

【公報種別】特許法第 17 条の 2 の規定による補正の掲載

【部門区分】第 6 部門第 1 区分

【発行日】平成23年10月27日 (2011.10.27)

【公表番号】特表2011-501172(P2011-501172A)

【公表日】平成23年1月6日 (2011.1.6)

【年通号数】公開・登録公報2011-001

【出願番号】特願2010-530431(P2010-530431)

【国際特許分類】

G 0 1 M 99/00 (2011.01)

F 0 3 D 11/02 (2006.01)

【F I】

G 0 1 M 19/00 A

F 0 3 D 11/02

【手続補正書】

【提出日】平成23年9月6日 (2011.9.6)

【手続補正 1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

風力タービンの設計および／または保守の作業のために、少なくとも 1 つの回転可能な風力タービンシャフトのトルクの推移および伝動機構の種々の構成要素に結果として生じる疲労損傷を決定するための方法であって、前記伝動機構が、回転速度が速度比 (  $i$  ) によって関係付けられている高速シャフトおよび低速シャフトを備えており、

- 高速シャフトにおけるトルク (  $T_g$  ) を決定するステップと、
- 高速シャフトにおける慣性モーメント (  $I_g$  ) を決定するステップと、
- 高速シャフトの角加速度 (  $g$  ) を決定するステップと、
- 低速シャフトにおけるトルク (  $T_r$  ) を、式  $T_r = ( T_g - I_g \cdot g ) i$  によって決定するステップと

を含むことを特徴とする、方法。

【請求項 2】

低速シャフトにおけるトルクの値 (  $T_r$  ) にレインフロー計数アルゴリズムを適用して、各トルク平均値のトルク範囲内のサイクル数を決定するステップをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

低速シャフトにおけるトルクの値 (  $T_r$  ) にレインフロー計数アルゴリズムを適用する前記ステップを、少なくとも 1 つのトルク平均値について実行する、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

トルクと、分析すべき各構成要素の各地点における材料の応力との関係を決定するステップをさらに含む、請求項 3 に記載の方法。

【請求項 5】

前記関係が、各平均応力値の応力範囲内のサイクルを得るためにトルク値 (  $T_r$  ) に適用される係数または非線形の式によって与えられる、請求項 4 に記載の方法。

【請求項 6】

トルクと、分析すべき各構成要素の各地点における材料の歪みとの関係を決定するステ

ップをさらに含む、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

前記関係が、各平均歪み値の歪み範囲内のサイクルを得るためにトルク値 ( $T_r$ ) に適用される係数または非線形の式によって与えられる、請求項 6 に記載の方法。

【請求項 8】

各応力範囲において実行されたサイクル数を、平均応力値および計算対象の構成要素の材料に対応する  $S-N$  (応力 / サイクル数) 曲線と比較して、得られた損傷をすべて合計することにより、一定の期間の間に伝動機構の任意の部品に蓄積された疲労損傷を決定するステップをさらに含む、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

各歪み範囲において実行されたサイクル数を、平均歪み値および計算対象の構成要素の材料に対応する  $N$  (歪み / サイクル数) 曲線と比較して、得られた損傷をすべて合計することにより、一定の期間の間に伝動機構の任意の部品に蓄積された疲労損傷を決定するステップをさらに含む、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

一定の期間の間に蓄積された疲労損傷を決定する前記ステップを、マイナー則を適用することによって実行する、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 11】

一定の期間の間に蓄積された疲労損傷が所定の値を超える場合に、警報信号を送信するステップをさらに含む、請求項 10 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 12】

高速シャフトの角加速度 ( $g$ ) を決定する前記ステップを、高速シャフトの角速度 ( $g$ ) の時間微分によって実行する、請求項 11 に記載の方法。

【請求項 13】

レインフロー計数アルゴリズムによって得られる前記データが、データ行列の形態である、請求項 12 に記載の方法。

【手続補正 2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【発明の詳細な説明】

【発明の名称】風力タービンの伝動機構の疲労損傷を決定するための方法

【技術分野】

【0001】

本発明は、少なくとも 1 つの回転可能なシャフトのトルクの推移、および伝動機構の種々の構成要素に結果として生じる疲労損傷を決定するための方法に関する。

【0002】

本発明は、高速シャフトおよび低速シャフトを備える伝動機構を有している風力タービンの設計および / または保守の作業に特に有用である。使用時、前記高速および低速シャフトは、速度比によって関係付けられる異なる速度で回転する。

【背景技術】

【0003】

風力タービンの伝動機構は、ある速度の入力トルクを低速シャフト (回転子および羽根板と組み合わせられている) から高速シャフト (所与の速度の前記入力トルクを電力へと変換する発電機と組み合わせられている) へと伝達しなければならない。

【0004】

現在の風力タービンは疲労クリティカル機械であり、したがって各風力タービンの伝動機構の設計および / または保守の作業のための疲労損傷の評価に、風力タービンの伝動機構の低速シャフトにおける前記入力トルクの値を知ることが重要である。これは、伝動機

構、特に、低速シャフトのトルク振動を決定することによって実行することができる。

【 0 0 0 5 】

本発明は、風力タービンの回転子の低速シャフトのトルク振動の正確な評価を可能にする。この低速シャフトのトルク値と、分析対象の構成要素の材料の疲労挙動と、年間の風速分布とを知ることによって、疲労損傷を正確に知ることができ、その結果風力タービンの寿命を正確に知ることができる。

【 0 0 0 6 】

従来、運転制御およびデータ記録のシステムは、発電機の電力および発電機（すなわち、高速シャフト）の角速度の正確な値を提供することができる。しかしながら、回転子（低速シャフト）の入力トルク値および前記低速シャフトの角速度の値は正確に取得することが困難である。この低速シャフトの入力トルク値の欠如ゆえに、現時点では、風力タービンの伝動機構に加わるトルクの値を直接的かつ容易に得ることが不可能である。

【 0 0 0 7 】

低速シャフトのトルク値は、典型的には、実験的な方法で、低速シャフトの応力値を直接的に測定する歪みゲージ手段による機械的な測定と組み合わせることによって得られている。これは、特にこれを各伝動機構について行わなければならない点に鑑み、大きな資本を必要とする。

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 8 】

本発明は、風力タービンの伝動機構のトルク振動に起因する疲労損傷を、風力タービンの発電機の電気トルクおよび角速度から正確に推定することを可能にする方法を提供する。

【 0 0 0 9 】

各風力タービンのこの疲労損傷の値を知ることによって、風力タービンの重要部品（シャフト、歯車、軸受、など）に関して、それらが破損して破損前の部品交換よりもはるかに費用を要する損傷を引き起こす前に、対策をとることができる。本発明の方法により、風力タービンの伝動機構の部品の状態を常に把握しておくことができる。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 0 】

したがって、本発明の方法によれば、各風力タービンについて、設計上の疲労限界を超えたときに適切な保守の作業を実行できるよう、部品の交換が必要であるか否かを判断することができる。

【 0 0 1 1 】

さらに、本発明の方法によれば、部品の設計において考慮された設計における仮定を、ソフトウェアシミュレーションによって、生じる疲労荷重に照らして検証することができる。この検証は、通常は、プロトタイプマシンにおける一連の測定によって実行される。本発明による方法は、そのような検証を、疲労を引き起こす入手可能な値に基づいて実行することを可能にする。

【 0 0 1 2 】

本発明は、風力タービンの設計および/または保守の作業のために、少なくとも1つの回転可能シャフトのトルクの推移および伝動機構の種々の構成要素に結果として生じる疲労損傷を決定するための方法を提供する。本発明によれば、単一の風力タービンまたは風力発電所全体について、高速シャフトおよび低速シャフトを備える伝動機構の疲労の進展を知ることが可能になる。

【 0 0 1 3 】

本発明の方法は、風力タービンの高速シャフトのトルク、慣性モーメント、および角加速度を決定するステップを含む。これらの決定は、そのような値を発電機において直接測定することによって実行される。高速シャフトの角加速度を決定するために、高速シャフトの角速度の時間微分を使用することができる。

## 【 0 0 1 4 】

本発明の方法は、それぞれのシャフトの速度の速度比を、高速シャフトの慣性モーメントと角加速度との積から高速シャフトのトルクを引き算した結果で乗算することによって、風力タービンの低速シャフトのトルクを決定するステップをさらに含んでもよい。

## 【 0 0 1 5 】

風力タービンの伝動機構の低速シャフトのトルク値の変動を決定するために、レインフロー計数アルゴリズムの手順を適用することができる。この低速シャフトのトルクの値にレインフロー計数アルゴリズムを適用するステップを、少なくとも1つのトルク平均値について実行することができる。

## 【 0 0 1 6 】

このレインフロー計数の手順の結果は、各トルク平均値における各トルク範囲のサイクル数を含むデータ行列であってもよい。これは、点検の測定値を、風力タービンの構成要素の疲労分析、例えば、疲労寿命の予測およびシミュレーション試験に適した形態で保存することを可能にする。

## 【 0 0 1 7 】

本方法は、トルクと、分析すべき各構成要素の各地点における材料の応力との関係を決定するさらなるステップを含むことができる。この関係は、各平均応力値の応力範囲内のサイクルを得るためにトルク値に適用される係数または非線形の式によって求めることができる。

## 【 0 0 1 8 】

式は、線形である場合には単純な係数であってよい。いずれの場合も、トルクと応力との関係は、解析計算または有限要素法 ( F E M ) によって、分析対象の構成要素の形状および材料を考慮して決定しなければならない。

## 【 0 0 1 9 】

あるいは、前記さらなるステップを、応力値の代わりに歪み値に対して実行してもよく、結果として、トルクと、分析すべき各構成要素の各地点における材料の歪みとの関係を与える式を決定することができる。式は、線形である場合には単純な係数であってよい。いずれの場合も、トルクと歪みとの関係は、解析計算または有限要素法 ( F E M ) によって決定される。

## 【 0 0 2 0 】

これにより、トルク値の変動を、該当の式をトルク値へと適用することによって、応力または歪みの変動へと変換することができ、すなわち応力範囲 - 平均応力値の行列または歪み範囲 - 平均歪み値の行列を、各構成要素の分析地点について入手することができる。

## 【 0 0 2 1 】

さらに、本方法は、一定の期間の間に伝動機構の任意の部品に蓄積された疲労損傷を、各応力範囲について実行されたサイクル数を  $S_N$  ( 応力 / サイクル数 ) 曲線によって確立される所定の限界と比較することによって決定することからなる、さらなるステップを含むことができる。

## 【 0 0 2 2 】

あるいは、本方法は、歪み値を使用して実行することができる。その場合、実行されたサイクル数を、各歪み範囲について  $N$  ( 歪み / サイクル数 ) 曲線によって確立される所定の限界と比較する。これは、好ましくは、複合荷重にさらされる風力タービンの疲労寿命を評価するためのマイナー則を適用することによって実行することができる。このマイナー則は、各応力範囲または歪み範囲について、系に加わったサイクル数を  $S_N / N$  曲線によって確立される限界と比較することによって適用される。  $S_N$  曲線を、種々の方法 ( *Leitfaden*、 *FKM*、または *SWL 99* ) によって定めることができる。  $S_N$  および  $N$  曲線は、実験的な方法によって得てもよい。いずれの場合も、曲線は、平均応力 / 歪みに従って変化する。応力または歪みの平均値は、上述に規定された行列から得られる。

## 【 0 0 2 3 】

本発明の一実施形態において、本発明の方法のさらなるステップに従い、一定の期間の間に蓄積された疲労損傷が所定の値を超える場合に警報信号を送信することができる。

【0024】

本発明の方法によれば、風力タービンの伝動機構に加わるトルクのレベルの時間推移を決定することができ、これが伝動機構の構成要素を形成している材料の疲労にどのように影響するかを決定することができる。

【0025】

添付の図面を参照し、あくまでも本発明を限定するものではない例として、本発明について以下に説明する。

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図1】風力タービンの伝動機構の概略図である。

【図2】一実施例から得られた時間 - トルクのグラフであり、発電機速度および電力ならびに低速シャフトのトルクの推定値および測定値が示されている。

【発明を実施するための形態】

【0027】

図1は、全体として参照符号10で示されている風力タービンの伝動機構を図式的に示している。伝動機構10は、入力トルク $T_r$ が電力へと変換されるよう、回転子20の低速シャフト15から、ギアボックス40を介して入力トルク $T_r$ を風力タービンの発電機30の高速シャフト35へと伝達する目的を果たす。低速シャフト15の角速度 $r$ と高速シャフト35の角速度 $g$ とは、速度比 $i$ によって結び付けられている。

【0028】

本発明の方法は、風力タービンの回転子20の所与の角速度 $r$ における入力トルク $T_r$ の振動を検出することによって、疲労損傷を正確に評価することができる。疲労損傷の評価は、風力タービンの設計および/または保守の作業に有用である。

【0029】

最初に、回転子20におけるトルク値 $T_r$ が、発電機における値、すなわちトルク $T_g$ 、慣性モーメント $I_g$ 、および角速度 $g$ から決定される。前記値は、発電機30の主たる動力源から直接入手可能であり、すなわち高速シャフト35において入手可能である。

【0030】

次いで、高速シャフト35の角加速度 $\dot{g}$ を、高速シャフト35の角速度 $g$ の時間微分によって得ることができる。

【0031】

風力タービンの安定な発電状態においては、空気力学的トルクが、発電機における電気トルク $T_g$ と伝動機構10における摩擦損失との合計によって正確に相殺され、したがって $T_r = T_g \cdot i + T_p$ であって、 $T_p$ が摩擦損失トルクである。対照的に、トルクおよび速度の振動が存在する過渡状態、すなわち通常の動作モードにおいては、発電機の慣性力、速度に依存する減衰荷重、および摩擦損失を代表するある程度一定なトルクなど、風力タービンの回転子20における機械的なトルクを求めるために電気トルクへと加算されなければならない他の力が生じる。

【0032】

発電機30および回転子20のそれぞれにおける前記力を等しくし、すなわち、 $(T_g - I_g \cdot \dot{g}) \cdot i = (T_r - I_r \cdot \dot{r})$ とする。回転子の慣性が大きい( $I_r \gg I_g$ )ため、発電機における速度の変化は、回転子の場合よりもはるかに高速で、且つ影響が大きいと仮定され、したがって $\dot{r} = 0$ と仮定され、その結果式は、 $T_r = (T_g - I_g \cdot \dot{g}) \cdot i$ となる。

【0033】

低速シャフト15におけるトルク値 $T_r$ が上記式によって得られたら、レインフロー計数アルゴリズムの手順を前記トルク値 $T_r$ の変動を評価するために使用することができる。レインフロー計数アルゴリズムの手順によって得られるデータは、それぞれの平均トル

クにおける各トルク範囲のトルクサイクル数を含むデータ行列（マルコフ行列など）の形態であってもよい。

【 0 0 3 4 】

伝動機構に加わったサイクルの総数を知るために、このレインフロー計数行列を保存し、特定の時間期間ごとに更新して、新たなトルクサイクルをそれまでのトルクサイクルに加算しなければならない。そのようにすることで、稼働期間中に系に加わった疲労荷重を表わす行列を、常に得ることが可能である。

【 0 0 3 5 】

各構成部品の疲労を決定するために、必要とされる各構成部品の各地点におけるトルクと応力との関係を、解析計算または有限要素法によって計算しなければならない。この計算では、部品の形状および当該部品を構成する材料の機械的特性を考慮しなければならない。この関係は、単一の係数などのように単純（線形の関係）であってもよく、またはトルクを局所的な応力または歪みに関連付ける任意の非線形な式であってもよい。前記係数または非線形の式は、解析計算または有限要素法（FEM）によって前もって得られる。

【 0 0 3 6 】

次いで、トルクサイクルによって伝動機構の構成要素に引き起こされる損傷を、計算することができる。これは、特に、レインフロー計数アルゴリズムの手順によって得られたデータのすべてのサイクル（種々のサイクル平均値レベルを有する、種々の範囲の応力または歪みサイクル値など）の合計を、分析対象の構成要素のそれぞれの材料のS-N曲線と比較することによって実行される。

【 0 0 3 7 】

本発明の方法のさらなるステップは、一定の期間の間に伝動機構10の任意の部品に蓄積された疲労損傷を、例えばマイナー則を適用することによって、実行されたサイクル数を各荷重範囲のS-N曲線の所定の限界と比較することによって決定することからなる。

【 0 0 3 8 】

風力タービンまたは風力発電所に何が発生したのかを調査し、それに応じて適切な対策をとることができるよう、一定の期間の間に蓄積された疲労損傷が所定の値を超える場合に、警報信号を制御ユニットへと送信することができる。

【 0 0 3 9 】

このモデルを検証するために、実際のデータの例を、いくつかの電圧低下試験に関する図2に従って以下に説明する。

【 0 0 4 0 】

この実施例において、動作部分および激しい出来事（電圧低下およびそのような電圧低下後の装置の回復など）の両方を見て取ることができる。これらのデータは、歪みゲージによって採取された低速シャフト15のトルク $T_r$ を含む。

【 0 0 4 1 】

図2のグラフに示されるとおり、推定装置によって得られた曲線は、高度な正確さで実際の値に追従している。

【 0 0 4 2 】

高速シャフト35（発電機30）の角加速度 $g$ の計算に起因する一定の遅延が、トルクの推定値に観察される。最初に高速シャフト35の角速度 $g$ の時間微分を計算し、得られた信号中の高周波の雑音を除去しなければならない。より急峻であるが幾分遅延した信号をもたらすフィルタが適用される。これは、風力タービンの伝動機構の疲労を監視するために最も現実に近いデータを取得するという本発明の目的にとって問題にならない。

【 0 0 4 3 】

一方、電圧低下を引き起こした最初のより急峻なトルクの低下において、トルク推定値は、実際のトルク値よりもさらに大きく低下している。このような影響は、この時間期間において装置の回復が生じており、したがって生み出される電力に急な変動を導入する電気系の過渡が存在することによる。これらの変動は、計算に克服困難な乖離を導入するが、その結果としてトルクの絶対値は増大するので、疲労の計算にとってはより安全である

。直後に見られるように、計算によるトルクの振動は、再び確実に追従する。

【 0 0 4 4 】

本発明の方法を、各風力発電所の各風力タービンまたは少なくとも1つの代表的な風力タービンにおいて適切に実行することができ、各風力タービンまたは風力発電所における特定の負荷について、蓄積される損傷を監視することができる。これは、本発明の方法が、計算に2つのパラメータを利用し、すなわち発電機における電気トルク（発電された電力から入手できる）および発電機の角速度  $\omega$  を利用することにより、実現可能である。

【 0 0 4 5 】

他の変数について記録される基本的かつ通常のパラメータは、各時間間隔（例えば、10分間）における最大値、最小値、および平均値である。しかしながら、これらのデータは、風力タービンの伝動機構が被る疲労損傷を決定するために充分でない。したがって、本発明の方法は、疲労損傷を評価するために、上述のレインフロー計数アルゴリズムの手順を利用し、その手順によって、種々の範囲の、種々のサイクル平均値を有する荷重サイクル値を入手することができる。これを、例えば  $64 \times 64$  のデータ行列によって実行することができる。

【 0 0 4 6 】

監視および記録データシステムについて損傷の蓄積を実行できるよう、これらのデータを1週間に1度ずつ渡すことができる。表の形式データを、例えば記録データシステムのデータベースに保存することができる。したがって、風力タービンが稼働期間に経験したすべての行列のサイクルの合計が、残存寿命の確認が所望される構成要素の材料に対応する  $S-N$  曲線と比較されるサイクルとなる。このようにして、蓄積サイクル行列が構成される。

【 0 0 4 7 】

他の実施形態は、上述のように、Leitfadens  $S-N$  曲線合成アルゴリズムを利用することができ、または曲線をあらかじめ定め、それらのパラメータを行列形式に導入することができる。