

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2018年2月1日(01.02.2018)



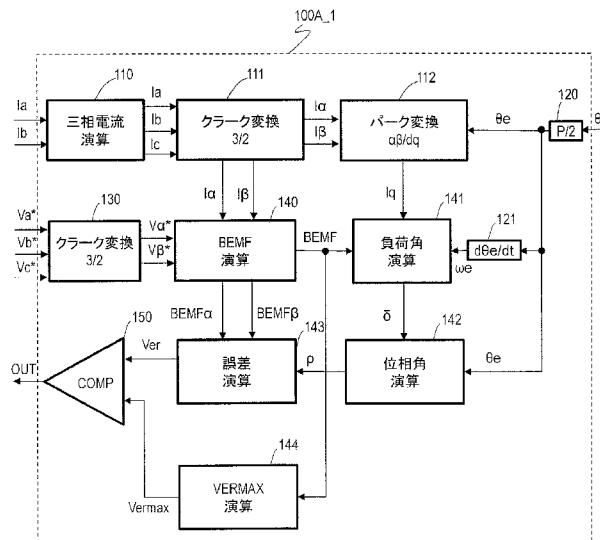
(10) 国際公開番号

WO 2018/021176 A1

- (51) 国際特許分類:
H02P 21/06 (2016.01) H02P 21/22 (2016.01)
H02P 21/18 (2016.01) H02P 27/06 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2017/026434
- (22) 国際出願日: 2017年7月21日(21.07.2017)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2016-148130 2016年7月28日(28.07.2016) JP
- (71) 出願人: 日本電産株式会社 (NIDEC CORPORATION) [JP/JP]; 〒6018205 京都府京都市南区久世殿城町 3 3 8 番地 Kyoto (JP).
- (72) 発明者: ガデリー アハマッド (GHADERI,Ahmad); 〒6018205 京都府京都市南区久世殿城町 3 3 8 番地 日本電産株式会社内 Kyoto (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) Title: SENSOR FAILURE DETECTION METHOD, MOTOR DRIVE SYSTEM, AND ELECTRIC POWER STEERING SYSTEM

(54) 発明の名称: センサ故障検出方法、モータ駆動システムおよび電動パワーステアリングシステム



- 110 Three-phase current calculation
111, 130 Clarke transformation 3/2
112 Park transformation $\alpha\beta/dq$
140 BEMF calculation
141 Load angle calculation
142 Phase angle calculation
143 Error calculation
144 VERMAX calculation

(57) Abstract: A sensor failure detection method is a method for detecting at least one failure of a plurality of sensors in a motor drive system, said method having: a step for executing a calculation (A) for determining a counter electromotive force error Ver using an $\alpha\beta$ fixed coordinate system or a dq rotary coordinate system for reference, wherein in this step, the calculation (A) is executed based on current I_α , I_β on the $\alpha\beta$ axes of the $\alpha\beta$ fixed coordinate system, on reference voltages V_α^* , V_β^* on the $\alpha\beta$ axes, and on an electrical angle θ_e of a rotor,



SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

and the counter electromotive force error V_{er} is expressed as a function of the error between an estimated phase angle ρ_s , and a measured phase angle ρ based on the sensor values measured using a plurality of the sensors; and a step for detecting failure on the basis of the counter electromotive force error V_{er} .

(57) 要約: センサ故障検出方法は、モータ駆動システムにおける複数のセンサの少なくとも1つの故障を検出する方法であって、 $\alpha\beta$ 固定座標系またはd q回転座標系を基準とした逆起電力誤差 V_{er} を決定する演算 (A) を実行するステップであって、演算 (A) は、 $\alpha\beta$ 固定座標系の $\alpha\beta$ 軸上の電流 I_α 、 I_β と、 $\alpha\beta$ 軸上のリファレンス電圧 V_α^* 、 V_β^* と、ロータの電気角 θ_e とに基づいて実行され、逆起電力誤差 V_{er} は、推定位相角 ρ_s と、複数のセンサによって測定されるセンサ値に基づく測定位相角 ρ との誤差の関数を表す、ステップと、逆起電力誤差 V_{er} に基づいて故障を検出するステップと、を有する。

明 細 書

発明の名称：

センサ故障検出方法、モータ駆動システムおよび電動パワーステアリングシステム

技術分野

[0001] 本開示は、モータ駆動システムで用いられるセンサ故障検出方法、モータ駆動システムおよび電動パワーステアリングシステムに関する。

背景技術

[0002] 近年、電気駆動システムが様々な応用分野に広く用いられる。電気駆動システムとして、例えばモータ駆動システムが挙げられる。モータ駆動システムは、例えばベクトル制御を用いて電動モータ（以下、「モータ」と表記する。）を制御する。ベクトル制御には、幾つかの電流センサおよび角度センサが用いられる方式がある。これらのセンサうち1つでも故障すると、そのモータ駆動システムは誤作動を起こし、回復することが不可能になる可能性が高まる。そのため、モータ駆動システムにおけるセンサ故障を検出する様々な手法が活発に提案されている。

[0003] 非特許文献1は、モータ駆動システムにおけるセンサ故障を拡張カルマンフィルタのアルゴリズムを用いて検出することを提案している。モータ駆動システムは、三相モータのロータ位置を検出する1つの位置センサ（角度センサ）と、三相モータを流れる電流を検出する2つの電流センサとを有する。故障検出の演算には、共分散行列などが用いられる。

先行技術文献

非特許文献

[0004] 非特許文献1: Gilbert Hock Beng Foo, Member, IEEE, Xinan Zhang, Student Member, IEEE, and D. M. Vilathgamuwa, Senior Member, IEEE, "A Sensor Fault Detection and Isolation Method in Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives Based on an Extended Kalman Filter," IEEE TRA

NSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, August 2013, Vol. 60, No. 8, p.3
485-3495.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0005] 上述した従来の技術では、センサ故障検出のためのコンピュータの演算負荷が大きいため、この演算負荷をさらに低減することが求められていた。
- [0006] 本開示の実施形態は、センサ故障検出のためのコンピュータの演算負荷を低減することが可能な、新規なセンサ故障検出方法、および当該センサ故障検出を有するモータ駆動システムを提供する。

課題を解決するための手段

- [0007] 本開示の例示的なセンサ故障検出方法は、モータ駆動システムにおける複数のセンサの少なくとも1つの故障を検出する方法であって、 $\alpha\beta$ 固定座標系または dq 回転座標系を基準とした逆起電力誤差 V_{er} を決定する演算（A）を実行するステップであって、前記演算（A）は、前記 $\alpha\beta$ 固定座標系の $\alpha\beta$ 軸上の電流 I_α 、 I_β と、前記 $\alpha\beta$ 軸上のリファレンス電圧 V_{α^*} 、 V_{β^*} と、ロータの電気角 θ_r とに基づいて実行され、前記逆起電力誤差 V_{er} は、推定位相角 ρ_s と、前記複数のセンサによって測定されるセンサ値に基づく測定位相角 ρ との誤差の関数を表す、ステップと、前記逆起電力誤差 V_{er} に基づいて前記故障を検出するステップと、を有する。
- [0008] 本開示の例示的なモータ駆動システムは、三相の巻線を有するモータと、三相電流のうちの少なくとも二相の電流を検出する少なくとも2つの電流センサと、前記モータのロータ角を検出する角度センサと、前記モータを制御し、前記少なくとも2つの電流センサおよび前記角度センサの少なくとも1つの故障を検出するコントローラと、を有し、前記コントローラは、 $\alpha\beta$ 固定座標系または dq 回転座標系を基準とした逆起電力誤差 V_{er} を、前記 $\alpha\beta$ 固定座標系の $\alpha\beta$ 軸上の電流 I_α 、 I_β と、前記 $\alpha\beta$ 軸上のリファレンス電圧 V_{α^*} 、 V_{β^*} と、前記ロータ角と、に基づいて演算し、前記逆起電力誤差 V_{er} は、推定位相角 ρ_s と、前記複数のセンサによって測定されるセンサ値に

基づく測定位相角 ρ との誤差の関数を表し、前記逆起電力誤差 V_{er} に基づいて前記故障を検出する。

発明の効果

[0009] 本開示の例示的な実施形態によると、センサ故障検出のアルゴリズムが簡素化されるので、センサ故障検出のためのコンピュータの演算負荷を低減することが可能なセンサ故障検出方法および当該センサ故障検出を有するモータ駆動システムが提供される。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]図1は、実施形態1によるセンサ故障検出を用いるモータ駆動システム1000のハードウェア構成を模式的に示すブロック図である。

[図2]図2は、実施形態1によるセンサ故障検出を用いるモータ駆動システム1000中のインバータ300のハードウェア構成を模式的に示すブロック図である。

[図3]図3は、本実施形態の変形例によるモータ駆動システム1000のハードウェア構成を模式的に示すブロック図である。

[図4]図4は、コントローラ100の機能ブロックを模式的に示す機能ブロック図である。

[図5]図5は、故障検出コアユニット100A__1のより詳細な機能ブロックを模式的に示す機能ブロック図である。

[図6]図6は、故障検出コアユニット100A__1の変形例のより詳細な機能ブロックを模式的に示す機能ブロック図である。

[図7]図7は、第1事例による、所定期間内のトルク波形を示すグラフである。

[図8]図8は、第1事例による、所定期間内の、実際のロータ角の波形および角度センサ700によって測定されたロータの機械角 θ_m の波形を示すグラフである。

[図9]図9は、第1事例による、所定期間内の電流 I_q の波形を示すグラフである。

[図10]図10は、第1事例による、所定期間内の電流 I_d の波形を示すグラフである。

[図11]図11は、第1事例による、所定期間内の電流 I_a 、 I_b および I_c の波形を示すグラフである。

[図12]図12は、第1事例による、所定期間内の逆起電力誤差 V_{er} および最大許容誤差 V_{ermax} の波形を示すグラフである。

[図13]図13は、第2事例による、所定期間内のトルク波形を示すグラフである。

[図14]図14は、第2事例による、所定期間内の、実際のロータ角の波形および角度センサ700によって測定されたロータの機械角 θ_m の波形を示すグラフである。

[図15]図15は、第2事例による、所定期間内の電流 I_q の波形を示すグラフである。

[図16]図16は、第2事例による、所定期間内の電流 I_d の波形を示すグラフである。

[図17]図17は、第2事例による、所定期間内の電流 I_a 、 I_b および I_c の波形を示すグラフである。

[図18]図18は、第2事例による、所定期間内の逆起電力誤差 V_{er} および最大許容誤差 V_{ermax} の波形を示すグラフである。

[図19]図19は、第3事例による、所定期間内のトルク波形を示すグラフである。

[図20]図20は、第3事例による、所定期間内の、実際のロータ角の波形および角度センサ700によって測定されたロータの機械角 θ_m の波形を示すグラフである。

[図21]図21は、第3事例による、所定期間内の電流 I_q の波形を示すグラフである。

[図22]図22は、第3事例による、所定期間内の電流 I_d の波形を示すグラフである。

[図23]図23は、第3事例による、所定期間内の電流 I_a 、 I_b および I_c の波形を示すグラフである。

[図24]図24は、第3事例による、所定期間内の逆起電力誤差 V_{er} および最大許容誤差 V_{ermax} の波形を示すグラフである。

[図25]図25は、第4事例による、所定期間内のトルク波形を示すグラフである。

[図26]図26は、第4事例による、所定期間内の、実際のロータ角の波形および角度センサ700によって測定されたロータの機械角 θ_m の波形を示すグラフである。

[図27]図27は、第4事例による、所定期間内の電流 I_q の波形を示すグラフである。

[図28]図28は、第4事例による、所定期間内の電流 I_d の波形を示すグラフである。

[図29]図29は、第4事例による、所定期間内の電流 I_a 、 I_b および I_c の波形を示す。

[図30]図30は、第4事例による、所定期間内の逆起電力誤差 V_{er} および最大許容誤差 V_{ermax} の波形を示すグラフである。

[図31]図31は、合成磁束 Ψ_s および推定位相角 ρ_s の関係を示す図である。

[図32]図32は、実施形態2による故障検出コアユニット100A__1のより詳細な機能ブロックを模式的に示す機能ブロック図である。

[図33]図33は、実施形態3によるEPSシステム2000の典型的な構成を模式的に示す図である。

発明を実施するための形態

[0011] 以下、添付の図面を参照しながら、本開示のセンサ故障検出方法、当該センサ故障検出を有するモータ駆動システムおよび当該モータ駆動システムを有する電動パワーステアリングシステムの実施形態を詳細に説明する。但し、以下の説明が不必要に冗長になるのを避け、当業者の理解を容易にするため、必要以上に詳細な説明は省略する場合がある。例えば、既によく知られた

事項の詳細説明や実質的に同一の構成に対する重複説明を省略する場合がある。

[0012] (実施形態1)

〔モータ駆動システム1000の構成〕

図1は、本実施形態によるセンサ故障検出を用いるモータ駆動システム1000のハードウェアブロックを模式的に示す。

[0013] モータ駆動システム1000は典型的に、モータMと、コントローラ100と、駆動回路200と、インバータ（「インバータ回路」とも称される。）300と、シャットダウン回路400と、複数の電流センサ500と、アナログデジタル変換回路（以下、「ADコンバータ」と表記する。）600と、角度センサ700と、ランプ800と、ROM（Read Only Memory）900とを有する。モータ駆動システム1000は、例えばパワーパックとしてモジュール化され、モータ、センサ、ドライバおよびコントローラを有するモータモジュールとして製造および販売され得る。なお、本明細書では、構成要素としてモータMを有するシステムを例に、モータ駆動システム1000を説明する。ただし、モータ駆動システム1000は、構成要素としてモータMを有しない、モータMを駆動するためのシステムであってもよい。

[0014] モータMは、例えば、表面磁石型同期型モータ（SPMSM）または埋込磁石型同期型モータ（IPMSM）などの永久磁石同期モータ、および三相交流モータである。モータMは、例えば三相（U相、V相およびW相）の巻線（不図示）を有する。三相の巻線は、インバータ300に電氣的に接続される。

[0015] コントローラ100は、例えばマイクロコントロールユニット（MCU）である。または、コントローラ100は、例えば、CPUコアが組み込まれたフィールドプログラマブルゲートアレイ（FPGA）によっても実現し得る。

[0016] コントローラ100は、モータ駆動システム1000全体を制御し、例えば

ベクトル制御によってモータMのトルクおよび回転速度を制御する。回転速度は、単位時間（例えば1分間）にロータが回転する回転数（rpm）で表される。ベクトル制御は、モータに流れる電流を、トルクの発生に寄与する電流成分と、磁束の発生に寄与する電流成分とに分解し、互いに直交する各電流成分を独立に制御する方法である。例えば、コントローラ100は、複数の電流センサ500によって測定された実電流値、および角度センサ700によって測定されたロータ角（すなわち、角度センサ700からの出力信号）などに従って目標電流値を設定する。コントローラ100は、その目標電流値に基づいてPWM（Pulse Width Modulation）信号を生成し、駆動回路200に出力する。

[0017] コントローラ100は、複数の電流センサ500および角度センサ700の少なくとも1つのセンサ故障を検出する。なお、センサ故障の検出方法については後で詳細に説明する。コントローラ100は、センサ故障を検出すると、例えば、シャットダウン信号および報知信号の少なくとも1つを生成することができる。コントローラ100は、シャットダウン信号をシャットダウン回路400に出力し、報知信号をランプ800に出力する。例えば、センサ故障が発生していないときは、シャットダウン信号および報知信号はネゲートされた状態である。コントローラ100はセンサ故障を検出したとき、それぞれの信号をアサートする。

[0018] 駆動回路200は、例えばゲートドライバである。駆動回路200は、インバータ300におけるスイッチング素子のスイッチング動作を制御する制御信号を、コントローラ100から出力されるPWM信号に従って生成する。なお、後述するように、駆動回路200は、コントローラ100に実装されていてもよい。

[0019] インバータ300は、例えば直流電源（不図示）から供給される直流電力を交流電力に変換し、変換された交流電力でモータMを駆動する。例えば、インバータ300は、駆動回路200から出力される制御信号に基づいて、直流電力を、U相、V相およびW相の擬似正弦波である三相交流電力に変換す

る。この変換された三相交流電力でモータMは駆動される。

[0020] シャットダウン回路400は、例えば、電界効果トランジスタ（FET、典型的にはMOSFET）若しくは絶縁ゲートバイポーラトランジスタ（IGBT）などの半導体スイッチ素子、またはメカニカルリレーを有する。シャットダウン回路400は、インバータ300とモータMとの間に電氣的に接続される。シャットダウン回路400は、コントローラ100から出力されるシャットダウン信号に応じて、インバータ300とモータMとの電氣的な接続を遮断する。詳細に説明すると、シャットダウン信号がアサートされると、シャットダウン回路400の半導体スイッチ素子がオフして、インバータ300とモータMとの電氣的な接続が遮断される。その結果、シャットダウン回路400は、インバータ300からモータMへの電力供給を停止することができる。

[0021] 複数の電流センサ500は、モータMのU相、V相およびW相の巻線に流れる少なくとも2つの電流を検出する少なくとも2つの電流センサを有する。本実施形態では、複数の電流センサ500は、U相およびV相に流れる電流を検出する2つの電流センサ500A、500B（図2を参照）を有する。当然に、複数の電流センサ500は、U相、V相およびW相の巻線に流れる3つの電流を検出する3つの電流センサを有していてもよいし、例えばV相およびW相に流れる電流またはW相およびU相に流れる電流を検出する2つの電流センサを有していてもよい。電流センサは、例えば、シャント抵抗、およびシャント抵抗に流れる電流を検出する電流検出回路（不図示）を有する。シャント抵抗の抵抗値は、例えば0.1Ω程度である。

[0022] ADコンバータ600は、複数の電流センサ500から出力されるアナログ信号をサンプリングしてデジタル信号に変換し、この変換したデジタル信号をコントローラ100に出力する。なお、コントローラ100がAD変換を行ってもよい。その場合、複数の電流センサ500は、アナログ信号をコントローラ100に直接出力する。

[0023] 角度センサ（「位置センサ」とも称される。）700は、モータMに配置さ

れ、モータMのロータ角、つまり、ロータの機械角を検出する。角度センサ700は、例えば磁気抵抗(MR)素子を有する磁気センサ、レゾルバ、ロータリエンコーダまたはホールIC(ホール素子を含む)などである。角度センサ700は、ロータの機械角をコントローラ100に出力する。これにより、コントローラ100は、ロータの機械角を獲得する。

[0024] モータ駆動システム1000は、角度センサ700の代わりに、例えば、速度センサまたは加速度センサを有し得る。コントローラ100は、角度センサに代えて速度センサが用いられる場合、回転速度信号または角速度信号に積分処理等を行うことでロータの位置、つまり、回転角を算出することができる。角速度は、1秒間にロータが回転する角度(rad/s)で表される。コントローラ100は、角度センサに代えて加速度センサが用いられる場合、角加速度信号に積分処理等を行うことにより回転角を算出することができる。本明細書において、角度センサには、ロータ角を獲得するためのあらゆるセンサが含まれる。例えば、上述した磁気センサ、速度センサまたは加速度センサが含まれる。また、「獲得」には、例えば、ロータの機械角を外部から受け取ること、および、コントローラ100自身がロータの機械角を演算して獲得することが含まれる。

[0025] ランプ800は、例えばLED(Light Emitting Diode)を有する。例えば、ランプ800は、コントローラ100が報知信号をアサートすると、そのアサートに応答して赤色に点灯する。例えば、車載用のモータ駆動システム1000を考える。その場合、ランプ800は、スピードメータおよびタコメータなどの計器と共にダッシュボードのインストルメントパネルに配置され得る。

[0026] ROM900は、例えば書き込み可能なメモリ(例えばPROM)、書き換え可能なメモリ(例えばフラッシュメモリ)または読み出し専用のメモリである。ROM900は、コントローラ100にモータMを制御させるための命令群を有する制御プログラムを格納する。例えば、制御プログラムはブート時にRAM(不図示)に一旦展開される。なお、ROM900は、コント

ローラ 100 に外付けされる必要はなく、コントローラ 100 に搭載されていてもよい。ROM 900 を搭載したコントローラ 100 は、例えば上述したMCUであり得る。

[0027] 図2を参照して、インバータ300のハードウェア構成をより詳細に説明する。

[0028] 図2は、本実施形態によるセンサ故障検出を用いるモータ駆動システム1000中のインバータ300のハードウェア構成を模式的に示す。

[0029] インバータ300は、3個の下アームのスイッチング素子および3個の上アームのスイッチング素子を有する。図示されるスイッチング素子SW_L1、SW_L2およびSW_L3が下アームのスイッチング素子であり、スイッチング素子SW_H1、SW_H2およびSW_H3が、上アームのスイッチング素子である。スイッチング素子として、例えばFETおよびIGBTを用いることができる。スイッチング素子は、モータMに向けて流れる再生電流を流す還流ダイオードを有する。

[0030] 図2には、U相およびV相に流れる電流を検出する2つの電流センサ500A、500Bのシャント抵抗R_sを示す。図示されるように、例えばシャント抵抗R_sは、下アームのスイッチング素子とグラウンドとの間に電氣的に接続され得る。または、例えばシャント抵抗R_sは、上アームのスイッチング素子と電源との間に電氣的に接続され得る。

[0031] コントローラ100は、例えばベクトル制御を用いた三相通電制御を行うことによってモータMを駆動することができる。例えば、コントローラ100は、三相通電制御を行うためのPWM信号を生成し、そのPWM信号を駆動回路200に出力する。駆動回路200は、インバータ300中の各FETのスイッチング動作を制御するゲート制御信号をPWM信号に基づいて生成し、各FETのゲートに与える。

[0032] 図3は、本実施形態の変形例によるモータ駆動システム1000のハードウェアブロックを模式的に示す。

[0033] 図示されるように、モータ駆動システム1000は、駆動回路200を有し

ていなくてもよい。その場合、コントローラ１００は、インバータ３００の各ＦＥＴのスイッチング動作を直接制御するポートを有する。具体的に説明すると、コントローラ１００は、ゲート制御信号をPWM信号に基づいて生成する。コントローラ１００は、そのポートを介してゲート制御信号を出力し、このゲート制御信号を各ＦＥＴのゲートに与えることができる。

[0034] 〔センサ故障検出〕

先ず、センサ故障検出のアルゴリズムを説明する前に、本開示のセンサ故障を説明する。センサ故障には、角度センサ７００の故障と、電流センサ５００の故障とがある。例えば、自動車の電動パワーステアリング（ＥＰＳ）用のモータ駆動システム１０００において、角度センサ７００として磁気センサが広く用いられる。本実施形態において、センサマグネットが、例えば射出成形などによってモータのシャフトに設けられる。また、磁気センサは、例えば、モータの回路基板（不図示）に設けられる。シャフトの回転に伴ってセンサマグネットも回転する。そのため、磁気センサは、その磁極の位置変化による磁束の変化を検出することができる。

[0035] 通常、センサマグネットはシャフトに強固に固定された状態である。ただし、自動車等の車両に外部から何らかの強い衝撃（例えば、車両が縁石に乗り上げたときに生じ得る衝撃）が加わると、その衝撃がシャフトに伝わり、センサマグネットが破損または変形してしまうことが起こり得る。または、センサマグネットの取り付け位置がずれてしまう可能性がある。破損、変形または位置ずれにより、磁気センサは、ロータの位置を正確に検出することは困難となる。本明細書において、角度センサの故障には、角度センサ自体の故障だけでなく、例えばセンサマグネットの破損も含まれる。電流センサの故障は、例えばシャント抵抗の破損である。

[0036] モータ駆動システム１０００にセンサ故障が生じた状態でＥＰＳの駆動を継続させることは可能であれば避けることが好ましい。例えば、センサ故障が生じたときに、ＥＰＳの駆動、すなわち、モータ駆動システム１０００の駆動を停止することで、ＥＰＳの安全性が向上する。このように、特に安全性

が求められるモータ駆動システム 1000 では、センサ故障を検知することが重要である。

[0037] 図 4 から図 6 を参照して、本実施形態によるセンサ故障検出のアルゴリズムを詳しく説明する。

[0038] 本実施形態によるセンサ故障検出のアルゴリズムは、例えば特定用途向け集積回路 (ASIC) または FPGA などのハードウェアのみで実現することもできるし、ハードおよびソフトウェアの組み合わせによっても実現することができる。

[0039] 図 4 は、コントローラ 100 の機能ブロックを模式的に示す。本明細書において、機能ブロック図における各ブロックは、ハードウェア単位ではなく機能ブロック単位で示される。ソフトウェアは、例えば、各機能ブロックに対応した特定の処理を実行させるためのコンピュータプログラムを構成するモジュールであり得る。

[0040] コントローラ 100 は、例えば、故障検出ユニット 100A およびベクトル制御ユニット 100B を有する。なお、本明細書において、説明の便宜上、各機能ブロックを「ユニット」と表記することとする。当然に、この表記は、各機能ブロックを、ハードウェアまたはソフトウェアに限定解釈する意図で用いられない。

[0041] 故障検出ユニット 100A は、故障検出コアユニット 100A__1 と信号生成ユニット 100A__2 とを有する。故障検出コアユニット 100A__1 は、センサ故障検出のコアである。故障検出コアユニット 100A__1 は、 $\alpha\beta$ 固定座標系または dq 回転座標系を基準とした逆起電力誤差 V_{er} を決定する演算を行う。その演算は、 $\alpha\beta$ 固定座標系の $\alpha\beta$ 軸上の電流 i_α 、 i_β と、 $\alpha\beta$ 軸上のリファレンス電圧 V_{α^*} 、 V_{β^*} と、ロータの電気角 θ_e とに基づいて実行される。故障検出コアユニット 100A__1 は、逆起電力誤差 V_{er} に基づいて故障を検出する。信号生成ユニット 100A__2 は、エラー信号に基づいてシャットダウン信号および報知信号の少なくとも 1 つを生成する。

[0042] ベクトル制御ユニット100Bは、一般的なベクトル制御に必要な演算を行う。なお、ベクトル制御は周知の技術であるので、その制御についての詳細な説明は省略する。

[0043] 図5は、故障検出コアユニット100A__1のより詳細な機能ブロックを模式的に示す。

[0044] 故障検出コアユニット100A__1は、三相電流演算ユニット110、クラーク変換ユニット111、パーク変換ユニット112、角度変換ユニット120、電気角微分ユニット121、クラーク変換ユニット130、逆起電力演算ユニット140、負荷角演算ユニット141、位相角演算ユニット142、誤差演算ユニット143、最大許容誤差演算ユニット144、およびレベル比較器150を有する。

[0045] 各機能ブロックがソフトウェアとしてコントローラ100に実装される場合、そのソフトウェアの実行主体は、例えばコントローラ100のコアであり得る。上述したように、コントローラ100は、FPGAによって実現され得る。その場合、全てまたは一部の機能ブロックは、ハードウェアで実現され得る。また、複数のFPGAを用いて処理を分散させることにより、特定のコンピュータの演算負荷を分散させることができる。その場合、図5に示される機能ブロックの全てまたは一部は、その複数のFPGAに分散して実装され得る。複数のFPGAは、例えば車載のコントロールエリアネットワーク(CAN)によって互いに接続され、データの送受信を行うことができる。

[0046] 本明細書において、モータMのU相の巻線に流れる電流を I_a 、モータMのV相の巻線に流れる電流を I_b 、および、モータMのW相の巻線に流れる電流を I_c とする。電流 I_a 、 I_b は、U相、V相用の2つの電流センサ500A、500Bによって検出される。電流 I_c は、電流センサによっては検出されず、演算により取得される。例えば、三相通電制御において、各相を流れる電流の総和はゼロになる。換言すると、電流 I_a 、 I_b および I_c の総和はゼロになる関係が満たされる。

- [0047] 三相電流演算ユニット 110 は、電流 I_a 、 I_b および I_c のうちの 2 つの電流を受け取って残りの 1 つの電流を演算により求める。本実施形態では、三相電流演算ユニット 110 は、電流センサ 500A で測定された電流 I_a および電流センサ 500B で測定された電流 I_b を取得する。三相電流演算ユニット 110 は、電流 I_a 、 I_b および I_c の総和はゼロになる上記関係を用いて、電流 I_a 、 I_b に基づいて電流 I_c を演算する。これにより、電流 I_a 、 I_b および I_c が獲得される。本明細書では、センサによって実際に検出された値（例えば電流 I_a 、 I_b ）に基づき演算により取得される値（例えば電流 I_c ）も「測定された値」と呼ぶ。三相電流演算ユニット 110 は、測定された、電流 I_a 、 I_b および I_c をクラーク変換ユニット 111 に出力する。
- [0048] 3 つの電流センサを用いて故障検出コアユニット 100A__1 に電流 I_a 、 I_b および I_c を入力する場合、三相電流演算ユニット 110 はなくても構わない。この構成によっても、電流 I_a 、 I_b および I_c は獲得される。
- [0049] クラーク変換ユニット 111 は、ベクトル制御などに用いられるいわゆるクラーク変換を用いて、三相電流演算ユニット 110 から出力された電流 I_a 、 I_b および I_c を、 $\alpha\beta$ 固定座標系における、 α 軸上の電流 I_α および β 軸上の電流 I_β に変換する。ここで、 $\alpha\beta$ 固定座標系は静止座標系であり、三相のうちの一相の方向（例えば U 相方向）が α 軸であり、 α 軸と直交する方向が β 軸である。クラーク変換ユニット 111 は、電流 I_α 、 I_β を、パーク変換ユニット 112 および逆起電力演算ユニット 140 に出力する。
- [0050] パーク変換ユニット 112 は、ベクトル制御などに用いられるいわゆるパーク変換を用いて、クラーク変換ユニット 111 から出力された電流 I_α 、 I_β を、 dq 回転座標系における、 d 軸上の電流 I_d および q 軸上の電流 I_q に変換する。このパーク変換は、ロータの電気角 θ_e に基づいて行われる。ここで、 dq 回転座標系は、ロータと共に回転する回転座標系である。パーク変換ユニット 112 は、少なくとも電流 I_q を負荷角演算ユニット 141 に出力する。
- [0051] 角度変換ユニット 120 は、下記の式 1 に基づいて、角度センサ 700 で測

定されたロータの機械角 θ_m を電気角 θ_e に変換する。角度変換ユニット 120 は、電気角 θ_e を、パーク変換ユニット 112、電気角微分ユニット 121 および位相角演算ユニット 142 に出力する。

[0052] $\theta_e = (P / 2) \cdot \theta_m$ 式 (1)

ここで、P は極数である。

[0053] 電気角微分ユニット 121 は、電気角 θ_e を時間微分して電気速度 ω_e を取得する。電気速度 ω_e は、電気角 θ_e の角周波数である。電気角微分ユニット 121 は、電気速度 ω_e を負荷角演算ユニット 141 に出力する。

[0054] クラーク変換ユニット 130 は、クラーク変換ユニット 111 と同様にクラーク変換を用いて、リファレンス電圧 V_a^* 、 V_b^* および V_c^* を、 $\alpha\beta$ 固定座標系における、 α 軸上のリファレンス電圧 V_{α}^* および β 軸上のリファレンス電圧 V_{β}^* に変換する。リファレンス電圧 V_a^* 、 V_b^* および V_c^* は、インバータ 300 の各スイッチング素子を制御するための、上述した PWM 信号を表す。クラーク変換ユニット 130 は、リファレンス電圧 V_{α}^* 、 V_{β}^* を逆起電力演算ユニット 140 に出力する。

[0055] 逆起電力演算ユニット 140 は、ベクトルで表される逆起電力の、 α 軸上の成分 BEMF α および β 軸上の成分 BEMF β を演算する。具体的に説明すると、逆起電力演算ユニット 140 は、下記の式 (2) に基づいて、電流 I_{α} およびリファレンス電圧 V_{α}^* の関数として逆起電力 BEMF α を演算する。また、逆起電力演算ユニット 140 は、下記の式 (2) に基づいて、電流 I_{β} およびリファレンス電圧 V_{β}^* の関数として逆起電力 BEMF β を演算する。

[0056] $BEMF_{\alpha} = V_{\alpha}^* - R \cdot I_{\alpha}$ 、 $BEMF_{\beta} = V_{\beta}^* - R \cdot I_{\beta}$ 式 (2)

ここで、R は電機子抵抗である。電機子抵抗 R は、例えばコントローラ 100 のコアによって逆起電力演算ユニット 140 に設定される。

[0057] 逆起電力演算ユニット 140 は、逆起電力絶対値 BEMF を下記の式 (3) に基づいて演算する。逆起電力絶対値 BEMF は、 $\alpha\beta$ 固定座標系または d q 回転座標系を基準とした逆起電力ベクトルの大きさを示す。

[0058] $BEMF = (BEMF \alpha^2 + BEMF \beta^2)^{1/2}$ 式 (3)

[0059] 逆起電力演算ユニット 140 は、 α 軸上の成分 $BEMF \alpha$ 、 β 軸上の成分 $BEMF \beta$ を誤差演算ユニット 143 に出力する。逆起電力演算ユニット 140 は、絶対値 $BEMF$ を、負荷角演算ユニット 141 と最大許容誤差演算ユニット 144 とに出力する。

[0060] 負荷角演算ユニット 141 は、負荷角 δ を下記の式 (4) に基づいて演算する。負荷角演算ユニット 141 は、負荷角 δ を位相角演算ユニット 142 に出力する。負荷角 δ は、例えば dq 回転座標系において、逆起電力ベクトルと q 軸との間の角度であって、反時計方向を正の方向とする角度である。

[0061] $\delta = \sin^{-1}(L_q \cdot I_q \cdot \omega_e / BEMF)$ 式 (4)

ここで、 L_q は、 dq 回転座標系における q 軸上の電機子インダクタンスである。

[0062] 位相角演算ユニット 142 は、測定位相角 ρ を下記の式 (5) に基づいて演算する。位相角演算ユニット 142 は、測定位相角 ρ を誤差演算ユニット 143 に出力する。測定位相角 ρ は、合成磁束 Ψ_s と α 軸との間の角度であって、反時計方向を正の方向とする角度である。合成磁束 Ψ_s は、例えばロータの永久磁石に起因する磁束（ベクトル）と、ステータの巻線が作る磁束（ベクトル）とを合成することによって得られるベクトルの大きさを指す。

[0063] $\rho = \theta_e + \delta$ 式 (5)

[0064] 誤差演算ユニット 143 は、逆起電力誤差 V_{er} を下記の式 (6) に基づいて演算する。

[0065] $V_{er} = BEMF \beta \cdot \cos \rho - BEMF \alpha \cdot \sin \rho$ 式 (6)

逆起電力誤差 V_{er} は、 $\alpha\beta$ 固定座標系を基準として演算されるスカラーである。ただし、逆起電力誤差 V_{er} は、 dq 回転座標系を基準としても演算され得る。その場合、 dq 回転座標系を基準として演算したスカラーを、 $\alpha\beta$ 固定座標系を基準とした値に変換すればよい。正常時において、逆起電力誤差 V_{er} の理想的な値はゼロである。本明細書において、モータ駆動システム 1000 のいずれのセンサにも故障が生じていないときを「正常時」と

表記する。

[0066] 最大許容誤差演算ユニット 144 は、最大許容誤差 V_{ermax} を下記の式 (7) に基づいて演算する。

[0067] $V_{ermax} = K \cdot BEMF$ 式 (7)

ここで、 K は、所定の定数である。定数 K は、例えばコントローラ 100 のコアによって設定される。

[0068] レベル比較器 150 は、逆起電力誤差 V_{er} と最大許容誤差 V_{ermax} との間のレベル差を検出する。換言すると、レベル比較器 150 は、逆起電力誤差 V_{er} と最大許容誤差 V_{ermax} との間のレベル比較を行う。レベル比較器 150 は、逆起電力誤差 V_{er} が最大許容誤差 V_{ermax} と等しいかまたは最大許容誤差 V_{ermax} よりも大きいとき、センサ故障を示すエラー信号を出力する。エラー信号は、例えばデジタル信号である。例えば、センサ故障を示すエラー信号レベルを「1」に、センサ故障を示さないエラー信号レベルを「0」に割り当てることができる。この割り当ての例では、エラー信号は、正常時には「0」であり、センサ故障が発生すると「1」にアサートされる。

[0069] 正常時には、逆起電力誤差 V_{er} は理想的にゼロとなる。ただし、実際には、逆起電力誤差 V_{er} は、ゼロよりも大きな値になり得る。本実施形態ではこれを考慮し、定数 K を適当な値（例えば 0.05）に調整することによって、正常時の逆起電力誤差 V_{er} を最大許容誤差 V_{ermax} よりも小さくすることができる。この調整によって、エラー信号はアサートされない。換言すると、センサ故障が発生したことを示すエラー信号は、故障検出コアユニット 100A__1 から外部に出力されない。

[0070] 複数の電流センサ 500 および角度センサ 700 の少なくとも 1 つに故障が生じると、逆起電力誤差 V_{er} は、最大許容誤差 V_{ermax} 以上になる。その結果、エラー信号がアサートされる。換言すると、センサ故障が発生したことを示すエラー信号が、故障検出コアユニット 100A__1 から外部に出力される。

[0071] 本実施形態によると、上述した磁気センサなどの故障検出に、拡張カルマンフィルタの演算と比較すると、演算式（１）から（７）に示されるはるかに簡単な演算が用いられるため、センサ故障検出のためのコンピュータの演算負荷を低減することが可能となる。換言すると、センサ故障検出のアルゴリズムが簡素化され、その結果、メモリコスト（システムコスト）および電力コストなどを抑えることができる。

[0072] 再び図４を参照する。

[0073] 故障検出コアユニット１００Ａ__１は、エラー信号を信号生成ユニット１００Ａ__２に出力する。信号生成ユニット１００Ａ__２は、故障検出コアユニット１００Ａ__１のレベル比較器１５０から出力されるエラー信号が１にアサートされると、そのアサートに応答してシャットダウン信号および報知信号の少なくとも１つを生成する。シャットダウン信号は、モータ駆動システム１０００を停止するための信号であり、シャットダウン回路４００に出力される。報知信号は、例えばランプ８００に出力される信号であり、ランプ８００の明滅等によりセンサ故障が発生したことを運転者に警告（注意喚起）することができる。

[0074] 例えば、上述したＥＰＳ用のモータ駆動システム１０００を考える。その場合、シャットダウン信号によってモータ駆動システム１０００を停止することで、故障したセンサ（電流センサ５００Ａ、５００Ｂおよび角度センサ７００の少なくとも１つ）からの出力値を用いたモータ駆動システム１０００の誤動作を未然に防止することができる。さらに、報知信号によって警告ランプが点灯および明滅するため、運転者に故障の発生を即座に警告できる。運転者はその警告に従って慎重にステアリング操作を行いながら、例えば路肩に自動車を安全に停止させることができる。このように、シャットダウン信号および報知信号によると、運転者の安全を確保することができる。

[0075] 図６は、故障検出コアユニット１００Ａ__１の変形例のより詳細な機能ブロックを模式的に示す。図６には、ベクトル制御ユニット１００Ｂ内の機能ブロックの一部も示される。本開示におけるベクトル制御においては、電流 I_a 。

、 I_b および I_c のうちの2つの電流から残りの1つの電流が演算される。また、電流 I_a 、 I_b および I_c は、電流 I_α 、 I_β にクラーク変換によって変換され、電流 I_α 、 I_β は、電流 I_d 、 I_q にパーク変換によって変換される。そのため、ベクトル制御ユニット100Bは、三相電流演算ユニット110、クラーク変換ユニット111およびパーク変換ユニット112、またはこれらに相当するユニットを有する。

[0076] 図示されるように、逆起電力演算ユニット140は、ベクトル制御ユニット100Bのクラーク変換ユニット111から出力される電流 I_α 、 I_β を獲得できる。また、負荷角演算ユニット141は、ベクトル制御ユニット100Bのパーク変換ユニット112から出力される電流 I_q を獲得できる。このように、故障検出コアユニット100A__1は、ベクトル制御ユニット100Bで生成されるデータ（信号）の一部を用いて、センサ故障を示すエラー信号を生成することができる。

[0077] 以下に、本実施形態によるセンサ故障検出に用いられるアルゴリズムの妥当性を、MathWorks社のMatlab/Simulinkを用いて検証した結果を示す。この検証には、表面磁石型（SPM）モータのモデルが用いられた。表1には、検証時の各種システムパラメータの値が示される。また、この検証モデルでは、SPMモータはベクトル制御により制御される。表2には、そのベクトル制御に用いられる変数が示される。

[0078]

[表1]

慣性モーメント	$6.9 \times 10^{-5} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
摩擦係数	$5.1 \times 10^{-3} [\text{Nm} / (\text{rad} / \text{s})]$
抵抗 (モータ+ECU)	$8.50 \text{ m}\Omega + 5.43 \text{ m}\Omega$
$L_d (\text{nominal})$	$40.7 \mu\text{H}$
$L_q (\text{nominal})$	$38.8 \mu\text{H}$
電圧範囲	10~16 V
温度範囲	-40℃~90℃
モータタイプ	DCブラシレスモータ
極数	8
スロット数	12
最大電流	77 A
定格電圧	13.5 V
定格温度	80度
最大トルク	$5.96 \text{ N} \cdot \text{m}$
巻線の直径	$\phi 1.45 \text{ mm}$
ターン数	11.5

[0079] [表2]

リファレンス I_q	10.32 A / 20.65 A
リファレンス I_d	0 A
スピード	750 rpm

[0080] [正常時のシミュレーション結果]

図7から図12を参照して、正常時のシミュレーション結果を説明する。

以下、センサ故障が発生していない事例を「第1事例」と表記する。

[0081] 図7は、第1事例による、所定期間（0秒から0.5秒）内のトルク波形を示す。図7の縦軸はトルク（N・m）を示し、横軸は時間（s）を示す。以下、図8から図30に示されるシミュレーション波形において、横軸は時間（s）を示し、所定期間は全て、0秒から0.5秒の期間である。

[0082] 図8は、第1事例による、所定期間内の、実際のロータ角の波形および角度センサ700によって測定されたロータの機械角 θ_m の波形を示す。図8の縦軸は、ロータの機械角 θ_m を示す。

[0083] 図9は、第1事例による、所定期間内の電流 I_q の波形を示す。図10は、第1事例による、所定期間内の電流 I_d の波形を示す。図9の縦軸は、電流 I_q （A）を示し、図10の縦軸は電流 I_d （A）を示す。

[0084] 図 1 1 は、第 1 事例による、所定期間内の電流 I_a 、 I_b および I_c の波形を示す。図 1 1 の縦軸は、電流 I_a 、 I_b および I_c (A) を示す。

[0085] 図 1 2 は、第 1 事例による、所定期間内の逆起電力誤差 V_{er} および最大許容誤差 V_{ermax} の波形を示す。図 1 2 の縦軸は、逆起電力誤差 V_{er} (V) と最大許容誤差 V_{ermax} (V) とを示す。図中の $Error$ は、逆起電力誤差 V_{er} を指す。

[0086] 第 1 事例においてセンサ故障は発生していないため、ベクトル制御を継続させることができる。図 1 2 に示されるとおり、逆起電力誤差 V_{er} は、最大許容誤差 V_{ermax} よりも小さい範囲にある。そのため、図 7 に示されるような、例えば 0.25 秒でトルクが瞬時に変動しても、エラー信号レベルは、ゼロに近い値に維持される。つまり、第 1 事例ではエラー信号レベルはアサートされない。

[0087] [電流センサの故障]

図 1 3 から図 1 8 を参照して、2 つの電流センサ 500 A、500 B のうちの一方にセンサ故障が発生するときのシミュレーション結果を説明する。以下、このセンサ故障が発生する事例を「第 2 事例」と表記する。

[0088] 図 1 3 は、第 2 事例による、所定期間内のトルク波形を示す。図 1 3 の縦軸はトルク (N・m) を示す。

[0089] 図 1 4 は、第 2 事例による、所定期間内の、実際のロータ角の波形および角度センサ 700 によって測定されたロータの機械角 θ_m の波形を示す。図 1 4 の縦軸は、ロータの機械角 θ_m を示す。

[0090] 図 1 5 は、第 2 事例による、所定期間内の電流 I_q の波形を示す。図 1 6 は、第 2 事例による、所定期間内の電流 I_d の波形を示す。図 1 5 の縦軸は、電流 I_q (A) を示し、図 1 6 の縦軸は電流 I_d (A) を示す。

[0091] 図 1 7 は、第 2 事例による、所定期間内の電流 I_a 、 I_b および I_c の波形を示す。図 1 7 の縦軸は、電流 I_a 、 I_b および I_c (A) を示す。

[0092] 図 1 8 は、第 2 事例による、所定期間内の逆起電力誤差 V_{er} および最大許容誤差 V_{ermax} の波形を示す。図 1 8 の縦軸は、逆起電力誤差 V_{er} (

V) と最大許容誤差 V_{ermax} (V) とを示す。図中の $Error$ は、逆起電力誤差 V_{er} を指す。

[0093] この事例 2 では、電流 I_a を検出する電流センサ 500A とモータ駆動システム 1000 との電氣的な接続が、時刻 0.4s で切断される。この切断は、電流 I_a を検出する電流センサ 500A が時刻 0.4s で故障することを意味する。そのため、図 17 に示されるように、時刻 0.4s 以降の電流 I_a はゼロとなる。

[0094] 図 18 に示されるように、故障が発生する時刻 0.4s までは、逆起電力誤差 V_{er} は、最大許容誤差 V_{ermax} よりも小さい範囲にある。しかし、故障が発生すると、逆起電力誤差 V_{er} は、最大許容誤差 V_{ermax} よりも大きくなる。その結果、第 2 事例ではエラー信号は、アサートされ、センサ故障が発生したことを示す。

[0095] [角度センサの故障]

図 19 から図 24 を参照して、角度センサ 700 にセンサ故障が発生するときのシミュレーション結果を説明する。以下、このセンサ故障が発生する事例を「第 3 事例」と表記する。

[0096] 図 19 は、第 3 事例による、所定期間内のトルク波形を示す。図 19 の縦軸はトルク (N・m) を示す。

[0097] 図 20 は、第 3 事例による、所定期間内の、実際のロータ角の波形および角度センサ 700 によって測定されたロータの機械角 θ_m の波形を示す。図 20 の縦軸は、ロータの機械角 θ_m を示す。

[0098] 図 21 は、第 3 事例による、所定期間内の電流 I_q の波形を示す。図 22 は、第 3 事例による、所定期間内の電流 I_d の波形を示す。図 21 の縦軸は、電流 I_q (A) を示し、図 22 の縦軸は電流 I_d (A) を示す。

[0099] 図 23 は、第 3 事例による、所定期間内の電流 I_a 、 I_b および I_c の波形を示す。図 23 の縦軸は、電流 I_a 、 I_b および I_c (A) を示す。

[0100] 図 24 は、第 3 事例による、所定期間内の逆起電力誤差 V_{er} および最大許容誤差 V_{ermax} の波形を示す。図 24 の縦軸は、逆起電力誤差 V_{er} (

V) と最大許容誤差 V_{ermax} (V) とを示す。図中の $Error$ は、逆起電力誤差 V_{er} を指す。

[0101] この第3事例では、角度センサ700とモータ駆動システム1000との電氣的な接続が、時刻0.3sで切断される。この切断は、角度センサ700が時刻0.3sで故障することを意味する。そのため、図20に示されるように、時刻0.3s以降の測定されるロータの機械角 θ_m はゼロとなる。

[0102] 図24に示されるように、故障が発生する時刻0.3sまでは、逆起電力誤差 V_{er} は、最大許容誤差 V_{ermax} よりも小さい範囲にある。しかし、故障が発生すると、逆起電力誤差 V_{er} は、最大許容誤差 V_{ermax} よりも大きくなる。その結果、第3事例ではエラー信号は、アサートされ、センサ故障が発生したことを示す。

[0103] [電流センサおよび角度センサの故障]

図25から図30を参照して、電流センサ500Aと角度センサ700とにセンサ故障が発生するときのシミュレーション結果を説明する。以下、このセンサ故障が発生する事例を「第4事例」と表記する。

[0104] 図25は、第4事例による、所定期間内のトルク波形を示す。図25の縦軸はトルク (N・m) を示す。

[0105] 図26は、第4事例による、所定期間内の、実際のロータ角の波形および角度センサ700によって測定されたロータの機械角 θ_m の波形を示す。図26の縦軸は、ロータの機械角 θ_m を示す。

[0106] 図27は、第4事例による、所定期間内の電流 I_q の波形を示す。図28は、第4事例による、所定期間内の電流 I_d の波形を示す。図27の縦軸は、電流 I_q (A) を示し、図28の縦軸は電流 I_d (A) を示す。

[0107] 図29は、第4事例による、所定期間内の電流 I_a 、 I_b および I_c の波形を示す。図29の縦軸は、電流 I_a 、 I_b および I_c (A) を示す。

[0108] 図30は、第4事例による、所定期間内の逆起電力誤差 V_{er} および最大許容誤差 V_{ermax} の波形を示す。図30の縦軸は、逆起電力誤差 V_{er} (V) と最大許容誤差 V_{ermax} (V) とを示す。図中の $Error$ は、逆

起電力誤差 V_{er} を指す。

[0109] この第4事例では、先ず、角度センサ700が時刻0.3sで故障する。そのため、図26に示されるように、時刻0.3s以降の測定されるロータの機械角 θ_m はゼロとなる。次に、電流 I_a を検出する電流センサ500Aが時刻0.4sで故障する。そのため、図29に示されるように、時刻0.4s以降の電流 I_a はゼロとなる。

[0110] 図30に示されるように、最初に故障が発生する時刻0.3sまでは、逆起電力誤差 V_{er} は、最大許容誤差 V_{ermax} よりも小さい範囲にある。しかし、最初の故障が発生すると、逆起電力誤差 V_{er} は、最大許容誤差 V_{ermax} よりも大きくなる。その結果、第4事例では、最初の故障が発生した後は、エラー信号はアサートされたままであり、センサ故障が発生したことを示す。

[0111] (実施形態2)

図31および図32を参照して、実施形態2によるセンサ故障の検出方法を説明する。

[0112] 上述した逆起電力誤差 V_{er} は、推定位相角 ρ_s と測定位相角 ρ との誤差の関数で表される。上記の式(6)を、これから説明する手順で変形することにより、逆起電力誤差 V_{er} の物理的な意味を理解することができる。

[0113] 図31は、合成磁束 Ψ_s および推定位相角 ρ_s の関係を示す。

[0114] 先ず、上記の式(6)の ρ を ρ' に置き換えることにより、式(8)が得られる。ここで $\rho' = 90^\circ - \rho$ の関係が満たされる。

[0115] $V_{er} = BEMF\beta \cdot \cos\rho' - BEMF\alpha \cdot \sin\rho'$ 式(8)

[0116] 式(8)の両辺を絶対値 $BEMF$ で除算することにより、式(9)が得られる。

[0117] $V_{er}/BEMF = (BEMF\beta/BEMF) \cdot \cos\rho' - (BEMF\alpha/BEMF) \cdot \sin\rho'$ 式(9)

[0118] 合成磁束 Ψ_s は、絶対値 $BEMF$ に基づいて演算される。 $BEMF = \Psi_s \cdot \omega$ の関係が満たされる。 $BEMF\alpha = d\Psi\alpha/dt$ (d/dt は時間微分を示

す演算子)、 $BEMF \beta = d\Psi\beta / dt$ の関係が満たされる。これらの関係式から、式(9)は、合成磁束 Ψ_s を用いて式(10)に変形される。

$$[0119] \quad Ver / BEMF = [\{ (d\Psi\beta / dt) / \omega_e \} / \Psi_s] \cdot \cos \rho' - [\{ (d\Psi\alpha / dt) / \omega_e \} / \Psi_s] \cdot \sin \rho' \quad \text{式(10)}$$

ここで、 $\Psi\alpha$ は、合成磁束 Ψ_s の α 軸上の成分であり、 $\Psi\beta$ は、合成磁束 Ψ_s の β 軸上の成分である。

[0120] $\Psi\alpha = (d\Psi\beta / dt) / \omega_e$ 、 $\Psi\beta = (d\Psi\alpha / dt) / \omega_e$ の関係が満たされる。この関係式を用いると、式(10)は式(11)にさらに変形される。式(11)の ρ' を ρ に戻すと式(12)が得られる。

$$[0121] \quad Ver / BEMF = (\Psi\alpha / \Psi_s) \cdot \cos \rho' - (\Psi\beta / \Psi_s) \cdot \sin \rho' \quad \text{式(11)}$$

$$Ver / BEMF = (\Psi\alpha / \Psi_s) \cdot \sin \rho - (\Psi\beta / \Psi_s) \cdot \cos \rho \quad \text{式(12)}$$

[0122] 図31に示される推定位相角 ρ_s は、合成磁束 Ψ_s に基づいて推定される。図31に示されるように、 $\Psi\alpha / \Psi_s = \cos \rho_s$ 、 $\Psi\beta / \Psi_s = \sin \rho_s$ が満たされる。この関係式を用いて式(12)を変形することで、式(13)が最終的に得られる。

$$[0123] \quad Ver = \sin(\rho - \rho_s) \cdot BEMF \quad \text{式(13)}$$

[0124] 式(13)は、逆起電力誤差 Ver が、測定位相角 ρ と推定位相角 ρ_s との誤差の関数で表されることを示す。正常時では、測定位相角 ρ と推定位相角 ρ_s とは一致する。正常時の誤差は低レベル示し、理想的にはゼロを示す。従って、低レベルの Ver は、センサ故障が発生していないことを示し、高レベルの Ver は、センサ故障が発生していることを示す。このように、実施形態1で説明した式(6)の代わりに式(13)に基づいて逆起電力誤差 Ver は演算され得る。ただし、推定位相角 ρ_s の演算は、時間を要する。また、その演算は、低速および高トルク時において複雑であるため、CPUに負荷をかける。その理由は、DCオフセットが影響するためである。これに対し、実施形態1によれば、推定位相角 ρ_s と測定位相角 ρ との誤差に基づいて逆

起電力誤差 V_{er} は演算される。そのため、推定位相角 ρ_s の演算は要求されない。従って、CPU に対する負荷等をさらに低減する観点では、式 (6) に基づいて逆起電力誤差 V_{er} を求めることが好ましい。

[0125] 図 3 2 は、本実施形態による故障検出コアユニット 1 0 0 A__1 のより詳細な機能ブロックを模式的に示す。

[0126] 故障検出コアユニット 1 0 0 A__1 は、さらに位相角推定ユニット 1 4 5 を有する。位相角推定ユニット 1 4 5 は、合成磁束 Ψ_s に基づいて推定位相角 ρ_s を推定し、その推定位相角 ρ_s を誤差演算ユニット 1 4 3 に出力する。なお、合成磁束 Ψ_s は、上述したように絶対値 B E M F に基づいて演算される。誤差演算ユニット 1 4 3 は、上記の式 (1 3) に基づいて逆起電力誤差 V_{er} を演算し、その逆起電力誤差 V_{er} をレベル比較器 1 5 0 に出力する。

[0127] 本実施形態によると、拡張カルマンフィルタのような複雑な演算は要求されないため、実施形態 1 と同様に、センサ故障検出のためのコンピュータの演算負荷を低減することが可能となる。

[0128] (実施形態 3)

図 3 3 は、本実施形態による E P S システム 2 0 0 0 の典型的な構成を模式的に示す。

[0129] 自動車等の車両は一般に、E P S システムを有する。本実施形態による E P S システム 2 0 0 0 は、ステアリングシステム 5 2 0、および補助トルクを生成する補助トルク機構 5 4 0 を有する。E P S システム 2 0 0 0 は、運転者がステアリングハンドルを操作することによって発生するステアリングシステムの操舵トルクを補助する補助トルクを生成する。補助トルクにより、運転者の操作の負担は軽減される。

[0130] ステアリングシステム 5 2 0 は、例えば、ステアリングハンドル 5 2 1、ステアリングシャフト 5 2 2、自在軸継手 5 2 3 A、5 2 3 B、回転軸 5 2 4、ラックアンドピニオン機構 5 2 5、ラック軸 5 2 6、左右のボールジョイント 5 5 2 A、5 5 2 B、タイロッド 5 2 7 A、5 2 7 B、ナックル 5 2 8 A、5 2 8 B、および左右の操舵車輪 5 2 9 A、5 2 9 B から構成され得る。

。

[0131] 補助トルク機構 540 は、例えば、操舵トルクセンサ 541、自動車用電子制御ユニット（ECU） 542、モータ 543 および減速機構 544 などから構成される。操舵トルクセンサ 541 は、ステアリングシステム 520 における操舵トルクを検出する。ECU 542 は、操舵トルクセンサ 541 の検出信号に基づいて駆動信号を生成する。モータ 543 は、駆動信号に基づいて操舵トルクに応じた補助トルクを生成する。モータ 543 は、減速機構 544 を介してステアリングシステム 520 に、生成した補助トルクを伝達する。

[0132] ECU 542 は、例えば、実施形態 1 によるコントローラ 100 および駆動回路 200 などを有する。自動車では ECU を核とした電子制御システムが構築される。EPS システム 2000 では、例えば、ECU 542、モータ 543 およびインバータ 545 によって、モータ駆動システムが構築される。そのモータ駆動システムとして、実施形態 1 によるモータ駆動システム 1000 を好適に用いることができる。

[0133] 本開示の実施形態は、センサの故障検出能力が求められる、シフトバイワイヤ、ステアリングバイワイヤ、ブレーキバイワイヤおよびトラクションモータなどのモータ駆動システムにも好適に用いられる。例えば、本開示の実施形態によるモータ駆動システムは、日本政府および米国運輸省道路交通安全局（NHTSA）によって定められたレベル 0 から 4（自動化の基準）に対応した自動運転車に搭載され得る。

産業上の利用可能性

[0134] 本開示の実施形態は、掃除機、ドライヤ、シーリングファン、洗濯機、冷蔵庫および電動パワーステアリングシステムなどの、各種モータを有する多様な機器に幅広く利用され得る。

符号の説明

[0135] 100：コントローラ、100A：故障検出ユニット、100A__1：故障検出コアユニット、100A__2：信号生成ユニット、100B：ベクトル

制御ユニット、２００：駆動回路、３００：インバータ、４００：シャット
ダウン回路、５００、５００Ａ、５００Ｂ：電流センサ、６００：ＡＤコン
バータ、７００：角度センサ、８００：ランプ、９００：ＲＯＭ、１０００
：モータ駆動システム、２０００：ＥＰＳシステム

請求の範囲

- [請求項1] モータ駆動システムにおける複数のセンサの少なくとも1つの故障を検出する方法であって、
- α β 固定座標系または d q 回転座標系を基準とした逆起電力誤差 V_{er} を決定する演算 (A) を実行するステップであって、前記演算 (A) は、前記 α β 固定座標系の α β 軸上の電流 I_α 、 I_β と、前記 α β 軸上のリファレンス電圧 V_α^* 、 V_β^* と、ロータの電気角 θ_e とに基づいて実行され、前記逆起電力誤差 V_{er} は、推定位相角 ρ_s と、前記複数のセンサによって測定されるセンサ値に基づく測定位相角 ρ との誤差の関数を表す、ステップと、
- 前記逆起電力誤差 V_{er} に基づいて前記故障を検出するステップと、
- を有する方法。
- [請求項2] 前記演算 (A) は、
- 前記電流 I_α および前記リファレンス電圧 V_α^* の関数として逆起電力 $BEMF_\alpha$ を決定する演算 (a1) を実行することと、
- 前記電流 I_β および前記リファレンス電圧 V_β^* の関数として逆起電力 $BEMF_\beta$ を決定する演算 (a2) を実行することと、
- を有する、請求項1に記載の方法。
- [請求項3] 三相リファレンス電圧 V_a^* 、 V_b^* および V_c^* を獲得するステップと、
- クラーク変換を用いて、前記三相リファレンス電圧 V_a^* 、 V_b^* および V_c^* を前記リファレンス電圧 V_α^* 、 V_β^* に変換するステップと、
- をさらに有する、請求項2に記載の方法。
- [請求項4] 三相電流 I_a 、 I_b および I_c を獲得するステップと、
- クラーク変換を用いて、前記三相電流 I_a 、 I_b および I_c を前記電流 I_α 、 I_β に変換するステップと、
- をさらに有する、請求項3に記載の方法。
- [請求項5] ロータの機械角 θ_m を獲得するステップと、

前記ロータの機械角 θ_m を前記ロータの電気角 θ_e に変換するステップと、

をさらに有する、請求項3または4に記載の方法。

[請求項6] 前記故障を検出するステップは、前記逆起電力誤差 V_{er} と最大許容誤差 V_{ermax} との間のレベル比較を有する、請求項3から5のいずれかに記載の方法。

[請求項7] 前記演算 (A) は、式 (1) に基づいて逆起電力絶対値 $BEMF$ を決定する演算 (a3) を実行することをさらに有し、

$$BEMF = (BEMF_{\alpha}^2 + BEMF_{\beta}^2)^{1/2} \quad (1)$$

前記演算 (a1) は、式 (2) に基づいて前記逆起電力 $BEMF_{\alpha}$ を演算することを有し、

$$BEMF_{\alpha} = V_{\alpha} - R \cdot I_{\alpha} \quad (2)$$

ここで、 R は、電機子抵抗を示し、

前記演算 (a2) は、式 (3) に基づいて前記逆起電力 $BEMF_{\beta}$ を演算することを有する、

請求項6に記載の方法。

$$BEMF_{\beta} = V_{\beta} - R \cdot I_{\beta} \quad (3)$$

[請求項8] 前記演算 (A) は、式 (4) に基づいて負荷角 δ を決定する演算 (a4) をさらに有し、

$$\delta = \sin^{-1} (L_q \cdot I_q \cdot \omega_e / BEMF) \quad (4)$$

ここで、 I_q は、前記 dq 回転座標系の q 軸上の電流を示し、 L_q は、前記 q 軸上の電機子インダクタンスを示し、 ω_e は、前記ロータの電気角 θ_e の時間微分として演算される電気速度を示す、請求項7に記載の方法。

[請求項9] パーク変換を用いて、前記電流 I_{α} 、 I_{β} を前記 dq 軸上の電流 I_d 、 I_q に変換するステップをさらに有する、請求項8に記載の方法。

[請求項10] 前記演算 (A) は、式 (5) に基づいて前記測定位相角 ρ を決定する演算 (a5) をさらに有する、請求項8または9に記載の方法。

$$\rho = \theta_s - \delta \quad (5)$$

[請求項11] 前記演算 (A) は、式 6 に基づいて前記逆起電力誤差 V_{er} を決定する演算 (a 6) をさらに有する、請求項 10 に記載の方法。

$$V_{er} = BEMF \beta \cdot \cos \rho - BEMF \alpha \cdot \sin \rho \quad (6)$$

[請求項12] 前記演算 (A) は、式 7 に基づいて前記逆起電力誤差 V_{er} を決定する演算 (a 6') をさらに有する、請求項 10 に記載の方法。

$$V_{er} = \sin(\rho - \rho_s) \cdot BEMF \quad (7)$$

[請求項13] 前記故障を検出するステップは、式 8 に基づいて前記最大許容誤差 V_{ermax} を演算することをさらに有し、

$$V_{ermax} = K \cdot BEMF \quad (8)$$

ここで、K は、所定の定数を示す、請求項 11 または 12 に記載の方法。

[請求項14] 前記逆起電力誤差 V_{er} が前記最大許容誤差 V_{ermax} 以上であるとき、前記故障を示すエラー信号を出力するステップをさらに有する、請求項 6 から 13 のいずれかに記載の方法。

[請求項15] 前記モータ駆動システムをシャットダウンするためのシャットダウン信号、および人間の注意を喚起するための報知信号の少なくとも 1 つを、前記エラー信号に応答して生成するステップをさらに有する、請求項 14 に記載の方法。

[請求項16] 三相の巻線を有するモータと、

三相電流のうちの少なくとも二相の電流を検出する少なくとも 2 つの電流センサと、

前記モータのロータ角を検出する角度センサと、

前記モータを制御し、前記少なくとも 2 つの電流センサおよび前記角度センサの少なくとも 1 つの故障を検出するコントローラと、
を有し、

前記コントローラは、

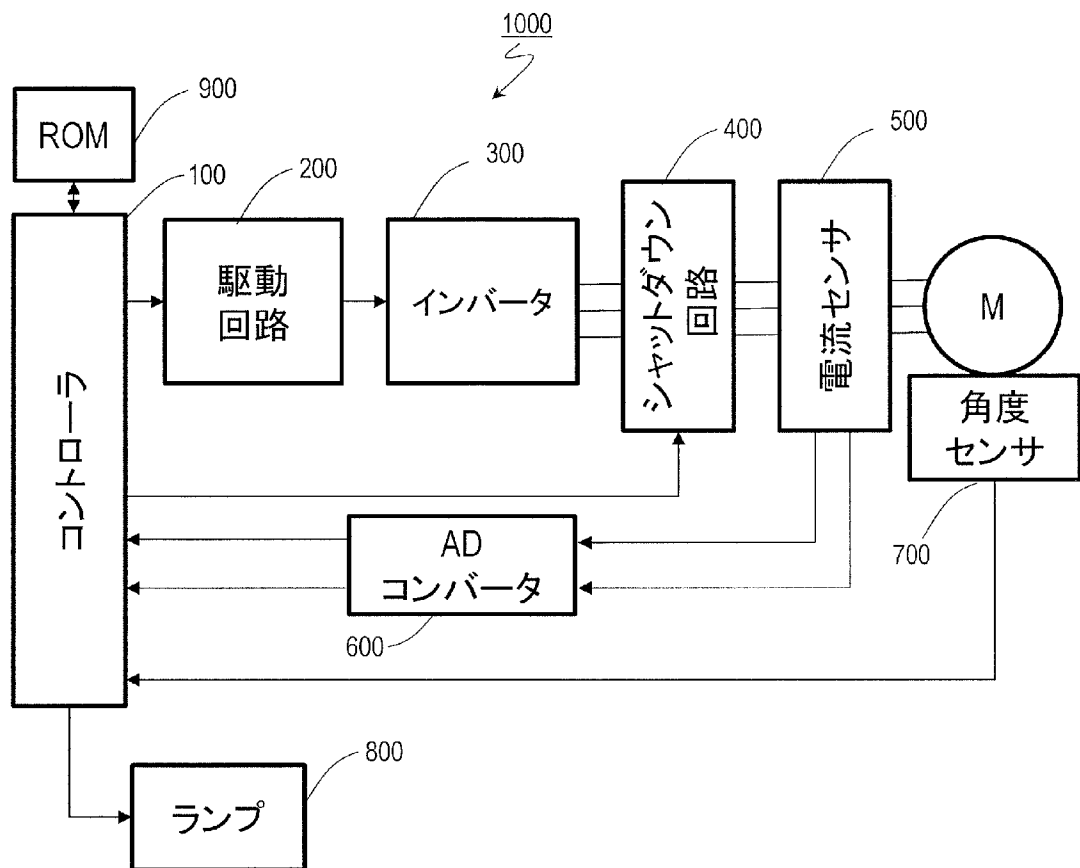
$\alpha\beta$ 固定座標系または dq 回転座標系を基準とした逆起電力誤差

V_{er} を、前記 $\alpha\beta$ 固定座標系の $\alpha\beta$ 軸上の電流 I_α 、 I_β と、前記 $\alpha\beta$ 軸上のリファレンス電圧 V_α^* 、 V_β^* と、前記ロータ角と、に基づいて演算し、前記逆起電力誤差 V_{er} は、推定位相角 ρ_s と、前記2つの電流センサおよび前記角度センサによって測定されるセンサ値に基づく測定位相角 ρ との誤差の関数を表し、

前記逆起電力誤差 V_{er} に基づいて前記故障を検出する、モータ駆動システム。

[請求項17] 請求項16に記載のモータ駆動システムを有する電動パワーステアリングシステム。

[図1]



[図2]

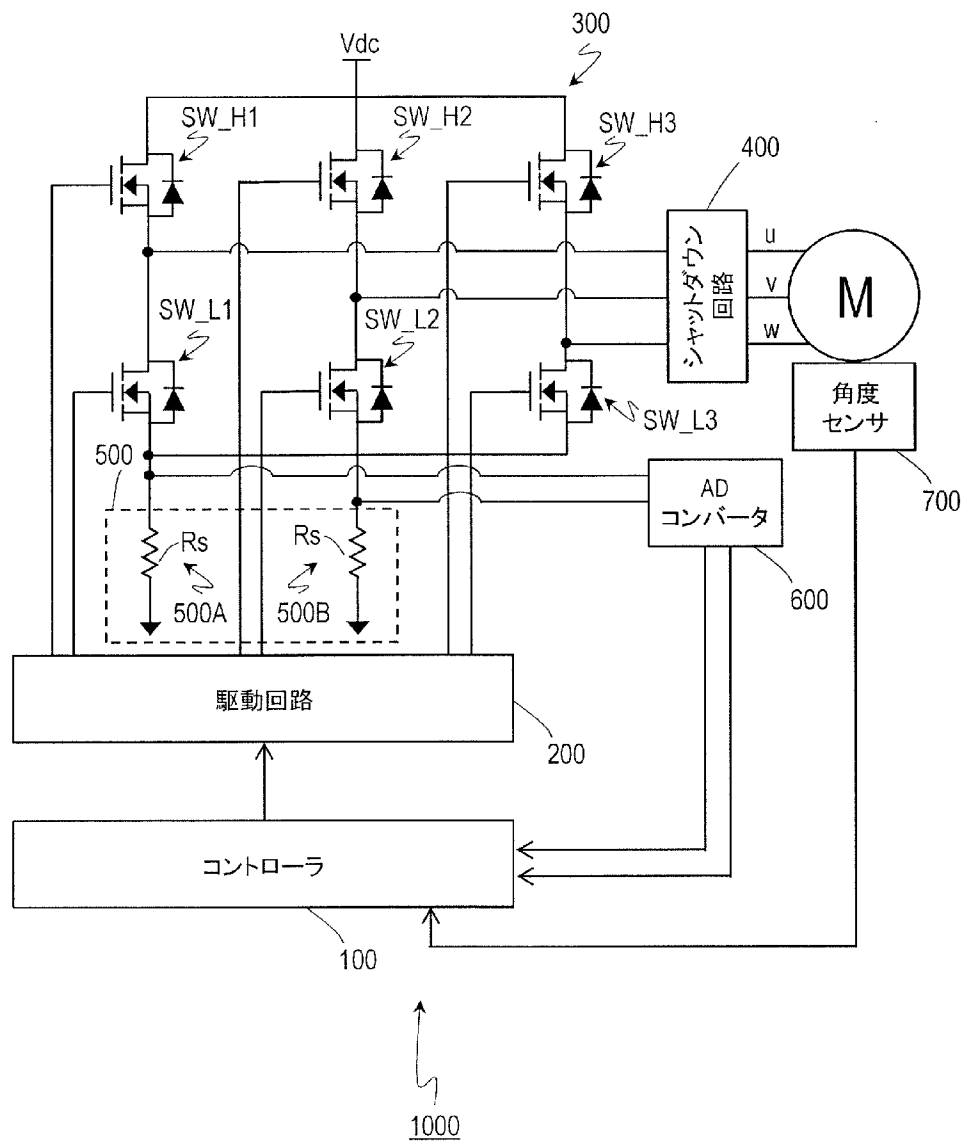
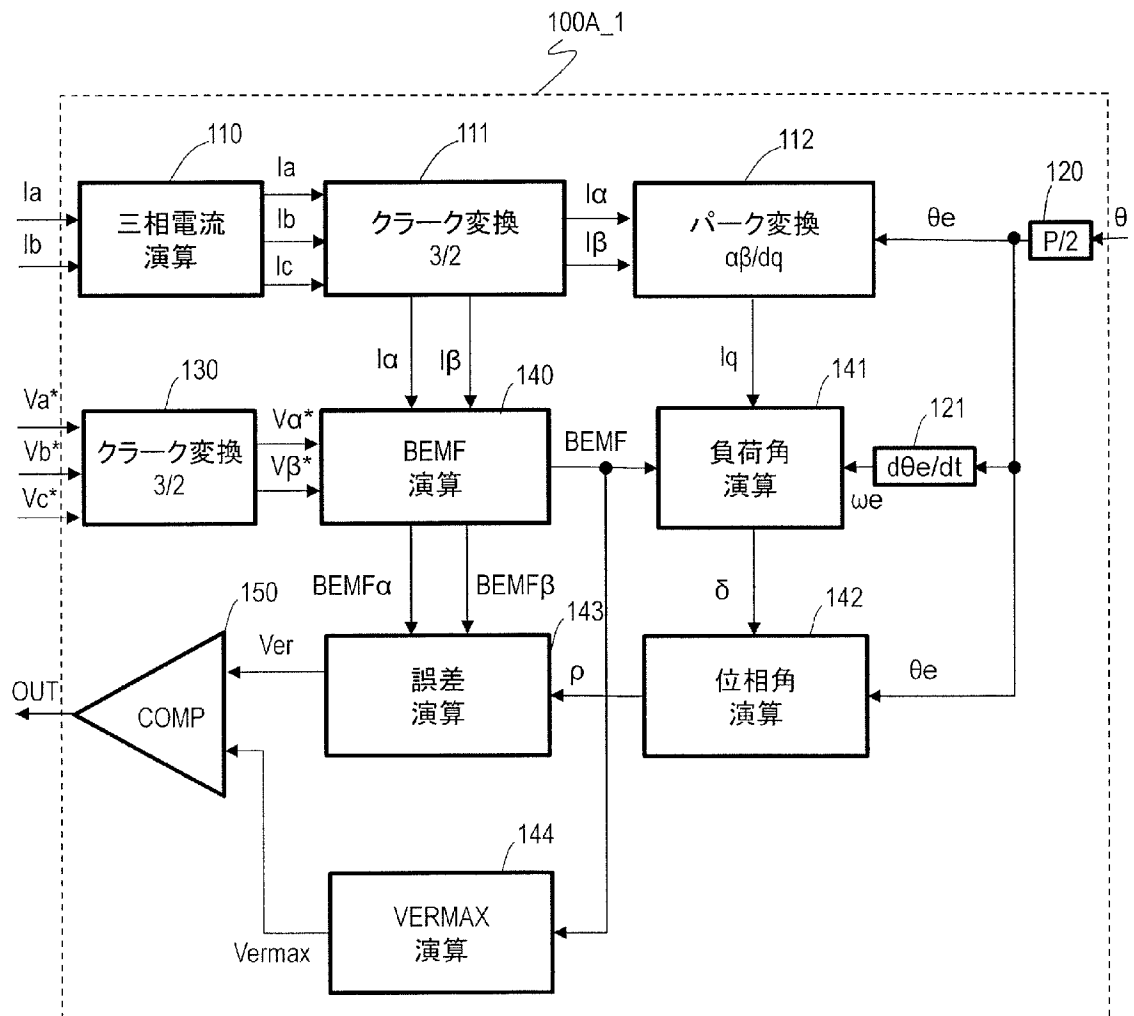
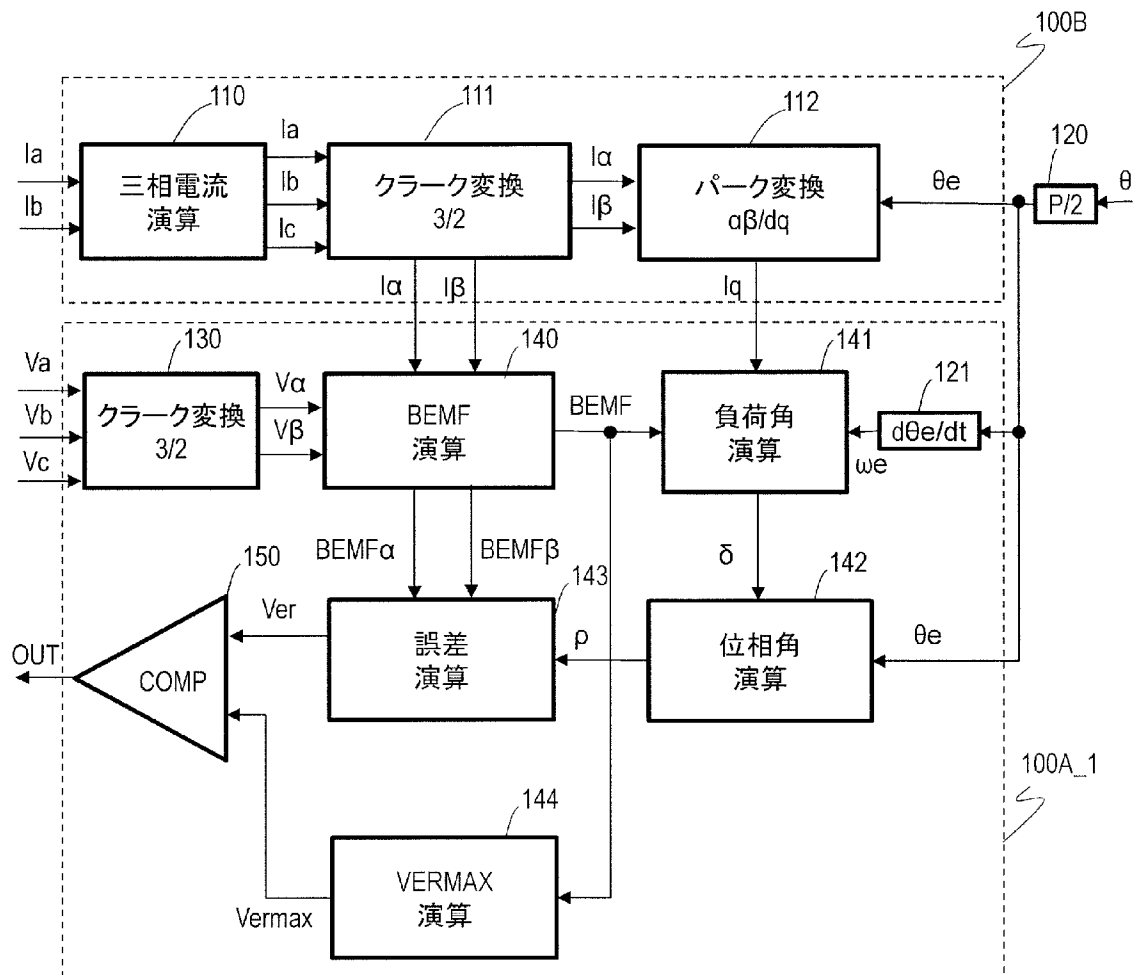


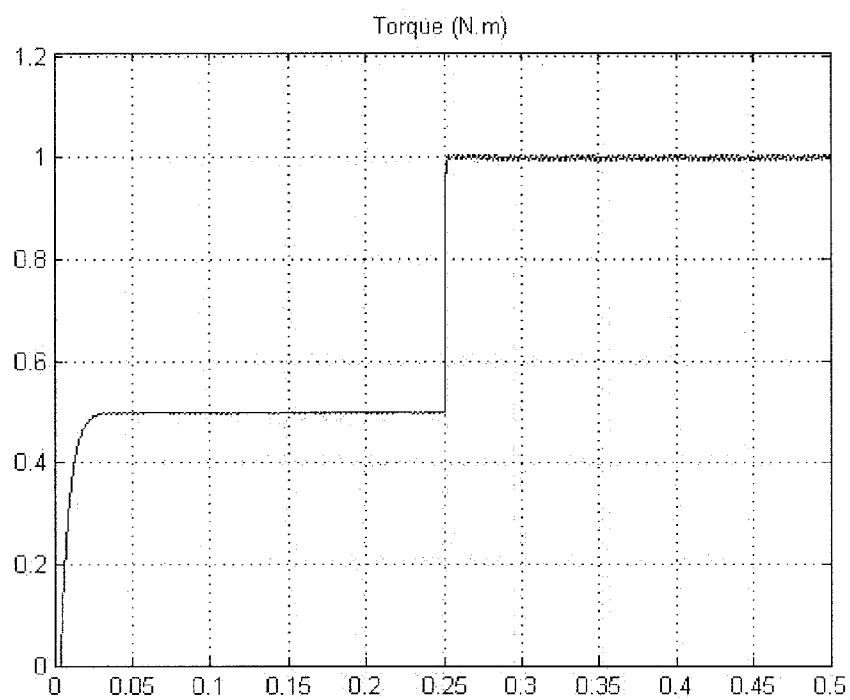
Figure 1 is a block diagram of a vector control system 100. The system 100 is enclosed in a rectangular frame. An input signal enters from the left and splits into two paths. The upper path leads to a block labeled 'ベクトル制御' (Vector Control) 100B. The lower path leads to a block labeled '故障検出コア' (Fault Detection Core) 100A_1. Block 100A_1 is part of a dashed box labeled 100A, which also contains a block labeled '信号生成' (Signal Generation) 100A_2. Block 100A_1 outputs a signal to block 100A_2, which then outputs a signal to the right. Block 100B also outputs a signal to the right.



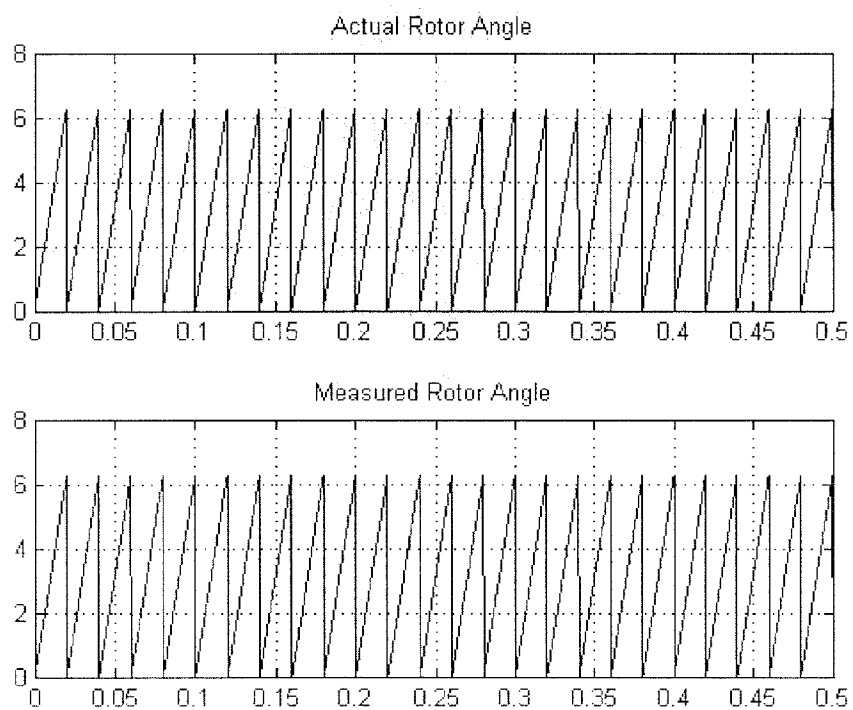
[図6]



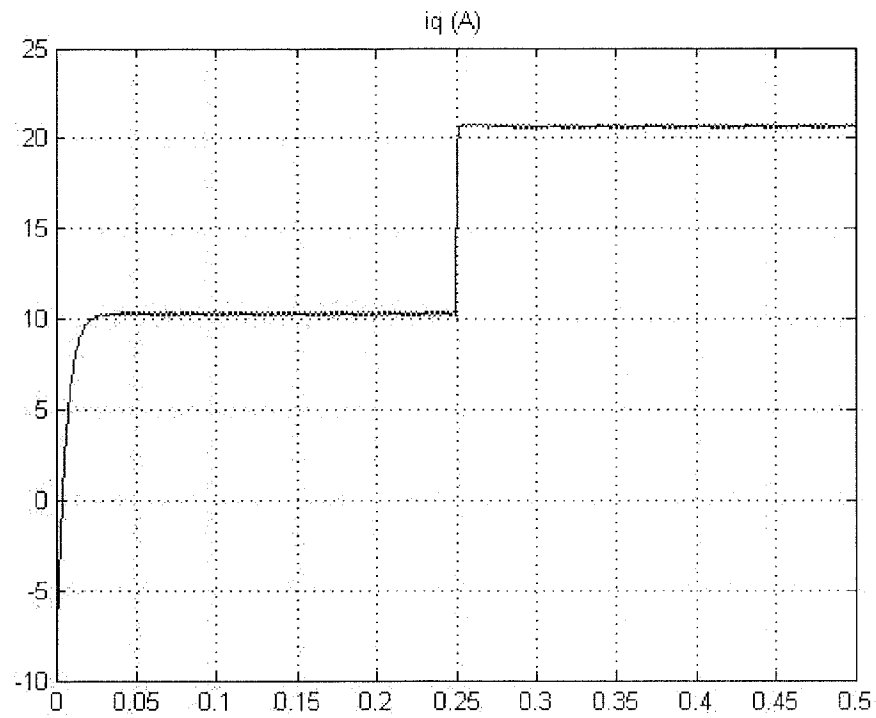
[図7]



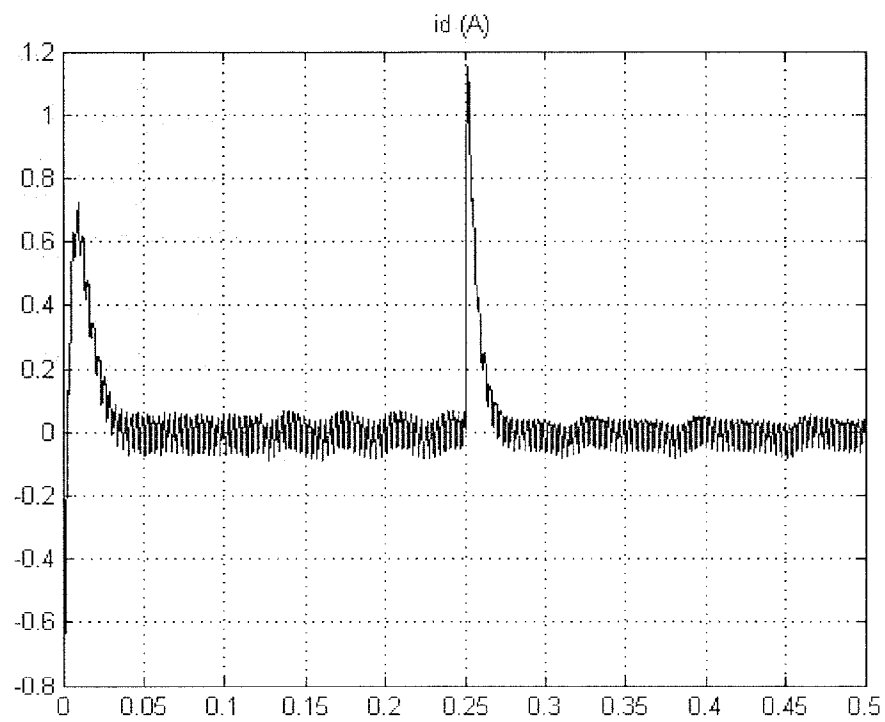
[図8]



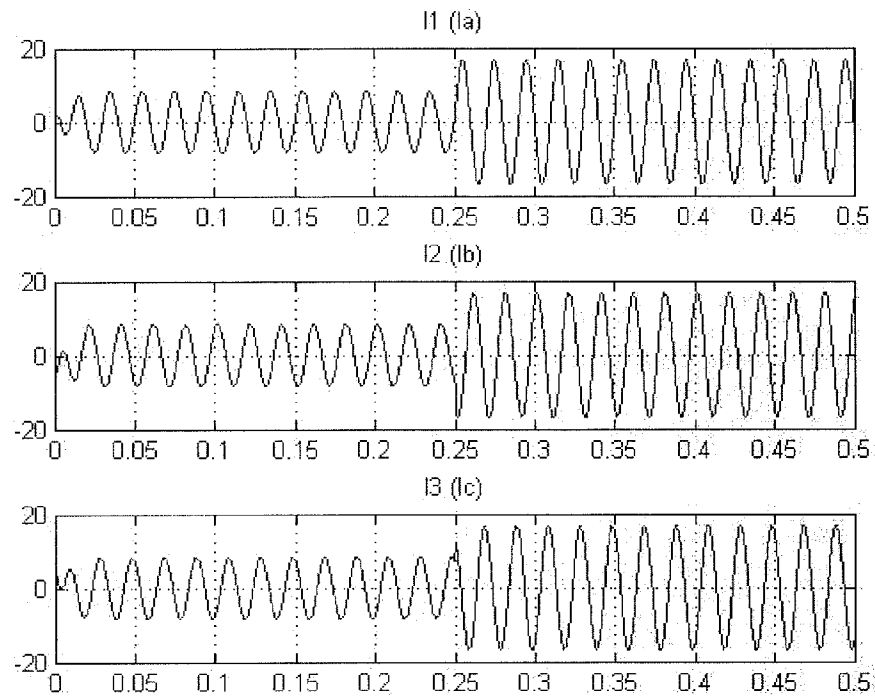
[図9]



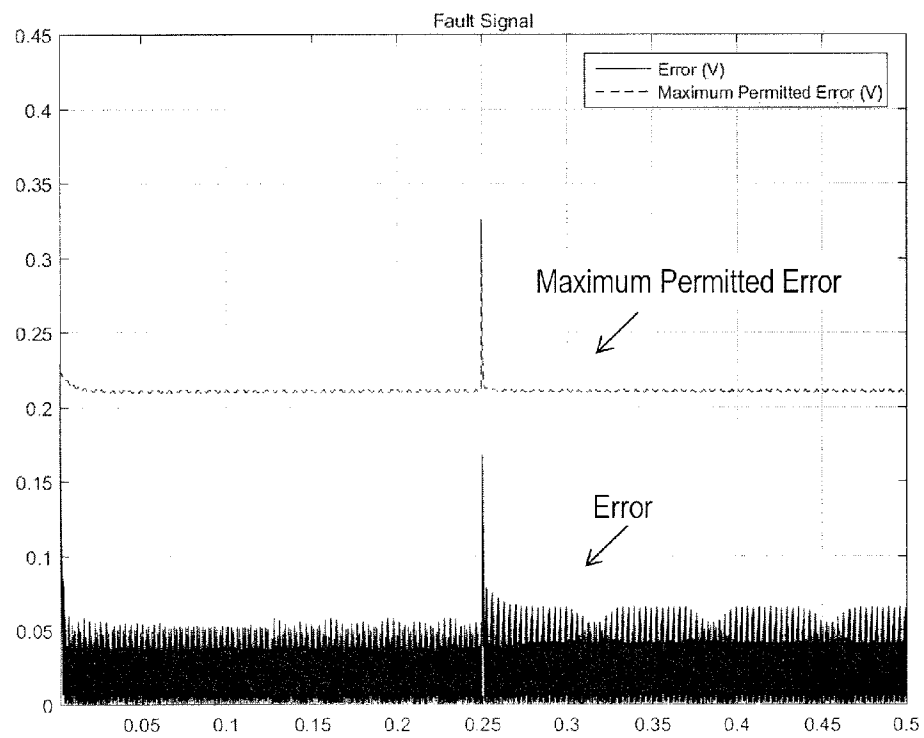
[図10]



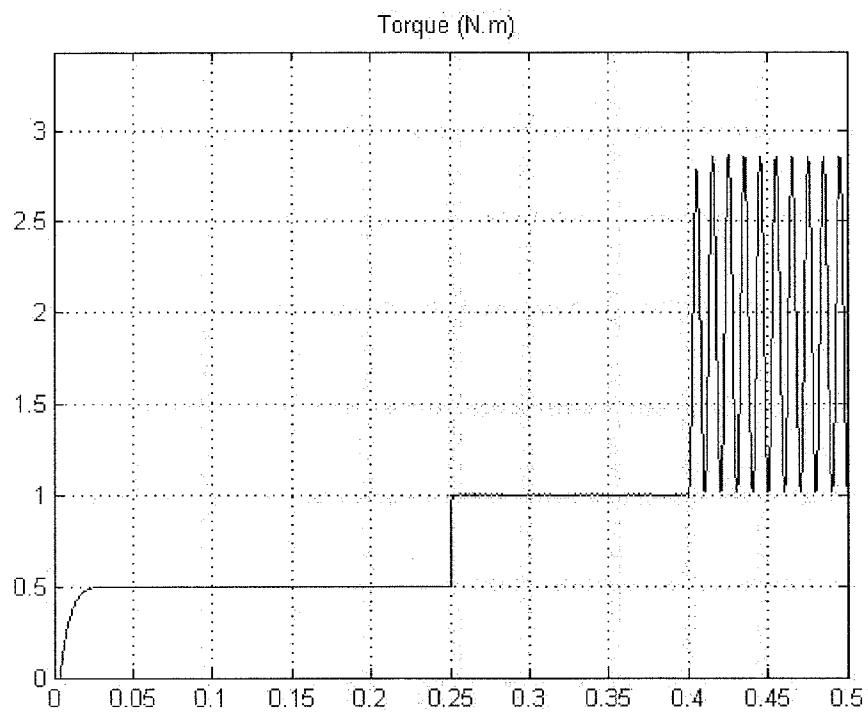
[図11]



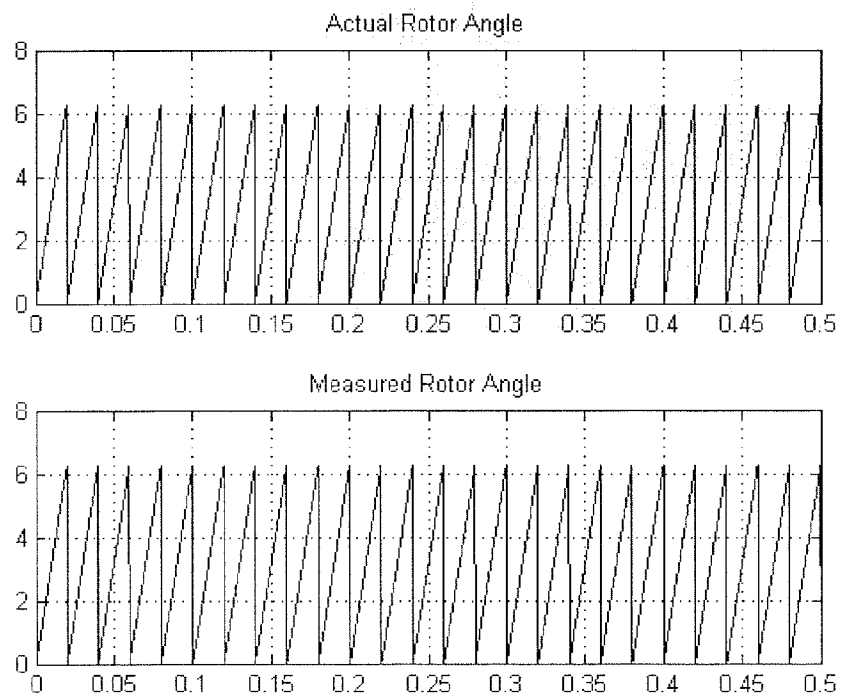
[図12]



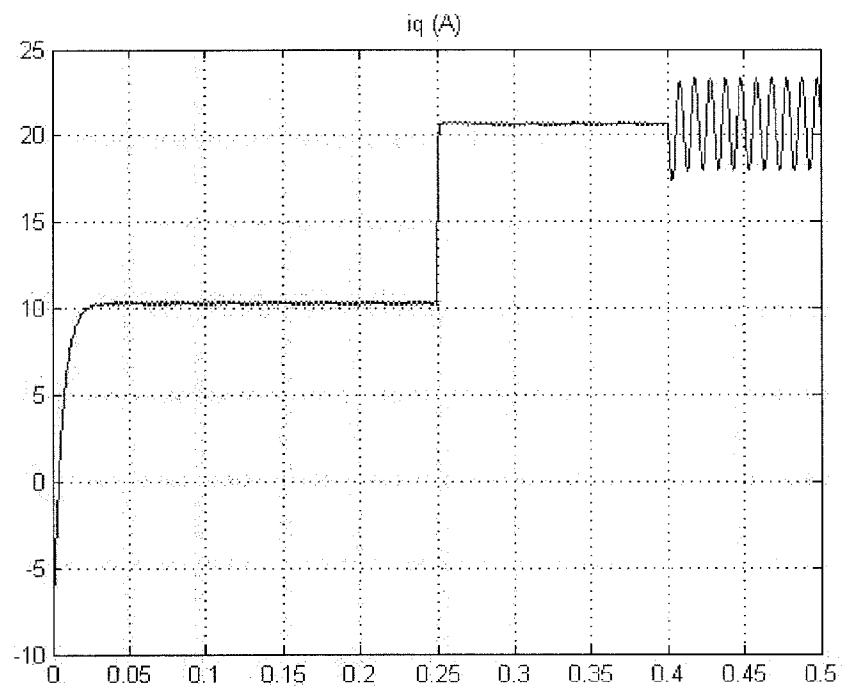
[図13]



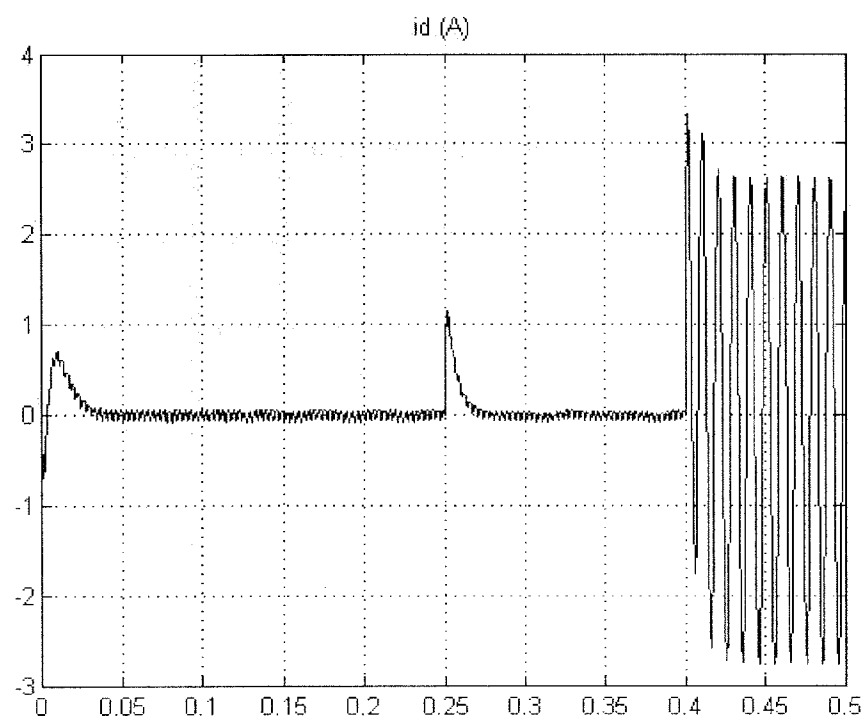
[図14]



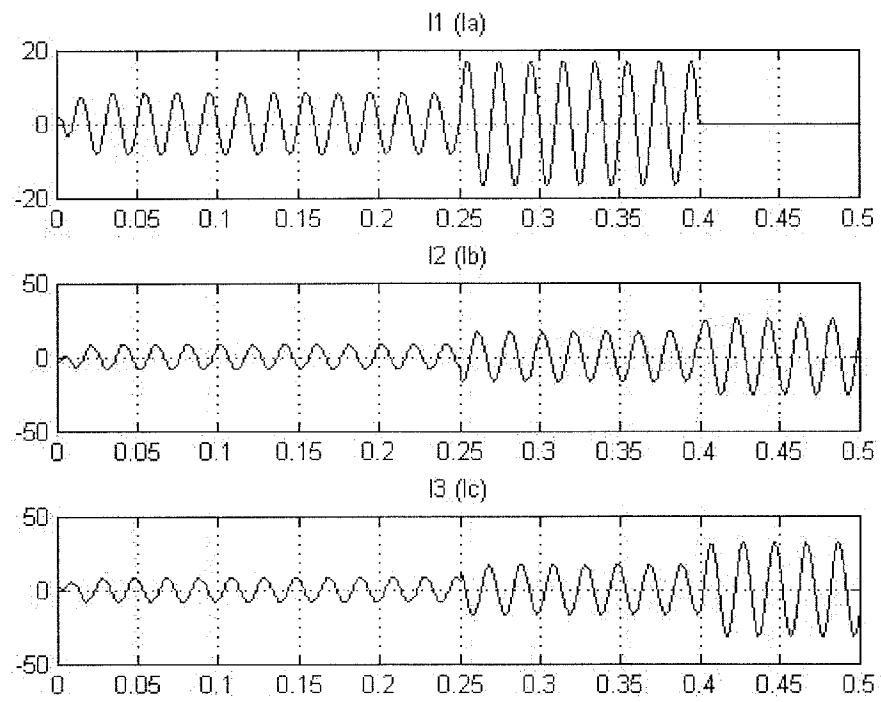
[図15]



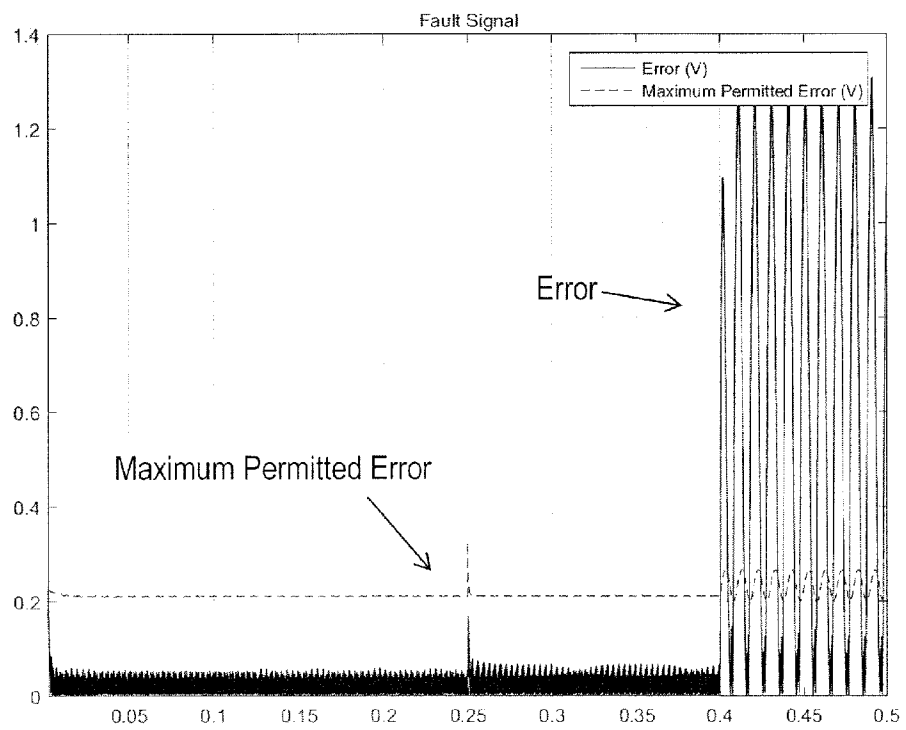
[図16]



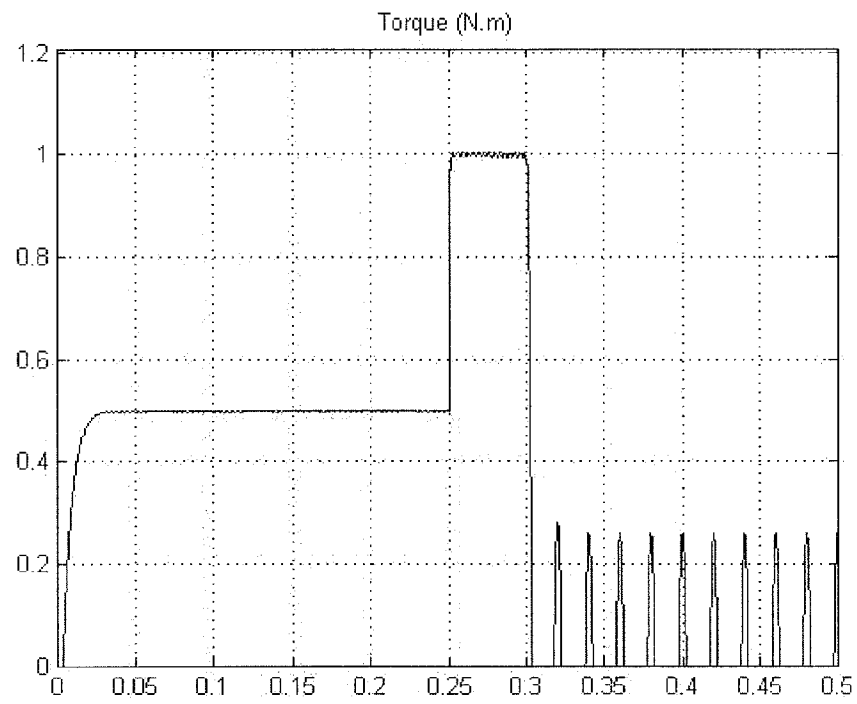
[図17]



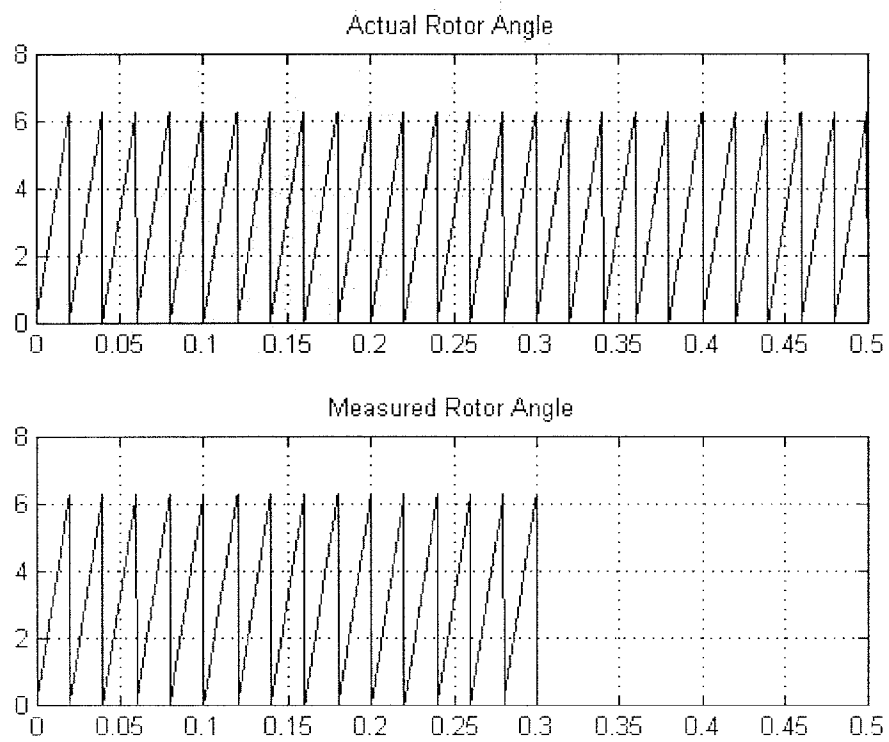
[図18]



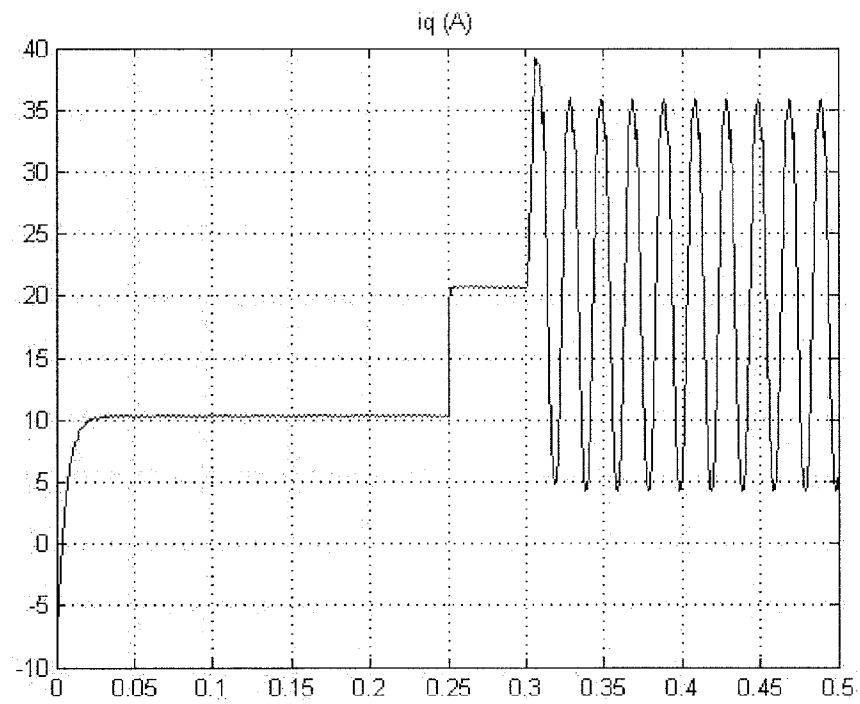
[図19]



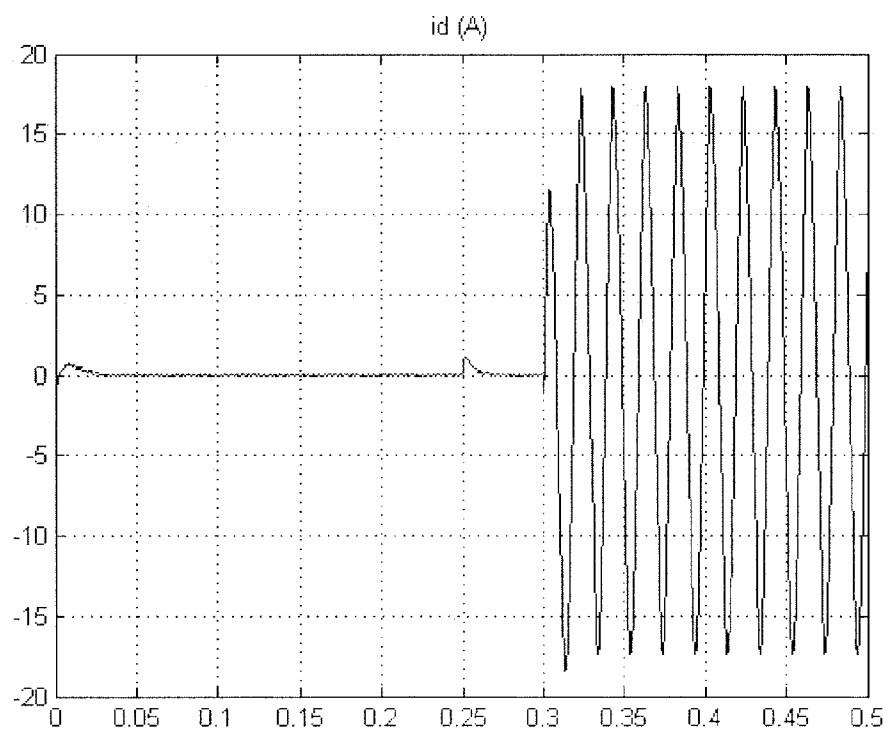
[図20]



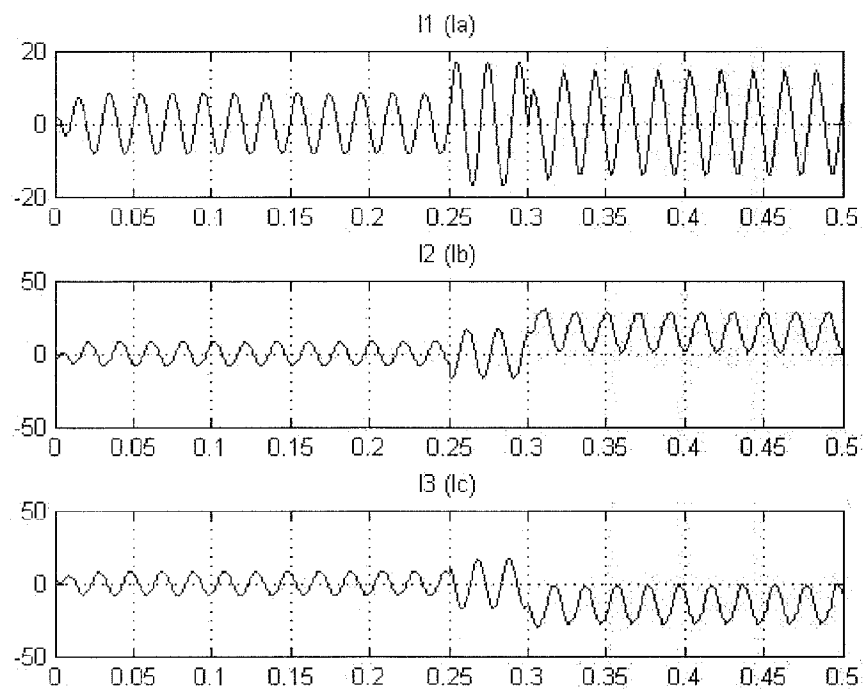
[図21]



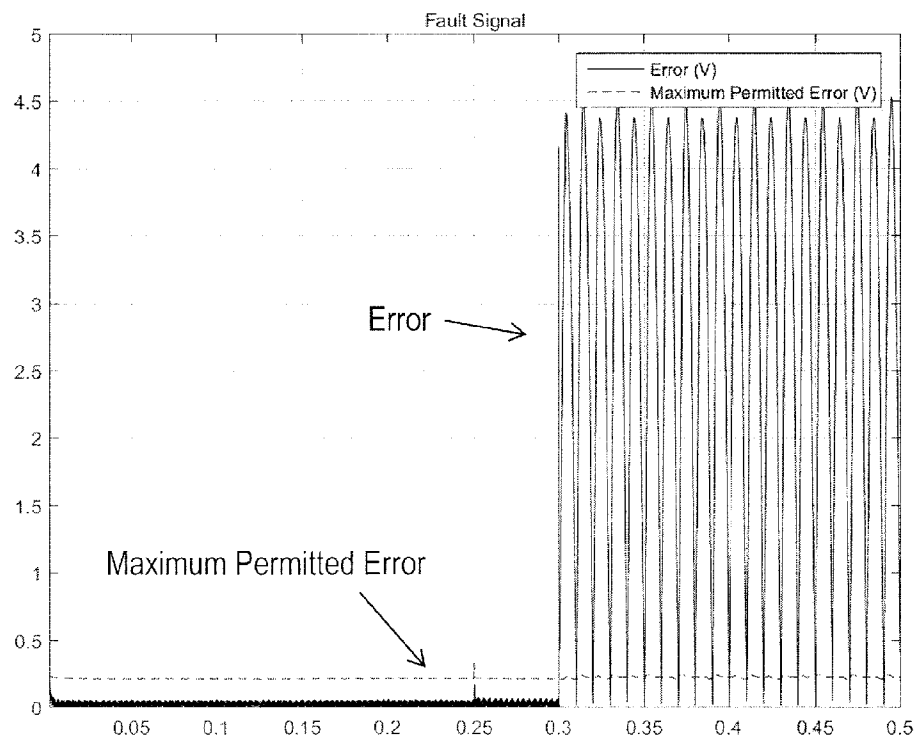
[図22]



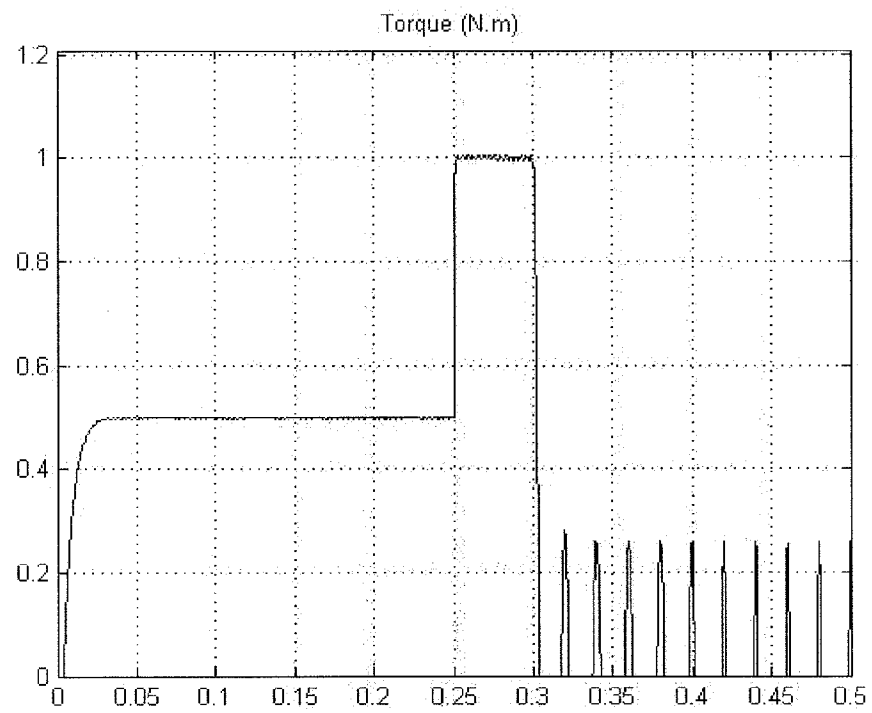
[図23]



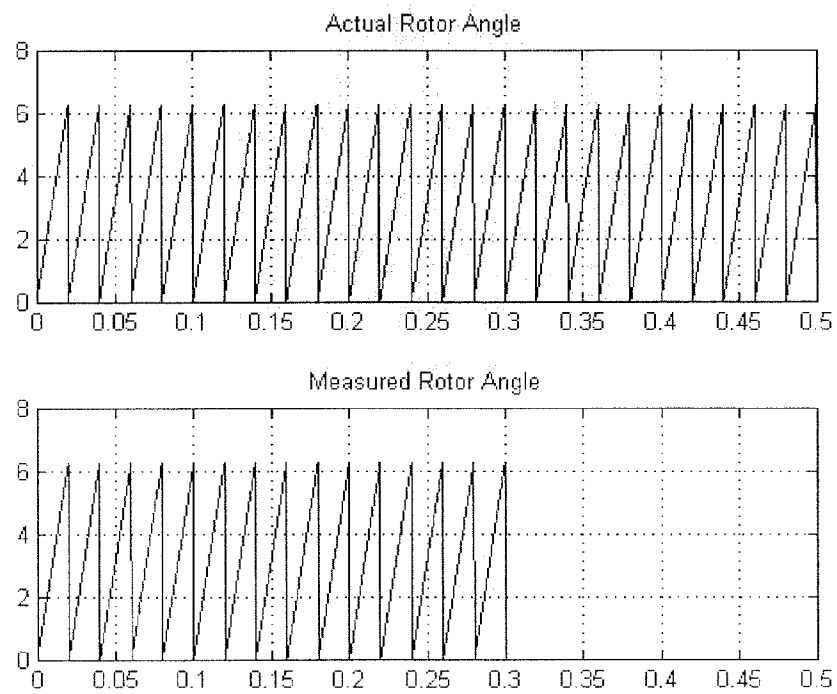
[図24]



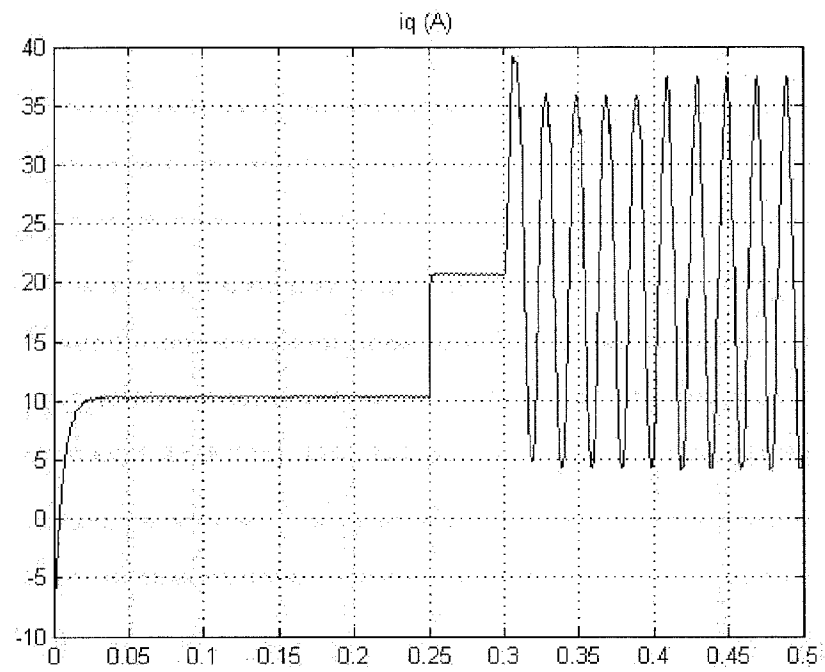
[図25]



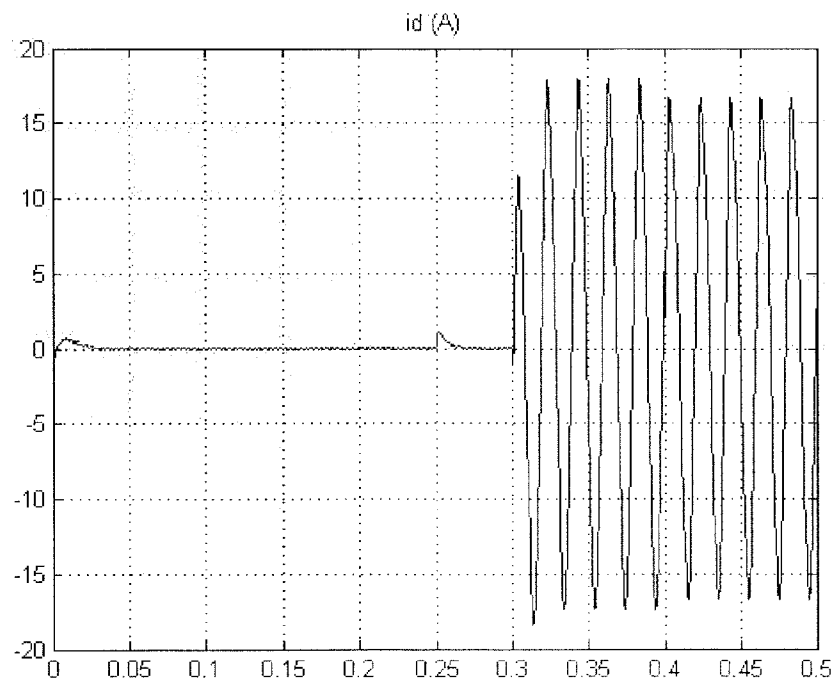
[図26]



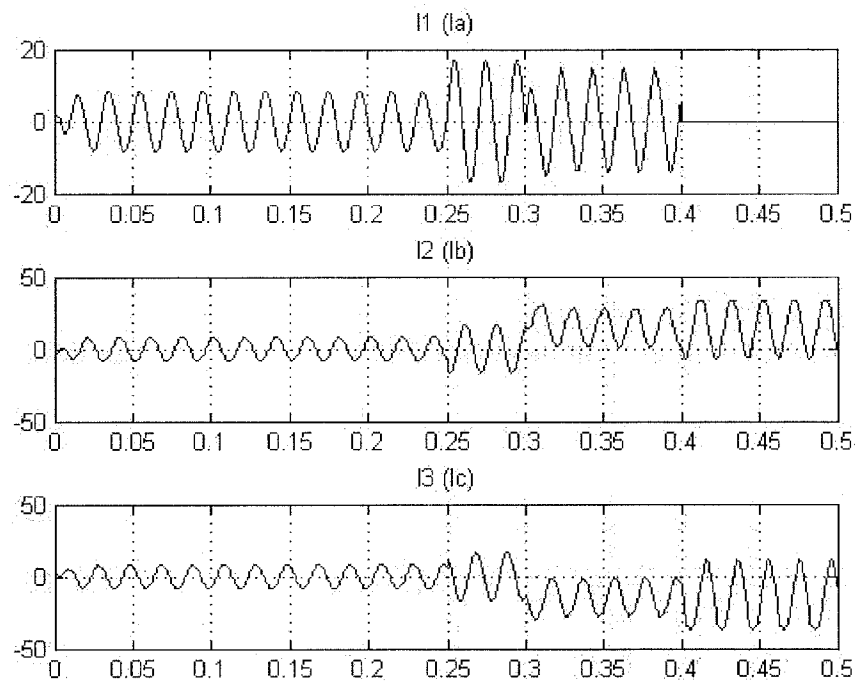
[図27]



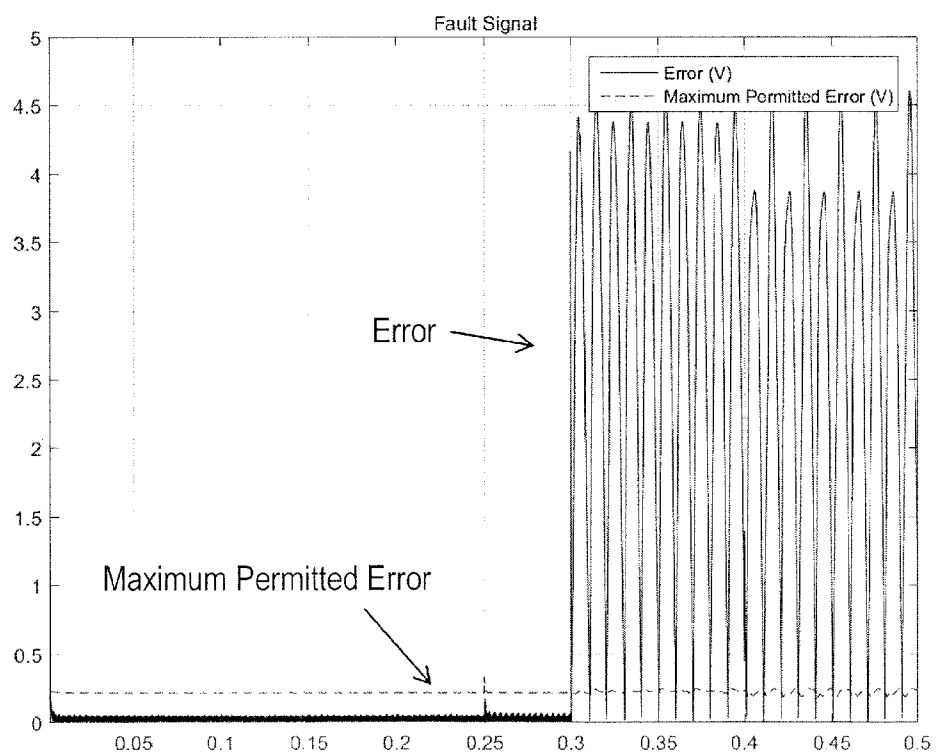
[図28]



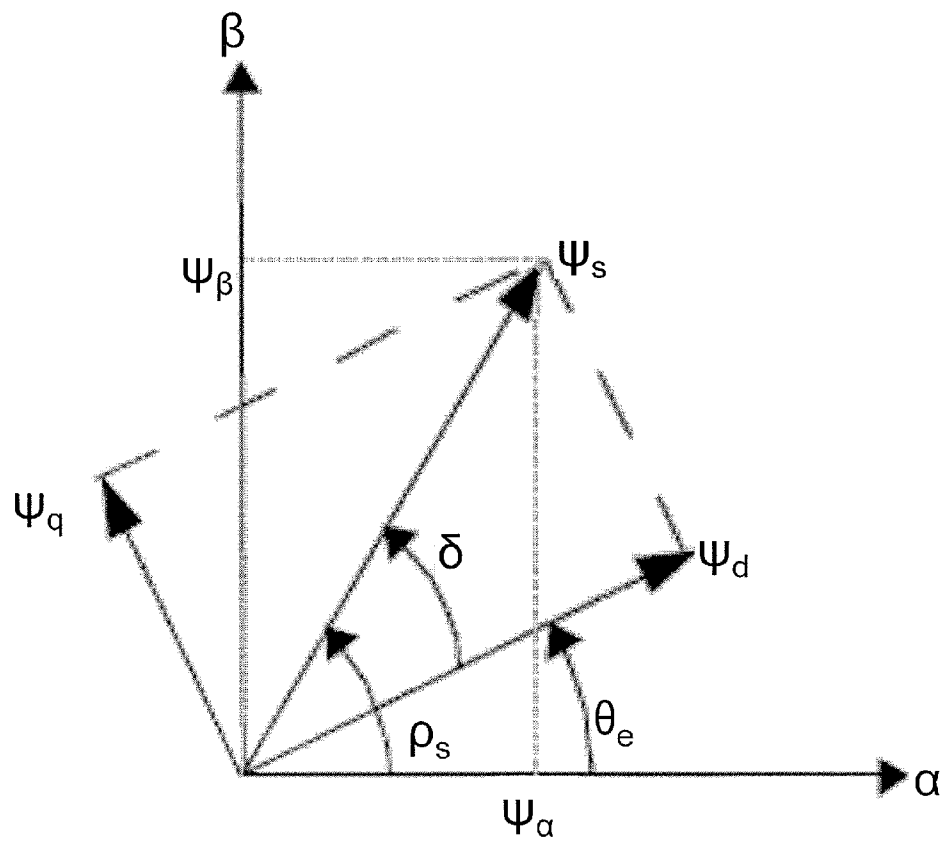
[図29]

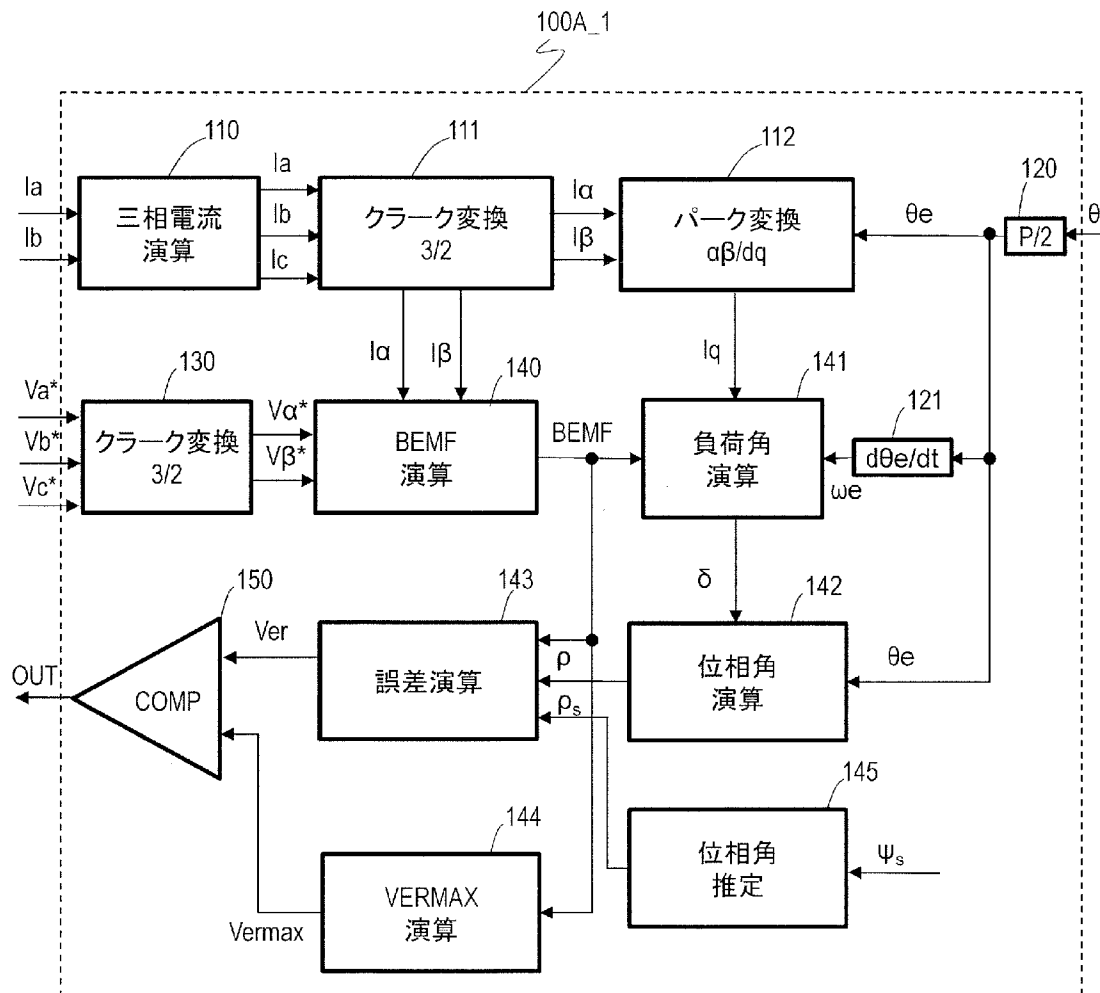


[図30]

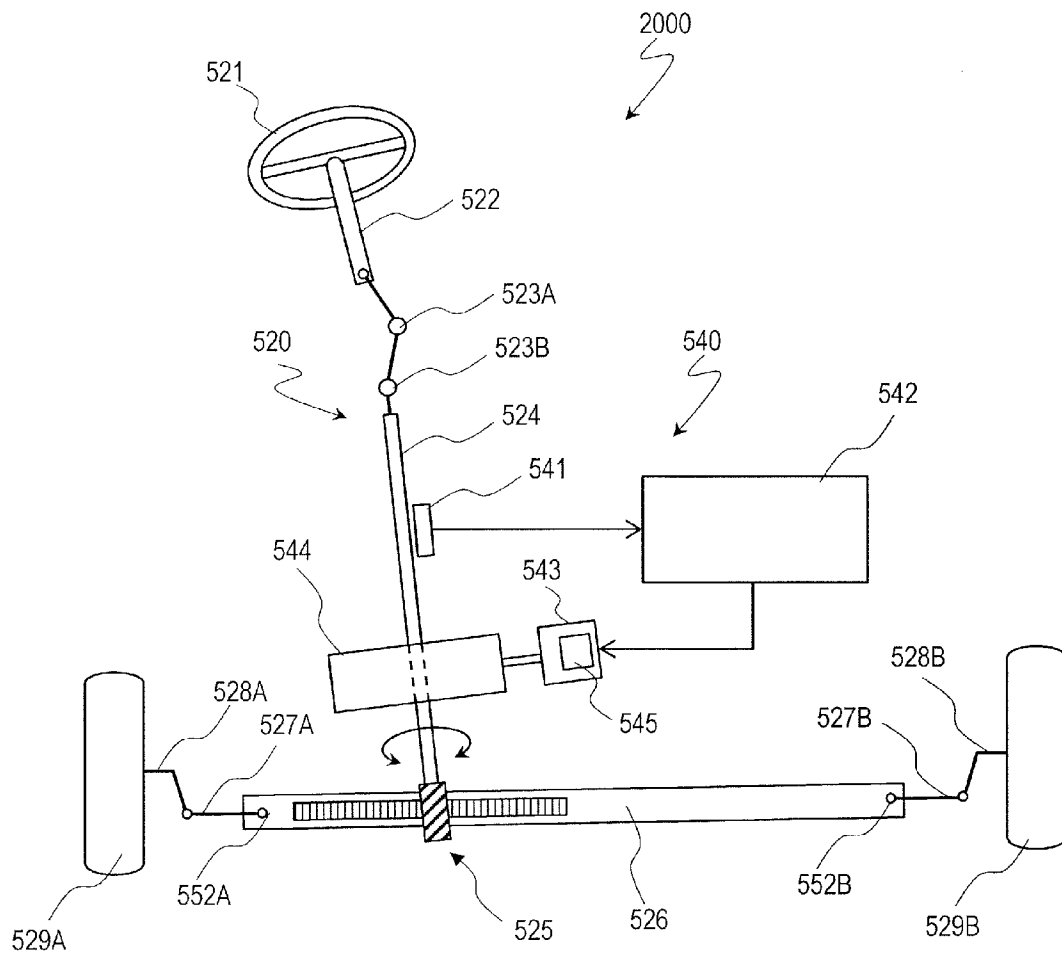


[図31]





[図33]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/026434

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02P21/06(2016.01)i, H02P21/18(2016.01)i, H02P21/22(2016.01)i, H02P27/06(2006.01)i

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02P21/06, H02P21/18, H02P21/22, H02P27/06

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2017

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2006-166677 A (Hitachi, Ltd.), 22 June 2006 (22.06.2006), entire text; all drawings & US 2006/0125439 A1 entire text; all drawings	1-17
A	JP 2012-114974 A (Toshiba Corp.), 14 June 2012 (14.06.2012), paragraphs [0030] to [0038]; fig. 5 (Family: none)	1-17
A	JP 2012-166776 A (Toyota Motor Corp.), 06 September 2012 (06.09.2012), entire text; all drawings (Family: none)	1-17

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

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

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

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

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

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

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

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

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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
27 September 2017 (27.09.17)

Date of mailing of the international search report
10 October 2017 (10.10.17)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/026434

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2010-29029 A (JTEKT Corp.), 04 February 2010 (04.02.2010), entire text; all drawings (Family: none)	1-17

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H02P21/06(2016.01)i, H02P21/18(2016.01)i, H02P21/22(2016.01)i, H02P27/06(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H02P21/06, H02P21/18, H02P21/22, H02P27/06

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2006-166677 A（株式会社日立製作所）2006.06.22, 全文、全図 & US 2006/0125439 A1, 全文、全図	1-17
A	JP 2012-114974 A（株式会社東芝）2012.06.14, 段落 [0030] - [0038]、図5（ファミリーなし）	1-17
A	JP 2012-166776 A（トヨタ自動車株式会社）2012.09.06, 全文、全図（ファミリーなし）	1-17

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

27.09.2017

国際調査報告の発送日

10.10.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

田村 恵里加

3 V

4 6 5 6

電話番号 03-3581-1101 内線 3357

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2010-29029 A (株式会社ジェイテクト) 2010.02.04, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-17