

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 25 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420241

研究課題名(和文) H無限大制御による風力発電機の軸ねじれトルクの抑制制御

研究課題名(英文) Suppression Control of Shaft Torsional Torque for Wind-Turbine Generator with H Infinity Control

研究代表者

千住 智信 (SENJYU, Tomonobu)

琉球大学・工学部・教授

研究者番号：40206660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能エネルギーで最も有力である風力発電システムは近年大幅に世界中で導入されており、今後もその導入が見込まれている。しかし、風力発電システムの軸ねじれの発生により、システムの故障が発生する可能性がある。本研究では、風力発電システムで発生する軸ねじれ現象をH無限大制御器により抑制する手法を提案している。また、高風速時の運転を継続できる運転方法も提案している。

研究成果の概要(英文)：The wind power generation system which is most influential in renewable energy has been widely introduced all over the world in recent years, and its introduction is expected in the future. However, due to the occurrence of shaft torsional of the wind power generation system, system failure may occur. In this research, we propose a method to suppress the shaft torsional phenomenon occurring in wind power generation system by H infinity controller. We also propose an operation method that can continue operation at high wind speed.

研究分野：再生可能エネルギー

キーワード：風力発電 再生可能エネルギー パワーエレクトロニクス 電力工学 制御工学

1. 研究開始当初の背景

風力発電機をカットアウト風速以上においても有効に利用できれば、強風時の風力発電機の電力系統からの離脱を防止することが可能となり、安定な電力供給に資する事ができると共に、風力発電機の稼働率を大幅に向上する事ができる。このため、売電電力増加と原価償却期間の短縮にも、このような技術は大いに効果を発揮することができるため、風力発電機導入の経済的なインセンティブ向上と今後の再生可能エネルギー普及に伴う二酸化炭素排出量の大幅抑制による地球温暖化抑止に大いに貢献できる。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は、高風速環境(風速 25m/s ~ 35m/s)において発電機出力と回転数を制御し、安全に風力発電機を運転することをシミュレーションにおいて示すことである。また、風力発電機の軸ねじれ振動の抑制に関しては、H 無限大制御を適用することにより、パラメータの測定誤差や風車ブレードへの着氷等の影響により風車パラメータが変化した場合においても効果的に風車軸の軸ねじれ現象を短時間で抑制することである。

3. 研究の方法

(1) 風力発電機のモデル化

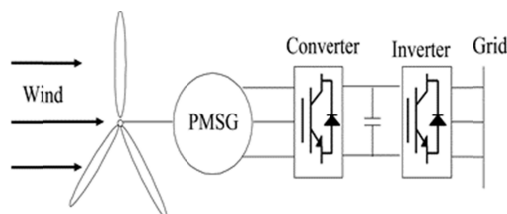


図 1. 風力発電機モデル

図 1 に今風力発電機の概略図を示す。この風力発電機は、定格出力 2MW、可変速可変ピッチ角水平軸型風力発電機であり、永久磁石形同期発電機を用いている。風車から取り出し得る有効電力 P 、トルク T は、次式で与えられる。

$$P = 0.5C_p(\lambda, \beta)\rho\pi R^2V_w^3 \quad (1)$$

$$T = 0.5C_p(\lambda, \beta)\rho\pi R^2V_w^2/\lambda \quad (2)$$

ここで、 C_p : 風車の出力係数、 ρ : 空気密度、 R : ブレード半径、 V_w : 風速、 ω_w : 風車の回転速度、 β : ピッチ角、 λ : 風速比である。風車の出力定数 C_p および周速比 λ は次式で表される。

$$C_p = 0.22(116\lambda_i - 0.4\beta - 5)\exp(-12.5\lambda_i) \quad (3)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

$$\lambda = \frac{\omega_w R}{V_w} \quad (4)$$

風力発電機を 2 慣性系でモデル化した。軸の運動方程式を以下に示す。

$$J_w \frac{d\omega_w}{dt} = T_w - T_a \quad (5)$$

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = T_a - T_g \quad (6)$$

$$T_a = K_s(\theta_w - \theta_g) \quad (7)$$

ここで、各変数は、 J_w 、 J_g : ブレード側および発電機側の慣性定数、 ω_w 、 ω_g : ブレード側および発電機側の回転角速度、 T_w 、 T_g : ブレード側および発電機側のトルク、 K_s : 軸の剛性を表している。

(2) 提案する出力制御則

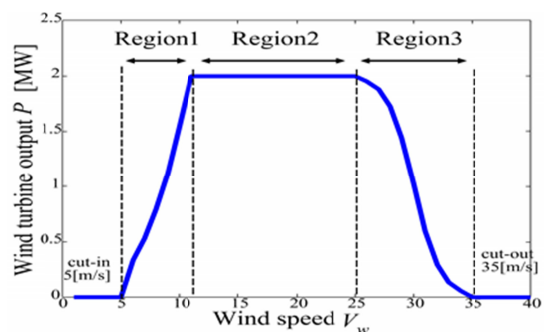


図 2 風力発電機の出力制御則

Region1

この領域では、風から得られるエネルギーを最大化するために最大電力点追従制御 (MPPT) を行う。

Region2

この領域では、ピッチ角制御を用いて出力を定格 2MW 一定に制御する。強風時に回転速度を 1[rad/s]で運転させるために、この領域では、風速の上昇に応じて徐々に回転速度を低下させる。

Region3

この領域では、風速の上昇に応じて発電機出力を徐々に低下させる。また、風速 35m/s 以上の風速が発生する場合は風車を停止できるように発電機の回転速度を低速の 1[rad/s]で運転させる。

(3)軸ねじれ振動の抑制および提案する制御系

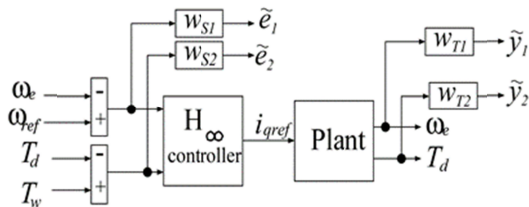


図3 提案する制御系の構成

軸ねじれ振動抑制および出力制御のための制御器を図3に示す。回転速度の目標値との偏差と風車トルクとねじれトルクの偏差の二つをH_∞制御器に入力し、q軸電流指令値を作成する。ここで、W_{S1}、W_{S2}、W_{T1}、W_{T2}はそれぞれ重み関数を表している。ねじれトルクを直接測定することは、困難であるため、オブザーバを用いて推定を行う。オブザーバにH_∞オブザーバを用いることでパラメータ変動が生じた場合でもロバストに推定を行うことができる。H_∞オブザーバの構成を図4に示す。オブザーバ作成のために用いた軸の状態空間方程式を以下に示す。

$$\hat{\dot{x}}(t) = A_o x(t) + B_o u(t) \quad (8)$$

$$y(t) = C_o x(t) \quad (9)$$

$$A_o = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{J_w} \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_g} \\ K_s & -K_s & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_o = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_w} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_g} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_o = [0 \quad 1 \quad 0]$$

$$D_o = [0 \quad 0 \quad 1]$$

ここで、 $x = [\omega_w \ \omega_g \ T_d]^T$ 、 $u(t) = [T_w \ T_g]^T$ 、 $y = \omega_g$ であり、それぞれ状態変数、入力変数、出力変数を表している。

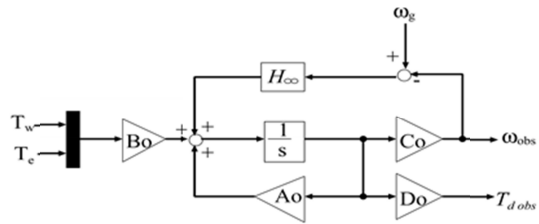


図4 H_∞オブザーバの構成

4. 研究成果

(1)H_∞オブザーバの軸ねじれトルクの推定結果

図5にオブザーバのねじれトルクの推定結果を示す。この結果からパラメータ誤差がある場合でも良好な推定精度が得られており、推定が十分正確に行われているといえる。

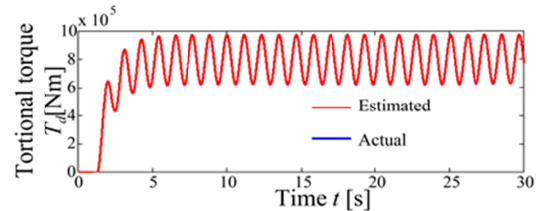


図5(a) 誤差なしの場合

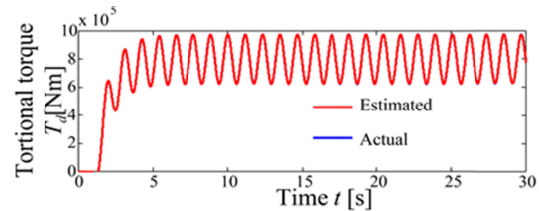


図5(b) 誤差10%の場合

図5 オブザーバの推定精度

(2)軸の固有周波数の抑制

軸の周波数応答を図6に示す。図6から軸の共振周波数が十分に抑制されており、提案する制御系は軸ねじれ振動を十分に抑制できるといえる。

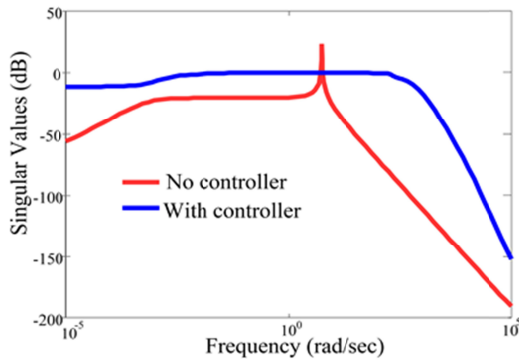


図6 軸の周波数応答

(3) 風速変動時の有効性の検証

提案手法の有効性をシミュレーションにより検証した。シミュレーションに用いた変動のある風速を図7に示す。この風速を用いて得られたシミュレーション結果を図8に示す。図8(a)から定格風速以上でピッチ角制御が動作し、発電出力を制御していることがわかる。図8(b)に軸トルクを示す。この図からねじれトルクが風車トルクに追従しており、ねじれ振動も抑制できていることがわかる。図8(c)に回転速度を示す。この図から風力発電機が目標値に追従していることがわかる。生じている制御誤差は、風の変化速度と風力発電機の応答速度の違いにより発生している。図8(d)に風力発電機の有効電力を示す。有効電力の指令値と実際値の差異が発生するが時間経過により零へ収束する。これは、ピッチ角の動作が遅いためである。この今後の課題として、出力平滑化を考慮に入れた研究を行う。

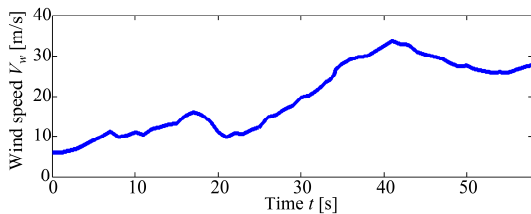


図7 風速

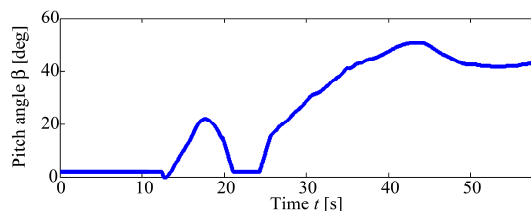


図8(a) ピッチ角

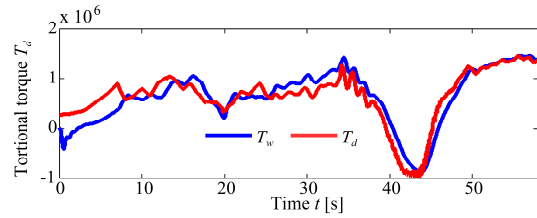


図8(b) ねじれトルク

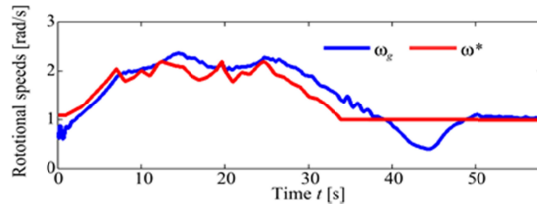


図8(c) 回転速度

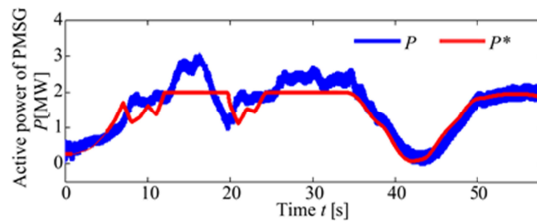


図8(d) 有効電力

図8 シミュレーション結果

[参考文献]

- (1) Mohsen Rahimi, "Drive train dynamics assessment and speed controller design in variable speed wind turbines," *ELSEVIER, Renewable energy*, pp716-719, 2016
- (2) John Licari, Carlos E. Ugalde-Loo, Janaka B. Ekanayake, "Damping of torsional Vibrations in Variable-Speed Wind Turbine," *IEEE transactions on energy conversion*, 2013
- (3) Tomonobu Senjyu, Eitaro Omine, Daisuke Hyashi, Muhando Billy Endusa, Atsushi Yona, Toshihisa Funabashi, and KIM Chul-hwan, "Balancing Control for Dispersed Generator Considering Torsional Torque Suppression," *The International Conference on Electrical Engineering 2007*,

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

Atsushi Kina, Gul Ahmad Ludin, Tomonobu Senjyu, Abdul Motin Howlader and Mir Sayed Shah Danish, "Torsional Oscillation Damping Control for Wind

Turbine Generator under Strong Wind Conditions," IEEE TENCON 2016 TECHNOLOGIES FOR SMART NATION, Nov. 22-25 2016, Marina Bay Sands, Singapore.

又吉秀仁, 千住智信, 平仲信明:「強風時を考慮した小型垂直軸風車の系統連系」, 電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, 平成 28 年 3 月 8~9 日, 九州工業大学戸畑キャンパス(福岡県北九州市)

喜納淳, 千住智信:「風力発電機の軸ねじれ振動抑制」, 平成 27 年度電気学会九州支部沖縄支所講演会, 2015 年 12 月 17 日, 琉球大学千原キャンパス(沖縄県中頭郡西原町)

森永崇太, 池間大記, 又吉秀仁, 千住智信:「強風時における垂直軸小型風力発電機の出力制御」, 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2014 年 9 月 10~12 日, 同志社大学京田辺キャンパス(京都府京田辺市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千住 智信 (SENJYU Tomonobu)

琉球大学・工学部・教授

研究者番号: [40206660](#)

(2) 研究分担者
なし ()

研究者番号:

(3) 連携研究者
なし ()

研究者番号:

(4) 研究協力者
なし ()