

(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 2013/189635 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
H02P 21/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2013/058474

(22) Internationales Anmeldedatum:
24. April 2013 (24.04.2013)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2012 210 650.2 22. Juni 2012 (22.06.2012) DE

(71) Anmelder: **ROBERT BOSCH GMBH** [DE/DE];
Postfach 30 02 20, 70442 Stuttgart (DE).

(72) Erfinder: **DEFLORIO, Andrea**; Friedenstr. 50, 71672
Marbach am Neckar (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, 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, KM, 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, 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: METHOD AND DEVICE FOR CONTROLLING AN INVERTER

(54) Bezeichnung : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM ANSTEUERN EINES WECHSELRICHTERS

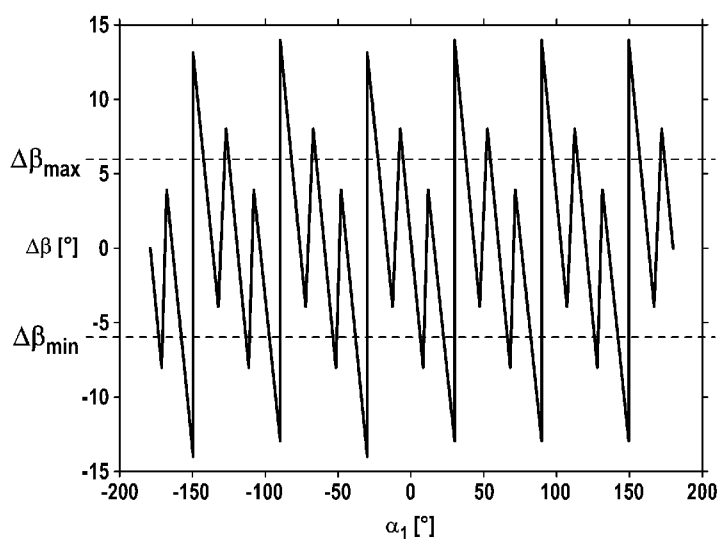


FIG. 9

(57) **Abstract:** The invention relates to a method for controlling an inverter (10) using space-vector pulse width modulation, in particular to control an electric machine, the inverter being equipped with a plurality of controllable switches (S) and being designed to provide a polyphase electric current (IU, IV, IV), in particular to supply polyphase electric current (IU, IV, IV) to the electric machine (14). In said method, a desired current space vector (II*) having a desired phase angle (alpha1) and a desired amplitude (I1) is predefined, and the inverter (10) is controlled in such a way that a plurality of different successive switching states (V1-V7) is established for the switches (S) in order to provide the electric current (IU, IV, IV) in the form of a current space vector (I2*), the inverter (10) being controlled in such a way that the current space vector (I2*) is provided at a phase angle (alpha2) which differs from the desired phase angle (alpha1), the difference (delta_beta) of the phase angle (alpha2) from the desired phase angle (alpha1) being limited according to a rotational speed (f) of the desired current space-vector (II*).

(57) **Zusammenfassung:**

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2013/189635 A2



Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ansteuern eines Wechselrichters (10) mittels Raumzeigermodulation, insbesondere zum Ansteuern einer elektrischen Maschine, wobei der Wechselrichter eine Mehrzahl von steuerbaren Schaltern (S) aufweist und der dazu ausgebildet ist, einen mehrphasigen elektrischen Strom (IU, IV, IV) bereitzustellen, insbesondere um die elektrische Maschine (14) mehrphasig mit elektrischem Strom (IU, IV, IV) zu versorgen, wobei ein Sollstromraumzeiger (I1*) mit einem Sollphasenwinkel (α_1) und einer Sollamplitude (I1) vorgegeben wird, wobei der Wechselrichter (10) derart angesteuert wird, dass eine Mehrzahl von unterschiedlichen aufeinanderfolgenden Schaltzuständen (V1-V7) der Schalter (S) eingerichtet wird, um den elektrischen Strom (IU, IV, IV) in Form eines Stromraumzeigers (I2*) bereitzustellen, wobei der Wechselrichter (10) derart angesteuert wird, dass der Stromraumzeiger (I2*) mit einem Phasenwinkel (α_2) bereitgestellt wird, der sich von dem Sollphasenwinkel (α_1) unterscheidet und wobei eine Abweichung ($\Delta\beta$) des Phasenwinkels (α_2) von dem Sollphasenwinkel (α_1) in Abhängigkeit einer Rotationsgeschwindigkeit (f) des Sollstromraumzeigers (I1*) begrenzt wird.

Beschreibung

5 Titel

Verfahren und Vorrichtung zum Ansteuern eines Wechselrichters

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ansteuern des Wechselrichters mittels Raumzeigermodulation, insbesondere zum Ansteuern einer elektrischen

10 Maschine, wobei der Wechselrichter eine Mehrzahl von steuerbaren Schaltern aufweist und der dazu ausgebildet ist, einen mehrphasigen elektrischen Strom bereitzustellen, insbesondere um die elektrische Maschine mehrphasig mit elektrischem Strom zu versorgen, wobei ein Sollstromraumzeiger mit einem Sollphasenwinkel und einer Sollamplitude vorgegeben wird, wobei der Wechselrichter derart angesteuert wird, dass

15 eine Mehrzahl von unterschiedlichen aufeinanderfolgenden Schaltzuständen der Schalter eingerichtet wird, um den elektrischen Strom in Form eines Stromraumzeigers bereitzustellen.

Die vorliegende Erfindung betrifft ferner eine Vorrichtung zum Ansteuern eines

20 Wechselrichters, insbesondere zum Ansteuern einer elektrischen Maschine, wobei der Wechselrichter eine Mehrzahl von steuerbaren Schaltern aufweist, die dazu angeschlossen sind, einen mehrphasigen elektrischen Strom in Abhängigkeit eines Sollstromraumzeigers mit einem Sollphasenwinkel und einer Sollamplitude bereitzustellen, insbesondere um die elektrische Maschine mehrphasig zu bestromen, mit

25 einem Steuergerät, das dazu ausgebildet ist, den Wechselrichter derart anzusteuern, dass der Wechselrichter eine Mehrzahl von aufeinanderfolgenden unterschiedlichen Schaltzuständen der Schalter annimmt, um den elektrischen Strom in Form eines Stromraumzeigers bereitzustellen.

30 Schließlich betrifft die vorliegende Erfindung einen Kraftfahrzeugantriebsstrang mit wenigstens einer elektrischen Maschine zum Bereitstellen von Antriebsleistung, einem Wechselrichter zum Ansteuern der elektrischen Maschine und mit einer Vorrichtung zum Ansteuern des Wechselrichters der oben beschriebenen Art.

35 Stand der Technik

Auf dem technischen Gebiet der Drehstromverbraucher im Allgemeinen und der elektrischen Drehstrommaschinen im Speziellen sind unterschiedliche Ansteuerungsverfahren bekannt. Dabei wird aktuell üblicherweise das Verfahren der Raumzeigermodulation zur Ansteuerung des Drehstromverbrauchers bevorzugt. Bei diesem Ansteuerungsverfahren wird ein Raumzeiger durch aufeinander folgende Einstellung von acht Grundspannungszeigern gebildet. Um die Strangspannung bereitzustellen, werden die Grundspannungszeiger pulsweitenmoduliert geschaltet, sodass eine entsprechende Ansteuerspannung generiert wird.

10

Bei den bekannten Ansteuerungsverfahren werden die elektrischen Verbraucher mittels eines Wechselrichters mit Leistungshalbleiterschaltern angesteuert. Die Einstellung der acht aufeinander folgenden Grundspannungszeiger zur Erzeugung des Spannungsraumzeigers wird durch abwechselndes Ein- und Ausschalten bestimmter Leistungshalbleiterschalter der Wechselrichter realisiert. Bei sehr geringen Rotationsgeschwindigkeiten des Raumzeigers beziehungsweise, sofern der Drehstromverbraucher eine elektrische Maschine ist, bei geringen Drehzahlen der angesteuerten elektrischen Maschinen werden einzelne der Leistungshalbleiterschalter sehr häufig bzw. sehr lange geschaltet und somit durch einen sehr lange bzw. sehr häufig fließenden elektrischen Strom thermisch belastet. Daher müssen die Leistungshalbleiterschalter für sehr lange Einschaltzeiten und für sehr große Ströme ausgelegt werden, wodurch der Wechselrichter im Allgemeinen technisch aufwändig wird.

15

20

Um einer, insbesondere thermischen, Überbelastung der Leistungshalbleiterschalter zu begegnen wird beispielsweise in der WO 2010/000548A2 vorgeschlagen, einen von zwei spannungsfrei schaltenden Schaltzuständen in bestimmten Pulsweitenmodulationsperioden entfallen zu lassen, um die Schaltverluste der Leistungshalbleiterschalter zu verringern.

25

Da die, insbesondere thermische, Belastung einzelner Leistungshalbleiterschalter des Wechselrichters abhängig von einem Phasenwinkel des bereitgestellten Stromraumzeigers ist bzw. einzelne der Leistungshalbleiterschalter des Wechselrichters für bestimmte Phasenwinkel des bereitgestellten Stromraumzeigers unterschiedlich belastet werden, wird beispielsweise in der DE 10393516 T1 vorgeschlagen, in bestimmten Winkelbereichen des bereitgestellten Stromraumzeigers einen bestimmten

30

35

Nullvektor zu verwenden, um die Schaltverluste der Leistungshalbleiterschalter zu reduzieren.

Nachteilig dabei ist es, dass in unterschiedlichen Ansteuerungssituationen und bei unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten des Stromraumzeigers einzelne der Leistungshalbleiterschalter stärker belastet werden und somit der Wechselrichter in bestimmten Situationen ungleichmäßig belastet wird und in anderen Situationen, in denen die Belastung der Leistungshalbleiterschalter im Wesentlichen gleichmäßig erfolgt, die Effektivität der Stromausnutzung reduziert ist.

10

Offenbarung der Erfindung

Erfindungsgemäß wird daher ein Verfahren zum Ansteuern eines Wechselrichters mittels Raumzeigermodulation der eingangs genannten Art bereitgestellt, wobei der Wechselrichter derart angesteuert wird, dass der Stromraumzeiger mit einem Phasenwinkel bereitgestellt wird, der sich von dem Sollphasenwinkel unterscheidet und wobei eine Abweichung des Phasenwinkels von dem Sollphasenwinkel in Abhängigkeit einer Rotationsgeschwindigkeit des Sollstromraumzeigers begrenzt wird.

20

Ferner wird daher erfindungsgemäß eine Vorrichtung zum Ansteuern eines Wechselrichters der eingangs genannten Art bereitgestellt, wobei das Steuergerät dazu ausgebildet ist, den Wechselrichter derart anzusteuern, dass der Stromraumzeiger mit einem Phasenwinkel bereitgestellt wird, der sich von dem Sollphasenwinkel unterscheidet und eine Abweichung des Phasenwinkels von dem Sollphasenwinkel in Abhängigkeit einer Rotationsgeschwindigkeit des Sollstromraumzeigers begrenzt wird.

25

Schließlich wird erfindungsgemäß ein Kraftfahrzeugantriebsstrang bereitgestellt mit wenigstens einer elektrischen Maschine zum Bereitstellen von Antriebsleistung, einem Wechselrichter zum Ansteuern der elektrischen Maschine und mit einer Vorrichtung zum Ansteuern des Wechselrichters der oben beschriebenen Art.

30

Vorteile der Erfindung

Dadurch, dass der Stromraumzeiger mit einem Phasenwinkel bereitgestellt wird, der sich von dem Sollphasenwinkel unterscheidet, kann in bestimmten Situationen, in denen einer der steuerbaren Schalter, insbesondere thermisch, überlastet wird oder überlastet zu

35

werden droht, entlastet werden, indem ein Stromraumzeiger mit einem Phasenwinkel eingestellt wird, der einen überlasteten steuerbaren Schalter entlastet und einen anderen steuerbaren Schalter stärker belastet. Sofern die Rotationsgeschwindigkeit des Stromraumzeigers zunimmt und einen bestimmten Wert überschreitet, werden die steuerbaren Schalter durch die hohen Rotationsfrequenzen und die Temperaturträger der steuerbaren Schalter in jedem Falle gleichmäßig belastet, so dass eine Entlastung eines bestimmten Schalters auf Kosten einer Belastung eines anderen Schalters eher nachteilig wäre. Daher kann durch das vorliegende Verfahren in Abhängigkeit der Ansteuersituation und in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit des Stromraumzeigers der Wechselrichter optimal angesteuert werden, um den Wechselrichter in allen Ansteuerungssituationen entsprechend gleichmäßig zu belasten. Somit können die steuerbaren Schalter im Allgemeinen für geringere Belastungswerte ausgelegt werden, wodurch der Wechselrichter im Allgemeinen weniger aufwendig und kostengünstiger gefertigt werden kann. Ferner wird durch die gleichmäßigere Belastung der Schalter die Lebensdauer des Wechselrichters im Allgemeinen verlängert.

Vorzugsweise wird die Abweichung mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit reduziert.

Dadurch kann der Wechselrichter bei sehr geringen Rotationsgeschwindigkeiten des Sollstromraumzeigers große Belastungen einzelner Schalter ausgleichen, wodurch eine kritische Belastungsphase für den Wechselrichter ausgeglichen werden kann.

Es ist weiterhin bevorzugt, wenn die Abweichung in Abhängigkeit von dem Sollphasenwinkel des Stromraumzeigers eingestellt wird.

Dadurch kann für bestimmte kritische Sollphasenwinkel individuell ein optimaler Stromraumzeiger eingestellt werden, der besondere Belastungszustände einzelner steuerbarer Schalter ausgleichen kann.

Es ist weiterhin bevorzugt, wenn die Abweichung innerhalb eines Abweichungsbereiches variiert wird und wobei der Abweichungsbereich mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit des Sollstromraumzeigers reduziert wird.

Dadurch kann die durch die Abweichung insgesamt stärkere Gesamtbelastung der elektrischen Maschine und des Wechselrichters angepasst werden an die Notwendigkeit einzelne steuerbare Schalter zu entlasten.

Es ist weiterhin allgemein bevorzugt, wenn unterhalb einer vordefinierten Rotationsgeschwindigkeit der Phasenwinkel in Abhängigkeit eines vordefinierten Belastungssollwerts der Schalter eingestellt wird.

5

Dadurch kann bei kritischen Rotationsgeschwindigkeiten des Stromraumzeigers eine bestimmte Belastungsverteilung des Wechselrichters eingestellt werden.

10 Dabei ist es besonders bevorzugt, wenn der Phasenwinkel und eine Amplitude des Stromraumzeigers derart eingestellt werden, dass eine Leistungsabgabe identisch ist mit einer Leistungsabgabe entsprechend dem Sollphasenwinkel und der Sollamplitude des Sollstromraumzeigers.

15 Dadurch kann die Abweichung des Phasenwinkels eingestellt werden, ohne dass die Ansteuerung der angesteuerten Last beeinträchtigt wird.

Es ist weiterhin bevorzugt, wenn die maximale Abweichung des Stromraumzeigers von dem Sollstromraumzeiger 30° Grad beträgt.

20 Dadurch kann die Gesamtbelastung des Wechselrichters begrenzt werden, da die Amplitude des Stromraumzeigers mit größerer Abweichung des Phasenwinkels von dem Sollphasenwinkels zunimmt und andere steuerbare Schalter des Wechselrichters übermäßig belastet werden.

25 Es ist weiterhin bevorzugt, wenn der Abweichungsbereich zwischen einer ersten vordefinierten Rotationsgeschwindigkeit und einer zweiten vordefinierten Rotationsgeschwindigkeit des Sollstromraumzeigers linear reduziert wird.

30 Dadurch kann in einer Übergangsphase zwischen unterschiedlichen Ansteuerungsverfahren mit regelungstechnischen einfachen Mitteln variiert werden, wobei Synergien beider Ansteuerungsverfahren genutzt werden können.

35 Es ist weiterhin bevorzugt, wenn mittels des Wechselrichters eine elektrische Maschine angesteuert wird und der Sollstromzeiger in Abhängigkeit des Rotorwinkels der elektrischen Maschine bestimmt wird.

Dadurch kann der Sollstromraumzeiger mit regelungstechnisch geringem Aufwand bestimmt werden.

5 Dabei ist es besonders bevorzugt, wenn der Phasenwinkel und die Amplitude des Stromraumzeigers unterhalb einer vordefinierten Rotationsgeschwindigkeit derart bestimmt wird, dass ein von der elektrischen Maschine abgegebenes Drehmoment identisch ist mit dem Drehmoment, das mittels des Sollstromraumzeigers abgegeben wird.

10 Dadurch kann die elektrische Maschine auch bei einem von dem Sollphasenwinkel abweichenden Phasenwinkel entsprechend eines vordefinierten Sollwertes angesteuert werden, wobei die Variation des Phasenwinkels die Ansteuerung der elektrischen Maschine nicht beeinträchtigt.

15 Im Ergebnis kann durch die vorliegende Erfindung die angesteuerte Last in unterschiedlichen Ansteuerungssituationen insbesondere bei unterschiedlichen Rotationsfrequenzen des Stromraumzeigers optimal angesteuert werden, so dass der Wechselrichter gleichmäßig belastet wird und die Stromausnutzung durch die angesteuerte Last optimal ist.

20 Es versteht sich, dass Merkmale, Eigenschaften und Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens auch entsprechend auf die erfindungsgemäße Vorrichtung zutreffen bzw. anwendbar sind.

25 Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Figur 1 zeigt in schematischer Form einen Wechselrichter zum Ansteuern eines elektrischen Verbrauchers;

30 Figur 2 zeigt ein komplexes Zeigerdiagramm zur Erläuterung des Raumzeigermodulationsverfahrens zum Ansteuern des Wechselrichters eines elektrischen Verbrauchers;

35 Figur 3 zeigt in schematischer Form einen Verlauf von drei Strangspannungen zum Einstellen unterschiedlicher Spannungsraumzeiger;

Figur 4 zeigt in schematischer Form einen Ablauf zum Bestimmen eines Belastungssollwertes der Schalter bzw. der Freilaufdioden des Wechselrichters;

Figur 5 zeigt in schematischer Form einen detaillierten Ablauf zum Bestimmen eines Belastungssollwertes auf der Grundlage von Temperaturmessungen oder -schätzungen;

Figur 6 zeigt in schematischer Form ein komplexes Zeigerdiagramm zum Einstellen eines Stromraumzeigers;

Figur 7 zeigt ein komplexes Zeigerdiagramm zum Einstellen eines Alternativstromraumzeigers;

Figur 8 zeigt ein komplexes Zeigerdiagramm zum Einstellen eines Stromraumzeigers mit einem Phasenwinkel von Null Grad;

Fig. 9 zeigt die Abweichung eines Phasenwinkels des Stromraumzeigers von dem Sollphasenwinkel in Abhängigkeit des Sollstromraumzeigers; und

Fig. 10 zeigt einen Verlauf der maximalen Abweichung des Phasenwinkels von dem Sollphasenwinkels in Abhängigkeit der Rotationsfrequenz des Sollstromraumzeigers.

Ausführungsformen der Erfindung

In Figur 1 ist ein Wechselrichter zum Ansteuern eines elektrischen Verbrauchers, insbesondere einer elektrischen Maschine schematisch dargestellt und allgemein mit 10 bezeichnet.

Der Wechselrichter 10 ist mit einer Gleichspannungsquelle 12 verbunden und dient dazu, den elektrischen Verbraucher 14, der in diesem Fall als elektrische Maschine 14 ausgebildet ist, dreiphasig zu bestromen. Der Wechselrichter weist drei Halbbrücken auf, die parallel zu der Gleichspannungsquelle 12 geschaltet sind und jeweils zwei steuerbare Schalter S aufweisen. Zwischen den Schaltern S ist jeweils ein Halbbrückenabgriff 16 gebildet, die jeweils mit einem Phasenleiter der Phasen U, V, W der elektrischen Maschine 14 verbunden sind.

35

Parallel zu den Schaltern S ist jeweils eine Freilaufdiode D geschaltet, die einen Stromfluss in entgegengesetzter Richtung ermöglicht.

5 In Figur 1 sind die Schalter S entsprechend der Phase U, V, W, die sie bereitstellen und entsprechend der Zuordnung zu einem hohen Potenzial der Gleichspannungsquelle 12 oder einem niedrigen Potenzial der Gleichspannungsquelle 12 mit SHA, SLA, SHB, SLB, SHC, SLC bezeichnet. Entsprechend sind die Freilaufdioden bezeichnet mit DHA, DLA, DHB, DLB, DHC, DLC.

10 Durch wechselndes Öffnen und Schließen der Schalter S wird zwischen den Phasenleitern U, V, W jeweils eine Ansteuerspannung angelegt, sodass sich entsprechend jeweils ein Phasenstrom IU, IV, IW einstellt, der die elektrische Maschine 14 antreibt. Der Wechselrichter 10 ist vorzugsweise mittels Halbleiterschaltern ausgebildet. Die Schalter des Wechselrichters werden mittels einer schematisch
15 dargestellten Steuereinheit 18 wechselnd geöffnet und geschlossen, um die Phasenspannungen mit einem bestimmten Verlauf bereitzustellen, und einen Spannungsraumzeiger bereitzustellen und die elektrische Maschine 14 entsprechend mit den Phasenströmen IU, IV, IW zu bestromen. Dabei wird der Spannungszeiger durch den Wechselrichter 10 bereitgestellt, woraufhin sich der Stromraumzeiger in Abhängigkeit der
20 angesteuerten Last entsprechend einstellt.

In Figur 2 ist ein komplexes Zeigerdiagramm zur Erläuterung der Raumzeigermodulation zum Ansteuern des Drehstromverbrauchers 14 beziehungsweise der elektrischen Maschine 14 dargestellt und allgemein mit 20 bezeichnet.

25

In dem Zeigerdiagramm 20 ist ein Spannungszeiger V^* mit einem Ansteuerungswinkel Alpha der elektrischen Maschine 14 dargestellt. In dem Zeigerdiagramm 20 sind ferner sechs Grundspannungszeiger V1, V2, V3, V4, V5, V6 dargestellt, die sich ergeben, wenn
30 einzelne oder zwei der Schalter S des Wechselrichters 10 geschlossen werden und die elektrische Maschine entsprechend angesteuert wird. Um den Spannungszeiger V^* mit maximaler Länge einzustellen, der in diesem Beispiel den Ansteuerwinkel Alpha zwischen den Grundspannungszeigern V1 und V2 aufweist, wird dieser durch abwechselndes Ansteuern des Wechselrichters 10 entsprechend dem Grundspannungszeiger V1 und dem Grundspannungszeiger V2 realisiert. Die beiden Grundspannungszeiger V1, V2
35 werden abwechselnd eingestellt mit einer vordefinierten Schaltfrequenz, sodass sich bei gleicher Einschaltdauer der Grundspannungszeiger V1, V2 der Spannungszeiger V^* mit

einem Phasenwinkel von 30° ergibt. Sofern ein Spannungszeiger V^* mit einem größeren Ansteuerungswinkel α eingestellt werden muss, wird entsprechend die Einschaltdauer des Grundspannungszeigers V_2 verlängert und die Einschaltdauer des Grundspannungszeigers V_1 verkürzt. Somit lässt sich durch getaktetes Ansteuern der

5 Schalter S des Wechselrichters 10 der Spannungsraumzeiger V^* mit einem beliebigen Ansteuerwinkel α realisieren.

Sofern der Spannungszeiger V^* , wie in dem in Figur 2 dargestellten Fall mit einem geringeren Betrag (geringere Länge) als die Grundspannungsraumzeiger V_1, V_2

10 eingestellt werden soll, wird entsprechend ein Nullspannungszeiger V_0, V_7 eingestellt, bei dem die Schalter SHA, SHB, SHC auf der oberen Seite bzw. SLA, SLB, SLC auf der unteren Seite des Wechselrichters 10 geöffnet sind. Die jeweils anderen der Schalter S sind entsprechend geschlossen. Entsprechend kann der Spannungszeiger V^* durch eine Kombination der Grundspannungsraumzeiger V_1 und V_2 und einem der

15 Nullspannungszeiger V_0, V_7 realisiert werden.

In Abhängigkeit des Spannungsraumzeigers V^* stellt sich ein Stromraumzeiger I^* ein. Der Stromraumzeiger I^* weist eine Amplitude und einen Phasenwinkel auf, die sich in Abhängigkeit des angesteuerten elektrischen Verbrauchers 14 einstellen. Der

20 Phasenwinkel des Stromraumzeigers I^* kann phasengleich mit dem Phasenwinkel α des Spannungsraumzeigers V^* sein oder eine Phasenverschiebung aufweisen.

Zur Bestromung des elektrischen Verbrauchers 14 beziehungsweise der elektrischen Maschine 14 wird der Spannungsraumzeiger V^* bereitgestellt, indem die

25 unterschiedlichen Grundspannungsraumzeiger V_1-V_6 und die Nullspannungszeiger V_0, V_7 in einer schnellen Abfolge hintereinander eingestellt werden. Dadurch werden die unterschiedlichen Schalter S und die unterschiedlichen Freilaufdioden D des Wechselrichters 10 bei einem entsprechend schnell rotierenden Spannungsraumzeigers V^* gleichmäßig belastet, insbesondere phasig gleichmäßig belastet. Sofern die

30 Rotationsfrequenz des Spannungsraumzeigers V^* sehr gering oder null ist, zum Beispiel bei geringen Drehzahlen der elektrischen Maschine 10, werden die entsprechenden Schalter S und die Freilaufdioden D des Wechselrichters 10 einer Phase U, V, W über einen langen Zeitraum belastet, sodass eine Überlastung der entsprechenden Schalter S und der Freilaufdioden D auftreten kann und die Schalter S und die Freilaufdioden D des

35 Wechselrichters 10 im Allgemeinen ungleichmäßig, insbesondere phasig ungleichmäßig belastet werden. Um bei eine Überlastung einzelner der Schalter S und Freilaufdioden D

zu verhindern, müssen Maßnahmen ergriffen werden, um die Belastung auf unterschiedliche der Schalter S und der Freilaufdioden D zu verteilen.

In Figur 3 sind Verläufe der Phasenspannungen der drei Phasen U, V, W innerhalb einer pulsweiten Modulationsperiode T dargestellt, um die Grundspannungsraumzeiger V_0 , V_1 , V_2 , V_7 nacheinander einzustellen. Innerhalb der pulsweiten Modulationsperiode T kann eine Einschaltdauer t_0 , t_1 , t_2 , t_7 der einzelnen Grundspannungsraumzeiger V_0 , V_1 , V_2 , V_7 variiert werden, um den Spannungsraumzeiger V^* präzise einstellen zu können.

In Figur 4 ist die Bestimmung eines Belastungssollwertes m prinzipiell dargestellt und allgemein mit 30 bezeichnet. Mittels des Belastungssollwertes m wird grundsätzlich das Ziel verfolgt, die Schalter SHA, SHB, SHC, die einem hohen Spannungspotential der Spannungsquelle 12 zugeordnet sind und die Schalter SLA, SLB, SLC, die einem niedrigen Spannungspotential der Spannungsquelle 12 zugeordnet sind, gleich oder in möglichst ähnlicher Weise zu belasten. Dabei werden im Folgenden die Schalter SHA, SHB, SHC, die dem hohen Spannungspotential der Spannungsquelle 12 zugeordnet sind als obere Schalter SH bezeichnet und die Schalter SLA, SLB, SLC, die dem niedrigen Spannungspotential der Spannungsquelle 12 zugeordnet sind, als untere Schalter SL bezeichnet.

Als Eingangsgröße dienen der Betrag V des Spannungsraumzeigers V^* , der Phasenwinkel α_V des Spannungsraumzeigers V^* , der Betrag I des Stromraumzeigers I^* und der Phasenwinkel α_I des Stromraumzeigers I^* .

Zunächst wird einer der oberen Schalter SH bzw. eine der oberen Freilaufdioden DH ausgewählt, der bzw. die die maximalen Verluste der oberen Seite für den einzustellenden Spannungsraumzeiger V^* aufweist. Für diesen Schalter SH bzw. diese Freilaufdiode DH werden die maximal möglichen Verluste P_{Hmax} für den einzustellenden Spannungsraumzeiger V^* theoretisch bestimmt für den Fall, dass lediglich V_7 als Nullspannungszeiger verwendet wird. Ferner werden die minimal möglichen Verluste P_{Hmin} dieses Schalters SH bzw. dieser Freilaufdiode DH für den einzustellenden Spannungsraumzeiger V^* theoretisch bestimmt für den Fall, dass lediglich V_0 als Nullspannungszeiger verwendet wird, wie es bei 32 gezeigt ist. Bei 34 wird entsprechend der untere Schalter SL bzw. die untere Freilaufdiode DL ausgewählt, der die maximalen Verluste der unteren Schalter SL bzw. der unteren Freilaufdioden DL für den einzustellenden Spannungsraumzeiger V^* aufweist. Für diesen Schalter SL bzw.

diese Freilaufdiode DL werden dann die maximal möglichen Verluste P_{Lmax} und die minimal möglichen Verluste P_{Lmin} für den einzustellenden Spannungsraumzeiger V^* bestimmt für den Fall, dass lediglich V_0 bzw. V_7 als Nullspannungszeiger verwendet wird. Aus diesen Verlustwerten wird bei 36 ein neuer Belastungswert m berechnet und zwar mit

5 der Formel:

$$m = \frac{P_{Lmax} - P_{Hmin}}{P_{Hmax} - P_{Hmin} + P_{Lmax} - P_{Lmin}}$$

Der so bestimmte Belastungswert m verteilt die thermische Belastung des

10 Wechselrichters 10 auf die obere und der untere Seite derart, dass die Verluste auf der oberen Seite identisch mit den Verlusten der unteren Seite sind. Bei 38 werden die Einschaltzeiten $t_0 - t_7$ berechnet, um den ausgewählten Belastungswert m einzustellen und die Schalter S und die Freilaufdioden D entsprechend gleichmäßiger zu belasten.

15 Da die Freilaufdioden D und die Schalter S unterschiedliche Belastungsgrenzen aufweisen aufweisen, müssen die Verluste P_D , P_S der Freilaufdioden D und der Schalter S aneinander angepasst bzw. faktorisiert werden, um miteinander verglichen werden zu können. Daher wird für die Freilaufdioden D eine Vergleichsverlustleistung P_{DV} bestimmt, und zwar mit der Formel:

20

$$P_{DV} = c \cdot P_D$$

Wobei P_{DV} die Vergleichsverlustleistung der Freilaufdioden, P_D die Freilaufdiodenverluste, und der Faktor c eine Konstante sind. In einer besonderen Ausführungsform kann der

25 Faktor c auch eine Funktion der Verlustleistung P_D der Freilaufdioden D sein.

Ferner wird deutlich, dass die Verluste P_D , P_S der Schalter S bzw. der Freilaufdioden D ausschließlich eine Funktion des Betrages V des Spannungsraumzeigers V^* , des Phasenwinkels α_V , des Betrages I des Stromraumzeigers I^* und des Phasenwinkels

30 α_I sind.

In einer alternativen Ausführungsform des Verfahrens 30 werden anstatt der Verlustleistungen P der elektrische Strom I in dem jeweiligen Bauelement S , D und/oder das Quadrat des elektrischen Stroms I^2 in dem jeweiligen Bauelement S , D verwendet,

35 um den Belastungswert m zu bestimmen.

In Figur 5 ist ein Verfahren dargestellt, um den Belastungswert m auf der Grundlage einer geschätzten oder gemessenen Temperatur T_D , T_S der Schalter S und/oder der Freilaufdioden D zu bestimmen und einen neuen Belastungssollwert m zu ermitteln. In

5 Figur 5 ist das Verfahren allgemein mit 40 bezeichnet.

Bei dem Verfahren 40 erfolgt im Betrieb die Bestimmung des Belastungssollwertes m in Abhängigkeit die Temperaturen der Schalter S bzw. der Freilaufdioden D . Als

Eingangsgröße dienen allgemein die Temperaturen T_D , T_S der Schalter S und der

10 Freilaufdioden D . Bei 42 wird über die Temperaturen T_D , T_S der am stärksten belastete obere Schalter SH , die am stärksten belastete obere Freilaufdiode DH , der am stärksten belastete untere Schalter SL und die am stärksten belastete untere Freilaufdiode DL

ermittelt. Mit anderen Worten wird das jeweilige Bauelement ermittelt, das die höchste Temperatur aufweist. Aus diesen Temperaturen wird bei 44 und 46 die maximale

15 Temperatur T_H der oberen Schalter und/oder der oberen Freilaufdioden bzw. aus den Verlusten der unteren Seite die maximale Temperatur T_L der unteren Seite ermittelt.

Dabei wird die Temperatur T_D der Freilaufdioden D faktorisiert um die Temperaturen der Schalter und der Freilaufdioden D vergleichen zu können, wie es bei 48 gezeigt ist. Um

die Temperaturen der Schalter S und der Freilaufdioden D vergleichen zu können, wird

20 eine Vergleichstemperatur der Freilaufdioden bestimmt mit der Formel:

$$T_{DV}=c \cdot T_D$$

Wobei T_{DV} die Vergleichstemperatur, T_D die Temperatur der Freilaufdioden D und der

25 Faktor c eine Konstante sind. In einer besonderen Ausführungsform kann der Faktor c

auch eine Funktion der Verlustleistung P_D der Freilaufdioden D sein. An einem

Summationspunkt 50 wird die Differenz dT zwischen der maximalen Temperatur T_H der oberen Seite und der maximalen Temperatur T_L der unteren Seite ermittelt. Bei 52 wird

in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz dT ein geänderter Belastungssollwert m

30 bestimmt, um die Temperaturdifferenz dT entsprechend auszugleichen. Sofern die

Temperaturdifferenz $dT > 0$ ist, wird der Belastungssollwert m , I_{sm} reduziert und sofern die Temperaturdifferenz $dT < 0$ ist, wird der Belastungssollwert m , I_{sm} erhöht. In

Abhängigkeit des so bestimmten Belastungssollwertes m , I_{sm} werden bei 54 neue

Einschaltdauern $t_0 - t_7$ für die folgende Pulsweitenmodulationsperiode T bestimmt. In

35 Abhängigkeit der neuen Pulsweitenmodulationsperiode T werden geänderte

Temperaturen T_D , T_S der Schalter S und der Freilaufdioden D ermittelt, wie es bei 56

gezeigt ist und als neue Eingangsgrößen für das Verfahren 14 bereitgestellt, wie es durch die Rückführung 58 angedeutet ist. Dadurch kann auf der Grundlage der gemessenen oder geschätzten Temperatur der Schalter S und/oder der Freilaufdioden D für jede Pulsweitenmodulationsperiode T ein neuer Belastungssollwert m bestimmt werden, um die entsprechenden Schalter S und Freilaufdioden D gemäß dem neuen Belastungssollwert m, I_{sm} gleichmäßig zu belasten. Durch den Vergleich der Temperatur der Bauelemente der oberen Seite und der unteren Seite und durch die Anpassung des Belastungswertes m kann somit eine gleichmäßigere Belastung der Bauelemente der oberen Seite relativ zu den Bauelementen der unteren Seite erreicht werden.

In einer alternativen Ausführungsform des Verfahrens 40 werden zur Bestimmung des Belastungssollwertes m, I_{sm} anstatt der Temperaturen der Bauelemente S, D Verlustwerte verwendet, die durch Integration der Verlustleistung des jeweiligen Bauelementes S, D oder durch Integration des elektrischen Stroms I in dem jeweiligen Bauelement S, D und/oder durch Integration des Quadrates des elektrischen Stroms I^2 in dem jeweiligen Bauelement S, D über einen vordefinierten Zeitraum ermittelt bzw. bestimmt werden.

In einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens 40 werden zur Bestimmung des Belastungssollwertes m, I_{sm} anstatt der Temperaturen der Bauelemente S, D die elektrischen Verluste P oder der elektrische Strom I in dem jeweiligen Bauelement S, D und/oder das Quadrat des elektrischen Strom I^2 in dem jeweiligen Bauelement S, D verwendet, die jeweils mittels eines Tiefpassfilter gefiltert werden.

In Figur 6 ist ein komplexes Zeigerdiagramm des Stromraumzeigers I_{1*} schematisch dargestellt. Der Stromraumzeiger I_{1*} weist einen Betrag I_1 und einen Phasenwinkel α_1 auf. Sofern der Wechselrichter 10, der den Stromraumzeiger I_{1*} einstellt, zum Ansteuern der elektrischen Maschine 14 eingesetzt wird, erzeugt die elektrische Maschine 14 ein Drehmoment M. In dem komplexen Zeigerdiagramm aus Figur 6 sind die einzelnen Phasen U, V, W mit einem Winkel von 120 Grad zueinander dargestellt. Eine Projektion des Stromraumzeigers I_{1*} auf die entsprechenden Phasen U, V, W entspricht dabei dem Strom, der in den zugeordneten Schalter S eingestellt wird. Durch diese Projektion, die durch die gestrichelten Linien angedeutet ist, kann somit die Belastung der einzelnen Schalter S bzw. Freilaufdioden D direkt abgelesen werden. In dem dargestellten Beispiel aus Figur 6 wird somit der Schalter SHA durch die Phase U am stärksten belastet, wobei

der Schalter SHC der Phase W weniger belastet wird, als der Schalter SHA und der Schalter SHB der Phase V sehr gering belastet wird.

In Figur 6 ist das bereitgestellte Drehmoment M der angeschlossenen elektrischen Maschine 14 als Kurve dargestellt, die gleichzeitig eine Kurve konstanten Drehmomentes M darstellt. Das von der elektrischen Maschine 14 abgegebene Drehmoment M ist eine Funktion eines Winkels Theta, um den der Stromzeiger I* dem elektrischen Rotorwinkel der elektrischen Maschine 14 vorausseilt und der Amplitude I des Stromraumzeigers I*: $M = f(\text{Theta}, I)$. Daraus wird ersichtlich, dass das Drehmoment M, das von der elektrischen Maschine 14 abgegeben wird, konstant ist, sofern der Stromraumzeiger I1* der in Figur 6 dargestellten Linie konstanten Drehmoments M folgt.

Der Stromraumzeiger I1* wird so eingestellt, dass er einem elektrischen Rotorwinkel der elektrischen Maschine 14 vorausseilt, um mittels der elektrischen Maschine 14 das Drehmoment M bereitzustellen. Der Stromraumzeiger I1* eilt der elektrischen Rotorposition der elektrischen Maschine 14 um einen Winkel Theta voraus. Dies wird deutlich durch die Formel:

$$\alpha_I = \alpha_R + \text{Theta},$$

wobei α_I der Phasenwinkel des Stromraumzeigers I1*, α_R der elektrische Winkel des Rotors der elektrischen Maschine 14 und Theta der Differenzwinkel ist.

Der Differenzwinkel Theta liegt üblicherweise zwischen 90 Grad und 180 Grad im motorischen Betrieb. Der Stromraumzeiger I1* wird so eingestellt, dass der Wechselrichter 10 und die elektrische Maschine 14 für den elektrischen Rotorwinkel α_R einen optimalen Wirkungsgrad haben.

Eine Variation des Phasenwinkels α_I des Stromraumzeigers ist in einem komplexen Zeigerdiagramm in Figur 7 schematisch dargestellt.

In dem in Figur 7 dargestellten komplexen Zeigerdiagramm ist der Sollstromraumzeiger I1* mit dem Phasenwinkel α_1 und dem Betrag I1 dargestellt und der Stromraumzeiger I2* mit dem Phasenwinkel α_2 und dem Betrag I2. Der Sollstromraumzeiger I1* ist dabei der Stromraumzeiger, bei dem der Wechselrichter 10 und die elektrische Maschine 14 einen optimalen Wirkungsgrad aufweisen. Beide Stromraumzeiger I1*, I2* geben das

gleiche Drehmoment M ab, da sie auf der Linie gleichen Drehmoments M verlaufen. Der Sollstromraumzeiger $I1^*$ ist identisch mit dem Stromzeiger $I1^*$ aus Figur 6. Der Stromraumzeiger $I2^*$ weist einen Phasenwinkel α_2 auf, der größer ist, als der Phasenwinkel α_1 des Sollstromraumzeigers $I1^*$. Die Differenz zwischen den

5 Phasenwinkeln α_1 und α_2 ist in Figur 7 als δ_{β} bezeichnet. δ_{β} kann in Abhängigkeit des Phasenwinkels α_1 unterschiedlich groß sein und schwanken maximal zwischen $+30^\circ$ und -30° . Durch die in Figur 7 dargestellte Projektion des Stromraumzeigers $I2^*$ auf die entsprechenden Phasenachsen der Phasen U, V, W wird deutlich, dass der Strom in der Phase U also in dem Schalter SHA gegenüber $I1^*$

10 reduziert ist und der Strom in der Phase W also dem Schalter SHC und der Freilaufdiode DLC erhöht ist. Insgesamt ist die Strombelastung durch den größeren Betrag des Stromraumzeigers $I2^*$ größer als bei dem Sollstromraumzeiger $I1^*$, jedoch kann durch diese Maßnahme wie aus Figur 7 ersichtlich ist, die Belastung des am stärksten belasteten Schalters SHA und der Freilaufdiode DLA reduziert werden. Dadurch können

15 Spitzenbelastungen der am stärksten belasteten Schalter S und auch der am stärksten belasteten Freilaufdioden D reduziert werden und die Belastung auf andere Schalter S oder Freilaufdioden D verteilt werden. Dadurch kann der Wechselrichter 10 phasig gleichmäßiger belastet werden. Da der Stromzeiger $I2^*$ der Linie gleichen Drehmoments M folgt, wird ein identisches Drehmoment M von der elektrischen Maschine 14

20 bereitgestellt, sodass diese Maßnahme für den Nutzer der elektrischen Maschine 14 keine Einschränkung darstellt und beispielsweise kein Stottern oder ein Einbruch des Drehmoments M auftritt. Durch die Einstellung des Stromraumzeigers $I2^*$, der von dem Sollstromraumzeiger $I1^*$ abweicht, können die Verluste in den einzelnen Phasen U, V, W verteilt werden und somit eine Überlastung einzelner Bauteile einzelner Phasen

25 vermieden werden. Mit anderen Worten kann somit eine gleichmäßigere Belastung der Phasen U, V, W erreicht werden.

Im Ergebnis kann somit durch das Bereitstellen eines alternativen Stromraumzeigers $I2^*$ mit einem von dem Sollphasenwinkel α_1 abweichenden Phasenwinkel α_2 eine

30 Reduktion des am meisten belasteten Schalters SHA und der Freilaufdiode DLA bzw. der am stärksten belasteten Phase U erzielt werden und somit der Wechselrichter 10 im Allgemeinen gleichmäßiger belastet werden.

Falls die Freilaufdioden D stark belastbar sind kann δ_{β} auch mit einem negativen

35 Wert eingestellt werden, um einzelne der Schalter S zu entlasten. In der in Figur 7 dargestellten Ansteuerungssituation wird zunächst durch die Auswahl des

Nullspannungszeigers V0 der Schalter SHA entlastet und somit die Freilaufdiode DLA stärker belastet. Dadurch werden auch die Schalter SLB, SLB stärker belastet. Für den Phasenwinkel α_1 wird dann die Freilaufdiode DLA am stärksten, der Schalter SLC weniger stark und der Schalter SLB sehr gering belastet. In dieser Situation kann durch
5 einen Phasenwinkel α_2 , der kleiner ist als α_1 , also mit einem negativen Abweichungswinkel δ_{β} , die Freilaufdiode DLA stärker belastet werden, wodurch allerdings der Schalter SLC entlastet und der Schalter SLB stärker belastet wird. Somit kann die Belastung der Schalter SLB und SLC gleichmäßiger verteilt werden. Dies erfolgt allerdings auf Kosten einer stärkeren Belastung der Freilaufdiode DLA.

10

Mit anderen Worten wird zunächst die Belastung von einem oberen Schalter SH auf eine untere Freilaufdiode DL verlagert und zwar durch Wahl einer geeigneten zeitlichen Verteilung der Nullspannungszeiger V0, V7 und dann wird die Belastung bei dem Nullspannungszeiger V0, V7 durch Einstellen des Abweichungswinkels δ_{β} auf die
15 Phasen U,V,W verteilt. So kann im Allgemeinen die Belastung der Schalter S und der Freilaufdioden D gleichmäßiger eingestellt werden.

Vorzugsweise wird das Verfahren 40 aus Fig. 5 mit dem Einstellen des alternativen Stromraumzeigers I2* aus Fig. 7 kombiniert. Dabei wird beispielsweise vor Ansteuerung des Wechselrichters 10 also etwa in dem Steuergerät 18 auf der Grundlage des
20 Sollstromraumzeigers I1* nach dem Verfahren 30 ein optimierter Belastungssollwert m und gleichzeitig auch ein optimierter Stromraumzeiger I2* bestimmt. Diese Werte werden in einem Kennfeld abgespeichert und die elektrische Maschine 14 wird anhand der Werte des Kennfeldes angesteuert. Mit anderen Worten werden der Belastungssollwert m und
25 der Stromraumzeiger I2* offline bestimmt und die elektrische Maschine entsprechend angesteuert.

Alternativ dazu kann der optimierte Stromraumzeiger I2* aus dem Kennfeld entnommen werden und der Belastungssollwert m im Betrieb der elektrischen Maschine 14 nach dem
30 Verfahren 30 oder 40 auf der Grundlage von Messwerten oder Schätzwerten bestimmt werden und entsprechend kontinuierlich optimiert werden. Mit anderen Worten wird der Belastungssollwert m online bestimmt und angepasst.

In Figur 8 ist ein komplexes Zeigerdiagramm entsprechend der Figuren 6 und 7
35 schematisch dargestellt für einen Sollstromraumzeiger I1* von Null Grad. In Figur 8 ist ferner die Linie gleichen Drehmoments M dargestellt. Die Linie gleichen Drehmoments M

weist eine derartige Krümmung auf, dass eine Entlastung der Phase U bzw. eine Entlastung des entsprechenden Schalters SHA durch Bereitstellen eines Stromraumzeigers I_2^* mit einem abweichenden Phasenwinkel nicht möglich ist. Im Gegenteil würde durch einen größeren oder kleineren Phasenwinkel α_2 die Belastung des Schalters SHA gleich bleiben oder sogar zunehmen und ferner ein weiterer Schalter der Phase W oder der Phase V zusätzlich belastet werden. Entsprechende Verläufe der Linie gleichen Drehmoments ergeben sich für Phasenwinkel entsprechend der Achsen der Phasen U, V, W, also für die Winkel 0 Grad, 60 Grad, 120 Grad, 180 Grad, 240 Grad, 300 Grad usw. Für diese Phasenwinkel α_1 ist eine Ansteuerung mittels eines abweichenden Phasenwinkels α_2 nicht sinnvoll. Besonders sinnvoll ist eine Ansteuerung mittels des abweichenden Phasenwinkels α_2 für Phasenwinkel α_1 im Bereich von 30 Grad, 90 Grad, 150 Grad, usw.

Um den regelungstechnischen Aufwand zu reduzieren, können für bestimmte Sollphasenwinkel α_1 Daten der Stromraumzeiger I_2^* in einem Kennfeld abgelegt werden. In dem Kennfeld kann auch berücksichtigt werden, dass für bestimmte Frequenzen des Stromsollraumzeigers I_1^* die Phasenwinkel des Stromraumzeigers I_1^* und die Phasenwinkel des Spannungsraumzeigers V_1^* voneinander abweichen können.

In Fig. 9 ist die Phasenwinkelabweichung δ_{β} des Stromraumzeigers I_2^* von dem Sollstromraumzeiger I_1^* in Abhängigkeit des Sollphasenwinkels α_1 schematisch dargestellt.

In Abhängigkeit des Sollphasenwinkels α_1 wird die Abweichung δ_{β} unterschiedlich eingestellt und schwankt zwischen -15° und $+15^\circ$. Wie oben bereits erwähnt, ist ein von dem Sollphasenwinkel α_1 abweichender Phasenwinkel α_2 für bestimmte Sollphasenwinkel α_1 nicht sinnvoll, da hier keine Entlastung eines Schalters S bzw. einer Freilaufdiode D erzielt wird, jedoch eine Mehrbelastung eines anderen Schalters S bzw. einer anderen Freilaufdiode bewirkt wird. Aus diesem Grunde ist die Abweichung δ_{β} für diese Sollphasenwinkel α_1 gemäß Fig. 9 gleich 0, wohingegen für andere Sollphasenwinkel α_1 , wie z.B. -150° , -90° , -60° , $+60^\circ$, $+90^\circ$, $+150^\circ$ einer Abweichung δ_{β} sinnvoll ist, um den am stärksten belasteten steuerbaren Schalter S zu entlasten. Aus diesem Grund entsteht ein Zickzack-Verlauf der Abweichung δ_{β} in Abhängigkeit des Sollphasenwinkels α_1 , wie es in Fig. 9 dargestellt ist. Erfindungsgemäß wird die Abweichung δ_{β} beschränkt, wie es durch die gestrichelten Linien bei $+6^\circ$ und -6° angedeutet ist, die die

Abweichungsgrenzen δ_{β_max} , δ_{β_min} bilden. Sofern eine Abweichung δ_{β} für die entsprechenden Sollphasenwinkel α_1 größer als die so definierte Abweichungsgrenze δ_{β_max} , δ_{β_min} möglich wäre, wird die Abweichung δ_{β} entsprechend der Abweichungsgrenze δ_{β_max} ,
5 δ_{β_min} eingestellt. Dadurch kann die Gesamtbelastung des Wechselrichters 10 und die Verlustleistung des Wechselrichters 10 und der elektrischen Maschine 14 reduziert werden bzw. der Wirkungsgrad des Wechselrichters 10 und der elektrischen Maschine 14 erhöht werden.

10 In Fig. 10 ist die maximale Abweichung δ_{β_max} in Abhängigkeit einer Rotationsfrequenz f des Sollstromraumzeigers I_1^* schematisch dargestellt. Dabei ist die maximale Abweichung δ_{β_max} für geringe Frequenzen, die kleiner sind als eine erste vordefinierte Rotationsfrequenz f_1 , konstant. Sofern die Rotationsfrequenz f des Sollstromraumzeigers I_1^* die erste vordefinierte Rotationsfrequenz f_1 überschreitet, wird
15 die maximale Abweichung δ_{β_max} in Abhängigkeit bzw. mit zunehmender Rotationsfrequenz f reduziert. Bei einer zweiten vordefinierten Rotationsfrequenz f_2 des Sollstromraumzeigers I_1^* wird die maximale Abweichung δ_{β} auf nahezu 0 reduziert. Ab der zweiten vordefinierten Rotationsfrequenz f_2 ist die Rotationsfrequenz f so hoch, dass die steuerbaren Schalter S über einen so kurzen Zeitraum belastet werden,
20 dass die thermische Belastung der Schalter S des Wechselrichters 10 gleich verteilt ist und eine Abweichung δ_{β} des Phasenwinkels α_2 von dem Sollphasenwinkel α_1 keine Entlastung eines der Schalter S bewirken würde, sondern die Gesamtbelastung des Wechselrichters 10 erhöhen würde. Daher wird für Rotationsfrequenzen f größer als die zweite vordefinierte Rotationsfrequenz f_2 auf 0
25 eingestellt. Zwischen der ersten vordefinierten Rotationsfrequenz f_1 und der zweiten vordefinierten Rotationsfrequenz f_2 wird die maximale Abweichung δ_{β} linear in Abhängigkeit der Rotationsfrequenz f reduziert. Dadurch ist ein regelungstechnisch einfacher Übergang zwischen der Ansteuerung mit abweichendem Phasenwinkel und ohne abweichendem Phasenwinkel, also zwischen dem Frequenzbereich für f kleiner als
30 f_1 und dem Frequenzbereich für f größer als f_2 möglich. Ferner können dadurch bei zunehmender Rotationsfrequenz f dynamische Effekte reduziert werden, die durch ein abruptes Umschalten zwischen der Ansteuerung mit Abweichung δ_{β} und ohne Abweichung δ_{β} vermieden werden.

Es versteht sich, dass die maximale Abweichung δ_{β_max} , die in Fig. 10 dargestellt ist als Betrag anzusehen ist und sowohl für die obere Grenze δ_{β_max} als auch für die untere Grenze δ_{β_min} gilt.

- 5 Das vorliegende Verfahren wird vorzugsweise zum Ansteuern von elektrischen Maschinen verwendet, wobei die maximal mögliche Abweichung δ_{β_max} abhängig ist von dem Typ der elektrischen Maschine. Die maximale Abweichung kann bis zu 30° betragen.

Ansprüche

- 5 1. Verfahren zum Ansteuern eines Wechselrichters (10) mittels Raumzeigermodulation, insbesondere zum Ansteuern einer elektrischen Maschine (14), wobei der Wechselrichter (10) eine Mehrzahl von steuerbaren Schaltern (S) aufweist und der dazu ausgebildet ist, einen mehrphasigen elektrischen Strom (IU, IV, IV) bereitzustellen, insbesondere um die elektrische Maschine (14) mehrphasig mit elektrischem Strom (IU, IV, IV) zu versorgen,
- 10 wobei ein Sollstromraumzeiger (I1*) mit einem Sollphasenwinkel (α_1) und einer Sollamplitude (I1) vorgegeben wird, wobei der Wechselrichter (10) derart angesteuert wird, dass eine Mehrzahl von unterschiedlichen aufeinanderfolgenden Schaltzuständen (V1-V7) der Schalter (S) eingerichtet wird, um den elektrischen Strom (IU, IV, IV) in Form eines Stromraumzeigers (I2*) bereitzustellen,
- 15 dadurch gekennzeichnet, dass
- der Wechselrichter (10) derart angesteuert wird, dass der Stromraumzeiger (I2*) mit einem Phasenwinkel (α_2) bereitgestellt wird, der sich von dem Sollphasenwinkel (α_1) unterscheidet und wobei eine Abweichung (δ_{β}) des Phasenwinkels (α_2) von dem Sollphasenwinkel (α_1) in Abhängigkeit einer Rotationsgeschwindigkeit (f) des Sollstromraumzeigers (I1*) begrenzt wird.
- 20
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Abweichung (δ_{β}) mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit (f) reduziert wird.
- 25
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Abweichung (δ_{β}) in Abhängigkeit von dem Sollphasenwinkel (α_1) des Stromraumzeigers (I1*) eingestellt wird.
- 30
4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die Abweichung ($\Delta\beta$) innerhalb eines Abweichungsbereiches (δ_{β_max} , δ_{β_min}) variiert wird und wobei der Abweichungsbereich (δ_{β_max} , δ_{β_min}) mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit (f) des Sollstromraumzeigers (I1*) reduziert wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei unterhalb einer vordefinierten Rotationsgeschwindigkeit (f_1) der Phasenwinkel (α_2) in Abhängigkeit eines vordefinierten Belastungssollwerts (m) der Schalter (S) eingestellt wird.

5 6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei der Phasenwinkel (α_2) und eine Amplitude (I_2) des Stromraumzeigers (I_2^*) derart eingestellt werden, dass eine Leistungsabgabe identisch ist mit einer Leistungsabgabe entsprechend dem Sollphasenwinkel (α_1) und der Sollamplitude (I_1) des Sollstromraumzeigers (I_1^*).

10 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die maximale Abweichung (Δ_{β_max}) des Stromraumzeigers (I_2^*) von dem Sollstromraumzeiger (I_1^*) 30° Grad beträgt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 7, wobei der Abweichungsbereich
15 (Δ_{β_max} , Δ_{β_min}) zwischen einer ersten vordefinierten Rotationsgeschwindigkeit (f_1) und einer zweiten vordefinierten Rotationsgeschwindigkeit (f_2) des Sollstromraumzeigers (I_1^*) linear reduziert wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei mittels des Wechselrichters (10)
20 eine elektrische Maschine (14) angesteuert wird und der Sollstromzeiger (I_1^*) in Abhängigkeit des Rotorwinkels der elektrischen Maschine (14) bestimmt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei der Phasenwinkel (α_2) und die Amplitude (I_2)
25 des Stromraumzeigers (I_2^*) unterhalb einer vordefinierten Rotationsgeschwindigkeit (f_1) derart bestimmt werden, dass ein von der elektrischen Maschine (14) angegebenes Drehmoment (M) identisch ist mit dem Drehmoment (M), das mittels des Sollstromraumzeigers (I_1^*) abgegeben wird.

11. Vorrichtung (18) zum Ansteuern eines Wechselrichters (10), insbesondere zum
30 Ansteuern einer elektrischen Maschine (14), wobei der Wechselrichter (10) eine Mehrzahl von steuerbaren Schaltern (S) aufweist, die dazu angeschlossen sind, einen mehrphasigen elektrischen Strom (IU, IV, IW) in Abhängigkeit eines Sollstromraumzeigers (I_1^*) mit einem Sollphasenwinkel (α_1) und einer Sollamplitude (I_1) bereitzustellen, insbesondere um die elektrische Maschine (14) mehrphasig zu bestromen, mit einem
35 Steuergerät (18), das dazu ausgebildet ist, den Wechselrichter (10) derart anzusteuern, dass der Wechselrichter (10) eine Mehrzahl von aufeinanderfolgenden unterschiedlichen

Schaltzuständen (V1-V7) der Schalter (S) annimmt, um den elektrischen Strom (IU, IV, IW) in Form eines Stromraumzeigers (I2*) bereitzustellen,

dadurch gekennzeichnet, dass

- 5
das Steuergerät (18) dazu ausgebildet ist, den Wechselrichter (10) derart anzusteuern, dass der Stromraumzeiger (I2*) mit einem Phasenwinkel (α_2) bereitgestellt wird, der sich von dem Sollphasenwinkel (α_1) unterscheidet, und eine Abweichung (δ_{β}) des Phasenwinkels (α_2) von dem Sollphasenwinkel (α_1) in Abhängigkeit einer
- 10 Rotationsgeschwindigkeit (f) des Sollstromraumzeigers (I1*) begrenzt wird.
12. Kraftfahrzeugantriebsstrang mit wenigstens einer elektrischen Maschine (14) zum Bereitstellen von Antriebsleistung, einem Wechselrichter (10) zum Ansteuern der elektrischen Maschine (14) und mit einer Vorrichtung (18) zum Ansteuern des
- 15 Wechselrichters (10) nach Anspruch 11.

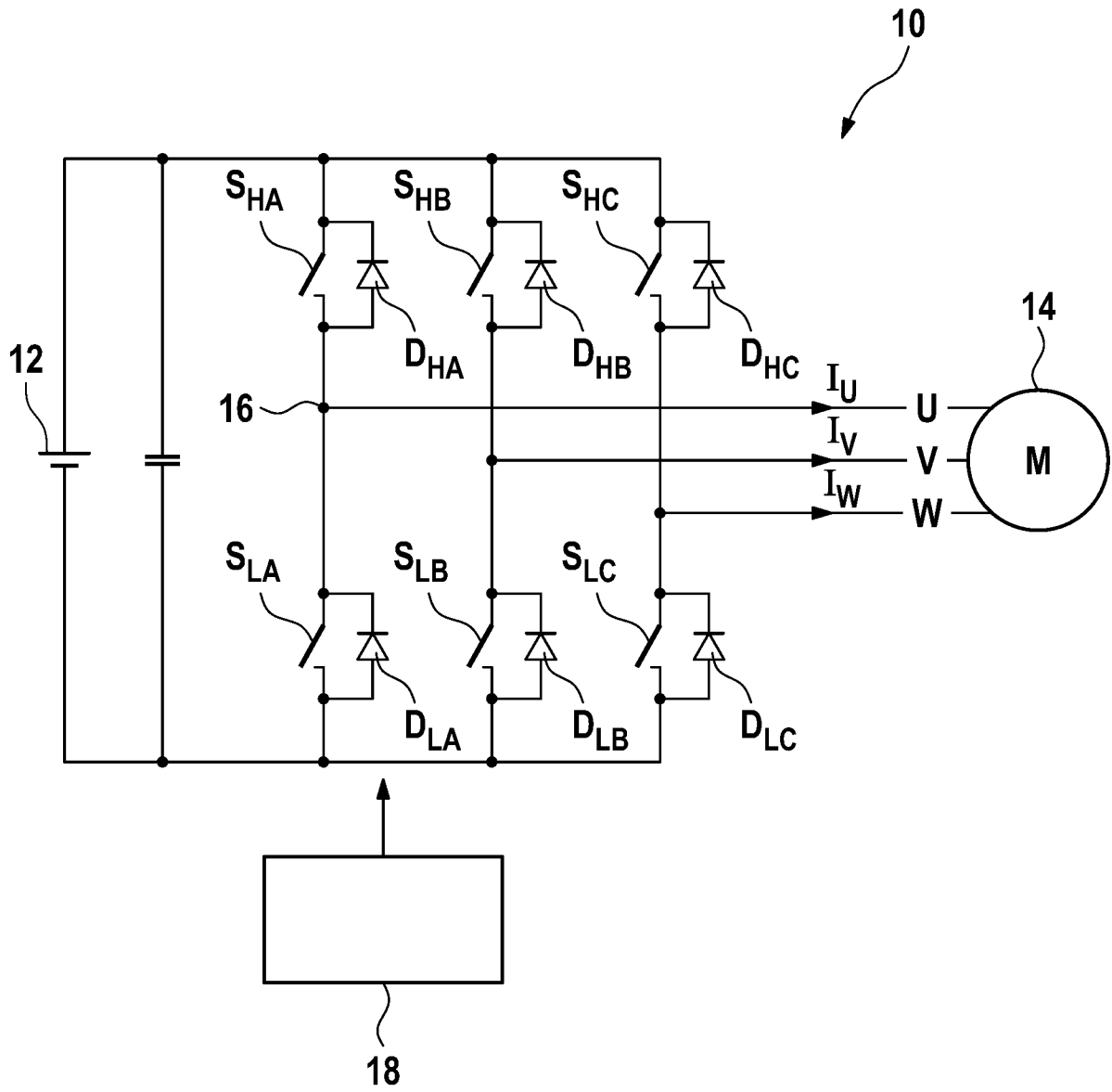


FIG. 1

2 / 7

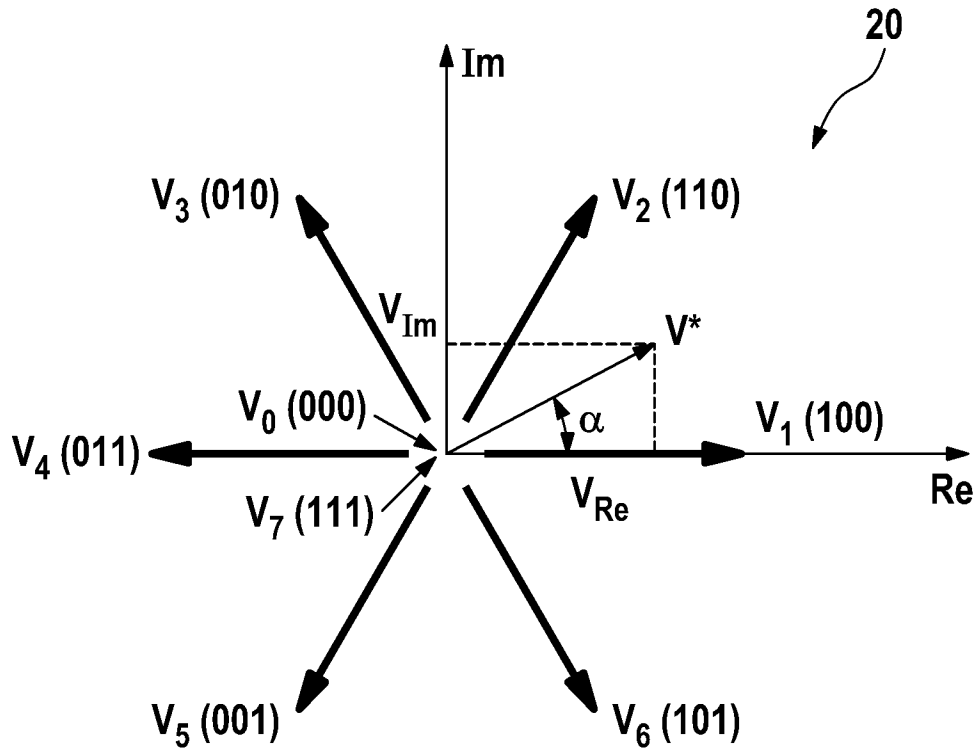


FIG. 2

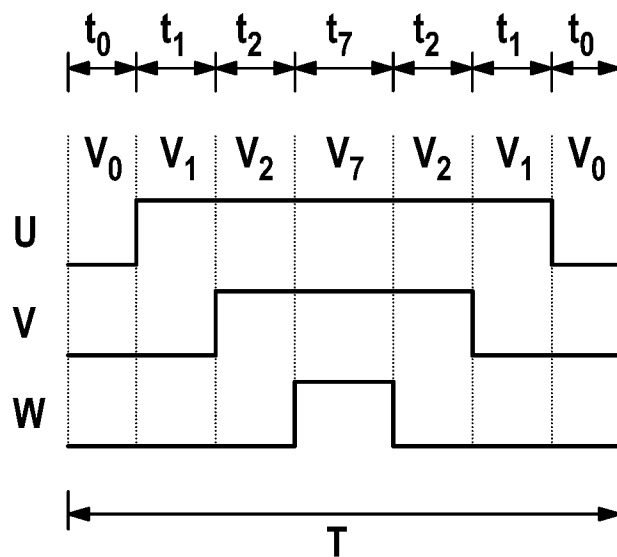


FIG. 3

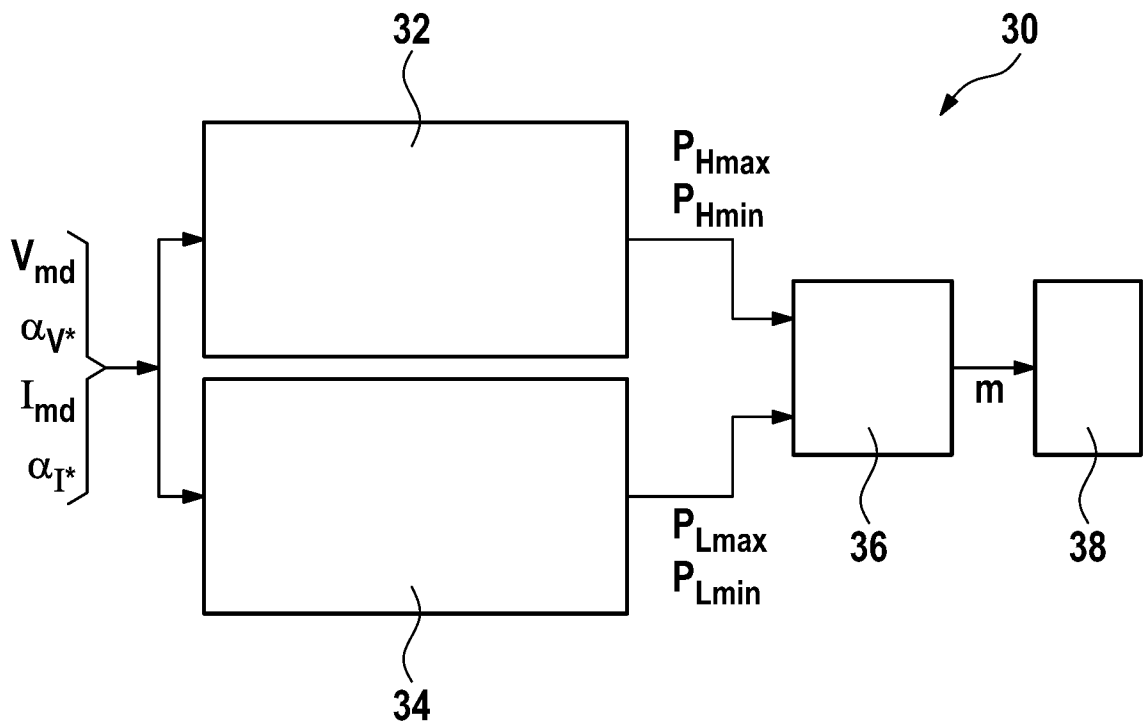


FIG. 4

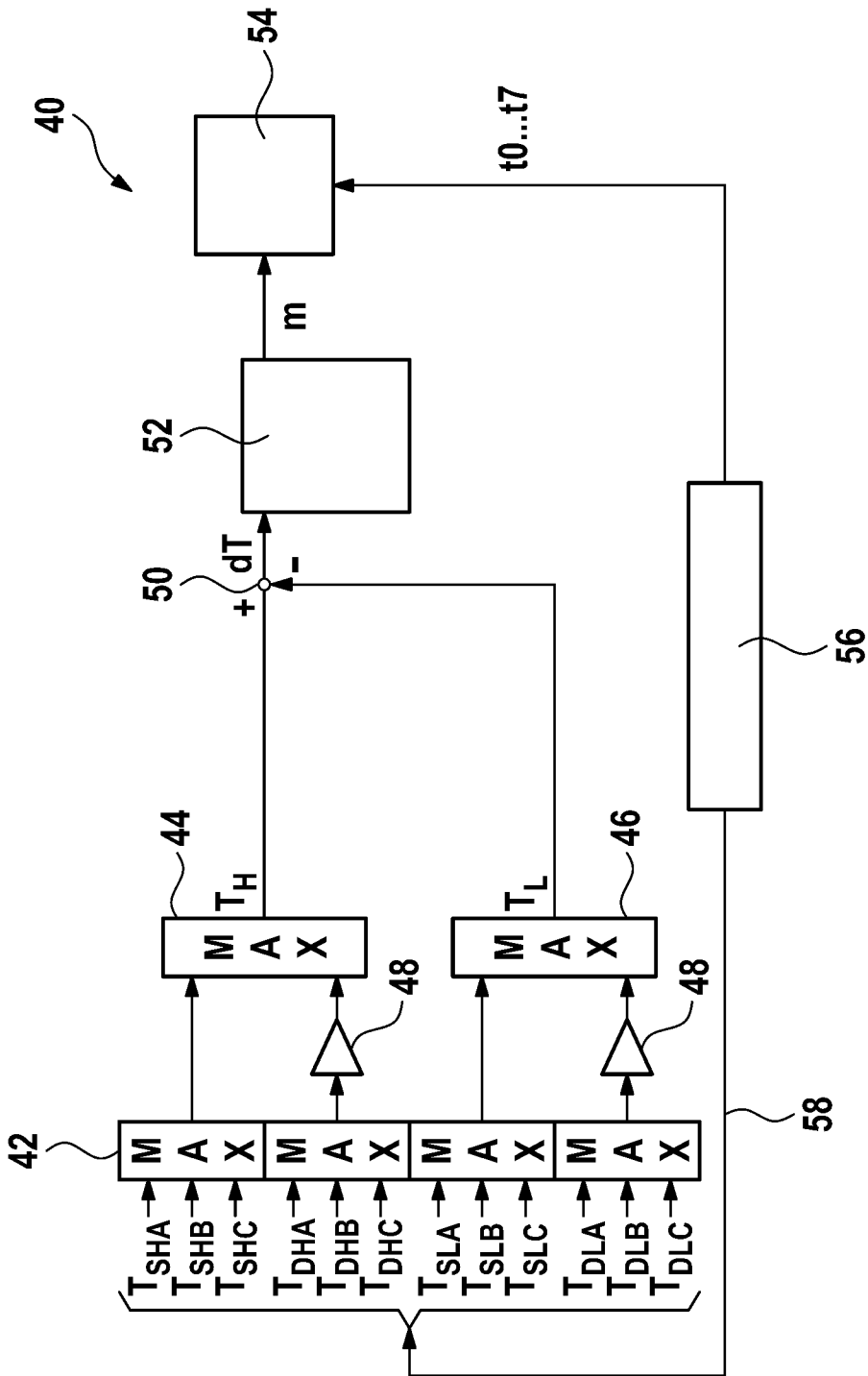
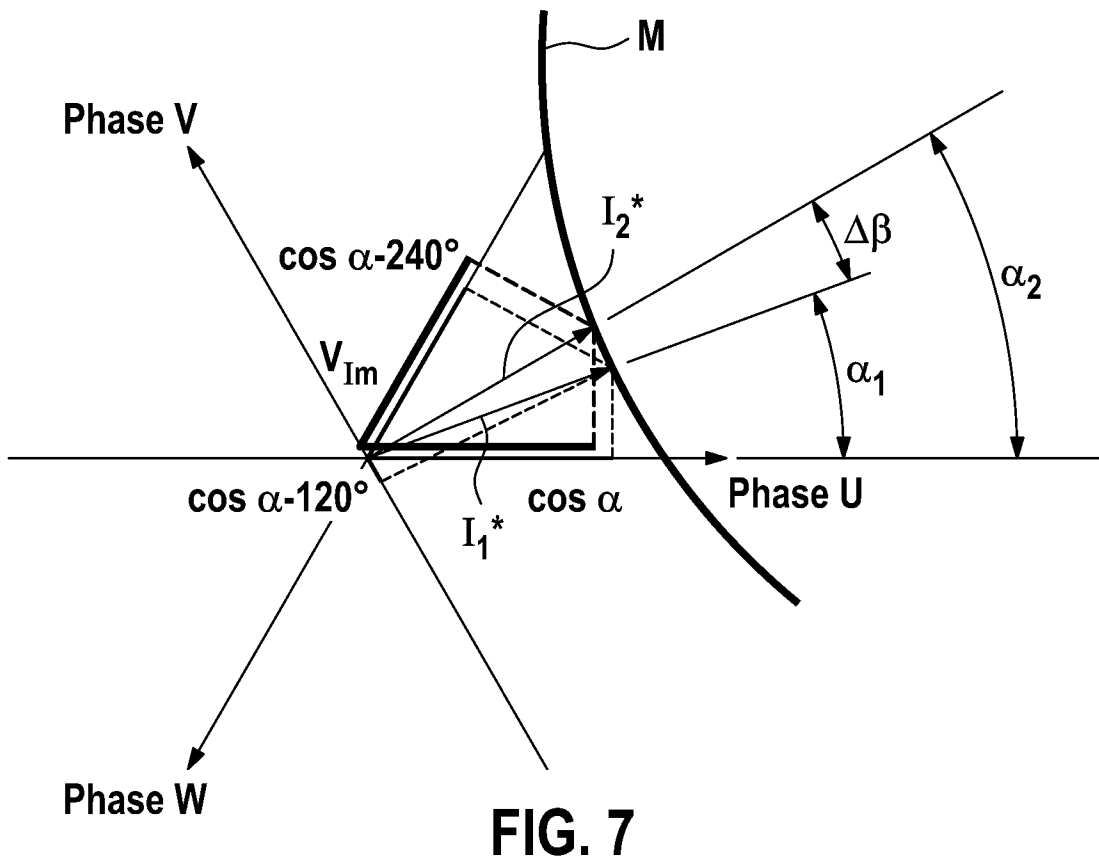
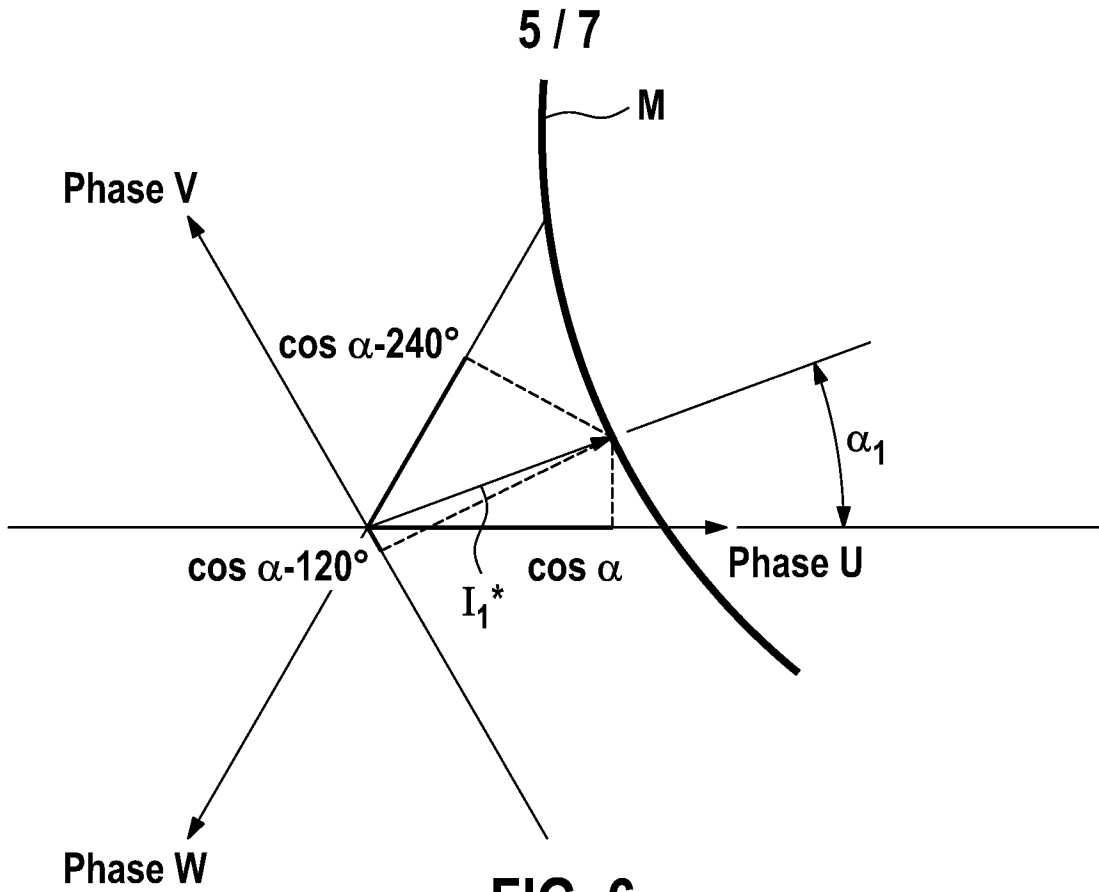


FIG. 5



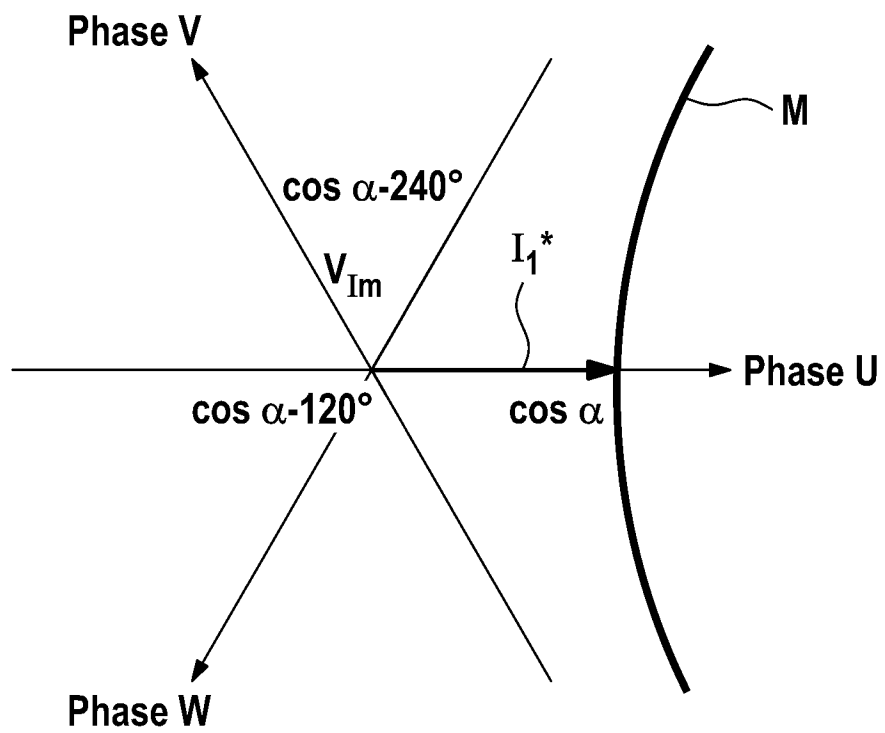


FIG. 8

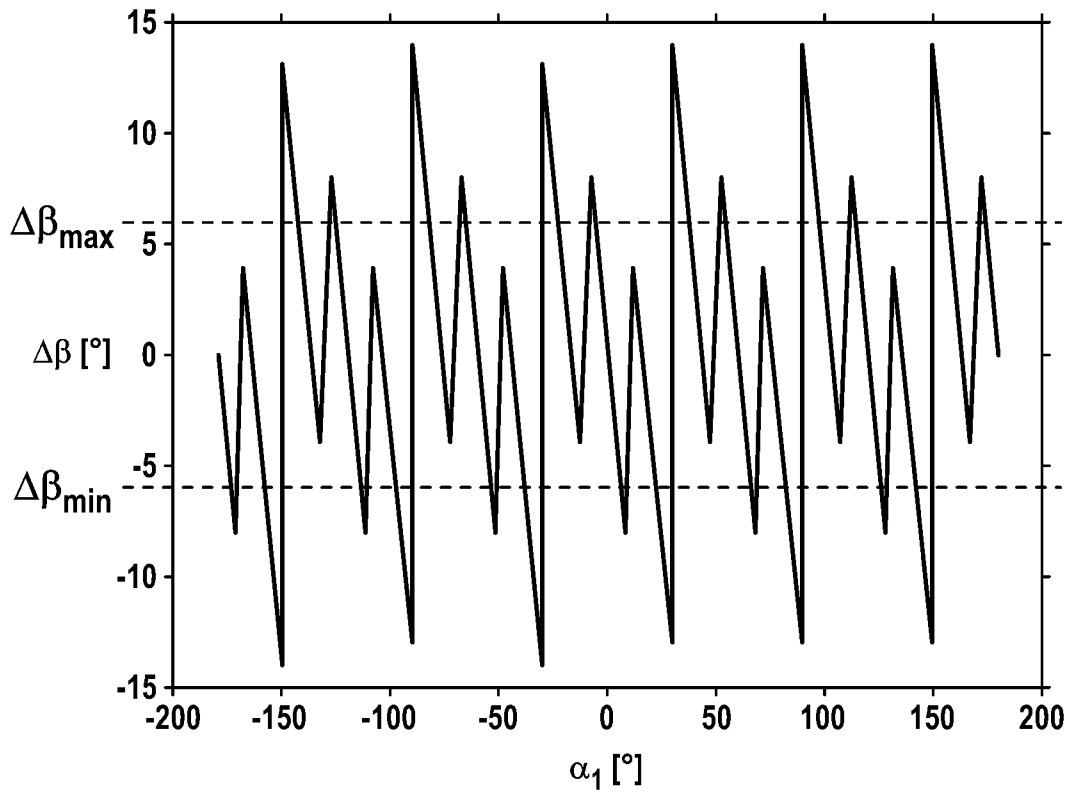


FIG. 9

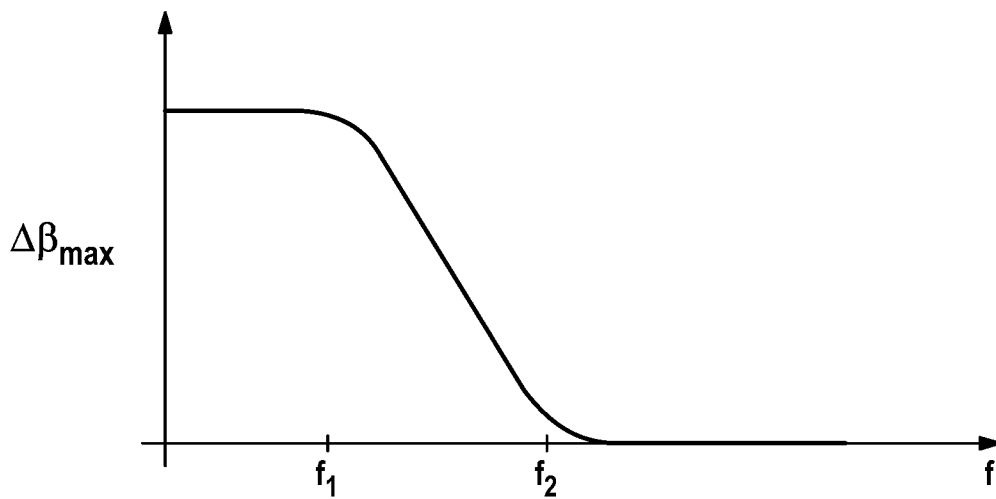


FIG. 10