

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：52601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420275

研究課題名(和文) 零相電圧を有効利用した電力変換器のノイズ低減技術の研究

研究課題名(英文) A Technique of for Reducing an Electromagnetic Noise in Power Converter Systems by Application of Zero-Sequence Voltage

研究代表者

綾野 秀樹 (AYANO, Hideki)

東京工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：50614525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電力変換装置において零相電圧成分を利用した電磁障害の低減技術を確立した。特に、零相電圧成分の利用を最適化し、零速度領域からモータ駆動領域まで対応できる。具体的な成果は次の3点である。(1)モータ駆動時の誘起電圧を考慮して、重畳する零相電圧を出力周波数の関数とする方式を立案した。(2)モータの回転状態を模擬した詳細なシミュレーションにより、提案手法は、モータの全駆動領域における漏えい電流を従来手法よりも低減可能なことを明らかにした。(3)実機評価により、提案手法は、漏えい電流を従来手法よりも約30%低減できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This research established a technique for reducing an electromagnetic interference by applying a zero-sequence voltage in power converters. This technique uses an appropriate zero-sequence voltage and can apply not only a motor is nearly at zero speed but also the motor is driving a load at any speed. Concrete results are the following three points. (1) We proposed to add the zero-sequence voltage to an inverter reference which is controlled as a function of the inverter output frequency considering that the counter EMF of the motor is directly proportional to the motor speed. (2) The detailed simulation results in the rotation state of the motor showed clearly that the proposed technique could reduce the leakage current not only the motor was nearly at zero speed but also the motor is driving a load at any speed. (3) The experimental results verified that the proposed technique could reduce about 30% of the leakage current compared with the conventional method.

研究分野：工学

キーワード：電力変換装置 零相電圧 モータ 電磁障害 キャリア騒音 発熱集中

1. 研究開始当初の背景

インバータ等の電力変換器の課題として、スイッチング時に発生する電磁ノイズがあり、自機器や周辺機器の誤動作を誘発する恐れがあった。この対策法としては、一般的に、コモンモードチョーク等のノイズ抑制部品を使用し、電磁ノイズの要因となる漏えい電流を低減する方式が取られていた。しかし、ノイズ規制値を満足するために施されるノイズ抑制部品の容積や重量は、電力変換器の全体実装に対する割合は大きく、これの小型軽量化は大きな課題となっていた。また、負荷として駆動される電動機が極低速(あるいは零速度)で駆動する場合には、各出力相のスイッチ素子がほぼ同時にスイッチングをするため、漏えい電流は最大となる。このような極低速かつ高トルク駆動を要する例としては、エレベータの駆動開始・終了状態、サーボ装置のサーボロック状態、鉄道システムの後退起動抑制、電気自動車における坂道発進抑制、プレス装置におけるプレス時の駆動などがある。研究代表者らは、電力変換器の零相成分を利用した電磁障害抑制技術を提案し、実験的な検討を実施していた。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、以下の点を目的とした。

- (1) 零相成分を利用した電磁障害抑制技術の適用領域を可変速モータの駆動時に拡張し、駆動状態に合わせたノイズ抑制制御技術(零相電圧の重畳量や重畳形態の最適化)について究明する。モータ駆動時には誘起電圧が発生するため零相電圧の重畳量は制限される。この点を踏まえ、最適化技術を理論的に解明する。
- (2) モータの回転状態を模擬した詳細なシミュレーションにより提案理論の妥当性を検証する。さらに、全駆動領域における漏えい電流を、従来手法の漏えい電流ピーク値(ノイズ抑制部品の大きさ決定する値)よりも低減できることを確認する。
- (3) 電力変換器とモータによる実機システム(大型機器を模擬できるミニモデル装置)を構築し、実験によって理論結果を実証する。特に、漏洩電流を25%以上低減させることを目標値とする。

3. 研究の方法

(1) モータ駆動領域まで拡大した低ノイズ化技術の理論構築を実施する。研究代表者らが実施した先行研究では、ノイズ要因の漏洩電流が最大となる零電圧出力時で検討を実施していた。提案方式では零相電圧を重畳してノイズ電流の低減を図るが、モータの回転速度の増加に伴って零相電圧の重畳幅は制限される。一方で、一般的にはモータの回転数が大きいほど漏洩電流は低減する。これらを鑑みて、総合的にノイズ電流

を一定限度以下に低減するための最適制御方法について、理論的に解明する。

- (2) モータの回転速度の変化を想定した詳細シミュレーションをパワーエレクトロニクス用のシミュレーションツール「PSIM」を用いて実施する。これに当たって、まず、モータを負荷とした電力変換器モデルを構築する。さらに、このモデルを使用して、モータを可変速運転させた場合の漏洩電流の低減効果を評価する。
- (3) 実機試験に向けて制御プログラム・装置の仕様設計を実施する。さらに、制御プログラムの製作し装置を構築した上で実機試験評価を実施し、提案方式の理論結果を実証する。

4. 研究成果

(1) 零相電圧の重畳量を制御する技術

① 評価システム構成

図1にインバータ装置のシステム構成を示す。評価対象のシステムでは、電源とダイオード整流器の間にコモンモードチョーク L_c を接続する。さらに、コモンモードチョーク L_c とダイオード整流器の間の各相に、対地コンデンサとして C_{ga} を星型接続し、その中性点とグラウンドの間を C_{gb} を介して接続する。インバータの出力には配線インダクタンス L_l を介してモータを接続する。さらに、インバータのスイッチング周波数は 10 kHz として駆動させる。

インバータのスイッチングに起因して発生する漏えい電流は、モータの巻線-フレーム間に存在する浮遊容量 C_m を介してグラウンドに漏えいする。この漏えい電流は、周辺機器を經由して電源を流れる経路と対地コンデンサを流れる経路がある。漏えい電流はスイッチング周波数以上の高周波数となるため、コモンモードチョークを經由する電源側の経路よりも対地コンデンサを通る経路の方がインピーダンスは低くなる。このため、図1では、漏えい電流は主に対地コンデンサ側に流れ、周辺機器への悪影響を低減できる。本研究では、

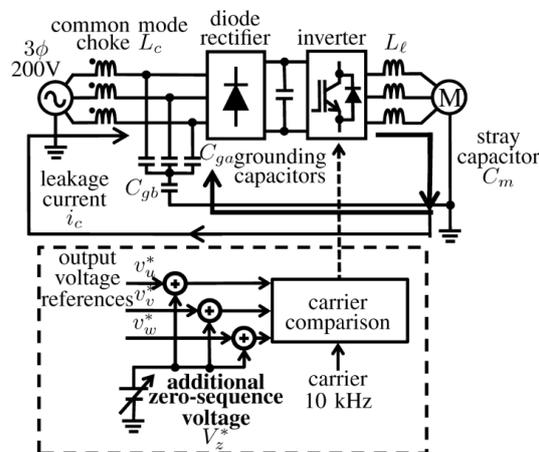


図1 システム構成

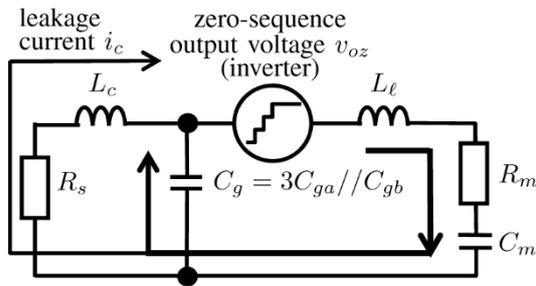


図2 零相等価回路

表1 等価回路の定数

cable inductance	L_c	8.2 [μ H]
load resistance (zero-sequence)	R_m	25 [Ω]
stray capacitor	C_m	2.9 [nF]
common-mode choke inductance	L_c	0.79 [mH]
power source resistance (zero-sequence)	R_s	3.0 [Ω]
grounding capacitor	C_{ga}	0.68 [μ F]
	C_{gb}	0.47 [μ F]

電源側に流れる漏えい電流 i_c のさらなる低減を目的としており、出力電圧指令値に零相成分の指令値を重畳する点が特徴である。この零相成分は各出力相電圧に対して同時に同量を与える電圧であり、線間電圧を考えた場合には相殺されるため、モータ駆動に対して影響を与えない。

図2に図1のシステムの等価回路を示す。ここで、 R_m はモータ等の負荷側の抵抗成分であり、 R_s は電源側の抵抗成分である。インバータは零相電圧の電圧源として表され、零相電流は L_c , R_m , C_m を介してグラウンドに流れる。この零相電流は、 C_{ga} と C_{gb} の直列接続で表される対地コンデンサ C_g を流れる経路と電源側の L_c , R_s を流れる経路からインバータへ循環する。表1に等価回路の定数を示す。ここで、 L_c , C_g , L_l , C_m は、実機評価システムにおいて個別に実測した値であり R_s および R_m は、数 kW クラスのモータを想定して設定した値である。

②制御方式

モータ駆動領域に対応する零相電圧を用いた漏えい電流低減方式について検討する。本報告では誘導モータを使用し、 v/f 一定制御で使用する。 v/f 一定制御はインバータの出力周波数と振幅の比を一定にする制御方法であり、出力周波数(回転速度)に対して励磁量を一定に保つことで広範囲の速度制御を実現できる。

図3にインバータの出力電圧と出力周波数の特性を示す。供試モータの定格電圧は 200V (線間電圧)、定格周波数は 50Hz であるため、出力相電圧と周波数の比は、

$$\frac{V}{f} = \frac{V_{\max}}{f_{\max}} = \frac{200\sqrt{2/3}\text{V}}{50\text{Hz}} = 3.27 \text{ V/Hz} \quad \dots\dots\dots(1)$$

となる。また、出力相電圧の指令値を正弦波

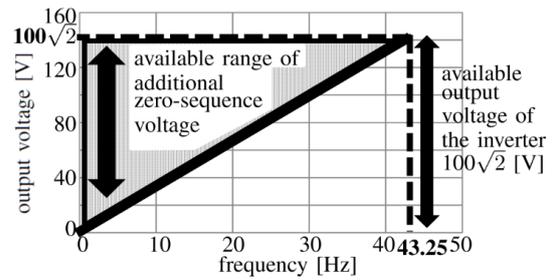


図3 出力周波数に対する重畳可能な零相電圧の関係

とした場合、インバータがひずみなく出力できる電圧の上限値は $100\sqrt{2}$ V である。この場合のインバータの最大の出力周波数は(1)式より、

$$f = \frac{100\sqrt{2}}{3.27} = 43.25\text{Hz} \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。モータ駆動領域で零相電圧 v_z^* を重畳する場合には、このインバータの出力電圧を考慮する必要がある。つまり、図3より電圧指令値 v_r^* と零相電圧重畳量 v_z^* の加算電圧値をインバータの出力可能範囲よりも小さくしなければならず、

$$v_r^* + v_z^* = 100\sqrt{2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

が必要条件となる。図3より重畳可能な零相電圧はインバータの出力周波数が低いほど大きくなり、インバータの出力周波数が高いほど小さくなる。提案方式では(2)式を満足するように、零速度時に重畳する v_z^* をインバータの出力可能電圧値の 90% に、最大周波数の場合 (v_r^* が最大となる場合) には v_z^* が零になるように次の式に基づいて線形に変化させる。

$$v_z^* = (100\sqrt{2} - v_r^*) \times 0.9 \quad \dots\dots\dots(4)$$

また、(3)式は、周波数指令値 f の関数とする場合は(1)式より、

$$v_z^* = (100\sqrt{2} - 3.27 \times f) \times 0.9 \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる。このように、モータ駆動に影響を与えることなく、零相電圧を最適に与える方式として(5)式を導出した。

(2)シミュレーションによる提案手法の妥当性の検証

回路シミュレータ PSIM により、電力変換器とモータのモデルを作成し、回転状態を模擬した詳細なシミュレーションを実施した。図4に漏えい電流のシミュレーション結果を示す。図4(a)はインバータの出力周波数と重畳する零相成分の特性である。シミュレーションでは、モータの回転周波数指令は 0.25 秒の時点から与え、線形に増加させて 5 秒間でインバータの出力周波数が最大の 43.25Hz に達するように設定した。

図4(b)に従来方式(零相電圧の指令値を重畳していない場合)の漏えい電流波形を示す。モータの零速度領域で漏えい電流は最大値

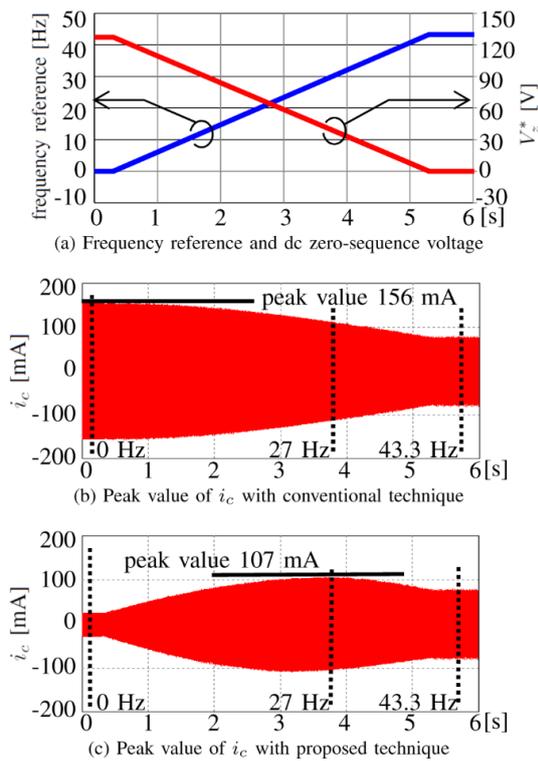


図4 シミュレーション結果

156mA となり、インバータの出力周波数の増加に伴って減少する。これは周波数が増加するにつれてインバータ各出力相の同時スイッチングが発生しなくなり、インバータの出力する零相電圧の変化率が小さくなるためである。図5に、図4(b)の結果において代表的な出力周波数(0Hz, 27Hz, 43.3Hz)での拡大波形を示す。図5より、漏えい電流波形の振動周波数はいずれも10kHzであり、出力周波数の増加に伴って振幅は減少していることが確認できる。さらに、いずれの周波数においても波形形状はほぼ正弦波であることが確認できる。

図4(c)に提案方式を用いた場合の漏えい電流波形を示す。漏えい電流は、モータが低速の場合には零相電圧指令の重畳量が大きいため、図4(b)の場合よりも大幅に低減できる。しかし、周波数の増加に伴って零相電圧の重畳量は減少するため、漏えい電流は一旦増加し、周波数指令が27Hzにおいて振幅は最大になる。さらに周波数が増加した場合には、インバータ各出力相の同時スイッチングが発生しないことにより、漏えい電流は低減する。

図6に、図4(c)の結果において代表的な出力周波数(0Hz, 27Hz, 43.3Hz)での拡大波形を示す。図6より、漏えい電流波形の振動周波数はいずれも10kHzであるが、図6(a)の周波数指令が0Hzの場合には正負が非対称なひずみ波となる。これは偶数時の高調波が発生するためである。図6(b)の周波数指令が27Hzにおける漏えい電流の振幅最大値は107mAとなり、図5(a)の従来方式での最大値(156mA)と比較して約31%の低減効果を確認できた。

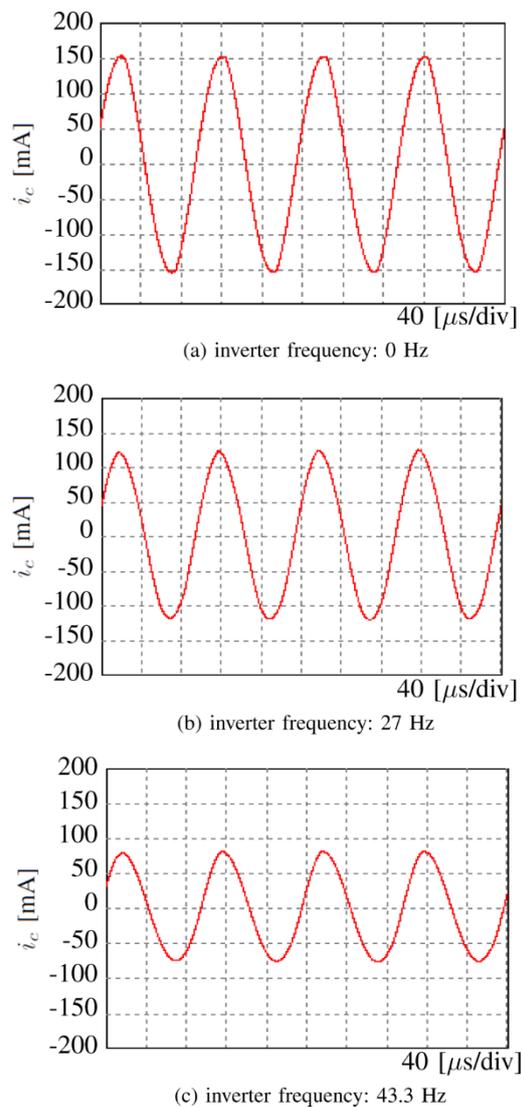
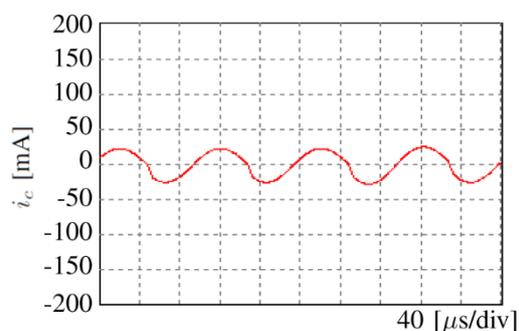


図5 従来法における漏えい電流の拡大波形

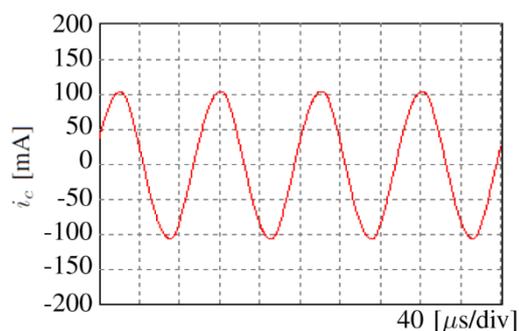
(3) 実機システムを用いた提案手法の妥当性の検証

図7に従来方式(零相電圧重畳の指令値を重畳していない場合)の漏洩電流の実測結果を示す。漏洩電流はモータ停止時に最大値164mAとなりインバータの出力周波数の増加に伴い減少する。これは周波数指令の増加に伴ってインバータの各相のスイッチングが同時に発生しなくなり、インバータの出力する零相電圧の変化率が小さくなるためである。また、漏洩電流波形はいずれの周波数においても正弦波が出力されている。図7の波形は図5と比較するとほぼ一致していることが確認できる。

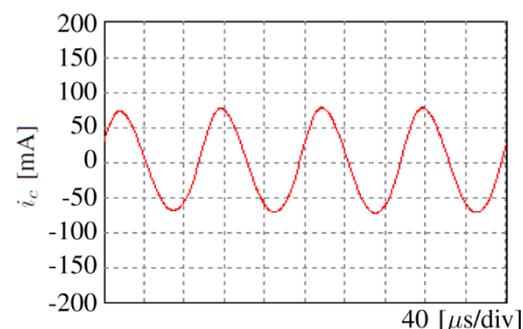
図8に提案方式の実測結果を示す。漏洩電流は、モータが低速の場合には零相電圧指令の効果により減少する。しかし、インバータの出力周波数の増加に伴って零相電圧の重畳量は減少するため、漏洩電流は一旦増加する。さらに周波数が増加した場合には、インバータの各相はスイッチングが同時に発生しなく



(a) inverter frequency: 0 Hz



(b) inverter frequency: 27 Hz



(c) inverter frequency: 43.3 Hz

図6 提案法における漏洩電流の拡大波形

なるため、漏洩電流は低減する。図8(a)(b)の漏洩電流は波形の正負が非対称のひずみ波形となっている。これは零相電圧を重畳したことにより、偶数次の高調波が発生するためである。図8の波形は全ての周波数において図6とほぼ一致していることが確認できる。図7(c)における漏洩電流の最大値は110mAになる。図7の従来方式と図8の提案方式を比較すると、漏洩電流を約33%低減できた。これにより、シミュレーションの妥当性を確認でき、かつ提案方式の有効性を確認できた。

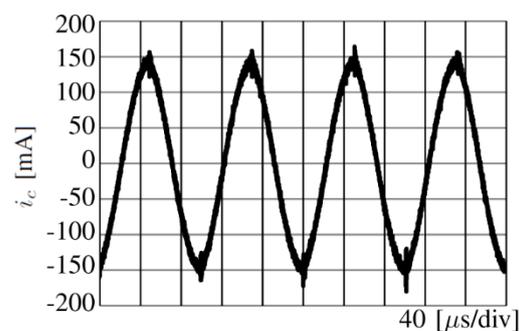
+

5. 主な発表論文等

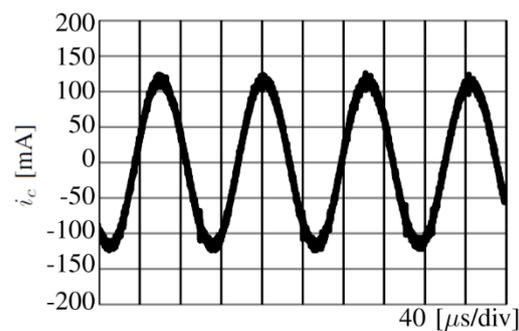
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

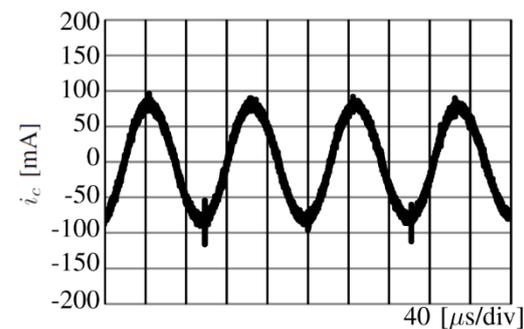
- [1] 綾野秀樹, 佐藤優貴, 松井義弘, 対地コンデンサの位置による漏えい電流の変化とその要因, 電気学会論文誌 D, 査読有, 133 巻, 11 号, pp.1048-1056, (2014.11) DOI: <http://doi.org/10.1541/ieejias.133.1048>



(a) inverter frequency: 0 Hz



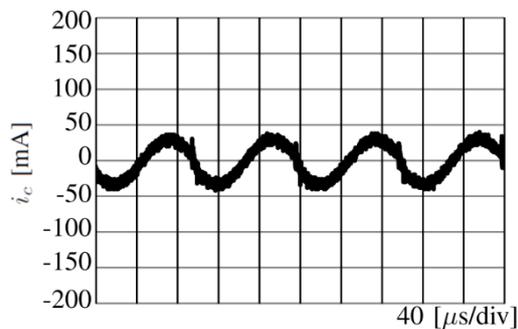
(b) inverter frequency: 27 Hz



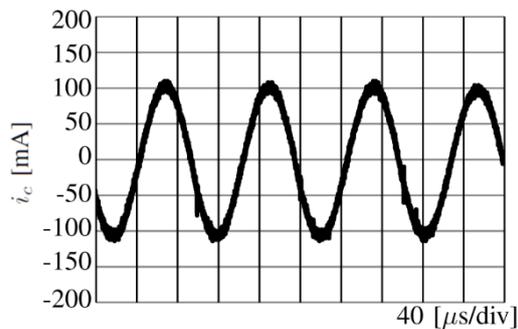
(c) inverter frequency: 43.3 Hz

図7 従来法における漏洩電流の実測波形

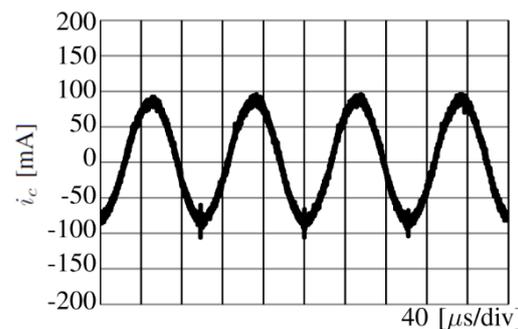
- [2] 綾野秀樹, 村上昂平, 松井義弘, モータの駆動領域におけるインバータノイズ低減法のシミュレーション評価, 東京工業高等専門学校研究報告書, 査読無, 45 号(2), pp. 57-62, (2014.1)
- [3] 綾野秀樹, 佐藤優太, 松井義弘, 素子損失のアンバランスを考慮したインバータノイズ低減法の評価, 東京工業高等専門学校研究報告書, 査読無, 46 号(3), pp. 43-49, (2015.1)
- [4] H. Ayano, K. murakami, and Y. Matsui, A Novel Technique for Reducing Leakage Current by Application of Zero-Sequence Voltage, IEEE Transactions on Industry Applications, 査読有, Vol. 51, No. 4, pp. 3094-6100 (2015.7) DOI:10.1109/TIA.2015.2391440
- [5] 浅井亨太, 綾野秀樹, 松井義弘, 永久磁石モータの零速度運転時における素子発熱集中緩和法, 電気学会論文誌 D, 査読有, 136 巻, 9 号 (掲載決定)



(a) inverter frequency: 0 Hz



(b) inverter frequency: 27 Hz



(c) inverter frequency: 43.3 Hz

図8 提案法における漏洩電流の実測波形

[学会発表] (計7件)

- [1] H. Ayano, K. Murakami, Y. Matsui, A novel technique for reducing leakage current by application of zero-sequence voltage, IEEE, International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima- ECCE-ASIA 2014), 広島県広島市 (2014. 5)
- [2] 綾野秀樹, 松井義弘, 変調方式の違いにおける電圧・電流ひずみの比較, 平成26年電気学会産業応用部門大会, 1-8, pp. I-69-72, 東京都足立区(2014. 8)
- [3] 綾野秀樹, 石川清太郎, 松井義弘, 零速度運転時のモータから発生するキャリア騒音の低減法, 平成27年電気学会全国大会, 4-098, pp. 165-166, 東京都世田谷区(2015. 3)
- [4] 浅井亨太, 綾野秀樹, 松井義弘, 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, 平成27年電気学会全国大会, 4-164, pp. 272-273, 東京都世田谷区(2015. 3)
- [5] 綾野秀樹, 石川清太郎, 松井義弘, 零相電

圧を利用した零速度運転時のキャリア騒音低減法, 平成27年電気学会産業応用部門大会, 1-107, pp. I-435-440, 大分県大分市(2015. 8)

- [6] 浅井亨太, 綾野秀樹, 松井義弘, 永久磁石モータの零速度運転時における素子発熱集中緩和法の評価, 電気学会半導体電力変換, 家電・民生, 自動車 合同研究会資料, SPC-15-204, HCA-15-073, VT-15-044, 新潟県長岡市(2015. 12)
 - [7] 河原智彦, 綾野秀樹, 松井義弘, 非対称な直流電源を持つ3レベル電力変換器による電圧ひずみ低減法に関する検討, 平成28年電気学会全国大会, 4-139, pp. 232-233, 宮城県仙台市(2016. 3)
- [図書] (計0件)

[産業財産権]
産業財産権
○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
特になし

6. 研究組織

(1) 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・准教授
研究者番号: 50614525

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: