 volts, 50 p:s, en fonction de la tension de régime.
1 Surtensions en kV entre *VU*.
2 Surtensions en % entre *VU*.
3 tension de régime avant la coupure.
4 Courant de magnétisation.

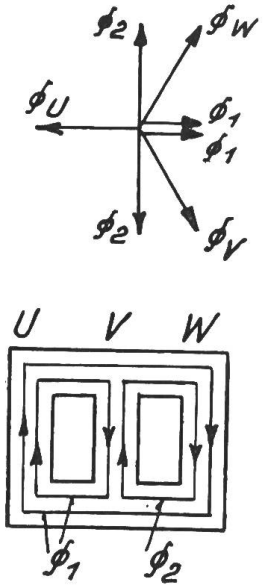

Fig. 14.

reliés aux transformateurs après le déclenchement. Or, la capacité par rapport à la terre de l'installation étant uniformément répartie, on ne peut pas tirer, des mesures faites avec des condensateurs, des conclusions définitives au sujet des surtensions de déclenchement des transformateurs dans une installation. Nous reproduisons cependant les surtensions mésurées lors de cette recherche, afin d'illustrer le côté physique du phénomène.

Les essais ont été faits avec un transformateur monophasé de 3000 kVA, 15/60 kV, 16,66 p:s, à la tension et à la fréquence nominales. Remarquons que ce transformateur avait une autre disposition des enroulements que celui dont les surtensions sont représentées sur les figures 7 à 10. La connexion employée est visible sur la figure 4, les bornes de l'enroulement haute tension du transformateur Tr_1 n'étant reliées qu'à l'éclateur à boules. La phase u a été mise à la terre et l'on déclenchait le transformateur Tr_1, avec l'interrupteur D_1 à 2 points de coupure. Les condensateurs C_1 et C_2, d'une capacité de 0,05 μF, ont été beaucoup plus grands que la capacité (0,001 μF) par rapport à la terre de l'enroulement à basse tension du transformateur Tr_1.

Comme on pouvait s'y attendre, le condensateur C_1 branché aux bornes du transformateur d'alimentation produit une réduction de la surtension u_1 v_1 qui est de sens opposé à celle se produisant à la borne v. La tension aux bornes de l'interrupteur étant de ce fait plus faible, l'extinction de l'arc est plus brusque et la surtension dans le transformateur Tr_1 est plus forte. En branchant encore la capacité C_2, on diminue les surtensions $u\,v$ et $U\,V$, cette capacité absorbant une partie de l'energie libérée par le transformateur déclenché. Les chiffres du tableau V montrent,

en outre, que les valeurs des surtensions du côté à basse et du côté à haute tension restent toujours liées par le rapport de transformation.

Surtensions de déclenchement du transformateur monophasé de 3000 kVA, 15/60 kV, 16,66 p:s. Mesures faites à 15 kV et 16,66 p:s.

Tableau V.

	Surtensions mesurées entre les bornes					
	$u_1\ v_1$		$u\ v$		$U\ V$	
	kV	%	kV	%	kV	%
Capacités branchées						
$C_1 = C_2 = 0$	39	260	55,5	370	227	380
$C_1 = 0{,}05\ \mu F,\ C_2 = 0$	19,5	130	69,0	460	270	450
$C_1 = C_2 = 0{,}05\ \mu F$	36	240	49,5	330	186	310

Remarquons encore que les surtensions mesurées sur Tr_1 en branchant seulement le condensateur C_1 avant l'interrupteur D_1 sont relativement élevées, mais il est facile à concevoir que ce cas ne se présente généralement pas dans la pratique, les bornes des transformateurs restant presque toujours connectées aux câbles ou à d'autres parties de l'installation. Il est indiqué pour cela de faire une réserve au sujet de l'amplitude maximum de la surtension qui peut se produire dans ces conditions. Ici également on ne pourrait se former un jugement qu'en faisant des essais dans les centrales. A en juger par la pratique américaine, le danger de ces surtensions n'est pas aussi grand qu'on pourrait le croire d'après les chiffres du tableau V.

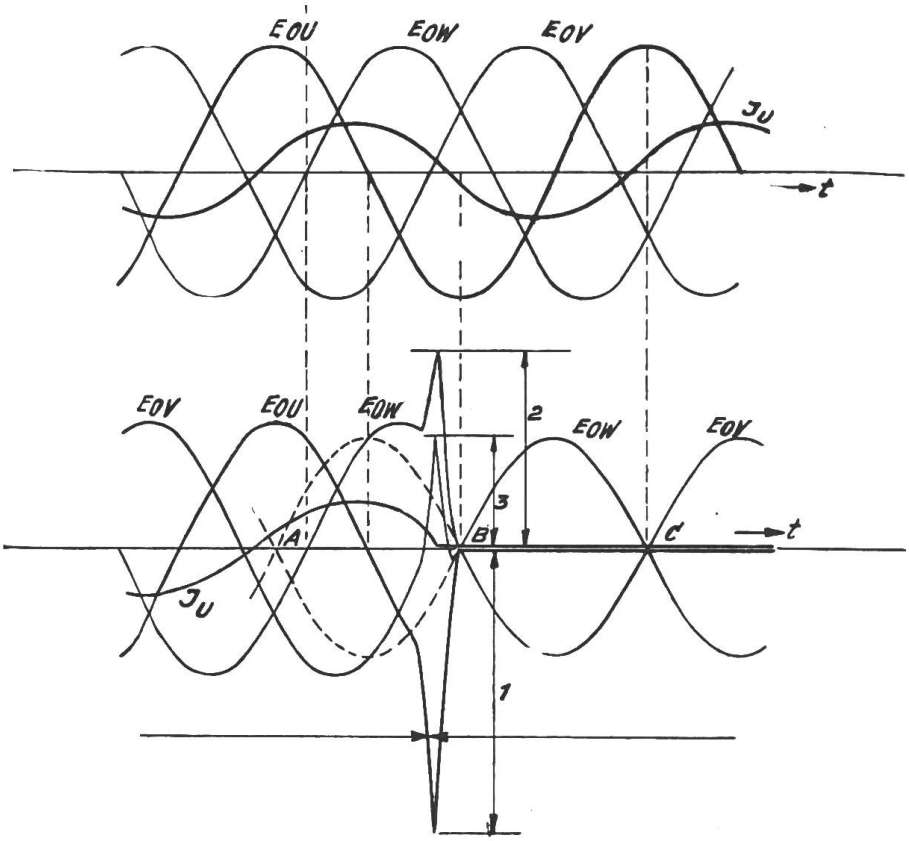

Fig. 15.
Diagramme représentant les surtensions d'un transformateur triphasé dues à une rupture brusque.
1 Surtension de la phase *OU*.
2 „ „ „ „ *OW*.
3 „ „ „ „ *OV*.

La mesure de la *distribution de la surtension* de déclenchement du côté à basse tension, faite d'après le schéma de la figure 6, a montré que l'enroulement à haute tension subit des contraintes entre spires à peu près égales de la borne jusqu'au point neutre : entre toutes les prises équidistantes on a pu constater des tensions pratiquement égales entre elles. La surtension constatée entre galettes est 2,5 fois

supérieure à la tension de régime d'une galette, la surtension mesurée à la borne ayant été 1,5 fois la tension de régime. Les tensions entre galettes étant relativement petites (de l'ordre de 2 kV), leur mesure est liée à des erreurs sensibles et nous croyons y voir la raison de cette divergence. De cet essai on peut conclure que les phénomènes qui se déroulent au moment de la coupure n'appartiennent pas aux oscillations de haute fréquence. On sait qu'à mesure que la fréquence des ondes envoyées dans un enroulement s'approche de sa fréquence critique, la distribution des tensions le long de l'enroulement suit une loi exponentielle décroissante pour présenter à la fréquence critique un maximum de contrainte entre les spires d'entrée[7]). Nous ne connaissons pas encore d'essais relatifs à la transformation des ondes de haute fréquence dans un transformateur, mais il résulterait de certains fait observés dans l'exploitation que cette transformation a réellement lieu[8]). Les constatations publiées à ce sujet nous semblent vraisemblables pour des fréquences non supérieures à la fréquence propre des enroulements.

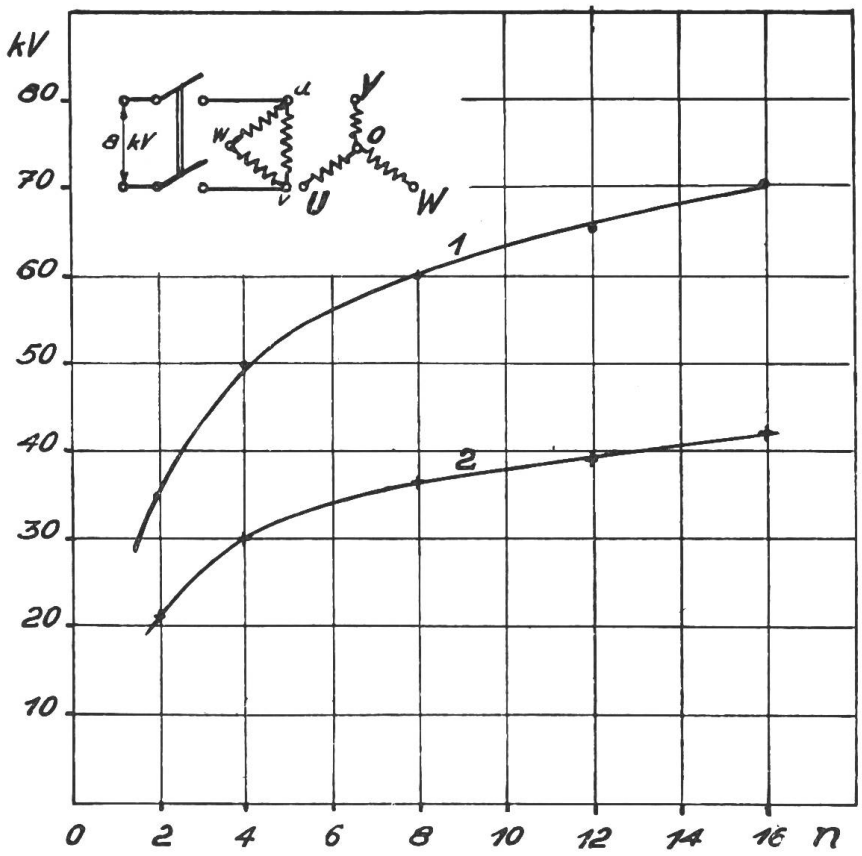

Fig. 16.
Surtensions du transformateur triphasé 6000 kVA, 12/34,65 kV, Δ/Y, 50 p:s en fonction du nombre total de points de coupure *n*.
1 Surtensions à la colonne *OV*.
2 " entre les bornes *uv*.
Mesures faites à 8 kV côté basse tension, 50 p:s.

4⁰ Étude oscillographique qualitative.

Comme nous l'avons dit tout au début de nos considérations (p. 515 et 516), les surtensions de déclenchement peuvent être engendrées par différents phénomènes. Pour approfondir l'étude qualitative du phénomène, nous avons recouru à quelques prises oscillographiques.

D'après ce qui précède, il semblerait que les surtensions les plus importantes sont dues aux ruptures brusques du courant. L'étude oscillographique de la coupure (125 prises) nous révèle cependant que des *rallumages d'arc* se produisent fréquemment et sont accompagnés de surtensions appréciables. Les oscillogrammes montrent toutefois que la disruption de l'éclateur se produit le plus souvent non pas à l'instant

[7]) *Fallou:* Contributions expérimentales à l'étude des surtensions dans les transformateurs. B. S. F. E., t. VI, No. 63, p. 1267.

[8]) *Finckh:* Spannungsstösse auf Freileitungen bei Blitzentladungen, ihre Hochtransformierung in Transformatoren. Elektrizitätswirtschaft, Juli 1926, No. 413, S. 314.

du rallumage, mais à la coupure définitive du courant. Afin d'être complets et pour mieux illustrer les différents phénomènes, nous avons choisi quelques oscillo-

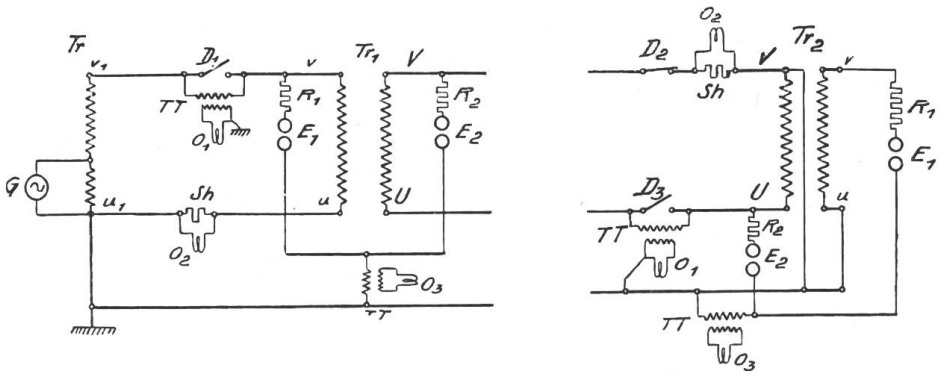

Fig. 17 a et b.

G = alternateur triphasé 1100 kVA, 16,66 et 50 p:s.
Tr = transformateur monophasé 1730 kVA, 1330/15 000 volts.
Tr_1, Tr_2 = fransformateur monophasé 3000 kVA, 15 000/60 000 volts.
D_1 = disjoncteur à 2 coupures, D_3 = à 4 coupures.
TT = transformateurs de tension.
Sh = shunt.
O_1, O_2, O_3 = équipages de l'oscillographe.
R_1, R_2 = résistances liquides 30 000 ohms.
E_1, E_2 = éclateurs à boules.

grammes typiques. Toutes les prises sont faites pendant les essais avec les deux transformateurs monophasés 3000 kVA, 15/60 kV, 16,66 p:s, l'alimentation étant faite par un alternateur relativement faible (1100 kVA en triphasé). La courbe des tensions contient pour cette raison, à saturation normale des transformateurs, une composante de l'harmonique 3. Cette déformation n'a d'ailleurs aucune influence sur le résultat qualitatif des essais.

L'oscillogramme 1 (fig. 18) a été pris en se servant de la connexion représentée sur la figure 17. En déclenchant le disjoncteur D_1 on ouvrait automatiquement l'obturateur de l'oscillographe. Celui-ci enregistrait la tension aux bornes de l'interrupteur, le courant de magnétisation et enfin le courant de disruption (sur l'oscillogramme n^0 1 pas visible) des éclateurs E_1 et E_2. Ce dernier a été fixé pour une tension de 64 kV (2,15 $\times$ tension de régime), tandis que l'éclateur E_1 avait une distance disruptive de 28 kV (1,85 $\times$ tension de régime). Cet oscillogramme, relevé à 15 kV et 16,66 p:s, présente le caractère typique de l'interruption d'un circuit inductif (le tracé de la tension est renversé de 180 ^{0}): l'allure du courant juste avant l'extinction de l'arc, extinction qui se fait un peu avant le passage normal du courant par zéro, est légèrement modifiée. La pointe de surtension qui se produit au même instant atteint la valeur de l'amplitude de la tension d'alimention. Si l'on tient compte du retard de l'équipage d'oscillographe employé, on doit conclure que la borne v du transformateur a atteint en ce moment une tension supérieure au double de la tension maximum d'alimentation.

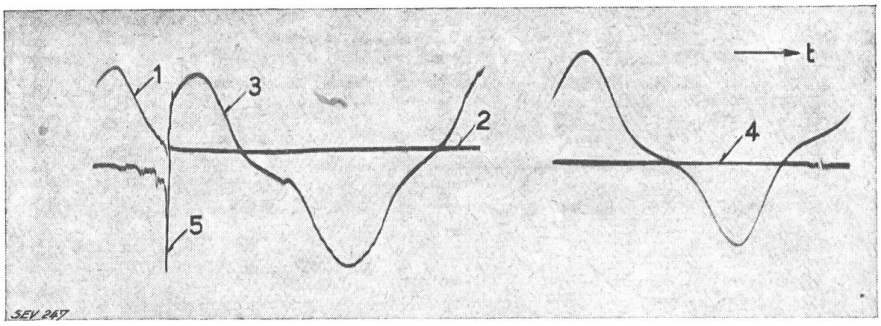

Fig. 18.
Oscillogramme de déclenchement du transformateur monophasé 3000 kVA, 16/60 kV.
Déclenchement du côté basse tension à 15 kV, 16,66 p:s, schéma de la fig. 17a
2 points de coupure.
1 et 2 Courant de magnétisation et sa ligne de repère.
3 et 4 Tension aux bornes de l'interrupteur et sa ligne de repère.
5 Pointe de la surtension: la borne v atteint 28 kV (187 %).

L'éclateur E_1 a d'ailleurs enregistré 28 kV, par contre sur E_2 la disruption n'a pas eu lieu. Remarquons encore que l'extinction de l'arc s'est produite au premier passage du courant par zéro.

Lors de la prise de l'oscillogramme 2 (fig. 19), on a fixé les éclateurs comme suit : $E_1 = 26$ kV ($= 1{,}73 \times E_{uv}$) et $E_2 = 44$ kV ($= 1{,}47 \times E_{ov}$). L'ouverture des contacts a eu lieu juste avant le passage du courant par zéro. Malgré la faible distance entre les contacts de l'interrupteur, l'arc s'éteint pour un instant, comme on le voit d'après la valeur zéro du courant et la pointe de la tension. Dès que la tension de rallumage a été atteinte, l'arc s'est rétabli pour brûler pendant toute une alternance. La forme du courant dans la seconde moitié de cette dernière est visiblement influencée par l'instabilité de l'arc, dont la résistance augmente rapidement. C'est à la rupture que l'éclateur E_2 a marqué une surtension. Parmi les nombreux oscillogrammes qui présentaient le caractère d'une coupure avec rallumage, c'est surtout à l'extinction définitive que les éclateurs marquaient une disruption.

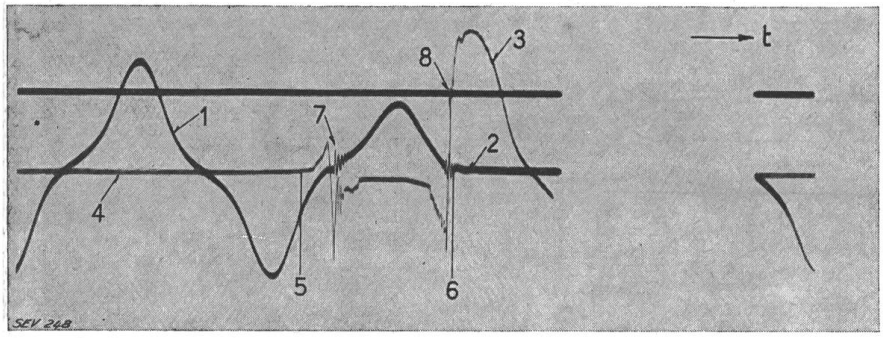

Fig. 19.
Oscillogramme de déclenchement du transformateur monophasé 3000 kVA, 15/60 kV. Déclenchement du côté basse tension à 15 kV, 16,66 p : s, schéma de la fig. 17a. 2 points de coupure.

1 et 2 Courant de magnétisation et sa ligne de repère.
3 et 4 Tension aux bornes de l'interrupteur et sa ligne de repère.
5 Début de l'ouverture de l'interrupteur.
6 Extinction de l'arc (définitive).
7 Rallumage de l'arc.
8 Disruption à l'éclateur E_2 à 44 kV (150 %).

L'oscillogramme 3 (fig. 20), qui a été relevé dans les mêmes conditions que le précédent, en diffère par le fait que le rallumage de l'arc est accompagné par des oscillations assez fortes, dont la fréquence atteint 1100 à 1200 p : s. Vu le caractère irrégulier de ces oscillations, on est porté à croire plutôt à une suite de fluctuations de l'arc qu'à une oscillation d'un circuit résonnant. Au cours de ces pulsations, l'éclateur E_2 marque une surtension de 44 kV. L'extinction de l'arc se fait sans pointe de tension.

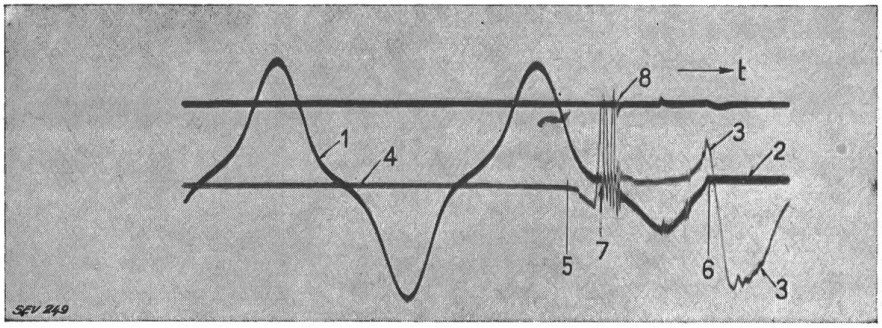

Fig. 20.
Oscillogramme de déclenchement du transformateur monophasé 3000 kVA, 15/60 kV. Déclenchement du côté basse tension à 15 kV, 16,66 p : s, schéma de la fig. 17a. 2 points de coupure.

1 et 2 Courant de magnétisation et sa ligne de repère.
3 et 4 Tension aux bornes de l'interrupteur et sa ligne de repère.
5 Début de l'ouverture de l'interrupteur.
6 Extinction de l'arc (définitive).
7 Rallumage de l'arc.
8 Disruption à l'éclateur E_2 à 44 kV (150 %).

La figure 17*b* reproduit la connexion dont on s'est servi lors de la prise de l'oscillogramme 4 (fig. 21). Le transformateur Tr_2 a été porté à 20 kV du côté haute tension et déclenché par le disjoncteur D_3 (4 coupures) de la phase U, la borne V étant reliée à la terre. Les éclateurs E_1 et E_2 ont été fixés, le premier à 10 kV ($= 2 \times E_{uv}$), le second à 30 kV ($= 1{,}5 \times E_{uv}$). Comme on le voit, malgré

l'ouverture des contacts presque au moment du passage du courant par zéro, l'arc brûle pendant la demi-onde suivante, au bout de laquelle il s'éteint en provoquant une rupture brusque, suivie d'une surtension. Ce phénomène ne nous est pas nouveau. Ce qui est particulièrement intéressant dans cet oscillogramme, ce sont les oscillations d'une fréquence de près de 12000 p : s, qui se superposent à l'onde du courant pendant la dernière alternance. Ces oscillations doivent sans doute être attribuées à l'effet de l'arc; leur amplitude réelle ne peut pas être déterminée à partir de cet oscillogramme, la fréquence propre de l'équipage ayant été trop faible. Cependant, ces oscillations ne semblent pas être dangereuses, puisque la surtension n'a été enregistrée qu'au moment de l'extinction de l'arc. Remarquons encore que l'harmonique qui est superposé au courant de magnétisation et qui subsiste après sa coupure, est dû au courant de charge des enroulements à haute tension des transformateurs Tr_1 et Tr_2.

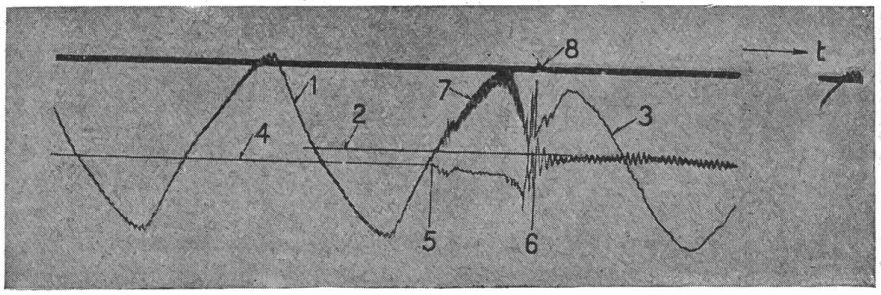

Fig. 21.
Oscillogramme de déclenchement du transformateur monophasé 3000 kVA, 15/60 kV. Déclenchement du côté à haute tension 20 kV, 16,66 p : s, schéma de la fig. 17b. 4 points de coupure.

1 et 2 courant de magnétisation et sa ligne de repère.
3 et 4 Tension aux bornes de l'interrupteur et sa ligne de repère.
5 Début de l'ouverture de l'interrupteur.
6 Extinction de l'arc (définitive).
7 Oscillations de haute fréquence.
8 Disruption de l'éclateur E_1 à 10 kV (200 %), de l'éclateur E_2 à 30 kV (150 %).

La prise de l'oscillogramme 5 (fig. 22) a été faite en déclenchant le transformateur du côté basse tension à 16,5 kV et 50 p : s, schéma de la figure 17*a*, l'équipage du courant étant alimenté par l'intermédiaire d'un transformateur d'intensité. La vitesse de déclenchement ayant été réduite, l'arc subsiste pendant $3\,^1/_2$ alternances. A chaque passage du courant par zéro, il se produit une extinction d'arc et, un instant après, un rallumage. A cause du transformateur d'intensité dont l'énergie magnétique se dissipe après chaque extinction dans le circuit de l'oscillographe, les segments des lignes de zéro du courant sont déplacés. Malgré les allumages et les oscillations à 1100 p : s, qui les accompagnent, les éclateurs E_1 et E_2, fixés respectivement à 26 kV = 1,57 $\times$ tension de régime et à 58 kV = 1,75 $\times$ E_{ov} ne marquent pas de surtension.

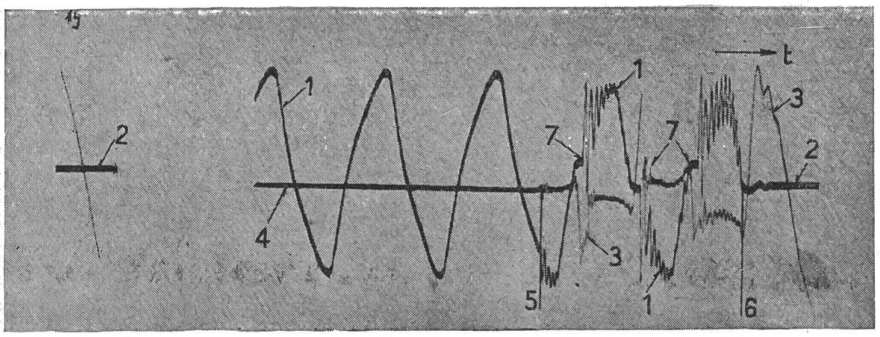

Fig. 22.
Oscillogramme de déclenchement du transformateur monophasé 3000 kVA, 15/60 kV. Déclenchement du côté basse tension à 16,5 kV, 50 p : s, schéma de la fig. 17 b. 2 points de coupure.

1 et 2 Courant de magnétisation et sa ligne de repère.
3 et 4 Tension aux bornes de l'interrupteur et sa ligne de repère.
5 Début de l'ouverture de l'interrupteur.
6 Extinction de l'arc (définitive).
7 Rallumage de l'arc.
Pas de disruption aux éclateurs E_1 à 25 kV (150%) et E_2 à 58 kV (175%).

Pour clore la série, nous reproduisons l'oscillogramme 6 (fig. 23) pris dans les conditions ci-dessous (fig. 17 *a*) : déclenchement du côté basse tension à 15 kV, 16,66 p : s, enregistrement des tensions aux bornes u_1 v_1 et uv des deux transfor-

mateurs et du courant de magnétisation avec shunt. Tout de suite après l'ouverture des contacts le courant passe par zéro, l'instabilité de l'arc engendre des oscillations à 1600 p : s, qui, toutefois, ne provoquent pas de surtension. Celle-ci ne se produit qu'à l'extinction définitive et la pointe de tension du transformateur Tr_1, qui atteint 42 kV, s'amortit rapidement en oscillations propres de l'enroulement avec 260 à 540 p : s. Au début de l'oscillation la fréquence est plus faible qu'à la fin, cette variation étant due à la diminution de l'inductivité avec l'affaiblissement de la tension (effet de la courbure de la courbe de magnétisation).

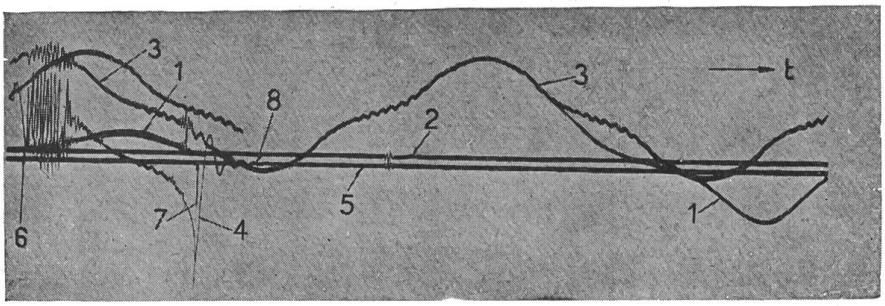

Fig. 23.
Oscillogramme de déclenchement du transformateur monophasé 3000 kVA, 15/60 kV. Déclenchement du côté basse tension à 15 kV, 16,66 p : s, schéma de la fig. 17a. 2 points de coupure.

1 et 2 Courant de magnétisation et sa ligne de repère.
3 Tension aux bornes du transformateur d'alimentation.
4 et 5 Tension aux bornes du transformateur 3000 kVA et sa ligne de repère.
6 Début de l'ouverture de l'interrupteur.
7 Extinction de l'arc (définitive).
8 Oscillations de l'enroulement du transformateur $f = 270$ à 540.

Des mesures à l'éclateur et de l'étude oscillographique de l'origine des surtensions de déclenchement on peut, en résumant, conclure que lors de nos essais les surtensions ont été provoquées, en premier lieu, par *les ruptures brusques* du courant de magnétisation un peu avant son passage normal par zéro. Ce genre de surtensions est en tout point semblable à celui qui se produit à la coupure du courant continu dans un circuit inductif. Les valeurs les plus hautes des tensions constatées se rapportent vraisemblablement à cette catégorie de surtensions. L'énergie magnétique emmaganisée dans le transformateur est dissipée dans les oscillations libres de l'enroulement.

Un second genre de surtensions est constitué par les *rallumages de l'arc* après une extinction momentanée. L'arc brûle en engendrant des oscillations de fréquence relativement élevée, dans lesquelles la surtension prend sa naissance. Cette seconde classe produit, comme le montrent les essais décrits, des surtensions moins élevées que la première.

Les valeurs maxima de surtensions entre phases, par suite de déclenchements, auxquelles ont peut s'attendre dans les conditions du service normal, peuvent être estimées à 3 à 3,5 fois la tension de régime, cette valeur étant fortement influencée par la construction de l'interrupteur, par celle du transformateur, par la saturation du fer et vraisemblablement par la capacité par rapport à la terre de la partie de l'installation qui reste connectée au transformateur. Pour un transformateur de construction moderne, tels que ceux employés pendant les essais à la plate-forme de la Société Brown, Boveri & Cie., des surtensions de cette amplitude ne présentent aucune danger. Pendant toutes nos recherches, qui ont exigé un très grand nombre de déclenchements, aucune détérioration ou percement n'a eu lieu. Dans une installation en bon état et conforme aux prescriptions actuellement en vigueur, des surtensions de l'amplitude indiquée ne peuvent généralement pas produire des contournements des isolateurs, surtout s'il s'agit des installations de tension moyenne (à peu près jusqu'à 60 kV). Pour les hautes et les très hautes tensions on a un coefficient de sécurité moins grand.

5⁰ Réduction des surtensions par l'emploi des interrupteurs à résistance de choc.

Pour éviter les contraintes aussi élevées, certains exploitants et constructeurs, surtout en Europe, emploient des interrupteurs munis de *résistances de choc.* Ces

résistances ont une valeur ohmique relativement grande et n'ont rien à faire avec les résistances à faible valeur ohmique, dont on se sert pour augmenter la puissance de rupture d'un interrupteur dans l'huile [9]).

L'emploi des *résistances de choc*, qui sont insérées dans le circuit un instant avant sa fermeture complète, a, comme on sait, un double but: l'amortissement de l'à-coup de courant d'enclenchement et la diminution de la contrainte de l'isolation produite, d'une part, par les ondes à front raide d'enclenchement et, d'autre part, par les surtensions de déclenchement. Le dimensionnement de la résistance de choc doit correspondre à ce double but.

A. Hay [10]) a mis en lumière déjà en 1898 l'origine et l'importance de l'à-coup de courant qui se produit au moment de l'enclenchement des transformateurs par suite de la saturation du circuit magnétique. Le remarquable travail de Rogowski [11]) donne une méthode approximative à employer pour le calcul de la valeur de la résistance de choc pour limiter l'à-coup d'enclenchement. Nous n'entrerons pas dans les détails de cette question, qui ne touche notre sujet qu'indirectement et dont le côté physique, théorique et pratique est épuisé par de nombreuses publications [12]). Pour illustrer l'action de la résistance de choc, nous tenons cependant à reproduire les courbes de la figure 24, résultat des mesures oscillographiques faites sur un auto-transformateur monophasé de 1730 kVA, 1330/15 000 volts, 16,66 p : s. Les intensités portées en ordonnées sont des valeurs maxima divisées par $\sqrt{2}$.

On voit que, sans résistance de choc, l'à-coup de courant atteint une valeur double du courant normal de charge, ou à peu près 17 fois la valeur du courant de magnétisation. Par l'insertion d'une résistance de choc de plus en plus grande, on réduit rapidement le premier à-coup. La courbe n° 2 représente l'à-coup de courant se produisant au moment où l'on court-circuite cette résistance, à-coup qui limite la valeur maximum de cette dernière. Remarquons encore que le calcul par la méthode de Rogowski, mentionnée plus haut, donne très exactement les valeurs constatées. Les courbes de cette figure, qui évidemment ne se rapportent qu'à la construction du transformateur étudié, montrent cependant qu'au point de vue de l'effort mécanique l'à-coup d'enclenchement ne présente aucun danger pour les enroulements qui doivent pouvoir supporter des forces électrodynamiques tout autrement considérables, produites par des courants de court-circuit. Quant au réseau, il supportera généralement des à-coups pareils sans aucun inconvénient pour le service, le phénomène constaté par K. Kuhlmann [13]) (déclenchement des transformateurs déjà en service par l'effet du courant d'enclenchement d'un nouveau transformateur) ne pouvant pas se produire avec les relais modernes.

Nous ne nous arrêterons que brièvement sur la question de la réduction des ondes d'enclenchement par une résistance de choc, question traitée par R. Rüden-

---

9) *B. Bauer:* Untersuchungen an Oelschaltern. Bulletin A. S. E., 1915, p. 141; 1917, pp. 226, 273.

10) *A. Hay:* The behaviour of a transformer at the instant of switching. The El. Review, 1898. p. 326.

11) *Rogowski:* Einschaltstromstoss und Vorkontaktwiderstand beim Transformator. A. f. E., 1912, p. 344.

12) *J. A. Flemming:* Experimental researches on alternate-current transformers. Journal Inst. El. Ing., 1892, p. 594.
W. Linke: Ueber Einschaltvorgänge bei el. Maschinen und Apparaten. A. f. E., 1912, p. 16 et 69.
M. Johann: De l'établissement du courant dans les transformateurs. Bull. Sté Intern. des Electriciens, 1905, p. 579.
T. Jensen: Abnormal primary current and secondary voltage on placing a transformer in circuit. El. World, 1907, p. 521.
T. D. Jensen: Einschaltströme von Transformatoren. E. T. Z., 1912, p. 1001.
B. Bauer: Ueber die Notwendigkeit von Schutzwiderständen an Hochspannungsölschaltern. El. Kraftbetrieb und Bahnen, 1914, p. 148.
M. Vidmar: Der Einschaltstrom des Transformators. E. u. M., 1918, p. 273.

13) *K. Kuhlmann:* Die Rückwirkung des Einschaltstromes von Transformatoren auf das Netz. A. f. E., 1913, Bd. 1, p. 527.

berg en 1912 [14]), étant donné que les transformateurs modernes sont construits de manière à pouvoir résister à des ondes à front raide d'amplitude bien plus élevée que celle des ondes d'enclenchement.

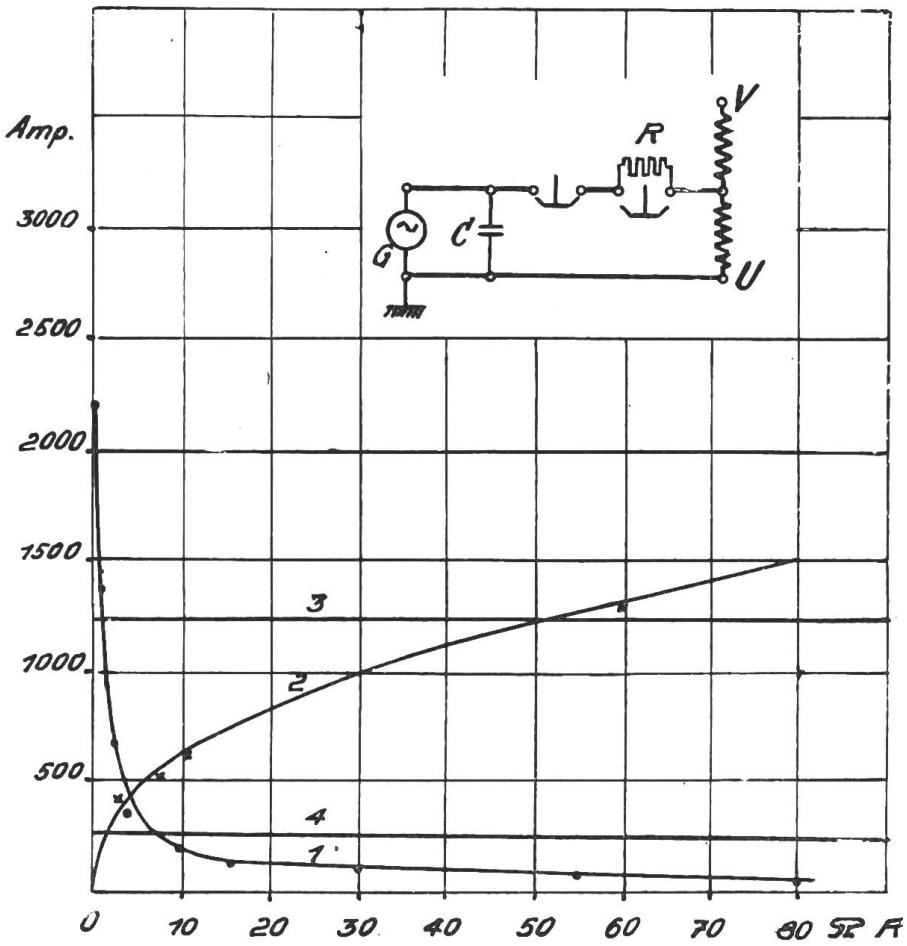

Fig. 24.
L'à-coup de courant à l'enclenchement d'un transformateur de 1730 kVA, 1330/15000 volts, 16,66 p:s en fonction de la résistance de choc.
1 Premier à-coup à l'insertion de la résistance.
2 Deuxième à-coup en court-circuitant la résistance.
3 Courant normal de charge.
4 Courant de magnétisation.

La valeur de la résistance de choc nécessaire pour la réduction des surtensions de déclenchement ne peut pas être déterminée en partant uniquement de considérations théoriques. Ici encore on est obligé de procéder par voie expérimentale. De nombreux essais ont été faits à la plate-forme de la Société anonyme Brown, Boveri & Cie., à Baden, pour étudier l'influence de la résistance de choc sur l'amplitude de la surtension. Suivant la construction des transformateurs, l'effet constaté peut varier sensiblement et la réduction de la surtension peut atteindre 20 à 40 pour 100. De la figure 25, qui donne les résultats de mesures sur un transformateur de 3000 kVA, on peut voir que l'efficacité des résistances de choc est plutôt insuffisante dans ce cas particulier. Le minimum de la surtension correspond à une résistance égale approximativement à deux fois la réactance à vide.

L'action favorable de l'insertion d'une résistance dans le circuit inductif au moment de la coupure peut être expliquée de la façon suivante:

Comme nous l'avons vu, les surtensions les plus élevées sont produites surtout par l'extinction brusque de l'arc. Pour un courant déphasé de près de 90 degrés en arrière, la tension de régime est maximum au moment de son passage par zéro. La surtension se superposant à cette tension peut facilement atteindre des valeurs considérables. Par l'insertion d'une résistance de choc d'une valeur ohmique deux ou trois fois supérieure à la valeur de la réactance à vide, on réduit l'angle de déphasage et le courant de magnétisation, et par là la valeur de la tension de régime au moment de la coupure du courant près de son passage normal par zéro. En outre, l'effet de l'augmentation de la résistance de l'arc avant

[14]) *R. Rüdenberg:* Der Einschaltvorgang bei elektrischen Leitungen. E. und M., 1912, p. 157. Elektrische Schaltvorgänge, Springer, Berlin, p. 375.

son extinction est moins prononcé, puisque la résistance totale du circuit est sensiblement augmentée par l'effet de la résistance de choc. La dérivée $\frac{di}{dt}$ aura une valeur moindre et la surtension sera plus faible. La résistance de choc empêche d'autre part les rallumages d'arc, qui sont surtout causés dans un circuit purement inductif par la tension élevée apparaissant aux bornes de l'interrupteur tout de suite après l'extinction de l'arc. La diminution de l'angle de phase a, sous ce rapport, une influence franchement favorable. Mentionnons encore l'augmentation du coefficient d'amortissement du circuit contenant la résistance de choc.

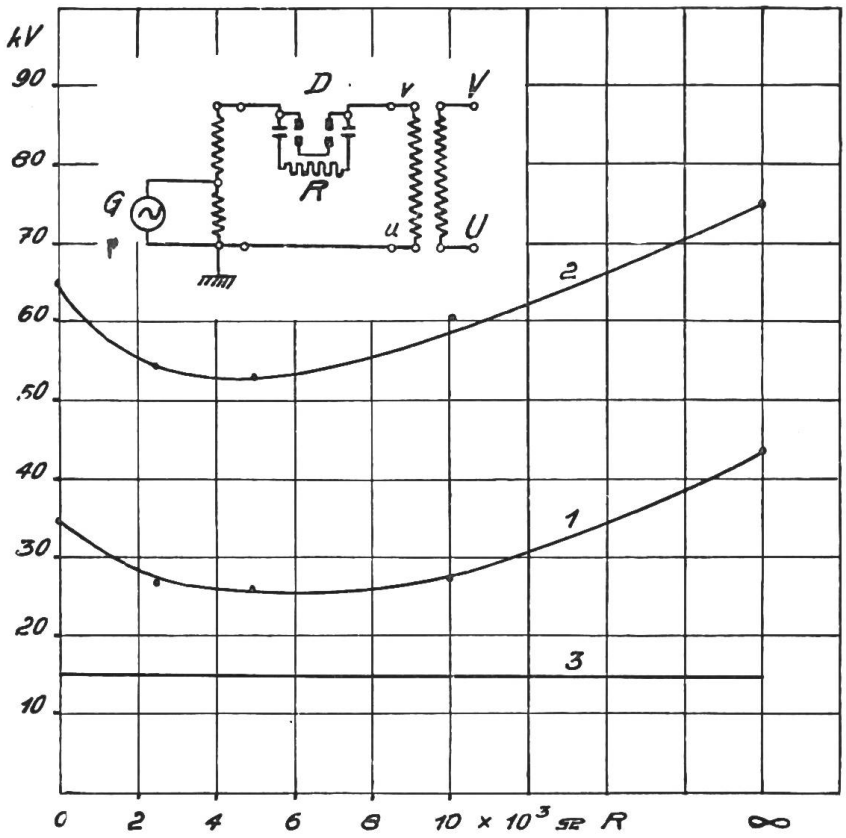

Fig. 25.
Surtensions de déclenchement d'un transformateur de 3000 kVA, 15/60 kV, 16,66 p:s, en fonction de la résistance de choc.
1 Surtensions à la borne *v*.
2 „ „ „ „ *V*.
3 Tension de régime, côté basse tension.

Si l'on calcule la valeur de la résistance de choc par la formule:

$$R = K \frac{E}{J\mu}$$

E étant la tension étoilée en volts, $J\mu$ le courant magnétisant du transformateur et K un coefficient, on obtient le minimum de surtension pour $K = 2$ à 10, la limite supérieure de la résistance R étant déterminée par la surtension se produisant au moment de son insertion dans le circuit. En cherchant à combiner l'effet de la résistance R sur la surtension avec celui qu'elle a sur là-coup d'enclenchement, on arrive à un coefficient $K = 0{,}9$ à 1. Cette valeur coïncide d'ailleurs à peu près avec celle indiquée par W. Petersen[15]) : ($K = 0{,}8$ à 2).

La résistance de choc représente certainement une complication dans la construction de l'interrupteur et on peut se demander si cette complication est compensée par une plus grande sûreté de service ou une protection plus efficace des appareils. Nous avons vu plus haut quelles sont les surtensions de déclenchement qui peuvent se produire et quelles sont les contraintes d'isolation du transformateur et de l'installation qui en résultent. Nous en avons conclu que ni les transformateurs, ni l'installation ne sont mis en danger, quand il s'agit de tensions moyennes. Les exploitants américains n'emploient pas de résistances de choc, leur appareillage et leur service n'en souffrent pas davantage. En Europe également, nous avons déjà nombre d'installations de puissances et de tensions différentes qui n'utilisent pas de résistances de choc et qui n'enregistrent pas d'avaries pour cela. Ce résultat de la pratique confirme les conclusions que nous croyons pouvoir tirer des mesures

[15]) Voir Archiv für Elektrotechnik, 1922, p. 454.

décrites plus haut. Remarquons toutefois que dans les cas des installations moins modernes, et surtout dans le cas des installations ayant un pôle à la terre (traction électrique) et ne possédant pas une isolation suffisante, la sûreté de service peut incontestablement être augmentée par l'emploi des interrupteurs à résistances de choc. Et d'ailleurs, la construction de ces derniers est aussi sûre que la construction d'autres appareils. Un grand nombre de ces interrupteurs de notre fabrication est en service depuis des années sans qu'on ait eu des accidents à enregistrer.

6⁰ Surtensions par déclenchement des lignes à vide.

Il nous reste à traiter le cas des surtensions aux bornes du transformateur produites par l'enclenchement et le déclenchement du réseau à vide.

Considérons le cas de déclenchement du dernier câble ou du dernier feeder à vide, ce cas étant le plus défavorable au point de vue de la contrainte de l'installation par les surtensions. Le courant de charge étant décalé en avant de 90 degrés, son extinction dans l'interrupteur se produit au moment où la tension de la phase correspondante est maximum (phase *u*, fig. 26 a), les deux autres phases

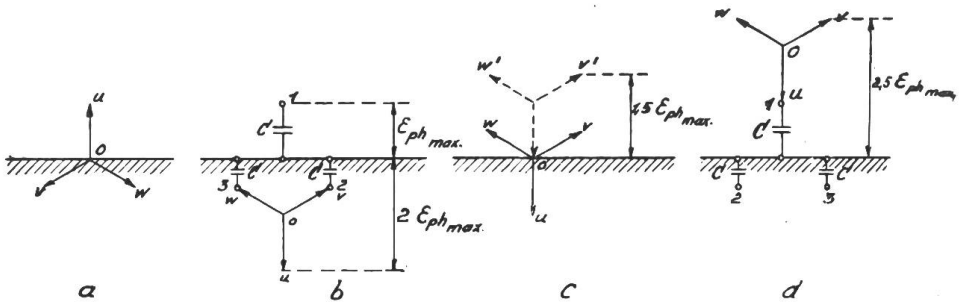

Fig. 26 a, b, c, d.

ayant des potentiels deux fois moindres et des signes contraires. Il peut arriver que les phases *v* et *w* après la coupure de la phase *u* restent reliées, directement ou par un arc, aux conducteurs 2 et 3 de la ligne plus longtemps qu'un quart d'onde. La phase *u* du transformateur continuant la pulsation à 50 p : s arrive au bout d'une rotation de 180 degrés dans la position opposée. La capacité du transformateur étant négligeable par rapport à celle des conducteurs de la ligne, ces derniers maintiennent le potentiel par rapport à la terre qu'ils avaient au moment de la coupure de la phase *u* (on néglige ici la diminution des charges statiques par la conductance de l'isolation). La figure 26 b reproduit le diagramme des tensions auquel on arrive. La différence de potentiel aux bornes de l'interrupteur *u* atteint en ce moment 3 E_{phmax}, valeur qui peut suffire pour allumer l'arc. La borne *u* et le conducteur 1 se trouvent reliés de nouveau et les charges statiques des trois conducteurs s'égalisent en passant par le transformateur. Une onde à front raide d'amplitude 3 $E_{phmax} = 1{,}75\ E$ (E = tension composée maximum) se propage dans l'installation. Les tensions finales sont représentées par le diagramme *c*. Le passage de *b* à *c* est généralement accompagné d'oscillations libres du circuit formé par la capacité du réseau, l'inductivité de fuites du circuit d'alimentation et la capacité de l'enroulement haute tension, de sorte que les phases *v* et *w* peuvent atteindre des potentiels 1,5 $E_{phmax} = 1{,}15\ E_{max}$, ce qui ne présente aucun danger pour l'installation.

Le *rallumage d'arc* à la phase *u* produira une surtension bien plus élevée si, un peu avant le rallumage, les deux autres phases sont séparées des conducteurs 2 ou 3 de la ligne. L'enroulement du transformateur a de cette façon avant le rallumage le potentiel $-1/2\ E_{phmax}$, et le passage au diagramme *d* s'effectuant par une oscillation, les bornes *v* et *w* peuvent atteindre 5 $E_{phmax} = 2{,}9\ E_{max}$ par rapport à la terre.

Des surtensions se produisent également à l'enclenchement, car la première étincelle jaillit généralement entre les contacts d'une seule phase. La borne correspondante du transformateur prend alors au premier instant le protentiel zéro., ce qui provoque des oscillations libres de l'enroulement. Par des raisonnement analogues aux précédents, on arrive à la grandeur de la surtension d'enclenchement qui est 2,5 $E_{phmax} = 1{,}44\ E_{max}$. L'enclenchement des lignes à vide ne présente donc pas non plus de danger pour l'installation.

Afin de vérifier la théorie ci-dessus et pour voir dans quelle mesure les surtensions de déclenchement des lignes à vide peuvent être réduits par l'emploi de résistances de choc, une série de mesures a été faite dans un réseau de 45 kV, avec des lignes aériennes longues de 41 km et de 94 km. Ici encore c'est avec l'éclateur à boules qu'on a pu faire les mesures quantitatives des surtensions, en opérant comme nous l'avons exposé au début de ce rapport (v. page 517). Les résultats des mesures faites à 30 kV sont visibles sur la figure 27. La courbe 1 représente les surtensions en fonction de la résistance de choc, constatées en déconnectant la ligne avec un interrupteur à 2 points de coupure par phase. La courbe 2 a été relevée

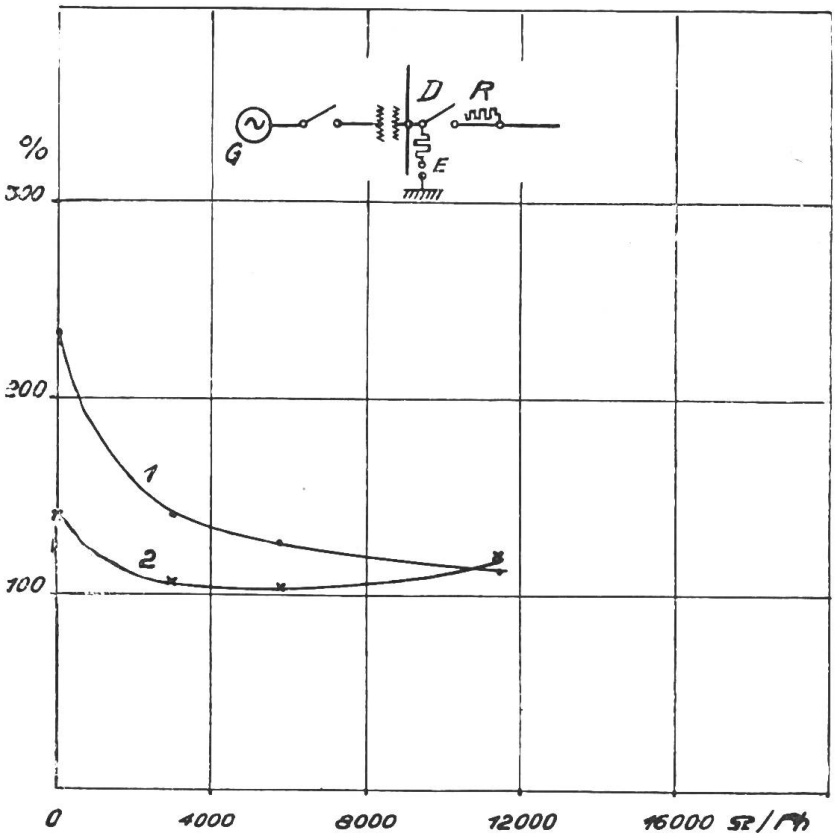

Fig. 27.
Surtensions de déclenchement des lignes à vide.
Ligne aérienne de 45 kV, 100 km.
1 Surtensions avec 2 points de coupures par phase.
2 " " 4 " " " " "

Surtension de déclenchement de lignes à vide, lignes aériennes de 41 et 94 km, 45 kV, 50 p : s.

Tableau VI.

Tension composée de régime kV	Surtension en % de la tension composée de régime			
	Ligne de 41 km		Ligne de 94 km	
	2 points de coupure par phase	4 points de coupure par phase	2 points de coupure par phase	4 points de coupure par phase
30	230	140*)	235	115
45	230	140*)	235	107
Amplitude théorique de la surtension de déclenchement.	Avec rallumage d'arc 290		290	
	Sans rallumage 115		115	

*) Lors de ces mesures un pôle de l'interrupteur n'ouvrait qu'avec un retard de 7 mm.

en déclenchant avec le même interrupteur, mais en insérant 4 points de coupures en série. Les valeurs obtenues étaient les mêmes pour les deux lignes. Nous opposons dans le tableau VI ci-dessous aux valeurs mesurées les surtensions maxima qu'on obtient en partant des considérations théoriques.

De ce tableau, de même que de la figure 27, on voit que les surtensions mesurées et les valeurs données par la théorie différent légèrement; ce fait peut être expliqué par l'écoulement des charges statiques des conducteurs de la ligne, d'une part, et par l'amortissement rapide des oscillations du système, d'autre part. L'influence nettement favorable de la coupure multiple, qui empêche les rallumages d'arc, doit être tout spécialement relevée. Les surtensions telles qu'elles étaient mesurées avec 4 points de coupure par phase ne sont pas excessives, ni pour une installation, ni pour un appareillage modernes.

Si la ligne déclenchée n'est pas la dernière, c'est-à-dire si les barres omnibus restent connectées encore avec d'autres lignes, dont la capacité par rapport à la terre est de même ordre de grandeur que celle de la ligne déclenchée, les surtensions du côté des barres seront moindres que celles obtenues par les considérations théoriques ci-dessus. Ceci découle tout d'abord du fait que la charge statique des conducteurs de la ligne, qui sont déconnectés en dernier lieu, se distribue sur toute l'installation, d'où résulte une diminution du potentiel statique. En outre, la fréquence propre du système étant plus basse, l'amortissement de la surtension sera plus fort.

Ces surtensions peuvent également être réduites au moyen des interrupteurs à *résistance de choc.* Ces dernières étant insérées dans le circuit avant son ouverture, réduisent le potentiel de la ligne et par là la charge statique de la ligne, la possibilité des rallumages d'arc et l'amplitude des oscillations du système. L'effet des résistances de choc se manifeste en outre par l'augmentation considérable du coefficient d'amortissement du système, de sorte que le maximum de la surtension est réduit sensiblement.

Nous ne toucherons que brièvement la question de dimensionnement de la résistance de choc. Sa valeur minimum peut être déterminée de manière que le circuit oscillant, formé par les inductivités de *fuites totales* du transformateur et des atternateurs d'alimentation L et de la capacité C par rapport à la terre de l'enroulement haute tension soit apériodique. Cette limite inférieure est donnée par la formule $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$. Les grandeurs L et C peuvent être déduites des mesures faites en alimentant l'enroulement haute tension avec une fréquence de quelques centaines de périodes par seconde, une fois branché sur la source, le secondaire étant relié aux alternateurs, une autre fois en enclenchant la source entre le sol et l'enroulement. Des valeurs des tensions et des courants obtenues de cette façon on déduit, par l'application des équations des lignes [16]), les coefficients L et C.

Pour la limite supérieure de la résistance de choc on peut indiquer la valeur $R = \frac{1}{\omega C}$ (ω = pulsation de régime), cette limite étant déterminée par la grandeur de la surtension produite par un rallumage d'arc entre les contacts de l'interrupteur, rallumage qui court-circuite la résistance de choc.

En terminant, remarquons encore que pour éviter les surtensions de déclenchement des lignes à vide on peut, au lieu d'opérer avec l'interrupteur de feeder, déclencher le transformateur du côté basse tension, l'enroulement haute tension étant relié aux conducteurs du feeder. Cette façon de procéder n'est évidemment possible que s'il s'agit de la dernière ligne.

---

[16]) *Fallou:* loc. cit. B. S. F. E., t. VI, p. 247.

7° Conclusions.

De l'étude ci-dessus des surtensions de déclenchement des transformateurs à vide, il ressort que:

1° Les surtensions de déclenchement sont produites en premier lieu par la rupture brusque du courant de magnétisation; elles sont engendrées par la variation du flux commun aux deux enroulements, et les valeurs mesurées du côté à basse et du côté à haute tension sont liées par le rapport de transformation. La répartition de la surtension le long de l'enroulement est uniforme.

2° Les surtensions provoquées par les rallumages d'arc se produisent plus rarement, et leur amplitude semble être inférieure à celle des surtensions du premier genre.

3° Les valeurs maxima des surtensions entre phases, auxquelles ou peut s'attendre dans les conditions du service normal, peuvent être estimées de 3 à 3,5 fois la tension de régime, cette valeur étant fortement influencée par la construction de l'interrupteur, par celle du transformateur, par la saturation de fer et vraisemblablement par la capacité par rapport à la terre de la partie de l'installation qui reste connectée au transformateur.

Entre l'une des bornes et la terre les surtensions de déclenchement peuvent atteindre deux fois la tension composée. Pour des transformateurs et installations modernes de tension moyennes, les surtensions de cette amplitude ne présentent pas de danger. Dans le cas des installations monophasées, ayant une phase à la terre, la tension de contournement des isolateurs de la phase isolée doit être suffisante pour supporter les contraintes indiquées plus haut. Cette mesure de précaution est d'ailleurs habituellement respectée.

4° L'enclenchement des transformateurs à vide engendre également des surtensions; celles-ci sont toutefois sensiblement plus faibles que les surtensions de déclenchement.

5° Par l'emploi des interrupteurs à résistances de choc ou peut dans une certaine mesure réduire les surtensions de déclenchement. Les mesures ci-dessus montrent que l'emploi de ces résistances, qui compliquent la construction de l'interrupteur, n'est généralement pas nécessaire, surtout s'il s'agit des installations modernes de tension moyenne.

6° Les surtensions aux bornes des transformateurs (par rapport à la terre) provoquées par le déclenchement des lignes à vide (dernière ligne à vide) peuvent théoriquement atteindre la valeur de 2,9 fois la tension composée. Ces surtensions sont dues à des rallumages d'arc dans le disjoncteur. Par une construction appropriée des interrupteurs on peut éviter les rallumages et par là ces contraintes élevées. Lors de nos mesures dans une installation de 45 kV avec des lignes de 41 et 94 km, les surtensions ont atteint $2{,}3 \times E$ avec un interrupteur à 2 points de coupures et $1{,}4 \times E$ avec un interrupteur à 4 points de coupures. Cette propriété de la coupure multiple doit tout spécialement être relevée. En employant des interrupteurs à résistance de choc, les surtensions ont été réduites à $1{,}2 \times E$ respectivement à $1 \times E$.

Appendice.

Le schéma de la fig. 2 conduit à un système de deux équations différentielles du premier ordre:

$$u = L\frac{di_L}{dt} + Ri_L + R_a i \tag{1}$$

$$\cdot = R_a i + \frac{1}{C_2}\int i_c\, dt\,. \tag{2}$$

En tenant compte de la condition:

$$i = i_L + i_c \tag{3}$$

et en cherchant l'équation reliant les courants transitoires ($u = 0$) on arrive à l'équation:

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_a C_2}\right)\frac{di_L}{dt} + \frac{R + R_a}{L C_2 R_a} i_L = 0 . \tag{4}$$

Si l'on suppose la résistance de l'arc R_a constante, sa solution est immédiate et l'on obtient selon la valeur du coefficient $a = \frac{R}{2L} + \frac{1}{2 R_a C_2}$:

$$a^2 \gtrless \frac{R + R_a}{L C_2 R_a}$$

un phénomène transitoire apériodique ou des oscillations amorties. De l'égalité $a^2 = \frac{R + R_a}{L C_2 R_a}$ on peut tirer la valeur critique de R_a, indiquée dans le texte.

Le problème devient bien plus compliqué si dans les équations (1) et (2) on introduit la tension de l'arc suivant l'une des formules connues ci-dessous:

$$e_a = b + \frac{a\,l}{i} = b + \frac{avt}{i} \qquad \text{(H. Ayrton)}$$

$$e_a = b + \frac{a\,l}{\sqrt{i}} = b + \frac{avt}{\sqrt{i}} \qquad \text{(C. P. Steinmetz)}$$

où l est la longueur d'arc, v la vitesse de l'interrupteur et b et a des constantes.

La formule d'Ayrton conduisant aux équations moins compliquées, nous poserons:

$$u = L\frac{di_L}{dt} + Ri_L + \left(b + \frac{avt}{i}\right) \tag{5}$$

$$= b + \frac{avt}{i} + \frac{1}{C_2}\int i_c\,dt . \tag{6}$$

Le courant transitoire est alors donné par l'équation différentielle de 2[d] ordre:

$$C_2 L^2 \frac{di_L}{dt}\,\frac{d^2 i_L}{dt^2} + C_2 L (Ri_L + b)\frac{d^2 i_L}{dt^2} + C_2 L R\left(\frac{di_L}{dt}\right)^2 +$$

$$+ [C_2 R (Ri_L + b) + Li_L]\frac{di_L}{dt} + (Ri_L + b)\, i_L = -\, avt \tag{7}$$

qu'il est impossible d'intégrer par les méthodes générales.

On peut chercher à simplifier l'équation (7) en admettant négligeables Ri_L et b, approximation généralement admissible, les équations 5 et 6 conduisent alors à l'expression:

$$\frac{di_L}{dt}\,\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{i_L}{C_2 L}\,\frac{di_L}{dt} + \frac{av}{C_2 L^2}\, t = 0$$

qui s'intègre immédiatement et fournit l'équation:

$$\left(\frac{di_L^2}{dt}\right) + \frac{i_L^2}{C_2 L} + \frac{av}{C_2 L^2}\, t^2 = K . \tag{8}$$

L'intégration de cette dernière ne peut être faite que par développements en série.