



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 704 267 B1

(51) Int. Cl.: G01R 15/18 (2006.01)

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-lichtensteinerischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTSCHRIFT**

(21) Anmeldenummer: 02164/10

(22) Anmeldedatum: 23.12.2010

(43) Anmeldung veröffentlicht: 29.06.2012

(24) Patent erteilt: 13.03.2015

(45) Patentschrift veröffentlicht: 13.03.2015

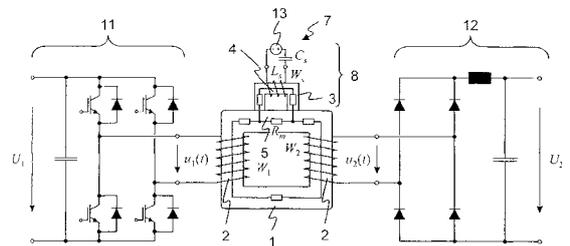
(73) Inhaber:
ETH Zürich ETH Transfer, HG E 47-49 Rämistrasse 101
8092 Zürich ETH-Zentrum (CH)

(72) Erfinder:
Johann Walter Kolar, 8044 Zürich (CH)
Jonas Mühelthaler, 8953 Dietikon (CH)
Gabriel Ignacio Ortiz, 8052 Zürich (CH)

(74) Vertreter:
Frei Patentanwaltsbüro AG, Postfach 1771
8032 Zürich (CH)

(54) **Vorrichtung zur Messung der Flussdichte im Magnetkreis von Mittelfrequenz-Hochleistungstransformatoren.**

(57) Ein induktives Element mit einer Messvorrichtung zum Bestimmen der magnetischen Flussdichte oder einer magnetischen Sättigung im induktiven Element weist einen Hauptkern (1) mit mindestens einer Hauptwicklung (2) zum Erzeugen eines Magnetfeldes im Hauptkern (1) auf. Dabei weist die Messvorrichtung einen vom Hauptkern (1) verschiedenen Messkern (3) mit einer Messwicklung (4) zum Erzeugen eines Magnetfeldes im Messkern (3) auf. Ein von der Hauptwicklung (2) erzeugter Hauptfluss und ein von der Messwicklung (4) erzeugter Messfluss überlagern sich in mindestens einem Teilbereich der beiden Kerne (1, 3). Die Messvorrichtung zur Messung der magnetischen Flussdichte im Hauptkern (1) weist eine Messeinheit (7) auf, welche dazu ausgebildet ist, die Messwicklung (4) zu speisen und Messsignale an der Messwicklung (4) zu erfassen und daraus einen Absolutwert der magnetischen Flussdichte des Hauptflusses zu bestimmen und/oder ein Signal zur Detektion einer Sättigung zu entnehmen.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Mess- und Steuerungstechnik für induktive Schaltungselemente wie Transformatoren, Drosseln. Sie bezieht sich auf ein induktives Element mit einer Messvorrichtung zum Bestimmen der magnetischen Flussdichte oder einer magnetischen Sättigung im induktiven Element, ein Messverfahren und eine Messvorrichtung gemäss dem Oberbegriff der entsprechenden unabhängigen Patentansprüche.

Stand der Technik

[0002] Die magnetische Aussteuerung des Magnetkernes eines Transformators erfolgt stationär idealerweise symmetrisch um den Ursprung der B-H-Ebene. Dies ist nur dann gegeben, wenn an keiner der den Magnetkern umschliessenden Wicklungen ein Gleichspannungsanteil anliegt. Real tritt jedoch, insbesondere bei der Einbindung von Transformatoren in leistungselektronische Konverter, i.A. ein geringer parasitärer Gleichanteil an einer mit eingepprägter Spannung betriebenen Wicklung auf. Dieser kann nur von parasitären ohmschen Widerständen der Wicklung bzw. des diese speisenden leistungselektronischen Converters aufgenommen werden und resultiert demgemäss in einem Gleichanteil des Primärstromes, welcher zu einer Vormagnetisierung des Magnetkreises bzw. zu einer unsymmetrischen magnetischen Aussteuerung führt. Nachteilige Folgen dieser Unsymmetrie können Sättigung des Magnetkreises und daraus resultierende hoher Stromspitzenwerte, unsymmetrische Beanspruchung und Überlastung von Schaltelementen, sowie höhere Kernverluste sein.

[0003] Das Auftreten eines Gleichanteiles z.B. der Primärspannung bzw. einer Unsymmetrie der innerhalb einer Taktperiode an die Primärwicklung gelegten positiven und negativen Spannungszeitflächen muss daher insbesondere bei Systemen hoher Leistung verhindert werden. Dazu kann eine direkte oder indirekte Messung der Flussdichte im Trafokern erfolgen und dann durch einen entsprechenden Eingriff in die Steuerung der die Wicklung speisenden Transistorvollbrückenschaltung das Spannungszeitflächengleichgewicht bzw. eine symmetrische magnetische Aussteuerung aktiv sichergestellt werden. Die aktuelle Flussdichte kann z.B. mittels eines, in einer Ausnehmung des Magnetkernes platzierten Fallelements oder mittels einer Feldplatte gemessen werden. Ein solcher Eingriff in den Magnetkreis ist jedoch vielfach nicht möglich, sodass indirekte Verfahren vorzuziehen sind.

[0004] F. Stögerer, J.W. Kolar, and U. Drofenik, «A Novel Concept for Transformer Volt-Second Balancing of a VIENNA Rectifier III Based on Direct Magnetizing Current Measurement», in Proc. of the IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, pp. 134–140, 2000, beschreibt ein derartiges Verfahren. Dabei geschieht die Messung des Magnetisierungsstroms aufgrund der Differenz des Transformatorprimär- und des mit dem Windungszahlverhältnis gewichteten Transformatorsekundärstromes. Nachteil dieses Konzeptes ist einerseits der konstruktive Aufwand und andererseits die ggf. resultierende Beeinträchtigung einer hohen Isolationsspannung von Primär- und Sekundärkreis.

[0005] W.M. Polivka, A. Cocconi, and S. Cuk, «Detection of Magnetic Saturation in Switching Converters», in Proc. of International PCI Conference, pp. 583–598, 1982 beschreibt ein weiteres Konzept, welches darauf beruht, dass durch eine Hilfswicklung ein orthogonal zur Nutzflussmagnetisierung des Transformators orientierter Hilfs-Gleichfluss eingestellt wird. Sobald der Transformator in Nutzflussrichtung sättigt, kann das Kernmaterial auch die Hilfs-Gleichflussdichte nicht mehr aufrechterhalten, entsprechend erfolgt eine Änderung der Gleichflussdichte, welche zu einer Spannungsinduktion bzw. zum Auftreten einer Spannung an der Hilfswicklung führt (aufgrund der Orthogonalität von Hilfs- und Nutzfluss wird ausserhalb der Sättigung durch den Nutzfluss keine Spannung in der Hilfswicklung induziert). Demgemäss kann die Spannungsinduktion als Indikator für Sättigung bzw. als Indikator für die Notwendigkeit eines Spannungszeitflächenkorrekturingriffs dienen. Dieses Verfahren benötigt aber eine zusätzliche Wicklung, die in den Transformator kern verbaut werden muss.

[0006] S. Klopper and J.A. Ferreira, «A Sensor for Balancing Flux in Converters with a High-Frequency Transformer Link», in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, pp. 774–779, May/June 1997, beschreibt ein Konzept, in welchem ein Einschnitt in den Transformator kern so angebracht wird, dass die Kernquerschnittfläche an dieser Stelle reduziert wird. Ein zusätzlicher magnetischer Pfad ist parallel zum eingeschnittenen Hauptpfad angebracht. Sobald der Transformator kern im Bereich des Einschnittes in die Sättigung kommt, wird der Fluss über den Alternativpfad ausweichen. Dies passiert, aufgrund des reduzierten Querschnittes, bevor die übrigen Kernabschnitte sättigen. In einer Wicklung um den Alternativpfad wird eine Spannung induziert, welche somit eine bevorstehende Transformator kernsättigung detektiert. Hauptnachteil dieses Verfahrens ist der konstruktive Aufwand (Modifikation am Hauptkern).

Darstellung der Erfindung

[0007] Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein induktives Element mit einer Messvorrichtung, eine Messvorrichtung und ein Messverfahren der eingangs genannten Art zu schaffen, welche eine Messung der Flussdichte im Magnetkreis des Transformators ohne konstruktiven Eingriff und mit möglichst geringem Aufwand erlaubt und ein Flussdichtesignal und/oder ein Signal zur Detektion einer Sättigung ausgibt, welches zur aktiven Symmetrierung der an die Trafoprimärwicklung gelegten Spannungszeitflächen herangezogen werden kann.

[0008] Diese Aufgabe lösen ein induktives Element mit einer Messvorrichtung, eine Messvorrichtung und ein Messverfahren mit den Merkmalen der entsprechenden unabhängigen Patentansprüche.

[0009] Das induktive Element mit einer Messvorrichtung zum Bestimmen der magnetischen Flussdichte oder einer magnetischen Sättigung im induktiven Element weist also einen Hauptkern mit mindestens einer Hauptwicklung zum Erzeugen eines Magnetfeldes im Hauptkern auf. Dabei weist die Messvorrichtung einen vom Hauptkern verschiedenen Messkern mit einer Messwicklung zum Erzeugen eines Magnetfeldes im Messkern auf. Ein von der Hauptwicklung erzeugter magnetischer Fluss, im Folgenden Hauptfluss genannt, und ein von der Messwicklung erzeugter magnetischer Fluss, im Folgenden Messfluss genannt, überlagern sich in mindestens einem Teilbereich des Hauptkernes und des Messkernes. Die Messvorrichtung zur Messung der magnetischen Flussdichte im Hauptkern weist eine Messeinheit auf, welche dazu ausgebildet ist, die Messwicklung zu speisen und Messsignale an der Messwicklung zu erfassen und daraus einen Absolutwert der magnetischen Flussdichte des Hauptflusses zu bestimmen und/oder ein Signal zu erzeugen, welches die Detektion einer Sättigung anzeigt.

[0010] Der Hauptkern ist typischerweise Kern eines Transformators und weist mindestens zwei Hauptwicklungen auf, zur Übertragung von Energie von einer Hauptwicklung an die andere. Alternativ ist der Hauptkern Teil einer Drossel.

[0011] Das Verfahren ermöglicht, mittels der Messvorrichtung Eigenschaften eines magnetischen Messkreises zu bestimmen, welche eine Aussage über den durch den Hauptkern definierten magnetischen Hauptkreis ermöglichen. Insbesondere wird dabei die Sättigung des magnetischen Materials in einem gemeinsamen Abschnitt von Hauptkreis und Messkreis oder im Messkreis alleine erfasst. Dabei kann die Sättigung nur in diesem gemeinsamen Abschnitt respektive im Messkreis alleine stattfinden, wobei die Messvorrichtung Eigenschaften oder Signale erfasst, die sich aufgrund der Sättigung ändern. Daraus wiederum kann ein Mass für die Flussdichte im nicht gesättigten Bereich des Hauptkreises bestimmt werden. Falls ein Gleichanteil des Flusses vorliegt, kann er durch eine Steuerung der Ströme via Spannungszeitflächenkorrektur durch das induktive Element reduziert werden.

[0012] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung bildet der Hauptkern einen magnetischen Hauptkreis, ist der Messkern an den Hauptkern angesetzt oder in einen Längsschlitz im Hauptkern eingesetzt und bildet der Messkern mit einem Abschnitt des Hauptkernes einen magnetischen Messkreis.

[0013] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist die Richtung von Hauptfluss und Messfluss im Abschnitt, der dem Hauptkreis und dem Messkreis gemeinsam ist, im Wesentlichen parallel oder antiparallel. Die Flüsse summieren sich also in diesem Abschnitt, und es kann mittels des Messflusses auf den Gesamtfluss im gemeinsamen Abschnitt geschlossen werden. Dies kann

- über eine Induktivitätsmessung an der Messvorrichtung geschehen,
- oder über ein Verfahren, in welchem der Messfluss in die Sättigung gebracht wird, diese Sättigung detektiert wird und daraus die Flussdichte des Hauptflusses bestimmt wird.

Die Induktivitätsbestimmung kann mit an sich bekannten Verfahren und Mitteln durchgeführt werden.

[0014] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist die Richtung von Hauptfluss und Messfluss im Abschnitt, der dem Hauptkreis und dem Messkreis gemeinsam ist, im Wesentlichen orthogonal. Über eine Induktivitätsmessung an der Messvorrichtung kann auf den Gesamtfluss im gemeinsamen Abschnitt geschlossen werden. Die Induktivitätsbestimmung kann mit an sich bekannten Verfahren und Mitteln durchgeführt werden.

[0015] In weiteren bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung ist die Richtung von Hauptfluss und Messfluss im Abschnitt, der dem Hauptkreis und dem Messkreis gemeinsam ist, im Wesentlichen orthogonal. Die beiden Flüsse sind, solange keine Sättigung auftritt, voneinander unabhängig. Sobald aber beispielsweise der Hauptfluss in den Bereich der Sättigung gelangt, tritt an der Messwicklung eine Spannung auf. Diese kann also zur Detektion der Sättigung verwendet werden. Die orthogonale Anordnung der Flüsse kann beispielsweise erreicht werden, indem wahlweise

- der Messkern an Ansatzflächen auf den Hauptkern aufgesetzt ist und dabei die Flussrichtung zwischen den Ansatzflächen des Messkernes senkrecht zur Hauptflussrichtung im Hauptkern verläuft;
- der Messkern einen geschlossenen magnetischen Kreis bildet und ein Abschnitt des Messkernes in einen Luftspalt des Hauptkernes angeordnet ist;
- der Messkern in einem Schlitz im Hauptkern eingesetzt ist, und die Flussrichtung zwischen Ansatzflächen des Messkernes im Schlitz senkrecht zur Hauptflussrichtung im Hauptkern verläuft.

[0016] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung überbrückt der Messkern einen Abschnitt erhöhten magnetischen Widerstands (z.B. einen Luftspalt) des Hauptkernes. Der Messkern bildet so einen magnetischen Pfad parallel zum Luftspalt. Ein Teil des Hauptflusses schliesst sich dadurch über den Messkern und kann mit an sich bekannten Mitteln gemessen werden.

[0017] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung bildet der Messkern einen geschlossenen magnetischen Kreis, ist der Messkern parallel zum Hauptkern angeordnet, und verlaufen die Hauptwicklungen sowohl um den Hauptkern als auch um den Messkern. Die beiden Flüsse Hauptfluss und Messfluss überlagern sich also vollständig im Messkern, währenddem im Hauptkern nur der Hauptfluss verläuft. Aus dem im Messkern gemessenen Fluss und insbesondere durch Detektion von Sättigungseffekten im Messkern kann der Fluss respektive die Flussdichte im Hauptkern bestimmt werden.

[0018] Die folgenden Messverfahren sind mit den bisher beschriebenen Messanordnungen, d.h. den verschiedenen Anordnungen des Messkernes relativ zum Hauptkern, kombinierbar, wobei bestimmte Kombinationen besonders vorteilhaft sind. Entsprechend den verschiedenen Messverfahren ist wahlweise

- eine Messeinheit dazu ausgebildet, einen für die Induktivität der Messwicklung repräsentativen Wert zu bestimmen und auszugeben, und/oder, falls dieser Wert einen Schwellwert überschreitet oder unterschreitet, ein Signal auszugeben, welches eine Sättigung des Hauptkernes anzeigt;
- eine Messeinheit dazu ausgebildet, mittels der Messwicklung einen Gleichfluss zu erzeugen, welcher orthogonal zum Hauptfluss verläuft, und eine Spannung an der Messwicklung als Indikator für die Sättigung durch den Hauptfluss zu messen;
- eine Messeinheit dazu ausgebildet, den Messkern periodisch symmetrisch um den Ursprung der B-H-Ebene zu magnetisieren und anhand des Stromes, der für diese Magnetisierung erforderlich ist, ein Mass für die Flussdichte des Hauptflusses zu bestimmen. Dazu kann dieses Mass beispielsweise anhand eines Gleichanteils oder einer Frequenz dieses Stromes bestimmt werden.

[0019] Die Messvorrichtung für sich alleine betrachtet weist einen vom Hauptkern verschiedenen Messkern mit einer Messwicklung zum Erzeugen eines Magnetfeldes im Messkern auf, wobei

- wenn die Messvorrichtung am induktiven Element angebracht ist, im Hauptkern der von der Hauptwicklung erzeugte Hauptfluss und der von der Messwicklung erzeugte Messfluss sich in mindestens einem Teilbereich des Hauptkernes und/oder des Messkernes überlagern, und
- die Messvorrichtung zur Messung der magnetischen Flussdichte im Hauptkern eine Messeinheit aufweist, welche dazu ausgebildet ist, die Messwicklung zu speisen und Messsignale an der Messwicklung zu erfassen und daraus einen Absolutwert der magnetischen Flussdichte des Hauptflusses zu bestimmen und/oder ein Signal zu erzeugen, welches die Detektion einer Sättigung anzeigt.

[0020] In der Praxis ist der Zustand, in welchem das Material eines ferromagnetischen Kernes als gesättigt betrachtet wird, nicht scharf definiert. Es wird daher hier davon ausgegangen, dass das Material beim Überschreiten respektive Unterschreiten eines bestimmten Masses als gesättigt betrachtet wird. Beispielsweise ist dies beim Unterschreiten eines bestimmten Wertes für die differentielle Permeabilität $\mu = dB/dH$ des Materials. Das Mass kann beispielsweise standardmässig in Abhängigkeit des Kernmaterials oder anwendungsabhängig durch einen Benutzer vorgegeben sein,

[0021] Weitere bevorzugte Ausführungsformen gehen aus den abhängigen Patentansprüchen hervor. Dabei sind Merkmale der Verfahrensansprüche sinngemäss mit den Vorrichtungsansprüchen kombinierbar und umgekehrt.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0022] Im Folgenden wird der Erfindungsgegenstand anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen, welche in den beiliegenden Zeichnungen dargestellt sind, näher erläutert. Es zeigen jeweils schematisch:

- Fig. 1a eine erste Ausführungsform eines induktiven Elementes mit einer Messvorrichtung, zusammen mit externen Beschaltungen, welche mit dem induktiven Element als Transformator einen Gleichspannungswandler bilden;
- Fig. 1b–c eine B-H-Kennlinie des Kernmaterials und die an der Messvorrichtung sichtbare Induktivität in Abhängigkeit der magnetischen Aussteuerung;
- Fig. 2a–c verschiedene Möglichkeiten zur Anordnung eines Messkernes am Hauptkern;
- Fig. 3a–b parallele und orthogonale Anordnungen eines Messkernes am Hauptkern;
- Fig. 4 die Anordnung eines Messkernes in einem Schlitz im Hauptkern;
- Fig. 5 einen Messkern, welcher einen Luftspalt im Hauptkern überbrückt, und eine dafür geeignete Messeinrichtung;
- Fig. 6 einen durchgehenden (d.h. einen geschlossenen magnetischen Kreis bildenden) Messkern, welcher in einem Luftspalt des Hauptkernes angeordnet ist;
- Fig. 7 einen durchgehenden Messkern, welcher parallel zum Hauptkern verläuft; und
- Fig. 8 einen Transformator mit Messeinrichtung und Wechselrichteransteuerung zur Flussregelung.

[0023] Die in den Zeichnungen verwendeten Bezugszeichen und deren Bedeutung sind in der Bezugszeichenliste zusammengefasst aufgelistet. Grundsätzlich sind in den Figuren gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

Wege zur Ausführung der Erfindung

[0024] Fig. 1a zeigt eine erste Ausführungsform eines induktiven Elementes mit einer Messvorrichtung. Das induktive Element ist durch einen Transformator mit einem Hauptkern 1 mit Hauptwicklungen 2 mit Windungszahlen W_1 , W_2 gebildet. Ein Wechselrichter 11 speist die eine Hauptwicklung 2, ein Gleichrichter 12 wird durch die zweite Hauptwicklung 2 gespeist. Zusammen bilden diese externen Beschaltungen mit dem Transformator einen Gleichspannungswandler. Die erfindungsgemässen Messvorrichtungen und -verfahren für die Flussdichte im Hauptkern 1 sind natürlich auch auf andere induktive Elemente wie Drosseln und auf Elemente mit anderer externer Beschaltung anwendbar, beispielsweise mehrphasige Transformatoren und beidseitig mit aktiven Schaltern versehene Wandler. Am Hauptkern 1 angesetzt ist ein Messkern 3 mit einer Sensorwicklung oder Messwicklung 4. Die Messwicklung 4 mit Windungszahl W_s ist durch eine Spannungsquelle 13 einer Messeinheit 7 gespeist, vorzugsweise über einen Serienkondensator mit Kapazität C_s . Die Messeinheit 7 ist – je nach Ausführungsvariante – zur Speisung der Messwicklung 4 und zur Erfassung und Verarbeitung von Spannungen und Strömen an der Messwicklung 4 ausgebildet. Eine Messeinrichtung 8 zur Messung der Flussdichte im Hauptkern 1 weist die Messeinheit 7 und den Messkern 3 mit Messwicklung 4 auf.

[0025] In den Kernen 1, 3 sind schematisch die magnetischen Kreise durch Hauptkern 1 und Messkern 3 dargestellt: Ein Hauptkreis führt durch den Hauptkern 1 und ein Messkreis durch den Messkern 3. Die beiden Kreise überlagern sich in einem Abschnitt des Hauptkernes 1 mit Reluktanz R_m . Die Anordnung der Sensor-Vorrichtung ist ohne Eingriff in den Flusspfad des Transformators möglich.

[0026] Durch den Trafo-Hauptfluss wird der Trafo-Magnetkern respektive Hauptkern 1 angesteuert und aufgrund der nicht-linearen Charakteristik des Magnetmaterials die Reluktanz R_m beeinflusst. Die an den Klemmen der Messwicklung 4 zu messende Induktivität L_s ist damit abhängig von der Trafo-Hauptflussdichte und kann als Mass für den Momentanwert der Flussdichte, d.h. für den im Induktivitäts-Messintervall vorliegenden Wert, herangezogen werden. Im Detail ist die Reluktanz R_m umgekehrt proportional zur Steigung der B-H-Charakteristik des Kernmaterials des Hauptkernes 1 im jeweiligen Arbeitspunkt (vgl. Fig. 1b) und nimmt aufgrund der nicht-linearen Charakteristik des Magnetmaterials mit zunehmender magnetischer Aussteuerung ab (vgl. Fig. 1c). Die Induktivität im jeweiligen Arbeitspunkt ist umgekehrt proportional zur Reluktanz R_m . Aufgrund der gemessenen Induktivität kann damit direkt auf die Reluktanz geschlossen werden und weiter, mittels bekannter B-H-Charakteristik, auf den aktuellen Wert der Flussdichte. Dazu muss die B-H-Charakteristik des Materials vorgängig bekannt sein.

[0027] Die Induktivität kann in bekannter Weise beispielsweise direkt, z.B. über eine Strom-Spannungsmessung, oder indirekt über den Anstieg des Stromes in der Messwicklung 4 bei Anlegen einer definierten Testspannung erfasst werden. Anstelle einer Induktivitäts- oder Stromanstiegsmessung ist die Bildung eines LC-Resonanzkreises möglich, in welchem die Sensorinduktivität L_s die Resonanzkreisinduktivität bildet. Eine Änderung des Trafo-Hauptflusses führt so zu einer Änderung der Resonanzfrequenz, welche digital einfach zu detektieren ist. Die Bestimmung der Flussdichte anhand der Induktivität der Messwicklung 4 wird im Folgenden als erstes Messverfahren bezeichnet.

[0028] Das beschriebene Verfahren kann zur kontinuierlichen Messung der Trafo-Hauptflussdichte innerhalb einer Taktperiode der Transistor-Vollbrückenschaltung des Wechselrichters 11 oder nur zur Sättigungsdetektion herangezogen werden. In beiden Fällen erfolgt vorteilhaft eine Synchronisation der periodischen Induktivitätsmessung mit der Taktung des speisenden Wechselrichters 11. Soll nur ein qualitatives Signal, welches die Sättigung anzeigt, erfasst werden, kann die Berechnung der Induktivität jeweils unterbleiben, und es ist z.B. nur das Überschreiten eines Grenzwertes des Anstieges eines Sensorstromes in der Messwicklung 4 nach Anlegen einer Testspannung oder das Überschreiten eines Grenzwertes des Sensorstromes am Ende eines Testspannungsintervalls zu überwachen.

[0029] Soll nur ein Gleichanteil des Trafo-Hauptflusses im Hauptkern 1 erfasst werden, ist eine Induktivitätsmessung auch im Mittel über mehrere Taktperioden der Transistor-Vollbrückenschaltung möglich, wobei das Messintervall vorteilhaft über eine ganze Zahl von Taktperioden gewählt ist.

[0030] Das erste Messverfahren, mittels Induktivitätsmessung auf den aktuellen Magnetisierungszustand zu schliessen, hat den Nachteil, dass keine Information über die Aussteuerungspolarität vorliegt. Um diese Information zu erhalten, kann die Spannung an einer Transformatorwicklung 2 integriert werden. Da ein Integrator eingesetzt wird, können nur dynamische Flussänderungen detektiert werden. Dies ist für eine Aussage bezüglich Polarität ausreichend, jedoch nicht für eine Aussage über eine absolute Flussinformation.

[0031] Fig. 2a–c zeigen verschiedene Möglichkeiten zur Anordnung eines Messkernes 3 am Hauptkern. Die Messwicklungen 4 um den Messkern 3 sind der Einfachheit halber nicht eingezeichnet. Der genaue Ort der Positionierung des Messkernes 3 am Hauptkern 1 ist für die Funktionalität im Wesentlichen nicht entscheidend. Vorteilhaft ist jedoch eine Platzierung derart, dass sich der Messfluss über einen magnetisch hoch angesteuerten Bereich des Hauptkernes 1 schliesst. Für den in Fig. 2a–c schematisch gezeigten Transformator ist dies z.B. die Innenseite des Wicklungsfensters und dort insbesondere nahe des Knicks vom vertikalen zum horizontalen Kernteil (Fig. 2b). In jedem Fall ist auf einen möglichst geringen Luftspalt zwischen Messkern 3 und Hauptkern 1 zu achten. Hinsichtlich der Form des Messkernes 3 gilt, dass neben der gezeigten C-Form auch jede beliebige andere Form, also z.B. ein, den oben erwähnten Knick diagonal mit minimalem Luftspalt überbrückender Stab mit schrägen, auf dem Hauptkern 1 aufliegenden Enden möglich ist.

[0032] Fig. 3a–b zeigt parallele und orthogonale Anordnungen eines Messkernes 3 am Hauptkern 1. Die Induktivitätsänderung beim oben beschriebenen Messverfahren ist ausgeprägter, wenn die Haupt- und Mess-Feldlinien gleichgerichtet (parallel oder antiparallel) verlaufen, wie dies bei einer Orientierung nach Fig. 3a der Fall ist. Um eine Spannungsinduktion durch den Hauptfluss in der Messwicklung 4 zu vermeiden, ist eine Orientierung nach Fig. 3b von Vorteil, da dann die Haupt- und Sensorfeldlinien senkrecht zueinander stehen und keine solche Spannungsinduktion erfolgt.

[0033] Das eingangs vorgestellte Messverfahren gemäss Polivka et al., im Folgenden als zweites Messverfahren bezeichnet, kann unter Verwendung der hier vorgestellten Messeinrichtungen 8 realisiert werden. Es beruht darauf, dass durch den Messkern 3 ein orthogonal zur Nutzflussmagnetisierung des Hauptkernes 1 orientierter Hilfs-Gleichfluss eingestellt wird. Die Messeinrichtung 8 stellt dabei vorzugsweise einen orthogonal zur Hauptflussrichtung orientierten Gleichfluss als Messfluss ein. Sobald der Hauptkern 1 in Hauptflussrichtung sättigt, kann das Kernmaterial auch den Mess-Gleichfluss nicht mehr aufrechterhalten, entsprechend erfolgt eine Änderung der Messflussdichte, was zu einer Spannungsinduktion bzw. zum Auftreten einer Spannung an der Messwicklung 4 führt. Aufgrund der Orthogonalität von Mess- und Hauptfluss wird ausserhalb der Sättigung durch den Hauptfluss keine Spannung in der Messwicklung 4 induziert. Demgemäss kann die Spannungsinduktion in der Messwicklung 4 als Indikator für Sättigung bzw. als Indikator für die Notwendigkeit eines Spannungszeitflächenkorrekturereingriffs dienen.

[0034] Fig. 4 zeigt die Anordnung des Messkernes 3 in einem Schlitz im Hauptkern 1. Um im Messkern 3 eine durch den Hauptfluss bewirkte Vormagnetisierung hervorzurufen, ist im Hauptkern 1 ein Längsschlitz 9, d.h. eine sich vorzugsweise in Richtung der Hauptflussdichte erstreckende längliche Ausnehmung eingebracht. Darin ist ein stabförmiger Messkern 3 mit Messwicklung 4 angeordnet. Vorzugsweise ist der Messkern 3 sehr dünn ausgeführt, um Wirbelstromeffekte zu minimieren. Die Dicke des Messkerns ist jedoch grundsätzlich nicht entscheidend für die Funktionalität. Die Vormagnetisierung und damit auch die Hauptflussdichte können mit einem der in der verschiedenen in dieser Anmeldung beschriebenen Verfahren bestimmt werden.

[0035] Fig. 5 zeigt einen Messkern 3, welcher einen Luftspalt im Hauptkern 1 überbrückt, und eine dafür geeignete Messeinrichtung. Es findet eine Flussmessung parallel zur Stosstelle der Trafo-Kernhälften statt.

[0036] Durch die geringe Reluktanz im Messkern 3 relativ zum Luftspalt 6 wird sich ein Teil des Hauptflusses über den Messkern 3 schliessen. Dieser Fluss kann mit einem der von DC-Stromwandlern bekannten, auf der nichtlinearen B-H-Charakteristik des Sensor-Magnetkreises beruhenden Messverfahren erfasst werden. Anstelle eines Luftspaltes könnte der Messkern 3 aus einem Material gefertigt werden, welches magnetisch besser leitet als das Material des Hauptkerns 1. Damit würde sich ebenfalls ein Teil des Hauptflusses über den Messkern 3 schliessen.

[0037] Als Beispiel dafür wird im Folgenden anhand der Fig. 5 ein drittes Messverfahren erläutert: es wird an die Messwicklung 4 durch einen Verstärker 16 eine rechteckförmige Wechselfspannung gelegt, wobei deren Polaritätumschaltung jeweils durch einen Komparator 15 mit Hysterese von einem mit einem Hochpass 14 herausgefilterten Anteil des Ausgangsstroms des Verstärkers 16 abgeleitet wird. Der Sensor-Magnetkreis wird dadurch symmetrisch um den Ursprung der B-H-Ebene magnetisiert, indem bei auftretender Sättigung, d.h. rascher Stromänderung über den Hochpass, jeweils eine Polaritätumschaltung ausgelöst wird. Ein niederfrequenter, durch einen Tiefpass 17 gefilterter Gleichanteil des Ausgangsstroms des Verstärkers 16 kompensiert die Vormagnetisierung des Sensor-Magnetkreises durch den Trafo-Hauptfluss und ist somit ein Mass für die Flussdichte im Trafo-Magnetkreis. Dieses Messverfahren und die entsprechende Schaltung sind beschrieben in «Low cost DC and AC current transducer with isolation and good linearity», A. Gyri and T.M. Undeland et al., PCI March 1982 Proceedings, welche hiermit durch Verweis in ihrer Gesamtheit aufgenommen wird. Die Frequenz der Stromänderung in der Messwicklung 4 beträgt zweckmässigerweise ein Mehrfaches, beispielsweise mindestens das Zehnfache der Frequenz der Änderung zu messenden Flusses.

[0038] Fig. 6 zeigt einen durchgehenden (d.h. einen geschlossenen magnetischen Kreis bildenden) Messkern 3, welcher in einem Luftspalt 6 des Hauptkernes angeordnet ist. Der Messkern 3 ist beispielsweise ein blechförmiger geschlossener magnetischer Kreis, welcher zumindest zum Teil in den Luftspalt 6 zwischen die Kernhälften des Hauptkernes 1 eingeschoben ist. Es ist eine geringe Blechstärke zu wählen, um Wirbelströme zu vermeiden. Die Magnetisierung des Messkernes 3 durch den Messfluss ist dann orthogonal zum Hauptfluss durch den Messkern 3. Als mögliches Messverfahren kann direkt das erste Messverfahren oder das zweite Messverfahren eingesetzt werden. Aufgrund der Orthogonalität der Flüsse kann das dritte Verfahren nicht angewendet werden (es gibt keinen zu kompensierenden Fluss in der Messflussrichtung), allerdings kann eine Abwandlung des dritten Messverfahrens implementiert werden: Je nach Stärke des Hauptflusses, welcher orthogonal zum Messfluss bzw. Messkerns steht, ändert sich die B-H-Charakteristik des Messkerns. Je stärker der Hauptfluss, desto flacher verläuft die B-H-Kurve des Messkerns (je flacher die B-H-Kurve ist, desto höher ist das Magnetfeld H bei gleichem Fluss B). Wenn nun die B-H-Ebene des Messkerns jeweils von einem positiven H zum entsprechend negativen H mit gleichem Betrag durchlaufen wird (ähnlich wie im dritten Messverfahren), und die Änderungsgeschwindigkeit von B konstant gehalten wird (d.h. die angelegte Spannung an der Messwicklung 4 ist konstant), so ändert sich die sich einstellende Frequenz bei unterschiedlicher B-H-Charakteristik: je höher die Frequenz ist, desto grösser ist der Betrag des orthogonalen Hauptflussfeldes.

[0039] Fig. 7 zeigt einen durchgehenden Messkern 3, vorzugsweise aus dünnem Blech, welcher parallel zum Hauptkern 1 verläuft und gleich wie der Hauptkern 1 von der respektive den Hauptwicklungen 2 umschlossen ist. Die Messung der durch den Hauptfluss im Messkern 3 bewirkten Magnetisierung erfolgt dann gemäss einem der drei vorgestellten Verfahren.

[0040] Fig. 8 zeigt einen Transformator mit Messeinrichtung und Wechselrichteransteuerung zur Flussregelung. Mittels einer der in der vorliegenden Anmeldung vorgestellten Varianten von Messeinrichtungen 8 und Messverfahren wird die Trafo-Hauptflussdichte detektiert und bei allfälliger Abweichung von einer symmetrischen magnetischen Aussteuerung des Magnetkerns mittels einer Wechselrichteransteuerung 18 in bekannter Weise durch Flussregelung bzw. Spannungszeitflächenkorrektur die Abweichung kompensiert respektive ausgeglet.

[0041] Gemäss einer weiteren Ausführungsform der Erfindung wird mit der Messung der Flussdichte gemäss einem der beschriebenen Verfahren nur ein niederfrequenter Anteil der Hauptflussdichte gemessen, beispielsweise als Mittelwert über mehrere Taktperioden des Wechselrichters 11. Der hochfrequente Anteil der Hauptflussdichte wird durch offene Integration anhand der Spannung an der Hauptwicklung 2 (respektive der Hauptwicklungen 2) bestimmt. Diese Spannung ist beispielsweise entweder direkt der Wechselrichteransteuerung 18 bekannt, welche die Spannungen auf die Hauptwicklung 2 schaltet, oder wird über eine Hilfswicklung am Trafo-Magnetkern gemessen.

[0042] Grundsätzlich lässt sich jedes der beschriebenen Messverfahren auf die verschiedenen Ausführungsformen von Messkernen 3 mit Messwicklungen 4, und deren Anordnung am Hauptkern 1 anwenden. Besonders geeignet und vorteilhaft sind jedoch die Kombinationen

- des ersten Messverfahrens mit den Anordnungen der Fig. 1–4, 6, 7.
- des zweiten Messverfahrens mit den Anordnungen der Fig. 1–4 mit Messfluss orthogonal zum Hauptfluss, sowie der Fig. 6.
- des dritten Messverfahrens mit den Anordnungen der Fig. 4, 5 und 7.

[0043] In den Ausführungsformen der Fig. 1–3 überlagern sich der Hauptfluss und der Messfluss im Wesentlichen im Hauptkern.

[0044] In den Ausführungsformen der Fig. 4, 5, 6, 7 überlagern sich der Hauptfluss und der Messfluss im Wesentlichen im Messkern.

Bezugszeichenliste

[0045]

- 1 Hauptkern
- 2 Hauptwicklung
- 3 Messkern
- 4 Messwicklung
- 5 Überlagerungsbereich
- 6 Luftspalt
- 7 Messeinheit
- 8 Messeinrichtung
- 9 Längsschlitz
- 11 Wechselrichter
- 12 Gleichrichter
- 13 Spannungsquelle
- 14 Hochpass
- 15 Komparator
- 16 Verstärker
- 17 Tiefpass
- 18 Wechselrichteransteuerung

Patentansprüche

1. Induktives Element mit einer Messvorrichtung zum Bestimmen der magnetischen Flussdichte oder einer magnetischen Sättigung im induktiven Element, wobei das induktive Element: einen Hauptkern (1) mit mindestens einer Hauptwicklung (2) zum Erzeugen eines Magnetfeldes im Hauptkern (1) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass
 - die Messvorrichtung einen vom Hauptkern (1) verschiedenen Messkern (3) mit einer Messwicklung (4) zum Erzeugen eines Magnetfeldes im Messkern (3) aufweist, und
 - ein von der Hauptwicklung (2) erzeugter magnetischer Fluss, im Folgenden Hauptfluss genannt, und ein von der Messwicklung (4) erzeugter magnetischer Fluss, im Folgenden Messfluss genannt, sich in mindestens einem Teilbereich des Hauptkernes (1) und/oder des Messkernes (3) überlagern, und
 - die Messvorrichtung zur Messung der magnetischen Flussdichte im Hauptkern (1) eine Messeinheit (7) aufweist, welche dazu ausgebildet ist, die Messwicklung (4) zu speisen und Messsignale an der Messwicklung (4) zu erfassen und daraus einen Absolutwert der magnetischen Flussdichte des Hauptflusses zu bestimmen und/oder ein Signal zur Detektion einer Sättigung zu entnehmen.
2. Induktives Element mit Messvorrichtung gemäss Anspruch 1, wobei der Hauptkern (1) einen magnetischen Hauptkreis bildet, der Messkern (3) an den Hauptkern (1) angesetzt ist und mit einem Abschnitt des Hauptkernes (1) einen magnetischen Messkreis bildet.
3. Induktives Element mit Messvorrichtung gemäss Anspruch 1 oder 2, wobei die Richtung von Hauptfluss und Messfluss im Abschnitt, der dem Hauptkreis und dem Messkreis gemeinsam ist, im Wesentlichen parallel oder antiparallel ist.
4. Induktives Element mit Messvorrichtung gemäss Anspruch 1 oder 2, wobei die Richtung von Hauptfluss und Messfluss im Abschnitt, der dem Hauptkreis und dem Messkreis gemeinsam ist, im Wesentlichen orthogonal ist.
5. Induktives Element mit Messvorrichtung gemäss einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei der Messkern (3) einen Abschnitt erhöhten magnetischen Widerstands, insbesondere einen Luftspalt (6), des Hauptkernes (1) überbrückt.
6. Induktives Element mit Messvorrichtung gemäss Anspruch 1 oder 4, wobei der Messkern (3) einen geschlossenen magnetischen Kreis bildet und ein Abschnitt des Messkernes (3) in einem Luftspalt (6) des Hauptkernes (1) angeordnet ist.
7. Induktives Element mit Messvorrichtung gemäss Anspruch 1 oder 3, wobei der Messkern (3) einen geschlossenen magnetischen Kreis bildet, der Messkern (3) parallel zum Hauptkern (1) angeordnet ist, und die Hauptwicklungen (2) sowohl um den Hauptkern (1) als auch um den Messkern (3) verlaufen.
8. Induktives Element mit Messvorrichtung gemäss einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei der Messkern (3) in einem Längsschlitz (9) im Hauptkern (1) angeordnet ist.
9. Induktives Element mit Messvorrichtung gemäss einem der Ansprüche 1 bis 8, in welchem die Messeinheit (7) dazu ausgebildet ist, einen für die Induktivität der Messwicklung (4) repräsentativen Wert zu bestimmen und auszugeben, und/oder, falls dieser Wert einen Schwellwert überschreitet oder unterschreitet, ein Signal auszugeben, welches eine Sättigung des Hauptkernes (1) anzeigt.
10. Induktives Element mit Messvorrichtung gemäss einem der Ansprüche 1, 2, 4, 6 oder 8, in welchem die Messeinheit (7) dazu ausgebildet ist, mittels der Messwicklung (4) einen Gleichfluss zu erzeugen, welcher orthogonal zum Hauptfluss verläuft, und eine Spannung an der Messwicklung (4) als Indikator für die Sättigung durch den Hauptfluss zu messen.
11. Induktives Element mit Messvorrichtung gemäss einem der Ansprüche 1 bis 3 oder 5 bis 8, in welchem die Messeinheit (7) dazu ausgebildet ist, den Messkern (3) periodisch symmetrisch um den Ursprung der B-H-Ebene zu magnetisieren und anhand des Stromes, der für diese Magnetisierung erforderlich ist, ein Mass für die Flussdichte des Hauptflusses zu bestimmen.
12. Messvorrichtung zum Bestimmen der magnetischen Flussdichte oder einer magnetischen Sättigung in einem induktiven Element, wobei das induktive Element einen Hauptkern (1) mit mindestens einer Hauptwicklung (2) zum Erzeugen eines Magnetfeldes im Hauptkern (1) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass
 - die Messvorrichtung einen vom Hauptkern (1) verschiedenen Messkern (3) mit einer Messwicklung (4) zum Erzeugen eines Magnetfeldes im Messkern (3) aufweist, und
 - wenn die Messvorrichtung am induktiven Element angebracht ist, im Hauptkern (1) ein von der Hauptwicklung (2) erzeugter magnetischer Fluss, im Folgenden Hauptfluss genannt, und ein von der Messwicklung (4) erzeugter magnetischer Fluss, im Folgenden Messfluss genannt, sich in mindestens einem Teilbereich des Hauptkernes (1) und/oder des Messkernes (3) überlagern, und
 - die Messvorrichtung zur Messung der magnetischen Flussdichte im Hauptkern (1) eine Messeinheit (7) aufweist, welche dazu ausgebildet ist, die Messwicklung (4) zu speisen und Messsignale an der Messwicklung (4) zu erfassen und daraus einen Absolutwert der magnetischen Flussdichte des Hauptflusses zu bestimmen und/oder ein Signal zur Detektion einer Sättigung zu entnehmen.
13. Messverfahren unter Verwendung einer Messvorrichtung gemäss Anspruch 12 zum Bestimmen der magnetischen Flussdichte oder einer magnetischen Sättigung in einem induktiven Element, wobei das induktive Element einen Hauptkern (1) mit mindestens einer Hauptwicklung (2) zum Erzeugen eines Magnetfeldes und eines Hauptflusses

CH 704 267 B1

im Hauptkern (1) aufweist, und mittels eines Messkernes (3) mit einer Messwicklung (4) ein Messfluss erzeugbar ist, welcher in einem Abschnitt mit dem Hauptfluss überlagert ist, wobei in dem Verfahren einer der folgenden Schritte ausgeführt wird:

- Bestimmen und Ausgeben eines für die Induktivität der Messwicklung (4) repräsentativen Wertes, und/oder, falls dieser Wert einen Schwellwert überschreitet oder unterschreitet, Ausgeben eines Signales, welches eine Sättigung des Hauptkernes (1) anzeigt; oder
- Erzeugen eines Gleichflusses mittels der Messwicklung (4), welcher orthogonal zum Hauptfluss verläuft, und Messen einer Spannung an der Messwicklung (4) als Indikator für die Sättigung des Hauptkernes (1) durch den Hauptfluss; oder
- periodisches Magnetisieren des Messkernes (3) symmetrisch um den Ursprung der B-H-Ebene und Bestimmen, anhand des Stromes, der für diese Magnetisierung erforderlich ist, eines Masses für die Flussdichte des Hauptflusses.

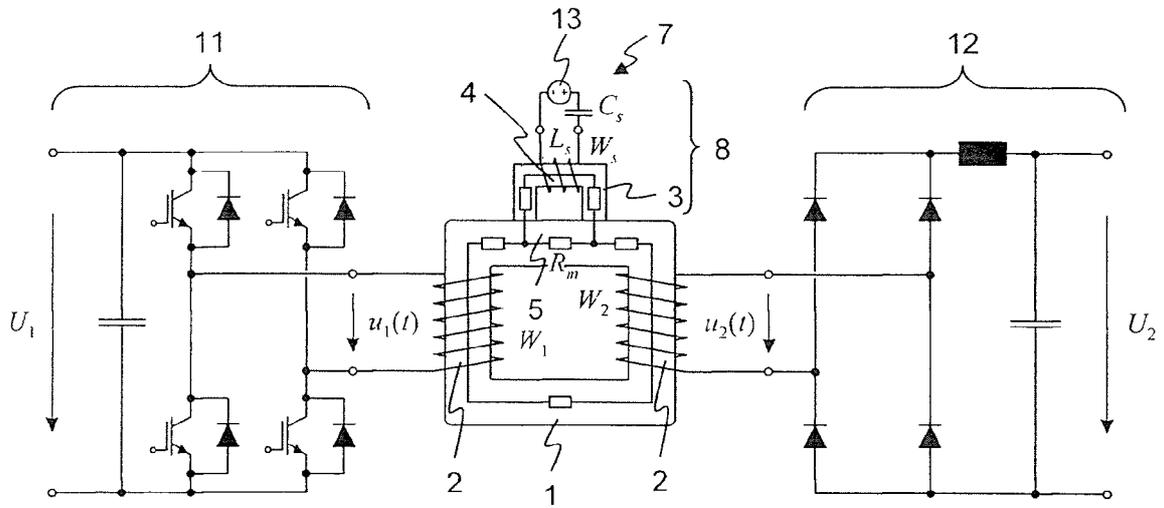


Fig. 1a

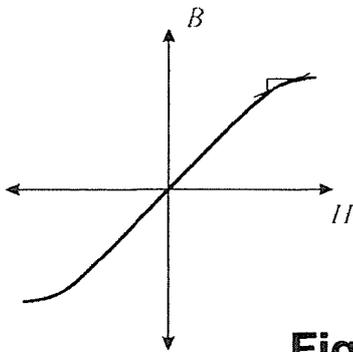


Fig. 1b

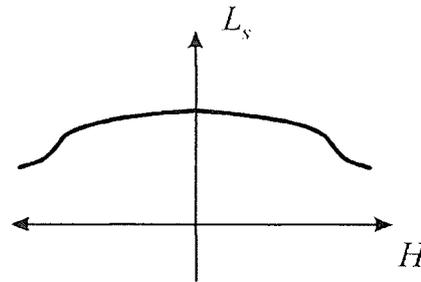


Fig. 1c

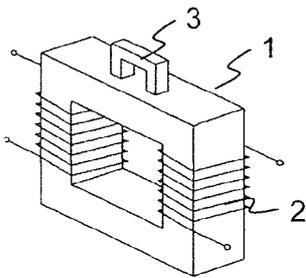


Fig. 2a

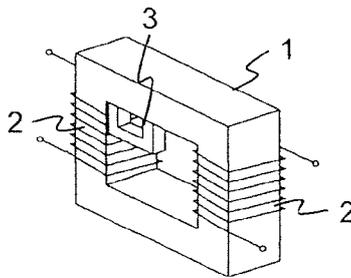


Fig. 2b

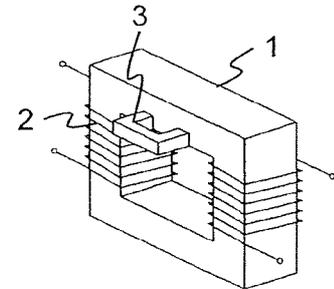


Fig. 2c

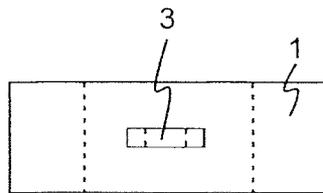


Fig. 3a

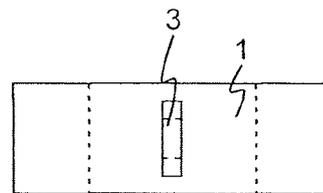


Fig. 3b

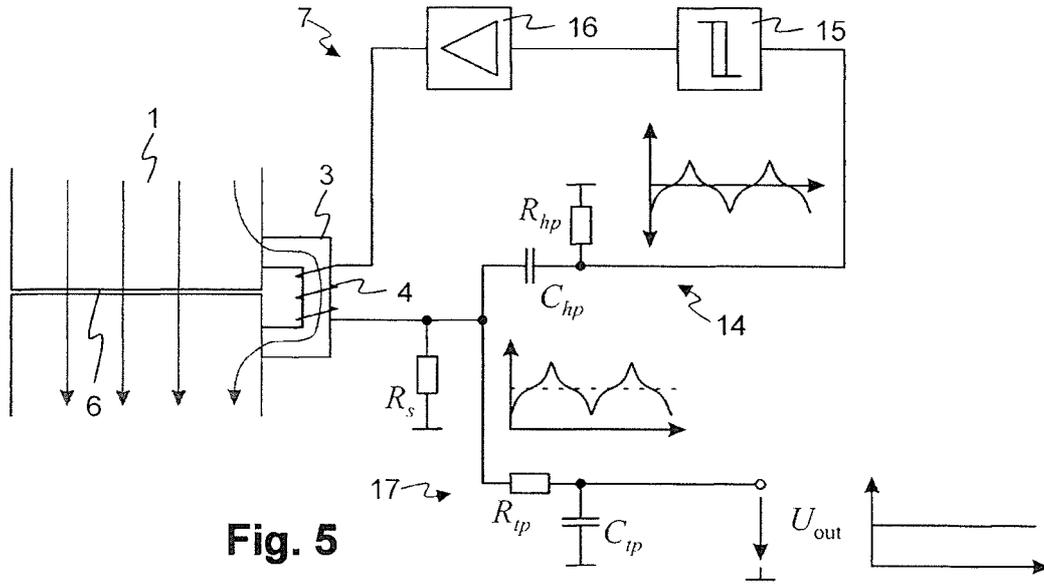


Fig. 5

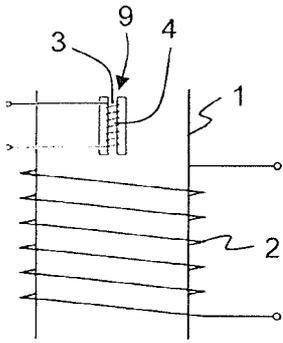


Fig. 4

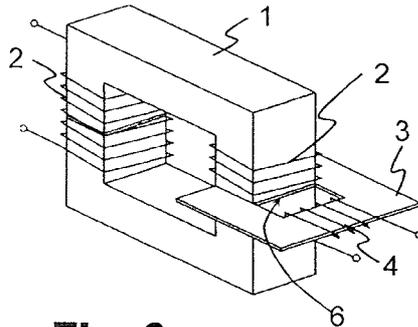


Fig. 6

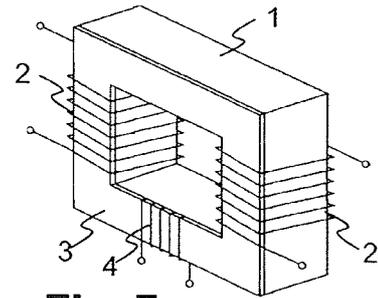


Fig. 7

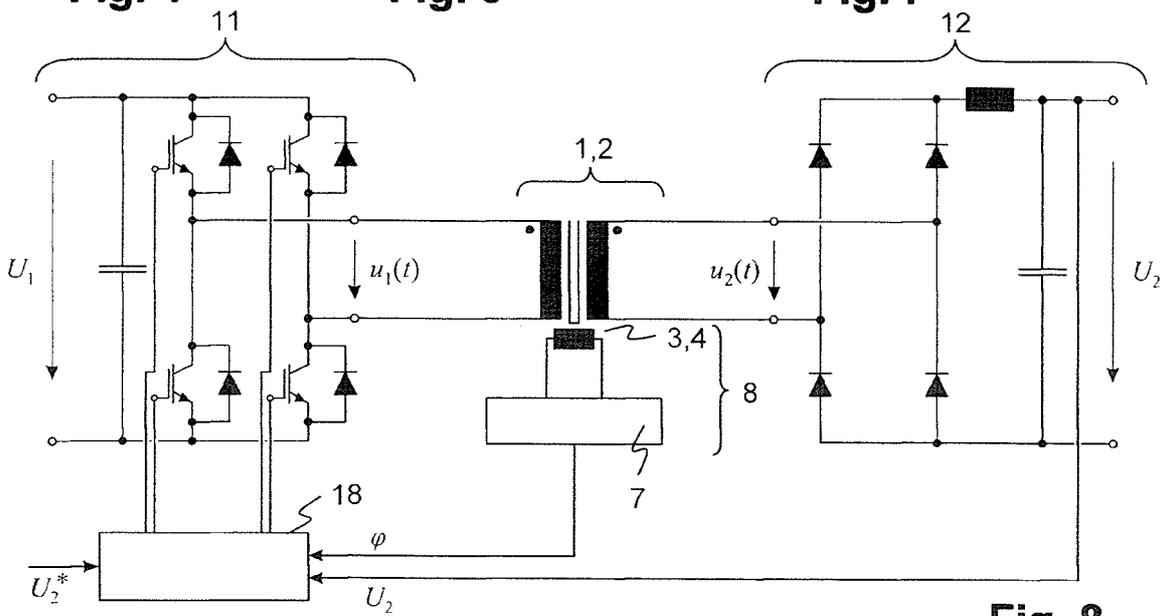


Fig. 8