

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19530833

研究課題名（和文）離島に於ける新エネルギー開発及び利用技術教育に関する研究

研究課題名（英文）Research on Development and Engineering Education for Renewable Energy in Islands.

研究代表者

関根 秀臣 (SEKINE HIDEOMI)

国立大学法人 琉球大学・教育学部・教授

研究者番号：90008516

研究成果の概要：

離島におけるエネルギー確保のために自然エネルギーを活用するための技術ならびに利用技術教育に関して研究を行った。先ず自然エネルギーを電力系統に大規模導入するためには電力負荷需要に応じて発電電力を制御する必要がある。本研究では、オブザーバを用いて負荷需要を推定し、その需要に応じて風力発電機の発電電力を制御することにより電力系統を安定化する手法を開発した。これらの技術により自然エネルギーの利用技術教育が可能となる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：社会科学

科研費の分科・細目：教育学・教科教育学

キーワード：新エネルギー技術教育

## 1. 研究開始当初の背景

近年、環境問題やエネルギー枯渇問題等を克服するため、世界中の多くの地域において環境に優しい発電形態である風力発電が積極的に導入されている。特に我が国に多く存在する離島では、年間を通して良風が得られる風力発電に適した地域が多く存在するため、風力発電設備の導入は離島における主電源である重油ディーゼル発電による環境負荷を低減することができる。しかしながら風

力エネルギーは不規則であり、風速変動により風力発電機出力は大きく変動する。そのため、風力発電機単機容量の増加や電力系統への導入量増加に伴い、離島のような小規模電力系統では周波数変動対策が必要となる。

## 2. 研究の目的

上記の問題を克服するため、これまで報告された論文では風力発電機の出力電力変動

が系統周波数へ及ぼす影響を抑制するため、可変速風車、ピッチ角制御や風車慣性を利用する手法など、様々な風力発電機の出力電力制御法が提案されている。これらの報告では、主に風力発電機出力電力を平滑化することを目的としており、出力電力平滑化は達成されている。しかしながら、今後着実に系統導入量が増加すると予想される風力発電機に潜在する能力の有効活用に関して考えると、負荷周波数に可能な限り影響を及ぼさないように風力発電機出力電力を平滑化する戦略は消極的である。従って、積極的な風力発電機の出力電力制御、つまり風力発電機のアクティブ出力電力制御により電力系統の負荷周波数制御を達成することが必要である。

### 3. 研究の方法

以上のような観点から、本研究では小規模電力系統における負荷電力推定を用いた風力発電機による負荷周波数制御法を提案する。外乱推定オブザーバで負荷電力を推定し、その推定値に基づいて風力発電機のピッチ角制御によるアクティブな発電電力制御により負荷周波数制御を達成する。また、発電電力は風速状況も考慮して決定されており、風速変動が発生した場合でも良好に風力発電機は制御される。風速変動および負荷電力変化時のシミュレーションにより、本手法の有効性を確認する。

本研究で想定する小規模電力系統モデルを図1に示す。電力系統内にはディーゼル発電機、風力発電機があり、これらの発電設備により電力供給を行っている。次に風力発電システムの概要図を図2に示す。本研究では、風力発電機および風車の特性方程式に加え、実機モデルのパラメータを用いることにより風力発電システムの詳細なモデルを作成した。

次に風力発電機のアクティブ出力電力制御を行うための出力電力指令値  $P_{go}$  の決定方法に関して記述する。風力発電機による負荷周波数制御を達成するために供給電力偏差  $P_e$  を零にすることが望ましいため、まず風力発電機に負荷電力と同様の変化を有する出力電力指令値  $P_{go}$  を与える必要がある。負荷電力は外乱推定オブザーバにより推定する。

図1に示す電力系統システムに関して状態方程式を構成し、電力系統において外乱となる負荷電力  $P_L$  を推定するための外乱推定オブザーバを構成する。構成した外乱推定オブザーバを図3に示す。次に図4に示す出力電力指令システムについて説明する。推定した負荷電力の値は風力発電機定格出力よりも大きい。また、負荷電力  $P_L$  の全周波数領

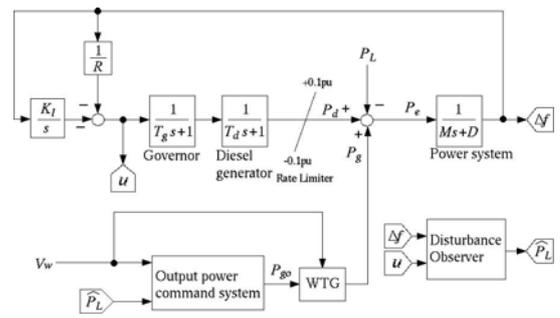


図1 小規模電力系統

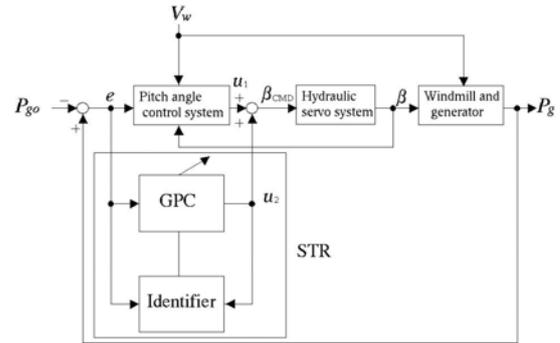


図2 風力発電システムの概要図

域における変動成分を全て風力発電機出力  $P_g$  により補償することは、負荷周波数制限のための風力発電機出力電力の変動幅を増加させる。これは風速状況によって風車出力に制限があるため好ましくない。従って、推定した負荷電力  $\hat{P}_L$  の変動分  $\Delta\hat{P}_L$  を次式により求める。

$$\Delta\hat{P}_L = \hat{P}_L - \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \hat{P}_L dt \quad \dots \quad (1)$$

ここで、 $T$  は積分区間である。次に風力発電機の出力電力指令値  $P_{go}$  を時式に従って決定する。

$$P_{go} = P_{base} + \Delta\hat{P}_L \quad \dots \quad (2)$$

$$P_{base} = \frac{0.5}{10s + 1} P_{g\_max} \quad \dots \quad (3)$$

$$P_{g\_max} = d_1 + d_2 V_w^2 \quad \dots \quad (4)$$

ここで  $P_{base}$  は出力電力指令値の基準値、 $P_{g\_max}$  は風力エネルギーから取得可能な電力である。出力電力指令値の基準値  $P_{base}$  は出力可能電力  $P_{g\_max}$  をフィルタに通して決定している。まず、フィルタの時定数について記述する。風力発電機出力電力  $P_g$  の長周期成分の変化に対して、ディーゼル発電機系が周波数変動を零とするため緩やかに動作

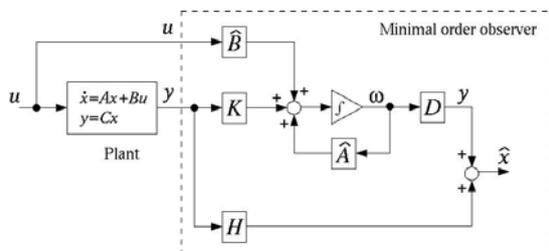


図3 外乱推定オブザーバの構成図

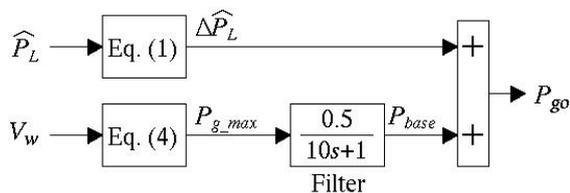
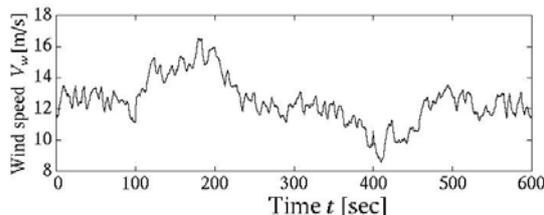


図4 出力電力指令システム

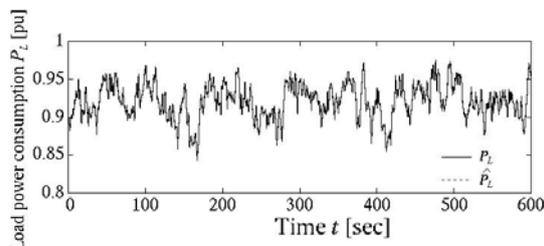
するようフィルタの時定数は10sとした。次にフィルタゲイン（図4中、フィルタの分子の値）について説明する。フィルタゲインは取得可能な電力  $P_{g\_max}$  の中心値とした。これは、出力電力指令値  $P_{go}$  が変動分  $\Delta \hat{P}_L$  に従って下方に振れ、0puを下回ること、風速の急激な減少により取得可能電力  $P_{g\_max}$  を上回ることを避けることが望ましいためである。

#### 4. 研究成果

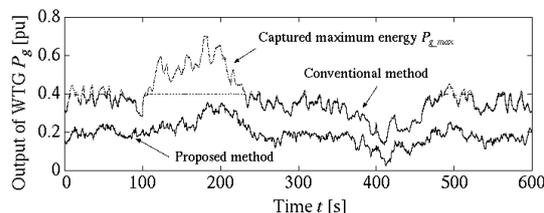
本研究で提案する外乱推定オブザーバを用いた風力発電機のアクティブ出力電力制御による負荷周波数制御の有効性を検証するためにシミュレーションを行う。ここで、風力発電機の定格出力  $275\text{kW}=0.4\text{pu}$  に規格化した。シミュレーションでは、低風速領域において最大電力を発生するためにピッチ角を10度に固定する従来手法と提案手法を適用した風力発電システムにより制御性能比較を行う。本研究で想定した風速変動  $V_w$  および負荷電力  $P_L$  の変化を図5(a)、(b)に示す。外乱推定オブザーバによる推定値  $\hat{P}_L$  は負荷電力  $P_L$  とほぼ一致していることがわかる。図5(c)、(d)からわかるように、提案手法に従ってピッチ角制御により風力発電機の出力電力制御が行われているため、ディーゼル発電機出力電力  $P_d$  は緩やかに変化していることが確認できる。図5(f)は提案手法またおよび従来手法を用いた場合の負荷周波数変動  $\Delta f$  である。従来手法を用いた場合、100s付近において風力発電機の急激な出力電力変動を原因とする大きな負荷周波数変動(約0.4Hz)が生じている。一方、提案手法を用いた場合、風力発電機は提案する出力電力指令システムによって負荷電力変動に応じて出力電力制御を行うため、周波数変動を良好に抑制していることが確認できる。



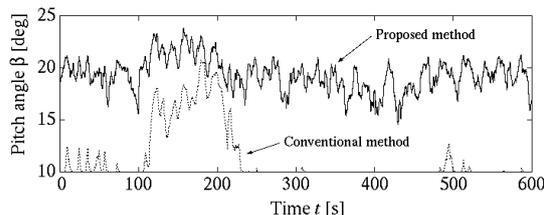
(a) Wind speed



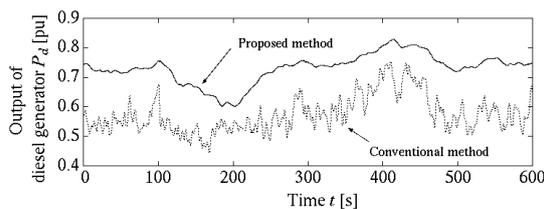
(b) Load power



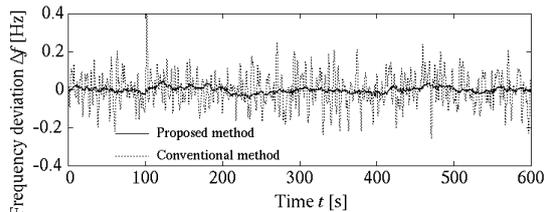
(c) Output power of wind turbine generator



(d) Pitch angle



(d) Output power of diesel generator



(f) Frequency deviation

図5 シミュレーション結果

## 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 8 件)

(1) Tomonobu Senjyu, Jyunya Miyagi, Howlader, A. M., Atsushi Yona, Naomitsu Urasaki, and Hideomi Sekine, ``Bi-directional Zero-current Soft-switching Technique Applied for Bi-directional DC-DC Converter in Energy Capacitor Systems,’’ ELECTRIC POWER COMPONENTS AND SYSTEMS, vol. 36, no. 11, pp. 1183-1199, 2008. 査読有り

(2) Tomonobu Senjyu, Eitaro Omine, Daisuke Hayashi, Hideomi Sekine, and Toshihisa Funabashi, ``Application of decentralized control for remote power system stabilization by installing renewable energy power plant,’’ IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, vol. 3, no. 5, pp. 473-481, Sep. 2008. 査読有り

(3) 與那 篤史, 千住 智信, 舟橋 俊久, 関根 秀臣: 「ニューラルネットワークを用いた太陽光発電設備の24時間先発電電力予測」, 電気学会論文誌. B, 電力・エネルギー部門誌, vol.128, no.1, pp. 33-40, 2008. 査読有り

(4) Tomonobu Senjyu, Tomohiro Yoshida, Mitsuru Nakamura, Naomitsu Urasaki, Toshihisa Funabashi, and Hideomi Sekine, ``Position sensorless control for ultrasonic motors based on input voltage information,’’ ELECTRICAL ENGINEERING IN JAPAN, vol. 163, no. 1, pp. 57-64, Apr. 2008. 査読無し

(5) Tomonobu Senjyu, Mitsuru Nakamura, Naomitsu Urasaki, Hideomi Sekine, and Toshihisa Funabashi, ``Mathematical model of ultrasonic motors for speed control,’’ ELECTRIC POWER COMPONENTS AND SYSTEMS, vol. 36, no. 6, pp. 637-648, 2008. 査読有り

(6) Tomonobu Senju, Ryo Kuninaka, Toshiaki Kaneko, Yoshitaka Miyazato, Atsushi Yona, Naomitsu Urasaki, Toshihisa Funabashi, and Hideomi Sekine, ``Transient Behavior Analysis of Induction Generator at Three-Phase Fault Condition,’’ International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 8, Iss. 2,

page 17(online), 2007. 査読有り

(7) Tomohiro Yoshida, Tomonobu Senjyu, Mitsuru Nakamura, Atsushi Yona, Naomitsu Urasaki, Hideomi Sekine, and Toshihisa Funabashi, ``Position control of ultrasonic motors using two-control inputs H-infinity controller,’’ ELECTRIC POWER COMPONENTS AND SYSTEMS, vol. 35, no. 7, pp. 741-755, Jul. 2007. 査読有り

(8) Tomonobu Senjyu, Ryose Sakamoto, Naomitsu Urasaki, Toshihisa Funabashi, Hideki Fujita, and Hideomi Sekine, ``Output power leveling of wind turbine generators using pitch angle control for all operating regions in wind farm,’’ ELECTRICAL ENGINEERING IN JAPAN, vol. 158, no. 4, pp. 31-41, Mar. 2007. 査読無し

[学会発表] (計 17 件)

(1) Tomonobu Senjyu, Norihiro Nakasone, Atsushi Yona, Ahmed Yousuf Saber, Toshihisa Funabashi, and Hideomi Sekine, ``Operation Strategies for Stability of Gearless Wind Power Generation Systems,’’ Proceedings of the 2008 IEEE PES General Meeting, PESGM2008-001146, 7 pages (CD-ROM), Pittsburgh(USA), Jul. 2008.

(2) Atsushi Yona, Tomonobu Senjyu, Ahmed Yousuf Saber, Toshihisa Funabashi, Hideomi Sekine, and Chul-Hwan Kim, ``Application of Neural Network to 24-Hour-Ahead Generating Power Forecasting for PV System,’’ Proceedings of the 2008 IEEE PES General Meeting, PESGM2008-000641, 6 pages (CD-ROM), Pittsburgh(USA), Jul. 2008.

(3) Tomonobu Senjyu, Yasuaki Kikunaga, Atushi Yona, Hideomi Sekine, Ahmed Yousuf Saber, and Toshihisa Funabashi, ``Coordinate Control of Wind Turbine and Battery in Wind Power Generator System,’’ Proceedings of the 2008 IEEE PES General Meeting, PESGM2008-001134, 7 pages (CD-ROM), Pittsburgh(USA), Jul. 2008.

(4) Tomonobu Senjyu, Yohei Noguchi, Naomitsu Urasaki, Abdul Motin Howlader, Atsushi Yona, and Hideomi Sekine, ``Position Sensorless Control for Interior Permanent Magnet Synchronous

Motors Using H infinity Flux Observer,’’ Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems 2008 (ICEMS 2008), 6 pages (CD-ROM), Wuhan (China), 17–20 Oct. 2008.

(5) Tomonobu Senjyu, Motoki Tokudome, Akie Uehara, Toshiaki Kaneko, Atsushi Yona, Hideomi Sekine, and Chul-Hwan Kim, ‘‘A New Control Methodology of Wind Turbine Generators for Load Frequency Control of Power System in Isolated Island,’’ Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems 2008 (ICEMS 2008), 6 pages (CD-ROM), Wuhan (China), 17–20 Oct. 2008.

(6) Eitaro Omine, Tomonobu Senjyu, Endusa Billy Muhando, Hideomi Sekine, Toshihisa Funabashi, and Ahmed Yousuf Saber, ‘‘Torsional Torque Suppression of Decentralized Generators using H infinity Observer,’’ Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET 2008), pp. 1120–1125, Singapore, Nov. 24–27, 2008.

(7) Eitaro Omine, Tomonobu Senjyu, Endusa Billy Muhando, Atsushi Yona, Hideomi Sekine, Toshihisa Funabashi, and Ahmed Yousuf Saber, ‘‘Coordinated Control of Battery Energy Storage System and Diesel Generator for Isolated Power System Stabilization,’’ Proceedings of the 2nd IEEE Conference on IEEE Power and Energy, pp. 925–930, Johor Bahru (Malaysia), 2008.

(8) Shohei Toma, Tomonobu Senjyu, Atsushi Yona, Hideomi Sekine, Toshihisa Funabashi, and Chul-Hwan Kim, ‘‘Optimal Control of Voltage in Distribution Systems by Voltage Reference Management,’’ Proceedings of the 2nd IEEE Conference on IEEE Power and Energy, pp. 1239–1244, Johor Bahru (Malaysia), 2008.

(9) Tomonobu Senjyu, Motoki Tokudome, Atsushi Yona, Hideomi Sekine, Toshihisa Funabashi, and Chul-Hwan Kim, ‘‘A Frequency Control Approach by Decentralized Generators and Loads in Power Systems,’’ Proceedings of the 2nd IEEE Conference on IEEE Power and Energy, pp. 79–84, Johor Bahru (Malaysia), 2008.

(10) Tomonobu Senjyu, Motoki Tokudome, Akie Uehara, Toshiaki Kaneko, Atsushi Yona,

Hideomi Sekine, and Chul-Hwan Kim, ‘‘A New Control Methodology of Wind Farm using Short-Term Ahead Wind Speed Prediction for Load Frequency Control of Power System,’’ Proceedings of the 2nd IEEE Conference on IEEE Power and Energy, pp. 425–430, Johor Bahru (Malaysia), 2008.

(11) Tomonobu Senjyu, Toshiaki Kaneko, Atsushi Yona, Toshihisa Funabashi, Chul-Hwan Kim, and Hideomi Sekine, ‘‘A New Control Methodology of Wind Farm for Load Frequency Control of Power System in Isolated Island,’’ Proceedings of 7th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems, 6 pages (CD-ROM), Madrid (Spain), May 26–27, 2008.

(12) Tomonobu Senjyu, Daisuke Hayashi, Eitaro Omine, Atsushi Yona, Toshihisa Funabashi, and Hideomi Sekine, ‘‘Stabilization Control for Remote Power System by Using H Infinity Decentralized Controllers,’’ Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting 2007, 8 pages, CD-ROM, Tampa (USA), June 24–28, 2007.

(13) Tomonobu Senjyu, Manoj Datta, Atsushi Yona, Hideomi Sekine, and Toshihisa Funabashi, ‘‘A Coordinated Control Method for Leveling Output Power Fluctuations of Multiple PV Systems,’’ Proceedings of The 7th International Conference on Power Electronics (ICPE’07), no. PD7, pp. 445–450, Daegu (Korea), Oct. 22–26, 2007.

(14) Tomonobu Senjyu, Manoj Datta, Atsushi Yona, Hideomi Sekine, and Toshihisa Funabashi, ‘‘A New Method for Smoothing Output Power Fluctuations of PV System Connected to Small Power Utility,’’ Proceedings of The 7th International Conference on Power Electronics (ICPE’07), no. WEE2-1, pp. 829–834, Daegu (Korea), Oct. 22–26, 2007.

(15) Tomonobu Senjyu, Yohei Noguchi, Naomitsu Urasaki, Atsushi Yona, Hideomi Sekine, and Toshihisa Funabashi, ‘‘Wide-Speed-Range Optimal PAM Control for Permanent Magnet Synchronous Motors,’’ Proceedings of The 7th International Conference on Power Electronics (ICPE’07), no. WED3-3, pp. 916–921, Daegu (Korea), Oct. 22–26, 2007.

(16) Tomonobu Senjyu, Yohei Noguchi, Naomitsu Urasaki, Atsushi Yona, and Hideomi Sekine, ``Parameter Identification for Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor,’’ Proceedings of International Conference on Electrical Machine and Systems 2007 (ICEMS 2007), pp. 566-571, Seoul (Korea), Oct. 8-11, 2007.

(17) Tomonobu Senjyu, Yasutaka Ochi, Atsushi Yona, and Hideomi Sekine, ``Parameter Identification of Wind Turbine for Maximum Power Point Tracking Control,’’ Proceedings of International Conference on Electrical Machine and Systems 2007 (ICEMS 2007), pp. 248-252, Seoul (Korea), Oct. 8-11, 2007.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

関根 秀臣 (SEKINE HIDEOMI)  
琉球大学・教育学部・教授  
研究者番号：90008516

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者