



(12)

# PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 1493/90

(51) Int.Cl.<sup>5</sup> : G01R 29/18

(22) Anmelddetag: 13. 7.1990

(42) Beginn der Patentdauer: 15. 5.1992

(45) Ausgabetag: 25. 1.1993

(56) Entgegenhaltungen:

TAGUNGSBUCH (S. 48-54) DER ETG/VDE-KONFERENZ  
'ANTRIEBSSYSTEME FÜR DIE GERÄTE- UND KRAFTFAHRZEUG-  
TECHNIK' BAD NAUHEIM, DEUTSCHLAND, 1988.  
KAPITEL 'DETECTION OF THE ROTOR POSITION OF A  
PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE AT STANDSTILL',  
IN DEN PROCEEDINGS ZUR 'INTERNATIONAL CONFERENCE ON  
ELECTRICAL MACHINES', PISA, ITALIEN, 1986.  
DISSERTATION 'DIE PERMANENTERREGTE UMRICHTERGESPEISTE  
SYNCHRONMASCHINE OHNE POLRADGEBER ALS DREHZAHL-  
GEREGELTER ANTRIEB' VON H. VOGELMANN, UNIVERSITÄT  
KARLSRUHE, DEUTSCHLAND, 1986.  
DE-AS1273686

(73) Patentinhaber:

ELIN ENERGIEANWENDUNG GES.M.B.H.  
A-1141 WIEN (AT).

(72) Erfinder:

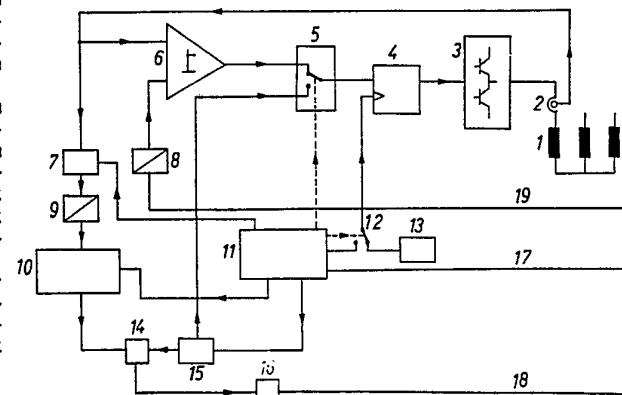
SCHRÖDL MANFRED DIPL.ING.  
SIEGRABEN, BURGENLAND (AT).  
STEFAN THOMAS DIPL.ING.  
BISAMBERG, NIEDERÖSTERREICH (AT).

(54) VERFAHREN UND SCHALTUNGSANORDNUNG ZUR SENSORLOSEN DREHWINKELERFASSUNG EINER DÄMPFERLOSEN,  
VORZUGSWEISE PERMANENTMAGNETERREGTEN, ÜBER EINEN STROMRICHTER GESPEISTEN SYNCHRONMASCHINE

(57) Bei der Erfindung handelt es sich um ein Verfahren und eine Schaltungsanordnung zur sensorlosen Drehwinkel erfassung einer dämpferlosen, vorzugsweise permanentmagnet erregten, über einen Stromrichter gespeisten Synchronmaschine durch Meßsignale.

Erfindungsgemäß werden dabei als Meßsignale vom speisenden Umrichter (3, 33, 63) generierte Spannungssprünge verwendet und die ermittelten Meßdaten einem Rechner zugeführt, der aus der Abhängigkeit der Statorreaktanz die Rotorstellung berechnet, wobei zum Start der Synchronmaschine eine Vormagnetisierung eingestellt und je eine Messung bei feldschwächender und bei feldstärkender Wirkung durchgeführt wird.

Der Vorteil der Erfindung besteht sowohl in seiner großen Genauigkeit als auch darin, daß für die Polradortung keine analogen Zusatzstromquellen benötigt werden. Zudem ist die Polradortung bei beliebiger Last durchführbar.



B  
AT 395 487

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Schaltungsanordnung zur sensorlosen Drehwinkelerfassung einer dämpferlosen, vorzugsweise permanentmagneterregten, über einen Stromrichter gespeisten Synchronmaschine durch Meßsignale.

Permanentmagneterregte Synchronmaschinen gewinnen durch die Fortschritte auf dem Sektor der Magnetmaterialien, der Leistungs- und Informationselektronik zunehmend an Bedeutung in der Antriebstechnik. Sie zeichnen sich gegenüber Asynchronmaschinen durch eine einfachere Regelungstechnische Struktur und höheren Wirkungsgrad aufgrund der sehr geringen Rotorverluste aus.

Für die Durchführung der Regelalgorithmen bei dynamisch hochwertigen feld- bzw. polradorientierten Regelkonzepten ergibt sich die Notwendigkeit eines mechanischen Gebers zur Erfassung der Polradposition. Es ist daher das Ziel vieler Forschungsaktivitäten, den mechanischen Geber durch mathematische Modelle oder durch Ausnutzung physikalischer Effekte zu ersetzen.

Es sind verschiedene Verfahren zur Lageerfassung des Polrades einer permanentmagneterregten Synchronmaschine bekannt.

Ein derartiges Verfahren wird im Kapitel „Algorithmus zur rechnerischen Erfassung der Polralage einer permanentmagneterregten Synchronmaschine ohne Lagegeber“ von M. Schrödl und T. Stefan im Tagungsbuch (Seite 48 bis 54) der ETG/VDE-Konferenz „Antriebssysteme für die Geräte- und Kraftfahrzeugtechnik“, veranstaltet 1988 in Bad Nauheim, BRD, beschrieben. Dabei erfolgt die Erfassung der Polralage bei Vollpolmaschinen durch Auswertung der induzierten Spannung. Ab einer gewissen mechanischen Drehzahl kann ein dauer-magneterregter Rotor selbst als Lagegeber verwendet werden, da ein in einer Statorwicklung induzierter Spannungsraumzeiger im allgemeinen in eindeutiger Weise mit der gesuchten Rotorposition in Zusammenhang steht. Dabei können auch nichtsinusförmige Induktionsverteilungen im Luftspalt zugelassen werden. Dieser induzierte Spannungsraumzeiger kann aus den Klemmenspannungen unter Berücksichtigung der ohmschen und induktiven Spannungsabfälle berechnet werden.

Nachteilig dabei ist, daß diese Auswertung erst ab einer gewissen Mindestdrehzahl erfolgen kann, da der induzierte Spannungsraumzeigerbetrag proportional mit der Drehzahl abnimmt.

Über ein anderes Verfahren berichtet das Kapitel „Detection of the rotor position of a permanent magnet synchronous machine at standstill“ von M. Schrödl, enthalten in den Proceedings, die zur „International Conference on Electrical Machines“ 1986 in Pisa, Italien, publiziert wurden.

Bei diesem Verfahren wird mittels elektrischer Meßsignale die von den permanenten Magneten hervorgerufene, variierende magnetische Sättigung gemessen. Da sich diese Art der Messung reproduzieren läßt, ist die Rotorposition exakt feststellbar. Die für die Durchführung der Messung notwendige Kenntnis der Polarität der Magnete läßt sich durch Veränderung des magnetischen Arbeitspunktes und die Messung seiner Auswirkung auf die Impedanz feststellen. Es ist hier die Eruierung der Rotorposition auch bei stillstehender Maschine möglich.

Der Nachteil dieser Methode besteht darin, daß durch die Notwendigkeit einer zusätzlichen analogen Stromquelle das Meßverfahren sehr aufwendig ist.

In der DE-AS 1 273 686 wird ein Meßwertgeber zur Erfassung des Polradwinkels von Synchronmaschinen beschrieben.

Konkret bezieht sich die Erfindung auf einen Meßwertgeber zur Bildung einer Ausgangsgröße, welche vom Polradwinkel einer Synchronmaschine abhängig ist. Es wird ein Polradwinkel-Meßgerät verwendet, dessen Ausgangsgröße eine Impulsspannung mit konstanter Impulsamplitude sowie dem Polradwinkel proportionaler Impulsdauer ist. Der Mittelwert der Ausgangsgröße des Polradwinkel-Meßgerätes verläuft mit wachsendem Betrag des Polradwinkels nach einer Dreiecksfunktion. Die Periode der Dreiecksfunktion stimmt mit einem Winkelbereich von 360° des Polradwinkels überein. Der Meßwertgeber ermöglicht es, die zur Beeinflussung der Erregung einer Synchronmaschine geforderte gebrochen lineare Funktion mit Schwellwert und Amplitudenbegrenzung nachzubilden.

Auch diese Erfindung erfordert einen mechanischen Geber sowie analoge Zusatzstromquellen.

Auch die Dissertation „Die permanenterregte umrichtergespeiste Synchronmaschine ohne Polradgeber als drehzahlgeregelter Antrieb“ von H. Vogelmann (Universität Karlsruhe, BRD, 1986) befaßt sich mit einem Verfahren zur Ortung der Polradlage.

Dabei wird ein mittels eines Umrichters erzeugter, relativ hochfrequenter Strom als Prüfsignal dem eigentlichen Nutzsignal überlagert. Der Grundgedanke dabei ist, daß ein in eine gewisse (Raumzeiger-) Richtung aufgeschaltetes elektrisches Wechselsignal aufgrund der unterschiedlichen Induktivitäten in Längs- und Querachse im allgemeinen auch in der orthogonalen Richtung eine Reaktion hervorruft. Nur für den Fall, daß das Wechselsignal genau in der Rotor-Längs- bzw. -Querrichtung aufgebracht wird, tritt eine derartige Verkopplung nicht auf. Damit ergibt sich ein Kriterium, ob das Signal in die gesuchte ausgezeichnete Richtung appliziert wird oder nicht. Eine Voraussetzung zur Erreichung exakter Meßergebnisse ist eine permanentmagneterregte Synchronmaschine mit Schenkelpolcharakter, also mit ungleichen Induktivitäten in Längs- und Querrichtung, wie etwa bei flußkonzentrierenden Anordnungen.

Der überwiegende Teil der permanentmagneterregten Synchronmaschinen wird jedoch nicht in fluß-

konzentrierender Bauweise ausgeführt, sondern mit konstantem Luftspalt und auf die Rotoroberfläche aufgeklebten Magneten. Dies ist fertigungstechnisch einfacher und erlaubt bei Verwendung von hochwertigen Samarium-Kobalt- bzw. Neodym-Eisen-Magneten Luftspaltinduktionen von etwa 1 Tesla.

Bei den erwähnten Ortungsverfahren besteht also der Nachteil, daß sich damit nur bei Maschinen mit ausgeprägter Schenkelpolcharakteristik brauchbare Ergebnisse ergeben.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein Verfahren zur geberlosen Lageerfassung des Rotors einer permanentmagnetenerregten Synchronmaschine durch Messung ausschließlich elektrischer Größen zu realisieren und die Nachteile bzw. Ungenauigkeiten der bekannten Verfahren zu vermeiden.

Die Aufgabe wird durch die Erfindung gelöst. Diese ist dadurch gekennzeichnet, daß die Meßsignale vom Stromrichter generierte Spannungssprünge sind, die einem Rechner zugeführt werden, der aus der Winkelabhängigkeit des Quotienten aus Statorspannungsraumzeiger und zeitlicher Änderung des Stromraumzeigers, im folgenden als komplexe differentielle Induktivität bezeichnet, die Polradlage berechnet, wobei die komplexe differentielle Induktivität sowohl in ihrem Betrag als auch in ihrem Argument mit dem doppelten Wert des gesuchten Drehwinkels, und zwar näherungsweise sinusförmig, schwankt, und daß dieser Verfahrensschritt mit geänderter Spannungsraumzeigerrichtung, in der vorzugsweise strangzahlgleichen Anzahl, wiederholt wird und für jede Meßrichtung die örtliche komplexe differentielle Induktivität ermittelt wird und daraus unter der idealisierten Annahme einer sinusförmigen Schwankung von Betrag und Phase der komplexen differentiellen Induktivität, wobei deren Betrag seine Extremwerte in der Magnetisierungsachse und elektrisch 90 Grad darauf und deren Argument an diesen Stellen ihre Nulldurchgänge und bei Winkeln von elektrisch  $45^\circ + k \cdot 90^\circ$  ihre Extrema aufweist, unter Verwendung der bekannten Methoden der komplexen Rechnung der doppelte Wert des gesuchten Drehwinkels, welcher mit der Magnetachse übereinstimmt, ermittelt wird, und in die so festgestellte Magnetachse ein einziges Mal zum Start der Maschine einen Stromraumzeiger zum Zweck der Änderung der Magnetisierung einprägt und sofort - wie oben geschildert - die komplexe differentielle Induktivität bestimmt und ihren Betrag berechnet, sodann einen Stromraumzeiger in die Gegenrichtung zum zuvor eingeprägten Stromraumzeiger einprägt und wiederum den Betrag berechnet, und dann aus der Tatsache, daß die Magnetisierungsrichtung mit dem Minimum der zwei zuvor berechneten Beträge übereinstimmt, die mit dem gesuchten Drehwinkel übereinstimmende Magnetisierungsrichtung festlegt.

Der Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht sowohl in seiner großen Genauigkeit als auch darin, daß für die Poladortung keine analogen Zusatzstromquellen benötigt werden, sondern der - ohnehin vorhandene - speisende Stromrichter als Meßsignalgenerator eingesetzt wird.

Weiters ist vorteilhaft, daß mit der Erfindung die exakte Poladortung bei beliebiger Last durchführbar ist.

In einer Weiterbildung der Erfindung werden zwei hintereinanderfolgende Messungen durchgeführt, wobei der Spannungsraumzeiger der zweiten Messung entweder entgegengesetzt dem Spannungsraumzeiger der ersten Messung oder der Nullspannungsraumzeiger ist, und daß die Differenz der in diesen Messungen verwendeten Spannungsraumzeiger einerseits und die Differenz der aus diesen Messungen ermittelten zeitlichen Änderungen der Stromraumzeiger anderseits gebildet werden und diese Raumzeigergrößen an die Stelle der entsprechenden Raumzeigergrößen bei Einzelmessungen treten.

Auf diese Weise wird der Effekt der vom Magneten herrührenden rotatorisch induzierten Spannung kompensiert. Dadurch funktioniert das Verfahren bei allen Drehzahlen, wobei auch im tiefsten Drehzahlbereich und im Stillstand dieselbe hohe Genauigkeit gegeben ist.

Ein weiteres Merkmal der Erfindung besteht darin, daß die EMK bei drehender Synchronmaschine aus momentanen Schätzwerten von Drehwinkel und Drehzahl berechnet und deren Einfluß auf das Meßergebnis kompensiert wird.

Dadurch ist es möglich, mit nur einer Messung und in Kombination mit tabellarischen Korrekturwerten, eine hohe Genauigkeit zu erzielen.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen sowie Schaltungsanordnungen, mit denen die für den jeweiligen Betriebsfall günstigste Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens verwirklicht werden kann, ergeben sich aus weiteren Unteransprüchen. So kann das erfindungsgemäße Poladortungsverfahren bei den gängigen Regelkonzepten (Toleranzbandführung, Pulsmustervorgabe usw.) problemlos implementiert werden.

An Hand von Ausführungsbeispielen soll nun die Erfindung, unter Verwendung dreistrangiger Synchronmaschinen, näher erläutert werden. (Dasselbe erfindungsgemäße Prinzip ist für Synchronmaschinen mit anderen Strangzahlen in gleicher Weise anwendbar.) Dabei zeigt Fig. 1 ein Meßverfahren mit fixen Meßzeiten. In Fig. 2 ist die Integration des erfindungsgemäßen Verfahrens in eine Spannungssteuerung mit fixem Pulsmuster dargestellt. Die Anwendung der Erfindung mit definierten Stromänderungen bei einem Antrieb mit Toleranzband-Stromregler ist in Fig. 3 aufgezeigt. In allen drei Figuren ist die Schaltung jeweils nur für einen Strang der Statorwicklung gezeichnet; sie ist für die beiden anderen Stränge selbstverständlich analog.

Das erfindungsgemäße Verfahren basiert auf der Tatsache, daß bei Luftspaltinduktionswerten von etwa 1 Tesla

gewisse Eisenpartien in der Maschine gesättigt werden. Bei Permanentmagneterregung werden in erster Linie die Statorzähne beträchtlich gesättigt. Weiters ist, bei entsprechender Auslegung, eine gewisse Sättigung im Joch denkbar.

Ein (kleines) Statorstromsignal ruft im Stator ein zusätzliches Magnetfeld hervor, das je nach Stromzeigerrichtung auf Pfaden mit unterschiedlichen magnetischen Leitwerten verläuft. Bei einem Stromraumzeiger parallel zum Raumzeiger des vom Dauermagneten hervorgerufenen magnetischen Flusses verläuft das Zusatzmagnetfeld in den magnetisch stark belasteten Gebieten, bei Aufbringung des Stromraumzeigers normal dazu werden die gesättigten Gebiete weitgehend nicht berührt.

Die magnetische Verteilung in der Maschine definiert also für jede Raumzeigerrichtung eines Meß-Statorstromes einen Arbeitspunkt auf der magnetischen Kennlinie, die den Zusammenhang zwischen den Raumzeigerbeträgen von Durchflutung und magnetischem Fluß angibt. Je nach betrachteter Raumzeigerrichtung schwankt dieser Arbeitspunkt zwischen einem Minimalwert im linearen Teil und einem Maximalwert in der Krümmung der Kennlinie. Diese Modulation des Arbeitspunktes kann durch Messung der differentiellen Induktivität der betrachteten Raumzeigerrichtung erfaßt werden. Dabei ist die Stromänderung im Vergleich zum Nennstrom vernachlässigbar klein, so daß die magnetischen Verhältnisse fast nicht beeinflußt werden. Der Einfluß des Statorwiderstandes ist dabei so klein, daß er vernachlässigt werden kann.

Um die sich bei Messung mittels einer analogen Meßspannungsquelle und sinusförmigen Meßsignalen ergebenden Nachteile (Messung nur bei stillstehendem, unbelastetem Rotor möglich; großer Meß- und Rechenaufwand; Meßsignalgenerator als Zusatzeinrichtung ist während der Messung anstatt des Umrichters auf die Synchronmaschine geschaltet), zu vermeiden, ist beim erfundungsgemäßen Verfahren der Umrichter selbst als Meßsignalgenerator eingesetzt.

Stillstehende Maschine:

Als Meßsignal werden geschaltete Spannungen aus den Umrichterzweigen auf die Synchronmaschine geschaltet. Es wird dann die differentielle Induktivität aufgrund des Anstiegs des Stromraumzeigerbetrages ermittelt. Damit ist für die möglichen Spannungsraumzeigerrichtungen (0, 120, 240 Grad bei Dreiphasensystemen) eine Messung mit äquivalentem Aussagewert wie mittels einer analogen Zusatzsignalquelle erzielbar. Durch wiederholte Messungen während des Betriebes kann eine statistische Auswertung der anfallenden Information durchgeführt und somit eine große Meßgenauigkeit erzielt werden.

Rotierende Maschine:

Durch Kombination von zwei Messungen wird der Effekt der rotatorisch induzierten Spannung weitestgehend eliminiert. Es werden zwei Messungen durchgeführt, wobei nach der ersten Messung in einem Zweig (beispielsweise Zweig (A) oder alternativ in allen anderen Zweigen außer (A); beides bewirkt eine Messung in die gleiche Raumzeigerrichtung) eine Schalthandlung durchgeführt wird. Sodann wird der Wert der Messung (2) vom Wert der Messung (1) subtrahiert. Der Spannungsdifferenzraumzeiger weist in die Richtung des mit dem geschalteten Wechselrichterzweig verbundenen Stranges, so daß es genügt, die Stromänderung während der Intervalle (I) und (II) nur im betreffenden Strang zu messen. (Durch die verschiedenen Induktivitäten aufgrund der Vorsättigung weichen Spannungs- und Meßstromraumzeiger leicht voneinander ab. Bei üblichen Sättigungsverhältnissen beträgt diese Abweichung maximal 7 Grad. Diese Abweichung ist jedoch ein reproduzierbarer Effekt und dadurch ein korrigierbarer Fehler.) Durch diese Meßstrategie wird die Auswirkung der rotatorisch induzierten Spannung kompensiert.

Bei höheren Drehzahlen ist die Drehung während der Meßzeit nicht vernachlässigbar. In diesem Fall kann der Meßvorgang des Intervalls (II) in zwei Teilmessungen aufgespaltet werden, wobei der erste Teil vor und der zweite Teil nach Intervall (I) durchgeführt wird. (In beiden Teilmessungen wird der gleiche Spannungsraumzeiger angelegt.) Dadurch tritt jeweils praktisch derselbe (mittlere) Wert der induzierten Spannung auf.

Auch die induzierte Spannung ist bei höheren Drehzahlen nicht vernachlässigbar. Durch diese Spannung erfolgt die Stromänderung nicht mehr parallel zum angelegten Statorspannungsraumzeiger, sondern in die Richtung der Differenz zwischen Statorspannungs- und induziertem Spannungsraumzeiger. Die Messung erfolgt also scheinbar in den Intervallen (I) und (II) in mehr oder weniger abweichende Raumzeigerrichtungen. Es ist (unter Verwendung der Raumzeigerrechnung), mathematisch eindeutig nachweisbar, daß die Messung durch die Differenzbildung der zwei Intervalle wirklich den Induktivitätswert der gewünschten Richtung liefert.

Zum Start des Systems ist es unbedingt notwendig, die Polarität des Permanentmagneten zu bestimmen, da sonst die bestimmte Rotorposition mit einer Unsicherheit von 180 Grad (elektrisch) behaftet ist. Dies ist darin begründet, daß die Induktivitätsschwankungen sich zweimal pro elektrischer Umdrehung wiederholen.

Im vorliegenden Fall erfolgt die Polaritätsbestimmung durch alleinige Verwendung des Umrichters. Nach der Bestimmung der Richtung minimaler und maximaler Induktivität, welche unmittelbar mit der Polradlage bzw. der Magnetisierungsrichtung des Rotors zusammenhängt, wird in etwa diese Richtung ein relativ großer

Statorstromraumzeiger aufgebracht, wodurch eine gewisse Verschiebung des magnetischen Arbeitspunktes erfolgt. In diesem neuen magnetischen Arbeitspunkt wird nun eine Induktivitätssmessung, wie zuvor beschrieben, durchgeführt. Ob dieses Zusatzsignal eine Erhöhung oder eine Verminderung der Sättigung gebracht hat, kann entschieden werden, wenn genau die entgegengesetzte Zusatzdurchflutung aufgebracht und wieder die differentielle Induktivität bestimmt wird.

Legt man einen konstanten Spannungsraumzeiger an die Maschine, so ändert sich der Betrag des mit dem Stator verketteten Flusses linear mit der Zeit, während der Strom progressiv zunimmt, wenn der Bereich magnetischer Sättigung erreicht wird. Die Messung der Induktivität erfolgt beispielsweise mit einem konstanten Stromänderungsintervall. Die Zeiten zwischen den Schalthandlungen sind dann ein Maß für die differentielle Induktivität.

Die geringe Statorinduktivität hat zur Folge, daß selbst Ströme in der Größenordnung des Nennwertes keine gravierende Änderung der Sättigungsverhältnisse in der Maschine nach sich ziehen. Es werden zwar die „Induktivitäts-Ellipsen“ etwas abgeplattet, jedoch bleibt der Verlauf der winkelabhängigen Induktivität erhalten und der Effekt meßbar. Es besteht die Möglichkeit, die lastabhängigen Sättigungsverhältnisse in einem Festwertspeicher abzulegen und die entsprechenden Kennwerte je nach Laststrom abzufragen. Die Lastpunkte können dahingehend eingeschränkt werden, daß nur flussnormale, also drehmomentbildende Statorstromkomponenten auftreten.

Zur praktischen Bestimmung der Rotorposition sind verschiedene Möglichkeiten des Meßablaufs denkbar. Die zwei wichtigsten Methoden sind, ein festes Meßintervall oder einen festen Stromänderungsbetrag vorzugeben.

Bei Vorgabe eines festen Meßintervalls wird die Zeit des Intervalls (I) gleich der des Intervalls (II) und konstant gesetzt. Nimmt man an, daß die Induktivität in Richtung des Stranges (A) gemessen werden soll, so ist der Zustand der Wechselrichterzweige (A), (B), (C) im Intervall (I) beispielsweise 1, 0, 0 (1 bedeutet: Wechselrichterzweig an positivem Zwischenkreispotential) und im Intervall (II) beispielsweise 0, 0, 0 oder 1, 1, 1 oder 0, 1, 1. In jedem Fall zeigt der Differenzspannungsraumzeiger in Richtung zur Strangachse (A). Legt man gedanklich die reelle Achse des Raumzeiger-Koordinatensystems in die zu messende Strangachse, so ergibt sich, daß der Kehrwert der gesuchten Induktivität proportional der Differenz der betreffenden Strangstromänderungen im Intervall (I) und (II) ist.

Fig. 1 zeigt eine Schaltungsvariante des erfundungsgemäßen Verfahrens mit fixen Meßzeiten in einer stromgeregelte, vorzugsweise permanentmagnetenerregte Synchronmaschine, wobei das Verfahren in eine konventionelle Regelung integriert ist. Während der normalen Regelung vergleichen Komparatoren (6) ohne Hysterese die Sollwerte der Strangstrome. Ein D-Flipflop (4) erlaubt eine Schaltzustandsänderung der Brückenzweige des Stromrichters (3) zu positiven (oder alternativ negativen) Flanken des Taktsignales.

Während des Meßbetriebes übernimmt das Modul (11) zur Meßablaufsteuerung die Kontrolle über das System. Der Komparator (6) wird mittels einer Umschalte-Logik (5) außer Betrieb gesetzt und direkt ein Spannungsraumzeiger gemäß der Meßvorschrift mittels der Brückenzweige des Stromrichters (3) an die Synchronmaschine gelegt. Über Sample-Hold-Glieder (7) und Analog-Digital-Wandler (9) werden die Stromänderungen erfaßt und daraus die

Raumzeigergröße  $\frac{\Delta i_s}{\Delta t}$  ermittelt. Durch Division dieser Größe durch den angelegten Spannungsraumzeiger in einem

Dividierer (14) wird die komplexe Induktivität  $L_{diff}$  berechnet und von einem Drehwinkelrechner (16) mit den bekannten Methoden der komplexen Rechnung der Drehwinkel gebildet und der Regelung zugeführt. Nachdem alle erforderlichen Spannungsraumzeiger angelegt und alle dazugehörigen Stromwerte erfaßt wurden, übergibt das Modul (11) zur Meßablaufsteuerung durch Zurückschalten der Umschaltelogik (5) die Kontrolle wieder an die normale Regelung.

In Fig. 2 ist die Integration des erfundungsgemäßen Verfahrens in eine Spannungssteuerung mit fixem Pulsmuster dargestellt. Im normalen Regelbetrieb berechnet ein Regler die notwendige Spannungsamplitude und Frequenz, die von einem Pulsmustergenerator (34) gebildet werden; in diesen sind Meßzyklen integriert. Das Auftreten eines Meßzyklusses wird einem Modul (35) zur Meßzykluserkennung und -steuerung mitgeteilt. Dieses Modul (35) veranlaßt eine Messung der Stromänderung und des dazugehörigen Zeitintervales. Gleichzeitig wird der Spannungsraumzeiger vom Pulsmustergenerator mitgeteilt. Damit wird wieder, wie in der Beschreibung zu Fig. 1 erläutert, die differentielle Induktivität und daraus der Drehwinkel berechnet. Nach dem Meßzyklus wird die Abtastung der Stromistwerte wieder von der Regelung gesteuert.

Die Anwendung der Erfindung bei einem Antrieb mit Toleranzband-Stromreglern ist in Fig. 3 aufgezeigt. Im normalen Regelbetrieb werden die Strangstrom-Sollwerte an hysteresebehaftete Komparatoren (65) herangeführt. Durch Vergleich mit den Stromistwerten werden die Brückenzweige der Stromrichter (63) bei Verlassen der Hysterese entsprechend umgeschaltet.

Während des Meßbetriebes übernimmt die Meßablaufsteuerung die Kontrolle über das System. Der Stromsollwert des zu messenden Stranges (61) der Statorwicklung wird durch ein Sample-Hold-Glied (66) festgehalten; in den jeweils übrigen Strängen der Statorwicklung wird der Schaltzustand der Brückenzweige des Stromrichters (63) durch Umschalten einer Umschalte-Logik (5) von der direkten Brückenzweigsteuerung eingefroren. Nun wird mit Hilfe

des Timers (67) jene Zeit ermittelt, die der Strom benötigt, um in dem zu messenden Strang (61) der Statorwicklung das Toleranzband zu durchqueren. Damit ist die Stromänderungsgeschwindigkeit festgelegt. Dieser Meßvorgang wird mit verschiedenen Strängen der Statorwicklung wiederholt. Der Drehwinkel kann nun wiederum, wie in der Beschreibung zu Fig. 1 erläutert, berechnet werden. Die Meßablaufsteuerung übergibt danach die Kontrolle der

5 Strangstrome wieder an die Regelung.

10

## PATENTANSPRÜCHE

- 15 1. Verfahren zur sensorlosen Drehwinkelerfassung einer dämpferlosen, vorzugsweise permanentmagneterregten, über einen Stromrichter gespeisten Synchronmaschine durch Meßsignale, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßsignale vom Stromrichter (3, 33, 63) generierte Spannungssprünge sind, die einem Rechner zugeführt werden, der aus der Winkelabhängigkeit des Quotienten aus Statorspannungsraumzeiger und zeitlicher Änderung des Stromraumzeigers, im folgenden als komplexe differentielle Induktivität bezeichnet, die Polradlage berechnet,
- 20 wobei die komplexe differentielle Induktivität sowohl in ihrem Betrag als auch in ihrem Argument mit dem doppelten Wert des gesuchten Drehwinkels, und zwar näherungsweise sinusförmig, schwankt, und daß dieser Verfahrensschritt mit geänderter Spannungsraumzeigerrichtung, in der vorzugsweise strangzahlgleichen Anzahl, wiederholt wird und für jede Meßrichtung die örtliche komplexe differentielle Induktivität ermittelt wird und daraus unter der idealisierten Annahme einer sinusförmigen Schwankung von Betrag und Phase der komplexen differentiellen Induktivität, wobei deren Betrag seine Extremwerte in der Magnetisierungsachse und elektrisch 90 Grad darauf und deren Argument an diesen Stellen ihre Nulldurchgänge und bei Winkeln von elektrisch  $45^\circ + k \cdot 90^\circ$  ihre Extrema aufweist, unter Verwendung der bekannten Methoden der komplexen Rechnung der doppelte Wert des gesuchten Drehwinkels, welcher mit der Magnetachse übereinstimmt, ermittelt wird, und in die so festgestellte Magnetachse ein einziges Mal zum Start der Maschine einen Stromraumzeiger zum Zweck der Änderung der Magnetisierung einprägt und sofort - wie oben geschildert - die komplexe differentielle Induktivität bestimmt und ihren Betrag berechnet, sodann einen Stromraumzeiger in die Gegenrichtung zum zuvor eingeprägten Stromraumzeiger einprägt und wiederum den Betrag berechnet, und dann aus der Tatsache, daß die Magnetisierungsrichtung mit dem Minimum der zwei zuvor berechneten Beträge übereinstimmt, die mit dem gesuchten Drehwinkel übereinstimmende Magnetisierungsrichtung festlegt.
- 25 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zwei hintereinanderfolgende Messungen durchgeführt werden, wobei der Spannungsraumzeiger der zweiten Messung entweder entgegengesetzt dem Spannungsraumzeiger der ersten Messung oder der Nullspannungsraumzeiger ist, und daß die Differenz der in diesen Messungen verwendeten Spannungsraumzeiger einerseits und die Differenz der aus diesen Messungen ermittelten zeitlichen Änderungen der Stromraumzeiger anderseits gebildet werden und diese Raumzeigergrößen an die Stelle der entsprechenden Raumzeigergrößen bei Einzelmessungen treten.
- 30 3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die EMK bei drehender Synchronmaschine aus momentanen Schätzwerten von Drehwinkel und Drehzahl berechnet und deren Einfluß auf das Meßergebnis kompensiert wird.
- 35 4. Schaltungsanordnung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die zufolge der Spannungssprünge und zur Berechnung der zeitlichen Änderung des Stromraumzeigerbetrages notwendigen Stromänderungen von an den zwischen Stromrichter (3, 33, 63) und Synchronmaschine angeordneten Strommeßeinrichtungen (2, 32, 62) abgenommen werden.
- 40 5. Schaltungsanordnung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Stromistwert jeweils eines Stranges (1) der Statorwicklung der Synchronmaschine von einer Strommeßeinrichtung (2) abgenommen und einem ersten Eingang eines Komparators (6) ohne Hysterese und einem ersten Eingang eines Sample and Hold-Gliedes (7) zugeführt ist, und daß der Ausgang des Sample and Hold-Gliedes (7) über einen Analog-Digitalwandler (9) mit einem ersten Eingang eines Stromanstiegsgeschwindigkeitsrechners (10) verbunden ist, und daß der Ausgang des Komparators (6) ohne Hysterese mit einem ersten Eingang einer Umschaltelogik (5) verbunden

- ist, und daß die Meßanforderung der Regelung über eine erste Leitung (17) dem Eingang eines Moduls (11) zur Meßablaufsteuerung zugeleitet ist, und daß ein erster Ausgang des Moduls (11) zur Meßablaufsteuerung mit einem ersten Umschaltek kontakt eines Umschalters (12) verbunden ist, und daß ein zweiter Umschaltek kontakt des Umschalters (12) mit dem Ausgang eines Taktgenerators (13) verbunden ist, und daß der Wurzelkontakt des Umschalters (12) mit dem dynamischen Eingang eines D-Flipflops (4) verbunden ist, und daß der statische Eingang des D-Flipflops (4) mit dem Ausgang der Umschaltelogik (5) verbunden ist, und daß digitale Schaltbefehle über den Ausgang des D-Flipflops (4) einem Brückenzweig des Stromrichters (3) zugeleitet sind, und daß ein zweiter Ausgang des Moduls (11) für die Meßablaufsteuerung mit einem zweiten Eingang des Sample and Hold-Gliedes (7) verbunden ist, und daß ein dritter Ausgang des Moduls (11) für die Meßablaufsteuerung mit einem zweiten Eingang des Stromanstiegsgeschwindigkeitsrechners (10) verbunden ist, und daß der Ausgang des Stromanstiegsgeschwindigkeitsrechners (10) mit einem ersten Eingang eines Dividierers (14) verbunden ist, und daß der Ausgang des Dividierers (14) mit dem Eingang eines Drehwinkelrechners (16) verbunden ist, und daß der vom Drehwinkelrechner (16) gebildete Drehwinkel über eine zweite Leitung (18) der Regelung zuführbar ist, und daß ein vierter Ausgang des Moduls (11) zur Meßablaufsteuerung mit dem Eingang eines Moduls (15) zur Spannungsraumzeigervorgabe verbunden ist, und daß ein erster Ausgang des Moduls (15) zur Spannungsraumzeigervorgabe mit einem zweiten Eingang des Dividierers (14) verbunden ist, und daß der Ausgang des Moduls (15) zur Spannungsraumzeigervorgabe mit einem zweiten Eingang der Umschaltelogik (5) verbunden ist, und daß der Sollwert der Regelung über eine dritte Leitung (19) dem Eingang eines Digital-Analog-Wandlers (8) zugeführt ist, und daß der Ausgang des Digital-Analog-Wandlers (8) mit einem zweiten Eingang des Komparators (6) ohne Hysterese verbunden ist. (Fig. 1)
6. Schaltungsanordnung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Stromistwert jeweils eines Stranges (31) der Statorwicklung der Synchronmaschine von einer Strommeßeinrichtung (32) abgenommen und einem ersten Eingang eines Sample and Hold-Gliedes (37) zugeführt ist, und daß der Stromistwert vom Ausgang des Sample and Hold-Gliedes (37) über einen Analog-Digital-Wandler (38) einem ersten Eingang eines Stromanstiegsgeschwindigkeitsrechners (41) sowie über eine erste Leitung (44) der Regelung zugeführt ist, und daß der Abtastbefehl von der Regelung über eine zweite Leitung (45) sowie über einen ersten Umschaltek kontakt und über einen Wurzelanschluß eines Umschalters (39) einem zweiten Eingang des Sample and Hold-Gliedes (37) zuführbar ist, und daß die Spannungsvorgabe bzw. die Frequenzvorgabe von der Regelung über eine dritte Leitung (46) bzw. über eine vierte Leitung (47) einem ersten bzw. einem zweiten Eingang eines Pulsmustergenerators (34) mit integrierten Meßzyklen zugeführt ist, und daß digitale Schaltbefehle über einen ersten Ausgang des Pulsmustergenerators (34) einem Brückenzweig des Stromrichters (33) zuführbar sind, und daß ein zweiter Ausgang des Pulsmustergenerators (34) mit dem Eingang eines Moduls (35) zur Meßzykluserkennung und -steuerung verbunden ist, und daß ein dritter Ausgang des Pulsmustergenerators (34) mit dem Eingang eines Spannungsraumzeigerbildners (36) verbunden ist, und daß ein erster Ausgang des Moduls (35) zur Meßzykluserkennung und -steuerung mit einem ersten Eingang eines Timers (40) verbunden ist, und daß die Abtastbefehle von der Meßablaufsteuerung von einem zweiten Ausgang des Moduls (35) zur Meßzykluserkennung und -steuerung einem zweiten Eingang des Timers (40) sowie einem zweiten Umschaltek kontakt des Umschalters (39) zuführbar sind, und daß der Ausgang des Timers (40) mit einem zweiten Eingang des Stromanstiegsgeschwindigkeitsrechners (41) verbunden ist, und daß der Ausgang des Spannungsraumzeigerbildners (36) mit einem ersten Eingang eines Dividierers (42) verbunden ist, und daß der Ausgang des Stromanstiegsgeschwindigkeitsrechners (41) mit einem zweiten Eingang des Dividierers (42) verbunden ist, und daß der Ausgang des Dividierers (42) mit dem Eingang eines Drehwinkelrechners (43) verbunden ist, und daß der gebildete Drehwinkel vom Ausgang des Drehwinkelrechners (43) über eine fünfte Leitung (48) der Regelung zuführbar ist. (Fig. 2)
7. Schaltungsanordnung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Stromistwert jeweils eines Stranges (61) der Statorwicklung der Synchronmaschine von einer Strommeßeinrichtung (62) abgenommen und einem ersten Eingang eines hysteresebehafteten Komparators (65) zugeführt ist, und daß der Ausgang des hysteresebehafteten Komparators (65) mit einem ersten Eingang einer Umschaltelogik (64) verbunden ist, und daß digitale Schaltbefehle über den Ausgang der Umschaltelogik (64) einem Brückenzweig des Stromrichters (63) zuführbar sind, und daß der Ausgang der Umschaltelogik (64) mit dem Eingang eines Meßablaufsteuerungsmoduls (68) sowie mit jeweils einem ersten Eingang eines Timers (67) und eines zur direkten Brückenzweigsteuerung während der Messung vorgesehenen Moduls (69) verbunden ist, und daß ein erster bzw. ein zweiter Ausgang des Meßablaufsteuerungsmoduls (68) mit einem zweiten bzw. einem dritten Eingang des Timers (67) verbunden sind, und daß ein dritter Ausgang des Meßablaufsteuerungsmoduls (68) mit einem ersten Eingang eines Sample and Hold-Gliedes (66) verbunden ist, und daß ein dritter Ausgang des Meßablaufsteuerungsmoduls (68) mit einem zweiten Eingang des zur direkten Brückenzweigsteuerung während der Messung vorgesehenen Moduls (69) verbunden ist, und daß der Ausgang des zur direkten Brückenzweigsteuerung während der Messung

AT 395 487 B

vorgesehenen Moduls (69) mit einem zweiten Eingang der Umschaltelelogik (64) verbunden ist, und daß der Stromsollwert von der Regelung über eine erste Leitung (71) einem zweiten Eingang des Sample and Hold-Gliedes (66) zugeleitet ist, und daß der Ausgang des Sample and Hold-Gliedes (66) mit einem zweiten Eingang des hysteresebehafteten Komparators (65) verbunden ist, und daß der Ausgang des Timers (67) mit dem Eingang eines Drehwinkelrechners (70) verbunden ist, und daß der gebildete Drehwinkel über den Ausgang des Drehwinkelrechners (70) über eine zweite Leitung (72) der Regelung zuführbar ist. (Fig. 3)

10

Hiezu 3 Blatt Zeichnungen

15

20

25

30

35

40

45

50

55

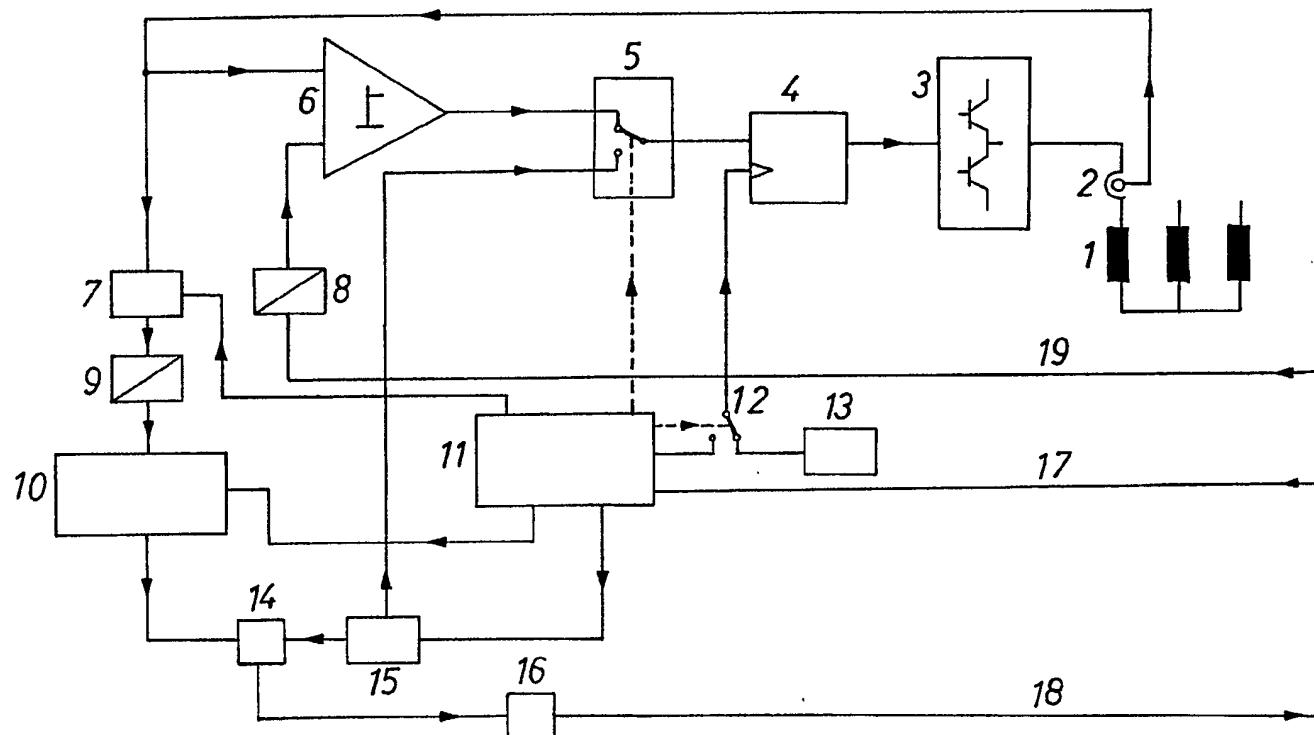


Fig. 1

Ausgegeben

25. 1.1993

Int. Cl.<sup>5</sup>: G01R 29/18

Blatt 2

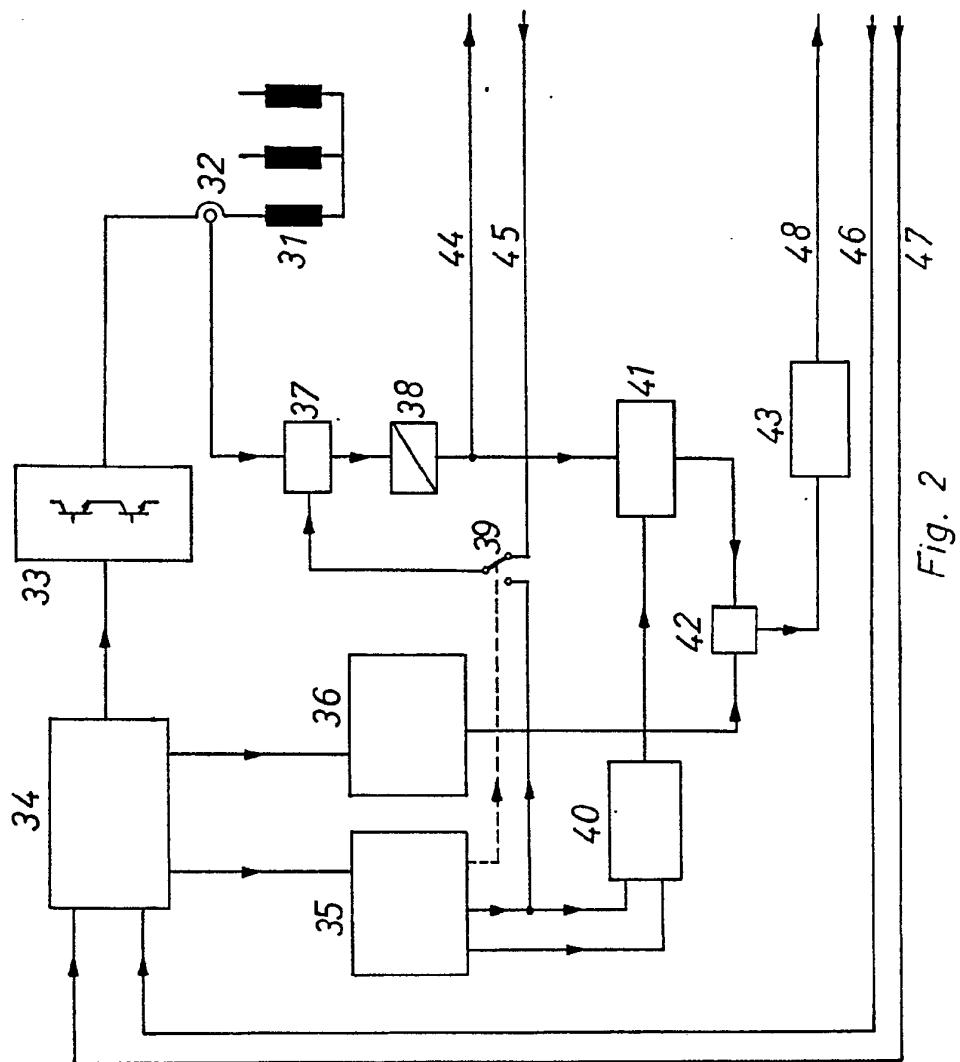


Fig. 2

Ausgegeben

25. 1.1993

Int. Cl.<sup>5</sup>: G01R 29/18

Blatt 3

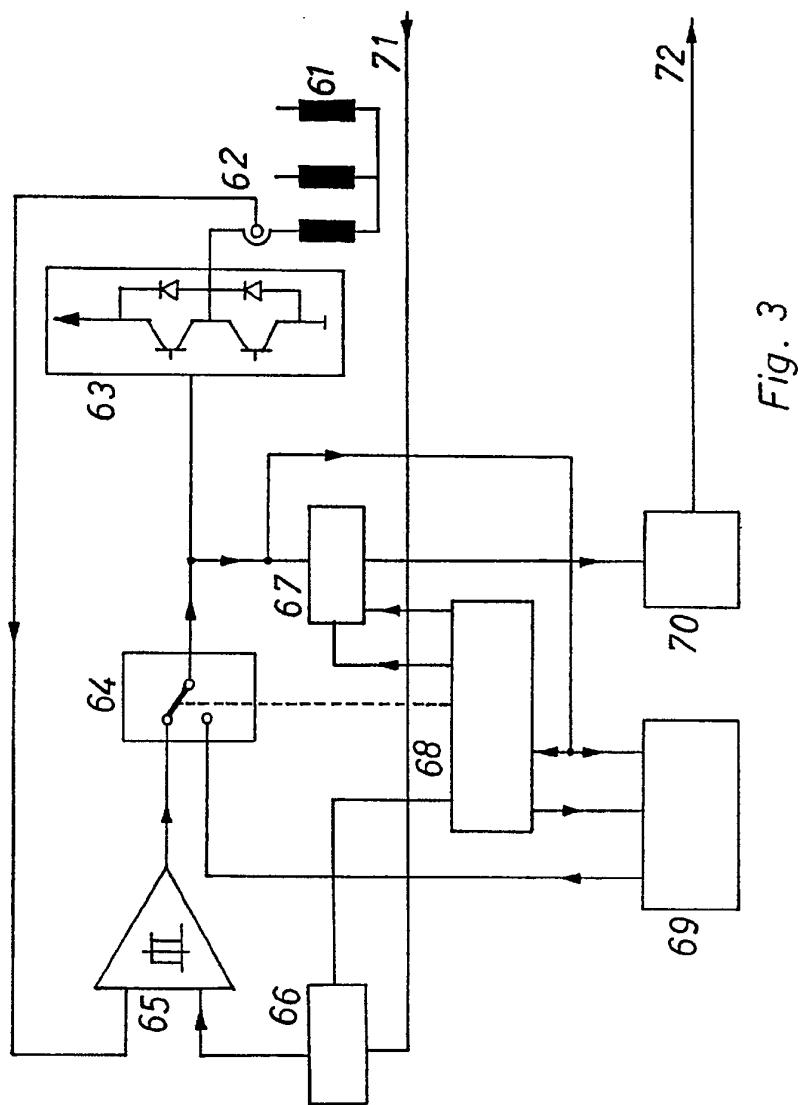


Fig. 3