

Basic Study on Battery Capacity Evaluation for Frequency Control in Power System with a Large Penetration of Wind Power Generation

Akiko Murakami Student Member (The University of Tokyo)

Akihiko Yokoyama Member (The University of Tokyo)

Yasuyuki Tada Member (Tokyo Electric Power Co. Inc.)

Keywords: power system, distributed generation, wind power generation, battery, frequency, load frequency control

In recent years, a lot of distributed generations such as photovoltaic and wind power generations are going to be installed in power systems. However, these generator output changes affect the system frequency. In this paper, the authors propose a systematic method to estimate an appropriate battery storage kWh capacity and its power converter kW capacity for suppressing the system frequency fluctuation caused by the wind power output change.

Three types of wind power outputs shown in Fig. 1 are used here. The maximum change of the wind power generation output is about 1524 (MW) in each case. The initial stored capacity (MWh) at time $t = 0$ is assumed to be a half of the required capacity.

The proposed systematic method is described as follows:

First, the required power converter capacity (MW) of the battery and the initial value in minimization process of the battery storage capacity (MWh) are calculated for the step input of wind power assumed in Fig. 2. The value of the step input is the same one as the assumed maximum change of the wind power generation output mentioned before. The initial MWh value is used to evaluate the required minimum battery storage capacity (MWh) under the

condition that the probability of the frequency existing within the reference value of the deviation is over 98 percents during the simulation period, 600 sec. here.

The frequency changes in Case1 to Case3 with the battery system obtained by the proposed method and without the battery system are shown in Figs. 3 and 4, respectively.

In case without the battery system, Figure 4 shows that the frequency deviation exceeds 0.2 Hz. It has been made it clear that the proposed battery system works effectively and that the proposed estimation method for minimizing the battery storage capacity can be available for the practical design. It has also been concluded that the battery control system should be coordinated with LFC system of thermal power plants and hydro power plants to obtain the minimum required capacity of the battery.

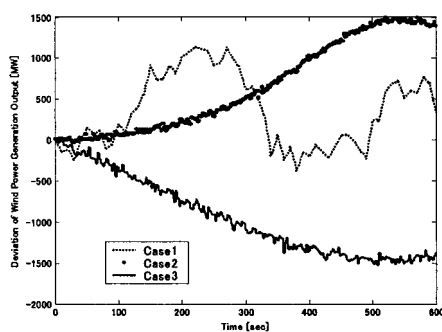


Fig. 1. Output changes from wind power plants

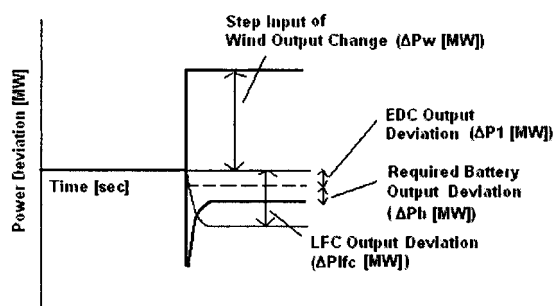


Fig. 2. Output power change from battery and LFC system

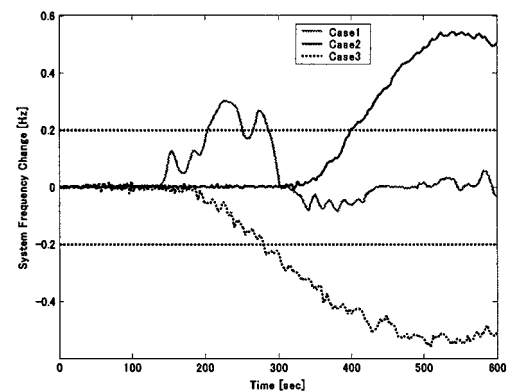


Fig. 3. Frequency change (without battery system)

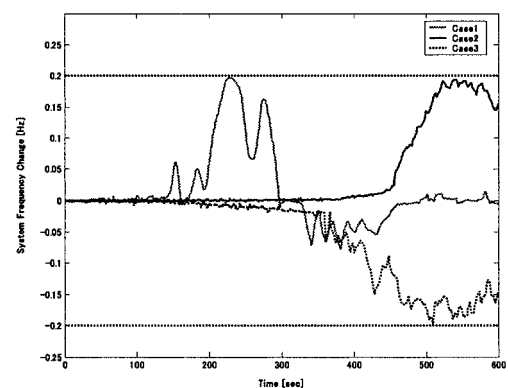


Fig. 4. Frequency change (with battery system)

大容量風力発電が導入された電力系統における周波数制御のための蓄電池容量評価に関する基礎的検討

学生員 村上 明子* 正員 横山 明彦*
正員 多田 泰之**

Basic Study on Battery Capacity Evaluation for Load Frequency Control (LFC) in Power System with a Large Penetration of Wind Power Generation

Akiko Murakami*, Student Member, Akihiko Yokoyama*, Member, Yasuyuki Tada**, Member

In recent years, a lot of distributed power generation such as photovoltaic and wind power generation are going to be installed in power systems. However, the fluctuation of these generator outputs affects the system frequency. Therefore, introduction of battery system to the power system has been considered in order to level the fluctuation of the total power output of the distributed generation. In the present paper, the authors propose a systematic method to evaluate the appropriate battery storage capacity and the power converter capacity of the battery for the various type of wind power outputs. The minimum required capacity of the battery is determined reasonably from the viewpoints of battery cost and load frequency control system in a power system with a large penetration of wind power generation.

キーワード：電力系統，分散型電源，風力発電，蓄電池，周波数，LFC

Keywords: power system, distributed generation, wind power generation, battery, frequency, load frequency control

1. はじめに

近年，風力発電や太陽光発電などの自然エネルギーは，二酸化炭素排出量を軽減するものとして系統への導入が大きいと期待されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら，これら分散型電源の系統への導入が進むにつれて，系統周波数変動や電圧変動など系統への悪影響が懸念されるようになってきている。一方，これらの問題を解決する手段として，NAS 電池や Redox Flow 電池などの電力貯蔵技術が検討されている。

最近では，NEDO のプロジェクトとして，太陽光発電装置が大量に集中的に連系された配電線の電圧制御に蓄電池を用いる実証試験や数万 kW 級大容量ウィンドファームの出力平準化にオンサイトに設置された蓄電池を用いる実証試験が行われている。しかしながら，風力発電による系統周波数の変動を抑制するため，系統内の周波数制御（LFC：Load Frequency Control）用発電所と協調して系統内に設置された蓄電池を制御する研究はまだ行われていない。

そこで，本研究では，系統へ大容量の風力発電が導入された際に，系統内に設置された蓄電池を用いて，LFC 用発電機との協調を図りつつ，系統周波数を規定値内に抑えることを目的としている。上記を達成するために，制御，コスト面を考慮した蓄電池システムの，いわゆる約 20 分周期以下の短周期風力出力変動に起因する周波数変動を抑制するのに必要な変換器の容量（MW）と蓄電池の最小貯蔵容量（MWh）を効率的に算出する手法を本稿では提案する。なお，風力発電所，蓄電池の設置場所については，実際には送配電系統の潮流，電圧分布，短絡容量など様々な面を考慮して，またそれに合わせた蓄電池の制御方法も考慮する必要があるが，本稿では系統周波数の変動抑制のみを目的とするので，設置場所については扱わないものとする。

2. 風力発電

風力発電は，風向，風速に大きく左右される上に風の保有するエネルギーが風速の 3 乗に比例するため出力変動が大きい。また，風力発電は，風を動力源として発電するシステムであるため，その発電出力は天候，立地条件等に左右されて絶えず変動し，かつその変動が大きい。電力系統に与える影響が懸念されている。風力発電出力の変動の様子の例を図 1 に示す。風力発電出力は，零から定格付近まで変動するが，約 20 分周期以下の短周期出力変動は，一般に定格出力の 30% 未満といわれている。

* 東京大学大学院 工学系研究科 電気工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
Dept. of Electrical Engineering, The University of Tokyo
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

** 東京電力（株）
〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1
Tokyo Electric Power Company
4-1, Egasakityou, Tsurumi-ku, Yokohama 230-8510

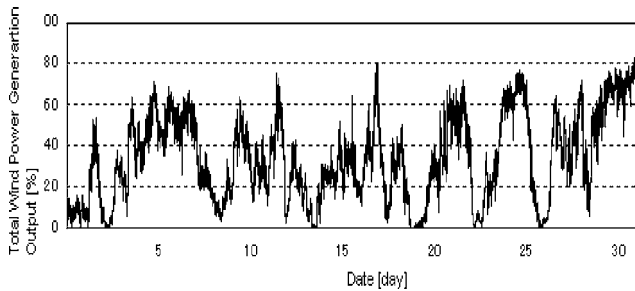


図 1 風力発電出力変動の例

Fig. 1. An example of wind power fluctuation.

風力エネルギーは無尽蔵でクリーンであるが、しかしエネルギー密度が低く、エネルギー量の中で実際に利用できる量は限られている。従って、風力発電機から得られたエネルギーを最大限に利用することが重要である。

風力発電は、技術的にはほぼ実用段階に達しており、我が国では、国の支援制度、RPS法の導入や電力会社による購入メニュー等が整備されたことにより、近年導入が急速に進んできた。平成17年3月末で、約90万kWが導入されている。国策として2010年には300万kWを目標としており、今後一層導入を進める必要がある。このために、本研究では、風力発電大量導入の制約となる系統周波数変動について焦点を当てて検討を行うこととしている。

3. 負荷周波数制御

ここでは、周波数制御について簡単に述べておく。系統へ入力される外乱である負荷変動には様々な周期成分があり、そのそれぞれの周期成分の負荷変動に合わせて発電出力をバランスさせる需給制御がなされている。その様子を図2（文献(5)参照）に示す。本研究では火力発電所や水力発電所で行われているいわゆるLFC（負荷周波数制御）容量の不足分を蓄電池制御によって補償することを目的とするので、図2よりわかるように、約20分以下の周期成分の領域を研究対象とする。LFCとは、系統周波数の偏差を検出し、それを用いて系統内での発電出力と負荷需要との差（地域要求量）を計算し、その差を補償するように指定された発電所に発電出力変化を割り当てて、周波数偏差を零に近づけるフィードバック制御のことである。日本における周波数偏差目標値を表1に示す。本研究では東地域を対象としている。

4. 周波数制御解析用モデル

電力システムの周波数制御解析用モデルを図3に、シミュレーションに用いる詳細ブロック図を図4に示す。これは動作点からの偏差を扱う伝達関数モデルである^{(3)~(9)}。ここでは水力機群、火力機群、原子力機群をそれぞれ1つの発電機ガバナ制御系で表現し、発電機（系統）モデルは全系を統合した1台のモデルで表現している。

我が国では、原子力機は出力一定運転をしているので、動

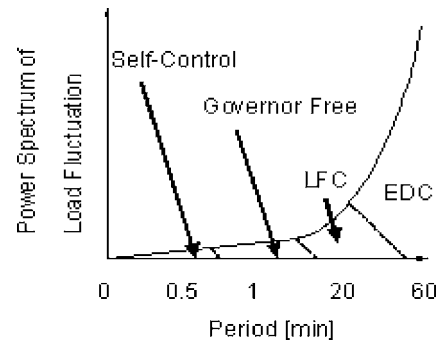
図 2 需給制御分担概念図⁽⁵⁾

Fig. 2. Load-demand control and power spectrum of load fluctuation.

表 1 日本における周波数偏差目標値

Table 1. Reference of frequency deviation in Japan.

Area	Maximum Deviation(Hz)
Hokkaido Area(50Hz)	± 0.3
East Area(50Hz)	± 0.2
Middle, West Area(60Hz)	± 0.1 (existing prob.95%)
Okinawa Area(60Hz)	± 0.3

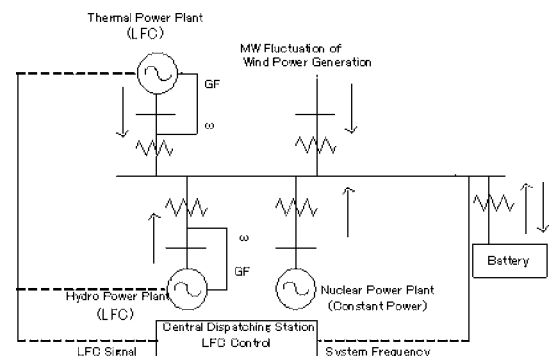


図 3 周波数制御解析のための電力システムモデル

Fig. 3. Power system model for frequency control analysis.

作点からの偏差を扱う伝達関数モデルでは、原子力機は常に発電機出力偏差は零であり、図4のブロック図には現れないことになる。そしてLFCとしては、地域要求量(AR)を用いたPI制御系を組み込んで、水力機、火力機の出力設定値を制御している。また電気学会東地域10機系(発電機定格総容量82000MW、夜間連系総容量49000MW、夜間負荷合計36000MW)を解析対象とした。そしてLFC能力が一番弱まる時間帯に、大きな風力発電出力変動が入力された状態を解析するために、この電気学会モデルを用いて夜間断面にできるだけ近くなるように模擬している⁽¹⁰⁾。仮定した夜間断面とは、発電機総出力が36000MWで、水力発電機総出力2800MW(連系総容量は3000MW)、火力発電機総出力11200MW(連系総容量は24000MW)、そして原子力発電機総容量22000MW(連系総容量は22000MW)が電力系統に連系されている状態である。図4に用いた電

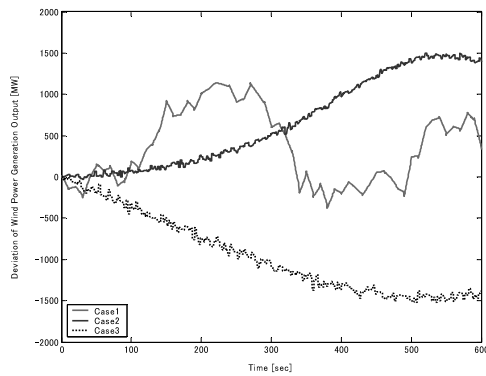


図5 風力発電出力変動

Fig. 5. Output change of wind power generation.

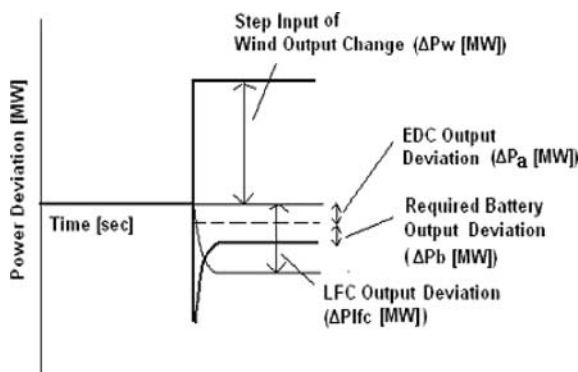


図6 風力発電出力変動のステップ入力に対する蓄電池出力とLFC出力との関係

Fig. 6. Output power change from battery and LFC system.

図7に系統発電機モデルを示す。 ΔP [p.u.]を許容周波数電力偏差、 M を全系発電機の等価慣性定数、 D を負荷の周波数特性係数とすると、最終値の定理より系統周波数偏差 Δf は次式となる。

$$\Delta f/50 = \Delta P/D \text{ [p.u.]} \dots\dots\dots (1)$$

50は基準周波数を表す。例えば偏差 ΔP_w [MW]の風力変動が生じたときに、周波数を規定値内 Δf_r [Hz]に抑えるためにLFCが出力する偏差を $\Delta Plfc$ [MW]、蓄電池変換器が出力する偏差を ΔPb [MW]、そして許容周波数電力偏差(あるいはEDC出力残差)を ΔPa [MW]とすると、

$$\Delta P_w = \Delta Plfc + \Delta Pb + \Delta Pa \text{ [MW]} \dots\dots\dots (2)$$

となり、 Ψ_y [MW]を系統容量とすると、(1)式より次式を得る。

$$\Delta f_r/50 = \Delta Pa/\Psi_y/D \text{ [p.u.]} \dots\dots\dots (3)$$

これを解くと、

$$\Delta Pa = D * \Delta f_r * \Psi_y/50 \text{ [MW]} \dots\dots\dots (4)$$

となり、(2)式、(4)式より蓄電池変換器に必要な出力偏差は

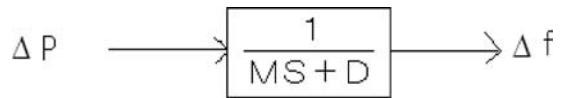


図7 系統発電機モデル

Fig. 7. System generator model.

$$\Delta Pb = \Delta P_w - \Delta Plfc - (D * \Delta f_r * \Psi_y/50) \text{ [MW]} \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここでLFCの出力偏差 $\Delta Plfc$ は、蓄電池システムがないものとして、図6に示す風力のステップ入力をもとにシミュレーションを行い求める。

次に蓄電池容量最小化のための初期値を W_b [MWh]、シミュレーション対象時間を T_{sim} [sec]とすると、

$$W_b = \Delta Pb * T_{sim}/3600 \text{ [MWh]} \dots\dots\dots (6)$$

と表すことができる。ここでは T_{sim} を600 secとしている。これは、仮定した風力波形が半周期であり、従って600 secの2倍の20 minがLFCの対応する負荷変動への変動周期最大値に近い時間であることと、また約600 secの時からLFCが十分に稼動するため蓄電池変換器出力量が微量となり考慮しなくてもよいからである。この値を初期値として、蓄電池貯蔵容量の増減を行い、それぞれについて図4のモデルを用いて動的シミュレーションを行って系統周波数偏差が規定値内に収まるときの最小容量を求める。尚、規定値内に収まる時間滞在率を98%以上としている。これは、周波数を100%規定値内に収めるために必要なLFC容量と蓄電池容量の和である周波数調整容量と98%内に収めるために必要な調整容量とを比較すると、前者ではこのわずか2%増のために非常に大きな設備容量を必要とする場合があり、大容量風力発電を導入するのに必要な周波数調整設備の有効利用を図るために滞在率を98%としている。

6. 数値シミュレーション

本章では、各シミュレーション結果を示す。尚、各風力発電出力ケースに対するシミュレーションを通して、分散制御と集中制御との結果にはほとんど違いが見られなかったため、分散制御の場合の結果を示すことにする。

〈6・1〉蓄電池システムの有無による比較 ここで蓄電池システムの必要性を評価する。

蓄電池システムがない場合の系統周波数偏差の様子を図8に示す。また、図5に示す3ケースの風のそれぞれに対して理想的な蓄電池最小必要容量で制御した場合(表3のSIM1に対応)の様子を図9に示す。図8より蓄電池システムがない場合、LFCのみでは周波数偏差を ± 0.2 Hz以内に抑えることができないことが分かる。

〈6・2〉試行錯誤的手法(SIM1)と体系的手法(SIM2)との比較 体系的手法(SIM2)の妥当性を評価するために試行錯誤的手法(SIM1)を用いたときの結果と比較する。結果を表3に示し、Case1のSIM2で得られた結果から、系

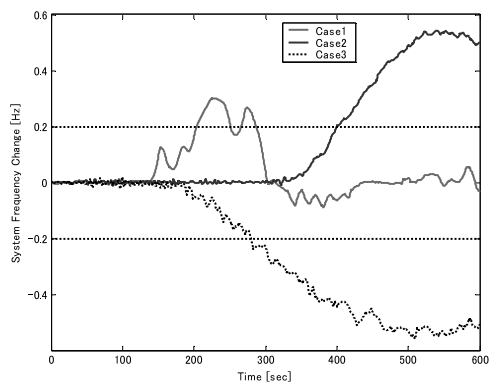


図 8 系統周波数偏差 (蓄電池システムなし)
Fig. 8. Frequency change (without battery system).

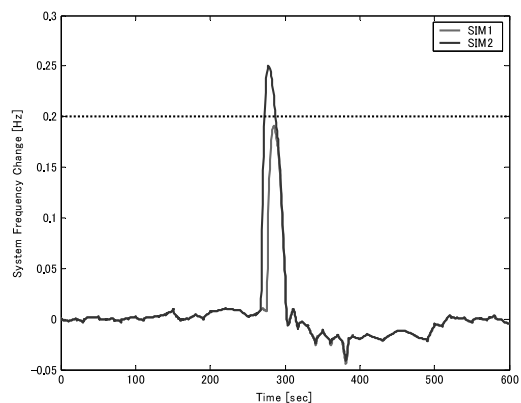


図 10 系統周波数偏差 (Case1)
Fig. 10. System frequency change (Case1).

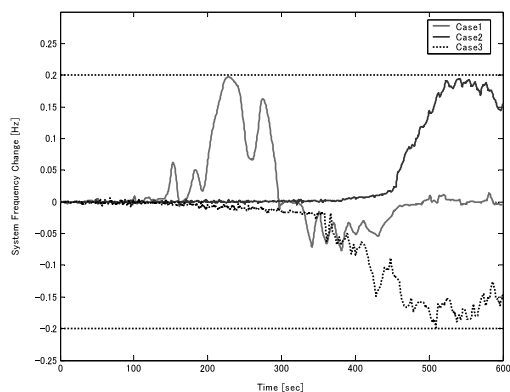


図 9 系統周波数偏差 (蓄電池システムあり)
Fig. 9. Frequency change (with battery system).

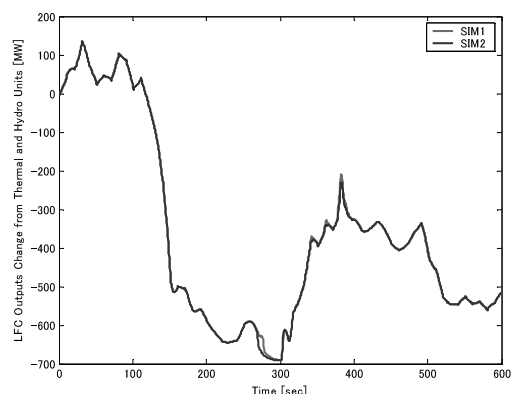


図 11 LFC (火力, 水力) 出力偏差 (Case1)
Fig. 11. System frequency change (Case1).

表 3 蓄電池による変換器出力と必要最小容量
(分散制御)

Table 3. Converter output and minimum required storage capacity of battery in decentralized control.

Wind Type	Converter Capacity (MW)		Initial Value Wb by SIM2 (MWh)		Minimum Required Capacity of Battery (MWh)		Probability within the reference of frequency deviation (%)	
	SIM2	SIM1	SIM2	SIM1	SIM2	SIM1	SIM2	SIM1
Case1	543	150	90	—	34	20	98	100
Case2	543	500	90	—	93	90	100	100
Case3	543	520	90	—	113	120	100	100

統周波数偏差の様子を図 10 に、各出力の様子を図 11、図 12 に示す。様々な風が存在することを考えると、SIM1 からは、変換器容量が 3 ケースの最大値の 520 MW 必要であることがわかる。SIM2 からは、変換器容量として 543 MW が得られる。

図 10 において、約 250~300 秒のあたりで周波数偏差が

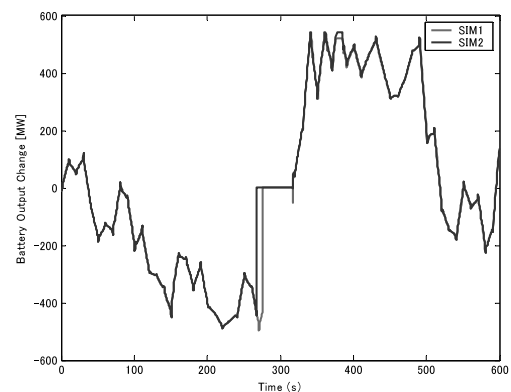


図 12 蓄電池変換器出力偏差 (Case1)
Fig. 12. Battery output change (Case1).

大きく変動しているのは、図 11 に示すように LFC 調整容量を使い切り、図 12 よりわかるように蓄電池が満充電になったために充電が止まり、全体の周波数調整容量が不足したために周波数が急上昇し、300 秒あたりで、ちょうどタイミングよく風力出力が減少したので周波数が元に戻っているのである。図 10 における、体系的手法 (SIM2) による結果は時間滞在率 98% を、試行錯誤的手法 (SIM1) による結果では 100% を満足する設定となっている。他の風力

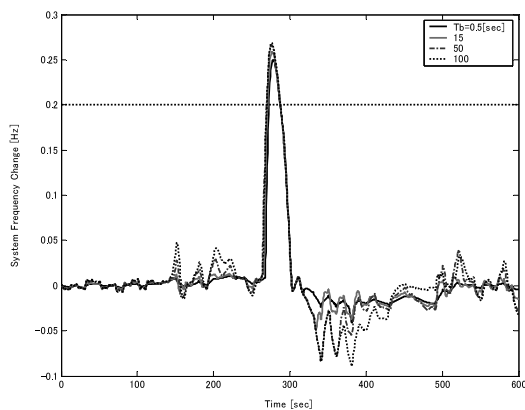


図 13 系統周波数偏差

Fig. 13. System frequency change.

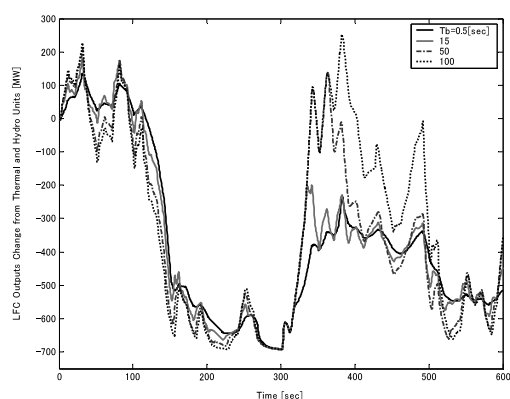


図 14 LFC（火力，水力）出力偏差

Fig. 14. LFC outputs change.

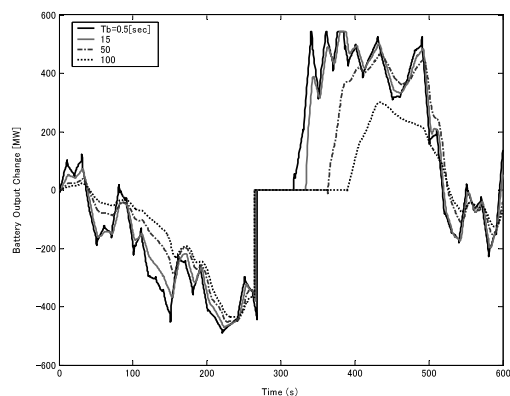


図 15 蓄電池変換器出力偏差

Fig. 15. Battery output change.

ケースの結果からも SIM1 と SIM2 の大差は見られず、体系的手法の妥当性を確認できたと言える。

〈6・3〉蓄電池システム時定数による比較 蓄電池システムが、LFC システム応答時間 (10.5 sec.) より速く応答する場合 (0.5 sec.) と遅く応答する場合 (15, 50, 100 sec.) のシミュレーションを行う。これにより、追従時間の相違により蓄電池必要量にどのような違いを与えるのか評価する。風力変動 Case1 における各出力の様子を図 13～図 16

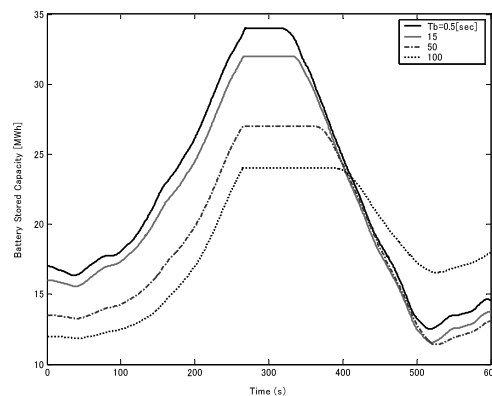


図 16 蓄電池出力

Fig. 16. Battery stored capacity.

に示す。

設定した条件下では、LFC 制御量の余裕がある場合は蓄電池システム時定数が大きいほど蓄電池容量が少なくなっている。これらから言えることは、蓄電池システムと LFC システムとの協調制御が重要であるということである。

7. おわりに

本研究では、LFC 余裕の少ない夜間に大容量の風力発電を導入した電力系統において、系統周波数を規定値内に維持して安定な電力供給を果たすために蓄電池システムと LFC システムの協調を図ることを試みた。そしてこのときにコストを考慮し蓄電池の周波数制御に必要な変換器容量、最小貯蔵容量を算出する手法を提案した。

今後は、負荷需要変動も考慮してシミュレーションを行うことで、実際の電力システムに近づけることができ、さらに精度の高い結果を得ることができると考えられる。

今回は風力出力変動を 3 ケース設定してシミュレーションを行ってきたが、実際にはどのようなパターンを設定を行うべきなのかを詳細に決める必要がある。また近い将来、風力発電出力の予測技術が実用化されれば、この技術を導入することによって、予測をもとに蓄電池システムの制御を計画して効率的に稼働させることができると考えられる。

本研究では、系統が単独の電力会社で構成された一地域モデルを用いており、今後は、できるだけ実態に近い地域間連系線により連系された多地域モデルにおいて、その地域間連系線潮流制約等も考慮した検討を行う予定である。

(平成 17 年 2 月 28 日受付, 平成 17 年 9 月 13 日再受付)

文 献

- (1) 「分散型電源技術と電力系統の将来展望」, 電気協同研資, Vol.56, No.4 (2001)
- (2) S. Niyama, O. Romny, K. Nakamura, S. Yamashiro, K. Mitsui, M. Yamagishi, and M. Okamura: "Development of PV-ECS System using New Type Electric Power Storage System ECS", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.2 (2000-2) (in Japanese)
新山信一郎・Om Romny・仲村宏一・山城 迪・三井克司・山岸政章・岡村延夫:「新型電力貯蔵装置 ECS を用いた PV-ECS システムの開発」, 電学論 B, **120**, 2 (2000-2)

- (3) A.J. Wood and B.F. Wollenberg: Power Generation Operation and Control, 2nd ed., Wiley, New York (1996)
- (4) P. Kundur: Power System Stability and Control, Mc-Graw Hill (1994)
- (5) 「電力系統における常時および緊急時の負荷周波数制御」, 電気学会技術報告, Vol.869 (2002)
- (6) A. Nakamura, K. Ezaki, E. Kakinuma, G. Fujita, T. Yamaguchi, R. Yokoyama, K. Koyanagi, and T. Funabashi: "Study on Relationship between Installation Capacity of Wind Power Generation and Power Quality", The Papers of Technical Meeting on PE, IEE Japan (2004) (In Japanese)
中村哲廣・江崎公太・柿沼絵美・藤田吾郎・山口剛史・横山隆一・小柳 薫・舟橋俊久:「風力発電設備導入量と電力品質の関係の検討」, 電気学会研資 (2004)
- (7) T. Michigami and T. Oishi: "Establishment of Dynamic Load Model and Analysis of BTB for AFC", *T. IEE Japan*, Vol.120, No.7 (2000-7) (in Japanese)
道上 勉・大石孝穂:「AFC 制御対象の動的負荷変動モデルの構築と BTB の AFC 連系時の解析検討」, 電学論 B, **120**, 7 (2000-7)
- (8) A. Murakami, A. Yokoyama, and Y. Tada: "Evaluation of Load Frequency Control by Battery in Power System with a Large Penetration of Wind Power Generation", Proc. of 2004 Annual Conference, Power & Energy Society, IEE Japan, No.417 (2004) (in Japanese)
村上明子・横山明彦・多田泰之:「風力発電が大量に導入された電力系統における蓄電池による系統周波数制御の評価」, 平成 16 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.417 (2004)
- (9) A. Murakami, A. Yokoyama, and Y. Tada: "Basic Study on Evaluation of Load Frequency Control by Battery in Power System with a Large Penetration of Wind Power Generation", The Papers of Technical Meeting on PE, IEE Japan, PE-04-103, PSE-04-103 (2004) (in Japanese)
村上明子・横山明彦・多田泰之:「風力発電の導入された電力系統における蓄電池による系統周波数制御の評価に関する基礎検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研資, PE-04-103, PSE-04-103 (2004)
- (10) 「電力系統の標準モデル」, 電気学会技術報告, Vol.754 (1999)
- (11) A. Murakami, A. Yokoyama, and Y. Tada: "Battery Capacity Evaluation for Load Frequency Control (LFC) in Power System with a Large Penetration of Wind Power Generation", 2005 National Convention Record IEE Japan, No.6-083 (2005) (in Japanese)
村上明子・横山明彦・多田泰之:「大容量風力発電の導入された電力系統における系統周波数制御に対する蓄電池容量評価」, 平成 17 年電気学会全国大会, No.6-083 (2005)

村上明子 (学生員) 1979 年 9 月 11 日生。2003 年 3 月同志社大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月東京大学大学院工学系研究科修士課程進学, 現在に至る。主として, 分散型電源を用いた電気エネルギー供給システムに関する研究に従事。



横山明彦 (正員) 1956 年 10 月 9 日生。1984 年 3 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専門課程博士課程修了。工学博士。同年 4 月同大学工学部電気工学科助手, 1985 年同講師, 1989 年助教授, 2001 年同大学大学院工学系研究科教授, 現在に至る。1987 年 2 月～1989 年 2 月テキサス大学アーリントン校客員研究員, この間 1989 年 2 月～1989 年 12 月カリフォルニア大学バークレー校客員研究員。主に電力システム工学の研究に従事。計測自動制御学会, 日本応用数理学会, IEEE, CIGRE 会員。



多田泰之 (正員) 1963 年 3 月 20 日生。1981 年 3 月埼玉県立川越工業高等学校電気科卒業。同年 4 月, 東京電力(株)入社。1988 年東電学園大学部卒業。1989 年 4 月より, 同社技術開発研究所系統技術グループ勤務。1996 年電気学会論文賞, 1998 年同優秀論文発表賞受賞。技術士(電気・電子部門)。博士(工学)。IEEE 会員, 電気学会上級会員。

