

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：52601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06328

研究課題名(和文) 零相電圧の積極活用手法による電動機駆動用電力変換器の素子発熱低減技術に関する研究

研究課題名(英文) Reduction Technique for Thermal Concentration on Specific Switching Devices in Power Converter by Using Zero-sequence Voltage

研究代表者

綾野 秀樹 (Ayano, Hideki)

東京工業高等専門学校・電気工学科・教授

研究者番号：50614525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、永久磁石モータを用いる電力変換装置で零速度運転をした場合に発生する素子発熱集中の緩和技術を確立した。3レベルインバータを使用して零相電圧を利用する点が特徴であり、次の成果を得た。(1)モータの磁極位置に応じて零相電圧の極性割合を変えることで最大温度素子の温度上昇量を効果的に低減できる。また、2電源からの電荷供給量をバランスさせる制御でも温度上昇量を約20%低減できる。(2)実機システムを構築し、提案法により温度上昇量を31%低減できることを確認した。零相電圧の切替え周期は熱時定数より十分低く設定すればよい。(3)零相電圧利用の応用としてモータ電磁音の低減法を提案し有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力変換器の高機能化に向けて零相電圧に着眼し、これを積極的に活用することで素子発熱集中の緩和が可能であることを理論的・実験的に実証した点に学術的意義がある。また、現状では使用が限定的である零相電圧に着目した制御手法は独創性があり、電力変換器のさらなる発展に貢献できる。さらに、結果として得られた技術は、制御演算処理のみで発熱が低減でき、冷却器等を小さくできる。これにより、電力変換器の小型化・軽量化・低コスト化がもたらされる。この技術は、更なる省エネルギー化の推進や電気自動車技術の促進による環境負荷軽減技術などの電力変換器技術の発展に寄与できる点で工学的にも意義がある。

研究成果の概要(英文)：I established a technique to alleviate thermal concentration on specific switching devices that drove a permanent magnet synchronous motor (PMSM) under zero-speed and high-torque condition. The proposed technique uses a zero-sequence voltage in a three-level inverter. The following results were obtained. (1)The proposed technique switches the polarity of the zero-sequence voltage according to the magnetic pole position of the PMSM, and the simulation results show that the temperature rise of the power device with the maximum temperature can be effectively reduced. Moreover, the control method that balances the amount of charge supplied from two power sources can reduce the temperature rise by about 20%. (2)I made a small power inverter system. It was confirmed that the proposed method could reduce the temperature rise by 31%. (3)As an application example of the use of zero-sequence voltage, a reduction technique of motor acoustic noise was proposed and its effectiveness was confirmed.

研究分野：工学

キーワード：電力変換装置 零相電圧 永久磁石モータ 発熱集中 零速度 3レベルインバータ 電磁騒音

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 産業製品や家電製品においては、省エネルギー化、小型化の観点から永久磁石モータが幅広く適用されている。しかし、永久磁石モータにおいて零速度・高トルク運転の条件では、電力変換器は直流の大電流をモータに供給する必要があり、電力変換器の構成する半導体素子では特定の素子に発熱が集中する。零速度で高トルク運転を要する例としては、電気自動車における坂道発進、エレベータの駆動開始・終了状態、プレス装置におけるプレス時の駆動などがある。

(2) 零速度時に電流が集中する事象に対して、従来の2レベルインバータでは、回路構成上、制御による回避は困難である。また、半導体素子においては、チップ温度の上昇幅が寿命に大きく影響するため、ファンやヒートシンク等の冷却装置により温度上昇を抑えている。特に、昨今のパワー密度の大きい素子では、より強力な冷却機能が要求されている。

(3) 研究代表者は、3レベルインバータを対象とした永久磁石モータの極低速運転時における素子発熱集中の緩和法を提案し、発熱量に関するシミュレーション評価を実施していた。この提案法は零相電圧を利用する点が特徴である。

2. 研究の目的

(1) シミュレーションを利用して零相電圧の振幅の最適化について究明する。特に、3レベルインバータにおいて、零速度状態で長時間運転する場合には、直流部の2個の電源が供給する電荷量を均等化させる方式も重要になる。この点を踏まえた駆動技術を理論的に解明する。

(2) 電力変換器とモータによる実機システムを構築し、素子温度を測定することによって提案する素子発熱集中の緩和法の理論結果を実証する。また、零相電圧の重畳時間についても評価する。

(3) 現状では限定的に使用される零相電圧に着目し、素子発熱集中緩和法以外の電力変換器の高機能化に向けた利用法を提案・検証する。

3. 研究の方法

(1) モータの零速度駆動時の各素子のジャンクション温度を導出するためにシミュレーションツールを作成する。これを用いて、(i)モータの磁極位置をパラメータとした場合の零相電圧の最適な重畳割合と最大上昇温度の関係、(ii)磁極位置と零相電圧振幅をパラメータとした場合の最適な時間割合の特性、(iii)磁極位置と零相電圧振幅をパラメータとした場合の素子の温度上昇特性、(iv)2電源からの電荷供給量をバランスさせる駆動を実施した場合の素子の最大上昇温度特性を評価し考察する。

(2) 提案法を検証するためディスクリット素子を使用した実機システムを構築する。さらに、この装置を対象とした素子温度に関するシミュレーションを実施した上で、実測により各素子の表面温度を評価する。これにより、シミュレーションの妥当性と提案法の効果を評価する。

(3) 零相電圧に着目した電力変換器の高機能化例として、電気自動車などのモータが発生する電磁騒音の低減と電力変換器の損失低減を両立する制御方法を提案し、検証する。

4. 研究成果

(1) 重畳する零相電圧の振幅に関する評価

① 評価システム構成

図1に提案法のシステム構成を示す。提案法では、3レベルインバータを使用し、永久磁石モータを駆動する。提案法では、制御回路において、モータ駆動用の電圧指令値に対して、零相電圧 V_0 を与える。特に、この V_0 について、永久磁石モータの磁極位置を考慮して時間割合を変えて正負に切り替える点が提案法の特徴である。これにより、電流経路を変化させることができ、各素子で発生する発熱を均一化できる。

モータが零速度の条件において V_0 が零の場合(従来の場合)には、直流電流が流れ、特定素子の導通損失が極めて大きくなり、素子温度も高くなる。提案法では、十分に大きい正の V_0 や負の V_0 を与えることにより、モータに供給する電流を変えずに主回路内の電流経路を変化させることができる。

評価条件として、DCリンクの電圧は100V(図1において $E=50V$)とし、キャリア周波数は5kHzとする。さらに、永久磁石モータは、2.2kWの8極モータを使用し、定格トルクを与えた零速度の条件で駆動させる。なお、評価時の外気温は21.3度であった。

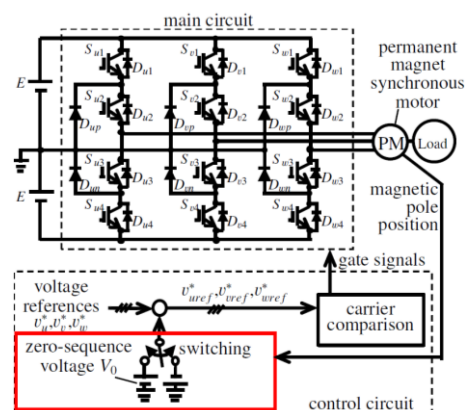


図1 システム構成

②シミュレーション結果

磁極位置 θ に対する出力電流の絶対値に着目すると、 60° 毎に最大電流の流れる相が変化し、 30° 毎に電流条件の特性は相似形となる。零相電圧 V_0 は各相に等しく与える電圧であるため、対称性を考慮することにより、 0° から 30° の範囲に対して評価することにより、 0° から 360° の全区間に対してその効果を適用できる。

磁極位置 θ が 0° の場合の電流条件は、U相電流が 6A, V, W相が $-3A$ となる。従来法では、電流導通量が多くなる S_{u2} の接合部温度が大きく 56.8°C となり、外気温 (21.3°C) から上昇する温度は 35.5°C となる。

図 2 に、 θ が 0° の場合について提案法を使用し、負の零相電圧の加算時間割合をパラメータとした場合の主要な素子の温度評価結果を示す。時間割合が 0% の場合は V_0 として常に $30V$ が電圧指令値に加算され、100% の場合は V_0 として常に $-30V$ が加算されることを意味する。図 2 より、 S_{u2} , D_{u3} , および D_{u4} の温度が最大素子温度に対して支配的になることが判る。また、負電圧を加算する時間割合が 69% ($-30V$ を 69%, $+30V$ を 31%) の場合に最大素子温度が最小 (48.5°C) となり、上昇温度は 27.2°C に低減できる。この場合、従来法と比較して素子上昇温度を 8°C (約 23.4%) 低減できる。

図 3 に、 V_0 を $\pm 30V$ として磁極位置 θ をパラメータとした場合の最適な重畳割合と素子の最大上昇温度の評価結果を示す。 θ が 0° から 18° の区間では、最適な時間割合は 69% で一定であり、温度低減効果もほぼ一定となる。この区間では、図 2 より、 S_{u2} と $D_{u3} \cdot D_{u4}$ が最大温度になる素子である。 θ が 18° から 30° の区間では、最適な時間割合が 69% から 50% に推移し、最大素子温度はほぼ一定となる。このように、最大上昇温度が最小になる時間割合は θ に依存して変化することが判る。提案する素子損失均一化法では θ を検出し、図 3 を参照して零相電圧の最適な時間割合を設定することにより、全ての磁極位置において温度低減効果が見込まれる。

図 4 に、 θ と V_0 をパラメータとした場合の最適な時間割合の評価結果を示す。 θ が小さい領域では、 V_0 の振れ幅が小さいほど + 側と - 側の時間配分割合が大きくなり、 V_0 の振れ幅が大きくなるほど時間割合は 50% に近づく。また、いずれの V_0 においても、最適な時間割合は、 θ が小さい領域では一定値となり、 15° 付近以降から θ が大きくなるほど 50% に近づく。 θ が 30° の場合は V_0 に依存せず 50% となる。また、 V_0 が $\pm 40V$ の場合は θ が全ての領域においてほぼ 50% になる。50% の条件は、直流部分の 2 電源からそれぞれ供給される電荷の量がほぼ等しいことを意味している。つまり、コンデンサで直流部分を構成する場合は、 V_0 の振れ幅を大きくする程、長時間の零速度条件でも電圧のアンバランスを生じなくできる。

図 5 に、 θ と V_0 をパラメータとした場合の素子の温度上昇特性の評価結果を示す。図 5 では、温度上昇が最小になるように図 4 の結果に基づいて時間割合を制御している。提案法は、どの条件でも従来法よりも温度上昇が抑えられており、効果があることが判る。温度上昇幅について、 θ が 0° から約 15° までの範囲は V_0 の大きさに依存せずほぼ同じであるが、それ以降の範囲では V_0 の振れ幅が大きいほど小さくなる。ただし、 θ が

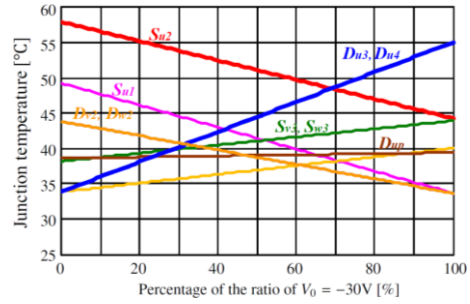


図 2 素子温度のシミュレーション結果 ($\theta = 0^\circ$)

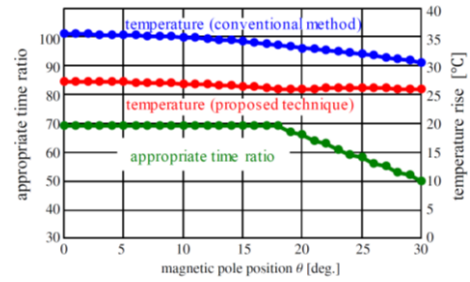


図 3 磁極位置をパラメータとした場合の最適な重畳割合と素子最大上昇温度特性

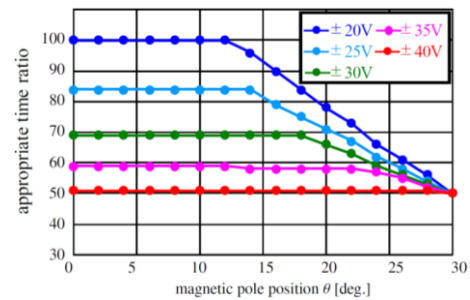


図 4 磁極位置と零相電圧重畳量をパラメータとした場合の最適な時間割合の特性

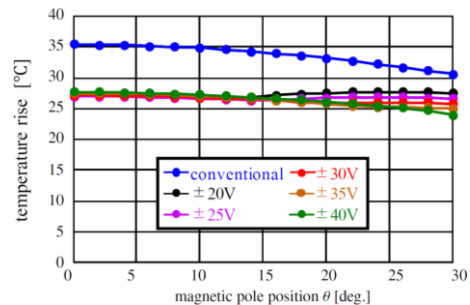


図 5 磁極位置と零相電圧重畳量をパラメータとした場合の素子の温度上昇特性

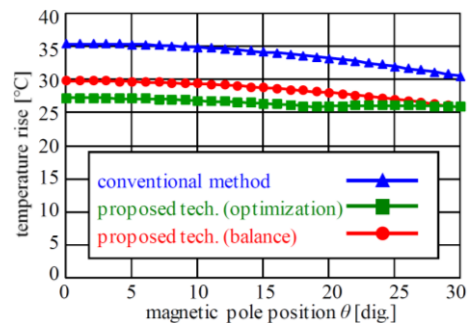


図 6 電源からの電荷供給量をバランスさせた条件での素子の最大上昇温度特性

30° の条件においても、 V_0 が $\pm 20V$ の場合と $\pm 40V$ の場合の温度上昇幅の差は温度上昇値の 10% 程度 (3.5°C 程度) であることが判る。

図 6 に、(i) 従来法、(ii) 提案法で V_0 を $\pm 30V$ とし、最適な時間割合で切替える方法、(iii) 提案法で V_0 を $\pm 30V$ とし、2 コンデンサからの電荷供給量がバランスするように V_0 の切替え時間割合を常に 50% とする方法の素子の最大上昇温度の特性を示す。切替え時間割合を常に 50% とする方法では、いずれの磁極位置 θ でも従来法よりも最大温度を約 20% 低減できる。また、最適な時間割合で切替える方法と比較しても、温度上昇は最大でも 10% 程度であることを確認できる。このため、温度条件に余裕がある場合は、 V_0 の切替え時間割合を常に 50% とする方法を採用することにより、長時間の零速度条件でも直流部分の 2 コンデンサの電圧アンバランスを生じなくできる。

(2) 実機システムによる提案方式の検証

提案法を検証するために評価装置を製作した。図 7 に、製作した 3 レベルインバータミニモデルの主回路写真を示す。各素子における温度評価を目的としているため、複数の IGBT 素子や還流ダイオードが内蔵された IGBT モジュールを使用せず、ディスクリート型の素子をヒートシンク上に配置している。本評価では、提案法による温度分散効果の検証を目的としているため、使用する素子の定格値はモータ負荷に対して十分に余裕をもたせて設計をしている。また温度分布をサーモカメラで観察するため、インバータを上部から見た場合に電線と素子が重ならないように配線を施している。

提案法について、サーモカメラを使用して各素子の表面温度を測定する。IGBT 素子は IGBT と還流ダイオードが内蔵されているため、一括した素子温度として評価する。実測においては、各条件で同一トルクの駆動を 1 分間継続した後の温度を測定し、測定後は次の条件での測定の前に十分に自然冷却させた。

図 8 に従来法で $\theta = 0^\circ$ の場合における温度分布を示す。図 8 より、一部の素子に発熱が集中していることが確認できる。特に IGBT₁₂ の温度が最も高く 50.6°C となる。シミュレーション結果と比較すると、実測結果の温度の方が僅かに低くなるが、この要因は、実測では素子表面の温度を測定しているため、厳密な接合部の温度よりも低下していると考えられる。

図 9 に、 $\theta = 0^\circ$ の場合において提案法を使用した場合の主要な素子の温度評価結果を示す。図 9 は、負の零相電圧の加算時間割合をパラメータとして評価しており、10 ms の周期で、割合に応じて V_0 が 30V, -30V になる時間を調整している。図 9 より、全体的に、実測結果の方がシミュレーション結果よりも温度が低くなる。これは、従来法の場合と同様の要因であると考えられるが、全体的な温度の傾向はよく一致している。図 9 より、負の零相電圧を加算する割合が 90% の場合に最大素子温度が最小 (41.5°C) になり、外気温度からの上昇温度は 20.2°C となる。提案法による最大素子温度は、従来法の最大素子温度 50.6°C (上昇温度 29.3°C) と比較すると、9.1°C 低減し、上昇温度は約 31.1% 低減する。このことから提案法の有効性が確認できる。図 10 に、負の零相電圧の時間割合が 90% の場合の温度分布を示す。提案法を使用した場合は従来法の場合と比較して素子温度が分散し、最大素子温度が低減していることが確認できる。

提案手法において重畳する零相電圧の切り替え時間割合を維持しながら、切り替え周期をパラメータとした評価を実施した。この結果、零相電圧の切替え周期は熱時定数より十分低く設定すれば、温度上昇の過渡的な特性はほとんど変化がないことを確認した。つまり、零相電圧は熱

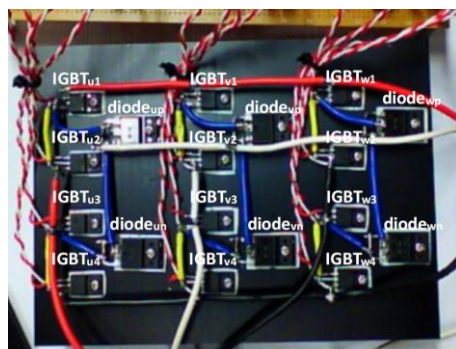


図 7 3 レベルインバータ主回路の写真

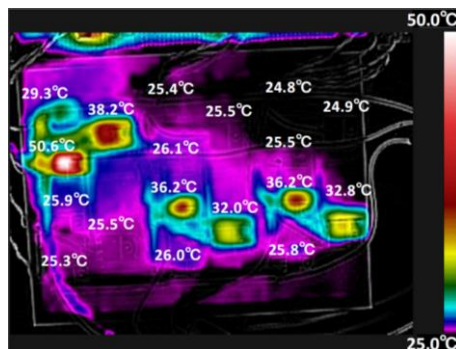


図 8 従来法における温度分布 ($\theta = 0^\circ$)

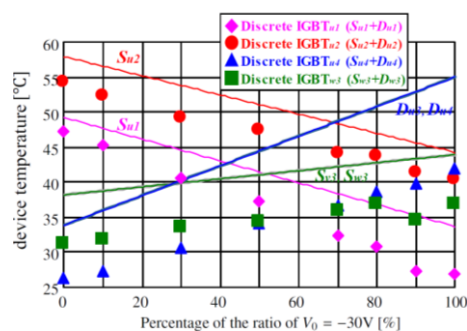


図 9 提案法における主要素子の温度特性 ($\theta = 0^\circ$)

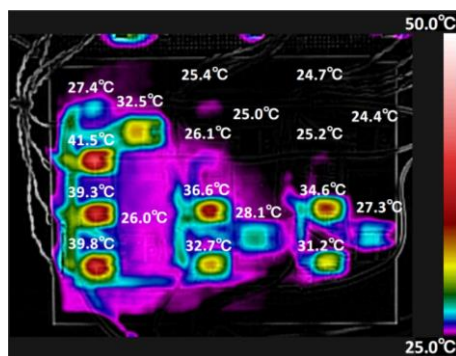


図 10 提案法で V_0 が -30V の割合が 90% の場合の温度分布 ($\theta = 0^\circ$)

時定数を目安に設定すればよく、頻繁に切り替える必要はない。

本研究で得られた技術は、制御演算処理のみで発熱が低減でき、冷却器等を小さくできる。これにより、電力変換器の小型化・軽量化・低コスト化がもたらされる。この技術は、更なる省エネルギー化の推進や電気自動車技術の促進による環境負荷軽減技術などの電力変換器技術の発展に寄与できると考える。

(3) 零相電圧利用による高機能化の応用例

零相電圧に着目した電力変換器の高機能化例として、電気自動車などのモータが発生する電磁騒音の低減と電力変換器の損失低減を両立する制御方法を提案した。図 11 に実験システムの構成を示す。本評価ではインバータの DC リンク電圧を 100V とし、誘導電動機 (1.5kW) を無負荷駆動させる。また、キャリア周波数は 5kHz とし、誘導電動機は無負荷の状態での V/f 一定制御とする条件で駆動する。さらに、線間電圧の基本波成分が 80V (電圧利用率 0.8) となるように指令を与える。この場合の出力周波数は 14.1Hz となる。モータ電磁音の測定は、コンデンサマイクをモータの近傍に固定し、相対評価により比較した。

提案法の特徴は、従来の二相変調法ではステップ状に変化する指令値の不連続部分をほぼランプ状に変化させる点である。特に、提案法では、瞬時値を用いて演算した零相電圧を与えることで出力電圧指令値を生成する。

図 12 に二相変調法のスイッチ休止区間 (b) に対するランプ状指令区間 (a) の割合 K をパラメータとしてスイッチング損失をシミュレーション評価した結果を示す。この評価は、力率 1.0 の条件で、簡単化のために正弦波電流を仮定して演算している。また、正弦波 PWM 法のスイッチング損失を 1.0 に規格化している。提案法では K を小さくするほどスイッチング損失を低減できる。特に、 K が 0.2 の場合にはスイッチング損失は正弦波 PWM 法の 58% に低減できる。

図 13 に、従来の二相変調法と提案法を用いた場合のモータの電磁音実測結果をそれぞれ示す。低周波数帯域の成分は直流電源の空冷装置によるものであり、本評価では無視する。図 13 (a) より、二相変調法では、キャリア周波数 5kHz とその高調波にピークが発生し、側帯波成分が大きくなることが判る。このため、モータ電磁音は大きく、多周波数の音が発生する。二相変調法ではキャリア周波数を大きくし、電磁音のピーク部分にあたる周波数を高くしたとしても側帯波成分の音が課題になる場合がある。図 13 (b) は、提案法において K を 0.2 とした場合の実測結果である。提案法では二相変調法よりも側帯波成分を大幅に低減できることが判る。実際に聞こえる音も二相変調法よりも小さくなる。

このように零相電圧を利用することにより、制御演算処理のみで変換器損失と電磁騒音を低減できることを確認した。本研究のように零相電圧を有効利用する方法は斬新であり、様々な産業機器に適用できる。今後の展望としては、電力変換器の高機能化に対して、さらなる零相電圧利用例を検討していきたい。

< 引用文献 >

- ① H. Ayano, R. Shimamoto, T. Noda, T. Horii, Y. Matsui, Alleviation Technique for Thermal Concentration on Power Devices Driving a PMSM under Zero-Speed and High-Torque Condition, IEEJ Transactions on Industry Applications, 査読有, Vol.9, No.5 (掲載決定)
- ② 綾野 秀樹, 北田 成祐, 井口 雄紀, 松井 義弘, 伊東 淳一, モータ電磁音とインバータ損失の低減を両立する新しい変調法の提案, 電気学会論文誌 D, 査読有, 140 巻, 6 号 (掲載決定)

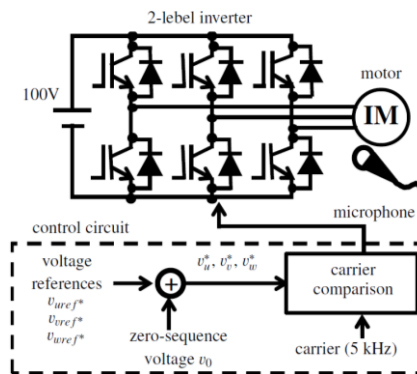


図 11 実験システムの構成

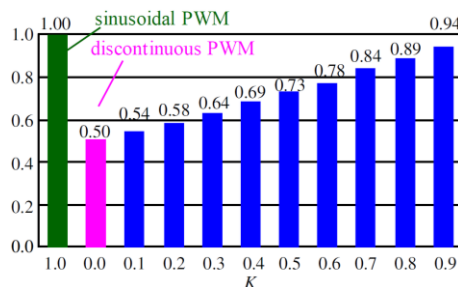
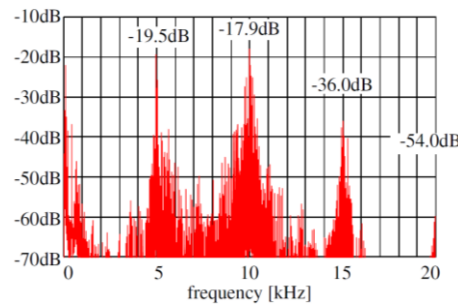
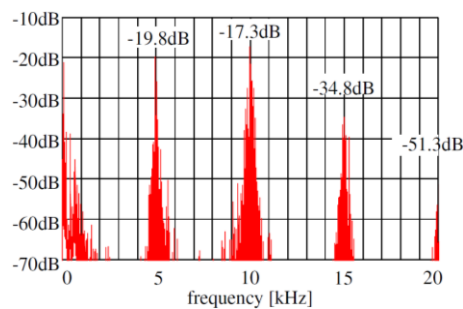


図 12 スwitching 損失の比較



(a) 二相変調法



(b) 提案法

図 13 モータ電磁音の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 綾野 秀樹, 木村 悠利	4. 巻 51
2. 論文標題 零相電圧の印加量と直流コンデンサバランスに着目した素子温度均一化法のシミュレーション評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 東京工業高等専門学校研究報告書	6. 最初と最後の頁 20 ~ 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 綾野 秀樹, 北田 成祐, 井口 雄紀, 松井 義弘, 伊東 淳一	4. 巻 140
2. 論文標題 モータ電磁音とインバータ損失の低減を両立する新しい変調法の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 442 ~ 449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.140.442	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 H. Ayano, R. Shimamoto, T. Noda, T. Horii, Y. Matsui	4. 巻 9
2. 論文標題 Alleviation Technique for Thermal Concentration on Power Devices Driving a PMSM under Zero-Speed and High-Torque Condition, IEEJ Transactions on Industry Applications(掲載決定)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) -	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 Ayano Hideki, Fujimura Akira, Matsui Yoshihiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Improvement of High-Frequency Characteristics of Small-Size Toroidal Reactors with New Wire Guides	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 615 ~ 622
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.8.615	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 綾野 秀樹、嶋本 椋太、松井 義弘	4. 巻 49
2. 論文標題 永久磁石モータの零速度駆動時の素子発熱集中緩和法に対するシミュレーション検証	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 東京工業高等専門学校研究報告書	6. 最初と最後の頁 24～29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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8件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 北田成祐, 綾野秀樹, 井口雄紀, 松井義弘, 伊東淳一
2. 発表標題 部分二相変調法を用いた場合のスイッチング損失の評価
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 綾野秀樹, 北田成祐, 井口雄紀, 松井義弘, 伊東淳一
2. 発表標題 モータ電磁音とインバータ損失の低減を両立する新しい変調法の提案
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 綾野秀樹, 嶋本椋太, 野田拓真, 松井義弘
2. 発表標題 永久磁石モータの零速度運転時における素子発熱均一法に対する実験検証
3. 学会等名 電気学会研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北田成祐, 綾野秀樹, 井口雄紀, 松井義弘, 伊東淳一
2. 発表標題 インバータの変調法がモータの電磁音に与える影響の評価
3. 学会等名 電気学会研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北田成祐, 綾野秀樹, 井口雄紀, 松井義弘, 伊東淳一
2. 発表標題 部分的な二相変調法を用いた場合のモータ電磁音の評価
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 綾野秀樹, 松井義弘
2. 発表標題 零相電圧を利用した零速度運転時の伝導ノイズ低減法に関するシミュレーション評価
3. 学会等名 平成29年度電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 綾野秀樹, 松井義弘
2. 発表標題 PWMインバータの過変調領域における高調波抑制方法の検討
3. 学会等名 平成30年度電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideki Ayano, Akira Fujimura, Yoshihiro Matsui
2. 発表標題 Evaluation of a High-Frequency Reactor with a New Wire Guide for a Toroidal Core
3. 学会等名 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 - ECCE-ASIA) (国際学会)
4. 発表年 2018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
研究協力者	松井 義弘 (Matsui Yoshihiro)	福岡工業大学・工学部 電子情報工学科・教授 (37112)	