

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360122

研究課題名(和文) マルチレベル電力変換器の新規トポロジー群創出と技術的枠組みの再構築

研究課題名(英文) Novel Topologies Creation and Technical Framework Reconstruction of Multilevel Power Converters

研究代表者

野口 敏彦 (Noguchi, Toshihiko)

静岡大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10237828

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円、(間接経費) 4,380,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、(1)従来の回路構成、動作原理とは全く異なるマルチレベル電力変換器の新規トポロジー群を見出し、マルチレベル技術の枠組みを拡張、再構築できた。(2)従来方式と新規トポロジー群を半導体素子数、受動素子数、電源数、絶縁ドライブ回路数、電力変換効率、実装や制御の難易度などの観点から総合的に比較評価し、それぞれの特徴を活かした応用に対する技術的基盤を提供できた。(3)新規トポロジー群の中から、SiC-MOSFETに代表される次世代半導体素子を利用した電力変換器のあるべき姿を提示した。

研究成果の概要(英文)：The achievements of this research work are as follows:

(1) Novel topologies of the multilevel power converters that have completely different circuit configuration and operation principle have been discovered, and the framework of the multilevel technology has been expanded and reconstructed. (2) Comprehensive comparison of the semiconductor counts, the passive element counts, power supply counts, isolated drive circuit counts, power conversion efficiency and difficulty of implementation and control has been conducted between conventional and novel proposed topologies. and (3) Some novel topologies are taken up for possible utilization in power converters using next-generation semiconductors such as SiC-MOSFET.

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：パワーエレクトロニクス 電力工学 電気機器工学 制御工学 マルチレベル電力変換器 電流形インバータ トポロジー

1. 研究開始当初の背景

電力変換器の出力をマルチレベル化することにより、出力波形の総合歪率を大幅に改善することができる。また、出力レベル数に応じて使用する電力用半導体素子の定格値を低減できると同時に、電力変換器の大容量化を図ることが容易となるため、主として大容量装置への適用を目指してマルチレベル電力変換技術が精力的に研究されている。一方、Si (シリコン) に代わって SiC (シリコンカーバイド) を基材とする次世代半導体素子がいよいよ実用に供される日が近づいている。このため、高速スイッチング ($dV/dt = 10^4 \sim 10^5 V/\mu s$)、高耐圧 (Si の 7~10 倍)、高効率 (Si に対し $R_{on} = 1/200 \sim 1/500$)、高温動作 (200~400°C) という卓越した諸特性を活かす電力変換技術が切望されている。また、AC/AC 直接変換方式も有望な技術であるため、双方向導通あるいは逆阻止能力をもった半導体スイッチング素子の開発が今後盛んに行われていくと思われる。

従来、マルチレベル電力変換器の代表的なものとして、中性点クランプ形、フライングキャパシタ形、カスケード接続形、キャパシタセル形などが広く知られている。このように、国内外を通じてマルチレベル電力変換技術は専ら電圧源形のトポロジを軸に展開されてきた。一方、電流源形のトポロジはあまり研究されていないが、並列接続形、マルチセル形、シングルレーティングインダクタ形などが国外で提案されている。本研究は過去に国内外で発表されたいずれとも異なる独自の回路構成と動作原理に基づくマルチレベル電力変換器の新規トポロジ群を探索、創出するものである。

2. 研究の目的

本研究は、従来の回路構成、動作原理とはまったく異なるマルチレベル電力変換器の新規トポロジ群を探索、創出し、マルチレベル電力変換器の技術的枠組みを再構築するとともに、新たな応用に対する技術的基盤を提供することを目的とする。以下に研究目的を項目別に掲げる。

- (1) 独自のフィッシュボーン構造、インダクタセル、DC 電流源モジュール重畳方式などの未開拓トポロジ群を出発点として、マルチレベル電力変換器の新たな技術領域を拡張する。
- (2) SiC (シリコンカーバイド)などを基材とする次世代半導体素子の適用を前提とし、大容量電力変換器に適した新規トポロジ群を探索、創出する。
- (3) プロトタイプによる実機検証を通じて従来方式と新規トポロジ群の比較評価を行う。

3. 研究の方法

本研究では独自のフィッシュボーン構造、インダクタセル、DC 電流源モジュール重畳

方式などの未開拓トポロジ群を出発点として、マルチレベル電力変換器の新規トポロジ群を探索、創出する点に学術的な特色がある。この点で従来とは一線を画した独創的研究である。

本研究により次の成果を期待できる。

- (1) 従来の回路構成、動作原理とは全く異なるマルチレベル電力変換器の新規トポロジ群を見出し、マルチレベル技術の枠組みを拡張、再構築することができる。
- (2) 従来方式と新規トポロジ群を半導体素子数、受動素子数、電源数、絶縁ドライブ回路数、電力変換効率、実装や制御の難易度などの観点から総合的に比較評価し、それぞれの特徴を活かした応用に対する技術的基盤を提供することができる。
- (3) 新規トポロジ群の中から、SiC-MOSFET に代表される次世代半導体素子を利用した電力変換器のあるべき姿を提示することができる。

本研究は以下の計画・方法に基づき平成 23~25 年度の 3 年間にわたって実施された。

- (1) 平成 23 年度 フィッシュボーン構造、インダクタセル、DC 電流源モジュール重畳方式などに基づくマルチレベル電力変換器の新規トポロジ群を検討した。計算機シミュレーションによる基本動作の確認と予備実験を行った。
- (2) 平成 24 年度 新規トポロジ群に基づくマルチレベル電力変換器のプロトタイプを試作した。プロトタイプによる実機検証と種々の方式について比較評価した。
- (3) 平成 25 年度 新規トポロジ群を含んだマルチレベル電力変換器の技術体系を再構築した。次世代半導体素子の利用を見据えた実装法検討と実験評価を行った。

4. 研究成果

(1) 技術的背景

近年、IGBT や MOSFET などの電力用半導体素子の特性が飛躍的に向上し、電力変換器の性能改善を力強く牽引している。特に、オン電圧 (オン抵抗) の改善とスイッチングの高速化によって電力変換器の導通損とスイッチング損が低減され、変換効率の向上に大きく寄与している。また、高耐圧・大電流素子は電力変換器の大容量化と電力密度の向上を促進し、適用範囲の拡大にも貢献している。このような半導体素子の特性向上のほか、電力変換器自体の回路構成および制御の工夫による性能改善も著しい。特に、電力変換器のマルチレベル化は導通損やスイッチング損、使用素子数、制御の複雑さにおいて基本的な 2 レベル電力変換器より不利であるが、波形歪、装置容量、素子定格などの点で高い優位性をもつ。中性点クランプ形コンバータに代表されるように、これまで数種のマルチレベル電力変換器が発表されてきたが、いずれも電圧源形であり、その双対にあたる電流源形が検討されたことはほとんどない。本研

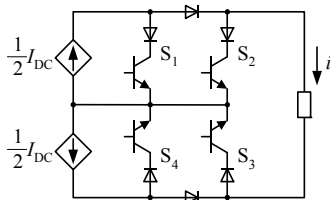


図1 電流源3レベルコンバータ（電圧源3レベル中性点クランプ形コンバータの双対回路）

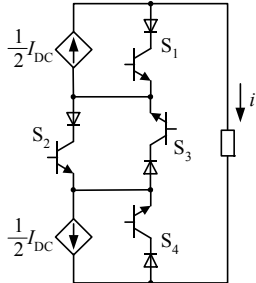


図2 電流源3レベルコンバータ（電圧源3レベル中性点短絡形コンバータの双対回路）

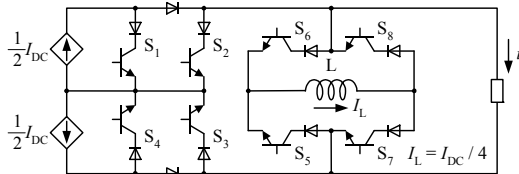


図3 インダクタセルを利用した電流源5レベルコンバータ（電圧源5レベル縦続キャパシタセル形コンバータの双対回路）

究では種々のマルチレベルコンバータについて電気回路の双対性を利用して新しいトポロジーを導出し、シミュレーションや実験によりその妥当性を検証する。

(2) 双対理論により導出されるマルチレベルコンバータの新トポロジー

① 中性点クランプ形コンバータの双対回路 3レベル中性点クランプ形コンバータの双対回路を図1に示す。

② 中性点短絡形コンバータの双対回路 図2に3レベル中性点短絡形コンバータの双対回路を示す。

③ 縦続キャパシタセル形コンバータの双対回路 図3は5レベル縦続キャパシタセル形コンバータの双対回路である。主回路は図1の電流源3レベルコンバータであり、インダクタを直流バスにもつフルブリッジ補助コンバータ（インダクタセル）が並列に接続される。この構成では、インダクタ電流を $I_{L1} = I_{DC} / 4$, $I_{L2} = I_{DC} / 8$, $I_{L3} = I_{DC} / 16$, ... とする複数のインダクタセルを並列に挿入して出力のレベル数を増大する。

④ ネスト構造をもつ電圧源マルチレベルコンバータとその双対回路 図4は電圧源2レベルコンバータを2組用いた例である。このように複数のコンバータを入れ子のように挿入していくことでマルチレベル化を図る。このようなネスト構造を双対変換すると図5のような回路を新たに得ることができる。電圧源で構成した図4の回路と異なり、ネスティングの度合に一切関わらず、すべての直

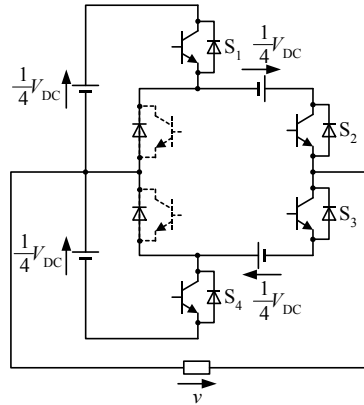


図4 ネスト構造をもつ電圧源4レベルコンバータ

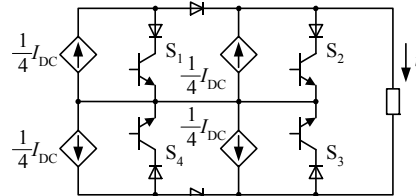


図5 電流源4レベルコンバータ（ネスト構造をもつ電圧源4レベルコンバータの双対回路）

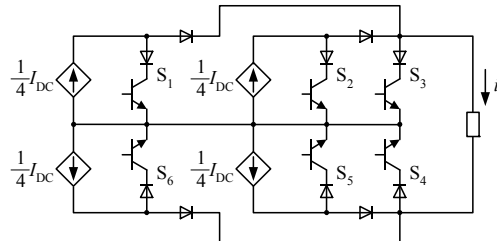


図6 電流源5レベルコンバータ（ネスト構造をもつ電圧源5レベルコンバータの双対回路）

流電流源が同一電位に接続される。また、スイッチング素子についても同様であるため、複数の素子を駆動するために絶縁されたドライブ回路は不要である。

ネスト構造をもつ電圧源マルチレベルコンバータは2レベルと3レベルの組合せでも実現できる。この双対回路は図6のような構成となる。このような新規トポロジーは、すべての直流電流源とスイッチング素子が共通枝路に接続される。しかも、出力レベル数を更に増加させる場合でも、その共通枝路上に同一電位で並列多重化するだけで良いという利点がある。なお、この回路はフィッシュボーン構造と命名した。

(3) Hブリッジを活用した新トポロジー

① インダクタセルとHブリッジ電流源3レベルコンバータの組み合わせ 図7にHブリッジ3レベル電流源コンバータと並列に挿入されたインダクタセルの組み合わせからなるマルチレベルコンバータを示す。ここで取り上げるHブリッジのほか、前述の図1に示したような回路でも主回路となりえる。

② DC電流源モジュールとHブリッジ電流源3レベルコンバータの組み合わせ DC電流源モジュールは図1や図7に既出の新規トポロジーでも頻繁に出現する構成単位である。図8は複数のDC電流源モジュールを

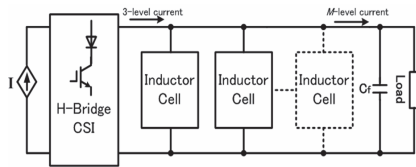


図7 インダクタセルとHブリッジ電流源3レベルコンバータを組み合わせたマルチレベルコンバータ

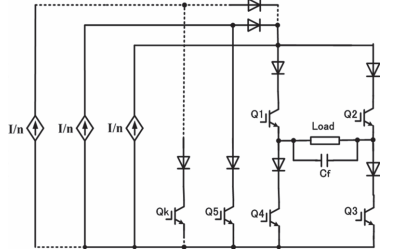


図8 DC電流源モジュールとHブリッジ電流源3レベルコンバータを組み合わせたマルチレベルコンバータ

重畳し、最終段でHブリッジ電流源3レベルコンバータと組み合わせた例である。

(4) 新規トポロジー群の運転特性と従来方式との比較

① フィッシュボーン構造電流源3レベルコンバータの運転特性 図1のフィッシュボーン構造を有する電流源3レベルコンバータの出力電流とフィルタ後の負荷電圧波形を図9に示す。直流電流源を10A一定に保持し、コンバータの出力電流指令値は100Hzの正弦波、100kHzのキャリアでパルス幅変調した。同図に示されているように出力電流は3レベルのPWM波形となっており、その振幅は電流源と一致している。

② フィッシュボーン構造電流源5レベルコンバータの運転特性 図6のフィッシュボーン構造電流源5レベルコンバータの波形を図10に示す。出力電流は所望の5レベルPWM波形となっており、中位のほか0レベルも良好に出力されている。図11は本コンバータの効率特性を示したものである。軽負荷時にはスイッチング素子の導通損が相対的に大きくなるため効率は低下するが、負荷が重くなるに従って改善され、最大出力1.42kW時には92.7%の効率を達成している。

③ インダクタセルを利用した電流源5レベルコンバータの運転特性 図12は図3に示したインダクタセルを利用した電流源5レベルコンバータの実験波形である。5レベルの出力電流波形は若干ノイズが乗っているが、THDは3.3%と良好である。図13は本コンバータの効率特性を示したものである。負荷消費電力が800Wになるまで測定し、最高効率は92.7%に達した。

④ HブリッジとDC電流源モジュールを組み合わせた電流源5レベルコンバータの運転特性 図14は1個のDC電流源モジュールをHブリッジ電流源3レベルコンバータに重畳した各部電流波形を示しており、負荷への出力電流は良好な5レベル波形となっている。負荷消費電力が800Wとなるまで測定した結果、最高効率93.4%を記録した。

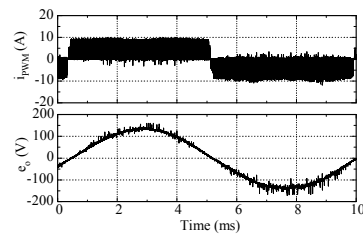


図9 フィッシュボーン構造電流源3レベルコンバータの出力波形

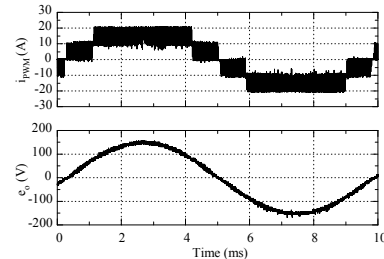


図10 フィッシュボーン構造電流源5レベルコンバータの出力波形

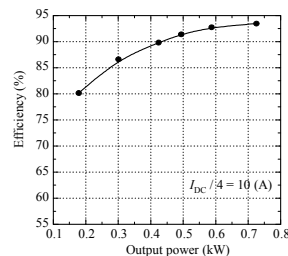


図11 フィッシュボーン構造電流源5レベルコンバータの効率

⑤ インダクタにおける導通損の比較 図16は出力波形のレベル数を横軸にとり、図1のフィッシュボーン構造電流源3レベルコンバータにおける直流電流源のインダクタ導通損を基準とした相対的なインダクタ導通損を示したものである。フィッシュボーン構造をもつトポロジーやDC電流源モジュールとHブリッジからなるトポロジーは、出力電流波形のレベル数が増加するに伴い急激にインダクタ導通損が減少する。

⑥ 使用素子数の比較 表1に従来の電流源5レベルコンバータ(1)~(3)と本研究で創出した5レベル新規トポロジー(4)~(7)の使用素子数を比較した。DC電流源モジュールとHブリッジの組み合わせからなるトポロジーが高い優位性をもつ。

(5) まとめ

本研究を通じて以下の成果が得られた。

- ① 従来の回路構成、動作原理とは全く異なるマルチレベル電力変換器の新規トポロジー群を見出し、マルチレベル技術の枠組みを拡張、再構築できた。
- ② 従来方式と新規トポロジー群を半導体素子数、受動素子数、電源数、絶縁ドライブ回路数、電力変換効率、実装や制御の難易度などの観点から総合的に比較評価し、それぞれの特徴を活かした応用に対する技術的基盤を提供できた。
- ③ 新規トポロジー群の中から、SiC-MOSFET

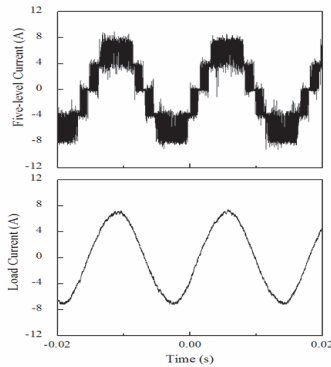


図 12 インダクタセルを利用した電流源 5 レベルコンバータの出力波形

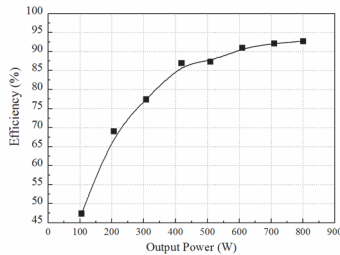


図 13 インダクタセルを利用した電流源 5 レベルコンバータの効率

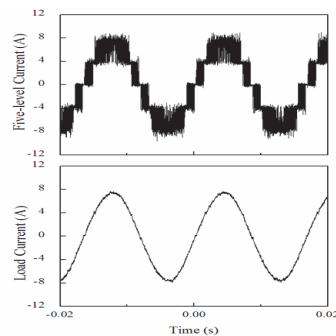


図 14 HブリッジとDC電流源モジュールを組み合わせた電流源 5 レベルコンバータの出力波形

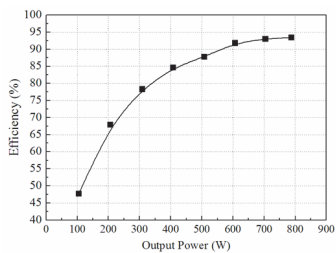
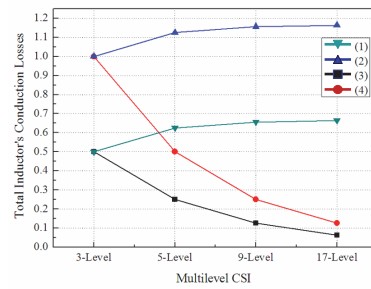


図 15 HブリッジとDC電流源モジュールを組み合わせた電流源 5 レベルコンバータの効率

に代表される次世代半導体素子を利用した電力変換器のあるべき姿を提示した。

5. 主な発表論文等

- [雑誌論文] (計 9 件, すべて査読あり)
- (1) 野口季彦, 和田哲朗, 鹿野 将, 小森健裕: 「効率とパワー密度の最大化を図った低電圧駆動1.5kW, 150,000 r/min超高速PMモータ」電気学会論文誌D(産業応用部門誌), 134 巻, 641-648 頁, 2014, DIO 10.1541/ieejias.134.641
 - (2) 野口季彦, 水野知博, 村田宗洋: 「スイッチングアシスト補助回路を用いた



(1) インダクタセルと H ブリッジの組み合わせ (2) インダクタセルとフィッシュボーン構造の組み合わせ (3) DC電流源モジュールと Hブリッジの組み合わせ (4) フィッシュボーン構造

図 16 インダクタ導通損の相対比較

表 1 各種コンバータの使用素子数の比較

マルチレベル電力変換器	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
スイッチング素子数	8	8	8	8	8	5	6
ダイオード数	8	8	8	8	10	6	10
直流電流源数	1	2	1	1	2	2	4
インダクタ数	3	2	5	2	3	2	4
絶縁ドライブ電源数	4	4	4	4	4	3	1

- (1) マルチセル (2) 並列 Hブリッジ (3) シングルレーティング (4) インダクタセルと Hブリッジの組み合わせ (5) インダクタセルとフィッシュボーン構造の組み合わせ (6) DC電流源モジュールと Hブリッジの組み合わせ (7) フィッシュボーン構造

MOSFET の高速スイッチング法」電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), 133 巻, 1186-1192 頁, 2013, DIO 10.1541/ieejias.133.1186

- (3) 小原正樹, 野口季彦: 「巻線抵抗同定機構を有する永久磁石同期モータの磁極位置センサレス制御における誘起電圧変動と磁極位置誤差の特性解析」電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), 133 巻, 812-820 頁, 2013, DIO 10.1541/ieejias.133.812
- (4) 小原正樹, 野口季彦: 「モデル規範適応システムに基づく永久磁石モータのセンサレス制御における磁極位置推定特性の改善」電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), 133 巻, 222-230 頁, 2013, DIO 10.1541/ieejias.133.222
- (5) Suroso, Toshihiko Noguchi, "Multilevel Current Waveform Generation Using Inductor Cells and H-Bridge Current-Source Inverter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, pp.1090-1098, 2012, DIO 10.1109/TPEL.2010.2056933
- (6) 小原正樹, 野口季彦: 「内部永久磁石同期モータの停止時磁極位置推定法」電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), 132 巻, 1082-1083 頁, 2012, DIO 10.1541/ieejias.132.1082
- (7) 野口敏彦, 水野知博: 「負荷短絡補助回路を用いた MOSFET の高速スイッチング法 —高周波ハーフブリッジインバータへの適用—」電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), 132 巻, 1080-1081 頁, 2012, DIO 10.1541/ieejias.132.1080
- (8) 野口敏彦, 水野知博: 「負荷短絡補助回路を用いた MOSFET の高速スイッチング法

- チョップパへの適用と運転特性—」電気学会論文誌D(産業応用部門誌), 132巻, 598-599 頁, 2012, DIO 10.1541/ieejias.132.598
- (9) Suroso, Toshihiko Noguchi, “Common-Emitter Topology of Multilevel Current-Source Pulse Width Modulation Inverter with Chopper-Based DC Current Sources,” IET Power Electronics, vol.4, pp.759-766, 2011, DIO 10.1049/iet-pel.2010.0008
[学会発表] (計 60 件)
- (1) M. Aoyama, T. Noguchi, “Mathematical Analysis of Wound-Field Synchronous Motor Self-Excited by Space Harmonics,” The 22nd International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM2014), Accepted, 2014年06月18日～20日, Hotel Continental Ischia, Ischia, Italy.
- (2) T. Noguchi, J. Xiang, “Off-Line Parameter Identification of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor by Searching Minimum Point of Current Norm Characteristics,” The 22nd International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM2014), Accepted, 2014年06月18日～20日, Hotel Continental Ischia, Ischia, Italy.
- (3) M. Aoyama, T. Noguchi, “Mathematical Model of Novel Wound-Field Synchronous Motor Self-Excited by Space Harmonics,” IEEJ International Power Electronics Conference 2014-Hiroshima (IPEC2014), 2014年05月18日～21日, 広島国際会議場(広島市).
- (4) T. Noguchi, M. Murata, “High-Speed Switching Method of MOSFET Using Voltage Boost Auxiliary Circuit Fed by Gate Drive Power Supply -Applications to Chopper and Half-Bridge Inverter and Their Operation Characteristics-,” IEEJ International Power Electronics Conference 2014-Hiroshima (IPEC2014), 2014年05月18日～21日, 広島国際会議場(広島市).
- (5) M. Aoyama, T. Noguchi, “Theoretical Analysis of Novel Wound-Field Synchronous Motor Self-Excited by Space Harmonics,” The 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD2014), 2014年04月08日～10日, Midland Hotel, Manchester, United Kingdom.
- (6) M. Aoyama, T. Noguchi, “Rare-Earth-Less Motor with Field Poles Excited by Space Harmonics —Theory of Self-Excitation and Magnetic Circuit Design—,” The 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2013), 2013年11月10日～13日, Austria Center Vienna, Vienna, Austria.
- (7) M. Aoyama, T. Noguchi, “Rare-Earth Free Motor with Field Poles Excited by Space Harmonics —Current Phase-Torque Characteristics of Self-Excitation Synchronous Motor—,” International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA2013), 2013年10月20日～23日, Avenida America Hotel, Madrid, Spain.
- (8) Suroso, H. Prasetijo, D. T. Nugroho, T. Noguchi, “New Five Level Current-Source PWM Inverter for Grid Connected Photovoltaics,” International Conference on Information Technology and Electrical Engineering 2012 (CITEE2012), 2012年7月12日, Gedung KPFT Fakultas Teknik Universitas, Indonesia.
- (9) T. Noguchi, T. Mizuno, “High-Speed Switching Operation of MOSFETs Using Auxiliary Circuit Shorting Load,” International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA2013), 2012年11月11日～14日, The Best Western Premier Hotel Nagasaki (長崎市).
- (10) Suroso, T. Noguchi, “A Multilevel Voltage Source Inverter Using H-Bridge and Two-Level Power Modules with a Single Power Source,” The 9th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS2011), 2011年12月5日～8日, Amara Hotel, Singapore.
- ほか国内学会発表 50 件 (内, 招待講演 4 件)
[図書] (計 3 件)
- (1) 分担執筆 (大久保仁, 野口季彦ほか) : 「電気工学ハンドブック」オーム社, 総頁数 2706, 2013 年
- (2) 分担執筆 (近藤圭一郎, 野口季彦ほか) : 「電気学会技術報告 新応用分野に拡大する可変速交流ドライブ技術」電気学会, 総頁数 62, 2012 年
- (3) 分担執筆 (森本雅之, 野口季彦ほか) : 「電気自動車の最新制御技術」エヌ・ディー・エス, 総頁数 256, 2011 年
- [産業財産権]
○出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)
[その他]
ホームページ等
静岡大学 野口研究室
<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~ttnogut/index.html>
6. 研究組織
- (1)研究代表者
野口 敏彦
静岡大学・工学研究科・教授
研究者番号: 10237828
- (2)研究分担者
なし
- (3)連携研究者
なし