

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 4日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656195

研究課題名（和文）低電圧・大電流・高周波スロットレス超高速モータの開発

研究課題名（英文）Development of Low-Voltage, High-Current and High-Frequency Slotless Ultra High-Speed Motor

## 研究代表者

野口 敏彦 (NOGUCHI TOSHIHIKO)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：10237828

研究成果の概要（和文）：本研究では、車載用過給機の電動化あるいはハイブリッド化を実現するための超高速モータの開発を行った。車載用であるため、低電圧・大電流・高周波をキーワードとする極めて特殊な設計が必要となる上、高パワー密度・高効率を両立しなければならない。有限要素法による電磁界解析に基づき、12V 直流電源で定格出力 1.5 kW、最大出力 3 kW、最高回転数 150,000 r/min のプロトタイプを開発した。このモデルは 2 ターン巻線スロットレス構造を導入することにより、 $22.2 \text{ W/cm}^3$ （定格出力時）という世界最高レベルのパワー密度と同時に 98.1% の電気的効率を実現することができた。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on development of an ultra high-speed motor to make automotive superchargers and turbochargers electrified or hybridized. Extremely special design is required to achieve low-voltage, high-current and high-frequency operation because of the automotive application. In addition, high-power density and high-efficiency design must be consistent with the above requirements. Using FEM based electromagnetic analyses, a prototype has been developed, which has 1.5-kW rated output power, 3-kW peak output and 150,000 r/min top speed specifications when operated with a 12-V DC power supply. This model has achieved the world's top level power density of  $22.2 \text{ W/cm}^3$  (at the rated output power) as well as the 98.1 % electrical efficiency by employing a 2-turn slotless configuration.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：パワーエレクトロニクス

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：高速モータ、スロットレス、低電圧、大電流、高周波、パワー密度、効率

## 1. 研究開始当初の背景

自動車や船舶の燃費改善には、ハイブリッド化が極めて有効である。中でもディーゼルエンジンは本来効率が高いため欧州では多用されており、これを用いたハイブリッド技術が進展すると考えられる。ディーゼルエンジンはターボチャージャと組合せて使用することが前提であり、大型自動車や船舶には不可欠の補機と位置づけられている。しかし、このようなシステムでも総合効率は 40% 台に

留まっており、燃焼エネルギーの大半は熱となって大気中に放散される。

排気から燃焼エネルギーを回収する原理として、熱電変換素子を利用したものが提案されているが、その変換効率は 5% 前後と非常に低いため莫大な燃焼エネルギーを回収することはできない。そこで、ターボチャージャやスーパーチャージャなどの過給機と高速モータを組み合わせるにより、過給システムの高性能化と高機能化を図ってタ

ーボラを解消するだけでなく、効率的に排気から燃焼エネルギーの回収を実現する手法が有望である。本研究に関する文献はほとんど見られないが、国内では本研究代表者と三菱重工業が共同で行った研究成果や石川島播磨重工業の報告が主だったものである。また、国内大手自動車メーカーからも展示会のたびにコンセプトモデル（模型）が発表されるが、未だ確立した技術とはなっていない。一方、国外でも米国のハネウェル社やピステオン社が技術概要を公表しているものの、未だ具体的な実機および実験データが報告されていない。

## 2. 研究の目的

従来の機械式ターボチャージャと超高速モータジェネレータを組み合わせてハイブリッド化を行い、排気ガスのエネルギーを電気エネルギーとして回収するシステムが検討されている。特に、高速道路を巡航するような状況では、大きなエンジントルクを要しないにもかかわらず、排気ガスの排出は相当量にのぼるため、このようなコジェネレーションシステムは総合効率を更に高め燃費を改善するのに極めて有効である。

そこで、本研究では今後の普及がますます期待されるハイブリッド自動車あるいはハイブリッド船舶において、エンジン補機である過給機（ターボチャージャ）の電動化によりコジェネレーションを行い、排気ガスエネルギーの回収を通じて更なる燃費向上を目指す。この目的を達成するために以下の3項目に狙いを定めて研究を推進する。

- (1) 世界最高レベルのパワー密度をもつ 150,000 r/min, 3 kW の超高速モータジェネレータを開発する。
- (2) 電氣的損失の最小化を図ることにより、同クラスのモータジェネレータとしては世界最高レベルの効率（97 %前後）を狙う。
- (3) 低電圧・大電流・高周波駆動技術の基盤構築に挑戦する。

## 3. 研究の方法

本研究では、過去の超高速モータに関する知見と技術的蓄積を基に、超高速モータジェネレータのスロットレス化を実現し、更なる小型化と高効率化を図って、世界最高レベルのパワー密度と効率を狙う。また、プロトタイプを試作を通して実機開発の問題点洗い出しを行う。

具体的には、定格回転数を 150,000 r/min, 最大出力を 3 kW と定め、超高速モータジェネレータの開発を進める。特に、車載用であ

るが故に、低電圧（12 VDC）、大電流（180 A）、高周波（2500 Hz）で駆動できるように電気設計とともに機械設計を行うことや、このような超高速モータジェネレータを約 70 cc の体積で実現し、更には 97 % の電氣的効率を目指す点で学術的にも大きな特色をもつ。以上のような一連の研究活動を通じて低電圧・大電流・高周波駆動技術の基盤構築に向けて、新しい知見を提供することもできると考えられる。

本研究は次の計画・方法に基づき平成 23～24 年度の 2 年間にわたって実施された。

平成 23 年度：150,000 r/min, 3 kW 超高速モータジェネレータの机上設計を行い、電磁界解析シミュレーションにより各部寸法の最適化を行った。特に、低ターン数、大断面積のスロットレス巻線構造についてはまったくの新規設計を行い、その製作方法についても検討した。

平成 24 年度：超高速モータジェネレータの各種部材や治具の加工図面等を作成し手配した。その後、スロットレス超高速モータジェネレータと電力変換器（擬似電流形インバータ）のプロトタイプ試作を通じて実機開発の問題点を洗い出した。

## 4. 研究成果

### (1) 超高速永久磁石モータの設計概要

表 1 の目標仕様に基づいて、種々のモータ形式の中から超高速駆動に最も適したものとして、表面磁石形同期モータ（SPMSM）を採用した。これは SPMSM が誘導モータやリラク

表 1 超高速永久磁石モータの目標仕様

Assumed engine	1.5 L class
Rated output power	1.5 kW
Rated voltage	12 V
Rated speed	150000 r/min
Rated torque	0.0955 Nm
Overload capacity and duration	3 kW (200 % overload), 1 s

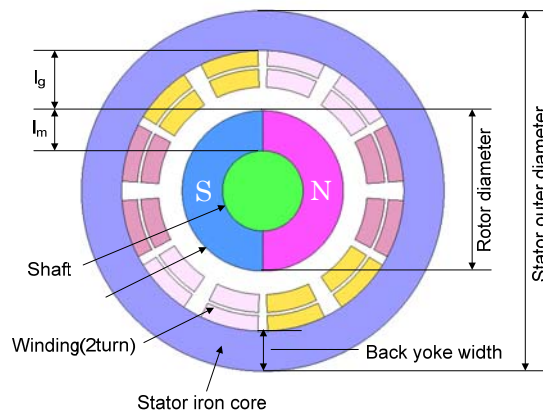


図 1 スロットレス超高速 PM モータの断面図

タンスモータとは異なり、励磁電流が必要なく効率が良く、同じ永久磁石型モータである埋込磁石形モータ (IPMSM) に比べ回転子構造が単純なため超高速回転に適しているからである。

固定子は図 1 に示すようにスロットレス構造である。固定子構造で注目すべき点は巻線構造であり、12 V という低電圧での駆動のため、同期インダクタンスだけでなく漏れインダクタンスも十分に低減する必要があるため集中巻構造を採用した。さらに、各相の巻線は 2 並列で 2 ターンという非常に少ないターン数で構成されている。固定子鉄心は 150,000 r/min の回転速度において、可能な限り鉄損を低減しなければならない。そのため、鉄損特性に優れる厚さ 0.1 mm の 6.5 % 珪素鋼板である JFE 製 10JNEX900 を積層ステータ鉄心として用いる。

回転子は強力な Nd-Fe-B 永久磁石 (ネオジウム磁石) とモリブデン合金のシャフトで構成されている。回転子にネオジウム磁石を用いることで、モータ効率の改善だけでなく、少ない磁石量で大きな磁束を得ることができるため回転子の小型化が可能となり、超高速永久磁石モータにとって重要な周速の制限と遠心力を軽減することが可能になる。また、 $BH_{max}$  が 326 kJ/m<sup>3</sup> の強力なネオジウム磁石を使うことで、エアギャップが非常に大きなモータの設計が可能であり、同期インダクタンスを低減できるとともに、集中巻構造であっても正弦波状の誘起電圧を得ることができる。表 2 は本研究で検討するスロットレス超高速 PM モータの基本設計概要である。

### (2) 電磁界解析結果に基づく設計のまとめ

図 2 に本研究で設計した 12 V 直流電源駆動、1.5 kW (最大 3 kW) -150,000 r/min のスロットレス超高速モータの各部寸法を示す。固定子の体積はわずか 67.7 cm<sup>3</sup> であり、定格負荷時のパワー密度は 22.2 W/cm<sup>3</sup> (最大出力時 44.3 W/cm<sup>3</sup>) と世界最高レベルの極めて高い値をマークすることができた。効率に関しては純電氣的効率が 98.1 % (定格運転時) であり、これについても当初目論見を 1 % 程度上回る設計ができた。なお、図 3 は定格運転時の諸損失計算結果である。

### (3) プロトタイプの概要

超高速モータの基本設計概念に記述されているように、試作機は非常に特殊な電気および機械構造を有している。図 4 は設計した試作モータの CG による構成図である。試作モータは永久磁石及び回転子シャフトから

構成される回転子、回転子シャフトを支持する 2 個のベアリング、固定子鉄心および固定子巻線から構成される固定子、回転子負荷側ベアリング及び固定子を支持する固定子フレーム、回転子反負荷側ベアリングを支持するベアリングブラケットから構成される。

今回設計した超高速モータは 12 V という低電圧で 150,000 r/min の超高速駆動を実現するために、巻線の漏れインダクタンスと抵抗をでき得る限り小さくするような構造、回転子の軸振動対策、回転子の遠心力対策など、設計上様々な機械的、電氣的工夫が必要である。図 5 は試作したプロトタイプの負荷側および反負荷側の写真である。

表 2 スロットレス超高速 PM モータの基本設計概要

Motor type	Surface Permanent-Magnet Synchronous Motor (SPMSM)
Number of phases	3 phase
Number of poles	2 poles
Stator configuration	Concentrated winding structure
Winding configuration	2 turns, 2 parallels per phase
Electromagnetic steel plates	10JNEX900 (0.1-mm thick, 6.5-% silicone, $\mu_s=23000$ , $B_{max}=1.8$ T)
Permanent magnet	N-40SH Nd-Fe-B ( $Br=1.28$ T, $bHc=971$ kA/m, $BH_{max}=326$ kJ/m <sup>3</sup> )
Bearings	Angular ceramic-ball bearings with grease lubrication

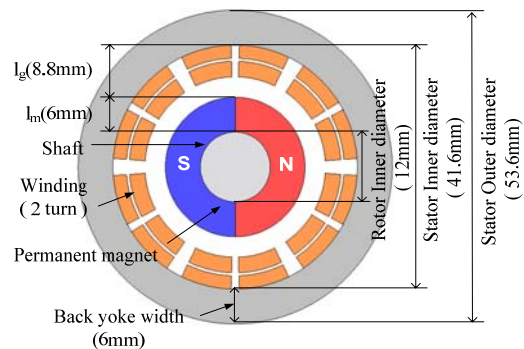


図 2 スロットレス超高速 PM モータの各部寸法

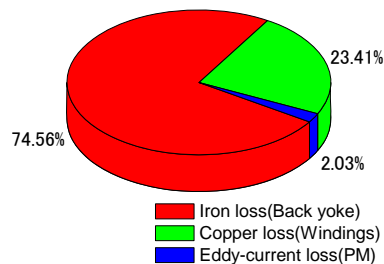


図 3 定格運転時の諸損失計算結果

#### (4) プロトタイプ of 回転子構造

超高速駆動用途のモータは特別な機械構造を有している。図6にCGによる回転子の断面構造を示す。回転子はモリブデン合金製のシャフトと、内径12mm、外径24mm、長さ30mmの円筒形ネオジウム磁石で構成される。この磁石は起磁力分布が正弦波状となるよう着磁されている。定格回転数150,000r/min時において回転子の磁石周速は188m/sに達するので、大きな遠心力が作用し永久磁石が飛散する可能性がある。そこで図7に示すように永久磁石表面にはエポキシ樹脂を含浸したグラスファイバー補強を施し、さらにエポキシ樹脂層を設けた。

超高速駆動用モータのため、回転子の加工において特にベアリング周辺にさまざまな特徴がある。ベアリング内輪はシャフト径に対して焼き嵌めを行い、ナットを用いて内輪を固定する。これにより、内輪のフレットングを防止する。さらにベアリング内輪が接するシャフト面にはミクロンオーダーの真円度、円筒度、直角度、ベアリング内輪同士の同芯度、サブミクロンオーダーの表面仕上げおよび平面度が要求される。また、ベアリング外輪と接するステータフレーム及びベアリングブラケットにはベアリング外輪径に対してルーズ加工がサブミクロン精度で施されている。

超高速駆動のモータにおいてベアリングは最も重要な構成部品であるが、試作モータはあくまで機能検証用のモータであるため高信頼性、耐久性のどちらも要求しない。そのため、グリス潤滑の高精度アンギュラ接触セラミック玉軸受を用いている。固定子フレーム及びベアリングブラケットには軽量化と放熱性の観点からアルミニウム合金A7075を採用している。しかし、ベアリングの外輪と接触する部分には高精度な加工や、反負荷側ベアリング外輪を軸方向に滑らかに可動させなければならないため、アルミニウムと比べ格段に硬度が高く、高精度な加工が可能な炭素鋼のベアリングスリーブを焼き嵌めしている。

#### (5) プロトタイプ of 固定子構造

図8は試作した固定子である。固定子鉄心は外径53.6mm、内径24mm、積厚30mmで、厚さ0.1mmの6.5%珪素鋼板約300枚から構成されている。図9は固定子の2ターン巻線である。固定子巻線は銅バーを扇形に切り出し、その銅バー2個を短絡バーで銀ろう付けして2ターンを構成する。固定子巻線と固定子鉄心、固定子巻線の1ターン目と2ターン目はそれぞれ電氣的に絶縁された上で、エポ

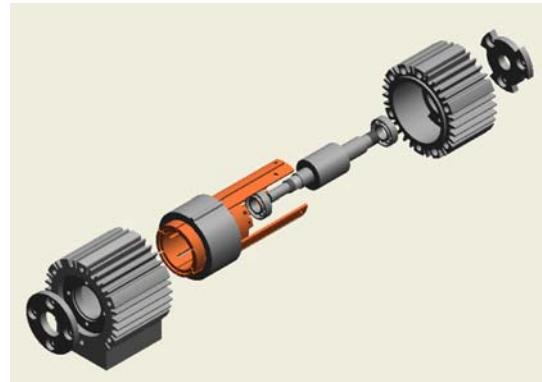


図4 CGによる試作モータの構成図

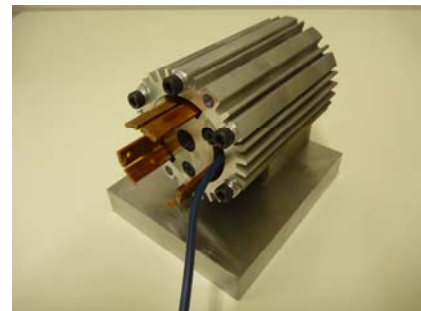
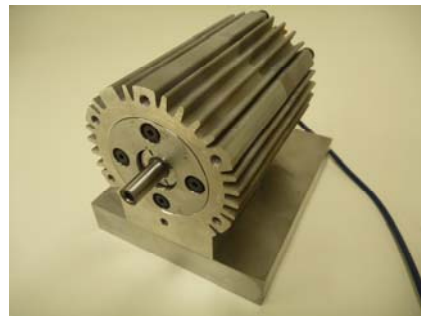


図5 プロトタイプ of 負荷側と反負荷側写真

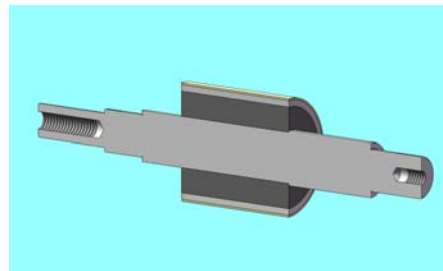


図6 CGによる回転子の断面図



図7 回転子の写真

キシ樹脂によって固定子鉄心と接着され、さらにエンドリングで他の相の固定子巻線と接続される。それぞれの固定子巻線の断面積は  $18.5 \text{ mm}^2$  であり、定格負荷における電流密度は約  $10 \text{ A/mm}^2$  である。

#### (6) 擬似電流形インバータ

プロトタイプの実験には図 10 に示す駆動回路を用いた。モータの基本駆動周波数は  $2 \text{ kHz}$  以上であり、今回は試作モータの基本的な動作特性を検証することが目的であり、一般的な電圧形 PWM インバータではなく擬似電流形インバータを用いた。擬似電流形インバータは電流制御用降圧チョップパ部と 6 ステップインバータ部から構成される。前者は DC バス電流フィードバックループを持ち、速度制御ループからのトルク指令に従い、DC バス電流を制御する。したがって、制御電流源とみなすことができ、DC バス電流の PAM 制御を実現する。この DC バスでは  $48 \text{ kHz}$  のスイッチング周波数で MOSFET が駆動されるため、DC バスインダクタンス値の低減と DC バス電流制御のミリ秒オーダーの高速応答が得られるので、一般のサイリスタ電力変換器よりも遥かに優れる。一方、6 ステップインバータ部はモータに内蔵した回転子の磁極位置検出用のホールセンサ信号にもとづいて DC バス電流の転流を行い、 $120$  度通電パターンの駆動電流を生成する。その電流が転流するたびに、モータの同期インダクタンスと線路インダクタンスによりインバータ端子にサージ電圧を発生する。しかし、擬似電流形インバータの場合、DC バス電圧はインバータの MOSFET 内のボディダイオードと降圧チョップパのバイパスダイオードを通してサージ電圧をクランプする。

#### 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 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, 2012 年, 222-230 頁  
DOI 10.1541/ieejias.133.222
- ② 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, 2011 年, 1082-1083 頁  
DOI 10.1541/ieejias.132.1082
- ③ 野口季彦, 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と運転特性—」電気学会論文誌 D (産

業応用部門誌), 132 巻, 2011 年, 1080-1081 頁

DOI 10.1541/ieejias.132.1080

- ④ 野口季彦, 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, 2011 年, 598-599 頁

DOI 10.1541/ieejias.132.598

[学会発表] (計 15 件)

- ① 青山真大, 野口季彦 「空間高調波を界磁エネルギー源とするレアアースフリーモータの基礎検討」平成 25 年電気学会全国大会, 2013 年 03 月 22 日, 名古屋大学 (愛知県)



図 8 固定子の写真



図 9 2 ターンスロットレス巻線の写真

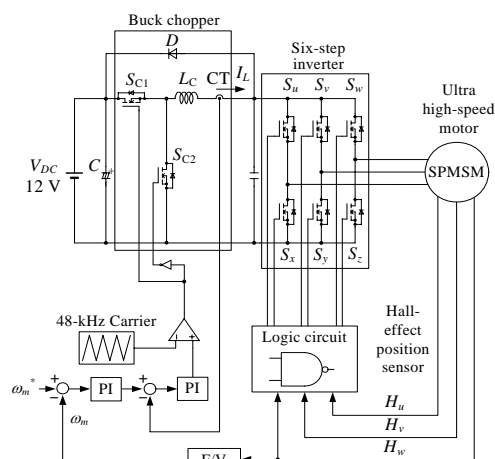


図 10 擬似電流形インバータ

- ② 季 翔, 野口季彦「パラメータミスマッチと電流ノルムの関係に着目した IPMSM の  $q$  軸インダクタンスオフライン同定法」平成 25 年電気学会全国大会, 2013 年 03 月 22 日, 名古屋大学 (愛知県)
- ③ 日吉良太, 野口季彦「磁気飽和と鉄損の数学モデルに基づく同期リラクタンスモータの最大効率運転法」平成 25 年電気学会全国大会, 2013 年 03 月 20 日, 名古屋大学 (愛知県)
- ④ 池上 憲, 野口季彦「インダクタモジュール電流形インバータの提案」平成 25 年電気学会全国大会, 2013 年 03 月 20 日, 名古屋大学 (愛知県)
- ⑤ 水野知博, 野口季彦「スイッチングアシスト補助回路を用いた MOSFET の高速スイッチング法」電力技術/電力系統/半導体電力変換合同研究会, 2013 年 03 月 05 日, 栗国島離島振興総合センター (沖縄県)
- ⑥ Toshihiko Noguchi, Tomohiro Mizuno “High-Speed Switching Operation of MOSFETs Using Auxiliary Circuit Shorting Load,” International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA2012), 2012 年 11 月 13 日, The Best Western Premier Hotel Nagasaki (長崎県)
- ⑦ 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同期モータの停止時磁極位置推定」電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, 2012 年 11 月 10 日, 福岡工業大学 (福岡県)
- ⑧ 野口季彦「モータドライブとパワーコンバータの高出力密度化に関する取り組み」電力デバイス/半導体電力変換合同研究会 (招待講演), 2012 年 10 月 25 日, 浜松市地域情報センター (静岡県)
- ⑨ 小原正樹, 野口季彦「モデル規範適応システムによる内部永久磁石同期モータの磁極位置センサレス制御」平成 24 年電気学会産業応用部門大会, 2012 年 08 月 23 日, 千葉工業大学 (千葉県)
- ⑩ 季 翔, 野口季彦「電流ノルムに着目した永久磁石同期モータのオフラインパラメータ同定法」平成 24 年電気学会産業応用部門大会, 2012 年 08 月 23 日, 千葉工業大学 (千葉県)
- ⑪ 野口有理, 野口季彦「スイッチング状態時系列行の提案と多相インバータの出力電流復元への応用」平成 24 年電気学会産業応用部門大会, 2012 年 08 月 21 日, 千葉工業大学 (千葉県)
- ⑫ Suroso, Hari Prasetyo, Daru Tri Nugroho,

Toshihiko Noguchi, “A New Five-Level Current-Source PWM Inverter for Grid Connected Photovoltaics,” International Conference on Information Technology and Electrical Engineering, 2012 年 07 月 12 日, Jenderal Soedirman University (Indonesia)

- ⑬ 野口季彦「モータ制御技術の基礎講座 I ~ III」モータ制御技術の基礎講座 (招待講演), 2011 年 11 月 15 日, 日本テクノセンター (東京都)
- ⑭ 野口季彦「次世代パワーエレクトロニクスへの挑戦」三菱電機静岡製作所社内技術講演会 (招待講演), 2011 年 9 月 28 日, 三菱電機静岡製作所 (静岡県)
- ⑮ 荻須崇文, 野口季彦「パワー密度を向上した低電圧大電流スロットレス超高速モータに関する検討」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 (沖縄県)

〔図書〕 (計 2 件)

- ① 分担執筆 (野口季彦ほか) 「電気工学ハンドブック」オーム社, 2013 年発売予定
- ② 分担執筆 (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, 2012 年

〔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 (NOGUCHI TOSHIHIKO)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号: 1 0 2 3 7 8 2 8

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし