

# Nie mehr Sicherungen auswechseln

Geräte-Entwickler müssen ihre Produkte heute entsprechend der EMV-Norm prüfen. Dazu gehört auch die Prüfung nach der Norm EN 61000-4-11, welche besagt, dass Geräte nach vorgegebenem Muster auf die nach dieser Norm erzeugten Netzunterbrechungen reagieren sollen. Geräte mit 50-Hz-Netztransformatoren, vor allem mit Ringkerntrafos, sind besonders davon betroffen. Der Artikel zeigt eine Möglichkeit, wie das von Hand erfolgte Rücksetzen, als solches kann ein Sicherungswechsel bezeichnet werden, entfallen kann.

M. Konstanzer

Hintergrund der Prüfung sind dabei die durch Netzumschalt- oder Überlastvorgänge auftretenden Kurzzeitnetzunterbrechungen. Dabei wird unterschieden, ob Geräte nach einer solchen Netzstörung unbeeinflusst weiterarbeiten oder nach kurzer Unterbrechung wieder ihren Betrieb wie zuvor aufnehmen oder von Hand neu gestartet werden müssen. Bei Geräten, welche automatisch und unbeaufsichtigt arbeiten müssen, ist das Von-Hand-Rücksetzen problematisch, wenn diese Hand nicht schnell genug um Sicherungswechsel verfügbar ist. Ein Beispiel sei das Netzteil einer Verkehrssignalanlage für Verkehrsshinweise, wie sie an Autobahnen zu finden sind.

## Etwas Physik

Wenn ein Transformator keine kontinuierlich verlaufende Netzspannung bekommt, sondern mit deformierter, das heisst insbesondere mit lückender Netzspannung gespeist wird, können genauso wie beim Einschalten des Transformators hohe Stromstösse entstehen. Durch ein nicht symmetrisches Aussteuern der Magnetisierungskurve, durch Lücken oder plötzliche Amplitudensprünge in der Speisespannung hervorgerufen, gerät das Trafoeisen in Sättigung und ruft Spitzenströme hervor, welche noch grösser sein können als beim Einschaltvorgang des Transformators im schlechtesten Fall des Einschaltens.

- **Normalbetrieb:** Die Magnetisierung im Trafoeisen wird durch die Spannungszeitfläche nur einer Netzspannungshalbwelle, entsprechend ihrer Polarität, von einem Wendepunkt auf der Hystereseurve zum anderen Wendepunkt bewegt. Am Ende einer jeden Netzspannungshalbwelle ist die höchste Magnetisierung im Trafoeisen erreicht. Dort liegt zeitlich gesehen auch der Scheitel des Magnetisierungsstromes, der mit steigender Magnetisierung nichtlinear zunimmt. Deshalb hat er auch diese nicht sinusförmigen, spitzen Amplituden, welche genau im Wendepunkt der Hystereseurve liegen.

- **Störung:** Wird das Trafoeisen über den betriebsmässigen Wendepunkt der Magnetisierungskurve hinaus noch stärker magnetisiert, gerät das Trafoeisen in Sättigung, was durch überproportionales Ansteigen des Magnetisierungsstromes erkennbar ist. Ursache ist erstens ein Einschalten mit einer Spannungshalbwelle der gleichen Polarität wie die Restmagnetisierung und zweitens eine plötzlich auftretende geringere Spannungszeitfläche einer Netzhalbwellen. Siehe die Bilder 1 bis 4.

## Bisherige Massnahmen

Transformatoren werden zur Begrenzung des Einschaltstromstosses oft mit einer Magnetisierungsreserve ausgelegt, damit man sie noch mit Motorschutzschaltern, die auf den Nennstrom eingestellt sind, oder mit trägen

Schmelzsicherungen absichern kann. Magnetisierungsreserve bedeutet eine abgesenkte Induktion, auch deshalb so ausgelegt, damit eine schlechtere und preiswertere Blechqualität mit höheren Verlusten verwendet werden kann. Eine weitere Massnahme zum Absenken des Einschaltstromes ist das Vorsehen von Luftspalten. (Geschweisste EI-Trafos.) Luftspalte verschlechtern aber wiederum indirekt den Wirkungsgrad von Trafos und erfordern grössere und schwerere Eisenkerne. Ebenfalls werden höhere Primärspulen- Kupferwiderstände dazu verwendet, den Einschaltstromstoss zu begrenzen.

Bei Netzfehlern in Form von Halbwellenausfällen, wie sie auch in der EMV-Prüfnorm EN 61000-4-11 beschrieben sind, Testen mit dem Ausfall einer halben Halbwellen = 5 ms,

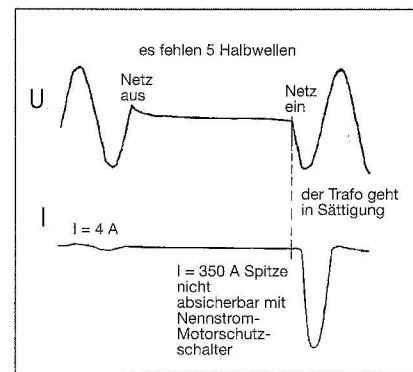


Bild 1 Halbwellenausfall-Simulation an einem 1,6-kVA-optimierten, geschachtelten Trafo mit 1 kW belastet.

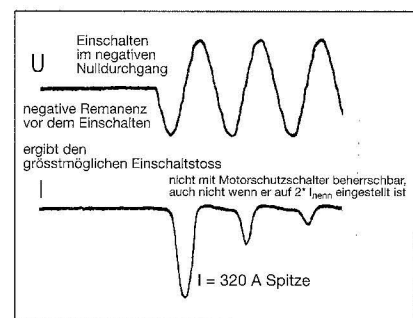


Bild 2 Grösster Einschaltstromstoss an einem 1,6-kVA-optimierten EI-Trafo mit 1 kW belastet.

verhält sich ein Trafo mit Magnetisierungsreserve, siehe Bilder 3 und 4, bezüglich der Spitzenströme jedoch genauso wie ein Trafo, der keine Magnetisierungs-Reserven und nur geringe Restluftspalte hat. Siehe Bilder 1 und 2. – (Der Stromstoss wird auch bei weichen Trafos nach einem Halbwellenausfall deutlich höher als beim normalen Netzeinschalten. Der Vorteil des geringeren Einschaltstromstosses gegenüber harten Trafos existiert dann nicht mehr.) Nach dieser Norm müssen Geräte geprüft werden. – Trafos ohne Magnetisierungsreserven erzeugen auch beim normalen Netzeinschalten einen hohen Einschaltstromstoss und können nicht mit einem Motor- oder Trafoschutzschalter abgesichert werden. Einfach ausgedrückt: Beim Halbwellenausfall verhalten sich beide Typen gleich. Den Trafo mit Magnetisierungsreserve bezeichnet der Autor auch als «weichen» Trafo, weil zusätzlich meistens ein höherer Primärwicklungswiderstand durch dünneren Drahtquerschnitt die Einschaltstrombegrenzung verbessert. Das Betriebsverhalten wird dabei natürlich verschlechtert, dieser Trafo wird heisser als nötig und ist baulich grösser.

Optimierte, harte Trafos dagegen erzeugen beim Einschalten und bei Netzfehlern fast gleich grosse Stromspitzen. Der beim Einschalten bestehende Vorteil eines geringeren Einschaltstromstosses von Trafos mit Magnetisierungsreserven gegenüber den optimierten Trafos ist bei Netzfehlern damit eher unbedeutend, das heisst, der weiche Trafo verhält sich dann wie

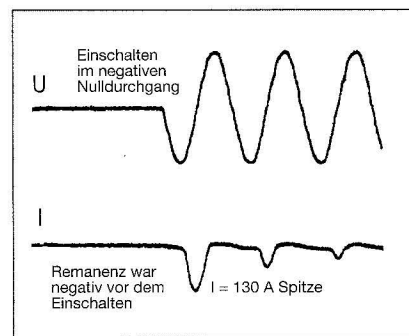
ein «harter», also optimierter Trafo. Kommt die Netzspannung nach dem Ausfall wieder zurück, und zwar mit der Halbwellenpolarität, mit der sie zuletzt beim Ausschalten am Trafo angelegen hat, dann entsteht eine stärkere Eisensättigung als beim Einschalten aus dem Ruhezustand. Die Magnetisierung läuft beim belasteten Trafo innerhalb der kurzen Netzhalbwellenausfallzeit nicht in den Ruheremanenzpunkt zurück. Fazit: wenn weiche Trafos vor diesem Störfall nicht schützen können, dann kann man gleich steife, optimierte Trafos oder Ringkerntrafos nehmen.

Ein optimierter Trafo hat andererseits gegenüber einem weichen Trafo beträchtliche Vorteile, weil er z. B. als Ringkerntrafo einen geringeren Leerlaufstrom hat und einen höheren Wirkungsgrad und bei gleicher Leistung wesentlich weniger Gewicht als ein weicher Trafo besitzt. Ausserdem wird ein harter Trafo, mit geringeren Eisen- und Kupferverlusten, weniger warm und kann auch bei schwierigen Einbauverhältnissen ohne forcierte Kühlung betrieben werden.

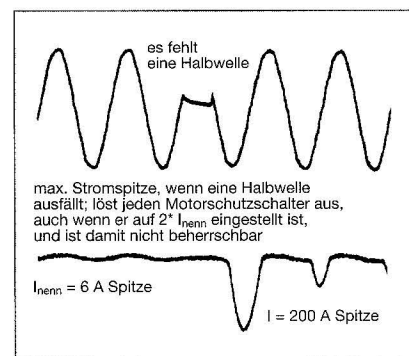
Folgende, mit einem Speicheroscilloskop, Spannungstastkopf und Stromzange aufgenommenen Bilder zeigen die Wirkung von Netzfehlern, Bild 1 und Bild 4 und das Verhalten beim Einschalten an unterschiedlichen Trafos, Bild 2 und 3.

Solche Netzfehler können zum Beispiel bei Netzzusammenbrüchen durch ferne Hochspannungsleitungs-Kurzschlüsse entstehen, wie an Weihnachten 1999 durch den Sturm Lothar zu beobachten war. (Das vom Autor beobachtete Flackern der Wohnungsbeleuchtung war kein Wackelkontakt einer Glühbirne, sondern wurde durch Netzkurzzeitunterbrechungen erzeugt. Ein Nachziehen der Glühbirne in der Lampenfassung war die erfolglose erste Reaktion des Autors.)

Auch das teilweise Herausrutschen eines Steckers aus der Steckdose die einen Elektronikenschub speist, in dem ein grösserer Ringkerntrafo eingebaut ist, kann diesen Effekt erzeugen. Eingebaute Einschaltstrombegrenzer schützen aufgrund ihres trägen Brückrelaisabfalls davor nicht.



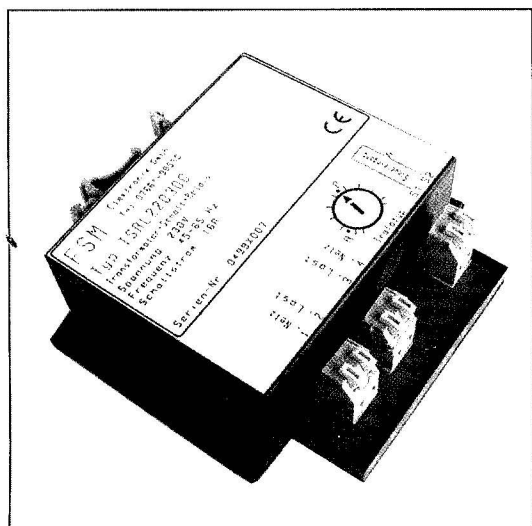
**Bild 3** Grösster Einschaltstromstoss an einem geschweissten 1-kVA-El-Trafo mit 1 kW belastet.



**Bild 4** Halbwellenausfall-Simulation an einem geschweissten 1-kVA-El-Trafo (weicher Trafo) mit 1 kW belastet.

Die Stromspitze von 350 A ist beim Ausfall von 5 Halbwellen grösser als der 35fache Nennstrom. Siehe Bild 1. (Beim Ausfall nur einer Halbwellen ist die Stromspitze noch etwas grösser.) Beim Einschalten im schlechtesten Fall, Einschalt polarität gleich Remanenz polarität, siehe Bild 2, das ergibt den grössten Einschaltstromstoss, erzeugt dieser Trafo eine Stromspitze von 320 A Spitze. Das ist fast genauso viel wie beim Ausfall von 1, 3, 5 ... Halbwellen. Beim optimierten Trafo ist also, wie hier durch Messung nachgewiesen, der Einschaltstromstoss beim ersten Einschalten fast genauso hoch wie bei Netzhalbwellendefekten.

Das wird von keinem passenden Motorschutzschalter mehr ausgehalten. Auch nicht wenn er wie üblich auf den nächstgrösseren Wert ausgelegt und auf den kleinsten Wert eingestellt wird. Auch überdimensionierte Gerätesicherungen lösen dabei aus. Die B-16A-Leitungsabsicherung von Steckdosen löst dabei natürlich sofort aus. (Die Messungen wurden mit einem Netzausfallsimulator an einem Stromnetz mit 0,4 Ω Innenwiderstand gemacht.)



**Bild 5** Transformator-Schaltrelais (TSR) mit schneller Halbwellenausfall-Erkennung.

Bei einem geschweissten Trafo ist der Einschaltstromstoss um etwa 21-mal grösser als der Nennstrom. Siehe Bild 3. Dieser Trafo ist gerade noch mit einem Trafoschutzschalter absicherbar. Geräte-Absicherungen auf Nennstrom ausgelegt und auch die vorgeschalteten B-16-A-Leitungsabsicherungen lösen dabei immer aus.

Beim geschweissten Trafo ist der Stromstoss nach einem Halbwellenausfall grösser als der 33fache Nennstrom (200 A Spitze.) Das ist deutlich grösser als der Einschaltstromstoss mit nur 130 A Spitze und damit 21-fachem Nennstrom. Wenn die Absicherung bei solchen Netzfehlern nicht auslösen darf, nützt es also nichts, einen weichen Trafo mit Magnetisierungsreserve auszuwählen.

Übliche Einschaltstrombegrenzer können auf solche kurzen Netzunterbrechungen nicht schnell genug reagieren, weil das Relais, welches den Strombegrenzungswiderstand brückt, nicht schnell genug öffnen kann. Daher sind sie für diesen Fall als Einschaltstrombegrenzer wirkungslos.

Ein Transformator-Schalt-Relais, (TSR), mit schneller Halbwellenausfall-Erkennung vermeidet diesen Nachteil. Siehe Abbildung oben, Bild 5. Es erkennt die beschriebenen Defekte der Netzspannung schon vor ihrer schädlichen Wirkung, trennt den Trafo sofort vom Netz und schaltet so schnell wie möglich, hier nach 40 Millisekunden wieder sanft und ohne jeglichen Einschaltstromstoss ein. Die TSR lassen sich von Trafogrössen ab 500 VA wirtschaftlich einsetzen. Ein TSR kann auch mehrere Trafos schalten und schützen. Das TSR ist auch als Platine in Geräte leicht einzubauen.

In Bild 6 sind der schnell reagierende Ausschaltvorgang und das schnelle Wiedereinschalten zu sehen. Ohne den TSR davor würde unweigerlich die Primärsicherung auslösen.

Nach dem Ausfall von 1 Netzhalb-welle, dem schlechtesten Fall für einen Ringkerntrafo überhaupt, entsteht bei Netz-wiederkehr keine Stromspitze. Der Trafo liefert für die meisten Fälle auf diese Art schnell genug wieder Strom, so dass eine Geräte-funktion auch nach solchen Netzstörungen gar nicht auftritt.

Die Ursache, warum bei Trafos ohne grosse Magnetisierungsreserve, wie zum Beispiel bei Ringkerntrafos, der

Unterschied des Einschaltstromes und des Stromstosses bei Netz-wiederkehr nach kurzen Unterbrechungen gering ist, ist folgendermassen begründet: Die Ruhe-Remanenz ist nach langer Zeit bei diesen Trafos fast die gleiche wie nach kurzzeitigem Ausschalten von wenigen Netzhalbwellen.

Bei Trafos mit Magnetisierungsreserve in Form von geschachtelten und erst recht bei geschweissten Trafos ist der Unterschied der Ruhe-Remanenz und der Remanenz nach Kurzunterbrechungen deutlich grösser als bei Optimierten oder Ringkerntrafos. Je geringer die Ruheremanenz vor dem gleichpoligen Einschalten, desto geringer ist der Einschaltstromstoss.

Bei Trafos mit Magnetisierungsreserve und mit Luftspalt ist die Remanenz nach den kurzen Netzunterbrechungen höher als nach längerer Pause. Deshalb nützt bei kurzen Netzunterbrechungen ein Luftspalt nicht viel zum Begrenzen des Einschaltstromstosses.

### Ein Wort für die Vorteile von Ringkerntrafos

Gerade für tragbare Stromversorgungen bieten Ringkerntrafos jedoch aufgrund ihres geringeren Gewichtes gegenüber Pakettrafos deutliche Vorteile. Auch ist ihr Leerlaufstrom, Blindstrom, vernachlässigbar klein.

Durch das Einschalten mit den TSR wird natürlich auch der Einschaltstromstoss vermieden. Die Trafoschaltrelais TSR haben zum Steuern des Einschaltens einen Steuereingang, der mit einem externen Kontakt oder mit einer 5-32-V-Fremdspannung bedient werden kann.

Der Nachteil ist überwunden. Ein Ringkerntrafo hat im Gegensatz zum immer luftspaltbehafteten «eckigen» Trafo eine hohe Ruhe-Remanenz, weil kein Restluftspalt im Eisen existiert. Durch Netzfehler, welche, wie am Anfang beschrieben, eine kurzzeitige Gleichstrommagnetisierung bewirken, ist solch ein Trafo leicht in Sättigung zu bringen, weil der fehlende Luftspalt keine Gleichstrommagnetisierung erlaubt. Mit dem TSR lässt sich ein Ringkerntrafo nicht nur optimal einschalten, sondern auch vor den dargestellten Netzhalbwellenfehlern schützen.

### Weshalb mit Netzwechselfspannung betriebene Transformatoren immer noch Vorteile haben

Nicht für alle Stromversorgungen von Elektronikeinrichtungen sind Schalt-netzteile geeignet, weil die erzeugten Hf-Störungen nur mit grossem Aufwand zu dämpfen sind. Auch ist die MTBF von Schaltnetzteilen lange nicht so gross wie die von 50-Hz-Trafos.

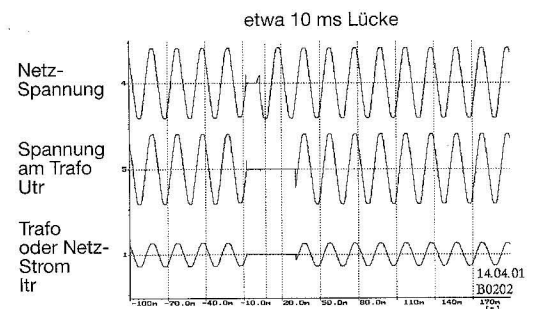
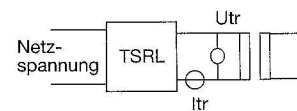


Bild 6 Halbwellenausfalltest, TSR vor 1,2 kVA Ringkerntrafo. Der Netzausfall wird durch Wackelkontakt erzeugt. In einem solchen Fall würde ein Trafo ohne TSR voll in die Sättigung gehen. TSR erkennt aber den Ausfall und verhindert die Eisensättigung des Trafos. TSR schaltet so früh wie möglich wieder ein.

Mit der vorgestellten Applikation für die Trafoschaltrelais lassen sich alle störenden Nachteile von Netztrafos beseitigen. Die Absicherung des Trafos kann auf der Primärseite mit Nennstrom und sogar flink geschehen. Der Netztrafo kann besonders verlustarm und hart ausgelegt werden und für Einbauverhältnisse mit schlechter Kühlung eingesetzt werden. Der Wirkungsgrad solcher 50-Hz-Kleintrafos liegt dann je nach Grösse mit 90 bis 98% auf jeden Fall immer noch höher als bei Schaltnetzteilen.

ET 07

M. Konstanzer, Dipl. Ing. FH  
Emeko-Ingenieurbüro  
Britzingerstr. 36, D-79114 Freiburg  
www.emeko.de