

A classer sous: 0 Electrotechnique

# Economiser des frais par l'optimisation de transformateurs de réseau

## tout en assurant correctement et en enclenchant en douceur

### Introduction:

Des transformateurs opérés avec 50 Hz de tension de réseau ont également leurs avantages à l'époque des parties de réseau enclenchantes. Il faut néanmoins, pour les utiliser au mieux, que les constructeurs sachent que des transformateurs de réseau destinés à alimenter des machines ou des installations, sont calculés et construits selon des critères tout à fait différents. Parce que transfo n'est pas égal transfo.

### Extrait:

L'enclenchement de transformateurs provoque une poussée de courant d'enclenchement qui empêche la juste assurance du transfo. Des transformateurs au courant d'enclenchement aussi réduit que possible sont volumineux et chers. S'ils doivent par contre être de volume réduit et avantageux de prix, alors ils provoquent un courant d'enclenchement encore bien plus fort. De nouveaux enclenchements en douceur brevetés résolvent ce dilemme.

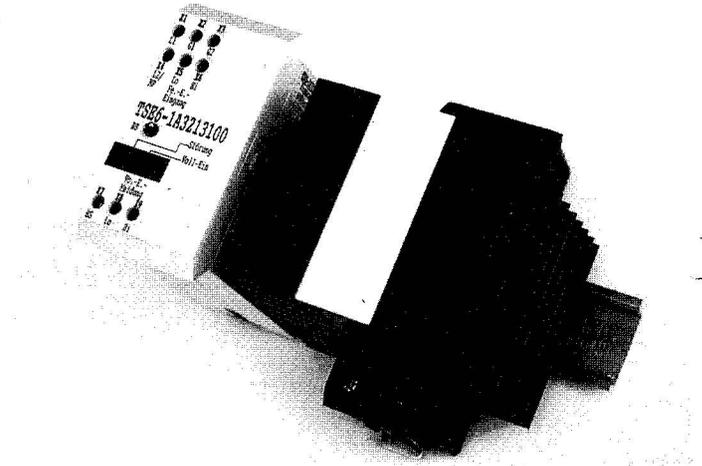
### Les deux extrêmes opposés sont:

- 1) obtenir un transformateur avec le moins de courant d'enclenchement possible, ou
- 2) obtenir un transformateur de volume le plus réduit que possible.

**1) Obtenir un transformateur avec le moins de courant d'enclenchement possible**, avec p.ex. tout au plus 8 fois le courant nominal, ce qui est en fait encore toujours trop, ne peut qu'être économiquement raisonnable. Ce transfo est alors, à cause de la réserve nécessaire d'induction en fer, fondamentalement plus gros et plus lourd qu'un transfo avec la même puissance VA construit selon les règles courantes, à cause de la réserve d'induction en fer nécessaire.

### Les raisons de la poussée de courant d'enclenchement?

Il naît toujours à chaque fois lorsqu'un transfo est enclenché dans la même direction d'aimantation que celle dans laquelle il était lorsqu'il a été déclenché auparavant. Pour mémoire: l'aimantation du fer dans le transfo est constamment transformée par les demi-ondes de tension de réseau alternativement positives et négatives, en quel cas la puissance d'aimantation fluctue sur la courbe d'hystérésis. (Les tranches de temps de tension des demi-ondes de réseau amènent l'aimantation dans le fer.) Si un transfo est par exemple déclenché à la fin d'une demi-onde de tension de réseau positive, la rémanence, la mémoire aimantée dans le fer, reste polarisée en positif sur le montant d'induction en rémanence. Si ce transfo est alors à nouveau enclenché au début d'une demi-onde de tension de réseau positive, alors l'aimantation est en ce cas, par ce qu'elle n'est pas inversée, poussée plus ou moins à saturation, d'après la distance entre rémanence et induction de saturation. Dans le pire des cas, le courant n'est plus que limité par la résistance cuivre de l'embobinent primaire. La plus forte poussée de courant advient lorsque la rémanence est proche de l'induction maximale, que le transfo n'a ainsi pas de réserve d'aimantation.



Des réserves, c'est bien connu, coûtent cependant de l'argent. C'est pourquoi le prix d'un transfo non optimisé est naturellement plus élevé, parce qu'il a plus de fer que ce qui est nécessaire pour sa puissance. Exemples les transfos de séparation pour des locaux utilisés en médecine, qui ne peuvent avoir une poussée de courant d'enclenchement de tout au plus huit fois le courant nominal, ce qui est peu pour un transfo d'autre part courant (env. 15 - 22 fois est courant).

Le dessous de cette explication se trouve dans la problématique de sécurisation concernant la sélectivité de la sécurité pré-enclenchée et la capacité nécessaire d'alimentation en courant d'urgence, qui ne supporte pas de poussée plus élevée de courant d'enclenchement. On admet jusqu'à présent pour cela pas d'autre moyen de limitation de la poussée de courant d'enclenchement que celui du surdimensionnement extrême du transformateur, et ceci même alors qu'il y a déjà des enclenchements en douce fiables pour des transformateurs.

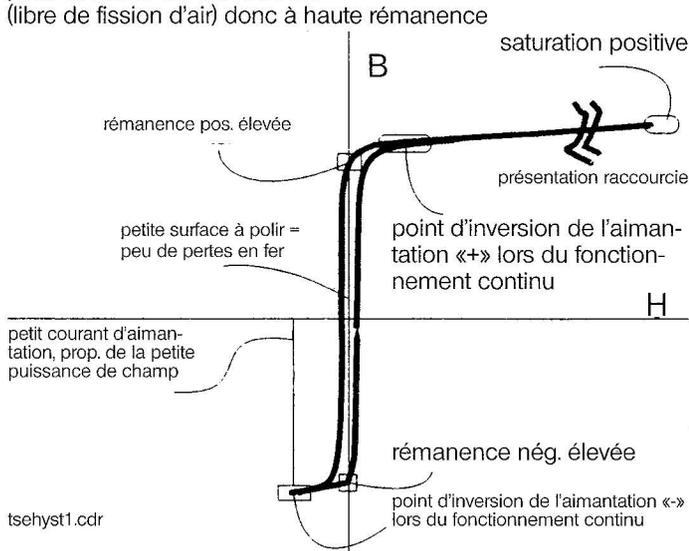
- Cela résonne comme un paradoxe: des transfos construits plus petits et donc sousdimensionnés produisent une plus haute poussée de courant d'enclenchement que ceux construits plus gros et ainsi donc surdimensionnés de par leur volume. On aurait plutôt supposé le contraire.

La puissance d'un transfo est essentiellement déterminée par la force du flux magnétique. Celle-ci dépend de la densité de flux et de la surface de fer par laquelle passe le flux magnétique. La densité de flux est aussi appelée induction. Si celle-ci est petite, alors la surface doit pour cela être plus grande. Si l'induction est importante, ainsi donc proche du maximum ou de l'induction de saturation que le fer supporte, alors la surface de fer et ainsi donc la taille de construction du transformateur peut - à capacité égale - être plus réduite.

### L'autre extrémité:

**2) Peut-on disposer un transformateur de telle façon qu'il a un volume et un poids les plus réduits possibles?** Ce transfo est alors, à cause de sa petite réserve d'induction entre induction de travail au point d'inversion et saturation, voir ill. 1, nettement

### Courbe d'Hystérésis pour des auto-transformateurs (libre de fission d'air) donc à haute rémanence



Ill. 1 - présente la courbe d'Hystérésis d'un transfo optimisé, ici un auto-transfo.

plus petit et plus léger qu'un transfo de même puissance VA qui est dimensionné pour une plus petite poussée de courant d'enclenchement. Comme la courbe d'Hystérésis des transfos optimisés et libres de fission d'air suit pratiquement un angle droit, voir ill. 1, on peut utiliser celle-ci pleinement dans la partie verticale en fonction nominale, sans arriver dans la partie de saturation et sans provoquer non plus des grands courants au passage à vide.

Ce petit transfo optimisé ne pouvait cependant être assuré à cause de sa forcément plus grande poussée de courant d'enclenchement, qu'avec des coupe-circuit à fusible lents ou avec des disjoncteurs de protection Ls avec une valeur de courant plus élevée que le courant nominal. La conduite doit alors forcément être adaptée aux sécurités respectives et donc être d'une coupe diagonale plus large. (C'est encore aujourd'hui la méthode utilisée dans différentes branches industrielles pour assurer les transformateurs de partie de courant de réseau pour l'alimentation de sécurité en courant 24V. Le transfo n'est en ce cas plus protégé par le fusible contre la surcharge. Cette tâche devant être reprise par une sécurité secondaire supplémentaire.)

**La poussée de courant d'enclenchement d'un transfo optimisé est plus grande que 30 fois le courant nominal durant au moins une demi-onde ce que chaque disjoncteur de moteur ou de protection de puissance déclencherait, lorsqu'il est choisi pour le courant nominal.**

Des coupe-circuit à fusible ne sont plus volontiers utilisés en construction de machines, vu qu'ils connaissent par rapport aux disjoncteurs de protection de puissance le triste problème d'acquisition. (Un disjoncteur de protection de moteur devrait être réglé à 2 - 3 fois la valeur nominale.)

**Il ne restait ainsi jusqu'à présent pas d'autre choix que de favoriser des transfos dotés d'une poussée de courant d'enclenchement plus limitée, mais qui étaient justement à cause de cela plus gros et plus chers que vraiment nécessaire.**

Les transformateurs de séparation et de puissance d'un fabricant connu sont ainsi p.ex. dimensionnés de telle façon que pour sa sécurité, le disjoncteur de protection du moteur, qui, comme c'est connu, déclenche promptement dans les 8 msec. à 15 fois la valeur du courant nominal, doit être réglé à 1,6 fois le courant nominal afin que lors de l'enclenchement il ne se déclenche quand même pas encore de lui-même. (Le disjoncteur de protection du moteur est en ce cas un niveau plus grand et donc plus cher que cela ne serait vraiment nécessaire pour le transfo vu qu'il n'est uti-

lisable, pour la partie déclenchement porteur, que de 60 - 100%.) Les transformateurs du fabricant «connu» sont bien avec un réglage au milieu entre les extrêmes stipulées entre 1.) et 2.) et représentent fort bien la pratique courante du réglage de transfos. Leur poussée de courant d'enclenchement mesurée à 10% de survolage réseau doit ainsi se situer tout juste en dessous de 24 fois le courant nominal. (1,6 x courant nominal du disjoncteur de protection fois 15 x valeur de déclenchement = multiple 24 de courant nominal et avec cela une poussée de courant d'enclenchement encore tout juste supportable). Des transfos destinés au fonctionnement à 60 Hz présentent cependant à la même tension réseau à fonction de 50 Hz une poussée de courant d'enclenchement nettement plus forte.

### Un transfo optimisé réglé à l'extrême 2.) a les avantages suivants:

Les pertes de travail d'un transfo optimisé sont mineures, parce que la longueur moyenne d'embobinage est plus réduite, la tension secondaire est plus rigide que celle d'un transfo non optimisé, le poids et le prix sont jusqu'à 30% inférieurs, ce pourquoi on peut justement l'appeler optimisé. Les pertes de passages à vide sont moindres qu'avec des transfos dotés de plus de fer. La différence de tension entre passage à vide et charge nominale est moindre.

### La conséquence: enclencher correctement les transfos optimisés

Si on arrive à éviter la poussée de courant d'enclenchement dans toutes les circonstances, en «enclenchant correctement», alors un tel transfo optimisé peut, dès une taille d'env. 2 kVA et ensemble avec «l'enclenchement en douceur» alors nécessaire, être plus avantageux et meilleur marché qu'un plus grand transfo respectif avec basse poussée de courant d'enclenchement et sans enclenchement en douceur.

Les auto-transfos sont un particulièrement bon exemple de transfo optimisé, avec jusqu'à 50% moins de poids que des transfos surdimensionnés de même puissance. Les économies en perte de courant sont, après deux années d'exploitation, de l'ordre de celles générées par le montant des frais d'un enclenchement en douceur.

Les applications dans lesquelles le gain de poids joue un rôle important donnent des exemples de l'utilisation de auto-transfos, p.ex.: parties portables de réseau ou transfos de séparation portables ainsi que transfos de séparation dans des véhicules pour p.ex. des organismes de transmission de radio ou de télévision.

### Limiter les poussées de courant d'enclenchement.

Si de tels transfos sont toujours enclenchés à la même charge et à une faible fréquence d'enclenchement, alors il y a moyen de régler un limiteur de poussée de courant d'enclenchement qui fonctionne avec une résistance en série à retardement en relais, exactement aux conditions auxquelles sont réglées la prérésistance et le retardement en relais. Si on avait par contre à faire avec des conditions de charge différentes ou des fréquences d'enclenchement plus élevées, alors on serait bloqué avec les limiteurs traditionnels d'enclenchement de courant à cause du réchauffement de la prérésistance et on devrait tout de même à nouveau se précipiter sur un plus-gros transformateur ayant une moindre poussée de courant d'enclenchement. Il s'y ajoute que de tels limiteurs de courant sont sans effet lors de courtes interruptions du réseau parce que le relais de pontage ne tombe pas en ce cas.

### Eviter les poussées de courant d'enclenchement.

On peut nouvellement entièrement éviter les poussées de courant d'enclenchement avec les appareils TSE (TSE = Trafo Sanft Einschalter) disponibles depuis env. 2 ans. Ils fonctionnent indépendamment de la charge et dans une variante aussi indépendamment de la fréquence d'enclenchement et servent comme disjoncteurs électroniques de réseau, qui pré-aimantent d'abord les transformateurs avant de l'enclenchement à fond et qui enclenchent alors au moment voulu sans jamais de poussée de courant. Voir les autres rapports spécialisés déjà parus mentionnés à

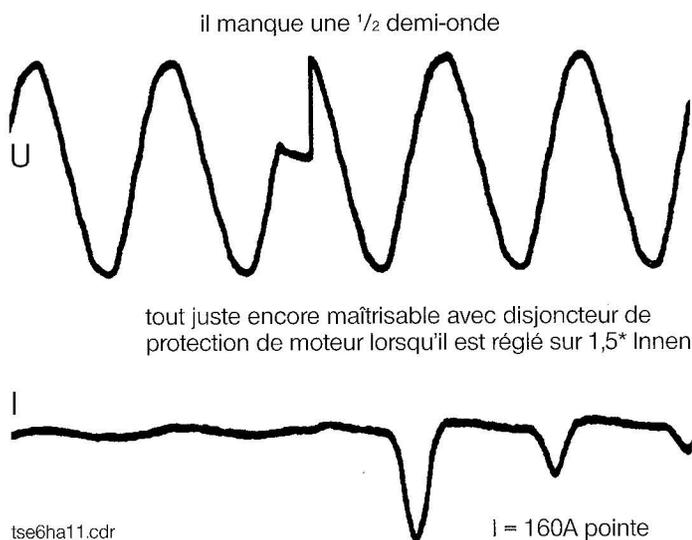
la fin du rapport sur le thème «Trafo sanft einschalten mit den patentierten T.S.E. Geräten».

### Jusqu'à quelle taille de transfo?

Des appareils transfos une à trois phases et jusqu'à 500 kVA sont fabriqués pour l'utilisation dans les exemples précités. Le courant d'enclenchement ne dépasse ainsi pas 1,5 x le courant nominal. Les derniers appareils TSE protègent en plus les transfos de poussées de courant arrivant lors de la remise en marche du réseau après des défauts de demi-ondes dans le réseau. En ce cas, sans TSE, un transfo réglé pour une moindre poussée de courant d'enclenchement provoquerait aussi, étonnamment, une poussée de courant nettement plus forte que la poussée de courant d'enclenchement, ainsi qu'il est clairement démontré par des mesures du rapporteur. Le limiteur de courant traditionnel ne sert en ce cas à rien, parce qu'il est relayé.

Une autre variante particulièrement avantageuse d'appareil TSE permet d'enclencher, au moment d'enclenchement, des transfos peu chargés plus souvent et ceux fortement chargés que env. toutes les minutes, ce qui suffit cependant pour les transfos de conduite. Il est en ce cas utilisé un conducteur de chaleur pouvant être relayé. L'enclenchement est bloqué automatiquement et de manière fiable en cas de surchauffe du conducteur de chaleur. Ce sont surtout des parties de réseau avec des auto-transfos et des redresseurs avec filtrage qui se laissent enclencher de manière optimale et se laissent aussi protéger des suites de pannes de demi-ondes avec ce système, qui naissent aussi inexorablement sans les appareils TSE avec des transfos non optimisés et donc doux. Voir ill. 2.

### Simulation de panne de demi-ondes qui touche un transfo él. 1,6 kVA avec 1 kW



Ill. 2 - montre l'effet d'une panne de demi-ondes du réseau sur un transfo de réseau surdimensionné.

### Assurer correctement

Il y a des automates de type LS-B jusqu'à 63 Ampères qui déclenchent promptement. La sécurité peut se faire sur le courant nominal en utilisant l'appareil TSE avec cet automate B déclenchant promptement, vu que le fusible ne doit maintenant quand même plus résister à la poussée de courant d'enclenchement et donc être lent à cause de cela. Ceci donne un accroissement substantiel de la sécurité par rapport à la surcharge des transfos. La situation toujours répétée de dommages durables dans des parties de réseau provoquée par des surcharges ayant pour conséquence un dégât de bobine dans le transfo est ainsi pour toujours résolue. Une sécurité sélective est alors toujours donnée, c.-à-d. c'est toujours d'abord le fusible du transformateur qui saute au lieu de la sécurité plus lente placée plus en avant.

### Voici maintenant trois exemples de réglage pour un transfo d'ajustage/de séparation de 4 kVA, pour 400V à 230V ou 50V qui:

- 1) «non optimisé» et avec cela gros ou
- 2) «optimisé» et avec cela pouvant être dimensionné plus petit
- 2a) «optimisé» et pouvant être dimensionné encore plus petit qu'un auto-transfo

#### 1) Données transfo pour le transfo «non optimisé, doux» et gros

Noyau UI 180/63 avec une chambre, puissance 4 kVA, taille de construction pour 4 kVA, 400V primaire; 10,5 A; 230V secondaire; 17,4A. Induction 1,3 t, coupe normale tôle avec tôle normale V 135-50A. Poids 32 kg, puissance perdue 174W, tension court-circuit 3,34%, rehaussement poussée de courant d'enclenchement 12,3 fois Innen (peut juste encore être assuré en cas de surtension de réseau avec un disjoncteur de protection de moteur), courant de passage à vide 0,23A<sub>eff</sub>, tension sec. de passage à vide 238V, tension sec. nominale 230V.

Coût du transfo (100 pièces/rabais usuel de 40%): **660.- DM**

#### 2) Données transfo pour le plus petit transfo «optimisé, dur»

Noyau UI 150/77 avec une chambre, puissance 4 kVA, taille de construction pour 3,1 kVA, 400V primaire; 10,25 A; 230V secondaire; 17,4A. Induction 55 t, coupe normale tôle avec tôle Armcolech VM111-35. Poids 26 kg, puissance perdue 82W, tensior. court-circuit 2,9%, rehaussement poussée de courant d'enclenchement sans TSE = 23 fois Innen, avec TSE 2 fois Innen max. (= ne peut être assuré sur courant nominal avec disjoncteur de protection de moteur sans TSE), courant de passage à vide 0,28A<sub>eff</sub>, tension sec. passage à vide 255V, tension sec. nominale 230V.

Coût du transfo (100 pièces/rabais usuel de 40%): **330.- DM**

TSE 6 (pour enclenchement fréquent) (100 pces) **290.- DM**

Total transfo + TSE 6 **620.- DM**

TSE 8 (pour enclenchement occasionnel) (100 pces) **160.- DM**

Total transfo + TSE 8 **490.- DM**

#### Economie en tout cas.

#### Avantages du plus petit transfo:

L'économie de frais en acquérant le plus petit transfo avec l'enclenchement en douceur comporte au moins 40.- resp. 170.- DM comparé au transfo doux et plus gros.

En plus, il y a env. 80W de chaleur perdue produite en moins. La tension secondaire est plus rigide à la charge. On obtient en plus 6 kg d'économie de poids.

2a) Si on utilisait un **auto-transfo** comme transfo plus petit et plus dur, les économies seraient encore plus conséquentes. Le courant de passage à vide est tellement minime qu'il peut être négligé. Les pertes sont encore une fois amoindries. Le poids n'est plus que de 20 kg, ainsi donc 12 kg de moins qu'avec le transfo 4 kVA «doux».

Coût de l'auto-transfo

(100 pièces/rabais usuel de 40%): **320.- DM**

TSE 6 (pour enclenchement fréquent) (100 pces) **290.- DM**

Total transfo + TSE 6 **610.- DM**

ou

TSE 8 (pour enclenchement occasionnel) (100 pces) **160.- DM**

Total transfo + TSE 8 **480.- DM**

Les économies sont encore substantiellement plus élevées dans de plus grandes puissances.

#### Aussi pour des transformateurs à courant rotatif:

Il y a bien sûr aussi moyen d'utiliser des transfos à courant rotatif optimisés jusqu'à 500 kVA avec un système d'enclenchement en douceur, - TSE30 -, spécialement développé à cet effet, sans poussée de courant. Les systèmes d'enclenchement en douceur sont relayés indépendamment avec une protection AC1 pour le courant nominal immédiatement après l'enclenchement, en quel cas la connexion de contact du relais est surveillée en permanence. Une protection d'enclenchement n'est plus nécessaire en

AC3, ce qui fait encore des économies supplémentaires. Le TSE fonctionne comme disjoncteur inusable. L'assurance de courants supérieurs à 63 A par phase, automates type LS-B, ne vaut que jusqu'à 63 A, peut alors se faire avec des disjoncteurs de protection de puissance prévus pour la protection de générateurs. Ces disjoncteurs de protection déclenchent promptement dans les 10 millisecondes dès que le triple du courant nominal est atteint et protègent le transfo de manière optimale.

**Est-ce aussi possible avec de plus petits transfos?**

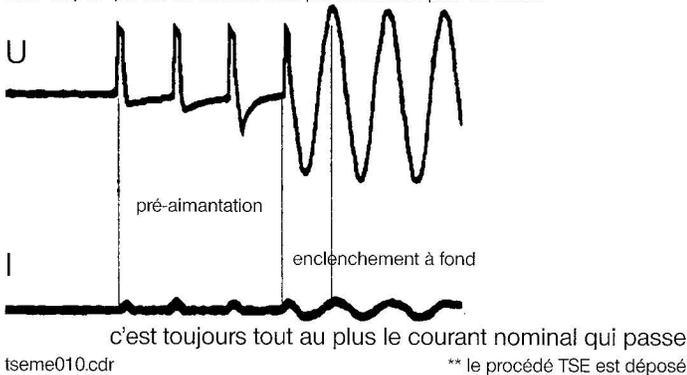
Pour les transfos qui sont plus petits que ce qui est montré dans ces exemples, on peut aussi calculer un avantage de coût avec les systèmes d'enclenchement en douceur lorsque on compte le remplacement du disjoncteur de protection du moteur pour le multiple 1,5 du courant nominal par des automates type LS-B et l'élimination de sécurités secondaires ainsi que du travail de câblage sans oublier les économies de courant.

**Norme EMV concernant les erreurs de tension dans le réseau**

L'utilisation des appareils TSE pour transformateurs de réseau ne peut à peine plus être évitée lorsque la norme EMV IEC 1000-4-11 vient à application, en quel cas des parties de réseau sont alimentées avec des tensions pouvant prendre des pannes de demi-ondes en charge, voir ill. 2. - Le rapporteur proposera bientôt un simulateur de panne de demi-ondes pour le test conforme à la règle de parties de réseau.- Comme cela a déjà été démontré, les appareils TSE protègent un transformateur et la sécurité des poussées de courant après survenance de pannes de demi-ondes dans le réseau, qui, sans TSE, sont plus fortes après une panne de demi-ondes que justement la poussée de courant d'enclenchement même aux transformateurs disposés en douceur.

**En emballage 1kVA. Transfo enclenché avec procédé \*\* TSE 2. Chargé en charge nominale.**

avec unipol - parties de tension fixes pré-aimantées pour 60 msec.



Ill. 3 - montre l'enclenchement avec les TSE 6 avec préaimantation du transfo.

(Si nécessaire, un TSE 6 pouvant enclencher jusqu'à 63 A, peut enclencher plusieurs transfos ensemble, ce qui donne alors encore plus de puissance.)

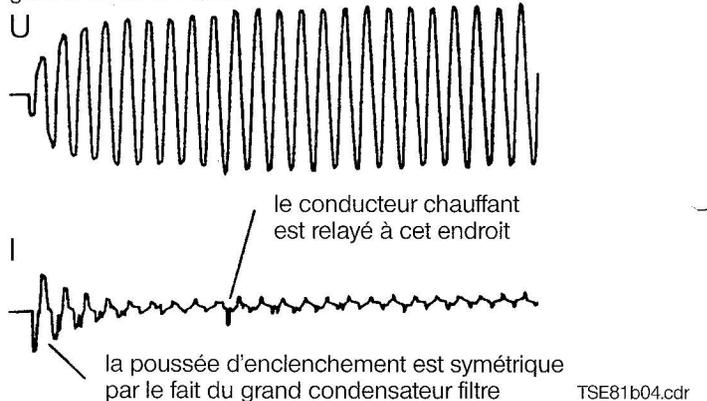
**Autres possibilités avec le TSE:**

Le TSE est doté en option d'un système de découplage en cas de sous tension qui fait que, dès qu'une tension est ramenée, p.ex., à plus que 65% de la tension d'entrée, le TSE découple le transfo et la charge et qu'il réenclenche ou reste déclenché, selon le souhait, à partir d'une tension de 75% de la tension d'entrée. Ceci permet de définir des conditions d'enclenchement précises pour la partie alimentation et charge et de mettre des procédés d'enclenchement au niveau central en place sans problème. L'utilisation des appareils TSE, dès une taille de transfo de l'ordre de env. 2kVA, est donc liée à des avantages financiers et techniques et ceci pas seulement pour des transfos qui sont enclenchés fréquemment, mais aussi pour des transfos de conduite, de chargement pour des systèmes d'alarme etc.

**Que disent les leaders du marché?**

*Un fabricant réputé de transfos et de disjoncteurs indique dans son dernier catalogue que des transfos dès 2kVA de taille doivent être équipés de limiteurs de courant d'enclenchement afin que le disjoncteur de protection de moteur préenclenché ne se mette pas en marche lors de l'enclenchement. Ceci est malgré tout un progrès pour l'utilisateur parce que le problème de la poussée de courant d'enclenchement a été tu par tout le monde jusqu'à présent. Il est vrai qu'on n'avait pas de moyen sensé pour le combattre, si ce n'est celui de fabriquer des transfos volumineux, lourds et chers, ce qui ne contrecarre pas forcément les intérêts des fabricants de transfos... On gagne notamment plus à un gros transfo qu'à un petit.*

Auto-transfo 1kVA avec égalisateur et 100.000myF et 50 Watt de charge ohmienne avec TSE81 enclenché avec propre auto-blocage à la fin de la therm.



Ill. 4 - montre l'enclenchement avec le TSE 8,1, avec limitation de courant et relai du conducteur de chaleur

**Résistance au court-circuit**

Le TSE 6 résiste au court-circuit par la sécurisation avec des disjoncteurs de protection de puissance de type B, lorsque le courant prospectif de court-circuit ne comporte pas plus de 5 kA dans le circuit de courant, sans disjoncteur de protection Ls ni LES. Feuilles de données, informations sur des applications et adresses de livraison pour les appareils TSE et pour des transfos optimisés chez: EMEKO Ingenieur büro, Michael Konstanzer, Britzingerstr. 36, D-79114 Freiburg, tél. 0049 761 5159 385 ou 0049 761 441 807, fax:

**Autre littérature du rapporteur sur le thème TSE Trafo Sanft Einschalter:**

- «Vermeiden statt begrenzen» Elektrotechnik, 73, H12, 18. Dez. 1991, chez Vogel Verlag Würzburg
- «Sanft geschaltete» par Michael Konstanzer dans ELRAD 1993 Cahier 4, pages 30-34, chez Heise Verlag.
- «Einschaltstromstöße vermeiden», de Michael Konstanzer dans ETZ vol. 114 (1993) cahier 16, pages 1004-1009, chez VDE Verlag
- «Transformatoren sanft einschalten» de Michael Konstanzer dans Elektronik 23/1993, pages 78-85, chez Francis Verlag.
- «Auf die sanfte Art» Elektronik 19/1994, pages 86-92, chez Francis Verlag
- «Start ohne Spitzen», EET, Hüthig Verlag, Cahier 4/1994, pages 54-55
- «Vermeidung von Überstromspitzen» Journal EMC, KM-Verlag, cahier 4/1994, pages 70-72. etc.

**Biographie d'auteur:**

Michael Konstanzer, ing. dipl. (FH), né 1943, étudie la technique générale de mécanique de précision à Fustwangen, Conclusion en 1967  
Carrière: Mittl. Reife, apprentissage de mécanicien de précision, études d'ingénieur, actif professionnellement comme ing. de développement (FH) en électronique et mécanique de précision dans 5 différentes entreprises industrielles, 1977 entrée comme ing. de développement dans un institut de la Fraunhofer Gesellschaft à Freiburg, de 1989 à 1994 enregistrement et réception de brevets mondiaux importants pour la FHg concernant la construction de systèmes d'enclenchement en douce, depuis 1995 indépendant à temps partiel pour la poursuite du développement et pour la commercialisation des appareils TSE.

Michael Konstanzer c.o. EMEKO Ingenieurbüro  
D-79114 Freiburg