Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 12 (1921)

Heft: 2

Artikel: Note sur la capacité répartie des transformateurs ou des bobines d'induction

Autor: Joye, Paul / Besson, Marius

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060407

stromanlagen Genüge leisteten. Eine Zusammenstellung ergibt das Resultat, dass von 201 geprüften Drähten deren 167 oder 83% der bezüglichen Vorschrift entsprechen, während 34 Drähte oder 17% geringere Festigkeit (Abweichung im Mittel 15%) aufwiesen. In 9 Fällen ergaben die Versuchsresultate sogar eine Bruchfestigkeit der Drähte, die mehr als 20% kleiner war, als sie in den Vorschriften verlangt ist.

Herr Ritter hat das Ergebnis seiner Untersuchung über die Festigkeitsprüfungen der Verbindungsstellen in folgende Sätze zusammengefasst:

1. Von sämtlichen Leitungsverbindungen weist $^1/_4$ mindestens die nämliche Festigkeit auf, wie die zu verbindenden Drähte; dagegen sind die übrigen $^3/_4$ mehr oder weniger geschwächt, durchschnittlich ca. 13%. Die maximalen Schwächungen gehen bis zu 65%.

2. Bei der grösseren Hälfte der geschwächten Verbindungsstellen (56%) erfolgt der Bruch nicht in der Verbindung, sondern nebenan im Leitungsdraht, als Folge einer zu grossen Erwärmung. Bei ca. 30% tritt die Lösung der Verbindung ein, sei es durch Herausziehen der Drähte aus der Wickellötstelle oder Muffe, sei es durch Bruch des Drahtes.

3. Die mechanische Festigkeit von Wickellötstellen und Muffen ist ungefähr die nämliche. Dagegen weisen die sog. Anschlusslötstellen durchschnittlich nur eine geringe Schwächung auf (2,5%).

4. Der Durchmesser der Drähte spielt bei der Güte von Lötverbindungen keine wesentliche Rolle. Relativ ist die Festigkeit bei den dünnen Drähten eher grösser als bei den dickern.

5. Lötungen mit Stichflamme verursachen speziell bei dickern Drähten wesentlich grössere Schwächungen, als solche mit Lötkolben.

Note sur la capacité répartie des transformateurs ou des bobines d'induction.

Par *Paul Joye* et *Marius Besson*. Institut de Physique de l'Université de Fribourg.

L'existence d'une capacité répartie dans un transformateur ou dans une bobine d'induction ne peut être mise en doute. Sans parler de celle inhérente à tout conducteur, il est évident que la chute de tension entre spires voisines ou entre couches horizontales de spires, la différence de potentiel, généralement très grande entre les enroulements primaires et secondaires, donnent naissance dans ces appareils à des courants de capacité. Mais cette capacité est tellement complexe dans sa forme et dans son origine que le calcul est impuissant à en déterminer même l'ordre de grandeur. Quant à l'expérience, elle n'a guère fourni jusqu'ici que des résultats illusoires. C'est ainsi que Walter et Overbeck en se fondant sur les mêmes mesures ont attribué à la même bobine, l'un $1{,}1 \cdot 10^{-6}$ μF, l'autre une valeur 500 fois plus grande[1]). Plus tard Jves, à l'occasion d'une étude sur une bobine d'induction a publié des resultats dont Armagnat a montré le caractère problématique[2]).

Les difficultés que nous avons rencontrées au cours d'une étude sur le transformateur à résonnance nous ont montré que cette capacité jouait un rôle non négligeable; de plus, l'étude des phènomènes de résonance nous a suggèré une méthode de mesure de la capacité répartie. Laissant à une autre publication l'étude

1) Walter, Ann. der Physik, Bd. 62, S. 390. – Overbeck, Ibidem, Bd. 64, S. 193–216. – Walter, Ibidem, Bd. 66, S. 623–635.

2) Contributions to the Study of the induction Coil. Phys. Rev. 1902; tome 14. p. 280 et tome 15. p. 7 Armagnat. Eclairage électrique. Volume 46. p. 217–227.

générale de la résonance, nous consacrons le présent article à la mise en évidence et à la mesure de la capacité répartie.

Nous nous sommes servis dans ces recherches d'une bobine d'induction construite par Klingelfuss (Bâle)[1]. Le secondaire entourant le primaire est constitué par des sections en série. Il est interrompu en son milieu, ce qui permet d'intercaler un milliampèremètre, au besoin réuni à la terre, sans fermer le circuit extérieur.

Ses caractéristiques sont les suivantes:

R_1, Résistance du primaire -1 ohm; R_2, Résistance du secondaire -40270 ohms; L_1, Self induction primaire, varie de 0,178 à 0,19 Henry lorsque le courant varie de 0,36 à 6 ampères; L_2, Self induction secondaire, varie de 8180 à 8370 Henry lorsque le courant varie de 11 à 25 milliampères; σ, Coefficient de dispersion 0,135. (Coefficient de couplement, $k = 0{,}93$ et $k^2 = 0{,}865$); M Coefficient d'induction mutuelle 36,9.

Les valeurs L_1, L_2, σ et M ont été mesurées à 50 périodes.

Nous faisons l'hypothèse que tous les éléments de la capacité répartie ont une capacité résultante qui peut être équiparée à une capacité C placée en parallèle sur l'enroulement secondaire[2]. Nous pouvons alors représenter la bobine réelle, par une bobine fictive dont les enroulements auraient une capacité rigoureusement nulle et dont le secondaire serait fermé sur une capacité équivalente à la capacité répartie.

Intercalons un galvanomètre à cadre mobile dans la coupure du secondaire et faisons passer dans le primaire un courant continu que nous fermons et coupons alternativement aussi brusquement que possible. Si la capacité C n'est pas nulle, à chaque fermeture et à chaque rupture, des oscillations libres prendront naissance dans le secondaire, et, si elles ne sont pas trop rapides, le galvanomètre fonctionnant comme balistique pour la première oscillation, donnera une déviation. C'est ce que l'expérience a vérifié; en plaçant en série avec le galvanomètre des résistances croissantes, afin d'augmenter l'amortissement des oscillations, nous avons vu cette déviation croître, passer par un maximum lorsque la résistance ohmique atteignait environ $1{,}5 \cdot 10^6$ ohms, puis décroître. Les phénomènes observés dépendant de conditions très complexes, il est très difficile de tirer de ces expériences toutes qualitatives, une méthode de mesure. Le seul intérêt qu'elles ont, est de mettre en évidence l'existence de la capacité répartie.

Nous allons maintenant nous occuper de sa mesure effectuée par un procédé tout à fait différent. Le galvanomètre est remplacé par un milliampèremètre électrodynamique, et le primaire est alimenté par un courant alternatif dont on fait varier la période. Ainsi nous n'avons plus a faire à un régime libre, mais à un régime permanent. Soient: J_1 l'intensité efficace du courant primaire; J_2 l'intensité efficace du courant secondaire et U la tension aux bornes de la capacité; si le courant est sinusoïdal, ces trois quantités sont données par les relations:

$$J_1 = \frac{E}{\sqrt{\varrho_1{}^2 + \lambda_1{}^2\omega^2}}; \quad J_2 = \frac{M\omega E_1}{\sqrt{(R_1{}^2 + L_1{}^2\omega^2)(\varrho_2{}^2 + \lambda_2{}^2\omega^2)}};$$

$$U = \frac{M E_1}{C\sqrt{(R_1{}^2 + L_1{}^2\omega^2)(\varrho_2{}^2 + \lambda_2{}^2\omega^2)}}$$

où E est la tension primaire; ω la pulsation; C la capacité équivalente; ϱ_1 la résistance complexe de l'enroulement primaire; λ_1 la self induction complexe de

[1]) Voir sur cette bobine: P. Joye: La mesure des hauts voltages au moyen du sléromètre Klingelfuss. Arch. sc. phys. et nat. Genève Volume 46. p. 243, 1918.

[2]) *Steinmetz.* Theory and Calculation of transients electric phenomena and oscillations. Traduit par Paul Bunet: „Théorie et calcul des phénomènes électriques de transitions et des oscillations. p. 353—358. Paris 1912.

l'enroulement primaire; ϱ_2 la résistance complexe de l'enroulement secondaire et λ_2 la self induction complexe de l'enroulement secondaire.

$$\varrho_1 = R_1 + R_2 \frac{M^2 \omega^2}{R_2{}^2 + \left(C_2 - \frac{1}{C\omega^2}\right)^2 \omega^2}\,; \quad \lambda_1 = L_1 - \left(L_2 - \frac{1}{C\omega^2}\right) \frac{M^2 \omega^2}{R_2{}^2 + \left(L_2 - \frac{1}{C\omega^2}\right)^2 \omega^2}$$

$$\varrho_2 = R_2 + R_1 \frac{M^2 \omega^2}{R_1{}^2 + L_1{}^2 \omega^2}\,; \qquad \lambda_2 = \left(L_2 - \frac{1}{C\omega^2}\right) - L_1 \frac{M^2 \omega^2}{R_1{}^2 + L_1{}^2 \omega^2}$$

Si l'on fait varier la self induction, la capacité, la dispersion ou la fréquence, les intensités des courants primaires et secondaires, ainsi que la tension U sont généralement susceptibles de passer par un maximum qu'ils atteignent à peu près en concordance; on dit alors que le transformateur est en résonance.

Cherchons le maximum de J_2 en fonction de la fréquence. Admettons qu'elle reste assez grande pour que $R_1{}^2$ soit négligeable devant $L_1{}^2 \omega^2$.

ϱ_2, λ_2 et J_2 prennent alors les valeurs:

$$\varrho_2 = R_2 + R_1 \frac{M^2}{L_1{}^2}\,; \qquad \lambda_2 = L_2 - \frac{1}{C\omega^2} - \frac{M^2}{L_1}\,; \qquad J_2 = \frac{M E_1}{L_1 \sqrt{\varrho_2{}^2 + \lambda_2{}^2 \omega^2}}$$

Dans la dernière expression $\lambda_2{}^2 \omega^2$ est le seul terme qui dépende de ω, pour autant que L_1 et M n'en dépendent pas non plus. On néglige donc les effets de l'hystérésis.

La condition pour que J_2 soit maximum est alors:

$$\lambda_2 = 0\,; \quad \textit{c'est-à-dire } L_2 - \frac{1}{C\omega^2} - \frac{M^2}{L_1} = L_2 - \frac{1}{C\omega^2} - k^2 L_2 = 0$$

$$\text{ou} \qquad \omega = \frac{1}{\sqrt{\sigma \cdot L_2 C}} \qquad (1)$$

$$\text{où} \qquad \sigma = 1 - k^2$$

et la valeur de ce maximum est:

$$J_{2\,max} = \frac{M E_1}{L_1 \varrho_2} \qquad (2)$$

Ces deux formules nous fournissent des conclusions intéressantes: on peut en variant la fréquence mettre un transformateur en résonance sur sa capacité propre. L'intensité du courant secondaire atteint alors un maximum dont la valeur est indépendante de la capacité. Il sera donc aussi facile, en suivant les indications d'un milliampèremètre placé au milieu du circuit secondaire, de mettre un transformateur en résonance sur sa capacité propre que s'il était fermé sur un groupe de condensateurs. Mais il faut bien remarquer que dans le cas général tout changement de la capacité entraîne un changement de la fréquence de résonance. Si l'on modifie la capacité sans modifier la fréquence, on sort des conditions de résonance et l'intensité du courant secondaire baisse; elle baisse, d'autant plus que l'accroissement de la capacité est plus grand. En particulier, un transformateur étant en résonance à circuit ouvert, on fera tomber l'intensité du courant secondaire à sa plus petite valeur en le mettant en court-circuit, car cela revient à fermer le transformateur sur une capacité infinie.

La mise en résonance d'un transformateur à circuit ouvert permet de mesurer sa capacité équivalente. Dans la formule (1) et selon les restrictions admises σ et L_2

sont des constantes qui peuvent être connues. Il suffit de noter la valeur de la pulsation du courant au moment de la résonance pour en déduire la capacité équivalente $C = \frac{1}{\omega^2 L_2 \sigma}$. Toutes ces conclusions ont été soumises à l'expérience; la mise en résonance à circuit ouvert s'est faite sans difficulté en alimentant le primaire par une dynamo à courant alternatif dont on pouvait varier la vitesse, mesurée à chaque instant par un compteur de tours. En augmentant la fréquence nous avons vu le courant secondaire à circuit ouvert croître jusqu'au maximum de 11 à 12 milliampères pour une tension $E_1 = 40$ volts. La fréquence était alors de 620 à 640. Nous sommes ainsi conduits à attribuer à notre bobine une capacité répartie équivalente à $57 \cdot 10^{-6}$ μF environ.

Nous avons ensuite augmenté celle-ci en plaçant sur chacune des bornes du secondaire une sphère conductrice. Il fallait alors pour remettre la bobine en résonance donner à la fréquence une nouvelle valeur, mais l'intensité maxima du courant revenait à $11-12$ milliampères.

Puis, maintenant la fréquence constante, nous avons mis le secondaire en court-circuit. L'intensité du courant secondaire est alors tombée à moins de 2 milliampères pour $E_1 = 40$ volts.

Ainsi, à première vue, nos conclusions théoriques sont vérifiées par l'expérience et les phénomènes se produisent bien dans le sens prévu. Mais, pour peu que l'on veuille pousser le contrôle expérimental en comparant les valeurs numériques calculées et observées, on constate des écarts considérables. Le fait que le courant secondaire maximum est indépendant de la valeur de la capacité sur laquelle on met en résonance, n'a été vérifié qu'en faisant varier la capacité entre des limites rapprochées. Les différentes capacités employées et par suite les différentes fréquences correspondantes étaient du même ordre de grandeur. Nos conditions expérimentales ne nous ont pas permis, dans ce premier travail, une vérification plus étendue, mais notre étude générale sur la résonance nous porte à croire que la formule (2) n'est qu'approchée. D'ailleurs la mesure expérimentale nous à fourni à la résonance, sous une tension primaire de 40 volts, un courant de 11 à 12 milliampères, alors que le calcul indique 82 mA.

Nous croyons devoir assigner deux causes à ce grand écart: 1^0 Dans l'établissement de nos formules, nous avons dû laisser de côté les effets de l'hystérésis et des courants de Foucault. 2^0 Les constantes que nous introduisons dans le calcul ont été mesurées à 50 périodes et nos expériences ont été exécutées entre 500 et 600 périodes. Ce qui nous intéresse actuellement, c'est de savoir dans quelle mesure ces deux causes d'erreur altèrent la détermination de la capacité équivalente. La deuxième conserve son influence et une simple inspection de la formule (1) nous montre que, toute autre cause d'erreur mise à part, nous connaîtrons la capacité équivalente avec la même approximation que L_2 et σ. Ces valeurs devront donc être déterminées à la fréquence de résonance.

Par contre, l'hystérésis et les courant de Foucault jouent un rôle diminué. Notons en effet que la détermination de la capacité équivalente repose non pas sur la valeur du maximum du courant secondaire mais de la fréquence pour laquelle il est obtenu. Portons en ordonnées l'intensité du courant secondaire, en abscisses la fréquence, et construisons, pour une capacité C donnée, extérieure, la courbe J_2 en fonction de ω. Toute cause qui n'entraînera qu'un abaissement du maximum de J_2 sera sans effet sur la détermination de C; mais tout déplacement de ce maximum vers la droite ou vers la gauche affectera la recherche de C d'une erreur proportionnelle à son carré. Or, d'après notre étude générale sur le transformateur en résonance, toute cause qui provoque un abaissement du maximum entraîne en général un déplacement latéral de ce maximum. Mais ce second effet est ordinairement beaucoup moins important que sa cause; c'est un effet de seconde ordre, tant que l'abaissement du maximum n'est pas considérable. Il en résulte que l'hystérésis et les courants de Foucault produiront une erreur dans la mesure de la capacité équivalente, mais cette erreur sera beaucoup moins grande que celle qui affecte l'intensité du courant secondaire.

Il y aurait bien, semble-t-il, un moyen de vérifier expérimentalement le degré d'approximation de notre mesure de la capacité équivalente; ce serait de fermer le secondaire sur une capacité connue et de déterminer la valeur par la mise en résonance de la capacité résultante. Ce procédé est très imparfait. En effet, si nous fermons le secondaire sur une capacité grande par rapport à la capacité répartie, la fréquence de résonance sera beaucoup plus basse; en admettant même que les constantes du circuit introduites dans les formules, aient été mesurées à la fréquence de résonance, on ne peut en conclure, à cause des effets de l'hystérésis, que la valeur trouvée pour la capacité répartie est bien celle que l'on aurait eue en la déterminant sans l'introduction de la grande capacité. De plus une faible erreur sur la valeur de cette dernière, affectera considérablement la valeur de la petite capacité répartie. Si nous prenons une capacité extérieure du même ordre de grandeur que la capacité à mesurer, nous restons dans le domaine de nos expériences avec toutes les difficultés que nous avons exposées. La seule voie pour en sortir est donc de reprendre les déterminations des constantes, aux fréquences utilisées, c'est-à-dire proche de la résonance sur la seule capacité répartie, et d'appliquer les formules générales du ploblème pour arriver à connaître le degré d'approximation de nos mesures.

Nous donnons cependant à titre d'indication, les résultats d'un essai. Dans une première expérience, nous avons ajouté une capacité de $38 \cdot 10^{-6}\ \mu F$ répartie également sur les deux pôles de la bobine sous forme de sphères. Dans une deuxième, nous avons fermé la bobine sur un voltmètre électrostatique dont la capacité calculée est de $51 \cdot 10^{-6}\ \mu F$; nous avons obtenu, dans le premier cas, $70 \cdot 10^{-6}\ \mu F$ et dans le second $128 \cdot 10^{-6}\ \mu F$ pour la capacité résultante. Ce qui donne $32 \cdot 10^{-6}\ \mu F$ et $77 \cdot 10^{-6}\ \mu F$, dont la moyenne se rapproche assez de la capacité répartie mesurée directement. Dans la première mesure, l'erreur sur la moyenne est de 40 % dans la seconde de 42 %.

Nous remarquons, en terminant cette étude, qu'il n'est pas nécessaire pour mesurer la capacité équivalente d'un transformateur, que son circuit secondaire soit interrompu en son milieu. On peut fort bien se passer du milliampèremètre intercalé dans le circuit secondaire ouvert. En effet, si nous considérons l'expression du courant primaire page 38 et que nous cherchions son maximum en fonction de ω, nous trouvons en négligeant R_2^2 devant $\left(L_2 - \frac{1}{c\,\omega^2}\right)^2 \omega^2$, que le maximum de J_2 se produit en concomitance avec celui du courant primaire. Dès lors, il suffira de déterminer le point de résonance en suivant les indications d'un ampèremètre au primaire.

Conclusions. Ces quelques considérations sont, croyons nous, suffisantes pour signaler l'intérêt que présente l'utilisation de la résonance à la mesure de la capacité répartie. Les expériences préliminaires dont nous venons de rendre compte fournissent, dès que l'on connait les caractéristiques d'un transformateur, un moyen facile et rapide de déterminer l'ordre de grandeur de ce que nous avons appelé la capacité équivalente à la capacité répartie. Nous avons indiqué pourquoi on ne peut, dans ces expériences, compter que sur un ordre de grandeur. Pour en mesurer la valeur exacte, il faudrait effectuer les déterminations des constantes à une fréquence voisine de celle de la résonance et étudier l'influence des courants de Foucault et de l'hystérésis sur le déplacement du point de résonance. Celà sort du cadre de cette note; nous n'avions ici pour but que d'exposer sommairement une méthode et les quelques expériences que nous avons faites ne doivent être considérées que comme un travail d'approche et de première approximation.