

風力発電出力を安定化するための蓄電池システムの制御方式

由本 勝久

風力発電の発電出力は天候や風況に左右されるため、出力変動が著しく安定して電気を得ることが難しい。そのため、今後導入量が増えると、電力系統に大きな影響を及ぼすと懸念される。この対策の一つとして、蓄電池システムによって出力変動を安定化する技術が期待されている。本稿では、風力発電出力を安定化するための蓄電池システムの制御法について説明する。そして、蓄電池システムを継続して運用するのに必要不可欠である充電レベルの制御法を紹介し、その効果や出力安定化に及ぼす影響を検討した結果を述べる。

キーワード：風力発電、ウィンドファーム、出力変動、安定化、蓄電池、充電レベル

1. はじめに

地球温暖化への関心が高まる中、風力発電はクリーンで無尽蔵な再生可能エネルギーとして注目されており、わが国では2010年度末に300万kW（2008年末188万kW）の導入を目標に、北海道、東北地方、九州地方を中心に風力発電設備の建設が進められてきた。しかしながら、風力発電は天候や風況に左右されるため、出力変動が著しく安定して電気を得ることが難しい。また、発電出力を予測しようにもまさに‘風任せ’であるので、予測技術は現在各方面で研究されているものの、十分な精度で予測できる技術は確立されていない。そのため、今後導入量がさらに増大すると、電力系統の品質に及ぼす影響が懸念される[1]。

この対策の一つとして、蓄電池システム（以下、BESS；Battery Energy Storage Systemと略記）によって出力変動を安定化する技術が期待されている[2][3]。筆者らは、多数の風力発電機からなるウィンドファーム（以下、WFと略記）にレドックス・フロー電池を併設し、短周期（数秒から数十分程度以下）のWF出力（WFの風力発電機の合計出力）の変動を平滑化するための技術開発を行っており、平成17年1月より試験設備を用いた実証試験を行ってきた[4][5]。

ところで、BESSを運用する際には、蓄電池の充電

レベルを運転可能な適正範囲に常に維持する必要がある。もし適正範囲を越えた場合には、蓄電池に重大な支障をきたすため、BESSの運転を停止せねばならない。そこで筆者らは、蓄電池の充電レベルを適正範囲内に維持するために、残存容量フィードバック制御（以下、容量FB制御と略記）[6]を開発した。本稿では、この容量FB制御について紹介する。

2. 風力発電出力の変動と電力系統

わが国の電力系統は10のエリアに分けられており、電力会社は自社が管轄するエリア内の需要と供給のバランスを常に維持するよう求められている[1][2]。もしもアンバランスが生ずると、電力系統の周波数を50 Hzあるいは60 Hzに維持できなくなり、需要家も含めた電力系統全体が多大な影響を受ける。周波数が大きく変化した場合、広域にわたる大停電へとつながる恐れもある。

各電力会社では、発電機の出力を調整することで需要と供給のバランスを保っている。しかし、出力調整が可能な発電機は一部に限られ、中でも火力発電機は、起動してから電力系統に接続できるようになるまで相当の時間を要する。電力会社が毎日の需要変動に対応できているのは、電力需要が季節・曜日で日間変動のパターンが似通っていることが大きい。これは高い精度で需要を予測でき、翌日あるいは数時間先の需要変動に備えた発電機の運用を行えるからである。しかし、風力発電の導入量が増えると、その出力を予測するのが困難であるので、需要と供給のバランスを保つのが難しくなると考えられる。

よしもと かつひさ

財団法人電力中央研究所

〒201-8511 狛江市岩戸北2-11-1

風力発電が電力系統に及ぼす影響とその対策については文献[2][7]に詳しいので、詳細はそちらを参照されたい。

3. 蓄電池システムを使ったウィンドファーム出力の安定化

図1に蓄電池システムを併設したWFの概念図を示す。同図では、蓄電池システムの充放電出力(BESS出力)によって変動の大きなWFの発電出力(WF出力)を安定化する様子を示している。安定化された出力は、WF出力とBESS出力を合成していることから、合成出力と呼んでいる。BESSの制御の方法は、WF出力の安定化したい変動周期によって

- ・ 出力平滑化制御 (短周期変動対応)
- ・ 一定出力制御 (長周期変動対応)

の二つに大別される (図2を参照)。

本稿では短周期出力変動を対象とし、WF出力の平滑化を行うためのBESSの制御法を取り上げる。短周期出力変動平滑化用BESSの基本制御のモデルを図3に示す。ここに、一次遅れフィルタの時定数を平滑化時定数と呼ぶ。なお、BESSには交直変換装置の制御遅れやリミッタ等があるので、電力系統に実際に流れる合成出力は合成出力目標値とは異なる。

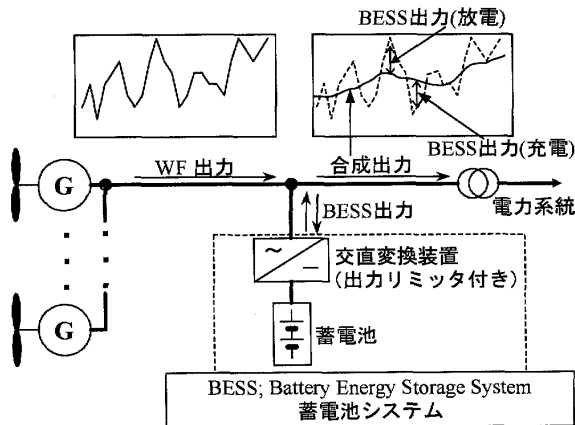


図1 蓄電池システムを併設したウィンドファーム

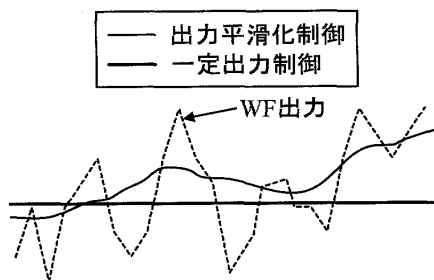


図2 ウィンドファーム出力の安定化の種類

図3に基づき、合成出力目標値および蓄電池出力要求値を伝達関数表記すると、平滑化時定数を T としそれぞれ(1)(2)式となる。図4に合成出力目標値の、図5にBESS出力要求値のゲイン特性を折線で近似して示す (対数表示)。図4と図5は、 $1/T$ より高い角周波数 ($2\pi T$ より短い周期) を平滑化の対象領域として、WF出力の変動が縮小されることを意味する。 T を長く設定することで平滑化効果を向上でき、 $1/(2\pi T)$ をカットオフ周波数という。

ところでBESSの効率が100%で制御遅れがなく、リミッタによる出力制限もない理想蓄電池を考えた場合、蓄電池の充電レベルは(3)式となる。(1)式と(3)式より、理想蓄電池の充電レベルは合成出力目標値の T 倍となることが分かる。また、平滑化効果を上げるために T を長く設定すると、BESS出力と充電レベルの変動が大きくなり、より大きなBESSが必要となることも分かる。

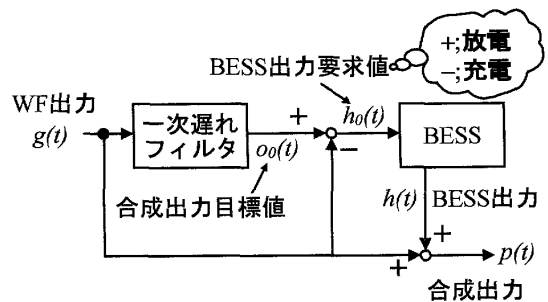


図3 ウィンドファーム出力の平滑化の基本制御

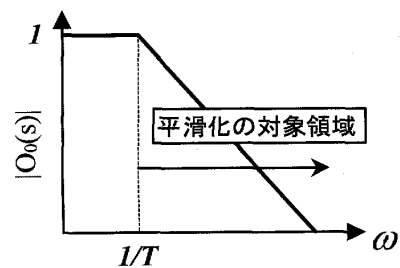


図4 合成出力目標値のゲイン特性

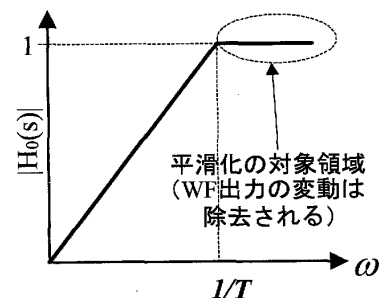


図5 BESS出力要求値のゲイン特性

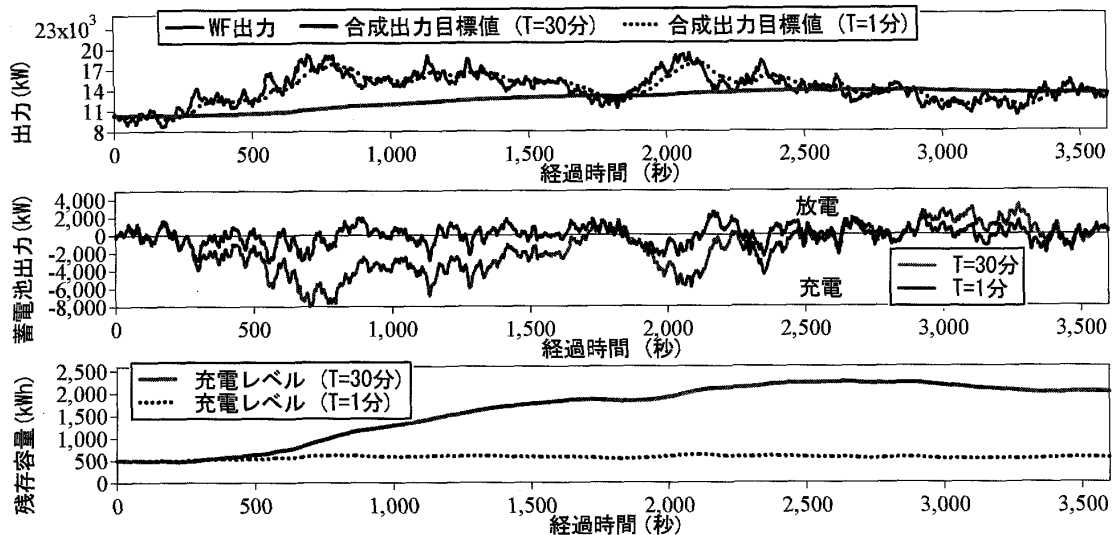


図6 基本制御のシミュレーション結果

合成出力目標値：

$$O_0(s) = \frac{1}{1+sT} G(s) \quad (1)$$

BESS 出力要求値：

$$H_0(s) = \frac{1}{1+sT} G(s) - G(s) = \frac{-sT}{1+sT} G(s) \quad (2)$$

充電レベル：

$$I_0(s) = \frac{-H_0(s)}{s} = \frac{T}{1+sT} G(s) \quad (3)$$

図6に T を1分、30分とした場合の合成出力目標値、BESS 出力、充電レベルを実測のWF 出力からシミュレーションにより求めた結果を示す。同図では、充電レベルを表す指標として残存容量を用いている。残存容量とは、放電可能なエネルギー (kWh) のことである。

4. 残存容量フィードバック制御

4.1 容量FB制御について

上述のように、 T を長く設定すると、残存容量は大きく変動して充電レベルの適正範囲を超える場合がある。また、 T がそれほど長くなくとも、BESS には各種損失があるため、残存容量が低下して適正範囲を下回ることもある。

そこで、図7の合成出力目標値の αT 倍 ($0 \leq \alpha \leq 1$) を残存容量の目標値として導入し、残存容量をこれに追従させる容量FB制御を開発した。ここに、係数 α は蓄電池の定格 kWh 容量の範囲内となるよう定める。なお、図7中のマージンは、蓄電池の残存容量を安全サイドに見積もるためのパラメータである。下側のマージンを $m1$ 、上側を $m2$ とし、BESS の kWh 容量

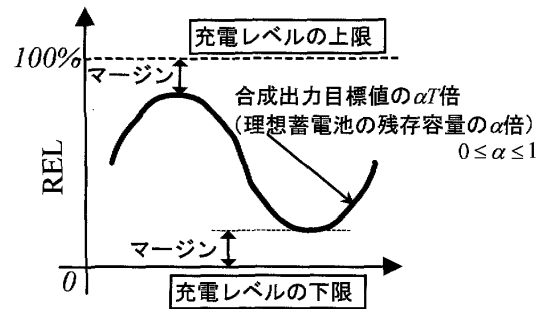


図7 残存容量の制御目標

定格に対する合計のマージン ($m1+m2$) の百分率 M [%] ($0 \leq M \leq 100$) をマージン率と定義する。

4.2 蓄電池出力の修正量について

以上の考えに従い、容量FB制御による時刻 t のBESS 出力の修正量 $h'(t)$ を(4)式のように設計した。

$$h'(t) = A(i(t) - \alpha T o_0(t) - m1) \quad (4)$$

ここに、 $i(t)$ ；時刻 t の残存容量、 $o_0(t)$ ；時刻 t の合成出力目標値、 A ；修正係数 ($A > 0$) である。また、WFの定格出力を C_{WF} 、蓄電池の定格 kWh 容量を E とすると、

$$\alpha = \frac{E - (m1 + m2)}{C_{WF}} \quad (5)$$

$$M = \frac{m1 + m2}{E} \quad (6)$$

となる。なお(4)式においては、残存容量はリアルタイムで把握して利用できるものとしている。そして、下側のマージン $m1$ で充電レベルを底上げしていることから、以下では $m1$ のことを特別にオフセットと呼ぶ。また、制御系設計の際に決定すべきパラメータは A (sec^{-1}) および M の2つである。以下ではパラメー

タ A(sec-1) をその役割から、フィードバックゲイン (FB ゲイン) と呼ぶこととする。

4.3 容量 FB 制御の制御モデル

容量 FB 制御を採用した場合の BESS の制御モデルを図 8 に示す。図中の実線は基本制御部であり、点線が容量 FB 制御部である。なお同図では、以降の議論の見通しを良くするために、BESS の交直変換装置のリミッタや各種損失を考慮していない。すなわち、BESS 出力は BESS 出力要求値と一致するものとしている。また、下側マージンと上側マージンの大きさを同じとして、オフセットを(7)式としている。

$$m_1 = m_2 = \frac{E - \alpha TC_{WF}}{2} \quad (7)$$

これにより、M は(8)式となる。

$$M = \frac{E - \alpha TC_{WF}}{E} \quad (8)$$

図 8 を基に容量 FB 制御を採用した場合の蓄電池の残存容量 $I(s)$ を表す伝達関数を求めると、(9)式となる。

$$\begin{aligned} I(s) &= \frac{sT + \alpha AT}{(s+A)(1+sT)} G(s) \\ &\quad + \frac{A(E - \alpha TC_{WF})}{2} \frac{1}{s+A} \\ &= \frac{s + \alpha A}{s + A} \frac{T}{1 + sT} G(s) \\ &\quad + \frac{A(E - \alpha TC_{WF})}{2} \frac{1}{s + A} \end{aligned} \quad (9)$$

5. 容量 FB 制御を採用した場合の各出力のゲイン特性

(1) 蓄電池出力のゲイン特性

容量 FB 制御を採用した場合の BESS 出力 $H(s)$ の伝達関数は(9)式を微分することで、(10)式のように表される (放電方向を正)。ここに、添字 0 は容量 FB 制御がない場合を表し、WF 出力の変動に反応して変化する部分だけを取り上げる。

$$H(s) = \frac{s + \alpha A}{s + A} \frac{-sT}{1 + sT} G(s) = \frac{s + \alpha A}{s + A} H_0(s) \quad (10)$$

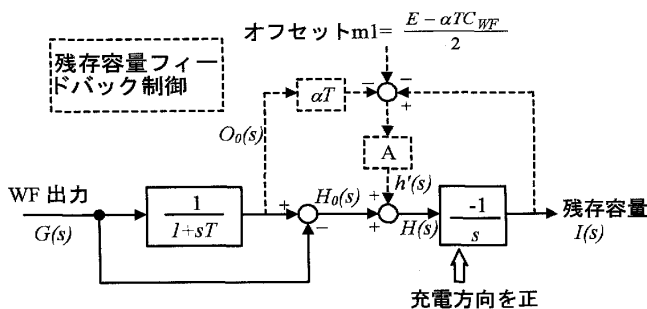


図 8 容量 FB 制御採用した BESS の制御モデル

また、(2)式と(10)式を比較すると、容量 FB 制御が BESS 出力に及ぼす影響 $C(s)$ は(11)式となる。

$$C(s) = \frac{s + \alpha A}{s + A} \quad (11)$$

このゲイン特性は図 9 であり、 $\omega < A$ の領域で容量 FB 制御の導入により平滑化効果が影響を受けることが分かる。図 5 と図 9 より、容量 FB 制御を採用した場合の BESS 出力のゲイン特性は、図 10 となる。同図より、A が小さいほど容量 FB 制御が BESS 出力に及ぼす影響は小さくなり、平滑化の対象領域である $\omega > 1/T$ で容量 FB 制御による影響を最小限とするには、

$$A < 1/T \quad (12)$$

が成立している必要がある。

(2) 残存容量のゲイン特性

容量 FB 制御を採用した場合の残存容量の伝達関数は(9)と(11)式を使って(16)式と整理できる。

$$I(s) = \frac{s + \alpha A}{s + A} TO_0(s) \quad (16)$$

(16)式の残存容量のゲイン特性は図 11 となる。同図では $A < 1/T$ の場合の結果を記載している。同図より、容量 FB 制御の採用により、長周期側の残存容量の変動を抑制できることが分かる。一般に、長い周期の方が短い周期よりも WF 出力の変動が大きいため、容量 FB 制御は充電レベルの変動を効果的に抑制しているといえる。また、FB ゲイン A が大きいほど $I(s)$ のゲインのピークが低くなる、すなわち残存容量の変動が小さくなることが分かる。

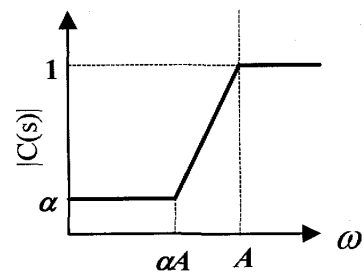


図 9 $C(s)$ のゲイン特性

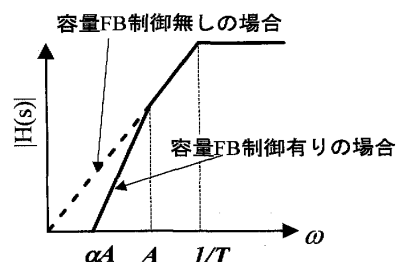


図 10 容量 FB 制御を採用した場合の BESS 出力のゲイン特性

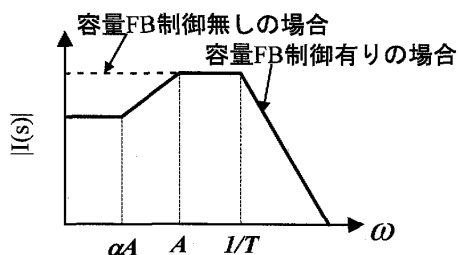


図 11 残存容量のゲイン特性

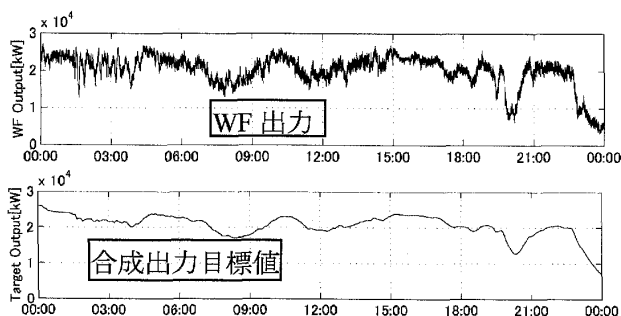


図 12 シミュレーションで使用した WF 出力と合成出力目標値

6. シミュレーションによる検証

6.1 シミュレーション条件

○蓄電池システムの仕様

- ・ 出力範囲； $-6,000 \text{ kW} \sim 6,000 \text{ kW}$ (最大出力は WF の定格出力の約 20%)
- ・ 定格 kWh 容量； $6,000 \text{ kWh}$ 。なお $6,000 \text{ kWh}$ は、平滑化時定数を約 12 分 (1 時間 \times 20%) とした場合の充電レベルの変動の理論最大値である。

○蓄電池システムのモデルについて

詳細については文献[8]を参照されたい。

○計算条件

- ・ WF 出力；定格出力 $30,600 \text{ kW}$ の WF (05 年 3 月 15 日) において実測したデータ (1 秒サンプリング, 24 時間) (図 12 に示す)
- ・ 平滑化時定数 T ；30 分 (合成出力目標値を図 12 に示す)
- ・ 容量 FB 制御の制御パラメータ
FB ゲイン A ； $1/T$ ($1/1800 \text{ sec.}^{-1}$)
マージン率 M ；上下 30% ($M=60\%$)

6.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 13 に示す。同図では、充電レベルを REL (Remaining Energy Level) で示している。残存容量を BESS の定格 kWh 容量の百分率で表記したのが REL である。同図より、合成出力は合成出力目標値よりも長周期の変動が大きくなった

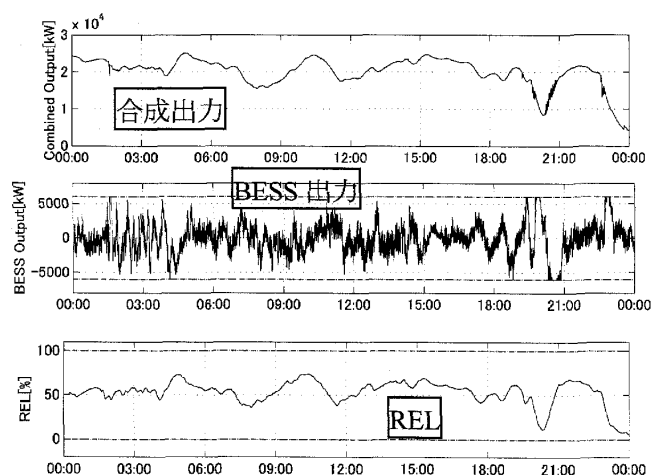


図 13 容量 FB 制御を採用した場合のシミュレーション結果

が、WF 出力は平滑化されており、REL は常に適正範囲内にあることが分かる。なお、BEE 出力は 21 時近辺で BESS のリミッタ ($-6,000 \text{ kW}$ と $6,000 \text{ kW}$) に抵触し、出力制限されている。これに伴い、合成出力には合成出力目標値にないスパイク (短周期変動) が重畳している。

7. おわりに：最適な制御に向けて

本稿では、WF 出力を平滑化する際に、蓄電池システムの充電レベルを適正範囲内に維持する容量 FB 制御について紹介した。同制御を採用するには、FB ゲインという制御パラメータを設定する必要があるが、同パラメータには充電レベルの維持と平滑化性能の面でトレードオフが存在する。また、平滑化時定数にも平滑化性能と蓄電池の規模の面でトレードオフがある。このため、これらのトレードオフをどう処理するのが課題である。特にこれから建設する WF においては、発電出力が得られていないことから、制御設計がより難しくなる。文献[10]において要求される平滑化性能に必要な蓄電池規模について見積もっているものの、

- ・ WF 出力には設置地点に依存した確率的な変動がある
- ・ 1 箇所で計測した風速から実際の WF 出力を求めるのが困難である¹

ため、制御の最適化を図るには実測した WF 出力が必要である。最適とまではいかないまでも、妥当な規

¹ 風車は広い土地に分散配置されている、局所的な地形の影響によって風が乱れる、風速と風力発電出力の関係が理論式と必ずしも一致しない等による。

模・制御パラメータを風速から設計できる技術開発が求められる。

最後に、本稿は(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託研究「風力発電電力系統安定化等技術開発」の一環として行った研究の一部である。同技術開発の際に種々ご指導・ご鞭撻をいただいていたNEDOの関係者の皆様、電源開発株式会社の高井様、沼田様、興水様、当所の七原副所長に深く謝意を表します。

参考文献

- [1] 岡本浩, 藤森礼一郎: 「Dr. オカモトの系統ゼミナール」, 社団法人日本電気協会新聞部, 2008.
- [2] 総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会風力発電系統連系対策小委員会, 「風力発電系統連系対策小委員会・中間報告書(案)」, 2004.
- [3] 高野富裕: 「自然エネルギー発電のための電力貯蔵技術」, 電気学会誌, Vol. 127, No. 10, 668-671, 2007.
- [4] 徳田憲昭: 「ウィンドファームの出力平準化技術風力発電電力系統安定化等技術開発」, 電気学会誌, Vol. 125, No. 11, 708-711, 2005.
- [5] 小林康一: 「電力会社における電力貯蔵への取り組み風力発電電力系統安定化等技術開発について」, エネルギー・資源, Vol. 25, No. 6-24, 394-397, 2004.
- [6] 由本勝久, 七原俊也, 興水源太郎: 「風力発電出力平滑化用蓄電池の充電レベルの制御法—残存容量フィードバック制御に関する考察—」, 電気学会 B 部門誌, Vol. 129-B, No. 5, 2008 (2008年5月掲載予定).
- [7] 総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会風力発電系統連系対策小委員会, 「風力発電系統連系対策小委員会中間報告書(案)~平成16年7月27日中間報告書に盛り込まれた対策のレビュー結果~」, 2004.
- [8] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「日本における風力発電設備・導入実績」, <http://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/index.html>
- [9] 由本勝久, 七原俊也, 興水源太郎, 加藤和男: 「ウィンドファームの出力変動の平滑化を目的とした蓄電池システムの運用シミュレーション」, 平成17年電気学会 電力・エネルギー部門大会 論文集, 238, 26-5-26-6, 2005.
- [10] K. Yoshimoto, T. Nanahara and G. Koshimizu: “Statistical Examination of Required Size of A Battery Energy Storage System to Mitigate Fluctuation of Wind Power Generation,” European Wind Energy Conference & Exhibition EWEC 2008, PO. 168, 2008.