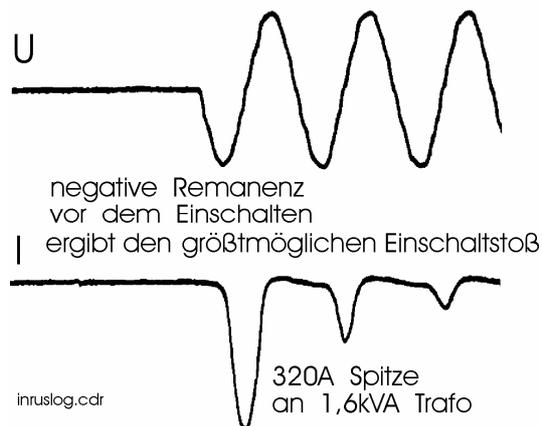


Trafo-Einschalt-Stromstoß beherrschen, verkleinern, begrenzen oder besser vermeiden!

Seit es Transformatoren gibt, kennen Fachleute die Probleme mit deren Einschalt-Stromstößen. Bereits beim Einschalten von Transformatoren ab ca. 500 VA Leistung, vor allem bei Ringkerntrafos im Haushaltsbereich, also bei Absicherung der Zuleitung mit B16 A Flachautomaten, löst häufig die Sicherung aus. Die dem Trafo vorgeschaltete Gerätesicherung wird in der Regel größer als der Nennstrom des Trafos und superträge ausgelegt und löst deshalb im echten Bedarfsfall nicht aus. Der Trafo ist dann erst durch eine zusätzliche Sekundärabsicherung im Gerät geschützt.



Ursachen und Auswirkungen des Einschalt-Stromstoßes:

Die Remanenz im Trafoeisen ist das magnetische Gedächtnis des Trafos. Wird zufällig in der Nähe des Spannungs-Nulldurchgangs eingeschaltet und ist vom Abschalten her, eine zur Netzhalbwellen gleichpolige magnetische Remanenz im Eisen des Trafos vorhanden, wird das Eisen in die magnetische Sättigung getrieben. Dann entsteht der größte Einschalt-Stromstoß. Siehe Bild 1.

Der Trafo hat dabei seinen **induktiven Widerstand weitgehend verloren**. Dieser Zustand kommt einem Kurzschluss während dem Ende der ersten Netzspannungs-Halbwellen gleich. Der Strom wird dabei **nur durch** die Netzimpedanz, den Spulen-Kupferwiderstand und je nach Trafotyp mehr oder weniger durch die Streureaktanz der Trafo-Primärwicklung begrenzt. Im Bild links beträgt der Einschalt-Stromstoß das 32fache des Nennstromes. Das hält keine Absicherung aus, die auf den Nennstrom ausgelegt ist.

Bild 1 Deshalb haben Trafos mit kleinen Kupferverlustwiderständen leider besonders hohe Einschaltströme. Wegen der nötigen Strombegrenzung beim Einschalten baut man Trafos **nicht** mit sehr kleinen Kupfer-Verlusten, weil dann der Einschaltstrom groß wäre. Der Fachmann erkennt das am angegebenen Wert der Kurzschlussspannung U_k . Ein kleiner Wert von U_k ergibt sich wenn die Kupferverluste und die Streureaktanzen der Primär- und Sekundärseite gering sind. Für den Einschaltstromstoß spielt die Sekundärwicklung keine Rolle. Ein Trafo mit kleiner U_k hat einen höheren Einschaltstrom als ein Trafo mit großer U_k .

Ein steifer und verlustarmer Trafo, bis 1000 V Betriebsspannung, hat deshalb eine U_k von 2% oder kleiner. Ein einschaltstromarmer Trafo hat eine U_k von über 4%.

Hochspannungstrafos, also solche mit primärseitiger Hochspannung, haben aus diesem Grund eine Kurzschlussspannung von größer 4%, damit die primärseitigen Schalter nicht zu schnell verschleiben.

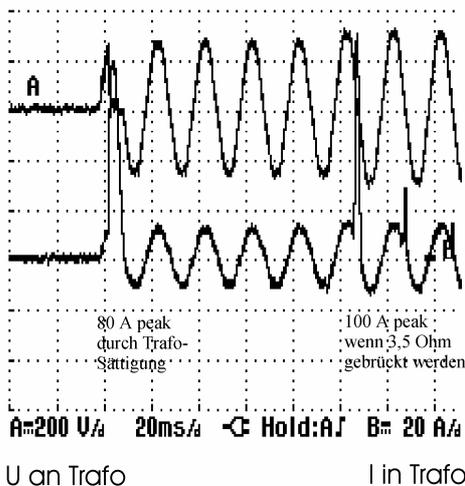
Was wird gegen den Einschalt-Stromstoß unternommen?

Bei einer sicher dimensionierten Anlage mit Transformatoren wird dieses Einschaltstrom-Problem nicht sichtbar. Weil man den Einschalt-Stromstoß nur am Auslösen der Primärsicherung erkennt, nimmt man ihn ansonsten nicht wahr. Wie wird verhindert, dass die Sicherung beim Einschalten nicht auslöst? Dazu gibt es verschiedene Maßnahmen, um den Einschalt-Stromstoß zu beherrschen, begrenzen, verkleinern oder zu vermeiden. Diese Maßnahmen sind im Einzelnen und in Kombination: (Eine neue Massnahme wird in Punkt 11 beschrieben.)

- 1) **Beherrschen:** Absicherung mit trägen Schmelzsicherungen und **Vergrößern des Sicherungsnennwertes auf bis zu drei Mal Trafo-Nennstrom**. Die Sicherung dient damit nur noch als Kurzschluss-Schutz für die Zuleitung, die auch entsprechend überdimensioniert werden muss. Bei einer Trafouberlastung ist der nicht sekundärseitig abgesicherte Trafo besonders brandgefährdet. Diese brachiale Maßnahme, welche die physikalischen Möglichkeiten zur Einschaltstromunterdrückung außer Acht lässt, wird leider immer noch angetroffen. Als Überlastschutz muss eine weitere Sicherung auf der Trafo-Sekundärseite installiert werden. Dort fließt nur der Nennstrom des Trafos, denn der Einschalt-Stromstoß tritt nur auf der Primärseite auf.
- 2) **Verkleinern:** Einschaltstrom-arme Auslegung, bei welcher der Trafo auf einen maximalen Einschalt-Stromstoß von 15 Mal Nennstrom ausgelegt wird. Dadurch wird der Trafo aber größer, teurer und hat mehr Verluste und kann nur in Verbindung mit träger Absicherung, die erst bei einem Strom von 21 mal I_{nenn} flink auslöst, eingesetzt werden. Der Anwender ist gezwungen einen höheren Anschaffungs-Preis als bisher zu bezahlen. Außerdem sind die elektrischen Verluste bei solchen Transformatoren größer als bisher. Ist eine flinke Absicherung gewünscht, dann muss die Absicherung dabei vor und hinter dem Trafo erfolgen. Die primär-seitige Absicherung kann nicht gleichzeitig flink und auf den Nennstrom ausgelegt werden.

- 3) **Verkleinern und beherrschen:** Eine einschaltstromarme Trafo-Auslegung wie zuvor ist bei der Absicherung mit Motor-schutzschaltern nötig: Für einen Steuertrafo mit z.B. 2,5 A Nennstrom, **einen im Stromwert größeren und sehr trägen (Trafo-)Schutzschalter** mit 2,5 A bis 4 A T Auslösebereich wählen und auf 2,5A stellen. Der Trafo braucht dann wie zuvor beschrieben eine zusätzliche sekundärseitige Sicherung. Trafo- oder Motorschutzschalter sind nur bei einschaltstrom-armen Trafos verwendbar. Für die Kosten und Verluste gilt das unter Punkt 2 gesagte.
- 4) **Verkleinern und beherrschen:** Eine einschaltstromarme Auslegung wie zuvor ist auch bei der Absicherung mit Flachautomaten nötig. Dazu einen Typ mit D- oder besser E-Charakteristik wählen. Typ E hat eine flinke Auslösung bei 21 Mal I_{nenn} . Der Trafo braucht dann wie zuvor beschrieben eine zusätzliche sekundärseitige Sicherung. Das geht aber nur bei Verwendung von Einschaltstrom-armen Trafos. Für die Kosten und Verluste gilt das unter Punkt 2 gesagte.
- 5) **Begrenzen:** Einen **Einschaltstrombegrenzer** mit Vorwiderstand oder Heißeiter (NTC) der nach kurzer Zeit automatisch von einem Relais gebrückt wird, zwischen Schalter und Trafo-Primärseite einbauen. Das ergibt eine Begrenzung des Stromstoßes auf Werte, welche die träge Primärsicherung gerade noch nicht zum Auslösen bringen.

2 kVA Ringkerntrafo mit Nennlast eingeschaltet mit Einschaltstrombegrenzer, TEB02, für 230V 16A, mit nach 100msec. gebrücktem 3,5 Ohm Vorwiderstand.
Abgesichert mit 16A B-Typ Leitungsschutzschalter, der gerade noch nicht auslöst.



Leerlauf zur Belastung bricht die Sekundärspannung ein bis sich Heißeiter

Bild 2

erwärmt hat. Unnötige Dauerverluste am Heißeiter.

Wenn Trafos unter Last eingeschaltet werden, muss der Vorwiderstand gerade so niederohmig ausgelegt werden, dass die Sicherung bei diesem scheinbaren Kurzschlussfall nicht auslöst. Beim Brücken des Begrenzungswiderstandes entsteht unter Last ein zweiter Stromstoß. Die Absicherung kann deshalb trotzdem nicht flink nach dem Trafo-Nennstrom erfolgen. Liegt jedoch beim Einschalten hinter dem Trafo ein echter Kurzschluss vor, verbrennt der Vorwiderstand, oder das Überbrückungsrelais nimmt Schaden. Außerdem muss nach jedem Einschaltvorgang wegen der Erwärmung des Begrenzungswiderstandes mindestens **eine Minute gewartet werden**, bis erneut eingeschaltet werden darf. Einschaltvorgang siehe Bild 2.

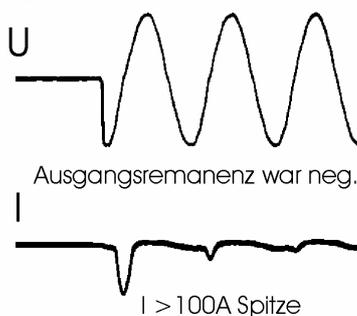
Heißeiter die ungebrückt bleiben werden bei kleineren Trafos verwendet. Weiterer Nachteil: Beim Wechsel von

- 6) **Begrenzen:** Eine speziell auf den Trafo angepasste **Drossel** zwischen Schalter und Trafo einbauen. Diese Drossel wird von einem Überbrückungsschalter automatisch gebrückt. Die Drossel ist groß und teuer. Die primärseitige Absicherung muss träge sein. (ohne Bild.)

- 7) **Mit nullspannungsschaltendem Halbleiterrelais** einschalten ergibt in 50% aller Fälle den ungünstigsten Fall (weil in 50% der Einschaltfälle in Richtung der Remanenzpolarität eingeschaltet wird. Die Remanenzpolarität ergibt sich aus der Polarität der letzten Strom-Halbwelle vor dem Ausschalten.)

Die am durchgeschalteten Halbleiterrelais verbleibenden Verluste und das zur Verfügung stellen einer DC Ansteuerspannung sind ein weiteres Hindernis. Für die Absicherung gilt das unter Punkt 1 gesagte. (Ohne Bild).

geschachtelter 1 kVA UI- Trafo mit scheinbar-schaltendem Halbleiterrelais eingeschaltet



...Tseme009.tif

Halbleiterrelais und das zur Verfügung stellen einer DC Ansteuerspannung sind ein weiteres

Bild 3

- 8) Mit einem nullspannungsschaltenden Halbleiterrelais einschalten, das so gesteuert ist, dass immer **gegenpolig zum Ausschalten eingeschaltet** wird. Die Steuerung des Schaltens und die Messung der Ausschalt polarität ist aufwändig und teuer. Es entsteht jedoch trotzdem bei jedem Schalten ein kleinerer Einschalt-Stromstoß. Beim ersten Einschalten nach einem Netzausfall versagt die Einrichtung vollkommen, weshalb doch wieder übersichert werden muss. Die bleibenden Verluste am durchgeschalteten Halbleiterrelais und das zur Verfügung stellen einer DC Ansteuerspannung sind ein weiteres Hindernis. (Ohne Bild).

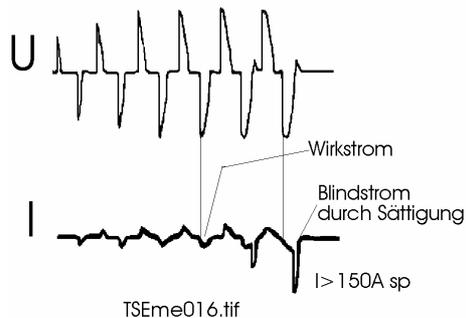
- 9) **Mit scheinerschaltendem Halbleiterrelais** einschalten ergibt nur bei Trafos mit einem definierten Luftspalt befriedigende Ergebnisse. Solche Trafos haben keine magnetische Remanenz, sind aber deutlich größer, teuer und mit mehr Verlusten behaftet als gewöhnliche Trafos. Die bleibenden Verluste am durchgeschalteten

Hindernis. Siehe Bild 3.

- 10) **Mit symmetrisch andimmenden Halbleiterrelais** einschalten ergibt nur bei ohmisch belasteten Trafos, die einen Luftspalt haben, befriedigende Ergebnisse. Bei gewöhnlichen Trafos im Leerlauf oder bei ohne jeden Luftspalt wie z.B. Ringkerntrafos ergeben sich auch im belasteten Fall hohe Einschaltstromspitzen. Die bleibenden Verluste am durchgeschalteten Halbleiterrelais und das zur Verfügung stellen einer DC Ansteuerspannung sind ein weiteres Hindernis. Siehe Bild 4 .

1kVA Ringkerntrafo mit sym.andimmendem Halbleiterrelais eingeschaltet.

Trotz Nennlast löst Sicherung aus, weil Trafo in Sättigung geht.



Außerdem gilt: Die Schaltkontakte zum direkten Einschalten von Trafos (in obigen Fällen 1 bis 6) müssen in Klasse AC3 ausgelegt werden, wie zum Schalten von Motoren, die auch einen erhöhten Anlaufstrom haben. (Motoren haben aber nur einen Einschaltstrom bis zu max. 12 Mal Nennstrom, optimierte Trafos haben bis zu 50 Mal Nennstrom.) Der hohe Einschaltstrom lässt die Schaltkontakte früher als nötig verschleiben oder gar verschweißen.

- 10a) Mit momentanschaltenden Halbleiterrelais hat man das Einschaltstromproblem nicht vermieden, es tritt nur seltener auf. Es ist dabei jedoch noch schlechter als das Schalten mit einem Schütz, weil dieser im Gegensatz zum Halbleiterrelais nicht immer im Nulldurchgang der Spannung ausschaltet. Wenn nämlich im Nulldurchgang ausgeschaltet wird dann wird die Remanenz im Trafoeisen immer auf den höchsten Wert gesetzt, was automatisch bei unpassend dazu gewähltem Einschalten dann den höchsten Einschaltstrom erzeugt.

Bild 4

- 11) **Einschaltstrom vermeiden** mit einem **Trafo Schalt Relais**, TSR, welches den Trafo zuerst vormagnetisiert und dann im physikalisch richtigen Punkt auf der Netzspannungskurve einschaltet. Die Remanenz im Trafoeisen wird vor jedem Einschalten auf den zum Einschalten optimalen Wert gebracht. Das Trafo Schalt Relais wird zwischen die Sicherung und die Trafoprimärseite eingebaut oder ersetzt einfach den bisherigen Schalter oder das Schütz.

Ein kleiner Schließer-Hilfskontakt kann den Einschaltvorgang starten. Das **TSR** lässt den Einschalt-Stromstoß niemals entstehen. Somit kann ein Trafo allein auf der Primärseite entsprechend seiner Last abgesichert werden, auch flink, selbst superflink und sogar unterhalb des Nennstroms. Das hat Konsequenzen für lange Leitungen nach dem Trafo, die damit im Querschnitt dünner und länger werden können (bei Anlagen wichtig), weil der Kurzschluss-Strom nun sicher und allein von der primärseitigen Sicherung abgeschaltet wird.

Messkurve von Einschaltvorgang mit TSR. Bild 5

Spannungsverlauf oben

und Stromverlauf unten

an der Trafo-Primärseite, Trafo im Leerlauf. Die Magnetisierung bleibt immer innerhalb der Betriebs-Hystereseurve.

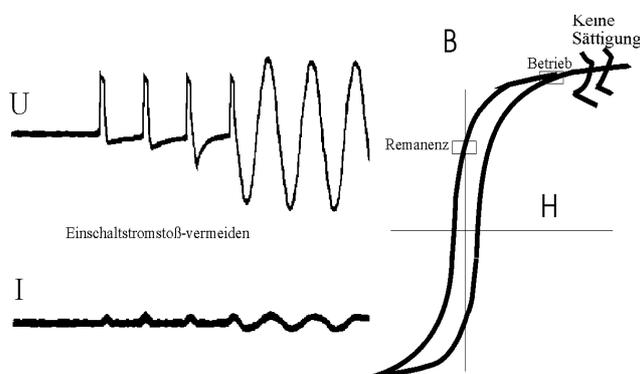


Bild 5

Die Einschaltstrom-Vermeider heißen **TSR**, Trafo Schalt Relais. Man kann diese nämlich auch zum Schalten des Trafos benutzen und spart dann den Netzschalter, ein Relais oder einen Schütz. Die TSR sind beim Einschalten auf einen Kurzschluss bei richtiger Absicherung des Trafos kurzschlussfest. Die Lebensdauer der TSR beträgt über fünf Million Einschaltvorgänge unter Vollast. Wartezeiten nach dem Einschaltvorgang sind nicht erforderlich. Durchschaltverluste entstehen nicht. Das TSR vermeidet Einschaltstromstöße im Gegensatz zu Einschaltstrom-Begrenzern auch bei sehr kurzen Netzunterbrechungen, so genannten Halbwellenausfällen.

Bei konsequenter Ausnutzung aller Vorteile, was die Absicherung, den Schalterersatz und die Trafoauslegung betrifft, können in Verbindung mit den TSR insgesamt System-Kosten eingespart werden.

Nun können Trafos endlich steifer ausgelegt werden. Sie brauchen nicht mehr einschaltstrom-arm gebaut werden. Die Beschränkung auf den Einschaltstrom von max. 15 Mal Nennstrom entfällt, wenn man wie folgt verfährt:

Wenn die TSR verwendet werden, können Trafos nun ohne Rücksicht auf den Einschalt-Stromstoß vom Trafo-Hersteller berechnet werden. Kornorientiertes Trafoblech kann generell eingesetzt werden. Die Induktion kann auf 1,6-1,7 Tesla erhöht werden. Luftspalte lassen sich bis auf das fertigungstechnisch unvermeidbare Maß vermindern. Vor allem die Kupferverluste können deutlich reduziert werden, indem die Kupferdrahtquerschnitte erhöht werden. Ein Ringkerntrafo hat, so ausgelegt einen Einschalt-Stromstoß von ca. 50 Mal Nennstrom, der aber mit dem TSR nicht mehr auftritt. Ringkerntrafos können nun ohne Beschränkungen eingesetzt werden.

Bild 6 zeigt ein **TSR** für 400 V, 32 A, zum Einschalt-Stromstoß-freien Schalten von Einphasentrafos als Platine zum Einbau in Geräte.

Bild 7 zeigt ein **TSR für 230 V, 16 A**, im Gehäuse zum Aufrasten auf die Hutschiene oder zur Wandbefestigung.



Bild 6



Bild 7

Klassische Fälle für die Anwendung der TSR:

Das Stromnetz soll nicht mit den störenden Einschaltstromstößen belastet werden, damit es keine Netzspannungseinbrüche zeigt, die wiederum andere Verbraucher stören.

Wenn Trafos mit kleiner Ausgangsspannung und hohen Strömen auf der Sekundärseite primärseitig eingeschaltet werden, ist die Absicherung auf der Sekundärseite problematisch und teuer. Hier hilft die Verlagerung der Sicherung auf die Primärseite ebenfalls Kosten zu sparen. Allerdings muss dann der Einschaltstrom mittels Einsatz eines TSR vermieden werden. Hier ist das TSR ein Muss.

Wenn Trafos mit hoher Ausgangsspannung auf der Sekundärseite primärseitig eingeschaltet werden, ist die Absicherung auf der Sekundärseite ebenfalls problematisch und teuer, weil Hochspannungssicherungen sehr voluminös und teuer sind. Dies trifft insbesondere für gleichgerichtete Hochspannung nach dem Trafo zu. Hier hilft die Verlagerung der Sicherung auf die Primärseite ebenfalls Kosten zu sparen. Dann kann auch hier der Einschaltstrom mittels Einsatz eines TSR vermieden werden.

Oft sind solche Trafos beim Einschalten im Leerlauf, was es erlaubt einen großen Trafo mit einem kleinen TSR, das zudem flink abgesichert ist, einzuschalten. Anschließend wird das TSR mit einem Schütz umgangen. Die Absicherung im Einschaltkreis kann flink auf weit unter Nennstrom geschehen. Damit führen Hochspannungsüberschläge hinter dem Trafo durch Anlagenfehler nicht mehr zu Zerstörungen von Bauteilen, weil dann schon während dem Einschalten mit den kleinen Spannungszipfeln die Absicherung in Reihe zum TSR auslöst. Man kann das auch vorausschauende Sicherung nennen.

Wenn ein Trafo eine hohe Überlastbarkeit haben soll, hat er eine kleine Kurzschlussspannung, also geringe Verluste und damit einen hohen Einschalt-Stromstoß, der durch das TSR vermieden wird.

Wenn ein optimierter Trafo bei Netzhalbwellenausfällen, welche das Trafoeisen in Sättigung treiben, die Sicherung nicht auslösen darf, hilft nur das TSR, weil es schnell genug auf diese Netz-Ausfälle reagiert.

Wenn ein Trafo für elektromedizinische Geräte die flinke Absicherung im OP nicht auslösen darf.

Wenn ein tragbarer Trafo leicht sein soll und trotzdem keinen Einschalt-Stromstoß haben soll.

Wenn der Trafo in engen und wärmeaustauscharmen Gehäusen eingebaut werden muss, dann muss er verlustärmer als üblich ausgelegt werden. Besonders die Kupferverluste müssen dann reduziert werden, was automatisch den Einschalt-Stromstoß hochtreibt, der wiederum ohne TSR nicht von einer auf Nennstrom ausgelegten Absicherung beherrscht werden kann.

Das trifft auch zu, wenn Trafos in Fahrzeugen, wie Funkübertragungswagen usw., eingebaut werden und als Trenntrafos für von außen eingespeisten Strom vorgeschrieben sind.

Dort müssen nicht nur die Verluste klein sein wegen des gekapselten Einbaus, sondern das Trafogewicht sollte so klein wie möglich sein. Bei diesem Trafo ist der Einschaltstrom ein echtes Problem. Mit dem TSR braucht die Konstruktion des Trafos auf den Einschaltstrom keine Rücksicht mehr zu nehmen.

Lieferbare Typen der TSR:

TSRL, für Einphasen Trafos von 500 VA bis 15 kVA, am 100 bis 500 V Einphasennetz. Der TSRL schaltet mit einem Relais ein und hat keine Durchschaltverluste.

Drehstromtrafos in D-Schaltung bis zu 12 kVA können auch mit zwei TSRL unterschiedlicher Ausrüstung sanft eingeschaltet werden.

TSRLF steuert große Thyristormodule und, wenn erforderlich, auch einen Beipass-Schutz an. Damit können beliebig große Einphasentrafos ohne Stromstoß eingeschaltet werden.

TSRD schaltet Drehstrom-oder drei Einphasentrafos zusammen ein: Für 100 V bis 500 V Netze, für Trafogrößen von 15 bis 42kVA, die mit der Last eingeschaltet werden.

Wenn die Trafos im Leerlauf eingeschaltet werden, können mit kleiner TSR auch wesentlich größere Trafos eingeschaltet werden.

Siehe zahlreiche Applikationszeichnungen. Beim Autor erhältlich.

TSRDF. Für größere Drehstromtrafos bis 500 V Drehstrom, die mit der Last eingeschaltet werden müssen, sind die TSRDF Steuergeräte für externe Thyristoren mit und ohne Beipass-Schützensteuerung bis zu einigen tausend A pro Phase Schaltstrom lieferbar.

In zahlreichen kundenspezifischen Elektroniken welche Netztrafos schalten müssen, sind die TSR Schaltverfahren eingebaut.

Überarbeitet am: 10.12.2012