

(12)

PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 453/94

(51) Int.Cl.⁶ : H02H 9/02

(22) Anmeldetag: 3. 3.1994

(42) Beginn der Patentdauer: 15. 6.1997

(45) Ausgabetag: 25. 2.1998

(30) Priorität:

9. 3.1993 DE 4307291 beansprucht.

(73) Patentinhaber:

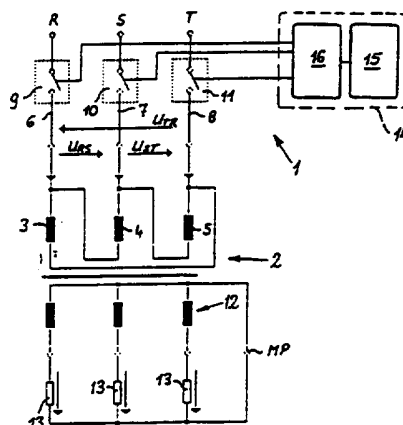
FRAUNHOFER GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER
ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.
D-80636 MÜNCHEN (DE).

(72) Erfinder:

KONSTANZER MICHAEL
FREIBURG (DE).
FREITAG STEFAN
FREIBURG (DE).

(54) VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR REDUZIERUNG DES EINSCHALTSTROMSTOSSES BEIM BETREIBEN EINER DREHSTROMLAST

(57) Das erfindungsgemäße Verfahren dient zur Reduzierung des Einschaltstromstoßes beim Betreiben einer induktivitätsbehafteten und mit einem magnetisierbaren Kern versehenen Drehstromlast. Beispielsweise kann dies ein Drehstromtransformator mit wahlweise in unterschiedlichen Schaltgruppen angeordneten Wicklungen sein. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren werden die einer Wicklung zugeordneten Kernbereiche jeweils auf vorgebbare Magnetisierungen gebracht. Dazu werden wenigstens zwei der drei Leiterspannungen eines Drehstrom-Wechselstromnetzes mit unipolaren und in ihrer Spannungs-Zeit-Fläche mindestens auf etwa die Hälfte reduzierten Spannungshalbwellen nacheinander entsprechend der vorhandenen Phasenverschiebung der Leiterspannungen an die Drehstromlast geschaltet. Nach wenigstens der Zeitdauer von einer Periodenlänge der zuletzt angelegten Leiterspannung bleibt eine der drei Phasen mit bis zu einem Sollwert oder bis zum Nennwert der Netzspannung vergrößertem Effektivwert eingeschaltet und die anderen beiden Phasen werden dann ebenfalls mit vergrößertem Effektivwert in Folge zugeschaltet. Bei diesem Verfahren sind keine Messungen der Ist-Zustände erforderlich, sondern es genügt, über eine vorgebbare Zeitspanne eine Vormagnetisierung vorzunehmen und mit Ablauf dieser Zeit dann in gleicher Folge den Drehstromtransformator oder dergleichen ans Netz zu schalten. Dabei werden störende Einschaltstromspitzen vermieden.



Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Reduzierung des Einschaltstromstoßes beim Betreiben einer induktivitätsbehafteten und mit einem magnetisierbaren Kern versehenen Drehstromlast mit drei wahlweise in unterschiedlichen Schaltgruppen angeordneten Wicklungen, an einem Drehstrom-Wechselstromnetz, wobei zumindest zeitweise ein Phasenanschnitt der Leiterspannungen vorge-

5 sehen ist.

Beim Betreiben induktivitätsbehafteter Lasten verbleibt nach dem Ausschalten im magnetisierbaren Kern solcher Lasten eine magnetische Remanenz oder remanente Induktion, die je nach Polarität der Wechselspannung zum Ausschaltzeitpunkt unterschiedlich gepolt sein kann und auch eine unterschiedliche Größe haben kann.

10

Beim Einschalten induktivitätsbehafteter Lasten ist deren Remanenzlage in der Regel unbekannt und es tritt speziell z. B. bei Transformatoren mit hoher Induktion und geringen Luftspalten beim Zusammentreffen eines zur vorhandenen Remanenzlage ungünstigen Einschaltzeitpunktes, bezogen auf den Verlauf der Wechselspannung, ein hoher Einschaltstromstoß auf, der unter Umständen bis zum fünfzigfachen des Nennstromes betragen kann und zum Auslösen von Sicherungselementen führt.

15

Diese hohen Ströme ergeben sich, weil die Magnetisierung hierbei weit in die Sättigung getrieben wird.

Man ist aus diesem Grunde gezwungen, die Induktion soweit zu reduzieren, bis der Einschaltstrom auch im ungünstigsten Fall einen vorgegebenen Grenzwert nicht überschreitet. Dies erfordert jedoch bei gleicher Nennleistung erheblich mehr Eisen für den Kern, z. B. eines Transformators und macht diesen entsprechend groß und teuer, was sich insbesondere bei Transformatoren hoher Leistung nachteilig

20

auswirkt. Aus der PCT/DE91/00216 ist es bereits bekannt, eine der drei Leiterspannungen an die zugeordnete Wicklung zu schalten und dabei die Spannungs-Halbwellenanschnitte zu vergrößern. Gleichzeitig erfolgt hierbei eine Messung des Blindstromes beziehungsweise Magnetisierungsstromes. Durch die Messung des Blindstromes erfolgt eine Überwachung des Betriebszustandes, bei dem die Magnetisierung des Kerns in

25

die Sättigung gelangt. Dieses Einschaltverfahren hat sich bewährt, jedoch ist hierbei eine Strommessung erforderlich und auch Einrichtungen zur Auswertung der Messung und zur entsprechenden Steuerung der Stellglieder. Außerdem muß eine vergleichsweise aufwendige Folgesteuerung vorgesehen sein, da nach dem Bestromen einer Wicklung durch Einschalten einer Leiterspannung bis zum Erreichen der Magnetisierungssättigung die anderen Leiterspannungen nach einer vorgebbaren Verzögerungszeit folgerichtig zugeschaltet werden

30

müssen. Es ist somit ein nicht unerheblicher schaltungstechnischer Aufwand vorhanden.

Es wurden auch schon Versuche unternommen, dieses Einschaltverfahren ohne Strommessung und mit auf einen festen Wert reduzierter Effektivspannung durchzuführen. Dabei wurde eine Vormagnetisierung des Kernes durch Anlegen einer der drei Leiterspannungen vorgenommen. Hierbei hat sich jedoch herausge-

35

stellt, daß eine wirksame Reduzierung des Einschaltstromstoßes stark von der Belastung und der Güte der induktiven Last abhängt, so daß eine Veränderung und Anpassung des Einschaltverfahrens jeweils in Abhängigkeit der angeschlossenen, induktiven Last und z. B. bei einem Drehstromtransformator auch in Abhängigkeit von dessen sekundärseitiger Belastung vorgenommen werden muß. Dies ist jedoch umständ-

40

lich und behindert einen universellen Einsatz. Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren der eingangs erwähnten Art sowie eine Vorrichtung zu schaffen, womit auf einfache Weise eine Drehstromlast auch bei verschiedenen Lastbedingungen und unterschiedlichen Ausführungen der Drehstromlast mit zumindest erheblich reduziertem, vorzugsweise mit praktisch vernachlässigbarem Einschaltstromstoß eingeschaltet werden kann.

45

Zur Lösung dieser Aufgabe wird erfindungsgemäß insbesondere vorgeschlagen, daß die einer Wicklung zugeordneten Kernbereiche jeweils auf vorgebbare Magnetisierungen gebracht werden, daß dazu wenigstens zwei der drei Leiterspannungen mit unipolaren und in ihrer Spannungs-Zeit-Fläche mindestens auf etwa die Hälfte reduzierten Spannungshalbwellen nacheinander entsprechend der vorhandenen Phasenverschiebung der Leiterspannungen an die Drehstromlast geschaltet werden und daß nach wenigstens der

50

Zeitdauer von einer Periodenlänge der zuletzt angelegten Leiterspannung nur eine der an die Drehstromlast geschalteten Spannungen mit bis zu einem Sollwert oder bis zum Nennwert der Netzspannung vergrößertem Effektivwert eingeschaltet bleibt und dann die anderen beiden Phasen ebenfalls mit vergrößertem Effektivwert in Folge wieder zugeschaltet werden.

55

Bei diesem Einschaltverfahren werden mindestens zwei der drei Leiterspannungen eingeschaltet, so daß dadurch praktisch das gesamte Eisen des Kerns so vormagnetisiert werden kann, daß ein unerwünschtes Entmagnetisieren in den Bestromungslücken nicht zum Tragen kommt. Es kann somit eine definierte Vormagnetisierungslage des Kern erreicht werden, die als Ausgangslage für ein Hochschalten beziehungsweise Anschalten an die z. B. volle Netzspannung dient. Dieses Verfahren ermöglicht insbeson-

dere auch ein sehr schnelles Einschalten der induktiven Last ans Netz. Eine Messung des Magnetisierungsstromes zur Erkennung des Magnetisierungszustandes ist bei diesem Verfahren nicht notwendig und es ist somit der Aufwand reduziert.

Werden die in Ihrem Effektivwert reduzierten, unipolaren Spannungspulse oder Halbwellen in der vorgesehenen Weise laufend auf die Drehstromlast gegeben, so wird nach wenigstens der Zeitdauer einer Periodenlänge der zuletzt angelegten Leiterspannung ein Magnetisierungsmuster mit sich periodisch wiederholenden Magnetisierungszuständen geschaffen, so daß jeweils nach Erreichen dieses Magnetisierungsmusters zu einem beliebigen Zeitpunkt jeweils im Anschluß an eine reduzierte Spannungsbeaufschlagung einer Phase, beginnend mit dieser, voll eingeschaltet werden kann.

Damit wird das Problem gelöst, daß sich beim Vormagnetisieren eines der jeweils einer Wicklung zugeordneten Kernbereiche auch die Magnetisierungszustände der beiden anderen ändern. Es ist dabei nicht möglich, die Verhältnisse von einer einphasigen, induktiven Last auf eine Drehstromlast zu übertragen, da bei der Drehstromlast nicht alle Kernbereiche gleichzeitig in eine remanente, maximale Magnetisierung gebracht werden können. Es wird deshalb ein Magnetisierungsmuster geschaffen und in Kenntnis der jeweils vorhandenen, unterschiedlichen und sich wiederholenden Magnetisierungen in den drei Kernbereichen, passend eingeschaltet. Unerwünschte Überströme beim Einschalten werden damit wirksam verhindert.

Die unipolaren, in Ihrer Spannungs-Zeit-Fläche reduzierten Spannungshalbwellen können in einem Bereich entsprechend einem Phasenanschnittwinkel von 135° bis etwa 90° bei etwa sinusförmiger Netzspannung reduziert werden. Insbesondere bei Drehstromtransformatoren als induktive Last mit einer sekundärseitigen Belastung genügen bereits vergleichsweise kleine Spannungs- bzw. Strompulse zum Magnetisieren des Kerns auf eine definierte Ausgangsremanenzlage.

Als universell hat sich eine Reduzierung der unipolaren Spannungshalbwellen auf einen Effektivwert entsprechend einem Phasenanschnittwinkel von 90° herausgestellt.

Nach einer Ausgestaltung der Erfindung wird die Magnetisierung bzw. Vormagnetisierung der drei Kernbereiche mit einem zumindest in zwei Kernbereichen gleichsinnigen, bzw. gleichgerichteten Magnetfluß vorgenommen. Durch diese Maßnahme wird bereits nach der Zeitdauer einer Periodenlänge der zuletzt angelegten Leiterspannung eine definierte Remanenzlage erreicht.

Vorzugsweise werden bei nebeneinander auf einem EI-Kern angeordneten, im Dreieck geschalteten Wicklungen nacheinander in Folge zuerst die auf den äußeren Schenkeln angeordneten Wicklungen und dann die auf dem mittleren Schenkel angeordnete Wicklung bestromt. Diese Magnetisierungsfolge hat ergeben, daß damit die Vormagnetisierung weitgehend unabhängig von der Lastsituation und sogar bei unsymmetrischen Lasten möglich ist und damit stromspitzenfrei eingeschaltet werden kann.

Besonders vorteilhaft ist es, wenn die während der Vormagnetisierungsphase an die Wicklungen angelegten, effektiven Spannungen vom Einschaltzeitpunkt bis zu einer Effektivspannung entsprechend etwa bei 90° angeschnittenen, unipolaren Spannungshalbwellen vergrößert werden. Durch diese Maßnahme, die wegen der zur Reduzierung des Spannungseffektivwertes in der Regel bereits vorhandenen Phasenanschnittsteuerung technisch einfach realisierbar ist, können sonst gegebenenfalls noch auftretende, kleine Überströme in der Vormagnetisierungsphase vermieden werden.

Bei im Dreieck geschalteten Wicklungen einer Drehstromlast und nebeneinander, insbesondere auf einem EI-Kern angeordneten und im Dreieck geschalteten Wicklungen besteht die Möglichkeit eines vereinfachten Vormagnetisierungsverfahrens mit Zuschaltung von zwei Leiterspannungen. Dabei werden bei z. B. auf einem EI-Kern angeordneten und im Dreieck geschalteten Wicklungen jeweils an die äußeren Wicklungen nacheinander die jeweils zugehörigen Leiterspannungen mit gleichpoligen, unipolaren und in ihrer Spannungs-Zeit-Fläche wenigstens auf die Hälfte reduzierten Spannungshalbwellen angelegt, wobei dann nach wenigstens der Zeitdauer einer Periodenlänge der zuletzt angelegten Leiterspannung eine der beiden Leiterspannungen im Anschluß an eine dieser Spannungshalbwellen mit gegebenenfalls reduziertem Effektivwert bzw. Stromflußwinkel eingeschaltet bleibt und die anderen beiden Leiterspannungen mit gegebenenfalls ebenfalls reduziertem Stromflußwinkel bzw. Effektivwert in Folge zugeschaltet werden.

Durch das Zuschalten von nur zwei Leiterspannungen während der Vormagnetisierungsphase verringert sich insgesamt der Aufwand bei der Steuerung und auch bezüglich der Anzahl der Stellglieder, da nur noch zwei Stellglieder vorgesehen sein müssen, während die dritte Phase direkt angeschlossen werden kann.

Eine andere Ausführungsform der Erfindung sieht vor, daß bei wahlweise primärseitig im Stern oder Dreieck geschalteten Wicklungen zur Kern-Vormagnetisierung auf vorgebbare Werte alle drei Leiterspannungen beim Netzeinschalten nacheinander entsprechend der vorhandenen Phasenverschiebung unipolar und mit reduziertem Effektivwert an die Ihnen jeweils zugeordneten Wicklungen geschaltet werden und daß dann nach wenigstens der Zeitdauer einer Periodenlänge der zuletzt angelegten Leiterspannung eine Leiterspannung im Anschluß an eine dieser Spannungshalbwellen mit gegebenenfalls reduziertem Effektiv-

wert bzw. Stromflußwinkel eingeschaltet bleibt und die anderen beiden Leiterspannungen mit gegebenenfalls ebenfalls reduziertem Stromflußwinkel bzw. Effektivwert in Folge zugeschaltet werden.

Mit diesem Einschaltverfahren können universell sowohl primärseitig im Stern als auch im Dreieck geschaltete Wicklungen einer induktiven Drehstromlast praktisch ohne Einschaltstromstoß ans Netz geschaltet werden.

Die Erfindung bezieht sich auch auf eine Vorrichtung zur Begrenzung des Einschaltstromstoßes einer induktivitätsbehafteten, mit einem magnetisierbaren Kern versehenen Drehstromlast, insbesondere eines Drehstromtransformators, wobei die Vorrichtung mit einer Phasenanschnittsteuerung verbundene, als Wechselstromschalter ausgebildete Stellglieder in den Phasenzweigen aufweist. Diese Vorrichtung ist insbesondere dadurch gekennzeichnet, daß in wenigstens zwei Phasenzweigen Stellglieder vorgesehen sind und daß diese Stellglieder sowie die Phasenanschnittsteuerung mit einer Ablaufsteuerung verbunden sind, zum Ein- und Ausschalten der Stellglieder der Vormagnetisierung der Kernbereiche auf vorgebbare Werte zum anschließenden, folgerichtigen Einschalten der Stellglieder und zum Ansteuern der Phasenanschnittsteuerung in Sinne einer Veränderung des Phasenanschnittwinkels von etwa 135° bis etwa 90° während der Vormagnetisierung zu kleineren Phasenanschnittwinkeln in der anschließenden Betriebsphase.

Mit dieser Vorrichtung läßt sich bei geringem Aufwand eine induktive Last praktisch unabhängig von deren Lastzustand ohne Überstromspitzen einschalten.

Zusätzliche Ausgestaltungen der Erfindung sind in den weiteren Unteransprüchen aufgeführt. Nachstehend ist die Erfindung mit ihren wesentlichen Einzelheiten anhand der Zeichnungen noch näher erläutert.

Es zeigt:

- Fig. 1 eine Prinzipdarstellung einer Vorrichtung zur Begrenzung des Einschaltstromstoßes mit einer Ablaufsteuerung und einer an Stellglieder angeschlossenen Phasenanschnittsteuerung sowie einem an die Vorrichtung angeschlossenen Drehstromtransformator,
- Fig. 2 eine schematische Darstellung eines dreischenkelligen Drehstromtransformators,
- Fig. 3 ein Diagramm mit Darstellung der Drehstrom-Leiterspannungen mit zugehörigen Strömen,
- Fig. 4 bis 9 den einzelnen Schenkel eines Drehstromtransformators zugeordnete Magnetisierungs-Hysteresekurven,
- Fig. 10 ein etwa mit Figur 3 vergleichbares Diagramm, hier jedoch für ein etwas abgeändertes Einschaltverfahren,
- Fig. 11 die Schaltung eines primärseitig im Stern geschalteten Drehstromtransformators mit in den Strangzuleitungen befindlichen Stellgliedern,
- Fig. 12 ein Diagramm mit Darstellung der drei Leiterspannungen mit zugehörigen Strömen,
- Fig. 13 bis 15 dem Diagramm gemäß Figur 12 bzw. der Schaltung nach Fig. 11 zugeordnete Magnetisierungs-Hysteresekurven,
- Fig. 16 eine Schaltung eines primärseitig im Dreieck geschalteten Drehstromtransformators mit nur in zwei Phasenzuleitungen befindlichen Stellgliedern,
- Fig. 17 ein Diagramm mit Darstellung der Leiterspannungen und der zugehörigen Ströme beim Einschalten eines in Figur 16 gezeigten Drehstromtransformators und
- Fig. 18 bis 20 den Figuren 16 und 17 zugeordnete Magnetisierungs-Hysteresekurven.

Figur 1 zeigt eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung 1 in Verbindung mit einem in der Schaltgruppe Dy5 geschalteten Drehstromtransformator 2. Dieser Transformator 2 ist primärseitig mit seinen Wicklungen 3, 4, 5 im Dreieck geschaltet. In die an die Phasen R S T angeschlossenen Phasenleiter 6, 7, 8 befindet sich jeweils ein symbolisch durch einen Schalter dargestelltes Stellglied 9, 10, 11.

Zur Kennzeichnung der Leiterspannungen sind zwischen die Phasenleiter entsprechende Spannungspfeile U_{RS} , U_{ST} und U_{TR} eingezeichnet.

Sekundärseitig ist der Transformator 2 mit seinen Sekundärwicklungen 12 im Stern mit Mittelpunktsteiter geschaltet und es sind auch noch gegen den Mittelpunktsteiter MP geschaltete Lastwiderstände 13 erkennbar.

Die Stellglieder 9, 10, 11 sind mit einer Steuerung 14 verbunden, die im wesentlichen eine Ablaufsteuerung 15 sowie eine Phasenanschnittsteuerung 16 beinhaltet. Damit können die Stellglieder 9, 10, 11 so gesteuert werden, daß sich unterschiedliche Stromflußwinkel und auch Schaltfolgen realisieren lassen. Die Stellglieder sind in einem praktischen Ausführungsbeispiel durch Triacs, Thyristoren oder eine Kombination aus elektromechanischem Schalter und Halbleiterschalter gebildet. Insbesondere können im letzteren Falle die Halbleiterschalter den Stromfluß in einer Vormagnetisierungsphase mit reduziertem Strom übernehmen, während dann bei voll ans Netz geschaltetem Transformator diese Halbleiterschalter durch mechanische Kontakte beispielsweise eines Schützes überbrückt sind.

Figur 2 zeigt schematisch den Aufbau eines Drehstromtransformators 2 mit einem dreischenkeligen Eisenkern 17 und auf jedem Schenkel 18, 19, 20 befindlicher Primärwicklung 3, 4, 5. Bei dem eingezeichneten Wicklungssinn der Primärwicklungen ergibt sich jeweils in den Eisenkern-Schenkeln 18, 19, 20 der durch Pfeile gekennzeichnete magnetische Fluß Φ .

5 Um beim Einschalten beispielsweise des in Fig. 1 gezeigten Drehstromtransformators 2 einen hohen Einschaltstromstoß (Inrush) zu vermeiden, werden die drei Leiterspannungen nacheinander entsprechend der vorhandenen Phasenverschiebung unipolar und mit reduziertem Effektivwert auf die Primärwicklungen 3 bis 5 geschaltet. Durch die Phasenanschnittsteuerung kann dabei ein Phasenanschnittwinkel von etwa 135° bis 90° eingestellt sein. Unipolar bedeutet hier, daß jeweils von den angeschnittenen Spannungshalbwellen
10 entweder nur die positiven oder die negativen auf die Wicklungen geschaltet werden.

Durch diese reduzierte Spannungs- bzw. Strombeaufschlagung der Primärwicklungen erfolgt eine Vormagnetisierung des Eisenkernes 17, wobei dessen Schenkel 18, 19, 20 in dieser Vormagnetisierungsphase bestimmte Magnetisierungszustände einnehmen, die sich nach kurzer Zeit periodisch wiederholen. Nach Erreichen dieses Magnetisierungsmusters mit sich periodisch wiederholenden Magnetisierungszuständen in den einzelnen Schenkeln kann der Transformator nach einem von der Steuerung 14 vorgegebenen Ablauf voll eingeschaltet werden, ohne daß dabei Überströme auftreten.

Bei dem in Figur 3 bis 9 gezeigten Einschaltverfahren ist ein fest eingestellter Stromflußwinkel bzw. Phasenanschnittwinkel von etwa 90° vorgesehen. Der Ablauf dieses Einschaltverfahrens bezieht sich auf Drehstromtransformatoren mit primärseitig im Dreieck geschalteten Wicklungen, wie dies bei dem Transformator gemäß Figur 1 der Fall ist. Die jeweiligen Magnetisierungen in den einzelnen Eisenkern-Schenkeln (vgl. Figur 2) sind für die Vormagnetisierungsphase in den Diagrammen gemäß Figur 4 bis 6 wiedergegeben, während beim vollen Einschalten der Netzwechselspannung sich die Magnetisierungsverläufe gemäß Fig. 7 bis 9 ergeben. Die einzelnen Hysteresekurven sind jeweils sinngemäß den Schenkeln des Eisenkernes zugeordnet. Somit bezieht sich Figur 4 und 7 jeweils auf den Schenkel 18, Figur 5 und 8 auf den
20 mittleren Schenkel 19 und Figur 6 und 9 auf den Schenkel 20 des Eisenkernes.

Vor dem Einschalten des Transformators ist die Lage der remanenten Induktion in den drei Schenkeln des Transformators beliebig und zufällig. In den drei Hysteresekurven gemäß Fig. 4 bis 6 sind diese Remanenzlagen jeweils mit A gekennzeichnet. Dies entspricht auch dem Zeitpunkt A in Fig. 3, wo die Leiterspannung U_{ST} bei 90° Anschnittwinkel an den Transformator geschaltet wird. Im Ausführungsbeispiel
30 wird zunächst von den Netzwechselspannungen jeweils nur die negative, angeschnittene Halbwellen durchgelassen. Ohne weiteres könnte hier jedoch auch in Umkehrung zum Ausführungsbeispiel jeweils nur die positive, angeschnittene Spannungshalbwelle durchgelassen werden.

Die in ihrem Effektivwert reduzierte Spannung U_{ST} treibt nun einen Strom durch die Wicklung 5 des Drehstromtransformators, wodurch im Schenkel 20 ein magnetischer Fluß Φ_{20} erzeugt wird. Durch die reduzierte Spannung wird die bei A liegende remanente Induktion über den Punkt B in den Punkt C der Hysteresekurve gebracht (vgl. Fig. 6). Der Punkt B liegt zwar bereits im Sättigungsbereich der Induktion, durch die in ihrem Effektivwert reduzierte Leiterspannung U_{ST} wird jedoch im Leiter S bzw. im Leiter T nur eine kleine Blindstromspitze entstehen. Der Zeitpunkt B ist der Spannungsnulldurchgang der Leiterspannung U_{ST} . Bis zum Zeitpunkt C (vgl. Fig. 3) ist die Remanenzlage im Schenkel 20 zum stationären Punkt C
40 zurückgelaufen.

Der zum Zeitpunkt A erzeugte magnetische Fluß Φ_{120} teilt sich bei seinem Weg durch den Eisenkern des Transformators in zwei Teilflüsse durch die Schenkel 18 und 19 auf. Die dabei induzierten Spannungen werden bei den nicht angelegten Leiterspannungen U_{RS} und U_{TR} mitgemessen. Bei der Leiterspannung U_{RS} wird die induzierte Spannung der Wicklung 4 und bei der Leiterspannung U_{TR} die induzierte Spannung der
45 Wicklung 3 gemessen. Die magnetischen Teilflüsse in den Schenkeln 18 und 19 laufen in entgegengesetzter Richtung wie der magnetische Fluß Φ_{120} . Im Schenkel 19 bewirkt der Teilfluß, daß die Remanenz zu positiven Werten hin verschoben wird. In Fig. 5 wird somit die magnetische Induktion von dem Ausgangspunkt A über den Punkt B (entsprechend dem Zeitpunkt B in Figur 3) zum stationären Punkt C entsprechend dem Zeitpunkt C verschoben. Im Schenkel 18 bewirkt der Teilfluß ebenfalls eine Verschiebung der Remanenz zu positiven Werten hin und zwar gemäß Figur 4 vom Ausgangspunkt A über den
50 Punkt B zum Punkt C.

In Figur 3 ist gut erkennbar, daß die Amplituden der Spannungen U_{RS} (1. Diagramm Zeile) und die Spannung U_{TR} (3. Diagrammzeile) durch die Reihenschaltung der Wicklung 3 und 4 beim Anlegen der Spannung U_{ST} halb so groß ist, wie die Spannung U_{ST} .

55 In der 4., 5. und 6. Diagrammzeile sind jeweils die Ströme I_R , I_S und I_T eingezeichnet. I_R ist dabei der Strom durch die Wicklung 3 und 4, der Strom I_S der Strom durch die Wicklung 4 und 5 und der Strom I_T der Strom durch die Wicklung 3 und 5. In der Diagrammzeile 5 und 6 ist die zum Zeitpunkt B auftretende Blindstromspitze erkennbar, die auftritt, wenn die magnetische Induktion über den negativen Umkehrpunkt

der Hysteresekurve in die Sättigung zum Punkt B gelangt (Fig. 6).

Sobald die Blindstromspitze zwischen den Zeitpunkten B und C (Figur 3) abgeklungen ist, werden die Stellglieder 10 und 11 gesperrt und somit die Spannung U_{ST} ausgeschaltet.

Zum Zeitpunkt C werden dann die Stellglieder 9 und 11 leitend gemacht, so daß am Transformator die
 5 Leiterspannung U_{TR} unipolar mit einer bei 90° angeschnittenen Halbwelle ansteht. Diese Spannung treibt einen Strom durch die Wicklung 3. Der durch diese Wicklung 3 fließende Strom erzeugt einen negativen, magnetischen Fluß Φ_{18} . Der magnetische Fluß Φ_{18} bewirkt im Schenkel 18, daß die Remanenzlage von dem Punkt C über den Punkt D in den Punkt E verschoben wird. Diesen Magnetisierungslagen entsprechen jeweils wieder die gleich bezeichneten Zeitpunkte in dem Diagramm gemäß Figur 3.

10 Da die remanente Induktion in dem Schenkel 18 im Mittelpunkt der Hysteresekurve (Fig. 4) lag, der Anschnittwinkel der negativen Halbwelle andererseits bei 90° liegt wird dementsprechend auch die magnetische Induktion passend bis zum negativen Umkehrpunkt D der Hysteresekurve geführt, so daß hierbei keine Blindstromspitze auftritt.

Auch der im Schenkel 18 erzeugte magnetische Fluß Φ_{18} teilt sich in zwei etwa gleichgroße Teilflüsse durch
 15 die Schenkel 19 und 20 auf. Im Schenkel 19 wird die Remanenzlage in der Hysteresekurve (Figur 5) von dem Punkt C über den Punkt D in den Punkt E verschoben. Der Punkt D liegt zwar auch im Bereich der Sättigung des Eisens im Schenkel 19, durch die Reihenschaltung der Wicklungen 4 und 5 tritt aber eine meßbare Blindstromspitze nicht auf (vgl. Diagramm Zeile 4 und 6 in Figur 3).

Vom Punkt D (Figur 5) wandert die Magnetisierung zum Punkt E in die stationäre Remanenzlage.

20 Der magnetische Teilfluß des magnetischen Flusses Φ_{18} in dem Schenkel 18 bewirkt in dem Schenkel 20, daß dort die Magnetisierung von dem Punkt C (vgl. Figur 6) über den Punkt D zum Punkt E verschoben wird. Bei Lage der Magnetisierung im Punkt D, entsprechend auch dem Zeitpunkt D in Figur 3, werden die Stellglieder 11 und 9 gesperrt. Am Transformator liegt keine Spannung mehr an.

Zum Zeitpunkt E wird die Leiterspannung U_{RS} durch Ansteuerung der Stellglieder 9 und 10 an den
 25 Transformator gelegt. Dies erfolgt ebenso wie bei den beiden anderen Leiterspannungen mit unipolaren und bei 90° angeschnittenen Spannungshalbwellen. Zum Zeitpunkt E befinden sich die remanenten Induktionen des Eisens der drei Schenkel bei den Punkten E der entsprechenden Hysteresekurven gemäß Figur 4 bis 6. Der Strom durch die Wicklung 4 erzeugt in dem Schenkel 19 einen magnetischen Fluß Φ_{19} . Durch diesen Fluß Φ_{19} wird die Remanenzlage im Schenkel 19 von dem Punkt E über den Punkt F in den Punkt G verschoben (Fig. 5).

30 Durch die Aufteilung des Flusses Φ_{19} in zwei durch die Schenkel 18 und 20 gehenden Teilflüsse wird die Remanenzlage in dem Schenkel 18 über den Punkt F zum Punkt G verschoben. Dieser Punkt fällt wieder mit dem Punkt A - zufällig vorhandene Anfangsremanenz - zusammen (Fig. 4). In dem Schenkel 20 wird die Remanenzlage ebenfalls von dem Punkt E über den Punkt F in den Punkt G verschoben (Figur 6).

35 Ab dem Zeitpunkt G (Figur 3) wiederholen sich die vorbeschriebenen Magnetisierungszustände in den drei Schenkeln periodisch. Zur Verdeutlichung sind deshalb die Spannungs- und Stromverläufe noch über 3 Periodenlängen dargestellt. In diesem Bereich erfolgt weiterhin nacheinander ein Einschalten der drei Leiterspannung jeweils mit unipolaren und mit 90° angeschnittenen Spannungshalbwellen.

Ab dem Zeitpunkt N (Figur 3) beginnt der Übergang zum vollen Einschalten des Drehstromtransforma-
 40 tors 2 ans Drehstromnetz. Wie bereits vorerwähnt, befinden sich die Magnetisierungszustände in den 3 Schenkeln 18, 19 20 bereits zum Zeitpunkt G in einer für das volle Einschalten geeigneten Lage. Dementsprechend könnte auch der Zeitpunkt N in den Zeitpunkt G zurückverlegt werden.

Zur Verdeutlichung sind die Magnetisierungszustände in den einzelnen Schenkeln während der Über-
 45 gangsphase vom Vormagnetisieren zum Volleinschalten, in den Hysteresekurven gemäß Figur 7 bis 9 wiedergegeben. Diese sind jeweils ebenfalls wie die Hysteresekurven gemäß Figur 4 bis 6 sinngemäß den Schenkeln 18, 19 und 20 zugeordnet. Der Ausgangspunkt N in den Hysteresekurven gemäß Figur 7 bis 9 entspricht dem Magnetisierungs-Remanenzpunkt G in den Figuren 4 bis 6. Die dazu passenden Zeitpunkte sind wiederum mit gleichen Buchstaben in dem Diagramm gemäß Figur 3 bezeichnet.

Zu dem Zeitpunkt N wird die Leiterspannung U_{ST} angelegt, indem die Stellglieder 10 und 11
 50 angesteuert werden und schließen. Durch den im Schenkel 20 erzeugten magnetischen Fluß gelangt die Magnetisierung in diesem Schenkel über den negativen Umkehrpunkt O der Hysteresekurve (Figur 9) in den Punkt P. Der negative Umkehrpunkt O liegt beim Spannungsnulldurchgang von der negativen zur positiven Spannungshalbwelle der Leiterspannung U_{ST} . Bis zum Zeitpunkt P (Figur 3) ist die Magnetisierungslage in den Punkt P (Figur 9) gewandert und befindet sich somit in der maximal möglichen negativen
 55 Remanenzlage.

Durch die sich ergebenden magnetischen Teilflüsse werden auch die Magnetisierungen in den Schenkeln 18 und 19 verschoben, wobei dies jeweils von den Punkten N über die Punkte O zu den Punkten P erfolgt (Figur 7 und 8). Zum Zeitpunkt P wird jetzt die Leiterspannung U_{ST} nicht abgeschaltet, sondern die

beiden Stellglieder 10 und 11 (Figur 1) bleiben leitend. Ein Phasenanschnitt ist ab dem Zeitpunkt P bezüglich der Leiterspannung U_{ST} nicht mehr vorhanden. Die Leiterspannung U_{ST} treibt somit weiter einen Strom durch die Wicklung 5, der einen magnetischen Fluß Φ_{20} im Schenkel 20 erzeugt. Durch diesen magnetischen Fluß wandert die Magnetisierungslage im Schenkel 20 von dem Punkt O zum Zeitpunkt O (Figur 3) über den Punkt P zum positiven Umkehrpunkt S der Hysteresekurve gemäß Figur 9. Bei der nächsten negativen Voll-Halbperiode der Leiterspannung U_{ST} durchläuft die Magnetisierung den oberen Ast der in Figur 9 gezeigten Hysteresekurve wieder bis zum negativen Umkehrpunkt, der jetzt entsprechend dem Zeitpunkt V in Figur 3 auch in Figur 9 mit V gekennzeichnet ist und mit dem Punkt O zusammenfällt. Der Weg zwischen den Umkehrpunkten in der Hysteresekurve wird immer zwischen zwei Spannungsnulldurchgängen zurückgelegt, vom negativen zum positiven Umkehrpunkt während der positiven Spannungshalbperiode und vom positiven zum negativen Umkehrpunkt während der negativen Spannungshalbperiode. Die Magnetisierung des Schenkels läuft somit von Beginn des Volleinschaltens (Zeitpunkt O) auf der Hysteresekurve für den stationären Betrieb um.

Zum Zeitpunkt P wird auch das Stellglied 9 angesteuert und leitend gemacht, so daß dann ab diesem Zeitpunkt nicht nur die Leiterspannung U_{ST} , sondern auch die beiden anderen Leiterspannungen U_{RS} und U_{TR} angeschlossen sind.

Bei den Leiterströmen findet ein Phasensprung statt, sobald alle drei Leiterspannungen am Transformator anliegend, weil die Leiterströme nicht mehr den Strangströmen entsprechen, sondern den Leiterströmen, die jeweils die Summe aus zwei Strangströmen sind.

Durch die zugeschaltete Leiterspannung U_{TR} zum Zeitpunkt P wird die Magnetisierung in dem Schenkel 18 von dem Punkt P (Figur 7) in den negativen Umkehrpunkt R der Hysteresekurve verschoben. R entspricht dem Zeitpunkt R und ist der Nulldurchgang von der negativen zur positiven Spannungshalbperiode der Leiterspannung U_{TR} . Somit fällt auch für den Schenkel 18 die Magnetisierungslage mit dem Spannungsverlauf der Leiterspannung U_{TR} so zusammen, daß jeweils zwischen den Nulldurchgängen dieser Leiterspannung einmal die Hysteresekurve in einer Richtung durchlaufen wird.

Zum Zeitpunkt P befindet sich die Magnetisierungslage des Schenkels 19 in dem stationären Punkt P (Figur 8). Der positive Spannungsabschnitt der Leiterspannung U_{RS} zwischen den Zeitpunkten P und Q (Figur 3) bewirkt eine Änderung der Magnetisierungslage vom Punkt P zum Punkt Q, dem positiven Umkehrpunkt der Hysteresekurve gemäß Figur 8. Die maximale Magnetisierungslage Q in dem mittleren Schenkel 19 fällt mit dem Nulldurchgang der Leiterspannung U_{RS} von der positiven zur negativen Halbperiode zusammen. Damit kann für die nächsten Halbwellen die Magnetisierung praktische "synchron" mit dem Spannungsverlauf mitlaufen.

Für alle drei Leiterspannungen ist somit ein Synchronismus in Bezug auf die Magnetisierungslage in den jeweils zugeordneten Schenkeln des Drehstromtransformators vorhanden, so daß keine Blindstromspitzen auftreten können.

Wie anhand der Figur 3 Zeile 5 und 6 erkennbar, treten zu Beginn der Vormagnetisierungsphase kleine Blindstromspitzen auf. Um diese zu vermeiden, können die unipolaren Spannungsabschnitte von zunächst sehr kleinen Spannungs-Zeitflächen allmählich bis zu einer vorgegebenen Spannungshalbwellen-Abschnittbreite erhöht werden. Dies ist in dem Diagramm gemäß Figur 10 dargestellt. Deutlich ist hierbei erkennbar, daß während der Vormagnetisierungsphase keine Blindstromspitzen mehr auftreten. In dem gezeigten Ausführungsbeispiel beginnen die Spannungsabschnitte etwa bei Phasenanschnittwinkeln von 135° und werden dann allmählich bis auf 90° erhöht. Ab dem Zeitpunkt A ergeben sich dann etwa gleiche Spannungsverläufe, wie in dem Diagramm gemäß Figur 3.

Figur 11 zeigt einen primärseitig im Stern geschalteten Drehstromtransformator 2 a, der mit seinen Phasenleitern 6, 7, 8 über Stellglieder 9, 10, 11 an die Netzphasen R, S und T angeschlossen ist. Der Mittelpunktsteiler ist mit MP, die Strangspannungen sind mit U_{RS} , U_{ST} und U_{TR} bezeichnet.

Auch dieser Drehstromtransformator 2a wird prinzipiell in einer Vormagnetisierungsphase mit unipolaren, angeschnittenen Spannungshalbwellen beaufschlagt. Dies erfolgt in etwa vergleichbar wie bei dem anhand der Figuren 1 bis 9 beschriebenen Einschaltverfahren, jedoch werden hier in zwei Schenkeln gleichzeitig magnetische Flüsse erzeugt, da beim Vormagnetisieren jeweils zwei Wicklungen in Reihe an eine Leiterspannung geschaltet sind.

Eine Besonderheit hierbei ist, daß sich bei primärseitig im Stern geschalteten Wicklungen in den zugehörigen Schenkeln des Kernes nach einiger Zeit in allen drei Schenkeln im Mittelpunkt bzw. Nullpunkt der jeweiligen Hysteresekurve liegende Magnetisierungen einstellen. Es finden dazu im Eisenkern Symmetrierungsvorgänge über die magnetischen Widerstände der einzelnen Kernschenkel statt. Wird nämlich das Eisen eines Schenkels etwas in die Sättigung getrieben, so vergrößert sich sein magnetischer Widerstand erheblich, weil die Permeabilität in diesem Schenkel stark abnimmt, so daß dann auch ein magnetischer Teilfluß der in den beiden Schenkeln erzeugten Flüsse durch diesen Schenkel fließt, dessen Wicklung nicht

bestromt wird.

In Figur 12 ist der Zeitpunkt des Netzeinschaltens mit X gekennzeichnet. Ab dem Zeitpunkt A' können dann die vorerwähnten Symmetrierungsvorgänge ablaufen. In der Regel sind diese etwa nach der Zeitdauer einer Periodenlänge der zuletzt angelegten Phasenspannung abgeschlossen. Eine weitere Beaufschlagung der Wicklungen mit unipolaren, angeschnittenen Spannungshalbwellen verändert jetzt aber nur noch periodisch die Magnetisierungszustände in den Schenkeln.

Zum Zeitpunkt A (Figur 12) befinden sich alle drei Schenkel des Kernes im Nullpunkt der jeweiligen Hysteresekurve (Figur 13 - 15). Der in Figur 12 mit A gekennzeichnete Zeitpunkt ist entsprechend in den Hysteresekurven ebenfalls mit A gekennzeichnet. Zum Zeitpunkt A werden die Stellglieder 10 und 11 leitend und am Transformator liegt dann die Leiterspannung U_{ST} an. Diese Leiterspannung treibt einen Strom durch die Wicklungen 4 und 5, so daß in den Schenkeln 19 und 20 (Fig. 2) entgegengesetzt gerichtete magnetische Flüsse erzeugt werden. Wie vorbeschrieben, wird in dem dritten Schenkel 3 kein magnetischer Fluß erzeugt, so daß sich die Magnetisierungslage zwischen dem Zeitpunkt A und C nicht ändert.

Der magnetische Fluß in dem mittleren Schenkel 19 verschiebt die Magnetisierung vom Punkt A über den Punkt B zur positiven Ruheremanenz C (Figur 14). Der Punkt C liegt etwas unterhalb der maximal möglichen, positiven Remanenzlage, weil die Spannung an der Wicklung 4 im Scheitel kleiner ist als im späteren stationären Betrieb, weil sich die Leiterspannung zu gleichen Teilen zwischen der Wicklung 4 und 5, die für die Leiterspannung U_{ST} in Reihe geschaltet sind, aufteilt.

Der magnetische Fluß im Schenkel 20 verschiebt die Magnetisierung vom Ausgangspunkt A über den Punkt B in den Punkt C (Figur 15).

Nach dem Zeitpunkt B sperren die Stellglieder 10 und 11 und zum Zeitpunkt C (Figur 12) werden die Stellglieder 9 und 11 leitend. Es liegt dann die Leiterspannung U_{TR} an den Transformator an. In den Schenkeln 18 und 20 werden dadurch entgegengesetzt gerichtete magnetische Flüsse erzeugt. In dem Schenkel 18 wird dabei die Magnetisierung vom Nullpunkt der Hysteresekurve - Punkt A, der die gleiche Lage hat, wie der Punkt C - über den Punkt D in den Punkt E verschoben (Figur 13). Der magnetische Fluß in dem Schenkel 20 verschiebt die Magnetisierung vom Punkt C über den Punkt D in den Nullpunkt E, der damit auch der Magnetisierung zum Zeitpunkt A entspricht.

Zum Zeitpunkt E (Figur 12) werden die Stellglieder 9 und 10 angesteuert und leitend und am Transformator 2 a liegt dann die Leiterspannung U_{RS} an. Der durch die Wicklungen 3 und 4 fließende Strom erzeugt in den beiden zugehörigen Schenkeln 18 und 19 unterschiedliche magnetische Flüsse. In dem Schenkel 18 wird die Magnetisierung vom Punkt E (Figur 13) über den Punkt F in den Punkt G verschoben, der damit wiederum dem Ausgangspunkt A bzw. dem Nullpunkt der Hysteresekurve entspricht.

In dem Schenkel 19 wird die Magnetisierung von dem Punkt C (Figur 14), der auch den Magnetisierungspunkten D und E entspricht, über den Magnetisierungspunkt F ebenfalls zurück in den Nullpunkt der Hysteresekurve verschoben. Dieser Punkt G ist somit der gleiche Magnetisierungszustand wie zum Zeitpunkt A.

Aus dem Vorbeschriebenen ist erkennbar, daß die Ummagnetisierungen in den einzelnen Schenkeln 18, 19, 20 (Fig. 2) jeweils zyklisch nach einer Periodenlänge an den jeweiligen Ausgangspunkt der Magnetisierung zurückkehren. Zu den Zeitpunkten A und G befinden sich somit im betrachteten Vormagnetisierungszeitraum die Magnetisierungen der einzelnen Schenkel jeweils in den Nullpunkten der Hysteresekurve, so daß hiermit eine definierte Ausgangssituation zum vollen Einschalten des Transformators ans Netz vorhanden ist.

Da sich diese definierten Magnetisierungszustände ab dem Einschaltzeitpunkt X (Figur 12) vor dem genauer betrachteten Zeitraum, beginnend bei A schon mehrfach wiederholt haben, könnte auch einer der von dem Zeitpunkt A liegenden, entsprechenden Zeitpunkte zum Umschalten auf volle Netzspannung bzw. einen vorgebbaren Wert gewählt werden.

Die Diagrammzeilen gemäß Figur 12 sind zwischen den Zeitpunkten A und A unterbrochen dargestellt, um zu verdeutlichen, daß dazwischen ein praktisch beliebiger Zeitraum liegen könnte.

Ab dem Zeitpunkt G (Figur 12), wo sich die Magnetisierungen der einzelnen Schenkel jeweils im Nullpunkt der Hysteresekurven befinden, werden die Stellglieder 10 und 11 leitend und somit die Leiterspannung U_{ST} an die Wicklungen 4 und 5 gelegt. In dem Schenkel 19 wird die Magnetisierung von dem Punkt G über den Punkt H in den Punkt I geschoben.

In dem Schenkel 20 wird entsprechend die Magnetisierung vom Mittelpunkt der Hysteresekurve (Figur 15) entsprechend dem Zeitpunkt G über die Magnetisierung H in den Punkt I verschoben.

Zum Zeitpunkt H bleiben die Stellglieder 10 und 11 leitend und somit die Leiterspannung U_{ST} angelegt. Zum Zeitpunkt I wird auch noch das Stellglied 9 leitend, so daß am Transformator alle drei Leiterspannungen anliegen.

Bei den Spannungen an den Wicklungen 3, 4, 5 findet dann ein Phasensprung statt.

Wird zum Zeitpunkt I das Stellglied 9 leitend, befindet sich die Magnetisierung im Schenkel 20 im Punkt I (Figur 15). Der Punkt I liegt etwas positiver als die maximale mögliche negative, remanente Magnetisierung des Schenkels 20, die beim Umlauf auf der Hysteresekurve erreicht wird, wenn die Strangspannung an der
 5 Wicklung 5 anliegt. Da der Strom I_T der Strangspannung U_T proportional ist, kann aus seiner Phasenlage nach dem Phasensprung geschlossen werden, daß die Remanenzlage im Schenkel 20 und die Phasenlage der Strangspannung U_T nicht ganz exakt zusammenpassen. Dadurch wird zwar der Eisenschenkel 20 zum
 10 Zeitpunkt K (Figur 15) etwas in die positive Sättigung getrieben, die dabei auftretende, kleine Blindstromspitze hat aber keine Bedeutung, da sie bei leerlaufendem Transformator nicht die Größe des Nennlaststromes erreicht und bei angeschlossener Last praktisch hinter dem Wirkstrom verschwindet. Nach dem
 Zeitpunkt K und der entsprechenden Magnetisierungslage K, läuft die Magnetisierung synchron zwischen den beiden Umkehrpunkten der Hysteresekurve hin und her.

Ähnlich verhält es sich bei dem Schenkel 19, wo sich zum Zeitpunkt I entsprechend die Magnetisierung auch im Punkt I befindet und durch die Strangspannung U_S etwas in die negative Sättigung getrieben wird.
 15 Im Schenkel 18 wird die Magnetisierung vom Nullpunkt der Hysteresekurve bzw. dem Punkt I über den Punkt J in den leicht in der Sättigung liegenden Magnetisierungspunkt M verschoben. Ab diesem Zeitpunkt M bzw. Magnetisierungspunkt M läuft auch hier die Magnetisierung zwischen den jeweiligen Umkehrpunkten der Hysteresekurve hin und her. Zum Zeitpunkt M ist somit der Übergang von der Vormagnetisierungsphase zum vollen Einschalten des Transformators abgeschlossen.

20 Versuche haben gezeigt, daß die vorerwähnten, kleinen Blindstromspitzen noch vermieden werden könnten, indem der Phasenanschnittwinkel der Leiterspannung U_{TR} separat eingestellt wird. Da diese Blindstromspitzen aber auch unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen nicht störend in Erscheinung treten, sind entsprechende Maßnahmen nicht erforderlich.

In den Figuren 16 bis 20 ist noch ein weiter vereinfachtes Einschaltverfahren in Verbindung mit einem
 25 primärseitig im Dreieck geschalteten Drehstromtransformator 2 gezeigt.

Bei diesem vereinfachten Einschaltverfahren kommt man mit nur zwei Stellgliedern 9 und 10, die hier in die Phasen R und S geschaltet sind, aus. Die Phase T ist direkt an den Transformator angeschlossen. Im vorliegenden Fall werden während der Vormagnetisierungsphase (Zeitpunkte A bis N in Figur 17) nur die beiden Leiterspannungen U_{ST} und U_{TR} mit unipolaren und etwa bei 90° angeschnittenen Halbwellen auf den
 30 Transformator geschaltet.

Zunächst wird das Stellglied 10 zum Zeitpunkt A leitend. Der durch die Wicklung 5 fließende Strom bewirkt einen magnetischen Fluß in dem Schenkel 20, so daß die Magnetisierung vom Punkt A über den Punkt B in den Punkt C verlagert wird. Die Magnetisierungspunkte innerhalb der Hysteresekurven entsprechen jeweils den Zeitpunkten mit gleicher Benennung in dem Diagramm gemäß Figur 17. Die Hysteresekurven gemäß
 35 Figur 18, 19 und 20 sind den Schenkeln 18, 19 und 20 (Fig. 2) zugeordnet.

In den beiden anderen Schenkeln 18 und 19 findet ebenfalls eine Ummagnetisierung von den Punkten A zu den Punkten C jeweils über die Punkte B statt. Dies wird durch magnetische Teilflüsse in diesen Schenkeln erzeugt, die aus dem magnetischen Fluß in dem Schenkel 20 herrühren. Die jeweiligen magnetischen Teilflüsse, die durch die in Reihe geschalteten Wicklungen 3 und 4 herrühren, heben sich
 40 gegenseitig auf.

Nachdem das Stellglied 10 nach dem Zeitpunkt B sperrt, wird das Stellglied 9 zum Zeitpunkt C leitend, so daß dann die Leiterspannung U_{TR} am Transformator anliegt. Der durch die Wicklung 3 fließende Strom bewirkt in dem Schenkel 18 des Transformators 2 einen magnetischen Fluß und dadurch eine Ummagnetisierung in den Punkt D und zum Zeitpunkt E eine remanente Magnetisierung in dem Punkt E (Figur 18). Die
 45 resultierenden magnetischen Teilflüsse bewirken in den Schenkeln 19 und 20 eine Veränderung der Magnetisierung vom Punkt C über den Punkt D zum Punkt E (vgl. Figur 19 und 20).

Zum Zeitpunkt E (Figur 17) wird das Stellglied 10 wieder leitend, so daß jetzt wieder die Leiterspannung U_{ST} anliegt. Der durch die Wicklung 5 fließende Strom bewirkt in dem Schenkel 20 einen magnetischen Fluß und damit eine Verschiebung der Magnetisierung von dem Punkt E über den Punkt G in den Punkt H.
 50 In Figur 20 ist zu erkennen, daß der Punkt G im Sättigungsbereich liegt, so daß zum Zeitpunkt G eine Blindstromspitze auftritt (vgl. Figur 17, 5. und 6. Diagrammzeile).

Der magnetische Fluß im Schenkel 20 teilt sich in diesem Falle nicht symmetrisch auf die beiden Schenkel 18 und 19 auf, weil die Magnetisierung in dem mittleren Schenkel 19 in die Sättigung gelangt (vgl. Punkt F in Figur 19) und damit der magnetische Widerstand größer wird. Ein größerer Anteil des aufgeteilten magnetischen Flusses aus dem Schenkel 20 fließt deshalb durch den Schenkel 18. Bis zum Zeitpunkt H hat
 55 sich die Magnetisierung in dem Schenkel 18 über den Punkt G zu dem Punkt H verlagert. Zum Zeitpunkt H befindet sich die Magnetisierung in dem mittleren Schenkel 19 entsprechend auch im Punkt H.

Zum Zeitpunkt H wird das Stellglied 9 wieder leitend und der erzeugte magnetische Fluß in dem Schenkel

18 verlagert die Magnetisierung über den negativen Wendepunkt der Hysterseurve J zum Punkt K, der wieder der Remanenzlage des Schenkels 18 zum Zeitpunkt E entspricht.

Da im Schenkel 19 ein höherer magnetischer Widerstand durch die hohe Remanenzlage gegeben ist, teilt sich der im Schenkel 18 fließende magnetische Fluß so auf, daß durch den Schenkel 19 nur ein so großer Teilfluß fließt, daß der hohe magnetische Widerstand erhalten bleibt, wobei die Remanenz den maximalen, positiven Wert in Punkt K zum Zeitpunkt K annimmt (Figur 19). Der andere magnetische Teilfluß setzt im Schenkel 20 die Magnetisierung von dem Punkt H über den Punkt J auf den Punkt K (Nullpunkt der Hysterseurve gemäß Figur 20).

Zum Zeitpunkt K befinden sich somit die Magnetisierungszustände in den einzelnen Schenkeln 18, 19, 20 in definierten Ausgangslagen, nämlich im Schenkel 18 im negativen, maximalen Remanenzpunkt, im Schenkel 19 im positiven, maximalen Remanenzpunkt und im Schenkel 20 im Nullpunkt der Hysterseurve. Ausgehend von dieser Magnetisierungslage kann dann, wie nachfolgende beschrieben, die volle Netzspannung aller drei Phasen an den Drehstromtransformator geschaltet werden.

Ab dem Zeitpunkt K wird durch wechselweises Einschalten der Stellglieder 10 oder 9 jeweils ebenfalls wechselweise die Remanenzlage in den beiden äußeren Schenkeln 18 und 20 zwischen der maximalen negativen Remanenz und dem Nullpunkt der Hysterseurve hin- und hergeschoben. In dem mittleren Schenkel 19 bleibt die maximale positive Remanenz dabei erhalten.

Zum Zeitpunkt N wird das Stellglied 10 leitend, so daß die Magnetisierung in dem Schenkel 20 vom Hysteresenullpunkt bis zum Zeitpunkt P in den negativen Umkehrpunkt P der Hysterseurve (Figur 20) wandert und von dort in den Punkt Q. Im mittleren Schenkel 19 wird die Magnetisierung vom maximal positiven Remanenzpunkt etwas in die Eisensättigung Punkt O getrieben und von dort wieder zum Ausgangspunkt bei der maximalen positiven Remanenz zurück. Im Schenkel 18 wird die magnetische Remanenzlage vom maximalen negativen Remanenzpunkt in den Nullpunkt der Hysterseurve verschoben.

Nach dem Zeitpunkt P (Figur 17) bleibt das Stellglied 10 leitend, so daß die Magnetisierung über den Punkt Q zum positiven Umkehrpunkt T gelangt. Die weiteren Spannungshalbwellen bewirken dann, daß die Magnetisierung jeweils zwischen den Umkehrpunkten der Hysterseurve hin- und herläuft.

Zum Zeitpunkt Q wird auch das Stellglied 9 leitend, so daß ab diesem Zeitpunkt alle drei Leiterspannungen an dem Transformator 2 anliegen. Der magnetische Fluß in dem Schenkel 18 bewirkt eine Verschiebung der Magnetisierung in den negativen Umkehrpunkt S der Hysterseurve. Der Magnetisierungspunkt entspricht dem Zeitpunkt S in Figur 17 und dabei dem Nulldurchgang der Leiterspannung U_{TR} . Die Magnetisierung im Schenkel 18 wandert dann durch die nächste positive Halbwellen in den positiven Umkehrpunkt V und mit dem nachfolgenden Halbwellen dann jeweils zwischen den Umkehrpunkten der Hysterseurve hin- und her.

Zum Zeitpunkt Q befindet sich die Magnetisierung in dem mittleren Schenkel 19 im maximaler, positiver Remanenzlage. Der positive Spannungsabschnitt der Leiterspannung U_{RS} bewirkt eine Verschiebung der Magnetisierung vom Punkt Q in den Punkt R (Figur 19). Die Ummagnetisierung des mittleren Schenkels 19 läuft dann synchron mit den weiteren Spannungshalbwellen zwischen den Umkehrpunkten R und U hin- und her.

Die Verschiebung in den Stromverläufen der Leiterströme I_R , I_S und I_T zum Zeitpunkt R kommt daher, daß die Ströme I_R , I_S , I_T nicht mehr den Strangströmen durch die Wicklungen entsprechen, wie während der Vormagnetisierungsphase, sondern zu Leiterströmen werden, die sich aus der Summe von jeweils zwei Strangströmen bilden.

Auch bei diesem Einschaltverfahren könnten die hier negativen Spannungshalbwellen vom Einschaltzeitpunkt X an in ihrer Spannungszeitfläche allmählich ansteigen bis beispielsweise zu einem Anschnittwinkel von 90° , um die sonst auftretenden Blindstromspitzen (vgl. Zeitpunkt G in Figur 17) zu vermeiden.

Das vorbeschriebene Einschaltverfahren kann sowohl bei Drehstromtransformatoren mit sekundärseitig angeschlossener Last oder auch für sekundärseitig im Leerlauf befindliche Transformatoren verwendet werden.

Patentansprüche

- Verfahren zur Reduzierung des Einschaltstromstoßes beim Betreiben einer induktivitätsbehafteten und mit einem magnetisierbaren Kern versehenen Drehstromlast mit drei wahlweise in unterschiedlichen Schaltgruppen angeordneten Wicklungen, an einem Drehstrom-Wechselstromnetz, wobei zumindest zeitweise ein Phasenanschnitt der Leiterspannungen (U_{RS}, U_{ST}, U_{TR}) vorgesehen ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß die einer Wicklung (3,4,5) zugeordneten Kernbereiche jeweils auf vorgebbare Magnetisierungen gebracht werden, daß dazu wenigstens zwei der drei Leiterspannungen (U_{RS}, U_{ST}, U_{TR}) mit

- unipolaren und in ihrer Spannungs-Zeit-Fläche mindestens auf etwa die Hälfte reduzierten Spannungshalbwellen nacheinander entsprechend der vorhandenen Phasenverschiebung der Leiterspannungen (U_{RS}, U_{ST}, U_{TR}) an die Drehstromlast geschaltet werden und daß nach wenigstens der Zeitdauer von einer Periodenlänge der zuletzt angelegten Leiterspannung (U_{RS}, U_{ST}, U_{TR}) nur eine der an die Drehstromlast geschalteten Spannungen mit bis zu einem Sollwert oder bis zum Nennwert der Netzspannung vergrößerten Effektivwert eingeschaltet bleibt und dann die anderen beiden Phasen ebenfalls mit vergrößertem Effektivwert in Folge wieder zugeschaltet werden.
- 5
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die unipolaren, in ihrer Spannungs-Zeit-Fläche reduzierten Spannungshalbwellen in einem Bereich entsprechend einem . Phasenanschnittwinkel von etwa 135° bis etwa 90° bei etwa sinusförmiger Netzspannung reduziert werden.
- 10
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Magnetisierung der drei Kernbereiche mit einem zumindest in zwei Kernbereichen gleichsinnigen, beziehungsweise gleichgerichteten Magnetfluß vorgenommen wird.
- 15
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß bei nebeneinander auf einem EI-Kern (17) angeordneten, im Dreieck geschalteten Wicklungen (3,4,5) nacheinander in Folge zuerst die auf den äußeren Schenkeln (18,20) angeordneten Wicklungen (3,5) und dann die auf dem mittleren Schenkel (19) angeordnete Wicklung (4) bestromt werden.
- 20
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß die während der Vormagnetisierungsphase an die Wicklungen (3,4,5) angelegten, effektiven Spannungen vom Einschaltzeitpunkt an bis zu einer Effektivspannung entsprechend etwa bei 90° Grad angeschnittenen, unipolaren Spannungshalbwellen vergrößert werden.
- 25
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß bei nebeneinander, insbesondere auf dem EI-Kern (17) angeordneten und im Dreieck geschalteten Wicklungen (3,4,5), jeweils an die äußeren Wicklungen (3,5) nacheinander die jeweils zugehörigen Leiterspannungen mit gleichpoligen, unipolaren und in ihrer Spannungs-Zeit-Fläche wenigstens auf etwa die Hälfte reduzierten Spannungshalbwellen angelegt werden und daß dann nach der Zeitdauer von wenigstens einer Periodenlänge der zuletzt angelegten Leiterspannung eine der beiden Leiterspannungen im Anschluß an eine dieser Spannungshalbwellen mit gegebenenfalls reduziertem Effektivwert beziehungsweise Stromflußwinkel eingeschaltet bleibt und die anderen beiden Leiterspannungen mit gegebenenfalls ebenfalls reduziertem Stromflußwinkel beziehungsweise Effektivwert in Folge zugeschaltet werden.
- 30
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß bei wahlweise primärseitig im Stern oder Dreieck geschalteten Wicklungen (3,4,5), zur Kern-Vormagnetisierung auf vorgebbare Werte, alle drei Leiterspannungen (U_{RS}, U_{ST}, U_{TR}) beim Netzeinschalten nacheinander entsprechend der vorhandenen Phasenverschiebung unipolar und mit reduziertem Effektivwert an die ihnen jeweils zugeordneten Wicklungen (3,4,5) geschaltet werden und daß dann nach der Zeitdauer von wenigstens einer Periodenlänge der zuletzt angelegten Leiterspannung eine Leiterspannung im Anschluß an eine dieser Spannungshalbwellen mit gegebenenfalls reduziertem Effektivwert beziehungsweise Stromflußwinkel eingeschaltet bleibt und die anderen beiden Leiterspannungen mit gegebenenfalls ebenfalls reduziertem Stromflußwinkel beziehungsweise Effektivwert in Folge zugeschaltet werden.
- 40
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 und 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß bei primärseitig im Stern mit Mittelpunktleiter (MP) geschalteten Wicklungen (3,4,5) zur Kern- Vormagnetisierung alle drei Wicklungen (3,4,5) nacheinander an die zugehörige Strangspannung (U_{RS}, U_{ST}, U_{TR}) jeweils zwischen einer Phase (6,7,8) und dem Mittelpunktleiter (MP) geschaltet werden.
- 50
9. Vorrichtung zur Begrenzung des Einschaltstromstoßes einer induktivitätsbehafteten, mit einem magnetisierbaren Kern versehenen Drehstromlast, insbesondere eines Drehstromtransformators, wobei die Vorrichtung mit einer Phasenanschnittsteuerung verbundene, als Wechselstromschalter ausgebildete Stellglieder in den Phasenzweigen aufweist, insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß in wenigstens zwei Phasenzweigen (6;7;8) Stellglieder (9;10;11) vorgesehen sind und daß diese Stellglieder (9;10;11) sowie die Phasenanschnittsteuerung mit einer Ablaufsteuerung verbunden sind, zum Ein-und Ausschalten der Stellglieder (9;10;11) während
- 55

AT 403 420 B

der Vormagnetisierung der Kernbereiche auf vorgebbare Werte sowie zum anschließenden, folgerichtigen Einschalten der Stellglieder (9;10;11) und zum Ansteuern der Phasenanschnittsteuerung im Sinne einer Veränderung des Phasenanschnittwinkels von etwa 135° bis etwa 90° während der Vormagnetisierung zu kleineren Phasenanschnittwinkeln in der anschließenden Betriebsphase.

5

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Stellglieder (9;10;11) mechanische Kontakte sowie von diesen überbrückbare Halbleiterschalter aufweisen.

Hiezu 6 Blatt Zeichnungen

10

15

20

25

30

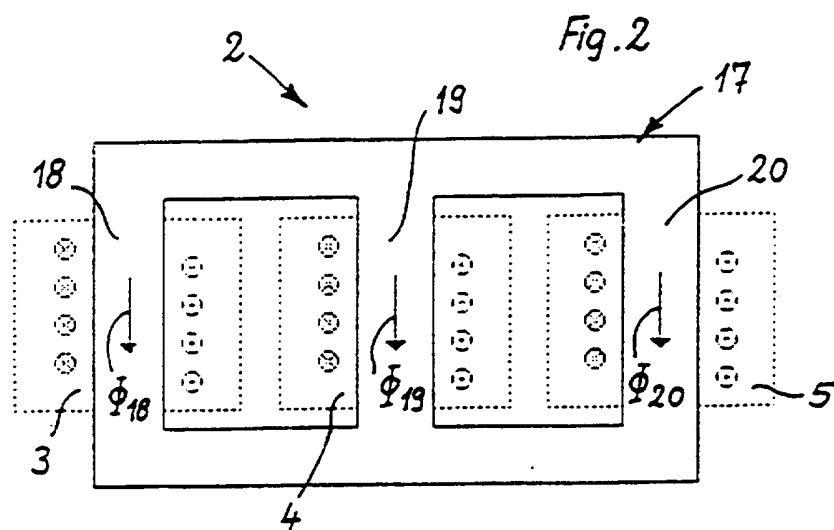
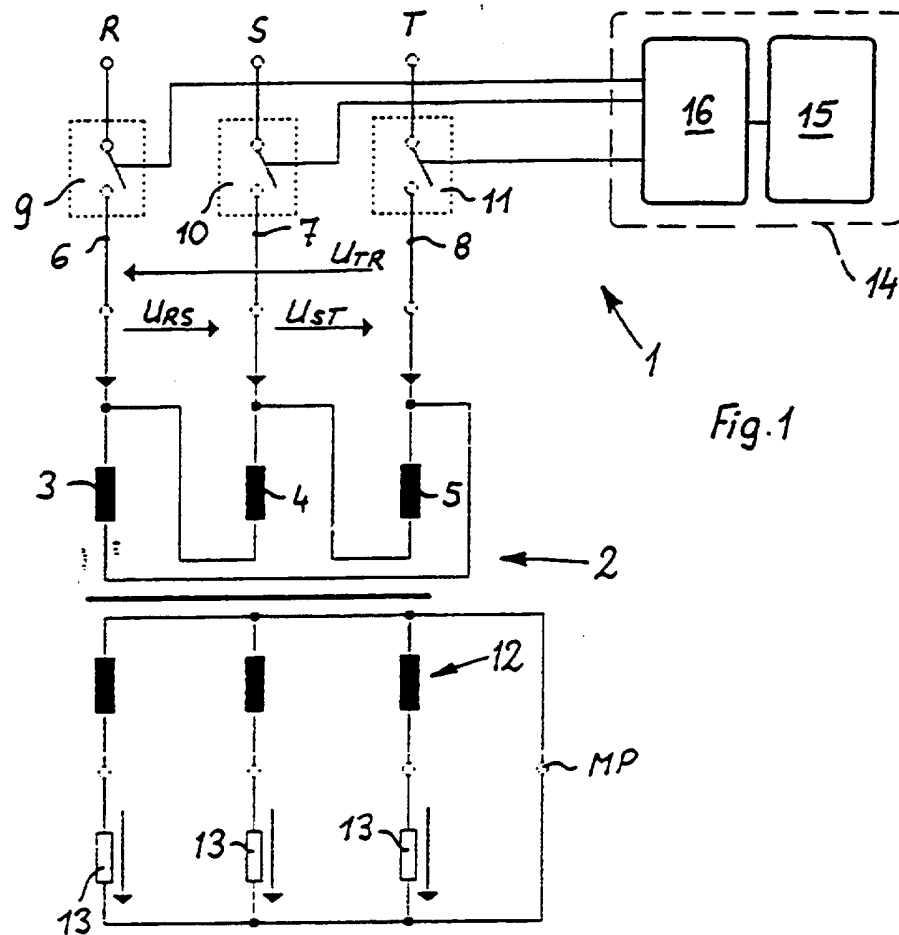
35

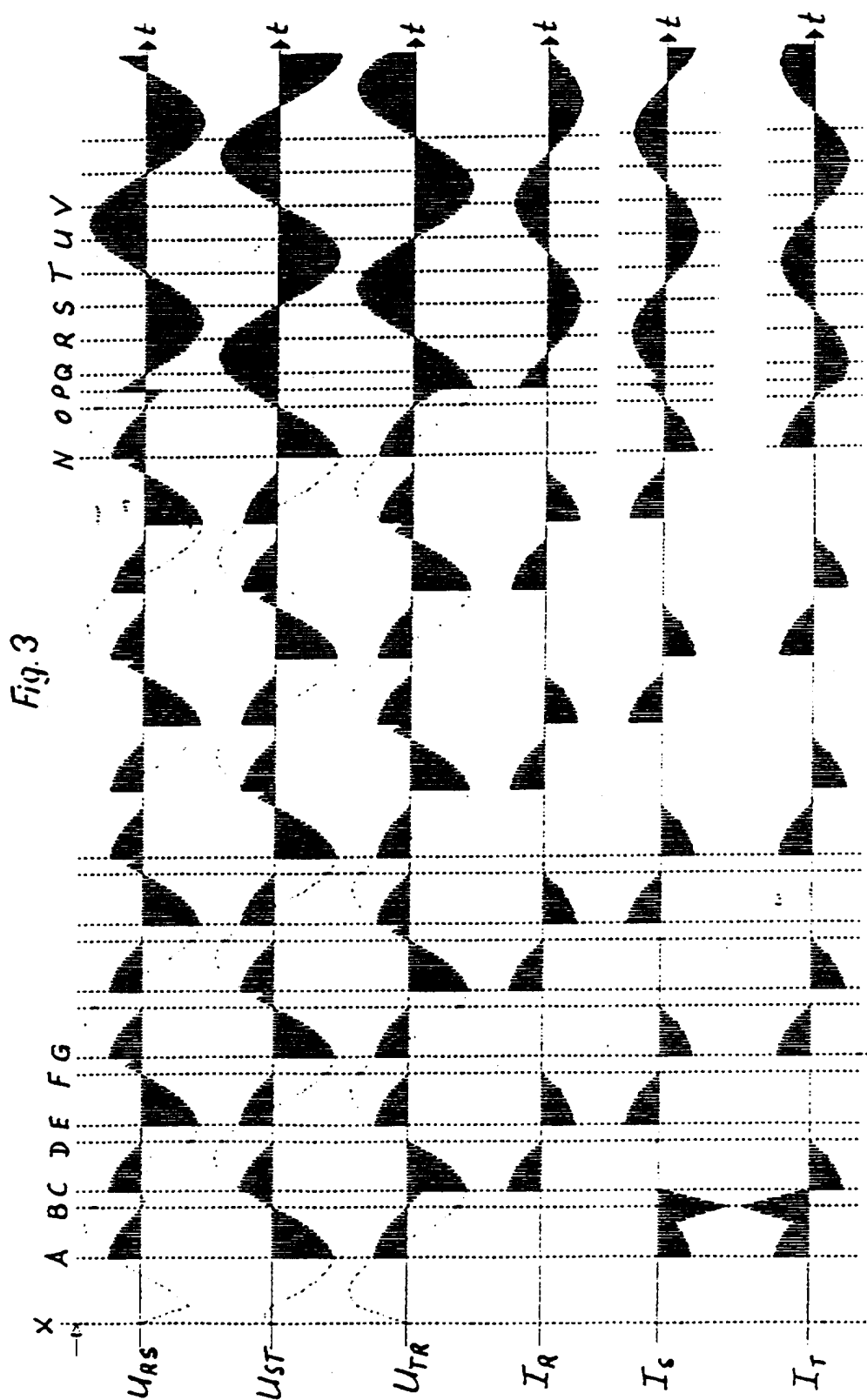
40

45

50

55





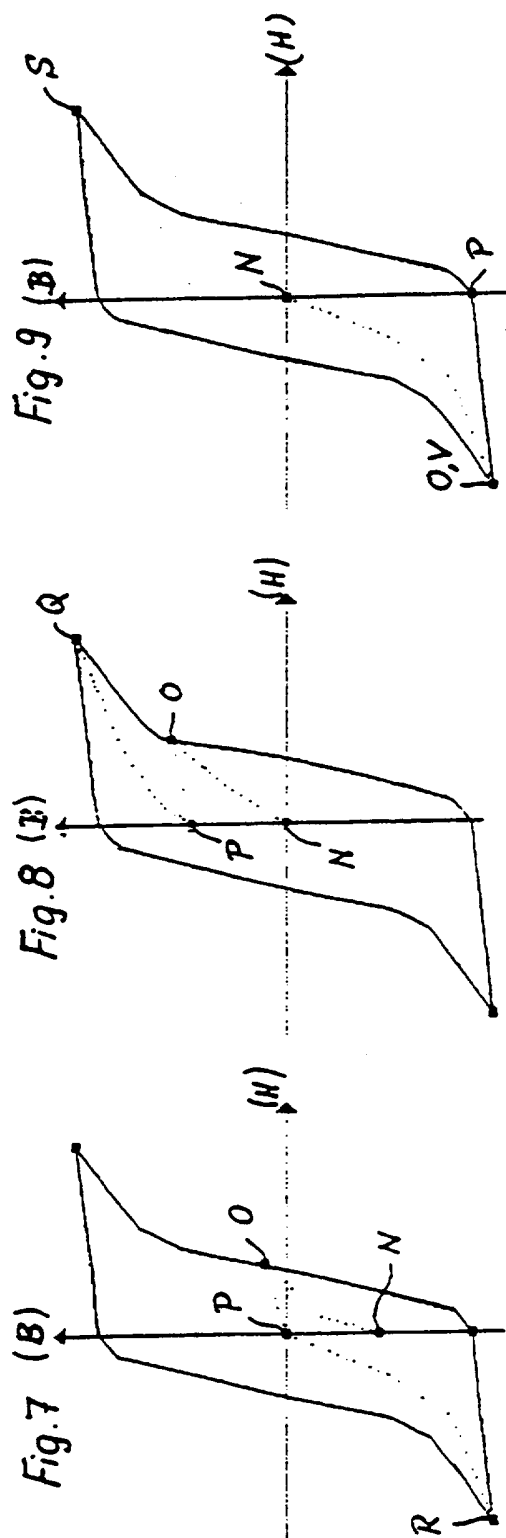
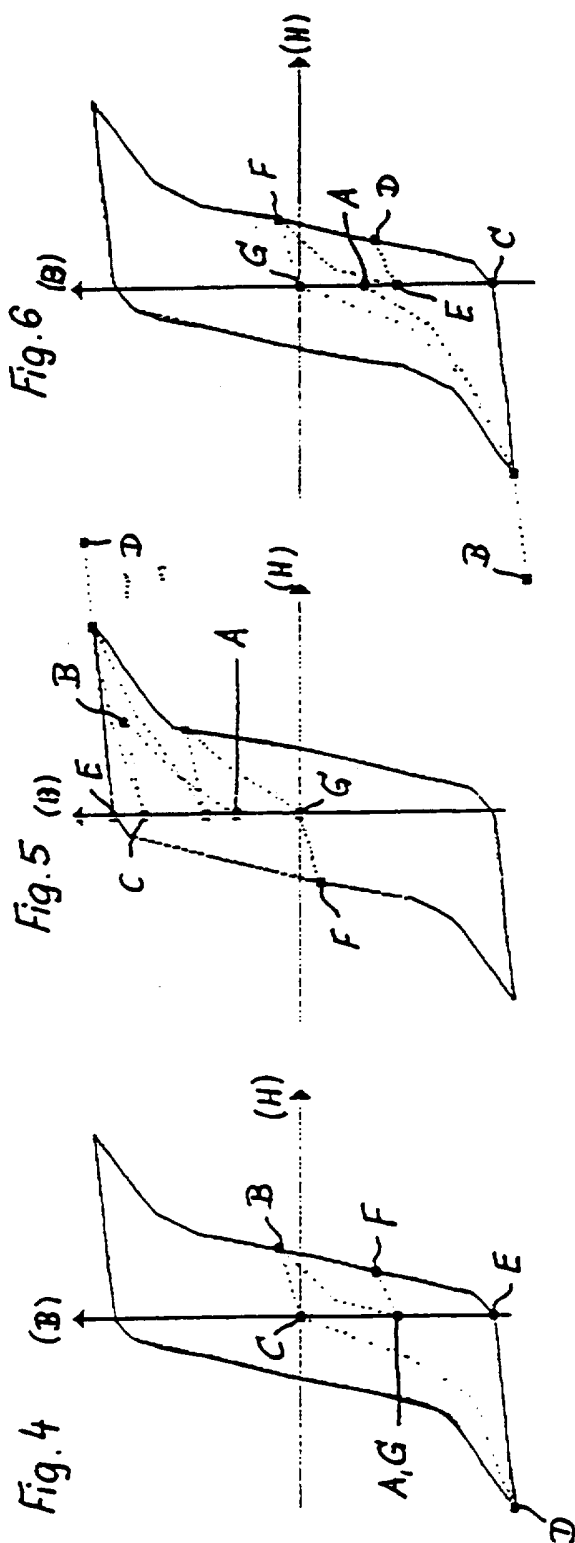


Fig. 10

