

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14957

研究課題名（和文）システム事故に対して頑強な風力発電機の統合最適制御方法の開発と実機検証

研究課題名（英文）Development of a robust control method for wind turbines under grid voltage dips

研究代表者

小岩 健太 (Koiwa, Kenta)

千葉大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：80815481

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、風力発電の導入拡大に資するために、システム事故時における風力発電機の運転継続技術を開発する。風力発電機はシステム事故に対して影響を受けやすいため、システム事故により風力発電機群が一齐にシステムから切り離され、電力系統の大停電を引き起こすことが問題視されている。したがって、風力発電のさらなる導入拡大を実現するためには、システム事故時における風力発電機の運転継続制御技術の開発が急務である。事故時の運転継続の達成には、風力発電機を電力系統に接続するために使用される2つの電力変換器の制御が鍵となる。上記課題を解決するために、本研究では積分器を使用しないモデル予測制御法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

風力発電機群が一齐に解列した場合、電力系統の大規模停電が生じてしまう。停電により現代社会を支える電力供給が遮断された場合、経済的損失を含めその損害は図り知れない。今後風力発電の導入が進んだ場合、この危険性はさらに増加すると考えられる。したがって、本問題の解決の一助となる本研究の成果がもたらす社会的インパクトは計り知れない。また、電力工学の問題を先端制御理論により解決に導いた本研究は、分野の融合により工学の問題を解決できることを示したといえる。したがって、その学術的価値は高い。

研究成果の概要（英文）：We develop a control method for wind power generation to operate wind turbines stably under the voltage dips. Wind turbines should be properly operated in the normal steady-state and the transient state under grid voltage dips. Therefore, it is necessary to design an appropriate full converter control system. To overcome these problems, we propose a simple control method without an integrator for full converters based on a model predictive control.

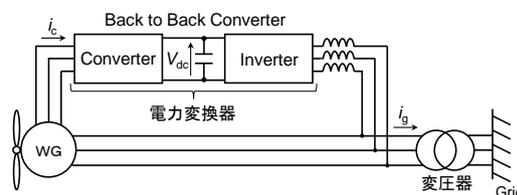
研究分野：電力システム

キーワード：風力発電機 電力変換器 電力システム

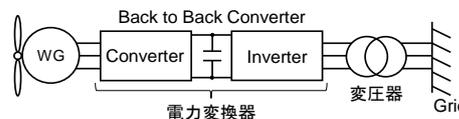
1. 研究開始当初の背景

環境問題から風力発電の導入が拡大している。2017 年末における世界の風力発電導入量は約 540GW であり、2007 年に比べて約 5.7 倍となった。そして、今後もさらなる導入拡大が期待されている[Global Wind Energy Council, Global Wind Report 2017 [R], 2018]。一方、風力発電機は落雷などに起因した系統事故の影響により、電力系統から解列(風力発電機が電力系統から切り離されること)することが問題となっている。風力発電の解列が一つの原因であった 2006 年の欧州大陸広域停電からもわかるとおり、風力発電機群が一斉に解列した場合、電力系統の大規模停電が生じてしまう。停電により現代社会を支える電力供給が遮断された場合、経済的損失を含めその損害は図り知れない。今後風力発電の導入が進んだ場合、この危険性はさらに増加すると考えられる。このような背景から、風力発電の導入拡大を実現するために、風力発電機の事故時運転継続技術の開発が急務となっている。

図 1 に可変速風力発電機の主なタイプを 2 つ示す。図における 2 つの電力変換器 (Back to Back Converter 以下 BTB コンバータと略す) は風力発電機の制御と系統に連系するために用いられる。可変速風力発電機は発電機および電力変換器が電力系統に直接接続されるため、系統事故の影響を受けやすい。事故による影響で風力発電機が解列する最大の要因は、電力変換器に過電流が流れ動作不能となることや直流リンクコンデンサが過電圧により破壊されることである。したがって、事故時運転継続を達成するためには、これらの過電流および過電圧を防ぐ必要がある。加えて、事故の影響により風力発電機のトルクが大きく変動した場合、風車のブレードに大きく負担がかかり破損することもあるため、事故時においては急激なトルク変動も抑制しなければならない。さらに、ドイツやスペイン等では事故により低下した系統電圧値に応じて系統に無効電流を注入することも求められている。以上のとおり、系統事故時に風力発電機(電力変換器)は多様な制御要求を達成しなければならない。これらの制御要求を事故時の短い時間内に確実に達成するためには、高速高精度で風力発電機を運用可能にする電力変換器の制御系を設計する必要がある。しかしながら、これまで、上述した多様な制御要求をすべて満足する制御器の構造および制御系設計法は未だに確立されておらず、風力発電機の導入拡大を実現するための大きな障害となっている。



(a) 二重給電誘導発電機



(b) 永久磁石式同期発電機

図 1 可変速風力発電機

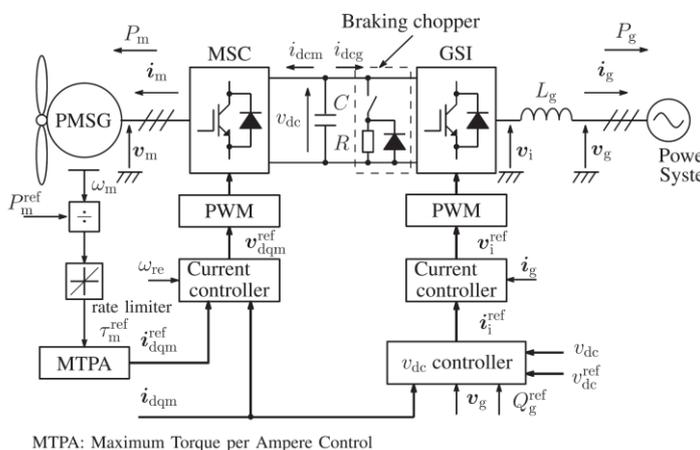
2. 研究の目的

風力発電の導入拡大に貢献するためには、「課題：系統事故時の多様な制御要求を満たし、運転継続を行う風力発電機の制御系設計」が必要不可欠である。したがって、本研究ではこの問題を解決することを目的とする。また、従来の制御器は試行錯誤的に設計されており、体系的な方法論は未確立である。そのため、設計者のスキルにより得られる性能が異なるという問題点もある。これを踏まえ、本研究では試行錯誤によらない体系的な設計方法の確立も視野に入れ、上記課題を解決する。

3. 研究の方法

電力変換器のモデルを構築する、そして、電力変換器の性能を最大限引き出すために、モデル予測制御を用いた制御方法を開発する。また、この際、通常制御器に使用される積分器を取り除き、システムのダイナミクスならびに設計パラメータを低減することで、高速高精度かつ試行錯誤不要な制御器構造を実現する。

下記に本研究により開発した、制御器を具体的に説明する。本研究の対象である永久磁石同期発電機を用いた風力発電システムを図 2 に示す。図におい



MTPA: Maximum Torque per Ampere Control

図 2 永久磁石同期発電機を用いた風力発電システム

て i, v は電流および電圧, P は有効電力, R, L, C は抵抗, インダクタンス, キャパシタンス, ω は角周波数, θ は位相角をあらわす. なお, 右下付き dq は d - q 回転座標系における状態量, として, m, i, g, dc はそれぞれ発電機側, インバータ側, 系統側, 直流リンクの状態量であることを意味する. また, 右上付き ref は目標値を表している. コンバータ発電機出力 (トルク) を目標値に制御することが目的である.

制御器を設計するために, 発電機および系統側の回路の差分方程式, そして DC リンク電圧に関する状態方程式を導出するとそれぞれ

発電機 :

$$\begin{bmatrix} i_{dm}[k+1] \\ i_{qm}[k+1] \end{bmatrix} = A_m \begin{bmatrix} i_{dm}[k] \\ i_{qm}[k] \end{bmatrix} + B_m \begin{bmatrix} v_{dm}[k] \\ v_{qm}[k] \end{bmatrix} + F_m, \quad (1)$$

系統側回路 :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha g}[k+1] \\ i_{\beta g}[k+1] \end{bmatrix} = a_g \begin{bmatrix} i_{\alpha g}[k] \\ i_{\beta g}[k] \end{bmatrix} + b_g \begin{bmatrix} v_{\alpha i}[k] \\ v_{\beta i}[k] \end{bmatrix} + F_g, \quad (2)$$

DC リンク電圧 :

$$\frac{dv_{dc}(t)}{dt} = \frac{P_m + P_g - P_{loss}}{C v_{dc}(t)}, \quad (3)$$

となる. ここで,

$$A_m = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R}{L_d} T_s & \frac{\omega_{re} L_q T_s}{L_d} \\ -\frac{\omega_{re} L_d}{L_q} T_s & 1 - \frac{R}{L_q} T_s \end{bmatrix}, B_m = \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L_q} \end{bmatrix}, F_m = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\omega_{re} \phi_f}{L_q} T_s \end{bmatrix}, a_g = \left(1 - \frac{R}{L_g} T_s\right), F_g = -b_g \begin{bmatrix} v_{\alpha g}[k] \\ v_{\beta g}[k] \end{bmatrix}$$

であり, T_s はサンプリングタイムを表す. なお, 制御系において積分器を取り除くために, 系統側回路におけるモデルは $\alpha\beta$ 座標系にて導出している.

発電機および系統側の回路において高速高精度な電流応答を実現するために下記の評価関数の最小化を考える.

$$J_1(i_{dq}[k+1]) = (i_{dm}^{ref} - i_{dm}[k+1])^2 + (i_{qm}^{ref} - i_{qm}[k+1])^2, \quad (4)$$

$$J_2(i_{\alpha\beta}[k+1]) = (i_{\alpha g}^{ref} - i_{\alpha g}[k+1])^2 + (i_{\beta g}^{ref} - i_{\beta g}[k+1])^2. \quad (5)$$

(4)および(5)式を最小にする最適な電圧制御測 (電力変換器の指令電圧) は(1)から(3)を用いて

$J_1(i_{dq}[k+1]) = 0$ および $J_2(i_{\alpha\beta}[k+1]) = 0$ を解くことで下記のように得られる.

$$\begin{bmatrix} v_{dm}^{ref}[k] \\ v_{qm}^{ref}[k] \end{bmatrix} = B_m^{-1} \left(\begin{bmatrix} i_{dm}^{ref} \\ i_{qm}^{ref} \end{bmatrix} - \left(A_m \begin{bmatrix} i_{dm}[k] \\ i_{qm}[k] \end{bmatrix} + F_m \right) \right), \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha g}^{ref}[k] \\ v_{\beta g}^{ref}[k] \end{bmatrix} = b_g^{-1} \left(\begin{bmatrix} i_{\alpha g}^{ref} \\ i_{\beta g}^{ref} \end{bmatrix} - \left(a_g \begin{bmatrix} i_{\alpha g}[k] \\ i_{\beta g}[k] \end{bmatrix} + F_g \right) \right). \quad (7)$$

(6)および(7)式に基づいて電圧指令値に基づいて電力変換器を制御することで, 高速高精度な電流(トルク)応答を実現できる. 加えて, 上記の制御測は積分および調整パラメータを含んでいないため, 試行錯誤は不要である. なお, (6)式の電流指定値は MPPT 制御ならびに MTPA 制御により与えられる.

DC リンク電圧は図 3 に示す制御系により制御する. 図 3 において(8)式は

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha g}^o \\ i_{\beta g}^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha g}^p & v_{\beta g}^p \\ v_{\beta g}^p & -v_{\alpha g}^p \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_g^{ref} \\ Q_g^{ref} \end{bmatrix} \quad (8)$$

より与えられる. ただし, 上付き文字 p は正相成分を表す. 図 3 から明らかなように, DC リンク電圧制御系においても積分器を含んでいない. なお, DC リンク電圧制御系に含まれる比例制御器は位相余裕などの指標をもとに簡単に設計できる.

4. 研究成果

提案制御系の有効性をシミュレーションにより明らかにする。はじめに、実風速に対する時間応答を確認する。図4および図5に発電機および系統の有効・無効電力を示す。従来の制御系と同様に提案制御でも、安定に風力発電機が制御できていることが図よりわかる。

次に系統事故に対する過渡応答を確認する。なお、系統事故は5秒で系統電圧を85%低下させ、事故継続時間は0.625秒とすることで模擬する。図6にDCリンク電圧、図7に系統電力を示す。提案制御を用いた場合系統電圧の回復と同時に速やかに目標値に制御できていることがわかる。一方、図6からも従来手法では電圧回復時に振動がみられるが、提案制御を用いた場合、振動なく安定に制御できていることがわかる。

以上の結果から、提案制御法は試行錯誤なく設計できるとともに、風力発電機の事故時運転継続性能を高めることができることがわかる。

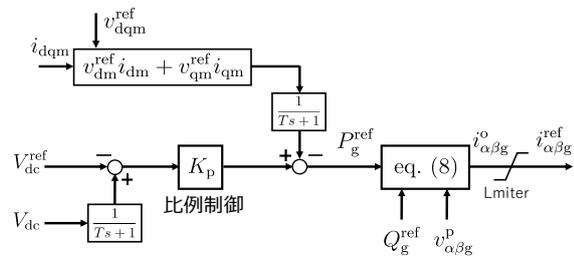


図3 DCリンク電圧制御系

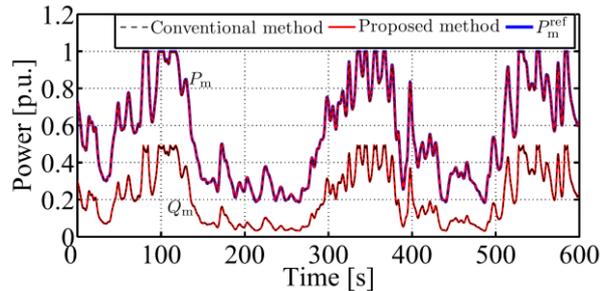


図4 風力発電機出力

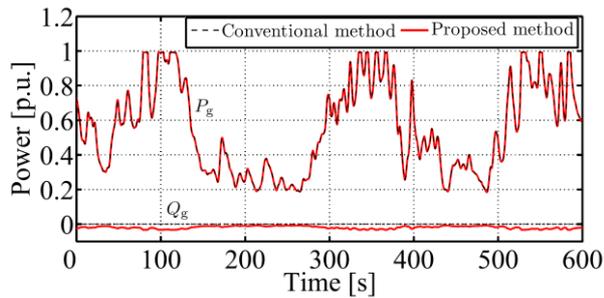


図5 系統出力

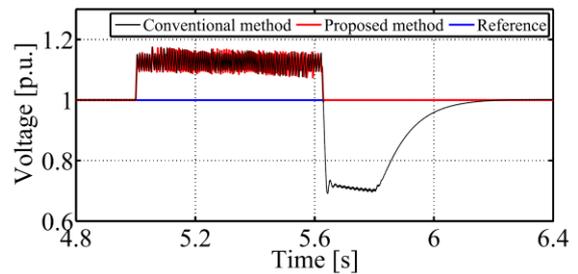


図6 DCリンク電圧(系統事故時)

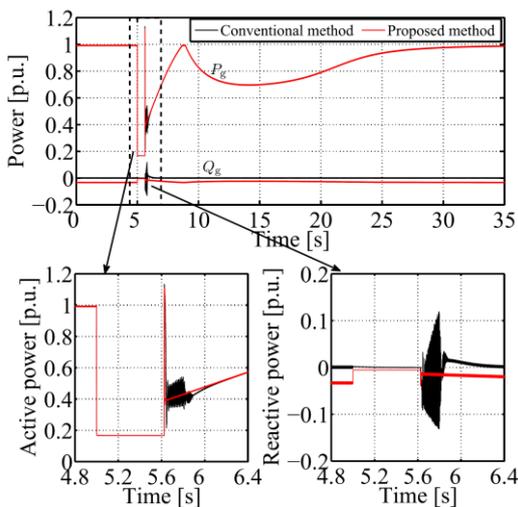


図7 系統出力(系統事故時)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Koiwa Kenta, Ishii Tomoya, Liu Kang Zhi, Zanma Tadanao, Tamura Junji	4. 巻 15
2. 論文標題 One sample optimal output smoothing method for wind farm with energy storage system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IET Renewable Power Generation	6. 最初と最後の頁 653 ~ 663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/rpg2.12052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Koiwa Kenta, Tawara Takuro, Watanabe Mizuki, Liu Kang-Zhi, Zanma Tadanao, Tamura Junji	4. 巻 10
2. 論文標題 Novel Cost Reduction Method for Wind Farms Associated with Energy Storage Systems by Optimal Kinetic Energy Control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 7223 ~ 7223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10207223	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Koiwa Kenta, Ishii Tomoya, Liu Kang-Zhi, Zanma Tadanao, Tamura Junji	4. 巻 35
2. 論文標題 On the Reduction of the Rated Power of Energy Storage System in Wind Farms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power Systems	6. 最初と最後の頁 2586 ~ 2596
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPWRS.2019.2960463	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koiwa Kenta, Liu Kang-Zhi, Zanma Tadanao, Li Yinqxiao, Tamura J.	4. 巻 67
2. 論文標題 Full Converter Control for Variable Speed Wind Turbines without Integral Controller or PLL	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 9418 ~ 9428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2019.2955406	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Liu Kang-Zhi, Akiba Junpei, Ishii Tomoyuki, Huo Xin, Yao Yu, Koiwa Kenta, Zanma Tadao	4. 巻 67
2. 論文標題 Improved Robust Performance Design for Passive Uncertain Systems -Active Use of the Uncertainty Phase and Gain-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 10755 ~ 10765
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2019.2960750	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koiwa Kenta, Kuribayashi Toru, Zanma Tadao, Liu Kang-Zhi, Wakaiki Masashi	4. 巻 13
2. 論文標題 Optimal current control for PMSM considering inverter output voltage limit: model predictive control and pulse-width modulation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IET Electric Power Applications	6. 最初と最後の頁 2044 ~ 2051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/iet-epa.2019.0225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koiwa Kenta, Watanabe Mizuki, Liu Kang-Zhi, Zanma Tadao, Tamura Junji	4. 巻 139
2. 論文標題 An Optimization Approach to Control the Output Fluctuation of Wind Power Generation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power and Energy	6. 最初と最後の頁 527 ~ 528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejpes.139.527	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Kenta Koiwa, Tomoya Ishii, Kang-Zhi Liu, Tadao Zanma
2. 発表標題 A New Optimal Output Smoothing Method for Wind Farm with Energy Storage System
3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2020 (SICE 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有馬幹人, 小岩健太, 劉康志, 残間忠直
2. 発表標題 負荷の正実性に基づくPWMインバータのロバスト制御器設計法
3. 学会等名 計測自動制御学会第8 会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 猪尾幸永, 小岩健太, 劉康志, 残間忠直
2. 発表標題 過電流抑制機構を付加した仮想同期発電機制御,
3. 学会等名 計測自動制御学会第8 会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西弘詞, 劉康志, 小岩健太, 残間忠直
2. 発表標題 非対称事故時の二重給電誘導発電機の最適なCrowbar 解除タ イミング
3. 学会等名 計測自動制御学会第8 会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kouyou Ino, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, Tadanao Zanma
2. 発表標題 Virtual Synchronous Generator with Improvement of FRT Performance
3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2020 (SICE 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoya Ishii, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, Tadanao Zanna, Juniji Tamura
2. 発表標題 Novel ESS Con- troller to Mitigate Wind Farm Output without Phase-lag
3. 学会等名 38th Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kouyou Inoo, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, Tadanao Zanna
2. 発表標題 "An Accurate Model of Virtual Syn- chronous Generator for Grid-Connected Inverter
3. 学会等名 38th Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junpei Akiba, Kenta Koiwa, Tomonori Yoshida, Kang-Zhi Liu, Tadanao Zanna
2. 発表標題 "A Robust Con- troller Design Method for Single-Phase PWM Inverter Based on Positive Realness
3. 学会等名 38th Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋葉淳平, 小岩健太, 劉康志, 残間忠直
2. 発表標題 正実性に基づいた単相PWM インバータの制御器設計
3. 学会等名 第 62 回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 猪尾幸永, 小岩健太, 劉康志, 残間忠直
2. 発表標題 系統連系インバータにおける仮想同期発電機のモデル構築に関する一考察
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小岩健太, 猪尾幸永, 劉康志, 残間忠直
2. 発表標題 系統連系インバータにおける仮想同期発電機の最適制御に関する基礎検討
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関