

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5782449号
(P5782449)

(45) 発行日 平成27年9月24日 (2015. 9. 24)

(24) 登録日 平成27年7月24日 (2015. 7. 24)

(51) Int. Cl. F I
HO2P 6/16 (2006.01) HO2P 6/02 371N
HO2P 6/18 (2006.01) HO2P 6/02 371S

請求項の数 11 (全 26 頁)

(21) 出願番号	特願2012-542565 (P2012-542565)	(73) 特許権者	502150878
(86) (22) 出願日	平成22年12月10日 (2010.12.10)		イスパノ・シユイザ
(65) 公表番号	特表2013-514049 (P2013-514049A)		フランス国、エフー92707・コロンブ
(43) 公表日	平成25年4月22日 (2013.4.22)		・セデツクス、ブルパール・ルイ・スギ
(86) 国際出願番号	PCT/EP2010/069406		ユアン、18
(87) 国際公開番号	W02011/070165	(74) 代理人	110001173
(87) 国際公開日	平成23年6月16日 (2011.6.16)		特許業務法人川口国際特許事務所
審査請求日	平成25年11月21日 (2013.11.21)	(72) 発明者	ルジユン, ギレーム
(31) 優先権主張番号	0958879		フランス国、26500・ブル・レ・バ
(32) 優先日	平成21年12月11日 (2009.12.11)		ランス、アブニユ・デ・ブリユイェール、
(33) 優先権主張国	フランス (FR)	(72) 発明者	13、アパルトマン・13
			ビエイヤール, セバスチヤン
			フランス国、77720・ラ・シヤベル・
			ゴーテイエ、リュ・ドユ・トラプトー・6
			1

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 PMSMの制御装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

固定子および回転子(7)を含み、インバータ(11)によって電力供給される、永久磁石同期機、「PMSM」(3)を制御するための装置(1)であって、回転子(7)の位置の測定値 θ_m を抽出するためのセンサ(15)と、回転子の位置および設定に応じてPMSM(3)の動作点を制御するための制御手段(19)と、を含み、これはさらに、回転子に関わる推定されたパーク座標系 θ において回転子位置の推定値

【数1】

$$\hat{\theta}$$

を決定するための推定手段(23)であって、前記推定手段(23)は、前記測定された回転子位置 θ_m と前記推定された回転子位置

【数2】

$$\hat{\theta}$$

との間でPIを実行するように構成されている調整手段(61)を含む、推定手段(23)と、

前記センサ(15)の故障を検出するための故障検出器(25)と、

故障検出器(25)が前記センサのいかなる故障も示していない間に制御手段(19)が回転子の測定位置 θ_m を受信するために、制御手段(19)をセンサ(15)に接続す

るように、あるいは故障検出器(25)が前記センサの故障を示しているときに制御手段(19)が回転子の推定位置

【数3】

$$\hat{\theta}$$

を受信するために、制御手段(19)を推定手段(23)に接続するように構成されている、スイッチ27と、を含むことを特徴とする、装置。

【請求項2】

推定手段(23)が、

固定子電流の測定値から得られた電流成分 i_d 、 i_q 、インバータの基準電圧に対応する固定子電圧の成分 v_d 、 v_q 、および回転子の回転速度 ω_c を含む、前記パーク座標系において定義された規模に応じて、推定されたパーク座標系 (d, q) における起電力「emf」の成分

10

【数4】

$$\hat{e}_\delta$$

【数5】

$$\hat{e}_\gamma$$

を推定するための、起電力推定器(31)と、

20

PMSMの動作設定点と等しい漸近的に安定した平衡の単一点を含む大域収束性の領域を有する制御法則にしたがって回転速度 ω_c を決定するために、起電力推定器(31)から得られたemfの前記推定成分

【数6】

$$\hat{e}_\delta$$

【数7】

$$\hat{e}_\gamma$$

を用い、ならびに非線形補正器を用いる、速度推定器(33)と、

30

回転子位置の前記推定値

【数8】

$$\hat{\theta}$$

を計算するために、速度推定器(33)から得られた回転速度 ω_c を用いる積分器35と、を含むことを特徴とする、請求項1に記載の制御装置。

【請求項3】

前記速度推定器(33)は、以下の式

【数9】

$$\hat{\Omega} = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f},$$

40

によって、軸 d に関わるemfの推定成分

【数10】

$$\hat{e}_\gamma$$

および回転子の永久磁石の特性に応じた所定の物理的パラメータ K_f にしたがって、回転速度の以前の推定値

【数 1 1】

$$\hat{\Omega}$$

を判定するように構成された第一推定器 (4 3) を含むこと、
および非線形補正器は、以下の式

【数 1 2】

$$\Omega_c = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f} - \frac{b}{K_f} \text{sign}(\hat{\Omega}) \cdot K \cdot \hat{e}_\delta$$

によって、回転速度の前記推定値

10

【数 1 3】

$$\hat{\Omega}$$

を補正する項を導入することによって、回転速度を調整するように構成されていること
を特徴とし、

ここで b は所定の動作設定、

【数 1 4】

$$\text{sign}(\hat{\Omega})$$

は回転速度の前記推定値

20

【数 1 5】

$$\hat{\Omega}$$

の符号、

【数 1 6】

$$\hat{e}_\delta$$

は軸 に関わる e m f、そして K は、軸 に関わる e m f

【数 1 7】

$$\hat{e}_\delta$$

30

の符号に、ならびに以下の式および条件

【数 1 8】

$$K = 1 - \xi \cdot \text{sign}(\hat{e}_\delta)$$

ここで $0 < \xi < 1$ 、および

【数 1 9】

$$\frac{1}{1+\xi} < b < \frac{1}{1-\xi}$$

40

によって定義済みの係数 に依存する、非線形因子である、

請求項 2 に記載の制御装置。

【請求項 4】

調整手段 (6 1) は、前記センサの故障が検出されたときに調整手段を抑制するための
抑制手段 (7 1) を含むことを特徴とする、請求項 1 から 3 のいずれかに記載の制御装置
。

【請求項 5】

前記推定手段 (2 3) は、センサ (1 5) の故障の検出の前に、最終回転子位置推定値

【数 2 0】

$$\hat{\theta}_0$$

を用いて、推定された回転子位置

【数 2 1】

$$\hat{\theta}$$

を再初期化するための、初期化手段を含むことを特徴とする、請求項 1 から 4 のいずれかに記載の制御装置。 10

【請求項 6】

請求項 1 から 5 のいずれかに記載の制御装置 (1) を含む、永久磁石同期機 P M S M。

【請求項 7】

請求項 6 に記載の P M S M を含む、航空機のアクチュエータ。

【請求項 8】

固定子および回転子 (7) を含み、インバータ (1 1) によって電力供給される、永久磁石同期機、「 P M S M 」 (3) を制御するための方法であって、

センサ (1 5) によって、回転子の位置 θ_m を測定するステップと、

回転子位置および定義済みパラメータに応じて P M S M の動作点を確認するステップと 20

、を含む制御方法であって、

方法は、

回転子に関わる推定されたパーク座標系 - における回転子位置の推定値

【数 2 2】

$$\hat{\theta}$$

を決定するステップと、

前記測定された回転子位置 θ_m と前記推定された回転子位置

【数 2 3】

$$\hat{\theta}$$

との間で P I を実行するステップと、

前記センサの故障を検出するステップと、

センサが故障していない間に測定された回転子位置 θ_m にしたがって P M S M の動作点を確認し、あるいはセンサが故障している間に推定された回転子位置

【数 2 4】

$$\hat{\theta}$$

に応じて P M S M の動作点を確認するステップと、を含むことを特徴とする方法。

【請求項 9】

固定子電流の測定値から得られた電流の成分 i_d 、 i_q 、インバータの基準電圧に対応する固定子電圧の成分 v_d 、 v_q 、および回転子の回転速度 ω_c を含む前記パーク座標系において定義された規模に応じて、推定されたパーク座標系 - における起電力「 e m f 」の成分

【数 2 5】

$$\hat{e}_d$$

【数 2 6】

$$\hat{e}_q$$

を推定するステップと、
e m f の前記推定成分

【数 2 7】

$$\hat{e}_\delta$$

【数 2 8】

$$\hat{e}_\gamma$$

に応じて回転速度 ω_c を推定し、P M S M の動作設定点と等しい、漸近的に安定した平衡の単一点を含む大域収束性の領域を有する制御法則にしたがって、非線形補正器を使用するステップと、

10

回転速度 ω_c に応じて前記推定された回転子位置

【数 2 9】

$$\hat{\theta}$$

を計算するステップと、を含むことを特徴とする、請求項 8 に記載の制御方法。

【請求項 1 0】

以下の式

【数 3 0】

$$\hat{\Omega} = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f},$$

20

によって、軸 γ に関わる e m f の推定成分

【数 3 1】

$$\hat{e}_\gamma$$

および回転子の永久磁石の特性に応じた所定の物理的パラメータ K_f に応じて、回転速度の以前の推定値

【数 3 2】

$$\hat{\Omega}$$

30

を判定するステップと、

以下の式

【数 3 3】

$$\Omega_c = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f} - \frac{b}{K_f} \text{sign}(\hat{\Omega}) \cdot K \cdot \hat{e}_\delta$$

によって、回転速度の前記推定値

【数 3 4】

$$\hat{\Omega}$$

40

に補正項を導入することによって回転速度を調節するステップと、を含むことを特徴とし、

ここで b は所定の動作設定、

【数 3 5】

$$\text{sign}(\hat{\Omega})$$

は回転速度の前記推定値

【数 3 6】

$$\hat{\Omega}$$

の符号、

【数 3 7】

$$\hat{e}_8$$

は軸 に関わる e m f、そして K は、軸 に関わる e m f

【数 3 8】

$$\hat{e}_8$$

10

の符号に、ならびに以下の式および条件

【数 3 9】

$$K = 1 - \xi \cdot \text{sign}(\hat{e}_8)$$

ここで $0 < \xi < 1$ および

【数 4 0】

$$\frac{1}{1+\xi} < b < \frac{1}{1-\xi}$$

20

によって定義済みの係数 に依存する、非線形因子である、
請求項 9 に記載の制御方法。

【請求項 1 1】

処理手段によって実行されたときに、請求項 8 から 1 0 のいずれか 1 つによる制御方法
を実行するためのコード命令を含む、コンピュータプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、永久磁石同期機 (P M S M) の制御の分野に関する。

【背景技術】

30

【0 0 0 2】

永久磁石同期機 (P M S M) は、固定子および回転子を含む。一般的に、固定子は星形
に接続された巻線を含み、回転子は永久磁石を含む。

【0 0 0 3】

P M S M は、電流のリプル因子および機械のトルクを低下させることが可能なインバ
ータによって、常に電力供給されている。

【0 0 0 4】

P M S M は、高いトルクおよび非常に低い慣性を有する。加えて、これは比較的低いイ
ンダクタンスを有し、これが電流およびひいてはトルクの高速度応答をもたらす。

【0 0 0 5】

40

したがって、高出力および高性能アクチュエータのモータ、とりわけ航空機搭載システ
ムに P M S M を使用することは、非常に有利である。

【0 0 0 6】

図 5 は、制御装置 1 0 1、インバータ 1 1 1、および P M S M 1 0 3 を含むシステムを
図式的に示している。

【0 0 0 7】

インバータ 1 1 1 は、直流電圧を用いて P M S M 1 0 3 に電力供給する。これは、制御
装置 1 0 1 によって調整可能な振幅および周波数電圧が P M S M 1 0 3 の端子に印加され
ることを可能にする。

【0 0 0 8】

50

制御装置101は、電氣的帰還データ106、とりわけ回転子の位置の正確な指示を用いて、インバータ111の電圧をベクトルの的に制御するように構成されている。この情報は、機械のシャフト上に位置する位置または速度センサから常に生じる。

【0009】

しかしながら、センサレスPMSM制御装置もある(たとえば、「Analysis of convergence of sensorless control law s of PMSMs based on estimation of the emf」と題される、Babak Nahid-Mobarakehらによる文献、Revue Internationale de Genie Electrique [International Electrical Engineering Review], Article Vol 6 / 5 - 6 - 2003 - pp 547 - 577 - doi : 10.3166 / rige . 6 . 545 - 577を参照されたい)。

10

【0010】

センサレス制御のための装置に関する記述は本質的に上記のBabak Nahid-Mobarakehらによる文献から引用されることは、留意されたい。

【0011】

一般的に、固定子に関わる静止座標系におけるPMSMの電気式は：

【数1】

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix}$$

20

によって記述され、ここで v_a 、 v_b 、 v_c は固定子相の電圧、 R は固定子相の抵抗、 i_a 、 i_b 、 i_c は固定子相の電流、および Ψ_a 、 Ψ_b 、 Ψ_c は固定子巻線を通る磁束である。

【0012】

PMSMは、回転子に関わる回転座標系において非常に単純にモデリングされることも可能である。

【0013】

図6は、直軸Odおよび横軸Oqを含む、回転子に関わる回転座標系d-q(パーク座標系と称される)を示す。直軸Odは、固定子に関わる静止軸Oに対して角度 θ を形成する。より具体的には、角度 θ は、その励起軸Odによって識別される回転子位置を指定する。

30

【0014】

コンコルディア変換 $T_{3/2}$ およびパーク変換を上記の連立方程式に適用することにより、パーク座標系d-qにおける電気式が、以下のように表されることが可能である：

【数2】

$$v_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - p\Omega Li_q + e_d$$

40

【数3】

$$v_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - p\Omega Li_d + e_q$$

ここで、 v_d 、 v_q および i_d 、 i_q は直軸および横軸電圧および電流成分、 L は固定子インダクタンス、 Ω は回転子の回転速度(すなわち座標系d-qの角速度)、 p は回転子の永久磁石の極の対の数、および e_d 、 e_q は、以下の関係によって定義される座標系d-qにおける「emf」起電力成分である：

$$e_d = 0$$

50

$$e_q = p_f$$

ここで p_f は、直流等価回路を通る磁石の磁束である。

【0015】

回転子の位置 および角速度 が測定されないと仮定すると、座標系 d - q は位置特定されることが不可能であり、この座標系における電気の大きさの成分は未知である。

【0016】

通常、この問題を解決するために、回転している推定座標系 - が定義され、その位置

【数4】

$$\theta$$

10

および速度 ω_c は既知である。推定座標系 - の軸 O は、静止軸 O に対する角度

【数5】

$$\theta$$

および軸 O_d に対する角度 を形成する。角度 は、軸 O と O_d との間のずれを示す。

【0017】

するとセンサレスベクトル制御の問題は、

【数6】

$$\theta$$

20

と との間の位置の差 が相殺されるように、角速度 ω_c を決定することからなる。

【0018】

すると推定座標系 - における PMSM の電気式は、以下のように記述されることが可能である：

【数7】

$$v_\delta = Ri_\delta + L \frac{di_\delta}{dt} - p\Omega_c Li_\gamma + e_\delta$$

30

【数8】

$$v_\gamma = Ri_\gamma + L \frac{di_\gamma}{dt} - p\Omega_c Li_\delta + e_\gamma$$

ここで、 v_δ 、 v_γ および i_δ 、 i_γ は座標系 - における電圧および電流成分、 ω_c は座標系 - の角速度、および e_δ 、 e_γ は、以下の関係によって定義される座標系 - における emf の成分である：

$$e_\delta = p_f \sin$$

$$e_\gamma = p_f \cos$$

【0019】

一般的に、センサレス PMSM を制御するために、emf の成分 e_δ 、 e_γ は、回転している推定座標系 - において推定される。座標系 - が回転子に関わる回転座標系 d - q と一致する場合、回転している推定座標系における emf の直流成分はゼロになる。これは、回転子に関わる座標系 d - q と同期できるようにするため、回転している推定座標系 - の位置

【数9】

$$\theta$$

40

および速度 ω_c が修正され得るようにする、基準を与える。この後、回転子の位置および速度は、推定座標系 - の位置および速度から直接推測されることが可能である。

50

【0020】

センサレスベクトル制御の問題は次に、 θ がいつもゼロに維持され、電流 i_d 、 i_q の成分が基準トルク T_{ref} によって決定されるその基準値 i_{dref} 、 i_{qref} に維持されることを保証する、座標系 $\alpha - \beta$ における角速度 ω_c および固定子電圧の成分 v_d 、 v_q を決定する制御法則を決めることによって、集約されることが可能である。

【0021】

図7は、センサレス制御装置を図式的に示す。

【0022】

この制御装置は、トルク - 電流コンバータ137、ベクトル制御手段119、および座標系 $\alpha - \beta$ におけるインバータ - MSAFアセンブリ114のモデルを含む。

10

【0023】

コンバータ137は、基準トルク（または設定トルク） T_{ref} の値を座標系 $\alpha - \beta$ における対応する基準電流 i_{dref} 、 i_{qref} に変換することによって、トルクから電流への遷移を実現する。

【0024】

ベクトル制御手段119は、 θ が常時ゼロに維持されることを保証しながら ($T_{ref} = 0$)、インバータ - MSAFアセンブリ114を制御するための制御法則を決定する。この制御法則は、逆電流の測定から得られる電流の成分 i_d 、 i_q 、および基準電流の成分 i_{dref} 、 i_{qref} に応じて、角速度 ω_c 、および座標系 $\alpha - \beta$ における固定子電圧の成分 v_d 、 v_q を定義する。

20

【0025】

センサレス制御装置は、検出要素が1つ少ないので、特に堅牢である。このためセンサレス制御装置は製造しやすく、センサを備える制御装置よりも長い寿命を有することができる。

【0026】

しかしながら、位置センサは通常非常に精密であり、結果的に位置センサを用いる制御装置は、センサレス制御装置よりも高い精度で、MSAFに電力供給するインバータの電圧を調節することができる。

【先行技術文献】

【非特許文献】

30

【0027】

【非特許文献1】「Analysis of convergence of sensorless control laws of PMSMs based on estimation of the emf」と題される、Babak Nahid-Mobarakehらによる文献、Revue Internationale de Genie Electrique [International Electrical Engineering Review], Article Vol6/5-6-2003 - pp547 - 577 - doi: 10.3166/rige.6.545-577

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

40

【0028】

本発明の目的は結果的に、最適な信頼性を有するMSAFを制御するための、極めて安全な装置を提供することであり、これは航空機業界における主要な関心事である。

【課題を解決するための手段】

【0029】

本発明は、固定子および回転子を含み、インバータによって電力供給される、永久磁石同期機、「PMSM」を制御するための装置に関し、制御装置は、

- 回転子位置の測定値 θ_m を抽出するためのセンサと、
- 回転子位置および定義済みパラメータに応じてPMSMの動作点を制御するための制御手段と、

50

- 回転子に関わる推定されたパーク座標系 - における回転子位置の推定値
 【数 1 0】

$$\hat{\theta}$$

を決定するための推定手段であって、前記推定手段は、前記推定された回転子位置
 【数 1 1】

$$\hat{\theta}$$

に前記測定された回転子位置 θ_m を追跡させるための調整手段を含む、推定手段と、
 - 前記センサの故障を検出するための故障検出器と、
 - 故障検出器が前記センサのいかなる故障も示していない間に制御手段が回転子の測定位置 θ_m を受信するために、制御手段をセンサに接続するように、あるいは故障検出器が前記センサの故障を示しているときに制御手段が回転子の推定位置

10

【数 1 2】

$$\hat{\theta}$$

を受信するために、制御手段を推定手段に接続するように構成されている、スイッチと、を含む。

【0030】

これは、センサの故障時に機械が問題なく動作することを保証することによって、劣化モードにおける PMSM の利用可能性を向上させることを可能にする。この装置は、センサによって抽出された測定値を用いる PMSM の制御を好み、センサの異常が検出された場合にのみセンサレス制御を切り替え、その一方でセンサを用いる制御がセンサレス制御に切り替わるときに 2 つの位置の間の実質的な差を回避できるようにすることは、留意されたい。

20

【0031】

有利なことに、推定手段は：

- 固定子電流の測定値から得られた電流成分 i_d 、 i_q 、インバータの基準電圧に対応する固定子電圧の成分 v_d 、 v_q 、および回転子の回転速度 ω_c を含む、前記パーク座標系において定義された規模に応じて、推定されたパーク座標系 - における起電力「e m f」の成分

30

【数 1 3】

$$\hat{e}_d$$

【数 1 4】

$$\hat{e}_q$$

を推定するための、起電力推定器と、
 - PMSM の動作設定点と等しい漸近的に安定した平衡の単一点を含む大域収束性の領域を有する制御法則にしたがって回転速度 ω_c を決定するために、起電力推定器から得られた e m f の前記推定成分

40

【数 1 5】

$$\hat{e}_d$$

【数 1 6】

$$\hat{e}_q$$

を用い、ならびに非線形補正器を用いる、速度推定器と、
 - 回転子位置の前記推定値

【数 17】

$$\hat{\theta}$$

を計算するために、速度推定器から得られた回転速度 Ω_c を用いる積分器と、を含む。

【0032】

このため本発明による制御装置は、固定子に対する回転子位置がどうであれ、単一の望ましい動作点への収束を制限する大域収束性の領域を有する制御法則にしたがって、センサの故障時に、PMSMが制御されることを可能にする。

【0033】

本発明の一実施形態によれば、前記速度推定器は、以下の式

10

【数 18】

$$\hat{\Omega} = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f},$$

によって、軸 γ に関わる e m f の推定成分

【数 19】

$$\hat{e}_\gamma$$

および回転子の永久磁石の特性に応じた所定の物理的パラメータ K_f にしたがって、回転速度の以前の推定値

20

【数 20】

$$\hat{\Omega}$$

を判定するように構成された第一推定器を含み、

そして、非線形補正器は、以下の式

【数 21】

$$\Omega_c = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f} - \frac{b}{K_f} \text{sign}(\hat{\Omega}) \cdot K \cdot \hat{e}_\delta$$

によって、回転速度の前記推定値

30

【数 22】

$$\hat{\Omega}$$

を補正する項を導入することによって、回転速度を調整するように構成され、

ここで b は所定の動作設定、

【数 23】

$$\text{sign}(\hat{\Omega})$$

は回転速度の前記推定値

【数 24】

$$\hat{\Omega}$$

40

の符号、

【数 25】

$$\hat{e}_\delta$$

は軸 δ に関わる e m f、そして K は、軸 δ に関わる e m f である

【数 26】

$$\hat{e}_\delta$$

50

の符号に、ならびに以下の式および条件

【数 2 7】

$$K = 1 - \xi \cdot \text{sign}(\dot{\theta}_0)$$

ここで $0 < \xi < 1$ および

【数 2 8】

$$\frac{1}{1+\xi} < b < \frac{1}{1-\xi}$$

によって定義済みの係数 b に依存する、非線形因子である。

10

【0034】

このため、非線形補正器は、軸 θ に関わる起電力 e を常時ゼロに維持することによって、および全ての望ましくない動作点を不安定にすることによって、回転子の実際の座標系に近づくことを可能にする。これは、回転速度の反転を可能にしながら、望ましい動作点に向かう迅速な収束を引き起こす。

【0035】

前記調整手段は、測定された回転子位置 θ_m と推定された回転子位置

【数 2 9】

$$\hat{\theta}$$

20

との間で P I を実行するように構成されている。

【0036】

調整手段は、前記センサの故障が検出されたときに調整手段を抑制するための抑制手段を、有利に含むことができる。

【0037】

故障が検出された場合、測定された回転子位置 θ_m はおそらく誤っているので、調整手段によってなされる補正は有利に抑制される。

【0038】

有利なことに、前記推定手段は、センサの故障の検出の前に、最終回転子位置推定値

【数 3 0】

$$\hat{\theta}$$

30

を用いて、推定された回転子位置

【数 3 1】

$$\hat{\theta}_0$$

を再初期化するための、初期化手段を含む。

【0039】

これは、センサを用いる制御がセンサレス制御に切り替えられるときに、過渡振動を防止し、トルク値を一定に保つことを可能にする。

40

【0040】

本発明はまた、上記の特性を有する制御装置を含む永久磁石同期機 P M S M も、包含する。

【0041】

本発明はまた、上記の特性を有する P M S M を含む航空機のアクチュエータも、包含する。

【0042】

本発明はまた、固定子および回転子を含み、インバータによって電力供給される、永久磁石同期機、「P M S M」を制御するための方法にも関し、制御方法は：

- センサによって、回転子の位置 θ_m を測定するステップと、

50

- 回転子位置および定義済みパラメータに応じて P M S M の動作点を確認するステップと、

- 回転子に関わる推定されたパーク座標系 - における回転子位置の推定値

【数 3 2】

$$\hat{\theta}$$

を決定するステップと、

- 前記推定された回転子位置

【数 3 3】

$$\hat{\theta}$$

10

に前記測定された回転子位置 θ_m を追跡させるステップと、

- 前記センサの故障を検出するステップと、

- センサが故障していない間に測定された回転子位置 θ_m にしたがって P M S M の動作点を確認し、あるいはセンサが故障している間に推定された回転子位置

【数 3 4】

$$\hat{\theta}$$

に応じて P M S M の動作点を確認するステップと、を含む。

【0 0 4 3】

20

制御方法はまた：

- 固定子電流の測定値から得られた電流の成分 i_d 、 i_q 、インバータの基準電圧に対応する固定子電圧の成分 v_d 、 v_q 、および回転子の回転速度 ω_c を含む前記パーク座標系において定義された規模に応じて、推定されたパーク座標系 - における起電力「e m f」の成分

【数 3 5】

$$\hat{e}_d$$

【数 3 6】

$$\hat{e}_q$$

30

を推定するステップと、

- e m f の前記推定成分

【数 3 7】

$$\hat{e}_d$$

【数 3 8】

$$\hat{e}_q$$

に応じて回転速度 ω_c を推定し、P M S M の動作設定点と等しい、漸近的に安定した平衡の単一点を含む大域収束性の領域を有する制御法則にしたがって、非線形補正器を使用するステップと、

40

- 回転速度 ω_c に応じて前記推定された回転子位置

【数 3 9】

$$\hat{\theta}$$

を計算するステップと、を含む。

【0 0 4 4】

制御方法はまた：

- 以下の式

50

【数 4 0】

$$\hat{\Omega} = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f}$$

によって、軸 に関わる e m f の推定成分

【数 4 1】

$$\hat{e}_\gamma$$

および回転子の永久磁石の特性に応じた所定の物理的パラメータ K_f に応じて、回転速度の以前の推定値

10

【数 4 2】

$$\hat{\Omega}$$

を判定するステップと、

- 以下の式

【数 4 3】

$$\Omega_c = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f} - \frac{b}{K_f} \text{sign}(\hat{\Omega}) \cdot K \cdot \hat{e}_\delta$$

20

によって、回転速度の前記推定値

【数 4 4】

$$\hat{\Omega}$$

に補正項を導入することによって回転速度を調節するステップと、を含み、

【0 0 4 5】

ここで b は所定の動作設定、

【数 4 5】

$$\text{sign}(\hat{\Omega})$$

30

は回転速度の前記推定値

【数 4 6】

$$\hat{\Omega}$$

の符号、

【数 4 7】

$$\hat{e}_\delta$$

は軸 に関わる e m f、そして K は、軸 に関わる e m f である

【数 4 8】

40

$$\hat{e}_\delta$$

の符号に、ならびに以下の式および条件

【数 4 9】

$$K = 1 - \xi \cdot \text{sign}(\hat{e}_\delta)$$

ここで $0 < \xi < 0$ および

【数 5 0】

$$\frac{1}{1+\xi} < b < \frac{1}{1-\xi}$$

によって定義済みの係数 に依存する、非線形因子である。

【 0 0 4 6】

本発明はまた、上記制御方法の実行のための命令を含むコンピュータプログラムも包含する。

【 0 0 4 7】

本発明のその他の特徴および利点は、以下の添付図面を参照してなされる本発明の好適な実施形態を読むことで、明らかになるだろう。 10

【図面の簡単な説明】

【 0 0 4 8】

【図 1】本発明による永久磁石同期機「PMSM」を示す線図である。

【図 2】図 1 の制御装置の実施形態を示す線図である。

【図 3】図 2 に示される速度推定器の実施形態を示す線図である。

【図 4 A】図 1 に示される調整手段の特定の実施形態を示す線図である。

【図 4 B】図 2 に示される調整手段の特定の実施形態を示す線図である。

【図 5】先行技術による、PMSMを制御する装置の線図である。

【図 6】PMSMの回転子に関わるパーク座標系を示す図である。 20

【図 7】先行技術による、センサレスPMSMを制御する装置を示す線図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 4 9】

図 1 は、本発明による、永久磁石同期機または「PMSM」3 を制御するための装置 1 を図式的に示す。

【 0 0 5 0】

PMSM 機械 3 は通常、別電源を有する星形に接続された固定子巻線 5、および（そのうちの 1 対がここに示される、 $p = 1$ ） p 対の極を備える対称構成の永久磁石 9 を備える回転子 7 を含む。

【 0 0 5 1】 30

PMSM 3 は、固定子巻線 5 の端子に電圧 v_a 、 v_b 、 v_c を印加するインバータ 1 1 によって、電力供給される。三相モデルによるインバータ - PMSM アセンブリは、簡素化された形態で、ブロック 1 3 によって表される。

【 0 0 5 2】

制御装置 1 は、位置センサ 1 5、電気的測定手段 1 7、および制御手段 1 9 を含む。

【 0 0 5 3】

位置センサ 1 5 は、回転子位置 7 測定値 θ_m を正確に抽出するために PMSM 3 に実装されたリゾルバ（たとえば、ホール効果センサ、またはその他のタイプのリゾルバ）である。位置は、当然ながら、その位置の代わりに回転子の回転速度を測定することによって、間接的に判断されることも可能である。この場合、位置センサは、回転速度を測定するための手段、および位置を判定するための積分器を含むことができる。 40

【 0 0 5 4】

電気的測定手段 1 7 は、電気的帰還データを測定するように、およびより具体的には、PMSM 3 の固定子電流 i_a 、 i_b 、 i_c を測定するように、構成されている。

【 0 0 5 5】

制御手段 1 9 は、回転子位置に関する信号、電気的測定手段 1 7 によって測定された固定子電流 i_a 、 i_b 、 i_c に関する信号、および基準トルク τ_{ref} および/または基準回転 ω_{ref} に関するデータを、受信する。

【 0 0 5 6】

制御手段 1 9 は、インバータ - PMSM アセンブリ 1 3 の三相モデルとパーク座標系に 50

における二相モデルとの間の変換インターフェース 21 を含む。この変換は、回転子 7 の位置にしたがって、三相モデルの物理的規模を二相モデルに変換させること、およびその逆の変換を、可能にする。

【0057】

このため、制御手段 19 は、回転子 9 の位置、定義済みパラメータ (r_{ref} および / または r_{ref})、および電氣的帰還データに応じて、PMSM3 の動作点 (すなわち、基準トルク r_{ref} および / または基準回転 r_{ref} によって望まれるかまたは設定される動作点) を制御または検査することができる。

【0058】

本発明によれば、制御装置 1 は、推定手段 23、故障検出器 25、および遷移スイッチ 27 も含む。 10

【0059】

推定手段 23 は、推定されたパーク座標系 - における回転子 7 の推定位置
【数 5 1】

$$\hat{\theta}$$

を判定するように構成されている。図 2 を参照して以下により詳細に見られるように、この推定は、回転子に関わる座標系 d - q と同期するように、推定された回転座標系 - の位置

【数 5 2】

$$\theta$$

20

を補正することによって、なされることが可能である (図 6 も参照のこと)。

【0060】

故障検出器 25 は、センサ 15 の可能性のある故障を検出するように構成されている。具体的には、故障検出器 25 は、たとえば、故障したときにセンサ 15 自身によって生成または送達される故障信号からなってもよい。

【0061】

スイッチ 27 は、センサ 15 が故障していることを故障信号 S が示すか否かに応じて、推定手段 23 または位置センサ 15 のいずれかに、制御手段 19 を接続するように構成されている。 30

【0062】

より具体的には、故障検出器が位置センサ 15 のいかなる故障も示していない間は、スイッチ 27 は、制御手段 19 が回転子 7 の測定位置 θ_m を受信するために、制御手段 19 と位置センサ 15 との間の接続を維持する。反対に、位置センサ 15 が故障していることを故障検出器が示すときには、スイッチ 27 は、制御手段 19 が回転子 7 の推定位置

【数 5 3】

$$\hat{\theta}$$

を受信するために、制御手段 19 を推定手段 23 に接続する。 40

【0063】

このため、センサ 15 が故障するとすぐに、スイッチ 27 は、センサを用いる制御から PMSM3 のセンサレス制御への変換を可能にする。これは、劣化モードにおける PMSM3 の利用可能性を上昇させることができる。当然ながら、位置センサ 15 が修理されるとすぐに、PMSM3 は再び位置センサ 15 によって制御されることが可能である。

【0064】

図 1 および図 2 ~ 図 4 B は、本発明による制御方法の主要ステップの図でもあることは、留意されたい。

【0065】

図 2 は図 1 の制御装置の実施形態を示す。 50

50

【0066】

この図は、推定手段23が起電力推定器31、速度推定器33、および積分器35を含むことを示している。加えて、制御手段19は、変換インターフェース21に加えて、トルク-電流コンバータ37および電流調整器39を含む。

【0067】

トルク-電流コンバータ37は、基準トルクの値 i_{ref} を、推定されたパーク座標系 α - β における対応する基準電流 i_{ref} 、 i_{ref} に変換する。

【0068】

加えて、変換インターフェース21は、電氣的測定手段17によって測定された固定子電流 i_a 、 i_b 、 i_c を、パーク座標系 α - β における電流の成分 i_α 、 i_β に変換する。

10

【0069】

加えて、電流調整器39は、インバータ11の基準電圧に対応する座標系 α - β における固定子電圧の成分 v_α 、 v_β を判定するために、トルク-電流コンバータ37から基準電流 i_{ref} 、 i_{ref} を、および変換インターフェース21から座標系 α - β における電流成分 i_α 、 i_β を、受信する。変換インターフェース21は、二相モデルにしたがって固定子電圧 v_α 、 v_β のこれらの成分を受信し、三相モデルにしたがってこれらをインバータ11の基準電圧 v_a 、 v_b 、 v_c に変換する。

【0070】

センサレスベクトル制御は、

20

【数54】

$$\theta$$

θ と θ^* の間の位置の差 θ_e が相殺されるように、角速度 ω_c を推定することからなる（図6参照）。言い換えると、角速度 ω_c は、位置誤差 θ_e が常にゼロに維持されることを保証する制御法則から得られなければならない（2 モジュール）。

【0071】

しかしながら、 θ_e がゼロに近づくときに軸 α における emf の成分 e_α もゼロに近づくとする（ $e_\alpha = p \psi_f \sin \theta$ ）、位置の差 θ_e を常にゼロに維持することは、 e_α を常にゼロに維持することに置き換えられることが可能である。

30

【0072】

この推定は、推定座標系 α - β における以下の電気式を解くことからなる：

【数55】

$$\hat{e}_\delta = -Ri_\delta - L \frac{di_\delta}{dt} - p\Omega_c Li_\gamma + v_\delta$$

【数56】

$$\hat{e}_\gamma = -Ri_\gamma - L \frac{di_\gamma}{dt} - p\Omega_c Li_\delta + v_\gamma$$

40

【0073】

結果的に、起電力推定器31は、推定座標系 α - β における emf の成分

【数57】

$$\hat{e}_\delta$$

【数58】

$$\hat{e}_\gamma$$

を、これらの規模に応じて推定するために、変換インターフェース21から電流の成分 i_α 、 i_β を、電流調整器39から固定子電圧の成分 v_α 、 v_β を、そして速度推定器3

50

3 から回転子の回転速度 ω_c を、受信する。

【0074】

回転子の回転速度 ω_c は、起電力推定器 31 によって決定された e m f の推定値

【数59】

$$\hat{e}_s$$

【数60】

$$\hat{e}_y$$

にしたがって速度推定器 33 によって、および成分

【数61】

$$\hat{e}_s$$

を常にゼロに維持することによって、閉ループ内で推定される。回転子の回転速度 ω_c は当然ながら、所定の初期値 ω_{c0} によって初期化される。

【0075】

有利なことに、速度推定器 31 は、リャプノフの意味において漸近的に安定した平衡の単一点を含む大域収束性の領域を有する制御法則にしたがって回転速度 ω_c を判定するために、非線形補正器を使用する。この平衡の単一点は M S A F の動作設定点と等しい。

【0076】

図3は、速度推定器 33 の実施形態を示す。

【0077】

この例によれば、速度推定器 33 の機能図は、第一速度推定器 43、比較器 45、第一および第二符号表示器 47 および 49、加算器 51、および非線形補正器 53 を含む。

【0078】

比較器 45 の目的は、成分

【数62】

$$\hat{e}_s$$

をその基準成分 $e_{ref} = 0$ と比較することである。第一速度推定器 43 の目的は、推定成分

【数63】

$$\hat{\Omega}$$

にしたがって回転速度の以前の推定値

【数64】

$$\hat{e}_y$$

を決定することである。第一符号表示器 47 の目的は、

【数65】

$$\hat{\Omega}$$

であると仮定される場合に、回転速度の以前の推定値

【数66】

$$\text{sign}(\hat{\Omega}) = \text{sign}(\Omega_{ref})$$

を示すことであり、ここで ω_{ref} は設定回転速度である。第二符号表示器 49 の目的は、成分

10

20

30

40

【数 6 7】

$$\hat{e}_\delta$$

の符号を示すことである。非線形補正器 5 3 の目的は、制御法則の全ての望ましくない収束点を不安定にするため、またはいずれの望ましくない解への収束も防止するために、非線形項を導入することである。最後に、加算器 5 1 の目的は、回転速度 ω_c を判定するために、以前の推定値

【数 6 8】

$$\hat{\Omega}$$

10

に非線形項を加算することである。

【0 0 7 9】

第一速度推定器 4 3 は、以下の式

【数 6 9】

$$\hat{\Omega} = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f}$$

を用いて、軸 γ に関わる e m f の成分

【数 7 0】

$$\hat{e}_\gamma$$

20

と回転子の永久磁石の特性に応じた所定の物理的パラメータ K_f との商を計算する：
ここで、

$$K_f = p_f \cdot \omega_f$$

【0 0 8 0】

特定の実施形態によれば、非線形補正器 5 3 は、以下の式

【数 7 1】

$$-\frac{b}{K_f} \text{sign}(\hat{\Omega}) \cdot K \cdot \hat{e}_\delta$$

30

および

【数 7 2】

$$K = 1 - \xi \cdot \text{sign}(\hat{e}_\delta)$$

を用いて、回転速度の以前の推定値

【数 7 3】

$$\hat{\Omega}$$

の符号

【数 7 4】

$$\text{sign}(\hat{\Omega})$$

40

所定の動作パラメータ b 、物理的パラメータ K_f 、軸 γ に関わる e m f の成分

【数 7 5】

$$\hat{e}_\delta$$

の関数である、補正項、および最終的に成分

【数 7 6】

$$\hat{e}_\delta$$

50

の符号および所定の係数 に依存する非線形因子を導入する：

【 0 0 8 1 】

次に加算器 5 1 は、以下の式

【 数 7 7 】

$$\Omega_c = \frac{\hat{e}_\gamma}{K_f} - \frac{b}{K_f} \text{sign}(\hat{\Omega}) \cdot K \cdot \hat{e}_\delta$$

を用いて回転速度 Ω_c を判定するために、上記補正項を以前の推定値

【 数 7 8 】

$$\hat{\Omega}$$

10

に加算する。

【 0 0 8 2 】

上記の式を用いて回転速度 Ω_c によって表される制御法則の安定性を解析することによって(「Analysis of convergence of sensorless control laws of PMSMs based on estimation of the emf」と題される、Babak Nahid-Mobarakehらによる文献参照)、位相空間 - の全ての軌跡が、以下の条件

$0 < \xi < 1$ および

【 数 7 9 】

20

$$\frac{1}{1+\xi} < b < \frac{1}{1-\xi}$$

にとって望ましい平衡点 ($\Omega = 0$ 、 $\theta = \theta_{ref}$) に向かって収束することがわかることは、留意されたい。

【 0 0 8 3 】

動作パラメータ b は有利なことに、 0 から 3 の間 ($0 < b < 3$) であり、より好ましくは 1 に近い。

【 0 0 8 4 】

上記制御方法は、特定の平衡点を不安定にすることによって、およびこれらを防止するために位相空間におけるその他の点を十分に遠ざけることによって、位相空間の全ての軌跡が全ての望ましくない平衡点に向かって収束するのを防ぐことができる。これは特に、ゼロに近い回転速度での電気式に内在する不可観測性の問題が克服されることを、可能にする。

30

【 0 0 8 5 】

さらに、回転速度の符号

【 数 8 0 】

$$\text{sign}(\hat{\Omega})$$

に対する補正項の依存は、設定回転速度 Ω_{ref} の符号が何であれ、位相空間 - の軌道が、所望の点に向かって収束することを可能にし、まったく問題なく速度反転を可能にする。

40

【 0 0 8 6 】

このようにして、上記の条件を用いると、初期座標点 ($\Omega = \Omega_0$ 、 $\theta = \theta_0$) が何であれ、位相空間 - の全ての軌道は、望ましい平衡点に向かって収束する。

【 0 0 8 7 】

言い換えると、たとえ開始時に初期位置誤差が 程度であったとしても、軌跡は設定トルクおよび回転速度値を用いて動作点に向かって急速に収束する。

【 0 0 8 8 】

加えて、たとえ開始時に初期点が設定速度とは逆の符号の回転速度を有していても、位

50

置誤差はゼロに向かって急速に収束し、PMSMが設定トルクおよび回転速度値に等しい整定速度を迅速に達成できるようにする。

【0089】

回転速度が速度推定器33によって判断されるとき、積分器35は、推定された回転子位置

【数81】

$$\hat{\theta}$$

を決定するために、速度推定器33からの回転速度 ω_c を積分する。

【0090】

さらに、センサを用いる制御とセンサレス制御との間の均一で正確な遷移を可能にするために、推定手段23は、推定された回転子位置

【数82】

$$\hat{\theta}$$

を連続的に調整する手段を含むことができる。

【0091】

図4Aは、推定手段23に含まれることが可能な調整手段61を示す。これらの調整手段61は、推定された回転子位置

【数83】

$$\hat{\theta}$$

に測定された回転子位置 θ_m を追跡させるために、測定された該回転子位置 θ_m と推定された回転子位置との間の差に対してPIを実行するように構成されている。

【0092】

調整手段61はこのため、位置センサ15によって測定された回転子位置 θ_m を積分器35から推定された回転子位置

【数84】

$$\hat{\theta}$$

と迅速に比較するための位置比較器63と、積分が発散しないための逆反応を達成するためのPIフィルタまたは利得乗算器65と、推定された回転子位置

【数85】

$$\hat{\theta}$$

を測定された回転子位置 θ_m と同期させるための追加積分器67と、回転子位置を補正

【数86】

$$\hat{\theta}$$

するための、追加積分器67の出力と推定された回転子位置

【数87】

$$\hat{\theta}_c$$

との間の第二比較器69と、を含むことができる。

【0093】

位置センサ15の使用、推定値

【数88】

$$\hat{\theta}$$

は開ループ内にあることになるので、回転子位置の推定値

10

20

30

40

50

【数 8 9】

$$\hat{\theta}$$

が発散するのを防止するために、比較および逆反応が連続的に発生することは、留意されたい。位置センサ 15 の故障が検出されると、その時点で速度推定器 33 からの回転速度 ω_c の最終推定値は、制御が切り替わった瞬間に、積分器 35 に代入される。

【0094】

結果的に、センサを用いる制御とセンサレス制御との間で切り替えが実際に行われた場合、最後に測定された値 θ_m と推定値

【数 9 0】

$$\hat{\theta}$$

との間の差は、有利なことに非常に小さい。

【0095】

遷移が行われた後には、位置センサ 15 の値は誤っているので、逆反応の必要性はない。

【0096】

実際、図 4 A は、調整手段 61 が、故障検出器 25 が位置センサ 15 の故障を示すときに調整手段 61 を抑制するための、抑制手段 71 を含むことを示している。これらの抑制手段 71 は非常に単純に、故障信号 S と、追加積分器 67 によって送達された回転子位置の補正值との積を計算する、乗算器を含むことができる。このため、故障が検出されたとき、故障信号はゼロに等しく ($S = 0$)、したがって抑制手段 71 の出力はゼロに設定され、これは回転子位置の最後に測定された値 θ_m が抑制されるか、または無視されることを可能にする。反対に、故障信号がセンサの異常を示していない間 ($S = 1$)、調整手段は回転子位置の測定された値 θ_m を使用する。

【0097】

図 4 B は、推定手段 23 が、位置センサ 15 の故障の検出の前の最終推定値

【数 9 1】

$$\hat{\theta}_0$$

を用いて推定された回転子位置

【数 9 2】

$$\hat{\theta}$$

を再初期化するための、初期化手段 73 も含むことができることを示している。

【0098】

初期化手段 73 は、まだ正しい回転子位置の最終値 (推定値

【数 9 3】

$$\hat{\theta}$$

または補正值

【数 9 4】

$$\hat{\theta}_c$$

) を記録するためのメモリを含む。

【0099】

実際、故障が検出されると、故障信号 S はトリガ、たとえば、最後に推定された回転子位置

10

20

30

40

50

【数 9 5】

$$\hat{\theta}_0$$

によって再初期化されている積分を生じる立ち下がり信号を、起動する。

【 0 1 0 0】

このため、センサを用いる制御とセンサレス制御との間の切り替えの時点で、2つの制御形態の間の過渡状態の時点のトルクは、振動しない。

【 0 1 0 1】

制御装置の異なる要素は、1つまたは複数のコンピュータプログラムがこれら様々な要素によって実行されたときに、本発明による制御方法を実行するためのコード命令を含む1つ以上のコンピュータプログラムを有する処理または計算手段を含むことができることは、留意されたい。

10

【 0 1 0 2】

結果的に、本発明は、制御装置の異なる要素において実行されることが可能なコンピュータプログラム製品も包含し、このプログラムは、上述のような本発明による方法を実現することができるコード命令を含む。

【 0 1 0 3】

本発明によるPMSMおよびこの制御を含むシステムは、有利なことに、航空機搭載システムのアクチュエータモータにおいて使用されることが可能である。一例として、これは圧縮機、通気システム、逆推力装置、ドア、およびその他多くの航空機設備に使用されることが可能である。

20

【 図 1】

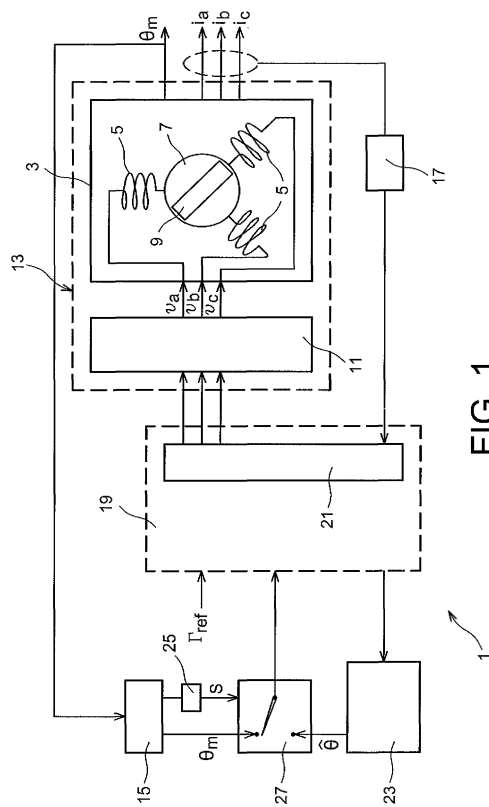


FIG. 1

【 図 2】

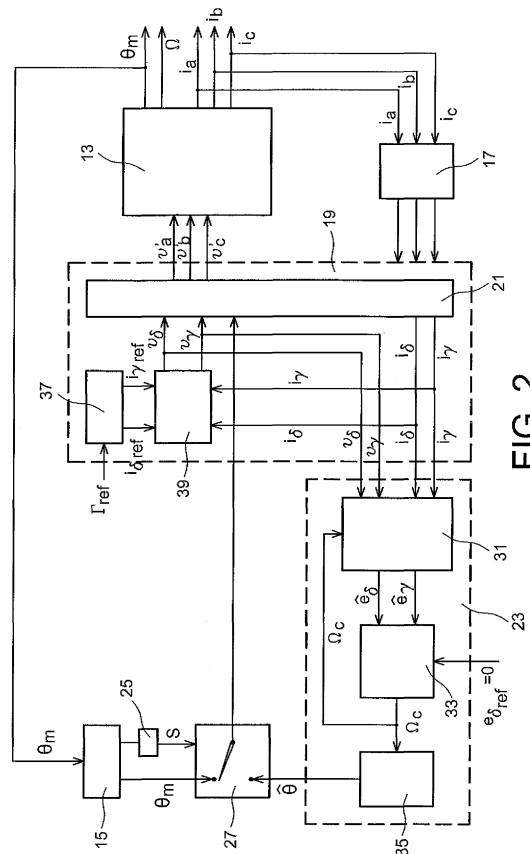


FIG. 2

【 図 3 】

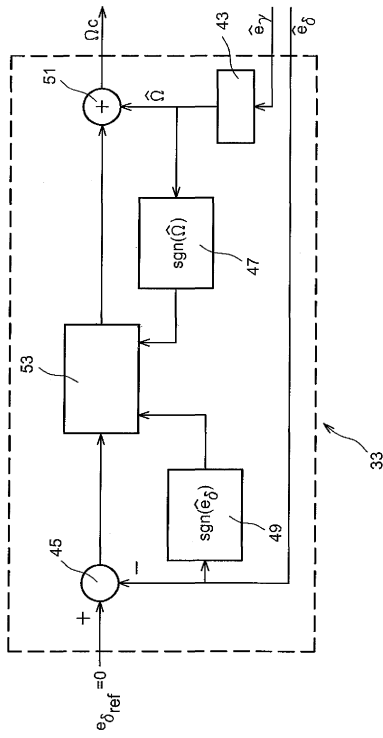


FIG. 3

【 図 4 A 】

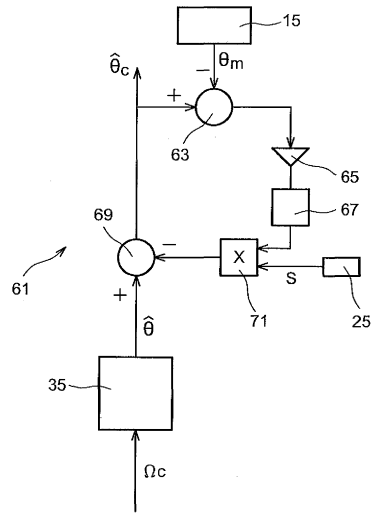


FIG. 4A

【 図 4 B 】

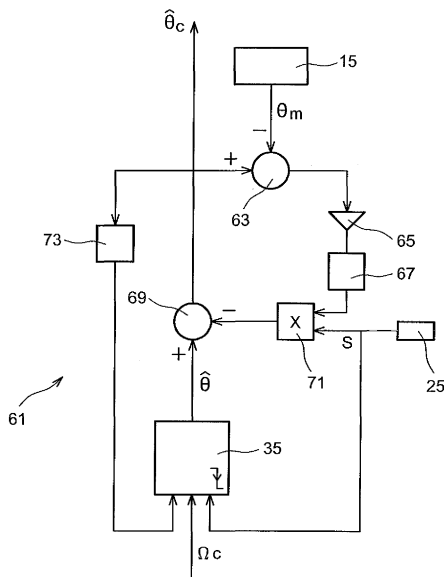


FIG. 4B

【 図 5 】

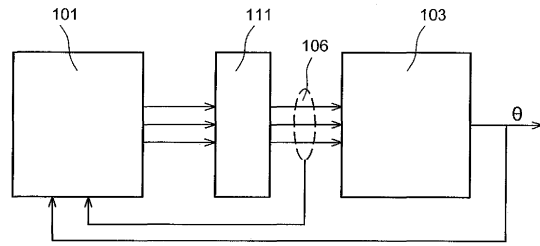


FIG. 5

【 図 6 】

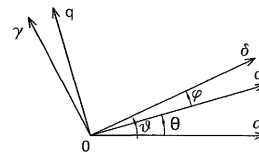


FIG. 6

【 図 7 】

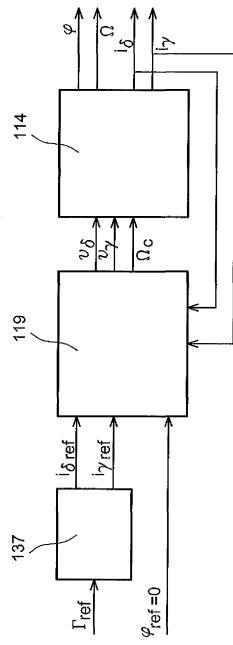


FIG. 7

フロントページの続き

審査官 宮崎 基樹

(56)参考文献 国際公開第2009/145270(WO, A1)
特開2001-112282(JP, A)
特開2004-112939(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H02P 1/00 - 31/00