

(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

25. September 2014 (25.09.2014)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer

WO 2014/147111 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

B60L 15/20 (2006.01) H02P 23/00 (2006.01)

G05B 19/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2014/055482

(22) Internationales Anmeldedatum:
19. März 2014 (19.03.2014)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
A 50188/2013 19. März 2013 (19.03.2013) AT

(71) Anmelder: AVL LIST GMBH [AT/AT]; Hans-List-Platz
1, A-8020 Graz (AT).

(72) Erfinder: ANTALOE, Ciprian; 5 Maplin Close,
Coventry, West Midlands CV4 8LT (GB).

(74) Anwalt: BABELUK, Michael; Mariahilfer Gürtel 39/17,
A-1150 Wien (AT).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK,

DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,
GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU,
RW, 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, SZ,
TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ,
RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY,
CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE,
SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA,
GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz
3)

— vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden
Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen
eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

(54) Title: METHOD FOR CONTROLLING A THREE-PHASE ALTERNATING-CURRENT MACHINE

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUR STEUERUNG EINER DREI-PHASEN-WECHSELSTROMMASCHINE

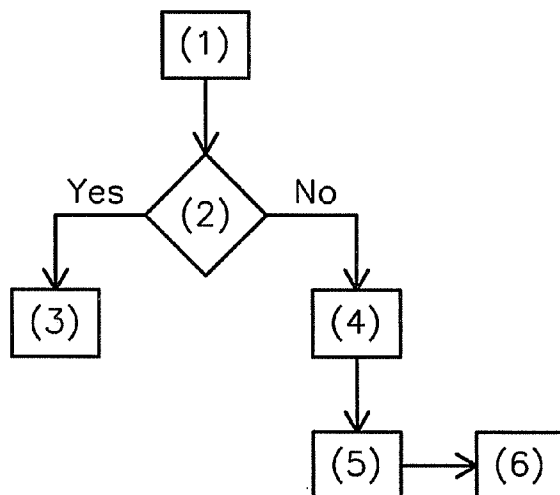


Fig.5

(57) Abstract: The invention relates to a method for
controlling a three-phase alternating-current machine,
in particular for an electrically driven vehicle or a vehicle
roller test stand. Optimal use of the alternating-current
machine can be achieved if a group of several different
control strategies is provided, preferably stored in the motor
controller, at least one operating parameter of the
alternating-current machine and/or of the electric vehicle
and/or external specifications, preferably regarding power
and/or duration and/or range, are detected, a control strategy
is selected from the group of control strategies in
dependence on at least one detected operating parameter of
the alternating-current machine and/or of the electric vehicle
and/or external specifications, and the alternating-current
machine is operated on the basis of said selected control
strategy.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein
Verfahren zur Steuerung einer Drei-Phasen-
Wechselstrommaschine, insbesondere für ein elektrisch
angetriebenes Fahrzeug oder einen Fahrzeugrollenprüfstand.
Ein optimaler Einsatz der Wechselstrommaschine lässt sich
erzielen, wenn eine Gruppe aus mehreren verschiedenen
Steuerungsstrategien bereitgestellt, vorzugsweise in der
Motorsteuerung abgelegt wird, zumindest

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



ein Betriebsparameters der Wechselstrommaschine und/oder des Elektrofahrzeuges und/oder externe Vorgaben, vorzugsweise hinsichtlich Leistung und/oder Dauer und/oder Reichweite, erfasst wird, aus der Gruppe von Steuerungsstrategien eine Steuerungsstrategie in Abhängigkeit zumindest eines erfassten Betriebsparameters der Wechselstrommaschine und/oder des Elektrofahrzeuges und/oder externen Vorgaben ausgewählt wird und die Wechselstrommaschine auf der Basis dieser ausgewählten Steuerungsstrategie betrieben wird.

Verfahren zur Steuerung einer Drei-Phasen-Wechselstrommaschine

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Steuerung einer Drei-Phasen-Wechselstrommaschine, insbesondere für ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug - Hybridfahrzeug oder Elektrofahrzeug - oder einen Fahrzeugrollenprüfstand (Dynamometer).

Der Betrieb von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen wird durch die geringe Energiedichte der mitgeführten Hochspannungsbatterien begrenzt. Während beträchtliche Anstrengungen unternommen werden, die Batterietechnologie zu verbessern, müssen verstärkt auch alle Wirkungsgradverbesserungen von Hilfsystemen des Antriebes wie Leistungselektronik, Motordesign und Motorsteuerung in Betracht gezogen werden.

Für den Betrieb eines Drei-Phasen-Wechselstrommotors sind verschiedene Steuerungsstrategien bekannt.

Die US 5,498,945 A beschreibt ein Verfahren für das maximale Drehmoment pro Ampere für einen Induktionsmotor, wobei geeignete Kombinationen der Ströme und Magnetflüsse der Quadratur-Achsen bzw. Direkt-Achsen gewählt werden.

Die US 6,630,809 B2 offenbart ein System und ein Verfahren zur Steuerung eines Induktionsmotors, wobei die Steuerung auf der Basis Strategie des maximalen Drehmoment pro Ampere und der konstanten gemeinsamen Flussverkettungen erfolgt.

Die Veröffentlichung "Control Strategies and Parameter Compensation for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", Ramin Monajemy, PhD Thesis, Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute, 12. Oktober 2000, beschreibt in Kapitel 5, Seiten 55 bis 94, verschiedene Regelungsstrategien für Permanentmagnet-Synchronmotoren, unter anderem die Strategie des Maximalen Wirkungsgrads, die Strategie des maximalen Drehmoments pro Ampere, die Strategie des Null d-Achsen Stromes, die Strategie des Leistungsfaktors eins und die Strategie der konstanten gemeinsamen Flussverkettungen.

Jede dieser Steuerungsstrategien kann allerdings nur für eine bestimmte Betriebsweise der Wechselstrommaschine optimal eingesetzt werden, während in anderen Betriebsarten Nachteile in Kauf genommen werden müssen. In bekannten Steuerungen von Elektromotoren wird üblicherweise nur eine einzige vordefinierte der bekannten Steuerungsstrategien eingesetzt. Jede Steuerungsstrategie stellt aber nur einen Kompromiss für verschiedene Betriebsarten dar. Somit müs-

sen im Betrieb abhängig von der spezifisch angewendeten Steuerung meist gravierende Nachteile im Kauf genommen werden.

Aufgabe der Erfindung ist es, diese Nachteile zu vermeiden und ein Verfahren zu entwickeln, welches einen optimalen Betrieb von Drei-Phasen-Wechselstrommaschinen ermöglicht.

Erfindungsgemäß wird dies dadurch erreicht, dass eine Gruppe aus mehreren verschiedenen Steuerungsstrategien bereitgestellt, vorzugsweise in der Motorsteuerung abgelegt wird, dass zumindest ein Betriebsparameter der Wechselstrommaschine und/oder des Elektrofahrzeuges und/oder externe Vorgaben, vorzugsweise hinsichtlich Leistung und/oder Dauer und/oder Reichweite, erfasst wird, und dass aus der Gruppe von Steuerungsstrategien eine Steuerungsstrategie in Abhängigkeit zumindest eines erfassten Betriebsparameters der Wechselstrommaschine und/oder des Elektrofahrzeuges und/oder externen Vorgaben ausgewählt wird und die Wechselstrommaschine auf der Basis dieser ausgewählten Steuerungsstrategie betrieben wird.

Die Steuerungsstrategien sind bevorzugt in der Motorsteuerung abgelegt und werden in Abhängigkeit der jeweiligen Erfordernisse ausgewählt. Nur die jeweils ausgewählte Steuerungsstrategie wird aktiviert, und die Wechselstrommaschine auf der Basis dieser ausgewählten Steuerungsstrategie betrieben.

Die Gruppe von Steuerungsstrategien beinhaltet zumindest zwei - vorzugsweise alle - der folgenden, an sich bekannten Strategien: Strategie des Null-d-Achsen-Stromes, Strategie des maximalen Drehmomentes pro Ampere, Strategie des maximalen Wirkungsgrades, Strategie des Leistungsfaktors eins, Strategie der konstanten gemeinsamen Flussverkettungen.

Jede der bekannten Betriebsstrategien hat gute und weniger gute Einsatzbereiche.

Jede der Steuerungsstrategien wird für definierte Auswahlkriterien, vorzugsweise verschiedene Betriebsparameters der Wechselstrommaschine und/oder des Elektrofahrzeuges und/oder Lastanforderungen, bewertet, wobei die Bewertung der Auswahl der Steuerungsstrategien zu Grunde gelegt wird. Zumindest ein Auswahlkriterium kann dabei aus der Gruppe der Beziehungen Drehmoment/Drehzahl, Drehmoment/Strom, Strom/Drehzahl, Leistung/Drehzahl, Gegenelektromotorische Kraft (bzw. Gegenspannung)/Drehzahl, Leistungsfaktor/Drehzahl, der Luftspalt-Magnetflussverkettung (bzw. Luftspaltverkettung), und der Ausführungskomplexität (bzw. Komplexität) ausgewählt werden.

Die Auswahl der Steuerungsstrategie kann mittels eines adaptiven Algorithmus - vorzugsweise unter Verwendung von künstlicher Intelligenz, Fuzzy Logik und/oder neuronalen Netzwerken - erfolgen.

Vorzugsweise wird während des laufenden Betriebes der Wechselstrommaschine kontinuierlich oder diskontinuierlich überprüft, ob diese mit der für die jeweilige Situation optimalen Steuerungsstrategie betrieben wird. Wenn die Prüfung auf Grund eines Auswahlkriteriums aus der Gruppe der Beziehungen Drehmoment/Drehzahl, Drehmoment/Strom, Strom/Drehzahl, Leistung/Drehzahl, Gegenelektromotorische Kraft/Drehzahl, Leistungsfaktor/Drehzahl, der Luftspalt-Magnetflussverkettung, und der Ausführungskomplexität ergibt, dass eine andere Steuerungsstrategie passender ist, dann wird die Steuerungsstrategie geändert und - in Abhängigkeit zumindest eines Betriebsparameters der Wechselstrommaschine und/oder des Elektrofahrzeuges und/oder von externen Vorgaben - eine passende Steuerungsstrategie ausgewählt und die Wechselstrommaschine mit dieser ausgewählten Steuerungsstrategie weiterbetrieben. Dadurch kann die Steuerungsstrategie optimal an die jeweilige Situation und die jeweiligen Anforderungen angepasst werden.

Beispielsweise wird im Normalbetrieb, insbesondere bei Hybridfahrzeugen, die Strategie des Leistungsfaktors eins oder die Strategie der konstanten gemeinsamen Magnetflussverkettungen für Drei-Phasen-Wechselstrommaschinen ausgewählt. Die durch die niedrigere Luftspalt-Magnetflussverkettung ermöglichte hohe Basisdrehzahl verbessert die Fahrbarkeitseigenschaften des Fahrzeugs bei hohen Drehzahlen der Brennkraftmaschine wegen dem bei konstantem Drehmoment anhaltenden Betrieb der elektrischen Maschine(n). Zusätzlich kann die Lebenszeit der Wechselstrommaschine mit der Strategie des Leistungsfaktors eins oder der Strategie der konstanten gemeinsamen Magnetflussverkettungen maximiert werden, da diese Strategien niedrige Stromschwankungen im elektrischen Fahrbetrieb und einen geringen Einschaltstrom ermöglichen. Sobald die Drehzahl der Brennkraftmaschine sich verringert (beispielsweise Einlegen eines hohen Ganges bei hoher Fahrzeuggeschwindigkeit), wird die Drehzahl der Motorwelle somit reduziert und für den weiteren Betrieb entweder die Strategie des maximalen Drehmomentes pro Ampere oder die Strategie des maximalen Wirkungsgrades ausgewählt, um einen energieeffizienten Betrieb des elektrischen Hochspannungssystems zu ermöglichen, wenn das Fahrzeug mit hohem Gang betrieben wird.

Für hohe Beschleunigungsanforderungen kann die Strategie des maximalen Drehmomentes pro Ampere oder die Strategie des maximalen Wirkungsgrades ausgewählt werden.

Für maximale Leistung und verbesserte Fahrdynamik kann beispielsweise der Fahrer auf Knopfdruck die Strategie des maximalen Drehmomentes pro Ampere auswählen um ein maximales Drehmoment/Drehzahlverhältnis zu erreichen.

Andererseits ist es vorteilhaft, wenn bei drohendem Energieengpass und/oder einer vorgegebenen Streckenlänge über einer kritischen Länge die Strategie des maximalen Wirkungsgrades ausgewählt wird. Wird beispielsweise vom Fahrer, etwa unter Verwendung einer Navigationseinheit des Fahrzeuges, ein Fahrziel vorgegeben, welches sich nahe der Grenze der durch den Ladezustand der Batterie definierten maximalen Reichweite befindet, so kann durch Auswahl der Strategie des maximalen Wirkungsgrades Energie gespart und somit die Reichweite optimiert werden.

Alternativ zur Anwendung in Elektrofahrzeugen kann das erfindungsgemäße Verfahren auch bei stationären Anwendungen, beispielsweise bei Fahrzeug-Rollenprüfständen (Dynamometer) eingesetzt werden, um definierte Fahrszenarien zu simulieren. Eine adaptive Steuerungsstrategie für den Elektromotor des Dynamometers kann dabei adaptiv das geplante Fahrszenario untersuchen und jeweils die für das jeweilige Fahrszenario optimale Steuerungsstrategie auswählen und anwenden. Beispielsweise kann in einem Abschnitt des Fahrszenarios mit simulierter Bergauffahrt die Steuerungsstrategie des maximalen Drehmomentes pro Ampere ausgewählt werden. In simulierten Stadt-Fahrszenarien kann dagegen die Strategie des maximalen Wirkungsgrades oder die Strategie des Leistungsfaktors eins oder die Strategie der konstanten gemeinsamen Flussverkettenungen ausgewählt werden, um Energie zu sparen oder die Lebensdauer von Komponenten des Dynamometers zu erhöhen.

Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich insbesondere für Drei-Phasen-Asynchron- und Synchronmaschinen, sowohl für drehmomentgesteuerte-, als auch für drehzahlgesteuerte Systeme. Bei Drehmomentsteuerung ergibt sich die Motordrehzahl durch die an der Motorwelle anliegenden Last. Bei Drehzahlsteuerung ergibt sich das Drehmoment durch die an der Motorwelle anliegende Last.

Das Verfahren, insbesondere das Erfassen der Betriebsparameter, das Prüfen der aktuellen Steuerungsstrategie, die Auswahl der optimalen Betriebsstrategie, das Auffinden eines optimalen Umschaltzeitpunktes für die Steuerungsstrategie, etc. kann vollkommen automatisch über ein Steuerungs- und Überwachungsprogramm durchgeführt werden. Zusätzlich ist es möglich das automatische Steuerungs- und Überwachungsprogramm der Motorsteuerung durch manuellen Eingriff zu übersteuern, beispielsweise, wenn vom Fahrer spontan eine hohe Leistung gefordert wird.

Ist während einer bekannten Fahrtstrecke ein Wechsel der Steuerungsstrategie erforderlich, so kann automatisch der optimale Zeitpunkt für einen Wechsel geplant und durchgeführt werden, beispielsweise auf Grund einer vorgegebenen Topografie oder externen Informationen wie Verkehrslage etc.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand der Figuren näher erläutert. Es zeigen:

- Fig. 1 normalisierte Leistungskennlinien der Steuerungsstrategie des Null-d-Achsen-Stromes;
- Fig. 2 normalisierte Leistungskennlinien der Steuerungsstrategie des Leistungsfaktors eins;
- Fig. 3 normalisierte Leistungskennlinien der Steuerungsstrategie der konstanten gemeinsamen Flussverkettungen;
- Fig. 4 normalisierte Leistungskennlinien der Steuerungsstrategie des maximalen Drehmomentes pro Ampere; und
- Fig. 5 das erfindungsgemäße Verfahren in einem Blockdiagramm.

Die Motorsteuerung steuert die Stärke des in die elektrische Maschine fließenden Stromes so, dass das Drehmoment der elektrischen Maschine einem bestimmten Sollwert oder Bezugsgröße folgt. Der Regelalgorithmus zur Steuerung des Stromes ist auf der Basis eines mathematischen Modells der elektrischen Maschine entwickelt. Das am häufigsten verwendete mathematische Modell der elektrischen Maschine ist aus den folgenden Gleichungen (1) bis (4) zusammengesetzt und wird auch als "d-q-System-Maschinenmodell" bezeichnet. Die Gleichungen (1) bis (5) sind spezifisch für eine Innenlaufende Permanentmagnet-Synchronmaschine. Andere 3-Phasen-Wechselstrommaschinen weisen eine Darstellung im d-q System auf, welche von diesem Gleichungssystem geringfügig abweicht.

$$V_q = I_q \cdot R_s + P \cdot \omega_r \cdot (\varphi_{PM} + L_d \cdot I_d) + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} \quad (1)$$

$$V_d = I_d \cdot R_s - P \cdot \omega_r \cdot L_q \cdot I_q + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} \quad (2)$$

$$\varphi_d = \varphi_{PM} + L_d \cdot I_d; \quad \varphi_q = L_q \cdot I_q \quad (3)$$

$$T_e = 1.5 \cdot P \cdot I_q \cdot \varphi_{PM} + 1.5 \cdot P \cdot (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (T_e - B \cdot \omega_r - T_L) \quad (5)$$

Dieses mathematische Gleichungssystem hat den Vorteil, dass die Darstellung der Wechselstrommaschine vereinfacht wird und dass die Steuerung leichter zu erfassen und anzuwenden ist. In der Tat ist das "d-q-System-Maschinenmodell

eine Gleichstrom-äquivalente Darstellung der Wechselstrom-Spannungen und -Ströme. Daher wird dieses Gleichungssystem bevorzugt für die Umsetzung der Wechselstrommotorensteuerung verwendet.

Innerhalb des nicht-linearen d-q-Systems können verschiedene Kombinationen der d- und q-Achsen-Ströme I_d und I_q zu der selben Motordrehzahl ω und dem selben Drehmoment T_e führen. Die einfachste Kombination der d- und q-Achsen-Ströme I_d und I_q besteht darin, I_d gleich Null zu setzen, wodurch das Drehmoment eine lineare Funktion des q-Achsen Stromes I_q wird. Diese Methode ist die übliche bei Motorsteuerungen verwendete Steuerungsmethode wegen der leichten Umsetzbarkeit, und wird im allgemeinen als "Steuerungsstrategie des Null-d-Achsen-Stromes ZDAC" bezeichnet.

Allerdings ist dies nur eine von vielen Kombinationsmöglichkeiten der d- und q-Achsen-Ströme I_d und I_q , welche verwendet werden können, um dasselbe Niveau des Drehmomentes T_e zu erhalten. So können andere Kombinationen von d- und q-Achsen-Ströme I_d und I_q für dasselbe Drehmoment T_e eingesetzt werden, um spezifische Aspekte hinsichtlich der Betriebes der Wechselstrommaschine zu optimieren.

Eine Variable, welche man zu maximieren wünscht, ist das Ausmaß des Drehmomentes T_e , welches die Wechselstrommaschine erzeugt, bezogen auf die Höhe des Stromes, welcher von der Energiespeichereinheit für die Versorgung der Wechselstrommaschine eingesetzt wird. Diese Methode, die auch als "Steuerungsstrategie des maximalen/optimalen Drehmomentes pro Ampere MTA" bekannt ist, beruht auf der nicht-linearen Beziehung, welche durch die obige Gleichung (4) beschrieben wird, um die besten Kombinationen der d- und q-Achsen-Ströme I_d und I_q hinsichtlich des Drehmomentes T_e zu erhalten, also dem größten Verhältnis zwischen T_e und der Vektorsumme der Ströme $\sqrt{I_q^2 + I_d^2}$. Diese Paare der d- und q-Achsen-Ströme I_d und I_q hinsichtlich des Drehmomentes T_e können entweder analytisch durch Lösen der Gleichung (4), oder empirisch durch absolvieren von geeigneten Testläufen der Wechselstrommaschine bestimmt werden.

Eine andere Variable, die man zu maximieren wünscht, ist der energetische Wirkungsgrad der Wechselstrommaschine. Um dies zu erreichen, hat man die Paare mit dem niedrigsten Wert der Ausdrücke $\sqrt{I_q^2 + I_d^2}$ und $\sqrt{V_q^2 + V_d^2}$ aufzusuchen, wodurch sowohl das Drehmoment T_e , als auch die Drehzahl ω der Wechselstrommaschine maximiert wird. Dadurch kann die maximale mechanische Leistung (Produkt aus Drehmoment T_e und Drehzahl ω), bei geringster elektrischer Leistung (Produkt aus Strom und Spannung) erzielt werden. Dieses Verfahren, welches auch als "Steuerungsstrategie des maximalen Wirkungsgrades ME" be-

kannt ist, kann auf der analytischen Berechnung der besten d- und q-Achsen-Ströme I_d und I_q basieren oder experimentell an der Wechselstrommaschine durchgeführt werden.

Basierend auf einer ähnlichen Vorgangsweise wie bei der Steuerungsstrategie des maximalen/optimalen Drehmomentes pro Ampere MTA oder der Steuerungsstrategie des maximalen Wirkungsgrades ME, lassen sich auch andere Aspekte des Wechselstrommaschinebetriebes und/oder der Leistungselektronikeinheit (DC/AC Inverter) maximieren. So ist unter der Bezeichnung "Steuerungsstrategie des Leistungsfaktors eins UPF" eine Methode bekannt, welche auf Paaren der d- und q-Achsen-Ströme I_d und I_q basiert, die zu in-Phase befindlichen Wechselspannungen und Wechselströmen in der Leistungselektronikeinheit führen. Das Verfahren "Steuerungsstrategie der konstanten gemeinsamen Flussverkettungen (CMFL)" zielt darauf ab Paare der d- und q-Achsen-Ströme I_d und I_q zu finden, bei denen der gesamte magnetische Fluss $\sqrt{\varphi_q^2 + \varphi_d^2}$ konstant bleibt. Auch diese beiden Methoden können analytisch oder experimentell gelöst werden.

Somit ergeben sich folgende bekannte Steuerungsstrategien, welche hier in Betracht gezogen werden:

1.) Steuerungsstrategie des Null-d-Achsen-Stromes (ZDAC)

Fig. 1 zeigt normalisierte Leistungskennlinien der Steuerungsstrategie des Null-d-Achsen-Stromes (ZDAC).

Eigenschaften:

- Der Leistungsfaktor verschlechtert sich mit zunehmender Rotordrehzahl und zunehmendem Statorstrom I_s .
- Der niedrigere Leistungsfaktor macht eine höhere VA Bewertung des Umrichters erforderlich.
- Die Steuerungsstrategie des Null-d-Achsen-Stromes (ZDAC) ist geeignet für Anwendungen, welche hohes Drehmoment erfordern.
- Durch lineare Strom-Drehmoment-Beziehung wird eine einfachere Ausführung möglich.

2.) Steuerungsstrategie des Leistungsfaktors eins (UPF)

Fig. 2 zeigt normalisierte Leistungskennlinien der Steuerungsstrategie des Leistungsfaktors eins (UPF).

Eigenschaften:

- Diese Strategie ist nicht optimal für die Erzeugung von hohem Drehmoment.
- Es ist eine niedrige reaktive VA Bewertung erforderlich
- Es ist eine niedrige Versorgungsspannung erforderlich.
- Wegen der verfügbaren Reservespannung, ist die Steuerungsstrategie des Leistungsfaktors Eins (UPF) für Anwendungen zur Reichweitenausdehnung von Fahrzeugen geeignet.

3.) Steuerungsstrategie der konstanten gemeinsamen Flussverkettungen (CMFL)

Fig. 3 zeigt normalisierte Leistungskennlinien der Steuerungsstrategie der konstanten gemeinsamen Flussverkettungen (CMFL).

Eigenschaften:

- Zum Unterschied zu allen anderen Verfahren, kann diese Strategie auch über der Basisdrehzahl verwendet werden
- Bei dieser Strategie wird eine Motorkern-Sättigung vermieden, daher werden das elektrische Antriebsmoment verbessert und hohe Stromübergänge vermieden.
- Der Leistungsfaktor befindet sich nahe bei eins.
- Die Maximaldrehzahl, bei der eine Abschwächung des Flusses erforderlich wird, wird angehoben.

4.) Steuerungsstrategie des maximalen/optimalen Drehmomentes pro Ampere (MTA)

Fig. 4 zeigt normalisierte Leistungskennlinien der Steuerungsstrategie des maximalen Drehmomentes pro Ampere (MTA).

Eigenschaften:

- Diese Strategie ist geeignet für Hoch-Schenkelmaschinen ($L_q \gg L_d$)
- Verglichen mit einer Null-d-Achsen-Stromes-Steuerung kann eine etwa 11%-tige Drehmomentsteigerung erreicht werden.

- Schlechte Umrichterauslastung (d.h. es ist eine hohe VA-Bewertung erforderlich).

5.) Steuerungsstrategie des maximalen Wirkungsgrades (ME)

Die Steuerungsstrategie des maximalen Wirkungsgrades (ME) basiert auf der Minimierung der Verlustfunktion:

$$P_l = 1.5 \cdot R_s \cdot (i_q^2 + i_d^2) + \frac{1.5}{R_c} \cdot \omega_r^2 \cdot [(L_q \cdot I_q)^2 + (\varphi_{PM} + L_d \cdot I_d)^2] \quad (6)$$

Fig. 5 zeigt das erfindungsgemäße Verfahren in einem Blockdiagramm.

In einem Schritt 1 werden Umgebungs- und Randbedingungen, wie Außentemperatur, Fahrpedaldruck, oder - bei Anwendung an einem Rollenprüfstand - der Typus des Dynamometer - Fahrzyklus erfasst.

In einem Schritt 2 wird abgefragt, ob die aktuell angewendete Steuerungsstrategie auf Grund der in Schritt 1 festgestellten Umgebungs- und Randbedingungen und auch basierend auf dem Auswahlkriterium aus der Gruppe der Beziehungen Drehmoment/Drehzahl, Drehmoment/Strom, Strom/Drehzahl, Leistung/Drehzahl, Gegenelektromotorische Kraft/Drehzahl, Leistungsfaktor/Drehzahl, der Luftspalt-Magnetflussverkettung, und der Ausführungskomplexität tatsächlich die optimale Strategie ist. Wenn dies der Fall ist ("Yes") erfolgt in einem Schritt 3 die Rückkehr zu Schritt 1.

Wenn die Abfrage aus Schritt 2 negativ ausfällt ("No") so wird in einem Schritt 4 ein adaptiver Steuerungsstrategie-Algorithmus gestartet, um die für die in Schritt 1 erfassten Bedingungen am besten geeignete Steuerungsstrategie zu ermitteln.

Im Schritt 5 wird der optimale Zeitpunkt für einen Wechsel der Steuerungsstrategie ermittelt und bis zu diesem Zeitpunkt abgewartet.

In Schritt 6 erfolgt der Wechsel zu der in Schritt 4 ermittelten Steuerungsstrategie.

Nomenklatur

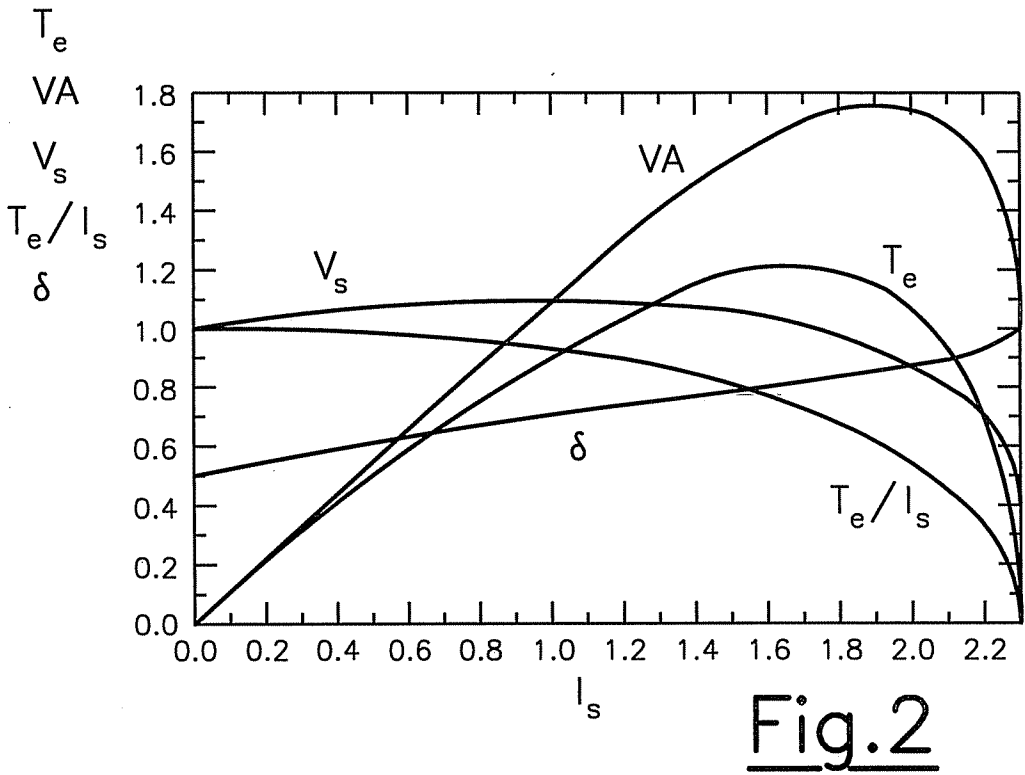
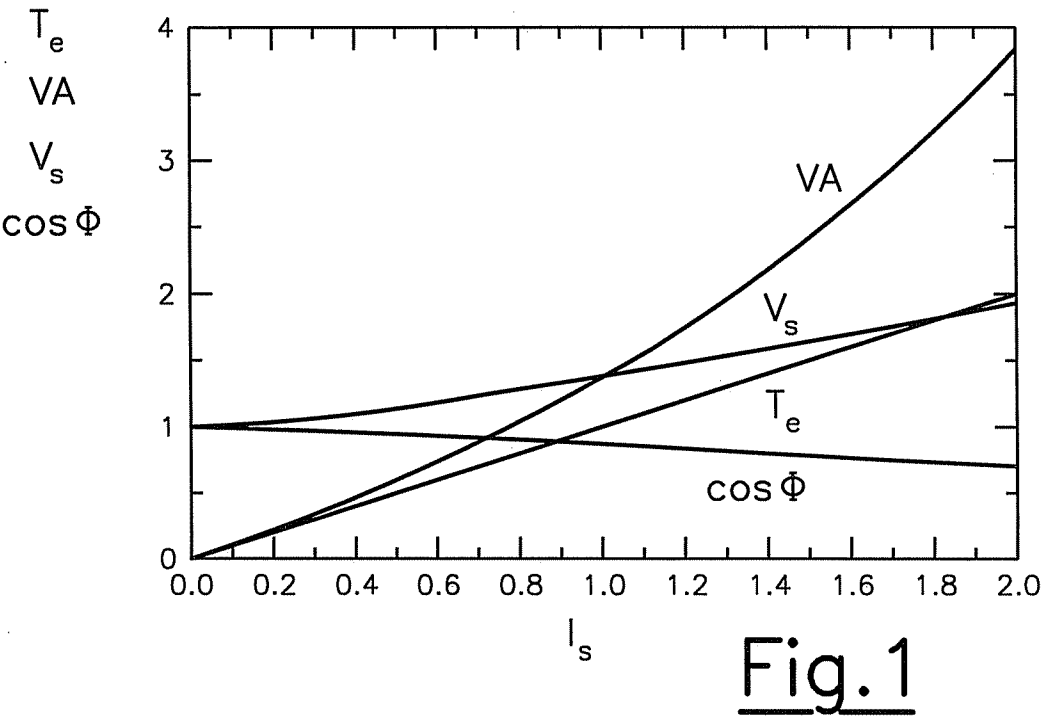
AC	Wechselstrom
B	Reibungskoeffizient
DC	Gleichstrom
V_q	q-Achsen Spannung (bezüglich des "d-q" Wechselstrommaschinen-Modells)
I_q	q-Achsen Strom (bezüglich des "d-q" Wechselstrommaschinen-Modells)
L_q	q-Achsen Induktanz (bezüglich des "d-q" Wechselstrommaschinen-Modells)
V_d	d-Achsen Spannung (bezüglich des "d-q" Wechselstrommaschinen-Modells)
I_d	d-Achsen Strom (bezüglich des "d-q" Wechselstrommaschinen-Modells)
L_d	d-Achsen Induktanz (bezüglich des "d-q" Wechselstrommaschinen-Modells)
I_s	Statorstrom
V_s	Statorspannung
J	Rotormassenträgheit
P_l	Leistungsverluste
VA	Leistung
R_c	Kernwiderstand der Wechselstrommaschine
R_s	Statorwiderstand der Wechselstrommaschine
ω_r	mechanische Drehzahl
Φ_{PM}	Permanentmagnetischer Fluss der Wechselstrommaschine
Φ_q	q-Achsen-generierter Fluss (bezüglich des "d-q" Wechselstrommaschinen-Modells)
Φ_d	d-Achsen-generierter Fluss (bezüglich des "d-q" Wechselstrommaschinen-Modells)
δ	Drehmomentwinkel zwischen Rotorfeldposition und Stator-Stromzeigerposition
Φ	Phasenwinkel zwischen sinusförmiger Spannung und sinusförmigem Strom
T_e	Drehmoment der Wechselstrommaschine
T_i	Lastdrehmoment

P A T E N T A N S P R Ü C H E

1. Verfahren zur Steuerung einer Drei-Phasen-Wechselstrommaschine, insbesondere für ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug oder einen Fahrzeugrollenprüfstand, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Gruppe aus mehreren verschiedenen Steuerungsstrategien bereitgestellt, vorzugsweise in der Motorsteuerung abgelegt wird, dass zumindest ein Betriebsparameter der Wechselstrommaschine und/oder des Elektrofahrzeuges und/oder externe Vorgaben, vorzugsweise hinsichtlich Leistung und/oder Dauer und/oder Reichweite, erfasst wird, und dass aus der Gruppe von Steuerungsstrategien eine Steuerungsstrategie in Abhängigkeit zumindest eines erfassten Betriebsparameters der Wechselstrommaschine und/oder des Elektrofahrzeuges und/oder externen Vorgaben ausgewählt wird und die Wechselstrommaschine auf der Basis dieser ausgewählten Steuerungsstrategie betrieben wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Gruppe von Steuerungsstrategien zumindest zwei - vorzugsweise alle - der folgenden Strategien beinhaltet: Strategie des Null-d-Achsen-Stromes (ZDAC), Strategie des Leistungsfaktors eins (UPF), Strategie der konstanten gemeinsamen Flussverkettungen (CMFL), Strategie des maximalen Drehmomentes pro Ampere (MTA), Strategie des maximalen Wirkungsgrades (ME).
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass jede der Steuerungsstrategien für definierte Auswahlkriterien, vorzugsweise verschiedene Betriebsparameters der Wechselstrommaschine und/oder des Elektrofahrzeuges und/oder Lastanforderungen, bewertet wird, und dass die Bewertung der Auswahl der Steuerungsstrategien zu Grunde gelegt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest ein Auswahlkriterium aus der Gruppe Drehmoment/Drehzahl, Drehmoment/Strom, Strom/Drehzahl, Leistung/Drehzahl, Gegenspannung/Drehzahl, Luftspaltverkettung, Leistungsfaktor/Drehzahl und Komplexität ausgewählt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Auswahl der Steuerungsstrategie mittels eines adaptiven Algorithmus - vorzugsweise unter Verwendung von künstlicher Intelligenz, Fuzzy Logik und/oder neuronalen Netzwerken - erfolgt.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass während des Betriebes der Wechselstrommaschine überprüft wird, ob

diese mit der für die jeweilige Situation optimalen Steuerungsstrategie betrieben wird, und - bei negativem Prüfungsergebnis - die Steuerungsstrategie geändert und - in Abhängigkeit zumindest eines Betriebsparameters der Wechselstrommaschine und/oder des Elektrofahrzeuges und/oder von externen Vorgaben - eine passende Steuerungsstrategie ausgewählt und die Wechselstrommaschine mit dieser ausgewählten Steuerungsstrategie weiterbetrieben wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Normalbetrieb der Drei-Phasen-Wechselstrommaschine, insbesondere bei Hybridfahrzeugen, die Strategie des Leistungsfaktors eins (UPF) oder die Strategie der konstanten gemeinsamen Flussverkettungen (CMFL) ausgewählt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei hohen Lastanforderungen an die Drei-Phasen-Wechselstrommaschine die Strategie des maximalen Drehmomentes pro Ampere (MTA) oder die Strategie des maximalen Wirkungsgrades (ME) ausgewählt wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei drohendem Energieengpass und/oder einer vorgegebenen Streckenlänge über einer kritischen Länge die Strategie des maximalen Wirkungsgrades (ME) ausgewählt wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verfahren automatisch durchgeführt wird.



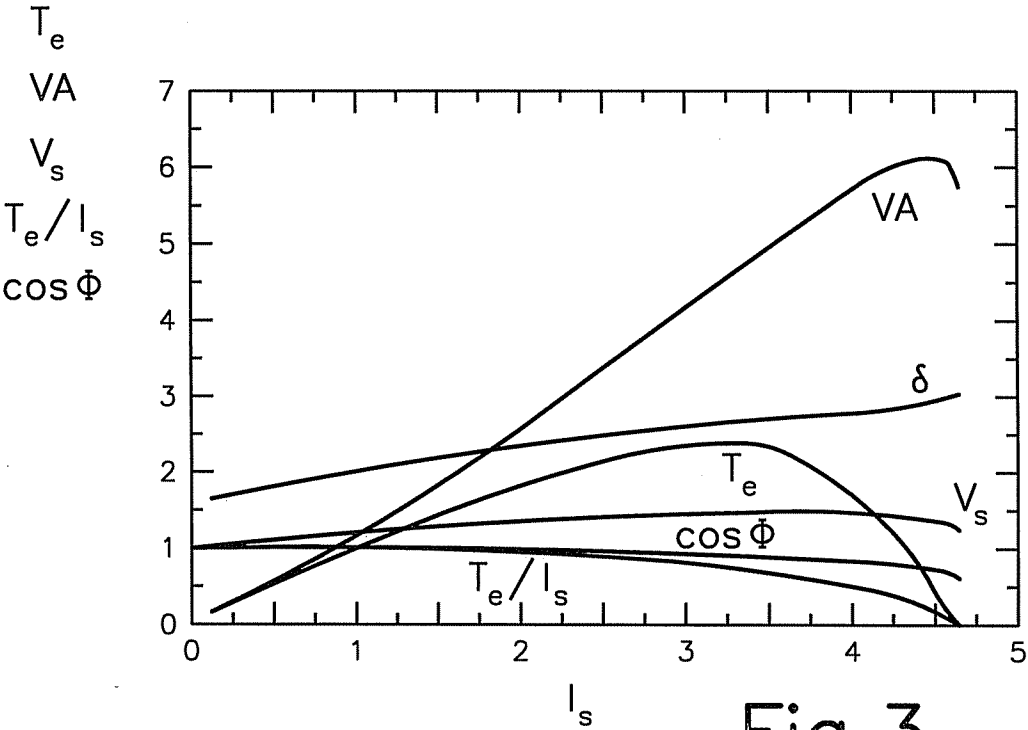


Fig.3

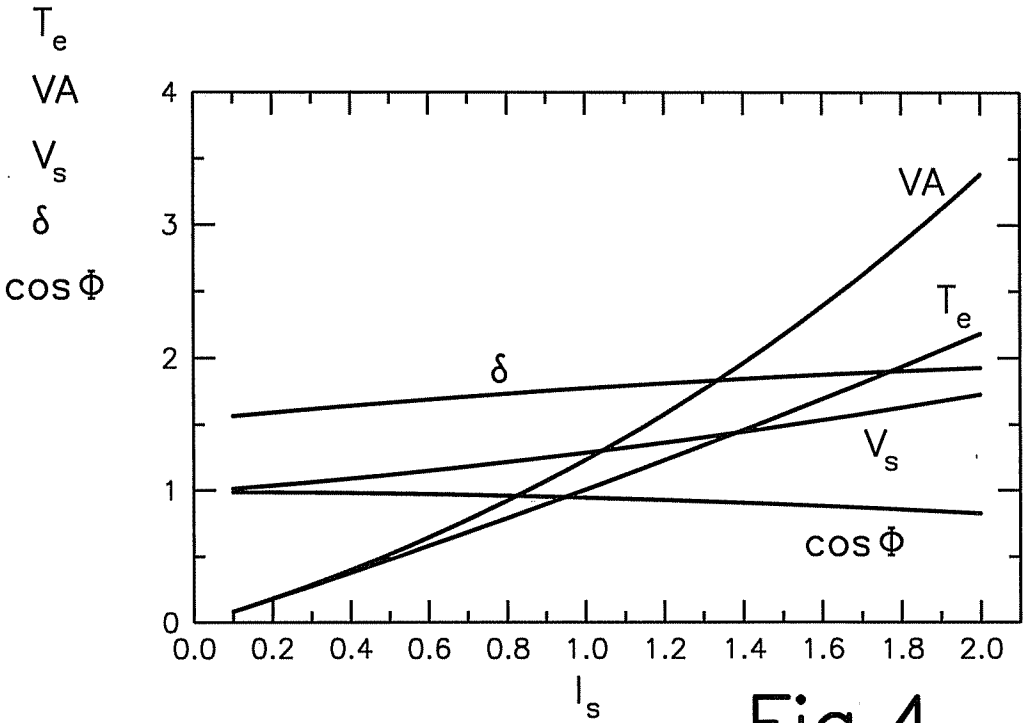
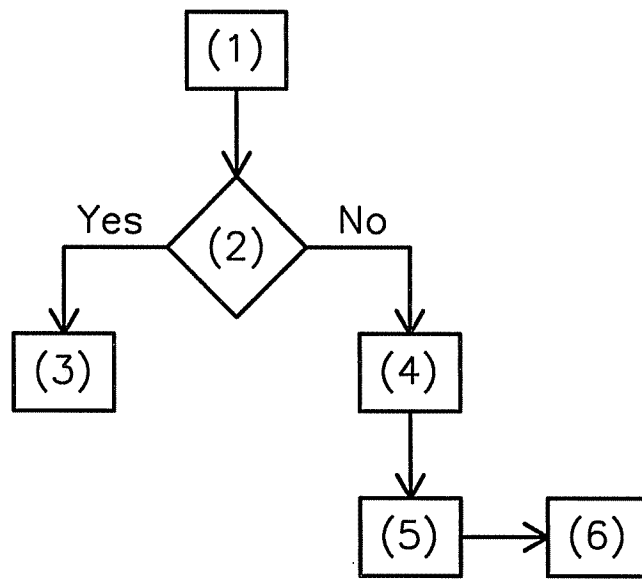


Fig.4

3/3

Fig.5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2014/055482

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. B60L15/20 G05B19/00 H02P23/00
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)

B60L G05B 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)

EP0-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.
X	US 2005/046375 A1 (MASLOV BORIS A [US] ET AL) 3 March 2005 (2005-03-03)	1,3-10
Y	paragraph [0147] - paragraph [0148]; figure 1 paragraph [0160]; figure 3 paragraph [0169] - paragraph [0201]; figure 9 paragraph [0165] - paragraph [0168]; figures 6-8 ----- -/--	2

☒ 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

5 August 2014

Date of mailing of the international search report

13/08/2014

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

Schürle, Patrick

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2014/055482

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	RAMIN MONAJEMY ET AL: "Comparison of Torque Control Strategies Based on the Constant Power Loss Control System for PMSM", 1 January 2002 (2002-01-01), CONTROL IN POWER ELECTRONICS: SELECTED PROBLEMS,, PAGE(S) 225 - 249, XP009179466, cited in the application	2
A	page 226 - page 227 page 240 - page 241 -----	7-9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2014/055482

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2005046375	A1	03-03-2005	NONE

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2014/055482

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. B60L15/20 G05B19/00 H02P23/00
ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherhierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
B60L G05B H02P

Recherhierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherhierten Gebiete fallen

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

EP0-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2005/046375 A1 (MASLOV BORIS A [US] ET AL) 3. März 2005 (2005-03-03)	1,3-10
Y	Absatz [0147] - Absatz [0148]; Abbildung 1 Absatz [0160]; Abbildung 3 Absatz [0169] - Absatz [0201]; Abbildung 9 Absatz [0165] - Absatz [0168]; Abbildungen 6-8	2
Y	----- RAMIN MONAJEMY ET AL: "Comparison of Torque Control Strategies Based on the Constant Power Loss Control System for PMSM", 1. Januar 2002 (2002-01-01), CONTROL IN POWER ELECTRONICS: SELECTED PROBLEMS,, PAGE(S) 225 - 249, XP009179466, in der Anmeldung erwähnt	2
A	Seite 226 - Seite 227 Seite 240 - Seite 241 -----	7-9

☐

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

5. August 2014

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

13/08/2014

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

Schürle, Patrick

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

PCT/EP2014/055482

US 2005046375	A1	03-03-2005	KEINE
---------------	----	------------	-------