

Cahier Technique N°13 bis

Principe de réduction des courants d'enclenchement des transformateurs

Versions du document :

Version	Date	Modification	Rédigé par
Préliminaire	12.04.2011	Version préliminaire	Petri
V1.0	02.11.2011		Petri
A	18/07/2018	Mise en forme mise à jour	JF

SOMMAIRE

1 Introduction	4
2 Excitation d'un transformateur	5
3 Excitation d'un transformateur monophasé.....	6
4 Réduction du courant d'enclenchement des transformateurs triphasés.....	8
4.1 Modèle physique appliqué - approximation	8
4.2 Etats de commutation asymétriques.....	9
4.2.1 Phase unique connectée à la source de tension	9
4.2.2 Deux phases connectées à la source de tension	9
4.3 Evaluation des séquences de commutation spéciales	11
4.3.1 Déconnexion optimale pour obtenir des valeurs de flux résiduel nulles.....	11
4.3.2 Excitation optimale à partir d'un flux résiduel nul.....	12
4.3.3 Les valeurs de flux résiduel les plus défavorables.....	13
4.3.4 Valeurs de flux extrêmement élevées	14
4.4 Stratégie de commutation	16
4.4.1 Commutation avec des coupe-circuits commandés indépendamment dans les trois phases	16
4.4.2 Commutation avec des coupe-circuits de commandes communes pour les phases.....	18
4.4.3 Commutation avec des commandes communes temporisées de 5-0-5 ms.....	18
4.4.4 Commutation avec des commandes communes temporisées de 0-6,66-3,33 ms	19
4.4.5 Commutation avec des commandes communes temporisées de 0-0-0 ms.....	20
4.5 Excitation des transformateurs à partir du côté en triangle.....	21

1 Introduction

Le "courant d'enclenchement" est un phénomène connu : l'excitation incontrôlée d'un transformateur peut provoquer un courant transitoire de grande amplitude à cause de la saturation du noyau de fer. L'amplitude de ce courant d'enclenchement est proche de celle des courants de court-circuit, et peut être mortelle ou endommager le transformateur. Les relais de protection modernes sont conçus pour résister à ces fortes distorsions du courant, mais la qualité de l'alimentation en est amoindrie. Ce document décrit le phénomène du courant d'enclenchement et analyse la possibilité de contrôler la commutation. A partir des propositions de plusieurs publications, Protecta a créé un système de commutation contrôlée avec un matériel à microprocesseur moderne. Les conclusions des expériences de terrain justifient l'application de la commutation contrôlée pour éliminer le courant d'enclenchement. Cette fonction de contrôle a été intégrée dans les dispositifs de protection Protecta standards.

2 Excitation d'un transformateur

Quand un transformateur est excité, on peut souvent mesurer un courant transitoire élevé. Ce "courant d'enclenchement" est illustré sur la

Fig. 0-1 qui montre une forme d'onde de courant distordue type et ses valeurs crêtes élevées.

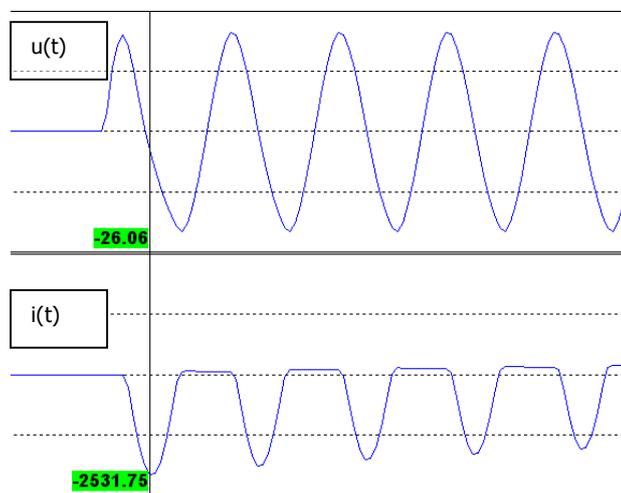


Fig. 0-1 Onde transitoire type lors de l'excitation d'un transformateur

Ce courant provoque des forces dynamiques élevées dans les enroulements du transformateur, réduit la durée de vie prévue du transformateur et peut aussi endommager les enroulements. La difficulté pour les dispositifs de protection est que ce courant circule uniquement du côté excité du transformateur, et que la protection différentielle peut déclencher le transformateur immédiatement. Les dispositifs de protection modernes résolvent ce problème en analysant la forme spécifique du courant, mais à cause des forces dynamiques élevées contenues dans le transformateur, et à cause de l'effet sur tout le réseau, il est souhaitable d'éliminer ces pointes de courant élevées.

L'analyse du courant d'enclenchement d'abord dans un transformateur monophasé puis dans un transformateur triphasé explique les facteurs d'influence et donne des indications pour les éliminer avec une commutation contrôlée.

3 Excitation d'un transformateur monophasé

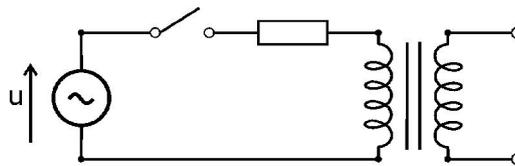


Fig. 0-1 Excitation d'un transformateur monophasé

La relation entre le flux dans le noyau de fer $\Phi(t)$ et la tension $u(t)$ est

$$u(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

En intégrant la tension, on peut calculer le flux, lequel démarre à sa valeur résiduelle Φ_e .

$$\Phi(t) = \Phi_e + \int_{t_e}^t u(t) dt$$

Le flux résiduel Φ_e reste dans le noyau de fer à la fin de la précédente déconnexion du transformateur.

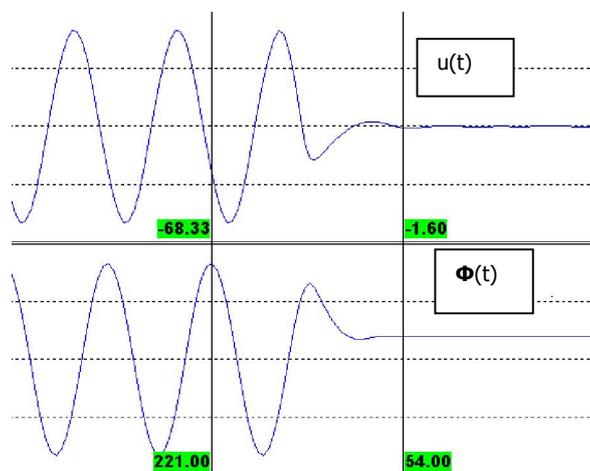


Fig. 0-2 Onde transitoire type lors de la déconnexion d'un transformateur

La Fig. 0-2 montre une forme d'onde de tension type enregistrée pendant le processus de déconnexion, avec la fonction flux-temps calculée.

Comme la Fig. 0-2 le montre, au moment de l'ouverture du coupe-circuit, la tension ne tombe pas immédiatement à zéro. Cela est dû à l'énergie inductive stockée dans l'enroulement du transformateur et à l'énergie capacitive stockée dans les capacités distribuées du transformateur. La tension décroît avec des fluctuations progressives, et pendant ce temps, le flux change aussi. A la fin de ce processus, le flux résiduel qui n'est pas nul est stocké dans le noyau de fer. A la prochaine excitation, le flux démarre avec cette valeur.

La Fig. 0-3 montre une déconnexion avec une valeur significative de flux résiduel, puis une excitation à un moment aléatoire. Dans ce cas, la valeur du flux transitoire est supérieure au flux de saturation du noyau de fer; il en résulte un courant d'enclenchement élevé.

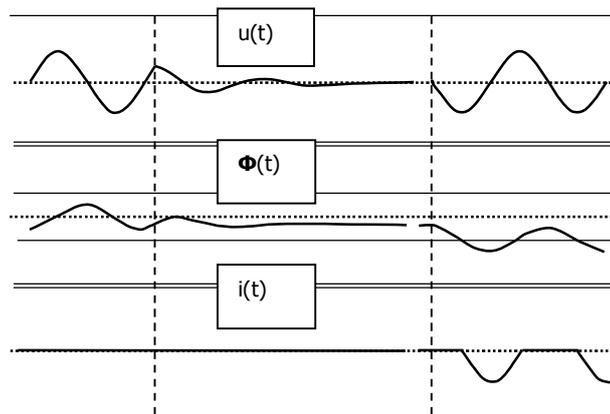


Fig. 0-3. *Excitation à un moment aléatoire*

La Fig. 0-4 montre cependant une excitation qui trouve le moment optimal où le flux résiduel est égal à la valeur instantanée du flux sinusoïdal potentiel. Si la valeur de crête transitoire n'est pas supérieure à la valeur du flux de saturation du noyau de fer, il n'y a pas de courant d'enclenchement.

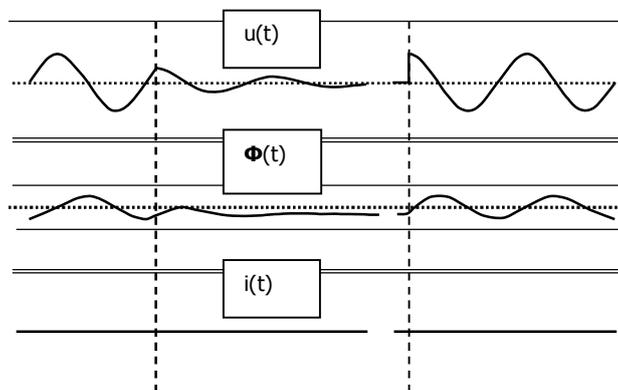


Fig. 0-4 *Excitation au moment optimal*

Comme le montrent la Fig. 0-3 et la Fig. 0-4, le principe de la commutation contrôlée consiste à trouver le moment d'excitation où le flux résiduel est égal à la valeur instantanée du flux constant sinusoïdal. Le courant d'enclenchement peut ainsi être éliminé.

4 Réduction du courant d'enclenchement des transformateurs triphases

4.1 Modèle physique appliqué - approximation

Il existe plusieurs types de transformateurs triphasés, dont le nombre est augmenté par la construction du noyau de fer et le nombre et les groupes de connexion des bobines.

Concernant les noyaux de fer, le groupe de transformation peut être constitué de trois transformateurs monophasés ou les noyaux de fer peuvent être réunis. Dans ce second cas, le nombre de branches peut être de trois ou de cinq. Sur une branche de noyau de fer, il peut y avoir deux ou trois bobines constituant les niveaux de tension primaire, secondaire et éventuellement tertiaire. Le couplage des bobines des différents niveaux de tension peut être relié ou non à la terre, en étoile, en triangle ou en zigzag. Lors de l'excitation, le comportement transitoire de chacun de ces types nécessite une analyse individuelle.

Ce document analyse tout d'abord une de ces configurations : niveau primaire en étoile à trois branches relié à la terre et niveau secondaire en triangle, sans niveau de tension tertiaire. L'excitation est supposée être effectuée à partir du côté en étoile relié à la terre (Fig.1-1. et Fig.1- 2).

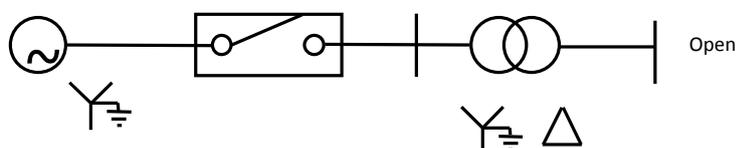


Fig. 0-1 Schéma d'excitation d'un transformateur YoD11

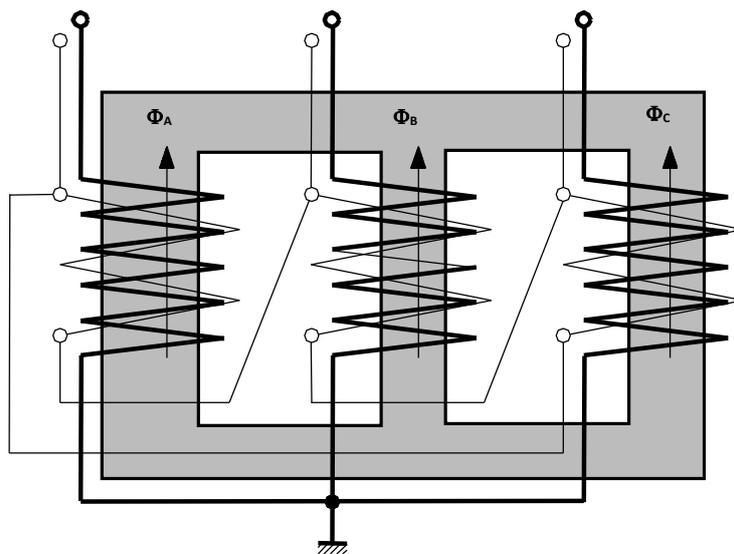


Fig. 0-2 Construction du transformateur analysé et définition de la direction positive du flux

Pour analyser les principes, il n'est pas nécessaire que le transformateur soit modélisé dans tous ses détails. Dans cette description, les simplifications suivantes sont appliquées.

- Le transformateur est supposé être complètement symétrique, ce qui signifie que l'écart entre la phase centrale et les deux autres phases est négligée (la résistance magnétique des culasses est supposée être nulle).
- La charge sur le secondaire du transformateur est négligée; toutes les autres valeurs de réactance, hormis la réactance de magnétisation, sont négligées.
- Notre but est d'éviter les courants d'enclenchement magnétisants. Cela peut être réalisé en maintenant le flux au-dessous de la saturation, et le moyen est la commutation contrôlée. Dans cette méthode, le moment de fermeture des pôles du coupe-circuit est commandé de manière optimale. Il en résulte que les valeurs de flux ne peuvent pas être supérieures à la valeur de saturation. Si cela est réussi, sur cette plage, l'approximation de la réactance par une valeur linéaire unique est une hypothèse acceptable. Bien entendu, avec ce modèle, la valeur de crête maximum ne peut pas être calculée, mais notre but n'est pas de calculer les valeurs de crête, mais de les éviter. Il est évident cependant qu'avec l'augmentation du flux, le courant atteint des valeurs extrêmement élevées, ce qui ne dépend pas seulement du transformateur, mais aussi de la réactance du réseau d'alimentation.

4.2 Etats de commutation asymétriques

A la fermeture ou à l'interruption du courant, les trois pôles des coupe-circuits ne peuvent pas fonctionner en même temps. Dans cette procédure, il y a des moments où une seule phase est connectée et de moments où deux phases sont connectées. Ces états vont être analysés séparément.

Dans les transformateurs à trois branches - en ne considérant que la réactance de magnétisation - le flux ne peut pas quitter le noyau de fer. Par conséquent, à tout moment, la somme des trois valeurs de flux est nulle (une valeur non nulle n'est possible que si les trois phases sont excitées et que la somme des excitations n'est pas nulle). L'équation de base est donc :

$$\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$$

4.2.1 Phase unique connectée à la source de tension

La phase connectée est la phase "A" dont la tension est "forcée". Selon la loi d'induction,

$$u_A(t) = N \frac{d\Phi_A(t)}{dt}$$

Le flux sera donc

$$\Phi_A(t) = \Phi_{A0} + \frac{1}{N} \int u_A(t) dt$$

Les lignes de flux sont continues le long des branches du noyau de fer des phases déconnectées. Comme nous avons supposé une symétrie parfaite et que les résistances magnétiques des trois phases sont identiques, la moitié du flux est dans la branche "B" et l'autre moitié dans la branche "C". Leur direction est opposée à la direction positive de la Fig. 0-2.

$$\Phi_B(t) = \Phi_C(t) = -\frac{\Phi_A(t)}{2}$$

Par conséquent, les tensions induites dans les phases "B" et "C" sont identiques - égales à la moitié de la tension connectée à la phase "A" - et de directions opposées :

$$u_B(t) = u_C(t) = -\frac{u_A(t)}{2}$$

Remarque : comme la somme des trois phases est nulle, la somme des tensions dans le triangle secondaire est également nulle; aucun courant n'est induit dans les enroulements connectés au triangle secondaire. L'effet des enroulements secondaires sur le flux n'a pas besoin d'être pris en compte.

4.2.2 Deux phases connectées à la source de tension

Les phases connectées sont supposées être la phase "A" et la phase "B" dont la tension sinusoïdale est "forcée". Selon la loi d'induction,

$$u_A(t) = N \frac{d\Phi_A(t)}{dt}$$

$$u_B(t) = N \frac{d\Phi_B(t)}{dt}$$

Par conséquent, les flux dans les branches sont :

$$\Phi_A(t) = \Phi_{A0} + \frac{1}{N} \int u_A(t) dt$$

$$\Phi_B(t) = \Phi_{B0} + \frac{1}{N} \int u_B(t) dt$$

Les lignes de flux peuvent courir le long du noyau de fer de la phase non connectée "C", de sorte que le flux à cet endroit est égal à la somme des flux des phases connectées ; sa direction est opposée à la direction positive de la Fig. 0-2. Comme les tensions sont les tensions de phase d'un système de tension symétrique,

$$-\Phi_C(t) = \Phi_A(t) + \Phi_B(t) = \Phi_{A0} + \Phi_{B0} + \frac{1}{N} \int (u_A(t) + u_B(t)) dt$$

La tension induite dans la phase "C" est

$$u_C(t) = N \frac{d\Phi_C(t)}{dt} = -(u_A(t) + u_B(t))$$

La tension de la phase non excitée "C" est identique à ce qu'elle serait à l'état excité.

Les considérations ci-dessus vont être appliquées dans l'analyse ci-dessous.

Remarque : comme, à tout moment, la somme des trois tensions est nulle, la somme des tensions induites dans les bobines secondaires est également nulle; par conséquent, aucun courant ne circule dans la boucle fermée (pas de composante de courant homopolaire). La conclusion est que l'enroulement connecté en triangle est sans influence sur la distribution du flux.

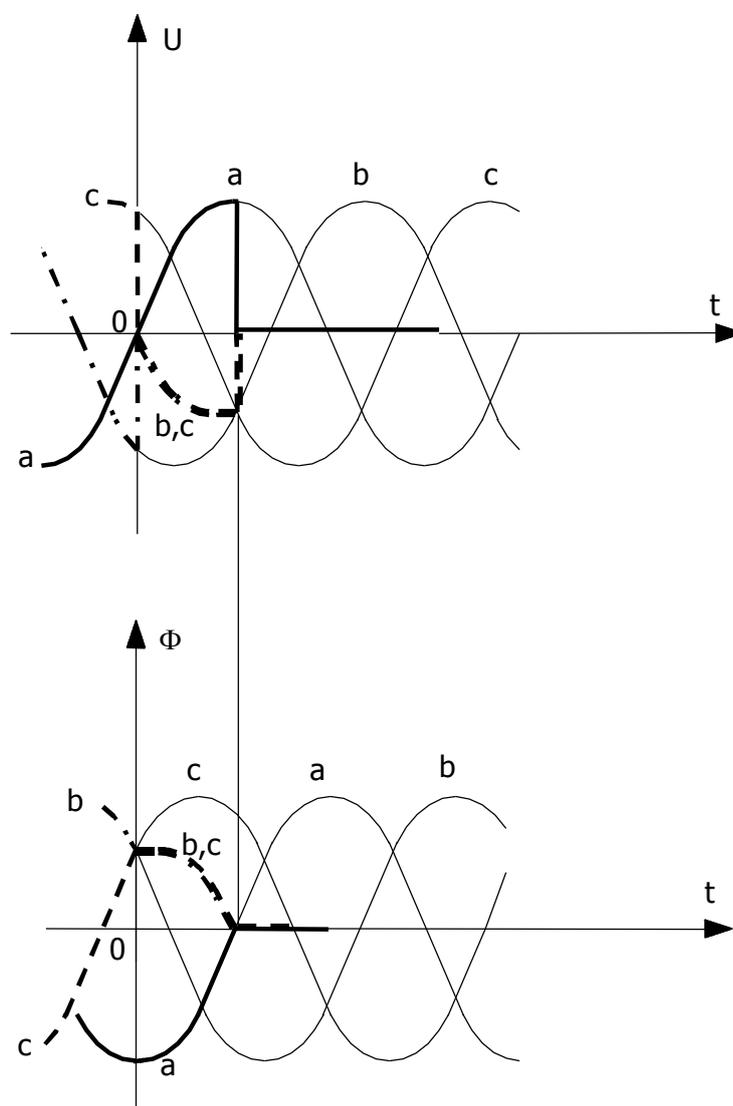
4.3 Evaluation des séquences de commutation spéciales

Dans ce chapitre, certaines séquences spéciales vont être sélectionnées parmi une infinité de variantes, et les conclusions générales finales seront basées sur ces processus de commutation spéciaux.

4.3.1 Déconnexion optimale pour obtenir des valeurs de flux résiduel nulles

Dans un système sous tension en permanence, quand la fonction flux-temps ne comprend pas de composante CC, les vecteurs de flux et les vecteurs de tension donnent des systèmes symétriques décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre, et les vecteurs de flux sont retardés de 90 degrés par rapport aux vecteurs de tension de référence. Dans ce cas, on déconnecte les phases "B" et "C" au même moment, quand la tension dans la phase "A" passe par zéro dans le sens positif. On appellera ce moment $t=0$. (Voir Fig. 0-3.) A ce moment, le flux dans la phase "A" atteint sa valeur crête négative, et les flux dans les deux autres phases ont une valeur égale à la moitié et une polarité opposée à celle du flux dans la phase "A".

Fig. 0-3 Séquence de déconnexion optimale pour obtenir un flux résiduel nul



Par conséquent, après ce moment, seule la phase "A" reste sous tension, et les valeurs instantanées de tension dans les phases "B" et "C" sont égales à la moitié de la valeur opposée à celle de la phase "A". Ce comportement est expliqué dans le chapitre "1.2.1 Phase unique connectée à la source de tension".

Après un quart de période, l'intégrale des valeurs instantanées positives de la phase "A" amène le flux à la valeur zéro dans la phase "A". Dans le même temps, les valeurs de flux dans les phases "B" et "C" passent également de la

demi-valeur positive à zéro. Par conséquent, si la phase "A" est déconnectée à 5 ms (un quart de période), le résultat sera une valeur de flux nulle sur les trois phases.

Hormis les états cycliquement symétriques et l'état de polarité opposée, c'est la seule séquence de commutation qui aboutit à un flux résiduel nul. Après toutes les autres séquences de déconnexion, le flux résiduel sera non nul sur au moins deux phases, mais habituellement sur les trois phases. Il est bien connu que le moment de la déconnexion des courants CA se produit normalement aux passages par zéro du courant (sinon, l'énergie inductive interrompue provoque des variations de courant et de tension du fait de l'interaction avec les capacités internes du transformateur). La conséquence est que, dans la pratique, le flux résiduel n'est pas nul.

Concernant les conclusions ci-dessus, il faut noter trois autres faits :

1. Quand les phases "B" et "C" sont déconnectées au passage par zéro de la tension sur "A", leur courant passe par zéro uniquement avec une condition de charge spéciale au moment défini. Par conséquent, dans le cas général, le courant doit être haché. Ce n'est pas le moment naturel de la déconnexion. Par conséquent, la probabilité de sélectionner cette séquence est faible (déconnexion de courant réactif pur).
2. L'analyse ci-dessus ne tient pas compte de la boucle d'hystérèse de la courbe de magnétisation du noyau de fer. La boucle a pour effet qu'au passage par zéro du courant, le flux n'est pas nul, de sorte qu'au moment naturel du passage par zéro, il y a toujours un flux résiduel qui n'est pas nul. Cela montre aussi qu'il est pratiquement impossible d'obtenir un flux résiduel nul avec une simple déconnexion.
3. L'analyse ci-dessus ne tient pas compte des capacités distribuées du transformateur ni de celles des autres éléments connectés au transformateur. L'effet de ces capacités est le suivant : quand le courant sur une inductance n'est pas nul, elle stocke de l'énergie inductive. Si la déconnexion "hache" le courant, cette énergie inductive est transférée aux capacités, changeant l'énergie capacitive. Le résultat est un processus ondulatoire qui décroît en fonction de l'amortissement interne. Ces ondulations peuvent être détectées dans les formes d'onde de tension. Cela peut influencer sur les valeurs de flux résiduel dans le transformateur.

4.3.2 Excitation optimale à partir d'un flux résiduel nul

En supposant un flux résiduel nul (résultant de la déconnexion spéciale décrite dans la section 0), on excite d'abord la phase "A" avec la valeur crête de tension (voir Fig. 0-4). Dans ce cas, la phase "A" démarre avec le flux de régime permanent et aucun surflux n'est prévu. Cependant, dans les phases "B" et "C", les flux commencent à changer immédiatement à cause de la tension $-u_A/2$ induite, et ils se mettent à augmenter dans la direction négative. Après 5 ms, ils atteignent la moitié de la valeur de crête du flux de régime permanent, qui est la valeur instantanée du flux de régime permanent à ce moment-là. Si une de ces deux phases est excitée à ce moment-là, il n'y aura pas de transitoire dans le flux, le régime permanent est atteint. (La commutation de la troisième phase peut avoir lieu n'importe quand; le délai n'a aucune influence. Elles peuvent être commutées simultanément).

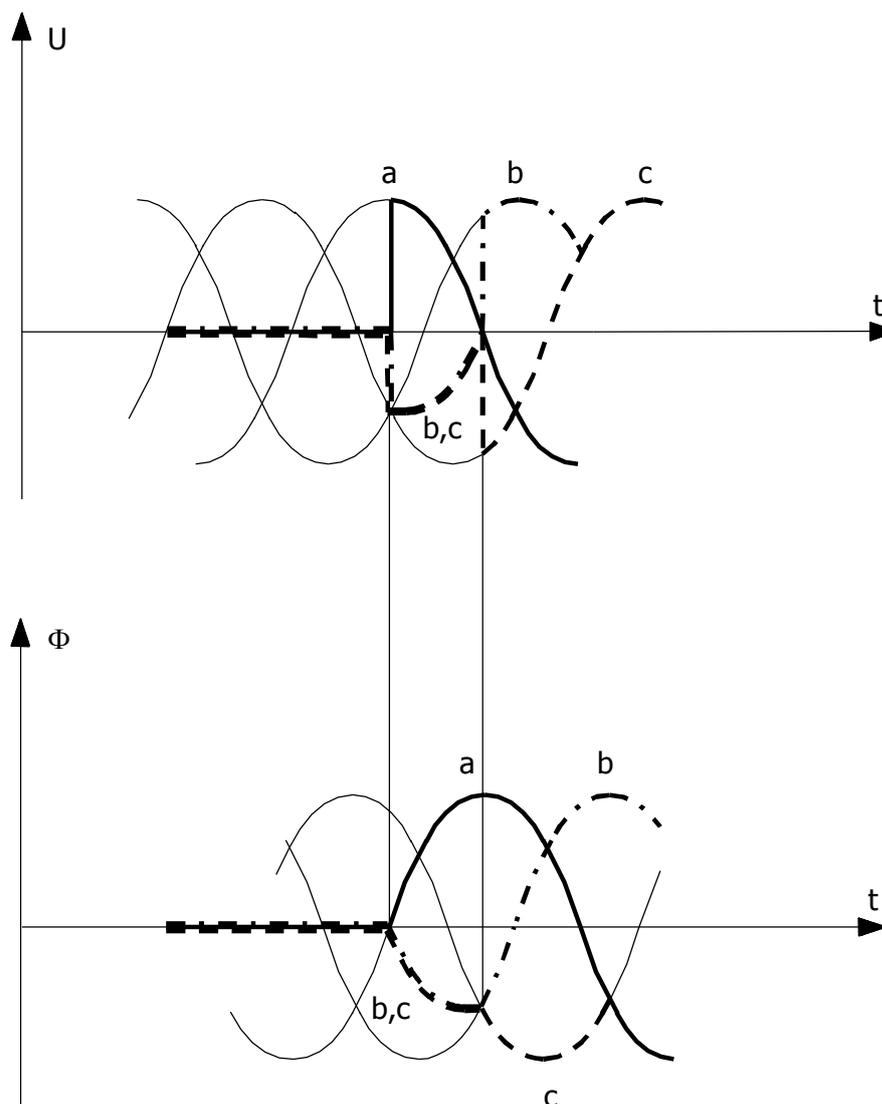


Fig. 0-4 Excitation optimale après un flux résiduel nul

Hormis les états cycliquement symétriques et l'état de polarité opposée, c'est la seule séquence de commutation qui ne produit pas de surflux transitoire à partir d'un flux résiduel nul. Toutes les autres séquences de commutation ont pour conséquence un surflux sur au moins deux phases, mais généralement sur les trois phases, ce qui a pour conséquence une valeur crête de courant d'enclenchement élevée.

Il est évident que si le flux résiduel dans une des phases n'est pas nul, cette séquence de commutation provoquera un surflux et des pointes de courant d'enclenchement élevées.

4.3.3 Les valeurs de flux résiduel les plus défavorables

Dans un état d'excitation stable, quand le flux ne contient pas de composante CC, qu'aussi bien les flux que les tensions forment des systèmes symétriques et que le décalage entre les tensions et les flux associés est de 90° , on déconnecte d'abord la phase "B". Le moment de la déconnexion n'a aucune influence car les deux phases excitées restantes maintiennent l'état symétrique (voir Fig. 0-5).

On déconnecte ensuite la seconde phase "A" 150 degrés après le passage par zéro (8,3333 ms) (c'est le moment où les valeurs instantanées des phases "A" et "B" sont identiques, les tensions étant égales à la moitié de la valeur crête. Après cela, seule la phase "C" est excitée, la valeur instantanée au moment de la commutation étant égale à la valeur crête. Le résultat est que la tension dans la phase "A" ne saute pas; la valeur est continuellement égale à la moitié de la valeur de phase normale. Il faut 5 ms de plus (un quart de période) pour atteindre zéro. Comme la Fig. 0-5 le montre, la surface sous la courbe de tension est augmentée de la surface grisée. La conséquence est que le

flux, comme intégrale de la tension, dépasse d'environ 36,6 % la valeur crête. Si, à ce moment-là (13,3333 ms après le passage par zéro), la tension est coupée sur cette phase aussi, cette valeur est conservée comme flux résiduel.

Il faut souligner que cette valeur extrême a très peu de réalité, cette valeur de 136,6 % étant improbable. L'explication est que la saturation asymétrique des branches du noyau de fer change la résistance magnétique des sections. Par conséquent, la distribution du flux est différente de celle du flux symétrique. Le flux résiduel est influencé par les pertes d'hystérèse, et les transitoires capacitifs peuvent aussi réduire les valeurs de flux résiduel.

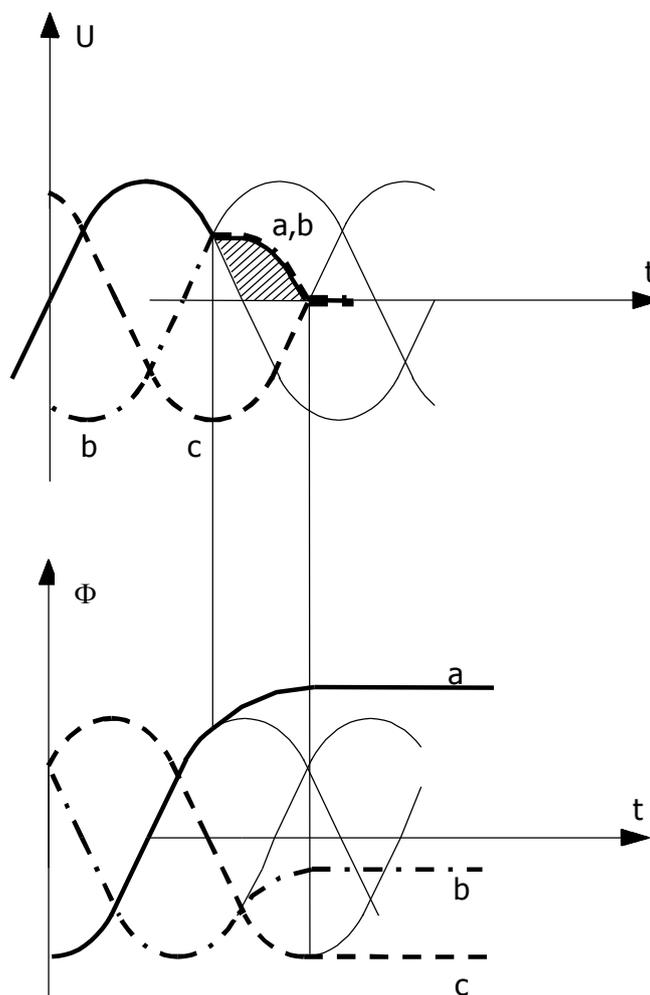


Fig. 0-5. Valeur théoriquement la plus élevée du flux résiduel

4.3.4 Valeurs de flux extrêmement élevées

Supposons une valeur extrêmement élevée du flux résiduel, comme il est indiqué dans la section 1.3.3. On excite d'abord la phase "B" lorsqu'elle passe par zéro dans le sens négatif (c'est-à-dire à -3,3333 ms en prenant la phase "A" comme référence). A ce moment-là, la demi-valeur de tension de "A" est induite avec la valeur opposée, c.-à-d. positive, et le flux commence à augmenter. On excite ensuite la phase "A" quand la tension augmente, et la valeur est la moitié de la valeur crête de régime permanent (c.-à-d. à +1,6666 ms par rapport au passage par zéro dans le sens positif). Avec cette chronologie, on obtient la plus grande surface tension-temps dans la "A". Si la polarité du flux résiduel est la même, la valeur crête de flux est à son maximum; elle est égale à 2,3666 fois la valeur crête normale. Si le flux résiduel tel qu'il a été calculé précédemment est de 1,3666, en ajoutant cette valeur, la valeur crête maximum sera de 3,7333 fois la valeur crête nominale. Cela peut donner la crête de courant d'enclenchement la plus élevée théoriquement.

Il faut souligner que cette valeur extrême a très peu de réalité. L'explication est que la saturation asymétrique des branches du noyau de fer change la résistance magnétique des sections. Par conséquent, la distribution du flux est différente de celle du flux symétrique. Le flux résiduel est influencé par les pertes d'hystérèse, et les transitoires capacitifs peuvent aussi réduire les valeurs de flux résiduel. De plus, la chute de tension sur l'impédance du réseau diminue la tension du transformateur, ainsi que les valeurs de flux et les valeurs crêtes de courant.

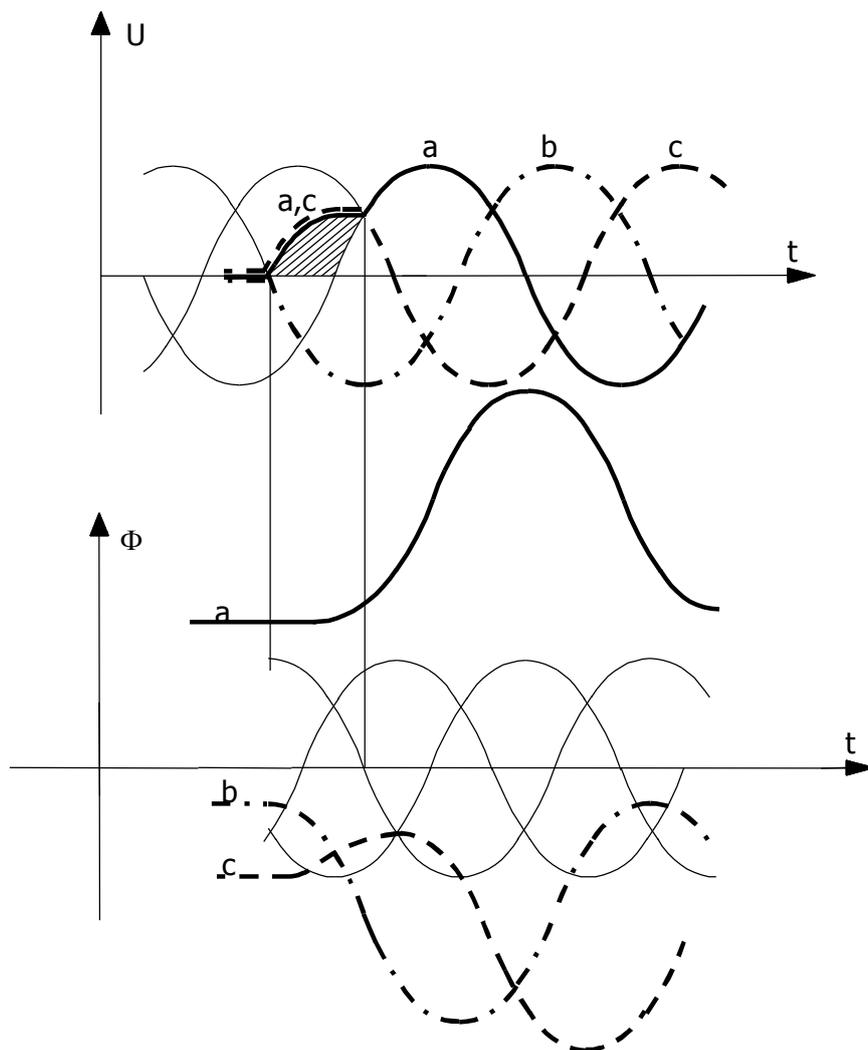


Fig. 0-6 Valeurs de flux extrêmement élevées

4.4 Stratégie de commutation

Cependant, la distribution du flux résiduel "général" est telle que la somme des valeurs de flux des trois phases est égale à zéro. Par conséquent, seules les valeurs de flux de deux phases peuvent être considérées comme indépendantes et peuvent varier librement.

Le fait est que la phase commutée en troisième n'a aucune influence sur les phénomènes. Par conséquent, la séquence de commutation et les moments de commutation de seulement deux phases doivent être calculés.

4.4.1 Commutation avec des coupe-circuits commandés indépendamment dans les trois phases

Lorsque le transformateur est mis sous tension, la liberté maximale signifie que les composants peuvent être commandés indépendamment dans les trois phases et que la séquence et le moment de commutation peuvent être choisis librement. Dans ce cas, en démarrant avec n'importe quelle combinaison de valeurs de flux résiduel, on peut obtenir une séquence et une chronologie qui ne peuvent pas produire de valeurs de flux élevées, et aucune valeur crête élevée du courant d'enclenchement ne peut être générée.

Pour définir la commutation optimale, il faut tenir compte de ce qui suit :

Quand la première phase est excitée, la tension de cette phase est "forcée" (en supposant la commutation du côté en étoile relié à la terre). Le flux dans cette phase, à partir de la valeur résiduelle, est l'intégrale de la tension sinusoïdale. Le moment de la commutation de cette phase doit être choisi de sorte que la valeur de flux résiduel corresponde à la valeur instantanée du flux sinusoïdal stationnaire. La solution pour la commutation par angle de phase est l'intersection de la sinusoïde et d'une valeur constante.

Quand la première phase est excitée, le flux dans les deux autres phases commence à changer aussi car une tension est induite, dont la valeur est égale à la moitié de la tension commutée et dont la polarité est inverse. Le flux commence par le flux résiduel et suit l'intégrale de cette demi-tension. Ce flux sinusoïdal - généralement - décalé de demi-amplitude croise le flux stationnaire qui est sinusoïdal, et est symétrique par rapport à l'axe temporel. Si la deuxième phase est excitée à un des points d'intersection, le flux sur cette phase continue selon la valeur stationnaire. Aucune valeur crête d'enclenchement élevée n'est générée.

Après cela, la troisième phase peut être excitée à n'importe quel moment. La somme des trois valeurs de flux est nulle à tout moment. Dans un état activé en monophasé, c.-à-d. avec une distribution de tension u , $-u/2$, $-u/2$, et donc après une commutation, la somme est encore égale à zéro. Si la deuxième phase est excitée, le résultat sera un état symétrique, et la somme restera nulle là aussi. La troisième phase peut être commutée à tout moment. La séquence inverse de déconnexion aboutit à l'état de départ, et la somme du flux résiduel reste égale à zéro.

Lors de la mise sous tension, le moment de la première commutation est facile à déterminer : dans la phase commutée, le flux résiduel doit continuer comme une courbe sinusoïdale stable. La liberté ici est de sélectionner la phase à commuter en premier. Il y a plusieurs possibilités de sélection. Principalement, le meilleur choix est de sélectionner la phase qui a la plus haute valeur de flux résiduel. Cela peut assurer qu'aucun surflux n'aura lieu dans la phase sélectionnée. L'inconvénient de cette sélection est que les trois phases doivent être comparées en permanence. (Il suffit de calculer le flux de deux phases; le troisième peut être calculé facilement en admettant que la somme des trois flux doit être égale à zéro.)

L'autre possibilité pour sélectionner la phase à commuter en premier est une sélection fixe : p. ex. la phase "A" ou la phase de la bobine centrale. Le résultat sera également correct. Dans la discussion suivante, la phase centrale sélectionnée sera appelée "A".

La phase à commuter en deuxième et le moment de la commutation doivent être examinés sérieusement. Une stratégie possible consiste à toujours sélectionner la phase "B". Ici, il ne suffit pas de prendre en considération le flux résiduel car l'excitation de la première phase induit une tension et modifie le flux en permanence dans toutes les autres bobines qui ne sont pas encore excitées. La fonction temporelle peut être calculée et, en admettant que l'état est stable, la fonction flux-temps symétrique aux points d'intersection peut aussi être calculée. Cela donnera le moment de commutation nécessaire. En divisant la plage de flux complète en plusieurs sections, les moments précalculés peuvent être entrés dans des tableaux. Le moment optimal pour la commutation est simplement sélectionné à partir des valeurs de flux résiduel enregistrées.

Comme le pas de temps de calcul est de 1 ms (18 degrés), le tableau le plus simple contient 10 lignes et 10 colonnes. Et les valeurs de flux résiduel peuvent être essentiellement des éléments quelconques de ce tableau. Dans ce tableau, "1" désigne la plage de 18 degrés de la valeur crête négative (et au-dessous), et "10" désigne les valeurs de flux sur la plage de 18 degrés de la valeur crête positive. Toutes les autres valeurs désignent les éléments internes du tableau qui indiquent le moment optimal pour la commutation par rapport au passage par zéro dans le sens positif de la tension dans la phase "A".

Le tableau contient des cases vides qui correspondent à des combinaisons impossibles. P. ex., il n'est pas possible que deux valeurs de flux résiduel soient proches de la crête négative car, dans ce cas, la valeur de flux résiduel de la troisième phase devrait être très supérieure à la crête positive (la somme des trois valeurs de flux est nulle).

La deuxième phase à commuter est soumise aux valeurs enregistrées dans le tableau; après cela, la commutation de la troisième phase ne peut pas influencer sur les valeurs de flux. Avec ce mode de contrôle, le flux ne peut pas être très supérieur à la valeur crête normale et les crêtes de courant d'enclenchement sont limitées à de petites valeurs.

Le tableau 4-1 indique les valeurs de flux maximales sélectionnées à l'aide de la stratégie de commutation décrite ci-dessus. Les valeurs sont exprimées en pourcentage des valeurs crêtes nominales. Il est évident que, lorsque le contrôle est correct, les valeurs restent sur la petite plage au-dessus de 100 %.

B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A										
1					118	110	110	110	110	126
2					118	110	110	110	110	118
3				110	110	110	110	110	110	126
4		126	110	110	110	110	110	110	118	142
5		118	110	110	110	110	110	110	126	142
6		102	102	110	110	110	110	126	126	150
7		110	110	110	110	110	110	134	150	165
8	102	110	110	110	110	110	118	150		
9	118	110	110	110	110	126	126			
10	134	118	150	150	150					

Tableau 0-1. Valeurs de flux maximales utilisant des commandes de coupe-circuit contrôlées individuellement dans l'ordre des phases A, B, C

Sur le tableau 4-1, on peut voir qu'en général, le flux ne dépasse pas de plus de 10 %, de sorte que des valeurs crêtes élevées du courant d'enclenchement sont improbables. Ici, le dépassement minimal est provoqué par la résolution temporelle de 1 ms, de sorte que la commande est générée avec cette erreur temporelle.

Sur le tableau, les dépassements de flux sont parfois supérieurs à 10 % (ils sont indiqués en gras), ce qui signifie que le flux résiduel est proche de la valeur crête théorique du régime permanent (voire au-dessus). Cependant, la réalité est que les oscillations des éléments inductifs ou capacitifs ne permettent pas ces valeurs élevées. La séquence de commutation fixe A-B-C selon le tableau 4-1 permet de limiter efficacement les valeurs crêtes de courant d'enclenchement. Les avantages de la séquence fixe sont que la phase de référence est toujours la phase "A", que seule la tension de la phase "A" doit être contrôlée en permanence pour la référence temporelle parmi les tensions du côté alimentation et que seules les tensions des phases "A" et "B" doivent être intégrées en permanence pour obtenir les valeurs de flux résiduel.

Le processus de commutation est relativement sensible à la précision du moment d'ouverture du coupe-circuit. La commande de commutation doit recevoir cette information temporelle avant le moment optimal, et s'il y a une imprécision de délai supplémentaire, la chronologie sera faussée. Sur le tableau 4-2, un élément du tableau 4-1 (ligne 6, colonne 6) a été sélectionné pour examiner la sensibilité. Les colonnes et les lignes du tableau 1-2 montrent l'effet de l'imprécision de la commutation des phases "A" et "B" en millisecondes; les éléments du tableau montrent les valeurs de flux maximum par rapport à la valeur crête nominale en pourcentage.

ΔB	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
ΔA								
-4	244	221	205	205	205	205	205	213
-3	229	213	181	181	181	181	197	213
-2	221	197	173	157	157	165	181	189
-1	205	181	157	126	126	150	165	173
0	181	165	142	110	110	134	150	157
1	205	181	157	126	126	150	165	173
2	213	197	165	157	157	165	181	189
3	213	205	181	173	173	173	189	197
4	213	205	181	181	181	181	181	197

Tableau 0-2. Effet de l'imprécision du moment d'actionnement des coupe-circuits en cas de commandes individuelles dans les phases

En examinant les valeurs de pourcentage du tableau 4-2, on peut voir que le flux au point 0-0 a une valeur minimum (110 %). La valeur minimum théorique est de 100 % et le tableau prend en compte un délai d'échantillonnage de 1 ms comme imprécision de base. Il est évident qu'un délai supplémentaire de 5 millisecondes ou une commutation en avance de 5 ms provoquera un passage à zéro au lieu de la valeur crête de la tension d'alimentation. Le tableau 4-2 reflète aussi cette tendance. Dans le cas des écarts de 2 ms, les valeurs de flux sont relativement élevées (jusqu'à 173 %), ce qui provoque une forte saturation du noyau de fer, et aboutit à un courant d'enclenchement élevé. En

prenant l'écart temporel possible de ± 2 ms, la commutation contrôlée peut garantir que la crête de flux ne peut pas atteindre un taux de saturation extrêmement élevé (supérieur à 200 %), de sorte que la crête de courant n'est pas supérieure au courant de crête normal.

Les investigations ci-dessus montrent clairement que la meilleure stratégie pour la commutation contrôlée est de chercher la valeur de flux résiduel la plus élevée, et que cette phase doit être excitée en premier pour limiter le flux aux valeurs normales. Si cette phase est prise comme phase de référence, la deuxième phase commutée devra être temporisée conformément aux valeurs de temporisation enregistrées dans le programme. Le moment de commutation de la troisième phase n'a aucune influence sur les valeurs de flux. Cette stratégie utilisant des coupe-circuits avec des commandes individuelles pour les phases permet de garantir des valeurs de flux inférieures à 110 % de la crête de flux nominale, et peut empêcher efficacement les courants d'enclenchement élevés.

Remarque : concernant les valeurs de crête du courant d'enclenchement, aucune valeur exacte ne peut être prévue. Pour calculer la valeur de l'impédance de source, il faut connaître la courbe de magnétisation complète du noyau de fer, la construction exacte du noyau de fer, la structure des bobines, etc. Toutefois, il est évident que la valeur du flux est limitée aux valeurs qui ne sont pas trop supérieures à la valeur de saturation, et que par conséquent le courant d'enclenchement est limité lui aussi à la valeur crête de courant nominale.

4.4.2 Commutation avec des coupe-circuits de commandes communes pour les phases

Dans les commandes communes pour les phases des coupe-circuits, les différents contacts peuvent être temporisés mécaniquement par rapport aux autres phases. Cette temporisation permet d'obtenir une commutation optimale pour les batteries de condensateurs par exemple, lorsqu'on peut supposer qu'elles sont déchargées avant l'excitation. Le but dans ce cas est d'éviter les sauts de tension soudains, d'empêcher les courants de charge élevés et d'empêcher les oscillations en interaction avec les éléments inductifs du réseau. Pour cela, les batteries de condensateurs neutres reliées à la terre sont mises sous tension près du passage à zéro de la tension dans des phases séparées. Etant donné que le moment du passage à zéro de la tension est fixe dans la séquence de phases A-B-C - à savoir 0 - 6,6666 - 3,3333 ms - la stratégie est la suivante : contrôler la commande de la phase "A" jusqu'au passage à zéro de la tension, après quoi les deux autres phases peuvent se suivre dans l'ordre indiqué et avec la temporisation définie mécaniquement.

Si le point neutre de la batterie de condensateurs est isolé, le premier pôle ne ferme aucun circuit et le second commute la tension ligne à ligne sur les deux phases de la batterie de condensateurs. Ainsi, les deux premières phases sont commutées en même temps, quand la tension ligne à ligne associée est nulle (les valeurs instantanées des tensions de phase sont identiques). Dans ce cas, la tension de phase non commutée varie selon $-1/2U$ de la tension présumée. La valeur instantanée de cette tension peut être identique à la tension de phase uniquement si elle est nulle. Ainsi, la temporisation mécanique idéale est de 0-0-5 ms, le temps étant égal à zéro pour le passage par zéro de la tension ligne à ligne.

Les inductances shunt ayant des noyaux de fer individuels pour chaque phase sont habituellement commutées avec des coupe-circuits de commandes communes temporisées mécaniquement. Dans ce cas, la séquence des phases est A-B-C avec une temporisation mécanique de 0-6,6666-3,3333 ms. Dans ce cas, le moment $t=0$ est situé à la crête de tension de la phase "A", les deux autres phases étant commutées au niveau de leurs propres valeurs de crête de tension. Le flux stationnaire à ces moments est nul dans les différentes phases (retard de 90 degrés par rapport aux tensions). Remarque : le courant d'enclenchement sera éliminé uniquement si le flux résiduel dans les phases est également nul. Sinon, il vaut mieux commander les phases des coupe-circuits individuellement, en fonction des valeurs de flux résiduel mesurées.

4.4.3 Commutation avec des commandes communes temporisées de 5-0-5 ms

La section 0 analyse la commutation en cas de flux résiduel nul dans les trois phases. Le résultat a été que la phase centrale était commutée à la valeur crête de tension et les deux autres phases avec un retard de 5 ms. La séquence de commutation à la tension de crête de la phase centrale était de 5-0-5 ms. Compte tenu de l'analyse décrite ci-dessus, il est évident que dans le cas d'une autre distribution du flux résiduel, cette stratégie ne peut pas donner une commutation optimale.

La solution pour la distribution du flux résiduel "général" ne peut être que le résultat d'une optimisation qui peut être proche de l'optimum dans la plupart des cas. Le courant d'enclenchement ne peut pas être complètement éliminé, mais il peut être maintenu dans des limites raisonnables. La procédure de contrôle ne peut garantir que l'élimination des crêtes de courant d'enclenchement les plus élevées.

Revenons au transformateur de type Y_0d triphasé avec un noyau de fer à trois branches, et supposons un flux résiduel nul dans les trois branches. Cet état a été analysé sur la Fig. 0-3. La conclusion a été que la commutation de la phase "A" à la tension de crête doit être suivie de la commutation des deux autres phases "B" et "C" ensemble avec un retard de 5 ms. Ainsi la séquence de commutation requise était de 5-0-5 ms.

Dans tous les autres cas de distribution de flux, la première phase doit être commutée non à la tension de crête, mais plus tôt ou un peu plus tard, et les deux phases suivantes doivent être commutées avec un délai non de 5 ms,

mais de 1 à 9 ms. Par conséquent, si le retard de phase est fixé mécaniquement à 5-0-5 ms, la commutation optimale ne peut pas être obtenue, mais, avec une optimisation, le flux de crête et donc la crête de courant d'enclenchement peuvent être minimisés.

Si la procédure de minimisation est exécutée hors ligne, en examinant toutes les combinaisons de flux résiduel réelles, les moments de commutation requis peuvent être enregistrés dans un tableau séparé. L'algorithme continuera alors à contrôler la commutation en fonction des valeurs enregistrées.

Remarque : concernant les valeurs de crête du courant d'enclenchement, aucune valeur exacte ne peut être prévue. Pour calculer la valeur de l'impédance de source, il faut connaître la courbe de magnétisation complète du noyau de fer, la construction exacte du noyau de fer, la structure des bobines, etc. Toutefois, il est évident que la valeur du flux est limitée aux valeurs qui ne sont pas trop supérieures à la valeur de saturation, et que par conséquent le courant d'enclenchement est limité lui aussi à la valeur crête de courant nominale.

Les en-têtes du tableau 4-3 montrent les plages de flux résiduel de la phase "A" dans la branche centrale et de la phase "B" dans la branche suivante. Le tableau 4-3 montre qu'aux valeurs de flux résiduel nulles (voir la case située dans la colonne 6, ligne 6 du tableau 4-3), la valeur crête de flux la plus élevée est optimale (110 %). Dans les autres cases du tableau, le flux maximal augmente avec la "distance" par rapport à cette case optimale. Si le flux résiduel est élevé, on trouve des valeurs particulièrement élevées dans les colonnes et les lignes 1 et 10. Les expériences montrent cependant que les variations dues aux capacités et aux inductances internes peuvent réduire les valeurs de flux résiduel, de sorte qu'on ne peut pas mesurer de telles valeurs extrêmes. Certaines cases ne sont pas remplies. Cela signifie que ces combinaisons de flux ne sont pas possibles théoriquement.

En résumé, la séquence de commutation fixe A-B-C avec les délais enregistrés dans un tableau permet de minimiser les valeurs de flux et donc les valeurs crêtes de courant d'enclenchement, mais la commutation optimale (dépassement de flux de 110 %) ne peut généralement pas être garantie. Il faut prévoir un dépassement de flux d'environ 160 %, mais les expériences montrent que les crêtes de courant sont limitées au-dessous de la plage de crête de courant nominale. L'avantage de cette méthode est que la phase "A" peut généralement être sélectionnée comme phase de référence, et parmi les tensions du côté alimentation, elle sert de base de temporisation.

B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A										
1					115	150	163	184	190	211
2					115	136	163	177	190	204
3				115	115	129	156	170	184	204
4		156	136	115	110	129	156	170	184	190
5		156	150	129	115	115	129	156	163	177
6		163	156	129	115	110	136	150	156	163
7	190	184	163	156	129	110	122	143	134	156
8	190	184	163	156	136	115	122	136		
9	197	184	177	163	143	115	110			
10	204	184	184	163	150	110	110			

Tableau 0-3. Valeurs de flux maximales utilisant des coupe-circuits avec une commande commune et une temporisation mécanique de 5-0-5 ms

Ce mode de fonctionnement n'est intéressant que si les valeurs de flux résiduel – à cause de la forme de la courbe de magnétisation – sont relativement faibles.

Remarque : concernant les valeurs de crête du courant d'enclenchement, aucune valeur exacte ne peut être prévue. Pour calculer la valeur de l'impédance de source, il faut connaître la courbe de magnétisation complète du noyau de fer, la construction exacte du noyau de fer, la structure des bobines, etc. Toutefois, il est évident que la valeur du flux est limitée aux valeurs qui ne sont pas trop supérieures à la valeur de saturation, et que par conséquent le courant d'enclenchement est limité lui aussi à la valeur crête de courant nominale.

4.4.4 Commutation avec des commandes communes temporisées de 0-6,66-3,33 ms

Dans l'introduction du chapitre 0, il est mentionné que les inductances shunt ayant des noyaux de fer individuels pour chaque phase sont habituellement commutées avec des coupe-circuits de commandes communes temporisées mécaniquement. Dans ce cas, la séquence des phases est A-B-C avec une temporisation mécanique de 0-6,666-3,333 ms. Si le flux résiduel est nul, cette temporisation mécanique peut donner une séquence de commutation optimale. Il est également indiqué que si les valeurs de flux résiduel ne sont pas nulles, les pointes de courant d'enclenchement ne peuvent pas être éliminées avec cette séquence de contrôle. Dans le cas des transformateurs, le noyau de fer combiné introduit d'autres complications. Lorsqu'une des phases est commutée, la tension induite dans les autres commence à modifier le flux immédiatement. Nous allons appliquer cette méthode d'investigation dans ce chapitre et essayer de prédire l'effet de cette commutation temporisée dans le cas des transformateurs YoD avec un noyau de fer à trois branches.

Les en-têtes du tableau 4-4 montrent les plages de flux résiduel de la phase "A" dans la branche centrale et de la phase "B" dans la branche suivante. "1" désigne la petite plage de valeurs de crête négatives et "10" désigne la petite plage de valeurs de crête positives. A "5" et "6", la valeur de flux résiduel est presque nulle.

Les valeurs de ce tableau montrent le dépassement de flux relatif. On peut voir qu'au milieu du tableau, les valeurs de flux sont relativement élevées (environ 130 %), mais que la distribution est "plate", ce qui signifie que le dépassement de flux peut être maintenu dans des limites raisonnables avec cette temporisation mécanique de 0-6,666-3,333 ms.

B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A										
1					115	115	129	156	163	163
2					115	115	122	143	156	163
3				115	122	115	115	129	150	163
4		122	110	115	129	122	115	129	143	150
5		122	110	115	129	129	115	115	129	136
6		129	122	110	129	129	122	115	129	136
7	150	136	129	115	115	129	115	115	129	136
8	156	150	122	115	115	115	115	115		
9	156	150	143	122	115	115	110			
10	163	156	150	129	115	110	115			

Tableau 0-4. Valeurs de flux maximales utilisant des coupe-circuits avec une commande commune et une temporisation mécanique de 0-6,66-3,33 ms

Les valeurs crêtes de courant d'enclenchement ne peuvent pas être éliminées complètement, mais elles peuvent être réduites au-dessous des valeurs crêtes de courant nominales du transformateur.

Remarque : concernant les valeurs de crête du courant d'enclenchement, aucune valeur exacte ne peut être prévue. Pour calculer la valeur de l'impédance de source, il faut connaître la courbe de magnétisation complète du noyau de fer, la construction exacte du noyau de fer, la structure des bobines, etc. Toutefois, il est évident que la valeur du flux est limitée aux valeurs qui ne sont pas trop supérieures à la valeur de saturation, et que par conséquent le courant d'enclenchement est limité lui aussi à la valeur crête de courant nominale.

4.4.5 Commutation avec des commandes communes temporisées de 0-0-0 ms

Si le coupe-circuit a une commande commune et que la construction mécanique est conçue pour déplacer ensemble les trois pôles des phases, la conséquence est un comportement sensiblement moins favorable que celui d'une temporisation mécanique de 5-0-5 ms.

Il faut noter que, comme les chiffres du tableau 4-5 le montrent, on ne peut pas obtenir des dépassements de flux optimaux, mais on peut les minimiser.

On peut remarquer que les valeurs de flux les plus élevées se trouvent dans les lignes 5 et 6 et les colonnes 5 et 6. Elles correspondent à des situations où le flux résiduel est faible. Les valeurs supérieures à 130 % sont signalées par des *chiffres* en gras. Ainsi, ce mode de fonctionnement est intéressant uniquement si les valeurs de flux résiduel – à cause de la forme de la courbe de magnétisation – sont relativement élevées.

Cependant, dans la plupart des cas, la boucle d'hystérèse du matériau du noyau de fer peut générer des valeurs de flux résiduel relativement élevées dans les branches. Les expériences montrent que ce genre de fixation mécanique des pôles de coupe-circuit donne des courants d'enclenchement raisonnablement faibles.

B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A										
1					126	110	110	110	118	118
2					118	110	118	110	110	126
3				110	118	126	126	110	110	126
4		126	110	110	126	150	150	126	126	110
5		118	110	142	157	173	157	134	110	110
6		110	126	142	173	189	142	110	110	126
7		110	126	142	142	142	126	110	126	150
8	102	110	126	126	134	118	110	126		
9	110	110	110	110	110	126	126			
10		134	134	134	110					

Tableau 0-5. Valeurs de flux maximales utilisant des coupe-circuits avec une commande commune et une temporisation mécanique de 0-0-0 ms

4.5 Excitation des transformateurs à partir du côté en triangle

L'analyse ci-dessus suppose un transformateur commuté à partir du côté en étoile relié à la terre. Il a été signalé que, pendant la procédure d'excitation, aucun flux ni aucune tension homopolaire n'est généré et qu'aucun courant homopolaire ne circule, de sorte que l'enroulement secondaire connecté en triangle n'a aucune influence sur les phénomènes.

Cependant, si le transformateur est excité à partir du côté en triangle, certains autres faits doivent être pris en compte.

Lorsqu'une tension monophasée est connectée à l'enroulement branché en triangle, il n'y a pas de boucle fermée, et aucun courant n'est attendu. Les phénomènes d'enclenchement n'apparaissent que si les deux phases sont excitées. Dans ce cas, une pleine tension ligne à ligne est connectée à l'enroulement entre les deux phases excitées; les deux autres bobines reçoivent une demi-tension qui est opposée à la direction positive supposée. Cela correspond aussi à la distribution de flux du noyau de fer fermé. Par conséquent, l'excitation de deux phases du côté en triangle est équivalente à l'excitation d'une phase du côté en étoile relié à la terre.

Si, du côté en triangle, la troisième phase est également excitée, il en résulte un état d'excitation en triphasé. Du point de vue du flux, cela est équivalent à l'état d'excitation de deux (ou trois) phases à partir du côté en étoile relié à la terre. Par exemple, un coupe-circuit à commande commune temporisé mécaniquement de 5-0-5 ms du côté en étoile correspond à un coupe-circuit temporisé mécaniquement de 0-5-0 ms du côté en triangle. Avec cette modification, les phénomènes d'enclenchement sont les mêmes. La fonction de contrôleur prend en compte cette équivalence.

Comme la structure du noyau de fer du transformateur est symétrique à la branche centrale, dans cette configuration, il est important d'exciter d'abord les deux phases qui transmettent la pleine tension à la bobine de la branche centrale. Dans le cas où les phases ont des commandes individuelles, cela est assuré par le logiciel. Si les phases du coupe-circuit sont temporisées mécaniquement, cette temporisation fixe doit tenir compte de cette exigence.

La **Fig. 0-7** ci-dessous montre un couplage Dy11. La bobine de la branche centrale du noyau de fer est entre S et T; par conséquent, ceux-ci sont les premiers contacts à fermer lors de la mise sous tension. La temporisation mécanique à configurer dans ce cas, p. ex. avec une temporisation de 5 ms, est de 5-0-0 ms.

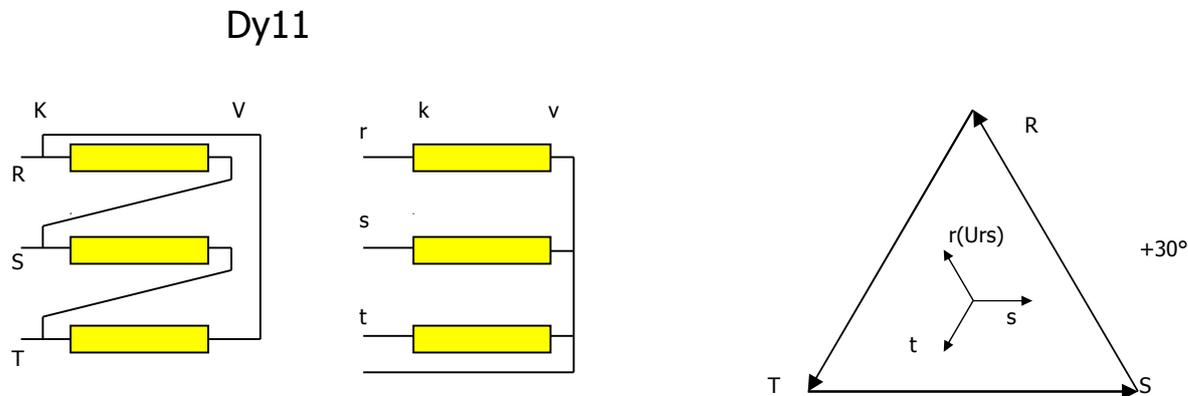


Fig. 0-7 Excitation d'un transformateur Dy11

En revanche, si le groupe de couplage est p. ex. Dy7, la bobine de la branche centrale du noyau de fer est entre R et S; par conséquent, ceux-ci sont les premiers contacts à fermer lors de la mise sous tension. La temporisation mécanique à configurer dans ce cas, p. ex. avec une temporisation de 5 ms, est de 0-0-5 ms. Voir la **Fig. 0-8** ci-dessous.

Dy7

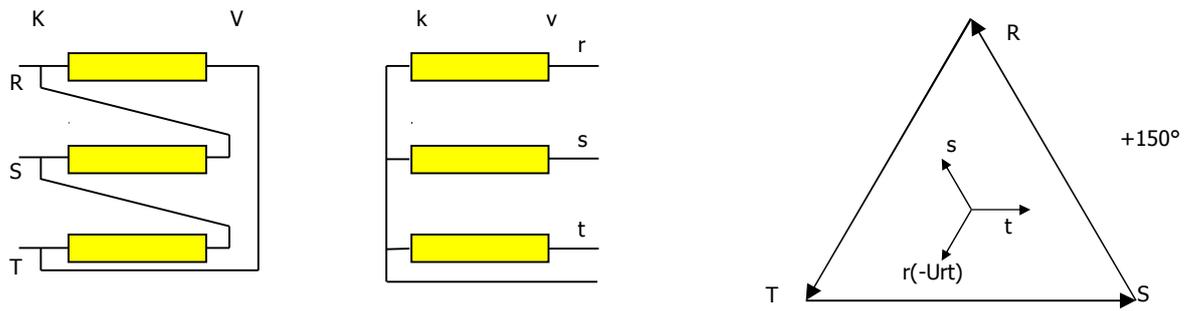


Fig. 0-8 Excitation d'un transformateur Dy7



PROTECTA
HUNGARY



MICROENER