

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02127

研究課題名（和文）モータドライブの実省エネと高信頼により多様化に優れたダイバーシティインバータ開発

研究課題名（英文）Development of Diversity Inverter for Actual Energy Savings and High Reliability in Motor Drives

研究代表者

芳賀 仁（Haga, Hitoshi）

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：10469570

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、商用電源をもつ可変速モータドライブのグローバルな普及を目指して、モータを設置する電源環境、負荷変動に制約がなく小型軽量省エネで多様性に優れたダイバーシティインバータを開発した。三相電源をもつモータシステムでは実験により従来手法と比較して系統擾乱時に発生するトルクの300Hz成分を最大91.0%低減できた。単相電源を持つモータシステムでは負荷の周期的変動による次数間高調波の抑制法を提案した。提案法により2次高調波電流を0.88Aから0.29Aへ67%低減できた。高効率化と広範囲駆動を実現する制御法として最大トルクを向上でき、そして変換効率は20pt以上向上できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでに電源変動や負荷変動を考慮した電力変換器を含むモータ制御に関する研究事例は少ないことから、本研究で開発した制御法および研究成果が産業応用（家電機器、産業機械）を中心に適用されることが期待される。これらは環境負荷低減、省エネルギー機器の普及にも貢献できることから社会的意義がある。次に、本研究ではモータに接続する負荷脈動が交流電源システムに与える影響を解析して高調波電流を理論的に明らかにしている。さらに電源歪がモータの実運転特性に与える影響も理論的に明らかにしている。これらはモータ制御分野における学術の普及においても意義がある。

研究成果の概要（英文）：This research developed a compact, lightweight, energy-saving, and flexible diversity inverter with no restrictions on the power supply environment in which the motor is installed or on load fluctuations, aiming at the global spread of variable-speed motor drives with commercial power supplies. In a motor system with a three-phase power supply, experiments have shown that the 300 Hz component of torque generated during grid disturbances can be reduced by up to 91.0% compared to conventional methods. For a motor system with a single-phase power supply, we proposed a method to suppress inter-order harmonics due to periodic load variations. The proposed method reduced the second-order harmonic current by 67%, from 0.88 A to 0.29 A. As a control method to achieve high efficiency and wide range drive, the maximum torque was increased, and the conversion efficiency was improved by more than 20 ppt.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーエレクトロニクス モータ制御 デュアルインバータ

1. 研究開始当初の背景

近年、モータドライブは定格出力時の省エネよりも実際の運転状態を考慮した「実省エネ」が求められている。エアコンや電気自動車では低速から高速まで幅広い領域での省エネ性が求められる。例えばモータを高効率に駆動するためにパワーデバイスを多数用いて波形を補償するなどの手法が研究されている。

一方、電源環境においては、再生可能エネルギーの普及により例えば独立電源システムなど脆弱な電源環境下でのモータ駆動の信頼性と安定性が課題である。モータが急激に負荷変動するとき安定した電力を負荷へ供給するために大容量のリアクトルと電解コンデンサで補償回路を構成する必要がある。さらに、蓄電システムや発電機を用いて電力システムを増強する必要がある。脆弱な電源環境下の現在のモータドライブは、カタログ値で示されているほどのモータ性能は得られず、実情は省エネルギー性と信頼性を両立するために多数の補償回路、追加素子が必要である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、様々な電圧歪みや電源インピーダンスをもつ劣悪な電源環境においても低速から高速までモータを広範囲に実省エネでき、急激な負荷変動や再生動作に対しても電源システムに不安定化の影響を与えないモータドライブを小型軽量で実現することである。本課題では、このような電源環境、負荷状態の多様性に対応できるモータドライブを「ダイバーシティインバータ」と位置付けて技術開発する。

3. 研究の方法

本研究では、三相商用電源と単相商用電源を想定したモータドライブシステムの電源歪みそして負荷変動に対応できるシステム構成ならびに制御法を開発する。本研究では小型軽量のモータドライブの電力変換器として電解コンデンサレスデュアルインバータを提案して制御法を開発する。具体的には三相交流電源システムの系統擾乱時におけるモータドライブの高性能化研究として、図1に示す電解コンデンサレスデュアルインバータのモータ速度範囲を拡大する制御法を開発する。次に、図2に示す単相商用電源をもつモータシステムの負荷変動に着目した制御技術の開発として、単相電解コンデンサレスデュアルインバータを用いたロータリ圧縮機駆動時における次数間高調波電流の低減を目的としたパワーデカップリング制御法を研究する。さらに、電解コンデンサレス電力変換器を用いたモータドライブシステムのシステム効率およびモータ運転範囲拡大を目的に、電解コンデンサレスデュアルインバータの電力補償制御法を提案してその有効性を実験により明らかにする。

本研究で実施する提案制御法の有効性は、系統擾乱を模擬した環境電源を使用し、従来のモータ速度範囲拡大手法との比較により、系統擾乱時にモータ電流およびトルクに重畳する高調波成分の低減効果を実機検証によって明らかにする。同様に、ロータリ圧縮機による負荷変動もプログラムブル電源によりエミュレートして従来制御法との比較検証を行う。

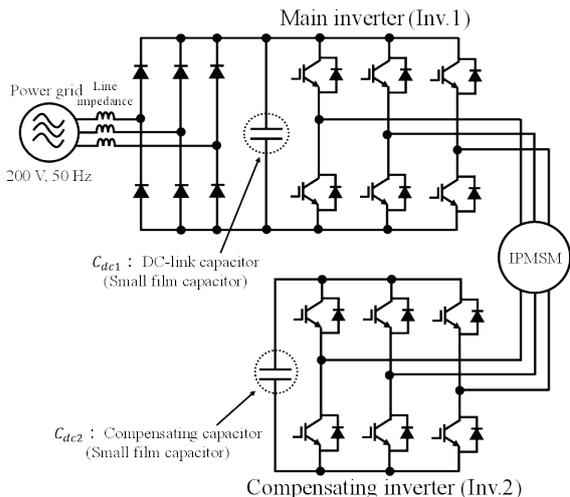


図 1

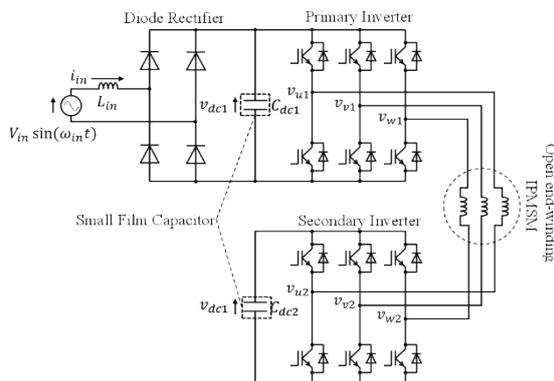


図 2

4. 研究成果

(1) 三相交流電源システムの系統擾乱時におけるモータドライブの高性能化

一般に、商用電源を用いるモータドライブシステムには大容量電解コンデンサが使用されている。大容量電解コンデンサはインバータの直流電圧を平滑化するためのエネルギーバッファとして使用され、電力系統擾乱や IPMSM 側で発生した負荷変動などの問題が、相互に悪影響を与

えることなく、IPMSMを容易に制御する役割がある。しかし、電力変換器を構成する故障部品の内訳として、コンデンサは電力変換器を構成する部品のなかで最も故障率が高い。特に、電解コンデンサは、熱による寿命の低下が著しく、モータドライブシステムの信頼性やメンテナンス性の低下、短寿命化などを引き起こす。そこで、本研究では、モータドライブシステムの信頼性を向上させるために、寿命部品である電解コンデンサをレス化し、フィルムコンデンサに置き換えた電解コンデンサレスデュアルインバータを提案して技術開発する。フィルムコンデンサは、電解コンデンサと比較して故障率が低いためモータドライブシステムの信頼性向上に有効である。本研究では、電解コンデンサレスデュアルインバータの開発によりモータドライブシステムの信頼性向上のみならずトルクリプル抑制や高効率化にも貢献する。

図1に三相電解コンデンサレスデュアルインバータを用いたモータドライブシステムの構成を示す。本構成は、各インバータの直流部に接続された大容量電解コンデンサを小容量フィルムコンデンサに置き換える。三相電解コンデンサレスデュアルインバータは、電力変換器に大容量のエネルギーバッファを含まないため、電力システムで発生した擾乱がモータ運転特性に直接影響を与える。

電力システムで発生する擾乱には、高調波歪み・不平衡・位相急変・周波数変動・瞬時停電などがある。このような系統擾乱の発生には、分散型電源の大量導入、非線形負荷の増加、長距離送電、EVの夜間充電などが原因として挙げられる。本研究では、系統電圧に高調波成分が重畳した系統擾乱を考慮する。三相電解コンデンサレスデュアルインバータで駆動するモータドライブシステムは、大容量のエネルギーバッファを持たないため、歪んだ系統電圧がダイオード整流器に入力されると、直流リンク電圧は大きな電圧リプルが発生する。一般に、系統電圧に重畳する高調波成分は、5次高調波および7次高調波が支配的である。

歪んだ系統電圧がダイオード整流器に入力された場合、系統電圧に7次高調波が重畳した条件が、他の条件と比較して直流リンク電圧リプルが大きく直流リンク電圧の最低値は最も小さい。7次高調波が25%重畳した系統電圧の場合、直流リンク電圧リプルは系統正常時と比較して335%増加する。そのため、7次高調波重畳が支配的な系統電圧でIPMSMを駆動する条件が、モータ運転特性に最も大きな影響を与える。そして、メインインバータ(Inv. 1)の出力相電圧は、電気角周波数のみに起因した電圧が出力される。メインインバータの出力電圧に重畳された高調波成分は、モータ巻線電圧に印加され、モータ電流に高調波成分が重畳する。さらに、モータ電流に重畳した高調波成分はトルクリプルを引き起こし、系統擾乱時における機械振動の原因となる。

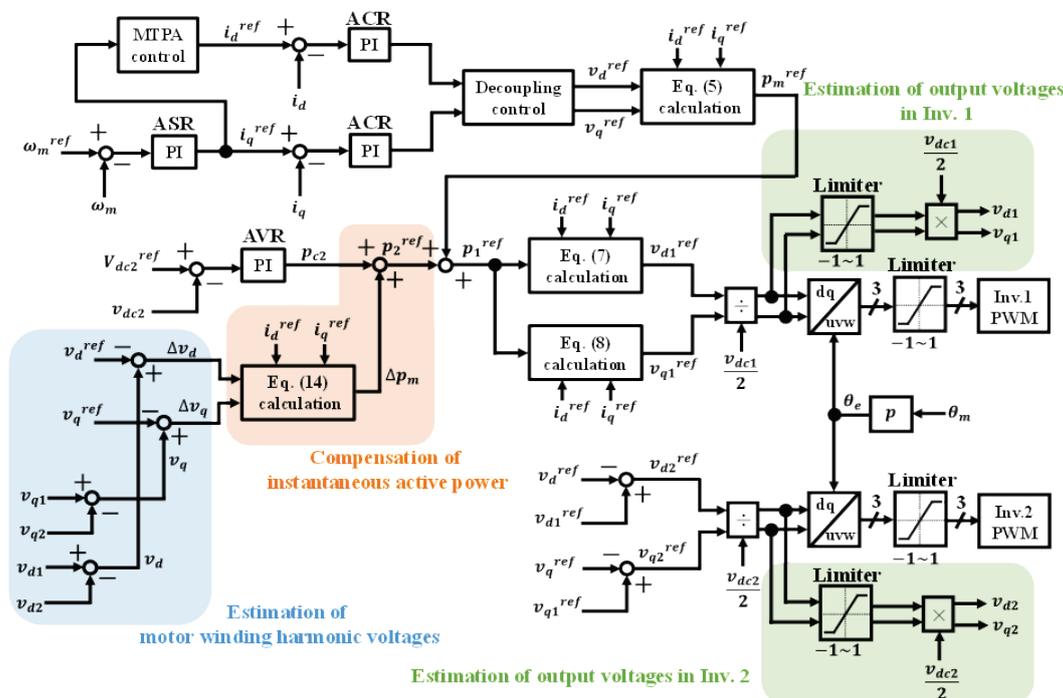


図3

図3は提案する制御ブロック図を示す。提案制御法の基本構成はオープン巻線IPMSMの速度制御系であり、d軸モータ電流指令はMTPA制御に基づき決定する。d-q軸モータ巻線電圧指令は、ACR出力に非干渉制御を行うことにより生成される。各インバータのd-q軸モータ巻線指令は提案制御法のアルゴリズムに従い決定する。系統擾乱時に発生するトルクリプルの原因であるモータ巻線電圧に重畳された高調波成分を低減するためには、Inv. 1の出力電圧に重畳した高調波成分がモータ巻線電圧に印加されることを防ぐ必要がある。Inv. 1の出力電圧に重畳した高調波成分と同等の高調波成分をInv. 2の出力電圧に重畳させ、両者の高調波成分を相殺し、所望

のモータ巻線電圧を印加する。これにより、系統擾乱時に発生するトルクリプルが低減する。さらに系統擾乱時に発生するトルクリプルを低減するためには、d-q 軸モータ電流を一定にすることが要求される。Inv. 2 の d-q 軸電圧は、Inv. 1 の d-q 軸電圧リプルを含むため Inv. 2 の瞬時有効電力は大きく脈動する。このとき、Inv. 2 の瞬時有効電力は次の要件を満たす必要がある。① Inv. 2 の瞬時有効電力は直流部にフローティングキャパシタが接続されているため平均 0 W とする。② 補償コンデンサの平均電圧は一定にする。③ Inv. 2 の出力電圧には、系統擾乱時に Inv. 1 の出力電圧に重畳する高調波成分を出力する。①と②は補償コンデンサの電圧 PI 制御器によって実現できる。③を満たすにはモータ巻線電圧に重畳する高調波成分を求める必要がある。本研究ではモータ巻線電圧は各インバータの出力電圧から推定する。提案制御法による Inv. 2 の瞬時有効電力指令値は、補償コンデンサ電圧 PI 制御器出力に系統擾乱時に発生する電力脈動成分を加算することにより生成される。なお、提案制御法は PLL を使用しないため、未知の系統擾乱に対してモータ巻線電圧に重畳する高調波成分の低減に有効である。

図 4 に、7 次高調波が重畳した入力電圧時 (THD 25%) において、負荷条件が 4650 r/min, 2.0 Nm 時におけるトルク高調波解析結果を示す。入力電圧擾乱によって、モータ電流に重畳した 145Hz と 455Hz 成分は、電気角 1 次周波数と干渉することにより、Inv. 1 の出力電力が 300 Hz で脈動する。速度制御帯域は 31.4 rad/s に設定しているため、Inv. 1 の出力電力脈動はトルクリプルを引き起こす。提案制御法は、モータ速度範囲の拡大が必要な負荷条件において、モータ電流に重畳する高調波成分が低減可能であり、トルクリプルの発生を抑制する。従来法の三相電解コンデンサレスデュアルインバータで駆動するオープン巻線 IPMSM のトルクに含まれる 300 Hz 成分を 1.00 p.u. (= 0.039 Nm) としている。提案法は、入力電圧擾乱時に発生する 300Hz のトルクリプルを従来法と比較して 87.4%低減できた。

図 5 は 7 次高調波が重畳した入力電圧時 (THD 25%) において、負荷トルク 2.0 Nm 時におけるモータ速度特性を示す。従来のモータ速度範囲拡大手法では、モータ速度が 3600 r/min 以上で駆動すると、Inv. 1 の電圧操作量飽和の影響を受け、トルクリプルが顕著となる。一方、提案法では、モータ速度が 3600 r/min 以上で駆動する場合においても、入力電圧擾乱時に発生するトルクリプルが小さい特徴がある。提案法は、従来法と比較して、トルクの 300 Hz 成分を最大で 91.0%低減できた (モータ速度が 4300 r/min)。提案法はデュアルインバータを用いたモータドライブシステムに要求される高速領域においても、入力電圧擾乱時に発生するトルクリプルを低減可能である。また、モータ速度が 3600 r/min 以下の速度条件では、各制御手法におけるトルクの 300 Hz 成分は同等といえる。以上の結果より、提案法はモータ速度範囲の拡大と系統擾乱時に発生するトルクリプル低減を両立できる制御法として有効であることが確認できた。

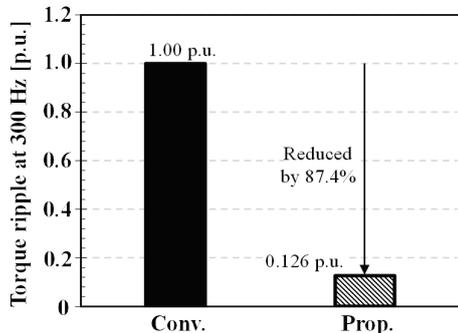


図 4

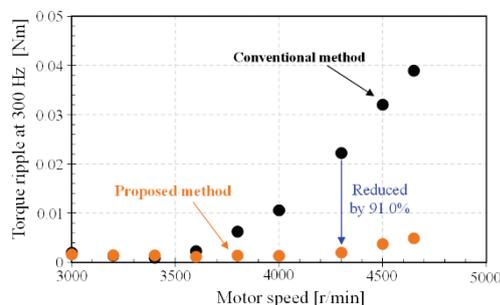


図 5

(2) 単相電解コンデンサレスデュアルインバータを用いたロータリ圧縮機駆動時における次数間高調波電流の低減法

単相商用電源をもつダイバーシティインバータの負荷変動に着目した制御技術の開発として、単相電解コンデンサレスデュアルインバータを用いたロータリ圧縮機駆動時における次数間高調波電流の低減を目的としたパワーデカップリング制御法を提案した。圧縮機特有の周期的トルク脈動により電源系統への影響が課題となり、電解コンデンサレスインバータで圧縮機を駆動する場合、電源電流には電源角周波数と機械角周波数の和と差の周波数成分が重畳する。例として、電源周波数を 50 Hz、機械周波数を 30 Hz とした場合、70 Hz および 20 Hz の周波数成分が電源電流に重畳する。これらの周波数成分が電源力率の低下や全高調波歪み (THD) に関与する。

本研究では、電解コンデンサレスデュアルインバータを提案してさらに、これら電力を非干渉化するための制御法を開発した。

図 6 に提案する負荷電力、1 次側インバータの出力有効電力、2 次側インバータの出力有効電力の関係を示す。負荷変動による電源高調波電流を低減するためには、負荷の変動周波数を 1 次側インバータの出力から分離させ、負荷変動状態に依らず、1 次側インバータの出力を $2\omega_{in}$ のみで脈動させればよい。提案制御法は負荷電力および負荷電流より、1 次側インバータの P 軸電圧指令値をフィードフォワードで算出する。また、電源力率向上のために、d 軸電流を用いて 1 次側インバータ出力の安定化を図る。

提案制御法の有効性を検証するために、オープン巻線 IPMSM および電解コンデンサレスデュ

アルインバータを設計および試作して実機実験を行った。図7と図8に実験結果を示す。従来制御法と比較して、提案制御法は次数間高調波である20 Hzと80 Hzの高調波電流をそれぞれ68%、72%減少し、電源力率を11 pt.改善できた。また、高調波グルーピング測定結果より、提案制御法によって2次高調波電流を0.88 Aから0.29 Aへと67%低減できた。加えて、提案制御法では、負荷変動成分が増大しても、低いTHDを維持し続け、定格負荷条件下で、電源電流THDを26 pt低減できた。以上より、提案制御法の有効性を確認できた。

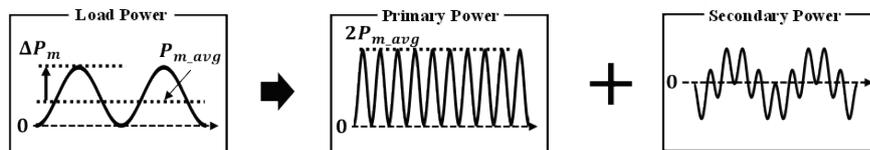


図6

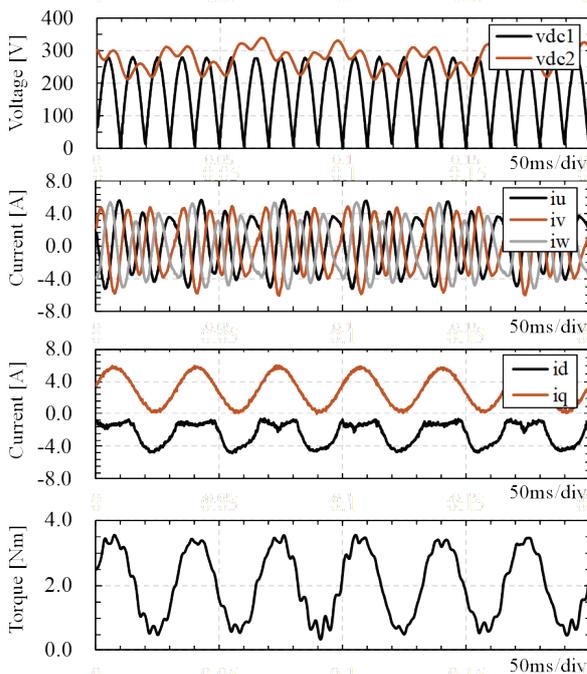


図7

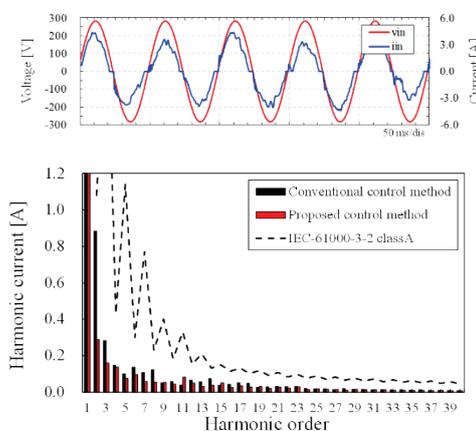


図8

単相商用電源を持つダイバーシティインバータとして、単相電解コンデンサレスデュアルインバータおよびオープン巻線IPMSMを用いたモータドライブシステムのシステム効率およびモータ運転範囲拡大を目的とした新しい電力補償制御法を提案した。提案制御法の特長は、1次側インバータによる電源力率の改善動作、2次側インバータによる有効電力脈動補償および定常的な無効電力補償を実現できる。2次側インバータによる無効電力補償により、1次側インバータの出力電圧ベクトルを抑制し、モータ運転範囲およびシステム効率の改善を図った。提案制御法の有効性を検証するために、オープン巻線IPMSMおよび電解コンデンサレスデュアルインバータを用いた実機実験を行った。実験結果より、従来の電解コンデンサレスインバータと比べて、トルク脈動を98.9%抑制すると同時に電源力率98.6%での駆動を確認した。従来制御法と提案制御法との比較では、回転子速度の上昇に伴い、提案制御法は最大トルク値を増加できた。回転子速度2600 rpmでは、提案制御法は出力できるモータトルクを従来手法による0.50 Nmから1.07 Nmへ2.14倍に増大できている。効率評価では、従来制御法で損失特性が悪化する運転領域において、システム効率を最大で20pt.向上できた。以上より提案制御法の有効性を確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sakurai Taiju, Haga Hitoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Power Decoupling Control of Electrolytic Capacitor-Less Dual-Inverter to Reduce Interharmonic Currents Under Periodic Load Fluctuation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 990 ~ 999
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.22011386	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 -
1. 著者名 Ohno Yuuki, Haga Hitoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Control Method of Electrolytic Capacitor-less Dual Inverter Fed IPMSM for Reducing Torque Ripple under Grid Disturbance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 623 ~ 633
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.21014244	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 -
1. 著者名 Sakurai Taiju, Ohno Yuuki, Haga Hitoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Control Method of Electrolytic Capacitor-Less Dual Inverter-Fed IPMSM under Periodic Load Torque Fluctuations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 833 ~ 844
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.22003993	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 -
1. 著者名 Yuuki Ohno, Hitoshi Haga	4. 巻 58
2. 論文標題 Control Method of Electrolytic Capacitor-less Dual Inverter for Harmonic Compensation Under Distorted Grid Voltage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 375-387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIA.2021.3131429	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yuuki Ohno, Hitoshi Haga
2. 発表標題 Harmonics Compensation for High Reliability Under Grid Voltage Distortion Using Electrolytic Capacitor-Less Dual Inverter with Periodical Torque Fluctuation Load
3. 学会等名 the 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuuki Ohno, Hitoshi Haga
2. 発表標題 Control Method of Electrolytic Capacitor-less Dual Inverter for Harmonic Compensation Under Distorted Grid Voltage
3. 学会等名 2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition - Asia (ECCE-Asia) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻井大樹, 大野友幹, 芳賀仁
2. 発表標題 電解コンデンサレスデュアルインバータ駆動IPMSMの圧縮機動作時における低振動化
3. 学会等名 電気学会モータドライブ/家電・民生合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大野友幹・櫻井大樹・芳賀仁
2. 発表標題 周期変動する負荷トルクを持つ電解コンデンサレスデュアルインバータのコンデンサ電圧可変制御法
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換/家電・民生/自動車合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野友幹・芳賀仁
2. 発表標題 三相電解コンデンサレスデュアルインバータにおける系統擾乱時の高調波補償と無効電力補償
3. 学会等名 電気学会マグネティックス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野友幹・芳賀仁
2. 発表標題 電解コンデンサレスデュアルインバータの電源位相急変時の検討
3. 学会等名 令和 3 年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野友幹・芳賀仁
2. 発表標題 三相電解コンデンサレスデュアルインバータを用いた系統擾乱時の高調波電圧補償による速度範囲拡大
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻井大樹, 大野友幹, 芳賀仁
2. 発表標題 周期的トルク変動による速度リップルを低減する単相電解コンデンサレスデュアルインバータの制御法
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野友幹, 芳賀仁
2. 発表標題 電解コンデンサレスデュアルインバータを用いた系統擾乱時の高調波補償
3. 学会等名 電気学会 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野友幹, 芳賀仁
2. 発表標題 デュアルインバータで駆動するオープンエンド巻線IPMSMの系統擾乱による高調波補償と速度範囲の検討
3. 学会等名 第30回電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野友幹, 芳賀仁
2. 発表標題 系統擾乱時のモータ速度リップルを低減する電解コンデンサレスデュアルインバータを用いた高調波補償法
3. 学会等名 令和2年電気関係学会関西支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野友幹, 芳賀仁
2. 発表標題 電解コンデンサレスデュアルインバータを用いた周期的負荷トルク変動時の速度リップル低減法
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021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
研究 分担 者	伊東 淳一 (Jun-ichi Itoh) (90377218)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------