Interconnected Power Systems with Superconducting Magnetic Energy Storage

Shinichi Nomura Member (Tokyo Institute of Technology, shin@nr.titech.ac.jp)
 Takushi Hagita Non-member (Tokyo Institute of Technology)
 Hiroaki Tsutsui Non-member (Tokyo Institute of Technology, htsutsui@nr.titech.ac.jp)
 Yoshihisa Sato Member (Daido Institute of Technology, satoy@daido-it.ac.jp)
 Ryuichi Shimada Member (Tokyo Institute of Technology, rshimada@nr.titech.ac.jp)

Keywords: interconnected system, back-to-back, superconducting magnetic energy storage (SMES), helical coil, electromagnetic force

Electric power systems are usually interconnected with each other through a back-to-back high-voltage direct-current (HVDC) link to increase reliability of electric power networks and to improve system operations. However, since the electric power has to be generated depending on the power demand, differences between peaks and valleys in the demand for the electric power are expected to be a serious problem in the future power systems.

The objective of this work is to discuss the concept of interconnected power systems with a Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) incorporated into a back-to-back DC link. Figure 1 illustrates a schematic diagram of the interconnected power system with the SMES. The SMES coils are connected in series between AC/DC current source converters. In this case, each converter of the back-to-back system is used as a power conditioning system for the SMES coils.

This work improves this concept and proposes two-way switches (SW1, SW2) that can select the interconnected power systems. Since the AC/DC converter can be designed independently of the frequency of the power system, the two-way switch is connected to the AC side of each converter. By using the two-way switches, this system can provide the stored energy in the SMES system to each interconnected power system through two AC/DC converters. For instance, lower-cost power from the power network 2 can be stored through two converters during the off-peak hours and made available for dispatch to the power network 1 during periods of demand peak. Then this system increases the reliability of electric power networks and enables the economical operations depending on the power demand.

On the other hand, strong electromagnetic forces caused by high magnetic fields and coil currents are a serious problem in constructing SMES systems. To cope with this problem, the concept of Force-Balanced Coil (FBC) is applied to the SMES systems. The FBC is a helically wound hybrid coil of toroidal field coils and a solenoid. This coil can control the distribution of working stresses and minimize the required mass of the structure for induced electromagnetic forces by selecting an optimal number of poloidal turns per toroidal turn.

This paper describes the unique operations of the back-to-back interconnection with SMES and discusses the optimal SMES configuration that can reduce the cost of the superconducting coil by the effect of mass production.

Figure 2 shows the schematic illustration of the interconnected power system with 600-MWh class SMES. This back-to-back DC link system enables interchange of 300-MW power between the interconnected power systems and also SMES operation with the stored energy of 300 MW-1.5 hours. The required mass of the structure is proportional to the stored energy so that the 600-MWh SMES

Fig. 1. Schematic diagram of the interconnected power systems with the SMES

Fig. 2. Schematic illustration of the interconnected power systems with 600-MWh class SMES; This SMES is composed of 4000 superconducting coils; The stored energy of each coil is 540 MJ (150 kWh)

system is composed of 4000 FBCs in order to reduce the cost of the superconducting coil by the effect of mass production. Each coil with an outer diameter of 4 m has 150-kWh stored energy at maximum magnetic field of 15 T. This coil can reduce the required mass of the structure to 40% of that in the solenoid case. The dimensions of the SMES system will be 480 m × 300 m.

超電導磁気エネルギー貯蔵付き系統間連系設備

正 員 野村 新一* 非会員 萩田 拓史*
 非会員 筒井 広明* 正 員 佐藤 義久**
 正 員 嶋田 隆一*

Interconnected Power Systems with Superconducting Magnetic Energy Storage

Shinichi Nomura*, Member, Takushi Hagita*, Non-member, Hiroaki Tsutsui*, Non-member,
 Yoshihisa Sato**, Member, Ryuichi Shimada*, Member

The objective of this work is to discuss the concept of back-to-back interconnection systems with energy storage, especially with a Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) incorporated into a back-to-back DC link. In this case, each converter of the back-to-back system is used as a power conditioning system for the SMES coils. Since the AC/DC converter can be designed independently of the frequency of the power system, a two-way switch is connected to the AC side of each converter. This two-way switch can select the interconnected power systems. By using the two-way switches, this system can provide the stored energy in the SMES system to each interconnected power system through two AC/DC converters. For instance, lower-cost power of each power network can be stored through two converters during the off-peak hours and made available for dispatch to each power network during periods of demand peak. Then this system increases the reliability of electric power networks and enables the economical operations depending on the power demand. This paper describes the unique operations of the back-to-back interconnection with SMES and discusses the optimal SMES configuration for a 300-MW class back-to-back interconnection.

キーワード：系統間連系，BTB，超電導磁気エネルギー貯蔵（SMES），ヘリカルコイル，電磁力

Keywords: interconnected system, back-to-back, superconducting magnetic energy storage (SMES), helical coil, electromagnetic force

1. はじめに

現在、電力の安定供給、電力設備の有効利用の観点から電力会社間で電力を融通する送電網の強化が重要視されている。一般に、交流系統間の連系方式として、順・逆の交直変換器を同一場所に設置する back-to-back (BTB) による系統間連系方式が採用されている。系統間連系設備に電力貯蔵機能を付加する方法として、BTB 方式の両変換器の直流側に超電導コイルを直列接続し、超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) 装置の機能を持たせる方法が検討されてい

る⁽¹⁾⁽²⁾。そこで、本研究では、この概念を発展させ、BTB 方式の順・逆両変換器の交流側に連系する交流系統のいずれか選択可能な系統切替スイッチを設置し、電力の需給状況に応じた系統間の電力融通、充電、貯蔵、放電動作の切り替え運用が可能な SMES 機能付き系統間連系設備について検討する。

本論文では、SMES 機能付き系統間連系設備の構成と運用方法を示し、国内外の BTB 連系設備の運用状況から設備の開発目標を明確にする。また、SMES 機能付き系統間連系設備の概略設計を行い、生産性の効率化と開発リスクの軽減化を期待する SMES 用超電導コイルの開発方針を検討し、設備の将来像を示す。

2. SMES 機能付き系統間連系の構成と運用方法

〈2・1〉 基本構成 図 1 に SMES を付加した系統間連系設備の構成を示す。図 1 に示すように BTB 方式の順・逆両変換器の直流側には超電導コイルを直列接続する。すなわち、BTB 方式の両変換器がそのまま SMES 装置の電源として利用できる⁽¹⁾⁽²⁾。BTB 方式の交直変換器は、サイリ

* 東京工業大学 原子炉工学研究所
 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 N1-33
 Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology
 N1-33, 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

** 大同工業大学 電気電子工学科
 〒457-8530 名古屋市南区滝春町 10-3
 Department of Electrical Engineering and Electronics, Daido Institute of Technology
 10-3, Takiharu-cho, Minami-ku, Nagoya 457-8530

図1 超電導磁気エネルギー貯蔵装置付き系統間連系設備の構成
Fig. 1. Schematic diagram of the interconnected power system with the SMES.

スタなど逆阻止能力を有する半導体電力変換素子で構成された電流型変換器であり、電力系統における電流源としての機能を有する電力設備となる。

一方、BTB方式による従来の系統間連系設備では、通常1つの交直変換器に対して1つの交流系統が接続されている。この場合、各交流系統から見たSMES装置の入出力容量に自由度を持たせることができない。そこで、交流系統の周波数によらず交直変換器の設計は同じであることから、図1に示すようにBTB方式の順・逆両変換器の交流側には、それぞれ連系する交流系統のいずれか選択可能な系統切替スイッチを設置する。この系統切替スイッチにより、BTB方式の交直変換器の利用率が向上する電力設備となる。

また、SMES装置の大容量化を妨げている要因の一つである超電導コイルに働く電磁力の問題を解決するために、後述する電磁力平衡コイル（FBC：Force-Balanced Coil）を採用し、エネルギー貯蔵に必要な電磁力支持材量の最小化を実現する⁽³⁾⁽⁴⁾。

〈2・2〉 系統切替スイッチを用いた運用方法 図1に示すように、系統切替スイッチSW1、SW2をそれぞれ系統2、系統1に接続し、系統2から系統1への電力融通を行う場合を考える。この場合、従来の系統間連系設備と同じく、変換器1を整流器動作、変換器2をインバータ動作とし系統間の連系運用を行う。連系運用により直流電力回路内に直流電流 I_d が流れると、自己インダクタンス L を有する超電導コイルの効果により、

$$E_m = \frac{1}{2} L I_d^2 \dots\dots\dots (1)$$

の磁気エネルギー E_m が貯蔵される。すなわち、SMES装置を付加させることにより、系統間の連系運用を行いつつ、同時にSMES運転を行うことが可能となる。

ここで、系統2の予備力が不足し系統間連系運用が維持できない場合、系統2側からの電力供給を遮断し、SMES装置として電力を系統1へ供給する。さらに、系統1の電力需要が急増した場合、系統切替スイッチSW1を系統2から系統1へ接続し、両変換器を通じてSMESに蓄えられた電力を系統1へ供給することも可能となる。すなわち、系統切替スイッチにより、系統から要求される容量に応じた運用ができ、緊急融通時の信頼性を向上させることが可能となる。

一方、待機運転時には、超電導コイルに所定の直流電流を流した状態で、2つの変換器を制御角 90° 近傍での動作またはバイパスペア動作とし、直流電流を循環させる。このとき、(1)式で与えられる磁気エネルギーが超電導コイルに貯蔵され、SMES運転が維持される。つまり、系統間の連系運用を必要としない待機運転時にはSMES装置として運用でき、設備全体の稼働率を高く維持することが可能となる。

また、夜間に系統2から電力を両変換器を通じて充電し、昼間に系統1へ放電するなど、系統間の時間的格差をつけた連系運用なども可能となる。

3. SMES機能付き系統間連系の目標設備容量

〈3・1〉 超電導コイル建設費返済期間の評価 本節では、SMES機能付き系統間連系設備を昼夜間の日負荷平準化用途として運用した場合に得られる利益から、超電導コイル建設費の返済年数を評価し、設備の貯蔵容量について検討する。

図2は、実際に製作された超電導コイルおよび概念設計に基づくコスト評価をまとめたものである⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図2より、超電導コイルの貯蔵エネルギーあたり単価は、貯蔵エネルギーの $-2/3$ 乗に比例している。このことから超電導コイ

図2 超電導コイルの貯蔵エネルギーあたり単価
Fig.2. Energy related costs of the superconducting coils.

ルの建設費 C_{coil} (億円) と貯蔵エネルギー E_m (MWh) との関係を表す評価関数は,

$$C_{\text{coil}} = 10E_m^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

と導出される。(2) 式より, 超電導コイルの建設費は貯蔵エネルギーの $1/3$ 乗に比例し, 貯蔵エネルギーに対するスケールメリットを有する。図2に示すコスト評価の妥当性に関しては, 1 MWh 以上の大型超電導コイルの製作実績がないため今後十分な検討を要するが, 本研究では, 将来的に大規模 SMES 装置を経済的基盤に載せるために必要な超電導コイルの開発目標コストとして捉え, (2) 式で与えられる評価関数を用いて議論を進める。

ここで, 昼夜間の電力料金の格差を利用し, SMES 機能付き系統間連系設備を日負荷平準化用途として運用した場合に得られる利益に関して検討する。SMES 装置で利用するエネルギー E_{av} は充放電率 κ を用いて

$$E_{\text{av}} = \kappa E_m \dots\dots\dots (3)$$

と表される。ここで, 充放電率 κ とは超電導コイルの貯蔵エネルギー E_m に対する利用エネルギー E_{av} との割合である。SMES で得られる単位電力量あたりの運用利益を u_e (円/kWh) とすると, 設備の1日あたりの運用利益 B_e (万円/日) は,

$$B_e = 10^{-1} u_e E_{\text{av}} = 10^{-1} u_e \kappa E_m \dots\dots\dots (4)$$

となる。従って, 設備の年間運用日数を D_{op} (日/年) とした場合, 超電導コイルの建設費 C_{coil} (億円) を日負荷平準化で得られる運用利益 B_e (万円/日) で返済するのに要する年数 Y_{de} (年) は,

$$Y_{\text{de}} = \frac{C_{\text{coil}}}{B_e D_{\text{op}}} = \frac{10^6}{u_e \kappa D_{\text{op}}} E_m^{-2/3} \dots\dots\dots (5)$$

より見積もることができる。

図3は, 超電導コイル建設費の返済期間と貯蔵エネルギーとの関係を示している。ここでは, 単位電力量あたりの運用

図3 超電導コイル建設費の返済期間と貯蔵エネルギーとの関係

Fig.3. Period of the cost refund of the superconducting coil as a function of stored energy.

図4 米国の系統間連系設備

Fig.4. Interconnected power systems in USA.

利益を 30 円/kWh (昼間 35 円/kWh, 夜間 5 円/kWh), 設備の年間運用日数を 200 日とした場合を例に超電導コイル建設費の返済期間を算出した。図3より, 貯蔵エネルギーが大きくなるほど, また充放電率が高くなるほど, 超電導コイル建設費の返済期間が短縮されるのがわかる。例えば, 充放電率が 75% の場合, 返済期間が 300 MWh で 5 年, 600 MWh で 3 年となり, 日負荷平準化の運用利益により, 系統間連系設備に SMES 装置を付加させる効果を期待することができる。

BTB 方式による系統間連系設備に SMES 装置を付加させる技術は, 電力自由化市場の盛んな欧米諸国においても, その効果を期待することができる。例えば, 2003 年 8 月のオランダでは, 通常 MWh あたり 15~60 EUR で取引されている電力市場が, 真夏の熱波で 8 月 11 日ごろから 3 日間にかけて 10 倍の 600 EUR にまで急騰した⁷⁾。従って, 電力貯蔵装置を有する電力卸売業者が電力市場を制することができ, SMES 装置による運用利益を大いに期待できる。

〈3・2〉 諸外国における系統間連系設備 ここでは, アメリカおよび中国における系統間連系設備の運用状況, 計画について述べる⁸⁾。現在, アメリカでは, 図4に示すように, 位相の違う交流系統を連系させるために, 東部系と西部

図5 中国の電力系統地域

Fig. 5. Regional power systems in China.

表1 600 MWh 級超電導磁気エネルギー貯蔵装置
付き系統間連系設備の開発仕様

Table 1. Specifications of the interconnected power system
with 600-MWh class SMES.

Rated power of the back-to-back DC link	300 MW
Voltage/Current	6 kV / 50 kA
Stored energy of the SMES system	600 MWh
Available energy of the SMES system	450 MWh
Cycles of the SMES operation	24 hours
Discharge duration time	1.5 hours

系の間で4ヶ所計700 MW、東部系とテキサス系の間で2ヶ所計800 MW、西部系とテキサス系の間で1ヶ所200 MWのBTBによる系統間連系設備が運用されている。

一方、中国の電力系統は、図5に示すように、山東、福建、チベット、新疆のほか、東北、華北、西北、華東、華中、四川重慶および南方の7つの地域別電力系統網から構成されている⁽⁹⁾。将来的には、北部、中部、南部の3つの送電網に統合し、直流送電やBTBによる系統間連系運用が計画されている⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾。

このように、世界的に系統間連系設備が運用・計画されており、SMES装置による連系強化を期待できる。特に、中国の北京-上海間をSMES装置を介して連系させることにより送電網の強化が大いに期待できる。

〈3・3〉 SMES機能付き系統間連系設備の開発目標 現在、わが国において52基-約4600万kWの原子力発電所が運転中(2002年3月の調べ)である⁽⁵⁾。これに対して、揚水発電所は35発電所、総出力2300万kWである⁽⁶⁾。仮に、原子力発電所1基あたり平均44万kWの揚水発電設備が必要であると仮定すると、1日5時間の負荷平準化を行った場合、220万kWh(2.2GWh)の貯蔵エネルギーが必要になるという計算になる。

一方、わが国のBTB方式による連系設備は、佐久間、新信濃1号機、2号機、東清水および南福光の4ヶ所5設備で、300 MWを基本設備容量とし、総容量1500 MWであ

る⁽¹¹⁾。従って、1設備あたり45万kWh(450MWh)の電力量を補償するSMES装置を付加し系統連系を行った場合、総容量225万kWh(2.25GWh)を有する揚水代替規模のSMES装置が実現できる。そこで、SMES機能付き系統間連系設備の開発目標を設備容量300 MWとし、超電導コイルの貯蔵エネルギーを600 MWh、充放電率75%、利用貯蔵容量450 MWhと定め議論を進める。表1に開発仕様をまとめる。

超電導コイルの充放電率が75%の場合、コイル電流値は、(1)式より最大電流値の半分まで低下する。従って、設備容量300 MWに対してBTB方式の1つの変換器あたりSMESの平均入出力容量は150 MWとなるが、系統切替スイッチにより両変換器を用いた場合、SMESの入出力容量は300 MWまで利用可能となる。すなわち、表1に示す仕様は、設備容量300 MWでの系統間連系運転と300 MW-1.5時間分のSMES装置とを兼ね備えた電力設備となる。

4. 600 MWh 級 SMES 装置付き系統間連系設備の概略設計

〈4・1〉 SMES用超電導コイルの開発方針 〈3・3〉節で述べたSMES装置付き系統間連系設備の開発仕様をもとに600 MWh 級 SMES 用超電導コイルの概略設計を行う。

現在、超電導コイルに働く電磁力の大きさがSMES装置の大容量化を妨げている大きな要因の一つとなっている。特に大型の超電導コイルの場合、岩盤支持などの開発リスクを伴う点が問題となる。超電導コイルの電磁力支持材の質量 M と貯蔵エネルギー E_m との関係は、支持材の許容応力 σ_a 、支持材の密度 ρ_m を用いて、

$$M = Q_{\max} \frac{\rho_m}{\sigma_a} E_m \dots\dots\dots (6)$$

と導出され、一般にエネルギー貯蔵に必要な電磁力支持材量を議論する場合に用いられている⁽¹²⁾。ここで、 $Q_{\max}$ とは、最大発生応力に関する形状パラメータであり、磁気エネルギーと支持材の体積で規格化された無次元パラメータである。従って、 $Q_{\max}$ の値を低減するためにコイル巻線形状の最適化が重要となる。

図1に示した電磁力平衡コイルとは、ヘリカル巻線形状のコイルであり、最適なヘリカル巻数を選定することにより応力分布の均一化が達成され、発生応力の最小化が実現できるコイル方式である⁽³⁾⁽⁴⁾。(6)式で与えられる $Q_{\max}$ の値は、電磁力平衡コイルの場合0.5となり、エネルギー貯蔵に必要な電磁力支持材量をソレノイド($Q_{\max} = 1 \sim 2$)の1/2以下にまで低減可能となる。

一方、(6)式の関係から電磁力支持材の必要量 M は貯蔵エネルギー E_m に比例し、貯蔵エネルギーに対するスケールメリットが得られないことがわかる。そこで、600 MWh 級 SMES 用超電導コイルの開発方針として、輸送可能な大きさの超電導コイルを多数個配置し、生産性の効率化と開発リスクの軽減化を期待する装置構成を考える。

本研究では、超電導コイルの設計条件を以下のように定

図 6 600 MWh 級超電導磁気エネルギー貯蔵装置付き系統間連系設備の概観

Fig. 6. Schematic illustration of the interconnected power system with 600-MWh class SMES.

表 2 600 MWh 級 SMES 用超電導コイルの設計値

Table 2. Key parameters of the superconducting coils for the 600-MWh SMES system.

	FBC	solenoid
Stored magnetic energy (kWh)	150 (540 MJ)	←
Magnetic field (T)	15	←
Coil outer diameter (m)	3.9	←
Coil height (m)	0.78	0.65
Coil current (kA)	50	←
Conductor length (km)	5.1	3.1
Mass of the structure ($\times 10^3$ kg)*	1.8	4.9

(* mass density: 8.0×10^3 kg/m³, allowable stress: 1200 MPa)

表 2 に示す仕様の電磁力平衡コイルを 4000 個設置した 600 MWh 級 SMES 装置の概観を図 6 に示す。貯蔵エネルギー 150 kWh の電磁力平衡コイルを縦に 80 個、横に 50 個設置し、貯蔵容量 600 MWh の SMES 装置を実現する。このとき、SMES 装置の規模は、およそ 480 m × 300 m となる。

5. まとめ

交流系統間の連系方式として、SMES 装置の機能を備えた系統間連系設備に関して検討を行った。本設備の特徴は、

- (1) BTB 方式の順・逆両変換器の直流側に超電導コイルを接続し、待機運転時には SMES 装置として運用することで設備全体の稼働率を高く維持することができる。
- (2) BTB 方式の両変換器の交流側に連系する交流系統のいずれか選択可能な系統切替スイッチを設置することで BTB 方式の交直変換器の利用率が増加し、緊急融通時の信頼性を向上させることが可能となる。
- (3) 系統切替スイッチの接続方法と変換器の動作方法を適切に組み合わせることにより、電力の需給状況に応じた系統間の電力融通、充電、貯蔵、放電動作を切り替え運用することが可能となり、系統間の時間的格差をつけた連系運用が可能となる。

という点にある。

国内外の BTB 連系設備の運用状況から、SMES 機能付き系統間連系設備の開発目標を設備容量 300 MW での系統間連系運転と 300 MW–1.5 時間分の電力貯蔵機能とを兼ね備えた電力設備と定め、600 MWh 級 SMES 用超電導コイルの概略設計を行った。本論文では、

- (1) 輸送可能な大きさの貯蔵エネルギー 150 kWh (540 MJ) を有する超電導コイルを 4000 個設置することで、生産性の効率化と開発リスク軽減化を期待する SMES 装置の構成を示した。
- (2) 超電導コイル方式を電磁力平衡コイルとすることで、電磁力支持材の必要量をソレノイドの 40% 程度にまで低減でき、超電導コイルの軽量化が期待でき

めた。

- (1) 現在、国際間協力で進められている国際熱核融合実験炉 (ITER) における超電導コイルシステムの研究開発実績⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾より、貯蔵エネルギーを 540 MJ (150 kWh)、最大発生磁束密度を 15 T、コイル電流値を 50 kA とする。

- (2) 超電導コイルの工場内製造性と現地までの可搬性を重視し、コイル外直径を 4 m 以下とする。

超電導コイルの貯蔵エネルギーが 150 kWh であるため、上記条件に基づく超電導コイルを 4000 個設置し、貯蔵容量 600 MWh の SMES 装置を実現する。

〈4・2〉 600 MWh 級 SMES 用超電導コイルの設計 前節で示した設計条件をもとに、600 MWh 級 SMES 用超電導コイルの設計を行う。表 2 に電磁力平衡コイルの設計値を同一規模のソレノイドと比較した結果を示す。ここで、電磁力支持材の必要量は、支持材の密度を 8.0×10^3 kg/m³、許容応力を 1200 MPa とし算出した。

表 2 の結果より、電磁力平衡コイルで使用される 50 kA 超電導導体は、ソレノイドに比べ 1.7 倍の長さが必要になるが、電磁力平衡コイルは電磁力支持材の必要量をソレノイドの 40% 程度にまで低減させることが可能となる。よって、電磁力平衡コイルは、SMES 用超電導コイルの軽量化を実現するコイル方式として期待することができる。

ることを示した。

4000 個の超電導コイルから構成される 600MWh 級 SMES 装置の開発シナリオとして、BTB 方式の交直変換器を多重化し、毎年 N 個づつ超電導コイルを製作し順次運用開始することで SMES 貯蔵容量を拡張する方法が考えられる。今後は、設備全体の初期コストと運用コストを評価し、装置実現に向けた詳細な検討を行っていく必要がある。また、SMES 用電源としての低電圧大電流量変換器のシステム構成の最適化と変換効率を評価するとともに、超電導コイルの製作容易性、漏洩磁界の低減化および冷却特性を考慮に入れた最適コイル形状と配置方法の検討を行っていく予定である。

(平成 16 年 10 月 25 日受付, 平成 17 年 7 月 15 日再受付)

文 献

- (1) K.-S. Tam and P. Kumar: "Application of Superconductive Magnetic Energy Storage in an Asynchronous Link between Power Systems", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol.5, No.3, pp.436-444 (1990)
- (2) 関根聖治・樋口 登:「自律分散型超電導パワープールの提案」, 平成 5 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集 (論文 II), pp.255-256 (1993)
- (3) H. Tsutsui, S. Nomura, and R. Shimada: "Application of Virial Theorem to Magnetic Confinement Fusion Device", *J. Plasma & Fusion Research*, Vol.77, No.3, pp.300-308 (2001) (in Japanese)
筒井広明・野村新一・嶋田隆一:「Virial 定理の磁気閉じ込め核融合装置への応用」, プラズマ・核融合学誌, 77, No.3, pp.300-308 (2001)
- (4) S. Nomura, et al.: "Variations of Force-Balanced Coils for SMES", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol.12, No.1, pp.792-795 (2002)
- (5) 嶋田隆一 監修, 佐藤義久 著: 図説 電力システム工学 電気をつくる・送る・ためる!, 丸善 (2002)
- (6) 新富孝和:「中規模 SMES の設計」, 超電導エネルギー貯蔵シンポジウム'97, pp.71-76 (1997)
- (7) N. Bolt: "The Liberalized Electricity Market in the EU—Targets and Hurdles", IERE Central American Forum, S3-04, November 23-28, Costa Rica (2003)
- (8) D. Povh and D. Retzmann: "Perspectives of Power System Interconnections", IERE Central American Forum, OP-03, Costa Rica (2003)
- (9) F. Zhu, Y. Zheng, X. Guo, and S. Wang: "Environmental impacts and benefits of regional power grid interconnections for China", *Energy Policy*, Vol.33, pp.1797-1805 (2005)
- (10) IEEJ Industry Applications Society News Letter, *IEEJ Trans. IA*, Vol.125, No.3 appendix, p.3 (2005-3) (in Japanese)
電気学会産業応用部門ニュースレター, 電学論 D, 125, 3, 付録, p.3 (2005-3)
- (11) 町田武彦 編集: 直流送電工学 パワーエレクトロニクス応用, 東京電機大学出版局 (1999)
- (12) Y.M. Eyssa: "Design of single layer superconductive energy storage magnets", *J. Phys. D Appl. Phys.*, Vol.13, pp.1719-1726 (1980)
- (13) C. Sborchia: "Status of ITER Magnet Design and Model Coils", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol.10, No.1, pp.554-559 (2000)
- (14) T. Terakado, et al.: "Pulse Operation Test of the ITER Central Solenoid Model Coil using the JT-60 Power Supply", Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI-Tech 2001-056 (2001) (in Japanese)
寺門恒久, ほか:「JT-60 電源を用いた ITER 中心ソレノイドモデルコイルのバルス通電試験」, 日本原子力研究所 JAERI-Tech 2001-056 (2001)

野村新一 (正員) 1973 年 6 月 20 日生。1996 年 3 月明治大学理工学部電気工学科卒業。2001 年 3 月東京工業大学大学院博士後期課程修了。同年 4 月同大学研究機関研究員, 2002 年 4 月から 2005 年 3 月まで日本学術振興会特別研究員を経て, 同年 6 月東京工業大学産学官連携研究員, 現在に至る。博士 (工学)。主として電力工学, 超電導応用, 核融合に関する研究に従事。IEEE 会員。

萩田拓史 (非会員) 1980 年 7 月 9 日生。2003 年 3 月大分大学工学部生産システム工学科卒業。2005 年 3 月東京工業大学大学院修士課程修了, 現在に至る。主として超電導に関する研究に従事。

筒井広明 (非会員) 1962 年 2 月 16 日生。1989 年 3 月東京大学大学院博士課程修了。同年 4 月日本原子力研究所・那珂研究所, 核融合特別研究生。同年 12 月東京工業大学工学部電気電子工学科助手。1990 年 12 月同大学原子炉工学研究所助手, 現在に至る。工学博士。プラズマ物理, 核融合, 超電導応用の研究に従事。日本物理学会, プラズマ・核融合学会, 日本原子力学会, 日本応用数理学会会員。

佐藤義久 (正員) 1950 年 4 月 21 日生。1976 年 3 月東京工業大学大学院修士課程修了。同年 4 月 (株) 東芝入社。核融合装置, 加速器, 超電導応用装置の技術開発に従事。1998 年 3 月東京工業大学大学院博士課程修了。工学博士。2003 年 4 月大同工業大学工学部電気電子工学科教授, 現在に至る。電気学会論文賞, 著作賞受賞。現在, 小型風力発電システム, 小型バイオマス発電等の再生可能エネルギーの実用化開発に従事。日本機械学会会員。

嶋田隆一 (正員) 1948 年 1 月 31 日生。1975 年 3 月東京工業大学大学院博士課程修了。工学博士。同年, 日本原子力研究所入所, 大型トカマク JT-60 核融合装置の開発に従事。1988 年 4 月東京工業大学工学部電気電子工学科助教授, 1990 年 3 月同教授, 1990 年 5 月同大学原子炉工学研究所教授, 2005 年 10 月同大学統合研究院ソリューション研究機構教授, 現在に至る。主として, 大電力システム, 電力工学, 電力貯蔵, パワーエレクトロニクス, 核融合炉工学, プラズマ制御の研究に従事。電気学会論文賞, 進歩賞, 著作賞受賞。