

(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
5. Oktober 2017 (05.10.2017)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2017/167493 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation:
H02P 21/22 (2016.01) *H02P 27/08* (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/053231
- (22) Internationales Anmeldedatum:
14. Februar 2017 (14.02.2017)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2016 205 300.0 31. März 2016 (31.03.2016) DE
- (71) Anmelder: **WAGO VERWALTUNGSGESELLSCHAFT MBH** [DE/DE];
Hansastr. 27, 32423 Minden (DE).
- (72) Erfinder: **BARINBERG, Viktor**; Dr.-Carlo-Schmid-Str.
42, 90491 Nürnberg (DE). **HANSEN, Dirk**; Unterm Berge
163, 32429 Minden (DE). **HELLER, Ulrich**; Föhrenstr. 1,
90552 Röthenbach a.d.Pegnitz (DE).
- (74) Anwalt: **HESS, Peter K.**; Bardehle Pagenberg
Partnerschaft mbB Patentanwälte, Rechtsanwälte,
Prinzregentenplatz 7, 81675 München (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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, 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, SA, 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, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: CURRENT CONTROL OF A PULSE-WIDTH MODULATED CONVERTER

(54) Bezeichnung : STROMREGELUNG EINES PULSWEITENMODULIERTEN STROMRICHTERS

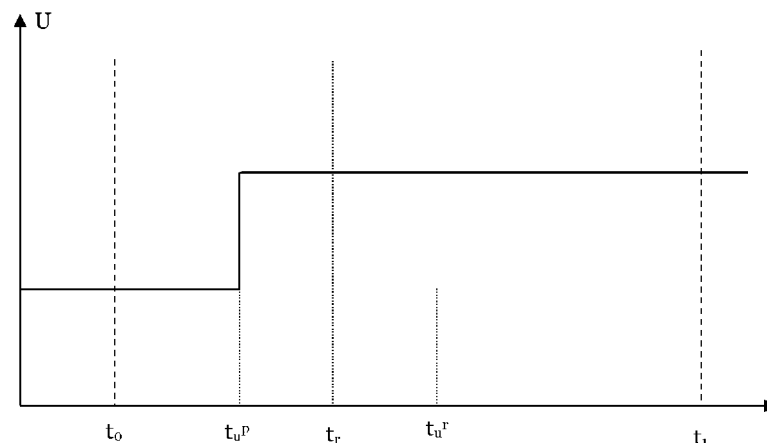


Fig.6

(57) **Abstract:** The invention relates to a method for the current control of a pulse-width-modulated converter for an electric machine, particularly a pulse-width-modulated inverter connected to the electric machine. The machine and the inverter have a plurality of phases, and the current control is carried out by means of a control loop comprising a modulator for calculating switching times for a pulse generator for producing a pulse-width-modulated control voltage for each phase. The invention also relates to a corresponding device for current control of an inverter connected to an electric machine.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2017/167493 A1

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Stromregelung eines pulsweitenmodulierten Stromrichters für eine elektrische Maschine, insbesondere eines an die elektrische Maschine angeschlossenen pulsweitmodulierten Wechselrichters. Die Maschine und der Wechselrichter weisen dabei mehrere Phasen auf, und die Stromregelung erfolgt durch einen Regelkreis, welcher einen Modulator zur Berechnung von Schaltzeitpunkten für einen Impulsgenerator zur Erzeugung einer pulsweitenmodulierten Steuerspannung für jede Phase umfasst. Ferner betrifft die vorliegende Erfindung eine entsprechende Einrichtung zur Stromregelung eines an eine elektrische Maschine angeschlossenen Wechselrichters.

Stromregelung eines pulsweitenmodulierten Stromrichters

1. Technischer Bereich

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Stromregelung eines
pulsweitenmodulierten Stromrichters einer elektrischen Maschine, insbesondere
5 eines pulsweitmodulierten Wechselrichters welcher an eine elektrische Maschine
angeschlossen ist..

2. Technischer Hintergrund

Moderne Stromrichter (engl.: power converter) auf Basis von Halbleitern werden
üblicherweise mittels Pulsweitenmodulation (PWM) angesteuert. Ein
10 entsprechendes Steuergerät erzeugt hierbei ein Pulsmuster mit modulierter
Breite, um die Umwandlung einer eingespeisten elektrischen Stromart
(Gleichstrom, Wechselstrom) in die jeweils andere, oder zur Änderung
charakteristischer Parameter wie der Spannung und der Frequenz, anzusteuern.
Eine der häufigsten Anwendungen der Stromrichter ist die Regelung von
15 drehzahlveränderlichen Elektromotoren, beispielsweise
permanentmagneterregten Synchronmotoren. Die PWM-Frequenz kann einen
konstanten Wert annehmen (beispielsweise 20 kHz) oder auch im Betrieb
verstellbar sein.

So wird, beispielsweise bei einem 3-Phasen-Motor, durch gezieltes Umschalten
20 jeder Phase u, v, w mittels einer PWM-Ansteuerung aus der Gleichspannung im
Zwischenkreis eine Wechselspannung erzeugt, die den Motor antreibt. Der PWM-
Ansteuerung wird ein gemessener Strom als Ist-Größe (Ist-Strom) zur Regelung
der Pulsbreite zur Verfügung gestellt, sodass die PWM-Ansteuerung die
Schaltzeitpunkte bzw. die Pulsmuster jeder Phase verändern kann und dadurch
25 den Betrag, die Frequenz und den Phasenwinkel der angelegten Spannung regeln
bzw. nachregeln kann.

Der Ist-Strom kann dabei zu diskreten Abtastzeitpunkten gemessen werden und daraus können PWM-Signale, also die ermittelten Umschalt- bzw. Schaltzeitpunkte der Phasen, ermittelt werden. Diese werden um ein, durch zwei aufeinanderfolgende Abtastzeitpunkte definiertes Abtastintervall verzögert
5 ausgegeben, übernommen bzw. verwendet.

Aus der DE 100 38 570 A1 ist ein Verfahren zur Regelung des Statorstroms einer elektrischen Maschine bekannt. Hierbei werden Ströme zu diskreten Zeitpunkten abgetastet, und in einen entsprechenden Regelausgangswert umgesetzt, der einen PWM-Zeitschritt verzögert verwendet wird. Dabei wird vorgeschlagen, einen
10 prädiktiven Stromistwert zur Regelung des Statorstroms zu verwenden. Dies ermöglicht es, die Verzögerung zu kompensieren und die Bandbreite des Regelkreises zu erhöhen. Eine solche Prädiktion ist jedoch mit Nachteilen verbunden, insbesondere aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Änderungen von Motor-Parametern, wodurch letztendlich die Genauigkeit und Stabilität der
15 Regelung beeinträchtigt wird.

Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung eine effiziente und präzise Regelung eines Stromes zu ermöglichen. Insbesondere liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine Stromregelung beispielsweise einer an einen Wechselrichter angeschlossenen elektrischen Maschine mit hoher zeitlicher
20 Dynamik bereitzustellen.

Diese und weitere Aufgaben, die aus der folgenden Beschreibung ersichtlich werden, werden durch das Verfahren gemäß Anspruch 1 und durch die Einrichtung gemäß Anspruch 11 gelöst.

3. Inhalt der Erfindung

25 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Stromregelung eines Stromrichters, welcher insbesondere ein pulsweitenmodulierter Stromrichter für eine elektrische Maschine ist. Ferner insbesondere eignet sich das Verfahren zur Stromregelung eines pulsweitenmodulierten Wechselrichters für eine elektrische Maschine. Generell kann mittels dieses Verfahrens jeder pulsweitenmodulierte

Stromrichter geregelt werden, der eine oder mehrere Phasen aufweist und heute vorzugsweise mit MOSFET oder IGBT realisiert ist. Die elektrische Maschine kann dabei generell ein beliebiger elektro-magnetischer Energiewandler sein, und beispielsweise als elektrischer Antrieb, Motor, Generator, Transformator oder

5 Netzwechselrichter ausgebildet sein. Vorzugsweise weist auch die elektrische Maschine mehrere Phasen auf. Beispielsweise kann mit dem Verfahren eine 3-Phasen-Maschine geregelt werden, die an einen solchen Wechselrichter angeschlossen ist. Beispielsweise eignet sich das Verfahren zur Stromregelung einer permanenterregten Synchronmaschine. Die Stromregelung erfolgt dabei

10 durch einen Regelkreis. Dieser Regelkreis umfasst dabei Mittel, wie vorzugsweise einen Modulator, zur Berechnung von Schaltzeitpunkten, vorzugsweise mit einem Impulsgenerator, zur Erzeugung einer pulswidenmodulierten Spannung oder Steuerspannung für jede Phase. Es kann somit ein PWM-Muster erzeugt werden, wobei insbesondere geregelt wird, zu welchen Zeiten jede Phase auf positives

15 oder negatives Potenzial des Zwischenkreises geschaltet wird, wodurch die jeweilige Phase umschaltet. Die Regelung kann beispielsweise mit Mikrokontrollern erfolgen, die eine unabhängige Einheit zur Erzeugung eines pulswidenmodulierten Signals mit geringem Softwareaufwand haben können.

Das Verfahren zur Stromregelung umfasst ein Erfassen eines ersten Strom-

20 Istwertes der Maschine in einem ersten Intervall. Vorzugsweise erfolgt das Erfassen des Strom-Istwertes im Rahmen einer zeitdiskreten Regelung zu diskreten Abtastzeitpunkten. Vorzugsweise wird dabei zu Beginn des ersten Intervalls der Ist-Strom erfasst bzw. abgetastet. Weiter vorzugsweise erfolgt das Erfassen des Strom-Istwertes zu Beginn jedes Intervalls. Das Definieren von

25 diskreten Abtastzeitpunkten kann dabei derart erfolgen, dass die Abtastfrequenz mit der PWM-Frequenz übereinstimmt, oder in einer bestimmten Relation zu dieser steht (wie etwa eine halbe oder eine doppelte PWM-Frequenz). Vorzugsweise erfolgt das Erfassen des Strom-Istwertes zu den Zeitpunkten innerhalb des PWM-Intervalls, zu denen in keiner Phase Umschaltvorgänge

30 laufen, sodass das Erfassen des Strom-Istwertes möglichst störungsfrei erfolgen kann. Das Erfassen erfolgt somit vorzugsweise zu einem Zeitpunkt, zu denen keine Phase in einem PWM-Intervall umgeschaltet wurde. Dieser Zeitpunkt kann somit sehr früh in einem PWM-Intervall liegen. Das erste Intervall wiederum

kann ein Abtastintervall sein, welches durch zwei aufeinanderfolgende Abtastzeitpunkte definiert ist. Zu einem Abtastzeitpunkt kann ein Strom-Istwert der Maschine erfasst werden.

Weiter umfasst das Verfahren ein Berechnen eines prädiktiven ersten Satzes von
5 Schaltzeitpunkten für Signale zur Erzeugung der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase in einem dem ersten Intervall folgenden Intervall. Dieses Intervall wird im Folgenden als das momentane Intervall bezeichnet, welches aktuell vorliegen kann. Das Berechnen muss dabei nicht in diesem momentanen Intervall erfolgen, der resultierende Satz von Schaltzeitpunkten jedoch kann für
10 das momentane Intervall gelten. Während des Berechnens muss das momentane Intervall somit nicht aktuell sein, vielmehr ist vorzugsweise derweil das erste Intervall das aktuell laufende Intervall. Der Satz von Schaltzeitpunkten kann dabei diskrete Zeitpunkte zum Umschalten der einzelnen Phasen von positivem auf negatives Potenzial und/oder umgekehrt vorzugsweise während bzw. in dem
15 momentanen Intervall umfassen, oder Information, die eine solche Umschaltung jeder Phase betrifft. Mittels des ersten Satzes von Schaltzeitpunkten kann der Stromrichter bzw. die entsprechende Stromregleinheit jede Phase umschalten, und zwar zu definierten Zeitpunkten in dem momentanen Intervall. Das Berechnen erfolgt vorzugsweise während des ersten Intervalls. Das momentane
20 Intervall kann dabei das dem ersten Intervall unmittelbar folgende Intervall sein. Das Berechnen des prädiktiven ersten Satzes von Schaltzeitpunkten erfolgt dabei basierend zumindest auf dem erfassten ersten Strom-Istwert, einem prädiktiven Strom-Istwert und einem Strom-Sollwert. Der prädiktive Strom-Istwert wird dabei zumindest anhand des erfassten ersten Strom-Istwertes bestimmt. Das
25 Berechnen des prädiktiven ersten Satzes umfasst dabei vorzugsweise ein Vergleichen des erfassten ersten Strom-Istwertes mit dem Strom-Sollwert. Der Strom-Sollwert kann dabei einen Sollwert des Stromes für das erste Intervall oder für das momentane Intervall, welches dem ersten Intervall folgt, beschreiben. Durch einen solchen Ist-/Sollwert-Vergleich wird eine Regelabweichung
30 ermittelt, und entsprechend der erste Satz von Schaltzeitpunkten berechnet, welcher Umschaltzeiten der Phasen in dem momentanen Intervall definiert. Somit werden vorzugsweise in dem ersten Intervall Schaltzeitpunkte für das folgende bzw. momentane Intervall prognostiziert.

Gemäß des Verfahrens wird der berechnete prädiktive erste Satz von Schaltzeitpunkten in dem momentanen Intervall bereitgestellt. Dabei wurde der erste Satz von Schaltzeitpunkten der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase vor diesem momentanen Intervall berechnet. Der prädiktive erste Satz von Schaltzeitpunkten wird zunächst für das momentanen Intervall als gültig betrachtet, sodass vorzugsweise der Impulsgenerator des Modulators basierend auf diesem ersten Satz arbeitet. Der erste Satz kann jedoch durch einen anderen Satz von Schaltzeitpunkten verdrängt werden, sodass ggf. keiner der Schaltzeitpunkte des ersten Satzes in dem momentanen Intervall tatsächlich umgesetzt wird.

Das Verfahren weist weiter ein Erfassen eines momentanen Strom-Istwertes der Maschine in dem momentanen Intervall auf, das vorzugsweise zu Beginn dieses Intervalls erfolgt. Das Erfassen des momentanen Strom-Istwertes kann dabei analog zu dem oben beschriebenen Erfassen des ersten Strom-Istwertes erfolgen.

Weiter umfasst das Verfahren ein Berechnen eines zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten für Signale zur Erzeugung der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase in dem momentanen Intervall. Das Berechnen des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten erfolgt dabei basierend zumindest auf dem erfassten momentanen Strom-Istwert und dem Strom-Sollwert. Das Berechnen erfolgt vorzugsweise während des momentanen Intervalls, welches zeitlich dem ersten Intervall folgt. Es wird somit ein zweiter Satz von Schaltzeitpunkten berechnet, welcher im Gegensatz zu dem prädiktiven ersten Satz von Schaltzeitpunkten direkt aktuell für das momentane Intervall berechnet wird, basierend auf dem erfassten momentanen Strom-Istwert, welcher für das momentane Intervall gültig ist. Wie der prädiktive erste Satz von Schaltzeitpunkten betrifft auch der zweite Satz von Schaltzeitpunkten die Schaltzeiten für jede Phase in dem momentanen Intervall, sodass mittels des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten der Stromrichter bzw. die Stromregleinheit jede Phase umschalten kann, und zwar zu definierten Zeitpunkten in dem momentanen Intervall. Das Berechnen des zweiten Satzes umfasst dabei vorzugsweise ein Vergleichen des erfassten momentanen Strom-Istwertes mit dem Strom-Sollwert. Der Strom-Sollwert kann dabei, wie

beschrieben, einen Sollwert des Stromes für das momentane Intervall beschreiben. Durch einen solchen Ist-/Sollwert-Vergleich wird eine Regelabweichung ermittelt, und entsprechend der zweite Satz von Schaltzeitpunkten berechnet, welcher, verglichen mit der Vorhersage bzw.

- 5 Prädiktion, welche beispielsweise während des Berechnens des prädiktiven ersten Satzes in dem vorangegangenen bzw. ersten Intervall erfolgte, genauere Umschaltzeiten der Phasen für bzw. in dem momentanen Intervall definiert.

- Weiter umfasst das Verfahren ein Bestimmen, ob zu einem Berechnungszeitpunkt, zu welchem die Berechnung des zweiten Satzes von
- 10 Schaltzeitpunkten abgeschlossen ist, keiner der Schaltzeitpunkte aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt. Es wird somit bestimmt, ob einer der Schaltzeitpunkte zeitlich vor dem Berechnungszeitpunkt und insbesondere in der Rechenzeit liegt. Der Berechnungszeitpunkt muss dabei nicht den exakten Zeitpunkt beschreiben, zu welchem die Berechnung des
- 15 zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten abgeschlossen ist. Der Berechnungszeitpunkt, zu welchem die Berechnung abgeschlossen ist, kann auch nach diesem Abschluss der Berechnung liegen. Es kann somit festgestellt werden, ob eine Übernahme von den neugerechneten Schaltzeiten des zweiten Satzes noch möglich ist. Hierzu kann überprüft werden, ob 1) keine der Phasen,
- 20 basierend auf dem ersten bzw. „prädiktiven“ Satz von Schaltzeitpunkten, der im vorherigen bzw. ersten Intervall berechnet wurden, bereits geschaltet hat; und 2) keiner der neugerechneten Schaltzeitpunkte des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten bereits in der Vergangenheit liegt. Diese Überprüfung erfolgt beispielweise durch einen Vergleich der Flankenpositionen bzw. der
- 25 Schaltzeitpunkten der Phasen mit einer vorbestimmten Rechenzeit (z.B. mit einem prädiktiven Berechnungszeitpunkt) oder einem momentanen Zeitpunkt zu welchem die Berechnung abgeschlossen ist.

- Wenn bestimmt wird, dass zu dem Berechnungszeitpunkt in dem momentanen Intervall keiner der Schaltzeitpunkte aus dem ersten und zweiten Satz von
- 30 Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt, erfolgt ein Verwenden des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten für Signale zur Erzeugung der pulswertenmodulierten Spannung jeder Phase in dem momentanen Intervall.

Wenn also die obigen Bedingungen zutreffen, eine Übernahme von den neugerechneten Schaltzeiten des zweiten Satzes noch möglich ist, kann erfolgt eine Übernahme des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten erfolgen, vorzugsweise durch den Impulsgenerator des Modulators. Die verwendeten Umschaltzeiten bzw. Pulsmuster jeder Phase in dem momentanen Intervall basieren nun nicht auf dem prädiktiven ersten Satz von Schaltzeitpunkten, sondern auf dem präzise berechneten zweiten Satz von Schaltzeitpunkten. Da der zweite Satz von Schaltzeitpunkten basierend auf dem in dem momentanen Intervall erfassten Strom-Istwert berechnet wurde, sind die entsprechenden Regelwerte sehr genau. Da sie in demselben Intervall verwendet werden, ist die Verzögerung zwischen der Istwerterfassung und der Reglerausgabe minimiert. Dadurch ist die Stromregelung sehr dynamisch. Der Fachmann versteht, dass falls zum Berechnungszeitpunkt eine der Phasen bereits geschaltet hat, und zwar basierend auf dem bereits geltenden ersten Satzes von Schaltzeitpunkten, oder zumindest ein neugerechneter Schaltzeitpunkt des zweiten Satzes bereits relativ zu dem Berechnungszeitpunkt in der Vergangenheit liegt, der zweite Satz nicht verwendet werden kann. Vielmehr wird in diesem Fall der erste prädiktive Satz von Schaltzeitpunkten weiter verwendet. Es ist jedoch gemäß der vorliegenden Erfindung angestrebt, den zweiten Satz von Schaltzeitpunkten zu verwenden, sobald erfindungsgemäß bestimmt wurde, dass dies möglich ist und zu keiner Inkonsistenz bzw. Störung der angestrebten Ausgabespannungen in den Phasen führt.

Wenn bestimmt wird, dass zu dem Berechnungszeitpunkt in dem momentanen Intervall zumindest einer der Schaltzeitpunkte aus dem ersten oder zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt, erfolgt ein Verwenden (bzw. fortgesetztes Verwenden) des ersten Satzes von Schaltzeitpunkten für Signale zur Erzeugung der pulswertenmodulierten Spannung jeder Phase in dem momentanen Intervall. Wenn also die obigen Bedingungen für die Anwendung des zweiten Satzes von Schaltzeiten nicht zutreffen, erfolgt ein Verwenden des bereits geltenden ersten Satzes von Schaltzeitpunkten, vorzugsweise durch den Impulsgenerator des Modulators.

In dem momentanen Intervall erfolgt die Regelung der Phasenspannungen somit entweder basierend auf dem prädiktiven ersten Satz von Schaltzeitpunkten, oder basierend auf dem zweiten Satz von Schaltzeitpunkten. Der zweite Satz von Schaltzeitpunkten wird nur dann verwendet bzw. übernommen, wenn die obigen
5 Bedingungen zutreffen. Dadurch wird verhindert, dass beispielsweise der Aussteuerungsgrad einer der drei Phasen vom prädiktiven ersten Satz von Schaltzeitpunkten bestimmt ist und die Aussteuerungsgrade von zwei anderen Phasen aus dem zweiten Satz von Schaltzeitpunkten übernommen wird. Dies würde zu einem inkonsistenten dreiphasigen Spannungssystem führen, was
10 durch das erfindungsgemäße Verfahren vorteilhaft vermieden wird.

Vorzugsweise erfolgt während des momentanen Intervalls ferner ein Berechnen eines prädiktiven dritten Satzes von Schaltzeitpunkten für Signale zur Erzeugung der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase in einem dem momentanen Intervall folgenden zukünftigen Intervall, welches vorzugsweise dem
15 momentanen Intervall unmittelbar folgt. Dieses Berechnen des prädiktiven dritten Satzes erfolgt dabei basierend zumindest auf dem erfassten momentanen Strom-Istwert, einem prädiktiven zukünftigen Strom-Istwert und einem Strom-Sollwert. Der prädiktive zukünftige Strom-Istwert wird dabei zumindest anhand des erfassten momentanen Strom-Istwertes bestimmt. Der Strom-Sollwert kann
20 dabei einen Sollwert des Stromes für das dem momentanen Intervall folgende zukünftige Intervall beschreiben. Als erste Näherung für einen solchen zukünftigen Strom-Sollwertes kann beispielsweise der Strom-Sollwert in dem momentanen Intervall genommen werden. Dieser Strom-Sollwert wird daher im Folgenden als zukünftiger Strom-Sollwert bezeichnet, muss jedoch nicht den
25 tatsächlich gültigen Strom-Sollwert des zukünftigen Intervalls wiedergeben.

Das Berechnen des prädiktiven dritten Satzes von Schaltzeitpunkten umfasst dabei vorzugsweise ein Vergleichen des prädiktiven zukünftigen Strom-Istwertes mit dem entsprechenden zukünftigen Strom-Sollwert. Der prädiktive zukünftige Strom-Istwert ist vorzugsweise auf das dem momentanen Intervall folgende
30 zukünftige Intervall bezogen, und beschreibt somit eine Schätzung eines Strom-Istwertes für das zukünftige Intervall. Durch Vergleichen des prädiktiven zukünftigen Strom-Istwertes mit dem zukünftigen Strom-Sollwert kann somit

ermittelt werden, wie die Regelung der pulsweitenmodulierten Spannung in dem zukünftigen Intervall erfolgen soll.

Dementsprechend umfasst das Verfahren vorzugsweise weiter ein Bereitstellen des prädiktiven dritten Satzes von Schaltzeitpunkten in dem zukünftigen Intervall. Somit wird sichergestellt, dass für das folgende zukünftige Intervall Umschaltzeitpunkte für die Phasen vorliegen, so dass eine effiziente Regelung der elektrischen Maschine möglich ist. Diese werden verwendet, wenn in dem zukünftigen Intervall entsprechend genau berechnete Werte nicht verwendet werden können, weil, wie oben beschrieben, eine Bedingung zur Verwendung bzw. Übernahme der genau berechneten Werte nicht erfüllt ist. Das Verfahren wird somit für das folgende Intervall wiederholt, wobei der bereitgestellte prädiktive dritte Satz von Schaltzeitpunkten nun als bereitgestellter erster Satz von Schaltzeitpunkten für das folgende Intervall dient bzw. gilt.

Das Verfahren zur Stromregelung bietet somit den Vorteil, dass die auf Prädiktion basierenden Regelwerte nur in einzelnen wenigen Fällen verwendet werden, beispielweise bei einem relativ hohen Aussteuerungsgrad, wenn eine der Flanken vor dem Berechnungszeitpunkt kommt bzw. bevor die Berechnung der neuen Schaltzeiten abgeschlossen ist. Die sonst unvermeidliche Verzögerung in einem Takt wird dadurch erheblich reduziert bzw. Inkonsistenzen in der Spannungsausgabe werden verhindert.

Vorzugsweise ist das erste und das momentane Intervall jeweils eine Periode oder eine halbe Periode der pulsweitenmodulierten Spannung bzw. der Trägerfrequenz der pulsweitenmodulierten Spannung. Der Regelkreis zeichnet sich somit durch eine hohe Dynamik aus, und die Bandbreite des Reglers, also die Regler-Geschwindigkeit wird erhöht.

Vorzugsweise erfolgt das Bestimmen, ob zu dem Berechnungszeitpunkt in dem momentanen Intervall keiner der Schaltzeitpunkte aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt, bzw. das Bestimmen, ob der in dem momentanen Intervall berechnete bzw. bestimmte zweite Satz von Schaltzeitpunkten zu übernehmen ist bzw. in dem momentanen Intervall

verwendet werden kann, nach und weiter vorzugsweise unmittelbar nach dem Berechnen des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten. Es wird somit bestimmt bzw. überprüft, nachdem der zweite Satz von Schaltzeitpunkten basierend auf dem erfassten momentanen Strom-Istwert in dem momentanen Intervall
5 berechnet wurde, ob beispielsweise eine der Phasen bereits basierend auf dem prädiktiven ersten Satz von Schaltzeitpunkten geschaltet hat oder beispielsweise einer von den neugerechneten Schaltzeitpunkten des zweiten Satzes in der Vergangenheit liegt. Somit wird vorzugsweise überprüft, ob die Verwendung des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten noch für alle Phasen in dem momentanen
10 Intervall im Anschluss an das Berechnen dieses Satzes möglich ist, ohne Inkonsistenzen der Spannungsausgabe hervorzurufen.

Vorzugsweise erfolgt das Bestimmen, ob zu dem Berechnungszeitpunkt in dem momentanen Intervall keiner der Schaltzeitpunkte aus dem ersten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt, bzw. ob bis zu dem
15 Berechnungszeitpunkt im momentanen Intervall eine der Phasen schaltet, vor und/oder während des Berechnens des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten. In dem Fall ist die Rechenzeit bzw. der Berechnungszeitpunkt vorzugsweise ein bereitgestellter prädiktiver Berechnungszeitpunkt in dem momentanen Intervall, der auf einer prädiktiven Rechenzeit basiert. Dieser prädiktive
20 Berechnungszeitpunkt kann dabei basierend auf einer bekannten mittleren Rechenzeit zur Berechnung des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten basieren. Somit kann vor und/oder während des Berechnens des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten ermittelt werden, ob die Berechnung des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten abgeschlossen sein wird oder würde, bevor eine der Phasen
25 basierend auf beispielsweise dem prädiktiven ersten Satz von Schaltzeitpunkten geschaltet hat. Dadurch kann effizient überprüft werden, ob eine genaue, dynamische Regelung in demselben Intervall möglich ist, oder zu Inkonsistenzen der Spannungsausgabe führen würde. Insbesondere vorzugsweise kann die Berechnung des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten selbst von dem Ergebnis
30 dieses Bestimmens abhängen. Falls bereits vor der Berechnung des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten festgestellt wird, dass mindestens eine Phase vor dem (prädiktiven) Berechnungszeitpunkt geschaltet haben wird, kann beispielsweise die Berechnung des zweiten Satzes entfallen. Anderenfalls kann

nach der Berechnung des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten überprüft werden, ob keiner der neugerechneten Schaltzeitpunkte in der Vergangenheit liegt. Wenn dies zutrifft, kann der erste „prädiktive“ Satz der Schaltzeitpunkte durch den zweiten Satz überschrieben werden.

5 Vorzugsweise wird, wenn bestimmt wurde, dass zu dem Berechnungszeitpunkt in dem momentanen Intervall keiner der Schaltzeitpunkte aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt, der bereitgestellte erste Satz von Schaltzeitpunkten mit dem zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in einem Speicher überschrieben werden. Der Speicher kann dabei ein Speicher des
10 Stromrichters sein, in welchem die Sätze von Schaltzeitpunkten bereitgestellt sein können. Da in diesem Fall noch keine Phase basierend auf dem prädiktiven ersten Satz von Schaltzeitpunkten geschaltet hat, kann der zweite Satz anstelle des ersten Satzes verwendet werden, ohne Inkonsistenzen der Spannungsausgabe hervorzurufen.

15 Vorzugsweise wird, wenn bestimmt wurde, dass zu dem Berechnungszeitpunkt in dem momentanen Intervall zumindest einer der Schaltzeitpunkte aus dem ersten oder zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt, der zweite Satz von Schaltzeitpunkten verworfen werden. Damit wird sichergestellt, dass keine inkonsistente Spannungsausgabe erfolgen kann, und in einem Intervall alle
20 Phasen einheitlich entsprechend eines einzigen Satzes von Schaltzeitpunkten umgeschaltet werden.

Vorzugsweise wird der prädiktive Strom-Istwert durch Addition des erfassten ersten Strom-Istwertes mit einer durch Stromprädiktion ermittelten Strom-Istwert-Änderung gebildet. Insbesondere vorzugsweise kann dabei jede bekannte
25 Stromprädiktion durchgeführt werden. Beispielsweise kann das aus der DE 100 38 570 A1 bekannte Verfahren zur Stromprädiktion verwendet werden. Somit können genaue Regelwerte bestimmt werden, die eine gute Regelung der Maschine ermöglichen, falls eine dynamische und präzise Regelung basierend auf einem entsprechenden Strom-Istwert in dem folgenden Intervall nicht
30 durchführbar sein sollte. Ebenso wird der prädiktive zukünftige Strom-Istwert vorzugsweise durch eine analoge Addition des erfassten momentanen Strom-

Istwertes mit einer durch Stromprädiktion ermittelten Strom-Istwert-Änderung gebildet.

- Vorzugsweise basiert das Berechnen des prädiktiven ersten Satzes von Schaltzeitpunkten ferner auf einem älteren Strom-Istwert der Maschine. Somit wird mit der Stromprädiktion auf die Historie der ermittelten bzw. erfassten Strom-Istwerte zurückgegriffen. Der ältere Strom-Istwert wurde dabei in einem vorherigen Intervall erfasst. Vorzugsweise können mehrere ältere Strom-Istwerte, welche in mehreren vorherigen Intervallen erfasst wurden, zum Berechnen des prädiktiven ersten Satzes von Schaltzeitpunkten berücksichtigt werden. Zum Bilden des prädiktiven Strom-Istwertes kann beispielsweise eine Interpolation basierend auf der Historie und dem in dem ersten Intervall erfassten ersten Strom-Istwert durchgeführt werden. Somit kann eine genaue Prädiktion und entsprechende Bestimmung des prädiktiven ersten Satzes von Schaltzeitpunkten durchgeführt werden.
- Die Erfindung betrifft weiterhin eine Einrichtung zur Stromregelung eines Stromrichters, vorzugsweise eines pulsweitenmodulierten Stromrichters für eine elektrische Maschine. Die Einrichtung eignet sich dabei insbesondere zur Stromregelung eines pulsweitenmodulierten Wechselrichters für die elektrische Maschine. Der Wechselrichter kann als Bestandteil eines elektrischen Antriebes an eine ein- oder mehrphasige elektrischen Maschine (beispielsweise eine permanentmagneterregte Synchronmaschine) angeschlossen sein. Der Stromrichter und die Maschine haben mehrere Phasen. Dabei erfolgt die Stromregelung des Stromrichters bzw. des Wechselrichters bzw. der Maschine durch einen Regelkreis, vorzugsweise, wie oben beschrieben, mit einem Mittel zur Berechnung von Schaltzeitpunkten zur Erzeugung eines pulsweitenmodulierten Spannungsmusters für jede Phase. Die Stromregelung kann dabei als Teil der Einrichtung oder separat zu dieser bereitgestellt sein kann. Die Einrichtung umfasst einen Modulator zur Pulsweitenmodulation einer Spannung jeder Phase. Die Einrichtung umfasst ferner ein Erfassungsmodul, welches eingerichtet ist zum Erfassen eines Strom-Istwertes der Maschine.

Ferner umfasst die Einrichtung ein Berechnungsmodul, welches eingerichtet ist zum Berechnen, vorzugsweise während eines ersten Intervalls, eines prädiktiven ersten Satzes von Schaltzeitpunkten für Signale zur Erzeugung der pulswertenmodulierten Spannung jeder Phase in einem dem ersten Intervall
5 folgenden momentanen Intervall, basierend zumindest auf einem in dem ersten Intervall erfassten ersten Strom-Istwert, einem prädiktiven Strom-Istwert und einem Strom-Sollwert. Das Berechnungsmodul ist dabei zum Bestimmen des prädiktiven Strom-Istwertes anhand zumindest des erfassten ersten Strom-Istwertes eingerichtet. Vorzugsweise ist das Berechnungsmodul eingerichtet,
10 dieses Berechnen in jedem aktuell laufenden Intervall durchzuführen.

Ferner ist das Berechnungsmodul eingerichtet zum Berechnen, vorzugsweise während des momentanen Intervalls, eines zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten für Signale zur Erzeugung der pulswertenmodulierten Spannung jeder Phase in dem momentanen Intervall basierend zumindest auf einem in dem momentanen
15 Intervall erfassten momentanen Strom-Istwert und dem Strom-Sollwert. Vorzugsweise umfasst die Einrichtung ein Vergleichsmodul, welches mit dem Berechnungsmodul gekoppelt ist und welches eingerichtet ist zum Vergleichen des momentanen Strom-Istwertes mit einem Strom-Sollwert, und zum Vergleichen des prädiktiven Strom-Istwertes mit einem Strom-Sollwert.

20 Ferner umfasst die Einrichtung einen Entscheider des Modulators, welcher eingerichtet ist zum Bestimmen, ob bis zu einem Berechnungszeitpunkt, zu welchem die Berechnung des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten in dem momentanen Intervall abgeschlossen ist, keiner der Schaltzeitpunkte aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt. Der
25 Entscheider kann somit bestimmen, dass relativ zu dem Berechnungszeitpunkt keine der Flanken der Phasen, generiert auf Basis vom ersten bzw. „prädiktiven“ Satz von Schaltzeitpunkten, der im vorherigen ersten Intervall berechnet wurden, bereits geschaltet hat, und keiner von neugerechneten Schaltzeitpunkten des zweiten Satzes bereits in der Vergangenheit liegt. Weiter umfasst die Einrichtung
30 ein Ausgabemodul, welches eingerichtet ist zum Bereitstellen, an den Modulator, vorzugsweise am Anfang eines Intervalls, des ersten bzw. „prädiktiven“ Satzes von Schaltzeitpunkten für Signale zur Erzeugung der pulswertenmodulierten

Spannung jeder Phase in dem Intervall. Das Ausgabemodul ist ferner eingerichtet zum Bereitstellen des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten für Signale zur Erzeugung der pulswertenmodulierten Spannung jeder Phase in dem momentanen Intervall an den Modulator.

- 5 Vorzugsweise umfasst die Einrichtung ferner ein Prädiktionsmodul, welches eingerichtet ist zum Ermitteln des prädiktiven Stromistwertes.

Dabei ist die Einrichtung vorzugsweise konfiguriert, das Bereitstellen des ersten Satzes von Schaltzeitpunkten mittels des Ausgabemoduls durchzuführen, wenn durch den Entscheider bestimmt wird, dass zu dem Berechnungszeitpunkt in
10 dem momentanen Intervall zumindest einer der Schaltzeitpunkte aus dem ersten oder zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt. Die Einrichtung ist vorzugsweise ferner konfiguriert, das Bereitstellen des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten mittels des Ausgabemoduls durchzuführen, wenn durch den Entscheider bestimmt wird, dass zu dem Berechnungszeitpunkt in
15 dem momentanen Intervall keiner der Schaltzeitpunkte aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt, also insbesondere keine der Phasen, basierend auf dem im vorherigen Intervall berechneten ersten Satz von Schaltzeitpunkten, bereits geschaltet hat und keiner von den Schaltzeitpunkten des zweiten Satzes bereits in der Vergangenheit liegt.

- 20 Vorzugsweise ist das Berechnungsmodul ferner eingerichtet zum Berechnen, insbesondere während des momentanen Intervalls, eines prädiktiven dritten Satzes von Schaltzeitpunkten für Signale zur Erzeugung der pulswertenmodulierten Spannung jeder Phase in einem dem momentanen Intervall folgenden zukünftigen Intervall, basierend zumindest auf dem erfassten
25 momentanen Strom-Istwert, einem prädiktiven zukünftigen Strom-Istwert und einem Strom-Sollwert welcher vorzugsweise für das zukünftige Intervall gilt. Das Berechnungsmodul ist dabei vorzugsweise zum Berechnen des prädiktiven zukünftigen Strom-Istwertes anhand zumindest des erfassten momentanen Strom-Istwertes eingerichtet. Hierzu kann mittels des Vergleichsmoduls
30 vorzugsweise der prädiktive zukünftige Strom-Istwert mit dem (zukünftigen) Strom-Sollwert verglichen werden. Ein solches Vergleichen des prädiktiven

Strom-Istwertes mit dem Strom-Sollwert mittels des Vergleichsmoduls erfolgt vorzugsweise in jedem Intervall für das nachfolgende Intervall.

5 Dabei erfolgt ggf. das Bereitstellen des prädiktiven dritten Satzes von Schaltzeitpunkten mittels des entsprechend eingerichteten Ausgabemoduls an den Modulator für das folgende zukünftige Intervall. Der bereitgestellte prädiktive dritte Satz von Schaltzeitpunkten dient nun erneut als bereitgestellter erster Satz von Schaltzeitpunkten für das folgende zukünftige Intervall.

10 Vorzugsweise umfasst das Berechnungsmodul eine digitale Logik, wie etwa eine Logik einer Zustandsmaschine, insbesondere innerhalb einer Feld-programmierbare-Logik-Gatter-Anordnung (engl.: Field Programmable Gate Array, FPGA). Durch den Einsatz der FPGA-Technologie, als auch vorzugsweise schneller A/D-Wandler, kann die Rechenzeit zum Berechnen des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten erheblich reduziert werden, sodass der zweite Satz von Schaltzeitpunkten innerhalb des momentanen Zeitintervalls berechnet ist. Da die
15 benötigte Rechenzeit jedoch nicht unerheblich lang ist, wird mittels des Entscheiders vorteilhaft bestimmt, ob eine Verwendung des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten in dem momentanen Intervall noch möglich ist ohne Inkonsistenzen der Spannungsausgabe hervorzurufen.

20 Vorzugsweise umfasst die Einrichtung ferner ein Speicherelement zur Speicherung des berechneten prädiktiven ersten Satzes von Schaltzeitpunkten. Dabei ist der Entscheider vorzugsweise eingerichtet, um ein Überschreiben des gespeicherten ersten Satzes von Schaltzeitpunkten mit dem zweiten Satz von Schaltzeitpunkten zu veranlassen, wenn bestimmt wurde, dass bis zu dem Berechnungszeitpunkt in dem momentanen Intervall keiner der Schaltzeitpunkte
25 aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt, also wenn beispielsweise durch den Entscheider festgestellt wird, dass keine der Phasen, basierend auf dem ersten Satz von Schaltzeitpunkten bereits geschaltet hat und keiner von den Schaltzeitpunkten des zweiten Satzes in der Vergangenheit liegt.

Vorzugsweise ist die Einrichtung eingerichtet zum Durchführen eines der oben beschriebenen Verfahren zur Stromregelung eines Stromrichters, und insbesondere eines an eine elektrische Maschine angeschlossenen Stromrichters bzw. Wechselrichters.

- 5 Insbesondere vorzugsweise umfasst die Einrichtung einen Regler bzw. eine Regelungseinheit, wobei der Modulator mit einem bzw. dem Ausgang der Regelungseinheit verbunden ist, und eine mit einem bzw. dem Ausgang des Modulators verbundene 3-phasige Endstufe insbesondere 3-phasiger Wechselrichter. Das Erfassungsmodul ist mit der 3-phasigen Endstufe verbunden,
10 und das Erfassungsmodul ist zur Bildung eines Regelkreises mit der Regelungseinheit verbunden. Vorzugsweise umfasst dabei der Modulator einen Impulsgenerator zur Erzeugung von Pulsmuster für eine Pulsweitenmodulation einer Spannung jeder Phase bzw. zur Erzeugung einer pulswertenmodulierten Spannung jeder Phase, einen Transformierer, einen Speicher und den
15 Entscheider. Der Fachmann versteht, dass der Transformierer des Modulators eingesetzt werden kann, um ein Eingangssignal in jeweilige Signale für jede der drei Phasen zu transformieren.

- Vorzugsweise ist das Erfassungsmodul dabei eingerichtet, um einen Strom-Istwert der Maschine in einem und insbesondere in dem ersten und in dem momentanen
20 Intervall zu erfassen. Vorzugsweise sind die Regelungseinheit und der Transformierer eingerichtet, um den prädiktiven ersten Satz von Schaltzeitpunkten zu berechnen und um den zweiten Satz von Schaltzeitpunkten zu berechnen. Vorzugsweise ist der Speicher eingerichtet, um den ersten Satz von Schaltzeitpunkten in dem momentanen Intervall bereitzustellen. Vorzugsweise ist
25 der Entscheider eingerichtet, um den Berechnungszeitpunkt mit jedem Schaltzeitpunkt des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten zu vergleichen. Der Entscheider kann somit insbesondere eingerichtet sein, den von der Rechenzeit bestimmten Berechnungszeitpunkt mit jedem Schaltzeitpunkt des ersten und/oder des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten zur Erzeugung der
30 pulswertenmodulierten Spannungen der Phasen zu vergleichen. Vorzugsweise ist der Entscheider ferner eingerichtet, um ein Steuersignal auszugeben, um zu veranlassen, dass der zweite Satz von Schaltzeitpunkten an dem Impulsgenerator

zum Erzeugen bzw. zur Erzeugung der Pulse bzw. des Pulsmusters in dem momentanen Intervall anliegt, wenn entsprechend des Vergleichs der Berechnungszeitpunkt vor jedem der Schaltzeitpunkte in dem momentanen Intervall liegt. Vorzugsweise ist der Entscheider ferner eingerichtet, um ein
5 Steuersignal auszugeben, um zu veranlassen, dass der erste Satz von Schaltzeitpunkten an dem Impulsgenerator zur Erzeugung der Pulse bzw. des Pulsmusters in dem momentanen Intervall anliegt und insbesondere nicht überschrieben wird, wenn entsprechend des Vergleichs der Berechnungszeitpunkt nicht vor jedem der Schaltzeitpunkte in dem momentanen
10 Intervall liegt.

Gemäß der vorliegenden Erfindung werden die Schaltzeitpunkte für Signale zum Erzeugen der pulsweitenmodulierten Spannungen jeder Phase in einem momentanen Intervall zweimal berechnet: zunächst wird in einem vorangegangenen Intervall ein prädiktiver erster Satz solcher Schaltzeitpunkte
15 berechnet bzw. prognostiziert. In dem momentanen Intervall wird dann ein zweiter Satz solcher Schaltzeitpunkte berechnet, wobei dabei ein momentan aktueller Strom-Istwert und Strom-Sollwert berücksichtigt werden. Falls der zweite Satz von Schaltzeitpunkten im momentanen Intervall verwendet werden kann, kann er direkt übernommen werden oder der in einem Latch/Register
20 gespeicherte prädiktive erste Satz von Schaltzeitpunkten überschrieben werden, so dass der zweite Satz von Schaltzeitpunkten verwendet wird. Andernfalls wird der prädiktive erste Satz von Schaltzeitpunkten verwendet. In dem momentanen Intervall kann ferner als zweites ein prädiktiver dritter Satz von Schaltzeitpunkten für das kommende Intervall berechnet bzw. prognostiziert werden.

25 4. Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Im Folgenden werden Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung unter Bezugnahme auf die beiliegenden Figuren näher beschrieben. Dabei sind gleiche Elemente mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet. Es zeigt:

Fig. 1 schematisch den Aufbau einer Stromregelung eines elektrischen Antriebes
30 gemäß einer Ausführungsform;

Fig. 2 schematisch den Aufbau eines Modulators gemäß einer Ausführungsform;

Fig. 3 schematisch den Ablauf eines Verfahrens zur Stromregelung einer elektrischen Maschine gemäß einer weiteren Ausführungsform;

Fig. 4 schematisch den Verlauf von Signalen zur Ansteuerung dreier Phasen eines Wechselrichters;

Fig. 5 schematisch den Verlauf eines Signals zur Ansteuerung einer Phase eines Wechselrichters;

Fig. 6 schematisch den Verlauf eines Signals zur Ansteuerung einer Phase eines Wechselrichters.

5. Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele

Die Figur 1 zeigt schematisch den Aufbau einer Stromregelung eines elektrischen Antriebes. Diese umfasst einen elektrischen Motor 20, beispielsweise eine permanentenerregte Synchronmaschine, kann aber auch andere elektrische Maschinen umfassen (wie z.B. eine Asynchronmaschine oder Reluktanzmaschine). Der Motor 20 wird mittels einer Steuereinrichtung 10 geregelt. Dabei werden drei Phasen u, v, w des Motor 20 an die dreiphasige Endstufe 13 angeschlossen, die einen Stromrichter bzw. einen Wechselrichter aufweist. Dabei erfolgt die Regelung des Stromes des Motors 20 durch Ausgabe einer pulswidenmodulierten Spannung jeder der drei Phasen u, v, w.

Die Steuereinrichtung 10 umfasst neben die Endstufe 13 eine Regelungseinheit 11, welche in Form eines oder mehrerer PI-Regler vorliegen kann. Ferner ist ein Erfassungsmodul 14 bereitgestellt, welches mit der 3-phasigen Endstufe 13 verbunden ist und zur Bildung eines Regelkreises mit der Regelungseinheit 11 verbunden ist. Mittels des Erfassungsmoduls 14 können die Größen erfasst werden, die durch die ausgegebenen Größen der Endstufe 13 geregelt werden, und für die Regelung an die Regelungseinheit 11 zurückgeführt werden. Der dargestellte Aufbau umfasst somit einen üblichen Regelkreis des Standes der

Technik. Ferner umfasst die Steuereinrichtung 10 einen Modulator 12. Der Modulator 12 umfasst in der dargestellten Einrichtung einen Transformierer 121 und einen Impulsgenerator 122. Der Transformierer 121 transformiert dabei die eingehenden Signale bzw. Spannungssollwerte entsprechend der Phasen und führt seine Ausgangssignale dem nachfolgenden Impulsgenerator 122 zu. Dieser erzeugt Pulsmuster zur Ansteuerung der Endstufe 13, so dass eine pulswertenmodulierte dreiphasige Spannung mit vorgegebenen Betrag, Phasenwinkel und Frequenz an den Motor 20 angelegt wird, um den anzutreiben.

In Figur 2 ist ein Modulator 12 dargestellt, welcher beispielsweise in der in Figur 1 dargestellten Einrichtung 10 eingesetzt werden kann. Vorzugsweise ist der Modulator 12 an einem Ausgang einer Regelungseinheit 11 bereitgestellt, und an einem Ausgang des Modulators 12 ist eine Endstufe 13. Der Modulator umfasst dabei einen Transformier 121, Impulsgenerator 122, Latch oder Speicher 123 und einen Entscheider 124. Der Fachmann versteht, dass der in Figur 2 dargestellte Modulator 12 in Verbindung mit den Elementen der Figur 1 eines oder mehrere der Module einer Einrichtung zur Stromregelung ausbilden können. Beispielsweise kann ein solches Berechnungsmodul zum erfindungsgemäßen Berechnung der Sätze von Schaltzeitpunkten durch die Regelungseinheit 11 und den Transformierer 121 gebildet werden.

Im Folgenden wird die vorliegende Erfindung beispielhaft anhand der Einrichtung 10 der Figur 1 mit dem Modulator 12 der Figur 2 beschrieben. Das Erfassungsmodul 14 ist eingerichtet, einen Strom-Istwert der Maschine zu erfassen, wie beispielsweise einen Statorstrom. Hierzu kann die entsprechende Ausgangsgröße der Endstufe 13 betrachtet werden. Dieses Erfassen bzw. Abtasten erfolgt in zeitdiskreten Abständen und relativ zu einer PWM-Frequenz der Steuereinrichtung 10.

Das Berechnungsmodul, welches durch die Regelungseinheit 11 und den Transformierer 121 gebildet sein kann, ist eingerichtet zum Berechnen eines Pulsmusters bzw. eines Satzes von Schaltzeitpunkten für Signale zum Erzeugen der pulswertenmodulierten Spannung jeder Phase u, v, w in einem Intervall, welches ein aktuelles, laufendes bzw. momentanes Intervall oder ein folgendes

Intervall sein kann. Das Berechnen erfolgt dabei basierend auf einem durch das Erfassungsmodul 14 erfassten Strom-Istwert in dem aktuell laufenden Intervall. Dieses Intervall entspricht dabei dem aktuellen Abtastintervall, in welchem durch das Erfassungsmodul 14 der Strom-Istwert abgetastet wurde. Das Berechnen
5 eines Satzes von Schaltzeitpunkten für ein folgendes Intervall (bzw. eines prädiktiven ersten Satzes) basiert dabei neben dem Strom-Istwert ferner auf einem prädiktiven Strom-Istwert und einem Strom-Sollwert. Dieses folgende Intervall, für welches der erste Satz gilt, kann dabei das dem aktuellen oder momentanen Abtastintervall folgende Intervall sein. Das Berechnen eines Satzes
10 von Schaltzeitpunkten für das aktuelle Intervall, bzw. des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten, basiert dabei neben dem Strom-Istwert ferner auf den Strom-Sollwert.

Als Berechnungsmodul kann dabei ein FPGA und als Erfassungsmodul 14 ein schneller A/D-Wandler verwendet werden, sodass das Berechnen eines Satzes
15 von Schaltzeitpunkten für ein momentanes Intervall möglichst früh innerhalb dieses Intervalls abgeschlossen ist. Gleiches gilt für die Berechnung eines prädiktiven Satzes von Schaltzeitpunkten für ein folgendes Intervall, sodass dieser vorteilhaft vor Ende des momentanen Intervalls zur Verfügung steht.

Das Berechnungsmodul kann dabei ein Vergleichsmodul umfassen, welches
20 eingerichtet ist zum Vergleichen eines Strom-Istwertes mit einem Strom-Sollwert. Dabei kann das Vergleichsmodul insbesondere den durch das Erfassungsmodul 14 erfassten Strom-Istwert mit einem für das momentane Intervall gültigen Strom-Sollwert vergleichen. Ebenso kann das Vergleichsmodul einen prädiktiven, bzw. für ein folgendes Intervall prognostizierten Strom-Istwert
25 mit einem für das folgende Intervall gültigen oder prognostizierten Strom-Sollwert vergleichen. Das Berechnungsmodul kann zum Berechnen eines Satzes von Schaltzeitpunkten auf das Ergebnis des Vergleichsmoduls zugreifen.

Der berechnete prädiktive Satz von Schaltzeitpunkten für Signale zum Erzeugen der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase u, v, w in einem folgenden
30 Intervall wird in dem Latch oder Speicher 123 gespeichert. Der anschließende, für

das aktuelle bzw. momentane Intervall berechnete zweite Satz von Schaltzeitpunkten wird erst von dem Entscheider 124 überprüft.

Der Entscheider 124 ist eingerichtet zum Bestimmen, 1) ob nach dem Ablauf der Rechenzeit (bzw. die für die Berechnung des zweiten Satzes von
5 Schaltzeitpunkten nötige Zeit) in dem momentanen Intervall eine der Phasen u, v, w bereits geschaltet hat, und zwar aufgrund des in dem Speicher 123 gespeicherten und bereits wirksamen prädiktiven ersten Satzes, und 2) ob einer von Schaltzeitpunkten des neugerechneten zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten nach dem Ablauf der Rechenzeit in der Vergangenheit liegt.

10 Wenn bestimmt wird, dass:

1) der zweite Satz von Schaltzeitpunkten, der in dem momentanen Intervall und für das momentane Intervall berechnet wurde, zur Verfügung steht, bevor eine der Phasen basierend auf dem im vorherigen Takt berechneten prädiktiven ersten Satz von Schaltzeitpunkten geschaltet hat;

15 2) keine der Schaltzeitpunkte des neugerechneten zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten hinsichtlich des Ablaufs der Rechenzeit in der Vergangenheit liegt,

wird durch den Entscheider 124 veranlasst, dass der in dem Speicher 123 gespeicherte prädiktive Satz von Schaltzeitpunkten durch den zweiten Satz von
20 Schaltzeitpunkte überschrieben wird. Ansonsten wird der zweite Satz von Schaltzeitpunkten verworfen.

Das Ausgabemodul, welches durch den Modulator 12 und insbesondere den Latch oder Speicher 123 gebildet sein kann, ist eingerichtet zum Bereitstellen eines Satzes von Schaltzeitpunkten zum Erzeugen der pulsweitenmodulierten
25 Spannung jeder Phase u, v, w in einem und insbesondere jedem Intervall an den Modulator 12, bzw. insbesondere an den Impulsgenerator 122. Dabei kann das Ausgabemodul einen für das momentane und für ein folgendes Intervall gültigen Satz von Schaltzeitpunkten zum Erzeugen der pulsweitenmodulierten Spannung

jeder Phase u, v, w in dem entsprechenden Intervall an den Impulsgenerator 122 bereitstellen.

Der Regelkreis rechnet somit zuerst mit einem prädiktiven Satz von Schaltzeitpunkten, welcher in einem vorherigen Intervall berechnet wurde. In
5 einem aktuellen bzw. momentanen Intervall wird erneut anhand der aktuell gültigen Messwerte ein neuer Satz von Schaltzeitpunkten berechnet, welche verwendet werden können, falls die obigen zwei Bedingungen zutreffen. Der Fachmann versteht, dass der Modulator 12 auch weitere Komponenten umfassen kann, wie beispielsweise eine Einheit zur Umsetzung der Übermodulation, usw.

10 Bezugnehmend auf Figur 3 wird im Folgenden eine Ausführungsform eines Verfahrens zur Stromregelung eines pulswidenmodulierten Stromrichters beschrieben. Dieses Verfahren ist mittels der in den Figuren 1 und 2 beschriebenen Steuereinrichtung 10 mit Modulator 12 ausführbar, und wird im Folgenden unter Bezugnahme auf diese Figuren 1 und 2 beschrieben. Das
15 Verfahren erstreckt sich dabei über zwei Intervalle, wobei die Schritte 31, 32 in dem ersten Intervall, und die Schritte 33-38 in dem zweiten (bzw. momentanen) Intervall erfolgen.

In Schritt 31 wird mittels des Erfassungsmoduls 14 (vorzugsweise am Anfang des ersten Intervalls) ein erster Strom-Istwert erfasst. Dieser ist somit für das erste
20 Intervall gültig.

In Schritt 32 erfolgt mittels des Berechnungsmoduls ein Berechnen eines prädiktiven ersten Satzes von Schaltzeitpunkten zur Erzeugung der pulswidenmodulierten Spannung jeder Phase u, v, w in dem folgenden zweiten Intervall basierend auf dem ersten Strom-Istwert, einem prädiktiven Strom-
25 Istwert (welcher für das zweite Intervall prognostiziert wird) und einem Strom-Sollwert. Das Berechnen umfasst dabei vorzugsweise ein Vergleichen des prädiktiven Strom-Istwertes mit dem Strom-Sollwert.

Die folgenden Schritte 33-38 erfolgen nun in dem zweiten Intervall, welches als das momentane Intervall bezeichnet wird. In dem Schritt 33 wird mittels des

Erfassungsmoduls 14 ein momentaner Strom-Istwert erfasst, welcher für das momentane Intervall gültig ist.

In Schritt 34 erfolgt mittels des Berechnungsmoduls ein Berechnen eines zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten zum Erzeugen der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase u, v, w in dem momentanen Intervall, also für jenes Intervall, für welches zuvor der erste Satz von Schaltzeitpunkten berechnet wurde, basierend auf dem erfassten momentanen Strom-Istwert, und dem laufenden Strom-Sollwert. Dabei umfasst das Berechnen vorzugsweise ein Vergleichen des mittels des Erfassungsmoduls 14 erfassten momentanen Strom-Istwertes mit dem Strom-Sollwert.

Bei der Entscheidung 35 wird mittels des Entscheiders 124 bestimmt,

1) ob nach dem Ablauf der für die Schritte 33 und 34 nötigen Rechenzeit in dem momentanen Intervall keine der Phasen u, v, w bereits geschaltet hat, und zwar aufgrund des in dem Speicher 123 gespeicherten und bereits wirksamen prädiktiven ersten Satzes;

2) ob keiner der Schaltzeitpunkte des neugerechneten zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten hinsichtlich des Endes der für die Schritte 33 und 34 nötigen Rechenzeit in der Vergangenheit liegt.

Es wird somit überprüft, ob zum laufenden Zeitpunkt keiner von den Schaltzeitpunkten, weder aus dem ersten noch aus dem zweiten Satz, bereits in der Vergangenheit liegt. Wenn dies zutrifft, ist eine Verwendung des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten durch den Impulsgenerator 122 in dem momentanen (bzw. zweiten) Intervall noch möglich.

Wenn die Entscheidung 35 negativ ausfällt, wenn also bestimmt wurde, dass keiner von den Schaltzeitpunkten aus dem ersten oder aus dem zweiten Satz von Schaltzeitpunkten, in der Vergangenheit liegt, erfolgt in Schritt 36 ein Überschreiben des früher gespeicherten ersten Satzes von Schaltzeitpunkten zum Erzeugen der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase u, v, w in dem

momentanen Intervall durch den gerade bereitgestellten zweiten Satz von Schaltzeitpunkten. Der erste Satz von Schaltzeitpunkten gilt damit nicht mehr.

Wenn die Entscheidung 35 hingegen positiv ausfällt, wenn also bestimmt wurde, dass mindestens einer von den Schaltzeitpunkten aus dem ersten oder aus dem
5 zweiten Satz von Schaltzeitpunkten hinsichtlich des Endes der Berechnungszeit des zweiten Satzes in der Vergangenheit liegt, wird in einem folgenden Schritt 37 der zweite Satz von Schaltzeitpunkten, der in Schritt 34 berechnet wurde, verworfen. Der Impulsgenerator 122 verwendet weiter den prädiktiven ersten Satz von Schaltzeitpunkten, welcher im vorherigen Takt in Schritt 32 berechnet
10 wurde.

Anschließend an Schritt 36 oder 37 erfolgt in Schritt 38 ein Berechnen eines prädiktiven dritten Satzes von Schaltzeitpunkten zum Erzeugen der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase u, v, w in dem folgenden zukünftigen Intervall, bzw. dem folgenden dritten Intervall. Dieses Berechnen
15 erfolgt dabei analog zu dem Berechnen in Schritt 32, es wird jedoch sowohl der in Schritt 33 ermittelte momentane Strom-Istwert verwendet, als auch ein prädiktiver zukünftiger Strom-Istwert (welcher für das zukünftige Intervall prognostiziert wird) und ein laufender Strom-Sollwert. Das Berechnen umfasst dabei vorzugsweise ein Vergleichen des prädiktiven zukünftigen Strom-Istwertes
20 mit dem Strom-Sollwert.

Anschließend erfolgt im folgenden zukünftigen Intervall erneut ein analoges Durchführen der Schritte 33-38.

Die Figur 4 zeigt exemplarisch den zeitlichen Verlauf der Pulsmuster für die Ansteuerung der Phasen u, v, w der Endstufe 13. Die Schaltzustände der drei
25 Phasen u, v, w sind dabei vertikal versetzt zueinander dargestellt. Zu den Zeitpunkten bzw. Schaltzeitpunkten t_u , t_v , t_w schalten die drei Phasen in dem 2. Intervall $t_0 < t < t_1$.

Zu diskreten Zeitpunkten t_{-1} , t_0 , t_1 , t_2 usw. werden Strom-Istwerte mittels des Erfassungsmoduls 14 abgetastet bzw. erfasst. Beispielsweise wird zum Zeitpunkt

t_0 ein Strom-Istwert I_0 erfasst. Aus einer früheren, im 1. Intervall $t_{-1} < t < t_0$ stattfindenden Berechnung bzw. früheren Prädiktion steht zu diesem Zeitpunkt t_0 ein erster Satz von Zeitpunkten bereit, anhand welchem die einzelnen Phasen u , v , w in dem 2. Intervall $t_0 < t < t_1$ geschaltet werden sollen.

5 Gemäß der vorliegenden Erfindung wird zum Zeitpunkt t_0 eine Berechnung eines neuen Satzes von Schaltzeiten bzw. Schaltzeitpunkten zum Schalten der Phasen in dem laufenden Intervall $t_0 < t < t_1$ gestartet, wobei die Berechnung unter Berücksichtigung des für das aktuelle Intervall $t_0 < t < t_1$ gemessenen tatsächlichen Strom-Istwertes I_0 erfolgt.

10 Die Berechnung und erfindungsgemäße Verwendung der Sätze von Schaltzeitpunkten wird nun unter Bezugnahme auf die Figuren 5 und 6 näher erläutert. Dabei wird der erfindungsgemäße Schaltvorgang der Phase u beschrieben. Die Schaltvorgänge der Phasen v und w verhalten sich analog.

Wie beschrieben, steht zum Zeitpunkt t_0 bereits ein prädiktiver Schaltzeitpunkt t_{u^p} bereit, welcher im vorangegangenen Intervall für das momentane Intervall $t_0 < t < t_1$ berechnet wurde. Es startet nun eine Berechnung von neuen Regelwerten für die pulswidenmodulierte Spannung zum Schalten der Phasen in dem Intervall $t_0 < t < t_1$, wobei die Berechnung unter Berücksichtigung des für das aktuelle Intervall $t_0 < t < t_1$ gemessenen tatsächlichen Strom-Istwertes I_0 erfolgt. Die
15 Berechnung dieses Wertes t_{u^r} ist zum Zeitpunkt t_r abgeschlossen.

Für die in der in Figur 5 dargestellten Situation gilt $t_r < t_{u^p}$ und $t_r < t_{u^r}$ bzw. liegen sowohl der prädiktive Schaltzeitpunkt t_{u^p} als auch der neugerechnete Schaltzeitpunkt t_{u^r} zeitlich hinter dem Zeitpunkt t_r . Daher hat die Phase u (und auch die anderen beiden Phasen v , w) zu dem Zeitpunkt t_r noch nicht geschaltet.
25 Darüber hinaus liegt der neugerechnete Schaltzeitpunkt t_{u^r} in der Zukunft, er kann zum Schalten der Phase u in dem Intervall $t_0 < t < t_1$ verwendet werden. Dementsprechend wird diese Phase nun zum Schaltzeitpunkt t_{u^r} und nicht zum prädiktiven Schaltzeitpunkt t_{u^p} geschaltet. Da der tatsächlich gemessene Strom-Istwert I_0 verwendet wird, um den Zeitpunkt t_{u^r} zu berechnen, ist eine
30 hochdynamische Regelung möglich. Anschließend wird ein prädiktiver

Schaltzeitpunkt berechnet, zum Schalten der Phase u in dem folgenden zweiten Intervall $t_1 < t < t_2$. Generell kann hierfür eine Prädiktion eines Strom-Istwertes für den Zeitpunkt t_1 durchgeführt werden. Hierfür kann auch berücksichtigt werden, welcher Strom-Istwert zum Abtastzeitpunkt t_{-1} erfasst wurde. Diese prädiktiven
 5 Regelwerte stellen den prädiktiven dritten Satz von Schaltzeitpunkten für das folgende zweite Intervall $t_1 < t < t_2$ dar.

Zum Zeitpunkt t_1 wird erneut ein Strom-Istwert I_1 erfasst, und erneut ein neuer Regelsatz zum Schalten der Phase u in dem Intervall $t_1 < t < t_2$ basierend auf diesem Strom-Istwert I_1 berechnet.

10 In der Figur 6 liegt eine analoge Situation zu der in Figur 5 dargestellten Situation vor, jedoch ist der prädiktive Schaltzeitpunkt t_u^p der Phase u nun zeitlich vor dem Zeitpunkt t_r : $t_r > t_u^p$. Obwohl hier wie in der Figur 5 $t_r < t_u^r$ gilt, kann der Schaltpunkt t_r nicht realisiert werden, weil die Phase u bereits geschaltet hat. Folglich wird erfindungsgemäß der in dem Zeitraum $t_0 < t < t_r$ ermittelte genaue
 15 Schaltzeitpunkt t_u^r nicht verwendet, sondern vorzugsweise verworfen, wie auch der ganze zweite Satz von Schaltzeitpunkten. Ferner werden erneut prädiktive Regelwerte für das folgende Intervall $t_1 < t < t_2$ berechnet.

Obwohl das Schaltverhalten in den Figuren 5 und 6 anhand der Phase u beschrieben wurde, gilt eine analoge Beschreibung auch für die Phasen v und w.

20 Hier werden entsprechend Schaltzeitpunkte t_v^p , t_w^p und t_v^r , t_w^r betrachtet. Erfindungsgemäß wird in der in Figur 5 dargestellten Situation der Schaltzeitpunkt t_u^r nicht verwendet, wenn bis zum Zeitpunkt t_r eine der Phasen v, w basierend auf dem entsprechenden prädiktiven Schaltzeitpunkt t_v^p , t_w^p bereits geschaltet hat.

25 Das unter Bezugnahme auf Figuren 4-6 beschriebene Verfahren wird für jedes Abtastintervall $t_0 < t < t_1$, $t_1 < t < t_2$ usw. durchgeführt. Ein Intervall wird dabei durch zwei Abtastzeitpunkte begrenzt. Eine PWM-Periode oder ein PWM-Intervall erstreckt sich in dem gezeigten Ausführungsbeispiel über zwei Abtastintervalle. Die Abtastfrequenz ist bevorzugt dabei doppelt so hoch wie die PWM-Frequenz,
 30 da sich eine PWM-Periode beispielsweise von t_{-1} bis t_1 erstreckt. Das Verfahren ist

allerdings nicht hierauf beschränkt. Vielmehr kann die Abtastfrequenz auch identisch mit der PWM-Frequenz sein, sodass ein Satz von Schaltzeitpunkten zum Erzeugen der pulswidenmodulierten Spannung jeder Phase sowohl die steigende als auch die fallende Flanke des Pulsmusters in jedem Intervall

5 bestimmt.

Ansprüche

1. Verfahren zur Stromregelung eines pulsweitmodulierten Stromrichters für eine elektrische Maschine, insbesondere eines pulsweitmodulierten Wechselrichters für die elektrische Maschine, wobei der Stromrichter und die Maschine mehrere Phasen (u, v, w) aufweisen, und wobei die Stromregelung durch einen Regelkreis erfolgt, wobei der Regelkreis Mittel zur Berechnung von Schaltzeitpunkten zur Erzeugung einer pulsweitenmodulierten Spannung für jede Phase (u, v, w) aufweist, das Verfahren aufweisend:
 - 5 a) Erfassen eines ersten Stromistwertes (I_{-1}) der Maschine in einem ersten Intervall (T_{-1});
 - b) Berechnen eines prädiktiven ersten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_{u^p} , t_{v^p} , t_{w^p}) für Signale zur Erzeugung der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase (u, v, w) in einem dem ersten Intervall folgenden momentanen Intervall (T_o) basierend zumindest auf dem erfassten ersten Stromistwert (I_{-1}), einem prädiktiven Stromistwert (I_p) und einem Stromsollwert (I_{so}), wobei der prädiktive Stromistwert (I_p) zumindest anhand des erfassten ersten Stromistwerts (I_{-1}) bestimmt wird;
 - 15 c) Bereitstellen des ersten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_{u^p} , t_{v^p} , t_{w^p}) in dem momentanen Intervall (T_o);
 - d) Erfassen eines momentanen Stromistwertes (I_o) der Maschine im momentanen Intervall (T_o);
 - e) Berechnen eines zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_{u^r} , t_{v^r} , t_{w^r}) für Signale zur Erzeugung der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase (u, v, w) in dem momentanen Intervall (T_o) basierend zumindest auf dem erfassten momentanen Stromistwert (I_o) und dem Stromsollwert (I_{so});
 - 25 f) Bestimmen, ob zu einem Berechnungszeitpunkt (t_r), zu welchem die Berechnung des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_{u^r} , t_{v^r} , t_{w^r}) abgeschlossen ist, keiner der Schaltzeitpunkte (t_{u^r} , t_{v^r} , t_{w^r} , t_{u^p} , t_{v^p} , t_{w^p}) aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt ($t_{u^p} > t_r$, $t_{v^p} > t_r$, $t_{w^p} > t_r$, $t_{u^r} > t_r$, $t_{v^r} > t_r$, $t_{w^r} > t_r$); wobei
 - 30 g) wenn bestimmt wird, dass zu dem Berechnungszeitpunkt (t_r) in dem momentanen Intervall (T_o) keiner der Schaltzeitpunkte (t_{u^r} , t_{v^r} , t_{w^r} , t_{u^p} ,

- t_v^p, t_w^p) aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt,
erfolgt ein Verwenden des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_u^r, t_v^r, t_w^r) für Signale zur Erzeugung der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase (u, v, w) in dem momentanen Intervall (T_o); oder
- 5 h) wenn bestimmt wird, dass zu dem Berechnungszeitpunkt (t_r) in dem momentanen Intervall (T_o) zumindest einer der Schaltzeitpunkte ($t_u^r, t_v^r, t_w^r, t_u^p, t_v^p, t_w^p$) aus dem ersten oder zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt,
- 10 erfolgt ein Verwenden des ersten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_u^p, t_v^p, t_w^p) für Signale zur Erzeugung der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase (u, v, w) in dem momentanen Intervall (T_o).
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das erste und das momentane Intervall
- 15 jeweils eine Periode oder eine halbe Periode der pulsweitenmodulierten Spannung ist.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, wobei das Erfassen des Stromistwertes im Rahmen einer zeitdiskreten Regelung zu diskreten
- 20 Abtastzeitpunkten erfolgt, wobei das Erfassen des Stromistwertes vorzugsweise zu Beginn jedes Intervalls erfolgt.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei das Bestimmen, ob zu dem Berechnungszeitpunkt (t_r) in dem momentanen Intervall (T_o) keiner der
- 25 Schaltzeitpunkte ($t_u^r, t_v^r, t_w^r, t_u^p, t_v^p, t_w^p$) aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt, nach und vorzugsweise unmittelbar nach dem Berechnen des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten erfolgt.
- 30 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei wenn bestimmt wurde, dass zu dem Berechnungszeitpunkt (t_r) in dem momentanen Intervall (T_o) keiner der Schaltzeitpunkte ($t_u^r, t_v^r, t_w^r, t_u^p, t_v^p, t_w^p$) aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt, der bereitgestellte erste Satz von

Schaltzeitpunkten (t_u^p , t_v^p , t_w^p) mit dem zweiten Satz von Schaltzeitpunkten (t_u^r , t_v^r , t_w^r) in einem Speicher (123) überschrieben wird.

- 5
 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei wenn bestimmt wurde, dass zu dem Berechnungszeitpunkt (t_r) in dem momentanen Intervall (T_o) zumindest einer der Schaltzeitpunkte (t_u^r , t_v^r , t_w^r , t_u^p , t_v^p , t_w^p) aus dem ersten oder zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt, der zweite Satz von Schaltzeitpunkten (t_u^r , t_v^r , t_w^r) verworfen wird.
- 10
 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei der prädiktive Stromistwert (I_p) durch Addition des erfassten ersten Stromistwertes (I_{-1}) mit einer durch Stromprädiktion ermittelten Stromistwert-Änderung (ΔI_{-1}) gebildet wird.
- 15
 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei das Berechnen des prädiktiven ersten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_u^p , t_v^p , t_w^p) ferner auf einem älteren Stromistwert (I_{-2}) der Maschine basiert, wobei der ältere Stromistwert (I_{-2}) in einem vorherigen Intervall (T_{-2}) erfasst wurde.
- 20
 9. Einrichtung (10) zur Stromregelung eines pulsweitmodulierten Stromrichters für eine elektrische Maschine, insbesondere eines pulsweitmodulierten Wechselrichters für die elektrische Maschine, wobei der Stromrichter und die Maschine mehrere Phasen (u, v, w) haben, aufweisend:
 - a) einen Modulator (12) zur Pulsweitenmodulation einer Spannung jeder Phase (u, v, w);
 - 25
 - b) ein Erfassungsmodul (14), eingerichtet zum Erfassen eines Stromistwertes der Maschine;
 - c) ein Berechnungsmodul (11, 12, 121), eingerichtet zum Berechnen, vorzugsweise während eines ersten Intervalls (T_{-1}), eines prädiktiven ersten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_u^p , t_v^p , t_w^p) für Signale zur
 - 30
 Erzeugung der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase (u, v, w) in einem dem ersten Intervall (T_{-1}) folgenden momentanen Intervall (T_o) basierend zumindest auf einem in dem ersten Intervall (T_{-1}) erfassten ersten Stromistwert (I_{-1}), einem prädiktiven Stromistwert (I_p) und einem Stromsollwert (I_{s0}),

wobei das Berechnungsmodul zum Bestimmen des prädiktiven Stromistwertes (I_p) anhand zumindest des erfassten ersten Stromistwertes (I_{-1}) eingerichtet ist, und

zum Berechnen, vorzugsweise während des momentanen Intervalls (T_o), eines zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_u^r, t_v^r, t_w^r) für Signale zur Erzeugung der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase (u, v, w) in dem momentanen Intervall (T_o) basierend zumindest auf einem in dem momentanen Intervall (T_o) erfassten momentanen Stromistwert (I_o) und dem Stromsollwert (I_{so}),

wobei ein Entscheider (124) des Modulators (12) eingerichtet ist zum Bestimmen, ob bis zu einem Berechnungszeitpunkt (t_r), zu welchem die Berechnung des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_u^r, t_v^r, t_w^r) in dem momentanen Intervall (T_o) abgeschlossen ist, keiner der Schaltzeitpunkte ($t_u^r, t_v^r, t_w^r, t_u^p, t_v^p, t_w^p$) aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt ($t_u^p > t_r, t_v^p > t_r, t_w^p > t_r, t_u^r > t_r, t_v^r > t_r, t_w^r > t_r$);

d) ein Ausgabemodul (12, 123), eingerichtet

zum Bereitstellen des ersten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_u^p, t_v^p, t_w^p) für Signale zur Erzeugung der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase (u, v, w) in dem momentanen Intervall (T_o) an den Modulator (12), wenn durch den Entscheider (124) bestimmt wird, dass zu dem Berechnungszeitpunkt (t_r) in dem momentanen Intervall (T_o) zumindest einer der Schaltzeitpunkte ($t_u^r, t_v^r, t_w^r, t_u^p, t_v^p, t_w^p$) aus dem ersten oder zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt, und

zum Bereitstellen des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_u^r, t_v^r, t_w^r) für Signale zur Erzeugung der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase (u, v, w) in dem momentanen Intervall (T_o) an den Modulator (12), wenn durch den Entscheider (124) bestimmt wird, dass zu dem Berechnungszeitpunkt (t_r) in dem momentanen Intervall (T_o) keiner der Schaltzeitpunkte ($t_u^r, t_v^r, t_w^r, t_u^p, t_v^p, t_w^p$) aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt.

10. Einrichtung (10) nach Anspruch 9, wobei das Berechnungsmodul (11, 12, 121) ferner eingerichtet ist
- zum Berechnen, während des momentanen Intervalls (T_0), eines prädiktiven dritten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_u^p , t_v^p , t_w^p) für Signale zur Erzeugung der pulsweitenmodulierten Spannung jeder Phase (u, v, w) in einem dem momentanen Intervall folgenden zukünftigen Intervall (T_{+1}) basierend zumindest auf dem erfassten momentanen Stromistwert, einem prädiktiven zukünftigen Stromistwert und einem Stromsollwert, und
- zum Berechnen des prädiktiven zukünftigen Stromistwertes zumindest anhand des erfassten momentanen Stromistwertes.
11. Einrichtung (10) nach Anspruch 9 oder 10, wobei das Berechnungsmodul (11, 12, 121) eine digitale Logik, insbesondere innerhalb eines FPGAs umfasst.
12. Einrichtung (10) nach einem der Ansprüche 9 bis 11, ferner aufweisend ein Prädiktionsmodul (11, 12, 121), eingerichtet zum Ermitteln des prädiktiven Stromistwertes (I_P , I_{P+1}).
13. Einrichtung (10) nach einem der Ansprüche 9 bis 12, ferner aufweisend ein Speicherelement zur Speicherung des berechneten ersten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_u^p , t_v^p , t_w^p), und wobei der Entscheider eingerichtet ist, um ein Überschreiben des gespeicherten ersten Satz von Schaltzeitpunkten (t_u^p , t_v^p , t_w^p) mit dem zweiten Satz von Schaltzeitpunkten zu veranlassen, wenn bestimmt wurde, dass zu dem Berechnungszeitpunkt (t_r) in dem momentanen Intervall (T_0) keiner der Schaltzeitpunkte (t_{ur} , t_{vr} , t_{wr} , t_{up} , t_{vp} , t_{wp}) aus dem ersten und zweiten Satz von Schaltzeitpunkten in der Vergangenheit liegt.
14. Einrichtung (10) nach einem der Ansprüche 9 bis 13, wobei die Einrichtung (10) eingerichtet ist, zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1-8.
15. Einrichtung (10) nach einem der Ansprüche 9 bis 14, ferner aufweisend: einen Regler (11), wobei der Modulator (12) mit einem Ausgang des Reglers (11) verbundenen ist;

eine mit einem Ausgang des Modulators (12) verbundene 3-phasige Endstufe (13), insbesondere ein 3-phasiger Wechselrichter, wobei das Erfassungsmodul (14) mit der 3-phasigen Endstufe (13) verbunden ist, und wobei das Erfassungsmodul (14) zur Bildung eines Regelkreises mit dem Regler (11) verbunden ist;

wobei der Modulator (12) einen Impulsgenerator (122) zur Erzeugung von Pulsmuster für eine Pulsweitenmodulation einer Spannung jeder Phase (u, v, w), einen Transformierer (121), einen Speicher (123) und den Entscheider (124) umfasst,

wobei das Erfassungsmodul (14) eingerichtet ist, einen Stromistwert (I_o , I_{-1}) der Maschine in dem ersten und in dem momentanen Intervall (T_o , T_{-1}) zu erfassen;

wobei der Regler (11) und der Transformierer (121) eingerichtet sind, den prädiktiven ersten Satz von Schaltzeitpunkten (t_u^p , t_v^p , t_w^p) zu berechnen;

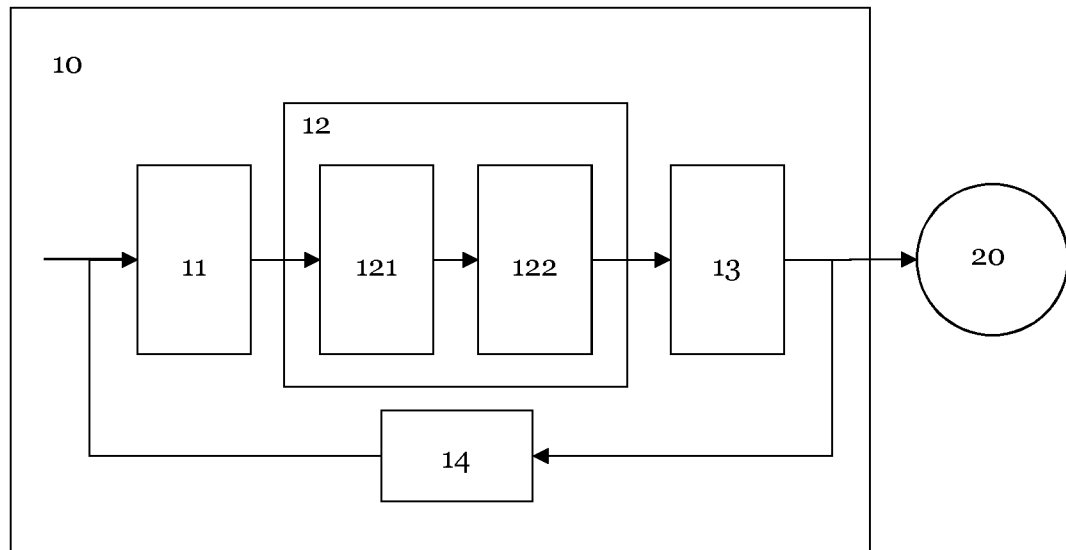
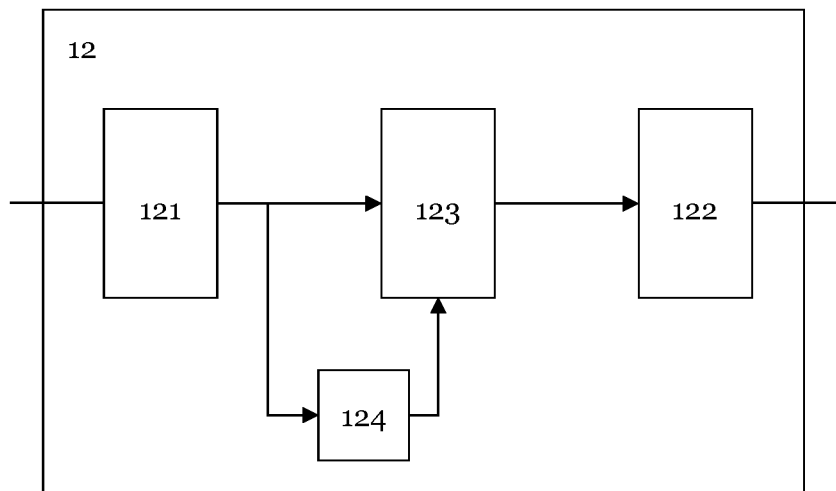
wobei der Speicher eingerichtet ist, den ersten Satz von Schaltzeitpunkten (t_u^p , t_v^p , t_w^p) in dem momentanen Intervall (T_o) bereitzustellen;

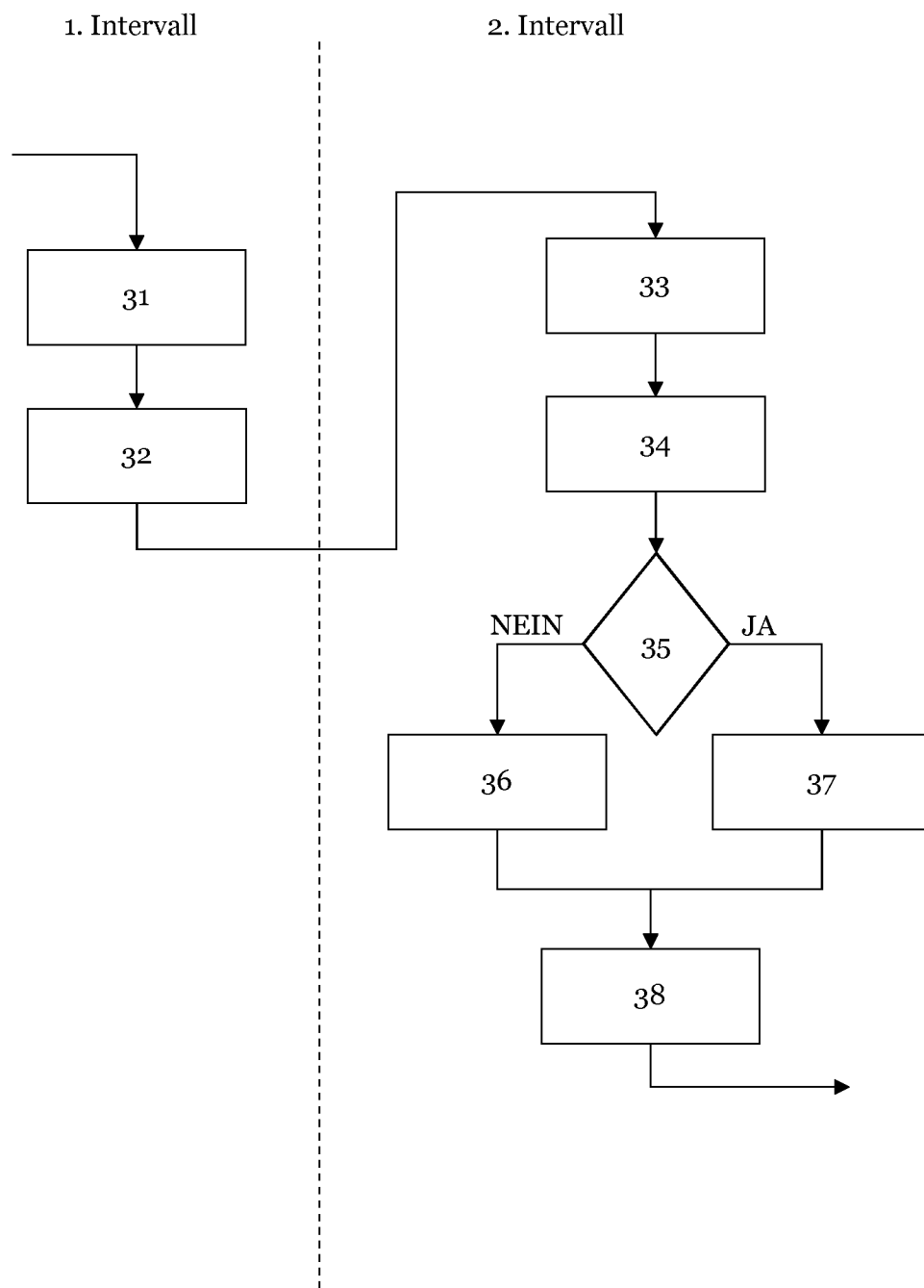
wobei der Regler (11) und der Transformierer (121) eingerichtet sind, den zweiten Satz von Schaltzeitpunkten (t_u^r , t_v^r , t_w^r) zu berechnen;

wobei der Entscheider eingerichtet ist, den Berechnungszeitpunkt (t_r) mit jedem Schaltzeitpunkt des zweiten Satzes von Schaltzeitpunkten (t_u^r , t_v^r , t_w^r) zu vergleichen;

wobei der Entscheider ferner eingerichtet ist, wenn entsprechend des Vergleichs der Berechnungszeitpunkt (t_r) vor jedem der Schaltzeitpunkte (t_u^r , t_v^r , t_w^r , t_u^p , t_v^p , t_w^p) in dem momentanen Intervall (T_o) liegt, ein Steuersignal auszugeben, um zu veranlassen, dass der zweite Satz von Schaltzeitpunkten (t_u^r , t_v^r , t_w^r) an dem Impulsgenerator (122) zur Erzeugung des Pulsmusters in dem momentanen Intervall (T_o) anliegt; und

wobei der Entscheider ferner eingerichtet ist, wenn, entsprechend des Vergleichs, der Berechnungszeitpunkt (t_r) nicht vor jedem Schaltzeitpunkt (t_u^r , t_v^r , t_w^r , t_u^p , t_v^p , t_w^p) in dem momentanen Intervall (T_o) liegt, ein Steuersignal auszugeben, um zu veranlassen, dass der erste Satz von Schaltzeitpunkten (t_u^p , t_v^p , t_w^p) an dem Impulsgenerator (122) zur Erzeugung der Pulsmuster in dem momentanen Intervall (T_o) anliegt.

**Fig. 1****Fig. 2**

**Fig. 3**

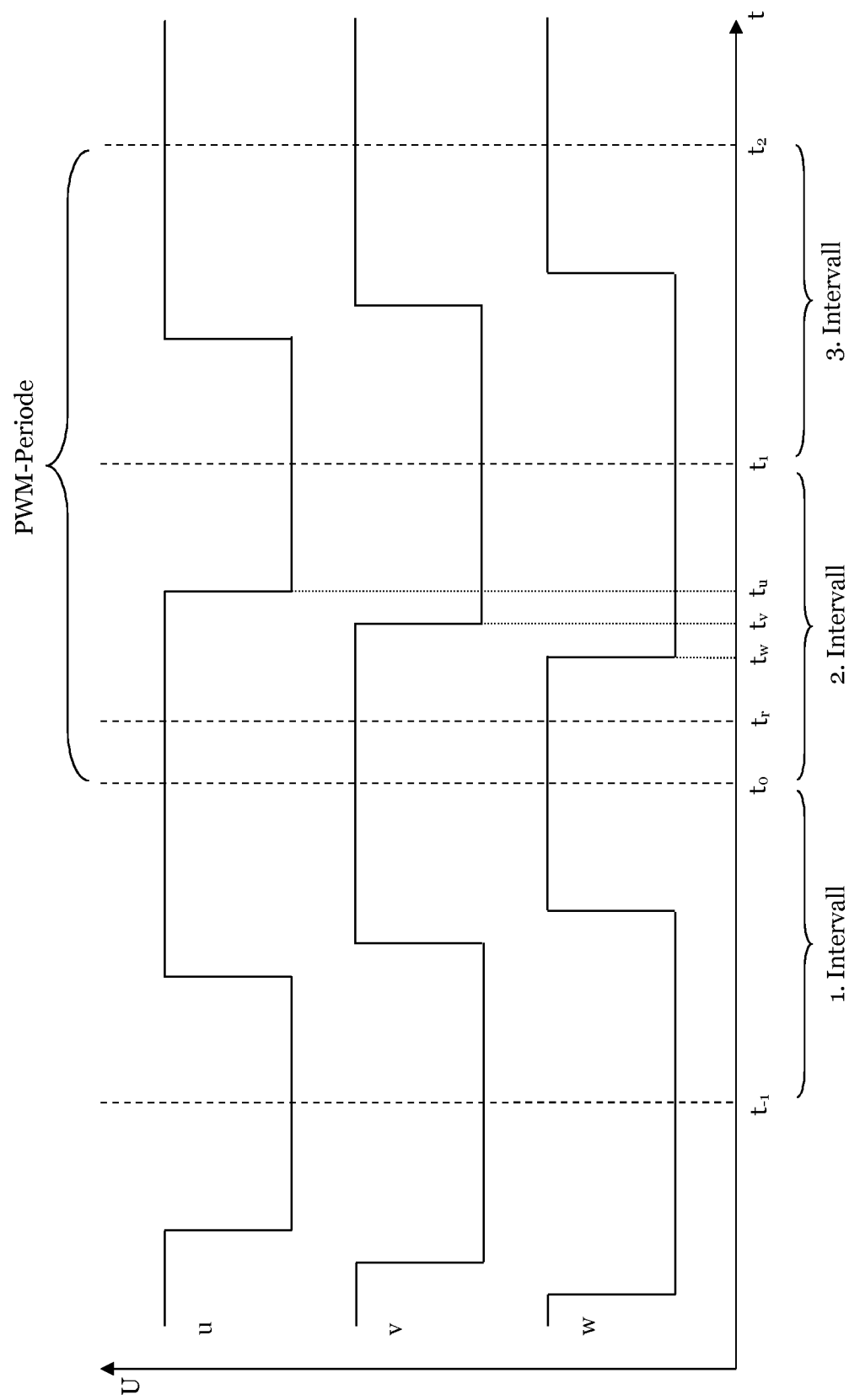


Fig. 4

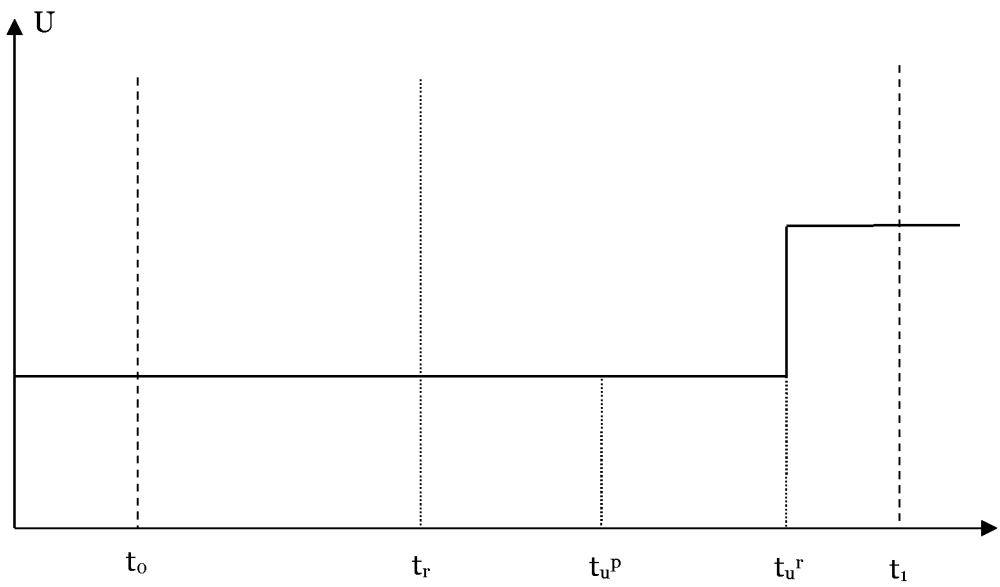


Fig. 5

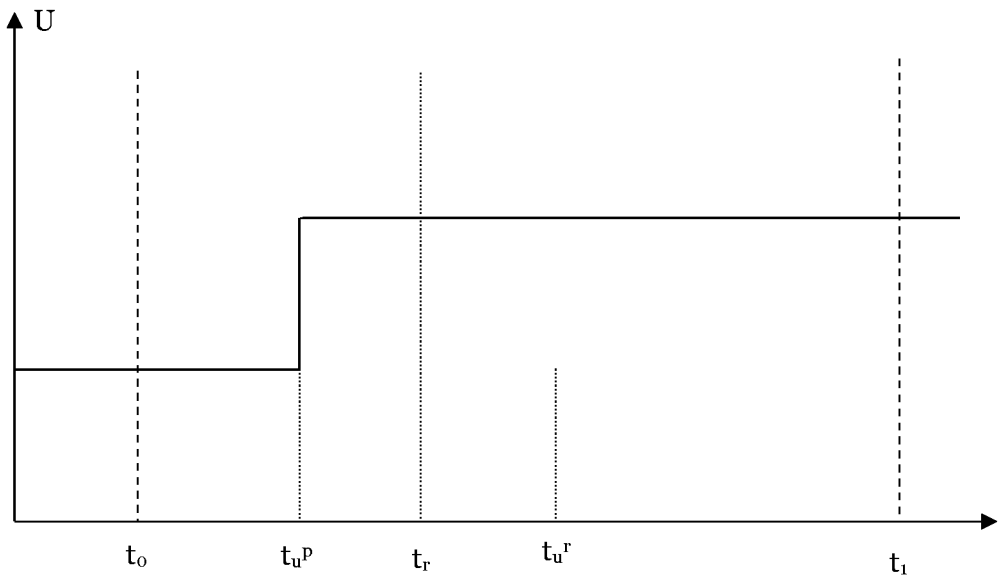


Fig. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/053231A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. H02P21/22 H02P27/08
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
H02P

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FLORIAN SENICAR ET AL: "Enhanced bandwidth current controller for FPGA based inverter drives - a detailed analysis and implementation", IECON 2012 - 38TH ANNUAL CONFERENCE ON IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, IEEE, 25 October 2012 (2012-10-25), pages 1775-1780, XP032281280, DOI: 10.1109/IECON.2012.6388932 ISBN: 978-1-4673-2419-9 the whole document ----- -/--	1-15



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

3 May 2017

Date of mailing of the international search report

16/05/2017

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Schneider, Gernot

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/053231

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EUNSOO JUNG ET AL: "FPGA-based motion controller with a high bandwidth current regulator", POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 2008. PESC 2008. IEEE, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 15 June 2008 (2008-06-15), pages 3043-3047, XP031300425, ISBN: 978-1-4244-1667-7 the whole document -----	1-15
A	US 2015/306962 A1 (RANSOM RAY M [US]) 29 October 2015 (2015-10-29) the whole document -----	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/053231

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2015306962 A1	29-10-2015	CN 105048784 A US 2015306962 A1	11-11-2015 29-10-2015

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. H02P21/22 H02P27/08
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 H02P

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	FLORIAN SENICAR ET AL: "Enhanced bandwidth current controller for FPGA based inverter drives - a detailed analysis and implementation", IECON 2012 - 38TH ANNUAL CONFERENCE ON IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, IEEE, 25. Oktober 2012 (2012-10-25), Seiten 1775-1780, XP032281280, DOI: 10.1109/IECON.2012.6388932 ISBN: 978-1-4673-2419-9 das ganze Dokument ----- -/--	1-15



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

3. Mai 2017

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

16/05/2017

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Schneider, Gernot

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	EUNSOO JUNG ET AL: "FPGA-based motion controller with a high bandwidth current regulator", POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 2008. PESC 2008. IEEE, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 15. Juni 2008 (2008-06-15), Seiten 3043-3047, XP031300425, ISBN: 978-1-4244-1667-7 das ganze Dokument -----	1-15
A	US 2015/306962 A1 (RANSOM RAY M [US]) 29. Oktober 2015 (2015-10-29) das ganze Dokument -----	1-15

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

PCT/EP2017/053231

Formblatt PCT/ISA/210 (Anhang Patentfamilie) (April 2005)