

zoom sur les transformateurs secteur

Comportement transitoire à l'allumage et l'extinction

Andreas R. Fecht (Allemagne)

À la mise sous tension d'un transformateur secteur, un courant d'appel circule. Son intensité dépend de l'angle de phase de la tension sinusoïdale d'entrée à cet instant précis.



Ce courant dépend aussi de l'angle de phase à la mise hors tension précédente. Le but de cet article n'est pas de concevoir un circuit palliant ce courant d'appel, mais seulement d'étudier cet effet en détail. Nous n'avons trouvé que très peu d'information détaillée sur ce sujet, et cette recherche a été menée afin de combler à l'avenir cette lacune.

La rémanence du noyau de fer entraîne quelques considérations théoriques sur le comportement des transformateurs. Seuls les essais permettent de déterminer le degré d'accord entre la théorie et la pratique. Les possibles différences de comportement entre transformateurs toriques et ceux à entrefer sont également abordées ici.

Banc d'essai

Pour étudier en détail les courants du transformateur, nous avons conçu un montage adapté. La **figure 1** en donne le schéma fonctionnel. Au cœur de ce montage, le microcontrôleur et le commutateur MOSFET commandé.

L'électronique de mesure et le microcontrôleur sont alimentés sous 3,3 V régulés. Un optocoupleur commande la grille du MOSFET avec une alimentation de 12 V à isolation galvanique.

L'électronique de mesure se compose de deux AOP rail à rail, de bande passante appropriée. Un diviseur résistif ramène la tension du secteur à une valeur convenable et une résistance shunt (dont la valeur permet d'aller jusqu'à ± 75 A) mesure le courant.

Doté de deux CA/N à 12 bits, le microcontrôleur acquiert simultanément les deux valeurs à une fréquence d'échantillonnage suffisamment élevée (environ 20-50 kHz). Quatre optocoupleurs

relient le microcontrôleur au PC et transmettent les mesures en RS232.

Le circuit d'essai en détail

Le schéma du banc d'essai est présenté à la **figure 2**. Trois tensions séparées galvaniquement sont nécessaires pour alimenter le circuit en énergie.

L'alimentation du circuit de mesure est confiée à un transformateur

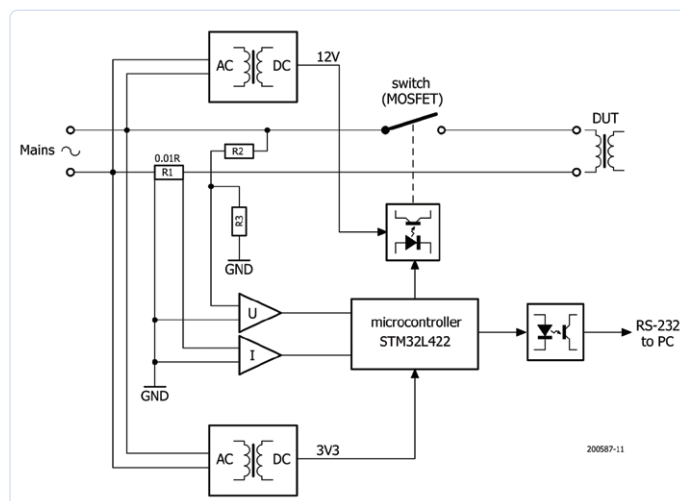


Figure 1. Schéma de principe du banc d'essai.

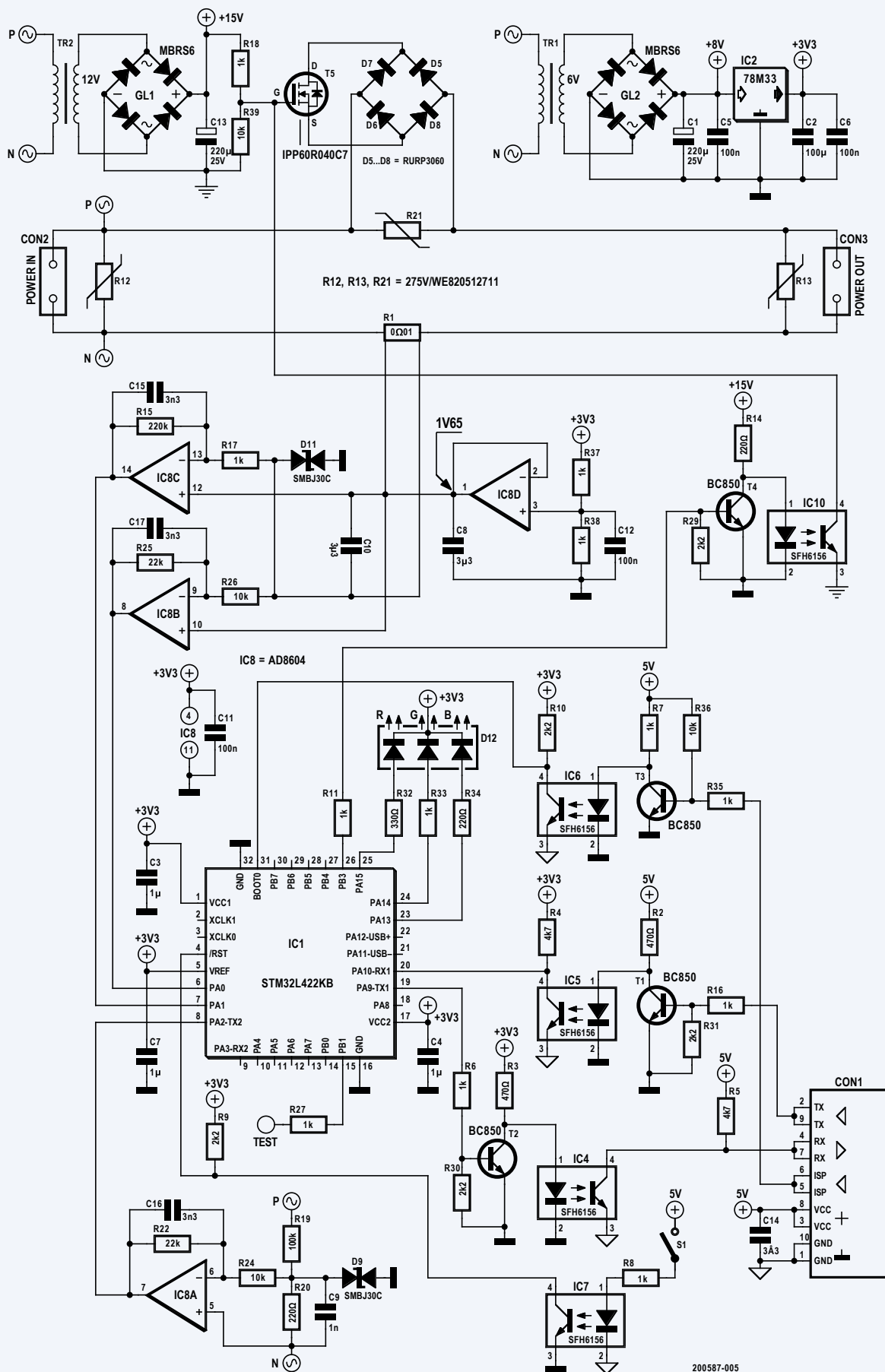


Figure 2. Le schéma du banc d'essai semble compliqué en raison des optocoupleurs qui assurent l'isolation galvanique.

zone D

Astuces, bonnes pratiques et autres informations pertinentes

Tableau 1 : Résistance de contact des bornes, mesurée pour différentes valeurs de courant.

Courant [A]	Résistance du commutateur fermé [Ω]
1	1,5
2	0,85
5	0,4 (100 m Ω différentiel)
10	0,24 (80 m Ω différentiel)

6 V / 1 W suivi d'un redresseur, un condensateur électrolytique, et un régulateur de tension 3,3 V.

Un transformateur 12 V / 1 W avec redresseur et filtrage produisant une tension continue non régulée d'environ 15 V alimente la commande de grille du MOSFET.

Le côté PC de l'interface RS-232 est alimenté en direct par un convertisseur USB-RS-232 5 V.

Interrupteur marche/arrêt

L'interrupteur marche/arrêt est un MOSFET (T5) avec un pont redresseur (D5 à D8). Un MOSFET peut être activé ou désactivé à tout moment, ce n'est pas le cas d'un thyristor ou d'un triac. Le MOSFET choisi peut supporter un courant continu de 73 A et des pointes de 211 A. Les diodes du pont redresseur supportent des courants continus de 30 A et des pointes de 70 A. Trois varistances avec une tension d'amorçage de 430 V assurent la protection contre les tensions induites.

Le MOSFET est commandé par un optocoupleur. Le temps de montée du front mesuré est de 20 μ s, c'est plus que suffisant pour ce type de mesure.

Les **tableaux 1** et **2** donnent respectivement les valeurs mesurées et extrapolées de la résistance de contact aux bornes du circuit pour différentes intensités de courant.

Prise de mesures

Le microcontrôleur STM32L422KB choisi est doté de deux convertisseurs analogique-numérique de 12 bits. Ils permettent d'échantillonner simultanément la tension et le courant.

Pour mesurer des valeurs positives et négatives, IC8D crée une masse virtuelle à la moitié de la tension d'alimentation (1,65 V). C'est le point de référence des AOP IC8A/B/C. Pour l'amplificateur de tension IC8A, la tension du secteur est d'abord divisée par 455 par le pont R19/R20. L'amplificateur a un gain de 2,2 et décale en outre la tension de 1,65 V. La plage de tension d'entrée est donc de $\pm 341,6$ V. L'amplificateur de courant IC8B amplifie la tension aux bornes de la résistance shunt d'un facteur 2,2 et décale en outre la tension amplifiée de 1,65 V. Cela donne une plage de courant de ± 75 A avec une résolution de 36 mA environ. IC8C augmente la précision de mesure des courants les plus faibles en portant à 220 le gain en tension. Sa sortie est reliée à une autre entrée du CA/N du MCU. Ainsi on peut mesurer des courants jusqu'à $\pm 0,75$ A avec une résolution d'environ 0,37 mA. La plus petite puissance crête détectable à 230 VAC est donc d'environ 0,1 W.

Tableau 2. Valeurs extrapolées de la résistance de contact.

Courant [A]	Résistance du commutateur fermé [m Ω]
20	140 (40 m Ω différentiel)
50	68 (20 m Ω différentiel)
100	40 (12 m Ω différentiel)



Figure 3. Le logiciel sur PC en action affiche la tension du réseau (vert) et le courant (rouge). Ici, la tension a été appliquée à la charge pendant un passage par zéro (ligne grise verticale de gauche) et retirée neuf passages par zéro plus tard (ligne grise verticale de droite).

Interface PC

L'interface PC est dotée de quatre optocoupleurs : deux pour les lignes TX et RX d'un port RS-232, un pour commander la broche de programmation in-system (ISP) du MCU et un pour réinitialiser le système de manière sûre. Les optocoupleurs utilisés permettent une vitesse de transmission maximale de 19200 bauds.

Circuit imprimé

Le schéma a été transposé sur un circuit imprimé double face. Sur la face inférieure, le chemin de fort courant a été renforcé de fils de cuivre d'1,5 mm². La résistance du circuit est de 11 m Ω environ pour le chemin de mesure du courant et 240 m Ω environ à 10 A entre les bornes de l'interrupteur. La résistance différentielle entre les bornes de l'interrupteur est d'environ 80 m Ω à 10 A.

Logiciel

Pour les expériences sur les transformateurs, le logiciel se compose d'un micrologiciel pour le MCU (enregistrement des données brutes) et d'un logiciel sur PC pour les traiter.

Le micrologiciel du MCU a été créé avec STM32Cube de STMicroelectronics. Le langage de programmation utilisé est le C99. Nous avons choisi le compilateur C ARM-GNU. Il est disponible comme dérivé d'Eclipse dans STM32Cube. Le logiciel pour PC (**fig. 3**) a été créé avec Delphi et donc écrit en Pascal.

Les données du MCU sont transférées par RS-232 vers un PC à l'aide

d'un convertisseur de niveau USB-RS-232. Pour chaque mesure individuelle, l'évolution de la tension et du courant est en outre affichée pour le contrôle. La valeur de la tension qui déclenche les mesures (ligne jaune) est réglée légèrement négative pour garantir l'enregistrement du 1^{er} passage par zéro de la tension.

Mesures

Le transfo a été allumé et éteint en couvrant tous les angles de phase de la tension du réseau CA, pour toutes les mesures. Paramètres utilisés :

- Pas de l'angle de phase : 5°
- Transformateur allumé pendant au moins 25 périodes (0,5 s)
- Pause entre deux mesures : 0,5 s
- Fréquence d'échantillonnage : 20 kHz

Le courant est enregistré sur deux périodes de tension complètes. Après chaque série de mesures, les deux maxima (positif et négatif) sont extraits et la valeur absolue la plus grande est retenue comme résultat. Les trois premières mesures de chaque cycle sont exclues pour écarter toute magnétisation antérieure résiduelle du noyau.

Pour un angle de phase final donné, le logiciel sur PC enregistre les 72 séries dans un fichier HTML en un tableau de 72 lignes que l'on peut ensuite facilement importer dans un tableur. Avec un pas angulaire de 5°, on obtient un ensemble de $72 \times 72 = 5184$ points qui s'affiche en 3D.

Exemple : mesure simple

Il s'agit d'une mesure sans charge pour l'impulsion de courant la plus forte (fig. 3). C'est le scénario le plus défavorable. Il se produit quand la tension est activée au début de la courbe à un passage par zéro (ligne grise verticale à gauche) et désactivée quatre périodes et demie plus tard, à nouveau à un passage par zéro (ligne grise verticale à droite).

L'impulsion de courant la plus forte se produit au 1^{er} passage par zéro. Cependant, elle n'est pas suffisante pour annuler la magnétisation du noyau du transformateur déjà présente. Les impulsions disparaissent progressivement après plusieurs passages par zéro. Cet effet est clairement audible : un bref bourdonnement dure environ une demi-seconde à la mise sous tension.

Transformateur torique avec charge résistive

Nous avons effectué cet essai avec un transformateur torique ELNA 100 VA (primaire de 230 V et secondaire de 2x24 V), voir figure 4. Comme charge résistive, nous avons connecté une résistance de 10 Ω / 50 W à chaque secondaire. Une plaque d'aluminium de montage assurait la dissipation thermique de cette charge totale d'environ 115 W (légère surcharge des résistances et du transfo). Les résultats sont présentés en 3D à la figure 5 (sans charge) et à la figure 6 (avec charge).

Transformateur EI avec charge résistive

Nous avons refait ces essais avec un transformateur à noyau EI de 120 VA (primaire 230 V et secondaire 2x15 V avec points



Figure 4. Transformateur torique de 100 W utilisé pour les expériences.

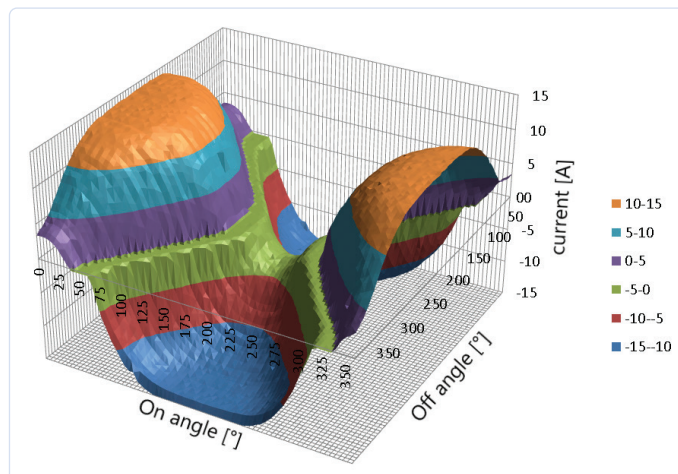


Figure 5. Tracé 3D du courant de phase pour le transformateur torique sans charge.

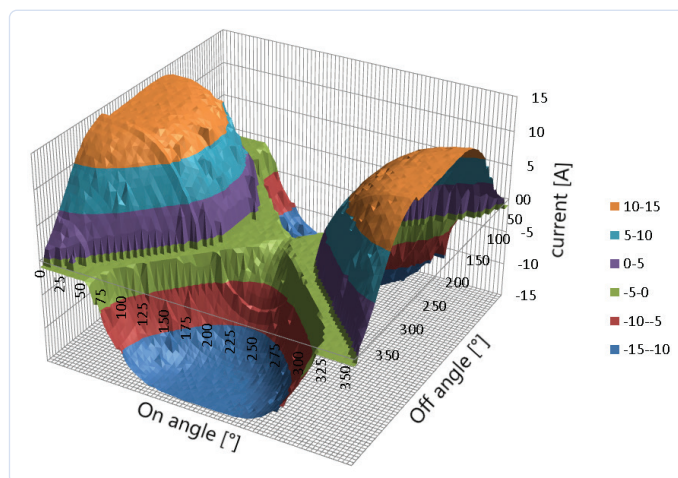


Figure 6. Charge résistive. Notez la discontinuité à l'angle de coupure d'environ 300°. Pour une raison inconnue, le fusible a sauté. Avant la poursuite de l'expérience, le transformateur s'était un peu refroidi, entraînant un courant légèrement plus élevé après le redémarrage. La raison de cette augmentation du courant pourrait être la résistance du fil de cuivre du primaire qui dépend de la température.

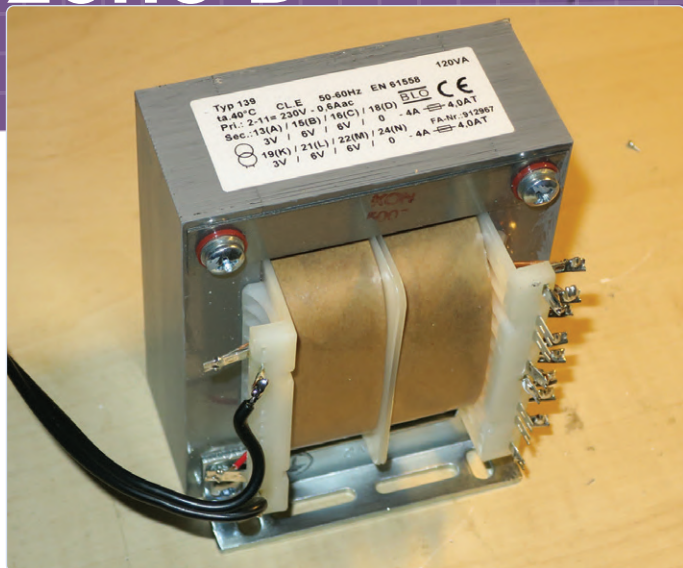


Figure 7. Ce transformateur à noyau EI de 120 W se comporte-t-il différemment du transformateur torique ?

intermédiaires) du fabricant Block (fig. 7). Comme charge résistive, nous avons connecté deux résistances de 10 Ω / 50 W en parallèle (soit 5 Ω) à chaque secondaire de 15 V. Comme ci-dessus, nous les avons vissées sur dissipateur thermique. La charge totale est de 90 W et le transfo est un peu sous-chargé. Les figures 8 (sans charge) et 9 (avec charge) donnent les résultats en 3D.

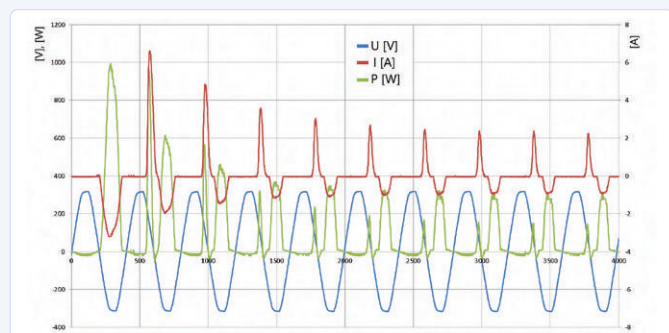
Redressement demi-onde des deux secondaires

Toutes les autres expériences ont été réalisées sur le transformateur torique.

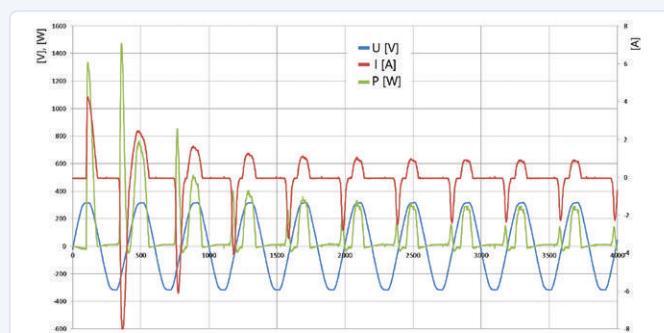
Une diode (redresseur monoalternance) a été connectée à chaque secondaire du transformateur. Les enroulements sont redressés en polarités opposées, ce qui entraîne une charge magnétique symétrique sur le transformateur, comme ce serait le cas avec un redresseur bialternance. Chaque diode est connectée à une

CHARGE ASYMÉTRIQUE

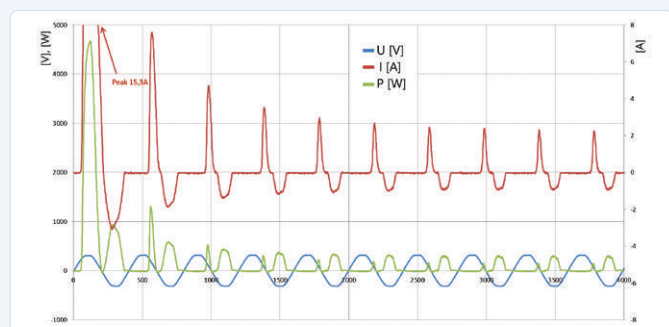
Les expériences suivantes utilisent le circuit de la figure 10, mais avec un seul secondaire chargé à la fois. Chaque expérience a été réalisée deux fois, une fois avec la charge sur S1 ('A') et ensuite avec la charge inversée sur S2 ('B'). Les conditions de départ étaient les mêmes que dans les expériences correspondantes avec charge symétrique.



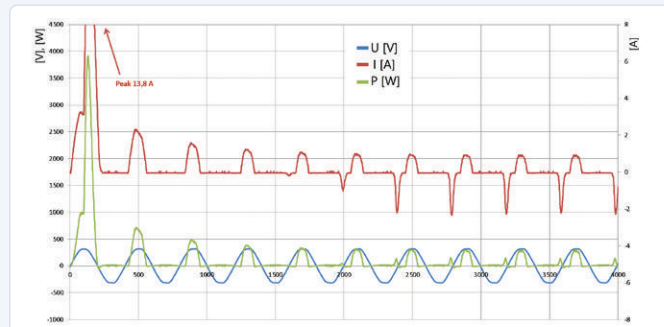
Meilleur cas A. Seule l'énergie des impulsions de courant négatives circule dans la charge. Les impulsions de courant positives se stabilisent lentement à une valeur d'environ 2 A. La rémanence du noyau du transformateur est quelque peu perturbée par la charge asymétrique du côté secondaire. L'énergie transportée par les impulsions de courant positif n'est pas négative : elle est dissipée comme puissance active dans le transfo et non dans la charge.



Meilleur cas B. La plus grande impulsion de courant se produit pendant la 2^e alternance. L'énergie de la 1^{re} pointe passe dans la charge, l'énergie de la 2^e dans le transformateur. Ici aussi, les impulsions de courant se stabilisent progressivement à environ 2 A sans tomber à zéro.



Pire cas A. Là encore, le pic d'allumage est similaire à celui du circuit ouvert. La même condition que dans le meilleur cas s'installe progressivement.



Pire cas B. Ce scénario ne produit pas la plus grande impulsion de courant. Cela est probablement dû au fait que la charge asymétrique du côté secondaire compense un peu la rémanence stockée dans le noyau pendant quelques périodes. Cependant, au bout de cinq périodes, le montage revient au comportement précédent.

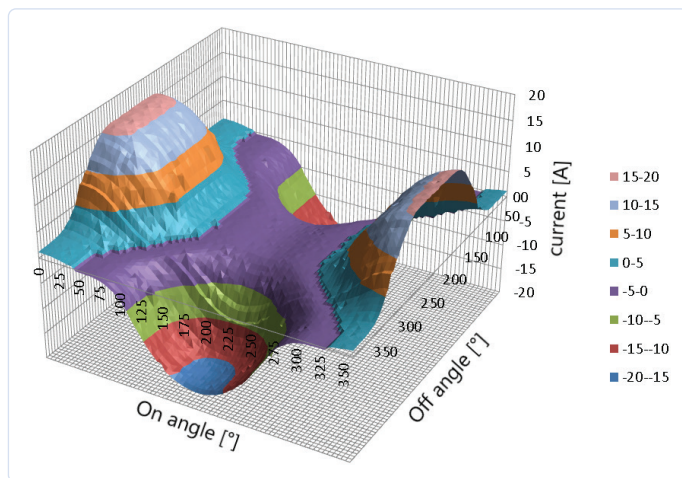


Figure 8. Tracé 3D pour le transformateur à noyau EI non chargé.

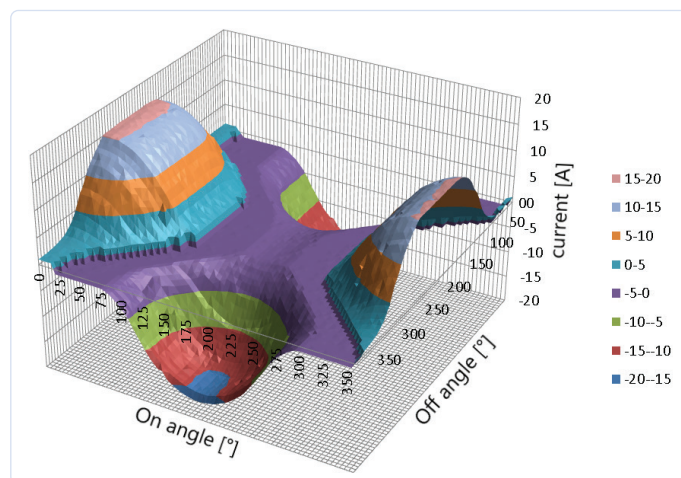


Figure 9. Transformateur à noyau EI avec charge résistive de 90 W.

résistance de 20 Ω / 100 W avec un condensateur électrolytique de 10 000 μF en parallèle (fig. 10).

Meilleur cas : angles de commutation 90°/90°

Allumage du transformateur au 1^{er} maximum de tension (après extinction exactement à un tel maximum). Ceci correspond au cas le plus favorable, où aucun effet magnétique supplémentaire ne devrait se produire comme dans les expériences précédentes.

Comme prévu, les résultats (fig. 11) montrent que le maximum de courant circule au maximum de tension (recharge du condensateur). La 1^{re} impulsion est la plus forte, car le condensateur est alors vide. Les impulsions décroissent lentement pour se stabiliser autour de 0,9 A (environ deux fois le courant nominal à pleine charge). La courbe de puissance (verte) n'est jamais négative. La puissance réactive convertie est quasi nulle.

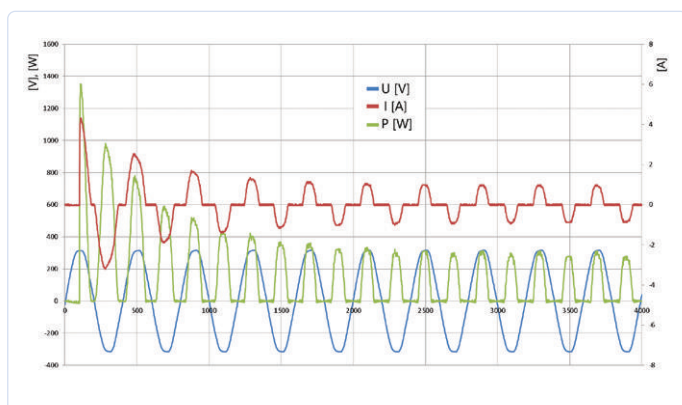


Figure 11. Charge symétrique dans le meilleur des cas. La courbe de puissance (verte) n'est jamais négative. La puissance réactive convertie est quasi nulle.

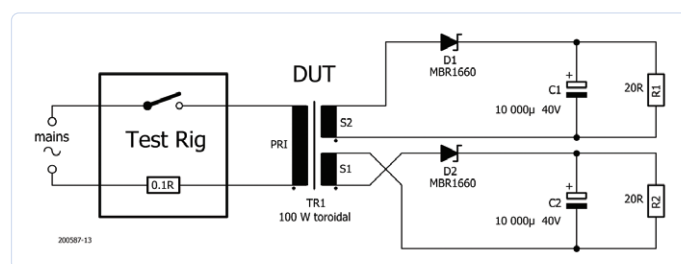


Figure 10. Circuit utilisé pour les expériences de charge symétrique. Pour les expériences de charge asymétrique, un seul secondaire était chargé à la fois.

Pire cas : angles de commutation 0°/180°

Allumage du transformateur au 1^{er} passage à zéro de la tension après une extinction au passage à zéro opposé. Comme observé

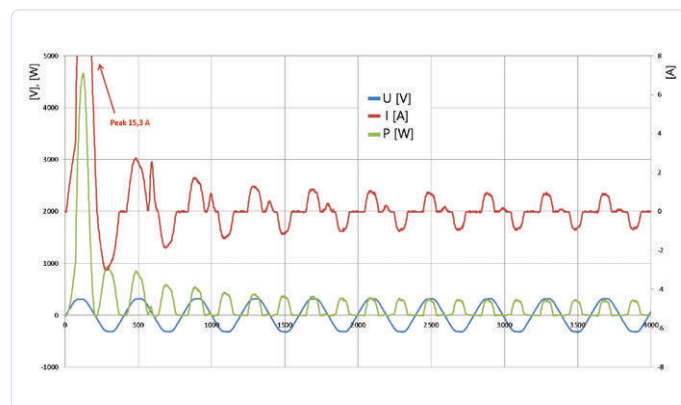


Figure 12. Charge symétrique dans le pire des cas. La puissance convertie dans le premier pic est remarquable pour un petit transfo de 100 W : presque 4,65 kW ! La valeur est positive, c'est une puissance active pure.

zone D

Astuces, bonnes pratiques et autres informations pertinentes

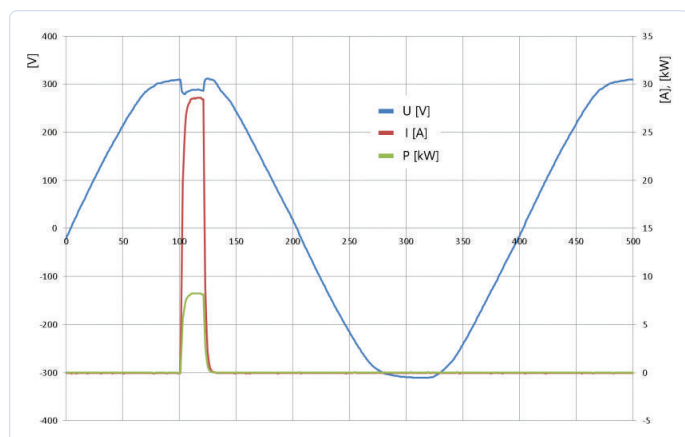


Figure 13. Pour l'impédance du réseau, une valeur d'environ 640 mΩ a été trouvée.

précédemment, c'est le cas le plus défavorable, où les effets de rémanence magnétique les plus forts sont à prévoir. Le pic de courant de 15,3 A à l'allumage (fig. 12) est proche du cas du circuit ouvert. Les pics qui suivent sont aussi similaires et disparaissent au bout de 10 à 20 périodes. La conversion de puissance réactive est quasi nulle.

Impédance du secteur

La mesure de l'impédance du secteur se fait par commutation d'une résistance de 10 Ω / 50 W pendant 1 ms environ sur le pic de tension du secteur. La chute de la tension secteur observée permet de calculer son impédance, voir **figure 13**.

La pointe de tension du réseau est mesurée peu avant la mise sous tension (310 V) et environ 0,5 ms après le front de mise sous tension (289 V). Le courant qui circule ici est de 28,5 A (puissance de crête maximale de 8,25 kW). L'impédance est alors de $(310 - 289) / 28,5 = 740 \text{ m}\Omega$. Le circuit lui-même présente une résistance de contact d'environ 100 mΩ à ce courant. Ainsi, la valeur de l'impédance du réseau est d'environ 640 mΩ.

Principaux points à retenir

Après analyse des résultats, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le courant d'appel dépend fortement de l'angle de phase auquel la tension a été précédemment coupée.

- La mise sous tension à un extremum est toujours convenable, quel que soit le type de transformateur. Cependant, il doit s'agir du même extremum (max. ou min.) que lors de la mise hors tension précédente. Sinon, le courant est à peine tolérable (environ 5× le courant normal à pleine charge). Les transformateurs toriques sont un peu plus brutaux.
- L'allumage lors d'un passage à zéro n'est pas souhaitable. L'extinction lors du passage par zéro de sens opposé produit l'impulsion de courant la plus forte (environ 30× le courant normal à pleine charge). Dans le même sens de passage par zéro, c'est moins critique (environ 10× le courant normal à pleine charge).
- Les transformateurs non chargés produisent des appels de courant beaucoup plus forts que lorsqu'ils sont chargés. Sous charge, la marge de tolérance sur l'angle de phase correct est nettement plus grande.
- Le comportement des transformateurs sous charge purement résistive ou redresseur + capacité de filtrage est comparable.

Si vous souhaitez approfondir les expériences présentées ici, toutes les données d'essai, les fichiers de conception du banc et le logiciel sont téléchargeables [1].

(200587-04)

Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (elektor@aftec.de) ou contactez Elektor (clemens.valens@elektor.com).

Contributeurs

Idée, conception, texte et illustrations : **Andreas R. Fecht**
Rédaction et illustrations : **Clemens Valens**
Schéma : **Patrick Wielders**
Mise en page : **Giel Dols**
Traduction : **Yves Georges**



Produit

- Livre en anglais, « **Advanced Programming with STM32 Microcontrollers** »
www.elektor.fr/19520

[1] Données d'essai, fichiers de conception et logiciels :
www.elektormagazine.fr/200587-04