

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-106401

(P2017-106401A)

(43) 公開日 平成29年6月15日(2017.6.15)

(51) Int.Cl.		F I	テーマコード (参考)			
FO3D	80/00	(2016.01)	FO3D	11/00	Z	3H178
FO3D	7/04	(2006.01)	FO3D	7/04	H	5H590
HO2P	9/00	(2006.01)	HO2P	9/00	F	

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2015-241888 (P2015-241888)
 (22) 出願日 平成27年12月11日 (2015.12.11)

(71) 出願人 000005108
 株式会社日立製作所
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
 (74) 代理人 110000350
 ポレール特許業務法人
 (72) 発明者 角谷 啓
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
 (72) 発明者 清木 荘一郎
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
 (72) 発明者 白石 崇
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 風力発電システムおよび風力発電システムの運転方法

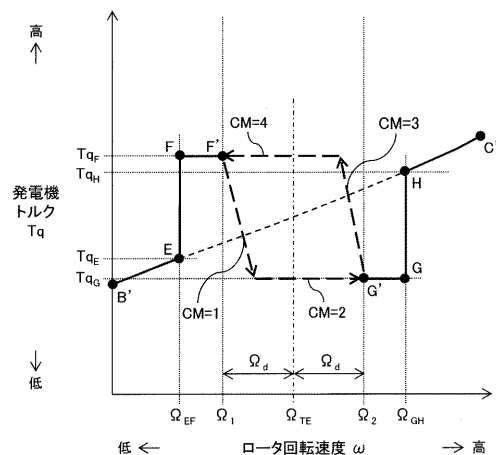
(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 タワー共振の影響を低減可能な風力発電システムを提供する。

【解決手段】 風を受けて回転するロータと、該ロータの回転エネルギーを用いて発電する発電機と、前記発電機の発電機トルク及び前記ロータのロータ回転速度を制御する制御装置とを備え、該制御装置は、ロータ回転速度が上昇して第1のロータ回転速度を越えた場合、発電機トルクを低下させる第1の運転モードCM=1に移行した後、前記第1の運転モードと連続し、かつロータ回転速度に対する発電機トルクの傾きが前記第1の運転モードと異なる第2の運転モードCM=2に移行し、ロータ回転速度が低下して第2のロータ回転速度を越えた場合、発電機トルクを上昇させる第3の運転モードCM=3に移行した後、前記第3の運転モードと連続し、かつロータ回転速度に対する発電機トルクの傾きが前記第3の運転モードと異なる第4の運転モードCM=4に移行することを特徴とする風力発電システム。

【選択図】 図5

図 5



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

風を受けて回転するロータと、
前記ロータの荷重を支持するタワーと、
前記ロータの回転エネルギーを用いて発電する発電機と、
前記発電機の発電機トルク及び前記ロータのロータ回転速度を制御する制御装置と、を
備え、

前記制御装置は、ロータ回転速度が上昇して第 1 のロータ回転速度を越えた場合、発電機トルクを低下させる第 1 の運転モードに移行した後、前記第 1 の運転モードと連続し、かつロータ回転速度に対する発電機トルクの傾きが前記第 1 の運転モードと異なる第 2 の
10 運転モードに移行し、

ロータ回転速度が低下して第 2 のロータ回転速度を越えた場合、発電機トルクを上昇させる第 3 の運転モードに移行した後、前記第 3 の運転モードと連続し、かつロータ回転速度に対する発電機トルクの傾きが前記第 3 の運転モードと異なる第 4 の運転モードに移行することを特徴とする風力発電システム。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の風力発電システムであって、

前記制御装置は、ロータ回転速度が上昇して前記第 1 のロータ回転速度を越えた場合と、ロータ回転速度が低下して前記第 2 のロータ回転速度を越えた場合では、異なる発電機トルク及びロータ回転速度を設定することを特徴とする風力発電システム。
20

【請求項 3】

請求項 1 に記載の風力発電システムであって、

前記第 2 の運転モード及び前記第 4 の運転モードの少なくともいずれか一方において、発電機トルクを一定に制御することを特徴とする風力発電システム。

【請求項 4】

請求項 1 に記載の風力発電システムであって、

前記第 1 のロータ回転速度及び前記第 2 のロータ回転速度は、予め設定された数値または前記風力発電システムの状態を計測するセンサの出力値に基づいて設定された数値のいずれかであることを特徴とする風力発電システム。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の風力発電システムであって、

前記制御装置は、ロータ回転速度が上昇して前記第 1 のロータ回転速度を越えた場合、前記第 1 の運転モードに移行する前に、ロータ回転速度を保持しながら発電機トルクを第 3 または第 4 の発電機トルク値まで上昇させる第 5 の運転モードに移行し、

ロータ回転速度が低下して前記第 2 のロータ回転速度を越えた場合、前記第 3 の運転モードに移行する前に、ロータ回転速度を保持しながら発電機トルク値を第 1 または第 2 の発電機トルク値まで下降させる第 6 の運転モードに移行することを特徴とする風力発電システム。
30

【請求項 6】

請求項 1 に記載の風力発電システムであって、

前記制御装置は、前記ロータのブレードのピッチ角を制御することでロータ回転速度を制御することを特徴とする風力発電システム。
40

【請求項 7】

ロータ回転速度が上昇して第 1 のロータ回転速度を越えた場合、発電機トルクを低下させる第 1 の運転モードに移行し、

前記第 1 の運転モードに移行した後、ロータ回転速度に対する発電機トルクの傾きが前記第 1 の運転モードと異なる第 2 の運転モードに移行し、

ロータ回転速度が低下して第 2 のロータ回転速度を越えた場合、発電機トルクを上昇させる第 3 の運転モードに移行し、

前記第 3 の運転モードに移行した後、ロータ回転速度に対する発電機トルクの傾きが前
50

記第 3 の運転モードと異なる第 4 の運転モードに移行することを特徴とする風力発電システムの運転方法。

【請求項 8】

請求項 7 に記載の風力発電システムの運転方法であって、

ロータ回転速度が上昇して前記第 1 のロータ回転速度を越えた場合と、ロータ回転速度が低下して前記第 2 のロータ回転速度を越えた場合では、異なる発電機トルク及びロータ回転速度を設定することを特徴とする風力発電システムの運転方法。

【請求項 9】

請求項 7 に記載の風力発電システムの運転方法であって、

前記第 2 の運転モード及び前記第 4 の運転モードの少なくともいずれか一方において、発電機トルクを一定に制御することを特徴とする風力発電システムの運転方法。

10

【請求項 10】

請求項 7 に記載の風力発電システムの運転方法であって、

前記第 1 のロータ回転速度及び前記第 2 のロータ回転速度は、予め設定された数値または前記風力発電システムの状態を計測するセンサの出力値に基づいて設定された数値のいずれかであることを特徴とする風力発電システムの運転方法。

【請求項 11】

請求項 7 に記載の風力発電システムの運転方法であって、

ロータ回転速度が上昇して前記第 1 のロータ回転速度を越えた場合、前記第 1 の運転モードに移行する前に、ロータ回転速度を保持しながら発電機トルクを第 3 または第 4 の発電機トルク値まで上昇させる第 5 の運転モードに移行し、

20

ロータ回転速度が低下して前記第 2 のロータ回転速度を越えた場合、前記第 3 の運転モードに移行する前に、ロータ回転速度を保持しながら発電機トルク値を第 1 または第 2 の発電機トルク値まで下降させる第 6 の運転モードに移行することを特徴とする風力発電システムの運転方法。

【請求項 12】

請求項 7 に記載の風力発電システムの運転方法であって、

ロータのブレードのピッチ角を制御することでロータ回転速度を制御することを特徴とする風力発電システムの運転方法。

【発明の詳細な説明】

30

【技術分野】

【0001】

本発明は、風力発電システムに係り、特に、タワーに発生する共振を好適に低減する風力発電システムに関する。

【背景技術】

【0002】

近年、二酸化炭素の排出量増加を起因とする地球温暖化や、化石燃料の枯渇によるエネルギー不足が懸念されており、二酸化炭素排出の低減や、エネルギー自給率の向上が求められている。これらの実現のためには、二酸化炭素を排出せず、輸入に依存する化石燃料を利用することなく、風力や太陽光などの自然から得られる再生可能エネルギーにて発電が可能な発電システムの導入が有効である。

40

【0003】

再生可能エネルギーを利用した発電システムの中でも、太陽光発電システムのように日射による急峻な出力変化をしない風力発電システムは、比較的安定した発電出力ができる発電システムとして注目されている。また、地上と比較して、風速が高く、風速変化が少ない洋上に設置する風力発電システムも有力な発電システムとして注目されている。なお、風力発電システムはロータのエネルギー変換効率が風速に応じて異なることから、ロータ回転速度の運転範囲を可変とする可変速運転を実施している。

【0004】

風力発電システムを活用して安定的に電力を供給するためには、風力発電システムを構

50

成するブレード、タワー、および、ドライブトレインに発生する振動を低減する技術が必要である。特に、システム全体を支える構造物であるタワーの振動は、構成部品への振動発生に繋がる場合がある。

【0005】

設置場所によっては台風といった暴風が発生する悪天候や、低気圧による風向の急変などによって発生する風の乱流を起因として、タワーの固有周波数が建造当初より変化する可能性がある。この際、上述のロータ回転速度の運転範囲内に、上述のタワー固有周波数が結果的に存在してしまう場合がある。このような状況では、風力発電システムのロータの回転運動がタワー固有周波数と一致し、タワー振動が増加する、すなわちタワー共振が発生する可能性がある。このようなタワー共振は、タワーの振動の振幅を増大させることで、疲労蓄積や最大荷重増大といった悪影響を及ぼす可能性がある。

10

【0006】

ここで、風力発電システムのタワーに発生する振動の低減を考慮したものとして、例えば特許文献1に開示された運転制御手段がある。特許文献1には、「タワーの振動を最小限に抑える風力発電の運転方法」が開示されている。

【0007】

要約すると、「タワー固有周波数がロータ回転速度内に存在し、ロータ回転速度と発電機トルクで規定する平面内において、風速の増加に従って回転速度を増加させた場合、タワー固有周波数以下の回転速度では発電機トルクを該運転制御手段を適用しない場合よりも増加させた運転をした後、タワー固有周波数を通過する際には、ロータ回転速度の増加に対して発電機トルクを低下させる運転をし、ロータ回転速度がタワー固有周波数を越えた後には、該運転制御手段を適用しない場合と比較して発電機トルクを低下させる運転をし、ロータ回転速度の増加に伴って該運転制御手段を適用しない場合の発電機トルクまで発電機トルクを増加させる」手段である。

20

【0008】

特許文献1に記載の技術を適用することで、ロータ回転速度がタワー固有周波数と一致する期間が短くなるため、タワー共振の発生を抑制することができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

30

【特許文献1】欧州特許第2113659B1号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

上述の通り特許文献1に記載の技術を適用することにより、タワー固有周波数がロータ回転速度の運転範囲内に存在する際に、タワー共振の発生を抑制することが可能である。ただし、特許文献1に開示された技術は、タワー固有周波数近傍をロータ回転速度が通過する際に、ロータ回転速度だけではなく、発電機トルクも同時に変化させるため、入力である風力エネルギーがロータ回転速度の変化のみに利用されないことで、ロータ回転速度とタワー固有周波数が概一致する期間を十分に短縮することができずに、タワー共振を十分に低減できない場合がある。これによって、タワー共振に伴う疲労蓄積や最大荷重増大を十分に低減できない可能性がある。

40

【0011】

そこで、本発明では、タワー共振の発生を十分に抑制できる運転制御手段を提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0012】

上記課題を解決するために、本発明は、風を受けて回転するロータと、前記ロータの荷重を支持するタワーと、前記ロータの回転エネルギーを用いて発電する発電機と、前記発電機の発電機トルク及び前記ロータのロータ回転速度を制御する制御装置と、を備え、前

50

記制御装置は、ロータ回転速度が上昇して第1のロータ回転速度を越えた場合、発電機トルクを低下させる第1の運転モードに移行した後、前記第1の運転モードと連続し、かつロータ回転速度に対する発電機トルクの傾きが前記第1の運転モードと異なる第2の運転モードに移行し、ロータ回転速度が低下して第2のロータ回転速度を越えた場合、発電機トルクを上昇させる第3の運転モードに移行した後、前記第3の運転モードと連続し、かつロータ回転速度に対する発電機トルクの傾きが前記第3の運転モードと異なる第4の運転モードに移行することを特徴とする風力発電システムである。

【0013】

また、本発明は、ロータ回転速度が上昇して第1のロータ回転速度を越えた場合、発電機トルクを低下させる第1の運転モードに移行し、前記第1の運転モードに移行した後、ロータ回転速度に対する発電機トルクの傾きが前記第1の運転モードと異なる第2の運転モードに移行し、ロータ回転速度が低下して第2のロータ回転速度を越えた場合、発電機トルクを上昇させる第3の運転モードに移行し、前記第3の運転モードに移行した後、ロータ回転速度に対する発電機トルクの傾きが前記第3の運転モードと異なる第4の運転モードに移行することを特徴とする風力発電システムの運転方法である。

10

【発明の効果】

【0014】

本発明によれば、使用環境によってタワー固有周波数がロータ回転速度の運転範囲に存在するようになった際にも、タワー共振による疲労蓄積と最大荷重増大を抑制可能な制御装置を備えた風力発電システムを提供することが可能になる。

20

【0015】

上記した以外の課題、構成及び効果は、以下の実施形態の説明により明らかにされる。

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】本発明の一実施形態に係る風力発電システム1の構成概要を示す図である。

【図2】本発明を実施しない場合の風力発電システム1の運転時におけるロータ4の回転速度と発電機6のトルクの関係を示す概略図である。

【図3】本発明の一実施形態に係る風力発電システム1のコントローラ9に実装される運転制御手段101の処理概要を示すブロック線図である。

【図4】本発明の一実施形態に係る運転制御手段101におけるロータ4の回転速度と発電機6のトルクの関係を示す概略図である。

30

【図5】本発明の一実施形態に係る運転制御手段101におけるロータ4の回転速度がタワー固有周波数近傍でのロータ4の回転速度と発電機6のトルクの遷移状態を示す概略図である。

【図6】本発明の一実施形態に係る運転制御手段101における風速が上昇してロータ4の回転速度が上昇しながらタワー固有周波数を通過する際のロータ4の回転速度と発電機6のトルクの変化概要を示すタイムチャートである。

【図7】本発明の一実施形態に係る運転制御手段101における風速が下降してロータ4の回転速度が下降しながらタワー固有周波数を通過する際のロータ4の回転速度と発電機6のトルクの変化概要を示すタイムチャートである。

40

【図8】本発明の一実施形態に係る運転制御手段101における目標値演算部301の処理概要を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0017】

以下、図面を用いて、本発明の実施形態について具体的に説明する。尚、下記はあくまでも実施例であって、本発明の実施態様が下記実施例に限定されることを意図するものではない。

【実施例1】

【0018】

以下、本発明の実施例について説明するが、その前に本発明適用の前提となる風力発電

50

システムの概略構成、及び制御について図 1 および図 2 を用いて説明する。

【0019】

まず、図 1 を用いて、本発明を適用可能な風力発電システム全体の概略構成について説明する。

【0020】

図 1 の風力発電システム 1 は、複数のブレード 2 と、複数のブレード 2 を接続するハブ 3 とで構成されるロータ 4 を備える。ロータ 4 はナセル 5 に回転軸（図 1 では省略する）を介して連結されており、回転することでブレード 2 の位置を変更可能である。ナセル 5 はロータ 4 を回転可能に支持している。ナセル 5 は発電機 6 を適宜位置に備える。ブレード 2 が風を受けることによりロータ 4 が回転し、ロータ 4 の回転力が発電機 6 を回転させることで電力を発生することができる。

10

【0021】

ブレード 2 の各々には、ブレード 2 とハブ 3 の位置関係、すなわちピッチ角と呼ぶブレードの角度、を変更可能なピッチアクチュエータ 7 を備えている。ピッチアクチュエータ 7 を用いてブレード 2 のピッチ角を変更することにより、風に対するロータ 4 の回転エネルギーを変更できる。これにより、広い風速領域においてロータ 4 の回転速度を制御しながら、風力発電システム 1 の発電電力を制御することができる。

【0022】

図 1 の風力発電システム 1 では、ナセル 5 はタワー 8 上に設置されており、タワー 8 に対して回転可能に支持されている。ハブ 3 やナセル 5 を介してブレード 2 の荷重がタワー 8 に支持される。タワー 8 は、基部（図では省略）に設置され、地上または洋上等の所定位置に設置される。

20

【0023】

また、風力発電システム 1 はコントローラ 9 を備えており、ロータ 4 の回転速度を計測する回転速度センサ 10 に基づき、コントローラ 9 が発電機 6 とピッチアクチュエータ 7 を調整することで、風力発電システム 1 が出力する電力を調整する。

【0024】

なお、風向を計測する風向センサ、発電機が出力する有効電力を計測する電力センサ、などを適宜位置に備えている。

【0025】

図 1 ではコントローラ 9 はナセル 5 またはタワー 8 の外部に設置される形態にて図示されているが、これに限ったものではなく、ナセル 5 またはタワー 8 の内部またはそれ以外の所定位置、または風力発電システム 1 の外部に設置される形態であっても良い。

30

【0026】

ここで、図 2 を用いて風力発電システム 1 の発電動作概要について説明する。ただし、図 2 は後述する本発明の運転制御手段 101 を適用しない場合の標準的な風力発電システムの概要である。図 2 はロータ回転速度に対する発電機トルクを示す。横軸はロータ回転速度、縦軸が発電機トルクを示し、横軸右方はロータ回転速度が高い、縦軸上方は発電機トルクが高い状態を示す。

【0027】

風力発電システム 1 は、ロータ回転速度を ω_{min} から ω_{max} の範囲で運転する。このロータ回転速度の範囲は、一般的に発電機 8 の動作範囲から決定される。風速の増加に従い、低風速では ω_{min} に保持しながら、発電機トルクを 0 から T_{qB} まで増加させ、発電機トルクが T_{qB} 以上では点 C の T_{qC} まで、ロータ 4 のブレードの出力特性が最大、すなわちロータのエネルギー変換効率が最大となるような軌道 BC に添って、ロータ回転速度に基づいて発電機トルクを決定する。この際、発電機トルクは下式に従う。

40

【0028】

【数 1】

$$T_q = K_{opt} \times \Omega^2 \quad \dots (1)$$

50

【0029】

ここで、 K_{opt} は軌道BCでの発電機トルクを決定するためのゲインである。発電機トルクが T_{qc} 以上ではロータ回転速度を保持しながら、発電機トルクを $T_{q_{max}}$ まで増加させる。

【0030】

上述のように、風力発電システム1はロータ回転速度を変化させることで、風力エネルギーを効率良く電気エネルギーに変換するような運転を実施する。

【0031】

次に、図3から図8を用いて風力発電システム1の制御装置(コントローラ9)に実装される運転制御手段101について説明する。この運転制御手段101は、タワー8の固有周波数が上述のロータ回転速度の運転範囲に存在する場合にも、タワー共振の影響を低減するように、ロータ回転速度がタワー固有周波数を通過する期間を短縮化すること狙っている。なお、以下では図2に示すようにタワー固有周波数 T_E がロータ回転速度の運転範囲内に存在することを想定する。

10

【0032】

図3は運転制御手段101のブロック線図を示す。運転制御手段101は目標値演算部301、ブレードピッチ角度制御部302、および発電機トルク制御部303より構成される。

【0033】

目標値演算部301は、ロータ回転速度に基づき、ブレードピッチ角度制御用ロータ回転速度目標値 ω_B^* 、発電機トルク制御用ロータ回転速度目標値 ω_T^* 、発電機トルク目標下限値 T_{qL}^* 、および発電機トルク目標上限値 T_{qH}^* を演算する。これらの値は、入力であるの状態に基づいて変化することで、ロータ回転速度と発電機トルクを上述する所定の軌道に沿うように風力発電システム1を運転する。なお、ロータ回転速度は上述の回転速度センサ10の出力信号である。

20

【0034】

ブレードピッチ角度制御部302は、ロータ回転速度とブレードピッチ角度制御用ロータ回転速度目標値 ω_B^* に基づき、ブレードピッチ角度目標値 θ_{dem} を決定する。詳細説明は省略するが、ロータ回転速度とブレードピッチ角度制御用ロータ回転速度目標値 ω_B^* との差分に基づくフィードバック制御により構成され、上記差分の比例、または積分、または微分、またはこれらのいずれかを組み合わせた成分を加算することで、ブレードピッチ角度目標値 θ_{dem} を演算するが、これに限ったものではない。

30

【0035】

発電機トルク制御部303は、発電機トルク制御用ロータ回転速度目標値 ω_T^* 、発電機トルク目標下限値 T_{qL}^* 、発電機トルク目標上限値 T_{qH}^* 、およびロータ回転速度に基づいて発電機トルク目標値 $T_{q_{dem}}$ を決定する。上述のブレードピッチ角度制御部302と同様に、発電機トルク制御用ロータ回転速度目標値 ω_T^* とロータ回転速度との差分を利用したフィードバック制御により構成される。フィードバック制御により演算された出力の上下限値を発電機トルク目標下限値 T_{qL}^* および発電機トルク目標上限値 T_{qH}^* により調整することで、最終的な発電機トルク目標値 $T_{q_{dem}}$ を決定するが、これに限ったものではない。

40

【0036】

図4は本発明に係る運転制御手段101によって実現される風力発電システム1の運転状態の軌道を示す。横軸、縦軸はそれぞれロータ回転速度と発電機トルクを示し、横軸右方がロータ回転速度が高い、縦軸上方が発電機トルクが高い運転状態を示す。なお、破線は図2に示した本発明に係る運転制御手段101を適用しない場合の運転状態の軌道を示している。

【0037】

本発明に係る運転制御手段101を適用することにより、ロータ回転速度に基づいて、ロータ回転速度がタワー固有周波数 T_E より所定値 ω_0 だけ低い ω_1 以下では、軌道ABEFに沿うように風力発電システム1を運転する。風速の増加に従い、軌道ABではロータ回転速度を ω_{min} としながら発電機トルクを0から T_{qB} まで上昇させる。さらに軌道BEでは上述の

50

式(1)に基づいて、ロータ回転速度を ω_{min} から ω_{EF} まで、発電機トルクを T_{qB} から T_{qE} まで上昇させる。さらに、軌道EFでは、ロータ回転速度を ω_{EF} に保持しながら発電機トルクを T_{qE} から T_{qF} まで上昇させる。なお、軌道EFにおける発電機トルクは、上述の式(1)に沿った発電機トルクの軌道から逸脱した、より大きい値である。

【0038】

風速が更に増加した場合には、ロータ回転速度をタワー固有周波数 ω_{TE} から所定値 ω_d だけ大きい ω_2 以上の ω_{GH} から ω_{max} の範囲内の軌道GHCDに沿って風力発電システム1を運転する。ここで、上述の所定値 ω_d はシミュレーションや試験によって予めプログラム内に記憶している値を用いても良いし、図には明記しないが、風力発電システム1の状態を計測する各種センサの出力値に基づいて決定するものであっても良い。風速の増加に伴い、軌道GHではロータ回転速度を ω_{GH} に保持しながら、発電機トルクを T_{qG} から T_{qH} まで上昇させる。軌道HCでは上述の式(1)に基づいてロータ回転速度を ω_{GH} から ω_{max} まで、発電機トルクを T_{qH} から T_{qC} まで上昇させる。軌道CDではロータ回転速度を ω_{max} に保持しながら発電機トルクを T_{qC} から T_{qmax} まで上昇させる。なお、軌道GHにおける発電機トルクは、上述の式(1)に沿った発電機トルクの軌道から逸脱した、より小さな値である。

10

【0039】

タワー固有周波数 ω_{TE} は予めシミュレーションや試験にて決定し、プログラムに記憶された値を用いる物であっても良いし、風力発電システム1の状態を計測する各種センサの出力信号に基づいて決定するものであっても良い。

【0040】

以上では、タワー固有周波数 ω_{TE} を避けた運転軌道のみ示したが、以下では ω_{TE} を通過する際の別の運転軌道を図5から図7を用いて説明する。なお、以下では複数示す運転状態を運転モード(CM: Control Mode)にて定義する。図4および図5を参照して、風速が増加してロータ回転速度が上昇し、 ω_{TE} を通過する際の運転モードを第1の運転モード、第2の運転モード(それぞれCM=1、CM=2)とし、風速が低下してロータ回転速度が下降し、 ω_{TE} を通過する際の運転モードを第3の運転モード、第4の運転モード(それぞれCM=3、CM=4)と定義する。また、軌道ABEFにおける運転モードを第5の運転モード(CM=5)、軌道GHCDにおける運転モードを第6の運転モード(CM=6)と定義する。

20

【0041】

図5は上述のCM=1、CM=2、CM=3、およびCM=4における風力発電システム1の運転軌道の概要を示す。横軸、縦軸はそれぞれロータ回転速度および発電機トルクを示し、横軸右方がロータ回転速度が高い、縦軸上方が発電機トルクが高い運転状態を示す。なお、図5は、図4におけるタワー固有周波数 ω_{TE} の近傍のB'からC'の運転範囲に注目した図である。

30

【0042】

以下ではまず、風速が上昇してロータ回転速度が上昇し、タワー固有周波数 ω_{TE} を通過する場合の運転軌道について説明する。

【0043】

上述の通りロータ回転速度が ω_1 以下では、軌道B'EFに沿って風力発電システム1を運転する。点F近傍の運転状態より、更に風速が上昇した場合には、発電機トルクが T_{qF} に保持され、ロータ回転速度が点F'まで上昇する。ロータ回転速度が ω_1 を越えた際には、風速が更に上昇すると判断し、タワー固有周波数 ω_{TE} を通過する運転モードへ遷移する。この際、CM=1では発電機トルクを T_{qF} から T_{qG} まで低減させる。その後、CM=2では、発電機トルクを T_{qG} に保持することで、ロータ回転速度を ω_{GH} まで上昇させる。このようにCM=1にて発電トルクを低減させて、CM=2で発電機トルクを小さい値に保持することで、風力エネルギーがロータ回転速度の変化のみに利用されるために、タワー固有周波数 ω_{TE} を通過する期間を短縮することができる。

40

【0044】

次に、風速が下降してロータ回転速度が下降し、タワー固有周波数 ω_{TE} を通過する場合の運転軌道について説明する。

50

【 0 0 4 5 】

上述の通りロータ回転速度が ω_2 以上では、軌道GHC'に沿って風力発電システム1を運転する。点G近傍の運転状態より、更に風速が下降した場合には、発電機トルクが T_{qG} に保持され、ロータ回転速度が点G'まで下降する。ロータ回転速度が ω_2 より小さくなった際には、風速が更に下降すると判断し、タワー固有周波数 ω_{TE} を通過する運転モードへ遷移する。この際、CM=3では発電機トルクを T_{qG} から T_{qF} まで上昇させる。その後、CM=4では、発電機トルクを T_{qF} に保持することで、ロータ回転速度を ω_{EF} まで下降させる。このようにCM=3にて発電トルクを上昇させて、CM=4で発電機トルクを大きい値に保持することで、風力エネルギーがロータ回転速度の変化のみに利用されるために、タワー固有周波数 ω_{TE} を通過する期間を短縮することができる。

10

【 0 0 4 6 】

なお、図5に明示するように、タワー固有周波数 ω_{TE} を通過する際、ロータ回転速度が上昇する場合と、ロータ回転速度が下降する場合では、その運転軌道が異なることが本発明に係る運転制御手段101の特徴である。

【 0 0 4 7 】

上述したように、ロータ回転速度が上昇して ω_1 (第1のロータ回転速度)を越えた場合、発電機トルクを低下させる第1の運転モードCM=1に移行し、第1の運転モードCM=1に移行した後、さらにロータ回転速度に対する発電機トルクの傾きが第1の運転モードCM=1と異なる第2の運転モードCM=2に移行する。

【 0 0 4 8 】

また、ロータ回転速度が低下して ω_2 (第2のロータ回転速度)を越えた場合、発電機トルクを上昇させる第3の運転モードCM=3に移行し、第3の運転モードCM=3に移行した後、さらにロータ回転速度に対する発電機トルクの傾きが第3の運転モードCM=3と異なる第4の運転モードCM=4に移行する。

20

【 0 0 4 9 】

以下では、図6および図7を用いて、図5に示す運転モード変化時のロータ回転速度と発電機トルクの時間的変化の概略について説明する。

【 0 0 5 0 】

図6は風速が増加し、ロータ回転速度がタワー固有周波数 ω_{TE} を通過するCM=1およびCM=2の動作概要を示すタイムチャートである。図6の横軸は時刻を示し、縦軸は図上方より風速、ロータ回転速度、発電機トルク、およびブレードピッチ角度を示し、図上方がそれぞれ風速高、ロータ回転速度高、発電機トルク高、ブレードピッチ角度がフェザーを示す。また、図6では本発明に係る運転制御手段101を適用した場合を実線で示し、適用しない場合を破線で示す。

30

【 0 0 5 1 】

以下では図6最上段に示すように、風速が時刻 t_0 の WS_E の状態から時刻 t_8 の WS_H まで上昇した場合を想定する。

【 0 0 5 2 】

破線で示す本発明に係る運転制御手段101を適用しない場合には、風速に応じてロータ回転速度が ω_{EF} から ω_{GH} まで上昇し、発電機トルクが T_{qE} から T_{qH} まで上昇する。この際、発電機トルクは上述の式(1)に従った値をとる。この場合には、ロータ回転速度がタワー固有周波数 ω_{TE} 近傍である ω_1 から ω_2 の範囲に滞在する期間が時刻 t_2 から時刻 t_6 の期間である。なお、ブレードピッチ角度は θ_{fine} に保持される。

40

【 0 0 5 3 】

これに対し、実線で示す本発明に係る運転制御手段101を適用した場合は、時刻 t_1 から時刻 t_3 の期間でロータ回転速度を ω_{EF} に保持し、発電機トルクを T_{qE} から T_{qF} まで上昇させる。時刻 t_3 から時刻 t_4 では発電機トルクを T_{qF} に保持するため、ロータ回転速度が ω_{EF} から ω_1 まで上昇する。ロータ回転速度が ω_1 以上となる時刻 t_4 以後は発電機トルクを T_{qF} から T_{qG} まで低下させる。これに伴ってロータ回転速度が時刻 t_5 にて ω_2 まで上昇する。時刻 t_5 から時刻 t_7 ではロータ回転速度を以後の運転で ω_{GH} に保持するように発電機トルクを

50

T_{qG} に保持し、ブレードピッチ角度を θ_{fine} から θ_1 へ一時的に変化させる。さらに、時刻 t_7 から時刻 t_8 では発電機トルクを T_{qG} から T_{qH} まで上昇させ、ロータ回転速度を ω_{GH} に保持する。

【0054】

このように本発明に係る運転制御手段101を適用することで、ロータ回転速度がタワー固有周波数 ω_{TE} の近傍である ω_1 から ω_2 の範囲に滞在する期間が時刻 t_4 から時刻 t_5 の期間に短縮されることで、タワー共振の発生を抑制することができる。

【0055】

図7は風速が低下し、ロータ回転速度がタワー固有周波数 ω_{TE} を通過する $CM=3$ および $CM=4$ の動作概要を示すタイムチャートである。図7の横軸は時刻を示し、縦軸は図上方より風速、ロータ回転速度、発電機トルク、およびブレードピッチ角度を示し、図上方がそれぞれ風速高、ロータ回転速度高、発電機トルク高、ブレードピッチ角度がフェザーを示す。また、図7では本発明に係る運転制御手段101を適用した場合を実線で示し、適用しない場合を破線で示す。

【0056】

以下では図7最上段に示すように、風速が時刻 t_7 の WS_H の状態から時刻 t_{15} の WS_E まで下降した場合を想定する。

【0057】

破線で示す本発明に係る運転制御手段101を適用しない場合には、風速に応じてロータ回転速度が ω_{GH} から ω_{EF} まで下降し、発電機トルクが T_{qH} から T_{qE} まで下降する。この際、発電機トルクは上述の式(1)に従った値をとる。この場合には、ロータ回転速度がタワー固有周波数 ω_{TE} 近傍である ω_2 から ω_1 の範囲に滞在する期間が時刻 t_9 から時刻 t_{13} の期間である。なお、ブレードピッチ角度は θ_{fine} に保持される。

【0058】

これに対し、実線で示す本発明に係る運転制御手段101を適用した場合は、時刻 t_8 から時刻 t_{10} の期間でロータ回転速度を ω_{GH} に保持し、発電機トルクを T_{qH} から T_{qG} まで下降させる。時刻 t_{10} から時刻 t_{11} では発電機トルクを T_{qG} に保持するため、ロータ回転速度が ω_{GH} から ω_2 まで下降する。ロータ回転速度が ω_2 以下となる時刻 t_{11} 以後は発電機トルクを T_{qG} から T_{qF} まで上昇させる。これに伴ってロータ回転速度が時刻 t_{12} にて ω_1 まで下降する。時刻 t_{12} から時刻 t_{14} ではロータ回転速度を以後の運転で ω_{EF} に保持するように発電機トルクを T_{qF} に保持し、ブレードピッチ角度を θ_{fine} から θ_2 へ一時的に変化させる。さらに、時刻 t_{14} から時刻 t_{15} では発電機トルクを T_{qF} から T_{qE} まで下降させ、ロータ回転速度を ω_{EF} に保持する。

【0059】

このように本発明に係る運転制御手段101を適用することで、ロータ回転速度がタワー固有周波数 ω_{TE} の近傍である ω_2 から ω_1 の範囲に滞在する期間が時刻 t_{11} から時刻 t_{12} の期間に短縮されることで、タワー共振の発生を抑制することができる。

【0060】

図8は、本発明に係る運転制御手段101における目標値演算部301の処理概要を示すフローチャートである。

【0061】

ステップS01ではロータ回転速度がタワー固有周波数 ω_{TE} より小さい値の ω_1 より小さいか否かを判断し、 ω_1 より小さい場合は第5の運転モードを実行すべく、ステップS02に進む。ステップS02ではCMとCMの前回値であるCM0に5をセットしてステップS03に進む。ステップS03では第5の運転モードを実施できるように、ブレードピッチ角度制御用ロータ回転速度目標値および発電機トルク制御用ロータ回転速度目標値に ω_{EF} をセットし、発電機トルク目標下限値に $T_{q_{opt}}$ 、発電機トルク目標上限値に T_{qF} をセットしてステップS04に進む。なお、 $T_{q_{opt}}$ は上述の式(1)にて決定される発電機トルクである。続くステップS04では、CM0にCMをセットして一連の動作を終了する。

【0062】

10

20

30

40

50

ステップS01にてロータ回転速度が ω_1 以上の場合にはステップS05へ進む。ステップ05ではロータ回転速度がタワー固有周波数 ω_{TE} より小さい値の ω_1 以上、かつ、タワー固有周波数 ω_{TE} より大きい値の ω_2 より小さいかを判断し、 ω_1 以上かつ ω_2 未満である場合には、ステップS06へ進み、 ω_1 以上かつ ω_2 未満の範囲外である場合には、ステップS12へ進む。以後は、図8のフローチャートに従い、ステップS06からステップS15のいずれかのフローを経て、ステップS04に至り、一連の動作を終了する。

【0063】

以上説明したように、本実施例の風力発電システムおよびその運転方法により、使用環境によってタワー固有周波数がロータ回転速度の運転範囲に存在するようになった際にも、タワー共振による疲労蓄積と最大荷重増大を抑制することができる。

10

【0064】

これにより、風力発電システムの信頼性向上、長寿命化、発電効率の向上などを図ることができる。

【0065】

なお、本発明は上記した実施例に限定されるものではなく、様々な変形例が含まれる。例えば、上記した実施例は本発明を分かりやすく説明するために詳細に説明したものであり、必ずしも説明した全ての構成を備えるものに限定されるものではない。また、ある実施例の構成の一部を他の実施例の構成に置き換えることが可能であり、また、ある実施例の構成に他の実施例の構成を加えることも可能である。また、各実施例の構成の一部について、他の構成の追加・削除・置換をすることが可能である。

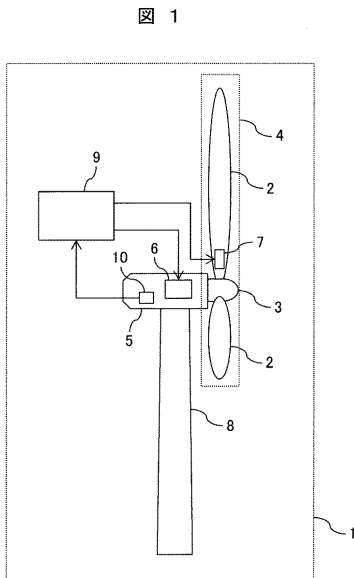
20

【符号の説明】

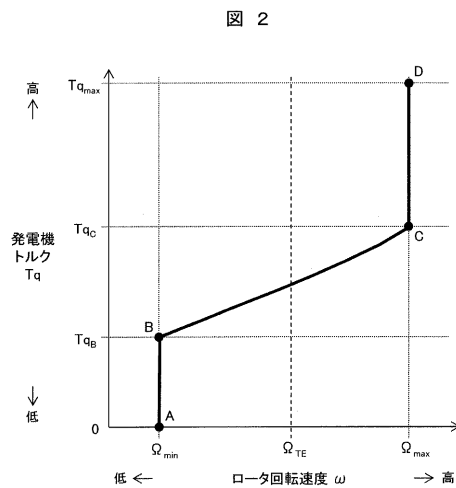
【0066】

1...風力発電システム、2...ブレード、3...ハブ、4...ロータ、5...ナセル、6...発電機、7...ピッチアクチュエータ、8...タワー、9...コントローラ、10...回転速度センサ。

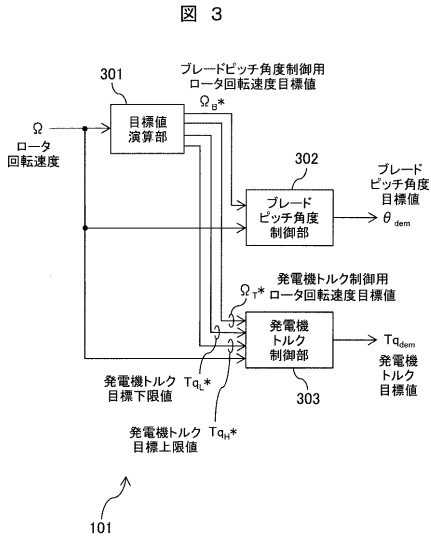
【図1】



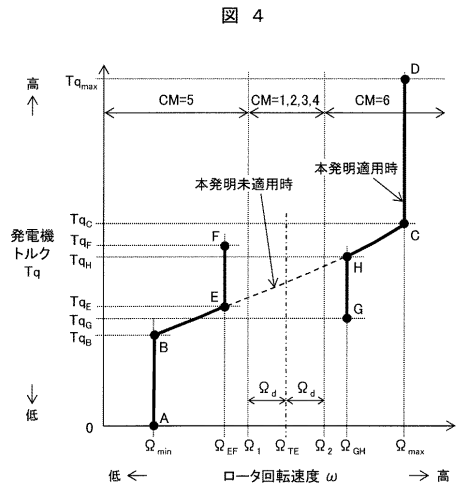
【図2】



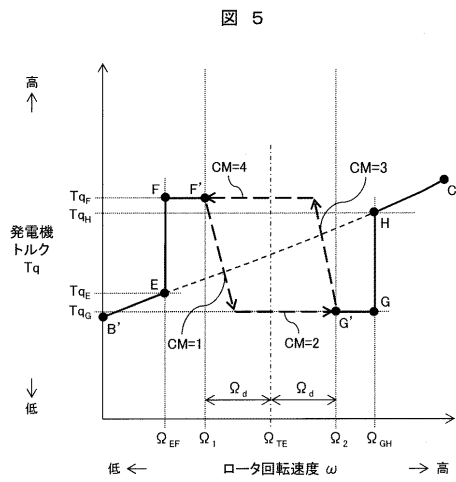
【 図 3 】



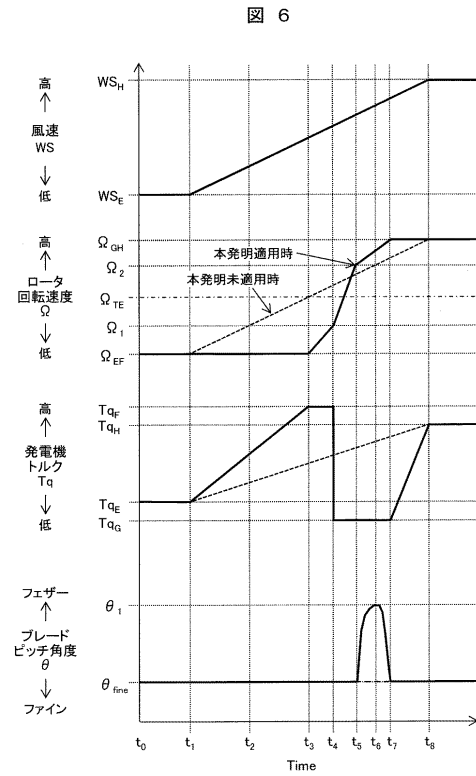
【 図 4 】



【 図 5 】

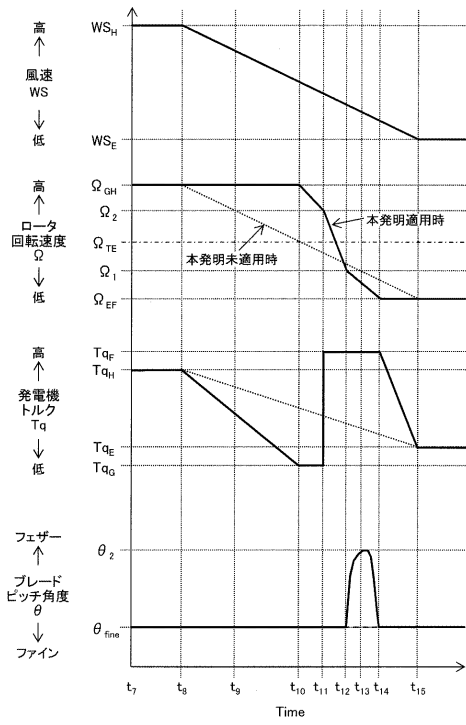


【 図 6 】



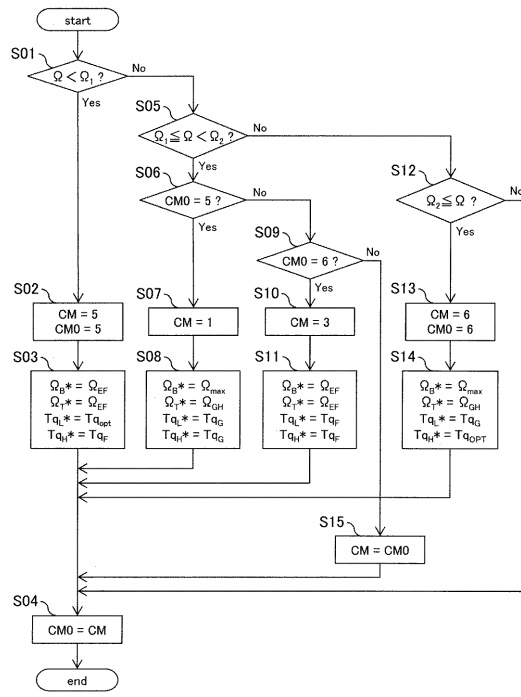
【 図 7 】

図 7



【 図 8 】

図 8



フロントページの続き

Fターム(参考) 3H178 AA03 AA22 AA24 AA43 BB06 BB31 BB35 BB42 CC02 DD12Z
DD31X DD52X DD54X EE05 EE13 EE18 EE25
5H590 AA30 AB20 CA14 EA07 EB18 FA05 HA09