

Michael Konstanzer

Auf die sanfte Art

Das Einschalten von induktiven Lasten

Thyristorbestückte Halbleiterrelais, auch Elektronische Lastrelais (ELR) genannt, haben sich in vielen ein- und dreiphasigen Anwendungen fest etabliert, bei denen Netzspannungen bis zu 600 V mit Strömen bis zu 90 A zu schalten sind. Ihre wichtigsten Vorteile sind verschleißfreies und damit EMV-konformes Schalten, das Einschalten an einem bestimmten, reproduzierbaren Punkt der Netzspannungshalbwelle sowie das Ausschalten im Strom-Nulldurchgang. Weitere Vorzüge sind potentialgetrennte „Low-Power“-Steuerleitungen, kleine Bauform, Dichtigkeit des Gehäuses und lange Lebensdauer bei hoher Robustheit.

Das am weitesten verbreitete ELR ist das mit Nullspannungs-Einschaltverhalten. Für ohmsche Lasten läßt es sich optimal verwenden. Für alle anderen Lasten jedoch, vor allem für induktive Lasten mit einem Eisenkern, ist es völlig ungeeignet.

Für Transformatoren mit Luftspalt – z.B. geschweißte Steuer-Trafos – hingegen eignen sich sogenannte Scheitelschaltende ELRs. Mit Einschränkungen gilt dies auch noch für momentanschaltende ELRs, die zusammen mit einem automatischen Aufdimmbaustein nach dem Einschalten in ca. 0,3 s von 0 bis 100 % symmetrisch aufdimmen.

Scheitelschaltende ELR für Trafos mit Luftspalt

Bei Transformatoren mit Luftspalt wird die Hysteresekurve automatisch geschert, d.h. flacher als im luftspaltfreien Eisenkern gelegt, worauf sich – nach dem Ausschalten des Trafos – eine geringere Remanenz (bleibende Magnetisierung) im Eisenkern einstellt (Bild 1). Bekanntlich reichen dazu wenige Zehntel Millimeter Luftspalt, die beispielsweise bei geschweißten Steuertrafos zwangsläufig vorhanden sind. Allerdings geht dieser Luftspalt immer mit größeren Verlusten und höherer Kurzschlußspannung einher und scheidet damit für Trafos hoher Qualität aus.

Wie aus Bild 1 zu ersehen ist, liegt bei einem luftspaltbehafteten Trafo die Remanenz nur wenig über bzw. unter der Nullremanenz. Während einer Netzspannungshalbwelle wird der Eisenkern genau vom einen bis zum anderen Wendepunkt der Magnetisierungskurve durch die Spannungs-Zeitfläche der Netzhalbwellen magnetisiert. Damit ist vom magnetischen Nullpunkt (Mitte der Hysteresekurve) aus auch nur die halbe Spannungs-Zeitfläche – im Scheitel beginnend – zum Erreichen eines Wendepunktes beim Einschalten nötig. Beim Einschalten mit scheitelschaltenden ELRs braucht bei Trafos mit geringer Remanenz auch nicht

auf die Polarität der Remanenz und die dazu passende Polarität der mit dem Einschalten beginnenden Netzspannungshalbwellen geachtet zu werden. *Bild 2* zeigt das Verhalten eines luftspaltbehafteten Trafos, der mit einem scheinerschaltenden ELR eingeschaltet wird. Aufgrund der kleinen Remanenz entsteht hier kein großer Einschaltstromstoß.

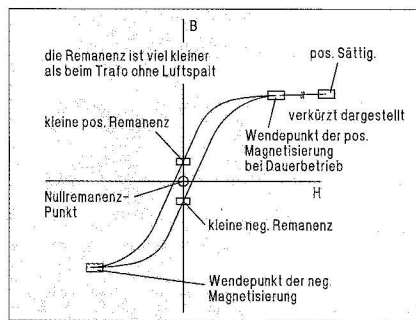


Bild 1. Flach verlaufende Hysteresekurve mit lediglich kleiner Remanenz bei einem Trafo mit Luftspalt.

Scheitelschaltende ELRs bei Trafos mit hoher Remanenz

Bild 3 skizziert den Einschaltvorgang an einem wechselseitig geschachtelten Trafo, der nach *Bild 4* eine deutliche Remanenz aufweist. Vor dem Einschalten hatte der Trafo eine negative Remanenz, weshalb nach der ersten negativen Spannungshalbwellen eine deutliche negative Stromspitze auftritt. Die positive Spannungszeitfläche der halben Halbwellen reicht beim Einschalten nicht aus, um die Magnetisierung vom negativen Remanenzpunkt in den positiven Wendepunkt zu transportieren; dort sollte sie am Ende der positiven Spannungshalbwellen sein. Daher wird dann am Ende der voll anliegenden negativen Halbwellen die Magnetisierung in die negative Sättigung gebracht, was dann zur negativen Stromspitze führt.

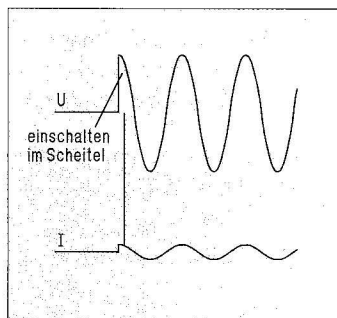


Bild 2. Strom-/Spannungsverhalten eines geschweißten Trafos, eingeschaltet mit einem scheinerschaltenden ELR.

Dieses Einschaltverhalten hat der Anwender in Ermangelung eines besseren Verfahrens bisher meistens akzeptiert. Die Sicherung wird dann eben, wie in der Vergangenheit auch, einfach überdimensioniert und der Stromstoß in Kauf genommen.

Befindet sich der einzuschaltende geschachtelte, jedoch weiche (1,2 T Induktion) Trafo im Leerlauf, so verläuft ca. jede zwanzigste Einschaltung nach *Bild 5*. Der negative Thyristor-Haltestrom wird nicht erreicht, weil der Strom nur in positiver Richtung fließt. Der

Einschaltstromstoß hat mit > 200 A Spitze eine Höhe, die jede Sicherung und jeden Motorschutzschalter auslöst. Betreibt man einen optimierten Trafo mit Nennlast, so liegt der Einschaltstromstoß mit dem scheinerschaltenden ELR schon über 100 A Spitze. Im Leerlauf ist die Stromspitze noch größer (*Bild 6*).

Ringkerntrafos – bisher mit ELRs nicht sauber einschaltbar

Werden Ringkerntrafos mit scheinerschaltenden ELRs eingeschaltet, so erzielt man ein Einschaltverhalten gemäß *Bild 7*. In der dazugehörigen Hysteresekurve (*Bild 8*) ist zu sehen, daß die Remanenz nahe der Betriebsinduktionshöhe liegt. Ein scheinerschaltendes ELR kann den Trafo in keinem Fall stromstoßfrei, d.h. ohne Eisensättigung einschalten.

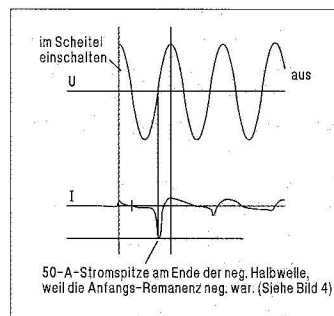


Bild 3. Strom-/Spannungsverhalten eines nicht-optimierten, wechselseitig geschachtelten 1-kVA-Trafos, eingeschaltet mit einem scheinerschaltenden ELR.

Wird vom negativen Remanenzpunkt aus mit dem Scheitel der positiven Spannungshalbwellen eingeschaltet, so bringt die halbe positive Spannungshalbwellen die Magnetisierung nicht in den positiven Wendepunkt. Die anschließende ganze, negative Halbwellen treibt die Magnetisierung weit in die negative Sättigung, was sich durch den großen negativen Stromstoß am Ende der negativen Spannungshalbwellen äußert. Darauf löst auch der 10-A-Motorschutzschalter aus.

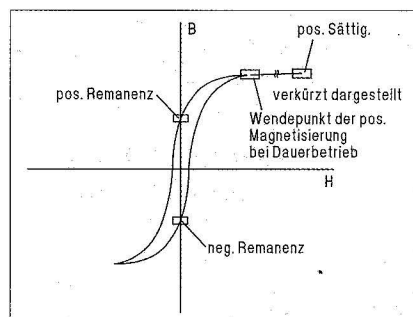


Bild 4. Steilere Hysteresekurve mit deutlich höherer Remanenz bei einem wechselseitig geschachtelten Trafo.

Geht man beim Einschalten mit positiver Scheitelspannung von der positiven Remanenz aus, dann entsteht ein Verhalten nach *Bild 7*. Die Spannungs-Zeitfläche der halben positiven Spannungshalbwellen ist viel zu groß, um die Magnetisierung

vom positiven Remanenzpunkt lediglich in den positiven Wendepunkt der Magnetisierungskurve zu bringen. Die positive Sättigung zeigt sich durch den hohen positiven Einschaltstromstoß.

Ringkerntrafos größerer Leistung (ab ca. 300 VA) sind bisher nicht sicher einschaltbar. Alle Lösungen haben immer mehr oder weniger große Einschaltstromstöße und andere Kompromisse zur Folge; egal ob der Strom mit ohmschen Vorwiderständen oder Heißeitern begrenzt beziehungsweise mit bisher üblichen elektronischen Phasenschnittverfahren eingeschaltet wird.

Das Problem stand der schnellen Verbreitung der Ringkerntrafos bisher wohl sicherlich im Wege, obwohl sie anderen Trafotypen in vielen Fällen weit überlegen sind. Hier liegt für die Zukunft ein großes Stromeinsparpotential. Der Leerlaufstrom ist auf Grund der Luftspalt- und Verlustfreiheit beispielsweise um den Faktor 100 kleiner als bei herkömmlichen Trafos gleicher Leistung. Auch die Wirkverluste sind geringer, weil die mittlere Windungslänge kürzer ist als bei vergleichbaren „eckigen“ Trafos.

Mit einem selbsttätig aufdimmenden ELR entsteht selbst bei einem weichen (d.h. nicht optimierten) geschachtelten Trafo mit nur 1,2 T Induktion ein Einschaltstromstoß von über 100 A Spitze, wenn der Trafo nicht mit der Nennlast belastet ist.

Aufgrund der Remanenz Ausgangslage, die immer ungleich der Nullremanenz ist, wird die Betriebs-Hystereseurve beim symmetrischen Aufdimmen immer nach einer Seite bis zur Sättigung unkontrolliert überfahren. Nur luftspalt- und immer mit einer Grundlast behaftete Trafos lassen sich mit Dimmern einschalten. (Der erfahrene Ingenieur weiß, daß zu dimmende Trafos mit höchstens 1,2 T Induktion und mindestens 5 % Kurzschlußspannung herzustellen sind. Sie benötigen immer einen Luftspalt und müssen den Leerlauf fall vermeiden.)

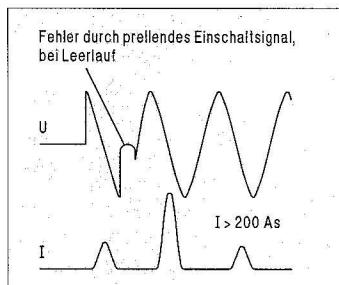


Bild 5. Strom-/Spannungsverhalten eines nicht-optimierten, wechselseitig geschachtelten 1-kVA-Trafos im Leerlauf, eingeschaltet mit einem scheinerschaltenden ELR.

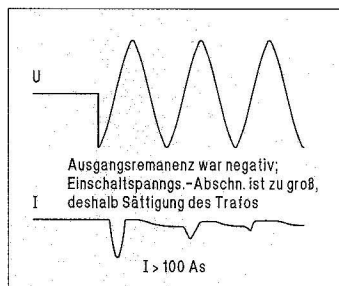


Bild 6. Strom-/Spannungsverhalten eines optimierten, wechselseitig geschachtelten 1-kVA-Trafos im Leerlauf, eingeschaltet mit einem scheinerschaltenden ELR.

Das Einschaltverhalten nach *Bild 9* ist typisch für einen Ringkerntrafo, den man mit einem selbsttätig aufdimmenden ELR einschaltet.

Selbst bei Belastung mit Nennlast entsteht aufgrund der hohen Remanenzpolaritäten immer ein die Sicherungen auslösender, sehr hoher Einschaltstromstoß. Im Leerlauf sieht das Geschehen noch dramatischer aus. Aufgrund der Tatsache, daß in einer Halbwellenpolarität überhaupt kein Strom fließen kann, zünden die Thyristoren des ELR dann nicht mehr sauber.

Der Trick mit dem TSE

Bild 10 dokumentiert das neue Einschaltverfahren TSE (Trafo-Sanft-Einschalter). Sowohl bei geschweißten und geschachtelten als auch bei Ringkerntrafos

läßt sich mit dem TSE-Prinzip immer ein optimales Einschaltverhalten erzielen. Es fließt nie mehr als der Nennstrom. Auch der Leerlauf wird sicher beherrscht. Damit ist die Absicherung auf den Trafoschutz und die Last und nicht nur auf den Lei-

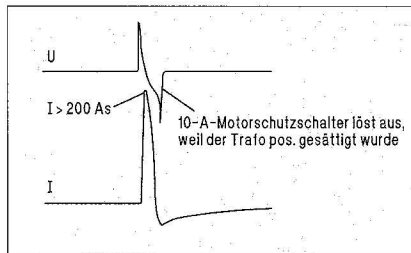


Bild 7. Strom-/Spannungsverhalten eines 1-kVA-Ringkerntrafos, eingeschaltet mit einem scheinerschaltenden ELR (positive Ausgangsremanenz vor dem Einschalten).

tungsschutz angepaßt. Auch prellende Einschalt signale führen im Gegensatz zu manch anderen ELRs nicht mehr zu Fehlfunktionen.

Nach dem Volleinschalten wird außerdem das Thyristorpaar durch einen eingebauten Relais- oder Schützkontakt überbrückt, der beim Ausschalten vor den Thyristoren öffnet und damit keinen Abbrand hat (siehe [4], S. 84). Das Überbrücken der Thyristoren spart den Kühlkörper. Das damit geschaffene Hybrid-ELR hat die Vorteile von ELRs und mechanischen Relais, ohne deren Nachteile. Außerdem kann das ELR aufgrund der kleinen Vormagnetisierungspulse mit einer ebenfalls patentierten sogenannten „vorausschauenden Sicherung“ vor dem Volleinschalten prüfen, ob Überlast oder Kurzschluß vorliegt, und dann gar nicht einschalten. Damit wurde die Überlast- und Kurzschlußfestigkeit sowie Verlustfreiheit von ELRs deutlich verbessert.

Auf dieser Basis existieren ELRs von 110 bis 400 V_{AC}, ein- oder dreiphasig, und für 10 bis 40 A in Form von Schnappschiene-Gehäusen für Schaltschrankmontage. Aufgrund der noch geringen Stückzahlen werden diese ELRs noch nicht in SM- oder integrierter Technik hergestellt, so daß sie nicht so klein

und preisgünstig wie übliche ELRs sind. Bestimmte Institute der Fraunhofer-Gesellschaft sind inzwischen in der Lage, die Steuerfunktionen kostengünstig in einem applikationsspezifischen Mikroprozessorchip unterzubringen. Damit können dann ELRs mit diesen neuartigen Eigenschaften ausgerüstet werden. Aus diesem Grund vergibt der Patentinhaber, die Fraunhofer-Gesellschaft, Lizenzen an geeignete Hersteller.

Schrittweise magnetisiert

Wie aus Bild 10 hervorgeht, gelangen – je nach Trafotyp – für eine kurze Zeit von 100 bis 500 ms schmale Spannungsabschnitte mit nur einer Polarität auf den Trafo. Seine Magnetisierung wird – vom Remanenzpunkt ausgehend – schrittweise in den oberen Wendepunkt der Magnetisierungskurve gebracht. Ist der Remanenzpunkt gleichphasig wie die Vormagnetisierung, dann pendelt die Magnetisierung zwischen Wendepunkt und Remanenzpunkt im Takt der Vormagnetisierungspulse hin und her, ohne daß der Trafo in die Sättigung getrieben wird; dazu wären die Vormagnetisierungspulse ohnehin zu klein. Anschließend wird im Wendepunkt gegenphasig voll eingeschaltet (patentiertes Verfahren).

Die Vormagnetisierungszeit ist, abhängig von der Größe der Spannungsabschnitte, so bemessen, daß auch vom entgegengesetzten Remanenzpunkt der richtige Wendepunkt der Hysteresekurve vor dem Volleinschalten sicher erreicht wird. Vorläufig sind zwei ELR-Typen nach dem TSE-Prinzip lieferbar:

- für „eckige Trafos“, die immer eine niedrigere Remanenz als die maximale Induktion haben und deshalb nur wenige, aber dafür etwas breitere Spannungsabschnitte zum Vormagnetisieren brauchen;
- für Ringkerntrafos, die schmale und dafür einige Spannungsabschnitte mehr benötigen.

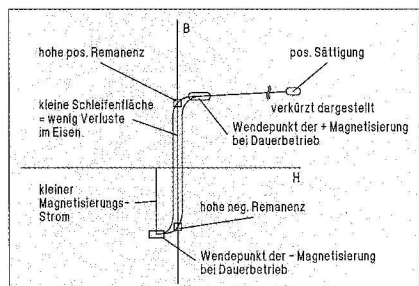


Bild 8. Steile Hysteresekurve mit hoher Remanenz bei einem Ringkerntrafo.

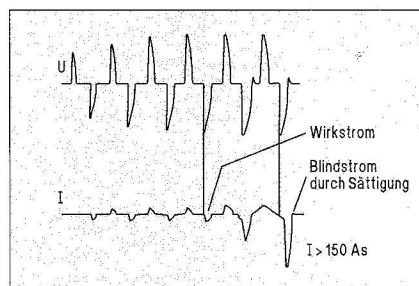


Bild 9. Strom-/Spannungsverhalten eines 1-kVA-Ringkerntrafos unter Nennlast, eingeschaltet mit einem symmetrisch aufdimmenden ELR.

Dipl.-Ing. (FH) Michael Konstanzer studierte Elektronik und Feinwerktechnik an der FH in Furtwangen und war dann als Entwicklungs- und Prüffeld-Ingenieur bei verschiedenen Industriebetrieben in Deutschland tätig. Seit 15 Jahren ist er nun am Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik in Freiburg tätig. Aktuell beschäftigt er sich mit dem Vermeiden von Einschaltstromstößen bei Trafos aller Arten und Größen.



In Zukunft wird auch ein Universaltyp hergestellt, der sich automatisch auf alle Lastarten, Trafotypen und Netzbedingungen einstellt und auch Trafos vor ungeradzahligem Netzhalfwellen-Ausfällen schützt (EN 50093), damit sie dann nicht in Sättigung geraten und große Stromspitzen erzeugen.

Auch für Drehstromtrafos und -motoren

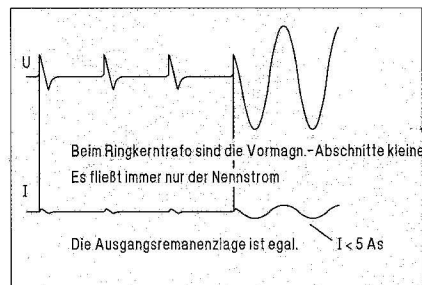


Bild 10. Strom-/Spannungsverhalten eines 1-kVA-Ringkerntrafos unter Nennlast, eingeschaltet entsprechend dem TSE-Verfahren, das bis zu 500 ms lang mit unipolaren, fixen Spannungsabschnitten vormagnetisiert.

„Getunte“ ELRs gibt es auch für Drehstromtrafos. Gerade ab einer Größe von zirka 5 kVA werden die Mehrkosten des ELR durch Kosteneinsparungen am Transformator wieder hereingeholt. Ein im Wirkungsgrad optimierter Drehstromtrafo ist bis zu 30 % leichter und kleiner; aus-

serdem hat er weniger Wirk- und Blindverluste. Gleiches gilt für Einphasentrafos.

Ein solches ELR kann auch mehrere Trafos zusammen einschalten. Ohne Änderung des Verfahrens lassen sich auch Drehstrommotoren mit höchstens zweifachem Nennstrom in etwa 5 bis 10 s sanft einschalten. Desgleichen sind diese ELRs zusammen mit Booster-Thyristoren für wesentlich größere Leistungen und Ströme anwendbar.

go

Literatur

- [1] Vermeiden statt begrenzen. Elektrotechnik 73 (1991), H. 12.
- [2] Konstanzer, M.: Sanft geschaltet. ELRAD 1993, H. 4, S. 30...34.
- [3] Konstanzer, M.: Einschaltstromstöße vermeiden. ETZ, Bd. 114 (1993), H. 16, S. 1004...1009.
- [4] Konstanzer, M.: Transformatoren sanft einschalten. Elektronik 1993, H. 23, S. 78...85.