

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 6 月 11 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560310

研究課題名（和文）サイリスタインバータ方式ハイブリッド風力発電システムの
高効率化・高品質化の研究研究課題名（英文）Studies on improving efficiency and quality of a hybrid wind
turbine generating system with a thyristor inverter

研究代表者

西方 正司 (NISHIKATA SHOJI)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：80092568

研究成果の概要（和文）：自然風の風速は終始変動するため、一般に風力発電システムでは電気出力を一定に保つことは困難である。このため風速変動時においても一定の電力が得られる、電流形サイリスタインバータを用いた新しい方式のハイブリッドの風力発電システムを提案した。さらに本システムは、非常に簡潔な構成で、高い信頼性や高品質の電気出力が得られるなどの特徴を有する。本研究によりハイブリッド風力発電システム実用化のための基盤技術を確立できた。

研究成果の概要（英文）：A wind turbine generating system generally has a difficulty in generating a stable power because the velocity of natural wind changes all the time and the system output cannot be kept always constant. Thus, a novel hybrid wind turbine generating system on the basis of a wind turbine generating system using a current source thyristor inverter for generating a constant output power for the cases when the wind velocity fluctuates is proposed. In the proposed system, high quality of output voltage waveform is always obtained with the system of very simple configuration. It is investigated that the hybrid wind turbine generating system can be put into practical use.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 2,400,000 | 720,000 | 3,120,000 |
| 2010年度 | 400,000 | 120,000 | 520,000 |
| 2011年度 | 400,000 | 120,000 | 520,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：コンピュータシミュレーション、ハイブリッドシステム、再生可能エネルギー、省エネルギー、電流形サイリスタインバータ、風力発電システム、高効率運転、高品質電力

1. 研究開始当初の背景

近年の地球規模の環境汚染や温暖化などにより、風力に代表される再生可能エネルギーを本格的に活用することが急務である。しかるに現時点では、我が国における風力発電

の開発並びに利用は、欧米をはじめとする諸外国に比べて活発とはいえない状況にある。その理由の一つに、日本の地勢的条件に起因する発電電力の変動の問題がある。風力発電では自然風を利用するため、得られる電力が

零から最大出力の範囲で大きく変動する。また、その変動周期も秒単位の短周期から、日月単位の長周期まで非常に幅広い。このように大きく変動する電力を、既存の商用電力系統に接続すると系統全体の電力が結果的に大幅に変動することとなり、このことが風力発電の導入を困難にしている。

風力発電による出力電力を平準化する方策として、例えばバッテリーなどの蓄電装置の併用が提案されている。しかしながら、バッテリーの利用はコストが高むだけでなく、比較的短寿命であり、システム全体の効率低下などの問題がある。さらに、太陽光発電システムを併用するハイブリッド発電システムや、風力エネルギーを水素エネルギーに一旦変換してエネルギー貯蔵を行なうシステムなどが提案されているが、何れも風力発電の弱点をカバーするまでに至っておらず、今後の研究開発が必要とされている。このため、風力発電の本格的な普及のためには、より効果的な発電電力の平準化方式の実現が望まれる。

一方で、通常風力発電システムは、商用電力系統と連系して運転される。これは、風力発電機が自然風により駆動されるため、負荷需要に対応する電力調整機能を本質的に持たないためである。この電力系統との連系方式には大別して2つの方式がある。第一の方式は、発電機の交流出力を系統に直接接続するACリンク方式で、システムの構成が簡単であるため風況が安定しているデンマークなどでよく用いられている。この方式は運転可能な風速範囲が比較的狭いため、風速変動の大きい日本などでは、適用可能な地域が限られる。第二の方式は、風力発電機の交流出力を一旦直流電力に変換した後、一定電圧、一定周波数の交流電力に変換したうえで電力系統に接続するDCリンク方式である。この方式では、風車の回転速度を系統の周波数とは無関係に設定できるため、幅広い風速に対して効率的な運転が可能となることから、採用例が増加しつつある。このDCリンク方式では、一般に直流を交流電力に変換する電力変換器として電圧形PWMインバータが用いられる。この方式のインバータは、寿命や信頼性に問題のある平滑用の大容量コンデンサや、スイッチング素子として比較的高価で過負荷耐量他の点で取扱に留意を要するIGBTなどの大容量トランジスタが必要である。さらにPWMインバータの出力電圧波形には多くの高調波成分が含まれるため、系統との連系のために、大がかりなフィルタの設置が不可欠となる。これらの理由により現在のDCリンク方式は、寿命や信頼性、インシヤルコスト、メンテナンスコストなどで難点があり、これらに対する解決策も必要とされている。

これに対し、我々はサイリスタインバータを用いた風力発電システム（電流形サイリスタインバータを採用したDCリンク方式）を提案し、本方式のシステム構成や定常並びに過渡特性などを詳細に検討し、国内外の学会等で報告している。この方式では電流形インバータを採用しているため、電圧形インバータが必要であった大容量コンデンサは不要となり、またインバータのスイッチング素子としてIGBTなどより安価で堅牢なサイリスタを用いるため、寿命や信頼性が格段に向上する。また本方式は原理的に出力電圧波形に高調波成分が含まれないので、基本的には系統と連系する場合にフィルタは不要である。

本研究で対象としたハイブリッド風力発電システムは、このサイリスタインバータ式電力制御システムを基本とするもので、基本システムの若干の変更のみにより風力発電機から得られる電力と、他の動力源から得られる電力を合成できるようにしたハイブリッドシステムである。すなわち、サイリスタインバータ式電力制御システムの基本構成要素である同期調相機（インバータのサイリスタの転流ならびに負荷への無効電力供給に用いる）を、風力以外の外部動力で駆動することにより負荷への有効電力の一部を供給し、これと風力によって得られる電力とのハイブリッド化を実現しようとするものである。このハイブリッド化により、風速によらず常に一定の高品質な電気出力を得ることができるので、風力発電の最大の弱点であった出力変動の問題は本質的に解決することが可能である。

2. 研究の目的

コンピュータシミュレーションや、研究室内に設置した模擬装置による実験等を通じて実施したこれまでの予備的な検討により、本研究で提案するハイブリッド風力発電システムに関する理論的、技術的な裏付けは既に得ている。しかしながら、本ハイブリッドシステムを実用に供するためには、実用的な規模の風力タービンシステムを用いて構成したハイブリッドシステムを、自然風の元で運転した実証実験データを蓄積し、その実用性についての検証を行う必要がある。一方で、自然風で運転される実用規模システムでは、風況等の実験条件を任意に設定した上での実験や、荒天時等の極限状態における実験を実施することは非常に困難であり、このような場合におけるシステムの挙動の検証には、実機の挙動を正確に模擬できるシミュレーションモデルが不可欠である。さらにこれらによる解析を通じて、システムの最適な制御パラメータの決定等も可能となる。

そこで本研究では実機による実証試験並びに理論的検証を実施するとともに、蓄積し

た実測データをシミュレーションモデルのパラメータの選定に利用し、システムのシミュレーション精度の向上を図った。

3. 研究の方法

以下に本研究の実施方法の概要を示す。

(1)本学キャンパス内に設置されている、既存の40kW級風力発電システムのサイリスタインバータ式電力制御システムを、本研究のハイブリッド風力発電システムとして運転可能とするための詳細設計を行なうとともにシステムの改造を実施した。

(2)改造したハイブリッド風力発電システムを、商用電力系統に連系しない単独システムとして運転し、様々な条件下における実験的検討を行なうとともに、コンピュータシミュレーションを実施して、所定の出力性能が得られることを確認した。

(3) (2)の結果を参考にしつつ、ハイブリッドシステムを電力系統に接続する場合の問題点を明らかにし、その解決策を検討する。

(4)以上を総合して、実用的なハイブリッド風力発電システムの最適設計法を明らかにし、もって風速によらず常に高品質かつ一定電力を発生できる、ハイブリッド風力発電システムの実現を目指す。

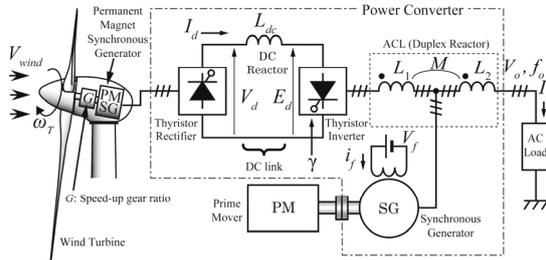


図1 ハイブリッドシステムの構成



図2 SUBARU15/40 風力発電システム

表1 SUBARU15/40 風力発電システムの仕様

| | |
|----------|----------------|
| ブレード枚数 | 3 |
| ロータ位置 | アップウィンド |
| ロータ直径 | 15 m |
| ハブ高さ | 21 m |
| 定格出力 | 40 kW |
| 定格風速 | 11 m/s |
| カットイン風速 | 2 m/s |
| カットアウト風速 | 25 m/s |
| 極値風速 | 60 m/s |
| 回転速度 | 18~69 rpm(可変速) |
| 発電機形式 | 永久磁石同期発電機 |
| 出力制御 | アクティブピッチ |

4. 研究成果

(1)実用規模実験システムの構築

図1に、本研究で提案したハイブリッドシステムの構成を示す。また図2および表1に、実証実験装置の構築に用いた、実用規模風力発電システム、SUBARU15/40 風力発電システムの外観ならびに主な仕様を示す(詳細は後記〔雑誌論文〕①参照)。

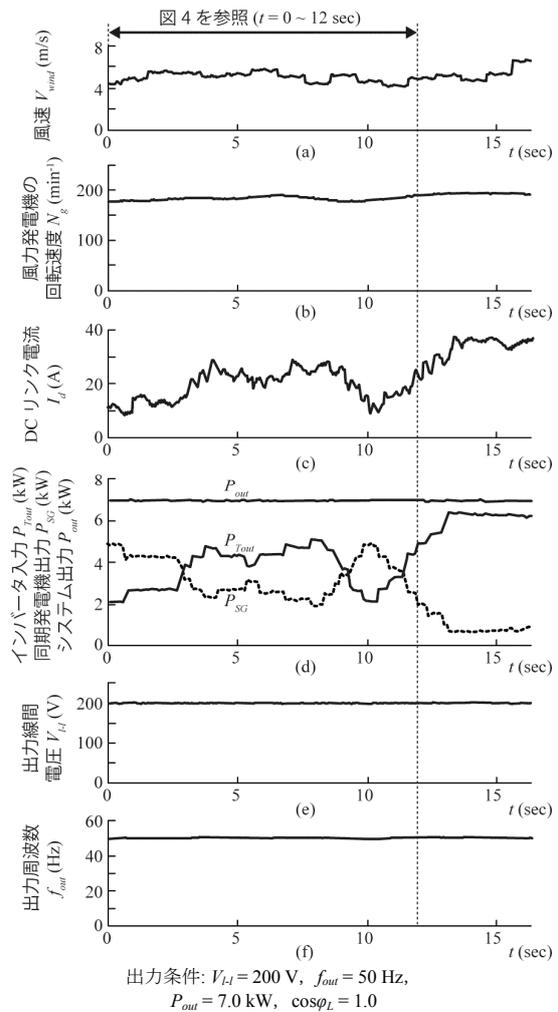


図3 ハイブリッドシステムの運転データの一例

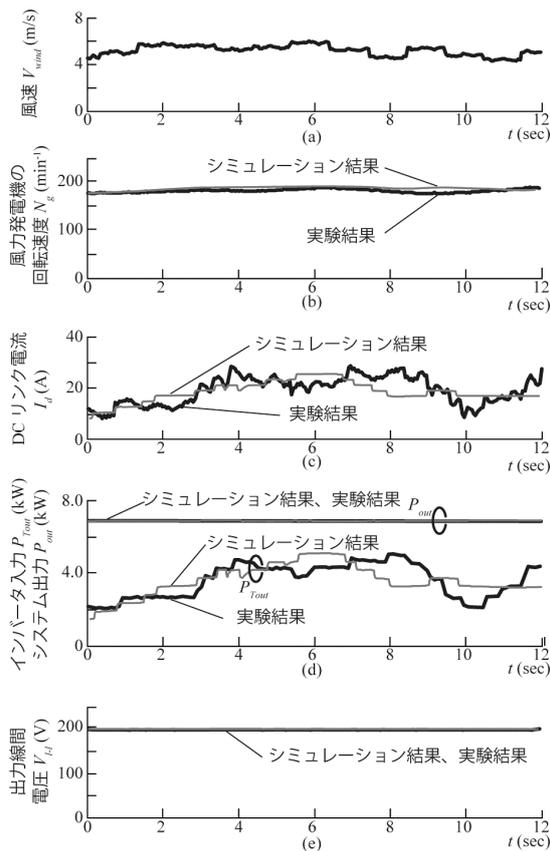


図4 実験およびシミュレーションによるダイナミック応答の比較

(2) 自然風によるシステムの運転の実施

図3にハイブリッドシステムの運転データの一例を示す。(a)のように風速が変動するため、(b)、(c)のように風力タービンの回転速度や、DCリンク電流が変動する。その結果、(d)のように、風力発電出力 P_{Tot} も大きく変動している。一方 P_{Tot} の変動を補償するように同期発電機出力 P_{SG} が自動的に応答し、結果としてシステム出力 P_{out} は7kW一定に維持される。この結果、本ハイブリッドシステムでは、風速の変動にも拘わらず、一定のシステム出力を得られることを確認した。

(3) シミュレーションモデルの構築とシミュレーションの実施

図4にシミュレーション結果と、対応する実験結果の一例を示す。これは図3における応答のうち、0~12秒の範囲についてシミュレーションを実施したものである。各応答のシミュレーション結果は何れも実測結果と傾向は一致しており、本シミュレーションモデルの妥当であることがわかる。

以上の結果より、本ハイブリッドシステムにおいては、変動する風速に拘わらず、一定のシステム出力が得られることを確認した。さらに、構築したシミュレーションモデルに

よるシミュレーション結果は、実験結果とよく一致し、シミュレーションモデルの妥当性を確認できた。

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4件)

① 童田藤男、西方正司、電流形サイリスタインバータを用いたハイブリッド風力発電システムの研究、電気学会論文誌 D、査読有、Vol.132、No.9、2012 (掲載決定)

② T. Teshirogi, S. Nishikata, Effects of System Parameters on the Performance Characteristics of a Wind Turbine Generating System Using a Current-Source Thyristor inverter, IEEE Trans. Industry Applications, 査読有, Vol.47, pp.252-257, 2011,

DOI: 10.1109/TIA.2010.2091376

③ S. Nishikata, F. Tatsuta, A New Interconnecting Method for Wind Turbine/Generators in a Wind Farm and Basic Performances of the Integrated System, IEEE Trans. Industry Electron, 査読有, Vol.57, No.2, pp.468-475, 2010,

DOI: 10.1109/TIE.2009.2026765

④ 西方正司、童田藤男、サイリスタインバータを用いた風力発電システムの研究、電気学会論文誌 D、査読有、130、4、pp.407-414、2010、

DOI: 10.1541/ieejias.130.407

〔学会発表〕(計42件)

① 童田藤男、西方正司、直列方式複数台ハイブリッド風力発電システムの制御特性の改善、平成24年電気学会全国大会7-068、2012年3月23日、広島工業大学五日市キャンパス

② 佐藤将樹、童田藤男、西方正司、複数台の風車で構成されるサイリスタインバータ式風力発電システムの系統連系時における過渡特性の検討、平成24年電気学会全国大会7-069、2012年3月23日、広島工業大学五日市キャンパス

③ 西方正司、高等教育支援事業、平成24年電気学会全国大会1-H5-3、2012年3月22日、広島工業大学五日市キャンパス

④ 大坪広明、西方正司、童田藤男、誘導性負荷接続時におけるハイブリッド風力発電システムの定常特性の検討、平成23年電気学会産業応用部門大会、2011年9月8日、琉球大学

⑤ 童田藤男、横山浩之、佐藤将樹、武村綾香、根橋文耶、西方正司、直列方式複数台風力発電システムにおける制御特性改善、平成23年電気学会産業応用部門大会、2011年9月8日

日、琉球大学

- ⑥佐藤将樹、西方正司、直列方式複数台風力発電システムの動作特性、平成 23 年電気学会産業応用部門大会、2011 年 9 月 6 日、琉球大学
- ⑦高橋孝太、西方正司、実用規模ハイブリッド風力発電システムの負荷変動時における動作特性、平成 23 年電気学会産業応用部門大会、2011 年 9 月 6 日、琉球大学
- ⑧沖原俊祐、西方正司、竜田藤男、ハイブリッドステッピングモータの回転子初期位置推定のための磁気モデルの検討、平成 23 年電気学会産業応用部門大会、2011 年 9 月 6 日、琉球大学
- ⑨Manabu Okubo, Shoji Nishikata, A Sensorless Starting Method for Self-Controlled Synchronous Motors without Damper Windings Using a DC Chopper in the Exciter Circuit, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2011, 2011 年 8 月 21 日, Beijing, P.R.China
- ⑩K. Yamashita, S. Nishikata, Considerations of kVA Capacity of Power Compensation Systems for DC Transmission System Including Wind Turbine Generating Systems, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2011, 2011 年 8 月 21 日, Beijing, P.R.China
- ⑪H. Yokoyama, F. Tatsuta, S. Nishikata, Tip Speed Ratio Control of Wind Turbine Generating System Connected in Series, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2011, 2011 年 8 月 21 日, Beijing, P.R.China
- ⑫ Shoji Nishikata, Fujio Tatsuta, Dynamic Control of Series Connected Wind Turbine Generating System, in Conf. Rec. 2011 IEEE PES PowerTech-Trondheim, 2011 年 6 月 21 日, Trondheim, Norway
- ⑬西方正司、高等教育支援事業、平成 23 年電気学会全国大会、2011 年 3 月 17 日、大阪大学
- ⑭竜田藤男、横山浩之、西方正司、直列方式複数台風力発電システムの周速比一定制御、平成 23 年電気学会全国大会、2011 年 3 月 16 日、大阪大学
- ⑮山下健一郎、西方正司、風力発電装置を有する直流送電系統の電力補償装置の容量に関する検討、平成 23 年電気学会全国大会、2011 年 3 月 16 日、大阪大学
- ⑯生形裕、西方正司、交流-直流励磁切換を用いたダンパ巻線の無い無整流子電動機のセンサレス始動法、平成 23 年電気学会全国大会、2011 年 3 月 16 日、大阪大学
- ⑰ F. Tatsuta, S. Nishikata, Dynamic Performances of a Wind Turbine Generating System with Series Connected Three Wind Generators Using a Current-Source Thyristor Inverter, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2010, 2010 年 10 月 12 日, Incheon, Korea
- ⑱ K, Yamashita, S. Nishikata, Steady-State Performance Analysis of an Integrated Wind Turbine Generating System in a DC Transmission System with Power Compensation System, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2010, 2010 年 10 月 12 日, Incheon, Korea
- ⑲K. Meguro, S. Nishikata, F. Tatsuta, Studies on Performance Characteristics of a Hybrid Wind Turbine Generating System, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2010, 2010 年 10 月 12 日, Incheon, Korea
- ⑳片岡義一、西方正司、負荷分担の異なる三相 UPS システムの並列運転法の簡略化に関する研究、平成 22 年電気設備学会全国大会、2010 年 8 月 27 日、工学院大学
- ㉑荻原和幸、西方正司、自励式交流発電機を用いたサイリスタインバータ式風力発電システムの定常特性の検討、平成 22 年電気学会産業応用部門大会、2010 年 8 月 26 日、芝浦工大
- ㉒F. Tatsuta, S. Nishikata, Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine Generating System with Series Connected Wind Generators and Bypass Diodes using a Current Source Thyristor Inverter, The 2010 International Power Electronics Conference, 2010 年 6 月 23 日, Sapporo, Japan, 23H2-3, pp.1830-1836 (2010)
- ㉓山川崇、西方正司、過変調領域で運転する三相 PWM インバータの出力電圧歪みに及ぼすパラメータ変動の影響、平成 22 年電気学会全国大会 4-113、2010 年 3 月 17 日、明治大学
- ㉔加藤康裕、西方正司、ダンパ巻線の無い無整流子電動機のセンサレス始動法、平成 22 年電気学会全国大会、2010 年 3 月 17 日、明治大学
- ㉕横山浩之、西方正司、直列接続された複数台風力発電システムの基本動作特性の検討、平成 22 年電気学会全国大会、2010 年 3 月 17 日、明治大学
- ㉖竜田藤男、西方正司、直列接続される複数台風力発電システムの対地電圧に関する考察、平成 22 年電気学会全国大会、2010 年 3 月 17 日、明治大学
- ㉗手代木拓哉、西方正司、電力系統と並列運転されるサイリスタインバータ式風力発電システムの過渡特性解析、平成 22 年電気学会全国大会、2010 年 3 月 17 日、明治大学
- ㉘山下健一郎、西方正司、複数台の風力発電装置を有する直流送電系統の電力補償装置の提案、平成 22 年電気学会全国大会、2010

年 3 月 17 日、明治大学

㊸中内誠、西方正司、ハイブリッド風力発電システムの周速比一定制御、平成 22 年電気学会全国大会、2010 年 3 月 17 日、明治大学

㊹大坪広明、西方正司、ディーゼル発電機を用いたハイブリッド風力発電システムの燃料消費量削減効果の検討、平成 22 年電気学会全国大会、2010 年 3 月 17 日、明治大学

㊺M. Nakauchi, S. Nishikata, F. Tatsuta, Y. Fujii, Realization of Constant Output Power with a Practical-Scale Hybrid Wind Turbine Generating System Using a Thyristor Inverter, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2009, 2009 年 11 月 17 日, Tokyo, Japan, LS3B-1 (2009)

㊻ K. Yamashita, S. Nishikata, Steady-State Performance Analysis of an Integrated Wind Turbine Generating System in a DC Transmission System with Thyristor Inverter, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2009, 2009 年 11 月 17 日, Tokyo, Japan, LS4B-2 (2009)

㊼T. Teshirogi, S. Nishikata, Effects of System Parameters on the Performance Characteristics of a Wind Turbine Generating System Using a Current-Source Thyristor Inverter, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2009, 2009 年 11 月 17 日, Tokyo, Japan, LS4C-1 (2009)

㊽ F. Tatsuta, S. Nishikata, A Proposal of Improving the Reliability of a Wind Farm Using Thyristor Inverter Connected in Series with Rectified Outputs of the Generators, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2009, 2009 年 11 月 17 日, Tokyo, Japan, LS4C-2 (2009)

㊾Y. Anzai, S. Nishikata, F. Tatsuta, Studies on a Sensorless Initial Rotor Position Estimating Method for Hybrid Stepping Motors, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2009, 2009 年 11 月 17 日, Tokyo, Japan (2009)

㊿Y. Kato, S. Nishikata, Studies on a Sensorless Starting Method for Self-Controlled Synchronous Motors without Damper Windings, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2009, 2009 年 11 月 17 日, Tokyo, Japan (2009)

㊻F. Tatsuta, S. Nishikata, Dynamic performance analysis of a wind turbine generating system with series connected wind generators using a current source thyristor inverter, Proc. of 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009 年 9 月 10 日, Barcelona, Spain

㊼西方正司、竜田藤男、サイリスタインバータを用いた実用規模ハイブリッド風力発電

システムの運転特性、平成 21 年電気学会産業応用部門大、2009 年 9 月 2 日、三重大学

㊹竜田藤男、西方正司、直列接続される複数台風力発電機システムの動作特性とその改善、平成 21 年電気学会産業応用部門大、2009 年 9 月 2 日、三重大学

㊺中村優太郎、竜田藤男、西方正司、船舶搭載時における風力発電システムの最適出力に関する検討、平成 21 年電気設備学会全国大会、2009 年 8 月 28 日、富山大学

㊻目黒孝太郎、竜田藤男、西方正司、杉原裕征、新方式ハイブリッド風力発電システムの研究、平成 21 年電気設備学会全国大会、2009 年 8 月 28 日、富山大学

㊼丸井敏裕、竜田藤男、西方正司、複数台風力発電システムの新しい構成とその基本特性の検討、平成 21 年電気設備学会全国大会、2009 年 8 月 27 日、富山大学

〔図書〕(計 2 件)

①Shoji Nishikata, Fujio Tatsuta (Chapter 5 分担執筆) 他、Springer、Wind Energy Conversion Systems, 2012 年、総ページ数 525(pp.111-130)

②西方正司、オーム社、基本を学ぶ電気機器、2011 年、137 頁

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西方正司 (NISHIKATA SHOJI)
東京電機大学・工学部・教授
研究者番号：80092568

(2) 研究分担者

竜田藤男 (TATSUTA FUJIO)
東京電機大学・未来科学部・講師
研究者番号：00155095