Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 88 (1997)

Heft: 23

Artikel: Transformateurs de distribution supraconducteurs : dispositif d'enclenchement doux par prémagnétisation d'un transformateur supraconducteur à haute température

Autor: Hugo, Nicolas / Rufer, Alfred

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902267

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: 09.12.2025

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

Les récents progrès dans le domaine des matériaux supraconducteurs sont remarquables. Outre leur utilisation dans la science expérimentale, on peut prévoir que le domaine de la distribution et de l'utilisation de l'énergie électrique tirera un grand avantage de cette nouvelle technologie. Un dispositif utilisant de tels matériaux, un transformateur supraconducteur de distribution, a été mis en service récemment aux Services Industriels de Genève. Cet article décrit un aspect particulier de tels transformateurs et propose une solution aux problèmes posés lors de leur enclenchement.

Transformateurs de distribution supraconducteurs

Dispositif d'enclenchement doux par prémagnétisation d'un transformateur supraconducteur à haute température

■ Nicolas Hugo et Alfred Rufer

Les recherches sur les matériaux supraconducteurs ont abouti, ces dernières années, à des résultats très intéressants. Le progrès majeur concerne la température limite à partir de laquelle ces matériaux perdent leur caractéristique supraconductrice. Cette température critique s'étant élevée régulièrement jusqu'à atteindre de «hautes» températures (quelques dizaines de °K), il devient ainsi possible d'utiliser de tels matériaux en les refroidissant avec un liquide relativement bon marché, de l'azote liquide (température d'ébullition de –196 °C = 77 °K). Cette diminution du coût ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine du transport, de la distribution et de l'utilisation de l'énergie électrique [1]. Une des premières applications envisagées est le transformateur. Ainsi, en remplaçant les conducteurs de cuivre par des conducteurs supraconducteurs, on élimine les pertes joules tout en augmentant le rendement électrique du transformateur.

Une deuxième particularité importante des matériaux supraconducteurs est le courant maximum que l'on peut y faire passer avec une résistance nulle. Ce maximum est connu sous le nom de «courant critique». Au-delà de cette valeur, le conducteur perd sa supraconductivité. Etant donné le prix relativement élevé des conducteurs, on fait attention à approcher le courant nominal du transformateur de ce courant limite. En fonctionnement normal, cette limite n'est jamais dépassée. Toutefois, on entre en conflit avec une autre caractéristique des transformateurs, à savoir leur courant d'appel à l'enclenchement qui peut atteindre un multiple du courant nominal et dépasser ainsi le courant critique. On peut aussi ajouter à ces limites physiques le «champ magnétique critique» qui constitue la limite supérieure du champ magnétique que le ruban supraconducteur peut supporter sans perdre sa supraconductivité. De plus, les composantes de courant continu générées lors du phénomène transitoire d'enclenchement ne sont éliminées que très lentement par rapport à un trans-

Adresses des auteurs
Nicolas Hugo, ing. él. dipl. EPFL, et prof. *Alfred Rufer,* professeur EPFL, Laboratoire d'électronique industrielle, Département d'électricité, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne
Email: Nicolas.Hugo@lei.de.epfl.ch et Alfred.Rufer@lei.de.epfl.ch

formateur classique. On se voit donc contraint de développer une stratégie d'enclenchement doux qui limite ces phénomènes transitoires.

Un transformateur supraconducteur de distribution de 630 kVA (18,72 kV/400 V) a été développé et construit chez ABB Sécheron SA à Genève. Il est actuellement installé dans une station de distribution dans les bâtiments des Services Industriels de Genève (SIG) au Lignon [2].

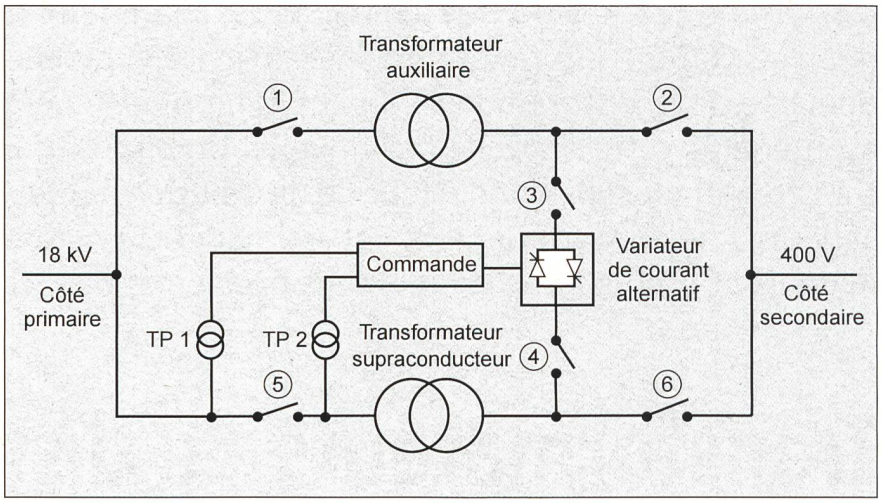


Figure 1 Schéma de principe du dispositif de prémagnétisation

Le problème d'enclenchement d'un transformateur supraconducteur

Le transformateur supraconducteur installé à Genève ressemble beaucoup à un transformateur à résine moulée. Il possède un circuit magnétique conventionnel autour duquel sont disposés trois enceintes isolantes de forme tubulaire (cryostats). Elles contiennent les enroulements supraconducteurs primaire et secondaire de chaque phase. Ainsi, les seules parties froides du transformateur sont les enroulements. Le circuit magnétique reste à température ambiante.

Les problèmes rencontrés lors de l'enclenchement d'un transformateur supraconducteur sont de trois types, bien qu'ils soient liés entre eux: temporel, magnétique et électrique.

Afin d'expliquer le *problème temporel,* on peut prendre comme exemple le branchement d'un circuit RL sur une source sinusoïdale. On peut facilement montrer que l'instant de fermeture du contact le plus favorable est lorsque la tension de la source passe par l'une de ses valeurs de crête. A l'opposé, un enclenchement lors du passage de la tension par zéro fait apparaître un courant transitoire décroissant dont l'amplitude de crête vaut, lors de la première période, environ deux fois le courant de crête en régime permanent. Dans un transformateur triphasé, cette condition temporelle de fermeture n'apparaît au mieux que sur une seule phase, les deux autres phases voyant alors une tension égale à la moitié de la tension de crête.

Là-dessus s'ajoute encore le *problème d'ordre magnétique.* Il a pour cause la saturation du circuit magnétique saturable. En effet, si l'on prend une inductance bobinée autour d'un noyau magnétique, on peut remarquer que la valeur de celle-ci dépend du courant qui la traverse. Plus le courant augmente, plus la valeur de l'inductance diminue, jusqu'à atteindre une valeur asymptotique qui correspond à la valeur qu'elle aurait sans le noyau magnétique. Ainsi, lors d'un enclenchement, le courant transitoire entraîne une diminution de la réactance de champ principal du transformateur, augmentant par là encore le courant d'appel. Le courant dans ce cas peut atteindre des valeurs supérieures à dix fois le courant nominal. Le phénomène transitoire décrit ci-dessus a lieu lors de l'enclenchement de tous les transformateurs du réseau de distribution. Le dépassement momentané des valeurs nominales de courant est bien toléré étant donné la grande capacité thermique des conducteurs en cuivre.

Abordons maintenant le *problème électrique.* Pour l'expliquer, il faut indiquer, on l'a vu plus haut, qu'une des caractéristiques importantes d'un fil supraconducteur, outre la température critique, est le courant maximal que celui-ci peut conduire avec une résistance nulle. Ce maximum est connu sous le nom de «courant critique». Au-delà de cette valeur, la matière perd sa supraconductivité. Pour comparer des conducteurs de sections différentes, il est utile de parler de «densité de courant critique», généralement mesurée en ampère par centimètre carré. Cette densité de courant ne doit donc pas être dépassée si l'on veut conserver la supraconductivité. Le champ magnétique qui traverse le supraconducteur a aussi une influence sur les caractéristiques du conducteur. Au-delà d'une certaine valeur appelée «champ magnétique critique» le conducteur se comporte de la même manière que lors d'un dépassement du courant critique.

L'enclenchement d'un transformateur supraconducteur voit aussi apparaître une intensité de courant supérieure à la valeur critique. Ces fils voient alors leur résistivité passer d'une valeur quasi nulle à une valeur positive non négligeable. Les pertes joules générées par la circulation de ce courant représentent une sollicitation anormale des bobines. Il est donc nécessaire de concevoir un dispositif auxiliaire qui amène le transformateur à un point de fonctionnement tel qu'à la fermeture du disjoncteur primaire aucun phénomène transitoire néfaste ne vienne perturber l'état supraconducteur des bobines. Pour cela, il a été prévu d'utiliser les moyens de l'électronique de puissance qui mettent à disposition des sources de tension commandables relativement souples. Un programme de recherche a été mené au Laboratoire d'Electronique Industrielle (LEI) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).

Recherche de solutions au problème d'enclenchement

Considérations générales

Comme on l'a vu, l'application brusque d'une tension aux bornes d'un transformateur engendre des courants transitoires importants. Ceci est dû au fait qu'aucun flux magnétique ne circule dans le transformateur avant l'instant d'enclenchement. Le phénomène transitoire amène ainsi la valeur de flux à atteindre théoriquement deux fois la valeur de crête, engendrant une saturation du circuit magnétique (courbe B–H non linéaire). Une première solution consiste à enclencher successivement chaque phase lors du passage par la valeur de crête de la tension correspondante. Le régime transitoire lors de l'enclenchement est contrôlé par un dispositif auxiliaire et la connexion se fait directement en régime permanent. Une autre solution consiste à générer dans le circuit magnétique du transformateur un flux magnétique alternatif synchrone correspondant au fonctionnement à vide du transformateur.

Une fois ce flux établi, on peut enclencher sans autres précautions le transformateur sur le réseau et aucun phénomène transitoire n'apparaît.

Prémagnétisation à courant continu et enclenchement séquentiel

Dans ce cas le dispositif de prémagnétisation à courant continu et enclenchement séquentiel ou, plus simplement, enclenchement à courant continu est un système auxiliaire de prémagnétisation utilisant une source de tension continue et un dispositif d'enclenchement séquentiel des phases. On se souvient que dans le chapitre précédant, on avait indiqué que l'instant le plus favorable pour l'enclenchement d'un transformateur était lorsque la tension à ses bornes passait par sa valeur de crête. Cette condition n'est malheureusement jamais remplie en même temps aux bornes d'un transformateur triphasé. La méthode d'enclenchement à courant continu contourne cette difficulté en faisant un enclenchement séquentiel des différentes phases de la manière suivante:

- Une tension continue est appliquée aux bornes d'une phase du transformateur. Cette action oriente le champ rémanent dans une direction déterminée. Cette dernière tension est ensuite annulée. Le transformateur se trouve ainsi dans une situation où le champ d'induction magnétique rémanent se trouve dans une position bien déterminée.
- On enclenche ensuite la phase qui vient d'être prémagnétisée sur la tension du réseau à l'instant d'enclenchement favorable par rapport au champ d'induction magnétique rémanent. Le courant qui circule ensuite dans cette phase y génère un flux qui se répartit uniformément dans les deux autres phases. On fera aussi attention à ce que le sens lors de l'enclenchement de la phase sur le réseau génère un champ d'induction magnétique dans le même sens que le champ d'induction magnétique rémanent.
- Les deux autres phases sont enclenchées lorsque le flux magnétique qui les parcourt a atteint le flux d'induction rémanent.

Cette solution est très intéressante d'un point de vue théorique de par la possibilité de prémagnétiser avec une charge connectée. Malheureusement, elle n'est pas réalisable pratiquement. Le principal obstacle rencontré se situe au niveau du disjoncteur primaire. En effet, cette méthode de prémagnétisation nécessite un instant d'enclenchement relativement précis. Un écart de 1 ms ou plus n'est pas admissible. Or les disjoncteurs actuellement sur le marché ont une déviation trop importante du temps de fermeture entre le moment où la commande est donnée et la fermeture effective des contacts et ne permettent pas leur utilisation pour cette méthode.

Prémagnétisation par une source de tension sinusoïdale synchrone d'amplitude croissante

La stratégie de cet enclenchement à courant alternatif se base sur le principe suivant: afin d'éviter un saut de tension il serait judicieux d'appliquer aux bornes primaires du transformateur supraconducteur une tension sinusoïdale synchronisée, dont l'amplitude croît régulièrement d'une valeur nulle à la valeur nominale (environ 18 kV). Au moment où cette dernière valeur est atteinte, il est possible de connecter le transformateur sur le réseau. Vu qu'à ce moment la différence entre les tensions du réseau et des bornes primaires du transformateur (c'est-à-dire la tension aux bornes du disjoncteur primaire) est quasi nulle, il n'y a plus de saut de tension et les phénomènes transitoires néfastes n'ont plus lieu.

Bien que cette solution soit également judicieuse, sa réalisation pratique n'en est malheureusement que difficilement réalisable. En effet, une source pouvant délivrer une tension triphasée dont l'amplitude correspond à la tension nominale du

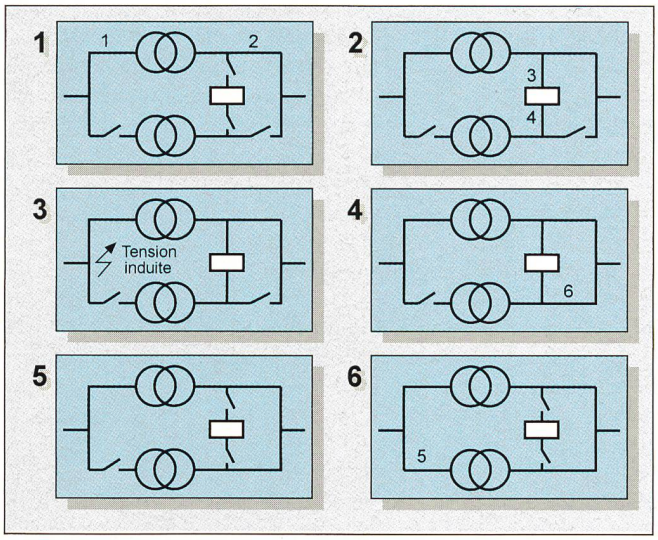


Figure 2 Les étapes de la prémagnétisation
voir texte

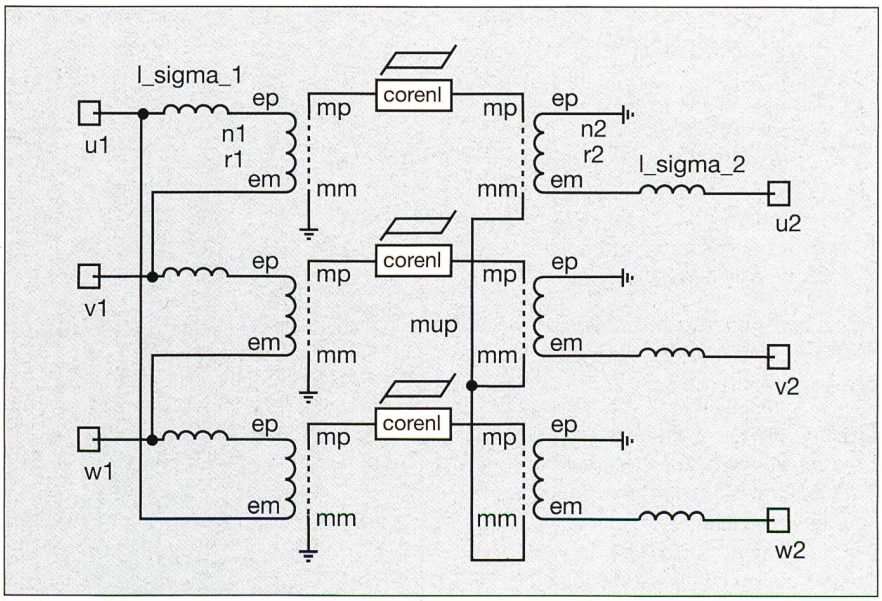


Figure 3 Modèle du transformateur

La liaison entre le circuit électrique et magnétique est faite à l'aide d'un girateur qui impose un potentiel magnétique. Le transformateur étant constitué de trois colonnes magnétiques, on trouve sur le modèle trois réluctances magnétiques non linéaires *(corenl)*, six girateurs et six inductances de fuite *(l_sigma_1, ..., l_sigma_3)*.

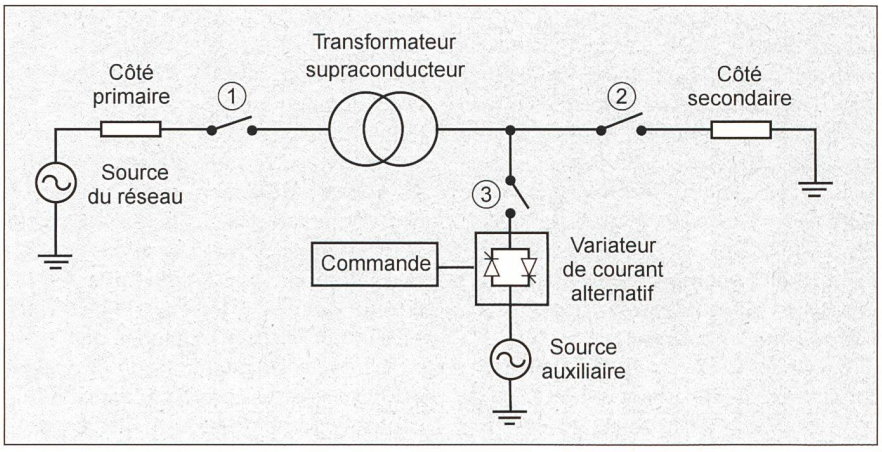


Figure 4 Modèle pour la simulation de l'enclenchement doux

primaire du transformateur est, d'un point de vue technique, difficilement réalisable et donc, d'un point de vue économique, fort coûteuse.

Pour se défaire de la contrainte en tension imposée par la valeur nominale élevée du côté primaire, on peut utiliser les enroulements secondaires du transformateur. Dans ce cas, on impose à ceux-ci une tension triphasée synchronisée dont l'amplitude croît régulièrement d'une valeur nulle à la valeur nominale des enroulements secondaires (400 V). Une source possédant une tension de sortie de cet ordre de grandeur peut être facilement trouvée sur le marché, dans des conditions économiques avantageuses. Les conditions requises pour le branchement des enroulements primaires sur le réseau sont les suivantes:

- Les amplitudes des tensions du primaire du transformateur et du réseau ainsi que la fréquence doivent être identiques.
- L'ordre de succession des phases sur les bornes des enroulements primaires du transformateur doit correspondre à celui du réseau.
- Il ne doit plus subsister de déphasage entre les tensions du primaire du transformateur et du réseau.

La stratégie d'enclenchement à courant alternatif par les enroulements secondaires suit les étapes suivantes:

- Une tension triphasée synchronisée d'amplitude croissante est appliquée aux enroulements secondaires du transformateur supraconducteur.
- Cette tension provoque la circulation d'un courant dans les enroulements secondaires du transformateur. Ce courant génère un flux magnétique dans le noyau.
- La variation de ce flux induit une tension au côté primaire du transformateur qui est proportionnelle à la tension imposée au secondaire. On voit donc, aux bornes des enroulements primaires, une tension induite dont l'amplitude croît régulièrement d'une valeur nulle à la valeur nominale.
- Une fois la valeur nominale de la tension primaire atteinte, les conditions d'enclenchement doux du transformateur sont remplies et le disjoncteur primaire peut être fermé.

Comme source de tension triphasée permettant la prémagnétisation du transformateur supraconducteur on utilise un variateur de courant alternatif. La tension de sortie du variateur n'est certes pas parfaitement sinusoïdale mais on peut la considérer en première approximation comme telle.

On doit brancher le variateur de courant alternatif à une source basse tension possédant un déphasage tel que la tension induite au primaire du transformateur respecte les conditions requises pour le branchement sur le réseau. Ces conditions sont facilement satisfaites si l'on branche le variateur de courant alternatif au secondaire d'un autre transformateur qui possède les mêmes caractéristiques que le transformateur supraconducteur (rapport de transformation, groupe de couplage). Ce transformateur est branché en parallèle du transformateur supraconducteur. C'est la topologie que l'on trouve à Genève. Pour une application industrielle future, on peut prévoir l'alimentation du variateur de courant alternatif par un petit transformateur auxiliaire.

Etapes de la procédure de prémagnétisation

Pour décrire les étapes de la procédure de prémagnétisation, on se base tout d'abord sur le schéma de principe de la figure 1. On reconnaît les deux trans-

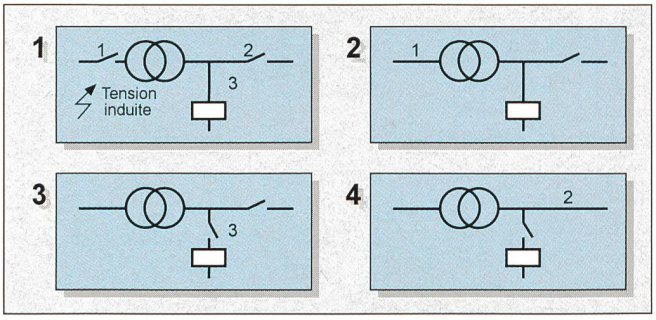


Figure 5 Les étapes de la prémagnétisation lors de la simulation

voir texte

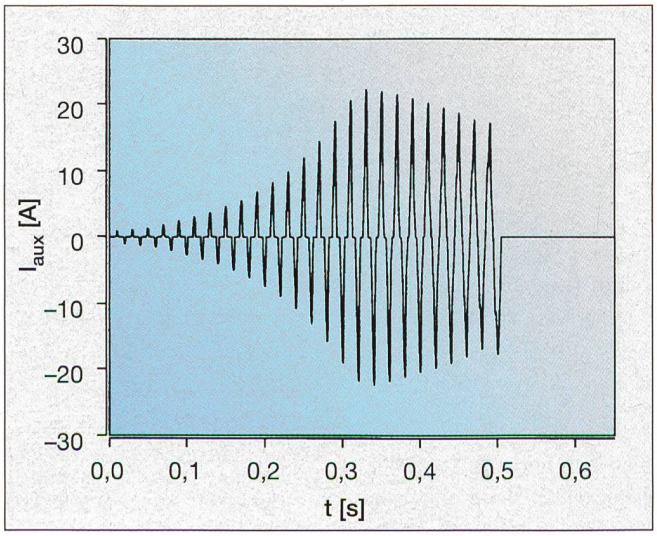


Figure 6 Simulation de l'enclenchement doux

I_{aux} courant secondaire de prémagnétisation fourni par une source auxiliaire

t temps

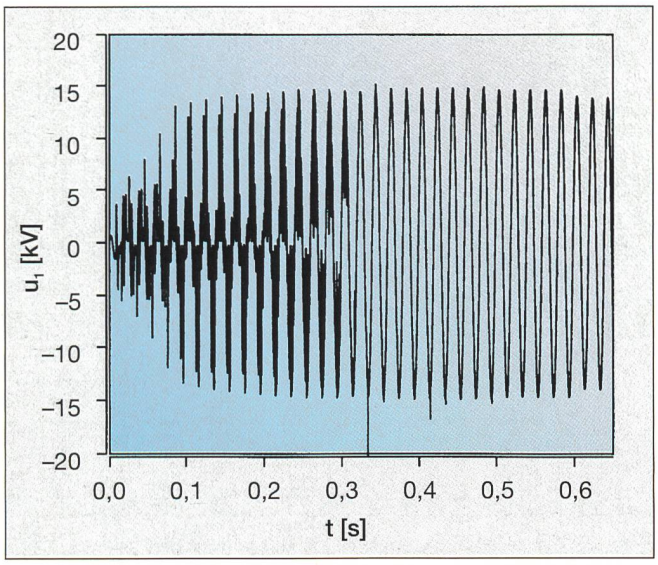


Figure 7 Simulation de l'enclenchement doux

u_1 tension induite au primaire d'une phase du transformateur
t temps

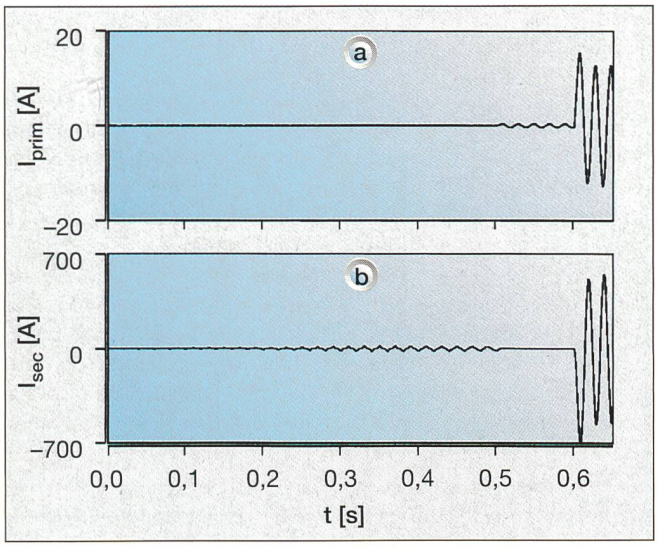


Figure 8 Simulation de l'enclenchement doux

a courant primaire I_{prim} d'une phase du transformateur
b courant secondaire I_{sec} d'une phase du transformateur
t temps

formateurs avec leurs disjoncteurs primaire et secondaire (*1, 2, 5* et *6*). Le variateur de courant alternatif est relié du coté secondaire des transformateurs par deux contacteurs (*3* et *4*) permettant son isolation. Le dispositif de commande actionne le variateur et contrôle la tension aux bornes du disjoncteur primaire du transformateur supraconducteur. Il contrôle la position des différents disjoncteurs et contacteurs et les commande automatiquement. Afin de ne pas alourdir le schéma, nous avons omis ces connexions. La description schématique de la procédure de prémagnétisation se trouve à la figure 2, les numéros ci-après correspondent aux numéros dans cette figure.

(1) A l'état initial, seul le transformateur auxiliaire est connecté au réseau (contacts *1* et *2* fermés). Dans le cas particulier du site des SIG, il alimente également la charge.

(2) Avant de commencer la procédure de prémagnétisation, la source commandable est branchée entre les deux secondaires des transformateurs (fermeture des contacts *3* et *4*).

(3) Le variateur de courant alternatif agit de sorte que le courant circulant dans le secondaire croisse lentement jusqu'à atteindre la valeur du courant à vide du transformateur. A cet instant, la tension induite au primaire est égale à la tension du réseau.

(4) On ferme tout d'abord le disjoncteur secondaire (contact *6*). Cette étape est nécessaire afin de faire passer dans les barres basse tension un éventuel courant de circulation dû aux tensions de court-circuit des deux transformateurs non égales.

(5) Le variateur de courant alternatif est débranché du secondaire du transformateur. Le transformateur fonctionne à vide, prémagnétisé par son secondaire.

(6) La fermeture du disjoncteur primaire peut être effectuée (contact *5*). Maintenant, les deux transformateurs fonctionnent en parallèle.

(7) Le transformateur auxiliaire peut être déconnecté du réseau moyenne tension.

Simulation numérique

Modèle non linéaire du transformateur

Avant de construire un dispositif final pour la prémagnétisation du transformateur, il est nécessaire de prévoir son fonctionnement. Pour cela, on a recours à la simulation numérique. Pour celle-ci, le logiciel *Saber* a été utilisé [3]. Il s'agit d'un outil de simulation numérique très efficace et puissant. Afin de modéliser l'allure non linéaire de la courbe B-H comprenant une hystérésis, il est nécessaire d'utiliser un modèle mathématique décrivant le comportement des circuits magnétiques [4]. Ce modèle est

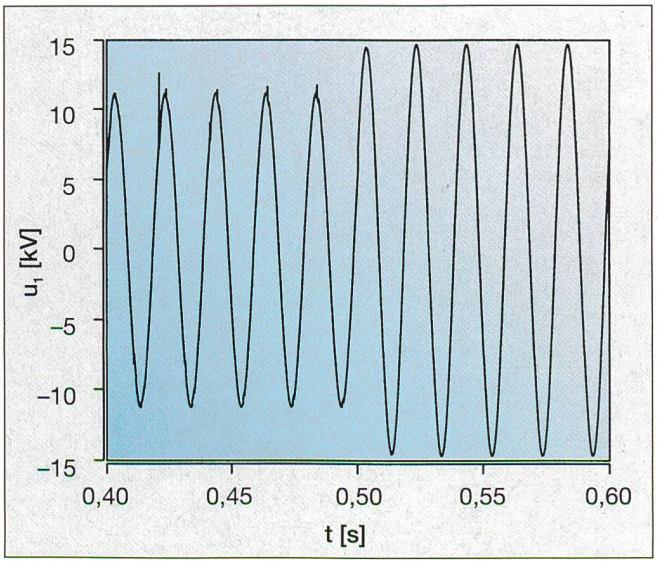


Figure 9 Simulation pour une tension auxiliaire inférieure à la tension secondaire nominale (prémagnétisation insuffisante)

u_1 tension induite au primaire du transformateur (fermeture du disjoncteur primaire à t = 500 ms)
t temps

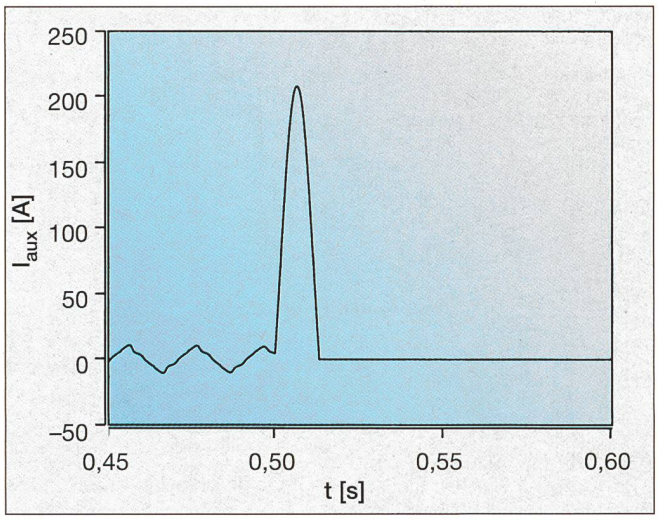


Figure 10 Simulation pour une tension auxiliaire inférieure à la tension secondaire nominale

I_{aux} courant secondaire de prémagnétisation
t temps

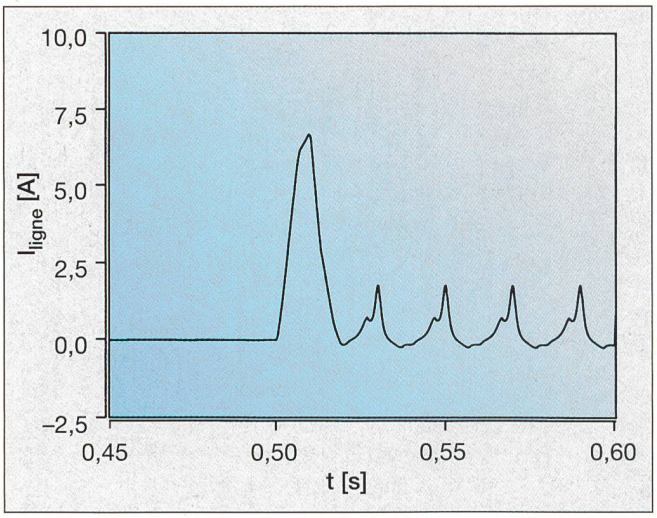


Figure 11 Simulation pour une tension auxiliaire inférieure à la tension secondaire nominale

I_{ligne} courant primaire du transformateur
t temps

utilisé par le logiciel de simulation. Il suffit dès lors d'introduire les bons paramètres.

Pour la simulation des circuits magnétiques, on utilise la dualité électrique–magnétique. Elle consiste à considérer le flux magnétique (respectivement le potentiel magnétique, la réluctance magnétique), semblable à un courant électrique (respectivement une tension électrique, une résistance électrique). La liaison entre le circuit électrique et magnétique est faite à l'aide d'un girateur qui impose un potentiel magnétique en fonction d'un courant et inversement. Pour tenir compte de l'allure non linéaire de la courbe B–H, la résistance magnétique devient non linéaire. Etant donné que le transformateur est constitué de trois colonnes magnétiques comprenant deux enroulements (primaire et secondaire), on trouve sur le modèle du transformateur trois réluctances magnétiques, six girateurs et six inductances de fuite (figure 3). Le modèle complet comprenant le transformateur, les disjoncteurs, la ligne et la source auxiliaire est représenté à la figure 4.

Résultats de la simulation

Dans la simulation et pour des raisons de simplicité, la séquence d'enclenchement doux du transformateur supraconducteur diffère légèrement de la séquence décrite plus haut. La description schématique, semblable à la figure 2, se trouve à la figure 5.

(1) Le variateur de courant alternatif, connecté au secondaire du transformateur supraconducteur par le contact *3* fermé, agit de sorte que le courant circulant dans le secondaire croisse lentement jusqu'à atteindre la valeur du courant à vide du transformateur. A cet instant, la tension induite au primaire est égale à la tension du réseau.

(2) On ferme tout d'abord le disjoncteur primaire (contact *1* fermé) au temps $t = 500$ ms.

(3) Le variateur de courant alternatif est débranché du secondaire du transformateur (contact *3* ouvert) au temps $t = 550$ ms. Le transformateur fonctionne à vide, prémagnétisé par son primaire.

(4) La charge est connectée (contact *2* fermé) au temps $t = 600$ ms.

On donne à la figure 6 une représentation du courant de prémagnétisation d'une des phases de la source auxiliaire. Dans cette simulation, on contrôle uniquement la tension de sortie du variateur de courant alternatif (à l'aide de l'angle

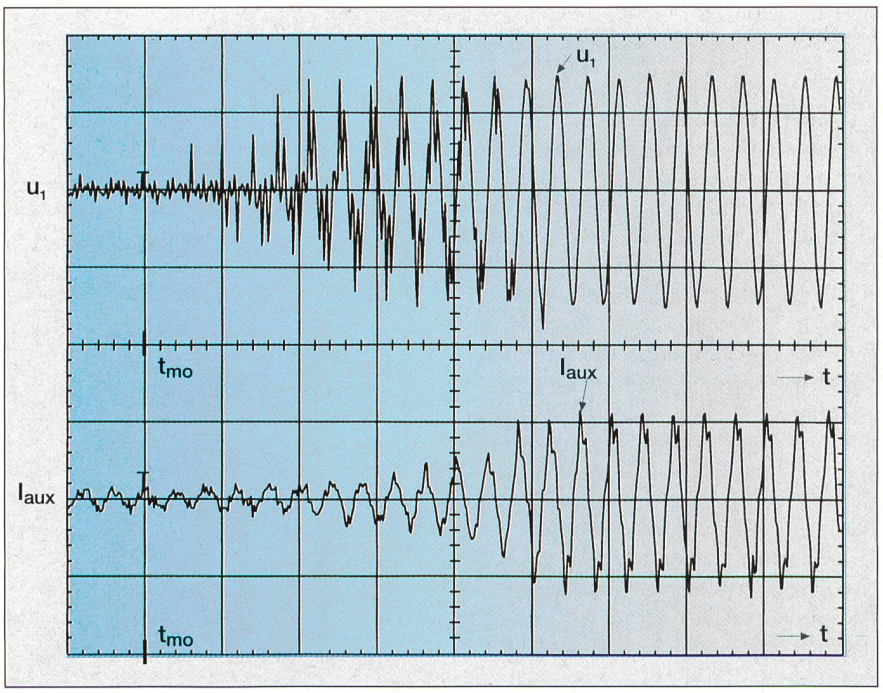


Figure 12 Procédure de prémagnétisation d'un transformateur de petite puissance

u_1 tension induite au primaire du transformateur (échelle: 100 V/div.)
I_{aux} courant de prémagnétisation lors de la prémagnétisation (échelle: 1 A/div.)
t temps (échelle: 20 ms/div.)
t_{mo} enclenchement d'un courant de prémagnétisation d'amplitude croissante

de retard d'allumage). La figure 7 représente la tension induite au primaire de l'une des phases du transformateur. La figure 8, *a* représente le courant primaire (une seule phase). La figure 8, *b* représente le courant secondaire. On remarque la prise en charge du courant magnétisant par l'enroulement primaire (au temps $t = 500$ ms) ainsi que l'effet de la mise en charge (au temps $t = 600$ ms). Notons qu'il n'y a aucun courant d'appel. A titre de comparaison, on a effectué la même simulation avec une tension de la source auxiliaire légèrement inférieure à la tension nominale secondaire du transformateur. La figure 9 donne une représentation de la tension induite au primaire du transformateur. On remarque qu'avant la fermeture du disjoncteur primaire ($t = 500$ ms), elle est inférieure à la tension du réseau. La source auxiliaire (figure 10) et le réseau (figure 11) voient apparaître un courant transitoire.

Essais sur un modèle réduit

Pour tester la procédure de prémagnétisation, un transformateur de petite puissance (2 kVA) à basse tension (100 V/400 V) a été utilisé. La figure 12 montre la tension induite au primaire du transformateur et le courant de prémagnétisation dans une des phases côté secondaire. A titre de comparaison, la figure 13 représente le courant d'enclenchement côté primaire sans le dispositif de prémagnétisation. L'effet de la saturation et l'asymétrie sont bien visibles sur la forme du courant. Il faut noter les échelles verticales différentes entre les figures 11 (1 A/div.) et 12 (5 A/div.). On remarque l'efficacité du système de prémagnétisation. En effet, avec le dispositif de prémagnétisation, le courant croît régulièrement (figure 12, courbe du bas) pour atteindre le courant de prémagnétisation alors que sans dispositif de prémagnétisation (figure 13), une grande impulsion de courant est nettement visible et le phénomène transitoire prend du temps avant de s'amortir.

Essais sur le transformateur supraconducteur 630 kVA

Des mesures ont été faites sur le transformateur supraconducteur 630 kVA en service aux SIG. Dans ces essais, il s'agissait de brancher le transformateur supraconducteur en parallèle du transformateur conventionnel qui alimentait déjà la charge. La figure 14 représente le courant transitoire primaire (une seule phase) lors de la fermeture du disjoncteur primaire du transformateur (étape *6*, fig. 2).

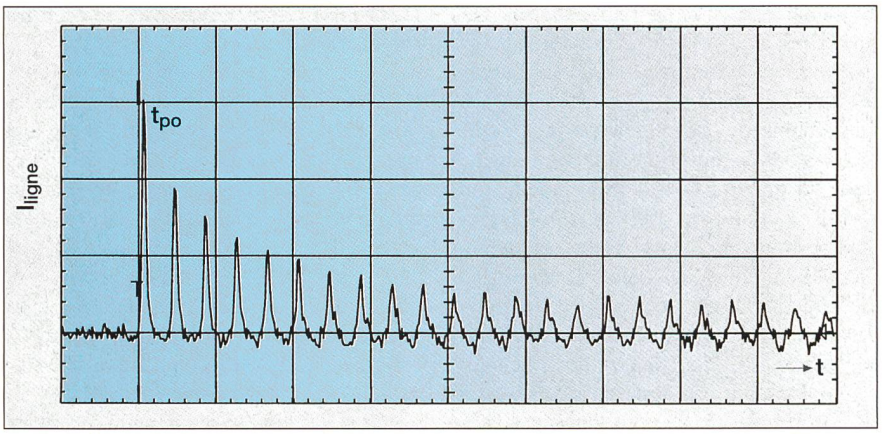


Figure 13 Enclenchement d'un petit transformateur sans prémagnétisation

I_{ligne} courant transitoire côté primaire lors de l'enclenchement du transformateur de la figure 12 sans le dispositif de prémagnétisation et sans charge au secondaire (échelle: 5 A/div.)
t temps (échelle: 50 ms/div.)
t_{po} temps de la fermeture du disjoncteur primaire

Dès cet instant, les deux transformateurs fonctionnent en parallèle pour alimenter la charge. Le courant de la figure 14 n'est donc pas uniquement le courant vide du transformateur, mais comporte encore le courant de charge. Cette dernière figure est remarquable et montre qu'il n'y a presque plus de phénomène transitoire. Le petit phénomène transitoire visible (une augmentation de l'amplitude de moins de 1 A ou moins de 10% du courant nominal) est dû aux inductances de fuite qui ne sont pas prémagnétisables. La stratégie d'enclenchement doux par prémagnétisation se révèle donc très efficace.

Conclusion

Un transformateur supraconducteur a été inauguré le 12 mars 1997 dans les locaux des Services Industriels de Genève. Il est actuellement en fonctionnement et alimente une partie de leurs nouveaux bâtiments au Lignon.

Un des premiers buts du projet global était de montrer la faisabilité d'un transformateur supraconducteur à haute température critique et de résoudre les problèmes de refroidissement, d'isolation et de fabrication à l'aide de rubans très délicats.

Les premières évaluations ont cependant montré des problèmes de rentabilité, en tout cas pour de faibles puissances (630 kVA). En plus du prix de fabrication, le remplacement de l'azote liquide évaporé par les pertes thermiques coûte plus que les pertes joules dans les conducteurs en cuivre. Par contre, si l'on considère les transformateurs de plus de 100 MVA, le recours à de telles technologies deviendra intéressant [5].

Etant donné qu'un tel appareil demande un dispositif auxiliaire de prémagnétisation, on peut imaginer munir un transformateur d'un système de contrôle

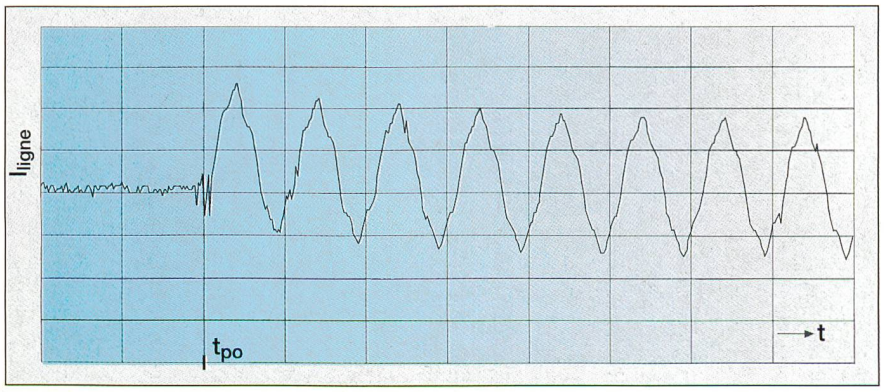


Figure 14 Enclenchement d'un transformateur supraconducteur 630 kVA

I_{ligne} courant transitoire primaire lors de l'enclenchement du transformateur (échelle: 1 A/div.)
t temps (échelle: 20 ms/div.)
t_{po} temps de la fermeture du disjoncteur primaire

en temps réel, voire de dispositifs supplémentaires qui ne font actuellement pas partie des transformateurs conventionnels tels que, par exemple, les filtres actifs. On peut même envisager, en utilisant judicieusement la propriété du courant critique, d'intégrer à l'intérieur même du transformateur un limiteur de courant supraconducteur. Les transformateurs passeraient ainsi au statut de dispositif électrique réalisant une fonction de transformation flexible de tension. Les concepteurs du réseau électrique n'achèteraient donc plus un appareil isolé auquel ils doivent ajouter de nombreuses protections mais plutôt une fonctionnalité, sous la forme d'un dispositif intégré, en fonction d'un cahier des charges précis.

En ce qui concerne l'étude et le développement du dispositif de prémagnétisation, le principe est utilisable pour tous les types de transformateurs et permet de résoudre de nombreux problèmes liés aux courants d'enclenchement, surtout dans le cas des réseaux de distribution sensibles, caractérisés par une puissance de court-circuit limitée. Du point de vue économique, l'équipement de prémagnétisation n'implique qu'un faible investissement. Le faible encombrement du système représente également un avantage.

Références

[1] *H.-R. Zeller:* Elektrotechnische Anwendungen der Supraleitung. Bull. ASE/UCS 81(1990)15, pp. 20–22.

[2] Une nouvelle étape importante dans l'histoire de la supraconductivité. Bull. ASE/UCS 88(1997)8, pp. 77–79.

[3] *N. Hugo:* Enclenchement doux d'un transformateur supraconducteur. Rapport de simulation. Laboratoire d'Electronique Industrielle, Lausanne, 1996.

[4] *D. C. Jiles* and *D. L. Atherton:* Theory of ferromagnetic hysteresis. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 61, pp. 48–60, 1986.

[5] *A. Demarmels:* Die Aspekte supraleitender Transformatoren. Supraleitung in der Energietechnik, München, 10./11. Mai 1995.

Supraleitende Verteiltransformatoren

Methode zum transientenlosen Einschalten eines supraleitenden Transformators durch Vormagnetisierung

Die grossen Fortschritte auf dem Gebiet der supraleitenden Materialien – man denke insbesondere an die Hochtemperatur-Supraleiter mit kritischen Temperaturen im Bereich des flüssigen Stickstoffs und höher – lassen erwarten, dass der Einsatz dieser Technologie bald auch auf dem Gebiet der Übertragung, Verteilung und Anwendung der elektrischen Energie Vorteile bringen wird. Grosse Chancen werden dabei ihrer Anwendung in Leistungstransformatoren beigemessen. Im Frühjahr dieses Jahres ist im Verteilnetz der Services Industriels de Genève (SIG) auch bereits der erste supraleitende Transformator mit Hochtemperatur-Supraleitern erfolgreich in Betrieb genommen worden. Gleichzeitig mit der Entwicklung dieses Transformators bei ABB Sécheron AG wurden am Laboratoire d'Electronique Industrielle der EPFL Lösungen für das besonders bei supraleitenden Transformatoren ausgeprägte Problem der hohen und nur langsam abklingenden Einschaltströme gesucht. Im vorliegenden Artikel wird nun beschrieben, wie mittels einer leistungselektronischen Hilfseinrichtung ein supraleitender Dreiphasentransformator durch Vormagnetisierung praktisch transientenlos eingeschaltet werden kann.

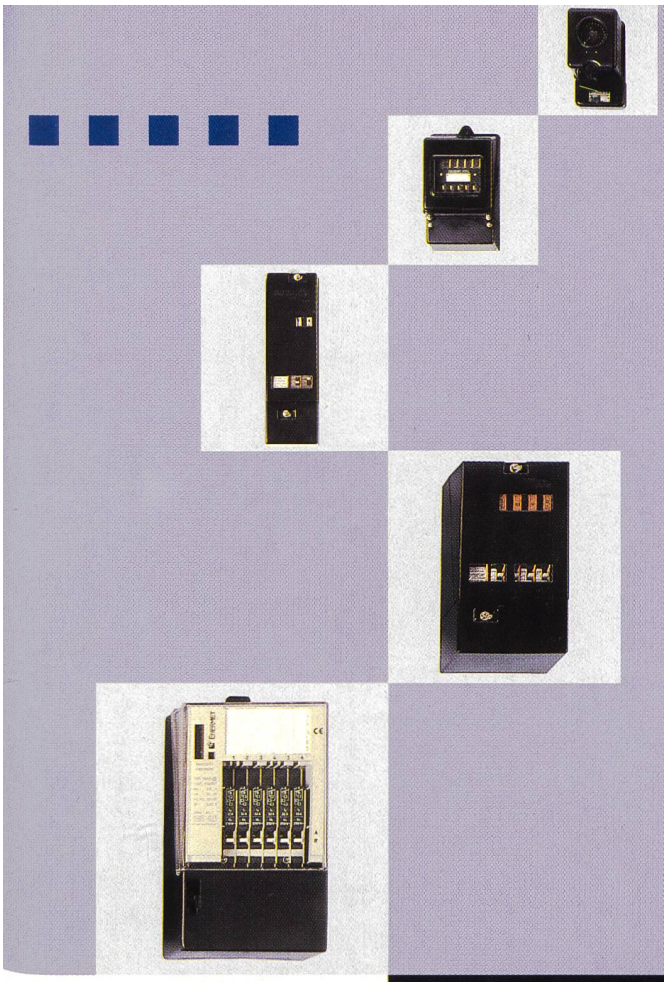
Das Prinzip dieser Methode besteht darin, dass vor dem Einschalten des Transformators auf seiner Sekundärseite ein Hilfsstrom eingespeist wird. Der Kern wird dabei synchron so vormagnetisiert, dass Amplitude und Phase der Magnetisierung bereits vor dem Einschalten jenen des Leerlaufbetriebs des Transformators entsprechen (Fig. 1 und 2). Die Vorgänge beim Einschalten nach dieser Methode wurden vorerst durch eine Simulation mit Hilfe der Software Saber untersucht (Fig. 3–11). Die Figuren 3–8 zeigen die Simulationsergebnisse für eine optimierte Vormagnetisierung, die Figuren 9–11 jene für eine etwas reduzierte Vormagnetisierung; letztere zeigen bereits wieder markante Einschaltstromspitzen. Im weiteren wurden Versuche mit einem kleineren Transformator (2 kVA, 100 V/400 V) durchgeführt; das Einschaltverhalten mit Vormagnetisierung wird in Figur 12 und jenes ohne Vormagnetisierung in Figur 13 gezeigt. Die Messungen zum Einschaltverhalten des supraleitenden 630-kVA-Transformators, welcher bei den SIG im Betrieb steht, schliesslich zeigen, dass die transienten Überströme dank der Vormagnetisierung klein bleiben. Die noch sichtbaren temporären Stromanteile (Fig. 14) betragen weniger als 10% des Nennstromes. Sie sind auf die Streuinduktivitäten des Transformators zurückzuführen und können durch die Vormagnetisierung nicht eliminiert werden; beim Einschalten des Transformators sind sie aber ohne weiteres tolerierbar.

ETG SEV/ASE

Connaissez-vous l'ETG?

La Société pour les techniques de l'énergie de l'ASE (ETG) est un *Forum national* qui s'occupe des problèmes actuels des systèmes d'énergie électrique dans le cadre global de toutes les formes de l'énergie. En tant que *société spécialisée de l'Association Suisse des Electriciens* (ASE), elle se tient à la disposition de tous les spécialistes et utilisateurs intéressés du domaine des techniques de l'énergie.

Pour de plus amples renseignements et documents, veuillez prendre contact avec l'Association Suisse des Electriciens, Luppmenstrasse 1, 8320 Fehraltorf, téléphone 01 956 11 11.



Seit über 50 Jahren entwickeln und produzieren wir Rundsteuerempfänger.

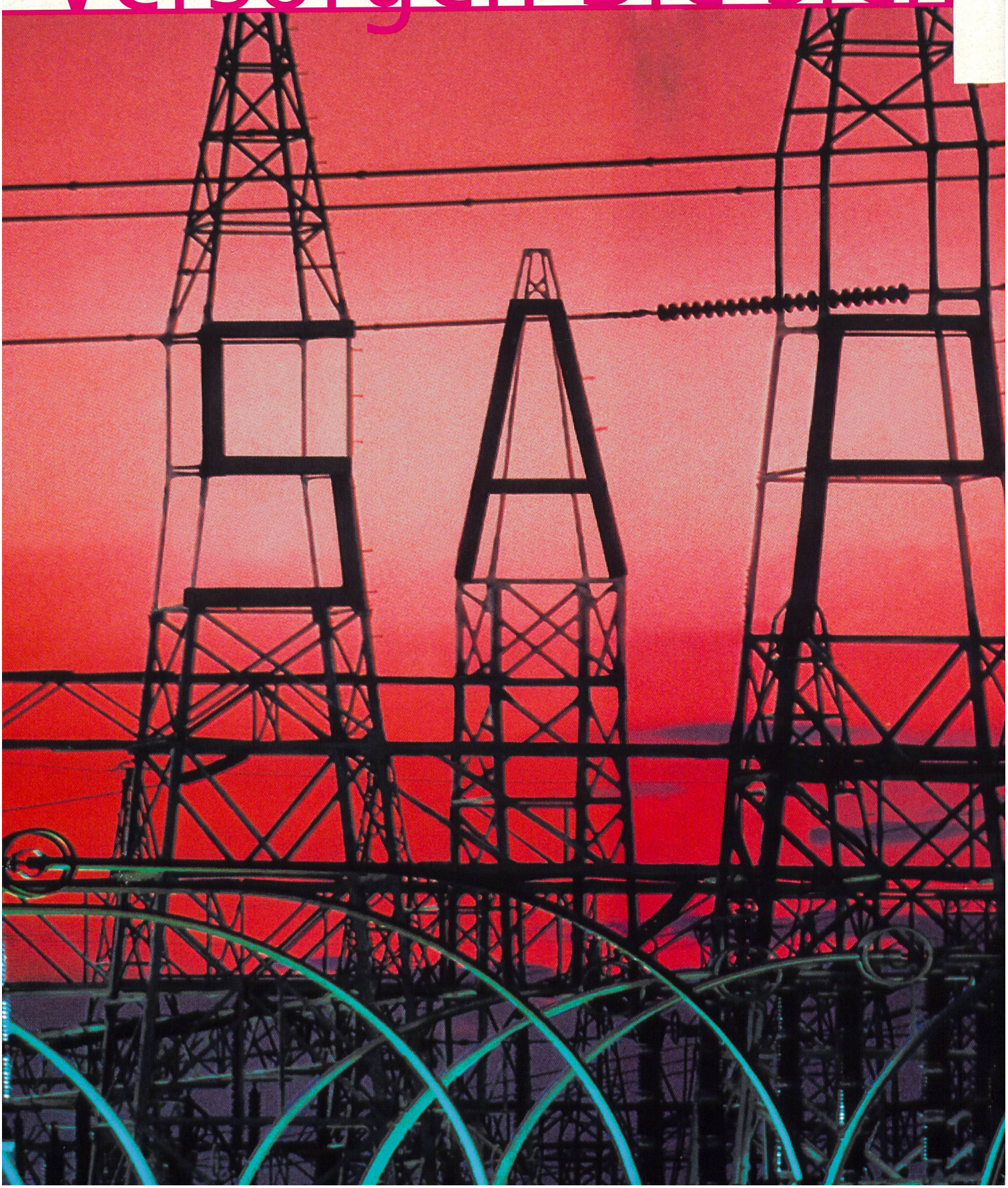
RO, unsere neue Empfängerfamilie, setzt die erfolgreiche Tradition fort.

- 5 steckbare 16 A-Relais
- Intelligente Funktionen bei fehlendem Signal
- Optische Schnittstelle für Parametrierung und Diagnose
- Kurze Lieferfristen und optimaler Service dank Schweizer Produktion

ENERMET

ENERMET AG ■ UNDERMÜLISTRASSE 28 ■ CH-8320 FEHRALTORF ■ TEL. 01/954 81 11 ■ FAX 01/954 81 01

Versorgen Sie sich



Live-Präsentation

Verrechnungs- und Kundeninformationssystem IS-U von SAP.
Dienstag, 9. 12. 1997, im Hotel Mövenpick, Egerkingen
13.30 bis 17.00 Uhr

mit Informationen.

Die Liberalisierung des Strom- und Gasmarktes verlangt ein zukunftsgerichtetes Verrechnungs- und Kundeninformationssystem. Deshalb entwickelt SAP mit der Industry Solution for Utilities (IS-U) eine branchenspezifische Lösung als Ergänzung zum integrierten System SAP R/3. Am Nachmittag des 9. Dezember 1997 stellen wir Ihnen IS-U vor, informieren Sie über die Erfahrungen in einem Pilotprojekt und zeigen Ihnen auf, wie Sie mit vorkonzipierten Systemen für die Versorgungswirtschaft und mit Outsourcing SAP R/3 schlank, zielgerichtet und kostengünstig einführen können. Verschaffen Sie sich neue Energien für Informatik, und versorgen Sie sich mit Informationen aus erster Hand.

Wir laden Sie ein.
Verlangen Sie das Detailprogramm:
Telefon 032 344 72 94
oder per Telefax 032 344 72 92.

SAP (Schweiz) AG
Leugenestrasse 6
2504 Biel
Telefon 032 344 71 11
Telefax 032 344 72 11

CLS SYSTEMHAUS

STG-Coopers &Lybrand

COMPAQ

SAP®
Integrierte Standardsoftware.

Qui dans le monde fait autant avancer l'électricité?

Avec 4 grandes marques mondiales, Merlin Gerin, Modicon, Square D et Telemecanique, Schneider est le spécialiste incontesté des métiers de l'électricité.
Avec plus de 60000 personnes dans 130 pays, tous professionnels de la distribution électrique, du contrôle industriel et de l'automatisation, Schneider contribue à faire avancer l'électricité partout dans le monde. Avec un seul et même objectif: répondre chaque jour à vos besoins. Parce que personne dans le monde ne fait autant avancer l'électricité.

Schneider Electric (Suisse) SA
Fax. +(41) 031 917 33 55
http://www.schneiderelectric.com

GROUPE SCHNEIDER

■ Merlin Gerin ■ Modicon ■ Square D ■ Telemecanique