

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249030

研究課題名(和文) 磁気飽和・矩形波駆動に対応した制御技術を想定したモータと電力変換器技術の高性能化

研究課題名(英文) Improvement of motor and power converter suitable for control under magnetic saturation and six-step drive

研究代表者

道木 慎二 (DOKI, Shinji)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：10273260

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電気自動車の主機モータなどで競争力を発揮するモータ技術、即ち、自動車用途で求められるモータ、インバータ、および、その制御技術について研究した。具体的には、ロータに界磁巻線を持ち、非接触で任意に制御可能な界磁電流を供給する技術である。既存の三相巻線を流用し、三相電流によるモータ制御と前記界磁電流制御とを非干渉性も保っている。そして、この界磁巻線技術を活用することにより、登坂運転で使用する低速回転での大トルクを力率90%以上で実現し、高速道路等の高速走行で使用する高速回転での弱め界磁制御・定出力制御を力率90%以上で、電圧が過大とならない技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：In this research, Motor drive system, which consist of motor, inverter and its control technology, has been developed for traction motor of Electric Vehicle(EV). At first, novel winding field type synchronous motor driven by 4-phase inverter was proposed. The system can supply the power from a stator winding to a rotor field winding without any physical contact and be driven as ordinary 3 phase AC synchronous motor. And independent current control between the field current and the torque current can be also realized. By using this proposed motor and control technique, power factor even in "Low-speed and High-torque" region for hill climb drive and "High-speed" region for highway drive are kept over 90% under a voltage limitation.

研究分野：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：駆動用モータ 界磁巻線 非接触給電 電気自動車 高トルク密度

1. 研究開始当初の背景

現在、家電、産業機械、ハイブリッド自動車などの駆動にモータ技術が広く活用されている。特に、ハイブリッド自動車、電気自動車の市場は急拡大の様相を呈しており、2050年までには自動車用内燃式エンジンは少数派になるという予測までである。これらにはモータ技術が必須であり、大変重要な中核技術となる。従って、国際競争力のあるモータ先進技術の研究開発が強く求められている。ここで、モータ技術とは、モータそのものの技術、電圧・電流の増幅を行うインバータの技術、これらを駆動する制御技術であり、これらトータルとしての高性能化、小形化、軽量化、低コスト化が求められる。このモータ技術の現状は、永久磁石を活用した磁石モータ、古くから幅広く使用されている誘導電動機が主流であり、他にリラクタンس力で駆動するスイッチトリラクタンスマータ、簡素な駆動を特徴とするフラックススイッチングモータ等があり、それぞれに特徴があり、しのぎを削っている。すなわち、モータ技術の方向性が定かではない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、特に自動車の主機用モータに関し、国際競争力のある先進技術を確立することである。

第1の目標は、「ロータ界磁巻線への非接触給電機能を持つ界磁巻線形同期モータ」の技術を確立し、大トルク化、高力率化、定出力特性の確保、小形化を実現することである。これは、ハイブリッド自動車などに使用されている磁石モータの従来技術では、大トルク時に力率が0.6程度まで低下し、モータ電流の増加を招き、銅損が2.778倍に、インバータの電流容量が1.667倍に増加する問題を改善する。高速回転の定出力特性領域においても、弱め界磁制御が理想的にはできないため、力率が低下し、モータ電圧が過大となり、インバータの電圧の負担が増加し、インバータの容量が増大する問題もある。これらの問題を解決することにより、大幅な小形化、低コスト化を期待できる。

第2の目標は、前記界磁巻線型同期モータを矩形波電圧・矩形波電流で駆動する非正弦波化技術の確立である。この技術は、モータおよびインバータの各部の利用率を、理想的には正弦波駆動の2倍に改善可能な技術であり、本研究では利用率1.5倍化を目標とする。従来の三相正弦波技術を矩形波・台形波などの非正弦波化の新技术によりモータとインバータをさらに小形化、低コスト化することが可能となる。

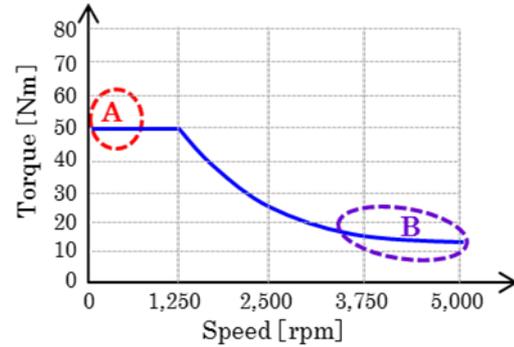


図1 速度 - トルク特性の例

Fig.1. Sample of torque vs. speed characteristics

3. 研究の方法

- (1) 現状の自動車主機用モータの問題点、および、主機用モータのニーズを、改めて、調査・分析した。
- (2) ロータ界磁巻線への非接触給電機能を持つ界磁巻線形同期モータの技術を開発した。
- (3) この界磁巻線型同期モータを矩形波電圧・矩形波電流で駆動する技術について検討を行った。なお、本研究では期間的・予算的な都合、駆動装置の都合により中断し、次の機会の研究テーマとする。

4. 研究成果

(1) 自動車主機用モータの問題点、および、ニーズの調査・分析

磁石内蔵形同期モータ IPMSM は最も有力なモータの一つであるものの、急坂道の登坂運転時に代表される低速大トルク

領域（図1のA）では磁気飽和の影響などで力率が低下することにより銅損が増加する問題がある。また、高速回転領域

（図1のB）でも力率の低下により電圧が増大する問題がある。これらの結果、モータが大型化する問題、インバータの電流容量が増大する問題がある。

また、本研究では矩形波電圧・矩形波電流の駆動技術による駆動効率の向上も目指しているが、前記の図1のA、Bの問題解決の方が優先課題であると考えられる。

(2) ロータ界磁巻線への非接触給電機能を持つ界磁巻線形同期モータの開発

提案するモータ構成

ロータ界磁巻線への非接触電力供給機能を設けることにより、モータの高トルク化と弱め界磁性能の向上との両立を目指す。従来のブラシ、スリップリングを排除して信頼性を確保する。

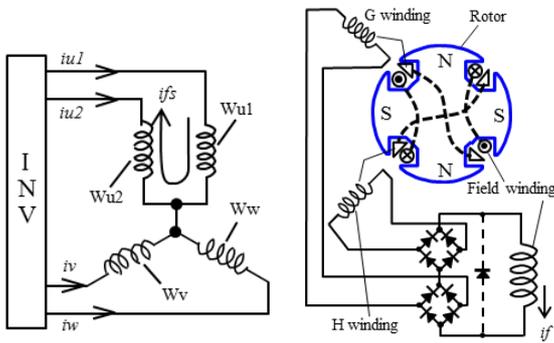


図2 ステータ巻線とロータの構成

Fig.2. Stator windings and rotor construction

図2のU相巻線をWu1とWu2の二組に分け、Wu1は電気角で0°から360°の間に配置し、Wu2は電気角で360°から720°の間に配置している。ロータの受電巻線であるG巻線、H巻線は電気角で360°ピッチで、相互に180°の位相差を持たせている。界磁巻線の給電電流ifsは、図2に示すよう、2個のU相電流に重畳して通電する。Wu1巻線に通電する電流iu1とWu2巻線に通電する電流iu2との和はU相電流iuであり、下式の関係となる。給電電流ifsは、例えば交流500Hzである。

$$iu = iu1 + iu2 \quad (1)$$

$$ifs = (iu1 - iu2) / 2 \quad (2)$$

ロータのG巻線、H巻線には500Hzの交流電圧が誘起され、それぞれを全波整流して加算した電圧vfを界磁巻線に供給して界磁電流ifを通電する。

ロータ界磁電流の精密制御技術

ロータ界磁電流ifは、高速回転での定出力制御を行うためには非接触で電力供給できるだけでなく、自在で精密な制御を行う必要がある。

図3は、界磁電流ifを計測するためのスリップリングを試作モータへ取り付けて、制御側で間接的に観測した界磁電流ifsと実測した界磁電流ifを比較した特性である。界磁電流指令if_refに対して、静止時・加減速時ともにほぼ正確に制御できることを確認した。ここで、界磁電流の制御には、(2)式、整流技術、移動平均技術、フィルター技術、フィードバック技術を使用している。評価は図7の評価システムで行った。

界磁制御と三相電流成分の非干渉性

ロータへの界磁電力の供給には2組に分けたWu1とWu2のU相巻線を使用しているが、(1)式および図3に示すよう、界磁制御と三相電流成分の非干渉性を確認できた。

ロータの内部構成と制御技術

本研究当初は単純な突極形状のロータ構造でロータへの非接触給電の原理を検証し

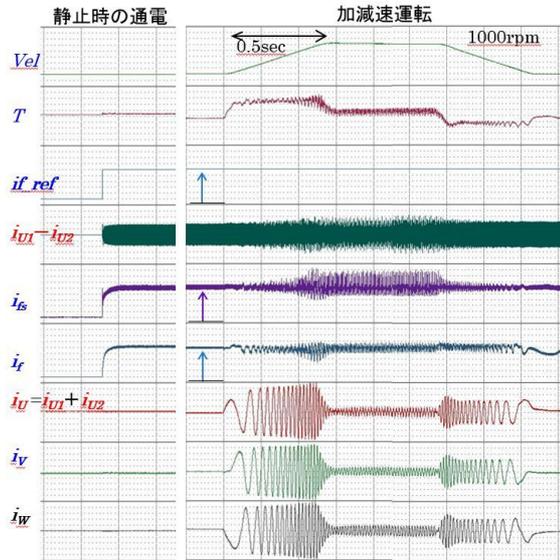


図3 ロータ界磁電流と三相電流

Fig.3. Rotor field current and 3 phase current

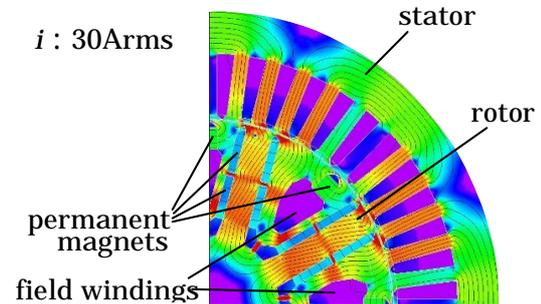


図4 モータモデルおよび磁束分布例

Fig.4. Motor model and distribution of magnetic

たが、磁気飽和の問題、電機子反作用の問題、トルクと力率の低下の問題も明らかになり、低速大トルクと定出力特性とのトレードオフ関係を両立させることの困難さを確認した。その力率確保と同時に電圧が過大とならないことが必要である。

これらの対応技術として、図4のロータ構成を提案した。ロータ界磁電流if、ステータd軸電流id、永久磁石をフル活用するロータ構成・技術である。具体的にはロータ磁極の2層の永久磁石、極間に界磁磁束強化磁石を配した磁極構造とし、所望トルク値と電圧値に対し、ロータ界磁電流ifとステータd軸電流idの最適値を選択して制御する技術である。従来、このような試みは無かった。

低速大トルクと定出力特性、および、その力率と電圧

有限要素法解析FEAとモータの試作による検討を行った。モータ概略仕様を表1、試作モータのステータを図5、ロータ巻線を図6、評価システムの外観を図7に示す。

表 1 試作モータの仕様
Table 1. Specifications of the prototype motor

Item	Specifications
Phase、 Pole、 Slot	3phase、 8pole、 48slot
Cont. / Max. Current	10 / 30Arms
Cont. / Max. Torque	17 / 51Nm
Outer diameter	176mm
Core width	50mm
Cooling condition	F class, All-closing , Natural air cooling

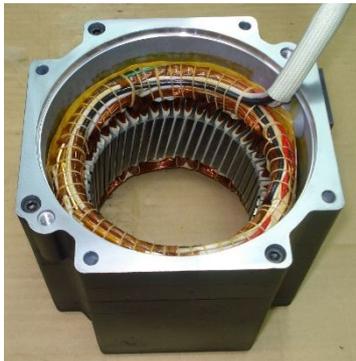


図 5 試作モータのステータ
Fig. 5 Stator of the prototype motor



図 6 試作モータのロータ巻線
Fig. 6 Rotor windings of the prototype motor

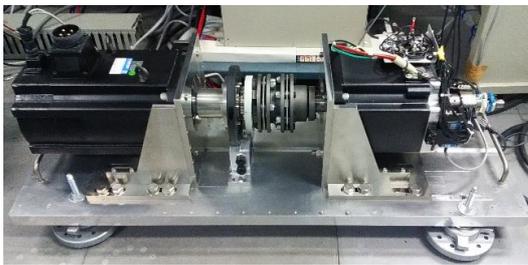


図 7 評価システム
Fig.7 Evaluation system

図 8 に電流 - トルク特性の FEA 結果を示す。3 相電流が 30Arms 時 48Nm とほぼ電流値に比例したトルク特性が得られた。図 9 はトルクリップル特性である。図 8、図 9 より、図 1 の領域 A に示す低速回転での大トルク実現可能性を確認できる。

前記図 4 の提案モータの界磁電流 i_f 、q 軸電流 i_q 、d 軸電流 i_d 、各永久磁石の配置・形状など各パラメータの組み合わせによる多

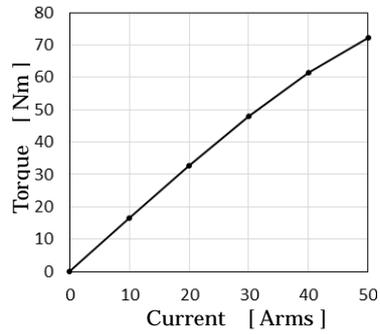


図 8 電流 - トルク特性
Fig.8 Torque characteristics

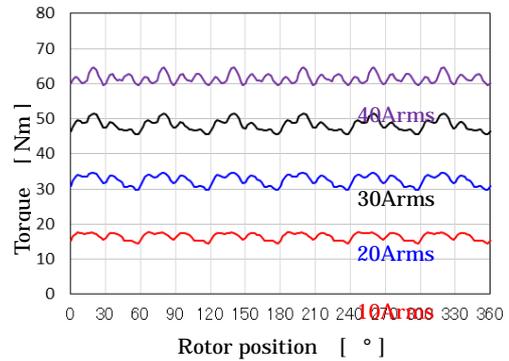


図 9 トルクリップル
Fig.9 Torque ripple

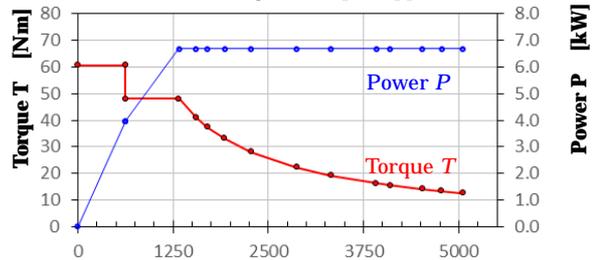


図 10 速度 N - トルク T · パワー P 特性
Fig.10 Speed N - Torque T · Power P

くのモータモデルについて FEA で評価した。すなわち、提案モータの最大トルク領域、最大出力領域における適正なパラメータの選択である。具体的な目的は、各動作点において、[力率 90%以上]と[モータ端子電圧が過大とならず、インバータ駆動が容易]を満足する適正パラメータの調査、検証である。

図 10 は速度 N - トルク T · パワー P 特性である。図 11 は速度 N - 力率 $\cos\theta$ · 線間電圧振幅値 V_l 特性である。図 10 と図 11 は連動して、同一モータ動作点の各変数値を示している。即ち、3 相電流の電流振幅 i_a と電流位相 θ_i 、界磁電流 i_f に対するトルク T 、Power P 、力率 $\cos\theta$ 、および 3 相線間電圧の振幅値 V_l である。図 11 のトルク T 特性は、最大電流 30Arms を通電し、1,250rpm を基底回転数として、6,676W の定出力特性上の動作点を 5,000rpm まで描いた特性である。従って、出力 P は基底回転数 1,250rpm から最大回転数 5,000rpm まで 6,676W で一定の値である。車両駆動用モータは急坂道の登坂運転で大ト

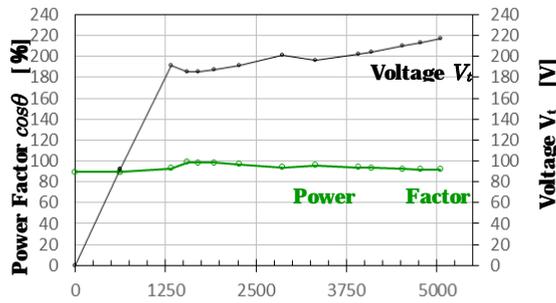


図 11 速度 N - 力率 $\cos\theta$ ・電圧 V_t 特性

Fig.11 Speed N - Power Factor $\cos\theta$ ・Voltage V_t

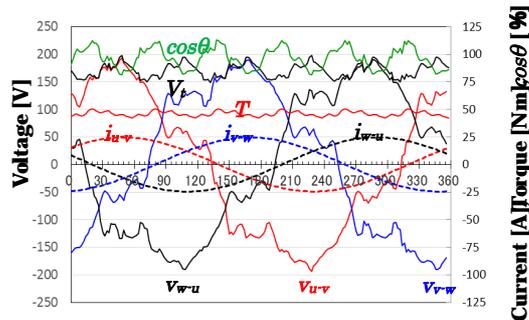


図 12 線間電流, 線間電圧, 線間電圧振幅値, トルク, 力率

Fig.12 Current, Voltage $v_{w-u}, v_{u-v}, v_{v-w}, V_t$, Torque T , Power Factor $\cos\theta$

ルクが必要なので、0rpm から 625rpm については 40Arms 時のトルクを示している。図 5 の力率 $\cos\theta$ 特性は、図 4 の各動作点における力率であり、90%以上の良好な値である。従って、各動作点で銅損を小さな値に保って運転することができる。ここで、力率 $\cos\theta$ の値は、線間電圧振幅値 V_t 、線間電流振幅値 I_t 、モータの回転角周波数 ω として、下式の関係から求めている。

$$P = 3/2 \times V_t \times I_t \times \cos\theta = \omega \times T \quad (3)$$

線間電圧振幅値 V_t は下式で求められる。トルク T 、3 相の相電圧瞬時値 v_u, v_v, v_w は FEA 解析値として得る。(3)式の各値は電気角 360° の間の平均値である。

$$V_t = (2 \times (v_u^2 + v_v^2 + v_w^2))^{0.5} \quad (4)$$

線間電流振幅値 I_t は下式で求めている。 I_{rms} は相電流実効値である。

$$I_t = (2/3)^{0.5} \times I_{rms} = 0.8164966 \times I_{rms} \quad (5)$$

図 11 の 3 相線間電圧振幅値 V_t は、1250rpm から 5000rpm の定出力の範囲で 185V から 217V の値であり、過電圧は発生していない。従って、インバータの直流電源電圧をほぼ一定値に保ちモータ駆動が可能であり、直流電源電圧マージン減少が可能となる。また、直流電源電圧の変動に応じてモータ出力を抑制して制御する手法も視野に入ってくる。

図 12 は、相電流 30Arms、電流位相 10° 、界磁電流 18A、回転数 1250rpm で運転時の各線

間電流 $i_{u-v}, i_{v-w}, i_{w-u}$, 各線間電圧 $v_{u-v}, v_{v-w}, v_{w-u}$, 線間電圧振幅値 V_t , トルク T , 力率 $\cos\theta$ である。図 10, 図 11 の各動作点の値は、図 12 の動作条件の特性から(3), (4), (5)式の電気角 360° の間の平均値で求めている。

図 10, 図 11 の特性から、図 4 のモータモデルの特性は本研究の目標値をほぼ達成していると言える。即ち、低速回転での大トルクを 90%以上の高力率で実現、最大回転数までの定出力特性を実現、最大回転数の近傍においても 90%以上の高力率で、かつ、過電圧を発生しないことを実現している。この結果、モータの最大損失の低減によるモータの小型化、モータ電流と電圧の低減によるインバータ電流容量の低減が期待できる。

なお、図 12 に示すように、各値の脈動成分が大きく、モータモデルの改良、測定条件の選択など、適正化の余地が多く残っている。

モータ特性改善のまとめと課題

以上説明したように、本研究モータでは次の新技術・特性を提案した。

- ・ロータ界磁電流を非接触で供給・制御する技術し、固定子三相電流成分を、ロータ界磁電流制御の影響を受けることなく、非干渉な制御を実現
- ・低速回転数での大トルクを高力率で実現するために、独特のロータ構成を提案し、ロータ界磁電流と d 軸電流と永久磁石とをフルに利用
- ・高速回転域までの弱め界磁を高力率で実現するために、ロータ界磁電流と d 軸電流と永久磁石との起磁力バランスを界磁磁束制御により適正化

この結果、次の効果が期待できる。

- ・モータの力率が 60%から 90%へ改善し、電流が 33.3%、銅損が 55.55%低減し、小形化、低コスト化
- ・モータ特性改善に伴い、インバータ電流 33.3%低減、インバータ発熱も 33.3%低減し、インバータの小型化、低コスト化
- ・「高速回転域での過電圧低減」により、一般のハイブリッド自動車において高速回転化のための昇圧回路を排除可能

課題として、次のものがある。

- ・モータ形状、パラメータの適正化技術の向上、特に試作では、界磁巻線抵抗値が増大し、ステータ側励磁負担が増加し、下記の低抵抗化設計が必要
- ・設計的に界磁巻線スペース確保した、巻線占積率の向上
- ・極数、ロータ径、巻回数、エアギャップ長などを適正化
- ・出力 10kW 程度では、界磁巻線スペースのため、モータ直径が 200mm 以上が必要

(3) 矩形波電圧・矩形波電流で駆動する技術 モータおよびインバータの利用効率

モータ、およびインバータの高効率利用について検討した。例えば図 13 の様に、振幅 V_0 の正弦波交流電圧、振幅 I_0 の正弦波交流電流で、力率 100% 単相モータ M_{\sin} は、出力 W_0 が $0.5 \cdot V_0 \cdot I_0$ となる。巻線抵抗 R とすると銅損は $0.5 \cdot I_0^2 \cdot R$ であり、鉄損などその他の損失は 0 と仮定する。正弦波交流理論において、一般的に前記例のモータは理想的であると思われることが多い。

しかし、図 14 のように、振幅 V_0 の矩形波交流電圧、振幅 I_0 の矩形波交流電流の単相モータ M_{rectan} は、出力 W_0 が $1.0 \cdot V_0 \cdot I_0$ となる。巻線抵抗 R とすると銅損は $1.0 \cdot I_0^2 \cdot R$ であり、鉄損などその他の損失は 0 と仮定する。単相モータ M_{rectan} は M_{\sin} に比較し、出力が 2 倍、銅損が 2 倍である。なお、 M_{\sin} の出力を 2 倍にするために電流振幅を $2.0 \cdot I_0$ とすることを想定するとその銅損は 4 倍の $2.0 \cdot I_0^2 \cdot R$ となることと考えると、単相モータ M_{rectan} の銅損は M_{\sin} の銅損に比較して $1/2$ であるとも言える。この時、単純論理では、インバータの電圧、電流は同じ値のもので両モータを駆動できる。

このように、正弦波駆動よりも効果的に駆動することが可能であり、矩形波駆動を利用率 100% と定義すると、正弦波駆動は利用率 50% であるといえる。現実的に矩形波化は困難な面もあるが、矩形波と正弦波の中間の台形波化は現実的である。本研究では、台形波化により利用率 75% に目標を設定した。

台形波電圧、台形波電流のモータの研究

単純論理的には、(3) 項で示したモータのロータ磁極形状を工夫し、相電圧が台形波形状となるモータを開発し、台形波電流を通電すれば良いことになる。しかし、本研究では期間的・予算的な都合、駆動装置の都合により中断し、次の機会の研究テーマとする。

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 0 件)

[学会発表](計 4 件)

1. 梨木政行、道木慎二、「ロータ界磁巻線への非接触給電機能を持つモータの提案と原理検証」、2015 年電気学会全国大会、2015 年 3 月 24 日、東京都市大学 世田谷キャンパス、東京都世田谷区玉堤 1-2 8-1
2. 梨木政行、道木慎二、「ロータ界磁巻線への非接触給電機能を持つ界磁巻線形同期モータの検討」、2015 年産業応用部門大会、2015 年 9 月 2 日、大分大学 旦野原キャンパス、大分県大分市大字旦野原 700 番地
3. 梨木政行、道木慎二、「ロータ界磁巻線への非接触給電機能を持つ界磁巻線形同期モータの特性検討」、2016 年電気学会全国

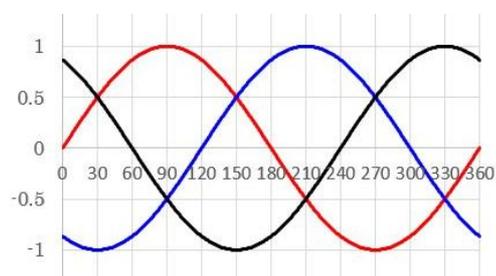


図 13 三相正弦波交流
Fig.13 3 phase sinusoidal wave form



図 14 矩形波
Fig.14 Rectangular wave form

大会、2016 年 3 月 16 日、東北大学 川内北キャンパス、宮城県仙台市青葉区片平 2 丁目 1-1

4. 梨木政行、道木慎二、「ロータ界磁巻線への非接触給電機能を持つ界磁巻線形同期モータの特性」、2016 年産業応用部門大会、2016 年 8 月 30 日、群馬大学 荒牧キャンパス、群馬県前橋市荒牧町 4 丁目 2

[図書](計 0 件)

[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

<http://doki-n.nuee.nagoya-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

道木慎二 (Shinji DOKI)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号：10273260

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし

(4) 研究協力者

梨木政行 (Masayuki NASHIKI)
名古屋大学・大学院工学研究科・非常勤研究員