

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4168252号
(P4168252)

(45) 発行日 平成20年10月22日(2008.10.22)

(24) 登録日 平成20年8月15日(2008.8.15)

(51) Int. Cl.		F I	
H02P 9/00	(2006.01)	H02P 9/00	F
F03B 15/08	(2006.01)	F03B 15/08	
F03B 15/16	(2006.01)	F03B 15/16	
F03D 7/04	(2006.01)	F03D 7/04	Z
F03D 9/00	(2006.01)	F03D 9/00	B

請求項の数 10 (全 22 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2002-379675 (P2002-379675)
 (22) 出願日 平成14年12月27日(2002.12.27)
 (65) 公開番号 特開2004-215345 (P2004-215345A)
 (43) 公開日 平成16年7月29日(2004.7.29)
 審査請求日 平成17年11月15日(2005.11.15)

(73) 特許権者 000006622
 株式会社安川電機
 福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号
 (74) 代理人 100123788
 弁理士 官崎 昭夫
 (74) 代理人 100127454
 弁理士 緒方 雅昭
 (74) 代理人 100088328
 弁理士 金田 暢之
 (74) 代理人 100106297
 弁理士 伊藤 克博
 (74) 代理人 100106138
 弁理士 石橋 政幸

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 発電システムおよびその制御方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

動力エネルギーを回転エネルギーに変換するタービンと、前記タービンの回転エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機と、前記発電機により得られた電気エネルギーの電力制御を行う電力制御装置と、前記電力制御装置の指令に従って入力および出力の電力を制御する電力変換装置とを備えた発電システムにおいて、

前記電力制御装置が、

発電機の出力電圧と出力電流を静止 d - q 座標系に変換することにより、2相電流および2相電圧を算出する3相 - 2相変換器と、

前記3相 - 2相変換器により算出された2相電流および2相電圧から前記発電機の出力を算出する発電機出力演算部と、

前記3相 - 2相変換器により算出された2相電流および2相電圧から誘起電圧を検出する誘起電圧検出器と、

前記誘起電圧検出器により検出された誘起電圧から誘起電圧の位相を検出する位相検出器と、

前記位相検出器により検出された誘起電圧の位相を微分することにより誘起電圧の回転速度を算出して、前記発電機の回転速度を推定する微分器と、

前記微分器により推定された速度推定値と、前記発電機出力演算部により求められた前記発電機の出力とを用いて前記タービンの出力を、前記発電機の出力に発電システムにおける電気損失と機械損失を加算することにより算出するタービン出力演算器と、

10

20

を備えていることを特徴とする発電システム。

【請求項 2】

動力エネルギーを回転エネルギーに変換するタービンと、前記タービンの回転エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機と、前記発電機により得られた電気エネルギーの電力制御を行う電力制御装置と、前記電力制御装置の指令に従って入力および出力の電力を制御する電力変換装置とを備えた発電システムにおいて、

前記電力制御装置が、

発電機の出力電圧と出力電流を静止 d - q 座標系に変換することにより、2 相電流および 2 相電圧を算出する 3 相 - 2 相変換器と、

前記 3 相 - 2 相変換器により算出された 2 相電流および 2 相電圧から前記発電機の出力を算出する発電機出力演算部と、

前記 3 相 - 2 相変換器により算出された 2 相電流および 2 相電圧から回転子磁束を検出する回転子磁束検出器と、

前記回転子磁束検出器により検出された回転子磁束から回転子磁束の位相を検出する位相検出器と、

前記位相検出器により検出された回転子磁束の位相を微分することにより回転子磁束の回転速度を算出して、前記発電機の回転速度を推定する微分器と、

前記微分器により推定された速度推定値と、前記発電機出力演算部により求められた前記発電機の出力とを用いて前記タービンの出力を、前記発電機の出力に発電システムにおける電気損失と機械損失を加算することにより算出するタービン出力演算器と、

を備えていることを特徴とする発電システム。

【請求項 3】

前記電力制御装置が、

前記タービン出力演算器により求められたタービンの出力と、前記発電機速度演算部により求められた速度推定値とからタービンのトルクを算出するタービントルク推定器と、

前記タービントルク推定器により求められたタービンのトルクから速度指令値を算出する最大効率運転制御器と、

をさらに備えている請求項 1 または 2 記載の発電システム。

【請求項 4】

前記最大効率運転制御器が、

前記タービントルク推定器により求められたタービンのトルクを一定の時間間隔でサンプリングして、今回のタービンのトルク $T_{tur}(n)$ とし、前回のタービンのトルクを $T_{tur}(n-1)$ とし、サンプリング間隔を t_s とした場合に、 $(T_{tur}(n) - T_{tur}(n-1)) / t_s$ を計算してトルクの変化率 $T_{tur}(n) / t_s$ を求めるトルク変化率演算器と、

タービンの特性によって決まる出力係数と前記トルクの変化率 T_{tur} / t_s の関係式の解を求める出力係数微分方程式演算器と、

前記出力係数微分方程式演算器により求められた解に基づいて前記速度指令値を求める発電速度指令部と、

から構成されている請求項 3 記載の発電システム。

【請求項 5】

前記電力制御装置が、

前記タービン出力演算器により求められたタービンの出力を一定の時間間隔でサンプリングして、今回のタービンの出力 $P_{tur}(n)$ と前回の出力 $P_{tur}(n-1)$ の差 $P(n)$ を演算する出力変化演算器と、前記出力変化演算器により算出された差 $P(n)$ に比例ゲインを乗算することにより微細速度指令値を算出する比例ゲイン乗算器と、前記比例ゲイン乗算器により算出された微細速度指令値の絶対値を一定の制限値以下に制限するリミッタと、から構成される微細補正制御器と、

前記最大効率運転制御器により算出された速度指令値に、前記微細補正制御器により算出された微細速度指令を加算して、新たな速度指令値として出力する加算器と、

10

20

30

40

50

をさらに備えている請求項 3 または 4 記載の発電システム。

【請求項 6】

動力エネルギーを回転エネルギーに変換するタービンと、前記タービンの回転エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機と、前記発電機により得られた電気エネルギーの電力制御を行う電力制御装置と、前記電力制御装置の指令に従って入力および出力の電力を制御する電力変換装置とを備えた発電システムの制御を行うための、発電システムの制御方法であって、

前記発電機出力電圧と出力電流を静止 d - q 座標系に変換することにより 2 相電流および 2 相電圧を算出し、該 2 相電流および 2 相電圧から前記発電機出力を算出するステップと、

前記 2 相電流および 2 相電圧から誘起電圧を検出するステップと、

検出された前記誘起電圧から誘起電圧の位相を検出するステップと、

検出された前記誘起電圧の位相を微分することにより誘起電圧の回転速度を算出して、前記発電機の回転速度を推定するステップと、

推定された前記速度推定値と、算出された前記発電機出力とを用いて前記タービンの出力を $\text{タービン出力} = \text{発電機出力} + (\text{電気損失} + \text{機械損失})$ により算出するステップとを備えている発電システムの制御方法。

10

【請求項 7】

動力エネルギーを回転エネルギーに変換するタービンと、前記タービンの回転エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機と、前記発電機により得られた電気エネルギーの電力制御を行う電力制御装置と、前記電力制御装置の指令に従って入力および出力の電力を制御する電力変換装置とを備えた発電システムの制御を行うための、発電システムの制御方法であって、

20

前記発電機出力電圧と出力電流を静止 d - q 座標系に変換することにより 2 相電流および 2 相電圧を算出し、該 2 相電流および 2 相電圧から前記発電機出力を算出するステップと、

前記 2 相電流および 2 相電圧から回転子磁束を検出するステップと、

検出された前記回転子磁束から回転子磁束の位相を検出するステップと、

検出された前記回転子磁束の位相を微分することにより回転子磁束の回転速度を算出して、前記発電機の回転速度を推定するステップと、

30

推定された前記速度推定値と、算出された前記発電機出力とを用いて前記タービンの出力を $\text{タービン出力} = \text{発電機出力} + (\text{電気損失} + \text{機械損失})$ により算出するステップとを備えている発電システムの制御方法。

【請求項 8】

算出された前記タービンの出力と算出された前記速度推定値とからタービンのトルクを算出するステップと、

算出された前記タービンのトルクから速度指令値を算出するステップと、

をさらに備えている請求項 6 または 7 記載の発電システムの制御方法。

【請求項 9】

算出された前記タービンのトルクから速度指令値を算出するステップが、

40

算出された前記タービンのトルクを一定の時間間隔でサンプリングして、今回のタービンのトルク $T_{tur}(n)$ とし、前回のタービンのトルクを $T_{tur}(n-1)$ とし、サンプリング間隔を t_s とした場合に、 $(T_{tur}(n) - T_{tur}(n-1)) / t_s$ を計算してトルクの変化率 $T_{tur}(n) / t_s$ を求めるステップと、

タービンの特性によって決まる出力係数と前記トルクの変化率 T_{tur} / t_s の関係式の解を求めるステップと、

算出された前記解に基づいて前記速度指令値を求めるステップと、

から構成されている請求項 8 記載の発電システムの制御方法。

【請求項 10】

算出された前記タービンの出力を一定の時間間隔でサンプリングして、今回のタービン

50

の出力 $P_{tur}(n)$ と前回の出力 $P_{tur}(n-1)$ の差 $P(n)$ を演算するステップと、
算出された前記差 $P(n)$ に比例ゲインを乗算することにより微細速度指令値を算出するステップと、

算出された前記微細速度指令値の絶対値を一定の制限値以下に制限するステップと、
算出された前記速度指令値に、算出された前記微細速度指令値を加算して、新たな速度指令値として出力するステップと、

をさらに備えている請求項 8 または 9 記載の発電システムの制御方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、風力や水力等の動力エネルギーを回転エネルギーに変換して発電を行う発電システムにおいて、特に発電機を最大効率で運転するための発電システムの制御方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

従来の発電システムの例として従来の風力発電システムの構成を図 10 に示す。この従来の風力発電システムは、図 10 に示すように、風力を取り込むための風車 1 と、風車 1 の回転数を変速して伝達するためのギア/カップリング 2 と、発電機 3 と、電力変換装置 4 と、電力制御装置 9 5 と、速度センサ 8 とから構成され、負荷 6 に対して発電した電力を供給している。

【0003】

次に、この従来の風力発電システムの動作について説明する。風車 1 が回転することによって得られた風力エネルギーは、ギア/カップリング 2 によって回転数の変速が行われた後に発電機 3 に伝達される。発電機 3 は、この風力エネルギーを電気的エネルギーに変換する。発電機 3 によって得られた電気エネルギーは、電力変換装置 4 によって制御された後に負荷 6 に伝えられる。電力制御装置 9 5 は速度センサ 8 から風車 1 の軸速度の情報を取り入れ電力変換装置 4 の制御を行う。発電機 3 には、同期発電機以外に誘導電動機や IPM (Interior Permanent Magnet) モータ (内部永久磁石同期電動機) 等の交流電動機も使用される。

【0004】

このような風力発電システムでは、得られる電力は風速によって影響を受けることになる。そして、風速は一定ではなく常に変動している。そのため、このような風力発電システムでは、発電効率を高めるために、風速に応じて求まる最適な軸速度で発電機 3 を運転する必要がある。具体的には、発電機 3 の運動回転数が風速に応じて変化しない速度一定制御、あるいは風速に応じて発電機 3 の運転回数を変化させることによってエネルギー利用度すなわち発電効率を高める軸速度可変制御が電力制御装置 9 5 によって行われる。

【0005】

そして、このような軸速度一定制御、軸速度可変制御を行うには、軸の速度を検出する必要があり、従来の風力発電システムでは軸速度を検出するためにエンコーダ等の速度センサ 8 が用いられていた。例えば、風車の軸速度検出にエンコーダを使用している風力発電システムが、特許文献 1 等に記載されている。

【0006】

しかし、風車の軸速度の検出にエンコーダ等の速度センサ 8 を設けている従来の風力発電システムでは、速度センサ 8 から電力制御装置 9 5 まで配線を設ける必要がある。そのため、速度センサ 8 から電力制御装置 9 5 までの距離が長くなると配線自体も長くなり、断線等による信頼性の劣化が問題となる場合があった。さらに、風車が回転している間は速度センサも常に回転することになるため、速度センサ自体の寿命が信頼性の劣化を招いてしまうという問題もあった。さらに、速度センサを設けることによってコストの増加を招くという問題もあった。

【0007】

10

20

30

40

50

ここでは、タービンとして風車を用いる風力発電システムを用いて説明したが、風車以外のタービンにより動力エネルギーを回転エネルギーに変換して発電を行う発電システムについても同様な問題が発生する。

【0008】

【特許文献1】

特開2002-84797号公報

【0009】

【発明が解決しようとする課題】

上述した従来の発電システムでは、効率的な発電を行うためには、タービンの軸速度を検出するために速度センサが必要となるため、信頼性の劣化、コストの増加を招いてしまうという問題点があった。

10

【0010】

本発明の目的は、タービンの軸速度を検出するための速度センサを使用せずに発電機からの速度情報をセンサレスで得ることにより高信頼性、回路の簡略化、コストの低減を図ることができる発電システムおよびその制御方法を提供することである。さらに本発明は、風速センサなどの動力源のエネルギー量検出手段を使用せずに高効率運転を実現することを目的とする。

【0011】

【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するために、本発明の発電システムは、動力エネルギーを回転エネルギーに変換するタービンと、前記タービンの回転エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機と、前記発電機により得られた電気エネルギーの電力制御を行う電力制御装置と、前記電力制御装置の指令に従って入力および出力の電力を制御する電力変換装置とを備えた発電システムにおいて、

20

前記電力制御装置が、

発電機の出力電圧と出力電流を静止 $d - q$ 座標系に変換することにより、2相電流および2相電圧を算出する3相 - 2相変換器と、

前記3相 - 2相変換器により算出された2相電流および2相電圧から前記発電機の出力を算出する発電機出力演算部と、

前記3相 - 2相変換器により算出された2相電流および2相電圧から誘起電圧を検出する誘起電圧検出器と、

30

前記誘起電圧検出器により検出された誘起電圧から誘起電圧の位相を検出する位相検出器と、

前記位相検出器により検出された誘起電圧の位相を微分することにより誘起電圧の回転速度を算出して、前記発電機の回転速度を推定する微分器と、

前記微分器により推定された速度推定値と、前記発電機出力演算部により求められた前記発電機の出力とを用いて前記タービンの出力を、前記発電機の出力に発電システムにおける電気損失と機械損失を加算することにより算出するタービン出力演算器と

を備えていることを特徴とする。

【0012】

40

また、本発明の他の発電システムは、動力エネルギーを回転エネルギーに変換するタービンと、前記タービンの回転エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機と、前記発電機により得られた電気エネルギーの電力制御を行う電力制御装置と、前記電力制御装置の指令に従って入力および出力の電力を制御する電力変換装置とを備えた発電システムにおいて、

前記電力制御装置が、

発電機の出力電圧と出力電流を静止 $d - q$ 座標系に変換することにより、2相電流および2相電圧を算出する3相 - 2相変換器と、

前記3相 - 2相変換器により算出された2相電流および2相電圧から前記発電機の出力を算出する発電機出力演算部と、

50

前記 3 相 - 2 相変換器により算出された 2 相電流および 2 相電圧から回転子磁束を検出する回転子磁束検出器と、

前記回転子磁束検出器により検出された回転子磁束から回転子磁束の位相を検出する位相検出器と、

前記位相検出器により検出された回転子磁束の位相を微分することにより回転子磁束の回転速度を算出して、前記発電機の回転速度を推定する微分器と、

前記微分器により推定された速度推定値と、前記発電機出力演算部により求められた前記発電機の出力とを用いて前記タービンの出力を、前記発電機の出力に発電システムにおける電気損失と機械損失を加算することにより算出するタービン出力演算器と

を備えていることを特徴とする。

10

【 0 0 1 3 】

本発明によれば、発電機の出力電圧および出力電流から誘起電圧または回転子磁束を求め、この誘起電圧の位相または回転子磁束の位相から発電機の回転速度を推定し、この速度推定値と発電機の出力とからタービンの出力を算出するようにしているため、発電機の軸速度を検出するための速度センサを必要とすることなくタービンの出力を算出することができ回路の簡略化、低コスト化および高信頼性を実現することができる。

【 0 0 1 4 】

また、本発明の他の発電システムによれば、前記電力制御装置が、前記タービン出力演算器により求められたタービンの出力と、前記発電機速度演算部により求められた速度推定値とからタービンのトルクを算出するタービントルク推定器と、前記タービントルク推定器により求められたタービンのトルクから速度指令値を算出する最大効率運転制御器とをさらに備えている。

20

【 0 0 1 5 】

本発明によれば、タービン出力と速度推定値とから、発電機に入力されたパワーとタービンのトルクとを算出し、この算出したタービンのトルクと速度推定値とタービンの出力係数とにより発電機の効率が最大となる速度指令を算出し、発電機の軸速度を速度指令に一致させるような制御を行うようにしているため、入力エネルギーに対して常に最大の効率で運転することが可能となる。

【 0 0 1 6 】

さらに、前記最大効率運転制御器を、前記タービントルク推定器により求められたタービンのトルクを一定の時間間隔でサンプリングして、今回のタービンのトルク $T_{tur}(n)$ とし、前回のタービンのトルクを $T_{tur}(n-1)$ とし、サンプリング間隔を t_s とした場合に、 $(T_{tur}(n) - T_{tur}(n-1)) / t_s$ を計算してトルクの変化率 $T_{tur}(n) / t_s$ を求めるトルク変化率演算器と、

30

タービンの特性によって決まる出力係数と前記トルクの変化率 T_{tur} / t_s の関係式の解を求める出力係数微分方程式演算器と、

前記出力係数微分方程式演算器により求められた解に基づいて前記速度指令値を求める発電機速度指令部とから構成するようにしてもよい。

【 0 0 1 7 】

40

さらに、本発明の他の発電システムでは、前記電力制御装置が、前記タービン出力演算器により求められたタービンの出力を一定の時間間隔でサンプリングして今回のタービンの出力 $P_{tur}(n)$ と前回の出力 $P_{tur}(n-1)$ の差 $P(n)$ を演算する出力変化演算器と、前記出力変化演算器により算出された差 $P(n)$ に比例ゲインを乗算することにより微細速度指令値を算出する比例ゲイン乗算器と、前記比例ゲイン乗算器により算出された微細速度指令値の絶対値を一定の制限値以下に制限するリミッタと、から構成される微細補正制御器と、

前記最大効率運転制御器により算出された速度指令値に、前記微細補正制御器により算出された微細速度指令を加算して、新たな速度指令値として出力する加算器とをさらに備えている。

50

【 0 0 1 8 】

本発明によれば、タービン出力の変化から微細速度指令を算出して速度指令に加算するようにしているので、速い過渡応答特性と安定的な微細調整の両方が実現される速度指令の算出が可能となり、設計値と実際値とが異なる場合においても常に最大効率を得ることができる。

【 0 0 1 9 】

【発明の実施の形態】

次に、本発明の実施の形態について図面を参照して詳細に説明する。

【 0 0 2 0 】

まず、本発明における発電機効率を最大とするための風速と発電機の軸速度の関係について説明する。 10

【 0 0 2 1 】

< 一般的な風車の出力特性 >

一般的に風車の出力 P_{tur} は下記の式 (1) のように表すことができる。

【 0 0 2 2 】

【数 1】

$$P_{tur} = c_p k_{sys} V_{wind}^3 \quad (1)$$

20

【 0 0 2 3 】

上記の式 (1) で風車定数 k_{sys} は風車の羽の面積と空気密度によって決まる定数で制御時急に可変するパラメータではない。また風の速度 V_{wind} は制御できないパラメータである。風速 V_{wind} と発電機の軸速度 W_{gen} の周速比は発電機と風車のギア比 k_c 、風車の半径 R_v を用いて下記の式 (2) に示すように表すことができる。

【 0 0 2 4 】

【数 2】

$$\lambda = R_v k_c \frac{W_{gen}}{V_{wind}} \quad (2)$$

30

【 0 0 2 5 】

動力係数 C_p は周速比によって図 1 に示したような可変するパラメータである。したがって、発電中に λ_{op} を制御して最大効率速度比 λ_{op} を維持するように制御すれば動力係数 C_p は最大値 $C_{p(max)}$ になるので、システムの最大効率運転が可能である。 λ_{op} は風車の設計によって決まる定数である。最大効率運転を維持するためには発電機の速度指令 W_{gen}^* を下記の式 (3) より求めて出力する。

【 0 0 2 6 】

【数 3】

$$W_{gen}^* = \left(\frac{\lambda_{op}}{R_v k_c} \right) V_{wind} \quad (3)$$

40

【 0 0 2 7 】

上記の式 (3) で λ_{op} 、 R_v 、 k_c は風車の設計値の一部なので把握できるが、風速 V_{wind} は未知の値である。したがって、最大効率運転のためには風速 V_{wind} の瞬時値が必要になる。

【 0 0 2 8 】

発電機電力 P_{gen} は、発電機速度 W_{gen} と発電機トルク T_{gen} を用いて下記の式 (4) に示すように表すことができる。 50

【 0 0 2 9 】

【 数 4 】

$$P_{gen} = W_{gen} T_{gen} \quad (4)$$

【 0 0 3 0 】

あるいは、発電機の静止 d - q 軸座標の 2 相電圧と電流を用いて下記の式 (5) により発電機電力 P_{gen} を算出することもできる。

【 0 0 3 1 】

10

【 数 5 】

$$P_{gen} = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \quad (5)$$

【 0 0 3 2 】

風車システムの損失分 P_{loss} は電気損失と機械損失で構成されている。電気損失は、発電機の等価抵抗と発電機を制御しているインバータの電力半導体のスイッチング周波数によって決まる電気損失定数 k_l に発電機電力 P_{gen} を掛けて求める。機械損失は機械摩擦定数 B_{sys} に発電機速度の 2 乗の W_{gen}^2 を掛けて求める。風車システムの損失分 P_{loss} は電気損失に機械損失を足して下記の式 (6) に示すように求める。

20

【 0 0 3 3 】

【 数 6 】

$$P_{loss} = k_l P_{gen} + B_{sys} W_{gen}^2 \quad (6)$$

【 0 0 3 4 】

風車の出力 P_{tur} は、求めた発電機電力 P_{gen} に出力の損失分 P_{loss} を足して下記の式 (7) により求められる。

30

【 0 0 3 5 】

【 数 7 】

$$P_{tur} = P_{gen} + P_{loss} \quad (7)$$

【 0 0 3 6 】

求めた風車の出力 P_{tur} と発電機の速度より風速は風車のデータから決められる。本発明では発電機の速度として、速度推定値

【 0 0 3 7 】

40

【 外 1 】

$$\hat{W}_{gen}$$

【 0 0 3 8 】

を用いて風車の出力 P_{tur} を求める。

【 0 0 3 9 】

< 風車の最大出力点 >

一般的に発電機の速度と風速の間には最大出力点が存在する。例えば図 2 に示したように発電機の速度 W_{gen} が $W_r(A)$ で風速 V_{wind} が V_{w1} の場合には風車の最大出力点は $P_{tur}(A)$

50

になる。発電機の世界速度 W_{gen} が $W_r(B)$ で風速 V_{wind} が V_{w2} の場合には風車の出力は最大点が $P_{tur}(B)$ となる。

【 0 0 4 0 】

< 過渡応答制御の原理 >

次に、過渡応答制御の関する原理について説明する。

一般的に風車のトルク T_{tur} は下記の式 (8) のように表すことができる。

【 0 0 4 1 】

【 数 8 】

$$T_{tur} = P_{tur} / k_c W_{gen} \quad (8) \quad 10$$

【 0 0 4 2 】

発電機の軸速度指令に発電機の軸速度が追従するように速度制御する機能を有する構成において、軸速度指令が一定の場合、トルクの時間に関する微分値は下記の式 (9) のように表すことができる。

【 0 0 4 3 】

【 数 9 】

$$\frac{dT_{tur}}{dt} = \frac{\pi}{2k_c} \rho R_v^5 W_{gen}^2 \frac{d}{dt} \left(\frac{c_p}{\lambda^3} \right) \quad (9) \quad 20$$

【 0 0 4 4 】

上記の式 (9) で ρ は空気の密度である速度制御器の制御周期 t_s が短い時は、速度制御器の出力であるトルク変換量 T_{tur} を用いて、式 (9) を下記の式 (10) のように表すことができる。

【 0 0 4 5 】

【 数 10 】

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{c_p}{\lambda^3} \right) = \frac{2k_c}{\pi \rho R_v^5 W_{gen}^2} \frac{\Delta T_{tur}}{t_s} \quad (10) \quad 30$$

【 0 0 4 6 】

一般的に風車の出力係数 C_p は λ に関する m 次の多項式であり、式 (11) のような表すことができる。

【 0 0 4 7 】

【 数 11 】

$$c_p(\lambda) = c_0 + c_1 \lambda + c_2 \lambda^2 + \dots + c_m \lambda^m \quad (11) \quad 40$$

【 0 0 4 8 】

この式 (11) の C_0 から C_n までは、風車の設計によって決まる既知の定数である。この式 (11) の C_p () を式 (10) に代入して整理すると、下記の式 (12) を得ることができる。

【 0 0 4 9 】

【 数 12 】

$$\frac{d}{dt} \{c_0 \lambda^{-3} + c_1 \lambda^{-2} + c_2 \lambda^{-1} + \dots + c_m \lambda^{m-3}\} - \frac{2k_c}{\pi \rho R_v^5} \frac{1}{W_{gen}^2} \frac{\Delta T_{tur}}{t_s} = 0 \quad (12)$$

【0050】

ここで、 λ^{-1} を x に置換して上記の(12)式を整理すると式(13)のように表すことができる。

【0051】

【数13】

$$3c_0 x^2 + 2c_1 x + \left(c_2 - \frac{2k_c}{\pi \rho R_v^5} \frac{1}{W_{gen}^2} \frac{\Delta T_{tur}}{t_s} \right) + \dots + c_m \frac{d}{dt} (x^{3-m}) = 0 \quad (13)$$

10

【0052】

式(13)の解を

【0053】

【外2】

\hat{x}

20

【0054】

とすると下記の式(14)に示すように風速を推定することができる。

【0055】

【数14】

$$\hat{V}_{wind} = R_v k_c \hat{W}_{gen} \hat{x} \quad (14)$$

【0056】

最終的に発電機の速度の代わりに推定速度

30

【0057】

【外3】

\hat{W}_{gen}

【0058】

を用いて、発電機の軸速度指令は(15)式のように表すことができる。

【0059】

【数15】

$$W_{gl}^* = \lambda_p \hat{W}_{gen} \hat{x} \quad (15)$$

40

【0060】

従って、風車の出力係数 C_p と発電機の速度及びトルクに基づいて式(10)から式(15)までのように微分方程式の解を求めて発電機の軸速度指令 W_{g1}^* を演算することができる。

【0061】

< 微細補正制御の原理 >

50

上記では、トルクの変換量から風速を検出して軸速度指令を演算して発電効率を制御することについて説明した。次に、動力係数 C_p の誤差等風力発電システムの定数の変化に変わらず効率運転制御の精密度を上げるための微細補正制御の方法の原理について、図2を参照して説明する。

【0062】

最初風車が図2におけるA点で運転しているものとする。風速が V_{w1} から V_{w2} に変わっても軸速度指令がまだ一定なので、速度は $W_r(A)$ で変わらずにトルクだけが違って運転点はAからa1に移る。式(11)から式(15)ではこのトルクの変化から風速の変化を判断し発電機の速度指令 W_{g1}^* を出力して過渡応答制御をする。しかし発電機の速度が指令速度 W_{g1}^* を追従しても発電システムの定数の変化及び誤差のため実際の運転点a2と新しい最大効率運転点Bとは一致しない可能性がある。この問題点を解決するために本発明では微細補正制御を行う。今回の検出電力を $P_{tur}(n)$ 、前回の検出電力を $P_{tur}(n-1)$ とすると、下記の式(16)に示すような式が得られる。

【0063】

【数16】

$$\begin{aligned} \Delta P(n) &= P_{tur}(n) - P_{tur}(n-1) \\ \Delta W_1^*(n) &= k_{pw} * \Delta P(n) \end{aligned} \quad (16)$$

【0064】

ここで k_{pw} は比例ゲインである。補正值が最大値を制限するために制限器で $W_1^*(n)$ の絶対値を下記の式(17)のように制限値

【0065】

【外4】

$$W_c_lim$$

【0066】

以下に制限する。このような発電機の速度の補正により微細補正制御をすることができる。

【0067】

【数17】

$$\begin{aligned} \text{if } \Delta W_1^*(n) > W_c_lim \quad \Delta W_c^* &= W_c_lim \\ \text{if } \Delta W_1^*(n) < -W_c_lim \quad \Delta W_c^* &= -W_c_lim \\ \text{else } \Delta W_c^* &= \Delta W_1^*(n) \end{aligned} \quad (17)$$

【0068】

結果的に発電機の速度指令値は式(18)のように示すことができる。

【0069】

【数18】

$$W_{gen}^* = W_{g1}^* + \Delta W_c^* \quad (18)$$

【0070】

<速度推定方法>

次に、軸速度推定方法についての原理について説明する。

【 0 0 7 1 】

発電機の出力電流検出値

【 0 0 7 2 】

【外 5】

$$\hat{I}_u、\hat{I}_w$$

【 0 0 7 3 】

と 3 相出力電圧の直接検出、或は電圧の指令値から得られた発電機の相電圧検出値

10

【 0 0 7 4 】

【外 6】

$$\hat{V}_u、\hat{V}_w$$

【 0 0 7 5 】

を 3 相座標系から固定子の任意の位置の上に設定した静止 d - q 座標系に変換すると 2 相電流

【 0 0 7 6 】

【外 7】

20

$$\hat{I}_{ds}、\hat{I}_{qs}$$

【 0 0 7 7 】

は下記の (1 9) 式から、2 相電圧

【 0 0 7 8 】

【外 8】

$$\hat{V}_{ds}、\hat{V}_{qs}$$

30

【 0 0 7 9 】

は下記の (2 0) 式から得られる。ここで C_0 は任意の常数である。

【 0 0 8 0 】

【数 1 9】

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{ds} \\ \hat{I}_{qs} \end{bmatrix} = C_0 \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_u \\ -(\hat{I}_u + \hat{I}_w) \\ \hat{I}_w \end{bmatrix} \quad (19)$$

40

【 0 0 8 1 】

【数 2 0】

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{ds} \\ \hat{V}_{qs} \end{bmatrix} = C_0 \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_u \\ -(\hat{V}_u + \hat{V}_w) \\ \hat{V}_w \end{bmatrix} \quad (20)$$

【 0 0 8 2 】

50

< 速度推定実施例 1 >

永久磁石型同期発電機の誘起電圧は下記の式(21)から求めることができる。

【0083】

【数21】

$$\begin{aligned}\hat{E}_{ds} &= \hat{V}_{ds} + (R_{ds} + pL_{ds})\hat{I}_{ds} \\ \hat{E}_{qs} &= \hat{V}_{qs} + (R_{qs} + pL_{qs})\hat{I}_{qs}\end{aligned}\quad (21)$$

【0084】

ここで R_{ds} と R_{qs} は d 軸と q 軸の固定子側等価抵抗、 p は微分子、 L_{ds} と L_{qs} は d 軸と q 軸のインダクタンスである。一般的に 3 相対称交流発電機の d 軸と q 軸の誘起電圧 E_{ds} 、 E_{qs} は下記の式(22)のような特徴を持っている。

【0085】

【数22】

$$\begin{aligned}E_{ds} &= K_e W_{gen} \sin \theta_e \\ E_{qs} &= K_e W_{gen} \cos \theta_e\end{aligned}\quad (22)$$

【0086】

ここで、 K_e は発電機の定格電圧によって決められる電圧係数、 W_{gen} は発電機の電気角速度、 θ_e は誘起電圧の位相である。従って、発電機の誘起電圧の位相の推定値は下記の式(23)から求めることができる。

【0087】

【数23】

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1}(\hat{E}_{ds} / \hat{E}_{qs})\quad (23)$$

【0088】

発電機の回転速度は磁束の位相の推定値を微分して下記の式(24)から求めることができる。

【0089】

【数24】

$$\hat{W}_{gen} = \frac{2}{\text{Pole}} \frac{d\hat{\theta}_e}{dt}\quad (24)$$

【0090】

ここで pole は発電機の極数である。

【0091】

< 速度推定実施例 2 >

永久磁石型同期発電機で、静止 d - q 座標系上の回転子側の磁束は下記の式(25)から求めることができる。

【0092】

【数25】

10

20

30

40

$$\begin{aligned}\hat{\Phi}_d &= \int (\hat{V}_{ds} + (R_{ds} + pL_{ds})\hat{I}_{ds}) dt \\ \hat{\Phi}_q &= \int (\hat{V}_{qs} + (R_{qs} + pL_{qs})\hat{I}_{qs}) dt\end{aligned}\quad (25)$$

【 0 0 9 3 】

一般的に 3 相対称交流発電機の d 軸と q 軸の回転子磁束 $\hat{\Phi}_d$ 、 $\hat{\Phi}_q$ は下記の式 (26) のような特徴を持っている。

【 0 0 9 4 】

【 数 2 6 】

10

$$\begin{aligned}\hat{\Phi}_d &= k_\Phi \sin \theta_\Phi \\ \hat{\Phi}_q &= k_\Phi \cos \theta_\Phi\end{aligned}\quad (26)$$

【 0 0 9 5 】

ここで K は磁束系数、 θ_Φ は磁束の位相である。従って、発電機の磁束の位相の推定値は下記の式 (27) から求めることができる。

【 0 0 9 6 】

【 数 2 7 】

20

$$\hat{\theta}_\Phi = \tan^{-1}(\hat{\Phi}_{ds} / \hat{\Phi}_{qs})\quad (27)$$

【 0 0 9 7 】

発電機の回転速度は磁束の位相の推定値を微分して下記の式 (28) から求めることができる。

【 0 0 9 8 】

【 数 2 8 】

$$\hat{W}_{gen} = \frac{2}{\text{Pole}} \frac{d\hat{\theta}_\Phi}{dt}\quad (28)$$

30

【 0 0 9 9 】

次に、上記で説明したような制御方法を実現するための本発明の一実施形態の発電システムの具体的な構成を図 3 に示す。

【 0 1 0 0 】

図 3 は、本発明を風力発電システムに適用した実施形態である。図 3 において、図 10 中の構成要素と同一の構成要素には同一の符号を付し、説明を省略するものとする。

【 0 1 0 1 】

本実施形態の風力発電システムは、図 10 に示した従来の風力発電システムに対して、軸速度を検出する速度センサ 8 を取り除き、電力制御装置 9 5 を電力制御装置 5 に置き換えた構成となっている。本実施形態における電力制御装置 5 は、発電機の電力および回転数を制御する機能と、発電機 3 に流れる電流値および電圧値を検出して、これらの電流値および電圧値に基づいて発電機速度を推定する発電機速度推定機能とを有している。

40

【 0 1 0 2 】

図 3 に示した電力制御装置 5 において、発電機 3 の電流値および電圧値から最大効率運転制御を行うための速度指令 W_{gen}^* を求める機能を実現するための構成部分を図 4 に示す。

【 0 1 0 3 】

最大効率運転制御を行うための機能は、図 4 に示されるように、3 相 - 2 相変換器 9 0 6 と、発電機速度演算部 9 0 1 と、発電機出力演算部 9 0 2 と、過渡応答制御器 9 0 3 と、微細補正制御器 9 0 4 と、加算器 9 0 5 とから構成されている。

50

【 0 1 0 4 】

3相 - 2相変換器 9 0 6 は、発電機 3 の出力電圧と出力電流を静止 d - q 座標系に変換して、上記で説明した式 (1 9)、(2 0) を用いて、2相電流

【 0 1 0 5 】

【外 9】

$$\hat{I}_{ds}, \hat{I}_{qs}$$

【 0 1 0 6 】

と 2 相電圧

10

【 0 1 0 7 】

【外 1 0】

$$\hat{V}_{ds}, \hat{V}_{qs}$$

【 0 1 0 8 】

を求める。

【 0 1 0 9 】

発電機出力演算部 9 0 2 は、3相 - 2相変換器 9 0 6 により算出された 2 相電流および 2 相電圧から、発電機 3 の出力 P_{gen} を算出する。

20

【 0 1 1 0 】

次に、発電機速度演算部 9 0 1 の具体的な構成の一例を図 5 に示す。図 5 に示された例では、発電機速度演算部 9 0 1 は、誘起電圧検出器 4 0 2 と、位相検出器 4 0 3 と、微分器 4 0 4 とから構成されている。この例は、上述した速度推定実施例 1 に該当する。

【 0 1 1 1 】

誘起電圧検出器 4 0 2 は、上記で説明した式 (2 1) を用いて、3相 - 2相変換器 9 0 6 からの 2 相電流および 2 相電圧から、誘起電圧

【 0 1 1 2 】

【外 1 1】

$$\hat{E}_{ds}, \hat{E}_{qs}$$

30

【 0 1 1 3 】

を検出する。

【 0 1 1 4 】

位相検出器 4 0 3 は、上記で説明した式 (2 3) を用いて、誘起電圧検出器 4 0 2 により検出された誘起電圧から、誘起電圧の位相

【 0 1 1 5 】

【外 1 2】

$$\hat{\theta}_e$$

40

【 0 1 1 6 】

を検出する。

【 0 1 1 7 】

微分器 4 0 4 は、上記で説明した式 (2 4) を用いて、位相検出器 4 0 3 により検出された誘起電圧の位相の推定値を微分することにより、誘起電圧の回転速度即ち発電機 3 の回転速度の推定値である速度推定値を算出する。

50

【 0 1 1 8 】

また、図 4 に示した発電機速度演算部 9 0 1 の具体的な構成の他の例を図 6 に示す。図 6 に示された例では、発電機速度演算部 9 0 1 は、回転子磁束検出器 5 0 2 と、位相検出器 5 0 3 と、微分器 5 0 4 とから構成されている。この例は、上述した速度推定実施例 2 に該当する。

【 0 1 1 9 】

回転子磁束検出器 5 0 2 は、上記で説明した式 (2 5) を用いて、図 4 に示した 3 相 - 2 相変換器 9 0 6 により静止 d - q 座標系に変換された 2 相電流

【 0 1 2 0 】

【 外 1 3 】

10

$$\hat{I}_{ds}, \hat{I}_{qs}$$

【 0 1 2 1 】

と 2 相電圧

【 0 1 2 2 】

【 外 1 4 】

$$\hat{V}_{ds}, \hat{V}_{qs}$$

20

【 0 1 2 3 】

から、回転子磁束

【 0 1 2 4 】

【 外 1 5 】

$$\hat{\Phi}_d, \hat{\Phi}_q$$

【 0 1 2 5 】

を検出する。

【 0 1 2 6 】

位相検出器 5 0 3 は、上記で説明した式 (2 7) を用いて、回転子磁束検出器 5 0 2 により検出された回転子磁束から、回転子磁束の位相

【 0 1 2 7 】

【 外 1 6 】

$$\hat{\theta}_o$$

30

【 0 1 2 8 】

を検出する。

【 0 1 2 9 】

微分器 5 0 4 は、上記で説明した式 (2 8) を用いて、位相検出器 5 0 3 により検出された回転子磁束の位相から、回転子磁束の回転速度即ち発電機 3 の回転速度の推定値を算出する。

【 0 1 3 0 】

次に、図 4 中の過渡応答制御器 9 0 3 の具体的な構成を図 7 に示す。過渡応答制御器 9 0 3 は、図 7 に示されるように、風車出力演算器 6 0 1 と、風車のトルク推定器 6 0 2 と、最大効率運転制御器 6 0 3 とから構成されている。

【 0 1 3 1 】

40

50

風車出力演算器 601 は、タービン出力演算器として機能し、図 5 または図 6 に示した発電機速度演算部 901 により求められた発電機 3 の速度推定値

【0132】

【外17】

$$\hat{W}_{gen}$$

【0133】

と、発電機出力演算部 902 により求められた発電機の出力 P_{gen} とを用いて風車の出力 P_{tur} を式 (7) のように求める。

10

【0134】

風車のトルク推定器 602 は、タービントルク推定器として機能し、風車出力演算器 601 により求められた風車の出力 P_{tur} と、発電機速度演算部 901 により求められた速度推定値

【0135】

【外18】

$$\hat{W}_{gen}$$

20

【0136】

とから風車のトルク T_{tur} を式 (8) から求める。

【0137】

最大効率運転制御器 603 は、風車のトルク推定器 602 により求められた風車のトルク T_{tur} から、速度指令値 W_{g1}^* を算出する。この最大効率運転制御器 603 の具体的な構成を図 8 に示す。最大効率運転制御器 603 は、図 8 に示されるように、風車のトルクの変化率演算器 701 と、出力係数微分方程式演算器 702 と、発電速度指令部 703 とから構成されている。

【0138】

最大効率運転制御器 603 では、一定の時間間隔で風車のトルク T_{tur} をサンプリングして演算を行っている。ここで、サンプリング間隔を t_s 、今回のサンプリング時のトルクを $T_{tur}(n)$ 、前回のサンプリング時のトルクを $T_{tur}(n-1)$ として表現するものとする。

30

【0139】

風車のトルクの変化率演算器 701 は、 $(T_{tur}(n) - T_{tur}(n-1)) / t_s$ を計算してトルクの変化率 $T_{tur}(n) / t_s$ を求める。出力係数微分方程式演算器 702 は、風車の特性によって決まる式 (13) の出力係数 $C_p(\quad)$ と T_{tur} / t_s の関係式の解を求め、発電速度指令部 703 では式 (15) から速度の指令値 W_{g1}^* を求める。

【0140】

次に、図 4 中の微細補正制御器 904 の具体的な構成について図 9 に示す。微細補正制御器 904 は、図 9 に示されるように、出力変化演算器 801 と、比例ゲイン乗算器 802 と、リミッタ 803 とから構成されている。

40

【0141】

出力変化演算器 801 は、風車出力演算器 601 により求められた風車の出力 P_{tur} を一定の時間間隔でサンプリングしていて、上記で説明した式 (16) のうちの上式を用い、今回の風車の出力 $P_{tur}(n)$ と前回の出力 $P_{tur}(n-1)$ の差の $P(n)$ を演算する。比例ゲイン乗算器 802 は、上記で説明した式 (16) のうちの下式を用いて、出力変化演算器 801 により算出された $P(n)$ に比例ゲイン k_{pw} を乗算することにより微細速度指令値 $W_{g1}^*(n)$ を求める。リミッタ 803 では $W_{g1}^*(n)$ の絶対値を制限値

【0142】

50

【外 19】

W_c_lim

【0143】

以下に制限した微細速度指令値 $W_c^*(n)$ を出力する。

【0144】

加算器 905 は、過渡応答制御器 903 の最大効率運転制御器 603 により算出された速度指令値 W_{g1}^* に、微細補正制御器 904 のリミッタ 803 により制限された後の微細速度指令 W_c^* を加算して、新たな速度指令値 W_{gen}^* として出力する。

10

【0145】

本実施形態の発電システムによれば、風車出力 P_{tur} の変化から微細速度指令 W_c^* を算出して速度指令 W_{g1}^* に加算するようにしているので、速い過渡応答特性と安定的な微細調整の両方が実現される速度指令 W_{gen}^* の算出が可能となり、設計値と実際値とが異なる場合においても常に最大効率を得ることができる。

【0146】

また、本実施形態の発電システムによれば、風車出力と速度推定値とから、発電機に入力されたパワーと風車のトルクとを算出し、この算出した風車のトルクと速度推定値と風車の出力係数とにより発電機の効率が最大となる速度指令を算出し、発電機の軸速度を速度指令に一致させるような制御を行うようにしているので、入力エネルギーに対して常に最大の効率で運転することが可能となる。

20

【0147】

本実施形態の風力発電システムおよびその制御方法によれば、発電機 3 の効率を向上させることができるとともに、一般的に高価な発電機 3 の速度センサ及び風速センサを使用せずに外部動力による電力制御ができるようになり回路の簡略化、低コスト化および高信頼性を実現できる。

【0148】

なお、本実施形態では、風力を用いた発電を行う風力発電システムに本発明を適用した場合について説明したが、本発明はこれに限定されるものではなく、動力エネルギーを回転エネルギーに変換するタービンと流体とが図 2 の関係を持っているシステム、例えば水力発電システムなどにも同様に本発明を適用することができるものである。

30

【0149】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明の発電システムおよびその制御方法によれば、風車の軸速度を検出するための速度センサや風速を検出するための風速センサ等を必要とすることなく、発電機の効率的な制御を行うことができ、低コスト化および高信頼性を実現できるという効果を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】出力係数と速度比の関係を示す図である。

【図 2】風車の出力と発電機速度、風速の関係を示す図である。

40

【図 3】本発明の一実施形態の風力発電システムの構成を示すブロック図である。

【図 4】図 3 に示した電力制御装置 5 において、発電機 3 の電流値および電圧値から最大効率運転制御を行うための速度指令 W_{gen}^* を求める機能を実現するための構成部分を示す図である。

【図 5】図 4 中の発電機速度演算部 901 の構成の一例を示すブロック図である。

【図 6】図 4 中の発電機速度演算部 901 の構成の他の例を示すブロック図である。

【図 7】図 4 中の過渡応答制御器 903 の構成を示すブロック図である。

【図 8】図 7 中の最大効率運転制御器 603 の構成を示すブロック図である。

【図 9】図 4 中の微細補正制御器 904 の構成を示すブロック図である。

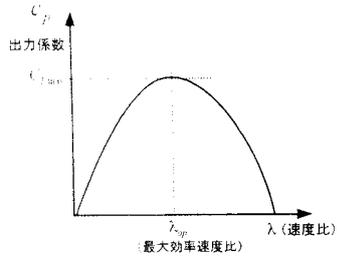
【図 10】従来の風力発電システムの構成を示すブロック図である。

50

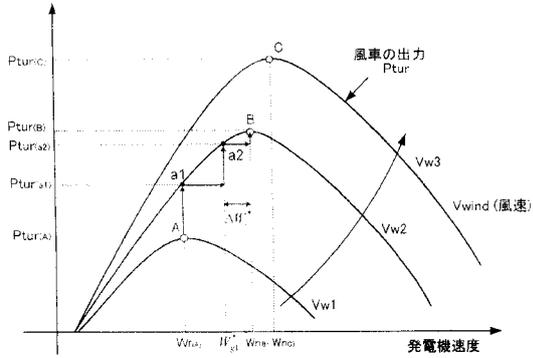
【符号の説明】

1	風車	
2	ギア/カップリング	
3	発電機	
4	電力変換装置	
5	電力制御回路	
6	負荷	
7	速度検出器	
8	速度センサ	
9 5	電力制御装置	10
4 0 2	誘起電圧検出器	
4 0 3	位相検出器	
4 0 4	微分器	
5 0 2	回転子磁束検出器	
5 0 3	位相検出器	
5 0 4	微分器	
6 0 1	風車出力演算器	
6 0 2	風車のトルク推定器	
6 0 3	最大効率運転制御器	
7 0 1	風車のトルクの変化率演算器	20
7 0 2	出力係数微分方程式演算器	
7 0 3	発電速度指令部	
8 0 1	出力変化演算器	
8 0 2	比例ゲイン乗算器	
8 0 3	リミッタ	
9 0 1	発電機速度演算部	
9 0 2	発電機出力演算部	
9 0 3	過渡応答制御器	
9 0 4	微細補正制御器	
9 0 5	加算器	30
9 0 6	3相 - 2相変換器	

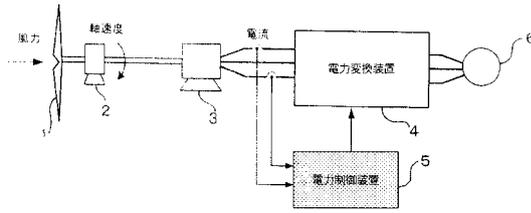
【図1】



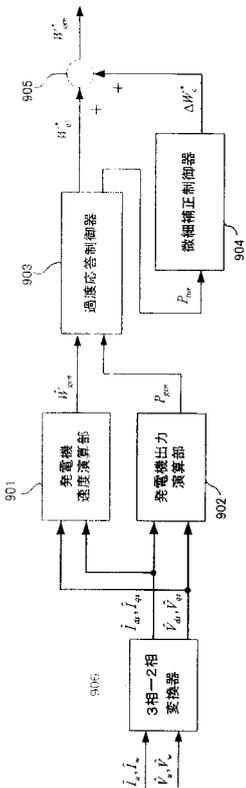
【図2】



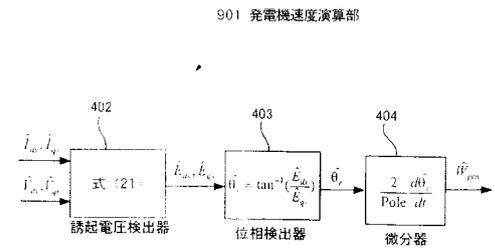
【図3】



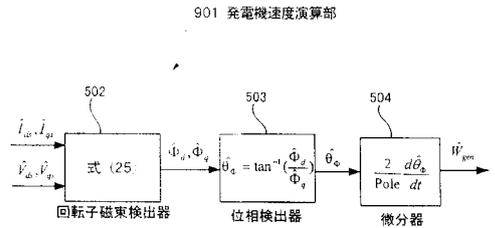
【図4】



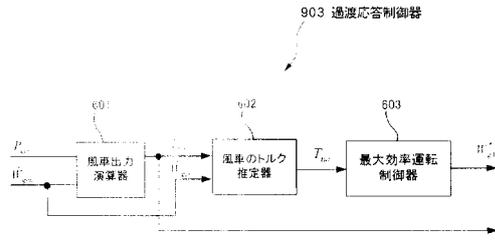
【図5】



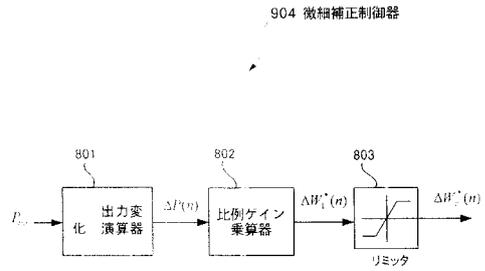
【図6】



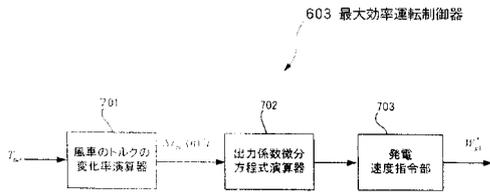
【図7】



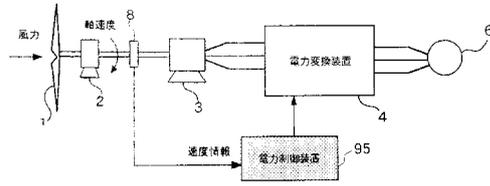
【図9】



【図8】



【図10】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 2 P 9/48 (2006.01) H 0 2 P 9/48 Z

(72)発明者 カン ジュンクー
福岡県北九州市八幡西区黒崎城石 2 番 1 号 株式会社安川電機内
(72)発明者 林 賛恵光
福岡県北九州市八幡西区黒崎城石 2 番 1 号 株式会社安川電機内
(72)発明者 森本 進也
福岡県北九州市八幡西区黒崎城石 2 番 1 号 株式会社安川電機内

審査官 西村 泰英

(56)参考文献 特表 2 0 0 1 - 5 1 2 8 0 4 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H02P 9/00
F03B 15/08
F03B 15/16
F03D 7/04
F03D 9/00
H02P 9/48