

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 36 (1945)
Heft: 14

Artikel: La transmission des ondes de choc par les transformateurs
Autor: Meyer, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056484>

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: 09.02.2026

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

La transmission des ondes de choc par les transformateurs

Par H. Meyer, Baden

621.3.015.33 : 621.314.21

Des essais systématiques ont été entrepris pour élucider le phénomène du passage des ondes de choc au travers des transformateurs. A l'aide des valeurs numériques recueillies et des oscillogrammes relevés, l'auteur décompose ce phénomène en ses composantes, l'explique et l'analyse qualitativement. Il démontre en outre que la théorie établie peut également servir de base à des calculs numériques, si l'on tient compte exactement pour chacune des composantes, de l'interdépendance des grandeurs déterminantes. En comparant les relevés oscillographiques avec les courbes de tension calculées uniquement d'après les données de construction — une comparaison qui à notre connaissance a été faite pour la première fois d'une manière complète — on constate une concordance remarquable.

Les transformateurs soumis aux ondes de choc ne se comportent pas d'une manière aussi simple que les transformateurs en régime stationnaire. C'est sans doute la raison pour laquelle nos connaissances en la matière sont souvent fort imprécises, malgré de nombreuses publications. Aussi avons-nous pensé qu'il pourrait être utile de traiter ce problème sous sa forme la plus générale, en le fondant toutefois sur des données expérimentales.

I. Données expérimentales¹⁾

Les valeurs d'expérience dont nous faisons état dans cette étude proviennent d'un transformateur de 100 kVA, dont le rapport de transformation 1 : 0,5 a été choisi voisin de l'unité, pour que les différentes composantes de la tension franchissant le transformateur puissent être décelées d'une manière aussi nette que possible. Ce transformateur était muni après chaque galette d'une prise de mesure et ses enroulements de phase pouvaient être branchés d'une manière quelconque; mais il ne différait, au surplus, en aucune façon des transformateurs normaux dans l'huile. Les tensions de choc ont été appliquées à l'enroulement haute tension, la durée du front était de 0,5 μ s et la durée de mi-amplitude de 200 μ s environ (ondes approximativement rectangulaires).

Le tableau I donne un aperçu de tous les couplages ayant fait l'objet des essais; dans certains cas, les phases exemptes de choc débloquent sur des résistances de 500 et de 2000 Ω , valeurs qui correspondent aux impédances d'onde des lignes aériennes et des génératrices. Les résultats d'essais les plus intéressants ont également été compris dans ce tableau; l'une des colonnes indique la valeur de la tension mesurée au secondaire du transformateur, exprimée en centièmes de la tension de choc appliquée au primaire, l'autre colonne nous donne de nouveau cette même tension, mais cette fois en centièmes de la tension qui apparaît au secondaire du transformateur, si la tension de choc était transmise selon le rapport des spires. Les chiffres

¹⁾ Un aperçu des paragraphes I et II a été communiqué le 13 juillet 1944 par l'auteur à l'assemblée de discussion de l'ASE sur les transformateurs. Voir Bull. ASE 1944, No. 22, p. 627...632.

Ausgehend von einer Reihe systematischer Versuche wird an Hand von Tabellen und Oszillogrammen der Aufbau des Uebertragungsvorganges aus seinen einzelnen Komponenten erläutert und qualitativ diskutiert. Weiterhin wird gezeigt, dass man mit der Theorie das Verhalten des Transformators auch quantitativ recht gut erfassen kann, wenn der jeder Komponente eigenen Verknüpfung der massgebenden Größen sorgfältig Rechnung getragen wird. So zeigt der unseres Wissens erstmals vollständig durchgeführte Vergleich der oszillographischen Messungen mit den allein auf Grund der Konstruktionsdaten berechneten Spannungsverläufen eine sehr schöne Übereinstimmung.

(Traduction)

Passage d'une tension de choc du primaire au secondaire d'un transformateur. Résultats d'essais

Les chiffres mis entre parenthèses indiquent les tensions maximales internes, toutes les autres valeurs numériques se rapportent à la tension aux bornes

Tableau I

Couplage primaire	Couplage secondaire	$\frac{U}{U_0}$	Tension secondaire maximum par rapport à la terre en % de la tension de choc primaire	en % de la valeur de choc primaire réduite au secondaire
		0,5	60	120
Idem		0,5	106	212
Idem		0,5	35	70
Idem	Idem R=500 Ω	0,5	33	66
Idem		0,29	34	117
Idem		0,29	(24,5) 5,5	(84,5) 16
		0,5	58,5	117
Idem		0,5	74	148
Idem		0,29	(26) 11,5	(90) 40
	Idem SEV12769a	0,29	(31) 11,5	(107) 40

mis entre parenthèses indiquent les tensions maximales internes, toutes les autres valeurs numériques se rapportent à la tension aux bornes.

II. Discussion générale

1. Aperçu des résultats et réflexions sur les composantes de la tension

En considérant les valeurs de la colonne extrême droite du tableau I, on constate ce qui suit. La tension apparaissant au secondaire du transformateur dépasse de très peu la valeur à laquelle on aurait pu s'attendre sur la base du rapport de transfor-

mation, abstraction faite toutefois des deux cas où les enroulements sont connectés en étoile/étoile inversée. Ici la tension secondaire prend des valeurs très élevées. L'examen des lignes 2 à 4 du tableau nous montre cependant que ces fortes surtensions sont considérablement réduites quand le secondaire du transformateur débite et qu'elles n'atteignent leur valeur maximale que pendant la marche à vide du transformateur.

On peut se demander pourquoi les connexions incriminées sont particulièrement défavorables et pourquoi la valeur de la charge exerce une aussi forte influence. Pour comprendre mieux le mécanisme de la transmission, considérons de plus près, à l'aide du tableau II, les diverses composantes de la tension qui franchit le transformateur.

Le potentiel initial capacitive dans l'enroulement secondaire qui est déterminée par la disposition du champ électrique. La tension de choc se transforme également selon le rapport des spires, du moins en marche à vide, car il est évident que pour l'entretien d'une tension de choc aux bornes du primaire, il faut une f. e. m. $L \frac{di}{dt}$ ayant son siège dans l'enroulement primaire, un flux couplé avec l'enroulement secondaire et une variation de ce flux. Le passage de la tension initiale capacitive a) à la tension de choc induite b) s'effectue sous la forme d'une oscillation propre d) de l'enroulement secondaire. L'amplitude de cette oscillation dépend de la différence des valeurs initiales des deux tensions a) et b). Le potentiel étant fixé aux deux extrémités

Tensions secondaires et leurs composantes lorsque le primaire est soumis à une tension de choc tripolaire

Couplages: étoile/étoile ou étoile/étoile inversée

Tableau II

Point neutre primaire mis à la terre		Point neutre primaire isolé		
Le circuit secondaire est ouvert	Le circuit secondaire débite	Cas général	Primaire et secondaire fortement couplés	Capacité secondaire réduite au primaire «capacité primaire»
a) Tension transmise par capacité	id.	a) Tension transmise par capacité	id.	id.
b) Onde incidente ré. → id., mais la tension croît lentement, selon la constante de temps donnée par le champ de fuite, le circuit d'utilisation et l'impédance d'onde des lignes de connexion		b)		
c)		c) Oscillation lente du système formé par deux circuits couplés	Oscillation du champ principal (inductance relative aux flux principaux avec la somme des capacités primaire et secondaire réduite au primaire)	Oscillation propre de l'enroulement primaire (inductance relative au flux principal avec la capacité primaire)
d) Oscillation propre de l'enroulement secondaire (champ de fuite et capacité secondaire)	id.	d) Oscillation rapide du système formé par deux circuits couplés	Oscillation du champ de fuite (inductance relative au flux de fuite avec les capacités primaire et secondaire, réduite au primaire, couplées en série)	Oscillation propre de l'enroulement secondaire (inductance relative au flux de fuite avec la capacité secondaire)
L'amplitude de l'oscillation d) est fonction de la différence des composantes a) et b). Au temps $t = 0$, la valeur de d) est égale à celle de a).		a) est égale à la valeur initiale de la résultante des valeurs secondaires de c) et de d).		
N. B. On tiendra compte, pour le calcul des inductivités et capacités selon c) et d), des facteurs de correction correspondant à une répartition non uniforme des courants et des tensions le long de l'enroulement.				

Nous partons du transformateur branché en étoile et dont *le neutre de l'enroulement primaire est mis à la terre*. Dans la partie gauche du tableau nous avons décomposé le phénomène de passage de la tension à travers le transformateur en ses différents éléments. Voici tout d'abord la composante capacitive. Sous l'influence du choc, il s'établit, comme on le sait, une répartition capacitive du potentiel le long de l'enroulement primaire, dite répartition initiale; à cette distribution de la tension correspond également une répartition du po-

tential initial capacitive dans l'enroulement secondaire qui est déterminée par la disposition du champ électrique. La tension de choc se transforme également selon le rapport des spires, du moins en marche à vide, car il est évident que pour l'entretien d'une tension de choc aux bornes du primaire, il faut une f. e. m. $L \frac{di}{dt}$ ayant son siège dans l'enroulement primaire, un flux couplé avec l'enroulement secondaire et une variation de ce flux. Le passage de la tension initiale capacitive a) à la tension de choc induite b) s'effectue sous la forme d'une oscillation propre d) de l'enroulement secondaire. L'amplitude de cette oscillation dépend de la différence des valeurs initiales des deux tensions a) et b). Le potentiel étant fixé aux deux extrémités

²⁾ On s'en rend compte facilement en traçant le schéma équivalent de Steinmetz pour le transformateur.

gine entre les tensions *a*) et *b*) s'amoindrit donc; il en est de même par conséquent de l'amplitude de l'oscillation transitoire. C'est la raison pour laquelle l'amplitude de la tension qui franchit le transformateur diminue considérablement quand le secondaire débite.

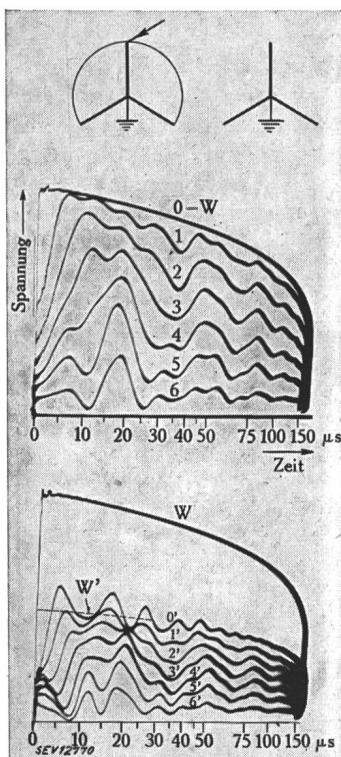


Fig. 1.
Oscillogrammes des tensions dans les enroulements d'un transformateur soumis à une tension de choc primaire
a 0,0' tension aux bornes 1, 2, 3, 4, 5, 6 tension de la fin de la première, 2me, 3me, 4me, 5me, 6me bobine de l'enroulement primaire, qui a reçu la tension de choc.
b 1', 2', 3', 4', 5', 6' tension de la fin de la première, 2me, 3me, 4me, 5me, 6me bobine de l'enroulement secondaire.
c W tension de choc primaire.
W' tension de choc primaire réduite au secondaire dans le rapport de transformation correspondant à la marche à vide du transformateur
a couplage
b tensions primaires
c tensions secondaires (le secondaire ne débite pas)

Les fig. 1 et 2 nous montrent comment ces phénomènes se déroulent dans les enroulements, et comment ils se présentent sous la forme de relevés oscillographiques. Examinons tout d'abord la fig. 1 qui se rapporte au couplage étoile/étoile; la variation des tensions aux extrémités des bobines du primaire en fonction du temps est représenté à la partie supérieure et les données correspondantes du secondaire à la partie inférieure de cet oscillogramme. Nous nous rendons facilement compte comment la répartition initiale capacitive au temps $t = 0$ se transforme en une répartition linéaire inductive à la fin du phénomène, par l'intermédiaire de l'oscillation propre. En partant de sa valeur initiale transmise capacitivement, la tension aux bornes du secondaire 0' exécute de même une oscillation de part et d'autre de l'onde de choc W' , rapportée au secondaire et représentée sur la figure par un trait interrompu. Les phénomènes analogues relatifs au couplage étoile/étoile inversée sont représentés à la figure 2. Nous voyons, en haut, la variation des tensions primaires et au milieu la variation des tensions de l'enroulement secondaire à vide. Les tensions initiales capacitatives du primaire et du secondaire sont en phase et dirigées vers le haut; en revanche la tension de choc W' rapportée au secondaire est dirigée vers le bas, puisque l'enroulement secondaire est inversé; la différence de tension étant considérable entre la répartition ini-

tiale et la répartition finale, il est naturel que l'amplitude de l'oscillation propre du secondaire soit particulièrement grande. C'est à ce couplage que se rapportent les elongations considérables de la tension 0' aux bornes du secondaire de part et d'autre de l'onde de tension W' rapportée au secondaire et qui figurent dans notre tableau I. L'allure du phénomène quand l'enroulement secondaire débite sur une résistance de 500Ω par phase est représentée à la partie inférieure de la fig. 2. La courbe W représente la tension de choc appliquée au primaire. La tension de choc induite dans l'enroulement secondaire n'est plus représentée dans ce cas par la courbe W' , mais par une tension qui augmente lentement suivant la constante de temps définie dans le tableau II. Il en résulte que la tension aux bornes du secondaire, comme aussi l'oscillation propre n'atteignent dans leur plus longue élongation que des amplitudes bien inférieures à celles de la marche à vide.

Considérons maintenant, à l'aide du tableau II, colonnes de droite, le couplage en étoile du primaire avec *point neutre isolé*. Il y a de nouveau passage capacitif d'une tension *a*). En revanche la tension de choc ne peut passer magnétiquement au secondaire, puisque le choc n'est pas appliqué aux deux

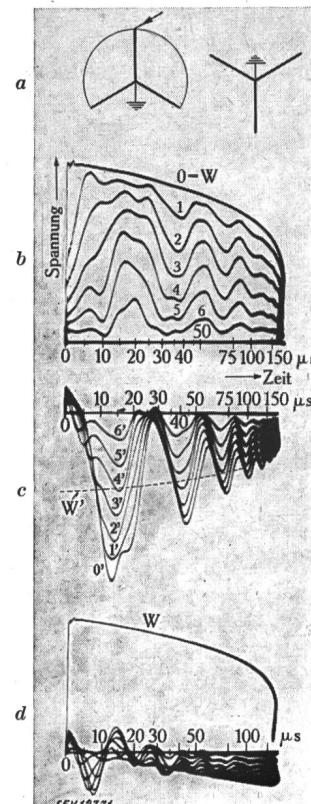


Fig. 2.
Oscillogrammes des tensions dans les enroulements d'un transformateur soumis à une tension de choc primaire
a couplage
b tensions primaires
c tensions secondaires (le secondaire ne débite pas)
d tensions secondaires (le secondaire débite sur une résistance de 500Ω par phase)

Légende: Voir fig. 1
a couplage
b tensions primaires
c tensions secondaires (le secondaire ne débite pas)
d tensions secondaires (le secondaire débite sur une résistance de 500Ω par phase)

extrémités de l'enroulement de phase primaire, le point neutre étant isolé. Le transformateur se présente comme un système couplé de deux circuits oscillants (formés chacun d'un enroulement et de capacités) qui sont le siège d'oscillations hétérogènes. Quand le flux magnétique de l'enroulement primaire est fortement lié à l'enroulement secon-

daire (cas du transformateur) on distingue en particulier une oscillation lente qui procède du flux principal et une oscillation rapide qui procède du flux de fuite. Le tableau nous donne la valeur des capacités déterminant ces oscillations. Si nous admettons en outre que la capacité du secondaire rapportée au primaire est petite devant la capacité du primaire — une condition fréquemment remplie, sinon toujours —, on peut identifier l'oscillation lente avec l'oscillation propre de l'enroulement primaire et l'oscillation rapide avec l'oscillation propre de l'enroulement secondaire. Ces cas particuliers ne doivent toutefois pas être généralisés et ne servent qu'à mieux déceler l'origine et le champ d'action de chacune des composantes du phénomène. Cette analyse, appliquée au cas du tableau II, colonne de droite, permet en particulier de voir clairement pourquoi le circuit magnétique principal détermine l'une des oscillations propres et le circuit magnétique de fuite l'autre, alors qu'en principe les deux enroulements devraient être équivalents. On peut calculer la valeur des amplitudes des oscillations propres d'une manière univoque en considérant que les tensions induites résultantes pour chacun des enroulements doivent être à l'origine égales aux tensions capacitatives initiales des enroulements primaires et secondaires.

Le relevé de la fig. 3 nous présente une fois encore le phénomène du choc. Les tensions de l'enroulement primaire sont tracées à la partie supé-

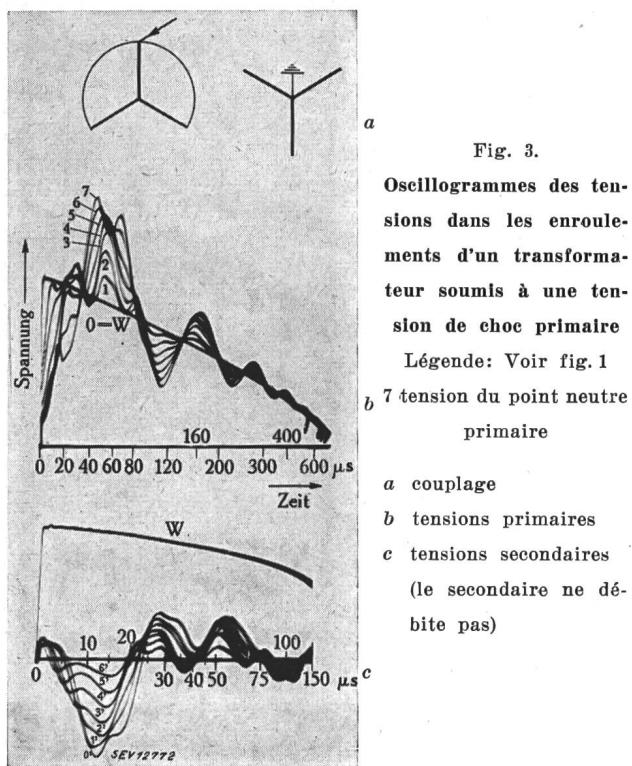
rieure de la figure et nous montrent l'ampleur du phénomène bien connu des oscillations du point neutre (courbe 7). Notons en particulier que le potentiel du point neutre peut être momentanément supérieur à celui de l'onde incidente. La variation

des tensions secondaires occupe la partie inférieure de l'oscillogramme, l'échelle des temps étant plus grande que celle des courbes précédentes. On peut se rendre compte qu'il n'y a — à proprement parler — plus d'onde de tension induite, mais que les tensions secondaires oscillent dans leur ensemble autour de la ligne zéro. Leur caractère compliqué s'explique par la superposition de l'oscillation lente qui débute par un quart d'onde négatif et de l'oscillation du champ de fuite quelque 4 fois plus rapide qui débute par un quart d'onde positif.

Nos considérations s'entendent pour des ondes tripolaires, mais on peut les compléter pour le cas d'une onde incidente monopolaire. L'allure du phénomène est la même pour les couplages étoile/étoile (avec mise à la terre du point neutre primaire) et étoile/étoile inversée (avec mise à la terre du point neutre primaire), qu'il s'agisse de chocs monopolaires ou tripolaires; il en est de même pour le couplage étoile/triangle, quand le point neutre primaire est mis à la terre, pour autant qu'on tienne compte du fait que la phase secondaire, sollicitée par le choc, débite sur les enroulements des deux autres phases. Les tensions engendrées au secondaire par une onde incidente monopolaire ne dépassent donc pas, pour tous les couplages considérés, les surtensions dues aux chocs tripolaires.

Il nous reste à examiner les cas où l'enroulement primaire à neutre isolé est sollicité par un choc monopolaire. On peut admettre à cet effet qu'un choc tripolaire résulte de la superposition de 3 chocs monopolaires appliqués à chacune des phases. Chacun de ces chocs engendre au secondaire dans le couplage étoile/étoile ou étoile/étoile inversée une oscillation fondamentale en phase dans chacun des conducteurs et dont l'amplitude atteint $\frac{1}{3}$ de l'amplitude provoquée par un choc tripolaire. A ceci s'ajoute une tension de choc induite (comme dans les couplages dont le point neutre du primaire est mis à la terre)³⁾ qui atteint les $\frac{2}{3}$ de la valeur de l'onde incidente rapportée au secondaire dans la phase soumise au choc et $\frac{1}{3}$ dans les deux autres phases. Ces tensions sont en opposition dans la phase soumise au choc et dans les deux autres phases. La somme vectorielle de ces deux composantes détermine par sa différence avec la valeur de la tension capacitive initiale l'axe des oscillations transitoires du champ de fuite. On sait que l'amplitude des oscillations lentes pour le cas du choc tripolaire atteint pratiquement la valeur de la tension de choc rapportée au secondaire; l'axe des oscillations du champ de fuite et leurs amplitudes sont par conséquent approximativement les mêmes dans le cas du choc unipolaire aussi bien que pour le choc tripolaire; en conséquence on peut admettre que la tension secondaire maximale aura pratiquement la même valeur pour les deux cas de sollicitation considérés.

Dans le transformateur couplé en étoile/triangle, soumis à des ondes de choc tripolaires, les tensions



rieure de la figure et nous montrent l'ampleur du phénomène bien connu des oscillations du point neutre (courbe 7). Notons en particulier que le potentiel du point neutre peut être momentanément supérieur à celui de l'onde incidente. La variation

³⁾ Il s'agit donc du cas le plus général où nous notons la présence de toutes les composantes, donc aussi la composante b) (tableau II à droite).

induites au secondaire se compensent aux bornes et l'enroulement en triangle prend dans son entier le potentiel fixé par l'effet capacitif, pour autant toutefois qu'aucun point du secondaire ne soit mis à la terre. Si l'onde de choc incidente est monopolaire, au contraire, seules les composantes de même phase de l'oscillation lente seront court-circuitées et n'apparaîtront pas au secondaire. Nous aurons donc aux bornes de la phase secondaire sollicitée par le choc une tension dont l'amplitude sera égale aux $\frac{2}{3}$ de l'onde incidente primaire rapportée au secondaire dans le rapport des spires des enroulements de phase. Quand le transformateur débite, nous assistons au phénomène déjà décrit plus haut pour le couplage étoile/étoile avec point neutre primaire à la terre: La tension de choc induite au secondaire croît lentement suivant la constante de temps du champ de fuite, du réseau d'utilisation et des conducteurs de raccord; en admettant par

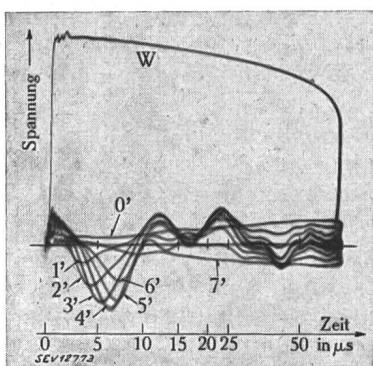


Fig. 4.

Oscillogramme des tensions secondaires transmises quand le primaire reçoit un choc unipolaire; couplage étoile/triangle. Résistance du réseau d'utilisation 500Ω entre phase et terre. 1', 2', 3', 4', 5', 6', 7' tension de la fin de la première, 2me, 3me, 4me, 5me, 6me, 7me bobine secondaire; 0' et 7' sont donc mesurées aux bornes de l'enroulement de la phase considérée.
W tension de choc primaire (pour référence)

exemple que le réseau d'utilisation soit couplé en étoile, avec neutre mis à la terre, les tensions secondaires dans la phase sollicitée par le choc seront symétriques par rapport à la terre et auront la même allure que pour les couplages étoile/étoile — le neutre primaire étant mis à la terre — et étoile/étoile inversée — avec le point neutre primaire à la terre — (voir fig. 2). Le relevé oscigraphique de la fig. 4 relatif au couplage du tableau I, dernière ligne, nous montre d'une manière très nette ces diverses particularités. L'allure des tensions internes est plus complexe que celle des tensions aux bornes, car le couplage en triangle n'empêche naturellement pas la formation des harmoniques d'ordre pair.

2. Comparaison sommaire des différents couplages

Il faut distinguer les composantes de la tension de choc induites électro-magnétiquement des composantes transmises au secondaire par effet de capacité. Les premières ont, en effet, une plus grande énergie intrinsèque que les autres et, contrairement à ces dernières, ne sont pas sensiblement réduites

par la capacité des réseaux dans lesquels le transformateur débite (ce sont les fréquences des oscillations qui sont seules affectées).

Les transformateurs avec couplage étoile/étoile inversée, dont le point neutre primaire est isolé ou mis à la terre, sont ceux qui réagissent le plus défavorablement aux phénomènes de choc et pour lesquels apparaissent les plus hautes tensions secondaires. Ces faits ont été mis en évidence tant par les considérations présentes que par l'analyse des résultats de mesure. Les conditions s'améliorent sensiblement avec le couplage étoile/étoile. D'autre part, il est préférable de ne pas mettre le réseau secondaire à la terre au transformateur même lorsque la charge est capacitif (câbles, par exemple), aussi bien pour le couplage étoile/étoile que pour le couplage étoile/étoile inversée; les tensions secondaires agissent, en effet, sur une chaîne de capacités formée par la capacité à la terre du transformateur et la capacité du réseau basse tension. Lorsque cette dernière prédomine, la sollicitation du réseau est diminuée aux dépens de celle du point neutre. On notera, en outre, que les plus fortes tensions secondaires résultent de la superposition de différentes oscillations, et de ce fait sont moins raides que les ondes de choc. Les machines et appareils sensibles aux tensions à front raide sont ainsi moins mis à l'épreuve.

Le couplage le plus favorable est le couplage étoile/triangle. Les transformateurs connectés de cette manière ne laissent pas passer les ondes de choc tripolaires. L'enroulement basse tension est alors porté à un potentiel capacitif, limité par l'ensemble des capacités secondaires (câbles, installations) et par la charge. Le cas du choc monopolaire est moins favorable, car l'onde incidente franchit alors le transformateur et apparaît au secondaire [composante b); tableau II]. Cependant, comme l'oscillation du champ principal fait défaut, la tension secondaire résultante reste inférieure à celle qui prendrait naissance dans les mêmes conditions pour les couplages étoile/étoile ou étoile/étoile inversée.

Ajoutons encore que les transformateurs étoile/zig-zag se comportent d'une manière analogue à ceux dont le couplage est étoile/triangle, donc favorablement. A vrai dire, ils sont peu utilisés, sauf comme transformateurs d'alimentation des réseaux à basse tension.

III. Détermination des tensions transmises au secondaire (ondes fondamentales) lors de chocs tripolaires

1. Détermination des grandeurs fondamentales

La capacité C_2 entre le secondaire et la terre (noyau de fer) est de 750 pF par phase, soit 107 pF par bobine.

La capacité entre le primaire et le secondaire peut être considérée comme celle de deux cylindres concentriques. Sa valeur C_{12} est de 630 pF par phase ou 90 pF par bobine. La capacité C_{11} du primaire

contre terre (cuve et culasses) est beaucoup plus petite par suite des distances sensiblement plus grandes qui entrent en jeu. Elle s'élève à environ 80 pF par phase.

La détermination des capacités-série efficaces des deux enroulements est plus délicate. Le calcul donne les valeurs suivantes:

Primaire: 205 pF par bobine, soit $C_{s1} = 29,3$ pF par phase.

Secondaire: 166 pF par bobine, soit $C_{s2} = 23,7$ pF par phase.

L'inductivité de fuite totale ramenée au secondaire, calculée de la manière habituelle, est de:

$$\lambda = 46,5 \text{ mH par phase.}$$

Nous devons tenir compte, pour la détermination de l'inductivité totale (champ principal) réduite au primaire, du fait que le flux se referme dans l'air puisque les phénomènes sont en phase dans les trois colonnes. Nous calculerons cette inductivité comme celle d'un solénoïde à noyau de fer. Pour tenir compte de l'influence des culasses, nous admettrons que la longueur du noyau dépasse celle de l'enroulement d'une valeur égale à deux fois le diamètre du noyau.

Nous obtenons ainsi:

$$L_1 = 2,56 \text{ H} \quad \text{d'après Kückler}^4)$$

Le calcul montre que cette inductivité est pratiquement la même que celle du secondaire ramenée au primaire, grâce à l'effet du noyau de fer. Nous pouvons donc écrire $L_1 \approx L'_2$.

Nous avons ainsi toutes les valeurs fondamentales nous permettant de calculer les phénomènes qui nous intéressent dans le transformateur. Remarquons d'emblée, que nous ne pourrons pas utiliser ces valeurs telles quelles, mais qu'il faudra les corriger pour tenir compte de la répartition des tensions qui s'établit réellement quand l'enroulement est le siège d'oscillations⁵⁾.

2. Tensions secondaires dans le cas où les points neutres primaire et secondaire sont mis à la terre

La valeur initiale de la composante *a*) de la tension secondaire transmise par capacité peut être calculée immédiatement à partir de la répartition

⁴⁾ Kückler, Jahrbuch der AEG-Forschung, t. 6 (1939), p. 118.

⁵⁾ Quand un enroulement est le siège d'oscillations, aux nœuds et ventres de tension correspondent des ventres et des nœuds de courant; l'efficacité et l'influence des inductivités et des capacités réparties dépend donc de leur localisation. Les fréquences d'oscillation qui se présentent alors ont été calculées sous certaines hypothèses quant au flux par Fröhlauf dans le rapport No. 28 du Congrès International d'Electricité 1932. Ses résultats fournissent des données utilisables pour la détermination de la fréquence de l'oscillation fondamentale. On peut en tirer la valeur des éléments du schéma équivalent relatif à un circuit résonant en tenant compte du fait que les impédances d'onde de l'enroulement et du circuit équivalent doivent être égales, pour que l'amortissement du circuit équivalent soit le même que celui de l'enroulement oscillant.

initiale de la tension⁶⁾). Elle se monte à 26 % de la tension de choc primaire pour le couplage étoile/étoile et à 5 % pour le couplage étoile/étoile inversée.

La tension de choc rapportée au secondaire *b*) est proportionnelle à la tension de choc primaire dans le rapport $K.\ddot{u}$, où $\ddot{u} = 0,5$ et K représente le facteur de couplage donné par:

$$K = \frac{L_{12}}{L_1} = \frac{\frac{1}{2} \frac{\lambda}{\ddot{u}^2}}{L_1} = 0,96 \quad (1)$$

La valeur de la tension de choc réduite au secondaire s'élève donc à 0,48 (soit $0,96 \times 0,5$) de la tension de choc primaire.

Le secondaire a une fréquence propre d'oscillation *d*) donnée d'une part par:

$$\lambda' = 0,516 \lambda = 24 \text{ mH}^7) \text{ et} \quad (2)$$

d'autre part par:

$$C' = \frac{2}{\pi} (C_2 + C_{12}) + \frac{\pi}{2} C_{s2} = 915 \text{ pF}^8) \quad (3)$$

On en déduit la période *T*

$$T = 2\pi \sqrt{\lambda' C'} = 29,5 \mu\text{s} \quad (4)$$

avec laquelle la tension secondaire oscille pour passer de sa valeur initiale, due à l'effet de capacité *a*), à la valeur de l'onde incidente rapportée au secondaire *b*). On doit encore tenir compte de l'amortissement pendant ce laps de temps. Il est déterminé par les résistances des enroulements primaire et secondaire, car au courant secondaire correspond évidemment un courant primaire; les pertes dans le fer sont négligeables. En calculant ces résistances il faut tenir compte des pertes additionnelles dans le cuivre dues à l'effet pelliculaire étant donné la fréquence élevée de 33 900 pér./s. Les résistances, calculées d'après Richter, Elektr. Maschinen, t. 1, chap. II, L2 et 5 sont les suivantes⁹⁾.

Résistance du primaire réduite au secondaire:

$$r'_p = 805 \Omega$$

Résistance du secondaire: $r_s = 395 \Omega$

d'où l'on déduit la constante de temps de l'amortissement:

⁶⁾ Voir entre autres l'article paru dans la rev. Brown Boveri 1943, No. 9/10, p. 275.

⁷⁾ Les facteurs $\frac{16}{\pi^3} = 0,516$, $\frac{2}{\pi}$ et $\frac{\pi}{2}$ en liaison avec les grandeurs données, permettent de tenir compte de la répartition de la tension qui s'établit lors de phénomènes oscillatoires [voir note⁵⁾].

⁸⁾ C'est la somme de la capacité entre les deux enroulements et de la capacité de l'enroulement secondaire à la terre qui intervient, puisque le potentiel de l'enroulement haute tension est fixe par rapport à l'oscillation de l'enroulement secondaire.

⁹⁾ On prendra garde au domaine de validité des formules indiquées.

$$T_D = \frac{2\lambda'}{r_p + r_s} = \frac{48 \cdot 10^{-3}}{1200} \text{ s} = 40 \mu\text{s} \quad (5)$$

et le rapport des amplitudes de deux demi-ondes successives

$$v = \varepsilon = \frac{-14,75}{40} = 0,69. \quad (6)$$

Nous avons ainsi calculé toutes les grandeurs nécessaires pour établir le diagramme des variations de la tension secondaire. Nous pouvons voir, sur les figures 5, la variation des tensions secondaires calculées et les courbes expérimentales correspondantes relevées à l'oscilloscophe. Ces courbes ont été établies pour les couplages étoile/étoile et étoile/étoile inversée. La fig. 5b nous montre, pour le cas étoile/étoile inversée, que les valeurs calculées et mesurées conduisent sensiblement à la même courbe; ce n'est pas le cas pour le couplage étoile/étoile. Cet écart est dû au fait que

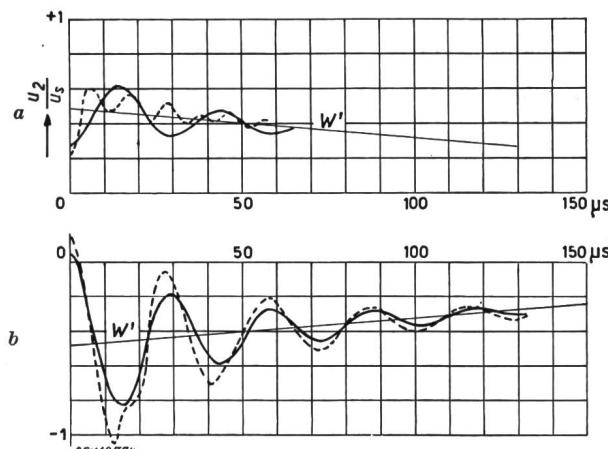


Fig. 5.

Comparaison des surtensions secondaires u_2 calculées et mesurées lors d'un choc primaire triphasé.

Points neutres primaire et secondaire mis à la terre

- a couplage étoile/étoile
- b couplage étoile/étoile inversée
- Trait continu: courbe calculée
- pointillé: courbe mesurée
- W' axe des oscillations

nous avons négligé les harmoniques, n'ayant fait intervenir que l'onde fondamentale. Dans ce cas, en effet, un harmonic d'ordre 3 important prend naissance puisque les ventres des courants primaires et secondaires sont décalés les uns par rapport aux autres le long de la colonne¹⁰⁾. L'illustration de cette remarque est visible sur la fig. 1, courbe 2'; l'onde fondamentale apparaît nettement à proximité d'un noeud de tension de l'harmonic 3.

3. Tensions secondaires dans le cas où le point neutre primaire est isolé, le secondaire mis à la terre: couplage étoile/étoile et étoile/étoile inversée

La répartition des tensions initiales n'est pratiquement pas influencé par la mise à la terre du primaire; nous pouvons donc prendre les valeurs

¹⁰⁾ Remarquons que les fréquences des harmoniques ne sont pas en rapport harmonique entre elles, à cause du couplage. Voir aussi la note¹⁴⁾ à la page 425.

du paragraphe précédent pour la tension initiale transmise par capacité. Nous supposons, en outre, que le potentiel initial de point neutre du primaire se monte à 6 % de la tension aux bornes.

Les autres composantes, dont nous devons tenir compte en régime transitoire, sont les oscillations du champ principal et du champ de dispersion, données dans le tableau II. Les conditions spéciales, dans lesquelles la colonne extrême droite de ce tableau a été établie, ne sont pas remplies ici et c'est l'avant-dernière colonne que nous devons donc considérer.

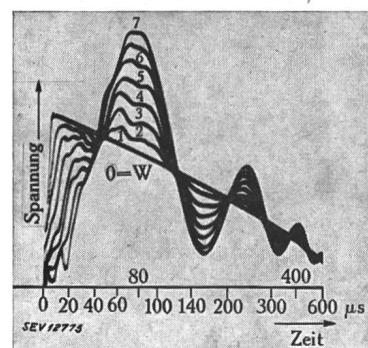


Fig. 6.
Oscillogramme des tensions primaires lors d'un choc triphasé. Couplage étoile/étoile
Légende: Voir fig. 3

Avant d'aborder le calcul des *fréquences propres* remarquons tout d'abord que les deux enroulements sont le siège d'oscillations. La capacité de l'enroulement haute tension étant localisée principalement entre celui-ci et l'enroulement basse tension, il s'ensuit que cette capacité est soumise à des tensions variables et que son rôle est différent suivant le couplage du secondaire du transformateur. Les fréquences ne seront donc pas les mêmes pour un transformateur étoile/étoile ou pour un transformateur étoile/étoile inversée. Ce fait est mis en évidence par la comparaison des fig. 6 et 3.

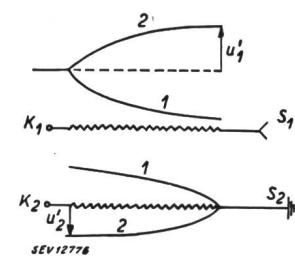


Fig. 7.
Répartition de la tension correspondant à l'oscillation du champ principal.
Couplage étoile/étoile
 K_1, S_1 Borne et point neutre primaires
 K_2, S_2 Borne et point neutre secondaires
SEV 12776

Nous avons représenté, sur la fig. 7, la répartition des tensions dues aux *oscillations du champ principal* (couplage étoile/étoile). Le potentiel de l'enroulement secondaire placé en regard du ventre de tension de l'enroulement primaire étant pratiquement au potentiel de la terre, il n'est pas nécessaire d'apporter une correction à la valeur de la capacité mutuelle. Nous admettons donc les inductivités et capacités efficaces suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} L' = 0,516 \text{ H} \\ L_1 = 1,32 \text{ H}^{11)} \\ C' = \frac{2}{\pi} (C_{11} + C_{12} + C_2 \cdot \ddot{u}^2) + \frac{\pi}{2} C_{s1} = 616 \text{ pF} \end{array} \right. \quad (7)$$

¹¹⁾ Voir note⁷⁾.

d'où nous tirons la période d'oscillation

$$T_H = 2\pi \sqrt{L' C'} = 179 \mu s \quad (8)$$

Considérons maintenant la fig. 8 qui nous donne la répartition correspondante des tensions pour le

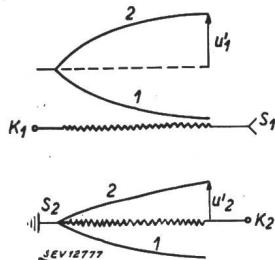


Fig. 8.
Répartition de la tension correspondant à l'oscillation du champ principal.
Couplage étoile/étoile inversée
 K_1, S_1 Bornes et point neutre primaires
 K_2, S_2 Bornes et point neutre secondaires

cas de couplage étoile/étoile inversée. La tension à laquelle est soumise la capacité C_{12} est la suivante:

$$u'_1 - u'_2 = u'_1 (1 - \ddot{u}) = 0,5 u'_1.$$

La capacité efficace se trouve alors diminuée dans la même proportion, soit:

$$C_{1w} = (1 - \ddot{u}) C_{12}$$

d'où

$$C' = \frac{2}{\pi} (C_{11} + C_{1w} + C_{2w} \cdot \ddot{u}^2) + \frac{\pi}{2} C_{s1} \quad (9)$$

Dans cette équation une partie C_{2w} seulement de la capacité secondaire C_2 est efficace, car les courants qui circulent du secondaire au primaire à travers la capacité C_{12} et du secondaire à la terre à travers la capacité C_2 se composent en partie. Il s'ensuit que la capacité secondaire efficace est alors:

$$C_{2w} = C_2 - C_{12} \left(\frac{1 - \ddot{u}}{\ddot{u}} \right) \quad (10)$$

Et par suite $C' = 316 \text{ pF}$, la période d'oscillation du champ principal est alors:

$$T_H = 128 \mu s \quad (11)$$

pour le couplage étoile/étoile inversée.

On calcule ensuite la période des oscillations dues au flux de fuite d'une manière et par des raisonnements analogues. C'est le couplage série des capacités primaires et secondaires qui est détermi-

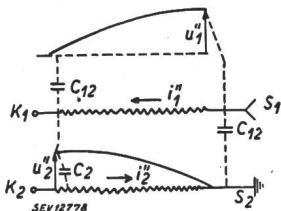


Fig. 9.
Répartition de la tension correspondant à l'oscillation du champ de fuite.
Couplage étoile/étoile

nant dans ce cas (voir tableau II, avant-dernière colonne); nous devrons pourtant calculer tout d'abord la répartition de la tension, car, dans ce cas encore, les capacités en dépendent. Il ne faut pas oublier que les courants dûs aux oscillations du flux de fuite circulent en sens inverse dans les deux en-

roulements. Les équations des courants de capacité et l'égalité des ampèretours permettent d'obtenir le rapport des tensions oscillantes primaires et secondaires. Dans le cas du couplage étoile/étoile et d'après la fig. 9, ce rapport est égal à:

$$\delta = \frac{u''_2}{u''_1} = \frac{C_{12} + \frac{\pi^2}{4} C_{s1} + C_{11}}{\ddot{u} \left(C_2 + C_{12} + \frac{\pi^2}{4} C_{s2} \right)} \quad (12)$$

d'où nous tirons le rapport des tensions oscillantes réduites au secondaire

$$\frac{u''_2}{u''_{red}} = \frac{\delta}{\ddot{u}} \quad (13)$$

L'équation (13) nous permet d'exprimer la capacité primaire qui intervient dans le schéma de principe indiqué dans le tableau II, lettre d), avant-dernière colonne:

$$C' = \frac{\delta}{\ddot{u}} \left(C_2 + C_{12} + \frac{\pi^2}{4} C_{s2} \right) \cdot \frac{2}{\pi} \quad (14)$$

ainsi que la capacité résultante, réduite au secondaire, qui intervient dans l'expression de la période d'oscillation:

$$C_{res} = \frac{2}{\pi} \frac{\delta}{\delta + \ddot{u}} \left(C_2 + C_{12} + \frac{\pi^2}{4} C_{s2} \right) \quad (15)$$

Dans notre cas: $\delta = 1,09$; $C_{res} = 627 \text{ pF}$

La période d'oscillation est donc:

$$T = 2\pi \sqrt{\lambda' \cdot C_{res}} = 24,5 \mu s \quad (16)$$

Raisonnons de manière analogue pour le couplage étoile/étoile inversée, correspondant à la fig. 10, et nous obtenons:

$$\delta = \frac{u''_2}{u''_1} = \frac{C_{11} + \frac{\pi^2}{4} C_{s1} + (1 - \ddot{u}) C_{12}}{\ddot{u} \left(C_2 + \frac{\pi^2}{4} C_{s2} \right) - (1 - \ddot{u}) C_{12}} \quad (17)$$

Les tensions u''_2 et u''_1 dépendant l'une de l'autre par C_{12} nous sommes obligés de calculer encore les

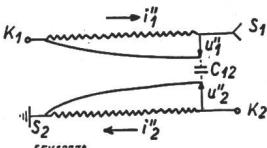


Fig. 10.
Répartition de la tension correspondant à l'oscillation du champ de fuite.
Couplage étoile/étoile inversée

capacités virtuelles \bar{C}_1 et \bar{C}_2 déterminantes pour le calcul de la fréquence, à partir de u''_2 , u''_1 et i''_2 , i''_1 . On trouve:

$$\bar{C}_2 = \frac{2}{\pi} \left[C_2 + \frac{\pi^2}{4} C_{s2} + C_{12} \frac{1 + \delta}{\delta} \right] \quad (18)$$

$$\bar{C}_1 = \frac{2}{\pi} \left[C_{11} + \frac{\pi^2}{4} C_{s1} + C_{12} (1 + \delta) \right]$$

d'où l'on déduit:

$$C_{res} = \frac{\bar{C}_2}{\bar{C}_2 + \frac{\ddot{u}^2}{\bar{C}_1}}; \quad T = 2\pi \sqrt{\lambda' C_{res}}. \quad (19)$$

Dans le cas particulier, on a:

$$\delta = 5,23; \quad \bar{C}_1 = 2600 \text{ pF}; \quad \bar{C}_2 = 990 \text{ pF}; \quad C_{res} = 904 \text{ pF}$$

$$T = 29 \mu s$$

Les amplitudes des oscillations doivent satisfaire à la condition suivante: Leur valeur résultante, pour chacun des enroulements, doit être égale à la valeur initiale de la tension capacitive. Remarquons que les tensions de l'oscillation lente u'_1 et u'_2 sont transformées dans le rapport \ddot{u} , alors que celles de l'oscillation rapide (due au flux de fuite) u''_1 et u''_2 dépendent du facteur δ obtenu à l'aide des équations (12) et (17). Désignons par u_s l'amplitude de la tension de choc primaire, par $\alpha_1 u_s$ les valeurs initiales des tensions dues à l'effet de capacité de l'enroulement primaire et par $\alpha_2 u_s$ celles du secondaire. L'amplitude initiale et résultante des oscillations est donc $(1 - \alpha_1) u_s = \beta u_s$ au primaire puisque les tensions primaires oscillent de part et d'autre de la valeur u_s . Nous pouvons alors écrire les équations suivantes, compte tenu des signes correspondant aux fig. 7 et 9 d'une part, 8 et 10 d'autre part:

$$\begin{cases} u'_1 + u''_1 = \beta u_s \\ -u'_2 + u''_2 = \alpha_2 u_s \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} u'_1 - u''_1 = \beta u_s \\ u'_2 + u''_2 = \alpha_2 u_s \end{cases} \quad (21)$$

Les équations (20) correspondent au couplage étoile/étoile et les équations (21) au couplage étoile/étoile inversée.

On en déduit les amplitudes des deux oscillations:

$$\frac{u'_1}{u_s} = \frac{\beta \delta - \alpha_2}{\ddot{u} + \delta}; \quad \frac{u''_1}{u_s} = \frac{\ddot{u} \beta + \alpha_2}{\ddot{u} + \delta}, \quad (22)$$

dans le cas du couplage étoile/étoile et

$$\frac{u'_1}{u_s} = \frac{\beta \delta + \alpha_2}{\ddot{u} + \delta}; \quad \frac{u''_1}{u_s} = \frac{\alpha_2 - \ddot{u} \beta}{\ddot{u} + \delta} \quad (23)$$

dans le cas de couplage étoile/étoile inversée.

Nous donnons dans le tableau III ci-dessous les amplitudes d'oscillations, calculées pour le transformateur envisagé ($T_H = 128 \mu s$; $f = 7800$ pér./s) est, ramenée au primaire, de

Nous pouvons adopter, avec une précision suffisante, comme valeurs de l'amortissement des oscillations du champ de fuite, celles que nous avons trouvées au paragraphe 2 précédent puisque les fréquences varient très peu et que les résistances et inductivités déterminantes sont pratiquement les mêmes dans les deux cas. On peut calculer ensuite l'amortissement des oscillations du champ principal d'une manière tout à fait analogue, en tenant compte toutefois de l'influence des pertes dans le fer. Dans ce cas, seules les pertes dues aux courants tourbillonnaires doivent être considérées par suite de la fréquence élevée du phénomène. Le calcul de ces courants tourbillonnaires se fera en tenant compte de l'effet pelliculaire. On déterminera les pertes dans le fer V_{Fe} dues aux courants tourbillonnaires en calculant la saturation moyenne du fer correspondant à une tension d'oscillation déterminée¹²⁾. Ces pertes sont ensuite ramenées à une résistance fictive équivalente comme suit: La tension d'oscillation admise correspond à un courant dont la valeur est le quotient de cette tension et de l'impédance d'onde

$$i = \frac{u}{\sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

Ce courant, traversant la résistance fictive R_{Fe} , produit des pertes égales à celles dues aux courants tourbillonnaires V_{Fe} :

$$R_{Fe} = \frac{V_{Fe}}{i^2} = \frac{V_{Fe}}{u^2} \left(\frac{L'}{C'} \right) \quad (24)$$

(Abstraction faite d'une variation de la répartition du flux due à une perméabilité variable, les pertes par courants tourbillonnaires sont proportionnelles à u^2 . Il en résulte que R_{Fe} est pratiquement indépendant de la tension u .)

La résistance fictive correspondant aux pertes dans le fer que nous obtenons dans le cas du couplage étoile/étoile inversée et avec le transformateur envisagé ($T_H = 128 \mu s$; $f = 7800$ pér./s) est, ramenée au primaire, de

$$R_{Fe} = 5800 \Omega$$

Si nous ajoutons les résistances correspondant aux pertes dans les conducteurs dont la valeur est de 1180Ω ¹³⁾, nous obtenons finalement une résistance d'amortissement totale de

$$R = 6980 \Omega$$

Le rapport des amplitudes de deux demi-ondes successives est alors:

$$v = e^{-\frac{R}{2} \frac{T_H}{L'} \cdot \frac{T_H}{2}} = 0,84.$$

¹²⁾ Si l'on fait le calcul d'après Richter, Elektr. Masch., t. 1, p. 156, on notera que le facteur 10^{-16} manque dans les formules 210.

¹³⁾ Remarquons que les courants des deux enroulements sont en phase lors d'oscillations du champ principal. La valeur des pertes additionnelles dans le cuivre ne sera donc pas celle qui correspond au champ de fuite usuel, mais aura une valeur plus élevée.

Tableau III

Couplage	Oscillation du champ principal		Oscillation du champ de fuite	
	primaire $\frac{u'_1}{u_s}$	secondaire $\frac{u'_2}{u_s}$	primaire $\frac{u''_1}{u_s}$	secondaire $\frac{u''_2}{u_s}$
Etoile/étoile . . .	-0,808	-0,404	-0,132	-0,144
Etoile/étoile inversée	-0,848	-0,424	+0,092	+0,474

Nous avons ainsi calculé toutes les valeurs nécessaires pour dessiner les diagrammes des tensions primaires et secondaires. Les fig. 11 nous montrent ces diagrammes établis à la fois par le calcul et par des mesures. La concordance des résultats obtenus

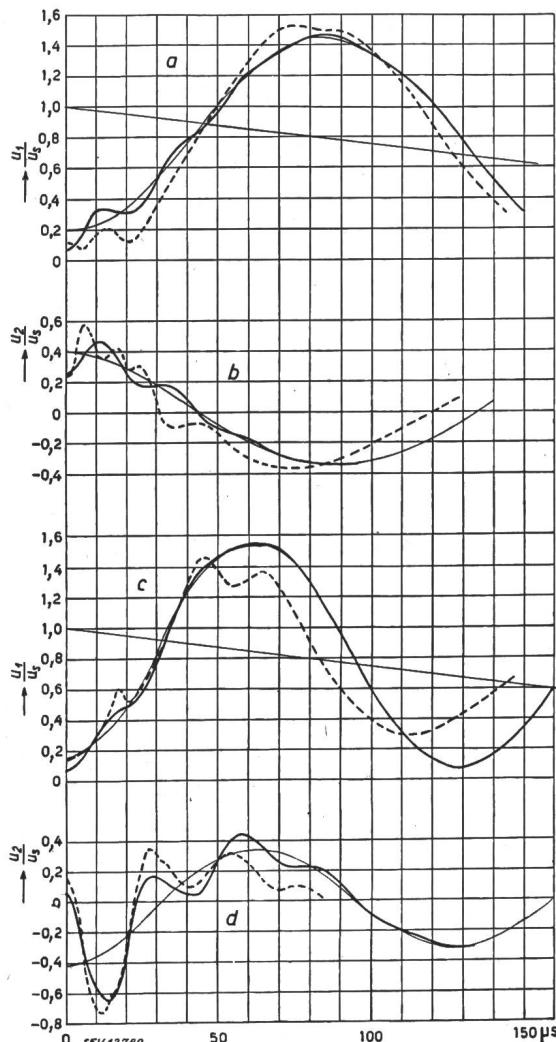


Fig. 11.

Tensions u_1 du point neutre primaire et u_2 de la borne secondaire lors d'un choc primaire tripolaire. Comparaison des valeurs mesurées et calculées. Point neutre primaire isolé

Couplage étoile/étoile

- a Tension du point neutre primaire u_1
- b Tension de la borne secondaire u_2
- Couplage étoile/étoile inversée
- c Tension du point neutre primaire u_1
- d Tension de la borne secondaire u_2
- Trait continu: courbe calculée
- pointillé: courbe mesurée

par ces deux procédés est, comme on le voit, satisfaisante, lorsque l'on songe aux nombreuses conditions qui régissent les phénomènes. Ce sont surtout les fréquences qui concordent le mieux. Nous avions déjà constaté, à la suite de l'étude du transformateur étoile/étoile avec neutres primaire et secondaire mis à la terre, que le 3^e harmonique venait dans ce cas modifier les résultats. Ce phénomène se retrouve ici pour la tension secondaire dans le cas du couplage étoile/étoile, schéma dans lequel l'extrémité libre de l'enroulement basse tension se trouve en regard de l'extrémité soumise au choc de l'enroulement primaire. (Les ventres de courants

de l'oscillation fondamentale, dans ce cas, comme le montre la fig. 9, ne se trouvent pas à la même extrémité des colonnes pour les enroulements primaires et secondaires correspondants. Un fort harmonique d'ordre 3 vient nécessairement se superposer pour compenser les ampèretours dans les enroulements. Il agit alors comme un enroulement compensateur¹⁴⁾.

Le calcul de l'amortissement des oscillations du champ de fuite donne des valeurs qui concordent tout à fait avec celles mesurées, comme ce fut également le cas avec couplage étoile/étoile inversée et neutre primaire mis à la terre. L'amortissement des oscillations du champ principal, obtenu par le calcul, est par contre un peu trop faible, car en réalité il y a encore d'autres pertes dans le fer que celles dont nous avons tenu compte. L'explication est simple si l'on se rappelle que les lignes de force, correspondant aux oscillations, ne se ferment pas dans le fer et que le flux s'échappe des

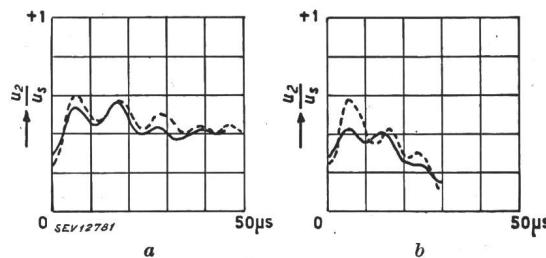


Fig. 12.

Tension secondaire u_2 . Comparaison des courbes mesurées et calculées, compte tenu du troisième harmonique. Couplage étoile/étoile. Point neutre primaire isolé ou mis à la terre
Trait continu: courbe calculée
pointillé: courbe mesurée

culasses et de l'extrémité des noyaux perpendiculairement aux tôles, ce qui entraîne des pertes supplémentaires importantes, spécialement à cause des fréquences élevées. On constate en outre, en poursuivant la comparaison des diagrammes de tension calculés et mesurés dans le cas où le point neutre primaire est isolé, que les tensions résultent de la superposition de deux oscillations, ce qui les rend très sensibles à la valeur des amplitudes des deux composantes. Nous sommes, ici, en présence d'un écart assez considérable entre le calcul et les mesures. Il ne faut pourtant pas s'en étonner, car le calcul de ces phénomènes est basé sur de nombreuses considérations, comme nous l'avons montré. Le rapport des amplitudes des deux oscillations dépend en outre et sur une grande échelle, des conditions initiales, pour lesquelles nous avons déjà des écarts entre les valeurs calculées et mesurées. Il n'y a donc pas lieu de s'étonner des résultats obtenus.

Nous pouvons pourtant conclure qu'en considérant la difficulté et la subtilité des phénomènes, nos calculs ont donné des résultats tout à fait satis-

¹⁴⁾ Poussons le calcul un peu plus avant et introduisons le troisième harmonique dans le cas du couplage étoile/étoile avec point neutre primaire isolé ou mis à la terre. Dans ce cas, les tensions secondaires sont données par les fig. 12a et 12b au lieu de 5a et 11b. On peut constater maintenant que les courbes de tension calculée (trait continu) et mesurée (pointillé) correspondent assez bien.

faisants. Les considérations théoriques, qui nous ont guidés dans cette étude, nous ont permis d'arriver à une conception exacte du comportement du transformateur lors des phénomènes de choc. Nous avons pu aussi constater qu'il n'est pas possible d'arriver à une solution par le seul emploi de schémas de substitution, mais qu'il est indispensable de tenir compte de l'interdépendance des constantes du transformateur.

IV. Résumé et conclusions

Les phénomènes de choc se transmettent du primaire au secondaire d'un transformateur suivant quatre composantes qui peuvent exister toutes ou partiellement selon le couplage envisagé. La première composante qui apparaît dans tous les cas est due à l'effet de capacité, car une répartition de la tension initiale capacitive prend aussi bien naissance le long de l'enroulement secondaire que le long de l'enroulement primaire sous l'effet de choc. Cette tension capacitive est identique à la valeur initiale de l'amplitude des phénomènes électromagnétiques transitoires ultérieurs. Vient ensuite une nouvelle composante: L'onde incidente induite au secondaire; nous avons enfin à considérer les deux oscillations propres qui prennent naissance dans le système couplé formé par les deux enroulements et dont nous ne considérons que l'onde fondamentale. Le passage de la répartition initiale capacitive, à la répartition finale, se fait par l'intermédiaire des deux dernières composantes citées (oscillations propres). La répartition finale est dictée par le régime stationnaire ou par une tension de choc transmise électromagnétiquement, pour autant que le couplage ait permis le passage de cette dernière composante. Le couplage des deux enroulements ainsi que le genre de choc déterminent l'apparition de toutes ou partie de ces composantes ainsi que leur grandeur et par conséquent fixent la valeur maximum de la tension secondaire. Les composantes induites magnétiquement sont prédominantes, en regard des composantes capacitatives, car leur énergie est beaucoup plus grande et parce qu'elles ne sont que peu affectées par la capacité du réseau et des câbles branchés au secondaire.

On a aussi constaté que l'on peut très bien étudier théoriquement le comportement du transformateur, si l'on a soin de tenir compte de l'interdépendance de toutes ses caractéristiques et si l'on ne se contente pas de simples schémas de substitution.

Nous indiquons ci-après les résultats qui découlent de nos mesures et de nos considérations théoriques:

a) Les surtensions qui affectent le primaire d'un transformateur se transmettent également au secondaire. Les surtensions secondaires dépendent du couplage du transformateur ainsi que du genre et de la forme de la surtension primaire; elles résultent de la superposition de plusieurs composantes.

b) Le couplage étoile/étoile inversée, avec point neutre primaire mis à la terre ou isolé, est celui qui donne les résultats les plus défavorables.

c) Ces couplages défavorables mis à part, on constate que la tension secondaire contre terre ou entre phases ne dépasse pas de beaucoup la valeur de la surtension primaire réduite au secondaire. La tension secondaire reste même inférieure à cette valeur dans les cas les plus favorables: Couplage étoile/triangle ou triangle/étoile avec circuit secondaire débitant.

d) Les surtensions secondaires ne mettent pratiquement pas les transformateurs en danger.

e) Une protection suffisante des machines et appareils branchés au secondaire de transformateurs étoile/triangle est assurée par des parafoudres insérés au primaire, puisque, d'une part, la surtension est inférieure à la valeur de la surtension primaire rapportée au secondaire et que, d'autre part, les parafoudres pour tensions nominales élevées ont des tensions d'amorçage relativement plus basses.

f) Les valeurs les plus élevées des tensions secondaires sont dues à la superposition des oscillations; c'est pourquoi elles sont moins raides que les ondes de choc normales et, de ce fait, sollicitent moins les appareils et machines sensibles aux forts gradients de tension.

g) Considérant un transformateur couplé en étoile/étoile et fermé au secondaire sur une charge capacitive (réseau de câble), on arrive à la conclusion qu'il serait préférable, eu égard à la valeur des surtensions secondaires, de ne pas mettre le point neutre secondaire de ce transformateur à la terre quand il est branché à un réseau aérien au primaire. Le réseau secondaire serait alors moins sollicité contre terre grâce à la répartition de la tension capacitive entre les capacités des câbles et du transformateur; le problème est néanmoins plus complexe et exige encore d'autres considérations.

h) Il est possible, en principe, de brancher également des parafoudres au secondaire des transformateurs; toutefois, cette mesure de précaution ne nous semble pas nécessaire, tout au moins pour les couplages les plus favorables, à moins que le réseau secondaire ne soit soumis lui-même à des surtensions atmosphériques.

i) Il est recommandé de se livrer à des recherches approfondies, chaque fois qu'il y a apparition de perturbations dues à des surtensions secondaires qui semblent provenir du réseau primaire, car d'autres phénomènes peuvent être en cause. Nous ne connaissons en effet aucun cas de perturbation secondaire dont l'origine était une surtension primaire, mais nous savons que de telles perturbations peuvent être dues, par exemple, à la transformation par capacité des variations de tension à fréquence industrielle du point neutre primaire par rapport à la terre ou à des oscillations (ferrorésonance en corrélation avec des réactances de mise à la terre). Les surtensions de ce genre ne peuvent être supprimées au moyen de parafoudres et nécessitent d'autres mesures de protection.

Adresse de l'auteur:

Hans Meyer, Dr. ès sc. techn., ingénieur de la S. A. Brown, Boveri & Cie., Baden.