

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2018-74902
(P2018-74902A)

(43) 公開日 平成30年5月10日(2018.5.10)

(51) Int.Cl.
H02P 6/34 (2016.01)

F I
H02P 6/34

テーマコード(参考)
5H560

審査請求 未請求 請求項の数 16 O L 外国語出願 (全 54 頁)

(21) 出願番号 特願2017-208171 (P2017-208171)
(22) 出願日 平成29年10月27日(2017.10.27)
(31) 優先権主張番号 16195987.9
(32) 優先日 平成28年10月27日(2016.10.27)
(33) 優先権主張国 欧州特許庁(EP)

(71) 出願人 506012213
ディスペース デジタル シグナル プロ
セッシング アンド コントロール エン
지니어リング ゲゼルシャフト ミット
ベシュレンクテル ハフツング
dspace digital sign
al processing and c
ontrol engineering
GmbH
ドイツ連邦共和国 パデルボルン ラーテ
ナウシュトラーセ 26
Rathenaustr. 26, D-33
102 Paderborn, Germ
any

最終頁に続く

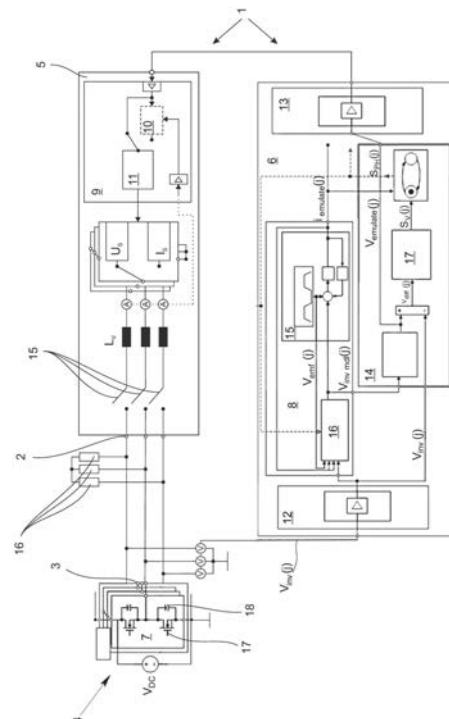
(54) 【発明の名称】 負荷エミュレータによる三相電動モータのシミュレーション方法および対応する負荷エミュレータ

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 負荷エミュレータによる三相電動モータのシミュレーション方法を提供する。

【解決手段】 負荷エミュレータ(1)はスイッチ手段(15)を含み、スイッチ手段(15)によって、エミュレータパワーエレクトロニクス装置(5)を給電端子(3)から高抵抗で遮断可能であり、かつスイッチ手段(15)によって、エミュレータパワーエレクトロニクス装置(5)を給電端子(3)に低抵抗で接続可能であり、給電端子(3)は、高抵抗の抵抗回路網(16)を介して互いに接続されており、電動モータの選択された動作状態をシミュレートするために、エミュレータパワーエレクトロニクス装置(5)は、スイッチ手段(15)によって給電端子(3)から高抵抗で分離され、または給電端子(3)からすでに高抵抗で分離されているエミュレータパワーエレクトロニクス装置(5)は、スイッチ手段(15)によって低抵抗で給電端子(3)に接続される。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

負荷エミュレータ(1)による三相電動モータのシミュレーション方法であって、
前記負荷エミュレータ(1)は、該負荷エミュレータ(1)の負荷端子(2)を介して、
モータ制御装置(4)の給電端子(3)と三相で接続されており、

前記負荷エミュレータ(1)は、エミュレータパワーエレクトロニクス装置(5)と、
該エミュレータパワーエレクトロニクス装置(5)を制御するエミュレータ制御装置(6)
とを有しており、

前記エミュレータ制御装置(6)は、前記モータ制御装置(4)により駆動されている
給電端子(3)と駆動されていない給電端子(3)とを検出し、

前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置(5)は、前記エミュレータ制御装置(6)
によって以下のように駆動される、すなわち、

前記モータ制御装置(4)により駆動されている前記給電端子(3)には、前記エミュ
レータ制御装置(6)によりモータモデル(8)に基づき計算された相電流 $i_{emulate}$
が流れ、前記モータ制御装置(4)により駆動されていない前記給電端子(3)には
、前記エミュレータ制御装置(6)によりモータモデル(8)に基づき計算された相電圧
 $v_{emulate}$ が送出される、
ように駆動される、

負荷エミュレータ(1)による三相電動モータのシミュレーション方法において、

前記負荷エミュレータ(1)はスイッチ手段(15)を含み、該スイッチ手段(15)
によって、前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置(5)を前記給電端子(3)か
ら高抵抗で遮断可能であり、かつ該スイッチ手段(15)によって、前記エミュレータパ
ワーエレクトロニクス装置(5)を前記給電端子(3)に低抵抗で接続可能であり、前記
給電端子(3)は、高抵抗の抵抗回路網(16)を介して互いに接続されており、

前記電動モータの選択された動作状態をシミュレートするために、前記エミュレータパ
ワーエレクトロニクス装置(5)は、前記スイッチ手段(15)によって前記給電端子(3)
から高抵抗で分離され、または前記給電端子(3)からすでに高抵抗で分離されてい
る前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置(5)は、前記スイッチ手段(15)に
よって低抵抗で前記給電端子(3)に接続される、
ことを特徴とする、

負荷エミュレータ(1)による三相電動モータのシミュレーション方法。

【請求項 2】

高抵抗の抵抗回路網(16)として、実質的にオーミックな3つの抵抗から成るスター
結線が選択され、該スター結線の自由端各々は、前記モータ制御装置(4)のそれぞれ
の給電端子(3)と接続されている、

請求項 1 記載の方法。

【請求項 3】

初期状態として、前記モータ制御装置(4)はいかなる給電端子(3)も駆動せず、前
記エミュレータパワーエレクトロニクス装置(5)は前記スイッチ手段(15)によって
、前記給電端子(3)から高抵抗で分離されており、

前記モータ制御装置(4)の各給電端子(3, i, j)間で測定により求められた出力
差分電圧 $v_{in v, diff}(i, j)$ のうちの少なくとも1つが、予め定められた電圧
閾値 $TH_{impedance}$ よりも大きい場合に、前記モータ制御装置(4)により開始
された前記給電端子(3)の駆動による電動機動作のモータ始動が識別される、

請求項 1 または 2 記載の方法。

【請求項 4】

初期状態として、前記モータ制御装置(4)はいかなる給電端子(3)も駆動せず、前
記エミュレータパワーエレクトロニクス装置(5)は前記スイッチ手段(15)によって
、前記給電端子(3)から高抵抗で分離されており、

前記モータモデル(8)のモータ回転数 $m o t, e m u$ の値が求められて、モータ回

10

20

30

40

50

転数 $m o t , e m u$ がゼロと等しくない場合に、発電機動作のモータ始動が識別される、

請求項 1 から 3 までのいずれか 1 項記載の方法。

【請求項 5】

電動機動作または発電機動作のモータ始動が識別された場合、前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) は前記スイッチ手段 (15) によって、前記給電端子 (3) に低抵抗で接続され、

前記エミュレータ制御装置 (6) は、前記負荷端子 (2) に電圧が印加されるように、前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) の前記負荷端子 (2) を駆動する、
請求項 3 または 4 記載の方法。

10

【請求項 6】

前記エミュレータ制御装置 (6) は、前記モータ制御装置 (4) から前記給電端子 (3) へ送出される可能性がないテスト電圧が前記給電端子 (3) に印加されるように、前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) の前記負荷端子 (2) を駆動し、

特に前記テスト電圧は、前記モータ制御装置 (4) の中間回路電圧 $V_{D C _ L i n k}$ の半分の値に、対応するモータ相におけるシミュレートされた逆誘起電圧を加算した電圧に相応する、

請求項 5 記載の方法。

【請求項 7】

前記給電端子 (3) への前記テスト電圧の印加は、待ち時間 t_3 を経て行われ、

前記モータ制御装置 (4) の 1 つの給電端子 j において測定された出力電圧 $V_{i n v} (j)$ と、前記待ち時間 t_3 後に前記負荷端子 (2) を介して送出された前記テスト電圧との差分電圧 $V_{d i f f} (j)$ の絶対値が、予め定められた電圧閾値 $V_{T H}$ よりも大きい場合に、前記給電端子 j の駆動状態 $S_{P H} (j) = 0$ が識別される、

請求項 6 記載の方法。

20

【請求項 8】

前記待ち時間 t_3 は少なくとも、前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) が前記テスト電圧の設定値を確実に調整するために必要とする長さを選定される、

請求項 7 記載の方法。

【請求項 9】

前記モータ制御装置 (4) の前記給電端子 j が駆動状態 $S_{P H} (j) = 0$ にあることが識別された後、前記エミュレータ制御装置 (6) は、いまや前記モータ制御装置 (4) により駆動されている前記給電端子 j を介して、前記エミュレータ制御装置 (6) により計算された相電流 $i_{e m u l a t e} (j)$ が流れるように、前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) を駆動し、

特に、同時に 2 つの給電端子 (3) が駆動されていることが識別された場合には、モータモデル (8) として矩形波転流によるモータのモデルが適用され、

同時に 3 つの給電端子 (3) が駆動されていることが識別された場合には、モータモデル (8) として正弦波転流によるモータのモデルが適用される、

請求項 7 または 8 記載の方法。

30

40

【請求項 10】

前記エミュレータ制御装置 (6) により、駆動状態 $S_{P H} (k) = 0$ から非駆動状態 $S_{P H} (k) = 1$ への前記モータ制御装置 (4) の給電端子 k の遷移が、以下のことにより識別される、すなわち、

前記エミュレータ制御装置 (6) により計算された相電流 $i_{e m u l a t e} (k)$ が、予め定められた第 1 の電流値 $i_{e m u l a t e , 1} (k)$ から予め定められた第 2 の電流値 $i_{e m u l a t e , 2} (k)$ まで減少する期間であるタイムインターバル $T_{I v c a l c , 1}$ 中に、前記モータ制御装置 (4) の前記給電端子 k の対応する測定された出力電圧 $V_{i n v} (k)$ について時間積分 $V_{I n t e g r a l , 1}$ が計算され、該時間積分 $V_{I n t e g r a l , 1}$ が、予め定められた電圧時間閾値 $V_{D i o d e T H , 1} (k)$ よりも大

50

きい、

ということにより識別される、

請求項 1 から 9 までのいずれか 1 項記載の方法。

【請求項 1 1】

前記予め定められた第 1 の電流値 $i_{emulate, 1}(k)$ は、前記相電流 $i_{emulate, 1}(k)$ の計算された最大電流値の半分よりも小さく、特に前記相電流 $i_{emulate, 1}(k)$ の計算された最大電流値の 4 分の 1 よりも小さく、かつ/または、

前記予め定められた第 2 の電流値 $i_{emulate, 2}(k)$ は、前記予め定められた第 1 の電流値 $i_{emulate, 1}(k)$ の分数であり、好ましくは前記予め定められた第 1 の電流値 $i_{emulate, 1}(k)$ の 4 分の 3 であり、かつ/または、

前記予め定められた電圧時間閾値 $V_{DiodeTH, 1}(k)$ は、前記モータ制御装置 (4) に含まれる環流ダイオード (18) の環流ダイオード電圧の半分の時間積分 $V_{Integral, 1}$ に対応する、

請求項 10 記載の方法。

【請求項 1 2】

前記エミュレータ制御装置 (6) により駆動状態 $S_{PH}(k) = 0$ から非駆動状態 $S_{PH}(k) = 1$ への前記モータ制御装置 (4) のすべての給電端子の遷移が調べられ、

駆動状態 $S_{PH}(k) = 0$ から非駆動状態 $S_{PH}(k) = 1$ への前記モータ制御装置 (4) の少なくとも 2 つの給電端子 (3) の遷移が識別された場合には、前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) が前記スイッチ手段 (15) によって、前記負荷端子 (2) から高抵抗で分離される、

請求項 10 または 11 記載の方法。

【請求項 1 3】

三相電動モータをシミュレートする負荷エミュレータ (1) であって、

当該負荷エミュレータ (1) は、該負荷エミュレータ (1) の負荷端子 (2) を介して、モータ制御装置 (4) の給電端子 (3) と三相で接続可能であり、

当該負荷エミュレータ (1) は、エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) と、該エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) を制御するエミュレータ制御装置 (6) とを有しており、

前記エミュレータ制御装置 (6) は、前記モータ制御装置 (4) により駆動されている給電端子 (3) と駆動されていない給電端子 (3) とを検出し、

前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) は、前記エミュレータ制御装置 (6) によって駆動されて、前記モータ制御装置 (4) により駆動されている前記給電端子 (3) には、前記エミュレータ制御装置 (6) によりモータモデル (8) に基づき計算された相電流 $i_{emulate}$ が流れ、前記モータ制御装置 (4) により駆動されていない前記給電端子 (3) には、前記エミュレータ制御装置 (6) によりモータモデル (8) に基づき計算された相電圧 $v_{emulate}$ が送出される、

三相電動モータをシミュレートする負荷エミュレータ (1) において、

当該負荷エミュレータ (1) はスイッチ手段 (15) を含み、該スイッチ手段 (15) によって、前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) を前記給電端子 (3) から高抵抗で遮断可能であり、かつ該スイッチ手段 (15) によって、前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) を前記給電端子 (3) に低抵抗で接続可能であり、前記給電端子 (3) は、高抵抗の抵抗回路網 (16) を介して互いに接続されている、

ことを特徴とする、

三相電動モータをシミュレートする負荷エミュレータ (1) 。

【請求項 1 4】

前記エミュレータ制御装置 (6) は、前記電動モータの選択された動作状態をシミュレートするために、前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) と前記スイッチ手段 (15) とを以下のように駆動する、すなわち、

前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置 (5) が、前記スイッチ手段 (15) に

10

20

30

40

50

よって前記給電端子(3)から高抵抗で分離され、または前記給電端子(3)からすでに高抵抗で分離されている前記エミュレータパワーエレクトロニクス装置(5)が、前記スイッチ手段(15)によって低抵抗で前記給電端子(3)に接続される、ように駆動する、

請求項13記載の負荷エミュレータ(1)。

【請求項15】

前記高抵抗の抵抗回路網(16)は、実質的にオーミックな3つの抵抗から成るスター結線であり、該スター結線の自由端各々は、前記モータ制御装置(4)のそれぞれ別の給電端子(3)と接続されている、

請求項13または14記載の負荷エミュレータ(1)。

【請求項16】

前記エミュレータ制御装置(6)は、

規定どおりに使用した場合に、該エミュレータ制御装置(6)が請求項3から12までの少なくとも1つの請求項の特徴部分に記載された方法を実施する、ように構成されている、

請求項13から15までのいずれか1項記載の負荷エミュレータ(1)。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、負荷エミュレータによる三相電動モータのシミュレーション方法に関する。この場合、負荷エミュレータはその負荷端子を介して、モータ制御装置の給電端子と三相で接続されており、負荷エミュレータは、エミュレータパワーエレクトロニクス装置と、このエミュレータパワーエレクトロニクス装置を制御するエミュレータ制御装置とを有しており、エミュレータ制御装置は、モータ制御装置により駆動されている給電端子と、駆動されていない給電端子とを検出する。その際、エミュレータパワーエレクトロニクス装置は、エミュレータ制御装置により駆動されて、モータ制御装置により駆動されている給電端子には、エミュレータ制御装置によりモータモデルに基づき計算された相電流 $i_{e.m.u.l.a.t.e}$ が流れ、モータ制御装置により駆動されていない給電端子には、エミュレータ制御装置によりモータモデルに基づき計算された相電圧 $v_{e.m.u.l.a.t.e}$ が送出される。本発明はさらに、負荷エミュレータのエミュレータ制御装置にも関する。このエミュレータ制御装置は、上述の三相電動モータのシミュレーション方法を、エミュレータパワーエレクトロニクス装置と共働して実施することができるように構成されている。

【0002】

負荷エミュレータを用いた電気負荷のシミュレーション方法は、「本物の」電気駆動装置を、本明細書では三相電動モータである電気駆動装置を、モータ制御装置に接続するようなことはせずに、実験室のコンディションのもとでその制御装置をテストするために用いられる。もっと正確に言えば、電気負荷つまり三相電動モータは、負荷エミュレータによってシミュレートされる。モータ制御装置の多くは、変換器の形態の電力出力段を備えた制御装置から成る。この制御装置は電流変換器制御データを生成し、それらのデータは、一般に半導体スイッチ素子(IGBT, IGBT等)によって実現されている変換器の電力スイッチを適切に駆動するために用いられる。本明細書で考察する適用事例の場合、モータ制御装置の変換器はインバータとして動作し、つまりこの変換器は、エネルギー源として直流電圧源を有し、交流電圧によって負荷を駆動する。モータ制御装置の変換器は通常、既述の電力スイッチにより実現されたハーフブリッジ回路を含んでおり、この場合、それらの電力スイッチには、逆並列接続された環流ダイオードが設けられており、電力スイッチが開かれているときにそれらの環流ダイオードを介して、モータのインダクタンスにより駆動される電流を徐々に低減して消滅させることができる。

【0003】

負荷エミュレータの多くは、ハードウェア・イン・ザ・ループ・シミュレータとして実現され、つまりシミュレーションコンピュータによって実現される。シミュレーションコ

10

20

30

40

50

ンピュータは、シミュレートすべき環境の数学的モデルを、本明細書では三相電動モータである負荷の数学的モデルを、数値的手法を用いて計算し、このコンピュータの側にはパワーエレクトロニクス出力段（エミュレータパワーエレクトロニクス装置）が設けられていて、負荷エミュレータの負荷端子を介してこの出力段を、モータ制御装置の対応する給電端子と接続することができる。このようにすることで、負荷エミュレータに実装された三相電動モータのシミュレーション方法により、モータ制御装置があたかも本物の駆動装置と接続されているかのように、モータ制御装置に対しその給電端子を介して電氣的に負荷が印加される、という結果がもたらされる。

【0004】

既述の三相電動モータのシミュレーション方法は、たとえば欧州特許出願公開第2940857号明細書（EP 2940857 A1）から公知である。この文献によれば、三相電動モータとして、もっぱらブラシレス直流モータが扱われている。この文献は内容的に本願と類似していることから、この出願の開示内容を参照されたい。ブラシレス直流モータは、ブラシレス構造ゆえに、低摩耗でメンテナンスの手間がかからない。

【0005】

ブロック転流もしくは矩形波転流により駆動されるブラシレス直流モータの場合、モータ制御装置により、3つのモータ相のうち常に2つのモータ相が駆動され、つまりこの場合、モータ制御装置の3つの給電端子のうち2つの給電端子が駆動され、三相巻線のうち3つめの相は、モータ制御装置によって駆動されず、したがってモータ制御装置の対応する給電端子も駆動されない。モータ制御装置により三相巻線を周期的に切り替えることによって、回転磁界が生成される。モータ制御装置により駆動されないブラシレス直流モータの相では、相電流が低下していき、まもなく完全に流れなくなる。ブラシレス直流モータの非駆動相は、しばしば非通電相とも呼ばれるが、上述のように、非駆動状態と非通電状態とが時間的にばらばらになる可能性がある。ブラシレス直流モータの1つの相が、モータ制御装置によってもはや駆動されなくなると、その結果、もはや駆動されていない相における相電流が、必ずしも転流直後ではないけれども、最終的には流れなくなり、したがってこの相が実際に非通電状態となる。

【0006】

ただし、ブラシレス直流モータの非駆動相には逆電圧が誘起され、この逆電圧の検出は、ブラシレス直流モータを駆動するために極めて重要である。その理由は、この逆電圧から回転子の位置角度を特定できるからであり、したがってモータ制御装置は、別個に角度エンコーダを用いなくても、次の転流時点を求めることができ、つまり非駆動給電端子から駆動給電端子への、およびその逆への切替時点を求めることができるからである。よって、矩形波転流によるブラシレス直流モータのエミュレーションにおいても、モータ制御装置が角度エンコーダを用いなくても次の転流時点を特定できるようにする目的で、非駆動相に誘起される逆電圧のシミュレーションが重要である。とはいえ、角度エンコーダを装備したブラシレス直流モータの場合であっても、エミュレーションを行うにあたって逆電圧の計算が重要である。なぜならば、そのようにすることによってのみ、エミュレートされるモータの物理特性つまりは接続負荷を適正に計算してシミュレートできるからである。

【0007】

エミュレータパワーエレクトロニクス装置には、モータ制御装置の給電端子に相応の電氣的接続負荷を印加するために、電圧源と電流源とが含まれており、これらはいずれもはデカップリングインダクタを介して、エミュレータパワーエレクトロニクス装置の負荷端子と接続可能である。したがって、電圧源および電流源をエミュレータパワーエレクトロニクス装置の負荷端子と相応に接続することによって、モータ制御装置により駆動されていないケースであれば、逆誘起電圧だけが負荷端子に印加されるのか、またはモータ制御装置により駆動されているケースであれば、負荷端子に電流が流れているのか、に反応することができる。負荷端子と電圧源もしくは電流源との間に設けられたデカップリングインダクタによって、接続された電圧源もしくは電流源により予め定められた電氣的接続負

10

20

30

40

50

荷の作用が負荷端子に即座に及ぼされてしまうことが阻止される。

【0008】

欧州特許出願公開第2940857号明細書(EP 2940857 A1)に記載されている方法によれば、負荷エミュレータを用いることにより、動作条件が変動しても転流時点が確実に識別されるようにして、三相ブラシレス直流モータの高品質のシミュレーションが実現される。このことは、三相直流モータの通常動作について当てはまる。

【0009】

つまり従来技術から公知の方法によれば、三相直流モータの電動機動作プロセスをシミュレートし、モータ制御装置による直流モータの種々の相の駆動切替を識別して、それに対し相応に応動することができる。

10

【0010】

従来技術から公知の方法を拡張して、実質的に任意の三相電動モータを、つまりたとえば永久磁石により励磁される同期機、または正弦波転流による、または同等に駆動される非同期モータも、負荷エミュレータを用いてシミュレートできるようにすることに、多大な関心が集まっている。正弦波転流による駆動と矩形波転流による駆動との本質的な相違点は、正弦波転流による駆動の場合には、すべてのモータ相が途切れることなく駆動される、ということであり、すなわち動作中、モータ相のいずれも非駆動状態つまり是非通電状態にはならない、ということである。この場合、持続的に規定された電圧が、モータ制御装置のパワーエレクトロニクス装置から、モータ制御装置の給電端子に出力される。

20

【0011】

しかも、負荷エミュレータを用いて三相電動モータをシミュレートするための従来技術から公知の方法によれば、電動モータの動作時の特別な状態に対し適切に応動することができず、または著しい制約を伴ってしか応動できない。上述の特別な状況とはたとえば、モータ制御装置の初期化ルーチンの取り扱いである。この初期化ルーチンの役割は特に、制御装置への電動モータの接続および電動モータの基本特性(たとえば短絡、断線の存在など)をチェックすることであり、その際、モータ制御装置の出力段によってたとえば任意の電圧が1つのモータ相に送出され、他の相においてフィードバック測定される。これとは別のこの種のルーチンは、たとえばモータ診断のために用いられる。

【0012】

したがって本発明の課題は、冒頭で述べた負荷エミュレータによる三相電動モータのシミュレーション方法を、ブラシレス三相直流モータの動作に限定されないようにすると共に、通常の電動機動作または発電機動作以外の三相電動モータの特別動作状態も考慮されるように、さらに発展させることにある。

30

【0013】

これまでの記述から導き出された上述の課題は、三相電動モータをシミュレートするための冒頭で述べた形式の方法において、以下のように構成することによって解決される。すなわち、負荷エミュレータはスイッチ手段を含み、スイッチ手段によって、エミュレータパワーエレクトロニクス装置を給電端子から高抵抗で遮断可能であり、かつスイッチ手段によって、エミュレータパワーエレクトロニクス装置を給電端子に低抵抗で接続可能であり、給電端子は、高抵抗の抵抗回路網を介して互いに接続されている。さらに、電動モータの選択された動作状態をシミュレートするために、エミュレータパワーエレクトロニクス装置は、スイッチ手段によって給電端子から高抵抗で分離され、または給電端子からすでに高抵抗で分離されているエミュレータパワーエレクトロニクス装置は、スイッチ手段によって低抵抗で給電端子に接続される。

40

【0014】

本発明による方法を実施するために、負荷エミュレータは回路技術的に、スイッチ手段と高抵抗の抵抗回路網とによって補われる。スイッチ手段によって、エミュレータパワーエレクトロニクス装置を給電端子から高抵抗で遮断することができ、当然ながらその逆に、エミュレータパワーエレクトロニクス装置を再び給電端子に低抵抗で接続することもできる。このような措置によってまずは基本的に可能となるのは、エミュレータパワーエ

50

クトロニクス装置をモータ制御装置から有効に電氣的に分離することである。この「分離」を、様々な回路技術的措置によって実現することができる。その際、完全な直流分離が必ずしも生じていなくてもよく、たとえば完璧な直流分離を成すものではない半導体スイッチなどを介して、エミュレータパワーエレクトロニクス装置を給電端子から、著しく高抵抗で電氣的に分離できれば、それでも十分である。つまりここで意図されているスイッチ手段によれば、モータ制御装置とエミュレータパワーエレクトロニクス装置との間の相互作用を阻止することができ、あとでさらに説明するように、このことは多くの状況において有利である。

【0015】

これに加えて給電端子は、高抵抗の抵抗回路網を介して互いに接続されている。その際、高抵抗の抵抗回路網を介した給電端子のこのような接続は、スイッチ手段の影響を受けず、つまり高抵抗の抵抗回路網は、スイッチ手段によってエミュレータパワーエレクトロニクス装置が給電端子から高抵抗で遮断されているときでも、給電端子とは接続されている。負荷エミュレータの通常動作中、つまりエミュレータパワーエレクトロニクス装置と給電端子との間で低抵抗の接続が機能しているときには、抵抗回路網によってもモータ制御装置にほとんど負荷が印加されないように、抵抗回路網を介した給電端子の高抵抗の接続が厳密に選定されている。抵抗回路網を設けた意義は、エミュレータパワーエレクトロニクス装置がスイッチ手段により負荷端子もしくは給電端子から高抵抗で遮断された状態のときにも、モータ制御装置の各給電端子が結線されており、つまりそれらの給電端子は負荷エミュレータの負荷端子と接続されている、という点にある。したがってモータ制御装置の給電端子は電氣的に開放された状態ではなく、高抵抗の抵抗回路網を介して互いに接続されている。

10

20

【0016】

これにより回路技術的には、たとえエミュレータパワーエレクトロニクス装置がモータ制御装置から高抵抗で分離されていても、モータ制御装置の特定の動作態様に対して基本的に応動可能である、という前提条件がもたらされる。このことが望まれるのはたとえば、モータ制御装置が初期化フェーズ中、給電端子に所定の電圧を送出し、またはそれぞれ異なる給電端子に所定の電圧パターンを送出し、見かけ上は接続されているように見えるモータに関して情報を取得する目的で、別の給電端子を介して電圧をフィードバック測定しようという場合などである。このケースではかかるフィードバック通報を、高抵抗の抵抗回路網を介してそのまま行うことができる。つまり高抵抗の抵抗回路網は、エミュレータパワーエレクトロニクス装置が給電端子から高抵抗で遮断された状態にあるときにも、モータ制御装置にとっては接続されたモータを成すものである。

30

【0017】

したがってモータ制御装置と電動モータの初期化という選択された動作状態を扱うために、スイッチ手段によってエミュレータパワーエレクトロニクス装置が給電端子から高抵抗で分離される。これとは逆に有利になり得るのは、電動モータの始動という動作状態が選択された場合に、まずはスイッチ手段によってエミュレータパワーエレクトロニクス装置を給電端子から分離し、モータ制御装置から給電端子に送出される信号パターンを観察し、次いで負荷エミュレータの適切な調整および同期合わせを行ってから、エミュレータパワーエレクトロニクス装置を再び給電端子に低抵抗で接続することであり、したがってこの場合には、高抵抗で分離された状態から低抵抗で接続された状態に遷移させられる。

40

【0018】

好ましくは、負荷エミュレータによる三相電動モータのシミュレーション方法は、以下のように構成されている。すなわち、高抵抗の抵抗回路網として、実質的にオーミックな3つの抵抗から成るスター結線が選択され、このスター結線の自由端各々は、モータ制御装置のそれぞれ別の給電端子と接続されている。対称的なスター結線によって、シミュレートすべき三相電動モータの、通常は同様に対称的に構成された相がシミュレートされる。スター結線の中性点は電位的に自由な状態にあり、つまりそこには、モータ制御装置の給電端子によりスター結線の自由端が相応に電圧駆動されることによって生じる電位が発

50

生し、エミュレータパワーエレクトロニクス装置が給電端子から高抵抗で分離されているときには、いずれにせよこれは決定的な影響を及ぼすものである。

【0019】

本発明による方法の1つの実施形態によれば、以下のように構成されている。すなわち、初期状態として、モータ制御装置はいかなる給電端子も駆動せず、エミュレータパワーエレクトロニクス装置はスイッチ手段によって、負荷端子から高抵抗で分離されており、モータ制御装置の各給電端子 i , j 間で測定により求められた出力差分電圧 $v_{i n v, d i f f}(i, j)$ のうちの少なくとも1つが、予め定められた電圧閾値 $T H_{i m p e d a n c e}$ よりも大きい場合に、モータ制御装置により開始された給電端子の駆動による電動機動作のモータ始動が識別される。

10

【0020】

これはたとえば、高抵抗状態から脱した状態遷移に関する一例であり、その際に給電端子によりフィードバック測定された電圧が考慮され、つまりは算出可能または直接測定可能な出力差分電圧も考慮される。これによればモータは、静止状態から脱して電動機動作で駆動され、したがって給電端子を介して三相電動モータを通電するための電圧が、モータ制御装置の出力段から送出される。次いでそれらの出力電圧 $v_{i n v}$ は、中間回路電圧 $v_{D C_L i n k}$ またはアース電位に引き寄せられる。任意に低い出力差分電圧 $v_{i n v, d i f f}$ のときに、即座に高抵抗状態から脱して遷移しないようにする目的で、所定の電圧閾値 $T H_{i m p e d a n c e}$ が予め定められる。

20

【0021】

これとは逆に、発電機動作のケースを識別することもでき、つまりこれはシミュレートされる三相電動モータが負荷を介して駆動される場合である。このケースでは、以下のように構成されている。すなわち初期状態として、モータ制御装置はいかなる給電端子も駆動せず、エミュレータパワーエレクトロニクス装置はスイッチ手段によって、負荷端子から高抵抗で分離されており、モータモデルのモータ回転数の値が求められて、モータ回転数がゼロと等しくなければ、発電機動作のモータ始動が識別される。

【0022】

このケースでは、モータ制御装置のすべてのハーフブリッジスイッチが開放されている。三相電動モータが所定の回転数で駆動されると、固定子巻線に逆電圧が誘起される。2つのモータ相間で測定可能なすべての逆誘起電圧が、モータ制御装置の給電端子に加わる中間回路電圧よりも小さいかぎり、固定子巻線には電流が流れないので、逆誘起電圧をモータ制御装置の任意の2つの相の間で測定することができる。この状態は、非駆動状態にされたモータが静止状態に向かっているときにも発生し、つまりモータに外部からトルクが印加されず、それまで生じていた回転数が回転部材の慣性モーメントゆえに徐々に減少して消滅する場合にも発生する。高抵抗で分離された状態から、エミュレータパワーエレクトロニクス装置が再び負荷端子と低抵抗で接続される駆動状態への遷移に対する条件として、シミュレートされた回転数の値が求められる。ここではエミュレータ制御装置において三相電動モータがシミュレートされているにすぎないので、当然ながら実際の回転数は存在しない。シミュレートされる電動モータが回転すると、たとえば負荷端子に電圧が送出されることによって(電圧モード)、すべての相と共に駆動状態へと遷移させられる。

30

40

【0023】

あるときは電動機動作のケースにおいて、あるときは発電機動作のケースにおいて、高抵抗で分離された状態から脱して遷移させる本発明による方法の既述の2つの実施形態によれば、好ましくは以下のように構成されている。すなわち、電動機動作または発電機動作のモータ始動が識別されたならば、エミュレータパワーエレクトロニクス装置はスイッチ手段によって、給電端子に低抵抗で接続され、エミュレータ制御装置は、給電端子に電圧が印加されるように、エミュレータパワーエレクトロニクス装置の負荷端子を駆動する。冒頭で説明したように、エミュレータパワーエレクトロニクス装置は、モータ制御装置の給電端子に相応の電氣的接続負荷を印加するために、電圧源と電流源とを有している。

50

つまりこのケースでは、エミュレータパワーエレクトロニクス装置と給電端子との間において再び低抵抗の接続が形成された後、給電端子に特定の電圧を送出する電圧源が用いられ、通常、これはエミュレータパワーエレクトロニクス装置の負荷端子を介して行われる。

【0024】

既述の方法の1つの実施形態によれば、さらに以下のように構成されている。すなわちエミュレータ制御装置は、モータ制御装置から給電端子へ送られる可能性がないテスト電圧が給電端子に印加されるように、エミュレータパワーエレクトロニクス装置の負荷端子を駆動し、特にこの場合、テスト電圧は、モータ制御装置の中間回路電圧 V_{DC_Link} の半分の値に相応する。このような措置によって、給電端子のいずれかがモータ制御装置によって駆動されるのか、または正弦波転流のケースのようにすべての給電端子が持続的に駆動されるのか、または矩形波転流のケースのように3つの給電端子のうち2つだけが交互に駆動されるのか、を見出すことができる。

10

【0025】

すべての相が電圧モードにある場合、本発明による方法の1つの好ましい実施形態によれば、それぞれテスト電圧 ($V_{DC_Link} / 2$) に、対応するモータ相におけるシミュレートされた逆誘起電圧を加算した電圧が、電圧目標値として用いられるように構成されている。この場合にはテスト電圧は、エミュレートされた誘起相電圧に対するオフセットだけである。初期状態としてモータが静止している場合、逆誘起電圧はゼロに等しい。ただしブリッジスイッチが開放されているときに、モータが発電機動作で駆動される場合には、またはブリッジスイッチが開放されているときにモータが静止状態に向かっている場合には、逆誘起電圧が発生し、この電圧はやはり目標値によって同様に考慮される。この動作中（ブリッジスイッチ開放、電流なし、ただし2つの任意のモータ相間に誘起電圧）、測定可能な誘起電圧は何らかの電位（たとえばアース）に関連づけられない。なぜならば給電端子へ、または給電端子から電流は流れず、モータ巻線も同様に無電位（スター結線の中性点は無電位）だからである。このため、任意の2つのモータ相間でエミュレートされた電圧を測定することは、制御装置の側にとって意義があり、したがって任意の2つの相の間において、測定された電圧が V_{DC_Link} にダイオード電圧の2倍の電圧を加算した電圧よりも大きくなれないかぎり、対応する電圧形成に対する具体的なオフセットは、最終的には重要ではない。

20

30

【0026】

モータ制御装置によっても発生し得ないテスト電圧の選択は、フィードバック測定される電圧の電位を区別できるようにする役割を果たす。モータ制御装置は、その内部で動作するハーフブリッジスイッチによって、給電端子に対し中間回路電圧またはアース電位だけを印加することができ、つまり中間回路電圧の半分の値がモータ制御装置から到来する可能性はなく、したがってある相においてそのような電圧が測定されたならば、それはモータ制御装置によって駆動されていない相に係わるものであり、その相は、開放されたハーフブリッジスイッチを介して電位的に開放状態に切り替えられている。

【0027】

好ましくは、給電端子へのテスト電圧の印加は、待ち時間 t_3 を経て行われ、モータ制御装置の給電端子 j において測定された出力電圧 $v_{inv}(j)$ と、待ち時間 t_3 後に負荷端子を介して送られたテスト電圧との差分電圧 $v_{diff}(j)$ の絶対値が、予め定められた電圧閾値 v_{TH} よりも大きい場合に、給電端子 j の駆動状態 $S_{PH}(j) = 0$ が識別されるように構成されている。このような措置は、負荷エミュレータ特にエミュレータパワーエレクトロニクス装置における過渡的な過程を減衰させて、電圧の値を求めるときには安定した信頼性のある値が得られるようにする役割を果たす。好ましくは、待ち時間 t_3 は少なくとも、エミュレータパワーエレクトロニクス装置がテスト電圧の設定値を確実に調整するのに必要とする長さを選定される。

40

【0028】

駆動されている相もしくは駆動されている給電端子を既述のように識別することによっ

50

て、ひいては矩形波転流による駆動または正弦波転流による駆動をモータ制御装置により識別することによって、高い信頼性を伴い適正な態様で三相電動モータを負荷エミュレータによりシミュレートすることができる。これは以下のようにして行われる。すなわち、モータ制御装置の給電端子 j が駆動状態 $S_{PH}(j) = 0$ にあることが識別された後、エミュレータ制御装置は、いまやモータ制御装置により駆動されている給電端子 j を介して、エミュレータ制御装置により計算された相電流 $i_{emulate}(j)$ が流れるように、エミュレータパワーエレクトロニクス装置を駆動し、特に、同時に2つの給電端子が駆動されていることが識別された場合には、モータモデルとして矩形波転流によるモータのモデルが適用され、同時に3つの給電端子が駆動されていることが識別された場合には、モータモデルとして正弦波転流によるモータのモデルが適用される。その際、電動モータの2つの異なるモデルが扱われるのか否かは重要ではなく、もちろん1つのモデルであっても同様によく、これには個々の状況を適切に扱うための相応のサブモデルも含まれる。

10

【0029】

ここで呈示した三相電動モータのシミュレーション方法は、矩形波転流される電動モータだけに限定されるものではなく、むしろすべての相が途切れることなく駆動される電動モータも、つまりすべての相に対し途切れることなくエミュレータパワーエレクトロニクス装置により計算された電流が供給される電動モータも、当然ながらシミュレート可能である。よって、本発明による方法の1つの実施形態によれば、モータの1つの任意の相について、つまりはモータ制御装置の1つの任意の給電端子について、その相もしくはその給電端子がモータ制御装置により引き続き駆動されるか否か、が確実に識別されるように構成されている。この問い合わせは、1つの相の電流のゼロクロスの際に行われる。正弦波転流による駆動の場合には、電流のゼロクロスの際にも、いずれの相も駆動状態のまま維持されるのに対し、矩形波転流による駆動の場合には、電流のゼロクロスの際に、それまで駆動されていた相のうち1つの相が必ず非駆動状態に遷移する。

20

【0030】

したがって、エミュレータ制御装置により、駆動状態 $S_{PH}(k) = 0$ から非駆動状態 $S_{PH}(k) = 1$ へのモータ制御装置の給電端子 k の遷移が、以下のことによって識別されるように構成されている。すなわち、エミュレータ制御装置により計算された相電流 $i_{emulate}(k)$ が、予め定められた第1の電流値 $i_{emulate,1}(k)$ から予め定められた第2の電流値 $i_{emulate,2}(k)$ まで減少する期間であるタイムインターバル $T_{I_{vc},1}$ 中に、モータ制御装置の給電端子 k の対応する測定された出力電圧 $v_{inv}(k)$ について時間積分 $V_{Integral,1}$ が計算される、ことによって識別されるように構成されている。時間積分 $V_{Integral,1}$ が予め定められた電圧時間閾値 $V_{DiodeTH,1}(k)$ よりも大きければ、観察されている相は非駆動状態へ遷移している。その結果、非駆動状態であると識別された相もしくは対応する負荷端子は、エミュレータパワーエレクトロニクス装置によって電流モードから電圧モードへ遷移させられることになり、もはや計算された電流ではなく、計算された誘起電圧が印加される。なぜならば、その相はモータ制御装置の側で開放状態に切り替えられ、つまり浮動状態にあるからである。

30

【0031】

この着想は、以下の状況を利用することに基づいている。すなわち、駆動されていない給電端子を介して、非駆動状態であっても当初は電流が流れるが、この電流はモータ制御装置に必ず含まれるモータ制御装置インバータの環流ダイオードを介して徐々に減少して消滅するのである。この場合、環流ダイオードのところ、一般に約 $0.7V$ の電圧が降下する。この電圧を、モータ制御装置の給電端子を介して測定することができ、このことは本発明において該当する。電流のゼロクロスに伴って、モータ制御装置の相が駆動されているとするならば、もしくはモータ制御装置の給電端子が駆動されているとするならば、モータ制御装置の該当する給電端子において測定可能な電圧は、実質的にゼロであるか、または V_{DC_Link} に相応する。この相違が、これまで説明した方法によって評価される。

40

50

【0032】

このことに基づき構築された本発明による方法の1つの実施形態の特徴によれば、予め定められた第1の電流値 $i_{emulate,1}(k)$ は、相電流 $i_{emulate}(k)$ の計算される最大電流値の半分よりも小さく、特に、相電流 $i_{emulate}(k)$ の計算される最大電流値の4分の1よりも小さい。このことによって、電流が実際にゼロクロスに向かって動くことが保証される。たとえば100Aのシステムであれば、 $i_{emulate}(k)$ は25Aよりも小さくなる。実際の運用において100Aのシステムの場合には、有効な閾値を1A~2Aの間に選定することさえ可能であった。小電力領域の用途（たとえばハードディスクモータなど）では、この閾値をさらに著しく小さくすることもできる。ここで重要であるのは、規定された電流導体において、電流が完全に消滅してしまいう前に環流ダイオードを介して電圧を依然として測定できる、ということである。

10

【0033】

さらに、予め定められた第2の電流値 $i_{emulate,2}(k)$ が、予め定められた第1の電流値 $i_{emulate,1}(k)$ の分数であるように、好ましくは予め定められた第1の電流値 $i_{emulate,1}(k)$ の4分の3となるように、構成されている。いずれにせよ、予め定められた第2の電流値 $i_{emulate,2}(k)$ を、環流ダイオードを介した電圧が完全には落ち込むことがない大きさに選定するのが望ましい。

【0034】

さらに有用であると判明したのは、予め定められた電圧時間閾値 $V_{DiodeTH,1}(k)$ が、モータ制御装置に含まれる環流ダイオードにおける環流ダイオード電圧の半分の時間積分に相応することである。この場合も積分期間として、タイムインターバル $T_{Vcalc,1}$ が用いられ、このタイムインターバル $T_{Vcalc,1}$ 内で、エミュレータ制御装置により計算された相電流 $i_{emulate}(k)$ が、予め定められた第1の電流値 $i_{emulate,1}(k)$ から予め定められた第2の電流値 $i_{emulate,2}(k)$ まで減少する。これにより生じる閾値は、給電端子がモータ制御装置のインバータの出力スイッチを介してアース電位または高電位に引き寄せられても、駆動状態の給電端子の場合によってはまだ加わっている積分されていく電圧と区別するのに十分な大きさである。

20

【0035】

非駆動状態の給電端子を確実に識別することによって、たとえば遮断されているモータ制御装置に応動することのできる、本発明による方法の1つの興味深い実施形態が実現される。本発明による方法のこの実施形態によれば、エミュレータ制御装置によって既述のように、モータ制御装置のすべての給電端子における駆動状態 $S_{PH}(k) = 0$ から非駆動状態 $S_{PH}(k) = 1$ への遷移が調べられる。駆動状態 $S_{PH}(k) = 0$ から非駆動状態 $S_{PH}(k) = 1$ へのモータ制御装置の少なくとも2つの給電端子の遷移が識別されると、エミュレータパワーエレクトロニクス装置はスイッチ手段によって、給電端子から高抵抗で分離される。その後はモータ制御装置の給電端子は、高抵抗の抵抗回路網と依然として相互に接続されただけの状態となる。さらにこの場合、モータ制御装置によって、診断ルーチンおよび初期化ルーチンを実施させることができる。当然ながらこれには、モータ制御装置の3つの給電端子すべてが非駆動状態 $S_{PH}(k) = 1$ へ遷移して、モータが静止状態に向かうケースも含まれる。このとき、必然的に誘起電圧が形成されるので、すべての相は電圧モードにある。モータが静止状態に向かい、その後、モータ回転数がゼロになると、エミュレータパワーエレクトロニクス装置はスイッチ手段によって給電端子から高抵抗で分離される。

30

40

【0036】

冒頭で説明して導き出した上述の課題は、本発明が前提とする負荷エミュレータにおいて、相応に以下のように構成することによって解決される。すなわち、負荷エミュレータはその負荷端子を介して、モータ制御装置の給電端子と三相で接続可能であり、負荷エミュレータは、エミュレータパワーエレクトロニクス装置と、このエミュレータパワーエレ

50

クトロニクス装置を制御するエミュレータ制御装置とを有しており、エミュレータ制御装置は、モータ制御装置により駆動されている給電端子と駆動されていない給電端子とを検出し、エミュレータパワーエレクトロニクス装置は、エミュレータ制御装置により駆動されて、モータ制御装置により駆動されている給電端子には、エミュレータ制御装置によりモータモデルに基づき計算された相電流 $i_{e m u l a t e}$ が流れ、モータ制御装置により駆動されていない給電端子には、エミュレータ制御装置によりモータモデルに基づき計算された相電圧 $v_{e m u l a t e}$ が送出される。さらに負荷エミュレータはスイッチ手段を含み、このスイッチ手段によって、エミュレータパワーエレクトロニクス装置を給電端子から高抵抗で遮断可能であり、かつこのスイッチ手段によって、エミュレータパワーエレクトロニクス装置を給電端子に低抵抗で接続可能であり、給電端子は、高抵抗の抵抗回路網を介して互いに接続されている。

10

【0037】

負荷エミュレータは、既述の方法に依拠して、電動モータの選択された動作状態をシミュレートするために、エミュレータ制御装置がエミュレータパワーエレクトロニクス装置とスイッチ手段とを以下のように駆動することを特徴とする。すなわち、エミュレータパワーエレクトロニクス装置が、スイッチ手段によって給電端子から高抵抗で分離され、または給電端子からすでに高抵抗で分離されているエミュレータパワーエレクトロニクス装置が、スイッチ手段によって低抵抗で給電端子に接続されるように駆動する。

【0038】

好ましくは、高抵抗の抵抗回路網は、実質的にオーミックな3つの抵抗から成るスター結線であり、この場合、スター結線の自由端各々はモータ制御装置のそれぞれ別の給電端子と接続されている。

20

【0039】

よって、エミュレータ制御装置は、規定どおりに使用すれば負荷エミュレータによる三相電動モータの前述のシミュレーション方法を実施する、ように構成されている。

【0040】

詳細には、本発明による方法および本発明によるエミュレータ制御装置を構築し発展させる多数の可能性がある。それらについて、一方では独立請求項に従属する各請求項を、他方では以下の実施例の説明を図面と共に参照されたい。

【図面の簡単な説明】

30

【0041】

【図1】モータ制御装置と、三相電動モータのシミュレーション方法を実施する負荷エミュレータとから成る、従来技術から公知の装置を示す図である。

【図2】モータ制御装置の各給電端子における1回の電气的回転中に生じる転流遷移を示す図である。

【図3】本発明による方法を実施する装置を示す詳細図である。

【図4】モータ制御装置の給電端子における高抵抗状態から電圧モードへの遷移の捕捉について説明するための状態図である。

【図5】駆動状態から非駆動状態への1つの相の遷移を識別する目的で、測定された相電圧と計算された相電流の曲線推移を示す図である。

40

【図6】図5に示した手順について説明するための状態図である。

【図7】高抵抗状態への遷移について説明するための状態図である。

【0042】

最初に図1に示したのは、三相電動モータのシミュレーション方法を実施する装置であり、この装置自体は従来技術から公知であるが、従来技術においては三相電動モータはブラシレス直流モータに限定されている。この装置はまずは負荷エミュレータ1を有しており、負荷エミュレータ1は、その負荷端子2を介して三相で、モータ制御装置4の給電端子3と接続されている。負荷エミュレータ1は、エミュレータパワーエレクトロニクス装置5と、このエミュレータパワーエレクトロニクス装置5を制御するエミュレータ制御装置6とを有している。このケース自体によればモータ制御装置4には、三相であるとして

50

表されたインバータ7の形態のパワーエレクトロニクス装置も含まれており、このインバータ7は、直流電圧源 V_{DC} を介して給電され、インバータ7に含まれる半導体スイッチの適切な切り替えによって、その給電端子3を介して三相の交番負荷を駆動する。

【0043】

この方法によれば、エミュレータ制御装置6が、モータ制御装置4により駆動されている給電端子3と駆動されていない給電端子3とを検出するように構成されている。この場合、エミュレータパワーエレクトロニクス装置5がエミュレータ制御装置6によって、以下のように駆動される。すなわち、モータ制御装置4によって駆動されている給電端子3には、エミュレータ制御装置6によりモータモデル8に基づき計算された相電流 i_{emul_a} が流れ、モータ制御装置4によって駆動されていない給電端子3には、エミュレータ制御装置6によりモータモデル8に基づき計算された相電圧 v_{emul_a} が送出される。この図からわかるように、エミュレータパワーエレクトロニクス装置5は、これらのタスクを達成するために、電流源 I_s および電圧源 U_s を備えており、それらをエミュレータパワーエレクトロニクス装置5の負荷端子2に相応に接続することができる。このケースではこのことは、デカップリングインダクタ L_d を介して間接的に各相ごとに行われる。

10

【0044】

図2には、ブロック転流もしくは矩形波転流による三相ブラシレス直流モータにおいて1回の電氣的回転中に発生する6つの転流遷移が示されており、この場合、各転流はそれぞれ 60° の電氣的角度インターバルで行われる。この図からわかるように、非駆動給電端子は1つの相における1つの転流インターバルにおいてのみ保持され、その後ただちに再び駆動状態へと遷移する。本実施例では、各相が参照符号 i_1, i_2, i_3 によって表されている。「非駆動状態」とはここでは、モータ制御装置の個々の給電端子が電位的に開放状態にある、ということの意味しており、つまりインバータ7の電力スイッチを介してアースへも正の駆動電圧 V_{DC} へも引き寄せられない、ということの意味している。1つの相もしくは対応する給電端子3が「駆動状態」にあるのは、給電端子がモータ制御装置により規定の電位におかれて、電位的に開放状態ではないとき、つまり浮動状態ではないとき、である。モータ制御装置4の駆動されている2つの給電端子3のうち、1つの給電端子が非駆動状態に切り替わる一方、駆動されている他方の給電端子は駆動状態のまま維持される。このようにして矩形波転流による駆動によって、相応の回転磁界がブラシレス直流モータに生成され、それによって相応のトルクをもたらすことができる。

20

30

【0045】

欧州特許出願公開第2940857号明細書(EP 2940857 A1)において呈示される方法および装置によれば、矩形波転流により駆動されるこの種のモータをシミュレートすることができる。そこで本発明の目的は、この方法をさらに発展させて、三相電動モータのシミュレーションが全般的に可能となるようにし、つまり各相が一貫してモータ制御装置により駆動された状態にある電動モータも、すなわちいかなる相も浮動状態ではなく非通電状態ではない電動モータも、シミュレートできるようにすることである。当然ながらそれらのモータにも、矩形波転流によるモータの場合と同様に、電流のゼロクロスがあるけれども、それらの相はモータ制御装置4によって、途切れることなく電位的に切り替えられる。

40

【0046】

図3には、本発明に従って構成されたエミュレータ制御装置6を用いて本発明による方法を実施するための図1に示した装置が、さらに詳しく描かれている。エミュレータパワーエレクトロニクス装置5内部にレギュレータ9が示されており、このレギュレータ9は、予め定められた相電流がエミュレータ制御装置6による事前設定に従って実際に負荷端子2に生じるようにする。この目的で、エミュレータパワーエレクトロニクス装置5内部において、そのつど着目している相電流がフィードバック測定され、調整偏差を形成する目的で調整アルゴリズム装置10へ供給される。変調器11を介してそれぞれ適正な位相に、予め定められた電圧値または予め定められた電流値が割り当てられる。

50

【0047】

エミュレータ制御装置6は、図示の実施例によればFPGA基板において実現されており、この基板上で「ハードワイヤード」回路構造によって、以下で説明する方法の極めて高速な実施可能性が保証される。モータ制御装置4の給電端子3において測定される出力電圧 $v_{in v}(j)$ が、読み込みインタフェース12を介してエミュレータ制御装置6に読み込まれ、そこにおいて使用できるようになり、つまりこれが実際の測定量となる。出力インタフェース13を介して、計算された相電圧 $v_{emulate}(j)$ および計算された相電流 $i_{emulate}(j)$ のために計算された目標設定値が、エミュレータパワーエレクトロニクス装置5へ送出される。

【0048】

さらにエミュレータ制御装置6内部にステートマシン14が実現されており、これにより転流に起因してモータ制御装置4の給電端子3に生じる状態遷移が識別される。給電端子 j の状態は以下では基本的に $S_{PH}(j)$ として表され、この場合、値1は給電端子 j の非駆動状態を表し、値0は該当する給電端子の駆動状態を表す。非駆動状態の給電端子であっても電流が流れる可能性があり、つまり環流ダイオードを介してその電流が途絶えるまで流れる可能性がある。このケースでは、状態は0である。ここでは、エミュレータ制御装置6のさらに詳細な構造および内容には立ち入らない。これらについての情報は、欧州特許出願公開第2940857号明細書(EP 2940857 A1)に含まれている。

【0049】

図3に示した負荷エミュレータ1にはさらにスイッチ手段15が含まれており、このスイッチ手段15によって、エミュレータパワーエレクトロニクス装置5を給電端子3から高抵抗で遮断可能である。このことは同様に、スイッチ手段15によってエミュレータパワーエレクトロニクス装置を負荷端子2から高抵抗で遮断可能である、と表現してもよく、最終的にはこのことによって、エミュレータパワーエレクトロニクス装置5が給電端子3から遮断されることになる。ここで重要であるのは、エミュレータパワーエレクトロニクス装置5がもはやモータ制御装置4と有効には接続されておらず、モータ制御装置4に対し電氣的に作用を及ぼす可能性がない、ということである。スイッチ手段15は、本実施例では合わせて3つの半導体スイッチを含んでおり、それらによって各相を別個に負荷端子2から、ひいてはモータ制御装置4の給電端子3から、高抵抗で分離することができる。スイッチ手段15によって達成可能な給電端子 j の「高抵抗状態」において、 $S_{PH}(j)$ は以下では値2をとる。

【0050】

当然ながらこれとは逆に、エミュレータパワーエレクトロニクス装置5を、スイッチ手段15によってモータ制御装置4の給電端子3と再び低抵抗で接続することもできる。この場合、モータ制御装置4の給電端子3へ低抵抗で接続するという事は、モータ制御装置4へのエミュレータパワーエレクトロニクス装置5の有効な電氣的結合に係わるものであることから、決定的に重要である。さらに各負荷端子2は、高抵抗の抵抗回路網16を介して互いに接続されている。つまりこのことは、モータ制御装置の給電端子3が高抵抗の抵抗回路網16を介して互いに接続されている、ということと同じ意味をもつ。あとで説明するように、モータ制御装置4の各給電端子3が抵抗回路網16を介して電氣的に接続されている、ということが本質的に重要であり、しかもこのことは、エミュレータパワーエレクトロニクス装置5がスイッチ手段15によって高抵抗で分離されていて、モータ制御装置4とエミュレータパワーエレクトロニクス装置5との間に電氣的に有効な接続が存在しない場合であっても、本質的に重要である。

【0051】

電動モータの選択された動作状態をシミュレートするために、エミュレータパワーエレクトロニクス装置5は、スイッチ手段15によって負荷端子2から高抵抗で分離され、または負荷端子2からすでに分離されているエミュレータパワーエレクトロニクス装置5が、スイッチ手段15によって低抵抗で負荷端子2に接続される。このことは同様に、電動モータの選択された動作状態をシミュレートするために、エミュレータパワーエレクトロ

10

20

30

40

50

ニクス装置 5 は、スイッチ手段 15 によって給電端子 3 から高抵抗で分離され、または給電端子 3 からすでに高抵抗で分離されているエミュレータパワーエレクトロニクス装置が、スイッチ手段 15 によって低抵抗で給電端子 3 に接続される、と表現してもよい。結果として、いずれにせよスイッチ手段 15 は、高抵抗の抵抗回路網 16 を介した各給電端子 3 の高抵抗の接続に作用を及ぼさない。

【0052】

モータ制御装置 4 の給電端子 3 と常に有効に接続されている抵抗回路網によって、通常の電動機動作以外の状態にある、または通常の発電機動作以外の状態にもあるモータ制御装置の動作態様にも応動することができ、つまりエミュレータパワーエレクトロニクス装置 5 がモータ制御装置 4 から高抵抗で分離されている場合であっても、モータ制御装置の 10 かかる動作態様に応動することができる。モータ制御装置 4 が、動作フェーズの初期化のために所定の電圧または電圧パターンを給電端子 3 に送出するときに、送出されたそれらの電圧を、抵抗回路網 16 を介してたとえば他の給電端子 3 を経由してフィードバック測定することができる。所定のテストパターンを給電端子にこのように印加することは、モータ制御装置 4 により給電端子 3 の外部結線を識別するためにしばしば用いられる。

【0053】

本実施例の場合には高抵抗の抵抗回路網 16 は、実質的にオーミックな 3 つの抵抗から成るスター結線であり、その際にスター結線の自由端各々は、モータ制御装置 4 のそれぞれ別の給電端子 3 と接続されている。「抵抗が実質的にオーミックである」という表現が 20 用いられる場合、これによって意図されるのは、ここでは抵抗回路網 16 の素子が当業技術分野において通常の実用的な電気技術的理解における抵抗である、ということであり、その際、理想的なオーミック抵抗など存在せず、つまりは電気的な各構成要素が当然ながら寄生的な誘導特性および容量特性も有する可能性がある、ということは承知の上である。

【0054】

図 4 に示されている実施例によれば、エミュレータパワーエレクトロニクス装置 5 は当初、エミュレータパワーエレクトロニクス装置 5 の負荷端子 2 から高抵抗で分離されており、つまりはモータ制御装置 4 の給電端子 3 から高抵抗で分離されている。つまりすべての相について、 $S_{PH}(i) = 2$ が成り立つ。モータ制御装置 4 により開始された給電端子 3 の駆動による電動機動作のモータ始動が識別されるのは、モータ制御装置 4 の各給電端子 i, j 間で測定により求められた出力差分電圧 $v_{in v, diff}(i, j)$ のうちの少なくとも 1 つが、予め定められた電圧閾値 $T_{H impedance}$ よりも大きい場合である。自明のとおり、モータ制御装置 4 の各給電端子 3 の間で測定技術的に捕捉可能な差分電圧 $v_{in v, diff}(i, j)$ によって、モータの駆動開始を示唆することができる。発電機動作のモータのモータ始動も、同様に識別することができる。この場合も初期状態はやはり、モータ制御装置 4 はいかなる給電端子 3 も駆動しておらず、エミュレータパワーエレクトロニクス装置 5 はスイッチ手段 15 によって、モータ制御装置の給電端子 3 から、もしくはエミュレータパワーエレクトロニクス装置 5 の負荷端子 2 から分離されている状態である。発電機動作のモータ始動が識別されるのは、モータモデル 8 のモータ回転数 $m_{ot, emu}$ の値が求められて、モータ回転数 $m_{ot, emu}$ がゼロではない場合である。図 4 には、このことも同様に示されている。 30 40

【0055】

電動機動作または発電機動作として、モータ始動が識別された結果、エミュレータパワーエレクトロニクス装置 5 がスイッチ手段 15 によって、負荷端子 2 に、つまりは給電端子 3 にも、低抵抗で接続され、エミュレータ制御装置 6 はエミュレータパワーエレクトロニクス装置 5 の負荷端子 2 を駆動して、それらの負荷端子 2 については給電端子 3 に電圧が印加されるようにし、したがってパワーエレクトロニクス装置 5 のすべての相が電圧モードで動作するようになる。エミュレータパワーエレクトロニクス装置 5 により負荷端子 2 に印加される電圧に対し、モータ制御装置 4 から給電端子 3 を介して負荷端子 2 へ供給される可能性のないテスト電圧が適用され、本実施例ではこのテスト電圧は、モータ制御装 50

置 4 の中間回路電圧 v_{DC_Link} の半分の値に相応する。かかるテスト電圧の選択によって、給電端子 3 のうちのいずれがモータ制御装置 4 によって駆動されるのか、を見つけ出すことができる。モータ制御装置 4 によって 1 つの給電端子 3 が電位的に開放状態すなわち浮動状態のままであれば、エミュレータパワーエレクトロニクス装置 5 の側から送出されるテスト電圧を、エミュレータ制御装置 6 によってフィードバック測定することができる。そうでないとしたならば、モータ制御装置 4 から送出される電圧が、複数の給電端子 3 を介してエミュレータ制御装置 6 によりフィードバック測定される重要な電圧となるであろう。

【 0 0 5 6 】

負荷端子 2 へのテスト電圧の印加は、待ち時間 t_3 を経て行われる。ある給電端子 j の駆動状態 $S_{PH}(j) = 0$ が識別されるのは、モータ制御装置 4 の給電端子 j において測定された出力電圧 $v_{inv}(j)$ と、待ち時間 t_3 後に負荷端子 2 を介して送出されたテスト電圧との差分電圧 $v_{diff}(j)$ の絶対値が、予め定められた電圧閾値 v_{TH} よりも大きい場合である。待ち時間 t_3 は少なくとも、エミュレータパワーエレクトロニクス装置 5 がテスト電圧の設定値を確実に調整するのに必要とする長さを選定されている。

10

【 0 0 5 7 】

モータ制御装置 4 の給電端子 j が駆動状態 $S_{PH}(j) = 0$ にあると識別された後、エミュレータ制御装置 6 はエミュレータパワーエレクトロニクス装置 5 を駆動し、いまやモータ制御装置 4 によって駆動されている給電端子 j を介して、エミュレータ制御装置 6 により計算された相電流 $i_{emulate}(j)$ が流れるようにする。2 つの給電端子 3 が同時に駆動されていることが識別されたならば、モータ制御装置 4 による駆動が矩形波転流により行われているものとすることができ、3 つの給電端子 3 が同時に駆動されていることが識別されたならば、モータ制御装置 4 により正弦波転流による駆動が行われているものとする事ができる。

20

【 0 0 5 8 】

図 5 および図 6 は、駆動状態 $S_{PH}(j) = 0$ から非駆動状態 $S_{PH}(j) = 1$ への 1 つの相の遷移の識別について説明する図である。この場合、適切な状態量の確実かつ一義的な評価を可能にする基準を見つける必要がある。たとえば、個々の相において単に電流のゼロクロスを観察するだけでは不十分であり、その理由は、そのような電流ゼロクロスは、すべての相において連続的に駆動状態にある正弦波転流によるモータの場合にも生じるからである。

30

【 0 0 5 9 】

図 5 には、まずは 2 つの相電圧と 2 つの相電流の推移が描かれており、その際、3 つめの相電圧の推移および 3 つめの相電流の推移は、見やすくする理由で省いてしまっている。図 5 のグラフの下側には、2 つの相電圧 v_{inv} の測定された推移が単位ボルトで書き込まれており、このグラフの上側には、対応する計算された相電流 $i_{emulate}$ が単位アンペアで書き込まれている。これら両方の推移についてエミュレータ制御装置 6 は、 $i_{emulate}$ はエミュレータ制御装置 6 自体によって計算されたものであり、相電圧 v_{inv} の推移は測定量として得られたものである（図 3 参照）、という情報を有する。

40

【 0 0 6 0 】

エミュレータ制御装置 6 によって、モータ制御装置 4 の 1 つの給電端子 k における駆動状態 $S_{PH}(k) = 0$ から非駆動状態 $S_{PH}(k) = 1$ への遷移が、相電流 $i_{emulate}(k)$ の観察により識別される。この場合、タイムインターバル $T_{IVcalc,1}$ が観察される。このタイムインターバル $T_{IVcalc,1}$ 内で、エミュレータ制御装置 6 により計算された相電流 $i_{emulate}(k)$ が、予め定められた第 1 の電流値 $i_{emulate,1}(k)$ から予め定められた第 2 の電流値 $i_{emulate,2}(k)$ まで減少する。つまりこれらの限界値の経過によって、タイムインターバル $T_{IVcalc,1}$ が規定される。次いでこのタイムインターバル中に、モータ制御装置 4 の給電端子 k において測定された対応する出力電圧 $v_{inv}(k)$ について、時間積分 $V_{Integr a l,1}$ が計算される。時間積分 $V_{Integr a l,1}$ が予め定められた電圧時間閾値

50

$V_{DiodeTH,1}(k)$ よりも大きければ、非駆動状態 $S_{PH}(k) = 1$ への相遷移が識別される。

【0061】

この方法によれば、モータ制御装置4のインバータ7が、動作電流方向に対し逆並列に接続された環流ダイオード18を備えた半導体スイッチ17を有する(図3)、という点が活用される。モータ制御装置の給電端子3, kがもはや駆動されなければ、該当する電流経路は電位的に自由な状態となり、その際、モータのインダクタンスに起因する電流経路k中の電流は減少し続けることしかできず、環流ダイオード18を介して徐々に消滅していく。このプロセス中、該当する環流ダイオードのところ約0.7Vの順方向電圧が低下し、この電圧は該当する給電端子に発生し、そこにおいて測定される。これに対し、給電端子3, kが駆動されているとしたならば、電流ゼロクロスによって0Vの規定の電圧が該当する給電端子に発生することになる。なぜならば、ローサイドのハーフブリッジスイッチ17がアース電位との電氣的な接続を形成するからである。最初のケースでは、タイムインターバル $T_{Ivcalc,1}$ 中の電圧の時間積分はゼロとは等しくなく、2つめのケースでは、電圧の時間積分は実質的にゼロと等しい。この場合、電圧時間閾値 $V_{DiodeTH,1}(k)$ は、0.35Vという環流ダイオード電圧の半分の値に基づき、タイムインターバル $T_{Ivcalc,1}$ にわたり積分によって計算されたものである。

10

【0062】

図5に示した実施例によれば、予め定められた第1の電流値 $i_{emulate,1}(k)$ は2Aであり、したがってこれは相電流 $i_{emulate}(k)$ の計算された最大電流値のほぼ4分の1に相応する。予め定められた第2の電流値 $i_{emulate,2}(k)$ は、この実施例では1.75Aであり、したがってこれは予め定められた第1の電流値 $i_{emulate,1}(k)$ のほぼ4分の3に相応する。

20

【0063】

図6には、駆動状態 $S_{PH}(j) = 0$ から非駆動状態 $S_{PH}(j) = 1$ への状態遷移の識別が、状態図の形態で形式化して表現されており、これはステートマシン14の枠組みで実現されている。相電流がゼロになり、電圧の時間積分に基づき前提条件が充足されると、状態遷移が生じる。

【0064】

最後に図7には、高抵抗状態へのすべての相の遷移について示されており、このために、ある1つの給電端子3もしくはある1つの相の非駆動状態の既述の識別が用いられる。エミュレータ制御装置6によって、モータ制御装置4のすべての給電端子の遷移が監視され、このようにして駆動状態 $S_{PH}(k) = 0$ から非駆動状態 $S_{PH}(k) = 1$ への状態遷移も識別される。駆動状態 $S_{PH}(k) = 0$ から非駆動状態 $S_{PH}(k) = 1$ へのモータ制御装置4の少なくとも2つの給電端子3の遷移が識別されると、エミュレータパワーエレクトロニクス装置5はスイッチ手段15によって、給電端子3から高抵抗で分離される。本実施例ではこれは、給電端子3と常に接続されている負荷端子2からの分離によって行われる。このような状態遷移の背景となる認識は、2つの給電端子3が駆動されていない場合には、3つめの相においても電流が流れる可能性がなく、したがってこの場合には意味のある動作状態が生じない、ということである。

30

40

【符号の説明】

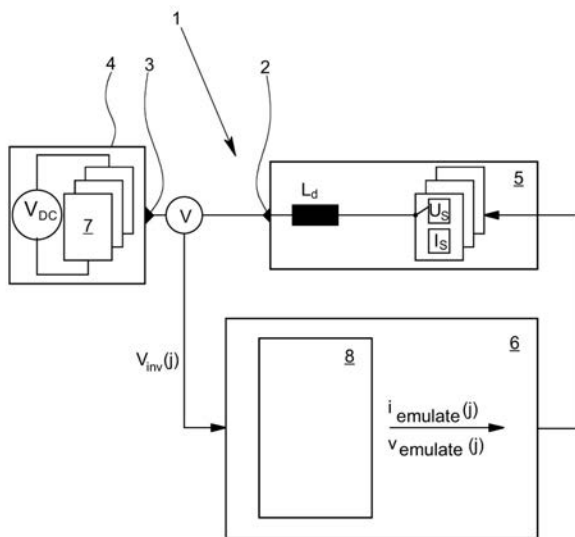
【0065】

- 1 負荷エミュレータ
- 2 負荷端子
- 3 給電端子
- 4 モータ制御装置
- 5 エミュレータパワーエレクトロニクス装置
- 6 エミュレータ制御装置
- 7 インバータ
- 8 モータモデル

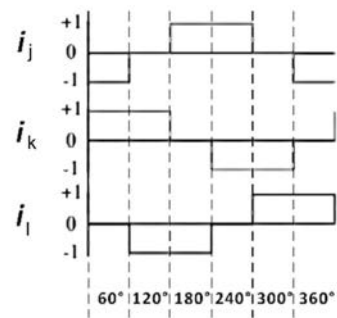
50

- 9 レギュレータ
- 10 調整アルゴリズム
- 11 変調器
- 12 読み込みインターフェース
- 13 出力インターフェース
- 14 ステートマシン
- 15 スイッチ手段
- 16 抵抗回路網
- 17 半導体スイッチ
- 18 環流ダイオード

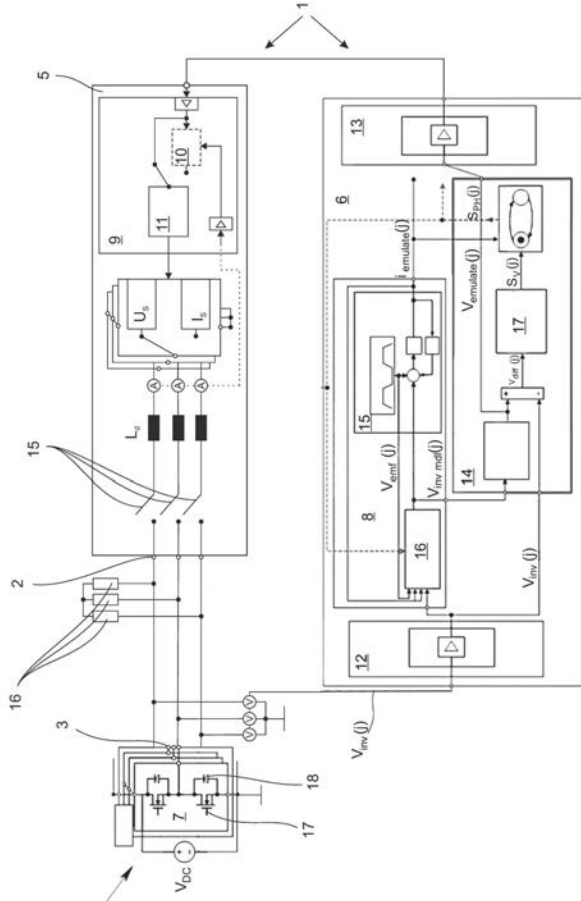
【図1】



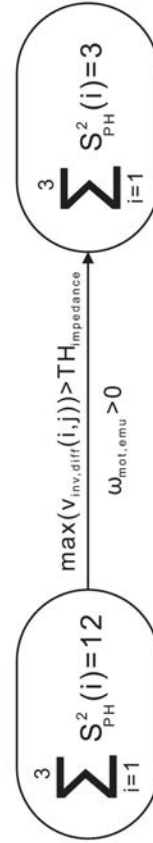
【図2】



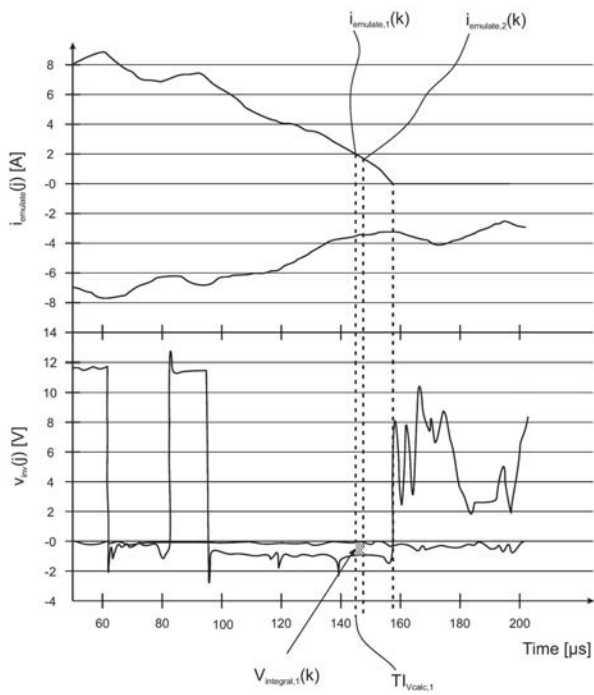
【 図 3 】



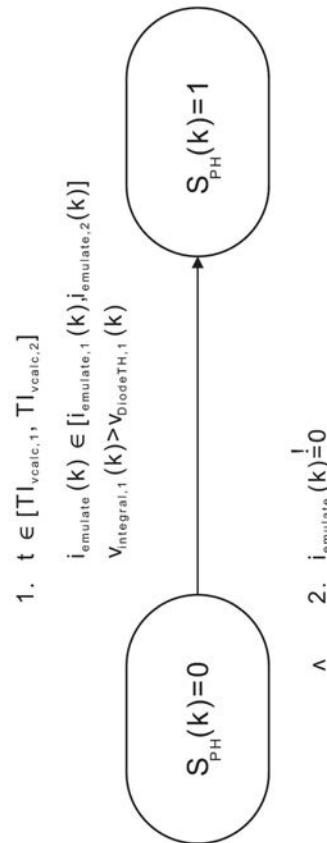
【 図 4 】



【 図 5 】



【 図 6 】



【 図 7 】



フロントページの続き

(74)代理人 100114890

弁理士 アインゼル・フェリックス＝ラインハルト

(74)代理人 100098501

弁理士 森田 拓

(74)代理人 100116403

弁理士 前川 純一

(74)代理人 100135633

弁理士 二宮 浩康

(74)代理人 100162880

弁理士 上島 類

(72)発明者 ニルス ホルトハウス

ドイツ連邦共和国 シュランゲン シュレーマーカンブ 9

Fターム(参考) 5H560 AA10 BB04 BB07 BB12 DA13 DB20 DC13 EB01 UA06

【 外国語明細書 】

Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors mit einem Lastemulator und entsprechender Lastemulator

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors mit einem Lastemulator, wobei der Lastemulator dreiphasig über seine Lastanschlüsse an die Speiseanschlüsse einer Motorsteuerung angeschlossen ist und der Lastemulator eine Emulatorleistungselektronik und eine Emulatorsteuerung zur Steuerung der Emulatorleistungselektronik aufweist, wobei die Emulatorsteuerung die von der Motorsteuerung angesteuerten Speiseanschlüsse und nicht angesteuerten Speiseanschlüsse ermittelt, und die Emulatorleistungselektronik durch die Emulatorsteuerung so angesteuert wird, dass in den durch die Motorsteuerung angesteuerten Speiseanschlüssen von der Emulatorsteuerung auf Grundlage eines Motormodells berechnete Phasenströme $i_{emulate}$ fließen und auf den von der Motorsteuerung nicht angesteuerten Speiseanschluss eine von der Emulatorsteuerung auf Grundlage eines Motormodells berechnete Phasenspannung $v_{emulate}$ aufgegeben wird. Die Erfindung betrifft ferner auch die Emulatorsteuerung eines Lastemulators, die so ausgestaltet ist, dass sie das zuvor beschriebene Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors in Zusammenhang mit einer Emulatorleistungselektronik ausführen kann.

Verfahren zur Nachbildung elektrischer Lasten mit Hilfe von Lastemulatoren dienen dazu, Motorsteuerungen unter Laborbedingungen zu testen, ohne dass an den Steuerungen ein "echter" elektrischer Antrieb – hier in Form eines dreiphasigen Elektromotors – anzuschließen wäre. Die elektrische Last, also der dreiphasige Elektromotor, wird vielmehr von dem Lastemulator nachgebildet. Die Motorsteuerung besteht oft aus einem Steuergerät mit einer Leistungsendstufe in Form eines Umrichters. Das Steuergerät erzeugt Stromrichtersteuerdaten, die zur geeigneten Ansteuerung der Leistungsschalter des Umrichters dienen, die üblicherweise mittels Halbleiterschaltenelementen (IGBT, IGCT usw.) realisiert sind. Im vorliegend betrachteten Anwendungsfall arbeitet der Umrichter der Motorsteuerung als Wechselrichter, er weist also als Energiequelle eine Gleichspannungsquelle auf und treibt eine Last mit Wechselspannung. Der Umrichter der Motorsteuerung umfasst üblicherweise eine mit den genannten Leistungsschaltern realisierte Halbbrückenschaltung, wobei die Leistungsschalter mit antiparallel geschalteten Freilaufdioden versehen sind, über die sich bei geöffnetem Leistungsschalter durch die Induktivitäten des Motors getriebene Ströme abbauen können.

Der Lastemulator wird oft in Form eines Hardware-in-the-Loop-Simulators realisiert, also durch einen Simulationsrechner, der mathematische Modelle der zu simulierenden Umgebung – hier die Last in Form dreiphasigen Elektromotors – mit numerischen Verfahren berechnet und seinerseits über eine leistungselektronische Endstufe – die Emulatorleistungselektronik – verfügt, die über die Lastanschlüsse des Lastemulators mit den korrespondierenden Speiseanschlüssen der Motorsteuerung verbunden werden kann. Das auf dem Lastemulator implementierte Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors sorgt im Ergebnis dafür, dass die Motorsteuerung über ihre Speiseanschlüsse elektrisch so belastet wird, als wäre sie mit dem echten Antrieb verbunden.

Ein vorbeschriebenes Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors ist beispielsweise aus der EP 2940857 A1 bekannt. Hier handelt es sich bei dem dreiphasigen Elektromotor ausschließlich um einen bürstenlosen Gleichstrommotor. Auf die Offenbarung dieser Anmeldung wird aufgrund ihrer inhaltlichen Nähe Bezug genommen. Bürstenlose Gleichstrommotoren sind aufgrund der bürstenlosen Konstruktion verschleiß- und wartungsarm.

Bei blockkommutiert angesteuerten bürstenlosen Gleichstrommotoren werden von der Motorsteuerung immer zwei der drei Motorphasen angesteuert – zwei der drei Speiseanschlüsse der Motorsteuerungen sind dann angesteuert – und die dritte Phase der dreiphasigen Drehstromwicklung wird durch die Motorsteuerungen nicht angesteuert, der entsprechende Speiseanschluss der Motorsteuerung ist dann ebenfalls nicht angesteuert. Durch periodisches Umschalten der Drehstromwicklungen durch die Motorsteuerung wird ein magnetisches Drehfeld erzeugt. In der von der Motorsteuerung nicht angesteuerten Phase des bürstenlosen Gleichstrommotors sinkt der Phasenstrom ab und kommt bald vollständig zum Erliegen. Die nicht angesteuerte Phase des bürstenlosen Gleichstrommotors wird oft auch als unbestromte Phase bezeichnet, wobei – wie zuvor erläutert – die Zustände des nicht-Angesteuertwerdens und des Unbestromtseins zeitlich auseinanderfallen können. Wenn eine Phase des bürstenlosen Gleichstrommotors von der Motorsteuerung nicht mehr angesteuert wird, ist die Folge, dass der Phasenstrom in der nicht mehr angesteuerten Phase letztlich, aber nicht zwingend

sofort nach der Kommutierung, zum Erliegen kommt und die Phase also tatsächlich unbestromt ist.

5 In der nicht angesteuerten Phase des bürstenlosen Gleichstrommotors wird jedoch eine Gegenspannung induziert, deren Erfassung für die Ansteuerung des bürstenlosen Gleichstrommotors von erheblicher Bedeutung ist, da aus
10 ihr der Lagewinkel des Rotors bestimmbar ist und die Motorsteuerung so auch ohne einen separaten Winkelgeber den Zeitpunkt der nächsten Kommutierung, also den Zeitpunkt der Umschaltung von nicht angesteuerten Speiseanschlüssen zu angesteuerten Speiseanschlüssen und umgekehrt ermitteln
15 kann. Deshalb ist auch bei der Emulation von blockkommutierten bürstenlosen Gleichstrommotoren die Nachbildung der in der nicht angesteuerten Phase induzierten Gegenspannung essenziell, damit die Motorsteuerung auch ohne Winkelgeber den Zeitpunkt der nächsten Kommutierung bestimmen
20 kann. Aber auch bei mit einem Winkelgeber ausgestatteten bürstenlosen Gleichstrommotoren ist die Berechnung der Gegenspannung im Rahmen der Emulation wichtig, da nur so die physikalischen Verhältnisse des emulierten Motors und damit die Anschlusswerte richtig berechnet und nachgebildet werden können.

20 Die Emulatorleistungselektronik umfasst zur Beaufschlagung der Speiseanschlüsse der Motorsteuerung mit entsprechenden elektrischen Anschlusswerten Spannungsquellen und Stromquellen, die meist über Entkopplungsinduktivitäten mit den Lastanschlüssen der Emulatorleistungselektronik verbindbar
25 sind. So kann durch entsprechendes Verbinden der Spannungsquellen und Stromquellen mit den Lastanschlüssen der Emulatorleistungselektronik darauf reagiert werden, ob ein Lastanschluss im Falle des nicht angesteuerten Zustandes durch die Motorsteuerung nur mit einer induzierten Gegenspannung beaufschlagt wird oder ein Lastanschluss im Falle des angesteuerten
30 Zustandes durch die Motorsteuerung stromführend ist. Durch die zwischen den Lastanschlüssen und den Spannungs- bzw. Stromquellen vorgesehenen Entkopplungsinduktivitäten wird eine unverzögerte Wirkungsentfaltung der durch die geschalteten Spannungs- bzw. Stromquellen vorgegebenen elektrischen Anschlusswerte auf die Lastanschlüsse verhindert.

35 Die EP 2940857 A1 beschreibt ein Verfahren, das eine qualitativ hochwertige Nachbildung eines dreiphasigen bürstenlosen Gleichstrommotors mit einem Lastemulator ermöglicht, indem Zeitpunkt der Kommutierung zuverlässig

auch unter wechselnden Betriebsbedingungen erkannt wird. Dies betrifft den Normalbetrieb des dreiphasigen Gleichstrommotors.

5 Mit dem aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren ist es also möglich, das motorische Verfahren von dreiphasigen Gleichstrommotoren nachzubilden und den Wechsel der Ansteuerung der verschiedenen Phasen des Gleichstrommotors durch die Motorsteuerung zu erkennen und darauf entsprechend zu reagieren.

10 Es besteht ein großes Interesse daran, das aus dem Stand der Technik bekannte Verfahren so zu erweitern, dass praktisch beliebige dreiphasige Elektromotoren mit einem Lastemulator nachgebildet werden können, also beispielsweise permanent erregte Synchronmaschinen oder auch Asynchronmotoren unter sinus-kommutierter oder vergleichbarer Ansteuerung. Der
15 wesentliche Unterschied einer sinus-kommutierten Ansteuerung zu einer block-kommutierten Ansteuerung besteht darin, dass bei einer sinuskommutierten Ansteuerung sämtliche Motorphasen unterbrechungslos angesteuert werden, also keine der Motorphasen während des Betriebs unangesteuert und damit unbestromt ist. Es werden permanent definierte Spannungen von der
20 Leistungselektronik der Motorsteuerung an die Speiseanschlüsse der Motorsteuerung ausgegeben.

Mit dem aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors mit einem Lastemulator ist es darüber
25 hinaus nicht – oder nur mit großen Einschränkungen – möglich, auf Sondersituationen beim Betrieb eines elektrischen Motors angemessen zu reagieren. Derartige Sondersituationen betreffen beispielsweise die Handhabung von Initialisierungsroutinen der Motorsteuerung, deren Aufgabe unter anderem darin besteht, den Anschluss des Elektromotors an das Steuergerät und
30 grundlegende Eigenschaften des Elektromotors (z. B. vorhandener Kurzschluss, Unterbrechung) zu prüfen, indem die Endstufe der Motorsteuerung zum Beispiel eine beliebige Spannung auf eine Motorphase aufgibt und auf den anderen Phasen zurückmisst. Andere derartige Routinen dienen beispielsweise der Motordiagnose.

35 Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es also, das eingangs beschriebene Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors mit einem Lastemulator so weiterzuentwickeln, dass es nicht auf den Betrieb von bürs-

tenlosen dreiphasigen Gleichstrommotoren beschränkt ist und auch Sonderbetriebssituationen eines dreiphasigen Elektromotors berücksichtigt, die jenseits des motorischen oder generatorischen Normalbetriebs liegen.

5 Die zuvor hergeleitete und aufgezeigte Aufgabe ist bei dem eingangs dargestellten Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors dadurch gelöst, dass der Lastemulator ein Schaltmittel umfasst, mit dem die Emulatorleistungselektronik hochohmig von den Speiseanschlüssen abgeschaltet werden kann und mit dem die Emulatorleistungselektronik niederohmig an die Speiseanschlüsse zugeschaltet werden kann, und wobei die
10 Speiseanschlüssen über ein hochohmiges Widerstandsnetzwerk miteinander verbunden sind. Ferner wird zur Simulation von ausgewählten Betriebszuständen des Elektromotors die Emulatorleistungselektronik mit dem Schaltmittel hochohmig von den Speiseanschlüssen abgetrennt oder wird die bereits mit hochohmig von den Speiseanschlüssen abgetrennte Emulatorleistungselektronik mit dem Schaltungsmittel niederohmig an die Speiseanschlüsse zugeschaltet.
15

Zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der Lastemulator schaltungstechnisch um ein Schaltmittel und um ein hochohmiges Widerstandsnetzwerk ergänzt. Das Schaltmittel gestattet es, die Emulatorleistungselektronik hochohmig von den Speiseanschlüssen abzuschalten und natürlich auch umgekehrt, die Emulatorleistungselektronik niederohmig an die Speiseanschlüsse wieder zuzuschalten. Durch diese Maßnahme ist es zunächst
20 grundsätzlich möglich, die Emulatorleistungselektronik wirksam elektrisch von der Motorsteuerung zu trennen. Diese "Trennung" kann über verschiedene schaltungstechnische Maßnahmen realisiert werden. Es ist nicht erforderlich, dass eine vollständige galvanische Entkopplung vorliegt, es reicht auch, wenn ein sehr hochohmiges elektrisches Abtrennen der Emulatorleistungselektronik von den Speiseanschlüssen möglich ist, beispielsweise durch
25 Halbleiterschalter, die keine perfekte galvanische Trennung darstellen. Durch das vorgesehene Schaltmittel ist es also möglich, eine Wechselwirkung zwischen der Motorsteuerung und der Emulatorleistungselektronik zu unterbinden, was in manchen Situationen vorteilhaft ist, wie nachfolgend noch aufgezeigt wird.
30
35

Zusätzlich sind die Speiseanschlüsse über ein hochohmiges Widerstandsnetzwerk miteinander verbunden. Diese Verbindung der Speiseanschlüsse

über das hochohmige Widerstandsnetzwerk wird dabei nicht durch das Schaltmittel beeinflusst, das hochohmige Widerstandsnetzwerk ist also auch dann mit den Speiseanschlüssen verbunden, wenn mit dem Schaltmittel die Emulatorleistungselektronik hochohmig von den Speiseanschlüssen abgeschaltet ist. Die hochohmige Verbindung der Speiseanschlüsse über das Widerstandsnetzwerk ist genau so gewählt, dass das Widerstandsnetzwerk im Normalbetrieb des Lastemulators, also wenn es eine funktionierende niederohmige Verbindung zwischen der Emulatorleistungselektronik und den Speiseanschlüssen gibt, die Motorsteuerung nur unwesentlich belastet. Der Sinn des Widerstandsnetzwerkes liegt darin, dass die Speiseanschlüsse der Motorsteuerung, die ja mit den Lastanschlüssen des Lastemulators verbunden sind, auch dann beschaltet sind, wenn die Emulatorleistungselektronik hochohmig mit dem Schaltmittel von den Lastanschlüssen bzw. von den Speiseanschlüssen abgeschaltet worden ist. Die Speiseanschlüsse der Motorsteuerung sind dann nicht elektrisch offen, sondern über das hochohmige Widerstandsnetzwerk miteinander verbunden.

Dadurch ist schaltungstechnisch die Voraussetzung dafür geschaffen, dass auf bestimmte Betriebsarten der Motorsteuerung grundsätzlich reagiert werden kann, selbst dann, wenn die Emulatorleistungselektronik hochohmig von der Motorsteuerung abgetrennt ist. Dies ist beispielsweise dann gewünscht, wenn die Motorsteuerung in einer Initialisierungsphase eine Spannung auf die Speiseanschlüsse oder ein Spannungsmuster auf verschiedene Speiseanschlüsse gibt und versucht, über die anderen Speiseanschlüsse eine Spannung rückzumessen, um so Informationen über den scheinbar angeschlossenen Motor zu erhalten. In diesem Fall ist eine derartige Rückmeldung über das hochohmige Widerstandsnetzwerk ohne Weiteres möglich. Das hochohmige Widerstandsnetzwerk repräsentiert für die Motorsteuerung also den angeschlossenen Motor, auch wenn die Emulatorleistungselektronik hochohmig von den Speiseanschlüssen abgeschaltet worden ist.

Zur Handhabung des ausgewählten Betriebszustandes der Initialisierung von Motorsteuerung und des Elektromotors wird also mit dem Schaltmittel die Emulatorleistungselektronik hochohmig von den Speiseanschlüssen abgetrennt. Umgekehrt kann es vorteilhaft sein, bei dem ausgewählten Betriebszustand des Anstartens des Elektromotors zunächst mit dem Schaltmittel die Emulatorleistungselektronik von den Speiseanschlüssen abzutrennen und die von der Motorsteuerung ausgegebenen Signalmuster an den Speiseanschlüs-

sen zu beobachten, um dann, nach einer geeigneten Einstellung und Synchronisierung des Lastemulators, die Emulatorleistungselektronik wieder niederohmig an die Speiseanschlüsse zuzuschalten, sodass hier also von dem hochohmig abgetrennten Zustand in den niederohmig zugeschalteten Zustand gewechselt wird.

Vorzugsweise ist das Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors mit einem Lastemulator so ausgestaltet, dass als hochohmiges Widerstandsnetzwerk eine Sternschaltung von drei im Wesentlichen ohmschen Widerständen gewählt wird, wobei jedes der freien Enden der Sternschaltung mit jeweils einem anderen Speiseanschluss der Motorsteuerung verbunden ist. Durch die symmetrische Sternschaltung werden die in der Regel ebenfalls symmetrisch ausgestalteten Phasen des nachzubildenden dreiphasigen Elektromotors nachgebildet. Der Sternpunkt ist potenzialmäßig frei, es stellt sich also hier das Potenzial ein, das sich durch die entsprechende spannungsmäßige Ansteuerung der freien Enden der Sternschaltung durch die Speiseanschlüsse der Motorsteuerung ergibt, jedenfalls ist das der bestimmende Einfluss, wenn die Emulatorleistungselektronik hochohmig von den Speiseanschlüssen abgetrennt ist.

Bei einer Weiterbildung des Verfahrens ist vorgesehen, dass als Ausgangszustand die Motorsteuerung keinen Speiseanschluss ansteuert und die Emulatorleistungselektronik mit dem Schaltmittel hochohmig von den Lastanschlüssen abgetrennt ist, dass ein motorischer Motoranstart durch eine beginnende Ansteuerung der Speiseanschlüsse durch die Motorsteuerung erkannt wird, wenn zumindest eine der zwischen den Speiseanschlüssen i, j der Motorsteuerung durch Messung ermittelten Ausgangsdifferenzspannungen $v_{inv,diff}(i,j)$ größer ist als ein vorbestimmter Spannungsschwellwert $TH_{impedance}$.

Dies ist ein Beispiel für einen Zustandswechsel aus dem hochohmigen Zustand heraus, indem die von den Speiseanschlüssen rückgemessenen Spannungen – und damit auch die ermittelbaren oder direkt messbaren Ausgangsdifferenzspannungen – berücksichtigt werden. Der Motor wird hier aus dem Stillstand heraus motorisch angetrieben, sodass über die Leistungsendstufe der Motorsteuerung Spannungen zur Bestromung des dreiphasigen Elektromotors über die Speiseanschlüsse ausgegeben werden. Diese Ausgangsspannungen v_{inv} werden dann entweder auf die Zwischenkreisspannung v_{DC_Link} oder auf das Ground-Potenzial gezogen. Um nicht bei beliebig kleinen Aus-

gangsdifferenzspannungen $v_{inv,diff}$ sofort aus dem hochohmigen Zustand herauszuwechseln, wird ein bestimmter Spannungsschwellwert $TH_{impedance}$ vorgegeben.

5 Umgekehrt kann auch der generatorische Fall erkannt werden, wenn also der nachgebildete dreiphasige Elektromotor über eine Last angetrieben wird. In diesem Fall ist vorgesehen, dass als Ausgangszustand die Motorsteuerung keinen Speiseanschluss ansteuert und die Emulatorleistungselektronik mit dem Schaltmittel hochohmig von den Lastanschlüssen abgetrennt ist, und
10 dass ein generatorischer Motoranstart erkannt wird, wenn die Motordrehzahl des Motormodells ausgewertet wird und die Motordrehzahl ungleich Null ist.

In diesem Fall sind sämtliche Halbbrücken-Schalter der Motorsteuerung geöffnet. Wenn der dreiphasige Elektromotor mit einer bestimmten Drehzahl
15 angetrieben wird, wird in den Statorwicklungen eine elektrische Gegenspannung induziert. Solange alle zwischen zwei Motorphasen messbaren induzierten Gegenspannungen kleiner sind als die an den Speiseanschlüssen der Motorsteuerung anliegenden Zwischenkreisspannungen, fließt kein Strom durch die Statorwicklungen, sodass die induzierten Gegenspannungen zwischen zwei beliebigen Phasen von der Motorsteuerung messbar sind. Dieser
20 Zustand liegt auch dann vor, wenn der nicht-angesteuerte Motor austrudelt, der Motor also nicht von extern mit einem Drehmoment beaufschlagt wird, sondern aufgrund des Trägheitsmoments der rotierenden Teile eine zuvor vorhandene Drehzahl langsam abbaut. Als Bedingung für den Übergang vom hochohmig abgetrennten Zustand in den angesteuerten Zustand, in dem die Emulatorleistungselektronik wieder niederohmig mit den Lastanschlüssen verbunden ist, wird die simulierte Drehzahl ausgewertet; eine tatsächliche Drehzahl ist natürlich nicht vorhanden, da der dreiphasige Elektromotor in der Emulatorsteuerung nur nachgebildet ist. Sobald sich der nachgebildete
25 Elektromotor dreht, wird mit allen Phasen in den angesteuerten Zustand gewechselt, beispielsweise indem auf die Lastanschlüsse eine Spannung aufgegeben wird (Spannungsmodus).
30

Bei beiden vorgenannten Weiterbildungen des Verfahrens, bei denen einmal
35 im motorischen und einmal im generatorischen Fall aus dem hochohmig abgetrennten Zustand gewechselt wird, ist bevorzugt vorgesehen, dass bei erkanntem motorischen oder generatorischen Motoranstart die Emulatorleistungselektronik mit dem Schaltungsmittel niederohmig an die Speisean-

schlüsse zugeschaltet wird und die Emulatorsteuerung die Lastanschlüsse der Emulatorleistungselektronik so ansteuert, dass die Speiseanschlüsse mit einer Spannung beaufschlagt werden. Eingangs ist erläutert worden, dass die Emulatorleistungselektronik zur Beaufschlagung der Speiseanschlüsse der Motorsteuerung mit entsprechenden elektrischen Anschlusswerten Spannungsquellen und Stromquellen aufweist. In diesem Fall wird also von den Spannungsquellen Gebrauch gemacht, die eine bestimmte Spannung auf die Speiseanschlüssen aufgeben – im Regelfall wird das über die Lastanschlüsse der Emulatorleistungselektronik geschehen –, nachdem wieder eine niederohmige Verbindung hergestellt ist zwischen der Emulatorleistungselektronik und den Speiseanschlüssen.

Bei einer Weiterbildung des vorgenannten Verfahrens ist zusätzlich vorgesehen, dass die Emulatorsteuerung die Lastanschlüsse der Emulatorleistungselektronik so ansteuert, dass die Speiseanschlüsse mit einer Testspannung beaufschlagt werden, die von der Motorsteuerung nicht auf die Speiseanschlüsse gegeben werden kann, insbesondere wobei die Testspannung der halben Zwischenkreisspannung v_{DC_Link} der Motorsteuerung entspricht. Diese Maßnahme ermöglicht es, herauszufinden, welche der Speiseanschlüsse von der Motorsteuerung angesteuert werden, ob alle Speiseanschlüsse permanent angesteuert werden – wie im Fall einer Sinus-Kommutierung – oder nur zwei der drei Speiseanschlüsse wechselnd angesteuert werden – wie im Fall der Block-Kommutierung.

Befinden sich alle Phasen im Spannungsmodus, so wird bei einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens vorgesehen, dass als Spannungssollwert jeweils die Testspannung ($v_{DC_Link}/2$) zuzüglich der simulierten induzierten Gegenspannungen in der entsprechenden Motorphase herangezogen wird. Dann ist die Testspannung lediglich ein Offset für die emulierten induzierten Phasenspannungen. Bei stehendem Motor als Initialzustand sind die induzierten Gegenspannungen gleich Null. Wird der Motor aber generatorisch bei offenen Brückenschaltern betrieben oder trudelt der Motor bei offenen Brückenschaltern aus, so existiert eine induzierte Gegenspannung, die mit dem Sollwert dann ebenfalls berücksichtigt wird. In diesem Betrieb (offene Brückenschalter, kein Stromfluss, aber induzierte Spannungen zwischen zwei beliebigen Motorphasen) beziehen sich die messbaren induzierten Spannungen nicht auf ein Potenzial (z. B. Masse), da kein Strom zu/von den Speiseanschlüssen fließt und die Motorwicklungen ebenfalls potenzialfrei sind

(Sternpunkt ist potenzialfrei). Daher macht es steuergerätseitig Sinn, die emulierte Spannung zwischen zwei beliebigen Motorphasen zu messen, und folglich ist der konkrete Offset zur entsprechenden Spannungseinprägung letztendlich egal, solange zwischen zwei beliebigen Phasen die gemessene Spannung nicht größer wird als v_{DC_Link} zuzüglich der doppelten Diodenspannung.

Die Wahl einer Testspannung, die von der Motorsteuerung nicht erzeugbar ist, dient der Unterscheidbarkeit der zurückgemessenen Spannungspotenziale. Die Motorsteuerung kann auf die Speiseanschlüsse mittels der in ihr wirkenden Halbbrücken-Schalter nur die Zwischenkreisspannung oder das Ground-Potenzial aufschalten, die halbe Zwischenkreisspannung kann also nicht von der Motorsteuerung stammen, es handelt sich, wenn diese Spannung auf einer Phase gemessen wird, also um eine von der Motorsteuerung nicht angesteuerte Phase, die über geöffnete Halbbrücken-Schalter potenzialmäßig freigeschaltet ist.

Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die Beaufschlagung der Speiseanschlüsse mit der Testspannung über eine Latenzzeit t_3 erfolgt, dass der angesteuerte Zustand $S_{PH}(j)=0$ eines Speiseanschlusses j erkannt wird, wenn der Betrag der Differenzspannung $v_{diff}(j)$ zwischen der an dem Speiseanschluss j der Motorsteuerung gemessenen Ausgangsspannung $v_{inv}(j)$ und der über die Lastanschlüsse aufgegebenen Testspannung nach der Latenzzeit t_3 größer ist als ein vorbestimmter Spannungsschwellwert v_{TH} . Diese Maßnahme dient dazu, transiente Vorgänge in dem Lastemulator, insbesondere in der Emulatorleistungselektronik abklingen zu lassen, sodass bei der Auswertung der Spannungen ein stabiler und zuverlässiger Wert erhalten wird. Vorzugsweise wird die Latenzzeit t_3 mindestens so lange bemessen, wie die Emulatorleistungselektronik benötigt, um die Vorgabe der Testspannung zuverlässig einzustellen.

Das zuvor beschriebene Erkennen der angesteuerten Phasen bzw. der angesteuerten Speiseanschlüsse und damit die Identifizierung einer blockkommutierten oder einer sinuskommutierten Ansteuerung durch die Motorsteuerung führt dazu, dass mit hoher Zuverlässigkeit und in richtiger Art und Weise der dreiphasige Elektromotor mit dem Lastemulator nachgebildet werden kann. Dies geschieht dadurch, dass nach Erkennung des angesteuerten Zustands $S_{PH}(j)=0$ des Speiseanschlusses j der Motorsteuerung die Emulatorsteuerung

die Emulatorleistungselektronik so ansteuert, dass über den nunmehr durch die Motorsteuerung angesteuerten Speiseanschluss j der von der Emulatorsteuerung berechnete Phasenstrom $i_{emulate}(j)$ fließt, insbesondere wobei bei Erkennung von zwei gleichzeitig angesteuerten Speiseanschlüssen als Motormodell das Modell eines blockkommutierten Motors verwendet wird und wobei bei Erkennung von drei gleichzeitig angesteuerten Speiseanschlüssen als Motormodell das Modell eines sinuskommutierten Motors verwendet wird. Es kommt dabei nicht darauf an, ob es sich hierbei um zwei verschiedene Modelle des Elektromotors handelt, es kann genauso gut ein Modell vorliegen, was die entsprechenden Teilmodelle zur richtigen Behandlung der jeweiligen Situation umfasst.

Das hier vorgestellte Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors ist gerade nicht beschränkt auf blockkommutierte Elektromotoren, vielmehr sollen auch Elektromotoren nachgebildet werden können, bei denen alle Phasen unterbrechungsfrei angesteuert werden, also mit einem berechneten Strom durch die Emulatorleistungselektronik beaufschlagt werden. Eine Weiterbildung des Verfahrens sieht daher vor, dass für eine beliebige Phase des Motors und damit für einen beliebigen Speiseanschluss der Motorsteuerung sicher erkannt wird, ob die Phase bzw. der Speiseanschluss durch die Motorsteuerung weiter angesteuert wird oder nicht. Diese Frage stellt sich bei jedem Nulldurchgang des Stromes in einer Phase. Bei sinuskommutierter Ansteuerung bleibt jede Phase im angesteuerten Zustand, auch bei einem Nulldurchgang des Stromes, wohingegen bei blockkommutierter Ansteuerung bei einem Nulldurchgang des Stromes immer eine der zuvor angesteuerten Phasen in den nicht angesteuerten Zustand wechselt.

Es ist nun vorgesehen, dass von der Emulatorsteuerung der Übergang eines Speiseanschlusses k der Motorsteuerung vom angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=0$ in den nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=1$ dadurch erkannt wird, dass in einem Zeitintervall $TI_{Vcalc,1}$, in dem der von der Emulatorsteuerung berechnete Phasenstrom $i_{emulate}(k)$ von einem vorgegebenen ersten Stromwert $i_{emulate,1}(k)$ auf einen vorgegebenen zweiten Stromwert $i_{emulate,2}(k)$ abfällt, das Zeitintegral $V_{Integral,1}$ über die entsprechende gemessene Ausgangsspannung $v_{inv}(k)$ des Speiseanschluss k der Motorsteuerung berechnet wird. Ist das Zeitintegral $V_{Integral,1}$ größer ist als ein vorgegebener Spannungszeit-Schwellwert $V_{DiodeTH,1}(k)$, dann ist die betrachtete Phase in den nicht angesteuerten Zustand gewechselt. Dies hat dann zur Folge, dass die als nicht angesteuert identifizierte Phase bzw. der korrespondierende Lastanschluss

von der Emulatorleistungselektronik von dem Strom- in den Spannungsmodus wechselt, also nicht mehr mit einem berechneten Strom beaufschlagt wird, sondern mit einer berechneten Induktionsspannung, da die Phase seitens der Motorsteuerung freigeschaltet, also floatend ist.

5 Die Idee besteht darin, von dem Umstand Gebrauch zu machen, dass über einen nicht angesteuerten Speiseanschluss auch im nicht angesteuerten Zustand zunächst noch ein Strom fließt, der sich jedoch über von der Motorsteuerung stets umfassten Freilaufdioden des Motorsteuerung-Umrichters abbaut. Dabei fällt an den Freilaufdioden eine Spannung ab, typisch etwa
10 0,7 V. Diese Spannung kann über die Speiseanschlüsse der Motorsteuerung gemessen werden, was vorliegend der Fall ist. Bei einer angesteuerten Phase bzw. bei einem angesteuerten Speiseanschluss der Motorsteuerung mit einem Nulldurchgang des Stromes wäre die messbare Spannung an dem betreffenden Speiseanschluss der Motorsteuerung entweder praktisch Null oder sie
15 entspräche v_{DC_Link} . Dieser Unterschied wird durch das zuvor beschriebene Verfahren ausgewertet.

Ein darauf aufbauende Weiterbildung des Verfahrens zeichnet sich dadurch aus, dass der vorgegebene erste Stromwert $i_{emulate,1}(k)$ kleiner ist als der halbe maximale berechnete Stromwert des Phasenstroms $i_{emulate}(k)$, insbesondere
20 kleiner ist als ein Viertel des maximalen berechneten Stromwertes des Phasenstroms $i_{emulate}(k)$. dadurch wird sichergestellt, dass der Strom sich tatsächlich auf einen Nulldurchgang zubewegt. Beispielsweise sollte bei einem 100 A-System $i_{emulate}(k)$ kleiner sein als 25 A. Ein sinnvoller Schwellwert konnte in der Praxis bei 100 A-Systemen sogar zwischen 1A und 2A gewählt
25 werden. Bei Anwendungen im kleinen Leistungsbereich (z. B. Festplattenmotoren) kann dieser Schwellwert auch deutlich kleiner sein. Wichtig ist, dass im definierten Stromband die Spannung über die Freilaufdioden noch deutlich messbar ist, bevor sich der Strom komplett abgebaut hat.

Ferner ist vorgesehen, dass der vorgegebene zweite Stromwert $i_{emulate,2}(k)$ ein
30 Bruchteil des vorgegebenen ersten Stromwertes $i_{emulate,1}(k)$ ist, vorzugsweise Dreiviertel des vorgegebenen ersten Stromwertes $i_{emulate,1}(k)$ beträgt. Der vorgegebene zweite Stromwert $i_{emulate,2}(k)$ sollte jedenfalls so groß gewählt werden, dass die Spannung über die Freilaufdioden nicht komplett einbrechen kann.

35 Es hat sich ferner als sinnvoll herausgestellt, dass der vorgegebene Spannungszeit-Schwellwert $V_{DiodeTH,1}(k)$ dem Zeitintegral der halben Freilaufdio-

denspannung einer von der Motorsteuerung umfassten Freilaufdiode ist. Als Integrationszeitraum wird hier auch das Zeitintervall $TI_{Vcalc,1}$ herangezogen, in dem der von der Emulatorsteuerung berechnete Phasenstrom $i_{emulate}(k)$ von dem vorgegebenen ersten Stromwert $i_{emulate,1}(k)$ auf den vorgegebenen zweiten Stromwert $i_{emulate,2}(k)$ abfällt. Der dabei entstehende Schwellwert ist hinreichend groß, um sich von einer solchen aufintegrierten Spannung zu unterscheiden, die an dem angesteuerten Speiseanschluss ggf. noch anliegt, wenn der Speiseanschluss über einen Leistungsschalter des Umrichters der Motorsteuerung auf das Nullpotenzial oder auf das High-Potenzial gezogen wird.

Die sichere Erkennung nicht angesteuerter Speiseanschlüsse ermöglicht eine interessante Ausgestaltung des Verfahrens, mit der auf eine beispielsweise abgeschaltete Motorsteuerung reagiert werden kann. Bei dieser Ausgestaltung des Verfahrens wird von der Emulatorsteuerung, wie zuvor beschrieben, der Übergang aller Speiseanschlüsse der Motorsteuerung vom angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=0$ in den nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=1$ untersucht. Bei Erkennen des Übergangs wenigstens zweier Speiseanschlüsse der Motorsteuerung vom angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=0$ in den nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=1$ wird die Emulatorleistungselektronik mit dem Schaltmittel hochohmig von den Speiseanschlüssen abgetrennt. Dann sind die Speiseanschlüsse der Motorsteuerung nur noch mit dem hochohmigen Widerstandnetzwerk miteinander verbunden. Es ist dann weiterhin möglich, durch die Motorsteuerung Diagnose- und Initialisierungsroutinen durchführen zu lassen. Natürlich umfasst dies auch den Fall, dass alle drei Speiseanschlüsse der Motorsteuerung in den nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=1$ wechseln, der Motor trudelt dann aus. Alle Phasen befinden sich dann im Spannungsmodus, da die induzierte Spannung abgebildet werden muss. Wenn die Motordrehzahl nach Austrudeln des Motors zu Null wird, wird die Emulatorleistungselektronik mit dem Schaltmittel hochohmig von den Speiseanschlüssen abgetrennt.

Die eingangs beschriebene und hergeleitete Aufgabe ist bei dem Lastemulator, von dem die Erfindung ausgeht, entsprechend dadurch gelöst, dass der Lastemulator dreiphasig über seine Lastanschlüsse an die Speiseanschlüsse einer Motorsteuerung anschließbar ist und der Lastemulator eine Emulatorleistungselektronik und eine Emulatorsteuerung zur Steuerung der Emulatorleistungselektronik aufweist, wobei die Emulatorsteuerung die von der Motorsteuerung angesteuerten Speiseanschlüsse und nicht angesteuerten Speiseanschlüsse ermittelt, und die Emulatorleistungselektronik durch die Emula-

torsteuerung so angesteuert wird, dass in den durch die Motorsteuerung angesteuerten Speiseanschlüssen von der Emulatorsteuerung auf Grundlage eines Motormodells berechnete Phasenströme $i_{emulate}$ fließen und auf den von der Motorsteuerung nicht angesteuerten Speiseanschluss eine von der Emulatorsteuerung auf Grundlage eines Motormodells berechnete Phasenspannung $v_{emulate}$ aufgegeben wird, und dass der Lastemulator ein Schaltmittel umfasst, mit dem die Emulatorleistungselektronik hochohmig von den Speiseanschlüssen abgeschaltet werden kann und mit dem die Emulatorleistungselektronik niederohmig an die Speiseanschlüsse zugeschaltet werden kann und wobei die Speiseanschlüsse über ein hochohmiges Widerstandsnetzwerk miteinander verbunden sind.

Der Lastemulator zeichnet sich in Anlehnung an das zuvor beschriebene Verfahren dadurch aus, dass die Emulatorsteuerung zur Simulation von ausgewählten Betriebszuständen des Elektromotors die Emulatorleistungselektronik und das Schaltmittel so ansteuert, dass die Emulatorleistungselektronik mit dem Schaltmittel hochohmig von den Speiseanschlüssen abgetrennt wird oder die bereits mit hochohmig von den Speiseanschlüssen abgetrennte Emulatorleistungselektronik mit dem Schaltmittel niederohmig an die Speiseanschlüsse zugeschaltet wird.

Vorzugsweise ist das hochohmige Widerstandsnetzwerk einer Sternschaltung von drei im Wesentlichen ohmschen Widerständen, wobei jedes der freien Enden der Sternschaltung mit jeweils einem anderen Speiseanschluss der Motorsteuerung verbunden ist.

Schließlich ist die Emulatorsteuerung so ausgestaltet, dass sie bei bestimmungsgemäßem Einsatz das vorbeschriebene Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors mit dem Lastemulator ausführt.

Im Einzelnen gibt es nun eine Vielzahl von Möglichkeiten, das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Emulatorsteuerung auszugestalten und weiterzubilden. Dazu wird verwiesen einerseits auf die den unabhängigen Patentansprüchen nachgeordneten Patentansprüche, andererseits auf die folgende Beschreibung von Ausführungsbeispielen in Verbindung mit der Zeichnung. In der Zeichnung zeigen

Fig. 1 eine aus dem Stand der Technik bekannte Anordnung aus Motorsteuerung und Lastemulator zur Durchführung eines Verfahrens zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors,

Fig. 2 die Kommutierungsübergänge innerhalb einer elektrischen Um-
drehung an den Speiseanschlüssen einer Motorsteuerung,

Fig. 3 eine ausführliche Darstellung der Anordnung zur Durchführung
des erfindungsgemäßen Verfahrens,

5 Fig. 4 ein Zustandsdiagramm zur Erläuterung der Erfassung des Über-
gangs eines Speiseanschlusses der Motorsteuerung vom
hochohmigen Zustand in den Spannungsmodus,

Fig. 5 Kurvenverläufe gemessener Phasenspannungen und berechneter
Phasenströme zwecks Erkennung des Übergangs einer Phase
10 vom angesteuerten Zustand in den nicht angesteuerten Zustand,

Fig. 6 ein Zustandsdiagramm zur Erläuterung der Vorgehensweise
gemäß Fig. 5 und

Fig. 7 ein Zustandsdiagramm zur Erläuterung des Übergangs in den
hochohmigen Zustand.

15 In Fig. 1 ist zunächst dargestellt eine aus dem Stand der Technik an sich be-
kannte Anordnung zur Durchführung eines Verfahrens zur Nachbildung ei-
nes dreiphasigen Elektromotors, bei dem es sich im Stand der Technik ein-
schränkend um einen bürstenlosen Gleichstrommotor handelt. Die Anord-
nung weist zunächst einen Lastemulator 1 auf, wobei der Lastemulator 1
20 dreiphasig über seine Lastanschlüsse 2 an die Speiseanschlüsse 3 einer Mo-
torsteuerung 4 angeschlossen ist. Der Lastemulator 1 weist eine Emulator-
leistungselektronik 5 und eine Emulatorsteuerung 6 zur Steuerung der Emu-
latorleistungselektronik 5 auf. Die Motorsteuerung 4 umfasst im vorliegen-
den Fall selbst auch eine Leistungselektronik in Form eines dreiphasig ange-
25 deuteten Wechselrichters 7, der über eine Gleichspannungsquelle V_{DC} leis-
tungsmäßig versorgt wird und durch entsprechende Schaltung der von dem
Wechselrichter 7 umfassten Halbleiterschalter über seine Speiseanschlüsse 3
eine dreiphasige Wechsellast treibt.

Das Verfahren sieht vor, dass die Emulatorsteuerung 6 die von der Motor-
steuerung 4 angesteuerten Speiseanschlüsse 3 und nicht angesteuerten Spei-
30 seanschlüsse 3 ermittelt, wobei die Emulatorleistungselektronik 5 durch die
Emulatorsteuerung 6 so angesteuert wird, dass in den durch die Motorsteue-
rung 4 angesteuerten Speiseanschlüssen 3 von der Emulatorsteuerung 6 auf
Grundlage eines Motormodells 8 berechnete Phasenströme $i_{emulate}$ fließen und

auf den von der Motorsteuerung 4 nicht angesteuerten Speiseanschluss 3 eine von der Emulatorsteuerung 6 auf Grundlage des Motormodells 8 berechnete Phasenspannung $v_{emulate}$ aufgegeben wird. Es ist zu erkennen, dass die Emulatorleistungselektronik 5 zur Bewältigung dieser Aufgabe sowohl Stromquellen I_s als auch Spannungsquellen U_s aufweist, die entsprechend auf die Lastanschlüsse 2 der Emulatorleistungselektronik 5 geschaltet werden können, wobei dies im vorliegenden Fall mittelbar für jede Phase über eine Entkopplungsinduktivität L_d erfolgt.

In Fig. 2 sind die sechs innerhalb einer elektrischen Umdrehung auftretenden Kommutierungsübergänge bei einem dreiphasigen blockkommutierten bürstenlosen Gleichstrommotor gezeigt, wobei die Kommutierungen jeweils im elektrischen Winkelabstand von 60° erfolgen. Es ist zu erkennen, dass der unangesteuerte Speiseanschluss nur in einem Kommutierungsintervall in einer Phase erhalten bleibt und danach sofort wieder in den angesteuerten Zustand überwechselt; die Phasen sind hier mit i_1 , i_2 und i_3 bezeichnet. "Unangesteuert" bedeutet hier, dass der jeweilige Speiseanschluss der Motorsteuerung potenzialmäßig offen ist, also weder durch die Leistungsschalter des Umrichters 7 auf Ground noch die positive Betriebsspannung V_{DC} gezogen wird. "Angesteuert" ist eine Phase bzw. der zugehörige Speiseanschluss 3 dann, wenn der Speiseanschluss von der Motorsteuerung auf ein definiertes elektrisches Potenzial gelegt wird und nicht potenzialmäßig offen – also nicht floatend ist. Von den beiden angesteuerten Speiseanschlüssen 3 der Motorsteuerung 4 wechselt ein Speiseanschluss in den nicht angesteuerten Zustand, während der andere angesteuerte Speiseanschluss im angesteuerten Zustand verbleibt. Über die blockkommutierte Ansteuerung wird so ein entsprechendes Drehfeld in dem bürstenlosen Gleichstrommotor erzeugt, mit dem dann ein entsprechendes Drehmoment aufgebracht werden kann.

In der EP 2940857 A1 wird ein Verfahren und eine Anordnung vorgestellt, mit denen solche blockkommutiert angesteuerten Motoren nachgebildet werden können. Ziel ist es vorliegend, das Verfahren so fortzubilden, dass es allgemein möglich ist, dreiphasige Elektromotoren nachzubilden, also auch solche Elektromotoren, deren Phasen durchgängig von der Motorsteuerung angesteuert sind, die also keine floatenden, unbestromten Phasen aufweisen. Natürlich weisen diese Motoren auch Nulldurchgänge des Stromes auf, genau wie dies bei blockkommutierten Motoren der Fall ist, jedoch sind ihre Phasen von der Motorsteuerung 4 durchgehend potenzialmäßig beschaltet.

In Fig. 3 ist die Anordnung aus Fig. 1 zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens mit der erfindungsgemäß eingerichteten Emulatorsteuerung 6 noch einmal in einem höheren Detaillierungsgrad dargestellt. Innerhalb der Emulatorleistungselektronik 5 ist ein Regler 9 gezeigt, der dafür
5 sorgt, dass die vorgegebenen Phasenströme tatsächlich an den Lastanschlüssen 2 gemäß der Vorgabe aus der Emulatorsteuerung 6 eingestellt werden. Dazu wird innerhalb der Emulatorleistungselektronik 5 der jeweils interessierende Phasenstrom zurückgemessen und einem Regelungsalgorithmus 10
10 zwecks Bildung einer Regeldifferenz zugeführt. Über einen Modulator 11 wird der jeweils richtigen Phase ein vorgegebener Spannungswert oder ein vorgegebener Stromwert zugewiesen.

Die Emulatorsteuerung 6 ist in dem dargestellten Ausführungsbeispiel auf einem FPGA-Board realisiert, auf dem "fest verdrahtete" Schaltkreisstrukturen eine besonders schnelle Ausführbarkeit des nachfolgend beschriebenen
15 Verfahrens gewährleisten. Über die einlesende Schnittstelle 12 werden die Ausgangsspannungen $v_{inv}(j)$, die an den Speiseanschlüssen 3 der Motorsteuerung 4 gemessen werden, in die Emulatorsteuerung 6 eingelesen und dort verfügbar gemacht, es handelt sich also um echte Messgrößen. Über die
Ausgangsschnittstelle 13 werden die berechneten Sollvorgaben für berechnete Phasenspannungen $v_{emulate}(j)$ und für berechnete Phasenströme $i_{emulate}(j)$ an
20 die Emulatorleistungselektronik 5 ausgegeben.

Innerhalb der Emulatorsteuerung 6 ist darüber hinaus ein Zustandsautomat 14 realisiert, mit dem kommutierungsbedingte Zustandswechsel an den Speiseanschlüssen 3 der Motorsteuerung 4 erkannt werden. Der Zustand des
25 Speiseanschlusses j wird im Folgenden grundsätzlich als $S_{PH}(j)$ bezeichnet, wobei der Wert 1 für den nicht angesteuerten Zustand des Speiseanschlusses j steht und der Wert 0 für den angesteuerten Zustand des betreffenden Speiseanschlusses. Es kann auch bei einem nicht angesteuerten Speiseanschluss ein Strom fließen, nämlich über Freilaufdiode, bis er zum Erliegen kommt.
30 In diesem Fall ist der Zustand 0. Auf den genaueren Aufbau und Inhalt der Emulatorsteuerung 6 kommt es hier im Einzelnen nicht an, diesbezügliche Informationen enthält die europäische Offenlegungsschrift EP 2940857 A1.

Der in Fig. 3 dargestellte Lastemulator 1 umfasst weiterhin ein Schaltmittel 15, mit dem die Emulatorleistungselektronik 5 hochohmig von den Speiseanschlüssen 3 abgeschaltet werden kann. Es könnte genauso gut gesagt werden,
35 dass mit dem Schaltmittel 15 die Emulatorleistungselektronik hochohmig von den Lastanschlüssen 2 abgeschaltet werden kann, was letztlich auch ein

Abschalten der Emulatorleistungselektronik 5 von den Speiseanschlüssen 3 bewirkt. Wichtig ist, dass die Emulatorleistungselektronik 5 nicht mehr wirksam mit der Motorsteuerung 4 verbunden ist und nicht auf die Motorsteuerung 4 elektrisch einwirken kann. Das Schaltmittel 15 umfasst hier insgesamt
5 drei Halbleiterschalter, mit denen jede Phase separat hochohmig von den Lastanschlüssen 2 – und damit von den Speiseanschlüssen 3 der Motorsteuerung 4 – abgetrennt werden kann. Bei dem durch das Schaltmittel 15 erzielbaren "hochohmigen Zustand" eines Speiseanschlusses j nimmt $S_{PH}(j)$ im Folgenden den Wert 2 an.

10 Umgekehrt kann die Emulatorleistungselektronik 5 mit dem Schaltmittel 15 natürlich auch niederohmig wieder an die Speiseanschlüsse 3 der Motorsteuerung 4 zugeschaltet werden. Die niederohmige Zuschaltung an die Speiseanschlüsse 3 der Motorsteuerung 4 ist dabei entscheidend, da es um die elektrisch wirksame Ankopplung der Emulatorleistungselektronik 5 an
15 die Motorsteuerung 4 geht. Darüber hinaus sind die Lastanschlüsse 2 über ein hochohmiges Widerstandsnetzwerk 16 miteinander verbunden. Dies ist gleichbedeutend damit, dass die Speiseanschlüsse 3 der Motorsteuerung über das hochohmige Widerstandsnetzwerk 16 miteinander verbunden sind. Wie noch dargelegt werden wird, kommt es im Wesentlichen auf die elektrische
20 Verbindung der Speiseanschlüsse 3 der Motorsteuerung 4 über das Widerstandsnetzwerk 16 an und zwar auch, wenn die Emulatorleistungselektronik 5 durch die Schaltmittel 15 hochohmig abgetrennt sind, sodass keine elektrisch wirksame Verbindung mehr zwischen der Motorsteuerung 4 und der Emulatorleistungselektronik 5 existiert.

25 Zur Simulation von ausgewählten Betriebszuständen des Elektromotors wird die Emulatorleistungselektronik 5 mit dem Schaltmittel 15 hochohmig von den Lastanschlüssen 2 abgetrennt oder es wird die bereits von den Lastanschlüssen 2 abgetrennte Emulatorleistungselektronik 5 mit dem Schaltmittel 15 niederohmig an die Lastanschlüsse 2 zugeschaltet. Es könnte genauso gut
30 heißen, dass zur Simulation von ausgewählten Betriebszuständen des Elektromotors die Emulatorleistungselektronik 5 mit dem Schaltmittel 15 hochohmig von den Speiseanschlüssen 3 abgetrennt wird oder die bereits hochohmig von den Speiseanschlüssen 3 abgetrennte Emulatorleistungselektronik mit dem Schaltmittel 15 niederohmig an die Speiseanschlüsse 3
35 zugeschaltet wird. Im Ergebnis ist es jedenfalls so, dass das Schaltmittel 15 nicht die hochohmige Verbindung der Speiseanschlüsse 3 durch das hochohmige Widerstandsnetzwerk 16 beeinflusst.

Durch das immer wirksame mit den Speiseanschlüssen 3 der Motorsteuerung 4 verbundene Widerstandsnetzwerk kann auch auf solche Betriebsarten der Motorsteuerung reagiert werden, die jenseits des motorischen oder auch generatorischen Normalbetriebs liegen, also auch dann, wenn die Emulatorleistungselektronik 5 hochohmig von der Motorsteuerung 4 abgetrennt ist. Wenn die Motorsteuerung 4 zur Initialisierung einer Betriebsphase eine Spannung oder ein Spannungsmuster auf die Speiseanschlüsse 3 gibt, können diese aufgegebenen Spannungen über das Widerstandsnetzwerk 16 beispielsweise über andere Speiseanschlüsse 3 rückgemessen werden. Ein solches Beaufschlagen der Speiseanschlüsse mit einem Testmuster dient häufig der Identifizierung der äußeren Beschaltung der Speiseanschlüsse 3 durch die Motorsteuerung 4.

Im vorliegenden Fall ist das hochohmige Widerstandsnetzwerk 16 eine Sternschaltung von drei im Wesentlichen ohmschen Widerständen, wobei jedes der freien Enden der Sternschaltung mit jeweils einem anderen Speiseanschluss 3 der Motorsteuerung 4 verbunden ist. Wenn gesagt ist, dass die Widerstände im Wesentlichen ohm'sch sind, dann ist damit gemeint, dass es sich bei den Elementen des Widerstandsnetzwerkes 16 hier um Widerstände im praktischen fachüblichen elektrotechnischen Verständnis handelnd, wissend dass es ideale ohm'sche Widerstände nicht gibt, also jedes elektrische Bauelement selbstverständlich auch parasitäre induktive und kapazitive Eigenschaften aufweisen kann.

In Fig. 4 ist ein Ausführungsbeispiel gezeigt, bei dem die Emulatorleistungselektronik 5 zunächst hochohmig von den Lastanschlüssen 2 der Emulatorleistungselektronik 5 und damit auch hochohmig von den Speiseanschlüssen 3 der Motorsteuerung 4 abgetrennt ist. Es gilt also für alle Phasen $S_{PH}(i) = 2$. Ein motorischer Motoranstart wird durch die Motorsteuerung 4 durch eine beginnende Ansteuerung der Speiseanschlüsse 3 erkannt, wenn zumindest eine der zwischen den Speiseanschlüssen i, j der Motorsteuerung 4 durch Messung ermittelten Ausgangsdifferenzspannungen $v_{inv,diff}(i, j)$ größer als ist als ein vorbestimmter Spannungsschwellwert $TH_{impdance}$. Es ist einleuchtend, dass messtechnisch erfassbare Differenzspannungen $v_{inv,diff}(i, j)$ zwischen den Speiseanschlüssen 3 der Motorsteuerung 4 auf eine beginnende Ansteuerung des Motors hindeuten können. Ein generatorischer Motoranstart des Motors kann ebenfalls erkannt werden. Ausgangszustand ist wieder der, dass die Motorsteuerung 4 keinen Speiseanschluss 3 ansteuert und die Emulatorleistungselektronik 5 mit dem Schaltmittel 15 von den Speiseanschlüssen 3

der Motorsteuerung bzw. von den Lastanschlüssen 2 der Emulatorleistungselektronik 5 abgetrennt ist. Ein generatorischer Motoranstart wird dann erkannt, wenn die Motordrehzahl $\omega_{mot,emu}$ des Motormodells 8 ausgewertet wird und die Motordrehzahl $\omega_{mot,emu}$ ungleich Null ist, was ebenfalls in Fig. 4 dargestellt ist.

Das Ergebnis des – motorisch oder generatorisch – erkannten Motoranstartes ist, dass die Emulatorleistungselektronik 5 mit dem Schaltmittel 15 niederohmig an die Lastanschlüsse 2 – und damit an die Speiseanschlüsse 3 – zugeschaltet wird und die Emulatorsteuerung 6 die Lastanschlüsse 2 der Emulatorleistungselektronik 5 so ansteuert, dass die Lastanschlüsse 2 und damit die Speiseanschlüsse 3 mit einer Spannung beaufschlagt werden, alle Phasen der Emulatorleistungselektronik 5 also im Spannungsmodus arbeiten. Für die Spannung, mit der die Lastanschlüsse 2 durch die Emulatorleistungselektronik 5 beaufschlagt werden, wird eine Testspannung verwendet, die von der Motorsteuerung 4 über die Speiseanschlüsse 3 nicht auf die Lastanschlüsse 2 gegeben werden kann, wobei die Testspannung hier der halben Zwischenkreisspannung v_{DC_Link} der Motorsteuerung 4 entspricht. Die Wahl einer solchen Testspannung gestattet es herauszufinden, welche der Speiseanschlüsse 3 von der Motorsteuerung 4 angesteuert werden. Wenn von der Motorsteuerung 4 ein Speiseanschluss 3 potenzialmäßig offen – floatend – bleibt, kann die seitens der Emulatorleistungselektronik 5 aufgegebenen Testspannung von der Emulatorsteuerung 6 zurückgemessen werden. Andernfalls würde die von der Motorsteuerung 4 aufgegebenen Spannung die maßgebliche und über die Speiseanschlüsse 3 von der Emulatorsteuerung 6 rückgemessene Spannung sein.

Die Beaufschlagung der Lastanschlüsse 2 mit der Testspannung erfolgt über eine Latenzzeit t_3 . Der angesteuerte Zustand $S_{PH}(j)=0$ eines Speiseanschlusses j wird dann erkannt, wenn der Betrag der Differenzspannung $v_{diff}(j)$ zwischen der an dem Speiseanschluss j der Motorsteuerung 4 gemessenen Ausgangsspannung $v_{inv}(j)$ und der über die Lastanschlüsse 2 aufgegebenen Testspannung nach der Latenzzeit t_3 größer ist als ein vorbestimmter Spannungsschwellwert v_{TH} . Die Latenzzeit t_3 ist mindestens so lang bemessen, wie die Emulatorleistungselektronik 5 benötigt, um die Vorgabe der Testspannung zuverlässig einzustellen.

Nach Erkennung des angesteuerten Zustands $S_{PH}(j)=0$ des Speiseanschlusses j der Motorsteuerung 4 steuert die Emulatorsteuerung 6 die Emulatorleistungselektronik 5 so an, dass über den nunmehr durch die Motorsteuerung 4

angesteuerten Speiseanschluss j der von der Emulatorsteuerung 6 berechnete Phasenstrom $i_{emulate}(j)$ fließt. Bei Erkennung von zwei gleichzeitig angesteuerten Speiseanschlüssen 3 kann davon ausgegangen werden, dass die Ansteuerung durch die Motorsteuerung 4 blockkommutiert erfolgt, und bei Erkennung von drei gleichzeitig angesteuerten Speiseanschlüssen 3 kann davon ausgegangen werden, dass eine sinuskommutierten Ansteuerung durch die Motorsteuerung 4 erfolgt.

Die Fig. 5 und 6 beschreiben die Erkennung des Übergangs einer Phase vom angesteuerten Zustand $S_{PH}(j)=0$ in den nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(j)=1$. Hier muss ein Kriterium gefunden werden, das eine zuverlässige und eindeutige Auswertung geeigneter Zustandsgrößen ermöglicht. Es genügt beispielsweise nicht, einfach nur Nulldurchgänge des Stromes in einzelnen Phasen zu beobachten, da derartige Stromnulldurchgänge auch bei sinuskommutierten Motoren vorliegen, die durchgehend in allen Phasen angesteuert sind.

In Fig. 5 sind zunächst dargestellt die Verläufe zweier Phasenspannungen und zweier Phasenströme, wobei der Verlauf der dritten Phasenspannung und der Verlauf des dritten Phasenstroms aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen worden sind. Im unteren Abschnitt des Diagramms in Fig. 5 ist der gemessene Verlauf der beiden Phasenspannungen v_{inv} in Volt aufgetragen, im oberen Abschnitt des Diagramms sind die korrespondierenden berechneten Phasenströme $i_{emulate}$ in Ampere aufgetragen. Über beide Verläufe hat die Emulatorsteuerung 6 Kenntnis, $i_{emulate}$ ist von ihr selbst berechnet worden, der Verlauf der Phasenspannungen v_{inv} liegt als Messgröße vor, siehe Fig. 3.

Von der Emulatorsteuerung 6 wird der Übergang eines Speiseanschlusses k der Motorsteuerung 4 vom angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=0$ in den nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=1$ durch Beobachtung des Phasenstroms $i_{emulate}(k)$ erkannt. Es wird das Zeitintervall $TI_{Vcalc,1}$ betrachtet, in dem der von der Emulatorsteuerung 6 berechnete Phasenstrom $i_{emulate}(k)$ von einem vorgegebenen ersten Stromwert $i_{emulate,1}(k)$ auf einen vorgegebenen zweiten Stromwert $i_{emulate,2}(k)$ abfällt. Das Durchschreiten dieser Grenzwerte definiert also das Zeitintervall $TI_{Vcalc,1}$. In diesem Zeitintervall wird dann das Zeitintegral $V_{Integral,1}$ über die entsprechende gemessene Ausgangsspannung $v_{inv}(k)$ des Speiseanschlusses k der Motorsteuerung 4 berechnet. Ist das Zeitintegral $V_{Integral,1}$ größer als ein vorgegebener Spannungszeit-Schwellwert $V_{DiodeTH,1}(k)$, dann ist der Übergang der Phase in den nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=1$ erkannt.

Bei diesem Verfahren wird ausgenutzt, dass der Umrichter 7 der Motorsteuerung 4 Halbleiterschalter 17 mit zur Betriebsstromrichtung antiparallel geschalteten Freilaufdioden 18 aufweist (Fig. 3). Wird ein Speiseanschluss 3,k der Motorsteuerung nicht mehr angesteuert, ist der betreffende Strompfad

5 potenzialmäßig frei, wobei der Strom in dem Strompfad k aufgrund der Motorinduktivität nur stetig abnehmen kann und sich über die Freilaufdioden 18 abbaut. Während dieses Vorgangs fällt an der betroffenen Freilaufdiode eine Durchlassspannung von etwa 0,7 V ab, die an dem betreffenden Speiseanschluss anliegt und gemessen wird. Im Gegensatz dazu läge bei einem ange-

10 steuerten Speiseanschluss 3,k mit Stromnulldurchgang eine definierte Spannung von 0 V an dem betreffenden Speiseanschluss, da der low-side-Halbbrückenschalter 17 eine elektrische Verbindung zum Ground-Potenzial herstellt. Im ersten Fall ist die Spannungszeitfläche im Zeitintervall $TI_{V_{calc},1}$ ungleich Null, im zweiten Fall ist sie praktisch gleich Null. Hier ist der

15 Spannungszeit-Schwellwert $V_{DiodeTH,1}(k)$ auf Basis der halben Freilaufdiodespannung von 0,35 V über das Zeitintervall $TI_{V_{calc},1}$ durch Integration berechnet worden.

In dem in Fig. 5 dargestellten Ausführungsbeispiel beträgt der vorgegebene erste Stromwert $i_{emulate,1}(k)$ 2 A und entspricht damit etwa einem Viertel des

20 maximalen berechneten Stromwertes des Phasenstroms $i_{emulate}(k)$. Der vorgegebene zweite Stromwert $i_{emulate,2}(k)$ beträgt in dem Beispiel 1,75 A und entspricht damit etwa Dreiviertel des vorgegebenen ersten Stromwertes $i_{emulate,1}(k)$.

In Fig. 6 ist die Erkennung des Zustandsübergangs vom angesteuerten Zustand $S_{PH}(j)=0$ in den nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(j)=1$ formal in Form

25 eines Zustandsdiagramms dargestellt, wie es im Rahmen des Zustandsautomaten 14 realisiert ist. Wenn der Phasenstrom zu Null wird und die Vorbedingung auf Grundlage der Spannungszeitfläche erfüllt ist, erfolgt der Zustandswechsel.

In Fig. 7 ist schließlich dargestellt der Übergang aller Phasen in den

30 hochohmigen Zustand, wozu die zuvor beschriebene Erkennung des nicht angesteuerten Zustands eines Speiseanschlusses 3 bzw. einer Phase herangezogen wird. Von der Emulatorsteuerung 6 wird der Übergang aller Speiseanschlüsse der Motorsteuerung 4 überwacht und damit auch ein Zustandswechsel

35 vom angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=0$ in den nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=1$ erkannt. Bei Erkennen des Übergangs wenigstens zweier Speiseanschlüsse 3 der Motorsteuerung 4 vom angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=0$ in den

nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=1$ wird die Emulatorleistungselektronik 5 mit dem Schaltmittel 15 hochohmig von den Speiseanschlüssen 3 abgetrennt. Dies erfolgt hier durch Abtrennung von den Lastanschlüssen 2, die mit den Speiseanschlüssen 3 stets verbunden sind. Hintergrund dieses Zustandswechsels ist die Erkenntnis, dass bei zwei nicht angesteuerten Speiseanschlüssen 3 auch in der dritten Phase kein Strom fließen kann, so dass hier kein sinnvoller Betriebszustand vorliegt.

Bezugszeichen

- | | | |
|----|-----|-----------------------------|
| 5 | 1. | Lastemulator |
| | 2. | Lastanschlüsse |
| | 3. | Speiseanschlüsse |
| | 4. | Motorsteuerung |
| | 5. | Emulatorleistungselektronik |
| 10 | 6. | Emulatorsteuerung |
| | 7. | Umrichter |
| | 8. | Motormodell |
| | 9. | Regler |
| | 10. | Regelungsalgorithmus |
| 15 | 11. | Modulator |
| | 12. | einlesende Schnittstelle |
| | 13. | Ausgangsschnittstelle |
| | 14. | Zustandsautomat |
| | 15. | Schaltmittel |
| 20 | 16. | Widerstandsnetzwerk |
| | 17. | Halbleiterschalter |
| | 18. | Freilaufdiode |

Patentansprüche

1. Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors mit einem Lastemulator (1), wobei der Lastemulator (1) dreiphasig über seine Lastanschlüsse (2) an die Speiseanschlüsse (3) einer Motorsteuerung (4) angeschlossen ist und der Lastemulator (1) eine Emulatorleistungselektronik (5) und eine Emulatorsteuerung (6) zur Steuerung der Emulatorleistungselektronik (5) aufweist, wobei die Emulatorsteuerung (6) die von der Motorsteuerung (4) angesteuerten Speiseanschlüsse (3) und nicht angesteuerten Speiseanschlüsse (3) ermittelt, und die Emulatorleistungselektronik (5) durch die Emulatorsteuerung (6) so angesteuert wird, dass in den durch die Motorsteuerung (4) angesteuerten Speiseanschlüssen (3) von der Emulatorsteuerung (6) auf Grundlage eines Motormodells (8) berechnete Phasenströme $i_{emulate}$ fließen und auf den von der Motorsteuerung (4) nicht angesteuerten Speiseanschluss (3) eine von der Emulatorsteuerung auf Grundlage eines Motormodells (8) berechnete Phasenspannung $v_{emulate}$ aufgegeben wird,

dadurch gekennzeichnet,

dass der Lastemulator (1) ein Schaltmittel (15) umfasst, mit dem die Emulatorleistungselektronik (5) hochohmig von den Speiseanschlüssen (3) abgeschaltet werden kann und mit dem die Emulatorleistungselektronik (5) niederohmig an die Speiseanschlüsse (3) zugeschaltet werden kann und wobei die Speiseanschlüsse (3) über ein hochohmiges Widerstandsnetzwerk (16) miteinander verbunden sind,

dass zur Simulation von ausgewählten Betriebszuständen des Elektromotors die Emulatorleistungselektronik (5) mit dem Schaltmittel (15) hochohmig von den Speiseanschlüssen (3) abgetrennt wird oder die bereits hochohmig von den Speiseanschlüssen (3) abgetrennte Emulatorleistungselektronik (5) mit dem Schaltmittel (15) niederohmig an die Speiseanschlüsse (3) zugeschaltet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als hochohmiges Widerstandsnetzwerk (16) eine Sternschaltung von drei im Wesentlichen ohmschen Widerständen gewählt wird, wobei jedes der freien Enden der Sternschaltung mit jeweils einem anderen Speiseanschluss (3) der Motorsteuerung (4) verbunden ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass als Ausgangszustand die Motorsteuerung (4) keinen Speiseanschluss (3) ansteuert und die Emulatorleistungselektronik (5) mit dem Schaltmittel (15) hochohmig von den Speiseanschlüssen (3) abgetrennt ist, dass ein motorischer Motoranstart durch eine beginnende Ansteuerung der Speiseanschlüsse (3) durch die Motorsteuerung (4) erkannt wird, wenn zumindest eine der zwischen den Speiseanschlüssen (3, i, j) der Motorsteuerung (4) durch Messung ermittelten Ausgangsdifferenzspannungen $v_{inv,diff}(i,j)$ größer ist als ein vorbestimmter Spannungsschwellwert $TH_{impedance}$.
- 5
- 10 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass als Ausgangszustand die Motorsteuerung (4) keinen Speiseanschluss (3) ansteuert und die Emulatorleistungselektronik (5) mit dem Schaltmittel (15) hochohmig von den Speiseanschlüssen (3) abgetrennt ist, dass ein generatorischer Motoranstart erkannt wird, wenn die Motordrehzahl $\omega_{mot,emu}$ des Motormodells (8) ausgewertet wird und die Motordrehzahl $\omega_{mot,emu}$ ungleich Null ist.
- 15
5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass bei erkanntem motorischen oder generatorischen Motoranstart die Emulatorleistungselektronik (5) mit dem Schaltungsmittel (15) niederohmig an die Speiseanschlüsse (3) zugeschaltet wird und die Emulatorsteuerung (6) die Lastanschlüsse (2) der Emulatorleistungselektronik (5) so ansteuert, dass die Lastanschlüsse (2) mit einer Spannung beaufschlagt werden.
- 20
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Emulatorsteuerung (6) die Lastanschlüsse (2) der Emulatorleistungselektronik (5) so ansteuert, dass die Speiseanschlüssen (3) mit einer Testspannung beaufschlagt werden, die von der Motorsteuerung (4) nicht auf die Speiseanschlüsse (3) gegeben werden kann, insbesondere wobei die Testspannung der halben Zwischenkreisspannung v_{DC_Link} der Motorsteuerung (4) zuzüglich der simulierten induzierten Gegenspannungen in der entsprechenden Motorphase entspricht.
- 25
- 30
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Beaufschlagung der Speiseanschlüsse (3) mit der Testspannung über eine Latenzzeit t_3 erfolgt, dass der angesteuerte Zustand $S_{PH}(j)=0$ eines Speiseanschlusses j erkannt wird, wenn der Betrag der Differenzspannung $v_{diff}(j)$ zwischen der an dem Speiseanschluss j der Motorsteuerung (4) gemessenen Ausgangsspannung $v_{inv}(j)$ und der über die Lastanschlüsse (2) aufgegebenen Testspan-
- 35

nung nach der Latenzzeit t_3 größer ist als ein vorbestimmter Spannungsschwellwert v_{TH} .

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Latenzzeit t_3 mindestens so lang bemessen wird, wie die Emulatorleistungselektronik (5) benötigt, um die Vorgabe der Testspannung zuverlässig einzustellen.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass nach Erkennung des angesteuerten Zustands $S_{PH}(j)=0$ des Speiseanschlusses j der Motorsteuerung (4) die Emulatorsteuerung (6) die Emulatorleistungselektronik (5) so ansteuert, dass über den nunmehr durch die Motorsteuerung (4) angesteuerten Speiseanschluss j der von der Emulatorsteuerung (6) berechnete Phasenstrom $i_{emulate}(j)$ fließt, insbesondere wobei bei Erkennung von zwei gleichzeitig angesteuerten Speiseanschlüssen (3) als Motormodell (8) das Modell eines blockkommutierten Motors verwendet wird und wobei bei Erkennung von drei gleichzeitig angesteuerten Speiseanschlüssen (3) als Motormodell (8) das Modell eines sinuskommutierten Motors verwendet wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass von der Emulatorsteuerung (6) der Übergang eines Speiseanschlusses k der Motorsteuerung (4) vom angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=0$ in den nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=1$ dadurch erkannt wird, dass in einem Zeitintervall $TI_{Vcalc,1}$, in dem der von der Emulatorsteuerung (6) berechnete Phasenstrom $i_{emulate}(k)$ von einem vorgegebenen ersten Stromwert $i_{emulate,1}(k)$ auf einen vorgegebenen zweiten Stromwert $i_{emulate,2}(k)$ abfällt, das Zeitintegral $V_{Integral,1}$ über die entsprechende gemessene Ausgangsspannung $v_{inv}(k)$ des Speiseanschlusses k der Motorsteuerung (4) berechnet wird und das Zeitintegral $V_{Integral,1}$ größer ist als ein vorgegebener Spannungszeit-Schwellwert $V_{DiodeTH,1}(k)$.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass der vorgegebene erste Stromwert $i_{emulate,1}(k)$ kleiner ist als der halbe maximale berechnete Stromwert des Phasenstroms $i_{emulate}(k)$, insbesondere kleiner ist als ein Viertel des maximalen berechneten Stromwertes des Phasenstroms $i_{emulate}(k)$ und/oder dass der vorgegebene zweite Stromwert $i_{emulate,2}(k)$ ein Bruchteil des vorgegebenen ersten Stromwertes $i_{emulate,1}(k)$ ist, vorzugsweise Dreiviertel des vorgegebenen ersten Stromwertes $i_{emulate,1}(k)$ beträgt und/oder dass der vorgegebene Spannungszeit-Schwellwert $V_{DiodeTH,1}(k)$ dem Zeitintegral

$V_{Integral,1}$ der halben Freilaufdiodenspannung einer von der Motorsteuerung (4) umfassten Freilaufdiode (18) ist.

12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass von der Emulatorsteuerung (6) der Übergang aller Speiseanschlüsse der Motorsteuerung (4) vom angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=0$ in den nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=1$ untersucht wird und bei Erkennen des Übergangs wenigstens zweier Speiseanschlüsse (3) der Motorsteuerung (4) vom angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=0$ in den nicht angesteuerten Zustand $S_{PH}(k)=1$ die Emulatorleistungselektronik (5) mit dem Schaltmittel (15) hochohmig von den Lastanschlüssen (2) abgetrennt wird.

13. Lastemulator (1) zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors, wobei der Lastemulator (1) dreiphasig über seine Lastanschlüsse (2) an die Speiseanschlüsse (3) einer Motorsteuerung (4) anschließbar ist und der Lastemulator (1) eine Emulatorleistungselektronik (5) und eine Emulatorsteuerung (6) zur Steuerung der Emulatorleistungselektronik (5) aufweist, wobei die Emulatorsteuerung (6) die von der Motorsteuerung (4) angesteuerten Speiseanschlüsse (3) und nicht angesteuerten Speiseanschlüsse (3) ermittelt, und die Emulatorleistungselektronik (5) durch die Emulatorsteuerung (6) so angesteuert wird, dass in den durch die Motorsteuerung (4) angesteuerten Speiseanschlüssen (3) von der Emulatorsteuerung (6) auf Grundlage eines Motormodells (8) berechnete Phasenströme $i_{emulate}$ fließen und auf den von der Motorsteuerung (4) nicht angesteuerten Speiseanschluss (3) eine von der Emulatorsteuerung auf Grundlage eines Motormodells (8) berechnete Phasenspannung $v_{emulate}$ aufgegeben wird,

25 **dadurch gekennzeichnet,**

dass der Lastemulator (1) ein Schaltmittel (15) umfasst, mit dem die Emulatorleistungselektronik (5) hochohmig von den Speiseanschlüssen (3) abgeschaltet werden kann und mit dem die Emulatorleistungselektronik (5) niederohmig an die Speiseanschlüsse (3) zugeschaltet werden kann und wobei die Speiseanschlüsse (3) über ein hochohmiges Widerstandsnetzwerk (16) miteinander verbunden sind.

14. Lastemulator (1) nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Emulatorsteuerung (6) zur Simulation von ausgewählten Betriebszuständen des Elektromotors die Emulatorleistungselektronik (5) und das Schaltmittel (15) so ansteuert, dass die Emulatorleistungselektronik (5) mit dem Schaltmittel (15) hochohmig von den Speiseanschlüssen (3) abgetrennt wird oder

die bereits mit hochohmig von den Speiseanschlüssen (3) abgetrennte Emulatorleistungselektronik (5) mit dem Schaltmittel (15) niederohmig an die Speiseanschlüssen (3) zugeschaltet wird.

5 15. Lastemulator (1) nach Anspruch 13 oder 14, dadurch gekennzeichnet, dass das hochohmige Widerstandsnetzwerk (16) eine Sternschaltung von drei im Wesentlichen ohmschen Widerständen ist, wobei jedes der freien Enden der Sternschaltung mit jeweils einem anderen Speiseanschluss (3) der Motorsteuerung (4) verbunden ist.

10 16. Lastemulator (1) nach einem der Ansprüche 13 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Emulatorsteuerung (6) so ausgestaltet ist, dass sie bei bestimmungsgemäßem Einsatz das Verfahren gemäß dem Kennzeichnungsteil wenigstens eines Anspruchs der Ansprüche 3 bis 12 ausführt.

Zusammenfassung

Dargestellt und beschrieben ist ein Verfahren zur Nachbildung eines dreiphasigen Elektromotors mit einem Lastemulator (1), wobei der Lastemulator (1) dreiphasig über seine Lastanschlüsse (2) an die Speiseanschlüsse (3) einer Motorsteuerung (4) angeschlossen ist und der Lastemulator (1) eine Emulatorleistungselektronik (5) und eine Emulatorsteuerung (6) zur Steuerung der Emulatorleistungselektronik (5) aufweist, wobei die Emulatorsteuerung (6) die von der Motorsteuerung (4) angesteuerten Speiseanschlüsse (3) und nicht angesteuerten Speiseanschlüsse (3) ermittelt, und die Emulatorleistungselektronik (5) durch die Emulatorsteuerung (6) so angesteuert wird, dass in den durch die Motorsteuerung (4) angesteuerten Speiseanschlüssen (3) von der Emulatorsteuerung (6) auf Grundlage eines Motormodells (8) berechnete Phasenströme $i_{emulate}$ fließen und auf den von der Motorsteuerung (4) nicht angesteuerten Speiseanschluss (3) eine von der Emulatorsteuerung auf Grundlage eines Motormodells (8) berechnete Phasenspannung $v_{emulate}$ aufgegeben wird.

Die Möglichkeit, auch Sonderbetriebssituationen eines dreiphasigen Elektromotors zu berücksichtigen berücksichtigt, die jenseits des motorischen oder generatorischen Normalbetriebs liegen, wird dadurch erzielt, dass der Lastemulator (1) ein Schaltmittel (15) umfasst, mit dem die Emulatorleistungselektronik (5) hochohmig von den Speiseanschlüssen (3) abgeschaltet werden kann und mit dem die Emulatorleistungselektronik (5) niederohmig an die Speiseanschlüsse (3) zugeschaltet werden kann und wobei die Speiseanschlüsse (3) über ein hochohmiges Widerstandsnetzwerk (16) miteinander verbunden sind,

dass zur Simulation von ausgewählten Betriebszuständen des Elektromotors die Emulatorleistungselektronik (5) mit dem Schaltmittel (15) hochohmig von den Speiseanschlüssen (3) abgetrennt wird oder die bereits hochohmig von den Speiseanschlüssen (3) abgetrennte Emulatorleistungselektronik (5) mit dem Schaltmittel (15) niederohmig an die Speiseanschlüsse (3) zugeschaltet wird.

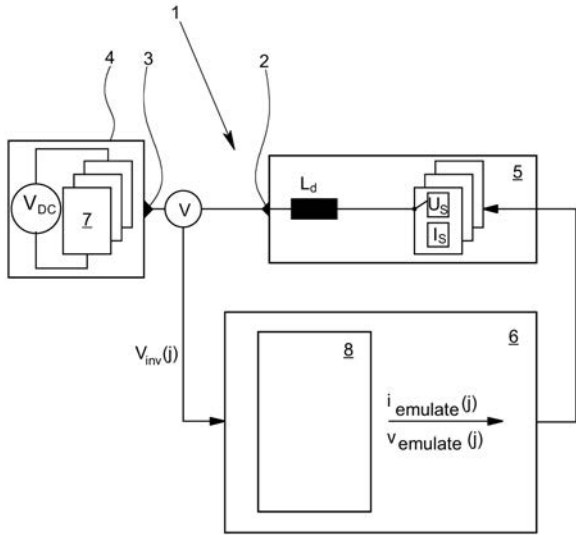


Fig. 1

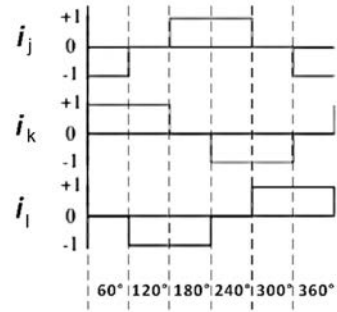


Fig. 2

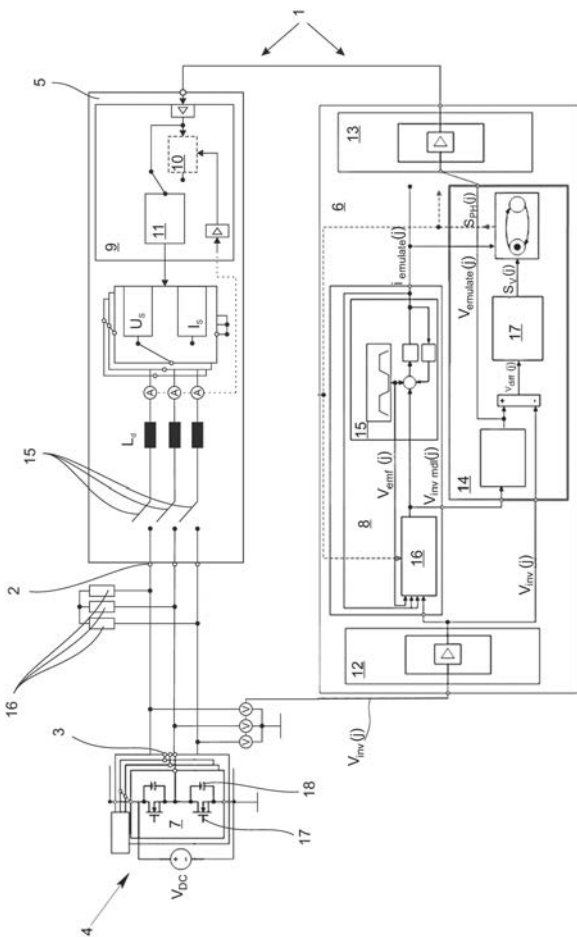


Fig. 3



Fig. 4

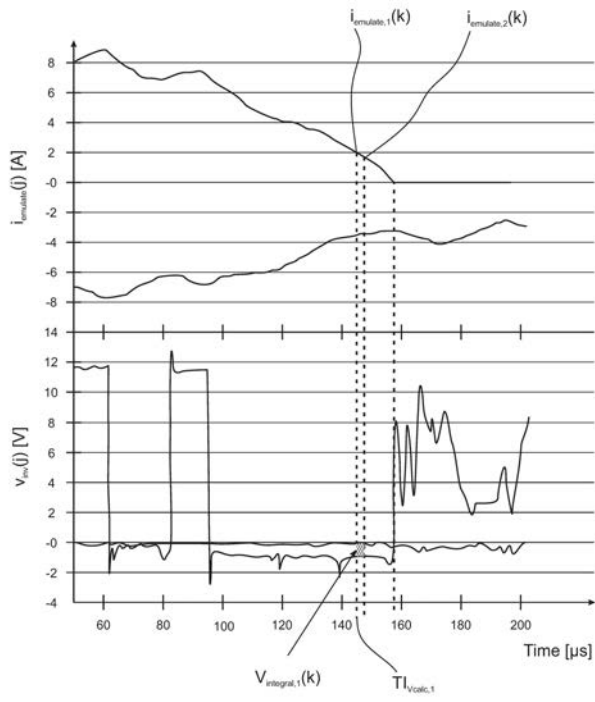


Fig. 5



Fig. 7



Fig. 6