

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 434/2011
(22) Anmeldetag: 28.03.2011
(45) Veröffentlicht am: 15.06.2014

(51) Int. Cl.: **H02M 1/088** (2006.01)
H02M 3/335 (2006.01)
G05F 1/575 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:

AT 505507 A1
AT 505507 A1
EP 1635448 A1
EP 1635448 A1
DE 4120112 C1
DE 4120112 C1
US 4477867 A
US 5550498 A
EP 2034322 A1

(73) Patentinhaber:
ERHARTT LUTZ
1100 WIEN (AT)

(72) Erfinder:
ERHARTT LUTZ
WIEN (AT)

(54) **DYNAMISCHE PWM-STEUERUNG FÜR TRANSFORMATORGEKOPPELTE
GEGENTAKTWECHSELRICHTER**

(57) Verfahren zur Steuerung der Leistungsübertragung eines über an Gleichspannung (UB) zu schaltenden Transformators (3), wobei die Gleichspannung (UB) über einen Wechselrichter (2) zur Verfügung gestellt wird, und der Wechselrichter (2) die Primärspule des Transformators (3) wechselweise mit drei Spannungszuständen versorgt, nämlich positive Spannung (UB), negative Spannung (-UB) und Spannung Null, wobei jede dieser drei Spannungen gemäß eines Pulses mit einer Pulsdauer an der Primärspule anliegt, wobei aus zumindest einer gegenüber einem Zeitpunkt (t) voran gegangener Pulsdauern ein dem Zeitpunkt (t) zugeordnetes Magnetisierungssignal (m) abgeleitet wird, welches zumindest zeitweise zumindest die den Zeitpunkt (t) unmittelbar folgende Pulsdauer im Sinne einer Angleichung der Magnetisierung im Transformator (3) an eine symmetrische Magnetisierung beeinflusst.

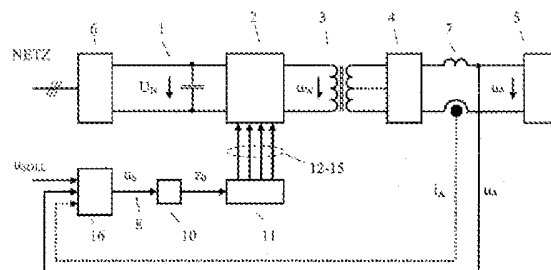


Fig.1 a.

Beschreibung

DYNAMISCHE PWM-STEUERUNG FÜR TRANSFORMATORGEKOPPELTE GEGENTAKT-WECHSELRICHTER.

TECHNISCHES GEBIET:

[0001] Die Erfindung betrifft Verfahren zur Steuerung der Leistungsübertragung eines über an Gleichspannung zu schaltenden Transformators gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

STAND DER TECHNIK:

[0002] Gebräuchliche Gegentaktwandler nach Oberbegriff des Anspruchs 1 sind Halb- oder Vollbrückenwechselrichter. Vorteilhaft gegenüber dem Vorwärtswandler sind die volle Transformatorausnutzung, sowie die geringe Welligkeit von Ein- und Ausgangsstrom und ein geringerer Filteraufwand. Nachteilig besteht die Gefahr der Sättigung des Transformators aufgrund unterschiedlich langer positiver und negativer Spannungsimpulse, weshalb die Regelung nur langsam erfolgen konnte.

[0003] Um die Vorteile des Gegentaktwandlers nutzbar zu machen, beziehen sich frühere Patente auf Verfahren, mit denen unterschiedliche und insbesondere stromabhängige Schaltverzugszeiten der Leistungsschalter ausgeglichen wurden. Moderne Leistungsschalter, z.B. FET, IGBT, weisen eine nahezu stromunabhängige Ausschaltverzugszeit und nahezu keine Einschaltverzugszeit auf, sodass bei konstanter oder bekannter Wechselrichterversorgungsspannung allein aus den Steuersignalen für die Schaltelemente eines Wechselrichters auf den Magnetisierungszustand des Transformators geschlossen werden kann. Dieses Vorgehen ist in /7/ AT 505507 A1, Anspruch 6 geschützt.

[0004] Das neue Verfahren und die neuen Vorrichtungen sind funktionsbedingt auf pulsweitenmodulierte (PWM) Wechselrichter eingeschränkt, unterschiedlich zu einer quasistationären Regelung bzw. Symmetrierung des Magnetisierungsstromes, wie in US 6,577,111 beschrieben, die für einen phasenverschiebungsgesteuerten Vollbrücken(quasi)resonanzwandler ausreichend ist, bei dem auch bei PWM-Steuerung aus den Steuersignalen für die Leistungsschalter nicht direkt auf den Magnetisierungszustand des Transformators geschlossen werden kann. US 6,577,111 zeigt den Aufwand für die Erfassung des Magnetisierungsstromes bzw. des nicht direkt erfassbaren magnetischen Flusses im Transformator Kern. Im technischen Gebiet der gegenständlichen Erfindung kann die Messeinrichtung für den Magnetisierungsstrom durch einen wesentlich kostengünstigeren Beobachter ersetzt werden.

[0005] In der Patentfamilie /2/ AT 505509 und DE 196 34 713 A1 (gleiche Uranmeldung bzw. gleicher Anspruch 1) ist ein Verfahren beschrieben, das bereits große Unterschiede in den Zeitdauern von aufeinander folgenden positiven und negativen Spannungsimpulsen am Transformator durch Voreinstellung der Einschaltzeiten und deren Mittelwertbildung gestattet. Dabei wird jegliche Flussverlagerung durch Voreinstellung der Einschaltzeiten oder zumindest durch Voreinstellung der Einschalt- und/oder Ausschaltzeitpunkte einer Schaltperiode unterdrückt. Einer festgestellten Änderung des Steuerwertes wird mit dem ersten Impuls zur Hälfte und mit dem zweiten Impuls der folgenden Schaltperiode vollständig entsprochen, sodass die Regelgeschwindigkeit eines mit gleicher Schaltfrequenz betriebenen Vorwärtswandlers erreicht wird, der nur einen Spannungsimpuls pro Schaltperiode erzeugt.

[0006] Damit wird der Gegentaktwechselrichter für dynamischere Prozesse, z.B. Lichtbogenabschaltung oder Lichtbogenregelung, ertüchtigt. Bei vielen Anwendungen ist, schon aus Gründen der Betriebssicherheit, eine Strombegrenzung gefordert. Diese kann bis dato nur im Regler realisiert werden. Insbesondere ist es bislang aufgrund des gefährlichen Transformator Kurzschlusses nicht möglich, die Energieübertragung wie beim Vorwärtswandler jederzeit zu beenden, z.B. wie dies bei einer Puls zu Puls Strombegrenzung der Fall ist. Weil der magnetische Fluss weder messtechnisch erfasst, noch beobachtet wird, erfolgt die Steuerung so, dass jegli-

che Flussverlagerung unterbunden wird. Wenn während einer Schaltperiode der Strom einen zumeist einstellbaren Wert übersteigt, so erfolgt, auch wenn der Sollwert augenblicklich auf Null gesetzt wird, noch die Ausgabe einer Mindesteinschaltzeit, die bis zu einer halben maximalen Einschaltzeit betragen kann, damit der Leistungstransformator entmagnetisiert wird. Hinzu kommt eine weitere Totzeit, weil der Sollwert eine Schaltperiode oder zwei Pulse lang, und nicht für jeden Impuls verarbeitet wird. Das kann im Strombegrenzungsbetrieb zu unerwünschten und hörbaren Schwingungen führen.

[0007] Weiters wird in /2/ und auch in /3/ EP 0898360 B1 ein Verfahren geschützt, wonach die Mittelwertbildung nicht für eine Schaltperiode sondern von Impuls zu Impuls erfolgt. In /3/ wird dazu kennzeichnend eine dreieckförmige Hilfsspannung für den Pulsweitenmodulator verwendet. Dadurch wird die Totzeit, die vom Zeitpunkt der möglichen Ausführung an verstreicht, bis der Sollwertsprung tatsächlich ausgeführt ist, in etwa halbiert, es verbleibt jedoch noch eine Totzeit aufgrund der Mittelwertbildung und ist folglich die Genauigkeit einer Strombegrenzung gegenüber dem Vorwärtswandler herabgesetzt. Eine weitere Totzeit kommt hinzu, wenn die Pulsdauer aufgrund des zuvor abgetasteten Steuerwertes voreingestellt und nicht aktuell ermittelt wird.

[0008] Für den unwahrscheinlichen Fall, dass das Spektrum der Steuerspannung über einen längeren Zeitraum hinweg hohe schaltfrequente Frequenzanteile aufweist, oder diese in kürzeren aufeinanderfolgenden Intervallen auftreten, besteht kein Sättigungsschutz. In diesen Zeiträumen klingt die plötzlich aufgetretene Flussverlagerung aufgrund parasitärer Effekte ab. Verschwindet die schaltfrequente Störung ebenso plötzlich, so lässt die Mittelwertbildung die abgeklungene Flussverlagerung neu entstehen, wobei der ungünstige Fall des Sättigungskurzschlusses eintreten kann. Auch können sich auf diese Weise mehrere Fehler zufolge des Abklingens der Flussverlagerung aufgrund parasitärer Effekte zufällig in die gleiche Richtung addieren. Dies wird bislang durch /2/ verhindert, wenn der Sollwert nur jede Schaltperiode gespeichert wird. Dadurch wird jedoch die Totzeit von einer Schaltperiode eingeführt und die Genauigkeit einer Strombegrenzung merkbar herabgesetzt.

[0009] In /2/ und /3/ EP 0898360 B1 werden Einschaltzeiten für positive und negative Spannungsimpulse erzeugt, sodass keine Flussverlagerung - nur im Falle anhaltender schaltfrequenter Überlagerungen auf der Steuerspannung bliebe die Flussverlagerung unabgesteuert - auftritt.

[0010] Die erfindungsgemäßen Verfahren benötigen die Speicherung der beobachteten Magnetisierung und sind insofern digitale Lösungen, wie /2/ und /3/, die gewährleisten, dass zumindest die halbe vorhergegangene Pulsbreite ausgegeben wird. Die Bedeutung der digitalen Lösung liegt in der naheliegenden weiteren Vorgangsweise begründet, die in /4/ WO 00/23223 und /5/ WO 00/79675 beschrieben sind. Kennzeichnend sind der digitale PWM und/oder voreingestellte oder hinterlegte Schaltzeitpunkte bzw. Einschaltzeiten.

[0011] Auch in /6/ WO 2005/043738 ist die Steuerung und ein Vollbrückenwechselrichter beschrieben. Auch hier erfolgt generell eine Voreinstellung der Schaltzeiten bzw. der Schaltzeitpunkte. Die Mittelwertbildung ist in den Ansprüchen 3, 4 und 5 geschützt. In Anspruch 3 wird „die Periodendauer bzw. Frequenz für die Pulsweitenmodulation“ (Steuerung der Pulsweite bei fester Schaltfrequenz) „zum Umschalten der Schaltelemente des Brückenwechselrichters ... eingestellt.“ Auf diese Weise wurde schon in den Diplomarbeiten Tuymer und Wenzelhuemer (österreichische Vorhaltungen zu /2/ AT 505509 A1) die Mittelwertbildung realisiert. Der darin beschriebene Mittelwert-PWM stellt die Phasenverschiebung bzw. Einschaltzeit zwischen voreilem und nacheilem Halbrückenumschalter einer Vollbrücke ein, indem eine Schaltperiode eines Umschalters vergrößert wird. Der Eingriff auf den nacheilenden Umschalter bewirkt die Vergrößerung, der Eingriff auf den voreilem Umschalter die Verringerung der Phasenverschiebung. Die Reduzierung der Schaltverluste in den Schaltelementen des Wechselrichters zufolge Mittelwertbildung ist Gegenstand der DA Tuymer. Die (stückweise) Erzeugung eines der Transformator magnetisierenden Signales, wie sie für gegenständlichen Anspruch 1 kennzeichnend ist, ist bei den Vorgehen nach /2/ - /6/ nicht gegeben.

[0012] Unterschiedlich zu /7/ AT 505507 A1, sonst wäre ein Zusatzpatent beantragt worden, wird der Betrag des magnetischen Flusses, im Folgenden als Magnetisierung bezeichnet, beobachtet.

[0013] In /7/ ist ein Verfahren beschrieben, das sehr einfach mittels Analogschaltung realisiert werden kann. Steuerwert und Strombegrenzungssignal werden auch schon wie bei einem Vorwärtswandler verarbeitet. Weiters wird gegenüber dem Vorwärtswandler die doppelte Stellgeschwindigkeit erreicht, wobei Flussverlagerungen auftreten können. Aufgrund von parasitären Effekten, die das Abklingen einer Flussverlagerung bewirken, kann es jedoch mit der Zeit zu Abweichungen kommen, zwischen dem beobachteten Verlauf des magnetischen Flusses und dem magnetischen Fluss, der um die Verzögerungszeit des Wechselrichters später tatsächlich im Transformatorkern auftritt. Diesen Effekt zu berücksichtigen kann sich aufwändig gestalten.

[0014] Das Dokument US 4,477,867 zeigt eine Regeleinrichtung für mit einer Pulsweitenmodulation versorgte Transformatoren, mithilfe derer einer Sättigung des Transformators vorgebeugt werden kann. Hierfür wird der Primärstrom des Transformators erfasst und zur Bewertung des Vorliegens einer Flussverlagerung herangezogen.

[0015] Es wird zum Patent angemeldet das Verfahren, wonach das Abklingen der Flussverlagerung nicht nachgeahmt, sondern aktiv durch Veränderung der Pulsdauern bewirkt und abgesteuert wird, sodass die Transformatormagnetisierung der beobachteten Magnetisierung nachläuft und kostengünstig begrenzt werden kann. Der Transformator kann ohne Luftspalt ausgeführt, der Magnetisierungsbedarf und somit die Ausschaltarbeit der Umschalter des Wechselrichters reduziert und der Wirkungsgrad gesteigert werden.

[0016] Es wird eine einfache Vorrichtung zur Beobachtung der Magnetisierung beschrieben.

[0017] In der Anmeldung wird weiters eine Vorrichtung beschrieben, womit auch Flussverlagerungen während unwahrscheinlicher schaltfrequenter Überlagerungen auf dem Steuerwert, die bei Abwandlung der Steuerspannung mit einem digitalen Begrenzungssignal theoretisch plötzlich entstehen, anhalten und verschwinden können, abgesteuert werden.

TECHNISCHE AUFGABE:

[0018] Ein Nachteil der in US 4,477,867 gezeigten Regeleinrichtung besteht darin, dass der gemessene Primärstrom nicht zuverlässig die Magnetisierung des Transformators repräsentiert, da die Magnetisierung ebenso von dem Sekundärstrom beeinflusst wird. Die Regelung ist daher nicht dazu geeignet Flussverlagerungen zuverlässig entgegen zu wirken.

[0019] Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht daher darin ein Verfahren zur Steuerung der Leistungsübertragung eines Transformators zu schaffen, mithilfe welchem Flussverlagerungen des Transformators zuverlässig entgegen gewirkt werden kann.

[0020] Diese Aufgabe wird mit einem Verfahren zur Steuerung der Leistungsübertragung eines über an Gleichspannung zu schaltenden Transformators der eingangs genannten Art gelöst, indem erfindungsgemäß aus zumindest einer gegenüber einem Zeitpunkt voran gegangener Pulsdauern ein dem Zeitpunkt zugeordnetes Magnetisierungssignal abgeleitet wird, welches zumindest zeitweise zumindest die den Zeitpunkt unmittelbar folgende Pulsdauer im Sinne einer Angleichung der Magnetisierung im Transformator an eine symmetrische Magnetisierung beeinflusst.

[0021] Der vorliegenden Erfindung liegt darüber hinaus die Aufgabe zu Grunde, bei einem Verfahren der eingangs genannte Gattung die durch dynamische Vorgänge verursachte Flussverlagerung im Transformator mit kostengünstigen Mitteln zu benützen, um die dynamischen Eigenschaften des Wechselrichters zu verbessern, die Sicherheit weiter zu erhöhen, indem die Energieübertragung jederzeit z.B. zwecks Bauteilschutz oder Begrenzung einer Prozessgröße gefahrlos beendet werden kann, und indem auch während anhaltender schaltfrequenter Überlagerungen auf der Steuerspannung eine aktive Symmetrierung des Transformators erfolgt, und den Magnetisierungsbedarf des Transformators zu senken bzw. den Wirkungsgrad zu steigern.

[0022] Die teilweise Lösung der Aufgabe besteht in einem ersten Schritt darin, die Transformatormagnetisierung bzw. den Betrag des magnetischen Flusses im Transformator Kern während eines Impulses einer dreieckförmigen Hilfsspannung für den Pulsweitenmodulator nachzusteuern, wobei die Voreinstellung einer folgenden Schalthandlung (Aus- und/oder Einschaltung eines Impulses) so erfolgt, dass auch bei Impulsverkürzungen aufgrund eines weiteren Digital-signales eine Flussverlagerung verhindert oder im Begrenzungsbetrieb vollständig abgesteuert wird.

[0023] Es sei angemerkt, dass unter der Bezeichnung „voran gegangene Pulsdauer“ auch die Pulsdauer jenes Spannungsimpulses zu verstehen ist, der momentan an der Primärspule des Transformators anliegt. Weiters verfügt die Magnetisierung im Transformator lokal über Betrag und Richtung, wobei unter symmetrischer Magnetisierung eine Magnetisierung verstanden wird, deren zeitlich aufeinander folgende Magnetisierungsamplituden im Wesentlichen denselben Betrag aufweisen und vorzugsweise in entgegen gesetzte Richtung weisen.

[0024] Insbesondere betrifft die Erfindung ein Verfahren, bei welchem die Pulsdauer der Spannungszustände durch ein mittels eines Pulsweitenmodulators generiertes PWM-Signal festgelegt wird.

[0025] Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass das die Pulsdauer der Spannungszustände festlegende PWM-Signal in Abhängigkeit von zumindest einem Sollwert einer Ausgangsgröße einer an die Sekundärwicklung des Transformators angeschlossenen Last sowie in Abhängigkeit von dem Magnetisierungssignal bestimmt wird.

[0026] Von Vorteil ist es, wenn ein Freigabesignal vorgesehen ist, welches ausschließlich eine Folge von ununterbrochen aufeinander folgenden Freigabeimpulsen und Sperrimpulsen mit gleicher Zeitdauer liefert, und eine Abschaltung des positiven oder negativen Spannungspulses ausschließlich während der Dauer eines Freigabeimpulses zugelassen wird, wobei das dem Zeitpunkt der Abschaltung zugeordnete Magnetisierungssignal gespeichert wird, und während der Dauer des darauf folgenden Sperrimpulses den Sollwert ersetzt.

[0027] In einer Weiterentwicklung des Verfahrens ist ein Freigabesignal vorgesehen, welches eine Folge von unmittelbar aufeinander folgenden Freigabeimpulsen und Sperrimpulsen mit gleicher Zeitdauer liefert, und eine Abschaltung des positiven oder negativen Spannungspulses jederzeit zugelassen wird,

- wobei bei einer während der Dauer eines Freigabeimpulses erfolgenden Abschaltung das dem Zeitpunkt der Abschaltung zugeordnete Magnetisierungssignal gespeichert wird und während der Dauer des darauf folgenden Sperrimpulses den Sollwert ersetzt,
- und bei einer während der Dauer eines Sperrimpulses erfolgenden Abschaltung der Spannungszustand Null an der Primärspule anliegt, bis während der in Bezug auf den Zeitpunkt der Impulsabschaltung folgenden Dauer des übernächsten Sperrimpulses ein Spannungszustand mindestens mit einer vorgegebenen Zeitdauer c folgt, wobei der Spannungszustand mit dem Spannungszustand, der durch die voran gegangene Pulsabschaltung abgeschaltet wurde, übereinstimmt.

[0028] Alternativ ist ein Verfahren vorgesehen, in welchem die Pulsdauer der Spannungszustände zusätzlich von einer Korrektur bestimmt wird, wobei die Korrektur durch Vergleich des Magnetisierungssignals mit einem bei symmetrischer Magnetisierung auftretenden Magnetisierungssignal ermittelt wird.

[0029] Insbesondere ist ein Verfahren von Vorteil, in welchem die Korrektur eine Annäherung des Magnetisierungssignals an das bei symmetrischer Magnetisierung auftretende Magnetisierungssignal bewirkt, indem einer durch den Vergleich festgestellten Abweichung der beiden Signale durch eine mittels der Korrektur veranlasste Verlängerung oder Verkürzung der Impulsdauer des jeweiligen Spannungszustands oder der jeweiligen Spannungszustände entgegen gewirkt wird.

[0030] Vorteilhafterweise ermittelt ein Beobachter das Magnetisierungssignal anhand des zeitli-

chen Verlaufs von PWM-Signal.

[0031] In einer sinnvollen Ausführungsform ist vorgesehen, dass das bei symmetrischer Magnetisierung auftretende Magnetisierungssignal aus Steuerwerten ermittelt wird, die zumindest vom Sollwert der Ausgangsgröße und von einem Abschaltsignal abhängen, wobei das Abschaltsignal dazu eingerichtet ist, eine Pulsabschaltung auszulösen.

[0032] Vorteilhafterweise wird das Magnetisierungssignal mit einem vorgegebenen Maximalwert verglichen, und bei Überschreitung des Maximalwerts der aktuelle Spannungszustand durch den Spannungszustand Null ersetzt wird.

[0033] Insbesondere kann ein Detektor zur Erkennung schaltfrequenter Überlagerungen der Steuerwerte vorgesehen sein, und die schaltfrequente Überlagerung mit einem Schwellwert verglichen wird, und bei einer Überschreitung des Schwellwerts der Detektor den Maximalwert der Magnetisierung herab setzt.

[0034] In einer empfehlenswerten Variante ist es vorgesehen, dass das Ergebnis des Vergleichs der Magnetisierungssignale mittels eines Multiplikators k verstärkt oder abgeschwächt und dadurch die Korrektur vergrößert oder verkleinert wird.

[0035] Dabei kann der Multiplikator k vorteilhafterweise vorgebar sein, der einer rationalen Zahl entspricht und in einem Zahlenbereich Wert zwischen 0 und 2 liegt, wobei die durch den Vergleich festgestellte Abweichung von der Magnetisierungssignale durch eine Verlängerung oder Verkürzung der Impulsdauer z nach einer Rechenvorschrift gemäß der Formel: $k \cdot U_0 \cdot (1 - k)^{n-1}$ berechnet wird, wobei U_0 der Abweichung der Magnetisierung von der bei symmetrischer Magnetisierung auftretende Magnetisierung zu einem Zeitpunkt t_0 entspricht, und n dem Momentanwert der Anzahl der dem Zeitpunkt t_0 folgenden positiven und negativen Spannungszustände entspricht, und das Ergebnis der Berechnung in eine der Abweichung proportionale Korrektur umgerechnet wird.

[0036] Insbesondere kann es vorteilhaft sein, wenn der Wert des Multiplikators k im Bereich $1 < k < 2$ liegt, womit eine exponentiell abnehmende Verstärkung von Steuerwertsprüngen bewirkt wird.

[0037] Alternativ kann es vorteilhaft sein, wenn der Wert des Multiplikators k im Bereich $0 < k < 1$ liegt, womit Steuerwertsprünge in abwechselnder Folge exponentiell abnehmend abgeschwächt und exponentiell abnehmend verstärkt werden.

[0038] In einer weiteren alternativ Ausführungsvariante kann es vorteilhaft sein, wenn der Multiplikator k den Wert $k=1$ aufweist, womit eine durch einen Steuerwertsprung verursachte Unsymmetrie des Magnetisierungssignals nach Hinzufügen eines Korrekturwerts bereits vollständig behoben ist. Mittels des Magnetisierungsbeobachters - einem zustandsabhängigen Betragsintegrator - und seiner Symmetrierung, wird die Aufgabe der Erfindung vollständig gelöst. Die Symmetrierung des Beobachters bewirkt die Symmetrierung des Transformators unabhängig von der schaltfrequenzbestimmenden Hilfsspannung des Pulsweitenmodulators.

[0039] Die Symmetrierungseinrichtung vergleicht in der Pulspause bzw. bei Impulsende den vom Magnetisierungszähler ausgegebene Magnetisierungsbetrag mit dem Betrag, der im symmetrischen Betriebsfall auftreten würde und mischt für die Erzeugung der folgenden Einschaltzeiten dem Steuerwert eine entsprechende Abweichung, die speziellen Anforderungen angepasst werden kann, hinzu, sodass die Flussverlagerung verkleinert wird.

[0040] Die ständige Symmetrierung des Transformators kann erfolgen, ohne Reglerparameter zu verändern, wobei der Mittelwert zweier Impulsdauern einer Schaltperiode dem Steuerwert entsprechen kann (Solarkonverter), oder dazu benützt werden, Steuerwertänderungen zu verstärken, z.B. um beim Schweißprozess bei unterschiedlichen Schlauchpaketelängen annähernd gleiche Dynamik zu erreichen. Es wird eine Realisierung der Mittelwertbildung nach /2/, Anspruch 6, mit sägezahnförmiger Hilfsspannung beschrieben, wonach eine Flussverlagerung weitestgehend unterbunden wird, und es wird eine erfindungsgemäße Möglichkeit angegeben, zugelassene Flussverlagerungen mittels Abschwächung der Steuerwertänderung abzusteuern.

Weiters wird die allgemeine Rechenvorschrift angegeben, wonach der Steuerspannung in den Einschaltzeiten ein nahezu beliebiges Sprungverhalten überlagert werden kann. Es eröffnen sich dadurch Möglichkeiten, nichtlineare Prozesse dynamischer zu regeln und/oder den Regler zu entlasten und/oder das Streckenverhalten gezielt zu beeinflussen.

[0041] Erreicht die beobachtete Magnetisierung einen Maximalwert, erfolgt die unverzügliche Impulsabschaltung. Dieses Signal wird weiters dazu benützt, schaltfrequente Überlagerungen auf der Steuerspannung zu erkennen. Wird jeder zweite Impuls (Impulse der gleichen Polarität) vom Beobachter beendet, liegt eine schaltfrequente Überlagerung vor. Solange die Detektierungssequenz vorliegt, erfolgt eine laufende Herabsetzung der Maximalmagnetisierung, bis die Dedektierungssequenz spätestens dadurch unterbrochen wird, dass auch der dazwischen liegende Impuls durch Erreichen der herabgesetzten Maximalmagnetisierung beendet wird und ein symmetrischer Betriebszustand erreicht ist. Die Maximalmagnetisierung wird bei Unterbleiben der Dedektierungssequenz wieder erhöht oder gleich auf den ursprünglichen Wert zurückgesetzt.

[0042] Den Stand der Technik und das Gebiet der Erfindung zeigen Funktionsschaltbilder Fig.1 und Fig. 11a und Zeitverläufe in Fig. 2. Die Erfindung und der Begrenzungsbetrieb werden anhand der Zeitverläufe in Figs. 2, 4 und 6 erläutert. Das erfindungsgemäße Verfahren wird anhand der Vorrichtungsschaltbilder 3 und 5 und der Signalflussbilder 7 und 11b für PWM 10 in Fig. 1c, dem Vorrichtungsschaltbild für den Beobachter in Fig. 8, und anhand der Diagramme in Fig. 9 und Fig. 10 erläutert und die Ergebnisse in Fig. 12 zusammengefasst.

[0043] Es zeigen:

- [0044]** Fig. 1: a: Prinzipschaltbild eines Gleichstromumrichters mit Netzgleichrichter, Spannungszwischenkreis, Vollbrückenwechselrichter, Transformator Ausgangsgleichrichter und Last, sowie Regler und herkömmlichen oder bekannten Pulsweitenmodulator, b: Funktionsschaltbild für bekannten Pulsweitenmodulator mit Mittelwertbildung durch dreieckförmige schaltfrequenzbestimmende Hilfsspannung, c: neue Steuerung mit weiteren Digitaleingängen für start/stop- und/oder Begrenzungsbetrieb;
- [0045]** Fig.2: Zeitverläufe im Begrenzungsbetrieb und resultierende Flussverlagerung;
- [0046]** Fig. 3: Vorrichtungsschaltbild eines erfindungsgemäßen Pulsweitenmodulators mit stückweisem Magnetisierungssignal und Eingang für Begrenzungs- und start/stop Betrieb;
- [0047]** Fig.4: Zeitverläufe im Begrenzungsbetrieb, stückweise entsprechendem Magnetisierungssignal, Unterdrückung der Flussverlagerung zufolge weiterem Digitaleingang;
- [0048]** Fig. 5: Vorrichtungsschaltbild eines erfindungsgemäßen Pulsweitenmodulators mit stückweise erzeugtem Magnetisierungssignal und Eingang für Begrenzungsbetrieb;
- [0049]** Fig.6: Zeitverläufe im vollen Begrenzungsbetrieb, stückweise entsprechendem Magnetisierungssignal, Unterdrückung der Flussverlagerung mit Pulsauslassung;
- [0050]** Fig. 7: Signalflussbild eines erfindungsgemäßen Pulsweitenmodulators mit Beobachter und von schaltfrequenzbestimmender Hilfsspannung (PWM) entkoppelter Magnetisierungssteuerung oder Symmetrierungseinrichtung und weiterem Digitaleingang;
- [0051]** Fig. 8: Vorrichtungsschaltbild des Betragsbeobachters;
- [0052]** Fig. 9: Diagramm für den Kreisprozess der Abstimmung einer Flussverlagerung mit einem Impuls;
- [0053]** Fig. 10: Diagramm für den Kreisprozess der Abstimmung einer Flussverlagerung mit mehreren Impulsen auf zwei verschiedene Arten;

[0054] Fig. 11: a. Signalflossbild für einen PWM nach /2/ mit sägezahnförmiger Hilfsspannung; b. Signalflossbild des erfindungsgemäßen Steuerverfahrens ohne laufende Rückkoppelung der Magnetisierung an die Symmetrierungseinrichtung;

[0055] Fig. 12: Steuerspannungssprungantworten des Wechselrichters nach bekanntem und neuem Verfahren mit verschiedenen Rechenvorschriften.

[0056] Fig. 1a zeigt das Prinzipschaltbild eines Gleichstromstellers mit Wechselspannungszwischenkreis u_w für den Einsatz der erfindungsgemäßen Steuerung bzw. Pulsmustererzeugung (10) für einen Wechselrichter (2). Wechselrichter (2) wird typisch vom Netz über Netzgleichrichter (6) eingangsseitig von der Betriebsspannung U_B versorgt, die von Kondensator (1) geglättet wird. Der Wechselrichterausgang speist die Primärwicklung von Transformator (3) mit abwechselnd positiver oder negativer Betriebsspannung und dazwischen liegenden Unterbrechungen der Energieübertragung.

[0057] Der an die Sekundärwicklung von Transformator (3) angeschlossene Ausgangsgleichrichter (4) wandelt die transformierte Wechselspannung u_w in die Ausgangsspannung u_A um und versorgt die über Induktivität 7 angeschlossene Last 5.

[0058] Die Steuerung der Wechselspannung u_w erfolgt aus Pulsmustergenerator (11) über die Signale auf den Leitungen (12,13) oder (12) bis (15). Wechselrichter (2) kann z.B. als Vollbrückenwechselrichter mit Phasenverschiebungssteuerung ausgeführt sein. Die Steuersignale für den voreilenden Brückenweig, z.B. (11) und (12) bestimmen den Beginn und die Steuersignale (13, 14) für den nacheilenden Brückenweig das Ende jedes positiven oder negativen Spannungsimpulses an Transformator (3). Pulsmustergenerator 11 erzeugt aus PWM-Signal z_0 Steuersignale für abwechselnd positive und negative Spannungsimpulse von u_w und versieht die Steuersignale mit Verriegelungszeiten, aufgrund der i.a. größeren Ausschaltverzögerungszeit moderner Leistungsschalter, die nahezu keine Einschaltverzögerung mehr aufweisen. Pulsmustergenerator 11 ist Stand der Technik. Die Erfindung betrifft Pulsweitenmodulator 10.

[0059] Pulsmustergenerator 11 wird von PWM 10 mit dem digitalen PWM-Signal z_0 versorgt und wandelt jeden Impuls von z_0 in Steuerimpulse (12,13) oder (12-15) für einen positiven oder negativen Spannungsimpuls von u_w um, wobei Pulsmustergenerator 11 aus aufeinanderfolgenden Impulsen von z_0 Steuersignale für abwechselnd positive und negative Spannungsimpulse am Wechselrichterausgang erzeugt. Die Dauer von aufeinanderfolgenden Impulsen z_0 entsprechen der Dauer von aufeinanderfolgend abwechselnd positiven und negativen Spannungsimpulsen u_w . PWM-Signal z_0 auf Zustand 0 bedeutet Pulspause, keine Energieübertragung und Speicherung der Transformator magnetisierung im Freilaufpfad ($u_w = 0$). Die auf Pulspausen (Zustand 0) folgenden Zustände 1 legen die Pulsdauern der abwechselnd positiven und negativen Spannungsimpulse fest. Nach diesem Muster erzeugt Pulsmustergenerator 11 aus z_0 die Ansteuersignale in den Ansteuerleitungen 12 und 13 oder 12 bis 15 für Wechselrichter 2. Die Erzeugung unterschiedlicher Pulsmuster für verschiedene Wechselrichter 2 betrifft nicht die Erfindung.

[0060] Der gewünschte Verlauf der Ausgangsgleichspannung u_A wird Pulsweitenmodulator (10) durch Steuerspannung u_s auf Leitung (8) vorgegeben, die von Regler 16 erzeugt wird. Regler 16 erhält eingangsseitig z.B. den Sollwert u_{soll} , der sich z.B. bei Impulsschweißverfahren sprunghaft ändert. An Regler 16 sind Ausgangsspannung u_A und zumeist auch Ausgangsstrom i_A rückgekoppelt. PWM 10 verarbeitet Steuerspannung u_s zu PWM-Signal z_0 , das von konventionellem Pulsmustergenerator 11 in die Steuersignale 12, 13 oder 12 bis 15 für mittlerweile weit verbreitete Gegentaktwechselrichter umgesetzt wird.

[0061] Aufgrund des Sättigungsproblems sind bekannte Steuerverfahren für PWM 10 nicht in der Lage die Energieübertragung (einen Spannungsimpuls u_w) jederzeit zu beenden und ein diesbezügliches Signal zu verarbeiten.

[0062] Fig. 1b zeigt ein Funktionsschaltbild für den bekannten PWM 10 mit Mittelwertbildung bei Verwendung einer dreieckförmigen Hilfsspannung 23. Mischer 21 vergleicht eine mit Halteglied 24 abgewandelte Sollwertspannung u_{s1} mit der dreieckförmigen Hilfsspannung 23. Ergebnis 20

wird von Zweipunktglied 22 in PWM-Signal z_0 umgewandelt.

[0063] Das Umschalten des Zweipunktgliedes 22 vom logischen Zustand 0 auf den logischen Zustand 1 (Beginn einer Einschaltzeit) erfolgt im Entmagnetisierungsintervall während der fallenden Flanke der Dreieckhilfsspannung bei Haltesignal 25 aufgrund der im Halteglied 24 festgehaltenen bzw. abgewandelten Steuerspannung u_{S1} . Das Ende einer Einschaltzeit wird im Freigabeintervall während der steigenden Flanke der Dreieckhilfsspannung durch die Steuerspannung u_S in ihrem aktuellen Verlauf bestimmt.

[0064] Durch Festhalten oder Abtastung der Steuerspannung bzw. Voreinstellung des folgenden Einschaltzeitpunktes und Abschaltfreigabe ab Hilfsspannungsminimum wird sichergestellt, dass eine bei Impulsende vorliegende Magnetisierung mit dem folgenden Impuls unabhängig von der Steuerspannung u_S zur Gänze abgesteuert wird.

[0065] Fig. 1c zeigt den erfindungsgemäßen PWM 10 für das System in Fig. 1a, der gegenüber dem Stand der Technik hinaus mit einem eventuellen weiteren Eingang 9 in der Lage ist, die Energieübertragung für ein System nach Oberbegriff in Anspruch 1 aufgrund eines weiteren, bevorzugt digitalen Signales auf Leitung 9 jederzeit zu beenden, etwa zum Bauteilschutz oder zwecks genauer Begrenzung einer Zustandsgröße (Strombegrenzung), wie dies beim Vorwärtswandler möglich ist. Dazu wird beispielsweise i_A an Mischer 17 rückgekoppelt. Mischer 17 gibt die Differenz aus Maximalwert 19 und Signal i_A an Zweipunktglied 18, welches das digitale Signal 9 erzeugt und an PWM 10 leitet. Übersteigt der Ausgangsstrom i_A einen einstellbaren Wert I_{MAX} , so schaltet PWM 10 den Impuls z_1 , z_1' oder z_2' ab, wodurch augenblicklich die Energieübertragung unterbrochen wird.

[0066] Die von PWM 10 ausgegebenen Impulse z_1 und z_1' beruhen auf der bekannten Mittelwertbildung mit erfindungsgemäßem Durchgriff für ein weiteres digitales Signal 9. Die volle Ausnützung der dynamischen Ressourcen eines Gegentaktwechselrichtersystems nach Fig. 1a ist durch Signal z_2' möglich, das von einem PWM 10 nach Fig. 7 oder Fig. 11b ausgegeben wird.

[0067] Fig. 2 zeigt die Wirkungsweise dieses bekannten Steuerverfahrens in Fig. 1b für ein transformatorgekoppeltes System mit Wechselspannungszwischenkreis u_W in Fig. 1a, wenn Impulse z_0 aufgrund eines weiteren Digitalsignales x auf Leitung 9 verkürzt werden, z.B. zwecks Strombegrenzung. Diagramm 27 zeigt Dreieckhilfsspannung u_{hd} und stationäre Steuerspannungen u_S , u_{S1} . Strichliert eingezeichnet ist der Verlauf der Magnetisierung m , womit in dieser Anmeldung der Betrag des beobachteten magnetischen Flusses in Transformator 3 bezeichnet ist, wobei der Maximalwert der Magnetisierung der Amplitude der Dreieckhilfsspannung u_{hd} entspricht. Diagramm 28 zeigt Ausgangssignal z_0 von PWM in Fig. 1b. Während der fallenden Flanke von u_{hd} wird aufgrund der festgehaltenen Steuerspannung $u_{S1}=u_S$ (weil stationär) ein Impuls gestartet. Während der folgenden steigenden Flanke von u_{hd} erfolgt die Pulsabschaltung zufolge der freigegebenen Steuerspannung u_S . Diagramm 29 zeigt Signal x , das beispielsweise von einer Puls zu Puls Strombegrenzung erzeugt wird, wie in Fig. 1c dargestellt. In Diagramm 30 ist das mit Digitalsignal x abgewandelte Ausgangssignal z_0' dargestellt. Die Dauer der abwechselnd positiven und negativen Spannungsimpulse der resultierenden Zwischenkreiswechselspannung u_W in Diagramm 31 werden nun von der Dauer der Impulse des abgewandelten PWM-Signales z_0' festgelegt. Demnach werden zwei negative Spannungsimpulse von u_W nun zu den Zeitpunkten $t6'$ und $t13'$ aufgrund von Signal x vorzeitig abgeschaltet. Ausgehend vom stationären symmetrischen Betriebszustand bis zum Zeitpunkt $t6'$ ist in Diagramm 32 der Verlauf des magnetischen Flusses in Transformator 3 zufolge der Beziehung $\Phi = \int u_W dt$ dargestellt.

[0068] In Fig. 1b nach Lit./3/ wird, wie bereits ausgeführt, der Einschaltzeitpunkt eines Impulses mittels festgehaltener Steuerspannung voreingestellt, sodass der Verlauf des Betrages des Flusses im Transformator Kern dem Verlauf der Magnetisierung m in Diagramm 27 (strichliert eingezeichnet) entspricht. Die Einschaltung, z_0 wechselt von Zustand 0 in Zustand 1, des positiven Spannungsimpulses zum Zeitpunkt $t1$ erfolgt, wenn u_{hd} die in u_{S1} festgehaltene Steuer-

spannung unterschreitet. Die Abschaltung, z_0 wechselt von Zustand 1 in Zustand 0 zurück, ist erst ab Freigabe zum Zeitpunkt t_2 möglich, bei dem Transformator 3 entmagnetisiert ist. Danach wird mit der noch verbleibenden Pulsdauer, bis u_{hd} die freigegebene Steuerspannung u_s zum Zeitpunkt t_3 wieder übersteigt, die Magnetisierung auf jenen Wert gebracht, welcher der neuen Steuerspannung zum Zeitpunkt t_3 entspricht. Mit dem Festhalten der Steuerspannung zum Zeitpunkt t_3 bis zur neuerlichen Freigabe beim nächsten Minimum von u_{hd} zum Zeitpunkt t_5 wird zugleich die Magnetisierung m gespeichert.

[0069] Während der folgenden fallenden Flanke von u_{hd} wird der nächste Impuls umgekehrter (negativer) Polarität gestartet, wenn u_{hd} die in u_{s1} festgehaltene Steuerspannung u_s unterschreitet, zum Zeitpunkt t_4 . Es erfolgt die Einschaltung zum Zeitpunkt t_4 mit Mindestimpulsdauer bis t_5 .

[0070] Es wird ein praktischer Fall angenommen, dass Steuerspannung u_s zum Zeitpunkt t_3 einen Maximalwert erreicht hat, und eine weitere Einrichtung, z.B. eine Strombegrenzung, über Leitung 9 eingreift und Impulse verkürzt.

[0071] Ab Impulsbeginn t_4 folgt die Magnetisierung dem Verlauf der fallenden Flanke der Dreieckhilfsspannung u_{hd} , bis zum Entmagnetisierungszeitpunkt t_5 und anschließend dem Verlauf der steigenden Flanke von u_{hd} bis Zeitpunkt t_6' , der vorzeitigen Abschaltung dieses (negativen) Impulses durch Signal x auf Leitung 9. Steuerung nach Lit./3/ speichert zum Zeitpunkt t_6 die abgewandelte Sollwertspannung u_{s1} , die nun nicht mehr der bereits zum Zeitpunkt t_6' in Transformator 3 gespeicherten Magnetisierung m bzw. $|\Phi|$ entspricht.

[0072] Zum Zeitpunkt t_7 der Einschaltung des nächsten Impulses umgekehrter (positiver) Polarität beginnt die nun kürzere Entmagnetisierungsphase, die schon zum Zeitpunkt t_8 vor dem nächsten Minimum von u_{hd} in t_9 beendet ist. Bei Impulsende t_{10} weist Transformator 3 eine gegenüber der Pulsbreite höhere Magnetisierung auf, weil sich der magnetische Fluss zufolge des verkürzten negativen und des folgenden unverminderten positiven Impulses verlagert hat. Der strichliert eingezeichnete Magnetisierungsverlauf hat sich gegenüber u_{hd} verschoben (siehe auch Diagramm 32).

[0073] Eine weitere Flussverlagerung in die gleiche Richtung erfolgt, wenn Signal x den nächsten negativen Impuls verkürzt, der zum Zeitpunkt t_{11} gestartet wird. Weiters kann es geschehen, dass die vorzeitige Abschaltung zu einem Zeitpunkt t_{13}' vor dem nächsten Minimum der Hilfsspannung u_{hd} in t_{12} erfolgt. Bei der nächsten Einschaltung des positiven Impulses zum Zeitpunkt t_{14} wird sodann keine Entmagnetisierungsphase gestartet, sondern erfolgt eine weitere Aufmagnetisierung, wobei schon nach kurzer Impulsdauer zum Zeitpunkt t_{15} die maximale Magnetisierung überschritten wird.

[0074] Ein nach Anspruch 1 aufgebautes Verfahren verhindert ebenfalls jegliche Flussverlagerung, erzeugt jedoch ein PWM-Signal z_1 , dessen Impulse aufgrund eines weiteren Signales x verkürzt werden können. Weiters kann nach Anspruch 1 ein Signal z_2 erzeugt werden, welches auch nicht mehr den Beschränkungen der Mittelwertbildung (/2/, /3/, /6/) unterliegt.

[0075] Zunächst wird weiterhin von der Mittelwertbildung nach Lit./2,3,6/ ausgegangen. Unverändert führt das verbesserte Verfahren eine Steuerspannungsänderung Δu_s in zwei Schritten aus, sodass in etwa die Dynamik eines mit gleicher Schaltfrequenz betriebenen Vorwärtswandlers, der nur einen, der Steuerspannung entsprechenden Spannungsimpuls pro Schaltperiode aufweist, erreicht werden kann, gegenüber den bekannten Verfahren z.B. jedoch mit höherer Genauigkeit einer Strombegrenzung.

[0076] Fig.3 zeigt das Funktionsschaltbild für einen PWM nach Fig. 1c mit Mittelwertbildung, wonach in der Freischaltphase Pulsverkürzungen möglich werden und die Genauigkeit einer Strombegrenzung erhöht wird. Magnetisierungssignal m wird stückweise aus der dreieckförmigen Hilfsspannung u_{hd} gewonnen.

[0077] Der bekannte PWM in Fig. 1b (20-26) wird mit Abtasthalteglied 33 und Umschalter 34 erweitert. Umschalter 34 weist die Eingänge 0 für die abgewandelte Steuerspannung u_{s1} und Eingang 1 für Magnetisierungssignal m auf und schaltet einen der beiden Eingänge auf Aus-

gang 20 und den Eingang von Mischer 21 durch. Umschalter 34 wird von UND-Gatter 38 in Stellung 0 gesteuert und von UND-Gatter 36 in Stellung 1. Magnetisierungssignal m wird mit Abtast-Halteglied 33 aus der Hilfsspannung u_{hd} gewonnen. Eine Abtastung von u_{hd} erfolgt gleichzeitig mit der Umschaltung von Schalter 34 durch Signal 37, das von UND-Gatter 36 ausgegeben wird.

[0078] Im Normalbetrieb ($x=1$) ist die von Halteglied 24 abgewandelte Steuerspannung u_{s1} an den +Eingang von Mischer 21 geschaltet. Die Rückumschaltung in diese Stellung geschieht durch die steigenden Flanken von Freigabesignal 26, die solange von UND-Gatter 38 auf Leitung 39 geschaltet sind, bis Signal x am zweiten Eingang in den Zustand $x=0$ (Pulsverkürzung) wechselt.

[0079] Magnetisierungssignal m wird von Umschalter 34 an den +Eingang von Mischer 21 geschaltet, solange sich Umschalter 34 in Stellung 1 (Pulsverkürzung) befindet. In diese Stellung wird Umschalter 34 durch die steigende Flanke von Signal 37 gesteuert, welche gleichzeitig auch die Abtastung von Hilfsspannung u_{hd} veranlasst. Signal 37 wird von UND-Gatter 36 ausgegeben, dem eingangsseitig Freigabesignal 26, Haltesignal bzw. PWM-Signal z_1 auf Leitung 25 und das invertierte Signal x von Inverter 35 zugeführt wird. Eine Abtastung von Hilfsspannung u_{hd} mit AH33 und die gleichzeitige Umschaltung von US34 von Stellung 0 nach Stellung 1 erfolgt, wenn mit der fallenden Flanke von Signal x die Energieübertragung unterbunden werden soll, aufgrund von Freigabesignal 26 frühestens nach Entmagnetisierung im Freigabeintervall (Signal 26 ist 1).

[0080] Die Funktionsweise des Verfahrens nach Fig. 3 und Ansprüchen... wird anhand der Diagramme 40-46 in Fig.4 erläutert. Steuerspannungen $u_s=u_{s1}$ und die vorzeitigen Abschaltzeitpunkte $t6'$ und $t13'$ durch die fallenden Flanken von Signal x werden angenommen, wie in Fig.2.

[0081] Diagramm 40 zeigt Hilfsspannung u_{hd} , Steuerspannung $u_s=u_{s1}$, sowie strichliert gezeichnet Magnetisierungsverlauf m , der keine Verlagerung mehr aufweist und stückweise aus Hilfsspannung u_{hd} zusammengesetzt wird. Diagramm 41 zeigt Freigabesignal 26. Diagramm 42 zeigt Signal x . In Diagramm 43 ist Signal 37 dargestellt. Die sich aus Freigabesignal 26 bzw. Rückschaltensignal für US34 und Umschaltsignal 37 ergebende Schalterstellung von Umschalter 34 ist in Diagramm 44 aufgetragen. In Diagramm 45 ist Signal z_1 dargestellt, und in Diagramm 46 die resultierende Zwischenkreiswechselspannung u_w .

[0082] Im Normalbetrieb ($x=1$) bis Zeitpunkt $t6'$ ist Freigabesignal 26 auf Leitung 38 durchgeschaltet und befindet sich US34 in Stellung 0. Zum Zeitpunkt $t6'$ wechselt Signal x von Zustand 1 in Zustand 0. Gleichzeitig wechselt aufgrund vom invertierten Signal x , dessen Zustand in $t6'$ von 0 auf 1 wechselt, Signal 37 am Ausgang von U36 von Zustand 0 in Zustand 1. Sowohl z_1 , als auch Freigabesignal 26 weisen zum Zeitpunkt $t6'$ Zustand 1 auf, weil die fallende Flanke von x im Freigabeintervall (Signal 26 ist Eins) auftritt, und weiters auch nicht in einer Pulspause ($z_1=0$). Mit der steigenden Flanke von Signal 37 wird der Momentanwert der Hilfsspannung u_{hd} zum Zeitpunkt $t6'$ in Abtasthalteglied 33 gespeichert und ist als Magnetisierungssignal m an Eingang 1 von US34 geführt, der aufgrund der gleichen steigenden Flanke von Signal 37 in Stellung 1 umschaltet und Signal m an den Eingang von Mischer 21 legt. Während der steigenden Flanke von u_{hd} übersteigt die Hilfsspannung augenblicklich ihren Momentanwert m , es erfolgt eine sofortige Pulsabschaltung, z_1 wird Null. Signal 37 wechselt in Zustand 0 zurück. Deshalb ist Signal 37 zum Zeitpunkt $t6'$ als Nadelimpuls dargestellt.

[0083] In Signal m ist nun die Magnetisierung zum vorzeitigen Abschaltzeitpunkt $t6'$ des (negativen) Spannungsimpulses gespeichert. Dadurch wird die Flussverlagerung unterbunden, weil sich die nächste Einschaltung des (positiven) Impulses vom Zeitpunkt $t7$ auf Zeitpunkt $t7'$ verschiebt, sodass die vollständige Entmagnetisierung zum nächsten Freigabezeitpunkt $t8$ erfolgt. Mit steigender Flanke des Freigabesignales wird Halteglied 24 freigegeben, US34 wieder in Stellung 0 gebracht, und es erfolgt die bereits beschriebene Abschaltung zum Zeitpunkt $t9$ und Einschaltung des folgenden (negativen) Impulses in $t11$ im folgenden, in $t10$ beginnenden Entmagnetisierungszeitraum $[t10,t12]$ (Signal 26 ist Null).

[0084] Zeitpunkt t_{13}' der neuerlichen Umschaltung von x nach Zustand 0 fällt in das Entmagnetisierungsintervall der fallenden Flanke der Hilfsspannung u_{hd} und ist bis zum folgenden Freigabezeitpunkt t_{12} unwirksam. Bei $x=0$ gelangt die steigende Flanke von Freigabesignal 26 zum Zeitpunkt t_{12} nun an Ausgang 37 von UND-Gatter 36. AH33 speichert das Minimum der Dreieckhilfsspannung u_{hd} und Umschalter 34 schaltet den im Signal m gespeicherten Wert an den +Eingang von Mischer 21. Hilfsspannung u_{hd} übersteigt ihr in m abgetastetes Minimum und es erfolgt die Pulsabschaltung zum Entmagnetisierungszeitpunkt t_{12} . Aufgrund des in m festgehaltenen Minimums der Dreieckhilfsspannung u_{hd} erfolgt die nächste Einschaltung frühestens im nächsten Freigabezeitpunkt t_{14} . Die steigende Flanke von Freigabesignal 26 gibt Halteglied 24 frei und schaltet bei $x=1$ Umschalter 34 in Stellung 0 zurück. Zum Abschaltzeitpunkt t_{15} entspricht Magnetisierung m dem durch die Hilfsspannung u_{hd} vorgegebenen Verlauf und der folgende, in t_{16} gestartete (negative) Spannungsimpuls kann bereits wieder die dem Steuerwert u_s entsprechende Dauer aufweisen.

[0085] Ist x zum Zeitpunkt t_{12} immer noch in Zustand 0 erfolgt keine Rückumschaltung von Umschalter 34, Hilfsspannung u_{hd} wird neuerlich im Minimum abgetastet, und es erfolgt kein Impulsstart.

[0086] Signal x kann von einer Begrenzungseinrichtung kommen (Fig. 1c), sodass angenommen werden kann, dass x kurz nach erfolgter Pulsverkürzung wieder in Zustand 1 zurückwechselt, wie dargestellt. Eine eventuelle Strombegrenzung ist nicht mehr gänzlich an die Beschränkungen der Steuerspannungsverarbeitung gebunden und wird die Schwingungsneigung reduziert und die Genauigkeit der Strombegrenzung erhöht. Signal x kann auch ein start/stop-Signal sein. Die Stillsetzung kann schneller erfolgen, wie bei den bekannten Verfahren, weil ein aktueller Impuls im Freigabeintervall (Signal 26 ist Eins) ohne Totzeit abgebrochen wird und mit dem letzten Impuls eine geringere Magnetisierung abgebaut wird. Die Schaltung ist einfach.

[0087] In weiterer Ausgestaltung der Idee kann beim Mittelwert-PWM der Sättigungsschutz auch im Falle vorzeitiger Pulsverkürzungen im Entmagnetisierungsintervall gewährleistet werden. Fig.5 zeigt das Funktionsschaltbild nach Ansprüchen... mit vollem Durchgriff für Signal x . Ausgegangen wird vom PWM in Fig.3, der Signal z_1 erzeugt. Eine Abtastung der Hilfsspannung u_{hd} durch AH33 und die Umschaltung von US34 nach Stellung 1 wird durch die fallende Flanke von Abschaltsignal 37 ausgelöst. Weil Signal 37 im Entmagnetisierungsintervall keine Pulsabschaltung bewirken kann, ist Signal 37 zusätzlich an einen Eingang von UND-Gatter 48 geführt, an dessen weiteren Eingang Signal z_1 angeschlossen ist. An den dritten Eingang ist OK-Signal 49 angeschlossen. UND-Gatter 48 gibt das PWM-Signal z_1' aus.

[0088] Signal z_1' ist über Leitung 25 an einen Steuereingang von Halteglied 24, die Eingänge von Impulsgeber 60 und 52, sowie von Inverter 50 rückgekoppelt. Abschaltsignal 37 wird von Impulsgeber 53 erzeugt, dessen Ausgang 1 ist, jedoch nach fallender Flanke von Signal x für eine Taktperiode Zustand 0 annimmt. Impuls 37 bewirkt im Freigabeintervall die Pulsabschaltung von z_1 und somit auch von z_1' . Im Entmagnetisierungsintervall bewirkt Taktimpuls 37 die Abschaltung von z_1' . Dieser Fall wird von UND-Gatter 59 wahrgenommen, das im Entmagnetisierungsintervall den Taktimpuls von Impulsgeber 60 an den Rücksetzeingang von RS Flip-Flop 55 leitet. RS55 setzt OK-Signal 49 zurück, wodurch z_1' abgeschaltet bleibt. Weiters ist Signal 49 an einen Eingang von UND-Gatter 38 geführt und verhindert dort die Rückumschaltung von Umschalter 34 in Stellung 0 mittels Ausgangssignal 39.

[0089] OK-Signal 49 entsteht am Ausgang von RS55, das an den START-Eingang von Zähler 56 rückgekoppelt ist. An den Taktengang von Zähler 56 wird Freigabesignal 26 geführt. An Preseteingang 57 wird der Startwert 2 angelegt. Bei OK=0 zählt Zähler 56 bei jeder fallenden Flanke von Freigabesignal 26 Eins herunter, bis auf Null. Bei Null angelangt wechselt Ausgangssignal 58 von Zustand 0 in Zustand 1, wodurch RS55 wieder gesetzt und der Zähler in diesem Zustand gehalten wird. Zustand 1 ist der stabile Ruhezustand.

[0090] Die Rücksetzung von FF55 geschieht durch den Ausgang von UND-Gatter 59. Ein Eingang von U59 wird vom Ausgang des Impulsformers 60 versorgt, der bei fallender Flanke von z_1' , also bei Abschaltung eines Spannungsimpulses, einen Impuls ausgibt. Freigabesignal 26

wird von Inverter 61 invertiert und das invertierte Signal an den zweiten Eingang von U59 gelegt. Ein Impuls von Impulsformer 60 gelangt daher nur im Entmagnetisierungsintervall an den Rücksetzeingang von FF55.

[0091] Im Freigabeintervall erfolgt eine Impulsverkürzung durch Signal 37, AH33 und US34, wie in Fig.3 beschrieben. Signal z_1 wechselt nahezu gleichzeitig mit Signal 37 in Zustand 0. RS55 bleibt gesetzt und Signal 49 in Zustand 1. Im Entmagnetisierungsintervall wird dadurch jedoch noch keine Abschaltung von z_1 bewirkt, weshalb die Impulsverkürzung im Entmagnetisierungszeitraum von UND-Gatter 48 aufgrund der Signale 37 und 49 erfolgt. Signal 37 am Eingang von U48 bewirkt die Abschaltung von z_1' und die Rücksetzung von Signal 49, wodurch z_1' abgeschaltet bleibt. In weiterer Ausgestaltung der Erfindungsidee wird mit Ausgängen 37, 49 auch während der Entmagnetisierungsphase eine Impulsabschaltung z_1' an Pulsmustergenerator 11 (Fig. 1a) ausgegeben und z_1' an Stelle von z_1 rückgekoppelt.

[0092] Signal 37 entsteht am Ausgang von (Nadel)Impulsformer 53, dessen Eingang mit Leitung 47 an den Ausgang von ODER-Gatter 51 angeschlossen ist. Signal x ist an einen Eingang von ODER-Gatter 51 geführt. An die beiden weiteren Eingänge sind die Ausgänge von Pulsformer 52 und von Inverter 50 angeschlossen, die eingangsseitig vom rückgekoppelten PWM-Signal z_1' (25) versorgt werden. An den Eingang von Inverter 50 ist Digitalsignal z_1' rückgekoppelt, um eine eventuell in der Pulspause (invertiertes Signal z_1') fallende Flanke von Signal 47 bis zum Impulsstart zu verschieben. (In der Pulspause entspricht die Dreieckhilfsspannung nicht dem Magnetisierungsverlauf.)

[0093] Ausgang 47 ist während der Pulspausen in Zustand 1 und kann nun auch schon im Entmagnetisierungszeitraum in Zustand 0 wechseln. Negativimpuls 37 bringt z_1 in Zustand 0, der durch Signal 49 verlängert wird. Impulserzeuger 52 wird durch das Einschalten von z_1' getriggert und gibt einen Impuls 54 der Dauer c aus. Aufgrund von Signal 54 führt ein eventueller Zustand 0 von Signal x beim Einschalten von z_1' erst um eine Dauer c später zu einer fallenden Flanke von Signal 47, damit auch bei anhaltendem Zustand 0 von Signal x die Magnetisierung abgesteuert wird. Pulsformer 52 erzeugt beim eingangsseitigen Einschalten von z_1 (Wechsel von 0 auf 1) am Ausgang einen Impuls einstellbarer Länge c. Damit wird, sollte x ein STOP-Signal und schon bei Impulsstart in Zustand 0 sein (im Falle einer Puls zu Puls Strombegrenzung unwahrscheinlich, weil x nach Pulsverkürzung wieder gesetzt wird), die fallende Flanke von Signal 47 verzögert, damit ein Entmagnetisierungsimpuls der Dauer c ausgeführt werden kann. Erfolgt keine Entmagnetisierung, so wird die Entmagnetisierung mit dem übernächsten Spannungsimpuls der gleichen Polarität fortgesetzt, sodass auch in diesem Fall die Magnetisierung abgesteuert wird. Ohne diese Maßnahme würde die in Transformator 3 gespeicherte Magnetisierung, unterschiedlich zum in AH33 gespeicherten Wert m, aufgrund parasitärer Effekte abklingen. Weil verfahrensgemäß mit einer Einschaltung ein Entmagnetisierungsintervall beginnt, würde der Einschaltimpuls um diesen Fehlbetrag zu lange ausfallen und könnte die Maximalmagnetisierung überschritten werden.

[0094] Weiters funktioniert in diesem Fall die Mittelwertbildung nicht (siehe Fig.2, Zeitpunkt t14), weshalb, der nächste Impuls umgekehrter Polarität unterdrückt werden muss. Der übernächste Impuls mit der gleichen Polarität des verkürzten Impulses startet mit Wert m, die über den ausgelassenen Impuls umgekehrter Polarität hinweg, bis Impulsstart gespeichert werden muss und wird in dieser Zeit auch eine Rückumschaltung von US34 unterbunden.

[0095] Die Funktionsweise des Verfahrens wird anhand der Zeitverläufe in Fig.6 erläutert. Es zeigen Diagramm 62 wieder Hilfsspannung u_{hd} , Steuerspannung $u_s = u_{s1}$ und beobachtete Magnetisierung m, Diagramm 63 z_1 , Diagramm 64 Signal x, Diagramm 65 Signal 47, Diagramm 66 Freigabesignal 26, Diagramm 67 Signal 49, Diagramm 68 z_1' und Diagramm 69 Zwischenkreiswechselspannung u_w , die unterdrückten (positiven) Impulse sind punktiert angedeutet.

[0096] Beispielhaft erfolgt im Entmagnetisierungszeitraum [t10,t12] zum Zeitpunkt t11 die Einschaltung eines negativen Impulses von u_w und die vorzeitige Abschaltung zum Zeitpunkt t13' durch Signal x. Der Ausgang von Inverter 50 zeigt mit Zustand 0 an, dass ein Impuls vorliegt. Der beim Einschalten ausgelöste Impuls c auf Eingang 54 wurde ignoriert, da bis Zeitpunkt t13'

$x=1$ ist. Beide anderen Ausgänge, die an Eingänge von ODER-Gatter 51 geschaltet sind, sind in Zustand 0, sodass mit Signal x auch Signal 47 am Ausgang von ODER-Gatter 51 von Zustand 1 in Zustand 0 wechselt. Der Wechsel triggert Impulsgeber 53, mit dessen Ausgangssignal auf Leitung 37 z_1' abgeschaltet wird. Durch die Rückkoppelung auf Leitung 25 wechselt der Ausgang von Inverter 50 in Zustand 1 und zieht Signal 47 mit, weshalb Signal 47 in diesem Zeitmaßstab sehr kurz als Nadelimpuls erscheint. Nadelimpuls 47 wird von Impulsgeber 53 etwas verlängert, sodass Ausgang z_1' sicher in Zustand 0 verharnt, bis Ausgang 49 von FF55 ebenfalls auf Zustand 0 umschaltet. Die Rücksetzung von FF55 geschieht nahezu gleichzeitig durch Impulsgeber 60 bei fallender Flanke des rückgekoppelten PWM-Signales z_1' (25).

[0097] Gleichzeitig mit der Abschaltung von z_1' wird u_{hd} abgetastet, Magnetisierung m gespeichert und an den Eingang von Mischer 21 geschaltet. Während OK-Signal 49 in Zustand 0 ist, erfolgt keine weitere Ansteuerung von AH33 und keine Rücksteuerung von Umschalter 34. Der nächste Impuls $[t14', t15']$ von z_1 wird aufgrund der gespeicherten Magnetisierung m erzeugt, in z_1' jedoch mittels OK-Signal 49 unterdrückt. Zähler 56 zählt zum Zeitpunkt $t14$ Eins herunter. Bei der nächsten fallenden Flanke von Freigabesignal 26 zum Zeitpunkt $t15$ zählt Zähler 56 auf Null und setzt wieder das OK-Signal.

[0098] Signal x ist weiterhin in Zustand 0, Signale 47, 37 in Zustand 1. Zum Zeitpunkt $t16$ erfolgt ein Impulsstart. Die durch Rückkoppelung an den Eingang von Inverter 50 ausgangsseitig auftretende fallende Flanke wird durch Ausgang 54 von Impulsgeber 52 ausgeblendet und tritt um die einstellbare Zeitdauer c später an Ausgang 47 auf. Es erfolgt die Ausgabe eines Entmagnetisierungsimpulses der Breite c , die von Impulsgeber 52 festgelegt ist. Ab Nadelimpuls 47 zum Abschaltzeitpunkt $t18'$ wiederholt sich der Ablauf von $t13'$ bis $t16$ mit der neu abgetasteten Magnetisierung.

[0099] Das Verfahren ist einfach, doch auch die Pulsauslassung kann Schwingungen in einem schnellen Begrenzungskreis begünstigen. Aufgrund der höheren Dynamik und aufgrund der höheren Transformatorausnutzung ist es vorteilhaft, die Steuerung der Transformatormagnetisierung von der Hilfsspannung des Pulsweitenmodulators zu entkoppeln.

[00100] Fig.7 zeigt das Signalflossbild für das neue Steuerverfahren nach Anspruch 1 zur Erzeugung eines hochdynamischen PWM-Signales z_2' aus Steuerspannung u_s und Digitalsignal x .

[00101] Mischer 70 erhält eingangsseitig Signal x (9) und Steuerspannung u_s (8) und gibt Steuerwert $\alpha(t)$ aus. Mischer 70 schaltet Steuerspannung u_s an Ausgang α durch, wenn Signal x in Zustand 1 ist, und gibt $\alpha(t)=0$ aus, wenn Signal x in Zustand 0 ist. Die mit Signal x abgewandelte Steuerspannung α ist an einen +Eingang von PWM (71-73,22) geführt. Mischer 71 weist gegenüber bekannten Pulsweitenmodulatoren einen weiteren +Eingang auf, mit dem Symmetrierungskorrektur $\Delta\delta$ verarbeitet wird. Wie beim herkömmlichen PWM ist eine sägezahnförmige Hilfsspannung u_{hz} 72 an den -Eingang des Mixers geführt und erzeugt Zweipunktglied 22 aus Ergebnis 73 PWM-Signal z_2 .

[00102] UND-Gatter 93 und Impulsgeber 95 erhalten eingangsseitig Signal z_2 . Die Ausgänge von UND-Gatter 93 und Impulsgeber 95 sind an die Eingänge des ODER-Gatters 97 geführt, das z_2' ausgibt. Die Abschaltung von z_2' kann nun erfolgen aufgrund eines weiteren von Differenzbildner 74 und Zweipunktglied 75 erzeugten Digitalsignales 76 am anderen Eingang des UND-Gatters, wenn Magnetisierung m 77 den auf Leitung 78 festgelegten Wert M_{MAX} erreicht. Im Falle der Impulsabschaltung durch Ausgang 76 geschieht die folgende Einschaltung von z_2' durch den Impulsgeber, der von der steigenden Flanke von z_2 ausgelöst wird. Aufgrund der einsetzenden Ummagnetisierung unterschreitet Magnetisierung 77 den auf Leitung 78 eingestellten Wert, Signal 76 wird wieder gesetzt und PWM-Signal z_2 von UND-Gatter 93 an den Ausgang z_2' durchgeschaltet.

[00103] Signal z_2' wird auf Leitung 79 an den Eingang von Beobachter 80 rückgekoppelt. Beobachter 80 erzeugt am Ausgang 77 Magnetisierungssignal m , das weiters an einen Eingang von Symmetrierungseinrichtung 81 (82-84) geführt ist.

[00104] Symmetrierungseinrichtung 81 enthält Mischer 82, der aus Steuerwert α die Magnetisierung m_{SYM} berechnet, die im symmetrischen Betrieb auftreten würde, Differenzglied 83 und einen weiteren Mischer 84 mit der Übertragungsfunktion k , die insbesondere ein fester oder variabler Wert zwischen 0 und 2 sein kann. Das Differenzglied ermittelt aus Steuerwert α und Magnetisierungssignal m vorzeichenrichtig die Höhe einer eventuellen Flussverlagerung U und gibt das Ergebnis U an Mischer k aus. Mischer k berechnet Symmetrierungswert $\Delta\delta$.

[00105] Die gleiche Symmetrierungswirkung kann mit verhältnismäßig großen oder verhältnismäßig kleinen Symmetrierungswerten $\Delta\delta$ erreicht werden. Für ein dynamisches Streckenverhalten sind größere und langsam abnehmende Werte vorteilhaft. Im Begrenzungsbetrieb werden kleine und rasch abnehmende $\Delta\delta$ gut sein. Mit einem eventuellen weiteren Eingang 85 kann die Rechenvorschrift in Mischer k verändert werden. Beispielsweise kann Signal x auch auf Eingang 85 geführt werden (strichlierte Verbindung), sodass gleichzeitig mit Steuerwert Null auch ein kleiner Symmetrierungswert $\Delta\delta$ oder auch $\Delta\delta = 0$ an Mischer 71 ausgegeben wird.

[00106] Theoretisch kann das Spektrum der mit Signal x abgewandelten Steuerspannung α und von Ergebnis 20 oder 73 hohe schaltfrequente Frequenzanteile enthalten, die plötzlich auftreten, anhalten und ebenso plötzlich wieder verschwinden. Filter 87 dedektiert schaltfrequente Eingriffe, beispielsweise durch Signal x oder durch eine mit Signal x abgewandelte Steuerspannung, und ist punktiert eingezeichnet. In den Anwendungen Lit /2/-/6/ besteht für diesen Fall kein Sättigungsschutz, ausgenommen Lit /2/,/6/ wenn die Impulse einer Schaltperiode voreingestellt werden. Weil das aber mit dem Nachteil einer größeren Totzeit verbunden ist, hat sich die dynamischere Puls zu Puls Mittelwertbildung nach Lit /2/, Anspruch 6 in Anwendung /3/ durchgesetzt und funktioniert mit vergleichbarer Sicherheit, wie der Vorwärtswandler. Detektor 87 mag in künftigen Anwendungsbereichen größere Bedeutung erlangen, belegt aber nicht viel Platz in einem schnellen Mikroprozessor oder Signalprozessor und erhöht die Robustheit des Systems.

[00107] Verfahrensgemäß ist es nun mit Filterdetektor 87 möglich, die Symmetrierung des Leistungstransformators 3 auch bei schaltfrequenten Eingriffen zu gewährleisten. Es können prozessabhängige Flussverlagerungen auch im Falle zwischenzeitlich auftretender massiver schaltfrequenter Eingriffe mit einstellbarer Geschwindigkeit abgesteuert werden. Es wird das Verfahren geschützt, wonach ein Beobachter symmetriert wird, ein Signal zur Impulsabschaltung erzeugt wird, wenn der Beobachter die Magnetisierungsgrenze erreicht, und dieses Signal an den Eingang eines Filters geführt wird, der die Magnetisierungsgrenze festlegt.

[00108] Der Ausgang von Detektor 87 ist Magnetisierungsmaximalwert 78. Eine anhaltende schaltfrequente Überlagerung liegt vor, wenn jeder zweite Impuls, also entweder aufeinanderfolgende positive oder negative Spannungsimpulse z_2' von Signal 76 abgeschaltet werden. Ausgang 76 und Signal 86 sind an Eingänge von Detektor 87 geführt. Signal 86 wird von Sägezahn-generator 72 ausgegeben. Bei Verwendung eines ständig durchzählenden Zählers mit 8 Bit besteht Signal 86 aus einem Taktimpuls, wenn der Zähler von $2^8-1=255$ auf Null springt. Die Länge des Taktimpulses beträgt in diesem Beispiel 1/512-tel der sich ergebenden Schaltperiode, die einen positiven und einen negativen Spannungsimpuls enthält. Taktimpuls 86 toggelt ein T-FF. Während der Ausgang von TFF 0 ist, können nur Spannungsimpulse einer (z.B. der negativen) Polarität von u_W auftreten, und in Zustand 1 können nur Impulse der anderen (positiven) Polarität auftreten.

[00109] Ein Ereignis ist die fallende Flanke von Ausgang 76. Ein Ereignis wird in RS1 gespeichert, wenn es während Zustand 1 von TFF auftritt und in RS0, wenn es während Zustand 0 auftritt. Die Speicherung eines Ereignisses bewirkt die Rücksetzung des anderen Ereignisspeichers. Wird bei fortschreitender Zeit ein Ereignisspeicher gesetzt und durch den anderen in der folgenden Halbperiode nicht rückgesetzt, so erfolgt, außer es tritt ein neuerliches Ereignis auf, die Rücksetzung automatisch am Ende dieser Halbperiode. Jedes Mal, wenn ein Ereignis bei bereits gesetztem Ereignisspeicher auftritt, erfolgt am Ende der Halbperiode keine automatische Rücksetzung und wird Ausgang 78 verkleinert. Dieser Vorgang kann sich wiederholen, bis auch der Impuls gegenteiliger Polarität aufgrund der herabgesetzten Magnetisierungsgrenze von

Signal 76 abgeschaltet wird, der Ereignisspeicher endlich durch den anderen Ereignisspeicher rückgesetzt wird, und symmetrischer Betrieb vorliegt. Wird ein Ereignisspeicher durch den anderen zurückgesetzt (Begrenzungsbetrieb), oder sind beide Ereignisspeicher zurückgesetzt bzw. in Zustand 0 (Normalbetrieb), so wird Ausgang 78 erhöht oder auf den voreingestellten Wert zurückgestellt.

[00110] Mit der zusätzlichen Veränderung der Magnetisierungsgrenze 78 durch die Betriebsspannung U_B wird bei Bedarf eine Vorsteuerung bewirkt bzw. kann zusätzlich die magnetische Beanspruchung des Transformatorkernes von der Betriebsspannung unabhängig gemacht werden. Vorteilhaft können dabei Betragsintegrator bzw. Magnetisierungszähler 88 (siehe Fig.8) und Sägezahn-generator 72 (Fig. 7) mit gleicher Taktfrequenz oder festem Taktfrequenzverhältnis betrieben werden, wodurch Synchronisierungsaufwand entfällt.

[00111] Fig.8 zeigt das Prinzipschaltbild des Betragsbeobachters. Signal z_2' ist über Leitung 79 an den start/stop-Eingang von Integrator 88 rückgekoppelt und wird integriert, wenn 1. Während $z_2'=0$ ist der Integrator angehalten. Die Integrationsrichtung wird durch das Signal auf Leitung 92 festgelegt. Integrator 88 erzeugt durch Integration von z_2' Magnetisierung m und Digitalsignal 89, das 1 ist, solange m Null ist. Eine steigende Flanke von Signal 89, wenn der magnetische Fluss seine Richtung ändert, gelangt zu einem Eingang von ODER-Gatter 90 und weiter an den Setzeingang von RS Flip Flop 91, dessen Ausgang 92 die Zählrichtung abwärts (Zustand 0) oder aufwärts (Zustand 1) festlegt. Bei Null angelangt, steuert sich Integrator 88 von selbst in die Aufwärtsrichtung, bis Impulsende.

[00112] Die Festlegung der Zählrichtung für den folgenden Impulsstart geschieht bei Impulsende durch Taktimpuls 93, der von Impulsgeber 94 bei fallender Flanke von z_2' ausgegeben und von Umschalter 124 zustandsabhängig entweder in Stellung 0 über ODER-Gatter 96 an den Setzeingang, oder in Stellung 1 an den Rücksetzeingang von RS91 geschaltet wird. Der Ausgang von ODER-Gatter 96 ist mit dem Setzeingang verbunden und ist ODER-Gatter 96 für beide Eingänge durchlässig.

[00113] Die Schalterstellung 0 oder 1 von Umschalter 124 entspricht der Zählrichtung bzw. Ausgang 92 von RS91, sodass ein Taktimpuls 93, also ein Impulsende von z_2' , während des Aufwärtszählens in Stellung 1 RS97 zurückgesetzt. Tritt Impulsende 93 schon während des Abwärtszählens in Stellung 0 auf, so erfolgt anstatt Rücksetzung die noch nicht erfolgte Setzung von RS97, wodurch sich ab Einschaltung des nächsten Impulses die Magnetisierung vergrößert, vergl. Fig.2, Zeitpunkt t_{14} .

[00114] Integrator 88 kann als digitaler Magnetisierungszähler ausgeführt sein, der 1 Bit weniger aufweist, als der ununterbrochen durchzählende Hilfsspannungszähler 72, und kann mit der gleichen Taktfrequenz arbeiten.

[00115] Die Ableitung der in Symmetrierungseinrichtung 81 durchgeführten Rechenvorschriften zur Steuerung eines Wechselrichtersystems in Fig. 1a geschieht auf Basis des Funktionsschaltbildes in Fig. 7 anhand des Diagramms in Fig. 9.

[00116] Zwecks einfacher Schaltungsrealisierung und der Herleitung möglichst einfacher Rechenvorschriften sind Magnetisierung m und Einschaltzeit δ normierte Größen:

$$m = \frac{|i_M(t)|}{2 \cdot I_M(\delta=1)}, [0 \dots 0,5] \text{ und } \delta = \frac{T_P}{T_S} = \frac{2T_P}{T_S}, [0 \dots 1].$$

[00117] Die Darstellung des ständigen Kreisprozesses, den Magnetisierung m in jeder Schaltperiode durchläuft, ist auf der bidirektionalen Zeitachse 96 aufgebaut. Vereinbarungsgemäß (umgekehrt wäre ebenso gut) folgt Magnetisierung m während eines positiven Spannungsimpulses von u_w Verlauf 77 in positiver Richtung von Achse 96 und während eines negativen Impulses in negativer Richtung. Beispielsweise folgt Magnetisierung m während des positiven Impulses δ_{-2} der Dauer 97 Verlauf 77 von m von Startzustand 98 zum Nullpunkt und von dort

weiter bis Zustand 98'. Ein negativer Spannungsimpuls δ_{-1} gleicher Dauer führt Beobachter bzw. Transformator von Zustand 98' nach Zustand 98 zurück.

[00118] Mit α ist der ebenfalls auf 1 normierte Wert von Steuerspannung u_s bezeichnet. Im symmetrischen Betriebsfall $\alpha_{-1} = \delta_{-1}$ ist $\Delta\delta_{-1} = 0$ und für den Einschaltzeitpunkt der 0-ten Einschaltzeit weiters

$$m(t_{A,-1}) = M_{sym} = \frac{\alpha_{-1}}{2}.$$

[00119] Der Großbuchstabe M steht für die während der Pulspause in Transformator und Beobachter gespeicherte Magnetisierung.

[00120] Eine Flussverlagerung entsteht dadurch, dass die ganze in der 0-ten Halbperiode auftretende Steuerwertänderung mit Pulsbreite 99 ausgeführt wird, mit der Einschaltzeit

$$\delta_0 = \alpha_0 = \alpha_{-1} + \Delta\alpha_{-1}, (\Delta\delta_{-1} = 0).$$

[00121] Die Zustände 101, 101' sind die symmetrischen Zustände für den neuen Steuerwert α_0 . Mit $\Delta\alpha_n(t) = \alpha(t_{A,n+1}) - \alpha_n = 0$ ergeben sich nach Fig. 7 die Einschaltzeiten zu

$$\delta_n = \alpha(t_{A,n}) + \Delta\delta_{n-1}, n = 0, 1, 2, \dots$$

[00122] Mit dem positiven Impuls der Dauer 99 wird Transformator 3 von Zustand 98 nach Zustand 100' gesteuert. Die Magnetisierung ist um den Wert U_0 (102) zu hoch. Mischer 83 errechnet in der Pulspause 100' Unsymmetrie 102 aus der gespeicherten Magnetisierung M_0 und dem von Mischer 82 ausgegebenen Wert $M_{0,sym} = \alpha_0 / 2$, nach

$$U_0 = M_0 - \frac{\alpha_0}{2},$$

und gibt den Wert an Mischer 84 aus. Die Länge der Pulsdauer 103, um Transformator 3 mit dem folgenden negativen Impuls von Zustand 100' in den für α_0 symmetrischen Betriebszustand 101 zu steuern, beträgt

$$\delta_1 = \alpha_0 + \Delta\delta_0 \text{ mit } \Delta\delta_0 = U_0.$$

[00123] Im Falle der vollständigen Absteuerung der Flußverlagerung mit $\Delta\delta_0$ (104) ist $k=1$, Mischer 84 kann entfallen, und Mischer 71 liefert das gewünschte Ergebnis 73 (Fig. 7), wonach PWM-Impuls z_2 die Dauer 103

$$\delta_1 = \alpha_0 + \Delta\delta_0 = \alpha_0 + U_0 = M_0 + \frac{\alpha_0}{2}$$

aufweist.

[00124] In der Zeitspanne δ_1 wird die höhere Magnetisierung M_0 von Zustand 100' abgebaut und auf die symmetrische Magnetisierung $\alpha_0 / 2$ ummagnetisiert, wobei die Steuerwertänderung verstärkt wird.

[00125] Das erfindungsgemäße Verfahren wird mit Fig.7 durch

$$\delta_n = \alpha(t_{A,n}) + \Delta\delta_{n-1}, \text{ mit } \Delta\delta_{n-1} = f(U_{n-1}), U_{n-1} = M_{n-1} - \frac{\alpha_{n-1}}{2}$$

beschrieben, wobei Transformator 3 entweder mit der Einschaltzeit

$$\delta_n = M_{n-1} + M_n$$

von Magnetisierung M_{n-1} auf Magnetisierung M_n ummagnetisiert oder mit

$\delta_n = M_{n-1} - M_n$, was nicht gesondert behandelt werden muss (Beobachter),

nur teilweise abmagnetisiert wird. Dabei ist in der ersten Halbperiode mit Einschaltzeit δ_1 Symmetrierungswert $\Delta\delta_0$ eine Funktion der am Ende der 0-ten Halbperiode $[0, T_S/2]$ (siehe auch Fig. 12) festgestellten Flussverlagerung U_0 , die durch die zur Gänze den Sprung $\Delta\alpha_{-1}$ enthaltende Einschaltzeit δ_0 entstanden ist.

[00126] Für $\Delta\delta_{n-1} = k \cdot U_{n-1}$, k eine rationale Zahl, gilt

$$\delta_0 = \alpha_0, U_0 = \frac{\Delta\alpha_{-1}}{2}, M_0 = \frac{\alpha_0}{2} + U_0, \Delta\delta_0 = k \cdot U_0, \delta_1 = \alpha_0 + \Delta\delta_0.$$

[00127] Mit $M_1 = \delta_1 - M_0$ und $\alpha_n = \alpha_0, n = 0, 1, 2, \dots$ wird

$$U_1 = -U_0 \cdot (1-k) \text{ und } M_1 = \frac{\alpha_0}{2} - U_0 \cdot (1-k).$$

[00128] Damit wird

$$U_n = U_0 \cdot (k-1)^n, \text{ und}$$

$$\Delta\delta_n = k \cdot U_{n-1} = k \cdot U_0 \cdot (k-1)^{n-1}, n = 0, 1, 2, \dots$$

[00129] Eine Abstimmung der Unsymmetrie, ist nur bei

$$|k - 1| < 1$$

gegeben. Dies ist für $0 < k < 2$ der Fall.

[00130] In Fig. 10 sind zwei Möglichkeiten zur Abstimmung der Flussverlagerung beispielhaft für $k=1,5$ und $k=0,5$ dargestellt.

[00131] Für $1 \leq k < 2$ findet eine exponentiell abnehmende Verstärkung des Steuerwertsprunges statt, bis die Unsymmetrie abgesteuert ist. Die Impulse 108 und 109 der 0-ten Schaltperiode sind strichliert hervorgehoben. Die Einschaltzeit 108, mit der Transformator 3 von Zustand 100' nach Zustand 105 gesteuert wird, ist

$$\delta_1 = \alpha_0 + \frac{3U_0}{2}.$$

[00132] Es folgt

$$M_1 = M_{0,sym} + U_1, U_1 = \frac{U_0}{2}, M_n = M_{0,sym} + U_n = M_{0,sym} + U_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n, M_{0,sym} = \alpha_0/2, \text{ und}$$

$$\delta_n = \alpha_0 + \Delta\delta_{n-1} = \alpha_0 + \frac{3U_0}{2} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n, \Delta\delta_{-1} = U_{-1} = 0, n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

[00133] Mit Einschaltzeit 109

$$\delta_2 = \alpha_0 + \Delta\delta_1 = \alpha_0 + \frac{3U_0}{4}$$

wird Transformator 3 von Zustand 105 nach 107' gesteuert. Unsymmetrie U_0 (102) ist nach 2 Impulsen auf 1/4-tel der ursprünglichen Flussverlagerung U_0 abgesteuert. Je nach Vorzeichen von U_0 erfolgt die Abstimmung ausschließlich mit Pulsverkürzungen oder Pulsverlängerungen

im Sinne einer Verstärkung der verursachenden Steuerwertänderung $\Delta\alpha_{-1}$. Es wird dem Streckenverhalten dadurch ein mittels k prozessunabhängig einstellbarer D-Anteil hinzugefügt. Die Realisierung eines D-Anteils im Regler führt leicht zu Instabilität und wird, wenn möglich vermieden. Der Regler kann entlastet, und die Symmetrierung von Transformator (3) zur Steigerung der Dynamik bzw. Beschleunigung der Prozessregelung verwendet werden.

[00134] Bei Verfahren mit $0 < k < 1$ konvergieren die Magnetisierungsamplituden M_n von m (77) von beiden Seiten gegen $M_{0,sym}$, und die Pulsweiten δ_n von beiden Seiten gegen die neue Pulsbreite α_0 . Bei $k=0,5$ wird Transformator 3 in der 0-ten Halbperiode mit den strichpunktiert eingezeichneten Impulsen 110 und 111 von Zustand 100' über 106 nach 107' gesteuert. Es gilt

$$U_n = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot U_{n-1} = \left(-\frac{1}{2}\right)^n \cdot U_0, \quad M_n = M_{0,sym} + U_0 \cdot \left(-\frac{1}{2}\right)^n, \text{ und}$$

$$\delta_n = \alpha_0 + \frac{U_0}{2} \cdot \left(-\frac{1}{2}\right)^n, \quad \Delta\delta_{-1} = U_{-1} = 0, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

[00135] Bei diesen Verfahren wird der Sollwertsprung nur geringfügig verstärkt, insbesondere bezüglich des Mittelwertes der Pulsdauern der folgenden Schaltperiode. Der Mittelwert der Einschaltzeiten der nach Ausführung von $\Delta\alpha_{-1}$ mit Einschaltzeit δ_0 folgenden Schaltperiode beträgt

$$\frac{\delta_1 + \delta_2}{2} = \alpha_0 + \frac{\Delta\alpha_{-1}}{8}.$$

[00136] Die von Transformator (3) übertragene Energie nach Ausführung des Sollwertsprunges entspricht bereits weitgehend Steuerwert (8) α_0 .

[00137] In beiden Fällen wird eine durch den Sollwertsprung in der 0-ten halben Schaltperiode entstandene Unsymmetrie exponentiell abgesteuert. Es tritt keine Totzeit auf und ist der volle Reglerdurchgriff gegeben. Es kann jedes $0 < k < 2$ eingestellt werden.

[00138] Die Funktionssicherheit des Steuerverfahrens beruht darauf, dass die symmetrierende Wirkung von Einrichtung 81 größer ist, als jene der parasitären Effekte, die ebenfalls ein Abklingen der Flussverlagerung bewirken. Deshalb ist es nicht nur möglich, sondern in diesem Sinne sogar wünschenswert, Transformator 3 ohne Luftspalt auszuführen. Der gleiche magnetische Fluss bildet sich bei wesentlich kleinerem Magnetisierungsstrom aus. Die Umschalter des Wechselrichters werden von zusätzlicher Abschaltarbeit befreit und kann der Wirkungsgrad des Wechselrichters gesteigert werden. Aufgrund der größtmöglichen Koppelungsinduktivität klingt eine Flussverlagerung aufgrund der parasitären Effekte sehr langsam ab und kann die Absteuerung einer Flussverlagerung zufolge einer plötzlichen Steuerwertänderung besonders langsam erfolgen, z.B. um um eine PT₁-Strecke, die durch Ausgangsinduktivität 7 und eine ohmsche Last 5 (Fig. 1a) gebildet sein kann, zu dynamisieren.

[00139] Es kann mit N Impulsen eine vollständige lineare Absteuerung der Flussverlagerung erfolgen. Für N Impulse wird die Unsymmetrie

$$U_{N,0} = \frac{U_0}{N} \text{ ermittelt. Damit ist}$$

$$\Delta\delta_0 = N \cdot U_{N,0} \cdot k.$$

[00140] Es wird $1 \leq k < 2$ betrachtet. Aus der Bedingung

$$\Delta\delta_0 = N \cdot U_{N,0} \cdot k = 2U_0 - U_{N,0} = U_{N,0} \cdot (2N - 1),$$

dass mit jedem Impuls ein N-tel der Flussverlagerung abgesteuert wird, folgt

$$k = 2 - \frac{1}{N}.$$

[00141] Bei $N=1$ ist $k=1$ und es erfolgt die vollständige Absteuerung mit dem nächsten Impuls, wie behandelt.

[00142] Für $N \geq 2$ gilt für den n-ten Impuls

$$\delta_{N,n} = \alpha(t_{A,n}) + \Delta\delta_{N,n}, \Delta\delta_{N,n} = U_{N,0} \cdot (2N - 2n - 1), n = 0 \dots N-1.$$

[00143] Für $N=2$, $k=2-1/N=3/2$, und $U_{2,0}=U_0/2$ ergeben sich die Impulsdauern einer Schaltperiode zu $\Delta\delta_{2,n} = (3 - 2n) \cdot U_{2,0}$, $n = 0,1$.

[00144] Transformator 3 wird von Zustand 105 nach 101' gebracht, wobei in Zustand 105 keine Neubestimmung der Flussverlagerung vorgenommen wird.

[00145] Mit N wird der D-Anteil eingestellt, welcher dem Sollwertsprung in der Steuerspannung hinzugefügt wird, zwecks schneller Regelung nichtlinearer Prozesse (Lichtbogenregelung, -abschaltung). Anzahl N kann theoretisch hoch gewählt werden. Bei $N > 2$, z.B. $N=50$, ist es auch bei relativ langsamen Prozessen sinnvoll, eine Absteuerung vorzeitig zu aktualisieren, wenn z.B. die 37-ste Impulsabschaltung durch Ausgang 76 ausgelöst wurde, weil Magnetisierung (77) die Sättigungsgrenze 78 erreicht hat (Fig.7).

[00146] Prinzipiell wird mit dem Steuerwert die Energie eingestellt, die mit Transformator (3) übertragen wird. Die Absteuerung der Unsymmetrie kann nun auch so erfolgen, dass der Mittelwert der Einschaltzeiten der auf einen ausgeführten Steuerwertsprung folgenden Schaltperioden dem Steuerwert ganz genau entspricht. Es sei jetzt eine vollständig lineare Absteuerung erwünscht, sodass die mit jeder folgenden Schaltperiode mit Transformator (3) übertragene Energie Steuerwert α entspricht, weshalb $0 < k \leq 1$ gewählt wird. Wenn der Mittelwert der Pulsdauern einer auf einen Steuerwertsprung folgenden Schaltperiode dem Steuerwert entsprechen soll (z.B. Solarkonverter), so muss die Absteuerung der Unsymmetrie auf mindestens zwei Impulse aufgeteilt werden. Mit jedem folgenden Impuls wird die Unsymmetrie um

$$U_{0,N} = \frac{U_0}{N} \text{ abgesteuert.}$$

[00147] Die Bedingung lautet

$$M_1 = \delta_1 - M_0 = \frac{\alpha_0}{2} - (U_0 - U_{0,N}).$$

[00148] Es folgt mit $\delta_0 = \alpha_0 + kU_0$ und $M_0 = \alpha_0 / 2 + U_0$ unmittelbar $(k-1/N)U_0=0$, bzw.

$$k = \frac{1}{N}.$$

[00149] Bei $N=1$ ist $k=1$ und es erfolgt die vollständige Absteuerung mit dem nächsten Impuls, wie behandelt.

[00150] Für $N \geq 2$ gilt für den n-ten Impuls

$$\delta_{N,n} = \alpha(t_{A,n}) + \Delta\delta_{N,n}, \Delta\delta_{N,n} = U_{N,0} \cdot (-1)^n, n = 0 \dots N-1.$$

[00151] Für $N=2$, $k=1/N=1/2$, und $U_{2,0}=U_0/2$ ergibt sich

$$\Delta\delta_{2,n} = (-1)^n \cdot U_{2,0}, n = 0,1.$$

[00152] Transformator 3 wird von Zustand 106 in den symmetrischen Betriebszustand 101'

gebracht, wobei in Pulspause 106 keine Neubestimmung der Flussverlagerung vorgenommen wird. Eine weitere hochdynamische Anforderung kann in der Praxis z.B. darin bestehen, den Betrieb für eine kurze Zeit, die durch den Ausgangsfilter überbrückt wird und in der das Solarpanel nicht belastet werden soll, zu unterbrechen, zwecks Erfassung betrieblicher Parameter.

[00153] Es kann die Unsymmetrie nicht jedes Impulsende, sondern seltener festgestellt werden. Es können auch exponentielle und lineare Absteuerungen in bestimmten Zeiträumen vorherrschen. Weiters kann der k-Wert auch während des Betriebes verändert und jederzeit eine vollständige Absteuerung einer Flussverlagerung erfolgen, oder eine vollständige Entmagnetisierung vorgenommen werden.

[00154] Fig. 11a zeigt das Signalflussbild für das bekannte Mittelwertverfahren nach 12/, Anspruch 6, mit sägezahnförmiger Hilfsspannung u_{hz} . Mit der Abschaltung von z_0 steht die Einschaltzeit δ_n fest, sowie Steuerwert α_n , der mit AH121 abgetastet und an den -Eingang von Mischer 122 geführt ist. Mischer 122 erhält am +Eingang den aktuellen Steuerwert $\alpha(t)$ und gibt laufend die Differenz

$$\Delta\alpha_{n-1}(t) = \alpha(t) - \alpha_{n-1}$$

an Mischer 84 aus, in dem die laufende Korrektur

$$\Delta\delta_{n-1}(t) = -\frac{\Delta\alpha_{n-1}(t)}{2}$$

berechnet und an einen +Eingang von Mischer 71 ausgegeben wird. Am zweiten +Eingang von Mischer 71 liegt Steuerwert $\alpha(t)$. Am -Eingang von Mischer 71 liegt Hilfsspannung u_{hz} an. Die Einschaltung von Z_2' erfolgt bei fallender Flanke der Hilfsspannung bzw. Zählerüberlauf. Die von PWM (71-73,22) erzeugte Einschaltzeit δ_n beträgt

$$\delta_n(t) = \alpha(t) - \frac{\Delta\alpha_{n-1}(t)}{2} = \frac{\alpha_{n-1} + \alpha(t)}{2}.$$

[00155] Das gleiche Ergebnis erhält man direkt mit dem Vorgehen nach 13/ mit dreieckförmiger Hilfsspannung. Steuerwert α_{n-1} ist die abgetastete oder abgewandelte Steuerspannung u_{s1} und $\alpha(t)$ die freigegebene Steuerspannung u_s . Springt Steuerwert $\alpha(t)$ auf Null, so erfolgt jedenfalls die vollständige Entmagnetisierung mit der Mindesteinschaltzeit $-\Delta\alpha_{n-1}/2$.

[00156] Fig. 11b zeigt ausgehend von Fig. 7 das Signalflussbild des neuen Verfahrens, wenn Korrekturwert $\Delta\delta$ direkt aus den Steuerwertänderungen $\Delta\alpha$ berechnet wird.

[00157] Steuerwert $\alpha(t)$ am Ausgang von Mischer 70 ist an den 0-Eingang von Umschalter 120 geführt. An den 1-Eingang ist der Ausgang von Abtast-Halteglied 119 angeschlossen, an dessen Eingang die sägezahnförmige Hilfsspannung u_{hz} geführt ist. Umschalter 120 schaltet entweder Eingang 0 oder Eingang 1 an Ausgang α durch. Bei jedem Impulsstart 86 wird Umschalter 120, sollte er sich in Stellung 1 befinden, nach Stellung 0 gesteuert. Abschaltimpuls 76, wenn die Maximalmagnetisierung erreicht ist, wird von Impulsgeber 123 bei fallender Flanke von Ausgang 75 ausgegeben und steuert Umschalter 120 in Stellung 1, löst eine Abtastung der Hilfsspannung mit AH 119 aus, und bewirkt bis zum nächsten Impulsstart 86 die Ausgabe von $\Delta\delta = 0$ durch Mischer 84. Weil die Sägezahnförmige Hilfsspannung ihren abgetasteten Momentanwert übersteigt, erfolgt die augenblickliche Abschaltung von z_2' durch Zweipunktglied 22, wobei in Steuerwert α auch in diesem Fall die Pulsdauer gespeichert ist. PWM-Signal z_2' bewirkt bei jeder Impulsabschaltung (fallenden Flanke) die Abtastung des Steuerwertes α und dessen Speicherung als α_{n-1} in AH 121. In Mischer 122 ist noch der vorhergehende Wert α_{n-2} gespeichert. In Mischer 122 wird der Wert $\Delta\alpha_{n-2} = (\alpha_{n-1} - \alpha_{n-2})/2$ an Mischer 84 ausgegeben und wird α_{n-2} mit α_{n-1} überschrieben. Mischer 84 berechnet daraus Korrekturwert $\Delta\delta_{n-1}$ für

den folgenden Impuls. Mit $k=0,5$ wird die Flussverlagerung zufolge jedem $\Delta\alpha_{n-2}$ mit der folgenden Impulskorrektur $\Delta\delta_{n-1} = \Delta\alpha_{n-2} / 2$ zur Gänze abgesteuert.

[00158] Soll jedoch mit dem folgenden Impuls nur $1/N$ -tel der Flussverlagerung abgesteuert werden, so überlagern sich die unabgesteuerten Flussverlagerungen, weshalb Mischer 84 den Korrekturwert $\Delta\delta$ nach

$$\Delta\delta_n = \frac{k}{2} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \Delta\alpha_{n-m} \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right)^m, \quad k = 2 - \frac{1}{N}, \dots \text{ oder}$$

$$\Delta\delta_n = \frac{k}{2} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \Delta\alpha_{n-m} \cdot \left(\frac{1}{N} - 1\right)^m, \quad k = \frac{1}{N}$$

berechnen müsste.

[00159] Bei Vorgehen nach Fig. 7, wenn die Flussverlagerung

$$U_{n-1} = M_{n-1} - \frac{\alpha_{n-1}}{2}, \quad \text{mit } M_{n-1} = m(t_{A,n-1}) \text{ beobachtet wird,}$$

kann die Steuerwertänderung aber auch anders abgeschwächt werden, indem z.B. die Flussverlagerung mit den Einschaltzeiten der gleichpoligen Spannungsimpulse abgesteuert wird, die nur einen Teil der Steuerwertänderung enthalten, während die gegenpoligen Impulse der Steuerwertänderung zur Gänze entsprechen. Die Reihe

$$\Delta\delta_n = k \cdot \sum_{m=0}^{\infty} f(m) \cdot U_{n-m}, \quad f(0)=1, |f(m)| \leq 1 \text{ und streng monoton fallend,}$$

kann jederzeit abgebrochen werden. Aufgrund der ständigen aktuellen Ermittlung der Flussverlagerung ist eine ständige Magnetisierungssteuerung möglich, auch in Form einer abklingenden Schwingung. Die Absteuerungszeit kann sehr weit ausgedehnt werden. Mit der in Mischer k realisierbaren Berechnung

$$\Delta\delta_n = k \cdot \sum_{m=0}^M f(m) \cdot U_{n-m}, \quad f(m) \text{ eine in Mischer k abgelegte Funktion,}$$

kann einem Steuerwertsprung $\Delta\alpha_{-1}$ in den Einschaltzeiten δ_n , $n=0,1,\dots$, aufgrund der resultierenden Flussverlagerungen U_{n-1} ein nahezu beliebiges Verhalten hinzuaddiert werden, um nichtlineare Prozesse besser zu beherrschen und/oder den Regler zu entlasten und/oder das Streckenverhalten gezielt zu beeinflussen.

[00160] Die je nach PWM-Signal z_0 oder unterschiedlichen PWM-Signalen z_2' sich ergebenden Verläufe von Zwischenkreiswechselspannung u_w und Magnetisierung m , strichliert eingezeichnet, nach einem Steuerwertsprung von $\alpha_{-1} = U_{-1} = 0$ auf $\alpha_0 = 0,5$ zufolge des stark eingezeichneten Verlaufes der Steuerspannung sind in Diagrammen 112-118 in Fig. 12 dargestellt. Wenn die Steuerwertänderung ohne Totzeit 125 durchgeführt wird, so entsteht die Flussverlagerung U_0 . Pfeil 126 kennzeichnet die Abschaltung, bei der der symmetrische Betriebszustand erreicht ist.

[00161] Diagramm (112) zeigt Steuerwert α und sägezahnförmige Hilfsspannung u_{hz} .

[00162] Verlauf z_0 in Diagramm (113) entsteht, wenn nach Lit./2/ Steuerwert $\alpha(t)$ einmal pro Schaltperiode verarbeitet wird. Vorteilhaft besteht eine Immunität gegenüber zwischenzeitlich über mehrere Schaltperioden hinweg auftretende schaltfrequente Überlagerungen auf Steuerwert $\alpha(t)$, die bei Puls zu Puls Mittelwertbildung verloren geht. Nachteilig dabei ist Totzeit 125.

[00163] In Diagramm 114 wird Totzeit 125 halbiert, indem nach Lit./2,3/ Steuerwert α zweimal

pro Schaltperiode, also für jeden Impuls verarbeitet wird. Mit der Einschaltzeit

$$\delta_n = \frac{\alpha_{n-1} + \alpha(t_{A,n})}{2} = \alpha_{n-1} + \frac{\Delta\alpha(t_{A,n})}{2}$$

werden Flussverlagerungen weitestgehend unterbunden.

[00164] In Diagrammen 115 bis 118 wird nach Fig. 7 vorgegangen. Ein Steuerwertsprung wird zur Gänze ausgeführt, nach

$$\delta_n = \alpha(t_{A,n}) + \Delta\delta_{n-1}, n = 0,1,2,\dots, \text{ mit } \Delta\delta_{n-1} = kU_{n-1}, \text{ und } U_{n-1} = M_{n-1} - \frac{\alpha_{n-1}}{2}.$$

[00165] Es tritt keine Totzeit, dafür eine Flussverlagerung U_0 auf, die zu dem mit Pfeil 126 bezeichneten Abschaltzeitpunkt abgesteuert ist.

[00166] In Diagramm 115 erfolgt die Absteuerung der Flussverlagerung U_0 mit $k=1$ mit der Einschaltzeit

$$\delta_1 = \alpha_0 + U_0, U_0 = \frac{\Delta\alpha_{-1}}{2}.$$

[00167] In Diagramm (116) werden die Einschaltzeiten mit $k=1,5$ ermittelt. Die einmalige Verstärkung ist zu einem exponentiell abklingenden D-Anteil (Verlauf 127), der Steuerspannung u_s hinzugedacht werden kann, ausgebaut worden.

[00168] In Diagrammen 117 und 118 erfolgt nach Ausführung des Steuerwertsprungs mit den beiden Impulsen der folgenden Schaltperiode, $N=2$, eine vollständige lineare Absteuerung der Flussverlagerung, siehe Pfeil 126.

[00169] In Diagramm 117 wurden die Korrekturwerte $\Delta\delta_0$ und $\Delta\delta_1$ für die Impulse einer Schaltperiode mit $k=2-1/N=1,5$ nach

$$\Delta\delta_{2,n} = (3-2n) \cdot U_{2,0}, n = 0,1, \text{ mit } U_{2,0} = \frac{\Delta\alpha_{-1}}{4}$$

berechnet, wodurch der Steuerwertsprung verstärkt wird.

[00170] In Diagramm 118 erfolgt die Berechnung der Korrekturwerte für die Impulse einer Schaltperiode mit $k=1/N=0,5$ nach

$$\Delta\delta_{2,n} = (-1)^n \cdot U_{2,0}, n = 0,1, \text{ mit } U_{2,0} = \frac{\Delta\alpha_{-1}}{4}.$$

[00171] Der Mittelwert der Impulsdauern der auf den in Halbperiode $[0, T_s/2]$ ausgeführten Steuerwertsprung auf α_0 folgenden Schaltperiode $[T_s/2, 3T_s/2]$ entspricht dem neuen Steuerwert $\alpha_0=0,5$.

BEZUGSZEICHENAUFSTELLUNG:

1	Betriebsspannung	7	Ausgangsinduktivität
2	Gegentaktwechselrichter	8	Steuerspannung
3	Transformator	9	Leitung, Digitalsignal x
4	Ausgangsgleichrichter	10	Pulsweitenmodulator
5	Last	11	Pulsmustergenerator
6	Netzgleichrichter	12	Steuerleitung

13	Steuerleitung	50	Inverter
14	Steuerleitung	51	ODER-Gatter
15	Steuerleitung	52	Impulsformer
16	Regler	53	Impulsformer
17	Differenzbildner	54	Leitung
18	Zweipunktglied	55	RS-FlipFlop
19	Leitung, Maximalwert	56	Zähler
20	Leitung, Signal Ergebnis	57	Preset-Eingang
21	Differenzbildner	58	Leitung
22	Zweipunktglied	59	UND-Gatter
23	Hilfsspannungsquelle	60	Impulsformer
24	Halteglied	61	Inverter
25	Leitung, PWM-Signal z_0	62	Diagramm
26	Leitung, Freigabesignal	63	Diagramm
27	Diagramm	64	Diagramm
28	Diagramm	65	Diagramm
29	Diagramm	66	Diagramm
30	Diagramm	67	Diagramm
31	Diagramm	68	Diagramm
32	Diagramm	69	Diagramm
33	Abtast-Halteglied	70	Mischer
34	Umschalter (Demultiplexer)	71	Mischer
35	Inverter	72	Hilfsspannungsquelle
36	UND-Gatter	73	Leitung, Signal, Ergebnis
37	Leitung, Signal	74	Differenzbildner
38	UND-Gatter	75	Zweipunktglied
39	Leitung, Signal	76	Leitung, Abschaltsignal
40	Diagramm	77	Leitung, Signal m
41	Diagramm	78	Leitung, Maximalwert
42	Diagramm	79	Leitung, PWM-Signal z_2'
43	Diagramm	80	Beobachter
44	Diagramm	81	Symmetrierungseinrichtung
45	Diagramm	82	Mischer
46	Diagramm	83	Differenzbildner
47	Leitung, Signal	84	Mischer k
48	UND-Gatter	85	Leitung, Steuereingang
49	Leitung, OK-Signal	86	Leitung, Einschaltsignal

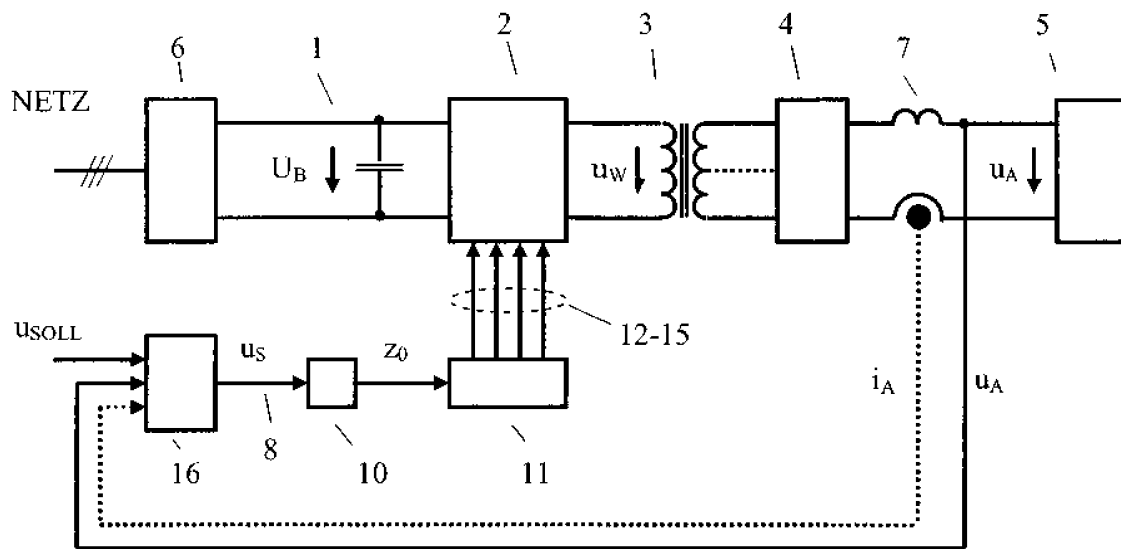
87	Symmetrierungseinrichtung	108	negativer Spannungsimpuls
88	Integrator, Zähler	109	positiver Spannungsimpuls
89	Leitung,	110	negativer Spannungsimpuls
90	ODER-Gatter	111	positiver Spannungsimpuls
91	RS-FlipFlop	112	Diagramm
92	Leitung, Signal	113	Diagramm
93	UND-Gatter	114	Diagramm
94	Impulsformer	115	Diagramm
95	Impulsformer	116	Diagramm
96	Achse	117	Diagramm
97	ODER-Gatter	118	Diagramm
98,98'	symmetrische Zustände	119	Abtast-Halteglied
99	positiver Spannungsimpuls	120	Umschalter (Demultiplexer)
100'	Zustand	121	Abtast-Halteglied
101,101'	symmetrische Zustände	122	Mischer
102	Flussverlagerung U	123	Impulsformer
103	negativer Impuls	124	Umschalter (Multiplexer)
104	Korrekturwert $\Delta\delta$	125	Totzeit
105	Zustand	126	Pfeil, Abschaltung
106	Zustand	127	Steuerwertverlauf
107'	Zustand		

Patentansprüche

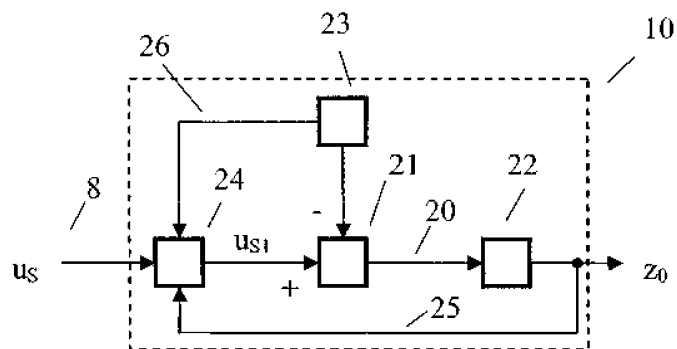
1. Verfahren zur Steuerung der Leistungsübertragung eines über an Gleichspannung (U_B) zu schaltenden Transformators (3), wobei die Gleichspannung (U_B) über einen Wechselrichter (2) zur Verfügung gestellt wird, und der Wechselrichter (2) die Primärspule des Transformators (3) wechselweise mit drei Spannungszuständen versorgt, nämlich positive Spannung (U_B), negative Spannung ($-U_B$) und Spannung Null, wobei jede dieser drei Spannungen gemäß eines Pulses mit einer Pulsdauer an der Primärspule anliegt, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus zumindest einer gegenüber einem Zeitpunkt (t) voran gegangener Pulsdauern ein dem Zeitpunkt (t) zugeordnetes Magnetisierungssignal (m) abgeleitet wird, welches zumindest zeitweise zumindest die den Zeitpunkt (t) unmittelbar folgende Pulsdauer im Sinne einer Angleichung der Magnetisierung im Transformator (3) an eine symmetrische Magnetisierung beeinflusst.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Pulsdauer der Spannungszustände durch ein mittels eines Pulsweitenmodulators (10) generiertes PWM-Signal (z) festgelegt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das die Pulsdauer der Spannungszustände festlegende PWM-Signal (z) in Abhängigkeit von zumindest einem Sollwert einer Ausgangsgröße einer an die Sekundärwicklung des Transformators (3) angeschlossenen Last sowie in Abhängigkeit von dem Magnetisierungssignal (m) bestimmt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Freigabesignal (26) vorgesehen ist, welches ausschließlich eine Folge von ununterbrochen aufeinander folgenden Freigabeimpulsen und Sperrimpulsen mit gleicher Zeitdauer liefert, und eine Abschaltung des positiven oder negativen Spannungspulses (U_B , $-U_B$) ausschließlich während der Dauer eines Freigabeimpulses zugelassen wird, wobei das dem Zeitpunkt der Abschaltung zugeordnete Magnetisierungssignal gespeichert wird, und während der Dauer des darauf folgenden Sperrimpulses den Sollwert ersetzt.
5. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Freigabesignal (26) vorgesehen ist, welches eine Folge von unmittelbar aufeinander folgenden Freigabeimpulsen und Sperrimpulsen mit gleicher Zeitdauer liefert, und eine Abschaltung des positiven oder negativen Spannungspulses (U_B , $-U_B$) jederzeit zugelassen wird,
 - wobei bei einer während der Dauer eines Freigabeimpulses erfolgenden Abschaltung das dem Zeitpunkt der Abschaltung zugeordnete Magnetisierungssignal gespeichert wird und während der Dauer des darauf folgenden Sperrimpulses den Sollwert ersetzt,
 - und bei einer während der Dauer eines Sperrimpulses erfolgenden Abschaltung der Spannungszustand Null an der Primärspule anliegt, bis während der in Bezug auf den Zeitpunkt der Impulsabschaltung folgenden Dauer des übernächsten Sperrimpulses ein Spannungszustand mindestens mit einer vorgegebenen Zeitdauer c folgt, wobei der Spannungszustand mit dem Spannungszustand, der durch die voran gegangene Pulsabschaltung abgeschaltet wurde, übereinstimmt.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Pulsdauer der Spannungszustände zusätzlich von einer Korrektur ($\Delta\delta$) bestimmt wird, wobei die Korrektur ($\Delta\delta$) durch Vergleich des Magnetisierungssignals (m) mit einem bei symmetrischer Magnetisierung auftretenden Magnetisierungssignals (M_{sym}) ermittelt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Korrektur ($\Delta\delta$) eine Annäherung des Magnetisierungssignals (m) an das bei symmetrischer Magnetisierung auftretende Magnetisierungssignal (M_{sym}) bewirkt, indem einer durch den Vergleich festgestellten Abweichung der beiden Signale durch eine mittels der Korrektur ($\Delta\delta$) veranlasste Verlängerung oder Verkürzung der Impulsdauer des jeweiligen Spannungszustands oder der jeweiligen Spannungszustände entgegen gewirkt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Beobachter das Magnetisierungssignal anhand des zeitlichen Verlaufs von PWM-Signal (z) ermittelt.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das bei symmetrischer Magnetisierung auftretende Magnetisierungssignal (M_{sym}) aus Steuerwerten (α) ermittelt wird, die zumindest vom Sollwert der Ausgangsgröße und von einem Abschaltsignal abhängen, wobei das Abschaltsignal dazu eingerichtet ist, eine Pulsabschaltung auszulösen.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Magnetisierungssignal (m) mit einem vorgegebenen Maximalwert (M_{max}) verglichen wird, und bei Überschreitung des Maximalwerts der aktuelle Spannungszustand durch den Spannungszustand Null ersetzt wird.
11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Detektor (87) zur Erkennung schaltfrequenter Überlagerungen der Steuerwerte (α) vorgesehen ist, die schaltfrequente Überlagerung mit einem Schwellwert verglichen wird, und bei einer Überschreitung des Schwellwerts der Detektor den Maximalwert (M_{max}) der Magnetisierung herab setzt.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Ergebnis des Vergleichs der Magnetisierungssignale (m, M_{sym}) mittels eines Multiplikators k verstärkt oder abgeschwächt und dadurch die Korrektur ($\Delta\delta$) vergrößert oder verkleinert wird.
13. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Multiplikator k vorgebar ist, einer rationalen Zahl entspricht und in einem Zahlenbereich Wert zwischen 0 und 2 liegt, wobei die durch den Vergleich festgestellte Abweichung von der Magnetisierungssignale (m und M_{sym}) durch eine Verlängerung oder Verkürzung der Impulsdauer z nach einer Rechenvorschrift gemäß der Formel: $k \cdot U_0 \cdot (1-k)^{n-1}$ berechnet wird, wobei U_0 der Abweichung der Magnetisierung (m) von der bei symmetrischer Magnetisierung auftretende Magnetisierung (M_{sym}) zu einem Zeitpunkt t_0 entspricht, und n dem Momentanwert der Anzahl der dem Zeitpunkt t_0 folgenden positiven und negativen Spannungszustände entspricht, und das Ergebnis der Berechnung in eine der Abweichung proportionale Korrektur ($\Delta\delta$) umgerechnet wird.
14. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wert des Multiplikators k im Bereich $1 < k < 2$ liegt.
15. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wert des Multiplikators k im Bereich $0 < k < 1$ liegt.
16. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Multiplikator k den Wert $k=1$ aufweist.

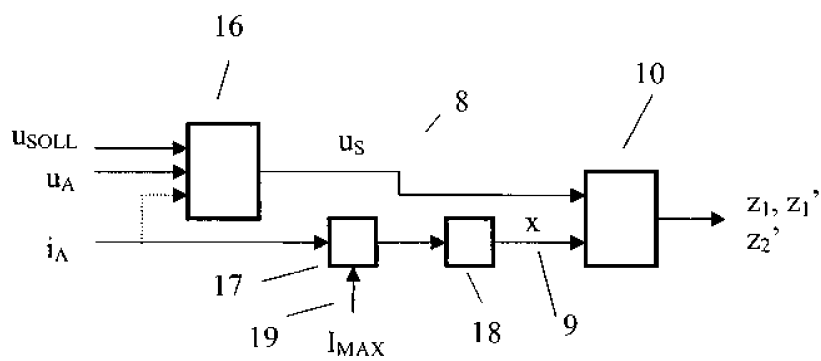
Hierzu 11 Blatt Zeichnungen



a.



b.



c.

Fig.1

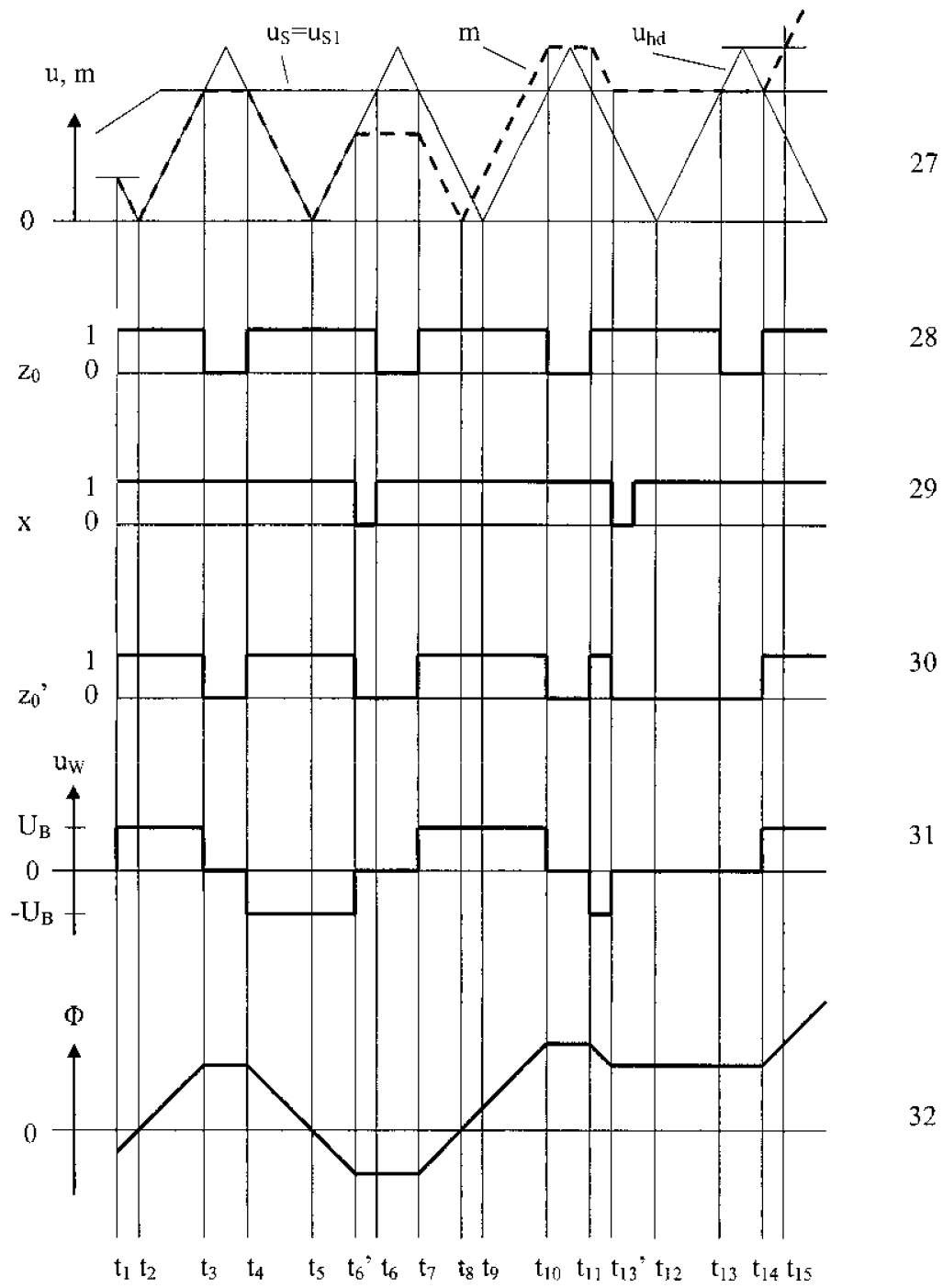


Fig.2

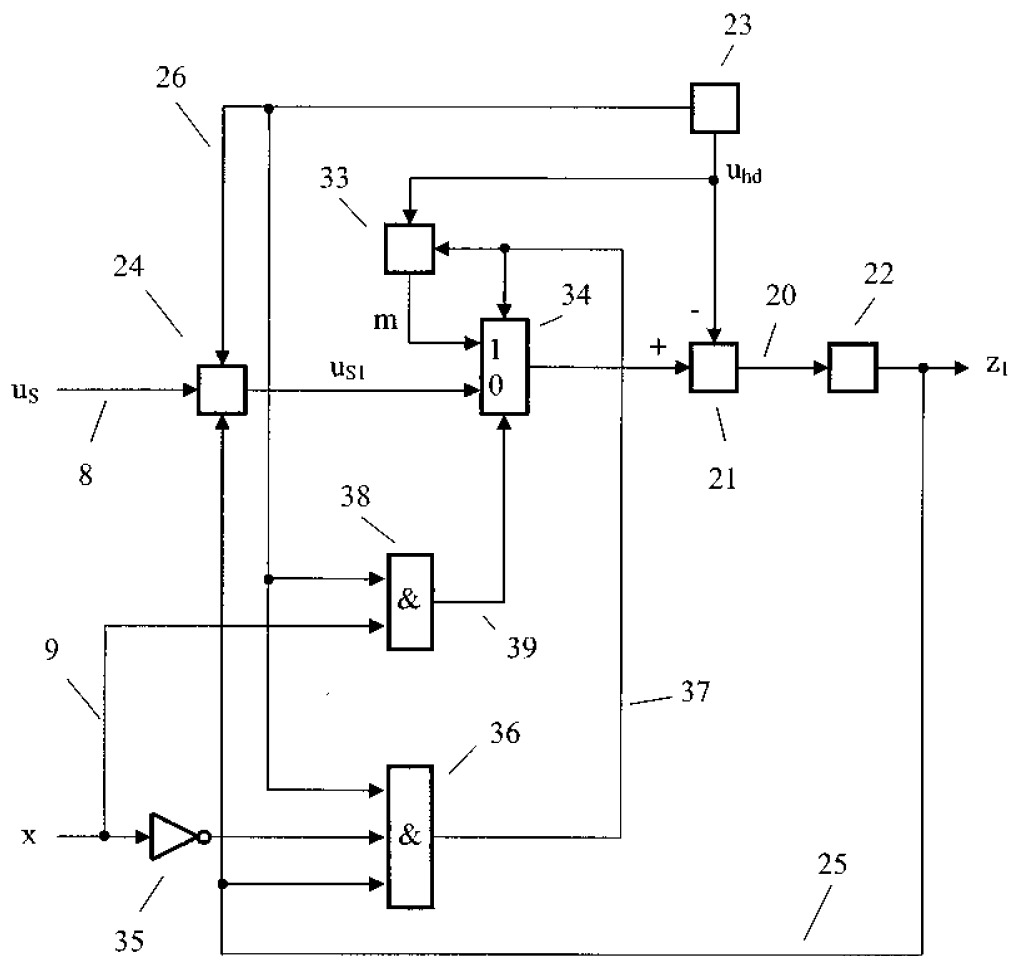


Fig.3

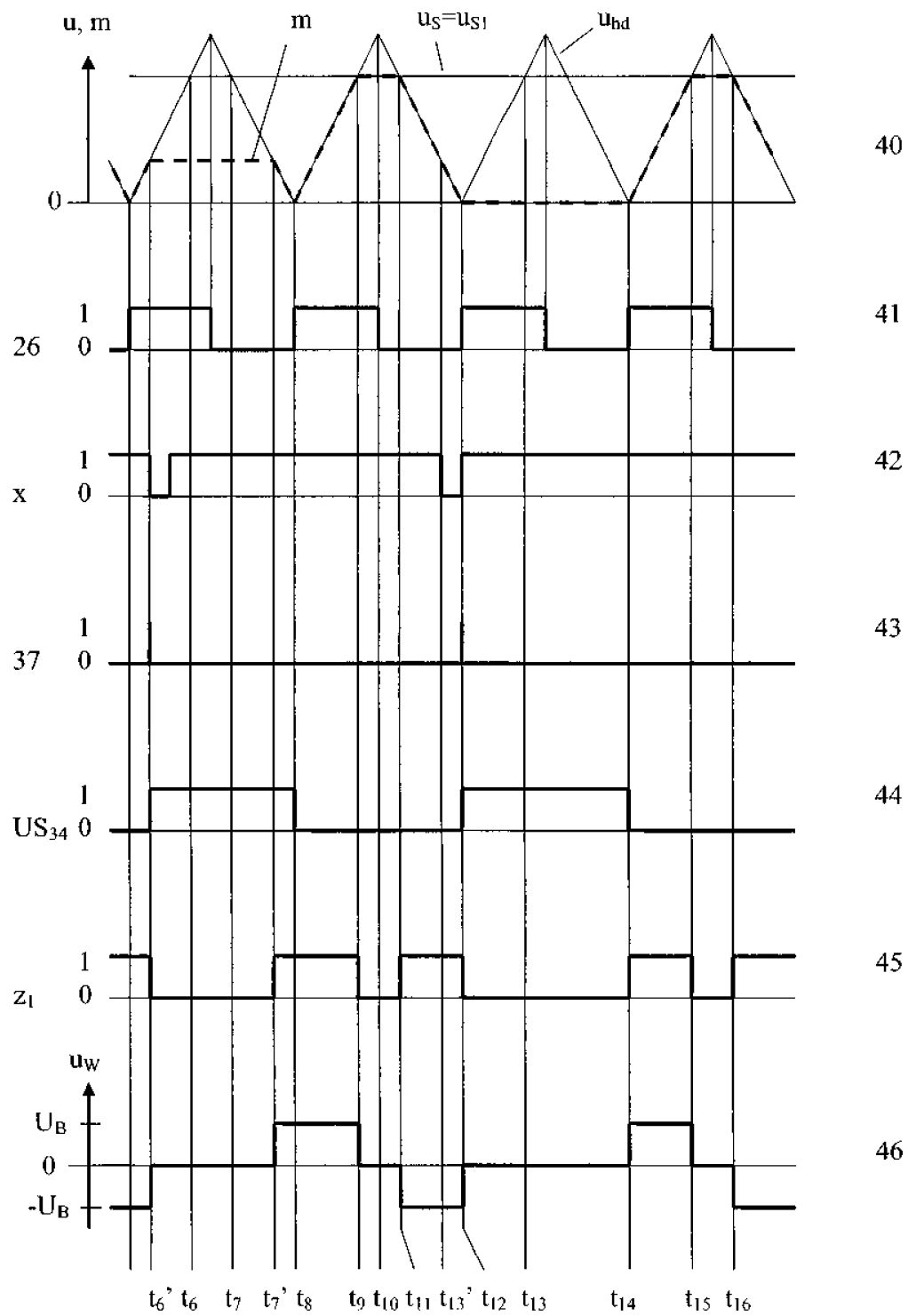


Fig.4

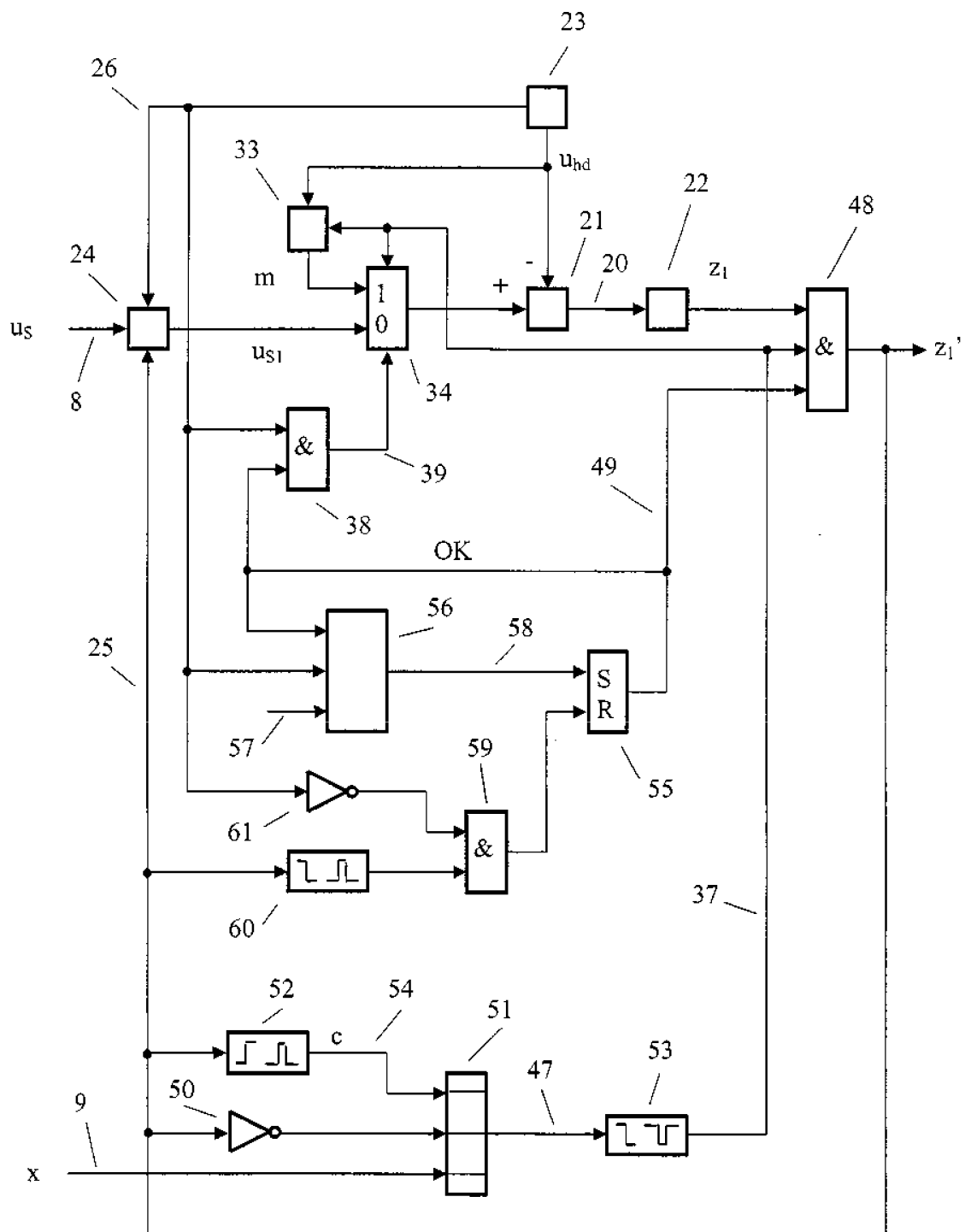


Fig.5

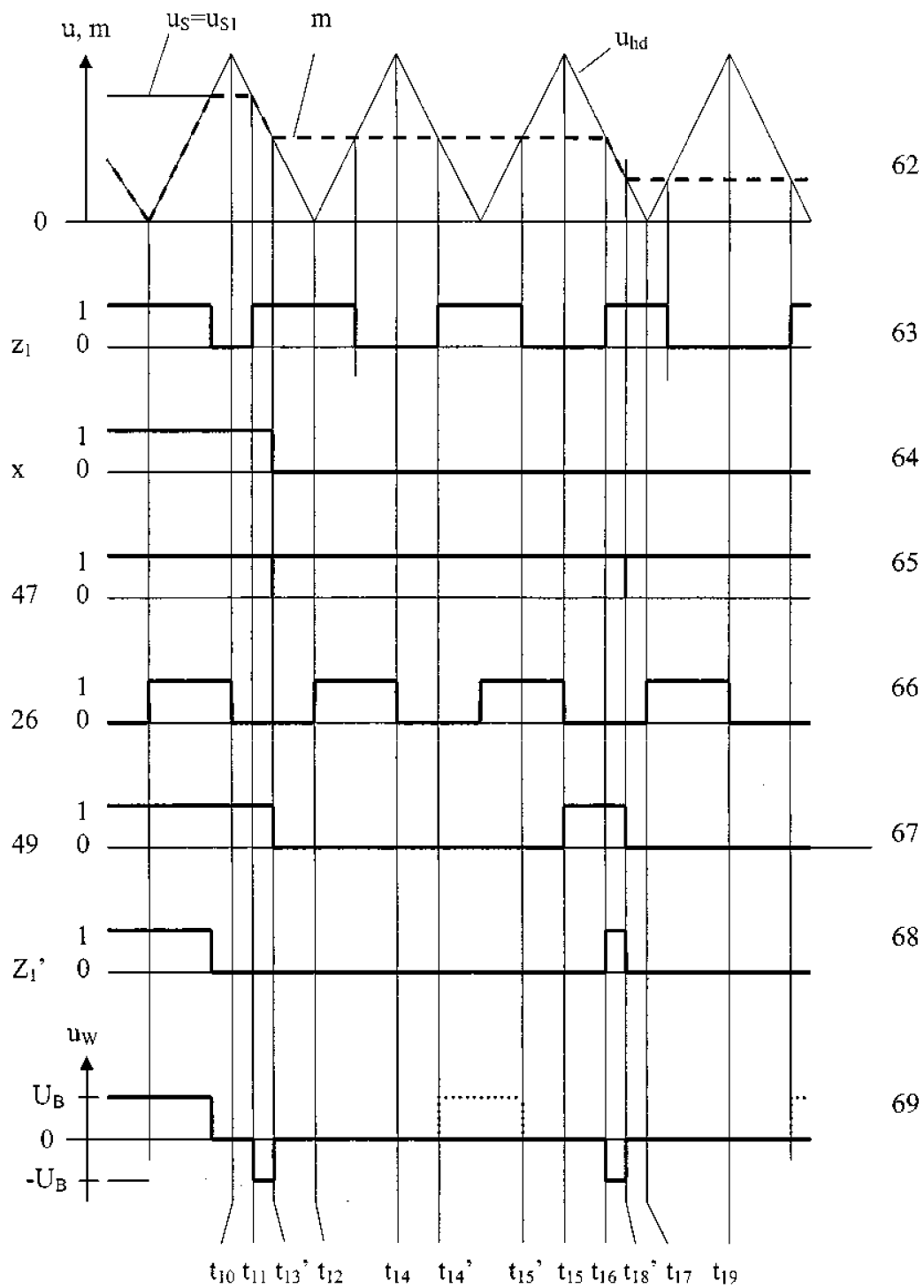


Fig.6

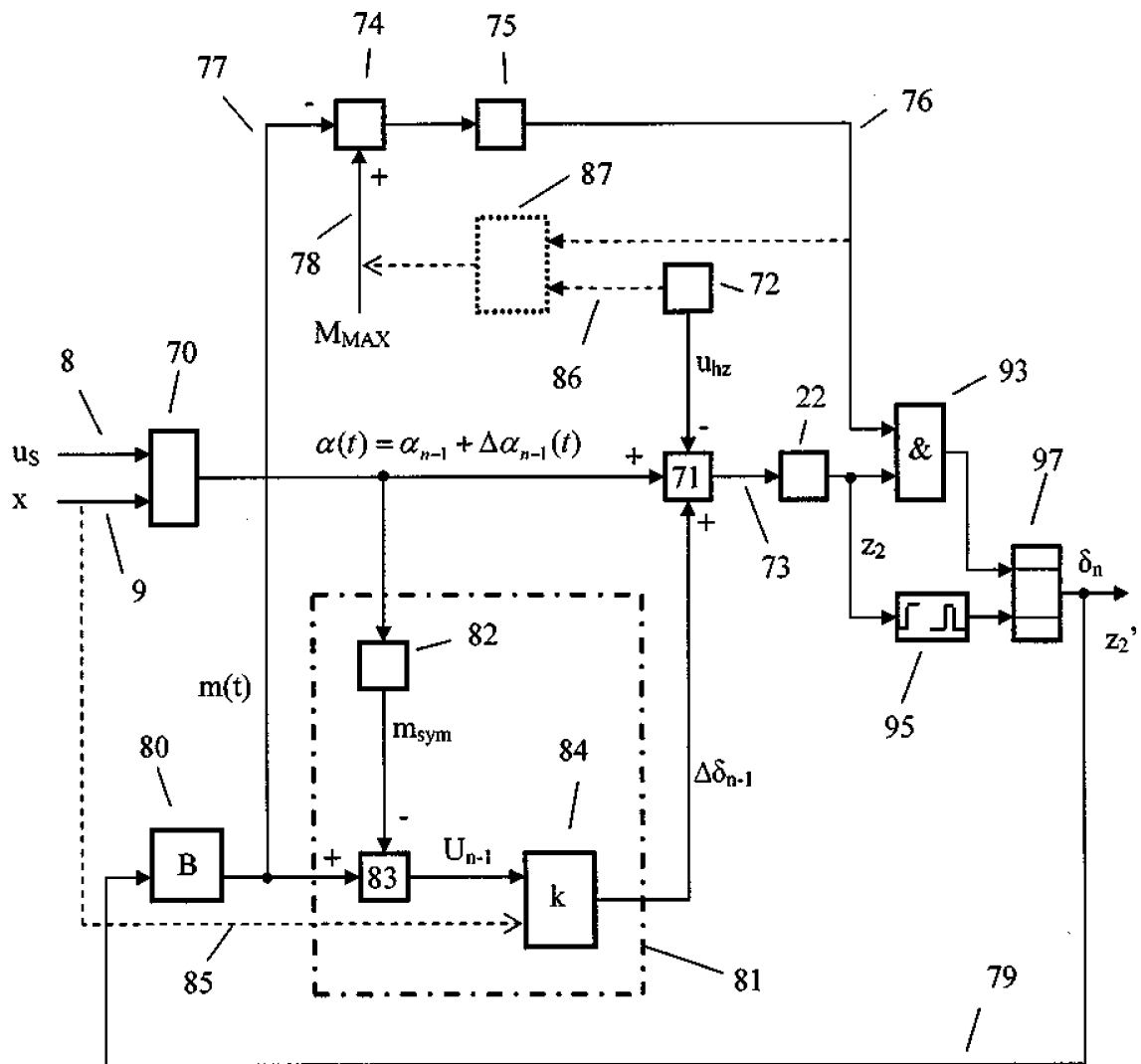


Fig.7

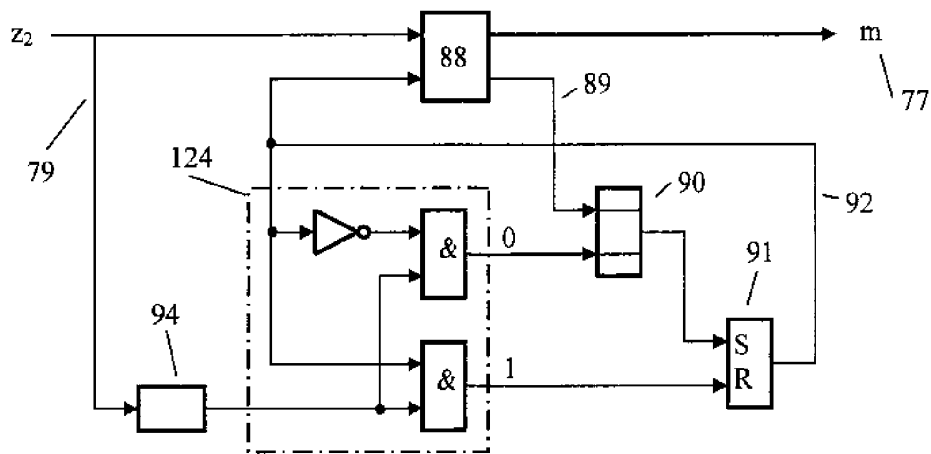


Fig.8

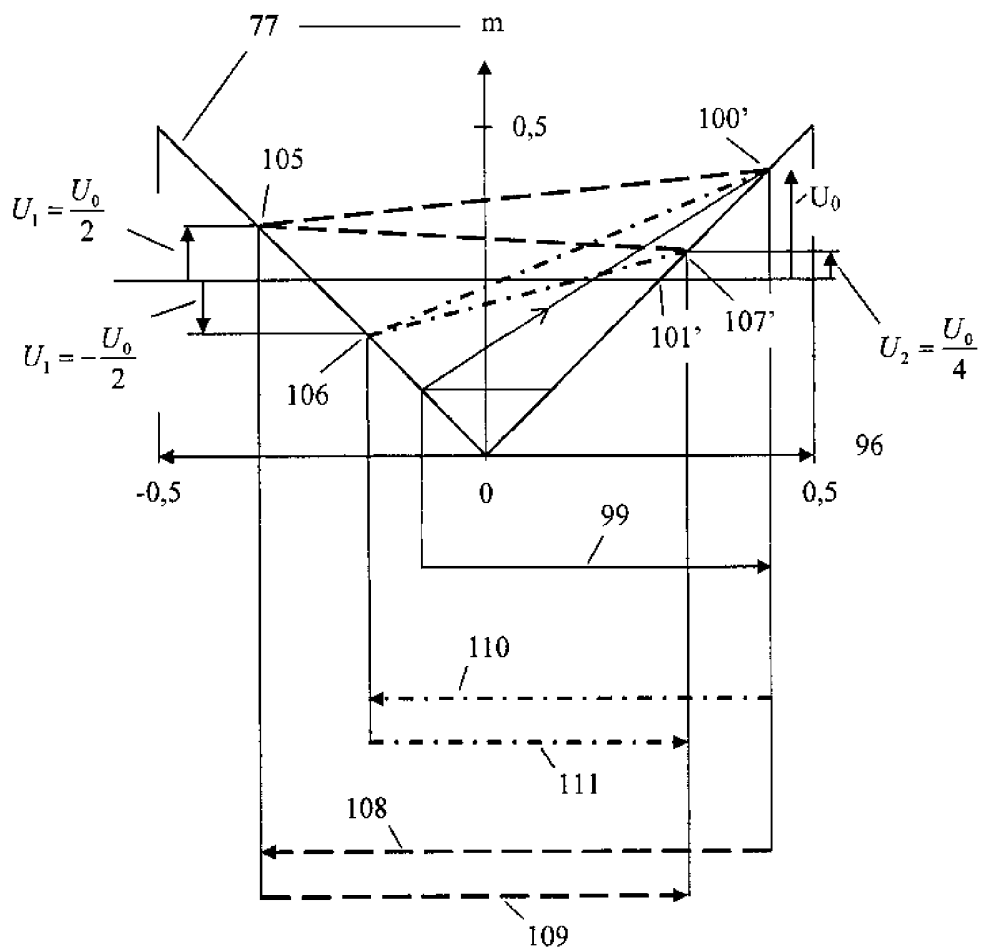
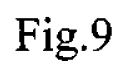
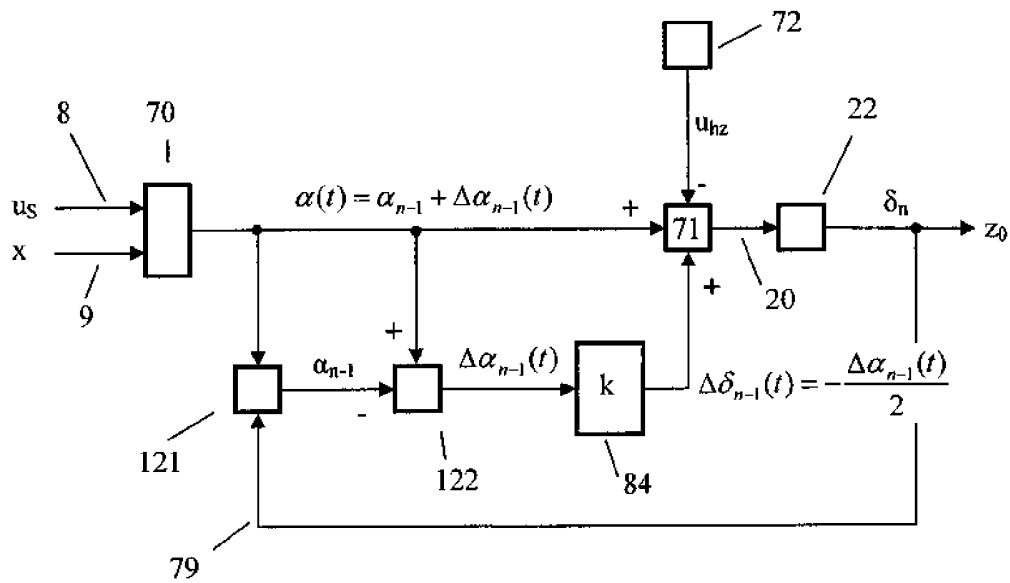
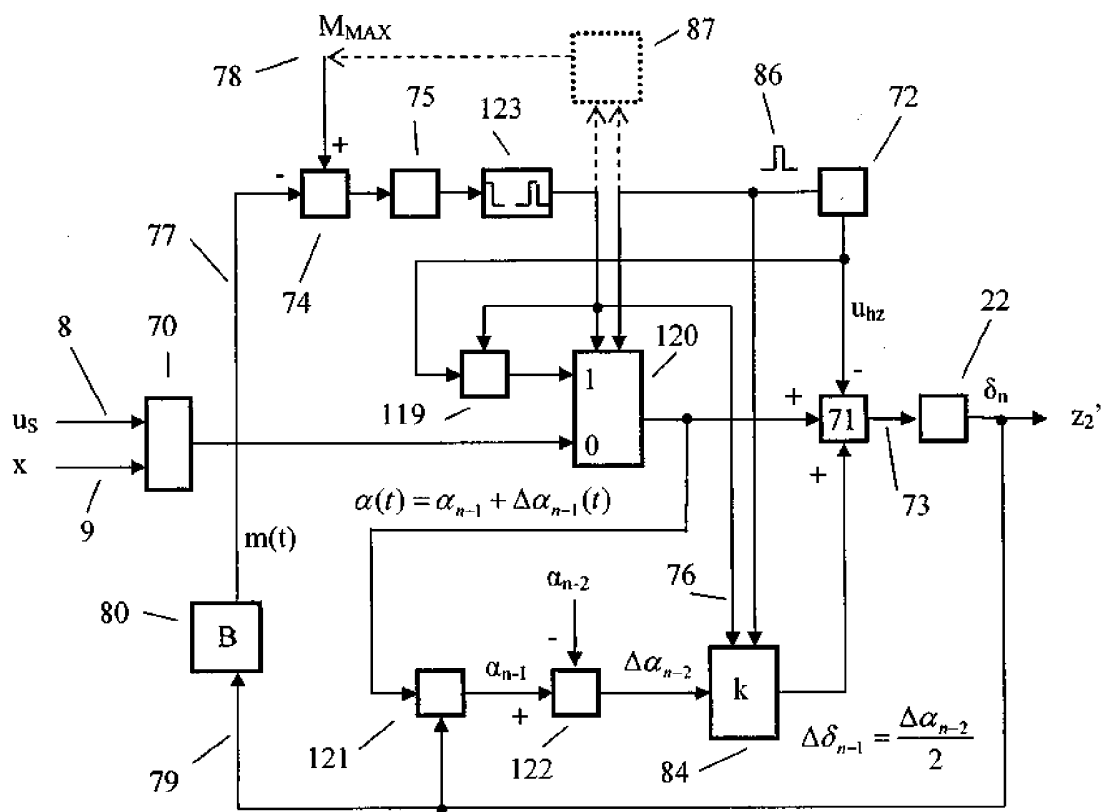


Fig.10





a.



b.

Fig.11

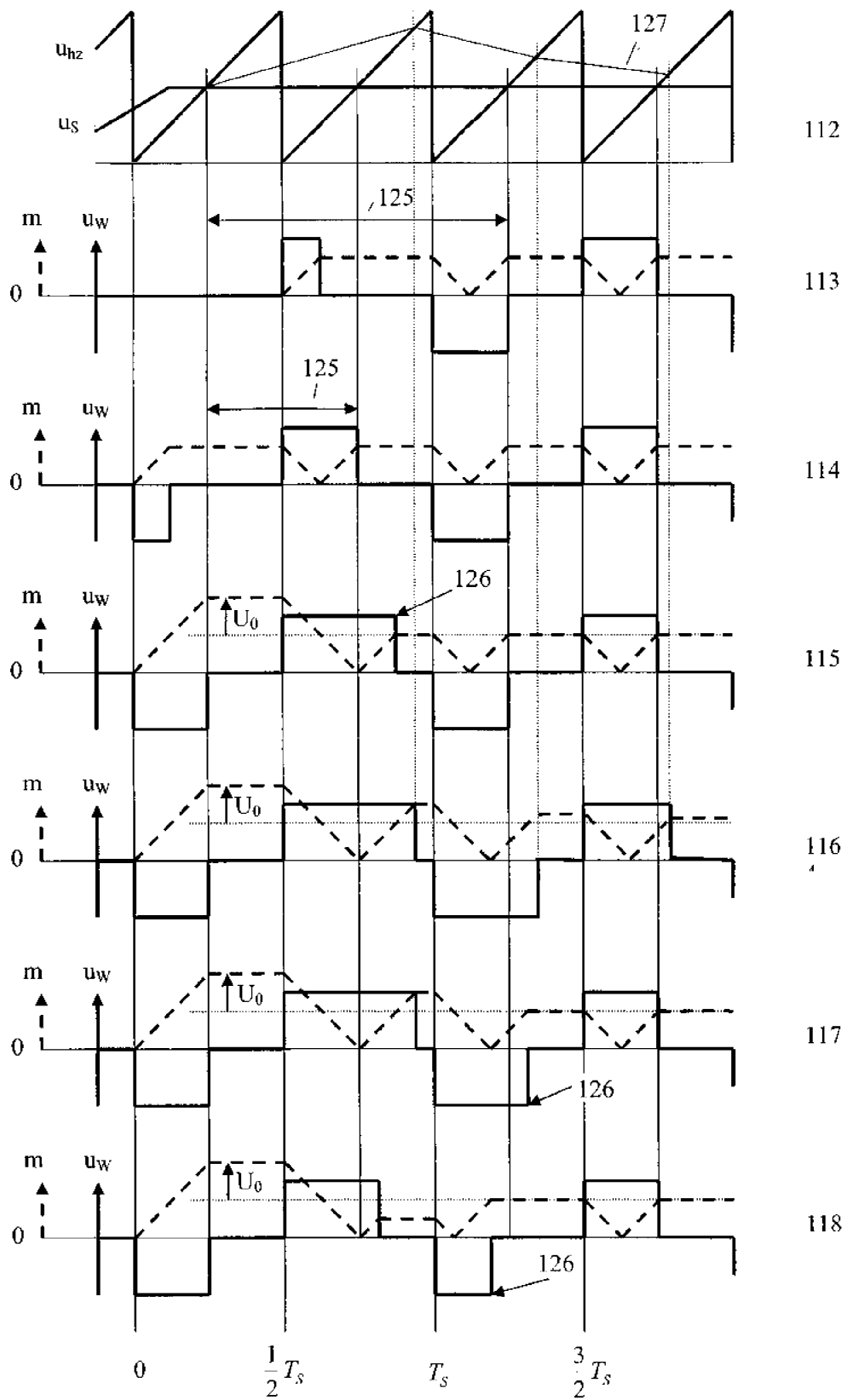


Fig.12