(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
10. Mai 2013 (10.05.2013)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2013/063632 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01R 31/34 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/AT2012/000281

(22) Internationales Anmeldedatum:
5. November 2012 (05.11.2012)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
A 1617/2011 3. November 2011 (03.11.2011) AT

(71) Anmelder: **TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN** [AT/AT]; Karlsplatz 13, A-1040 Wien (AT).

(72) Erfinder: **WOLBANK, Thomas**; Straussengasse 2/1/50, A-1050 Wien (AT).

(74) Anwalt: **SONN & PARTNER Patentanwälte**; Riemergasse 14, A-1010 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, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

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

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

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 AND DEVICE FOR DETECTING DEFECTS IN MAGNETIC SLOT CLOSURES OF AC MACHINES

(54) Bezeichnung : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR ERKENNUNG VON FEHLERN BEI MAGNETISCHEN NUTVERSCHLÜSSEN VON WECHSELSTROMMASCHINEN

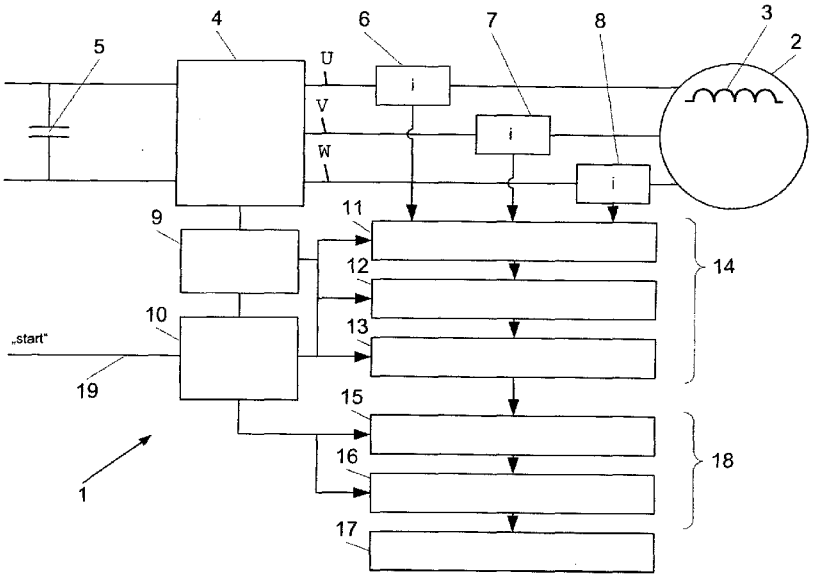

FIG. 2

(57) Abstract: In order to detect defects in magnetic slot closures of the stator of AC machines (2), preferably three-phase machines, in particular for detecting defects on slot closure wedges (34) or missing slot closure wedges (34'), the winding current (*i*) that is generated when a voltage (V) is applied to the machine is monitored, wherein the machine (2) is energised by means of a predetermined voltage signal (V) and the winding currents (*i*) generated thereby in the machine (2) are measured and evaluated in order to detect and localise stator-fixed asymmetries of the magnetic circuit arising from any defects based on the transient reactance of the machine (2).

(57) Zusammenfassung: Zur Erkennung von Fehlern bei magnetischen Nutverschlüssen des Stators von Wechselstrom-Maschinen (2), vorzugsweise Drehstrommaschinen, insbesondere zur Erkennung von Fehlern an Nutverschlusskeilen (34) oder von fehlenden Nutverschlusskeilen (34'),

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2013/063632 A1

wird der bei Anlegen einer Spannung (V) an die Maschine erzeugte (2) Wicklungsstrom (*i*) überprüft, wobei die Maschine (2) mit einem vorgegebenen Spannungssignal (V) angeregt wird und die dadurch in der Maschine (2) erzeugten Wicklungsströme (*i*) gemessen und evaluiert werden, um von etwaigen Fehlern stammende, statorfeste Asymmetrien des Magnetkreises auf Basis der transienten Reaktanz der Maschine (2) zu erkennen und zu lokalisieren.

Verfahren und Vorrichtung zur Erkennung von Fehlern bei magnetischen Nutverschlüssen von Wechselstrommaschinen

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Erkennung von Fehlern bei magnetischen Nutverschlüssen des Stators von Wechselstrommaschinen, vorzugsweise Drehstrommaschinen, insbesondere zur Erkennung von Fehlern an Nutverschlusskeilen oder von fehlenden Nutverschlusskeilen, gemäß den Oberbegriffen der unabhängigen Ansprüche.

Es ist bekannt, bei Drehstrommaschinen, insbesondere Hochspannungs-Drehstrommaschinen, offene Statornuten vorzusehen, um die Montage der Statorwicklungen zu erleichtern. Um ein Absinken des Leistungsfaktors zufolge der sich dann ergebenden Luftspalte zu verhindern, werden magnetische Nutverschlusskeile verwendet, die nach der Montage der Wicklungen in die Nuten eingeschoben werden und diese verschließen. Derartige Nutverschlusskeile bestehen üblicherweise aus einem Hauptanteil Eisenpulver sowie Glasfasern und Epoxidharz. Das Epoxidharz und die Glasfasern verhindern dabei eine elektrische Leitung, wodurch Wirbelströme verhindert werden können.

Diese Nutverschlusskeile können jedoch im Betrieb der Maschine beschädigt werden, und sie können sich aufgrund von Vibrationen, Montagemängeln und magnetischen Kräften auch teilweise oder zur Gänze lösen und so den Betrieb der Maschine beeinträchtigen.

Es ist daher von Bedeutung, derartige Fehler bei magnetischen Nutverschlüssen, wie insbesondere den Ausfall von Nutverschlusskeilen, möglichst früh zu erkennen, um einen etwaigen Ausfall der Maschine zu vermeiden.

Die Problematik mit derartigen magnetischen Nutverschlusskeilen sowie ein Vorschlag zum Erkennen von Fehlern bei diesen magnetischen Nutverschlusskeilen ist im Artikel Mike Davis, „Problems and Solutions with Magnetic Stator Wedges", Iris Rotating Machine Conference June 2007, San Antonio, TX (mike.davis@machinemonitor.com) enthalten. Im Einzelnen wird dort zum Erkennen von Fehlern bei den magnetischen Nutverschlüssen vorgeschlagen, die Betriebsströme der drei Phasen der Dreiphasenmaschine im Fre-

quenzspektrum zu vergleichen und bei auffälligen Abweichungen der Ströme die Maschine zu zerlegen und eine visuelle Überprüfung vorzunehmen. Diese optische Überprüfung wird als effektivste Detektionstechnik dargestellt.

Eine derartige zumindest teilweise Demontage der Maschine mit der anschließenden optischen Kontrolle ist jedoch aufwendig und teuer, wie unmittelbar einzusehen ist. Verbunden mit einer derartigen Demontage ist auch ein relativ langer Ausfall der Maschine, und es wäre wünschenswert, eine Erkennung und Lokalisierung von defekten magnetischen Nutverschlüssen „online", d.h. ohne Zerlegen der Maschine, zu ermöglichen.

Es ist demgemäß Aufgabe der Erfindung, durch Messungen an geschlossenen Maschinen Fehler bei magnetischen Nutverschlüssen zu erkennen sowie weiters auch die Position dieser Fehler zu detektieren. Dabei soll es überdies möglich sein, durch derartige Messungen an geschlossenen Maschinen Fehler von magnetischen Nutverschlüssen bereits im Anfangszustand zu erfassen und so eine Reparatur zu einem frühen, optimalen Zeitpunkt zu ermöglichen.

Zur Lösung dieser Aufgabe sieht die Erfindung ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung wie in den unabhängigen Ansprüchen definiert vor.

Vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Bei der vorliegenden Technik werden vorgegebene Spannungssignale, insbesondere Spannungsimpulse oder aber hochfrequente (Sinus-) Spannungen, an die Maschine angelegt, z.B. mit Hilfe eines üblichen Umrichters, und der sich ergebende Wicklungsstrom der Maschine wird insbesondere mit Hilfe von in den Zuleitungen zur Maschine üblicherweise vorhandenen Stromsensoren gemessen. Die Fehlererkennung und -lokalisierung basiert dann auf den hochfrequenten oder transienten elektrischen Eigenschaften der Maschine. Wenn hochfrequente Spannungssignale oder transiente Spannungssignale (Spannungsimpulse) an die Anschlüsse der Maschine angelegt werden, enthält der sich ergebende Wicklungs-

strom Informationen über den magnetischen Zustand der Maschine. Dabei sind in dieser Strom-Antwort Informationen über die Eigenschaften des Magnetmaterials, aber in der Regel auch über Maschinen-inhärente Asymmetrien, wie beispielsweise im Bereich der räumlichen Sättigung oder der Nuten, ebenso enthalten wie die gesuchten Fehler-induzierten Asymmetrien. Es geht demgemäß in der Folge auch darum, die eventuellen inhärenten Asymmetrien von den gesuchten Fehler-induzierten Asymmetrien zu trennen und nur letztere im Hinblick auf die Lokalisierung der Fehlerstellen bei den magnetischen Nutverschlüssen auszuwerten. Demgemäß werden zu verschiedenen Zeitpunkten und bzw. oder bei unterschiedlichen Spannungen erhaltene Ströme miteinander verglichen bzw. voneinander subtrahiert, um die genannten Maschinen-inhärenten Asymmetrien zu eliminieren und die von etwaigen Fehlern stammenden statorfesten Asymmetrien des Magnetkreises abzusondern bzw. zu erkennen sowie zu lokalisieren.

Vorzugweise werden die Spannungs-Anregungen und Strom-Messungen in einem unmagnetisierten Zustand der Maschine und bzw. oder im unbelasteten Zustand der Maschine durchgeführt. Dadurch wird die Messung und Lokalisierung der Fehler bei magnetischen Nutverschlüssen, so vorhanden, erleichtert. Dieser Vorteil wird verstärkt, wenn die Erkennung bei stillstehender Maschine durchgeführt wird.

Um den vorerwähnten Vergleich von mehreren Stromreaktionen in Form einer Subtraktion effizient durchführen zu können, ist es günstig, wenn die Spannungs-Anregungen und Strom-Messungen einfach bei verschiedenen aufeinanderfolgenden Rotorpositionen durchgeführt werden.

Im Fall, dass die Maschine nicht bei Stillstand untersucht wird, sondern bei umlaufendem Rotor, wird der Einfluss der sich dann ergebenden Gegen-EMK (EMK-elektromotorische Kraft) dadurch eliminiert, dass die Strom-Antworten auf verschiedene, insbesondere aufeinanderfolgende Spannungs-Anregungen evaluiert werden.

In ähnlicher Weise kann der Einfluss des Stator-Widerstands auf die Messung dadurch eliminiert werden, dass die Strom-Antworten auf verschiedene, insbesondere aufeinanderfolgende Spannungs-An-

regungen evaluiert werden.

Für eine rasche und effektive Auswertung der Messergebnisse ist es weiters von Vorteil, wenn aus den Messungen Asymmetrie-Zeiger für eine Spektralanalyse, z.B. mittels FFT, hergeleitet werden.

Im Fall von Drehstrommaschinen ist es auch günstig, wenn die gleichen Spannungs-Anregungen aufeinanderfolgend für alle (drei) Phasen durchgeführt werden.

Was die vorliegende Vorrichtung anlangt, so ist es für eine effiziente Analyse der transienten Vorgänge besonders vorteilhaft, wenn der Umrichter zur Abgabe von Spannungsimpulsen eingerichtet ist. Weiters ist es günstig, wenn die Rechenmittel zur Herleitung von Asymmetrie-Zeigern eingerichtet sind, wobei weiters eine vorteilhafte Ausführungsform gekennzeichnet ist durch eine Spektralanalyseeinheit zur spektralen Analyse der Asymmetrie-Zeiger.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von besonders bevorzugten Ausführungsbeispielen, auf die sie jedoch nicht beschränkt sein soll, sowie unter Bezugnahme auf die beiliegende Zeichnung noch weiter erläutert. In der Zeichnung zeigen dabei im Einzelnen:

Fig. 1 schematisch eine Darstellung einer Nut mit darin enthaltener Wicklung und einem Nutverschlusskeil;

Fig. 2 schematisch in der Art eines Blockschaltbildes eine Vorrichtung zur Erkennung von Fehlern bei magnetischen Nutverschlüssen des Stators einer elektrischen Maschine, wobei dieser Maschine, einer Drehstrommaschine, ein Umrichter zur Spannungsversorgung zugeordnet ist;

Fig. 3 in einem Diagramm beispielhaft ein zur Anregung der Maschine verwendetes Spannungspulssignal und eine korrespondierende Strom-Reaktion, wobei auch Abtastpunkte veranschaulicht sind;

Fig. 4 in einem Schema die richtungsabhängige Induktanz einer Maschine bei einem fehlenden Nutverschlusskeil;

Fig. 5 in einem Diagramm eine zu Fig. 4 gehörige Zeigerdarstellung zur Veranschaulichung von transienten Stromänderungen für eine gegebene Pulsfolge, beispielsweise in der Phase V;

Fig. 6A schematisch eine Aufeinanderfolge von Nuten mit Wicklungen und intakten Nutverschlusskeilen sowie zugehörige Magnetlinien;

Fig. 6B eine entsprechende Anordnung dieser Nuten mit Wicklungen, wobei nun jedoch bei einer Nut der Nutverschlusskeil fehlt, wodurch sich Unregelmäßigkeiten im Magnetlinien-Verlauf ergeben;

Fig. 7 ein Schema in der Art eines Blockschaltbildes zur Veranschaulichung der Durchführung der Messung und Detektion bzw. der zugehörigen Signalverarbeitung;

Fig. 8 ein schematisches Diagramm mit Veranschaulichung von Nutkeilen einer Maschine, wobei in Tests ein Nutverschlusskeil bzw. mehrere Nutverschlusskeile entfernt wurden; und

Fig. 9 in einem Diagramm die Messergebnisse bei einer Maschine mit einer Anordnung von Nutverschlusskeilen.

Elektrische Maschinen, deren Statorwicklungen für Hochspannungen ausgelegt sind, werden in der Regel mit offenen Statornuten konstruiert, in denen die Wicklungen einfach untergebracht werden können; um jedoch in der Folge Störungen in den Magnetfeldern zufolge der offenen Nuten zu vermeiden, die zu Leistungsverlusten der Maschine führen könnten, werden die Nuten durch magnetische Verschlusskeile abgeschlossen. In Fig. 1 ist schematisch ein Teil eines Stators 30 mit einer Nut 31 schaubildlich veranschaulicht, wobei die Nut zum Innenumfang 32 des Stators 30 hin an sich offen ist, jedoch nach Einbringung der in Fig. 1 nur schematisch angedeuteten Statorwicklungen 33 mit Hilfe eines achsparallel eingeschobenen Nutverschlusskeils 34 verschlossen wird.

Diese Technik ist hinlänglich bekannt, ebenso wie es bekannt ist, dass sich die Nutverschlusskeile 34 im Betrieb der Maschine, wenn sie magnetischen, aber auch mechanischen Kräften, Vi-

brationen etc. ausgesetzt werden, lockern können, sich in ihren Führungen verschieben können und schließlich auch aus ihren Führungen herauslösen und in den Luftspalt fallen können. Ein derartiges Lockern der Nutverschlusskeile kann auch in einem ungenügenden Montagevorgang seinen Grund haben. Ein gelockerter oder insbesondere herausgefallener Nutverschlusskeil 34 kann derzeit nur nach zumindest teilweisem Zerlegen der Maschine detektiert werden. Dies bestätigt auch die eingangs genannte Literaturstelle von Mike Davis, wo auf die optische Überprüfung verwiesen wird, nachdem gegebenenfalls über das im Normalbetrieb sich ergebende Strom-Spektrum Verdachtsmomente festgestellt wurden.

Ansonsten wird im Zuge von routinemäßigen Wartungsarbeiten die Feststellung von gelockerten oder gelösten Nutverschlusskeilen getroffen.

Mit der vorliegenden Technik können ohne Demontage der Maschine Fehler im Bereich der magnetischen Nutverschlüsse, insbesondere gelockerte, gelöste bzw. herausgefallene Nutverschlusskeile, erkannt werden, wobei überdies auch die Lokalisierung der Position dieses magnetischen Fehlers möglich ist. Es ist dadurch möglich, rechtzeitig eine verringerte Leistung festzustellen, und auch im Hinblick auf die Möglichkeit, die Anzahl der fehlenden Nutverschlusskeile zu erkennen, wird die Entscheidung erleichtert, ob eine Maschine zerlegt werden muss oder nicht.

In Fig. 2 ist allgemein eine Vorrichtung 1 zur Erkennung von Fehlern bei magnetischen Nutverschlüssen in einer Wechselstrom-Maschine 2 veranschaulicht, wobei nur beispielhaft schematisch eine Wicklung 3 der Maschine 2 angedeutet ist. Mittels eines Umrichters 4, dessen Eingängen ein Kondensator 5 parallel geschaltet ist, werden Spannungssignale, nämlich konkret Spannungsimpulse, wie nachstehend näher anhand der Fig. 3 erläutert werden wird, an die Anschlüsse der Maschine 2 angelegt. Mit Hilfe vom Stromsensoren 6, 7 und 8, die in den Zuleitungen (Phasen U, V, W) vom Umrichter 4 zur Maschine 2 angeordnet sind, werden die sich ergebenden Wicklungsströme, nachfolgend auch kurz Stromantworten i genannt, erfasst und mit Hilfe einer Messeinheit 11 gemessen. An diese Messeinheit 11 schließt eine Re-

cheneinheit 12 zur Auswertung der Messdaten an, insbesondere zur Berechnung eines nachstehend noch näher erläuterten Asymmetrie-Zeigers, und überdies ist eine Detektionseinheit 13 zur Detektion der Rotornutung/Position vorgesehen. Die Einheiten 11, 12 und 13 sind zu einem Mess- und Berechnungssystem 14 zusammengefasst, und alle drei Einheiten sind an eine Steuereinheit 10 angeschlossen, der über einen Eingang 19 ein Startsignal „Start" zugeführt wird. Diese Steuereinheit 10 steuert auch eine Befehlseinheit 9 für den Umrichter 4 an, um entsprechende Schaltbefehle für die Maschinen-Erregung abzugeben.

Weiters sind gemäß Fig. 2 mit der Steuereinheit 10 eine Datensammeleinheit 15 sowie eine Analyseeinheit 16, vorzugsweise eine für eine FFT (Fast Fourier Transformation - schnelle Fouriertransformation)-Spektralfilterung ausgelegte Analyseeinheit, verbunden. Diese Einheiten 15 und 16 können als abschließende Evaluierungseinheit 18 zusammengefasst sein.

Schließlich ist mit dem Ausgang der Analyseeinheit 16 eine Fehlerausgabeeinheit, kurz Fehlerindikator 17 genannt, verbunden.

Die vorliegende Technologie der Fehlererkennung und -ortung beruht wie erwähnt auf einer Überprüfung der transienten Reaktanz der jeweiligen Maschine. Hierzu werden mit Hilfe des in Fig. 2 gezeigten Umrichters 4 beispielsweise kurze Spannungsimpulse an die Maschinen-Anschlüsse angelegt, und der sich ergebende Strom wird mit Hilfe der in den einzelnen Zuleitungen vorhandenen Stromsensoren gemessen. Anstatt von kurzen Spannungsimpulsen können auch hochfrequente Spannungssignale, insbesondere auch sinusförmige Spannungssignale, der Maschine 2 zugeführt werden. In diesem Zusammenhang kann im Übrigen auch auf den Artikel von Fernando Briz et al., „Dynamic Operation of Carrier-Signal-Injection-Based Sensorless Direct Field-Oriented AC Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, S 0093-9994 (00) 07622-2, verwiesen werden, wobei dort Oberwellen, die durch Einschwingvorgänge der Grundwellenströme verursacht werden, untersucht werden, um u. a. eine Rotor-Position mit hoher Genauigkeit abschätzen zu können.

Wie erwähnt ist bei der vorliegenden Technologie ein Punkt die

Identifikation der transienten Reaktanz bzw. Impedanz der jeweiligen Maschine. Nachfolgend soll in diesem Zusammenhang beispielhaft für die Ausführungsform mit der Anregung der Maschine mit Hilfe von kurzen Spannungsimpulsen die theoretischen Grundlagen näher erläutert werden. In Fig. 3 ist hierfür schematisch ein impulsförmiges Spannungssignal V in Verbindung mit dem sich dann bei der Maschine ergebenden Strom i gezeigt. Die Pulsfolge weist einen positiven Spannungsimpuls I sowie einen negativen Spannungsimpuls II auf. Der Strom i hat wie ersichtlich einen dreieckförmigen Verlauf. Die Detektion von zwei zeitlichen Ableitungen der Strom-Antwort i wird mit beispielsweise vier Abtastpunkten S_1-S_4 bewerkstelligt, wobei die Stromwerte zu den Abtastpunkten S_1, S_2 die Neigung beim Stromanstieg und die Abtastwerte S_3, S_4 den Winkel des Stromverlaufs in der negativen Impulsphase II berechnen lassen. Demgemäß werden die Ist-Stromwerte eine kurze Zeit nach dem Beginn und eine kurze Zeit nach dem Ende einer jeden Impulsperiode gemessen. Daraus können die zeitlichen Ableitungen des Stroms näherungsweise ermittelt werden. Die gesamte Messung kann innerhalb von wenigen 10 µs durchgeführt werden.

Der zeitliche Verlauf des Stromsignals i wird wesentlich durch die transiente Streu-Induktanz der Maschine mitbestimmt. Ein wesentlicher Teil des Streuflusses ist der Statornuten-Streufluss und der Zickzack-Streufluss. In einer symmetrischen Konfiguration verläuft der Statornuten-Streufluss durch die Nutverschlusskeile unabhängig vom räumlichen Winkel der hochfrequenten oder transienten Erregung. Wenn jedoch ein Nutverschlusskeil fehlt oder mehrere Nutverschlusskeile fehlen, ergibt sich eine wesentliche Änderung in den transienten Streuflusspfaden, wenn sich der Erregungswinkel ändert. Diese Änderungen führen zu einer Asymmetrie, die durch den Messvorgang detektiert werden kann. Bevorzugt wird bei der vorliegenden Technologie die Messung bei stillstehender Maschine, bei Null-Last und bei Null-Fluss, angewandt, also bevorzugt wenn die Maschine gerade nicht betrieben wird oder gerade gewartet wird.

Beispielhaft wird in der Folge auch eine elektrische Maschine 2 mit drei Phasen U, V, W vorausgesetzt (also eine Drehstrommaschine), die Umrichter-gespeist ist, wobei die verschiedenen

Spannungszustände an den Umrichter-Ausgängen verwendet werden. Wenn der Ausgang des Umrichters 4 vom inaktiven Zustand auf einen aktiven Zustand wechselt, wird ein Spannungssprung entsprechend der Amplitude der Zwischenspannung des Umrichters 4 erzeugt. Ähnliches gilt auch für das Wechseln vom aktiven Ausgangszustand auf den inaktiven.

Wie erwähnt wird die Strommessung mit Hilfe der eingebauten, üblicherweise vorhandenen Stromsensoren 6, 7, 8 durchgeführt. Wenn diese Messungen bei einem Null-Fluss und bei einer Null-Last durchgeführt werden, kann die Leistung des Umrichters 4 im Verhältnis zu jener der Maschine 2 ein Bruchteil sein.

Bei einer angenommen symmetrischen Maschine 2 ergibt sich bekanntlich ein Spannungs-Raumzeiger, der das Verhalten der Maschine beschreibt, gemäß der folgenden Beziehung (1):

$$\underline{v}_S = r_S \cdot \underline{i}_S + l_I \cdot \frac{d\underline{i}_S}{d\tau} + \frac{d\underline{\lambda}_R}{d\tau} \qquad (1)$$

Hierin haben die einzelnen Bezeichnungen die folgende Bedeutung:

$\underline{v}_s$.....Spannungs-Raumzeiger

r_s.....Statorwiderstand

$\underline{i}_s$.....Statorstrom

l_I.....Streuinduktanz

$\frac{d\underline{\lambda}_R}{d\tau}$ .....Gegen-EMK.

Der Spannungszeiger $\underline{v}_s$, der von der Umrichter-Schalthandlung bewirkt wird, führt zu der vorgenannten Stromänderung $d\underline{i}_S/d\tau$. Diese Ablenkung des Stroms nach der Zeit wird vom Schaltzustand des Umrichters 4 von der Gleichstrom-Zwischenspannung, aber auch von der Streuinduktanz l_I, vom Statorwiderstand r_s und von der Gegen-EMK $d\underline{\lambda}_R/d\tau$ beeinflusst. Nach Realisierung der Spannungsstufe (einige 10µs lang) wird die transiente Reaktion der Maschine 2 vom Spannungsabfall der transienten Streuinduktanz $l_{I,t}$ dominiert.

Ein zusätzlicher Einfluss existiert aufgrund der Gegen-EMK, wenn die Maschine 2 nicht bei Stillstand getestet wird. Im letzteren Fall ist eine Identifikation der transienten Streuinduktanz nur nach Eliminieren der Störung zufolge der Gegen-EMK möglich.

Der Einfluss der Gegen-EMK ebenso wie der Statorwiderstands-Spannungsabfall kann einfach durch Evaluieren der Strom-Antworten auf zwei Spannungssprünge mit unterschiedlichen Umrichter-Ausgangszuständen eliminiert werden. Wenn diese zwei Ausgangszustände aufeinander folgen, ändern sich der Grundwellen-Arbeitspunkt und insbesondere die Richtung und Größe der Gegen-EMK nicht wesentlich. Diese beiden aufeinanderfolgenden Umrichter-Ausgangszustände sind die Phasen (Intervalle) I und II im Diagramm von Fig. 3. Im Folgenden werden auch bei den weiteren theoretischen Überlegungen in den Beziehungen die Größen je nach Phase mit dem zusätzlichen Index I und II angegeben. Zum Eliminieren der störenden Anteile kann demgemäß eine einfache Subtraktion der zwei Statorgleichungen (s. obige Gleichung (1)) durchgeführt werden. Weiters unterscheidet sich die transiente Induktanz der Maschine vom Grundwellen-Streufluss, und sie wird mit $l_{I,t}$ bezeichnet. Es ergibt sich damit für den resultierenden Spannungszeiger die folgende Gleichung:

$$\underline{v}_{S,I}-\underline{v}_{S,II}=l_{I,t}\left(\frac{di_{S,I}}{d\tau}-\frac{di_{S,II}}{d\tau}\right) \qquad (2)$$

Der Grundwellen-Arbeitspunkt des Statorstroms i_S sowie die zeitliche Ableitung hiervon können direkt gemessen werden. Selbst wenn wie erwähnt die Maschine 2 nicht bei Stillstand betrieben wird, ändert sich die Gegen-EMK nicht wesentlich zwischen den zwei aufeinanderfolgenden Puls-Anregungen. Demgemäß fällt beim Subtrahieren der zwei Statorspannungs-Gleichungen die Gegen-EMK heraus. Ähnliches gilt auch für den Einfluss des Statorwiderstands. Wenn die Spannungszeiger der aufeinanderfolgenden Impulse in entgegengesetzte räumliche Richtungen zeigen, dann sind die Grundwellen-Arbeitspunkte in den beiden Fällen zufolge des symmetrischen Impulsmusters, wie es aus Fig. 3 ersichtlich ist, praktisch gleich.

Wenn eine ideale symmetrische Maschine 2, mit Betrieb bei einem

Null-Hauptfluss und einer Null-Drehzahl, unterstellt wird, kann die transiente Streuinduktanz $l_{l,t}$ als skalare Größe angesehen werden, und demgemäß ist die Richtung der Neigung des sich ergebenden Stroms parallel zur Anregungs-Impulsspannung. In gängigen Maschinen sind jedoch, auch wenn sie keine Fehler aufweisen, immer inhärente räumlichen Asymmetrien vorhanden, die auch zu einer Winkelabhängigkeit des transienten Streuflusses führen. Daher sind die Richtungen der Spannungsimpulse und der sich ergebenden Strom-Neigungen nicht gleich. Zu diesem Zweck kann eine komplexe transiente Streuinduktanz $\underline{l}_{l,t}$ eingeführt werden, s. die nachfolgende Gleichung:

$$\underline{l}_{l,t}=l_{offset}+\underline{l}_{mod},$$
$$\underline{l}_{mod}=l_{mod}\cdot e^{j2\gamma} \qquad (3)$$

Auf diese Weise werden die Asymmetrien der drei Phasen in einem Parameter kombiniert. Diese komplexe transiente Streuinduktanz setzt sich aus einem skalaren Offset-Wert l_{offset} und einem komplexen Wert $\underline{l}_{mod}$, wie in Gleichung (3) ersichtlich, zusammen. Der Offset-Wert repräsentiert die symmetrische Maschine, wogegen der komplexe Wert die Fehler-induzierte Asymmetrie mit Größe und räumlicher Richtung angibt. Es wird hier angenommen, dass keine weitere Asymmetrie vorhanden ist.

γ ist der Winkel des Asymmetrie-Teils, d.h. er gibt die räumliche Position der maximalen Induktanz innerhalb eines Polpaares an. Die Asymmetrie hat daher eine doppelte Periode in Bezug auf eine einmalige elektrische Umdrehung und eine feste Position relativ zum Stator.

Auf diese Weise kann im Fall einer Anregung der Maschine 2 mit Hilfe einer Spannungsimpulssequenz (s. Fig. 3) bei der Evaluierung der Strom-Antwort die zeitliche Ableitung des Maschinenstroms in einen symmetrischen Teil und in einen asymmetrischen Teil, der für die vorliegende Problematik von Interesse ist, getrennt werden.

Größe und Winkel des komplexen Induktanz-Teils enthalten die Information betreffend die Fehler-verursachte Asymmetrie. Im Fall

eines fehlenden Nutverschlusskeils entspricht dessen räumliche Position der Richtung des komplexen Induktanzteils relativ zu den Statorwicklungen.

Für die vorliegende Evaluierung genügt es, die sich ergebende Strom-Neigung zufolge der zwei Schaltzustände nach Eliminieren des Statorwiderstand und gegebenenfalls der Gegen-EMK zu überwachen. Für die Berechnung des Winkels γ der Asymmetrie ist eine genaue Kenntnis des skalaren Werts und des komplexen Werts der Induktanz erforderlich. Demgemäß wird die vorstehende Gleichung (3) in die Gleichung (2) eingesetzt, und die erhaltene Gleichung wird invertiert, was zur nachfolgenden Gleichung (4) führt, in der die konjugiert-komplexen Größen mit einem Stern angegeben sind:

$$\frac{\Delta \underline{i}_{S,I}}{\Delta \tau} - \frac{\Delta \underline{i}_{S,II}}{\Delta \tau} = y_{offset} \cdot (\underline{v}_{S,I} - \underline{v}_{S,II}) + \underline{y}_{mod} \cdot (\underline{v}^*_{S,I} - \underline{v}^*_{S,II}) \qquad (4)$$

Diese Gleichung kann vereinfacht wie folgt angeschrieben werden:

$$\frac{\Delta \underline{i}_{S,I-II}}{\Delta \tau} = \underline{y} \cdot \underline{v}_{S,I-II} \qquad (5)$$

Es genügt somit, dass das Messsystem einfach die vereinfachte Gleichung (5) berechnet, wobei die zeitlichen Ableitungen durch Differenzquotienten numerisch berechnet werden, wie dies an sich bekannt ist. Ein entsprechender Indexwechsel erfolgt bei den Spannungszeigern.

Die gemessene Stromneigung der Anregungs-Sequenz wird somit direkt durch die Größe und Position des komplexen Induktanz-Teils gemäß Gleichung (4) beeinflusst; die Werte von y_{offset} und $\underline{y}_{mod}$ können nach Umrechnung wie in den Gleichungen (6) angegeben erhalten werden:

$$y_{offset} = \frac{l_{offset}}{l^2_{offset} - l^2_{mod}}$$

$$\underline{y}_{mod} = -\frac{l_{mod}}{l^2_{offset} - l^2_{mod}} \cdot e^{j(2\gamma - 2\arg(\underline{v}_{S,I-II}))} \qquad (6)$$

Die Hauptrichtung der sich ergebenden Stromänderung ist durch die zwei Umrichter-Schaltzustände (I, II in Fig. 3) bestimmt,

wie sich aus den vorstehenden Gleichungen ergibt. In symmetrischen Maschinen dominiert in der Regel der skalare Wert y_{offset}, wogegen die Größe des komplexen Werts $\underline{y}_{mod}$ selbst bei einer fehlerbehafteten Maschine nur ungefähr 10% dieses skalaren Offset-Werts beträgt. In Fig. 4 sind die vorstehend beschriebenen Zusammenhänge für den Fall einer durch einen fehlenden Nutverschlusskeil im Stator in einer Winkelposition $\gamma=50°$ verursachten Asymmetrie veranschaulicht. Der fehlende Keil bei der Position $\gamma=50°$ ist mit 34' bezeichnet und durchgestrichen, um sein Fehlen zu verdeutlichen. Die sich ergebende Asymmetrie führt beispielsweise zu einer idealen sinusförmigen Modulation der Streuinduktanz. Die entsprechende Richtungs-Abhängigkeit dieser Induktanz ist mit einer Ellipse 35 angegeben, wobei die Minimalinduktanz in Richtung der magnetischen Achse entsprechend einer magnetmotorischen Kraft in der Nut, wo der Keil fehlt, verläuft. Die richtungsabhängige Induktanz ist in Fig. 4 mit dem Zeiger 36 veranschaulicht. Eine gleiche Ellipse wird ersichtlich erhalten, wenn ein Nutverschlusskeil in der Position $\gamma = 230°$ fehlt, wie sich auch aus den Gleichungen (3) und (6) ergibt.

Die entsprechenden Signale sind in dem Zeigerdiagramm von Fig. 5 schematisch veranschaulicht, wobei der Differenzspannungs-Zeiger $\underline{v}_{s,I\text{-}II}$ in Richtung der Phase V ($\underline{v}_{s,I=+v}$ und $\underline{v}_{s,II=-v}$) zeigt. Der sich ergebende Stromänderungs-Zeiger $\Delta \underline{i}_{S,I-II}/\Delta\tau$ ist wie beschrieben aus zwei Teilen zusammengesetzt, nämlich dem skalaren Teil $\underline{v}_{s,I\text{-}II,yoffset}$ und dem komplexen Teil $\underline{v}_{s,I\text{-}II,ymod}$, vgl. auch die vorstehenden Gleichungen (4) und (5). Die Position der Asymmetrie ist in Fig. 5 ähnlich wie in Fig. 4 gewählt, wobei die Hauptachse der Ellipse als Zeiger 37 für die maximale Induktanz in Fig. 5 veranschaulicht ist. Der Winkel δ definiert die Differenz der Richtung der maximalen transienten Induktanz (Nutverschlusskeil) relativ zur Richtung des Differenz-Spannungsvektors $\underline{v}_{s,I\text{-}II}$ der Pulserregung.

Vereinfacht gesprochen führt die Fehler-induzierte Asymmetrie zu einer Strom-Neigung, Pfeil 38 in Fig. 5, die zusammengesetzt ist aus dem skalaren Wert parallel zur Richtung der Erregung (Phase V) im gezeigten Beispiel, Pfeil 39, und dem komplexen Anteil, Zeiger 40 in Fig. 5, mit einer Richtung entsprechend dem doppelten Winkel δ .

Wenn die Richtung der Asymmetrie gleich der Richtung der resultierenden Erregungsspannung $\underline{v}_{s,I-II}$ (δ =0°) ist, dann hat die resultierende Stromneigung die selbe Richtung wie die angelegte resultierende Spannung, wenn die Maschine symmetrisch wäre. Im Vergleich zur einer symmetrischen Maschine ist jedoch die Größe geringer. Bei einer Winkeldifferenz δ =90° wird wiederum eine „symmetrische" Richtung erhalten, nun jedoch mit einer größeren Größe. Wie ersichtlich bewegt sich die Spitze des resultierenden Zeigers 38 zweimal links der Kreislinie 38', wenn sich die Position des fehlenden Nutverschlusskeils 34' während einer elektrischen Periode ändert.

Um den beschriebenen Einfluss eines fehlenden Nutverschlusskeils 34' auf die Stromänderung zu analysieren und eine Bestätigung für die vorstehenden Erläuterungen zu finden, wurde eine Simulation auf Basis von finiten Elementen (FE) durchgeführt, wobei das Ergebnis in Fig. 6A und 6B schematisch veranschaulicht ist. Im Einzelnen zeigt dabei die Fig. 6A einen Teil eines Stators mit Nuten, die alle ordnungsgemäß durch Nutverschlusskeile verschlossen sind. Dabei ergibt sich ein Bild der Magnetlinien wie dargestellt.

In Fig. 6B ist dann ein fehlender Nutverschlusskeil 34' gegeben. Dabei ergeben sich Störungen bzw. Änderungen im Verlauf der Magnetlinien, wie dies insbesondere mit den drei auf der rechten Seite in Fig. 6B befindlichen Pfeilen 41 gezeigt ist.

Die Maschine 2 wurde dabei ohne Grundwellen-Erregung betrieben. Es wurden nur Spannungsimpulse in Richtung der Phasenachse U (s. auch die nachfolgend noch näher zu beschreibende Fig. 8) angelegt. Der entfernte Nutverschlusskeil 34' befand sich in einer Nut der Phasenwicklung U (elektrisch im rechten Winkel zur Phasenachse). Die Änderungen 41 im Verlauf der Magnetlinien sind direkt mit der Änderung der transienten Stromneigung verknüpft, wie sie durch die Messungen ermittelt wird. Dies führt schließlich zu einer festen Stator-Asymmetrie, die im Asymmetrie-Zeiger detektierbar ist.

In der Praxis können die Steuerungen und Messungen mit Hilfe eines Prozessors erfolgen, der Spannungssignale für die Anregung

und Triggersignale für die Messung veranlasst. Die Spannungs-Impuls-Folge kann von gespeicherten Werten her generiert werden. Demgemäß ist der Spannungszeiger 39 (Fig. 5) im Vorhinein berechenbar. Der Stromdifferenz-Zeiger 38 ergibt sich aus den im jeweiligen Fall genommenen Strom-Abtastwerten S_1 bis S_4 (vgl. Fig. 3). Da dieser Stromdifferenz-Zeiger aus einem symmetrischen Teil 39 und einem asymmetrischen Teil 40 zusammengesetzt ist, werden diese beiden Teile im Messsignal voneinander getrennt. Dies kann beispielsweise wie folgt bewerkstelligt werden: Wie aus Fig. 5 ersichtlich zeigt der vom skalaren Wert y_{offset} beeinflusste Teil (Zeiger 39 in Fig. 5) in Richtung der Anregungsimpulse. Die Spannungsimpulssequenzen werden nacheinander in den drei Hauptphasenrichtungen angelegt. Wenn die drei sich ergebenden Stromdifferenz-Zeiger durch Addition kombiniert werden, führt dies zu nur einem Stromdifferenz-Zeiger. Bei dieser Zeiger-Berechnung werden die symmetrischen Anteile eliminiert. Der resultierende Zeiger enthält nun mehr Information über die Asymmetrien der Maschinen 2. Dieser Zeiger wird hier einfach als Asymmetrie-Zeiger bezeichnet.

Für die endgültige Detektion von fehlenden (oder fehlerhaften) Nutverschlusskeilen werden noch einige weitere Signalverarbeitungsschritte durchgeführt. Der erhaltene Asymmetrie-Zeiger enthält nicht nur die Fehler-induzierte Asymmetrie, sondern auch einige Maschinen-inhärente Asymmetrien. Die wesentliche Maschinen-inhärente Asymmetrie wird durch räumliche Sättigung, durch die Nutung und durch eine Rotor-Anisotropie verursacht. Diese Asymmetrien gibt es praktisch in allen Maschinen, auch wenn diese ansonsten fehlerlos sind. Diese Asymmetrien sind alle im Asymmetrie-Zeiger überlagert, jedoch kann eine Identifikation und Abtrennung zufolge ihres deterministischen Verhaltens durchgeführt werden. Der detektierte Asymmetrie-Zeiger ist somit in diese Komponenten aufzusplitten.

Eine wesentliche Maschinen-inhärente Asymmetrie in Induktionsmaschinen ist die Sättigungs-Asymmetrie. Diese ergibt sich aufgrund der verschiedenen Werte der Sättigung, die durch die Grundwelle längs des Umfangs der Maschine bewirkt wird. Die Modulationsperiode ist zweimal so groß wie die Periode der elektrischen Grundwelle, entsprechend der Anzahl der Pole. Die

Identifikation und Abtrennung dieser Asymmetrie kann vorab durchgeführt werden.

Eine weitere Asymmetrie wird durch die Öffnungen der Nuten in der Blechung verursacht. Die Periode dieser Asymmetrie hängt mit dem Rotorwinkel zusammen. Bei Maschinen mit magnetischen Nutverschlüssen ist ihre Modulation jedoch sehr gering, und diese Asymmetrie kann in der Regel vernachlässigt werden.

In Fig. 7 ist in einer Art Blockschaltbild die Signalverarbeitung bei der vorliegenden Vorrichtung 1 veranschaulicht, wobei insbesondere auch die Eliminierung der Maschinen-inhärenten Asymmetrien inkludiert ist.

Gemäß Fig. 7 ist für die Messung und Auswertung der Messungen ein bevorzugt einheitliches Prozessorsystem 50 mit einer Steuereinheit 10' für die einzelnen Abläufe sowie mit einem Mess- und Berechnungssystem 14' vorgesehen. Im Zuge der Messung werden im vorliegenden Beispiel von einer Einheit 4' (beispielsweise der Umrichter 4 gemäß Fig. 2) Spannungsimpulse abgegeben, und in der eigentlichen Messeinheit 11' (vgl. die Stromsensoren 6, 7 und 8 sowie die Einheit 11 in Fig. 1) erfolgt die Messung der Strom-Antworten wie vorstehend beschrieben. Aus diesen Messsignalen wird mit Hilfe einer Recheneinheit 12' (vgl. auch den Block 12 betreffend Asymmetrie-Zeiger-Berechnung in Fig. 2) der Asymmetrie-Zeiger wie vorstehend erläutert berechnet. Im Einzelnen werden die Spannungs-Impulse vom Umrichter 4 abgegeben, die Ströme i in den einzelnen Phasen U, V, W werden mit Hilfe der Sensoren 6, 7 und 8 gemessen, und zwar entsprechend Fig. 3 zu den jeweiligen Abtastpunkten S_1 bis S_4. In der Recheneinheit 12' werden die Stromdifferenzen in Entsprechung zu der vorstehenden Gleichungen (4) und (5) berechnet und gespeichert.

Die Erzeugung der Triggersignale für das Schalten des Umrichters 4 und für die Vornahme der Messungen wird von der Steuereinheit 10 bzw. 10' bewerkstelligt, die - vorzugsweise zusammen mit den Rechenbausteinen des Systems 50 - auf Basis eines Echtzeit-Prozessors realisiert sein kann.

Die selbe Art von Pulsfolgen wird nacheinander an alle drei Pha-

sen U, V, W angelegt, und wie erwähnt wird durch Kombinieren der berechneten Zeiger für die drei Richtungen (Phasen) der symmetrische Teil eliminiert und der gewünschte Asymmetrie-Zeiger erhalten.

Als nächstes wird mit Hilfe einer Rotor-Ansteuereinheit 51 die Position des Rotors der Maschine 2 geändert, und die Spannungssignal-Anregung, die Messungen und Berechnungen werden wiederholt.

Dieser Vorgang wird für zumindest eine Rotor-Nutungsperiode oder aber so lange, bis der Rotor eine mechanische Umdrehung ausgeführt hat, wiederholt.

Die Datenspeicherung hinsichtlich der berechneten Asymmetrie-Zeiger erfolgt in einer Speichereinheit 15'.

In einer Spektralanalyse-Einheit 16', beispielsweise für eine FFT-Analsye, werden die Asymmetrie-Zeiger sodann analysiert, wobei auch die Nutungs-Modulation identifiziert und eliminiert wird. Falls eine Sättigungs-Asymmetrie vorliegt, z.B. zufolge der Magneten in einer Permanentmagnetmaschine, kann auch diese beispielsweise durch Spektralfilterung eliminiert werden.

Das Ergebnis hinsichtlich der Fehleranzeige wird schließlich über eine Einheit 17' angezeigt bzw. ausgegeben.

Da der Asymmetrie-Zeiger eine komplexe Größe ist, wie vorstehend erwähnt, enthält das Eingangssignal zur Analyseeinheit 16' (bzw. 16 in Fig. 2) Informationen bezüglich Größe und Richtung. Dadurch ist es auch möglich, sowohl einzelne als auch mehrere fehlende Nutverschlusskeile 34' zusammen mit ihren Positionen zu detektieren.

Abschließend soll noch auf durchgeführte praktische Tests eingegangen werden, die mit einer vierpoligen 11 kW-Induktionsmaschine durchgeführt wurden, bei der zuerst ein Nutverschlusskeil bzw. sodann weitere Nutverschlusskeile entfernt wurde bzw. wurden.

Die Messungen wurden im Zustand ohne Last und ohne Fluss sowie ohne Magnetisierung der Maschine durchgeführt. Vorab wurden Messungen an der symmetrischen Maschine vorgenommen, bei denen noch alle Nutverschlusskeile vorhanden waren, um so Referenzwerte für das Fehlerindikatorsystem zu erhalten.

Danach wurden verschiedene Messungen nach Entfernen einzelner Nutverschlusskeile durchgeführt, wobei als erstes ein Nutverschlusskeil in der Position A (in Fig. 8 in Entsprechung zu Fig. 4 ebenfalls mit 34' bezeichnet) entfernt wurde. Mit strichlierten Umrandungen sind in Fig. 8 die Keile für die Phase U angedeutet, wobei die Achse der U-Phase annahmeweise der horizontalen Achse im Diagramm gemäß Fig. 8 entsprechen. Anders gesagt entsprechen die Keile U gemäß den Umrandungen 60 den in der Phase U aktiven Wicklungen.

Wie vorstehend erwähnt führt das Entfernen eines Nutverschlusskeils in der Position +90°, wie in Fig. 8 gezeigt (aber auch des Keiles in der Position -90°), zu einer Änderung des Fehlerindikators in Richtung der Phasenachse U. Auch wenn nur das Fehlen des Nutverschlusskeils 34' in der Position +90° (oder -90°) exakt zur Phasenrichtung U führt, kann das Fehlen von Nutverschlusskeilen in Positionen +/-70° und +/-110° (vgl. die Positionen B und C in Fig. 8) nichtsdestoweniger als „fehlender Nutverschlusskeil in der Phase U" bezeichnet werden.

Im Diagramm von Fig. 9 sind Imaginärteil und Realteil (jeweils in beliebigen Einheiten (a.u. - abitrary units) in einer Zeigerdarstellung veranschaulicht, wobei auch die Phasen U, V, W der Maschine 2 gezeigt sind. Die erhaltenen Messergebnisse sind in Fig. 9 wie folgt eingetragen:

(1) Punkt 61 - fehlerlose Maschine, d.h. alle Nutverschlusskeile 34 sind vorhandenen;

(2) Punkt 62 - der Nutverschlusskeil 34' in der Position A (s. Fig. 8) wurde entfernt;

(3) Punkt 63 - hier wurden die Nutverschlusskeile in den Positionen A und B entfernt; wie ersichtlich vergrößert sich dabei die

Asymmetrie; ähnlich verhält es sich selbstverständlich, wenn die Keile in den Positionen A und C gemäß Fig. 8 entfernt werden;

(4) Punkt 64 - die Nutverschlusskeile in den Positionen A, B und C wurden entfernt; es ergibt sich eine noch stärkere Asymmetrie, wie direkt aus Fig. 9 ersichtlich ist;

(5) Punkt 65 - hier wurde zusätzlich zu den Nutverschlusskeilen in den Positionen A, B und C auch jener in der Position D (s. Fig. 8) entfernt, also ein Keil in einer Position außerhalb der Phase U, sondern vielmehr der Phase W zugehörig;

Wenn man die verschiedenen Messergebnisse in Fig. 9 miteinander vergleicht, ist ersichtlich, dass jeder fehlende Nutverschlusskeil mit einem Zeiger des Fehlerindikators korreliert ist. Die Kombination bei mehreren fehlenden Nutverschlusskeilen ergibt sich durch Summierung der einzelnen Zeiger. Dabei ist es nicht nur möglich, fehlende Nutverschlusskeile 34' als solche zu erkennen, sondern auch zwischen einzelnen oder mehreren fehlenden Nutverschlusskeilen zu unterscheiden und überdies deren räumliche Positionen festzustellen.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Erkennung von Fehlern bei magnetischen Nutverschlüssen des Stators von Wechselstrom-Maschinen (2), vorzugsweise Drehstrommaschinen, insbesondere zur Erkennung von Fehlern an Nutverschlusskeilen (34) oder von fehlenden Nutverschlusskeilen (34'), bei welchem Verfahren der bei Anlegen einer Spannung (V) an die Maschine erzeugte (2) Wicklungsstrom (*i*) überprüft wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Maschine (2) mit einem vorgegebenen Spannungssignal (V) angeregt wird und die dadurch in der Maschine (2) erzeugten Wicklungsströme (*i*) gemessen und evaluiert werden, um von etwaigen Fehlern stammende, statorfeste Asymmetrien des Magnetkreises auf Basis der transienten Reaktanz der Maschine (2) zu erkennen und zu lokalisieren.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Maschine (2) mit Spannungsimpulsen (V) angeregt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Maschine (2) mit einer hochfrequenten Spannung angeregt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Erkennung bei stillstehender Maschine (2) durchgeführt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Spannungs-Anregungen und Strom-Messungen bei verschiedenen Rotorpositionen durchgeführt werden.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass dann, wenn die Maschine (2) bei umlaufendem Rotor untersucht wird, der Einfluss der dabei bewirkten Gegen-EMK dadurch eliminiert wird, dass die Strom-Antworten (*i*) auf verschiedene, insbesondere aufeinanderfolgende Spannungs-Anregungen evaluiert werden.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass ein möglicher Einfluss des Stator-Widerstands auf die Messung dadurch eliminiert wird, dass die Strom-Antworten (*i*) auf verschiedene, insbesondere aufeinanderfolgende Spannungs-An-

regungen evaluiert werden.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Spannungs-Anregungen und Messungen in einem nicht-magnetisierten und bzw. oder unbelasteten Zustand der Maschine (2) durchgeführt werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass aus den Messungen Asymmetrie-Zeiger (40) für eine Spektralanalyse, z.B. mittels FFT, hergeleitet werden.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass im Falle von Drehstrommaschinen die gleichen Spannungs-Anregungen aufeinanderfolgend für alle Phasen (U, V, W) durchgeführt werden.

11. Vorrichtung (1) zur Erkennung von Fehlern bei magnetischen Nutverschlüssen des Stators von Wechselstrom-Maschinen (2), vorzugsweise Drehstrommaschinen, insbesondere zur Erkennung von Fehlern an Nutverschlusskeilen (34) oder von fehlenden Nutverschlusskeilen (34'), mit einer Einrichtung, z.B. einem Umrichter (4), zur Erzeugung von Spannungen (V) zum Anlegen an die Maschine (2), dadurch gekennzeichnet, dass in den Zuleitungen zu den Spannungs-Anschlüssen der Maschine (2) Stromsensoren (6, 7, 8) zum Messen der Strom-Reaktionen (i) der Maschine (2) auf die Spannungs-Anregungen (V) angeordnet sind, die mit Rechenmitteln (14, 18) verbunden sind, die eingerichtet sind, die sich ergebenden Ströme zu evaluieren, um von etwaigen Fehlern stammende, statorfeste Asymmetrien des Magnetkreises auf Basis der transienten Reaktanz der Maschine zu erkennen und zu lokalisieren.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Umrichter (4) zur Abgabe von Spannungsimpulsen (V) eingerichtet ist.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Rechenmittel (14, 18; 14', 15') zur Herleitung von Asymmetrie-Zeigern (40) eingerichtet sind.

14. Vorrichtung nach Anspruch 13, gekennzeichnet durch eine

Spektralanalyseeinheit (16; 16') zur spektralen Analyse der Asymmetrie-Zeiger (40).

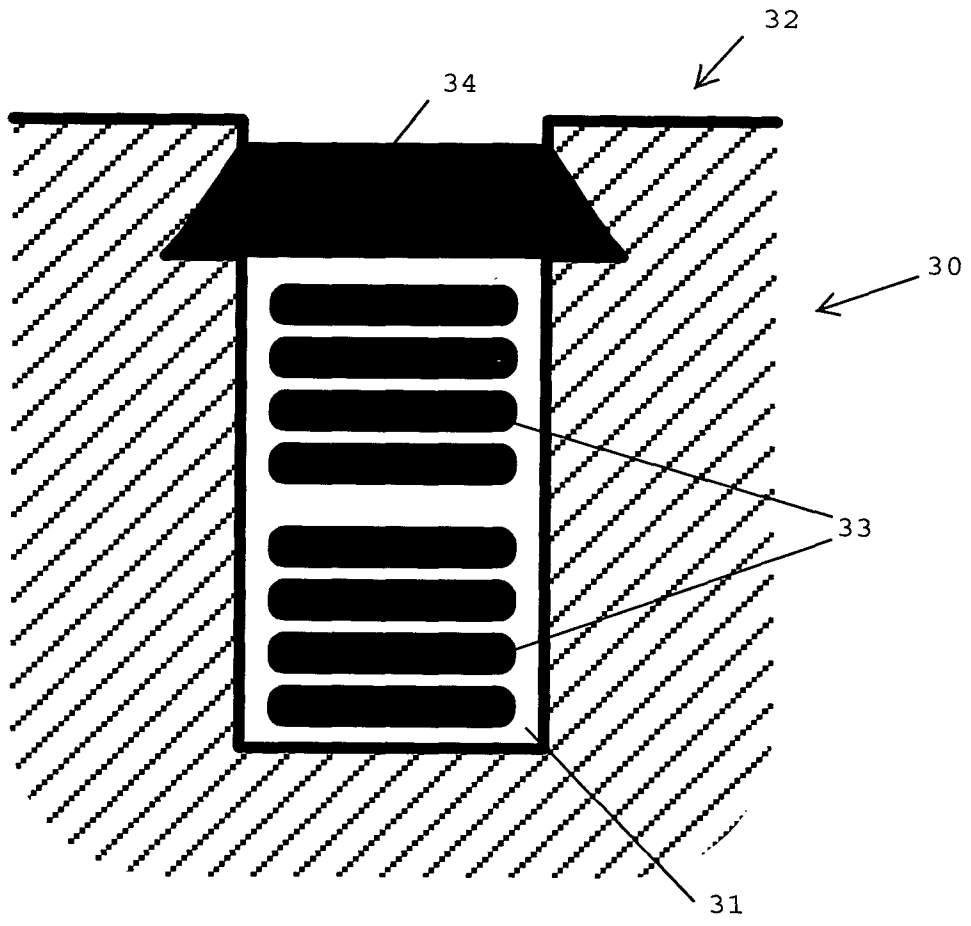

FIG. 1

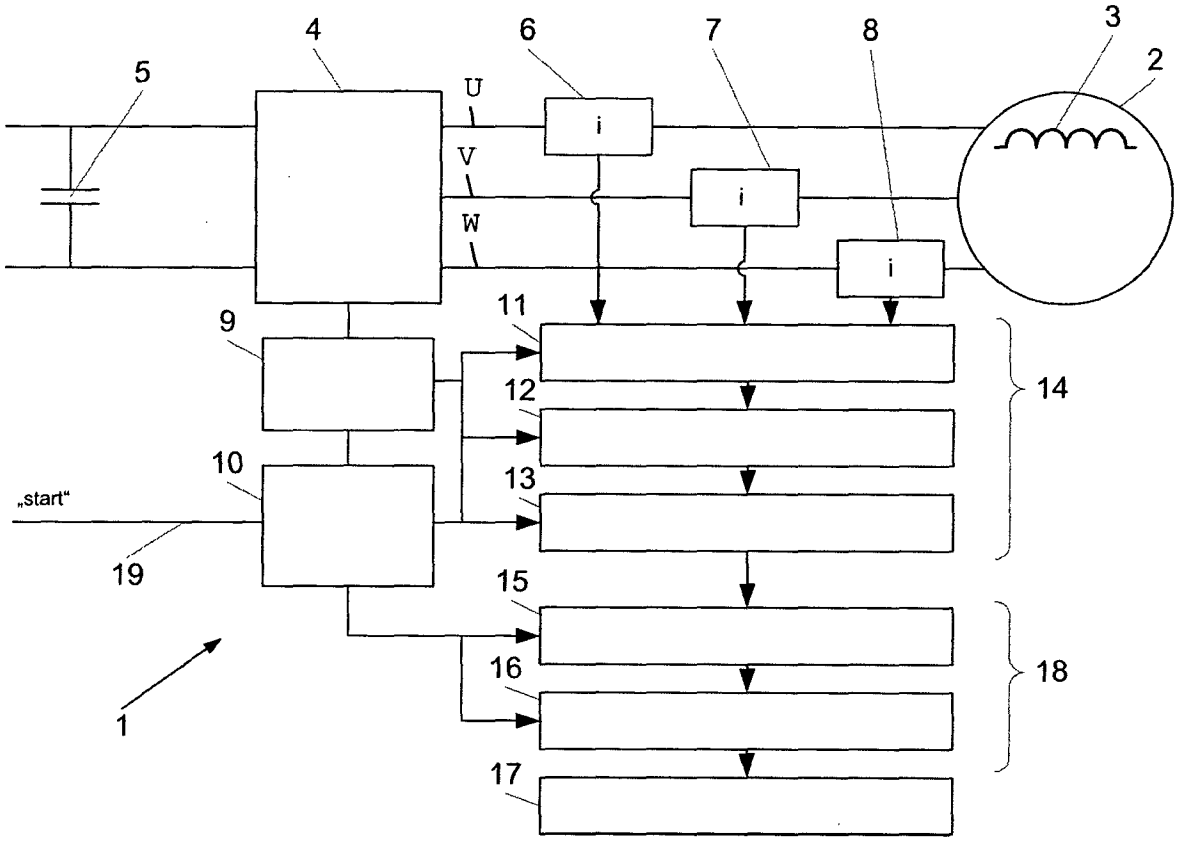

FIG. 2

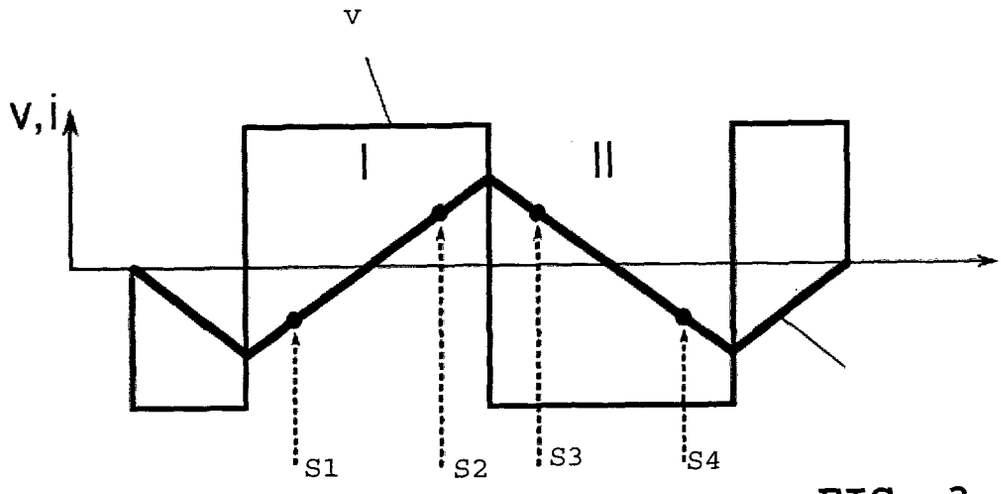

FIG. 3

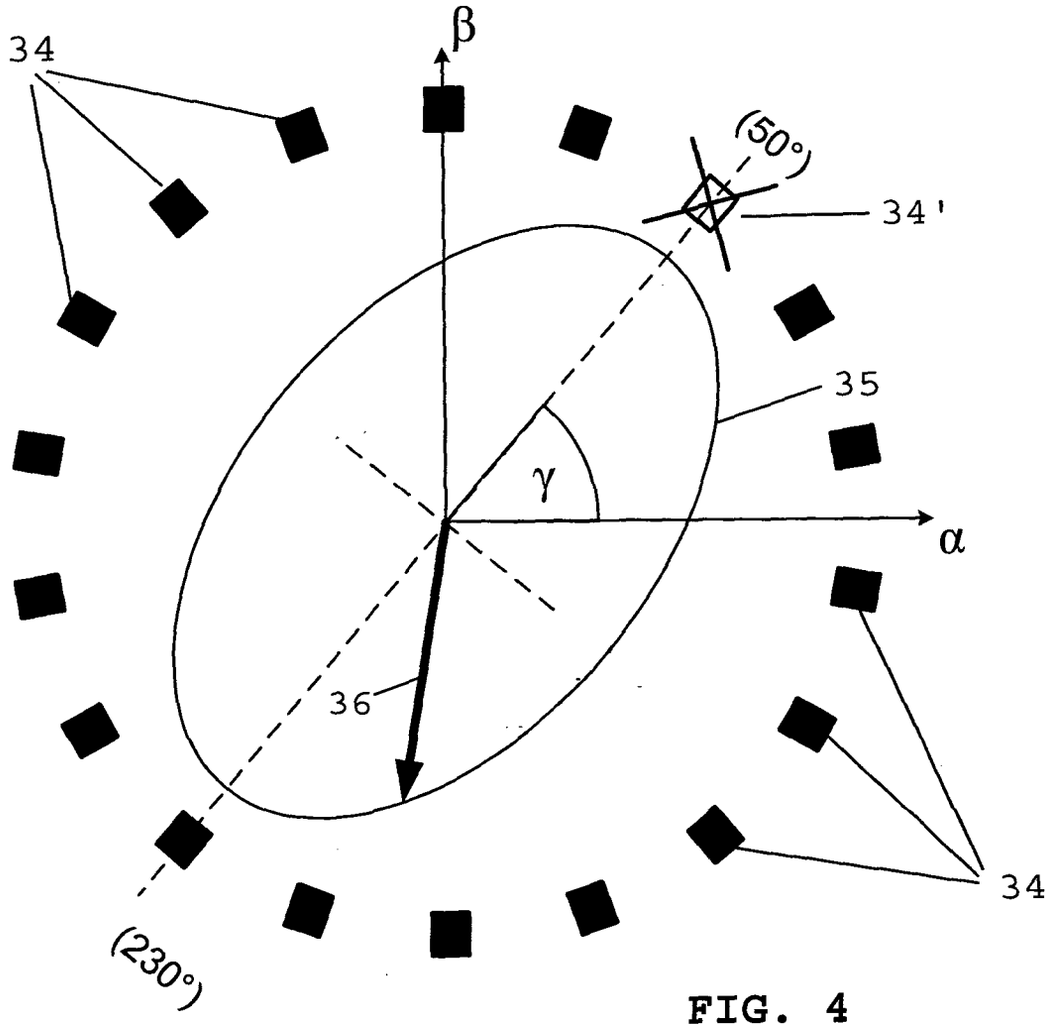

FIG. 4

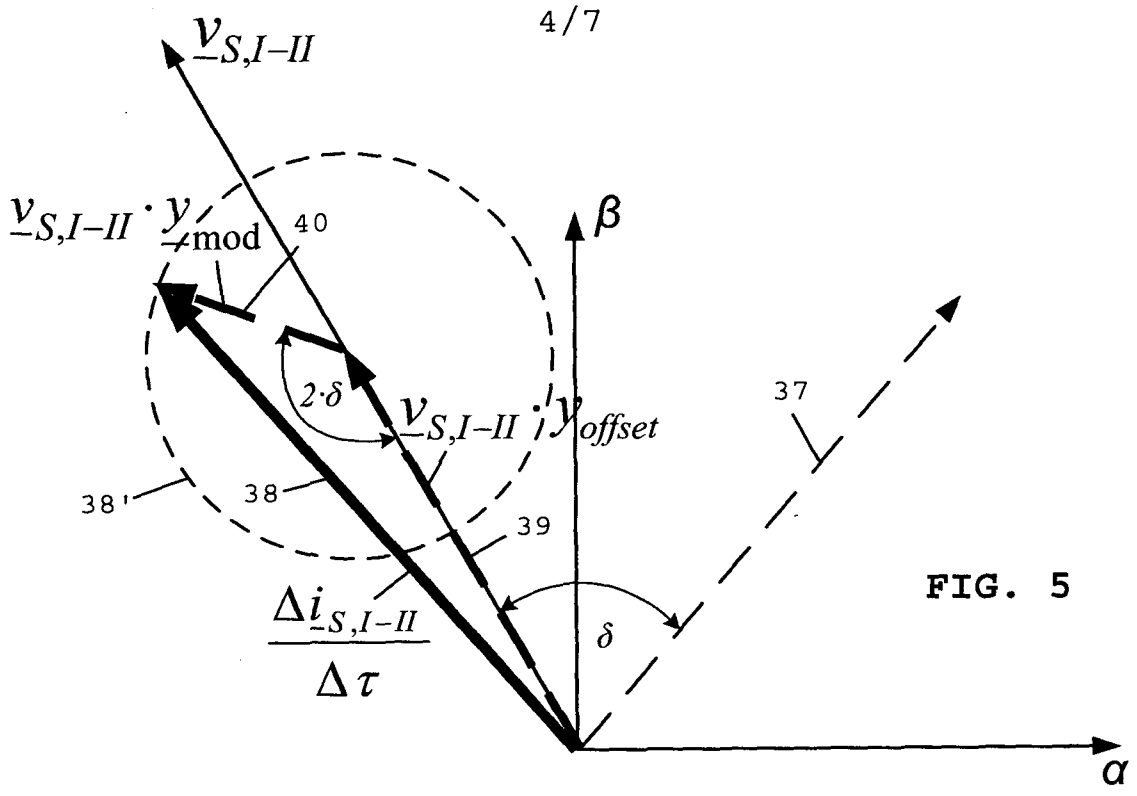

FIG. 5

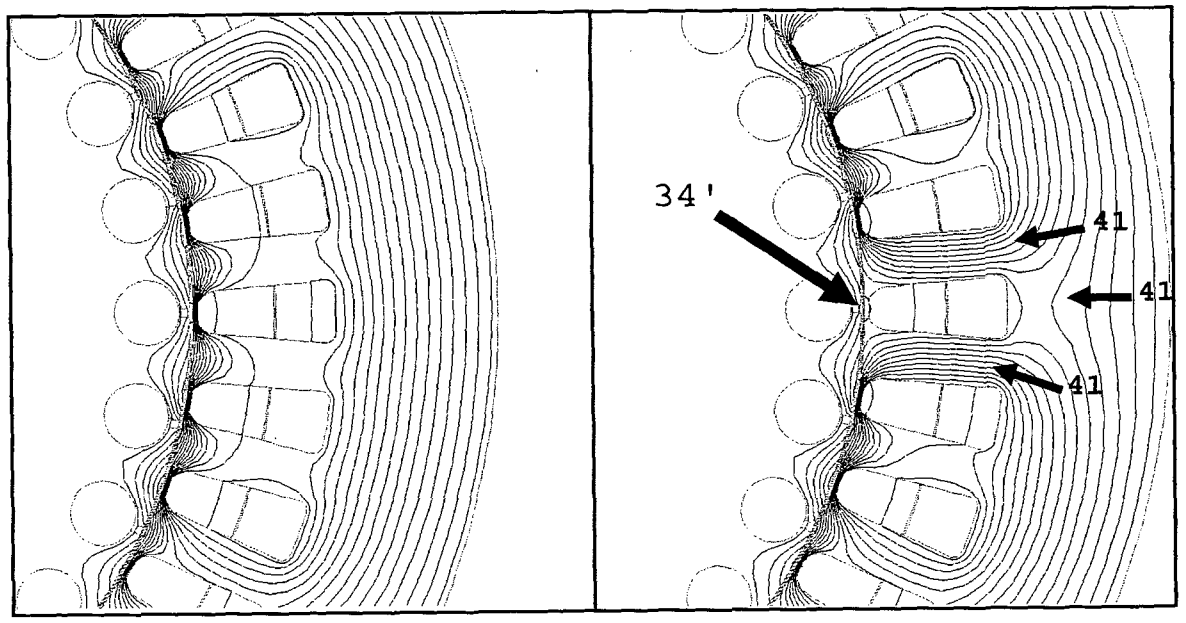

FIG. 6A

FIG. 6B

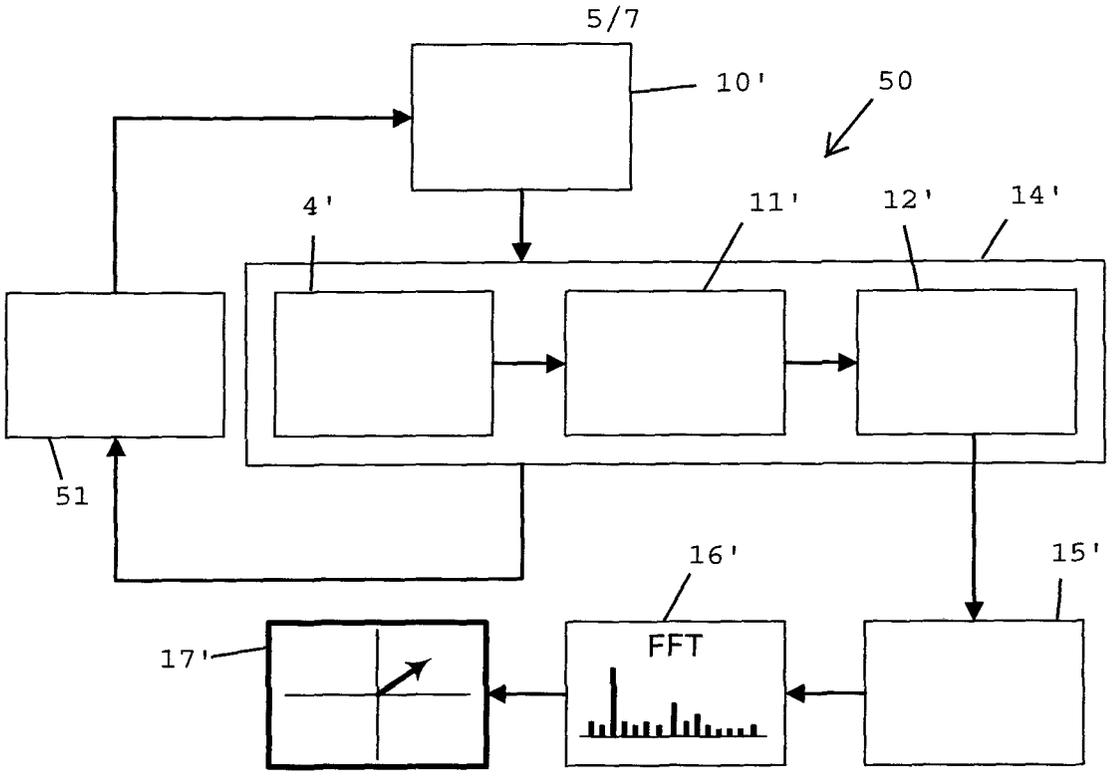

FIG. 7

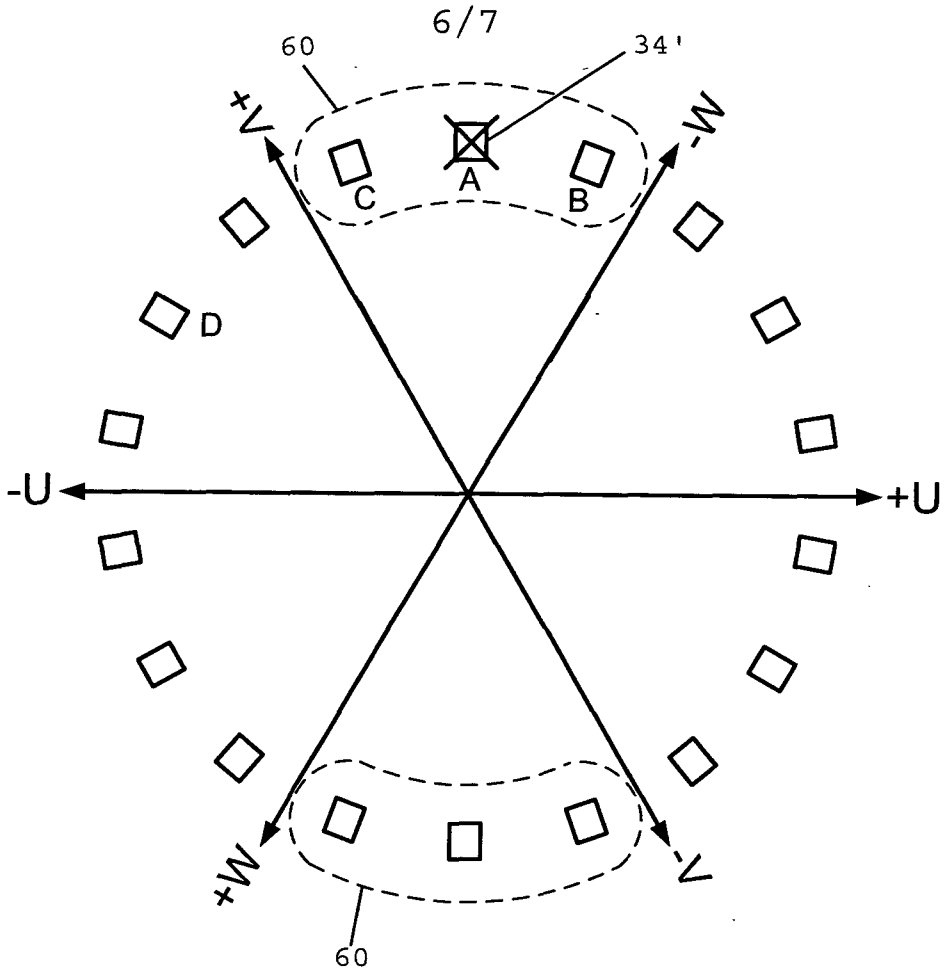

FIG. 8

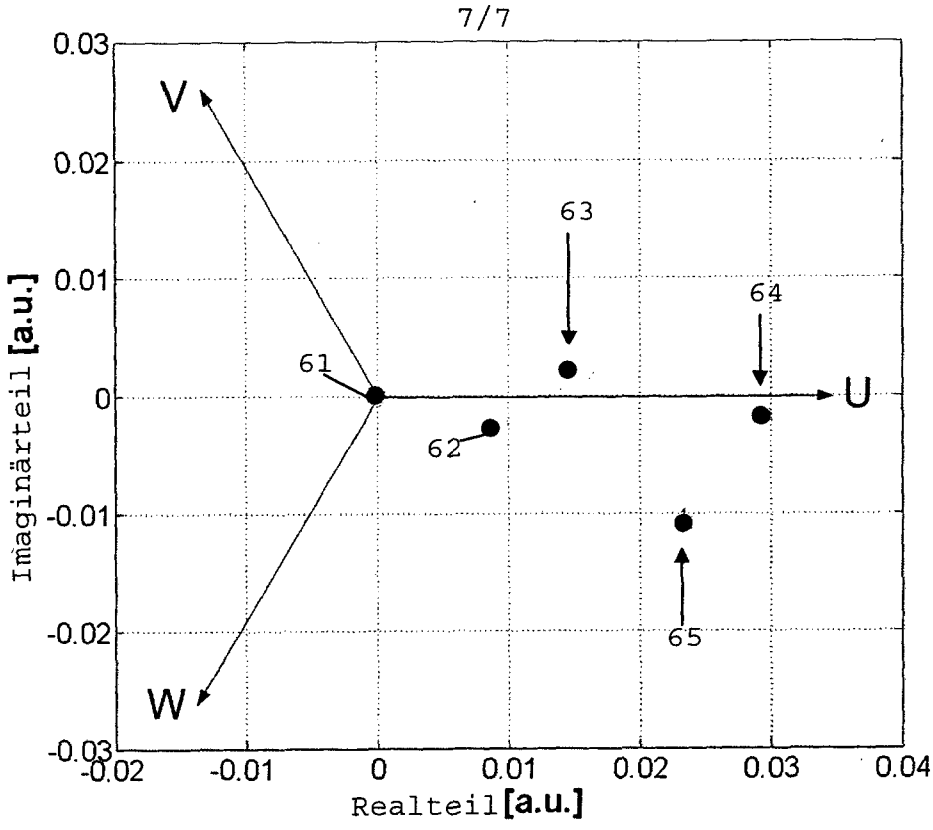
V
U
W
61
62
63
64
65
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
-0.02
-0.01
0
0.01
0.02
0.03
0.04
Imaginärteil [a.u.]
Realteil [a.u.]

FIG. 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/AT2012/000281

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01R31/34
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)
G01R H02K

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	Mike Davis: "Problems and Solutions with Magnetic Stator Wedges", Iris Rotating Machine Conference, 1 July 2007 (2007-07-01), pages 1-5, XP055002425, San Antonio, TX Retrieved from the Internet: URL:http://www.marubun.co.jp/product/measurement/electric/qgc18e0000004nwj-att/Session3_15_IRMC2007.pdf [retrieved on 2011-07-08] cited in the application page 2, column 2, paragraph 3 - page 3, column 1, paragraph 1 page 4 - page 5 ----- -/--	1-14

[X] Further documents are listed in the continuation of Box C.

[X] 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	Date of mailing of the international search report
21 February 2013	04/03/2013

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	O'Callaghan, D

2

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (April 2005)

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2009/301168 A1 (MOORE CHARLES C [US]) 10 December 2009 (2009-12-10) paragraph [0001] - paragraph [0016] -----	1-14
A	US 5 654 603 A (SUNG AN-MIN J [US] ET AL) 5 August 1997 (1997-08-05) column 1, line 5 - column 2, line 34 -----	1-14
A	HAO QIAN ET AL: "Multi-domain analysis of tangential-set permanent magnet synchronous generator", ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS (ICEMS), 2010 INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 10 October 2010 (2010-10-10), pages 1773-1776, XP031830981, ISBN: 978-1-4244-7720-3 the whole document -----	1-14

2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/AT2012/000281

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2009301168 A1	10-12-2009	NONE	
US 5654603 A	05-08-1997	NONE	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/AT2012/000281

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G01R31/34
ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G01R H02K

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	Mike Davis: "Problems and Solutions with Magnetic Stator Wedges", Iris Rotating Machine Conference, 1. Juli 2007 (2007-07-01), Seiten 1-5, XP055002425, San Antonio, TX Gefunden im Internet: URL:http://www.marubun.co.jp/product/measurement/electric/qgc18e0000004nwj-att/Session3_15_IRMC2007.pdf [gefunden am 2011-07-08] in der Anmeldung erwähnt Seite 2, Spalte 2, Absatz 3 - Seite 3, Spalte 1, Absatz 1 Seite 4 - Seite 5 ----- -/--	1-14

[X] Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen [X] 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	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
21. Februar 2013	04/03/2013

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	O'Callaghan, D

2

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 2009/301168 A1 (MOORE CHARLES C [US]) 10. Dezember 2009 (2009-12-10) Absatz [0001] - Absatz [0016] -----	1-14
A	US 5 654 603 A (SUNG AN-MIN J [US] ET AL) 5. August 1997 (1997-08-05) Spalte 1, Zeile 5 - Spalte 2, Zeile 34 -----	1-14
A	HAO QIAN ET AL: "Multi-domain analysis of tangential-set permanent magnet synchronous generator", ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS (ICEMS), 2010 INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 10. Oktober 2010 (2010-10-10), Seiten 1773-1776, XP031830981, ISBN: 978-1-4244-7720-3 das ganze Dokument -----	1-14

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/AT2012/000281

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2009301168 A1	10-12-2009	KEINE	
US 5654603 A	05-08-1997	KEINE	