

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 9 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06313

研究課題名(和文) 飛躍的な省エネと自在制御・フェルセーフ機能を有するパワーエレモータ

研究課題名(英文) Power Electronics Motor Capable of Significant Energy Saving with Universal Control and Fail Safe

研究代表者

堺 和人 (Sakai, Kazuto)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：40377099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は電気自動車等の広い速度範囲で運転するモータの省エネルギー化を行う新システムを提案する。低速度の運転域では極数の多いモータ、高速度域では極数の少ないモータの効率が良い。そこで、複数の独立した3相インバータと複数の3相巻線グループが電氣的に一体化して個別に制御できるモータシステムを考案し、インバータの電流位相を変化させることで極数と相数を変換できることが得られた。低速域の8極モードは4極モードの1.7倍の高トルクを発生し、高速域の4極モードは8極モードよりも高効率の96%で駆動できた。さらに3相と9相の相数変換によるトルク脈動の低減やコイルや電力用半導体が故障しても運転の持続を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界的な環境問題とエネルギー問題が将来に亘って最重要である。本研究は電気自動車、鉄道、家電製品の駆動装置である可変速モータ駆動システムの省エネルギーと多機能化を図ることができる。さらに本研究を参考にすることで前記の各応用システムの技術開発に貢献できる。学術面では、本研究はモータとパワーエレクトロニクスを融合する考え方を提案し、それが新機能を生み出すことを具体的に示しており、今後の電気エネルギー変換分野の発展と拡大に貢献できる。特にモータ内部の電気特性を運転状況に応じて適したものに交換できることはこの分野に関する技術の新しい進歩につながる。

研究成果の概要(英文)：A motor operating with high efficiency at variable speed contributes to the energy saving of drive systems. We propose a motor system using pole changing to ensure efficiency over a wide speed range. The motor capable of controlling current has multi three-phase winding connected to multi-phase inverters. Poles and phases can be changed using a motor-controlled coil current in combination with multiple units of three-phase inverters, which control the current of each coil. The torque in case of eight pole mode is 1.7 times larger than that of four-pole mode. The efficiency in case of four-pole mode is higher than that of eight pole-mode and reached 96%. Furthermore, changing from three phase to nine phase allows torque ripple to decrease. Also, if the power device or winding breaks down, the motor is able to operate by using the other three-phase inverters and groups of winding.

研究分野：電気機器及びパワーエレクトロニクス

キーワード：モータ 発電機 インバータ 省エネルギー 高効率 可変速 フォールトトレランス 電気自動車

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究では、エネルギー問題、環境問題の解決になる可変速度のモータと発電機の省エネルギー、及び電気自動車や風力発電等の次世代可変速度電機システムに関する研究である。2015年米国エネルギー省 DOE は 30%以上の省エネルギーを目標に大学と企業が次世代モータの研究プロジェクトを開始した。一方、産業用モータにも高効率規制が導入されて、高効率の永久磁石モータやリラクタンスモータとその制御の研究が行われている。しかし、これらの研究は現状技術の延長線上であるため効率と性能の飛躍的向上は困難である。また、高効率は定格出力点のみを評価しており、定格点以外の運転範囲では効率が大幅に低下する。装置に組み込まれたモータは定格出力と定格回転数の一点ではなく広範囲で運転されるため、総消費電力量の省エネルギーが重要となる。他の背景では、自動運転の電気自動車、人工心臓や心肺装置など医療装置、離島の風力発電、病院や情報システムの非常用発電装置は、運転中のモータ駆動システムの故障が大きな問題になり、故障時でも応急的に運転を維持できることが要求されている。

2. 研究の目的

本研究は、飛躍的な省エネルギー、高出力、従来に無い高機能を有する理想の可変速度モータ・発電システムを得ることを目的とする。高効率の運転範囲、最大出力と最高速度範囲の限界は機器の特性定数で決定される。そこで、本研究では機器の特性定数を可変できる従来では不可能なモータを得る。電気機器、磁性材料、制御、パワーエレクトロニクスの技術を融合した考えから発想したモータ・発電システムを創出し、革新的技術を生み出すものであり、目的を下記に示す。

- (1) 広い運転範囲で損失を 50%まで低減できる電氣的特性定数を可変するモータを創出する。
- (2) フェルセーフだけでなく故障しても動作できるフォールトトレランス機能や出力脈動低減の機能も自ら有したモータを創出する。
- (3) 前記モータでコイル電流を個別に直接的制御する電力変換回路と制御を創出する。

3. 研究の方法

複数の独立した 3 相インバータとモータ内部で複数にグループ化された 3 相巻線で構成したモータ駆動システムを考案し、電磁界解析を駆使してコンピュータ上でモータシステムを物理モデルとして模擬して電流制御を行う。これにより、モータシステムの実現性を検証し、実際の駆動した状態と等価な特性を得る。また、駆動制御とその制御特性の検討においては、試作機の実測から求めた機器定数を用いてシミュレーション上のモータモデルを作り、複数の 3 相インバータからなるパワーエレクトロニクス回路とそれらを制御する制御回路で駆動システムを構成して駆動制御の特性検証を行う。

4. 研究成果

(1) マルチインバータの個別制御モータ駆動システム

多極数のモータは低速回転では高トルクを発生することができ、少極数のモータは高速回転では高出力で高効率となる。したがって、図 1 に示す電気自動車等の可変速度運転では低速回転域では多極数のモード、高速回転域では少極数のモードで駆動できれば高出力で高効率を実現できる。そこで、本考案のモータ駆動システムは複数の独立した 3 相インバータと同数の 3 相巻線グループを持つモータで構成され、各 3 相インバータによって 3 相巻線グループ毎に個別に直接的に電流を制御する。この新規システムによって、グループ毎に電流位相をシフトすれば、駆動中に極数を変換でき、低速から高速までの全領域で高効率にできるため飛躍的な省エネルギーが予想される。

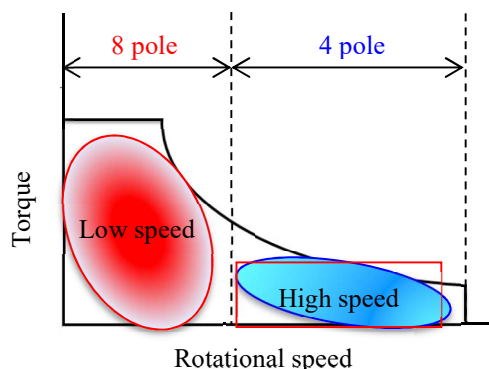


図 1 可変速度駆動システムにおける極数変換による高効率化

本研究では 2 個、または 3 個の 3 相インバータの個別制御モータシステムについて検討した。ここでは、図 2 に示す 3 個の 3 相インバータと 3 グループの 3 相巻線で構成されたシステムについて述べる。各インバータ出力電流位相と各巻線組合せは表 1 に示す電流位相になるように各 3 相電流を制御することで、8 極と 4 極に極数を変換する。さらに、各 3 相インバータの電流の大きさを異なった大きさに変化させることで振動の低減の効果も期待できる。表 2 はモータモデルの諸元である。極数変換の実現性を物理的に検証するために磁界解析を行い、極数変換における電磁氣的挙動も確認した。図 3 は表 2 に基づいて電流制御した時の磁束と磁束密度分布を示しており、8 極と 4 極の磁束分布が形成されていることが確認された。

つぎに負荷特性について述べる。低速回転領域の同期速度 3000rpm、高速回転領域の同期速度 6000rpm のトルクとすべり特性をそれぞれ図 4(a) と (b) に、各すべり点における特性値を表 3~6 に示す。8 極モードは低速と高速とも 4 極モードよりもいずれも 1.7 倍の高トルクが得られている。一方、効率では、4 極モードの効率は 8 極モードよりも低速で 2~4%高い値の 94%、高速では 1%高い値の 96%であった。このことから、高トルクが要求される低速回転域では 8 極モード、トルクよりも高効率が求められる高速回転域では 4 極モードで駆動すれば、高出力と高効

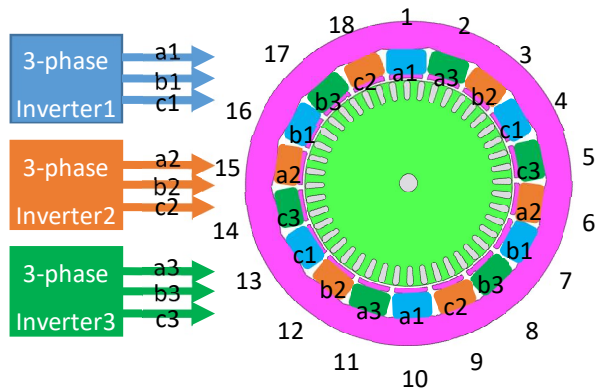


図2 3個の3相インバータの出力端とそれらに直結されたモータコイルの配置

率を両立できる可変速駆動システムが得られた。さらに、軽負荷における駆動は低速から高速まで4極モードにすると高効率が得られる。

つぎに極数変換の切り替え時の過渡特性について述べる。8極から4極モードに切り替えたときのトルク、2次電流を図5、6にそれぞれ示す。極数切り替えた瞬間に2次電流が大きく変動するが0.1秒後にはと2次電流とトルクは定常値になる。このことから負荷状態で駆動中でも極数変換できることが確認された。

図5の8極のトルク波形は脈動が大きく、4極に切り替えるとトルク脈動がわずかになることがわかる。これより、トルク脈動が問題になる運転範囲や振動・騒音が大きくなる運転周波数では極数変換をすることで問題を改善できる。相数に関しては多相化にする位相差のある相電流が多くなるので、位相差により各高調波によるトルク脈動が低減される。本検討モデル機においても3相よりも9相のトルク脈動が小であることが確認された。フォールトトレランスに関しては、複数の3相インバータとモータ内の複数の3相巻線は互いに独立した構成となっているので、一つのインバータや一つの3相巻線が故障しても、独立した残りの複数インバータと巻線に通電できるのでモータとして駆動を継続できる。

つぎに駆動制御について述べる。図7は本モータシステムを駆動するための3個のインバータ回路を示す。速度制御を行った状態で極数変換を行ったときの速度制御特性を図8に示す。8極から4極に変換した瞬間に過渡的に速度が低下する変動が生じ、その後指定速度まで復帰して一定速度で制御できていることがわかる。これは極数を変換した時にモータの電気的な機器定数が変化することが要因であり、機器定数変化により2次電流も過渡的に変動するためと

表1 極数変換のための電流位相

		Pole chnaging	
Phase		9	9
Pole		8	4
Current phase in inverter 1 (degree)	a1	0	0
	b1	120	240
	c1	240	120
Current phase in inverter 2 (degree)	a2	40	200
	b2	160	80
	c2	280	320
Current phase in inverter 3 (degree)	a3	80	40
	b3	200	280
	c3	320	160

表2 モータ諸元

Items	Motor controlled by three inverter
Phase	9
Number of pole in pole changing	8/4
Number of slot	18
Stator outer diameter (mm)	123
Rotor outer diameter (mm)	78.3
Number of rotor bar	44
Air gap length (mm)	0.3
Core length (mm)	47.5
Number of turn per coil	49
Rated current per winding (A)	6.26
Rated current density (A/mm ²)	5.00
Frequency (Hz)	200/100

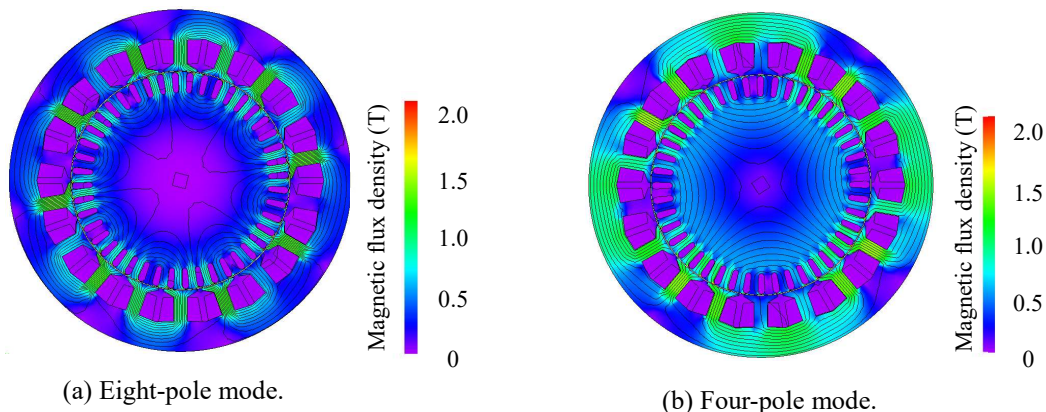
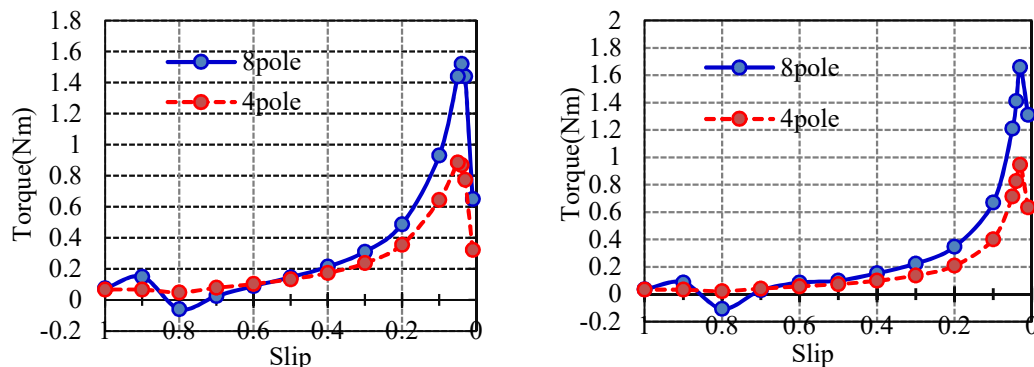


図3 極数変換前後の磁束と磁束密度分布 (すべり 0.05, 同期速度 3,000rpm)

考えられる。

本モータモデルではコイルは集中巻であるが、分布巻のモータについても検討した。検討システムは3つのインバータと36個のコイルからなる3グループの3相分布巻のモータからなる。図9に極数変換するために各インバータ出力電流の位相を変化させたときの磁束分布を示す。



(a) Synchronous speed of 3,000 rpm.

(b) Synchronous speed of 6,000 rpm.

図4 8極と4極モードにおけるすべりに対するトルク特性

表3 8極モードのモータ特性
(定格電流, 同期速度 3,000 rpm)

Slip	Torque (Nm)	Output (W)	Iron loss (W)	Copper loss (W)	Efficiency (%)
0.01	0.65	202.47	36.90	6.81	82.2
0.03	1.44	438.82	31.80	18.90	89.6
0.04	1.52	458.42	27.35	23.80	90.0
0.05	1.44	429.77	22.80	26.80	89.7
0.1	0.93	262.95	9.57	32.10	86.3
0.2	0.49	122.65	3.68	33.80	76.6

表4 4極モードのモータ特性
(定格電流, 同期速度 3,000 rpm)

Slip	Torque (Nm)	Output (W)	Iron loss (W)	Copper loss (W)	Efficiency (%)
0.01	0.322	100.15	17.70	1.23	84.1
0.03	0.773	235.56	13.40	5.08	92.7
0.04	0.869	262.08	11.44	6.66	93.5
0.05	0.885	264.13	9.60	7.66	93.9
0.1	0.643	181.80	4.94	9.42	92.7
0.2	0.356	89.47	3.45	9.95	87.0

表5 8極モードのモータ特性
(定格電流, 同期速度 6,000 rpm)

Slip	Torque (Nm)	Output (W)	Iron loss (W)	Copper loss (W)	Efficiency (%)
0.01	1.31	814.87	68.4	5.65	91.7
0.03	1.66	1011.72	35.2	20.8	94.8
0.04	1.41	850.49	23.7	23.7	94.7
0.05	1.21	722.25	17.3	25.4	94.4
0.1	0.67	378.88	6.46	28.7	91.5
0.2	0.35	174.42	3.15	31.6	83.4

表6 4極モードのモータ特性
(定格電流, 同期速度 6,000 rpm)

Slip	Torque (Nm)	Output (W)	Iron loss (W)	Copper loss (W)	Efficiency (%)
0.01	0.634	394.37	44	1.74	89.61
0.03	0.946	576.56	19.4	6.24	95.74
0.04	0.827	498.83	14.2	7.18	95.89
0.05	0.714	426.19	11.7	7.69	95.65
0.1	0.402	227.33	7.54	8.7	93.33
0.2	0.208	104.55	5.68	9.44	87.37

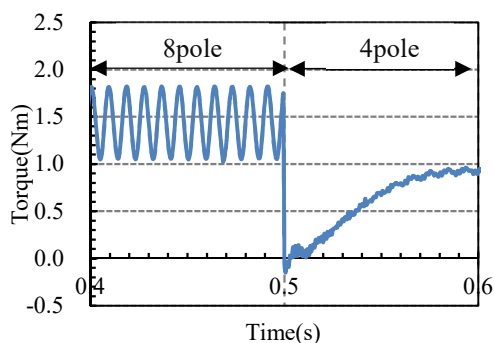


図5 極数変換前後のトルクの過渡特性

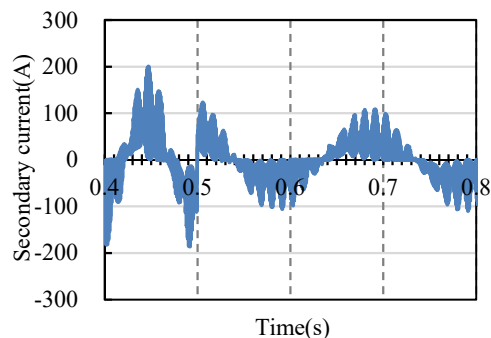


図6 極数変換前後の2次電流の過渡特性

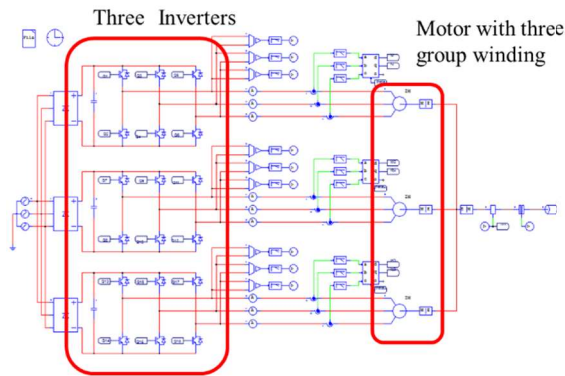


図7 複数インバータのモータシステムの駆動回路

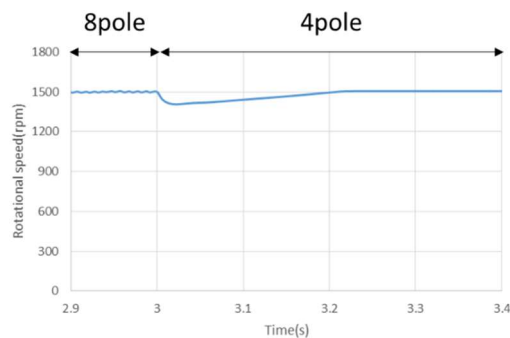
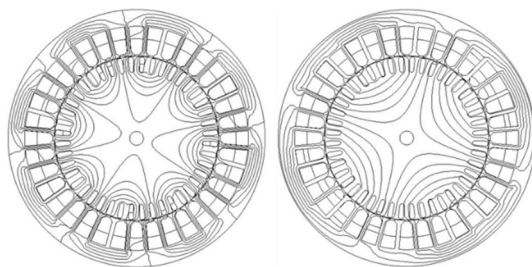


図8 3個の3相インバータにおける極数変換時のPID速度制御特性



(a) 9Phase-8pole (b) 9pase-4pole

図9 分布巻モータの極数変換前後の磁束分布 (すべり 0.1, 同期速度 3,000rpm)

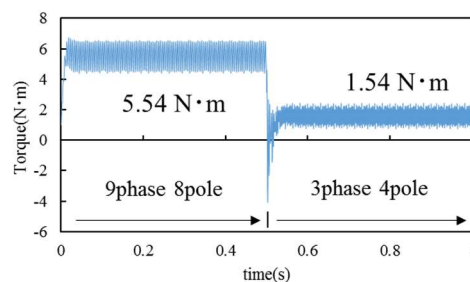


図10 分布巻モータの極数変換前後のトルクの過渡特性 (すべり 0.1, 同期速度 3,000rpm)

磁束はそれぞれ8極と4極に分布していることが確認された。図10に極数変換前後のトルク特性波形を示す。8極と4極モードのトルクはそれぞれ5.54 Nm, 1.54 Nmであり、集中巻に対して3.6倍の高トルクである。一方で効率は集中巻よりも低下して84.6%である。トルクの大幅アップにもかかわらず効率の低下の要因は、分布巻はコイルエンドが集中巻きよりもかなり長くなるため巻線抵抗が増加して銅損が増え、効率が低下したためである。また、分布巻では巻線ピッチが8極、または4極の極ピッチに近い方の特性が高くなることもわかった。鉄損は8極から4極モードに変換することで42%低減できた。

得られた成果は、世界における電気自動車や省エネルギーの駆動システムにおいて、可変速の全範囲での高効率化の有力技術として提案でき、今後の技術の進歩に参考になると思われる。

(2) 可変磁力モータ

可変速運転における省エネルギー化のもう一つの有力方法の可変磁力についても検討した。可変磁力の新技术は高出力で高効率のレアアース永久磁石モータの可変速運転における省エネルギー化が期待できる。永久磁石モータは永久磁石の一定値の磁力によって高速回転時に生じる過電圧を抑制するため、等価的に磁束を減少させる電流を余分に流し続けるのでモータもインバータも効率が悪化する。そこで、可変磁力の永久磁石モータは低保磁力と高保磁力の永久磁石を用いて瞬間的な磁化電流を流すだけで磁力を可変できる。これらの低保磁力と高保磁力の磁石構成を検討し、減磁と増磁に必要な磁化電流は定格電流の1.5、2.5倍まで抑えて駆動中に磁力を可変できた。得られた成果は、電気自動車の省エネルギー化で注目されて研究開発が盛んな可変磁束モータにおける有力技術になり、今後の技術の進歩に参考になると思われる。

(3) 磁界共振モータ

ワイヤレス電力伝送の原理である電磁界共振結合と誘導機の技術を融合し、磁界共振結合によりモータのインピーダンスを大きく可変することで、無鉄心でも出力が得られるモータを検討した。モータの等価回路と特性式を提案し、特性解析により妥当性が検証された。さらに等価回路を用いて可変速特性が得られた。鉄心がないため重量は32%に軽量化されるので、電気自動車等のモータを搭載して移動するシステムの運転時の消費エネルギーを大幅に低減できる。得られた成果は新概念のモータの提案になり、世界に先行した研究となる。

今後の展望として、以下を計画している。(1)のマルチ3相インバータの個別制御モータの極数変換では、多極と少極の出力特性がかなり偏っている。今後は、集中巻と分布巻において多極と少極の両方でトルクと効率がさらに向上するモータ構成や制御を研究する。(1)の個別制御と極数変換の新機能を(2)の可変磁力の永久磁石モータへ展開してさらに省エネルギー化を図る。(3)の磁界共振モータも同様に(1)の複数インバータと複数巻線グループ構成にすることで個別に制御し、高出力と可変速運転を可能にするシステムを創出する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takishima Kenta, Sakai Kazuto	4. 巻 8
2. 論文標題 Starting Characteristics of Axial and Radial Type Ultra-Lightweight Motors Based on Magnetic Resonance Coupling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 471 ~ 479
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1541/ieejjia.8.471	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakai Kazuto, Takishima Kenta	4. 巻 2019
2. 論文標題 Frequency and operational characteristics of an ultra-lightweight machine converting energy by magnetic resonance coupling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Engineering	6. 最初と最後の頁 4571 ~ 4575
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/joe.2018.8185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 矢野秀征, 堺和人
2. 発表標題 マルチインバータ駆動モータの極数変換時の制御特性
3. 学会等名 平成30年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 矢野秀征, 堺和人
2. 発表標題 マルチインバータ駆動モータの極数変換時の過度速度特性
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuto Sakai and Kenta Takishima
2. 発表標題 Frequency and Operational Characteristics of an Ultra-lightweight Machine Converting Energy by Magnetic Resonance Coupling
3. 学会等名 IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenta Takishima and Kazuto Sakai
2. 発表標題 Starting Characteristics of an Ultra-Lightweight Motor Using Magnetic Resonance Coupling
3. 学会等名 The 2018 International Power Electronics Conference - ECCE Asia 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuto Sakai, Takanobu Akiyama, and Kenta Takishima
2. 発表標題 A Basic Characteristics of an Ultra-lightweight Magnetic Resonance Coupling Machine with a Cage Rotor
3. 学会等名 24th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenta Takishima and Kazuto Sakai
2. 発表標題 Analytical and Experimental Investigation of the Frequency Characteristics of an Ultra-Lightweight Motor Based on Magnetic Resonance Coupling
3. 学会等名 23rd International Conference on Electrical Machines (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenta Takishima and Kazuto Sakai
2. 発表標題 Equivalent Circuit Analysis of an Ultra-Lightweight Motor Designed with Magnetic Resonance Coupling
3. 学会等名 20th European Conference on Power Electronics and Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuto Sakai and Kenta Takishima
2. 発表標題 Basic Characteristics of an Ultra-lightweight Magnetic Resonance Coupling Motor with Various Numbers of Poles
3. 学会等名 The 17th Annual IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 矢野秀征, 堺和人
2. 発表標題 マルチインバータモータの極数変換の制御特性
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井涼太郎, 堺和人
2. 発表標題 モータと発電の同時動作永久磁石同期モータ
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuto Sakai and Masakazu Okayasu
2. 発表標題 Integrated Motor Controlled by Multi-Inverter with Pole-Changing Functionality and Fault Tolerance
3. 学会等名 EPE2017-ECCE Europe (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hideyuki Yano and Kazuto Sakai
2. 発表標題 Integrated Motor-Controlled Independently by Multi-Inverters with Pole and Phase Changes
3. 学会等名 EPE2019-ECCE Europe (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuto Sakai and Takishima Kenta
2. 発表標題 Basic Design of an Ultra-lightweight Machine Based on Magnetic Resonance Coupling and Influence of AC Losses due to High Frequency
3. 学会等名 IEEE ECCE 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢野秀征, 堺和人
2. 発表標題 マルチインバータ駆動モータの極数変換による可変速特性の向上
3. 学会等名 2020年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 矢野秀征, 堺和人
2. 発表標題 マルチインバータ駆動モータの極数・相数変換特性
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----