



(12)

# PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 1032/95

(51) Int.C1.<sup>6</sup> : H02J 3/38  
G05F 1/455, H02M 1/08

(22) Anmeldetag: 16. 6.1995

(42) Beginn der Patentdauer: 15. 1.1999

(45) Ausgabetag: 27. 9.1999

(56) Entgegenhaltungen:

DE 3231945A DE 3840806A

(73) Patentinhaber:

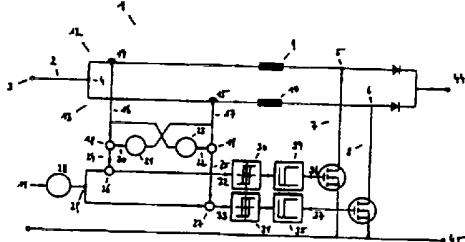
KOLAR JOHANN W.  
A-1050 WIEN (AT).

(72) Erfinder:

KOLAR JOHANN W.  
WIEN (AT).  
MOHAN NED  
ST. PAUL (US).  
KAMATH GIRISH R.  
MINNEAPOLIS (US).

## (54) SYNCHRONISATION DER SCHALTZUSTANDSÄNDERUNGEN PARALLELGESCHALTETER ZWEIPUNKT-STROMGEREGELTER LEISTUNGSELEKTRONISCHER SYSTEME BEI DEFINIERTER PHASENVERSETZUNG

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Steuerung parallelgeschalteter zweipunkt-stromgeregelter leistungselektronischer Teilsysteme (12) und (13) wobei jedes Teilsystem eine stromeinprägende Induktivität (9) bzw. (10), eine elektronische Schaltvorrichtung (7) bzw. (8) und ein, den Schaltzustand dieser Schaltvorrichtung festlegendes Hystereseschaltglied (30) bzw. (31) aufweist. Die Ansteuerung der elektronischen Schaltvorrichtungen erfolgt gegenüber dem Ausgang der Hystereseschaltglieder (30) und (31), für beide Teilsysteme gleich, über Totzeitelemente (34) und (35) verzögert. Durch symmetrische Kopplung (21) und (22) der Teilsysteme (12) und (13) wird gegenüber ungekoppeltem Betrieb eine Abänderung des Signalverlaufes der am Eingang der Hystereseschaltglieder auftretenden Regelabweichungen derart erreicht, daß nach Umschaltung des voreilenden Systems die Änderungsgeschwindigkeit des am Eingang des Hystereseschaltgliedes des nacheilenden Systems auftretenden Signals erhöht/verringert und damit für das nacheilende System nach Ablauf der Zeitverzögerung zwischen Umschalten des Hystereseschaltgliedes und Ansteuerung der zugeordneten elektronischen Schaltvorrichtung ein, gegenüber der Regelabweichung des voreilenden Systems höherer/geringerer, einer Erhöhung/Verringerung der Phasenversetzung der Schaltzustandsänderung der Teilsysteme entsprechender Wert der Regelabweichung vorliegt und somit die Phasenversetzung an jeder Schaltstufe bis zum Erreichen des gegenphasigen/gleichphasigen Betriebes weiter erhöht/verringert wird bzw. eine Synchronisation der Schaltzustandsänderungen der Teilsysteme in Gegenphase/ein phasensynchroner Betrieb der Teilsysteme vorliegt wobei die Teilströme im zeitlichen Mittel entlang eines, durch übergeordnete Systemteile oder Einstellvorrichtungen vorgegebenen Sollwertes (11) geführt werden.



AT 405 584 B

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Synchronisation zweipunkt-stromgeregelter parallel arbeitender Teilsysteme ein- oder mehrphasiger leistungselektronischer Energieumformer, wie es im Oberbegriff des Patentanspruches 1 beschrieben ist.

- Zur Realisierung leistungselektronischer Energieumformer hoher Leistung wird bei Forderung nach hoher Leistungsdichte und hohem Wirkungsgrad vorteilhaft eine Parallelschaltung phasenversetzt getakteter Teilsysteme herangezogen. Durch

$$\frac{2\pi}{n}$$

- schaltfrequent phasenversetzte Taktung von  $n$  Teilsystemen wird die Frequenz des Rippels des, als Summe der Teilströme resultierenden Gesamtstromes um einen Faktor  $n$  erhöht bzw. eine teilweise Auslöschung der schaltfrequenten Harmonischen der Teilströme erreicht, womit auch eine Verringerung der Schwankungsbreite des Rippels des Gesamtstromes verbunden ist. Bei gegenüber  $n = 1$  (Anordnung nur eines Systems oder phasensynchrone Taktung der Teilsysteme) gleichem Rippel des Gesamtstromes kann somit die Grund-Taktfrequenz der Teilsysteme verringert und aufgrund der damit gegebenen Verringerung der Schaltverluste der Wirkungsgrad der Energieumformung erhöht oder, bei Beibehaltung der Taktfrequenz der Induktivitätswert der, die Teilströme einprägenden Induktivitäten der Teilsysteme und der Aufwand zur Filterung schaltfrequenter Anteile des Gesamtstromes vermindert und damit bei gleichem Wirkungsgrad eine Erhöhung der Leistungsdichte des Energieumformers erreicht werden.

Zur Regelung der Teilsysteme werden nach dem derzeitigen Stand der Technik Steuerverfahren mit konstanter Taktfrequenz herangezogen da die Bindung an ein festes Taktraster eine einfache Synchronisation und definierte Phasenversetzung der Teilsysteme erlaubt. Das Ausgangssignal eines, die Regelabweichung des Gesamtstromes erfassenden, lokal mittelnden und dynamisch bewertenden Stromregelverstärkers wird dabei im einfachsten Fall durch Verschneidung mit entsprechend phasenversetzten Dreiecksignalen in pulsbreitenmodulierte phasenversetzte Ansteuersignale der elektronischen Schaltvorrichtungen der Teilsysteme umgesetzt. Grundsätzlich liegt damit jedoch ein Spannungs- und nicht ein stromeinprägendes Steuerverfahren vor. Zur Sicherstellung einer symmetrischen Stromaufnahme der Teilsysteme ist demgemäß ein eigener Regelkreis vorzusehen. Als weitere Nachteile sind die aufgrund der Mittelung der Stromregelabweichung nur begrenzte Dynamik der Stromregelung und damit verbunden das Erfordernis einer getrennten Überstromüberwachung bzw. allgemein die relativ hohe Komplexität der Steuerung zu nennen.

Eine direkte Regelung, Symmetrierung und Begrenzung der Teilströme kann mit geringem schaltungs-technischem Aufwand nur durch Anwendung eines direkt stromeinprägenden Steuerverfahrens, beispielsweise einer Zweipunktstromregelung, erreicht werden, wobei die sich dabei prinzipbedingt frei einstellende Schaltfrequenz allerdings keine unmittelbare Möglichkeit einer Synchronisation der Teilsysteme bei definierter Phasenversetzung bietet.

In der DE-OS 3231945 wird ein aus zwei Teilwechselrichtern gebildeter Wechselrichter beschrieben, wobei zwischen den Ausgängen der Teilwechselrichter eine Last-(Induktivität) angeordnet ist. Jeder der, gleichspannungsseitig an einer gemeinsamen Spannungsquelle liegenden Teilwechselrichter (elektronischen Umschalter) wird durch eine eigene Komparatorstufe angesteuert. Ziel ist hiebei die Führung des Laststromes mit möglichst geringer Schwankungsbreite bei vorgegebener Frequenz oder minimaler Frequenz bei vorgegebener Schwankungsbreite. Dies erfordert eine Einbindung der Freilaufzustände (Spannung 0 an der Last) in die Schaltzustandsfolge des Systems, die durch eine zeitlich konstante gegenseitige Verschiebung der Toleranzbänder erreicht wird. Auch der, der vorliegenden Erfindung zugrundeliegende leistungselektronische Energieumformer wird durch zwei, gleichspannungsseitig parallel geschaltete elektronische Umschalter gebildet, zwischen deren Ausgängen stromeinprägende Induktivitäten liegen. Allerdings zielt die Erfindung nicht auf die Minimierung des Rippels des Stromes in den Induktivitäten; vielmehr soll der Rippel des, in einer, für die Vorrichtung nach DE-OS 3231945 nicht vorhandenen Zuleitung zum Verbindungspunkt der Induktivitäten fließenden Gesamtstromes minimiert werden. Aufgrund dieses Unterschiedes der Schaltungstopologien und der Regelaufgaben kann das in der DE-OS 3231945 beschriebene Verfahren in Verbindung mit der vorliegenden Erfindung grundsätzlich keine Anwendung finden.

In der DE-OS 3840806 wird eine Schaltungsanordnung zur Statuskontrolle, Sollwertvorgabe und Informationsverteilung zwischen parallelgeschalteten Pulsumrichtersystemen beschrieben, wobei jedoch keine konkrete Ausführung der Regelung angegeben wird. Die Informationsaufbereitung erfolgt zentral, Hauptpunkte sind die Überwachung von Grenzwerten und die symmetrische Aufteilung eines Sollwertes auf die parallelen Teilsysteme. Im Gegensatz zur vorliegenden Erfindung steht die Aufteilung des Gesamtleistungsflusses im Vordergrund, der zeitliche Ablauf der Umschaltvorgänge der Systeme, bzw. die Bildung

des Rippels der Ausgangsströme wird nicht näher ausgeführt. Die Teil-Stromrichtersysteme werden nur als Funktionseinheiten betrachtet, es wird kein Stromregelverfahren näher behandelt. Damit wird auch eines der Hauptziele der vorliegenden Erfindung, nämlich die Synchronisation von parallelgeschalteten Stromrichtern durch entsprechenden Eingriff in die Bildung der Ansteuersignale, nicht berührt.

- 5 Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein Verfahren zur Synchronisation der Schaltzustände von parallelgeschalteten zweipunkt-stromgeregelter leistungselektronischer Systeme oder Teilsysteme bei definierter Phasenversetzung zu schaffen.

Dies wird erfindungsgemäß durch die kennzeichnenden Merkmale des Patentanspruches 1 erreicht. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind den Unteransprüchen zu entnehmen.

- 10 Grundgedanke der Erfindung ist, durch Kopplung der Teilsysteme, also steuerungstechnische Kopplung oder/und schaltungstechnische Kopplung der Leistungsteile der Teilsysteme, gegenüber ungekoppeltem Betrieb eine Abänderung des Signalverlaufes der am Eingang der, die Zweipunktregelung realisierenden Hystereseschaltglieder der Teilsysteme auftretenden Stromregelabweichungen derart vorzunehmen, daß bei jedem Umschaltvorgang eine Erhöhung oder Verringerung einer bestehenden Phasendifferenz der am 15 Ausgang der Hystereseschaltglieder gebildeten Ansteuersignale der elektronischen Schaltvorrichtungen der Teilsysteme resultiert wobei die Breite der Hysterese der Schaltglieder nicht notwendigerweise einen zeitlich konstanten Wert aufweisen muß. Der Leistungsteil eines Teilsystems wird dabei in bekannter Weise allgemein durch eine, von einem (im weiteren als Verzweigungspunkt bezeichneten) Schaltungspunkt mit eingravierter Spannung abzweigende, gegen einen Schaltungspunkt mit, durch die Stromregelung 20 steuerbarem Potential geschaltete Induktivität gebildet, wobei die Einprägung der Spannung dieses, im weiteren als Wurzelpunkt bezeichneten Schaltungspunktes über eine elektronische Schaltvorrichtung erfolgt, deren Steuereingang an den Ausgang des Hystereseschaltgliedes der zugeordneten Zweipunktregelung gelegt wird. Abhängig vom Schaltzustand bzw. dem Potential der an den Wurzelpunkt durchgeschalteten Spannung tritt eine Erhöhung oder Verringerung des Stromes in der Induktivität auf, womit bei Anlegen der 25 Regelabweichung des Teilstromes an den Eingang des Hystereseschaltgliedes eine Zweipunktregelung des Teilstromes realisiert wird. Die einzelnen, jedenfalls am Schaltungspunkt mit eingravierter Spannung parallel liegenden Teilsysteme weisen vorteilhaft identische Struktur, gleiche Breite der Schalthysterese gleichen Stromsollwert und gleiche Niveaus der Wurzelpunktsspannungen, jedoch nicht zwingend gleichen Sollwert auf.
- 30 Bei Anordnung von zwei Teilsystemen wird nun ein gegenphasiger, den Riegel des Gesamtstromes verringender Betrieb ausgehend von einer geringfügigen anfänglichen Phasenversetzung der Taktung der Teilsysteme dadurch erreicht, daß die Ansteuersignale der elektronischen Schaltvorrichtungen gegenüber den Ausgangssignalen der Hystereseschaltglieder bzw. den Durchschreiten der Schaltschwellen zeitlich verzögert werden und nach Umschaltung des voreilenden Systems über die (symmetrische, stationäre oder nur für schaltfrequente Vorgänge wirksame) Kopplung der Teilsysteme die Änderungsgeschwindigkeit des an den Eingang des Hystereseschaltgliedes des nacheilenden Systems geführten Signals für den folgenden Zeitabschnitt unterschiedlichen Schaltzustandes der Teilsysteme erhöht wird, womit, da die Umschaltung jeweils erst nach Ablauf der bei Durchschreiten einer Schaltschwelle gestarteten Verzögerungszeit erfolgt, im Umschaltzeitpunkt des nacheilenden Systems ein höherer Wert der Stromregelabweichung erreicht und demgemäß die nachfolgende Schaltschwelle des Hystereseschaltgliedes später durchschritten wird, was einer Erhöhung der Phasendifferenz der Ansteuersignale der elektronischen Schaltvorrichtungen der Teilsysteme bzw. einer Erhöhung der Phasendifferenz der Rippelanteile der Teilströme entspricht. Wird nach mehreren Umschaltvorgängen aufgrund der bei jedem Umschaltvorgang zunehmenden Phasendifferenz eine gegenphasige Taktung der Teilsysteme erreicht, werden durch die Stromregelabweichungen der 40 Teilsysteme zyklisch aufeinanderfolgend jeweils gegenüberliegende Schaltschwellen durchschritten, womit abschnittsweise nach Umschaltung eines Teilsystems bis zur Umschaltung des anderen Teilsystems stets ein gleicher Schaltzustand beider Systeme vorliegt, damit entsprechend den vorstehenden Ausführungen keine weitere Änderung der Phasenbeziehung der Schaltsignale erfolgt und somit ein Einrasten der Teilsysteme in Gegenphase gegeben ist.
- 45 Ein gleichphasiger Betrieb der Teilsysteme kann einfach durch Änderung des Vorzeichens der Kopplung der Teilsysteme erreicht werden. Eine bestehende Phasendifferenz wird in diesem Fall bei jedem Umschaltvorgang entsprechend der dann gegebenen Verringerung der Änderungsgeschwindigkeit des Eingangssignales des Hystereseschaltgliedes des nacheilenden Systems nach Umschaltung des voreilenden Systems stetig verringert bis frequenz- und phasensynchroner Betrieb beider Teilsysteme vorliegt.

- 50 Eine Anwendung des Verfahrens bei einer höheren Anzahl paralleler Systeme kann einfach durch sinngemäße Weiterführung des am Beispiel von zwei parallelen Systemen dargestellten Grundprinzips der Erfindung erfolgen, wobei grundsätzlich die Möglichkeit einer direkten Kopplung sämtlicher Teilsysteme oder einer Kopplung von jeweils durch Zusammenfassung von zwei oder mehreren Teilsystemen gebildeten

Untergruppen besteht. Bei Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens bei mehrphasigen Stromrichterschaltungen sind die einer Phase zugeordneten Teile der Parallelsysteme als Parallelsystem im vorstehenden Sinne zu betrachten, allerdings kann für eine Optimierung des Systemverhaltens auch eine Kopplung zwischen unterschiedlichen Phasen zugeordneten Systemteilen erfolgen.

- 5 Eine vorteilhafte schaltungstechnische Realisierung des erfindungsgemäßen Verfahrens beschreibt der Kennzeichenteil des Patentanspruches 2. Es wird hiebei wieder auf zwei parallele Teilsysteme Bezug genommen.

Die Kopplung der Teilsysteme wird dabei dadurch erreicht, daß in der, den Verzweigungspunkt mit einer Klemme eines übergeordneten Schaltungsteiles verbindenden Leitung eine für alle Systeme gemeinsame Kopplungsinduktivität angeordnet wird. Weiters werden zwischen den, die positiven und negativen Schaltschwellen der Zweipunktregelungen realisierenden Hystereseschaltgliedern und den Ansteuereingängen der elektronischen Leistungsschalter Signalverzögerungsglieder (im einfachsten Fall gebildet durch ein Tiefpaßelement mit nachgeordneter Schmitt-Trigger-Stufe) eingefügt. Die Umschaltung der elektronischen Schaltvorrichtung eines Teilsystems und damit die Umkehr des Vorzeichens der Stromänderung dieses Teilsystems erfolgt somit gegenüber dem Durchschreiten der entsprechenden Schaltschwelle um die Verzögerungszeit verschoben.

Weisen nun beide Teilsysteme entsprechend einer nur geringen Phasenverschiebung der Rippelanteile der Teilströme den gleichen, z.B. eine Abnahme der gegen die Verzweigungspunkte positiv gezählten Ströme bewirkenden Schaltzustand auf, wird nun nach Umschaltung des voreilenden Teilsystems aufgrund der damit resultierenden Zunahme des Teilstromes das Potential des Verzweigungspunktes abgesenkt und damit die Änderungsgeschwindigkeit des nach wie vor abnehmenden Stromes des nacheilenden Teilsystems erhöht. Innerhalb der nach Durchschreiten der negativen Schaltschwelle laufenden Verzögerungszeit wird damit eine gegenüber dem Wert des voreilenden Systems höhere Regelabweichung erreicht, womit nach erfolgter Umschaltung des nacheilenden Systems die positive Schaltschwelle entsprechend später erreicht und die gegenüber der Schaltzustandsänderung des voreilenden Systems gemessene Phasendifferenz vergrößert wird. Bei gleichem Schaltzustand der Teilsysteme weisen beide Teilströme gleiche Änderungsgeschwindigkeit auf. Wird zufolge der Erhöhung der Phasendifferenz bei jedem Umschaltvorgang letztlich ein gegenphasiger Betrieb der Teilsysteme erreicht, werden durch die Teilströme zeitlich aufeinanderfolgend jeweils ungleichnamige Schaltschwellen durchschritten, womit zwischen diesen Schaltzustandsänderungen beide Systeme stets den gleichen Schaltzustand aufweisen, damit der Schnitt einer Schaltschwelle für beide Teilsysteme stets mit gleicher Steigung erfolgt und die phasenverschiebende Wirkung zu Null wird bzw. die Teilsysteme in Gegenphase eingerastet verbleiben.

Eine vorteilhafte Variante der schaltungstechnischen Realisierung des erfindungsgemäßen Verfahrens nach Patentanspruch 2 beschreibt der Patentanspruch 3.

35 Die Kopplungsinduktivität wird dabei als Hauptinduktivität einer magnetischen Kopplung der Induktivitäten der Teilsysteme realisiert, wobei, wie über Interpretation der durch Verschaltung der Kopplungsinduktivität und der Induktivitäten der Teilsysteme gebildeten Schaltungsstruktur nach Patentanspruch 2 als Ersatzschaltbild der magnetischen Kopplung die funktionstechnische Äquivalenz beider Realisierungen umittelbar einzusehen ist. Als Vorteil dieser Anordnung ist neben der Verringerung der Bauelementanzahl 40 auch die Möglichkeit der freien Festlegung des Vorzeichens des Kopplungskoeffizienten zu nennen. Es kann abhängig vom Wicklungssinn der Induktivitäten der Teilsysteme die Anordnung somit für eine Synchronisation der Teilsysteme in Phase oder in Gegenphase herangezogen werden.

45 Eine weitere vorteilhafte schaltungstechnische Realisierung des Verfahrens nach Patentanspruch 1 wird durch den Patentanspruch 4 beschrieben.

45 Im Gegensatz zu Patentanspruch 2 (bzw. einer direkten schaltungstechnischen Kopplung der Leistungs- teile der Teilsysteme) erfolgt die Kopplung der Teilsysteme nach Patentanspruch 4 rein steuerungstechnisch. Der zum Vergleich mit dem Sollwert eines Teilstromes herangezogene Stromwert wird hiezu als gewichtete Summe der Meßwerte beider Teilströme derart gebildet, daß bei Forderung nach Synchronisation der Teilsysteme in Gegenphase und ausgehend von gleichem Schaltzustand der Systeme die Änderung des Schaltzustandes eines Systems die Änderungsgeschwindigkeit des Eingangssignales des zugeordneten Hystereseschaltgliedes bzw. in Verbindung mit den in den Ansteuerleitungen der elektronischen Schalter liegenden Verzögerungselementen die Stromregelabweichung des diesen Schaltzustand noch beibehaltenden, nacheilenden Systems erhöht wird, womit wieder bei jeder Umschaltung des nacheilenden Systems die Phasenverschiebung der Teilsysteme erhöht wird.

55 Die Erfindung sowie weitere vorteilhafte Ausgestaltungen werden im weiteren anhand eines Ausführungsbeispieles und charakteristischer Signalverläufe näher erläutert. Es zeigt

Fig.1 die Grundstruktur einer vorteilhaften schaltungstechnischen Realisierung des erfindungsgemäßen Steuerverfahrens bei rein steuerungstechnischer Kopplung der Teilsysteme in Verbindung mit einer sche-

matischen Darstellung eines, durch Parallelschaltung von zwei Teilsystemen gebildeten, zweipunkt-stromge-regelten leistungselektronischen Energieumformers bekannter Topologie und

Fig.2 einen Zeitausschnitt der am Eingang der Hystereseschaltglieder der in Fig.1 gezeigten, erfindungsgemäß gesteuerten Schaltung auftretenden Signalverläufe und der zugeordneten Ansteuersignale der elektronischen Schaltvorrichtungen der Teilsysteme wobei ein Vorzeichen der Kopplung der Teilsysteme derart vorausgesetzt wird, daß letztendlich eine Synchronisation der Teilsysteme in Gegenphase erfolgt.

Die Grundfunktion des in Fig.1 dargestellten, allgemein eine Teilfunktion eines übergeordneten leistungselektronischen Systems ausführenden Schaltungsteiles 1 besteht allgemein darin, die Ströme in zwischen einem, über eine Verbindungsleitung 2 mit einem Punkt eingeprägten Potentials 3 der übergeordneten Schaltung verbundenen Verzweigungspunkt 4 angeordneten, mit den, dem Verzweigungspunkt abgewandten Klemmen an die Wurzelpunkte 5 und 6 elektronischer Schaltvorrichtungen 7 und 8 geführten Induktivitäten 9 und 10 entsprechend einem, durch die Steuerung des Gesamtsystems vorgegebenen oder durch externe Einstellvorrichtungen vorgebbaren Sollwert 11 zu führen und die Teilsysteme 12 und 13 bei gegenphasiger Taktung zu synchronisieren. Es werden hiezu die Ströme in den Induktivitäten 9 und 10 durch Strommeßvorrichtungen 14 und 15 erfaßt und die Meßsignale 16 und 17 an Summierstellen 18 und 19 geführt. Der zweite Eingang 20 der Summierstelle 18 wird durch das über ein Filterelement 21 geführte Strommeßsignal 17 des Teilsystems 13 und der zweite Eingang 22 der Summierstelle 19 durch das über ein Filterelement 23 geführte Strommeßsignal 16 des Teilsystems 12 gebildet, und damit eine symmetrische Kopplung der Teilstromregelungen bzw. der Teilsysteme erreicht. Die Ausgangssignale 24 und 25 der Summierstellen 18 und 19 werden Soll-Ist-Vergleichsstellen 26 und 27 zugeführt an deren zweite Eingänge ein über ein Filterelement 28 vom Sollwert 11 abgeleitetes Signal 29 gelegt wird, womit die an die Eingänge von Hystereseschaltgliedern 30 und 31 geführten Ausgangssignale 32 und 33 der Elemente 26 und 27 einer gewichteten Summe der Regelabweichungen der Teilströme entsprechen und somit die Steuerung jedes Teilsystems erfindungsgemäß durch den Verlauf beider Teilströme bestimmt wird. Die 25 Teilstromregelschleifen werden durch Anlegen der Ausgangssignale der Hystereseschaltglieder 30 und 31 über Zeitverzögerungen 34 und 35 an die Steuereingänge 36 und 37 der elektronischen Schaltvorrichtungen 7 und 8 geschlossen. Durch die elektronischen Schaltvorrichtungen kann dabei jeweils ein gegenüber Punkt 3 positives Potential aufweisender Punkt 44 oder ein gegenüber 3 negatives Potential aufweisender Punkt 45 des übergeordneten Schaltungsteiles mit den Wurzelpunkten 5 und 6 verbunden werden, womit 30 über entsprechende Ansteuerung der Schaltvorrichtungen eine Erhöhung oder Verringerung der Teilströme vorgenommen bzw. diese im zeitlichen Mittel dem Verlauf des Sollwertes 11 nachgeführt werden können.

Zur Veranschaulichung der Funktion der Schaltung ist in Fig.2 ein Ausschnitt des zeitlichen Verlaufes der Eingangssignale 32 und 33 der Hystereseschaltglieder und der zugeordneten Ansteuersignale 36 und 37 der elektronischen Schaltvorrichtungen dargestellt. Weiters sind in Fig.2 die positive Schaltschwelle 38 und die negative Schaltschwelle 39 der Hystereseschaltglieder 30 und 31 durch strichlierte Linien eingetragen. Liegt nun für  $t = 0$  ein Schaltzustand der elektronischen Schaltvorrichtungen 7 und 8 derart vor, daß die Regelabweichungen 32 und 33 verringert werden, wobei aufgrund der Symmetrie der Kopplung der Teilsysteme eine gleiche Änderungsgeschwindigkeit der Signale 32 und 33 auftritt, wird im Zeitpunkt  $t_1 - T_t$  das voreilende Teilsystem 12 die negative Schaltschwelle 39 erreichen, was zu einer Änderung des 40 Schaltzustandes des Hystereseschaltgliedes 30 führt, die allerdings für die elektronische Schaltvorrichtung 7 erst nach Ablauf der Verzögerungszeit 34 (in Fig.2 durch Punktierung eines Intervales  $T_t$  eingetragen), also im Zeitpunkt  $t_1$  bzw. bei einem Pegel 40 des Signales 32 wirksam wird. Durch die Umschaltung der Schaltvorrichtung 7 wird die Regelabweichung 32 in das, durch die positive und negative Schaltschwelle definierte Toleranzband zurückgeführt und zufolge der Änderung des Vorzeiches der Steigung des Signales 32 über die Kopplung 23 die Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung 33 des nacheilenden 45 Teilsystems 13 erhöht, womit innerhalb des durch das Zeitglied 35 bestimmten Verzögerungsintervalls nach Durchschreiten der negativen Schaltschwelle 39 (Zeitpunkt  $t_2$ ) im Zeitpunkt  $t_2 + T_t$  ein gegenüber 40 höherer Betrag 41 des Signales 33 erreicht wird, was, wie bei Analyse weiterer, nachfolgender Umschaltvor-gänge deutlich wird, einer Erhöhung der Phasendifferenz der Ansteuersignale 36 und 37 entspricht. Für 50 eine Beibehaltung der in  $t = 0$  bestehenden Phasenbeziehung müßte eine Umschaltung des Teilsystems 13 bereits in  $t = t_3$  erfolgen, was auf den Verlauf 42 und 43 der Signale 32 und 33 führen würde, jedoch durch die Verzögerung 35 (zugeordnetes Verzögerungsintervall  $[t_2, t_2 + T_t]$  in Fig.2 durch Punktierung hervorgehoben) unterbunden wird.

Die Phasendifferenz der Ansteuersignale 36 und 37 wird bei jedem Umschaltvorgang solange weiter erhöht, bis die Umschaltungen der Teilsysteme zyklisch aufeinanderfolgend an gegenüberliegenden Schaltschwellen erfolgen. Es weisen dann vor jedem Schaltzustandswechsel eines Teilsystems beide Teilsysteme stets den gleichen Schaltzustand auf, womit der Durchtritt der Signale 32 und 33 durch eine Schaltschwelle stets mit gleicher Steigung erfolgt und keine weitere Erhöhung der Phasenversetzung auftritt. Die Teilsyste-

me werden also durch das erfindungsgemäß Zusammenwirken der Kopplung der Stromregelschleifen und der Verzögerung der Ansteuersignale der elektronischen Schaltvorrichtungen in Gegenphase synchronisiert.

Wie ausgehend von vorstehendem unmittelbar einsichtig, kann durch Umkehr der des Vorzeichens der Kopplung bzw. des Vorzeichens der Verstärkung der Elemente 21 und 23 ein gleichphasiger Betrieb der Teilsysteme sichergestellt werden.

5 Teilsysteme sichergestellt werden.  
 Wie eine detaillierte Analyse in Weiterführung der erfindungsgemäßen Grundidee zeigt, kann eine der  
 steuerungstechnischen Kopplung äquivalente gegenseitige Beeinflussung der Teilsysteme auch durch  
 Anordnung einer Kopplungsinduktivität in der Verbindungsleitung 2 erreicht werden. Die Signale 32 und 33  
 weisen in diesem Fall gegenüber der in Fig.1 gezeigten steuerungstechnischer Kopplung identen Verlauf  
 10 auf, was auf ein grundsätzlich gleiches Betriebsverhalten der Anordnung führt, wobei allerdings aufgrund  
 des dann fest vorgegebenen Vorzeichens der Kopplung stets ein gegenphasiger Betrieb der Teilsysteme  
 resultiert. Werden in einem weiteren Schritt die Teilinduktivitäten 9 und 10 magnetisch gekoppelt, wird die  
 15 Kopplungsinduktivität in Form der Hauptinduktivität der Wicklungsanordnung realisiert und kann damit als  
 explizites Schaltelement entfallen, womit die Systemkomplexität verringert und durch Umkehr des Wick-  
 lungssinnes einer der Teilwicklungen auch eine Umkehr des Vorzeichens der Kopplung der Teilsysteme  
 realisiert, bzw. wahlfrei eine Synchronisation der Teilsysteme in Gegenphase oder ein gleichphasiger Betrieb  
 erreicht werden kann.

## Patentansprüche

- 20 1. Verfahren zur Steuerung parallelgeschalteter zweipunkt-stromgeregelter leistungselektronischer Teilsysteme (12) und (13) mit durch übergeordnete Systemteile oder Einstellvorrichtungen vorgegebenem Sollwert (11) der Teilströme wobei jedes Teilsystem eine, einseitig an einem, mit einem Punkt eingeprägter Spannung (3) über eine Verbindungsleitung (2) verbundenen Verzweigungspunkt (4) liegende, stromeinprägende Induktivität (9) bzw. (10), eine elektronische Schaltvorrichtung (7) bzw. (8) und ein, den Schaltzustand dieser Schaltvorrichtung festlegendes Hystereseschaltglied (30) bzw. (31) mit verschiebbarer Hysteresecharakteristik aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Ansteuerung der elektronischen Schaltvorrichtungen gegenüber dem Ausgang der Hystereseschaltglieder (30) und (31) für beide Teilsysteme gleich zeitlich verzögert erfolgt und die Verschiebung der Hysteresecharakteristiken durch eine symmetrische Kopplung der Teilsysteme (12) und (13) bzw. durch Abänderungen des Signalverlaufes der am Eingang der Hystereseschaltglieder auftretenden Regelabweichungen gegenüber ungekoppeltem Betrieb derart erfolgt, daß nach Durchschreiten einer unteren (39) oder einer oberen (38) Schaltschwelle durch die Regelabweichung des voreilenden Systems und Umschaltung dieses Systems nach Ablauf der zugeordneten Zeitverzögerung die Änderungsgeschwindigkeit des am Eingang des Hystereseschaltgliedes des nacheilenden Systems auftretenden Signals erhöht/verringert und damit innerhalb der, dem Durchschreiten der unteren Schaltschwelle (39) oder oberen Schaltschwelle (38) durch das nacheilende System folgenden, dem nacheilenden System zugeordneten Zeitverzögerung ein gegenüber der Regelabweichung des voreilenden Systems höherer/geringerer, einer Erhöhung/Verringerung der Phasenversetzung der Schaltzustandsänderung der Teilsysteme entsprechender Wert der Regelabweichung resultiert und somit die Phasenversetzung an jeder Schaltschwelle bis zum Erreichen des gegenphasigen/gleichphasigen Betriebes weiter erhöht/verringert wird bzw. eine Synchronisation der Schaltzustandsänderungen der Teilsysteme in Gegenphase/Phase vorliegt wobei die Teilströme im zeitlichen Mittel in an sich bekannter Weise entlang eines für die Teilsysteme gegebenenfalls auch unterschiedlichen Sollwertes geführt werden.

25 2. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 **dadurch gekennzeichnet**, daß die Kopplung der Teilsysteme durch eine, die Verbindungsleitung (2) ersetzende Kopplungsinduktivität und die Zeitverzögerung der Ausgangssignale der Hystereseschaltglieder (30) und (31) durch, zwischen den Ausgängen der Hystereseschaltglieder und den zugeordneten Eingängen (36) und (37) der elektronischen Schaltvorrichtungen (7) und (8) eingefügte Totzeitelemente (34) und (35) erfolgt.

30 3. Vorrichtung zur Durchführung Verfahrens nach Anspruch 1 **dadurch gekennzeichnet**, daß die Kopplung der Teilsysteme durch magnetische Kopplung der Induktivitäten (9) und (10) der Teilsysteme (12) und (13) erreicht wird und die Zeitverzögerung der Ausgangssignale der Hystereseschaltglieder (30) und (31) durch zwischen den Ausgängen der Hystereseschaltglieder und den zugeordneten Eingängen (36) und (37) der elektronischen Schaltvorrichtungen (7) und (8) eingefügte Totzeitelemente (34) und (35) erfolgt, wobei bei gleichem Wicklungssinn der Induktivitäten (9) und (10) eine Synchronisation der Schaltzustandsänderungen der Teilsysteme in Gegenphase erreicht wird und bei entgegengesetztem

Wicklungssinn ein gleichphasiger Betrieb der Teilsysteme resultiert.

4. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, daß die, den, die Regelabweichung der Zweipunkt-Stromregelungen der Teilsysteme (12) und (13) bildenden Summierverstärkern (26) und (27) zugeführten Signale (24) und (25) durch Summierverstärker (18) und (19) als gewichtete Summe der an deren Eingängen liegenden Meßwerte der in den Induktivitäten (9) und (10) fließenden Ströme gebildet werden, wobei dem Summierverstärker (18) bzw. (19) ein Meßsignal (16) bzw. (17) direkt zugeführt und das jeweils andere Meßsignal (17) bzw. (16) über, für jedes Teilsystem gleiche Filter- bzw. Verstärkungselemente (21) bzw. (23) bewertet an den zweiten Eingang (20) bzw. (22) des Summierverstärkers (18) bzw. (19) gelegt und derart eine symmetrische steuerungstechnische Kopplung der Teilsysteme realisiert wird und die Zeitverzögerung der Ausgangssignale der Hystereseschaltglieder (30) und (31) durch zwischen den Ausgängen der Hystereseschaltglieder und den zugeordneten Eingängen (36) und (37) der elektronischen Schaltvorrichtungen (7) und (8) eingefügte Totzeitelemente (34) und (35) realisiert wird, wobei durch entsprechende Wahl des Vorzeichens der Verstärkung der Filterelemente (21) und (23) eine Synchronisation der Schaltzustandsänderungen der Teilsysteme in Gegenphase oder in Phase erreicht wird und zur Führung der Teilströme entsprechend der externen Sollwertvorgabe (11) in den Sollwertkanal der Teilstromregelungen ein Filter- bzw. Verstärkungselement (28) eingefügt wird.

20

Hiezu 2 Blatt Zeichnungen

25

30

35

40

45

50

55

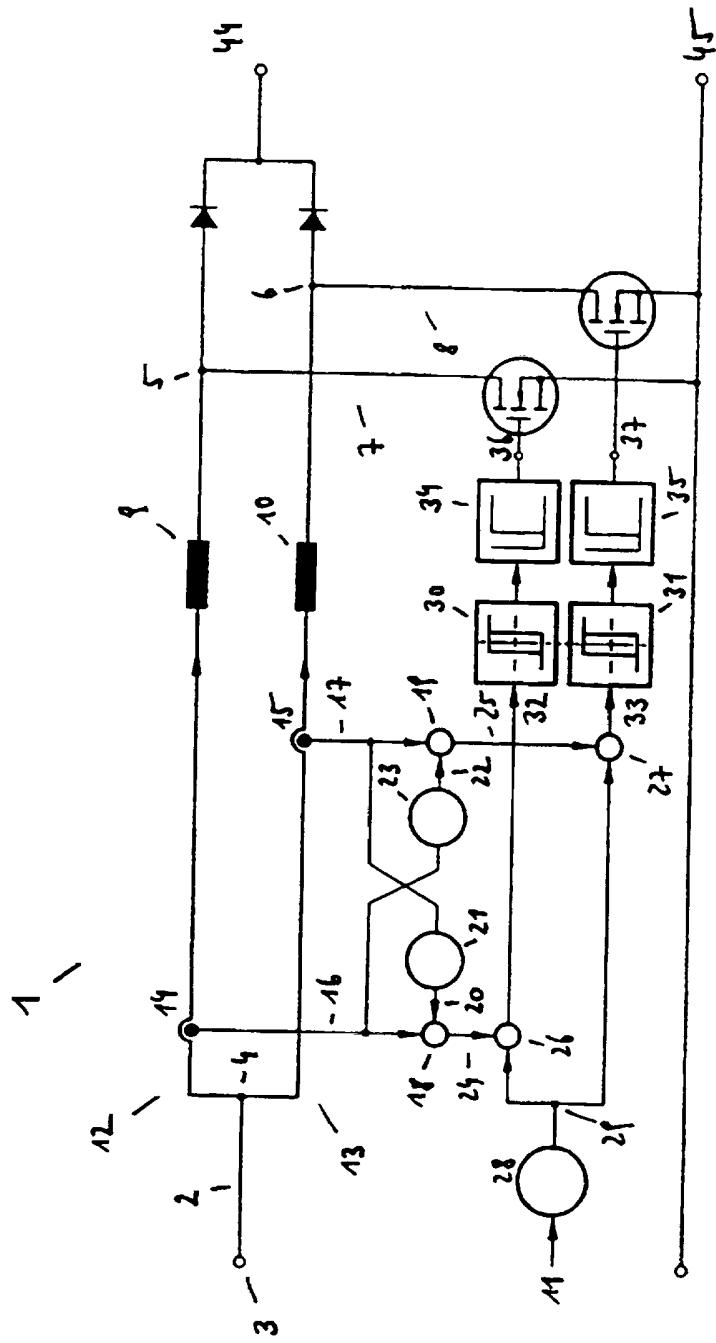


Fig.1 Erfindungsgegenstand: Synchronisation der Schaltzustandsänderungen parallelgeschalteter zweipunkt-stromgeregelter leistungselektronischer Systeme bei definierter Phasenversetzung. Anmelder: Johann W. KOLAR.

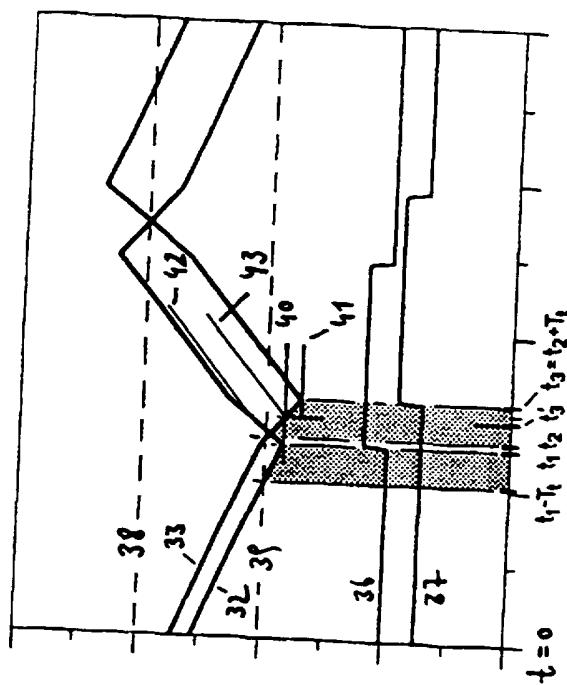


Fig. 2 Erfindungsgegenstand: Synchronisation der Schaltzustandsänderungen parallelgeschalteter zweipunkt-stromgeregelter leistungselektronischer Systeme bei definierter Phasenversetzung. Anmelder: Johann W. KOLAR.