

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50920/2020
(22) Anmeldetag: 23.10.2020
(43) Veröffentlicht am: 15.05.2022

(51) Int. Cl.: **H02P 21/00** (2016.01)
H02P 21/02 (2006.01)
H02P 21/06 (2016.01)
H02P 21/12 (2016.01)
H02K 1/24 (2006.01)
H02K 1/27 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
AT 522280 B1
JP 2008029148 A
DE 102006006824 A1
CN 111697899 A

(71) Patentanmelder:
AVL List GmbH
8020 Graz (AT)
(72) Erfinder:
AHMED Mohamed Essam Msc.
8020 Graz (AT)
POHN Julian Dipl.-Ing.
8010 Graz (AT)
Garcia de Madinabeitia Merino Inigo
8010 Graz (AT)
GARMENDIA GUTIERREZ Jorge MSc.
8010 Graz (AT)
DAVYDOV Vitaly
8301 Laßnitzhöhe (AT)
(74) Vertreter:
Hartinger Mario Dipl.Ing.
8020 Graz (AT)

(54) **Steuerung zur Magnetisierung oder Entmagnetisierung variabler Magnete in elektrischen Maschinen**

(57) Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Steuerung eines variablen Magnetisierungszustands von Magneten (5) in einer drehenden elektrischen Maschine (1) mit variablem Magnetfluss. Das Verfahren umfasst die Schritte: Erfassen einer Drehzahl (N) des Rotors (3) mittels eines Drehzahlerfassungsmittels, Bestimmen einer Magnetisierungsfrequenz (f_M) für einen Magnetisierungsänderungsstrom (I_M) basierend auf der Drehzahl (N) des Rotors (3); Zuführen des Magnetisierungsänderungsstroms (I_M) mit der Magnetisierungsfrequenz (f_M) an Ankerwicklungen oder optionalen Magnetisierungsfeldwicklung zur Erzeugung wenigstens eines Magnetisierungsfeldes oder Entmagnetisierungsfeldes (H_M), das in Richtung des Magnetfeldes wenigstens eines Magnets (5) an dem Rotor (3) ausgerichtet ist. Erfindungsgemäß ist dabei die bestimmte Magnetisierungsfrequenz (f_M) zu einer Frequenz der Rotorpolfelder (f_R) asynchron.

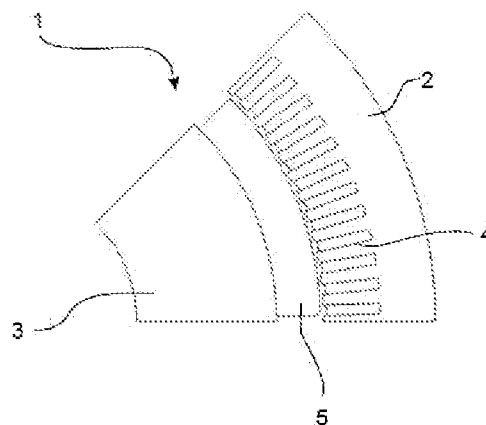


Fig. 1

Zusammenfassung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Steuerung eines variablen Magnetisierungszustands von Magneten (5) in einer drehenden elektrischen Maschine (1) mit variablem Magnetfluss. Das Verfahren umfasst die Schritte: Erfassen einer Drehzahl (N) des Rotors (3) mittels eines Drehzahlerfassungsmittels, Bestimmen einer Magnetisierungsfrequenz (f_M) für einen Magnetisierungsänderungsstrom (I_M) basierend auf der Drehzahl (N) des Rotors (3); Zuführen des Magnetisierungsänderungsstroms (I_M) mit der Magnetisierungsfrequenz (f_M) an Ankerwicklungen oder optionalen Magnetisierungsfeldwicklung zur Erzeugung wenigstens eines Magnetisierungsfeldes oder Entmagnetisierungsfeldes (H_M), das in Richtung des Magnetfeldes wenigstens eines Magnets (5) an dem Rotor (3) ausgerichtet ist. Erfindungsgemäß ist dabei die bestimmte Magnetisierungsfrequenz (f_M) zu einer Frequenz der Rotorpolfelder (f_R) asynchron.

Fig. 1

Steuerung zur Magnetisierung oder Entmagnetisierung variabler Magnete in elektrischen Maschinen

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Steuerung eines Stroms für ein Magnetisierungsfeld oder Entmagnetisierungsfeld zur Änderung eines Magnetisierungszustands variabler Magnete in einer drehenden elektrischen Maschine mit variablem Magnetfluss sowie eine dementsprechende Steuerungsvorrichtung.

Auf dem Gebiet der elektrischen Motoren und Generatoren sind Maschinen mit variablem Magnetfluss bekannt. Ein Hauptvorteil der Anwendung von Maschinen mit einem variablen magnetischen Fluss besteht in der Flexibilität einer möglichen Anpassung des Magnetisierungszustands und der Magnetstärke der veränderlichen Magnete an Betriebspunkte oder -bereiche der Maschine. Zum Beispiel ist es möglich in einem Betriebszustand mit niedrigem Drehmoment oder einem Leerlaufbetrieb den Magnetisierungszustand der veränderlichen Magnete der Maschine zu verringern, um eine induzierte Spannung und damit einhergehend einen Energieverbrauch durch magnetische Verluste, Eisenverluste oder Kupfer- bzw. Wicklungsverluste in der Maschine zu reduzieren.

Bekannte Magnetkörperwerkstoffe, die in Anwendungen mit variablem Fluss bevorzugt eingesetzt werden, bestehen aus einer Aluminium-Nickel-Cobalt Verbindung (AlNiCo) oder einer Eisen-Chrom-Cobalt Verbindung (FeCrCo), da diese im Vergleich zu den Werkstoffen für Dauermagnete, wie z.B. Neodym-Magneten, eine sehr geringe Koerzitivfeldstärke H_c aufweisen. Andererseits haben alle diese Werkstoffe eine sehr ähnliche magnetische Flussdichte B_r gemeinsam. Die niedrige Koerzitivfeldstärke von AlNiCo- oder FeCrCo-Magneten weist darauf hin, dass der Magnetisierungszustand im Vergleich zu NdFeB-Magneten deutlich einfacher irreversibel zu verändern ist. Das bedeutet, dass die Magnete einen von einem Ausgangszustand abweichenden, anderen Magnetisierungszustand aufweisen, nachdem ein Laststrom oder Magnetisierungs- bzw. Entmagnetisierungsstrom der Maschine angelegt und wieder abgestellt wurde. Im Gegensatz dazu haben Dauermagnete wie Neodym einen reversiblen Zustand, d.h. sie behalten während des normalen Betriebs nahezu ihren Magnetisierungszustand bei, auch nachdem der Laststrom abgestellt ist.

Ferner wird im Stand der Technik grundlegend eine Steuerungstechnik zum Magnetisieren/Entmagnetisieren von veränderlichen Magneten in Maschinen mit variablem Fluss verwendet, bei der Magnetfelder zum Rotor synchronisiert werden, in gleicher Weise wie während des Betriebs der Maschine. Diese Steuerungstechnik sieht das Anlegen eines direkten Achsenstroms bzw. Längsstroms (D-Strom), eines Quadratur-Achsenstrom (Q-Strom) oder einer Kombination aus diesen beiden vor, um die veränderlichen Magnete zu entmagnetisieren und den Magnetisierungszustand der Magnete zu ändern. Ein solcher synchroner Steuerungsmodus für Magnetisierungs- oder Entmagnetisierungsvorgänge entspricht einem Stand der Technik, der beispielsweise aus der EP 2192684 A1, der WO 17023249 A1, oder der EP 2048772 A1 bekannt ist.

Allerdings können durch diese Steuerungstechnik harmonische Oberschwingungen bzw. sogenannte Oberwellen der magnetomotorischen Kraft des Stators in ein Magnetisierungsmuster kopiert bzw. übertragen werden, wodurch höhere Oberwellenverluste bei unterschiedlichen Magnetisierungsniveaus erzeugt und die Magnete nicht vollständig entmagnetisiert bzw. magnetisiert werden, wie später beschrieben wird.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine effizientere Magnetisierung / Entmagnetisierung von veränderlichen Elektromagneten, insbesondere solchen in einer Maschine mit variablem magnetischen Fluss zu ermöglichen.

Die voranstehende Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren mit den Schritten des Anspruchs 1. Weitere Merkmale und Details der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen. Dabei gelten Merkmale und Details, die im Zusammenhang mit der erfindungsgemäßen Steuerungsvorrichtung beschrieben sind, selbstverständlich auch im Zusammenhang mit einer erfindungsgemäßen Steuervorrichtung und jeweils umgekehrt, sodass bezüglich der Offenbarung zu den einzelnen Erfindungsaspekten stets wechselseitig Bezug genommen wird bzw. werden kann.

Erfindungsgemäß ist ein Verfahren zur Steuerung eines variablen Magnetisierungszustands von Magneten in einer drehenden elektrischen Maschine mit variablem Magnetfluss vorgesehen, die einen Stator mit elektrisch schaltbaren Ankerwicklungen zur Erzeugung von Statorpolfeldern und zur Erzeugung eines Magnetisierungsfeldes oder Entmagnetisierungsfeldes in einer ersten Alternative, sowie optional, zusätzliche Mag-

netisierungsfeldwicklungen zur Erzeugung des Magnetisierungsfeldes oder Entmagnetisierungsfeldes in einer zweiten Alternative, und einen Rotor mit Magneten zur Erzeugung von Rotorpolfeldern aufweist. Derartige Maschinen zeichnen sich dadurch aus, dass ein Magnetkörperwerkstoff der Magnete eine Eigenschaft eines variabel einstellbaren Magnetisierungszustands aufweist, der mittels des Magnetisierungsfeldes oder Entmagnetisierungsfeldes, welches durch die schaltbaren Ankerwicklungen oder durch die optionalen Magnetisierungsfeldwicklungen erzeugbar ist, veränderbar ist. Das Verfahren umfasst die Schritte: Erfassen einer Drehzahl des Rotors mittels eines Drehzahlerfassungsmittels, Bestimmen einer Magnetisierungsfrequenz für einen Magnetisierungsänderungsstrom basierend auf der Drehzahl des Rotors; Zuführen des Magnetisierungsänderungsstroms mit der Magnetisierungsfrequenz an den Ankerwicklungen oder den optionalen Magnetisierungsfeldwicklungen zur Erzeugung wenigstens eines Magnetisierungsfeldes oder Entmagnetisierungsfeldes, das in Richtung des Magnetfeldes wenigstens eines Magnets an dem Rotor ausgerichtet ist. Erfindungsgemäß ist dabei die bestimmte Magnetisierungsfrequenz zu einer Frequenz der Rotorpolfelder asynchron.

Der Begriff asynchron ist gemäß dieser Offenbarung als ein Verhältnis von ungleichen Frequenzwerten von Stromimpulsen und Polfeldern definiert. Bei drehenden elektrischen Maschinen sind Frequenzen von Stromimpulsen an der Ankerwicklung mit einer Geschwindigkeit eines Drehfeldes des Stators, d.h. umlaufender Statorpolfelder oder einer dadurch erzeugten Rotordrehzahl vergleichbar. Somit ist eine asynchrone Magnetisierungsfrequenz auch als ein Magnetisierungsfeld darstellbar, das sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zu dem Rotorpolfeld dreht.

Im vorliegenden Fall eines Rotors mit permanent erregten -wenn auch variabel magnetisierten- Magneten, dreht sich der Rotor synchron, d.h. mit gleicher Geschwindigkeit wie das Drehfeld des Stators, das durch die umlaufenden Statorpolfelder in Form von Stromimpulsen an den Ankerwicklungen mit einer bestimmten Frequenz erzeugt wird. Somit ist die Frequenz der Rotorpolfelder und die Frequenz der Statorpolfelder die gleiche. Demzufolge ist in dieser Offenbarung ein asynchrones Verhältnis zwischen der Magnetisierungsfrequenz und der Frequenz der Rotorpolfelder gleichbedeutend mit einem asynchronen Verhältnis zwischen der Frequenz der Rotorpolfelder und der Frequenz der Statorpolfelder.

Die Erfindung sieht somit erstmals eine neue Steuerungstechnik unter Verwendung eines asynchronen Steuerungsmodus zur Magnetisierung oder Entmagnetisierung von veränderbaren Magneten unabhängig von der Form und Anordnung der Magnete vor.

Der erfindungsgemäße asynchrone Steuerungsmodus erzielt eine effizientere Magnetisierung und Entmagnetisierung, und er erzielt insbesondere eine gleichmäßigere Magnetisierungsänderung, die in einem homogenen Magnetisierungszustand über eine Fläche der Magnete resultiert, wie nachstehend ausführlicher beschrieben wird.

Bei der Anwendung des erfindungsgemäßen asynchronen Steuerungsmodus an Magneten in einer drehenden elektrischen Maschine vom Typ eines variablen Magnetflusses, werden u.a. durch die homogenen erzielten Magnetisierungszustände der Magnete Oberwellenverluste erheblich reduziert. Mit der Reduzierung der Oberwellenverluste geht eine Minimierung der Spannungswelligkeit und der Eisenverluste und schließlich einer Erhöhung der Effizienz der Maschine einher.

Ein weiterer Vorteil der Erfindung besteht darin, dass sich der asynchrone Steuerungsmodus ohne Umbauten sowohl an bestehenden Maschinen nachrüsten als auch an neuen Modellen von Maschinen realisieren lässt.

Ferner besteht ein Vorteil der Erfindung darin, dass sich das Prinzip des asynchronen Steuerungsmodus auf eine Vielzahl verschiedener Typen von drehenden elektrischen Maschinen mit variablem Magnetfluss anwenden lässt, zu denen in letzter Zeit zunehmend neue Bauformen und Konzepte zur Variation des Magnetflusses bekannt werden.

Es kann von Vorteil sein, wenn der Schritt des Bestimmens der Magnetisierungsfrequenz einen Schlupffaktor umfasst, der mit der Frequenz der Rotorpolfelder oder einer Frequenz der Statorpolfelder multipliziert wird. Somit ist bei jeder Frequenz eine wirksame Asynchronisierung der Magnetisierungsfrequenz sichergestellt.

Alternativ kann es von Vorteil sein, wenn der Schritt des Bestimmens der Magnetisierungsfrequenz einen Schlupfbetrag umfasst, der zu einem Betrag der Frequenz der Rotorpolfelder oder der Frequenz der Statorpolfelder addiert oder subtrahiert wird.

Hierdurch wird ein alternativer Berechnungsansatz für die Bestimmung einer asynchronen Magnetisierungsfrequenz des Magnetisierungsänderungsstroms bereitgestellt.

Ferner kann es von Vorteil sein, wenn der Schritt des Erfassens der Drehzahl des Rotors mittels eines Drehzahlerfassungsmittels eine Messung und Analyse induzierter Spannungen an dem Stator umfasst. Hierdurch wird eine sensorlose Erfassung der Drehzahl ermöglicht, sodass die Bereitstellung einschließlich Beschaffung, Bauraum und Montageaufwand für einen Drehzahlsensor entfallen kann. Zudem bietet diese Ausführungsform den Vorteil einer optionalen Funktionalität, während des Betriebs Rückschlüsse über eine Homogenität der Magnetisierung der Magnete zu ziehen und ggf. steuerungstechnische Maßnahmen einzuleiten.

Alternativ kann es von Vorteil sein, wenn der Schritt des Erfassens der Drehzahl des Rotors mittels eines Drehzahlerfassungsmittels eine Signalauswertung eines Drehzahlsensors umfasst. Hierdurch wird eine alternative Ausführungsform bereitgestellt, welche eine Rechenkapazität einer Steuerung, von einer zur Erlangung einer Drehzahl vergleichsweise komplexe Datenverarbeitung einer Gegen-Elektromotorischen Kraft (back electromotive force), abgekürzt Gegen-EMK (oder BEMF) entlastet.

Vorteilhaft ist es, wenn ferner folgende Schritte durchgeführt werden: Ermitteln eines ersten Magnetisierungszustands wenigstens eines Magnets; Bestimmen einer Magnetisierungsänderungsenergie und einer Polarität des Magnetisierungsänderungsstroms zur Änderung des ersten Magnetisierungszustands in einen zweiten Magnetisierungszustand; Bestimmen einer Effektivstromgröße und/oder einer Anzahl von Stromimpulsen des Magnetisierungsänderungsstroms basierend auf der Magnetisierungsfrequenz. Durch diese Ausführungsform wird eine Funktionalität zur steuerbaren Einstellung des variablen Magnetisierungszustands bereitgestellt.

Dabei kann es von Vorteil sein, wenn der Schritt des Ermitteln eines ersten Magnetisierungszustands eine Messung und Analyse induzierter Spannungen an dem Stator umfasst. Auf diese Weise kann die BEMF nicht nur zur sensorlosen Erfassung der Drehzahl, sondern auch für eine Ermittlung und Steuerung des Magnetisierungszustands herangezogen werden.

Eine Steuerungsvorrichtung zur Durchführung des Verfahrens kann in vorteilhafter Weise an einer Vielzahl von Typen elektrischer Maschinen eingesetzt werden, deren verschiedene Aufbauten wiederum individuelle Anwendungsvorteile mit sich bringen.

Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung, in der unter Bezugnahme auf die Zeichnungen, Ausführungsbeispiele der Erfindung im Einzelnen beschrieben sind. Dabei können die in den Ansprüchen und in der Beschreibung erwähnten Merkmale jeweils einzeln für sich oder in beliebiger Kombination erfindungswesentlich sein. Es zeigen:

- Fig. 1 einen Ausschnitt auf einen Querschnitt einer elektrischen Maschine mit einem veränderlichen Magnet in einem bestimmten Magnetisierungs-Ausgangszustand;
- Fig. 2 ein Diagramm einer induzierten Leerlaufspannung in dem bestimmten Magnetisierungs-Ausgangszustand;
- Fig. 3 ein Diagramm einer FFT-Analyse von Frequenzen in Bezug auf die induzierte Leerlaufspannung aus Fig. 2 in dem bestimmten Magnetisierungs-Ausgangszustand;
- Fig. 4 ein Diagramm zu einem synchronisierten Entmagnetisierungsstrom gemäß einer bekannten Steuerung aus dem Stand der Technik;
- Fig. 5 einen Konturplot eines Magnetisierungszustands eines Magnets nach dem synchronisierten Entmagnetisierungsstrom aus Fig. 4, gemäß der bekannten Steuerung aus dem Stand der Technik;
- Fig. 6 ein Diagramm einer induzierten Leerlaufspannung durch den Magnetisierungszustand aus Fig. 5, gemäß der bekannten Steuerung aus dem Stand der Technik;
- Fig. 7 ein Diagramm einer FFT-Analyse von Frequenzen in Bezug auf die induzierte Leerlaufspannung aus Fig. 6 gemäß der bekannten Steuerung aus dem Stand der Technik;

- Fig. 8 ein Diagramm eines Rastmoments der Rotorpole durch den Magnetisierungszustand aus Fig. 5, gemäß der bekannten Steuerung aus dem Stand der Technik;
- Fig. 9 ein Diagramm eines asynchronisierten Entmagnetisierungsstrom gemäß einer Steuerung nach einer Ausführungsform der Erfindung;
- Fig. 10 einen Konturplot eines Magnetisierungszustands des Magnets nach dem asynchronisierten Entmagnetisierungsstrom aus Fig. 9, gemäß der Steuerung nach der Ausführungsform der Erfindung;
- Fig. 11 ein Diagramm einer induzierten Leerlaufspannung durch den Magnetisierungszustand aus Fig. 10, gemäß der Steuerung nach der Ausführungsform der Erfindung;
- Fig. 12 ein Diagramm einer FFT-Analyse von Frequenzen in Bezug auf die induzierte Leerlaufspannung aus Fig. 11, gemäß der Steuerung nach der Ausführungsform der Erfindung;
- Fig. 13 ein Diagramm eines Rastmoments der Rotorpole durch den Magnetisierungszustand aus Fig. 10, gemäß der Steuerung nach der Ausführungsform der Erfindung; und
- Fig. 14 ein Diagramm zum Vergleich von Parametern nach der synchronisierten und asynchronisierten Entmagnetisierung, gemäß der Steuerung nach der Ausführungsform der Erfindung.

Die voranstehenden Erläuterungen der Ausführungsformen beschreiben die vorliegende Erfindung ausschließlich im Rahmen von Beispielen. Selbstverständlich können einzelne Merkmale der Ausführungsformen, sofern technisch sinnvoll, frei miteinander kombiniert werden, ohne den Rahmen der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

Fig. 1 zeigt einen Ausschnitt eines schematischen Aufbaus einer drehenden elektrischen Maschine 1, der insbesondere für einen Elektromotor eines Typs mit variablem Magnetfluss in der bevorzugten Anwendung eines Antriebsmotors mit hoher Leistungsdichte für Fahrzeuge oder Luftfahrzeuge stellvertretend dargestellt ist. Dargestellt von der elektrischen Maschine 1 ist ein Ausschnitt eines feststehenden Stators 2

und eines drehbaren Rotors 3 zum Antreiben einer beliebigen Welle auf. Der Stator 2 weist eine Ankerwicklung 4 auf, die durch eine Struktur von ausgeprägten Polzähnen des Stators gewickelt ist, wodurch eine allgemein bekannte Anordnung von schaltbaren, elektromagnetischen Statorpolfeldern geschaffen wird. Der Rotor 3 weist eine Mehrzahl von Magneten 5 auf, die vom Typ eines veränderlichen Permanentmagnets sind.

Die Magnete 5 bestehen vorzugsweise aus dem Werkstoff AlNiCo oder FeCrCo, der im Vergleich zu z.B. Neodym eine geringere Koerzitivfeldstärke aufweist. Somit stellen die Magnete 5 eine für derartige veränderliche Permanentmagnete charakteristische Eigenschaft bereit, einen im Wesentlichen irreversiblen und variablen Magnetisierungszustand einzunehmen, welcher unter Einfluss eines äußeren Magnetfelds verändert und eingestellt werden kann.

Bei der dargestellten elektrischen Maschine 1 wird das äußere Magnetfeld bzw. ein Magnetisierungsfeld oder Entmagnetisierungsfeld H_M in Bezug auf die Magnete 5 durch Bestromung der Ankerwicklung erzeugt. Wesentlich für die Funktionsweise in verschiedenen Bauformen von Elektromotoren eines Typs mit variablem Magnetfluss ist, dass ein durch die Ankerwicklung, oder optional, ein durch eine eigens hierfür separat angeordnete Magnetisierungsfeldwicklung erzeugtes Magnetisierungsfeld oder Entmagnetisierungsfeld H_M in Richtung des Magnetfelds des zu verändernden Magnets 5 ausgerichtet ist.

In Fig. 2 ist eine Diagramm in Bezug auf einen Ausgangszustand gezeigt, bei dem die Magnete 5 anfänglich einen gleichmäßigen hohen Magnetisierungszustand von 100% Magnetisierung aufweisen. Die induzierte Spannung wird über ein im Allgemeinen bekanntes Mess-Prinzip einer Back-EMF (BEMF) bzw. Gegenelektromotorischen Kraft (Gegen-EMK) an den Ankerwicklungen 4 erfasst. Hieraus ist in Kenntnis einer Polzahl auch eine Drehzahl N des Rotors 3 ableitbar, sodass in der dargestellten Ausführungsform kein separater Drehzahlsensor zur Erfassung der Drehzahl N des Rotors 3 erforderlich ist. Der dargestellte Graph zeigt einen Verlauf der im Stator 2 induzierten Leerlaufspannung in Abhängigkeit eines Drehwinkels, wenn der Rotor 3 bei 1000 U/min im Leerlauf, also ohne einer angelegten elektrischen Leistung an der elektrischen Maschine 1 im Sinne eines Generators gedreht wird.

Fig. 3 zeigt das Ergebnisdiagramm einer mathematischen Fast-Fourier-Transformation (FFT) des induzierten Leerlaufspannungsverlaufs zur Analyse eines Amplitudenspektrums in Bezug zur Frequenz. Das Diagramm zeigt für den Ausgangszustand, bei dem die Magnete 5 eine Magnetisierung von 100% aufweisen, eine 1. Harmonische der Spannungsamplitude bzw. eine Oberwelle erster Ordnung mit einer Amplitude von etwa 57,8 V. Es ist auch zu sehen, dass bei gleichmäßigem Anfangsmagnetisierungszustand die induzierte Spannung eine recht hohe Spannungsamplitude der 3. Harmonischen bzw. der Oberwelle dritter Ordnung von etwa 9,2 V enthält.

Diese Werte werden nun im Anschluss als Referenz verwendet, um den Magnetisierungszustand der Magnete 5 sowohl nach einer Entmagnetisierung durch einen im Stand der Technik verwendeten synchronen Entmagnetisierungsstrom, als auch nach einer Entmagnetisierung durch einen erfindungsgemäßen asynchronen Entmagnetisierungsstrom aus demselben Ausgangszustand vergleichsweise beurteilen zu können.

Fig. 4 zeigt ein für den Stand der Technik stellvertretendes Ausführungsbeispiel einen Steuerungsmodus zur Entmagnetisierung, bei dem ein Entmagnetisierungsstrom, ausgeführt als negativer D-Achsen-Strom angelegt wird, um die Magnete 5 bei einer Rotordrehzahl von 1000 U/min von einem anfänglichen gleichmäßigen Magnetisierungszustand von 100% auf ein bestimmtes Magnetisierungsniveau zu entmagnetisieren. Die Bezeichnung D-Achsen-Strom bezieht sich gemäß bekannter Zuordnungsweise auf eine Ausrichtung einer resultierenden Induktanz in Richtung des Magnetfelds des betreffenden Magnets, im Gegensatz zu einem ebenfalls bekannten Q-Achsen-Strom, der hierzu senkrecht ausgerichtet ist. Der dargestellte D-Achsen-Strom wird durch einen Inverter an der betreffenden Magnetisierungsfeldwicklung zugeführt, und in diesem Ausführungsbeispiel auf Stromimpulse mit einer Effektivstromstärke von 200 A_{eff} bzw. A_{rms} und einer Frequenz von etwa 66,6667 Hz, die zu einer Frequenz f_R der Rotorpolfelder synchron ist, eingestellt. Charakteristisch ist für diesen aus dem Stand der Technik bekannten Steuerungsmodus, dass die Frequenz eines Magnetisierungsstrom oder eines Entmagnetisierungsstrom mittels einer nachstehenden Synchronisationsformel bestimmt und eingestellt wird, sodass die Stromimpulse mit der Frequenz der Rotorpolfelder f_R oder Statorpolfelder f_s synchronisiert sind:

(1) $f \text{ (Hz)} = p * N / 60$, wobei $p = 4$ die Anzahl der Polpaare und $N = 1000$ die Drehzahl U/min ist.

Fig. 5 zeigt eine Konturdarstellung eines Magnets 5 nach einer Anwendung des synchronen Steuerungsmodus des D-Achsen-Entmagnetisierungsstroms gemäß der herkömmlichen Steuerungstechnik im Stand der Technik. In dem Plot ist deutlich zu erkennen, dass die Magnetisierung des Magnets 5 entlang der Magnetgeometrie nicht gleichmäßig ist. Während im Magnetzentrum eine vollständige und gleichmäßige Demagnetisierung erzielt wird, ist in den Randbereichen eine unvollständige Demagnetisierung zu sehen.

Ferner wurde ein Leerlauftest durchgeführt, um den ungleichmäßigen Magnetisierungszustand der Magnete 5 und das entsprechende Verhalten der induzierten Spannung bei der gleichen Drehzahl von 1000 U/min zu überprüfen. Fig. 6 zeigt hierzu den Verlauf der induzierten Leerlaufspannungen in Bezug zum Drehwinkel, die mittels Gegen-EMK bzw. BEMF ermittelt wurden.

Die zugehörige Analyse durch Fast-Fourier-Transformation, die in Fig. 7 abgebildet ist, zeigt, dass zusätzliche Harmonische, also Oberwellen weiterer Ordnungen in der magnetischen Flussdichte und demzufolge in der induzierten Spannung eingeführt wurden, was zu mehr Spannungswelligkeit und Oberwellenverlusten führt. Im Einzelnen ist dem Diagramm zu entnehmen, dass die 1. Harmonische der Spannungsamplitude etwa 36 V beträgt, was einem mittleren Magnetisierungszustand der Magnete 5 von etwa 62,2 % entspricht.

Besonders nachteilig sticht heraus, dass sich die 3. Harmonische mit einer Spannungsamplitude von 13 V ausgeprägt hat. Dieser Wert ist somit im Vergleich zu dem anfänglichen Zustand gestiegen, obwohl der Magnetisierungszustand der Magnete 5 von 100 % auf 62,2 % Magnetisierung verringert wurde. Nach weiteren Berechnungen ergeben sich hierdurch in dem vorliegenden Anwendungsbeispiel eine gesamte Oberwellenverzerrung bzw. ein magnetischer Klirrfaktor (Total Harmonic Distortion TDH) von 39% sowie Eisenverluste von 80 W und magnetische Verluste von 27 W.

Zudem wurde das Rastmoment vermessen und in Fig. 8 dargestellt. Durch eine Amplitude des durch die Rotorpolfelder erzeugten Rastmoments können im Allgemei-

nen ebenfalls Rückschlüsse auf einen Oberwellengehalt in der magnetischen Flussdichte gezogen werden. Zu dem genannten Ausführungsbeispiel beträgt das Rastmoment einen Spitzenwert von -2 Nm.

Nachfolgend wird ein asynchroner Steuerungsmodus einer Steuerungstechnik gemäß einer Ausführungsform der Erfindung erläutert, der ebenfalls an dem Ausgangszustand der Magnete 5, der zu den Figuren 1 bis 3 beschrieben ist, anknüpft.

In einem für die Erfindung stellvertretenden Ausführungsbeispiel wird zur Entmagnetisierung erneut ein negativer D-Achsen-Strom als Entmagnetisierungsstrom zugeführt, um die Magnete 5 bei einer Rotordrehzahl von 1000 U/min von dem anfänglichen gleichmäßigen Magnetisierungszustand von 100% auf ein bestimmtes Magnetisierungsniveau zu entmagnetisieren.

Der D-Achsen-Strom wird wiederum durch einen Inverter an der betreffenden Magnetisierungsfeldwicklung zugeführt. Um auch in diesem Ausführungsbeispiel einen Vergleich aufrechtzuerhalten, weisen die Stromimpulse des verwendete Entmagnetisierungsstrom das gleiche Niveau einer Effektivstromstärke von 200 A_{eff} bei der gleichen Rotordrehzahl von 1000 U/min auf, wie in Fig. 9 dargestellt ist. Allerdings wird der Entmagnetisierungsstrom mit einer Magnetisierungsfrequenz zugeführt, die nach einer anderen Gleichung bestimmt wird:

$$(2) \quad f_M \text{ (Hz)} = \text{slip} * p * N / 60, \text{ wobei slip ein Schlupffaktor der Magnetisierungsfrequenz zu der Frequenz der Rotorpolfelder } f_R \text{ ist.}$$

Charakteristisch für diese Ausführungsform eines erfindungsgemäßen asynchronen Steuerungsmodus ist somit ein Schlupffaktor slip der Magnetisierungsfrequenz f_M , durch den die Stromimpulse eines Magnetisierungsänderungsstroms I_M asynchron zu der Frequenz der Rotorpolfelder f_R zugeführt werden.

Sobald die Drehzahl des Rotors 3 oder die Frequenz der Rotorpolfelder, d.h. der Magnetpole zum Zeitpunkt der Magnetisierung oder Entmagnetisierung bekannt ist, wird in dem asynchronen Steuerungsmodus ein Schlupffaktor slip zur Erlangung einer Magnetisierungsfrequenz f_M des Magnetisierungs- oder Entmagnetisierungsstroms eingeführt, mit welchem ein Umrichter bzw. eine Magnetisierungsstromeinheit entsprechende Stromimpulse des Magnetisierungsänderungsstroms I_M an die Ankerwicklung oder, falls entsprechend vorgesehen, die Magnetisierungsfeldwicklung liefert. Dabei

ist der Magnetisierungsänderungsstrom I_M ein Magnetisierungsstrom oder ein Entmagnetisierungsstrom, der je nach Polarität von dessen angelegter Spannung an der Magnetisierungsfeldwicklung und in Abhängigkeit einer dazu ausgerichteten Polarität des Magnetfelds des Magnets 5 ein äußeres Magnetisierungsfeld oder Entmagnetisierungsfeld H_M durch die Ankerwicklung oder Magnetisierungsfeldwicklung erzeugt, das einen variablen Magnetisierungszustand des Magnets 5 verändert bzw. steuerbar einstellt.

Fig. 10 zeigt die Konturdarstellung eines Magnets 5 nach einer Anwendung des asynchronen Steuerungsmodus mit einem Entmagnetisierungsstrom nach einer Ausführungsform der Steuerungstechnik. In dem Plot ist zu erkennen, dass die Magnetisierung entlang der Magnetgeometrie im Gegensatz zu dem Ergebnis aus Fig. 5 gleichmäßig bzw. homogen ist.

Nach der Entmagnetisierung wurde ein Leerlauftest durchgeführt, um den Magnetisierungszustand der Magnete 5 und das entsprechende Verhalten der induzierten Spannung bei der gleichen Drehzahl von 1000 U/min zu überprüfen, die zu Vergleichszwecken konstant gehalten wird. In Fig. 11 ist der Verlauf der induzierten Leerlaufspannungen in Bezug zum Drehwinkel aufgetragen und es ist zu erkennen, dass sich die Wellenform der induzierten Spannung (BEMF) im Vergleich zu derjenigen in Fig. 6 stark verändert hat, und zwar in vorteilhafter Weise, da sie nun einer reinen Sinuswelle sehr nahe kommt.

Das Diagramm der Fast-Fourier-Transformations Analyse in Fig. 12 zeigt hierzu unter anderem eine Spannungsamplitude von etwa 34,78 V für die 1. Harmonische bzw. Oberwelle erster Ordnung, was einem Magnetisierungszustand von etwa 60% entspricht und auf eine gesteigerte Effizienz der Entmagnetisierung hinweist. Positiv fällt weiter auf, dass sich die Spannungsamplitude der 3. Harmonischen auf einen Wert von etwa 3,46 V reduziert hat, was im Vergleich zu einem Wert von etwa 13 V aus Fig. 7 nach einem synchronen Steuerungsmodus einer Reduzierung von 73 % entspricht.

Des Weiteren ergeben sich nach weiteren Berechnungen zu diesem Anwendungsbeispiel eine gesamte Oberwellenverzerrung (THD) von 12%, womit eine Reduzierung von 73 % zu dem synchronen Steuerungsmodus erzielt wurde. Die Eisenverluste wurden bei einem Wert von etwa 44,8 W um 44% gesenkt, ebenso wie die magnetischen Verluste mit einem Wert von etwa 18,6 W was einer Reduzierung von 31% entspricht.

Dabei haben sich die Eisen- und Magnetverluste bei gleicher Geschwindigkeit aufgrund der Reduzierung des Oberwellengehalts in der magnetischen Flussdichte verringert.

Das Rastmoment, das in dem Diagramm von Fig. 13 aufgetragen wurde, bestätigt einen Hinweis auf einen reduzierten Oberwellengehalt in der magnetischen Flussdichte und ergibt einen Spitzenwert von lediglich $-0,7 \text{ Nm}$.

Im Ergebnis zeigt ein Vergleich der Ausführungsbeispiele, wie in Fig. 14 verdeutlicht, dass mit der erfindungsgemäßen Steuerungstechnik, die durch ein Steuerungsverfahren mit dem asynchronen Steuerungsmodus oder einer entsprechenden Steuerungsvorrichtung bereitgestellt werden kann, eine verbesserte und effizientere Magnetisierung und Entmagnetisierung erzielt wird. Denn bei gleichem Magnetisierungsniveau hat sich der magnetische Fluss der Maschine mit variablem Magnetfluss zusammen mit der induzierten Spannung deutlich verbessert. Insbesondere wurden die Eisen- und Magnetverluste reduziert, die eine zentrale Herausforderung bei der Konstruktion von elektrischen Antrieben insbesondere von Hochgeschwindigkeitssystemen ist. Darüber hinaus ist festzustellen, dass die 1. Harmonische der induzierten Spannung, die hier ein Hinweis auf den Magnetisierungszustand ist, einen etwas kleineren Wert als bei der synchronen Steuerungstechnik hat, was darauf hinweist, dass die Verwendung der asynchronen Steuerungstechnik den benötigten Magnetisierungsstrom reduzieren kann, was einen geringeren Energieverbrauch während einer Magnetisierungstransientenzeit bedeutet.

Bezugszeichenliste

- 1 Elektrische Maschine
- 2 Stator
- 3 Rotor
- 4 Ankerwicklung
- 5 Magnet

- f_M Magnetisierungsfrequenz
- f_R Frequenz der Rotorpolfelder
- f_S Frequenz der Statorpolfelder
- E_M Magnetisierungsänderungsenergie
- I_M Magnetisierungsänderungsstrom
- H_M Magnetisierungsfeld / Entmagnetisierungsfeld
- N Drehzahl des Rotors
- p Zahl der Polpaare
- $slip$ Schlupffaktor
- BEMF Gegenelektromotorische Kraft

Patentansprüche

1. Verfahren zur Steuerung eines variablen Magnetisierungszustands von Magneten in einer drehenden elektrischen Maschine (1), die einen Stator (2) mit elektrisch schaltbaren Ankerwicklungen (4) zur Erzeugung von Statorpolfeldern und zur Erzeugung eines Magnetisierungsfeldes oder Entmagnetisierungsfeldes (H_M) in einer ersten Alternative, sowie optional, zusätzliche Magnetisierungsfeldwicklungen zur Erzeugung des Magnetisierungsfeldes oder Entmagnetisierungsfeldes (H_M) in einer zweiten Alternative, und einen Rotor (3) mit Magneten (5) zur Erzeugung von Rotorpolfeldern aufweist, wobei

ein Magnetkörperwerkstoff der Magnete (5) eine Eigenschaft eines variabel einstellbaren Magnetisierungszustands aufweist, der mittels des Magnetisierungsfeldes oder Entmagnetisierungsfeldes (H_M), welches durch die schaltbaren Ankerwicklungen oder durch die optionalen Magnetisierungsfeldwicklungen erzeugbar ist, veränderbar ist,

mit den Schritten:

Erfassen einer Drehzahl (N) des Rotors (3) mittels eines Drehzahlerfassungsmittels;

Bestimmen einer Magnetisierungsfrequenz (f_M) für einen Magnetisierungsänderungsstrom (I_M) basierend auf der Drehzahl (N) des Rotors (3);

Zuführen des Magnetisierungsänderungsstroms (I_M) mit der Magnetisierungsfrequenz (f_M) an den Ankerwicklungen oder den optionalen Magnetisierungsfeldwicklungen zur Erzeugung wenigstens eines Magnetisierungsfeldes oder Entmagnetisierungsfeldes (H_M), das in Richtung des Magnetfeldes wenigstens eines Magnets (5) an dem Rotor (3) ausgerichtet ist; wobei

die bestimmte Magnetisierungsfrequenz (f_M) zu einer Frequenz der Rotorpolfelder (f_R) asynchron ist.

2. Verfahren zur Steuerung nach Anspruch 1, wobei der Schritt des Bestimmens der Magnetisierungsfrequenz (f_M) einen Schlupffaktor (slip) umfasst, der einen

Wert kleiner oder größer als 1 aufweist, und der mit der Frequenz der Rotorpolfelder (f_R) oder einer Frequenz der Statorpolfelder (f_R) multipliziert wird.

3. Verfahren zur Steuerung nach Anspruch 1, wobei der Schritt des Bestimmens der Magnetisierungsfrequenz (f_M) einen Schlupfbetrag umfasst, der zu einem Betrag der Frequenz der Rotorpolfelder (f_R) oder der Frequenz der Statorpolfelder (f_R) addiert oder subtrahiert wird.
4. Verfahren zur Steuerung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Schritt des Erfassens der Drehzahl (N) des Rotors (3) mittels eines Drehzahlerfassungsmittels eine Messung und Analyse (BEMF) induzierter Spannungen an dem Stator (2) umfasst.
5. Verfahren zur Steuerung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei der Schritt des Erfassens der Drehzahl (N) des Rotors (3) mittels eines Drehzahlerfassungsmittels eine Signalauswertung eines Drehzahlsensors umfasst.
6. Verfahren zur Steuerung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner mit den Schritten:

Ermitteln eines ersten Magnetisierungszustands wenigstens eines Magnets (5),

Bestimmen einer Magnetisierungsänderungsenergie (E_M) und einer Polarität des Magnetisierungsänderungsstroms (I_M) zur Änderung des ersten Magnetisierungszustands in einen zweiten Magnetisierungszustand,

Bestimmen einer Effektivstromgröße und/oder einer Anzahl von Stromimpulsen des Magnetisierungsänderungsstroms (I_M) basierend auf der Magnetisierungsfrequenz (f_M).
7. Verfahren zur Steuerung nach Anspruch 6, wobei der Schritt des Ermitteln eines ersten Magnetisierungszustands eine Messung und Analyse (BEMF) induzierter Spannungen an dem Stator (2) umfasst.
8. Verfahren zur Steuerung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei ein Verhältnis der asynchronen Magnetisierungsfrequenz (f_M) zu der Frequenz der Rotorpolfelder (f_R) während des Betriebs der drehenden elektrischen Maschine (1) variabel bestimmt wird.

9. Verfahren zur Steuerung nach Anspruch 2, wobei der Schlupffaktor (slip) während des Betriebs der drehenden elektrischen Maschine (1) variabel bestimmt wird und sowohl Werte kleiner 1 als auch Werte größer 1 einnimmt.
10. Verfahren zur Steuerung nach Anspruch 9, wobei der Schlupffaktor (slip) während eines Magnetisierungsvorgangs zwischen einem ersten Magnetisierungszustand und einem zweiten Magnetisierungszustand eines Magnets (5) variabel bestimmt wird.
11. Verfahren zur Steuerung nach Anspruch 3, wobei der Schlupfbetrag während des Betriebs der drehenden elektrischen Maschine (1) variabel bestimmt wird und sowohl negative Werte als auch positive Werte einnimmt.
12. Verfahren zur Steuerung nach Anspruch 11, wobei der Schlupfbetrag während eines Magnetisierungsvorgangs zwischen einem ersten Magnetisierungszustand und einem zweiten Magnetisierungszustand eines Magnets (5) variabel bestimmt wird.
13. Steuerungsvorrichtung für eine drehende elektrische Maschine (1) mit variablem Magnetfluss, aufweisend Steuerungsmittel zum Durchführen eines Verfahrens zur Steuerung eines variablen Magnetisierungszustands von Magneten 5 in der drehenden elektrischen Maschine (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche.
14. Drehende elektrische Maschine (1) mit variablem Magnetfluss, aufweisend:

einen Stator (2) mit elektrisch schaltbaren Ankerwicklungen (4) zur Erzeugung von Statorpolfeldern und zur Erzeugung eines Magnetisierungsfeldes oder Entmagnetisierungsfeldes (H_M) in einer ersten Alternative, und optional, zusätzliche Magnetisierungsfeldwicklungen zur Erzeugung des Magnetisierungsfeldes oder Entmagnetisierungsfeldes (H_M) in einer zweiten Alternative, und

einen Rotor (3) mit Magneten (5) zur Erzeugung von Rotorpolfeldern, wobei

ein Magnetkörperwerkstoff der Magnete (5) eine Eigenschaft eines variabel einstellbaren Magnetisierungszustands aufweist, der mittels des Magnetisierungs-

feldes oder Entmagnetisierungsfeldes (H_M), welches durch die schaltbaren Ankerwicklungen oder durch die optionalen Magnetisierungsfeldwicklungen erzeugbar ist, veränderbar ist, ferner aufweisend eine Steuervorrichtung nach Anspruch 13.

15. Drehende elektrische Maschine (1) nach Anspruch 14, wobei die Magnetisierungsfeldwicklungen an den Statorpolen integriert angeordnet sind.
16. Drehende elektrische Maschine (1) nach Anspruch 14, wobei die optionalen, zusätzlichen Magnetisierungsfeldwicklungen in Form einer separaten Magnetisierungsfeldspule in dem Stator (2) angeordnet sind.

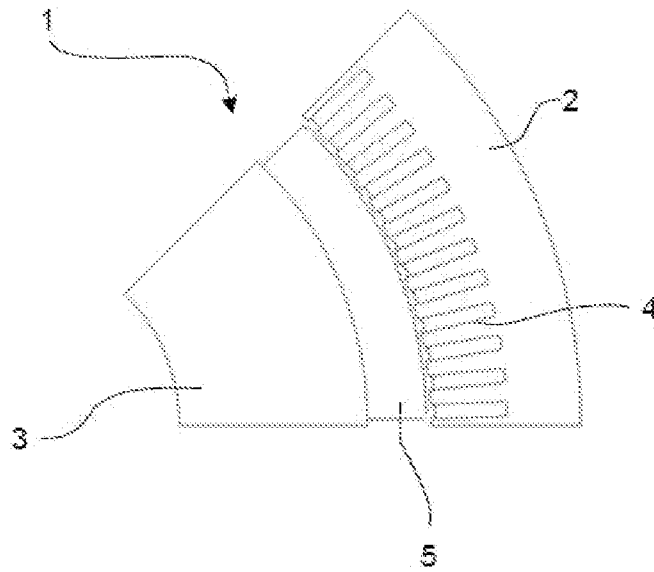


Fig. 1

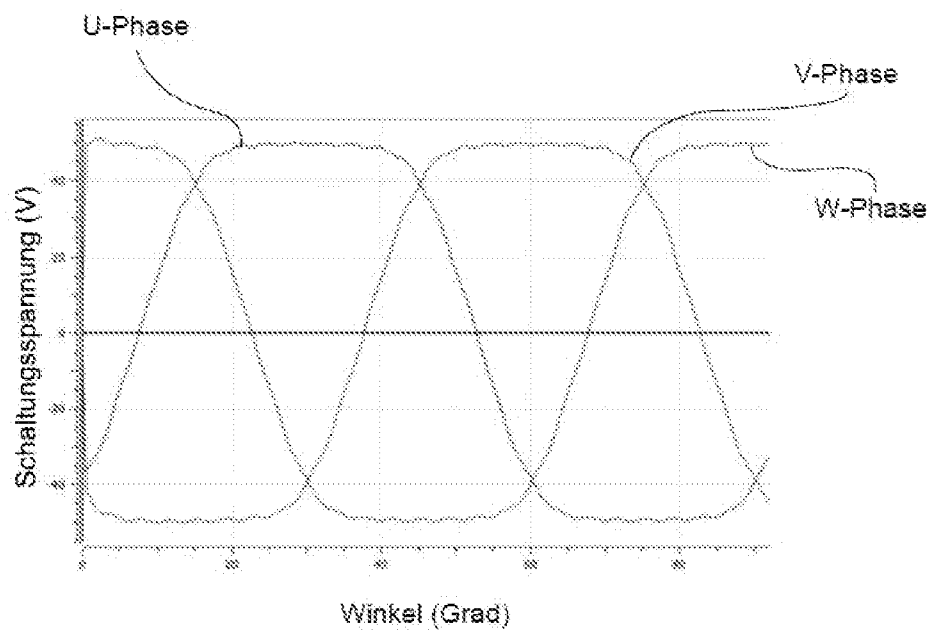


Fig. 2

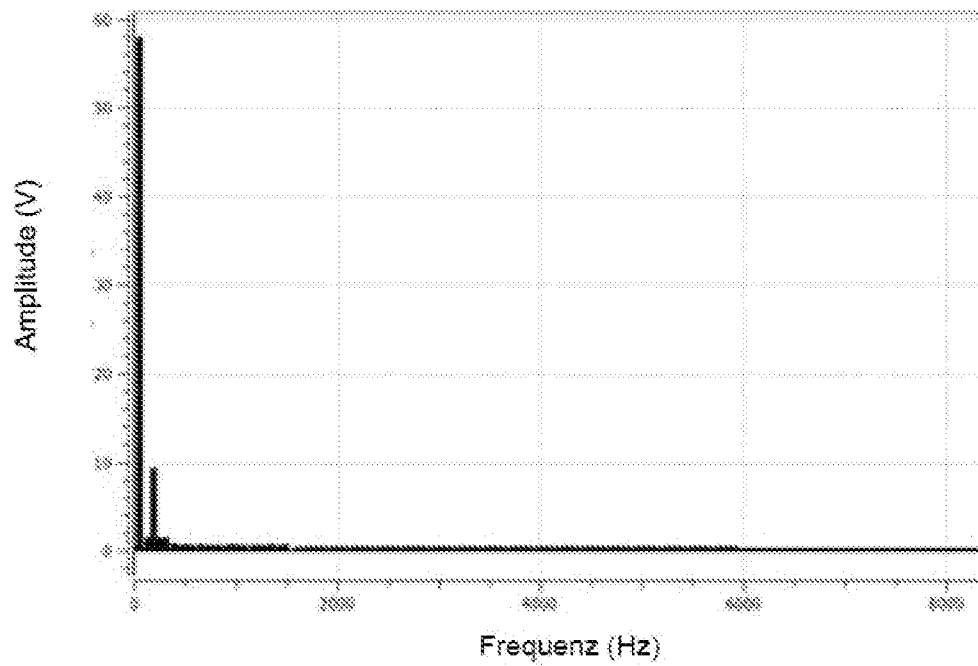


Fig. 3

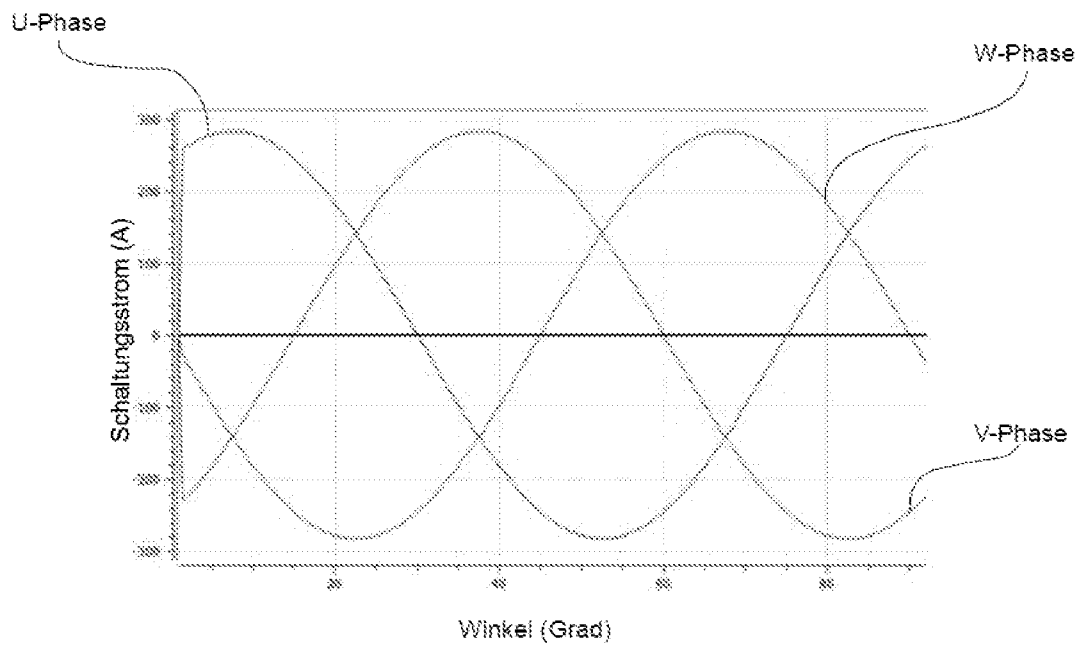


Fig. 4

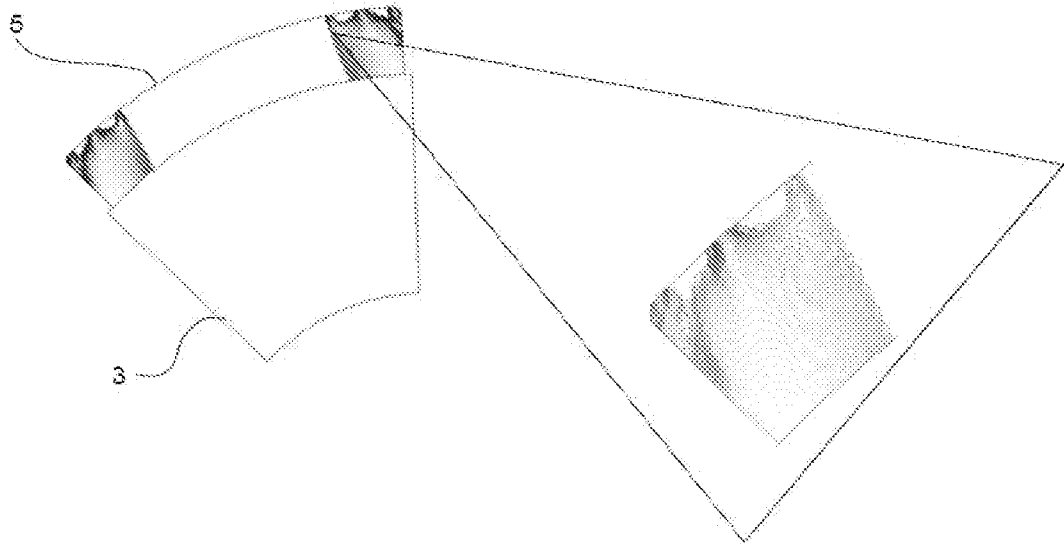


Fig. 5

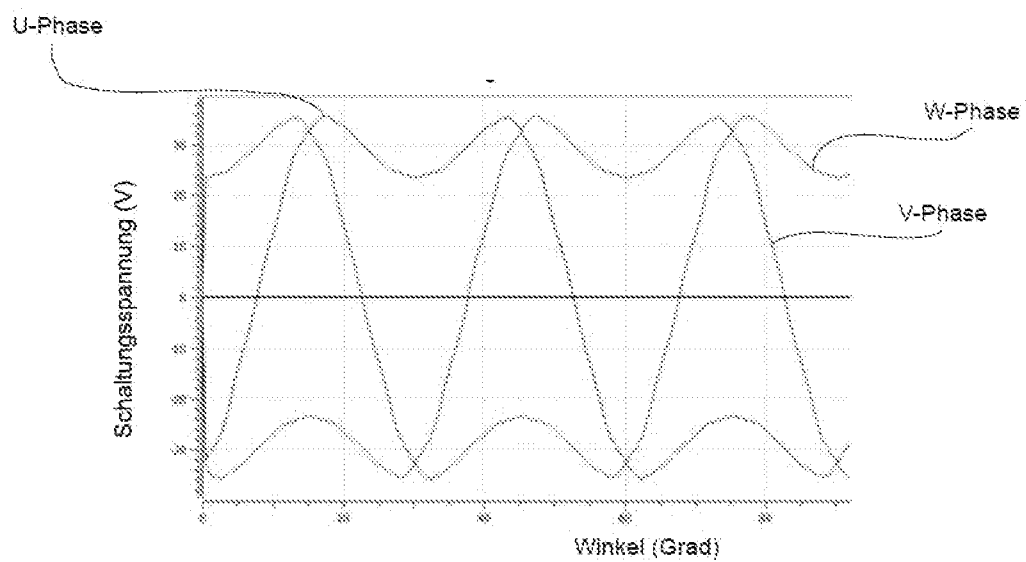


Fig. 6

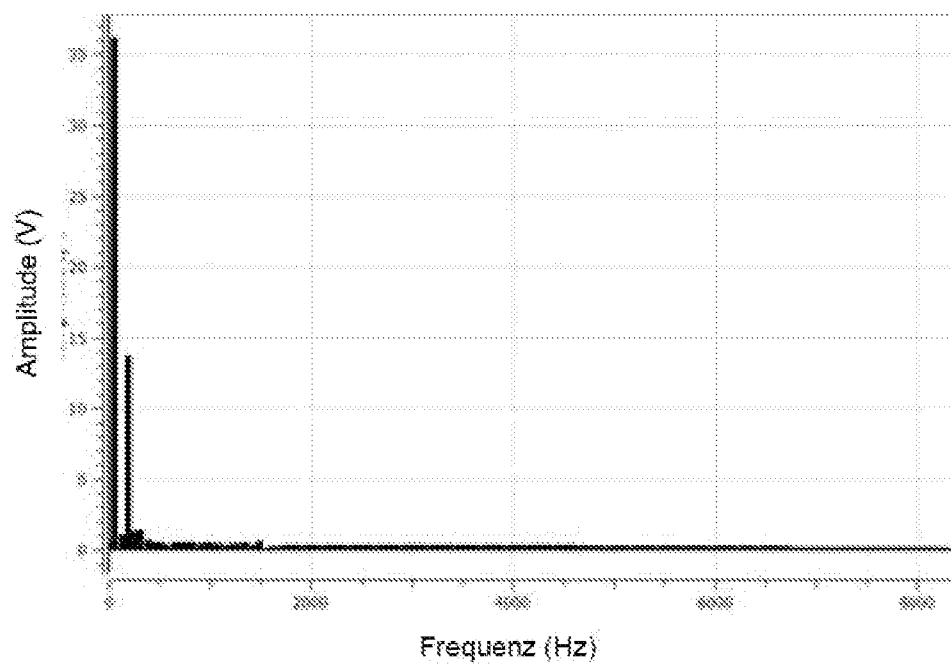


Fig. 7

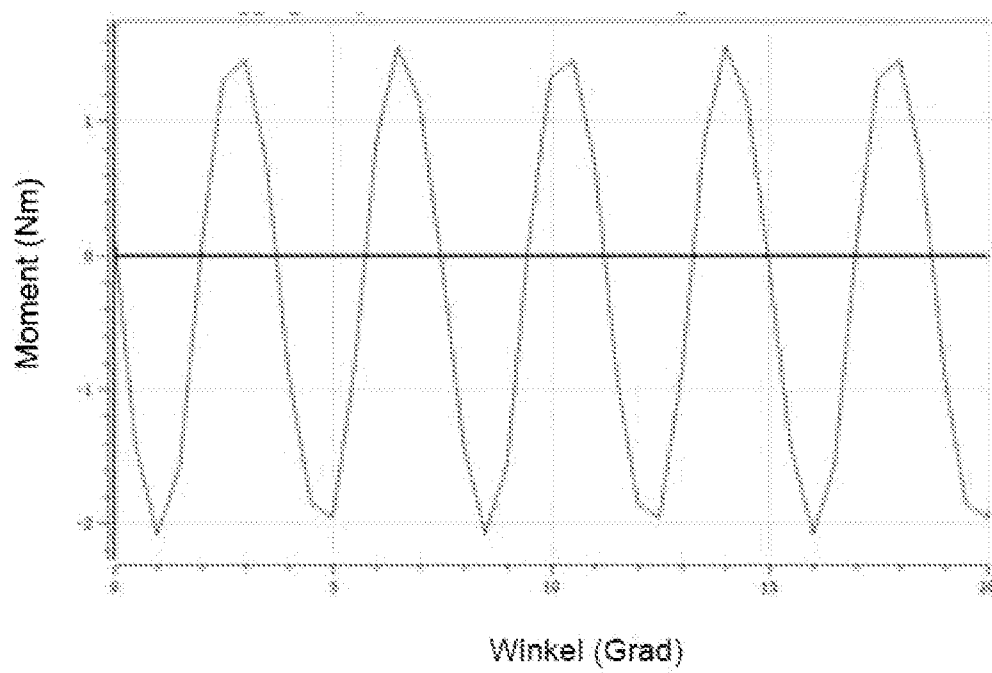


Fig. 8

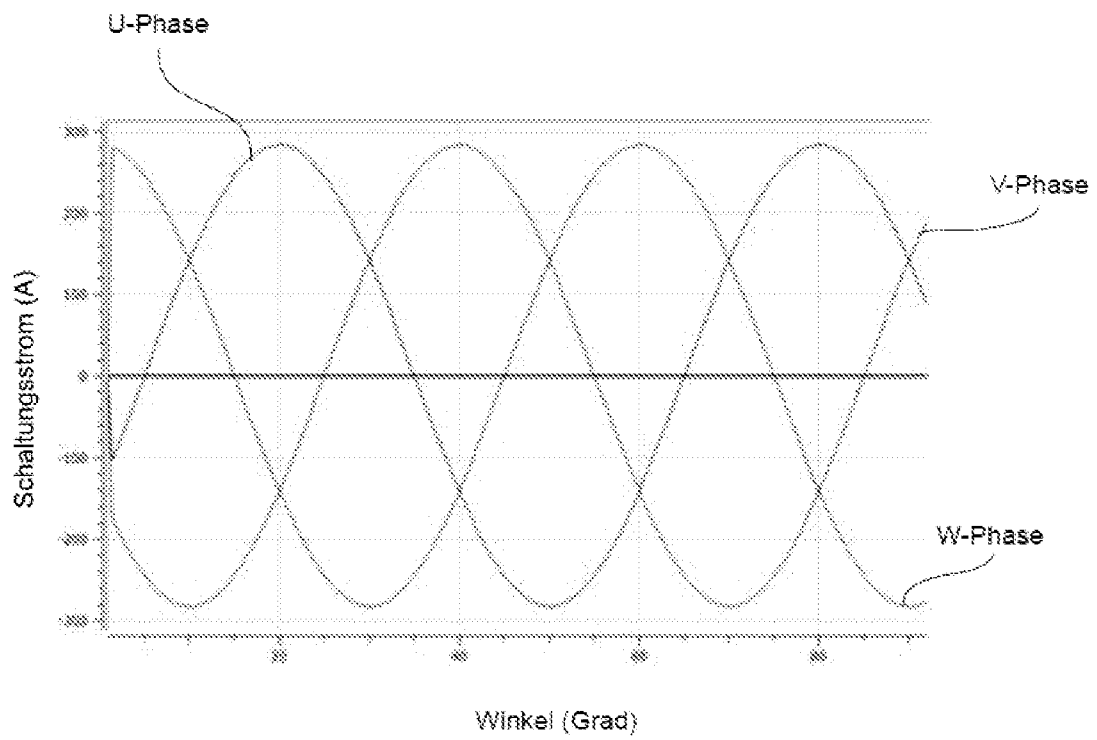


Fig. 9

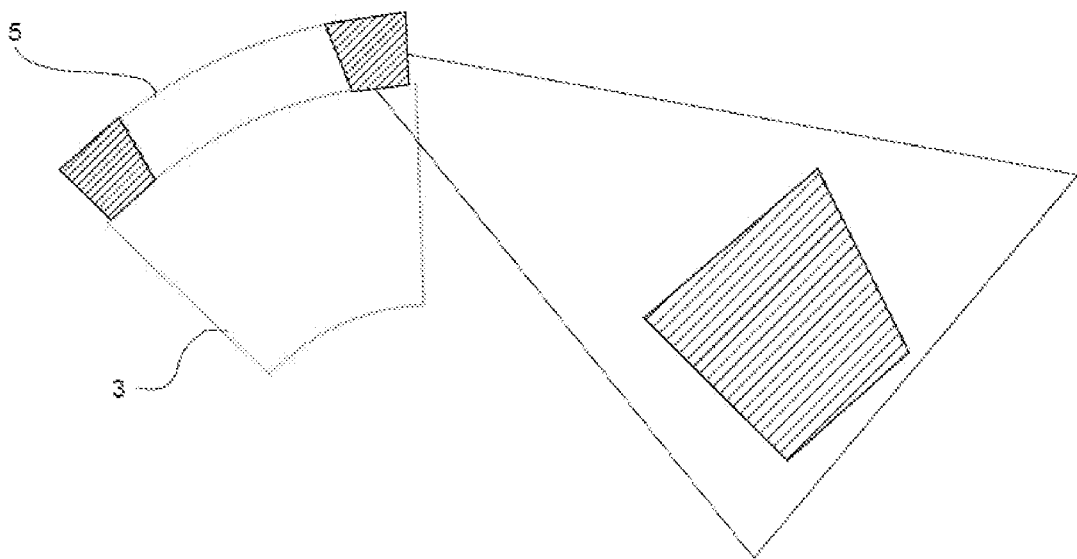


Fig.10

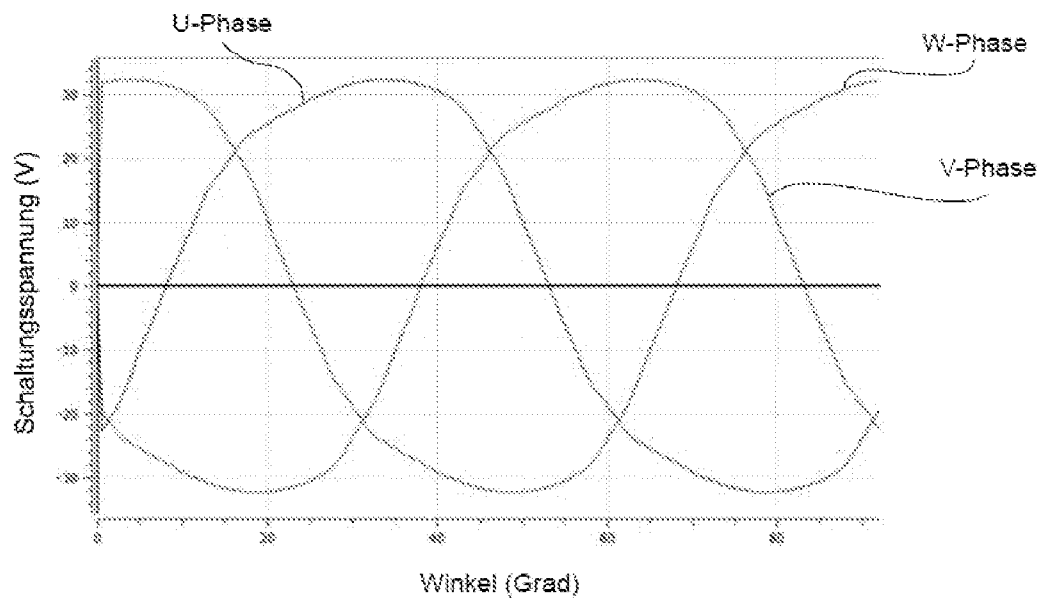


Fig. 11

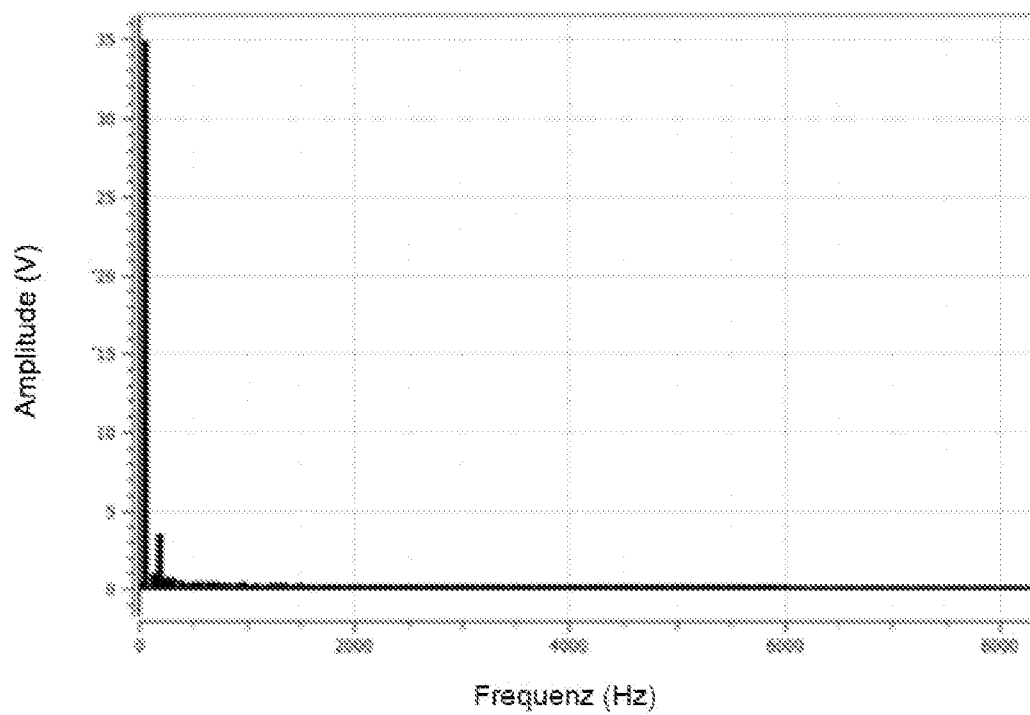


Fig.12

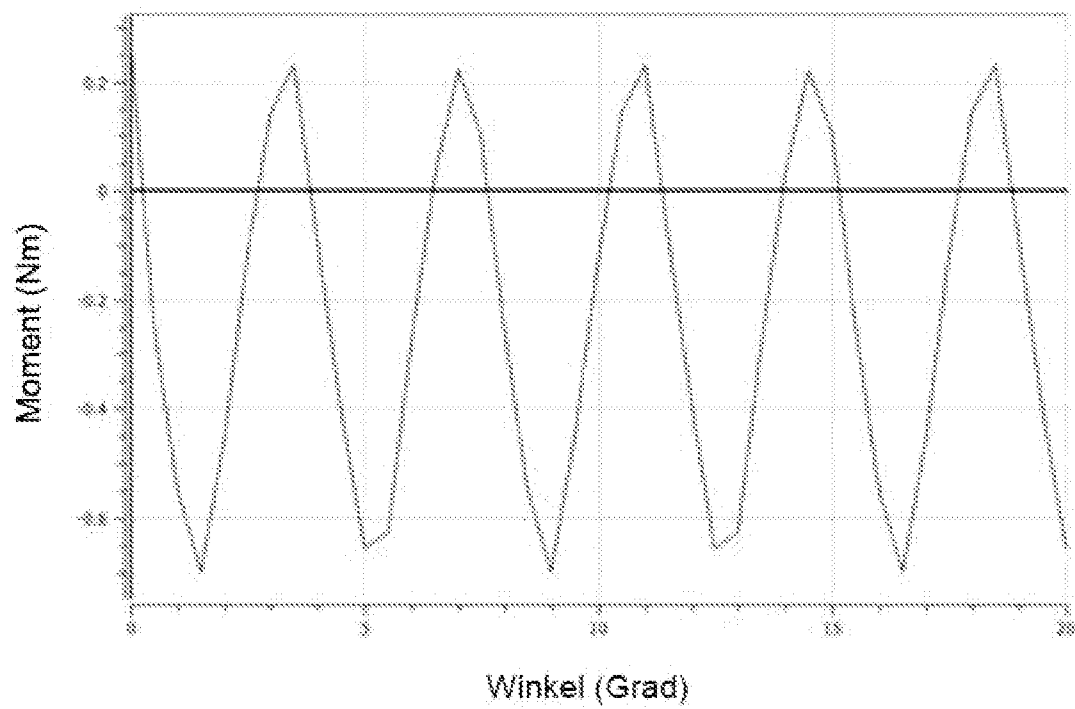


Fig. 13

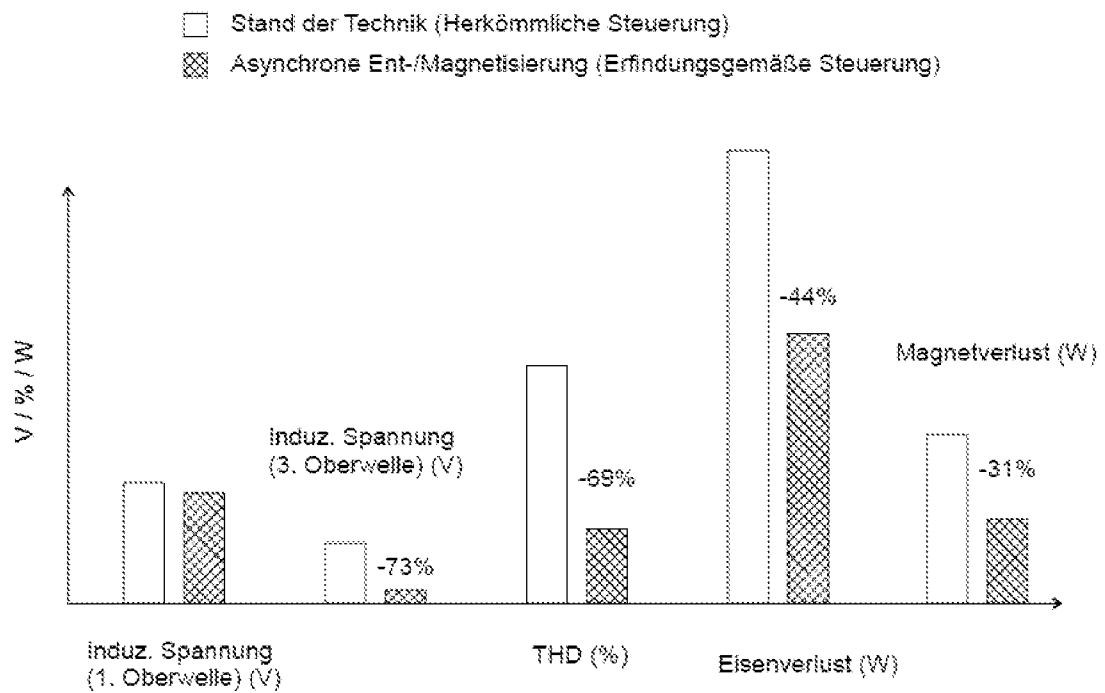


Fig.14

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß IPC:

H02P 21/00 (2016.01); H02P 21/02 (2006.01); H02P 21/06 (2016.01); H02P 21/12 (2016.01); H02K 1/24 (2006.01); H02K 1/27 (2006.01)

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß CPC:

H02P 21/0089 (2013.01); H02P 21/02 (2013.01); H02P 21/06 (2016.02); H02P 21/12 (2016.02); H02K 1/246 (2013.01); H02K 1/2766 (2013.01)

Recherchierter Prüfstoff (Klassifikation):

H02P, H02K

Konsultierte Online-Datenbank:

EPDOC, WPIAP

Dieser Recherchenbericht wurde zu den am 23.10.2020 eingereichten Ansprüchen 1-16 erstellt.

Kategorie ^{*)}	Bezeichnung der Veröffentlichung: Ländercode, Veröffentlichungsnummer, Dokumentart (Anmelder), Veröffentlichungsdatum, Textstelle oder Figur soweit erforderlich	Betreffend Anspruch
A	AT 522280 B1 (AVL LIST GMBH, AVL SOFTWARE & FUNCTIONS GMBH) 15. November 2020 (15.11.2020) Zusammenfassung; Figuren 1-8	1-16
A	JP 2008029148 A (TOSHIBA CORP) 07. Februar 2008 (07.02.2008) Zusammenfassung; Figuren 1-18	1-16
A	DE 102006006824 A1 (SIEMENS AG) 23. August 2007 (23.08.2007) Zusammenfassung; Figuren 1-9	1-16
A	CN 111697899 A (UNIV HUAZHONG SCIENCE TECH) 22. September 2020 (22.09.2020) Zusammenfassung; Figuren 1-4	1-16

Datum der Beendigung der Recherche:

27.09.2021

Seite 1 von 1

Prüfer(in):

KOVACS György

*) Kategorien der angeführten Dokumente:

- X** Veröffentlichung **von besonderer Bedeutung**: der Anmeldungsgegenstand kann allein aufgrund dieser Druckschrift nicht als neu bzw. auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden.
- Y** Veröffentlichung **von Bedeutung**: der Anmeldungsgegenstand kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren weiteren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese **Verbindung für einen Fachmann naheliegend** ist.

- A** Veröffentlichung, die den allgemeinen **Stand der Technik** definiert.
- P** Dokument, das von **Bedeutung** ist (Kategorien **X** oder **Y**), jedoch **nach dem Prioritätstag** der Anmeldung veröffentlicht wurde.
- E** Dokument, das **von besonderer Bedeutung** ist (Kategorie **X**), aus dem ein „**älteres Recht**“ hervorgehen könnte (früheres Anmeldedatum, jedoch nachveröffentlicht, Schutz ist in Österreich möglich, würde Neuheit in Frage stellen).
- &** Veröffentlichung, die Mitglied der selben **Patentfamilie** ist.