

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
27. Dezember 2013 (27.12.2013)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2013/189609 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
H02P 9/10 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2013/001835

(22) Internationales Anmeldedatum:
21. Juni 2013 (21.06.2013)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2012 012 465.1 21. Juni 2012 (21.06.2012) DE

(71) Anmelder: **BROSE FAHRZEUGTEILE GMBH & CO. KG** [DE/DE]; Würzburg, Ohmstr. 2a, 97076 Würzburg (DE).

(72) Erfinder: **SCHWARZKOPF, Johannes**; Am Klöffling 13, 97828 Marktheidenfeld (DE).

(74) Anwalt: **DÖRING, Sven-Uwe**; Brose Fahrzeugteile GmbH & Co., Kommanditgesellschaft, Coburg, Ketschendorfer Straße 38-50, 96450 Coburg (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,

BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

(54) Title: SYNCHRONOUS MACHINE AND METHOD FOR OPERATING A SYNCHRONOUS MACHINE

(54) Bezeichnung : SYNCHRONMASCHINE UND VERFAHREN ZUM BETRIEB EINER SYNCHRONMASCHINE

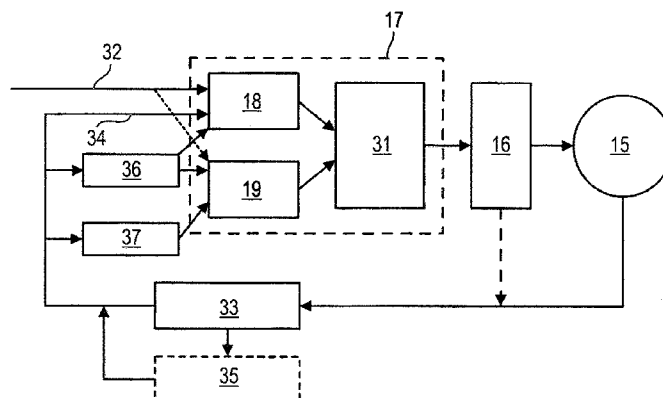


FIG. 5

(57) Abstract: The invention relates to a method for operating a synchronous motor (15) comprising a stator and comprising phase windings (U, V, W) with a drive device (16) for the phase windings, a measuring device (33) and a closed-loop control device (17) for the closed-loop control of the drive device (16), wherein for complexity- and effect-optimized closed-loop control, the measuring device (33) detects exclusively electrical variables at the phase windings of the synchronous motor (15) and/or in the drive device (16), the value of a variable which is representative of the load angle between the stator field and the rotor or the value of the load angle is determined from this, and a manipulated variable of the closed-loop control device (17, 37) is determined exclusively from the discrepancy between the determined values and a setpoint value, for bringing the load angle close to the setpoint value for the load angle.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betrieb eines Synchronmotors (15) mit einem Stator und mit Phasenwicklungen (U, V, W) mit einer Ansteuereinrichtung (16) für die Phasenwicklungen einer Messeinrichtung (33) sowie einer Regeleinrichtung (17) zur Regelung der Ansteuereinrichtung (16), wobei für eine aufwands- und wirkungsoptimierte Regelung die Messeinrichtung (33) ausschließlich elektrische Größen an den Phasenwicklungen des Synchronmotors (15) und /oder in der Ansteuereinrichtung (16) erfasst, dass hieraus der Wert einer für den Lastwinkel zwischen Statorfeld und Rotor repräsentativen Größe oder der Wert des Lastwinkels ermittelt wird und dass ausschließlich aus der Abweichung der ermittelten Werte von einem Sollwert eine Stellgröße der Regeleinrichtung (17, 37) zur Annäherung des Lastwinkels an den Sollwert des Lastwinkels ermittelt wird.

Beschreibung

Synchronmaschine und Verfahren zum Betrieb einer Synchronmaschine

Die Erfindung liegt auf dem Gebiet der Elektrotechnik und bezieht sich insbesondere auf Synchronmaschinen.

Derartige Synchronmaschinen können als rotierende elektrische Maschinen sowohl als Motor als auch als Generator betrieben werden. Entsprechende Synchronantriebe werden vielfältig in der Industrie als Maschinenantriebe, jedoch auch als Stellantriebe eingesetzt. Eine solche Synchronmaschine weist grundsätzlich einen Stator mit Statorwicklungen, sogenannte Phasenwicklungen auf, die im Bereich des Rotors ein magnetisches Drehfeld erzeugen. Eine entsprechende Ansteuerung der Phasenwicklungen bewirkt, dass das magnetische Feld rotiert. Ein im Drehfeld befindlicher Rotor mit magnetischen Polen, die entweder als Permanentmagnete oder elektrisch erregte Magnete ausgebildet sein können, dreht sich synchron mit der Drehzahl des durch den Stator erzeugten Drehfeldes.

Die Ansteuerung der Phasenwicklungen des Stators erfolgt üblicherweise durch elektronisch angesteuerte Umrichterschaltungen, die mit Leistungshalbleitern gestaltet sind. Abhängig von der Belastung eines Antriebs eilt der Rotor dem Stator-drehfeld mehr oder weniger nach und zwar um einen Winkel α , der als Polradwinkel oder Lastwinkel bezeichnet wird. Wird die Last zu groß, so vergrößert sich der Lastwinkel bis über einen Kippwinkel hinaus, bei dem der Antrieb stehen bleibt.

Übliche Steuerungen für Synchronantriebe sehen vor, dass die absolute Position des Rotors (Winkelposition) durch gesonderte Sensoren (beispielsweise Hallsensoren oder andere magnetische Sensoren) oder durch Auswertung der in der Statorwicklung induzierten Spannung (EMK) ermittelt wird. Eine Regelung der Maschine stellt dann beispielsweise Spannungen oder Stromstärken an den Phasenwicklungen derart ein, dass ein Sollverhalten, insbesondere eine zeitabhängige Sollposition, der Synchronmaschine erreicht wird.

BESTÄTIGUNGSKOPIE

Ein Nachteil derartiger Verfahren ist einerseits, dass die Ermittlung der absoluten Position des Rotors entsprechende Sensoren und Hardwareaufwand sowie eine gewisse Rechenleistung in der Regeleinrichtung erfordert. Auch die indirekte Ermittlung der absoluten Position des Rotors über elektrische Größen erfordert Rechenleistung. Andererseits ist die Ermittlung der absoluten Rotorposition auch zeitaufwendig, so dass eine Reaktion der Regelung bei Laständerung oft nicht mit der gewünschten Geschwindigkeit erfolgen kann. Zudem ist besonders bei der Ermittlung der Rotorposition über elektrische Größen oft eine entsprechende Gestaltung der Kommutierung in der Ansteuerung der Phasenwicklungen notwendig, so dass weitere Randbedingungen für die Ansteuerung entstehen, die die Regelung erschweren.

Typische Probleme, die bei derartigen Regelverfahren entstehen, sind akustische Anregungen und langsame Reaktion der Regelung bei Laständerungen sowie gegebenenfalls auch Schwingungsverhalten der geregelten Größe, beispielsweise der Rotorgeschwindigkeit, wodurch beispielsweise Schwingungen des Lastwinkels bis hin zum Erreichen des Kippwinkels entstehen können.

Der vorliegenden Erfindung liegt vor dem Hintergrund des Standes der Technik die Aufgabe zugrunde, ein stabiles Verfahren zum Betrieb einer Synchronmaschine zu schaffen, das eine möglichst einfache und effektive Regelung auch bei Laständerungen erlaubt und dabei mit einer möglichst unaufwändigen Regeleinrichtung auskommt. Des Weiteren soll eine danach arbeitende Synchronmaschine, insbesondere ein danach arbeitender Synchronmotor angegeben werden.

Bezüglich des Verfahrens wird die genannte Aufgabe erfindungsgemäß gelöst durch die Merkmalen des Patentanspruchs 1. Vorteilhafte Weiterbildungen sind Gegenstand der hierauf rückbezogenen Unteransprüche. Bezüglich der Synchronmaschine wird die genannte Aufgabe erfindungsgemäß gelöst mit den Merkmalen des Patentanspruchs 12. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind Gegenstand der hierauf rückbezogenen Unteransprüche.

Dabei wird vorausgesetzt, dass die Synchronmaschine, insbesondere der Synchronmotor, einen Stator mit Phasenwicklungen sowie eine Ansteuereinrichtung für die Phasenwicklungen, eine Messeinrichtung und eine Regeleinrichtung zur Regelung der Ansteuereinrichtung aufweist.

Gemäß der Erfindung ist zudem vorgesehen, dass die Messeinrichtung ausschließlich elektrische Größen an den Phasenwicklungen des Synchronmotors und/oder in der Ansteuereinrichtung erfasst, dass hieraus der Wert einer für den Lastwinkel zwischen Statorfeld und Rotor repräsentativen Größe oder der Wert des Lastwinkels ermittelt wird, und dass ausschließlich aus der Abweichung der ermittelten Werte von einem Sollwert eine Stellgröße der Regeleinrichtung zur Annäherung des Lastwinkels an den Sollwert des Lastwinkels ermittelt wird.

Dabei sind üblicherweise wenigstens zwei oder drei Phasenwicklungen zur Erzeugung des Drehfeldes vorgesehen, die über die Ansteuereinrichtung mit Strom versorgt werden. Beispielsweise erzeugt die Ansteuereinrichtung dabei aus elektronischen Steuersignalen für die einzelnen Phasenwicklungen zeitabhängige Spannungen in Form von pulswertenmodulierten Signalen. Dazu werden entsprechende Spannungen an die Phasenwicklungen angelegt. Die Spannungen werden der Pulsweitenmodulation üblicherweise von einem elektrischen Zwischenkreis zugeführt, der Teil einer Halbleiterbrückenschaltung mit steuerbaren Halbleiterschaltern, beispielsweise Transistoren, Feldeffekttransistoren oder IGBTs ist. Über die Pulsweitenmodulation werden dann die Sollspannung und die Stromstärke an den Phasenwicklungen eingestellt.

Die Messeinrichtung kann beispielsweise den Spannungsabfall an den Phasenwicklungen messen und dabei beispielsweise auch die durch den Rotor in der Statorwicklung erzeugte induzierte Spannung erfassen, die zeitlich ins Verhältnis zu den Ansteuerspannungen der Phasenwicklungen gesetzt werden kann. Hierdurch kann bereits ein Lastwinkel bestimmt werden, ohne dass unmittelbar eine Rotorposition bestimmt wird. Es kann auch als eine für den Lastwinkel zwischen Statorfeld und Rotor repräsentative Größe zu einem bestimmten Zeitpunkt, der durch die Statorfeldperiodizität bestimmt ist, die bei Erreichen des optimalen Last-

winkels zu diesem Zeitpunkt erwartete induzierte Spannung mit der zu diesem Zeitpunkt tatsächlich induzierten Spannung verglichen und der Differenzwert der weiteren Regelung zu Grunde gelegt werden, bis dieser Differenzwert auf Null heruntergeregelt worden ist. Bei Verschwinden der Differenz ist dann der optimierte Lastwinkel erreicht.

Die gemessenen Werte der Messgröße(n) können allerdings auch zusätzlich und unabhängig von dem Regelmechanismus in eine Rotorposition umgerechnet werden und damit ebenfalls Aufschluss über den Lastwinkel geben. Dieser Rechengang kann, da er keine für die Regelung benötigte Größe liefert, mit geringer Geschwindigkeit und geringem Rechenaufwand durchgeführt werden. Die Messeinrichtung kann auch die Stromstärke und damit die Last des Antriebs oder eine Kombination aus Strom und Spannung an den einzelnen Phasenwicklungen erfassen.

Durch den Vergleich der durch die Messeinrichtung erfassten Werte mit den durch die Ansteuereinrichtung eingespeisten Signalen kann die Rückwirkung der Synchronmaschine auf die Ansteuereinrichtung und daraus unter anderem der Lastwinkel und gegebenenfalls die absolute Last ermittelt werden. Diese Rückwirkung dient als Grundlage zur Ermittlung der Regelabweichung, d.h. der Differenz zwischen einer Ist-Größe und einer Soll-Größe sowie der Ermittlung der Stellgröße der Regeleinrichtung, um eine Annäherung an den Sollwert der Führungsgröße (den optimalen Lastwinkel) zu bewirken.

Die Regelung kann zum Erreichen des Sollwertes beispielsweise als Stellgröße die Spannung, beispielsweise die Spannungsamplitude, an den Phasenwicklungen und/oder den Strom, beispielsweise die Stromamplitude des Stroms, durch die Phasenwicklungen steuern oder beeinflussen, wobei eine Erhöhung der Statorfeldstärke üblicherweise zu einer Verringerung des Lastwinkels führt. Der optimale Lastwinkel bestimmt den optimalen Wirkungsgrad der Synchronmaschine und hängt beispielsweise vom Reluktanzmoment der Maschine ab.

In den beschriebenen Fällen ist jedenfalls eine direkte Messung der Position des Rotors mit dem entsprechenden Hardware- und Rechenaufwand vermeidbar und die Regeleinrichtung kommt mit der Ermittlung des Lastwinkels oder einer für diesen repräsentativen elektrischen Größe zur Optimierung des Wirkungsgrades aus. Es kann dabei vorteilhaft vorgesehen sein, dass eine Drehzahl und/oder eine zeitabhängige Sollposition des Rotors der Synchronmaschine vorgegeben ist.

Beim Konzept der Erfindung wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die Drehzahl der Synchronmaschine als ein Sollwert vorgegeben ist und diese durch die Regeleinrichtung vorteilhaft primär nicht beeinflusst wird, sondern dass die Regeleinrichtung lediglich Phasenspannungen und Phasenspannungsamplituden beeinflusst. Lediglich eine mit der Regeleinrichtung zusammenwirkende Dämpfungseinrichtung, die weiter unten noch näher erläutert wird, kann dafür vorgesehen sein, auch die Drehzahl oder die Frequenz des Statorfeldes zumindest kurzfristig und vorübergehend zu beeinflussen.

Der Rotor folgt grundsätzlich dem Statorfeld und hält auch dessen Drehzahl ein, solange der kritische Kippwinkel zwischen Statorfeld und Rotorposition nicht erreicht wird, so dass die Regelung auf die Optimierung des Lastwinkels konzentriert oder beschränkt werden kann. Die eigentliche Rotorposition oder -drehzahl muss weder konkret ermittelt, noch geregelt werden.

Vorteilhaft kann bei der Regelung die Stellgröße der Regeleinrichtung die Spannungsamplitude und/oder eine Stromstärkenamplitude in wenigstens einer Phasenwicklung oder in zwei oder drei Phasenwicklungen sein. Mit der Spannungsamplitude ist der Maximalwert der Spannung gemeint, der durch Sinus- und Cosinusfunktionen oder auch konkret durch eine Pulsweitenmodulation zur Ansteuerung einer Phasenwicklung moduliert wird. Damit muss zur Regelung lediglich eine Größe angepasst werden, die beim Betrieb der Ansteuereinrichtung zeitlich grundsätzlich konstant ist. Die Stromstärken- bzw. Spannungsamplitude werden in der Ansteuereinrichtung als konstanter Wert der Modulation durch eine periodische Funktion, beispielsweise eine Sinusfunktion oder eine Pulsweitenmodulation zugrunde gelegt.

Als Stellgröße kann vorteilhaft auch ein bestimmtes Zeitverhalten der Ansteuerung einer Phasenwicklung (U, V, W), beispielsweise ein Tastverhältnis einer Pulsweitenmodulation, für eine begrenzte Wirkzeit dienen. Beispielsweise kann bei einem Lastwechsel an der Synchronmaschine eine Verlängerung der Periodendauer bei der Ansteuerung einer oder mehrerer Phasenwicklungen für eine halbe oder ganze Periode oder wenige Perioden des Drehstromfeldes der Synchronmaschine vorgesehen sein, um beispielsweise einen plötzlich vergrößerten Lastwinkel durch einen Zeitversatz des Drehstromfeldes dauerhaft oder vorübergehend zu verringern.

Grundsätzlich kann auch vorgesehen sein, dass die Stellgröße eine Frequenz der Ansteuerung der Phasenwicklungen, also des Drehstromfeldes ist. Dies kann dazu führen, dass bei einem Lastwechsel die Drehgeschwindigkeit des Drehfeldes zeitweise an die veränderte Last angepasst wird. Beispielsweise kann bei einer vergrößerten Last vorübergehend die Frequenz bei der Ansteuerung der Phasenwicklungen gesenkt und damit die Drehzahl des Drehfeldes und des Rotors gesenkt werden. Dies kann für eine so kurze Wirkzeit realisiert werden, dass faktisch nur eine oder wenige Schwingungsperioden des Drehfeldes verlängert sind.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens sieht vor, dass das zeitliche Verhalten der Regelabweichung ermittelt und durch eine Dämpfungseinrichtung die Änderungsgeschwindigkeit der Stellgröße gezielt verringert wird, um die Änderung der Regelabweichung zu dämpfen.

Es ist grundsätzlich bekannt, dass eine zu stark und/oder zu schnell eingreifende Regelung bei Auftreten einer Regelabweichung zum Aufschwingen der Regelabweichung führen kann. Wird beispielsweise bei einer sprunghaft vergrößerten Last der Lastwinkel entsprechend vergrößert, so kann die Regelung durch eine Erhöhung der Spannung und/oder der Stromstärke in den Phasenwicklungen eine ebenso sprunghafte Verringerung des Lastwinkels bewirken, so dass der Lastwinkel stark um den Sollwert schwingen kann. Solche Schwingungen können beispielsweise durch in der Literatur bekannte Masse-Federmodelle des Polradwin-

kels/Lastwinkels beschrieben werden und im Extremfall zum Erreichen des Kippwinkels führen, bei dem die Synchronmaschine nicht mehr funktioniert. Aus diesem Grund kann erfindungsgemäß eine Dämpfung der Regelung durch die Regeleinrichtung vorgesehen werden, die in elektronischer Weise realisiert wird.

Grundsätzlich ist auch alternativ oder zusätzlich zu der elektronischen Dämpfung die Realisierung einer solchen Dämpfung durch einen sogenannten Dämpferkäfig im Rotor möglich, wobei der Dämpferkäfig durch im Rotor induzierte Ströme magnetische Felder erzeugt, die Pendelungen dämpfen und das System gegenüber raschen Änderungen stabilisieren.

Eine elektronische Dämpfung kann jedoch gezielter und damit optimiert reagieren. Es wird daher gemäß der vorliegenden Erfindung als vorteilhaft angesehen, solche Dämpfungen zumindest zusätzlich in elektronischer Weise zu realisieren, indem beispielsweise die Stellgröße der Regeleinrichtung nicht sprunghaft, sondern allmählich und zeitlich verzögert angepasst wird. Alternativ kann die Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung durch das Messsystem erfasst und die Stellgröße derart verändert werden, dass die Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung begrenzt wird. Die Dämpfungseinrichtung kann auch den durch die Regeleinrichtung erzeugten elektrischen Signalen an den Phasenwicklungen selbst eigene Signale überlagern und somit die Wirkung der Regeleinrichtung modulieren.

Vorteilhaft kann die Erfindung dadurch ausgestaltet werden, dass zur Ansteuerung einer Dämpfungseinrichtung Spannungswerte an den Phasenwicklungen und/oder Phasenströme der Synchronmaschine gemessen und hieraus Pendelungen ermittelt werden. Da Pendelungen des Rotors durch die Rückwirkung auf das Statorfeld auch auf die Ströme in den Statorwicklungen und die Spannungen an den Statorwicklungen zurückwirken, kann ein konkreter Schwingungszustand durch Analyse der Phasenströme und/oder der Spannungen ermittelt werden.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung kann vorsehen, dass zur Ansteuerung einer Dämpfungseinrichtung eine in den Phasenwicklungen durch

die Rotorbewegung induzierte Spannung erfasst wird und hieraus Pendelungen ermittelt werden. Da eine der gewollten Rotorbewegung überlagerte Zusatzschwingung die Relativbewegung von Rotor und Statorfeld beeinflusst, sind hiervon auch die durch die Relativgeschwindigkeit bestimmten, im Stator induzierten Spannungen beeinflusst. Daher lässt sich der Schwingungszustand durch Analyse der induzierten Spannungen ermitteln.

Es kann außerdem vorteilhaft vorgesehen sein, dass zur Dämpfung einer Rotorpendelung durch eine Dämpfungseinrichtung die Amplitude und/oder die Phasenlage der Ansteuerspannung beeinflusst wird.

Zudem kann bei der Erfindung vorgesehen sein, dass zur Dämpfung einer Rotorpendelung durch eine Dämpfungseinrichtung eine zeitabhängige Spannung am Umrichter der durch die Regeleinrichtung erzeugten Kommutierungsspannung überlagert wird.

Die Erfindung bezieht sich außer auf ein Verfahren zum Betrieb einer Synchronmaschine auch auf die Ausgestaltung einer Synchronmaschine/eines Synchronmotors. Es ist dabei eine Synchronmaschine vorgesehen, die einen Stator mit Phasenwicklungen und einen Rotor sowie eine Ansteuereinrichtung für die Phasenwicklungen und eine Messeinrichtung sowie eine Regeleinrichtung zur Regelung der Ansteuereinrichtung aufweist. Die Erfindung sieht dabei vor, dass die Messeinrichtung ausschließlich elektrische Messgrößen an wenigstens einer Phasenwicklung und/oder an der Ansteuereinrichtung erfasst und verarbeitet, dass die Regeleinrichtung eine für den Lastwinkel zwischen Statorfeld und Rotor repräsentative Größe oder den Lastwinkel und eine Stellgröße, insbesondere eine Spannungsamplitude zur Ansteuerung der Phasenwicklungen zur Annäherung des Lastwinkels an den Sollwert des Lastwinkels ermittelt.

Der Regeleinrichtung werden somit keine Messwerte beispielsweise von einer weiteren Messeinrichtung zugeführt, die die Position des Rotors direkt über Hardwaresensoren misst. Als Führungsgröße für die Regeleinrichtung dienen somit ausschließlich Größen, die für den Lastwinkel repräsentativ sind oder unmittelbar

die Größe des Lastwinkels ausdrücken, und die aus elektrischen Messungen an einer, zwei, drei oder mehr Phasenwicklungen und/oder an der Ansteuerrichtung ermittelt werden.

Die Messeinrichtung kann beispielsweise durch eine Ermittlung der Spannungsabfälle an einer, zwei oder drei Phasenwicklungen oder der maximalen Stromstärken oder Stromstärkenverläufe und einer, zwei oder drei Phasenwicklungen die Last an der Synchronmaschine sowie die durch die Rotorbewegung induzierten Spannungen bestimmen und hieraus den Lastwinkel ermitteln. Es kann somit aus dem Verhältnis zwischen den an den einzelnen Phasen anliegenden Spannungen und den Lastströmen oder aus dem zeitlichen Verhalten von Strömen und Spannungen der Lastwinkel ermittelt werden. Als Führungsgröße für die Regeleinrichtung kann dann entweder eine Spannung an einer Phasenwicklung, eine Stromstärkenamplitude oder eine punktuell zu einem bestimmten Zeitpunkt der Ansteuerperiode erreichte Spannung oder Stromstärke dienen, die für den Lastwinkel / Polradwinkel charakteristisch sind. Somit kann die Synchronmaschine in besonders einfacher und unaufwändiger Weise geregelt werden, wobei besonders schnell auch mit geringer Rechenleistung der Regeleinrichtung effizient auf Lastwechsel reagiert werden kann.

Die Messeinrichtung kann beispielsweise auch eine Einrichtung zur Messung der Stromstärke oder einer Spannung an einer Stromquelle der Ansteuereinrichtung und/oder an einem elektrischen Zwischenkreis aufweisen.

Das tatsächliche Verhalten der Synchronmaschine wirkt auch auf diese genannten Größen zurück, so dass auch aus deren Verhalten die Last oder der Lastwinkel der Synchronmaschine und hieraus eine Stellgröße für die Regeleinrichtung ermittelt werden kann.

Eine vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung sieht zudem vor, dass eine elektrische Dämpfungseinrichtung für die Stellgröße des Reglers entweder in die Regeleinrichtung integriert oder dieser nachgeschaltet ist. Das bedeutet beispielsweise, dass bei einer Integration der Dämpfungseinrichtung in die Regeleinrich-

tung die Dämpfungseinrichtung Einfluss auf das Regelverhalten der Regeleinrichtung nimmt, um ein Aufschaukeln eines Pendelverhaltens zu verhindern. Die Dämpfungseinrichtung kann allerdings auch auf die durch die Regeleinrichtung erzeugten und ausgegebenen Stellgrößen Einfluss nehmen oder diesen eigene Signale, beispielsweise eine Modulation am Eingang der Ansteuereinrichtung oder am Umrichter oder eigene Spannungssignale direkt an einer oder mehreren Phasenwicklungen überlagern.

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand einer Zeichnung näher erläutert. Darin zeigen:

- Fig. 1 schematisch die Phasenwicklungen eines Elektroantriebs in Sternschaltung,
- Fig. 2 eine Brückenschaltung zur Ansteuerung jeweils einer Phasenwicklung eines Antriebs,
- Fig. 3 ein Ersatzschaltbild für eine Spannungsversorgung einer Phase,
- Fig. 4 ein schematisiertes Ersatzschaltbild für einen Elektroantrieb in Dreiecksschaltung,
- Fig. 5 eine Einrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Betriebsverfahrens,
- Fig. 6 eine weitere Einrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Betriebsverfahrens, bei der die Dämpfungseinrichtung direkt die Ausgangssignale der Regeleinrichtung moduliert, und
- Fig. 7 eine Einrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Betriebsverfahrens, bei der die Dämpfungseinrichtung nur auf die Phasenlage und die Regeleinrichtung nur auf die Amplituden der Ansteuerungen der Phasenwicklungen wirkt.

Fig. 1 zeigt schematisch eine Sternschaltung von drei Phasenwicklungen U, V, W, wobei der Sternpunkt 1 den Verbindungsanschluss zwischen jeweils zwei Phasenwicklungen U, V, W bildet. Die einzelnen Phasenwicklungen sind in Form eines Ersatzschaltbildes gezeigt mit jeweils einer Induktivität 2, einem ohmschen Widerstand 3 und einem Spannungsabfall, der durch eine durch die Bewegung

des Rotors induzierte Spannung (EMK, EMF) erzeugt wird und durch den Kreis 4 repräsentiert ist. Wenn eine der drei Phasenwicklungen als stromlos angenommen wird, so ergibt sich jeweils eine Reihenschaltung der beiden übrigen Phasenwicklungen, die jeweils am Sternpunkt 1 verbunden sind.

Die jeweils über einer Phasenwicklung U, V, W abfallende Spannung ist durch die Pfeile 20, 21, 22 repräsentiert und ergibt sich jeweils als Summe der Spannungsabfälle über Induktivität und ohmschem Widerstand und induzierter Spannung.

Die Ansteuerung eines derartigen in Sternschaltung betriebenen bürstenlosen Elektroantriebs kann beispielsweise über eine sogenannte B6-Schaltung erfolgen, bei der an jede der Phasenwicklungen wahlweise ein höheres Gleichspannungsniveau oder ein niedrigeres Gleichspannungsniveau eines Zwischenkreises 5 bis 11, insbesondere Erdpotential, angelegt werden kann. Damit ist ein solcher Elektroantrieb bezüglich der Drehzahl, der Leistung und der Drehrichtung steuerbar.

Beispielhaft ist eine Anordnung aus zwei Schaltern für die Phase W in der FIG 1 dargestellt, wobei mit 5 der Erdpotentialanschluss und mit 6 ein höheres Gleichspannungspotential des Zwischenkreises 5 bis 11 bezeichnet ist. Über die Schalter 7, 8 kann der erste Anschluss 9 der Phasenwicklung W entweder mit dem höheren Gleichspannungspotential oder mit Erdpotential verbunden werden. Wird der Schalter 7 geschlossen und der Schalter 8 geöffnet, so ist der Anschluss 9 mit dem höheren Spannungspotential verbunden. Ist der Anschluss 7 geöffnet und der Anschluss 8 geschlossen, so wird der erste Anschluss 9 der Phasenwicklung W mit dem Erdpotential verbunden. Je nach der Schaltstellung der einzelnen Schalter kann somit die Phasenwicklung mit zwei verschiedenen Spannungsniveaus beaufschlagt werden.

Fig. 2 stellt vergleichsweise detailliert die mögliche Konstruktion einer Schaltung mit einer Konstellation aus zwei Halbleiterschaltern dar, über die gezielt zwei verschiedene Spannungspotentiale an eine Phasenwicklung angeschlossen werden können. Der Phasenwicklungsanschluss ist mit 9 und ein erster Schalter ist mit 7 sowie ein zweiter Schalter mit 8 - analog den Bezeichnungen aus der Fig. 1 - be-

zeichnet. Ein niedriges Spannungsniveau beispielsweise des Erdpotentials ist durch den Erdpotentialanschluss 5 bezeichnet, während das höhere Gleichspannungspotential an dem Anschluss 6 anliegt. Die Schalter 7, 8 sind als MOSFET's realisiert, die jeweils Durchschalten oder Sperren können, und die durch eine Steuerspannung bzgl. deren Schaltzustandes ansteuerbar sind. Die Steuerspannungseingänge sind in Fig. 2 mit 10, 11 bezeichnet. Durch entsprechende Ansteuerung der Steuerspannungseingänge 10, 11 kann somit an eine Phasenwicklung einer Schaltung, beispielsweise einer Sternschaltung, eines Elektroantriebs wahlweise ein Gleichspannungsimpuls eines höheren Spannungsniveaus oder eines geringeren Spannungsniveaus oder Erdpotentials übertragen werden.

Fig. 3 zeigt ein Ersatzschaltbild für eine Spannungsquelle, die beispielsweise das höhere Spannungsniveau am Anschluss 6 in Fig. 2 gegenüber Erdpotential liefern kann. Dabei bezeichnet 23 den Innenwiderstand der Spannungsquelle, 24 die Eigeninduktivität, 25 die Kapazität, 26 den Erdpotentialanschluss, 27 den Shuntwiderstand, an dem die Nutzspannung abfällt sowie 28 die gelieferte Nutzspannung und 29 den gelieferten Strom. Strom und Spannung werden auf der linken Seite der Schaltung beispielhaft durch eine Batterie geliefert.

Üblicherweise weist eine Sternschaltung, wie in Fig. 1 dargestellt, jeweils Halbleiterschalterbrücken für jede Phasenwicklung auf, wie beispielsweise in Fig. 2 dargestellt.

Analoges gilt für eine in Fig. 4 schematisch dargestellte Dreiecksschaltung, die ebenfalls als typische Schaltung eines Elektroantriebes dienen kann, mit entsprechend in bekannter Weise gegenüber einer Sternschaltung verschiedener Antriebscharakteristik. Für die einzelnen Phasenwicklungen der Phasen U, V, W gilt das oben im Zusammenhang mit Fig. 1 Beschriebene.

In Fig. 5 ist beispielhaft eine Synchronmaschine 15 in Form eines Synchronmotors dargestellt, der von einem Umrichter 16 gespeist wird. Der Umrichter 16 stellt eine Ansteuereinrichtung für die Phasenwicklungen U, V, W des Motors dar und enthält

die typischen Komponenten für eine Spannungsversorgung der Phasenwicklungen, gegebenenfalls einschließlich einer Einrichtung für die Pulsweitenmodulation.

Eine entsprechende Regeleinrichtung für die Ansteuereinrichtung 16 ist in Fig. 5 mit 17, 37 bezeichnet. Die Regeleinrichtung 17 weist für den Spannungsvektor, der in der Ansteuereinrichtung 16 in die Speisespannung der Phasenwicklungen umgesetzt wird, einerseits ein Richtungsvorgabemodul 18 auf, das zeitabhängig unter Beachtung der Sollfrequenz die Ausrichtung des Spannungsvektors, das heißt die relative Phasenlage der einzelnen Phasenspannungen vorgibt sowie andererseits ein Vektorlängenmodul 19, das zur Festlegung der Amplitude der einzelnen Phasenspannungen dient. Die Informationen/Vorgaben des Richtungsvorgabemoduls 18 und des Vektorlängenmoduls 19 werden an ein Vektormodul 31 geleitet, das die Vorgaben in ein Vektor-Tupel, insbesondere ein Vektor-Tripel, also letztlich eine absolute Vorgabe für die einzelnen Komponenten des Spannungsvektors umsetzt. Diese Informationen werden dann an den Umrichter geleitet und dort in Speisespannungsgrößen für die einzelnen Phasen umgewandelt.

Als Spannungsverlauf kann beispielsweise in üblicher Form folgender für die Phasen U, V und W gewählt werden:

$$U_U = \sin(\alpha)$$

$$U_V = \sin(\alpha + 120^\circ)$$

$$U_W = \sin(\alpha - 120^\circ)$$

Die Vektorlänge wird durch die Spannungsamplitude U_{Amp} bestimmt. Aus der Richtungsvorgabe und der Vektorlänge baut die Regeleinrichtung 17, 37 die Ansteuergrößen für die Ansteuereinrichtung 16 auf:

$$U_{U\text{Anst}} = U_{\text{Offset}} + U_{\text{Amp}} * U_U$$

$$U_{V\text{Anst}} = U_{\text{Offset}} + U_{\text{Amp}} * U_V$$

$$U_{W\text{Anst}} = U_{\text{Offset}} + U_{\text{Amp}} * U_W$$

Als Wert für U_{Offset} wird meist die halbe Zwischenkreisspannung gewählt. U_{Offset} kann aber auch vorteilhaft zeitlich veränderlich gewählt werden:

$$U_{\text{Offset}}(t) = - \min (U_{\text{Amp}}(t) * U_U(t), U_{\text{Amp}}(t) * U_V(t), U_{\text{Amp}}(t) * U_W(t)).$$

Dies führt dazu, dass jeweils eine Phase den Wert 0 hat. Diese Spannungsgrößen kann dann die Ansteuereinrichtung zur Erzeugung von zeitabhängigen Spannungswerten verarbeiten. Der Verlauf der einzelnen Phasenspannungen kann beispielsweise durch eine Pulsweitenmodulation in der Ansteuereinrichtung umgesetzt werden.

Eingangsseitig wird der Regeleinrichtung 17, 37 außer beispielsweise der Sollfrequenz der Ansteuerung, also der Solldrehzahl der Maschine, einerseits über einen Sollwerteingang 32 ein Sollwert für den Lastwinkel oder einer oder mehreren für diesen repräsentativen Größen vorgegeben. Solche repräsentativen Größen können beispielsweise bestimmte Werte von induzierten Spannungen an den Phasenwicklungen zu bestimmten Zeitpunkten in Bezug auf die Periode der Phasenwicklungsansteuerung, also in Bezug auf die Ausrichtung des Phasenvektors sein.

Ein Messsystem 33 ermittelt aus direkt am Motor gemessenen Größen, wie beispielsweise der Phasenspannung und/oder dem Phasenstrom sowie beispielsweise den induzierten Spannungen und deren Zeitverhalten, den tatsächlichen Lastwinkel und leitet diesen eingangsseitig als Istwert an die Regeleinrichtung 17, 37 über den Istwert-Eingang 34 und den Phasenregler 37. Die Regeleinrichtung kann über den Phasenregler 37 zur gezielten Änderung des Lastwinkels beispielsweise die Phasenspannungen (entsprechend der Vektorlänge) vergrößern (bei zu großem Lastwinkel) oder verringern (bei zu kleinem Lastwinkel). Damit kann je nach der Wahl des Sollwertes am Sollwerteingang 32 ein optimierter Phasenwinkel eingestellt werden, der beispielsweise unter anderem vom Reluktanzmoment des Motors abhängt.

Aktuelle Messwerte des Lastwinkels oder der für ihn repräsentativen Größe(n) wird/werden in dem gezeigten Beispiel gemäß Fig. 5 zudem der Dämpfungseinrichtung 36 zugeführt. Die Dämpfungseinrichtung kann sowohl auf die Vektorlänge als auch auf die Vektorrichtung einwirken, d. h. sowohl die Phasenspannungsmplituden als auch kurzfristig die Drehzahl verändern.

Die Messeinrichtung 33 kann zur Ermittlung der Rückwirkung des Motors auf die Ansteuerung auch direkt mit der Ansteuereinrichtung 16 verbunden sein, was durch eine gestrichelte Verbindung in Fig. 5 dargestellt ist. Die entsprechenden Größen können durch die Messeinrichtung 33 auch ausschließlich aus der Ansteuereinrichtung 16, beispielsweise in Form von Werten der Phasenströme, Phasenspannungen, des Zwischenkreisstroms oder des Batteriestromes gewonnen werden.

Aus den in der Messeinrichtung 33 verarbeiteten Größen kann zusätzlich auch in einem Positionsermittlungsmodul 35 indirekt die absolute Position des Rotors des Motors 15 ermittelt werden. Diese kann auch eingangsseitig der Regeleinrichtung 17 übermittelt werden. Wichtig ist, dass die Positionsermittlung, die zur Weitergabe von Informationen an die Regeleinrichtung 17 führt, für den Regelungsvorgang nicht notwendig ist.

Es kann wahlweise oder zusätzlich ein weiteres Positionsermittlungsmodul vorgesehen sein, dass mittels direkt am Motor 15 vorhandener Sensoren funktioniert, jedoch werden die so gewonnen Informationen über die Rotorposition ebenfalls im Rahmen der Erfindung nicht als Eingangsgröße für die Regeleinrichtung 17 benötigt und stellen allenfalls vorteilhaft verwendbare Zusatzinformationen dar.

Um die Wirkungsweise der Regeleinrichtung 17, 37 zu dämpfen, kann beispielsweise das Messsystem 33 außer den Istwerten des Lastwinkels oder einer für diesen repräsentativen ermittelten Messgröße auch eine Änderungsgeschwindigkeit der betreffenden Istgröße ermitteln und diese der Dämpfungseinrichtung 36 zuführen. Die Dämpfungseinrichtung 36 ist mit dem Richtungsvorgabemodul 18 und dem Vektorlängenmodul 19 verbunden und wirkt eingangsseitig auf die Regeleinrichtung 17, 37 ein, um ein Nachstellen der Sollgröße derart zu dämpfen, dass gegebenenfalls Schwingungen des Systems minimiert werden und schnell abklingen. Dabei kann zur Dämpfung ein langsamer Regler verwendet werden. Die Dämpfungseinrichtung kann auch das konkrete Schwingungsverhalten des Rotors aus Messwerten ermitteln und dem Regelungsverhalten Signale überlagern, die zu einer Dämpfung der Schwingungen führen.

Die Dämpfungseinrichtung 36 kann beispielsweise gemessene Motorströme/-Phasenstromstärken auswerten. Durch eine Pendelbewegung infolge einer Schwingung des Rotors werden beispielsweise Spannungen induziert, die sich den Speisespannungen aus der Ansteuereinrichtung überlagern. Auch beeinflusst die Variation des Lastwinkels die Phasenströme. Beispielsweise können die induzierten Spannungen im Nulldurchgang der Ströme gemessen werden, um entsprechende Pendelbewegungen zu detektieren. Die Dämpfung kann entweder durch Beeinflussung des momentan angesteuerten Lastwinkels (beispielsweise über eine zeitliche Rampe) oder durch eine Beeinflussung der Vektorlänge des Spannungsvektors geschehen.

Fig. 6 zeigt eine Konstellation, bei der die Dämpfungseinrichtung die Ausgangsgrößen der Regeleinrichtung moduliert und nicht unmittelbar auf die Regeleinrichtung einwirkt. Der Phasenregler der Regeleinrichtung kann sowohl auf die Vektorlänge als auch auf die Vektorrichtungsvorgabe, also die Phasenlage des Spannungsvektors, einwirken.

Bei einer beispielhaften Umsetzung der Erfindung wird zunächst der Regeleinrichtung eine Solldrehzahl und damit für jeden definierten Zeitpunkt auch eine Winkelposition vorgegeben. Wird eine Abweichung des Lastwinkels vom Sollwert detektiert, so folgt die durch die Regelung vorgegebene Drehzahl über eine Rampe dem eigentlichen Sollwert, wobei Randbedingungen wie die einzuhaltende Maximalstromstärke beachtet werden.

Das Messsystem erfasst im geschätzten Nulldurchgang der induzierten Spannung einer oder mehrerer Phasen die Phasenströme und optional auch beispielsweise den Batteriestrom. Diese Größen sind die Eingangsgrößen für die Regeleinrichtung 17, 37 und die Dämpfungseinrichtung 36.

Die Regeleinrichtung arbeitet dann folgendermaßen: Der Sollwert der Phasenströme im Nulldurchgang der induzierten Spannung ist Null. Da die Spannung zum Messzeitpunkt ausschließlich an der Induktivität abfällt, kann aus der bekannten

Induktivität, der gemessenen Stromstärke und der Drehzahl die Sollspannung bestimmt werden. Die ermittelten Werte für Stromstärke und Spannung werden der Regeleinrichtung 17, 37 zugeleitet und durch Variation der Amplitude und Phasenlage (Vektorausrichtung) des Spannungsvektors auf Null geregelt.

Anstelle einer Variation von Phasenlage und Amplitude des Spannungsvektors können auch, wie in Fig. 7 dargestellt, zwei unabhängige Aspekte der Amplitude (ein Sinusanteil und ein Cosinusanteil) getrennt geregelt werden. In diesem Fall ist der Phasenregler 37 nur mit dem Vektorlängenmodul und nicht mit dem Vektorrichtungsmodul verbunden.

Bei dem beschriebenen Beispiel nach Fig. 7 wirkt die Dämpfungseinrichtung beispielsweise folgendermaßen: Der Batteriestrom wird laufend gemessen. Bei Entstehen einer Pendelung des Rotors schwingt auch die Stromstärke des Batteriestroms entsprechend. Hieraus kann eine Dämpfung abgeleitet werden. Auf die Solldrehzahl wird eine zeitlich veränderliche Größe aufmoduliert, wobei

$n_{\text{neu}} = n_{\text{alt}} + f(I_{\text{Bat}})$ mit $f(I_{\text{Bat}})$ gleich einem Dämpfungsfaktor, multipliziert mit einer Momentanabweichung der Batteriestromstärke von einem Stromstärkenmittelwert ist. Die Vorzeichen sind derart gewählt, dass bei einem momentanen Überschreiten der gemittelten Batteriestromstärke der Sollwert der Drehzahl etwas reduziert wird, und dass dieser Sollwert der Drehzahl bei Unterschreiten der gemittelten Batteriestromstärke etwas heraufgesetzt wird.

Durch diese schwingungsabhängige Modulation der Solldrehzahl/Sollfrequenz/-Sollphasenlage wird eine effektive Dämpfung des Batteriestroms und des Gesamtsystems erreicht. Wahlweise kann zur Dämpfung auch die Amplitude der Phasenspannungen moduliert werden oder eine Kombination aus der Amplitude und der Phasenlage, wie dies in Figur 5 angedeutet ist. Die Dämpfungseinrichtung 36 wirkt in der beschriebenen Weise gegen eine Überschreitung eines Kippwinkels und für eine Minimierung von Rotorschwingungen mit den bekannten entsprechenden Nebenwirkungen.

Im Ergebnis wird durch die Implementierung der Erfindung der Betrieb einer Synchronmaschine mit einer optimierten Regelung erreicht, wobei sich nach einer vertretbaren Zeit eine optimale Phasenlage zwischen Statorfeld/Drehfeld und Rotorfeld einstellt. Vorteilhaft können überlagerte Schwingungen durch einen Dämpfer, insbesondere einen elektronischen Dämpfer, schnell zum Abklingen gebracht werden. Das Betriebsverfahren kann auf Lastsprünge und sonstige Veränderungen sehr schnell reagieren, bevor vergleichbare Messwerte von Istpositionen des Rotors, die gemäß dem Stand der Technik über früher verwendete gesonderte Sensoren gewonnen wurden, solche Veränderungen signalisieren könnten. Das verwendete Messsystem kann mit geringem Aufwand und relativ geringer Genauigkeit und Abtastrate arbeiten, da die Phasenregelung und die Dämpfung im Allgemeinen nicht zeitkritisch sind.

Die Erfindung ist nicht auf das vorstehend beschriebene Ausführungsbeispiel beschränkt. Vielmehr können auch andere Varianten der Erfindung von dem Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Gegenstand der Erfindung zu verlassen. Insbesondere sind ferner alle im Zusammenhang mit dem Ausführungsbeispiel beschriebene Einzelmerkmale auch auf andere Weise miteinander kombinierbar, ohne den Gegenstand der Erfindung zu verlassen.

Bezugszeichenliste

1	Sternpunkt	U, V, W	Phasenwicklungen
2	Induktivität		
3	ohmscher Widerstand		
4	induzierte Spannung		
5	Erdpotentialanschluss		
6	höheres Gleichspannungspotential		
7, 8	Schalter		
9	erster Anschluss der Phasenwicklung W		
10, 11	Steuerspannungseingänge		
12, 13, 14	Phasenanschlüsse in Dreieckschaltung		
15	Synchronmotor		
16	Ansteuereinrichtung		
17, 37	Regeleinrichtung		
18	Richtungsvorgabemodul		
19	Vektorlängenmodul		
20, 21, 22	über Phasenwicklung abfallende Spannungen		
23	Innenwiderstand der Spannungsquelle		
24	Eigeninduktivität der Spannungsquelle		
25	Kapazität der Spannungsquelle		
26	Erdpotentialanschluss der Spannungsquelle		
27	Shuntwiderstand der Spannungsquelle		
28	Nutzspannung der Spannungsquelle		
29	Strom der Spannungsquelle		
30	zweiter Anschluss der Phasenwicklung V		
31	Vektormodul		
32	Sollwerteingang		
33	Messeinrichtung		
34	Istwert-Eingang		
35	Positions-Ermittlungsmodul		
36	Dämpfungseinrichtung		
37	Phasenregler (Teil der Regeleinrichtung)		

2012 045 WO

21. Juni 2013

Ansprüche

1. Verfahren zum Betrieb einer Synchronmaschine, insbesondere eines Synchronmotors (15), mit einem Stator mit Phasenwicklungen (U, V, W), mit einer Ansteuereinrichtung (16) für die Phasenwicklungen, mit einer Messeinrichtung (33) sowie mit einer Regeleinrichtung (17, 37) zur Regelung der Ansteuereinrichtung (16),
dadurch gekennzeichnet,
 - dass die Messeinrichtung (33) ausschließlich elektrische Größen an den Phasenwicklungen des Synchronmotors (15) und/oder in der Ansteuereinrichtung (16) erfasst, wobei hieraus der Wert einer für den Lastwinkel zwischen Statorfeld und Rotor repräsentativen Größe oder der Wert des Lastwinkels ermittelt wird, und
 - dass ausschließlich aus der Abweichung der ermittelten Werte von einem Sollwert eine Stellgröße der Regeleinrichtung (17, 37) zur Annäherung des Lastwinkels an den Sollwert des Lastwinkels ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass eine Drehzahl und/oder eine zeitabhängige Sollposition des Rotors der Synchronmaschine vorgegeben ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Stellgröße eine Spannungsamplitude und/oder Stromstärkenamplitude an wenigstens einer Phasenwicklung (U, V, W) ist.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,

dadurch gekennzeichnet,
dass die Stellgröße ein variables Zeitverhalten der Ansteuerspannung einer Phasenwicklung (U, V, W), insbesondere ein Tastverhältnis einer Pulsweitenmodulation für eine begrenzte Wirkzeit ist.

5. Verfahren nach Anspruch 4,

dadurch gekennzeichnet,
dass die Stellgröße die Frequenz der Ansteuerung wenigstens einer Phasenwicklung (U, V, W) ist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5,

dadurch gekennzeichnet,
dass das zeitliche Verhalten der Regelabweichung ermittelt und durch eine Dämpfungseinrichtung die Änderungsgeschwindigkeit der Stellgröße bei Einwirkung durch die Regeleinrichtung gezielt verringert wird um die Änderung der Regelabweichung zu dämpfen.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6,

dadurch gekennzeichnet,
dass zur Ansteuerung einer Dämpfungseinrichtung Spannungswerte an den Phasenwicklungen und/oder Phasenströme der Synchronmaschine gemessen und hieraus Pendelungen ermittelt werden.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7,

dadurch gekennzeichnet,
dass zur Ansteuerung einer Dämpfungseinrichtung eine in den Phasenwicklungen durch die Rotorbewegung induzierte Spannung erfasst wird und hieraus Pendelungen ermittelt werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8,

dadurch gekennzeichnet,

dass zur Dämpfung einer Rotorpendelung durch eine Dämpfungseinrichtung die Phasenlage der Ansteuerspannung beeinflusst, insbesondere moduliert wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9,

dadurch gekennzeichnet,

dass zur Dämpfung einer Rotorpendelung durch eine Dämpfungseinrichtung die Amplitude der Ansteuerspannung beeinflusst, insbesondere moduliert wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9,

dadurch gekennzeichnet,

dass zur Dämpfung einer Rotorpendelung durch eine Dämpfungseinrichtung (36) eine zeitabhängige Spannung am Umrichter der durch die Regeleinrichtung erzeugten Kommutierungsspannung überlagert wird.

12. Synchronmaschine, insbesondere Synchronmotor (15), mit einem Stator mit Phasenwicklungen (U, V, W) und mit einem Rotor, mit einer Ansteuereinrichtung (16) für die Phasenwicklungen (U, V, W) sowie mit einer Messeinrichtung (33) und mit einer Regeleinrichtung (17, 37) zur Regelung der Ansteuereinrichtung (16),

dadurch gekennzeichnet,

- dass die Messeinrichtung (33) ausschließlich elektrische Messgrößen an wenigstens einer Phasenwicklung (U, V, W) und/oder an der Ansteuereinrichtung (16) erfasst und verarbeitet,
- dass die Messeinrichtung (33) ausschließlich elektrische Größen an den Phasenwicklungen (U, V, W) der Synchronmaschine (15) und/oder in der Ansteuereinrichtung (16) erfasst, wobei die Regeleinrichtung (17, 37) eingangsseitig zur Zuführung der Führungsgröße ausschließlich mit der Messeinrichtung (33) verbunden ist,
- dass die Regeleinrichtung eine für den Lastwinkel zwischen Statorfeld und Rotor repräsentative Größe oder den Lastwinkel und eine Stellgröße, insbesondere eine Spannungsamplitude, zur Ansteuerung der Pha-

senwicklungen (U, V, W) zur Annäherung des Lastwinkels an den Sollwert des Lastwinkels ermittelt.

13. Synchronmaschine nach Anspruch 12,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Messeinrichtung (33) eine Einrichtung zur Messung der Stromstärke und/oder Spannung an wenigstens einer Phasenwicklung (U, V, W) aufweist.
14. Synchronmaschine nach Anspruch 12 oder 13,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Messeinrichtung (33) eine Einrichtung zur Messung der Stromstärke und/oder der Spannung an einer Stromquelle (23, 24, 25, 26, 27, 28, 29) der Ansteuereinrichtung (16) und/oder an einem elektrischen Zwischenkreis (5, 6, 7, 8, 9, 10, 11) aufweist.
15. Synchronmaschine nach Anspruch 12, 13 oder 14,
dadurch gekennzeichnet,
dass eine elektronische Dämpfungseinrichtung (36) für die Stellgröße der Regeleinrichtung (17) vorgesehen ist, die in die Regeleinrichtung (17) integriert oder dieser nachgeschaltet ist.

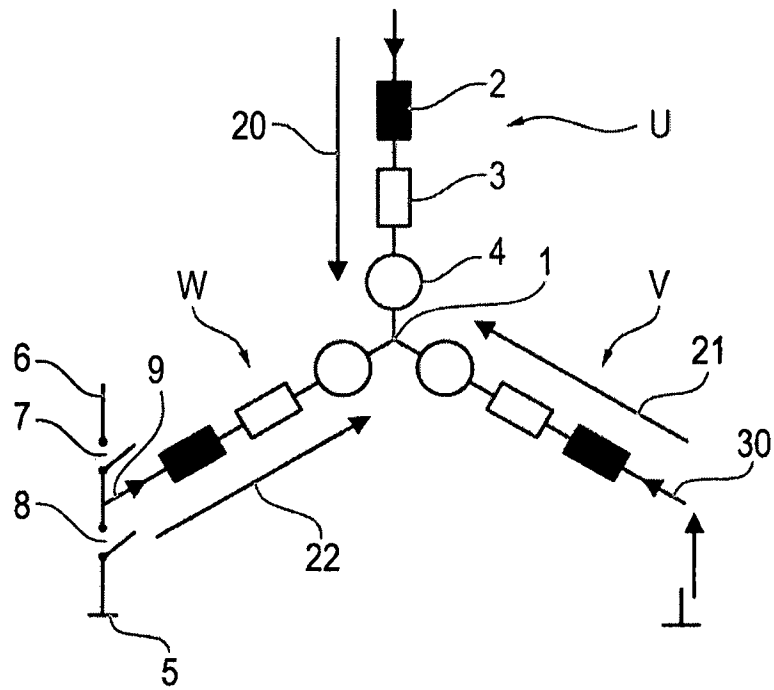
$\frac{1}{4}$ 

FIG. 1

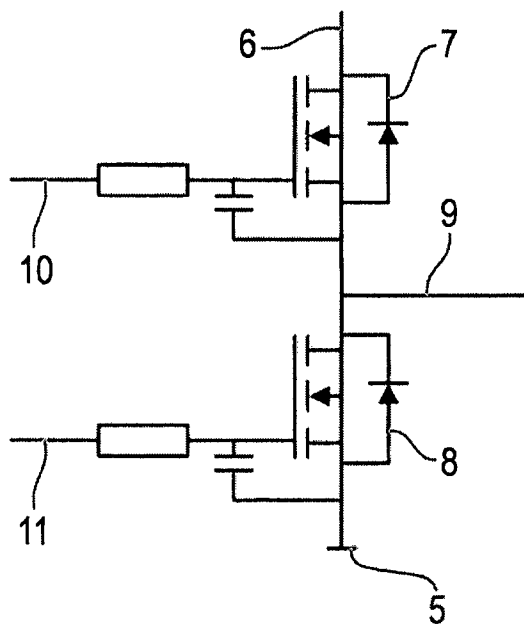


FIG. 2

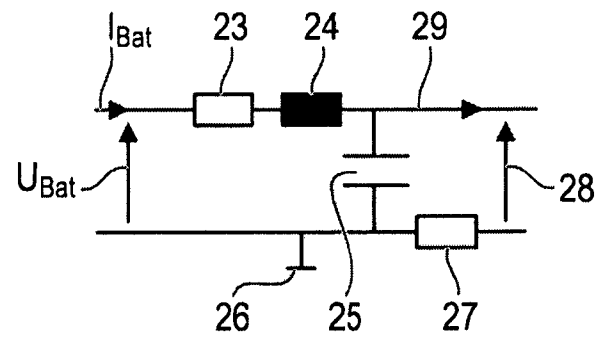


FIG. 3

2/4

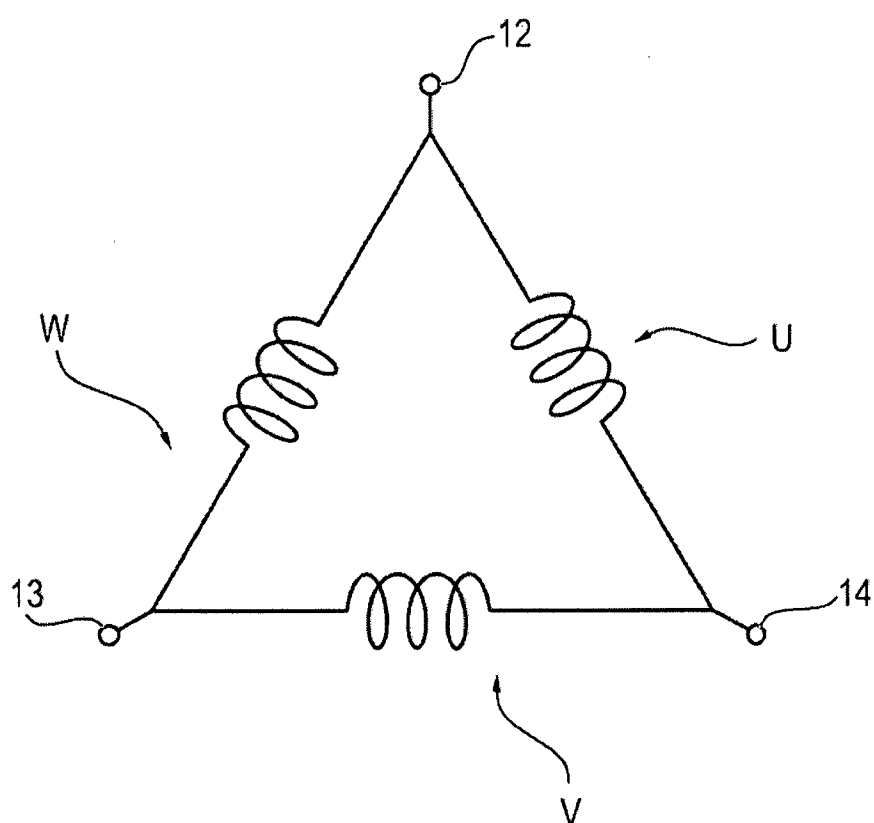


FIG. 4

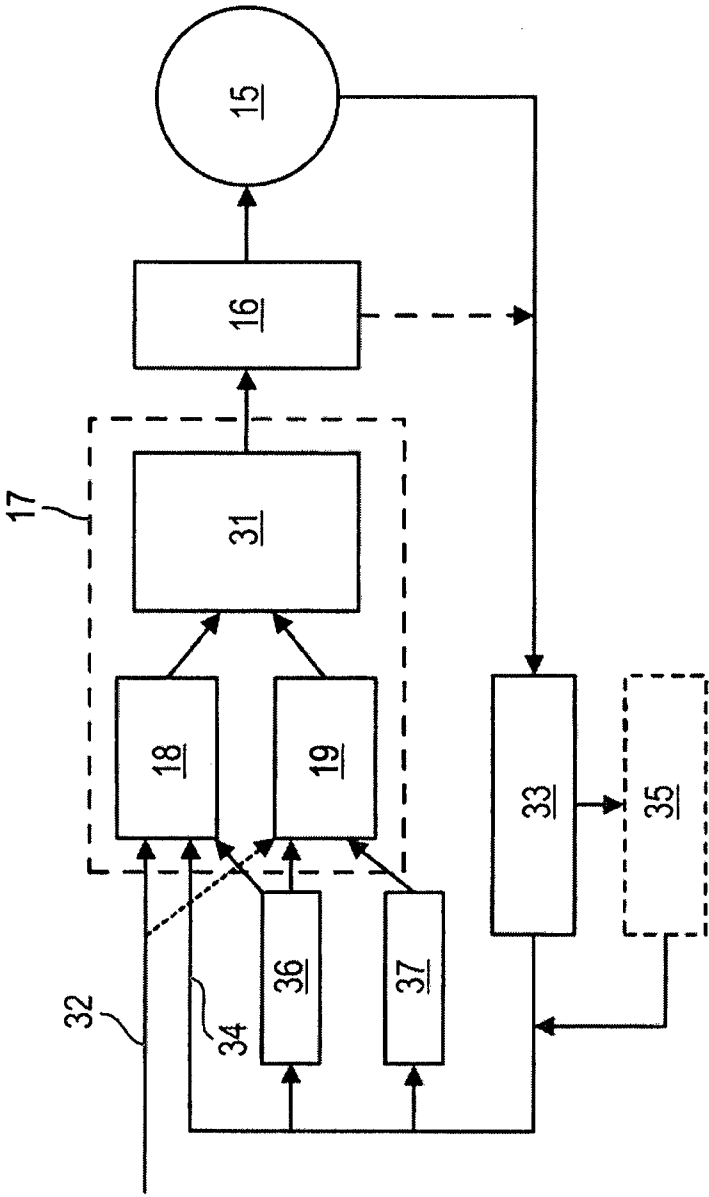


FIG. 5

4/4

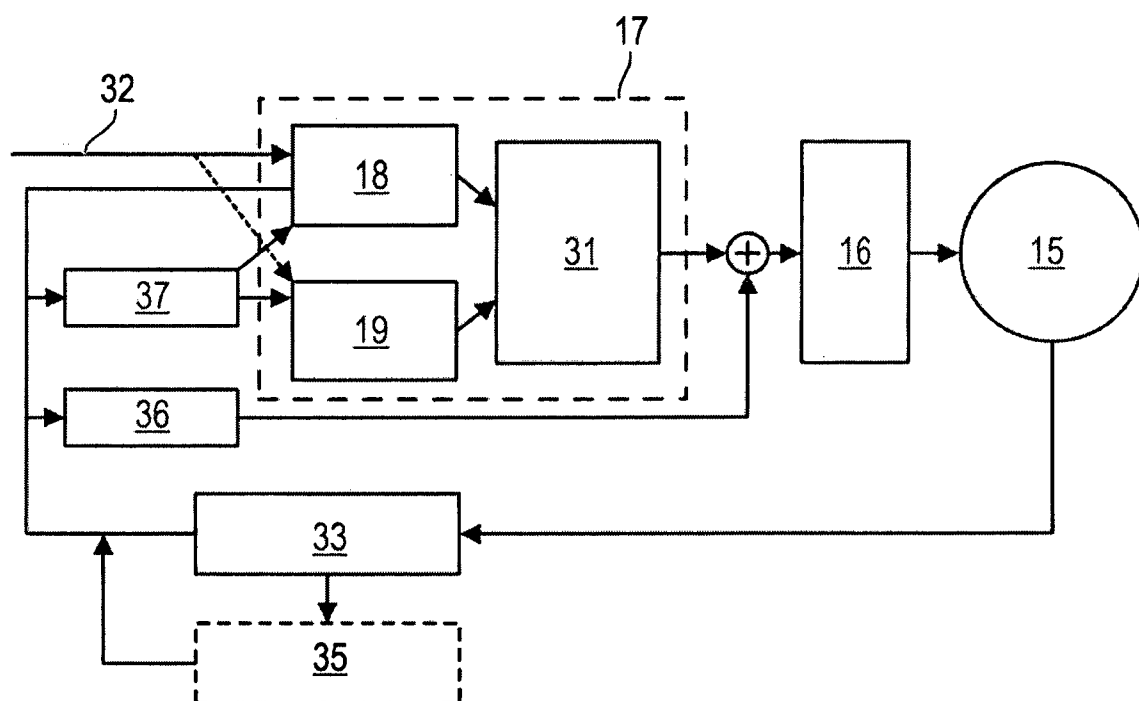


FIG. 6

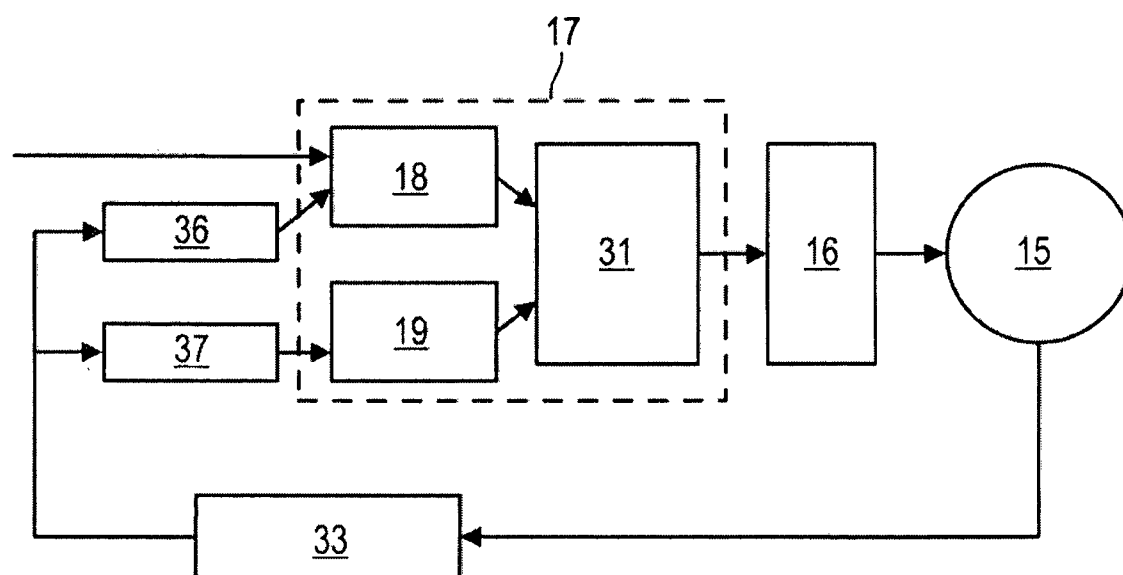


FIG. 7