

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22656065

研究課題名（和文） 機能別電力貯蔵装置を用いた高度再生可能エネルギーシステム

研究課題名（英文） Advanced renewable energy system using functional electric power storage devices

研究代表者

濱島 高太郎 (HAMAJIMA TAKATARO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00314815

研究成果の概要（和文）：

変動する再生可能エネルギーを制御した一定電力に変換して出力するために、再生可能エネルギーの急峻に変動する成分とその変動の平均成分に分解し、急峻な変動成分は応答性の良い超伝導電力貯蔵装置で貯蔵し、平均成分は貯蔵エネルギーが大きいので電気分解による水素貯蔵で構成した機能別電力貯蔵システムを提案した。平均成分の予測にはカルマンフィルタによる未来予測技術アルゴリズムを適用した。機能別貯蔵システムを適用した結果、電気効率が水素単独の変換より高い効率が得られることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

In order to convert fluctuating renewable energies into controllable constant power, we resolve them into fluctuating and averaged components. While the fluctuating part is compensated by SMES (superconducting magnetic energy storage) due to its quick response, the averaged part is absorbed by hydrogen through electrolyte or supplied through fuel cell due to its large capacity. The average power is predicted by Kalman filter algorithm. It is found that electrical efficiency of the proposed functional storage systems becomes larger than that of single hydrogen storage system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	0	1,700,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	420,000	3,520,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：再生可能エネルギー，トレンド予測，カルマン・フィルタ，SMES，燃料電池，電気分解槽，予測シミュレーション，電力バランス

## 1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギーの電力品質の向上には、変動分に対応した大電力の頻繁な入出力の機能と、平均分の安定に大容量のエネルギーを貯蔵する機能が要求される。従来の単一

機能の貯蔵装置では、貯蔵容量または大電力の入出力の両者を満足できないので、どちらかの制約下で運転制御をしなければならなかった。さらに、その最適な運転制御には精度の良い未来予測が必要であるが、精度に限

界がある。したがって、それぞれの機能を有する貯蔵装置を組合せることにより、変動電力を平均値の予測と、瞬時の制御に分解して、確実な運転制御が期待できる。

## 2. 研究の目的

持続性のある低炭素社会を構築するために再生可能エネルギーの有効利用は人類の喫緊の課題である。その代表である風力や太陽光発電は気象条件に大きく左右され、時間的に変動する電力となるので、品質の良い電力として使用するには問題がある。変動のない品質の良い電力を得るために、変動する自然エネルギーの発電波形を比較的ゆっくりとした平均的なトレンド成分と、急峻に変動する成分に分解し、それぞれに適した貯蔵装置を適用して電力制御を行う。トレンド成分は時間積分すると大きなエネルギーとなるので、無限に近く貯蔵できる水素と、それを燃料とする燃料電池で構成した貯蔵発電装置を用いる。一方、激しい変動成分は時間積分するとほぼゼロになるので、大電電力を瞬時に、かつ、高効率で入出力できる超電導電力貯蔵装置を用いる。燃料電池は指令が出てからある時定数の遅れを持って定格運転に達するので、事前に定格となる時刻の平均電力を知る必要がある。そのために、自然エネルギーの時系列データにカルマン・フィルタを適用して、トレンド予測を行う。一般的に、急峻な変化の正確な予測は不可能であるが、平均値のトレンドを予測することは比較的可能性が高い。このように、容量性機能とアクセス性機能の2種類の機能の異なる電力貯蔵装置を組み合わせ、変動電力をほぼ完全に制御する。

## 3. 研究の方法

本研究の再生可能エネルギー発電システムは、時間的に変動する再生可能エネルギーの出力の品質向上のためにアクセス性貯蔵装置と容量性貯蔵装置を用いて構成する。アクセス性貯蔵装置には、大電力の入出力を瞬時に、頻繁に、かつ、高効率で行うことができるSMESを用いる。また、容量性貯蔵装置には、無限に近く貯蔵できる水素と、それを燃料とするFCで構成された装置を用いる。それらの運転制御には、カルマン・フィルタを用いた未来予測アルゴリズムを開発し、それを組み込んだコントローラを製作して用いる。最初の年度では、アクセス性貯蔵装置と容量性貯蔵装置を有する再生可能エネルギーシステムの基本設計と、システムをモデル化した平均値モデルのシミュレーションを中心に実施する。

また、提案する未来予測技術を含む制御技術を、アクセス性貯蔵装置（SMES）および容量性貯蔵装置（水電気分解装置、水素貯槽装

置、燃料電池発電装置）を有する再生可能エネルギーシステムに適用して、その有効性を確立すること、および、SMES容量の最適化、システムのエネギー効率、幾何学的な寸法を推定する。

## 4. 研究成果

以下に得られた成果を示す。

(1) 再生可能エネルギーシステムの基本設計を実施した。風力発電装置、および、太陽光発電装置の出力は統計論的に変化するので、多くのデータを収集し、統計論的に変化再生可能エネルギーを平均値と変動分に分解して、変動分に対応するアクセス性貯蔵装置の規模や応答性などを調査して、装置の基本設計を行った。SMESの基本設計では、超電導コイルを極低温で使用するので、侵入熱や安定性、コイル規模と電磁力、変換効率などを含めて検討した。容量性貯蔵装置は水の電気分解で水素と酸素を発生する。燃料電池ではその水素と酸素で発電を行う。水や、水素、酸素はタンクに蓄えられて、バルブを通して運転を行い、電気分解や燃料電池による発電はそれらの圧力や温度に依存するので、データを収集して関数関係を導出した。装置の規模や容量の基本設計を行ったので、その一例を図1に示す。

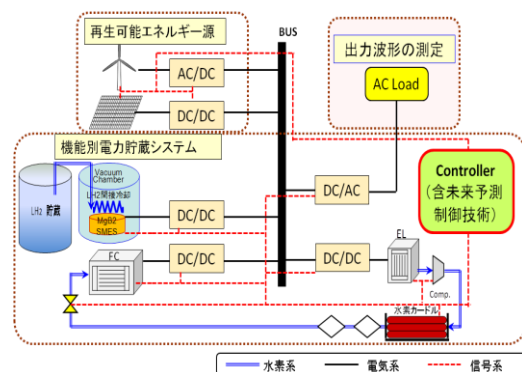


図1 全体システムの概念図

(2) カルマン・フィルタを用いた未来予測シミュレーションを行った。確率論的に変化する時系列データは、平均値の傾向を示す成分とさまざまな変動成分が加わったものであるから、観測モデルとシステムモデルから構成される状態空間モデルで表すことができ、カルマン・フィルタの予測アルゴリズムを構築、適用して、平均値の最適な推定を行うコードを作成した。さらに、予測値と実際の出力には僅かなずれが生じるので、これらを最小化すると同時に、SMESの瞬時応答による補償可能範囲を検討した。再生可能エネルギーのデータと一般的な負荷曲線との差からそれに対応した過不足の電力を平均値モデルによる未来予測シミュレーションと瞬時対応のSMESでシミュレーションし、比較的良

い結果を得た。図2にカルマン・フィルタを適用した結果の波形、図3に最適化した SMES の概略図を示す。

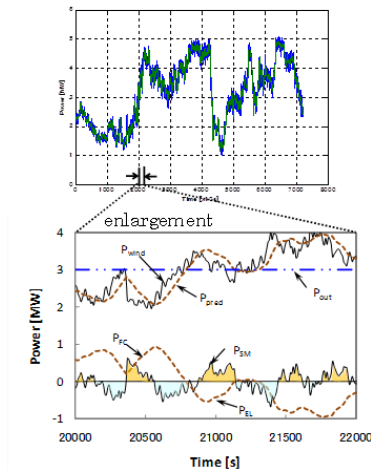


図2 カルマンフィルタによる風力波形の分解

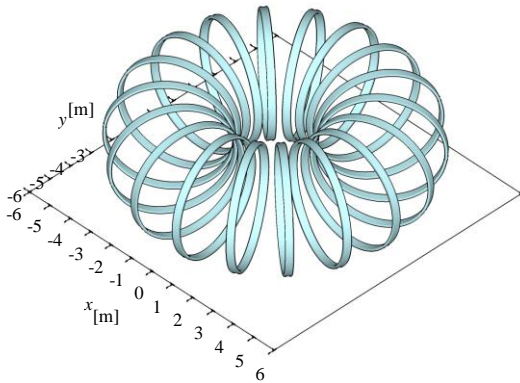


図3 100MJ-SMES の概念図

(3) 再生可能エネルギーシステムの設計を実施した。再生可能エネルギーの代表である風力発電装置、および太陽光発電装置と、2種類の機能の異なる貯蔵装置（アクセス性貯蔵装置の SMES と容量性の貯蔵装置の水電気分解装置、水素貯蔵、燃料電池発電装置）を用いたシステムが一定の電力を出

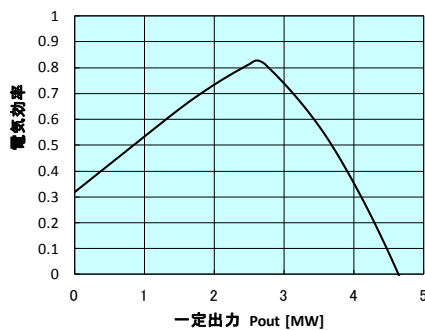


図4 全体システムの電気効率  
力する場合に、その出力と再生可能エネルギー

ギー出力との間には密接にシステム全体の効率に関係するので、最適な制御システムの可能性を調べ、電気効率を解析した。その結果の一例を図4に示す。図より、電気効率が全ての再生可能エネルギーを水素で貯蔵する場合の効率より大きいことが分かった。

#### 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3件)

1. Takakazu Shintomi, Yasuhiro Makida, Takataro Hamajima, Makoto Tsuda, Daisuke Miyagi, Tomoaki Takao, Naoki Tanoue, Narumi Ota, Kohei Munakata, and Yuta Miwa, "Design Study of SMES System Cooled by Thermo-Siphon with Liquid Hydrogen for Effective Use of Renewable Energy", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol.22, 2012 (in press)
2. Takataro Hamajima, Hiroto Amata, Tatsuya Iwasaki, Naoki Atomura, Makoto Tsuda, Daisuke Miyagi, Takakazu Shintomi, Yasuhiro Makida, Tomoaki Takao, Kohei Munakata, Masataka Kajiwara, "Application of SMES and Fuel Cell System Combined with Liquid Hydrogen Vehicle Station to Renewable Energy Control", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol.22, 2012 (in press)
3. T. Hamajima, M. Tsuda, D. Miyagi, H. Amata, T. Iwasaki, K. Son, N. Atomura, T. Shintomi, Y. Makida, T. Takao, K. Munakata, M. Kajiwara, "Advanced Superconducting Power Conditioning System with SMES for Effective Use of Renewable Energy", Physics Procedia, 査読有, Vol. 27, (2012) pp.396 – 399

[学会発表] (計13件)

1. 濱島高太郎, 「環境・エネルギーの視点からの超伝導線材の将来展望」, 社団法人日本鉄鋼協会第63回白石記念講座, pp. 15-29, 平成23年11月25日, 東京コーポビル
2. 新富孝和, 槇田康博, 宮城大輔, 津田理, 濱島高太郎, 高尾智明, 田上尚樹, 太田成美, 宗像浩平, 梶原昌高, 「先進超電導電力変換システム用 SMES」, 第85回2011年度秋季低温工学・超電導学会

- 講演概要集, p170, 2011年11月11日, 金沢歌劇座
3. 榎田康博, 新富孝和, 津田理, 宮城大輔, 濱島高太郎, 高尾智明, 宗像浩平, 梶原昌高:「先進超電導電力変換システム用 SMES 冷却システム」, 第 85 回 2011 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p171, 2011年11月11日, 金沢歌劇座
  4. 天田博仁, 岩崎辰哉, 孫敬雨, 佐藤諒亮, 津田理, 宮城大輔, 濱島高太郎, 新富孝和, 高尾智明, 榎田康博, 宗像浩平, 梶原昌高, 「先進超電導電力変換システムのハイブリッド貯蔵システムに関する検討」, 第 85 回 2011 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p172, 2011年11月11日, 金沢歌劇座
  5. T. Hamajima, M. Tsuda, D. Miyagi, H. Amata, T. Iwasaki, K. Son, N. Atomura, T. Shintomi, Y. Makida, T. Takao, K. Munakata, M. Kajiwara, “Advanced Superconducting Power Conditioning System with SMES for Effective Use of Renewable Energy”, 24th International Symposium on Superconductivity, 2011年10月25日, 東京タワーホール船堀
  6. 濱島高太郎, 「再生可能エネルギーを有効利用するための先進超伝導電力変換システムの概要について」, 低温工学・超電導学会 第3回超電導応用研究会シンポジウム, 2012年10月17日, 秋田カレッジプラザ
  7. 濱島高太郎, 「SMES を用いた再生可能エネルギー有効利用のための先進超伝導電力変換システム」, 第 23 回超電導電力貯蔵研究発表会, 平成 23 年 10 月 6 日, 東海大学校友会館 (霞が関ビル)
  8. Takakazu Shintomi, Yasuhiro Makida, Takatara Hamajima, Makoto Tsuda, Daisuke Miyagi, Tomoaki Takao, Naoki Tanoue, Narumi Ota, Kohei Munakata, and Yuta Miwa, “Design Study of SMES System Cooled by Thermo-Siphon with Liquid Hydrogen for Effective Use of Renewable Energy”, The 22th International conference on Magnet Technology, 2011年9月14日, 仏国マルセイユ
  9. Takatara Hamajima, Hiroto Amata, Tatsuya Iwasaki, Naoki Atomura, Makoto Tsuda, Daisuke Miyagi, Takakazu Shintomi, Yasuhiro Makida, Tomoaki Takao, Kohei Munakata, Masataka Kajiwara, “Application of SMES and Fuel Cell System Combined with Liquid Hydrogen Vehicle Station to Renewable Energy

- Control”, The 22th International conference on Magnet Technology, 2011年9月14日, 仏国マルセイユ
10. 孫敬雨, 天田博仁, 岩崎辰哉, 津田理, 宮城大輔, 濱島高太郎, 新富孝和, 高尾智明, 榎田康博, 宗像浩平, 梶原昌高, 「先進超電導電力変換システムを用いた風力エネルギーの有効利用」, 電気関係学会東北支部平成 23 年度連合大会, 2B04, 平成 23 年 8 月 19 日, 東北学院大学多賀城キャンパス
  11. 天田博仁, 中村隆人, 岩崎辰哉, 孫敬雨, 津田理, 宮城大輔, 濱島高太郎, 新富孝和, 榎田康博, 宗像浩平, 三輪佑太, 「SMES-燃料電池と液体水素ステーションで構成されたシステムによる再生可能エネルギーの有効利用」, 電気学会超電導応用電力機器研究会, ASC-11-033, pp51-56, 2011-6-10, 産業技術総合研究所 臨海副都心センター
  12. 岩崎辰哉, 天田博仁, 中村隆人, 孫敬雨, 津田理, 宮城大輔, 濱島高太郎, 新富孝和, 榎田康博, 宗像浩平, 三輪佑太, 「液体水素ステーションに併設した SMES-燃料電池を用いた風力エネルギー変動補償方法の検討」, 第 84 回 2011 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p11, 2011年5月18日, 研究交流センター(つくば)
  13. 中村隆人, 天田博仁, 中山知紀, 津田理, 濱島高太郎, 「自然エネルギーに用いる SMES 容量の最適化の検討」, 第 83 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p190, 2010年12月2日, かごしま県民交流センター

〔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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

濱島 高太郎 (HAMAJIMA TAKATARO)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00314815

### (2) 研究分担者

津田 理 (TSUDA MAKOTO)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：10267411

谷貝 剛 (YAGAI TSUYOSHI)  
上智大学・理工学部・准教授  
研究者番号：60361127

新富 孝和 (SHINTOMI TAKAKAZU)  
日本大学・総合科学研究科・教授  
研究者番号：10016082

槇田 康博 (MAKIDA YASUHIRO)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器機構・素粒子原子核研究所・准教授  
研究者番号：30199658

### (3) 連携研究者

( )  
研究者番号：