

Drehstromtransformatoren sanft einschalten

von Michael Konstanzer

Mit dem vorgestellten Gerät lassen sich mehrere Einphasentransformatoren zusammen – vor allem aber Drehstromtransformatoren jeder Art und Schaltgruppe – unabhängig von ihrer Belastung ohne Stromstoß einschalten. Das eingesetzte Verfahren wird nicht beeinflusst von der Güte des Eisenkerns, der Induktionshöhe und dem Luftspalt im Eisenkern des Transformators.

Anwendungsbereich

Der Transformator-Sanft-Einschalter TSE 30 soll beim Einschaltvorgang den Magnetisierungsverlauf im Eisenkern mit der Netzspannung vor dem Einschalten synchronisieren. Nachdem die Magnetflüsse in den einzelnen Schenkeln des Transformators mit der Netzspannung synchron laufen, wird voll eingeschaltet. Ein bipolares, symmetrisches Dimmen führt – im Gegensatz zu dem beschriebenen Verfahren – das Eisen bei Standardtransformatoren in die Sättigung und verursacht große Stromspitzen.

Wirkung von Strom und Spannung am Netztransformator

Die Magnetflußänderung im Eisenkern des Transformators wird durch die Netzspannungszeitfläche erzeugt, die auf die Transformatorspule wirkt. Transformatorspule, Transformator-eisen, Netzfrequenz und Netzspannung sind so aufeinander abgestimmt, daß sich die Magnetisierung im Eisen im stationären Betrieb am Ende jeder Netzspannungshalbschwingung jeweils genau auf den Wendepunkten der Hysteresekurve (Bild 1) befindet. Die bei der Vormagnetisierung auf den Transformator gegebenen unipolaren Spannungsabschnitte transportieren die Magnetisierung innerhalb der Hysteresekurve je nach Polarität auf oder abwärts sowie je nach Spannungszeitfläche mehr oder weniger stark. Die Magnetisierung kann am Ende der Hysteresekurve nur durch Verbreiterung der Spannungsabschnitte über die Betriebs-hysteresekurve hinaus vergrößert werden. Am Ende einer Spannungsabschnitts läuft die Magnetisierung wieder zum Remanenzpunkt zurück.

Der Strom in den Leitern zeigt rein ohmschen Charakter, wenn eine Last am Transformator angeschlossen ist

und das Transformator-eisen sich nicht in Sättigung befindet. Ein induktiv geprägter Leiterstrom entsteht, wenn das Transformator-eisen am Ende eines Spannungsabschnitts oder einer Halbschwingung in Sättigung gebracht wird. Am leerlaufenden Transformator kann man keinen Strom messen – Blindleistungsverluste seien vernachlässigt –, wenn sich die Magnetisierung innerhalb der Betriebs-hysteresekurve befindet.

Spannungen an nicht stromdurchflossenen Transformator-Wicklungen, z. B. bei nichtleitenden Thyristor-Schaltern im TSE 30, zeigen an, daß sich der Fluß im zugehörigen Transformatorschenkel proportional zur Spannungshöhe ändert.

Einschalten ohne TSE 30

Werden Drehstromtransformatoren ans Netz geschaltet, entsteht – genau wie bei Einphasentransformatoren – ein großer Einschaltstromstoß. Diesen Stromstoß in den einzelnen Phasen beeinflussen Polarität und Stärke der Remanenz im Eisen in den einzelnen Schenkeln des Transformators sowie die Phasenlage der Netzspannung der drei Leiter beim Direkteinschalten.

In Bild 2 sind die größten Einschaltströme beim Einschalten eines leerlaufenden Transformators in den verschiedenen Netzleitern dargestellt. Gemessen wurde an einem Modulkern-Transformator 20 kVA. Diese Transformatorart verfügt bauartbedingt über einen geringen Luftspalt, so daß eine geringere Remanenz als bei geschachtelten Transformatoren entsteht. Daher erreicht der Einschaltstromstoß nur etwa den zehnfachen Nennstrom.

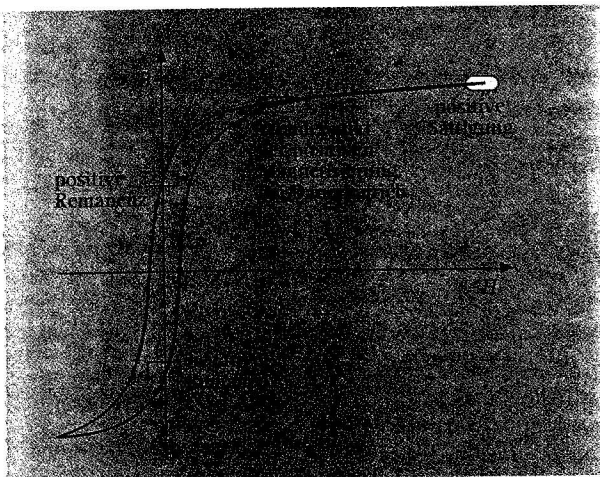


Bild 1. Hysteresekurve eines geschachtelten Einphasen-Transformators

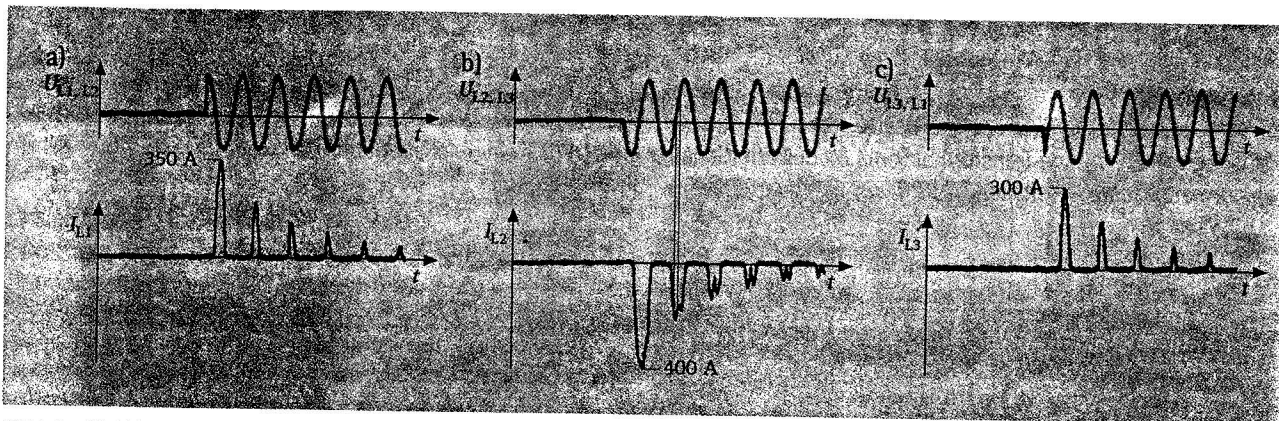


Bild 2. 20-kVA-Drehstrom-Transformator mit Modulkern (Schaltgruppe DY5) direkt eingeschaltet im Leerlauf
 a) $U_{L1,L2}$ und I_{L1} b) $U_{L2,L3}$ und I_{L2} c) $U_{L3,L1}$ und I_{L3}

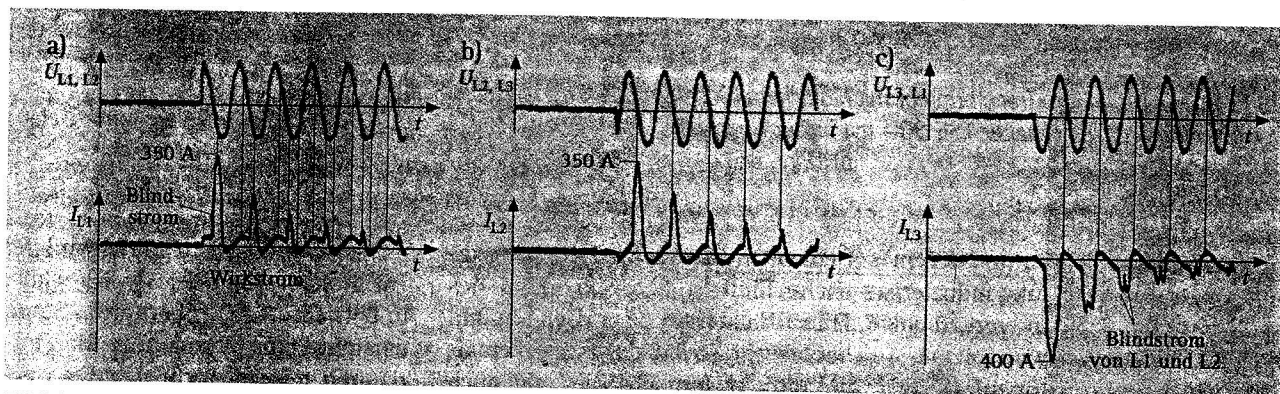


Bild 3. 20-kVA-Drehstrom-Transformator mit Modulkern (Schaltgruppe DY5) direkt eingeschaltet mit halber Nennlast
 a) $U_{L1,L2}$ und I_{L1} b) $U_{L2,L3}$ und I_{L2} c) $U_{L3,L1}$ und I_{L3}

In Bild 3 sind die Ströme und Spannungen desselben Transformators, aber belastet mit der halben Nennlast, aufgetragen. Der Vergleich mit Bild 2 ergibt, daß die Höhe der Blindstromspitze des Einschaltstroms nicht von der Last abhängt.

Remanenzsetz-Verfahren mit unipolaren Spannungsabschnitten Bild 5

Die unipolaren Remanenzsetz-Spannungsabschnitte der Leiterspannungen sind so gepolt, daß im Transformator kern in allen drei Schenkeln ein Fluß derselben Richtung erzeugt wird. Die unipolaren Spannungsabschnitte werden am Anfang der Remanenzsetz-Zeit kontinuierlich bis zu einem eingestellten Endwert ver-

größert (gedimmt), der dann bis zum Ende der Remanenzsetz-Zeit unverändert bleibt. Durch das unipolare Andimmen werden bei Transformatoren in Dreieckschaltung Einschwingstromspitzen vermieden, bis sich der Magnetfluß in den Transformator-schenkeln symmetriert hat.

Nach der ungefähr 200 ms dauernden Remanenzsetz-Zeit werden die beiden zuerst angelegten Leiterspannungen mit derselben Breite der Spannungsabschnitte beginnend, wie während der Remanenzsetz-Zeit, nacheinander eingeschaltet. Wenn diese beiden Leiterspannungen voll eingeschaltet sind, gilt dies auch automatisch für die dritte, da alle drei Stelliglieder leitend sein müssen, um zwei Leiterspannungen an den Transformator anzulegen.

In Bild 4 ist der Einschaltvorgang bei Verwendung des Transformator-Sanft-Einschalters TSE 30 am glei-

chen unbelasteten Transformator gezeigt. Dabei werden auf jede Transformatorwicklung unipolare, negativ gepolte Spannungsabschnitte mit zuerst steigender und dann konstanter Breite gegeben.

In Bild 5 ist die Wirkungsweise des TSE 30 am gleichen, aber nun belasteten Transformator dargestellt.

Bild 4 und 5 verdeutlichen das Verhalten der Leiterspannungen und Ströme, wenn anschließend voll eingeschaltet wird. Das TSE-Verfahren verhindert den Einschaltstromstoß.

Die Funktion des Sanfteinschalt-Verfahrens für Drehstromtransformatoren läßt sich am besten mit Hilfe von Bild 5 erläutern. In allen drei Netzleitern fließt immer der ohmsche Laststrom. Es werden nur die negativ gepolten Spannungsabschnitte – gemessen zwischen den Leitern – auf den Transformator gegeben. Die positiven Spannungsabschnitte werden

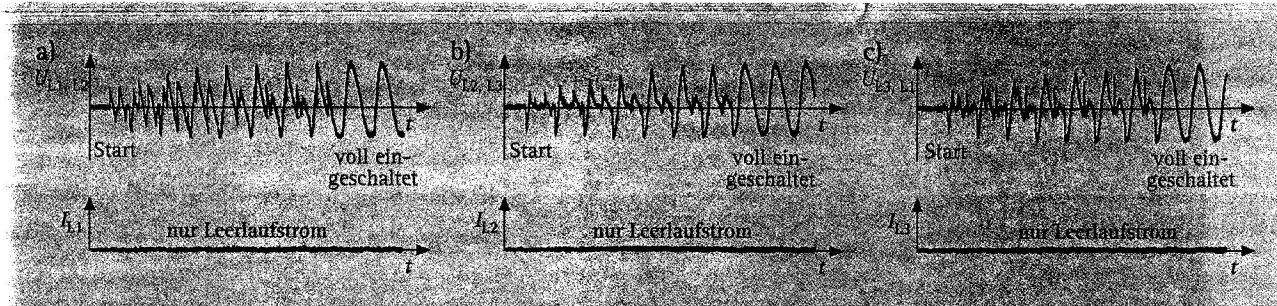


Bild 4. 20-kVA-Drehstrom-Transformator mit Modulkern (Schaltgruppe DY5) – eingeschaltet über den Transformator-Sanft-Einschalter TSE 30 – im Leerlauf

a) $U_{L1,L2}$ und I_{L1}

b) $U_{L2,L3}$ und I_{L2}

c) $U_{L3,L1}$ und I_{L3}

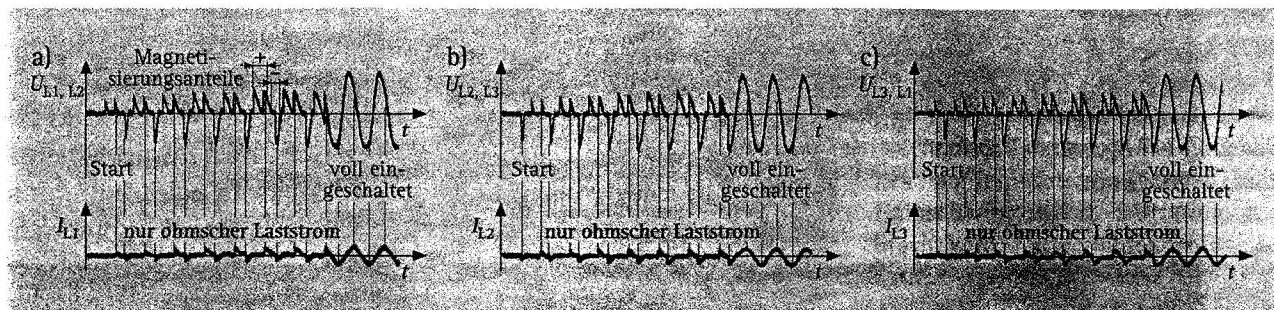


Bild 5. 20-kVA-Drehstrom-Transformator mit Modulkern (Schaltgruppe DY5) – eingeschaltet über den Transformator-Sanft-Einschalter TSE 30 – mit halber Nennlast

a) $U_{L1,L2}$ und I_{L1}

b) $U_{L2,L3}$ und I_{L2}

c) $U_{L3,L1}$ und I_{L3}

von den anderen Leitern und den in die Transformatorwicklung induzierten Spannungsanteilen verursacht und sind demnach Antwortspitzen.

Alle drei Transformatorstufen sind über den Eisenkern magnetisch verbunden. Die positiven Spannungsabschnitte sind halb so groß wie die negativen, da die „Antwort“ nur von der Hälfte des induzierenden Flusses erzeugt wird. Allerdings gibt es doppelt so viele positive Spannungsabschnitte. Diese zeigen die von den negativen Spannungsabschnitte erzeugte Magnetisierungsänderung an.

Dementsprechend wird der magnetische Fluß in den Schenkeln des Transformators symmetrisch hin und her bewegt, so daß das Eisen niemals die Sättigung erreicht. Dies zeigt auch der gemessene ohmsche Laststrom.

Mit dem Verfahren läßt sich auch ein stetiger Dimmer für optimierte Drehstromtransformatoren realisieren, der keinen Blindstrom erzeugt. Herkömmliche, symmetrische Dimmer können nur weiche und luftspaltbehaftete Transformatoren mit abgesenkter Induktion und erhöhter Kurzschlußspannung dimmen.

Drehstromtransformatoren, die über den Transformator-Sanft-Einschalter TSE 30 eingeschaltet werden, kann man bis zu 30 % kleiner, leichter und dabei noch stromsparender auslegen. Der normalerweise große Einschaltstrom wird mit dem TSE vermieden. Die Einschalthäufigkeit ist unbegrenzt. So braucht man auch keine Motorschutzschalter mehr zum Absichern, sondern kann flinke B-Typ Sicherungsautomaten – dimensioniert für Nennstrom – einsetzen.

Der TSE läßt sich wie ein Schütz oder ein Halbleiterrelais mit einer Hilfsspannung oder einem Hilfskontakt, ohne Begrenzung der Schalthäufigkeit, fern einschalten.

Nach dem Volleinschalten wird der TSE 30 sofort von einem Bypass-Schütz in Betriebsart AC1 überbrückt. Somit entsteht keine Wärme und die Thyristoren müssen nicht gekühlt werden. Der TSE 30 ist auch gegen große Kurzschlußströme gesichert. Das korrekte Anziehen des Bypass-Schützes wird vom TSE 30 selbst überwacht.

Der Transformator-Sanft-Einschalter kann auch mit einer bei der Remanenzzeit wirkenden, vorausschauenden Sicherung ausgerüstet werden. Bei Kurzschluß oder auch ab z. B. zehnfacher Überlast schaltet er nach den ersten kleinen Spannungsabschnitten nicht weiter ein. Damit ist der TSE beim Einschalten in der 40-A-Version auch kurzschlußfest, wenn Nennstrom und Sicherung über 16 A betragen. Dann wird der zehnfache Nennstrom für eine Netzhalb-schwingung – für diese Überlast ist der Transformator-Sanft-Einschalter ausgelegt – am Thyristor nicht überschritten. Bei Phasenausfall schaltet der Mikrocontroller-gesteuerte TSE 30 sofort aus oder gar nicht ein.

Der Transformator-Sanft-Einschalter TSE 30 eignet sich für die Montage auf einer Hutschiene und benötigt so viel Platz wie drei dem Nennstrom entsprechende Schütze. ■

Dipl.-Ing. (FH) Michael Konstanzer (51) ist Leiter Elektronik-Entwicklung beim Fraunhoferinstitut für Angewandte Festkörperphysik in Freiburg und befaßt sich mit der Vermeidung von Einschaltstromstößen von Transformatoren aller Arten und Größen. Nach dem Studium der Elektronik und Feinwerktechnik an der FH Furtwangen war er Entwicklungs- und Prüffeld-Ingenieur bei verschiedenen Industrieunternehmen.

