

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820104

研究課題名(和文) 高効率昇圧形モータ駆動装置の開発

研究課題名(英文) Improvement of motor driver with charge-pump circuit

研究代表者

松本 洋和 (Matsumoto, Hirokazu)

福岡大学・工学部・准教授

研究者番号：40526406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、内部に電圧を上昇させる回路を組み込んだモータ駆動装置(昇圧形モータ駆動装置)について研究を行った。申請者らはかねてより新しい回路構成を持つ昇圧形モータ駆動装置を提案しており、本研究はこの駆動装置の改良を行い、従来の昇圧形モータ駆動装置と比較を行い、その優位性を明らかにすることである。その結果として、提案する駆動装置はモータ駆動性能を維持しつつ、出力の高周波成分を低減した上で高効率でモータを駆動できることを確認し、その高い実用性を確認できた。

研究成果の概要(英文)：In this research, the motor driver with voltage-step-up circuit, which has been proposed by the researcher has been studied. The motor driver is proved to be able to have the same level of motor drive performance and perform with higher efficiency and lower harmonics in the output in comparison with conventional motor drivers.

研究分野：電気機器

キーワード：モータ駆動装置 昇圧回路 インバータ チャージポンプ

1. 研究開始当初の背景

産業用モータは、生産性や品質を向上させるために制御性能の向上や、省エネ化のために駆動効率の改善が求められており、これらを実現する方法の一つとしてモータの駆動電源の高圧化が進められている。申請者らは低損失で高圧化を行えるモータ駆動装置の提案を行ってきた。

一般的なモータ駆動装置の回路構成は、商用交流電源を直流に変える整流回路と、その直流をモータ制御に合わせて任意の振幅と周波数をもつ交流に変えるインバータ回路からなる。この構成に電圧を高めるための昇圧回路を追加したものが昇圧形モータ駆動装置である。従来の昇圧形モータ駆動装置は、直流部にインダクタ L_c を使ったチョップ回路を備えたものである (図 1(a) 参照)。一方、本研究者らが提案してきた装置は直流回路部分にチャージポンプ機能を持たせた回路 (CP 回路) を備える (図 1(b) 参照)。CP 回路はコンデンサで代表される蓄電デバイス C_{cp} と電気的にオン/オフ可能なスイッチ素子 ($Q_{c1} \sim Q_{c4}$) 等で構成される。スイッチを適切に制御することにより、あらかじめ充電された蓄電デバイスと整流回路を直列に接続させ、駆動回路内部の電圧 v_{dc} を $v_{cp} + v_{nc}$ に上昇させることができる。その結果、モータへの供給電圧を高圧化することができるものである。また、昇圧に必要な C_{cp} の充電エネルギーの補充は、モータを力行運転している時でも行うことができるため、継続してモータの駆動が可能である。

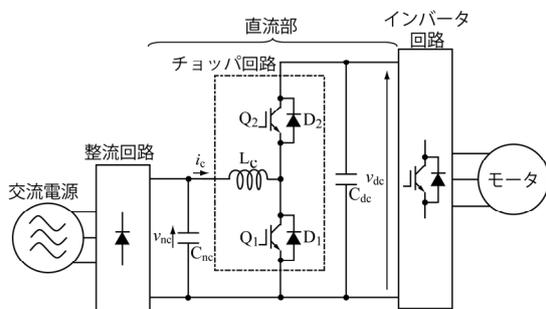


図 1(a) 従来の昇圧形モータ駆動装置

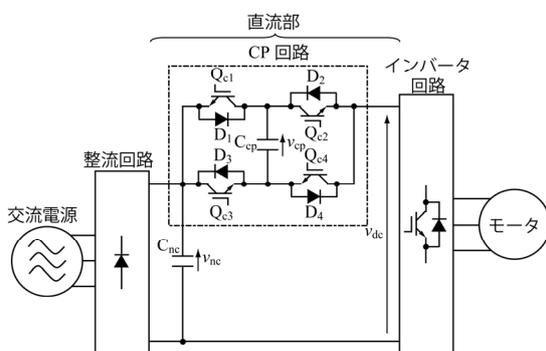


図 1(b) 提案する昇圧形モータ駆動装置

2. 研究の目的

提案する昇圧形モータ駆動装置の更なる

性能改善とコスト低減による実用性の向上、そして従来の駆動装置と比べての優位性を確認することを目的とする。具体的には次の 4 点について検証を行う。

(1) 新しい制御アルゴリズムの開発

これまでは空間ベクトル変調 (SVM) をベースにした制御を使用していたが、SVM では実装コードが複雑であり、また制御の演算時間が長いこと制御周期を短くできない、高性能な演算装置が必要であるとの欠点がある。一方、キャリア比較パルス幅変調法 (PWM) にはこれらの欠点がない。そこでキャリア比較 PWM をベースにした新たな制御アルゴリズムを開発する。

(2) 蓄電デバイスの電圧制御方法の改善

(1) の制御方式を基に、蓄電デバイスの電圧制御をより効率的に行える制御方法の開発を行う。

(3) 弱め界磁制御の導入

弱め界磁制御を適用することで、モータの駆動可能な条件を拡大する。

(4) 電解コンデンサの代用を可能にする制御方式の開発

提案装置の低コスト化を図るため、蓄電デバイス C_{cp} としてこれまで使用してきた電気二重層キャパシタの代わりに、より安価な電解コンデンサを使用することを検討する。電圧変動が大きくなることが想定されるが、安定してモータ駆動を行える制御方式の開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 新しい制御アルゴリズムの開発

空間ベクトル変調 (SVM) の代わりにキャリア比較パルス幅変調 (PWM) をベースにした制御方式を提案、実装、検証する。図 2 はその方式を採用した場合のスイッチング信号の作成例である。本方式では 3 つのキャリアを用いる。内 2 つ (Carrier 1 と 2) は三角波で残り 1 つ (VF Carrier) は電圧指令値によって波形をかえる。これら 3 つを電圧指令値 v_u, v_v, v_w と比較することによって信号波形を生成する。

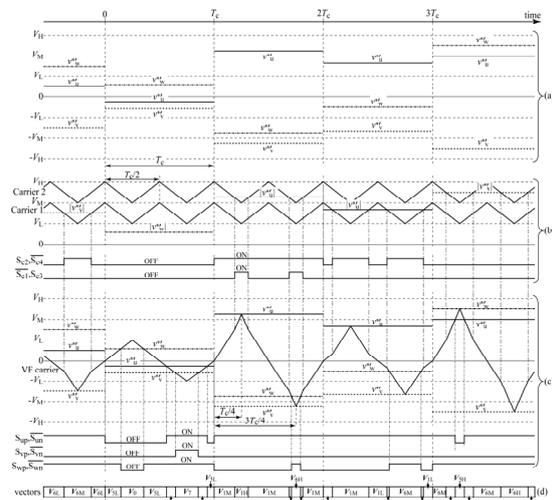


図 2 キャリア比較パルス幅変調 (PWM) をベ

ースにした制御方式

(2) 蓄電デバイスの電圧制御方法の改善

(1)で開発した制御には、図2に示したキャリアを3つ使う場合 (Variation 1) に加えて、VF Carrier と carrier 2 のみを使った場合 (Variation 2) と VF Carrier のみを使用した場合 (Variation 3) の3つのバリエーションがある。図3はそれぞれのバリエーションを採用した時の蓄電デバイスへの入力電力である。バリエーションごとに電力が異なるこの特性を使って、蓄電デバイスの電圧に応じてバリエーションを切替える充電法を開発し運転効率を改善する。

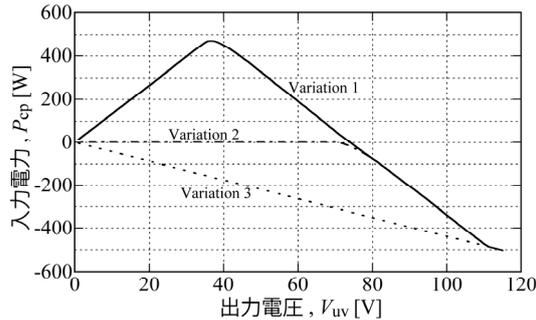


図3 バリエーションごとの蓄電デバイスへの入力電力

(3) 弱め界磁制御の導入

次に示す制御ブロック図に示した弱め界磁制御を導入し、動作検証を行う。なお図中の電圧制御ブロックに本研究(1)で開発した制御方法が適用される。

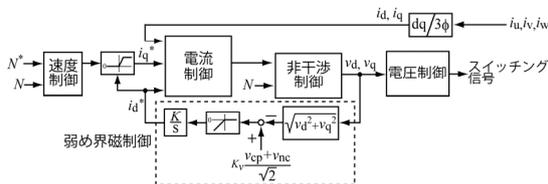


図4 弱め界磁制御を導入した制御

(4) 電解コンデンサの代用を可能にする制御方式の開発

電解コンデンサは静電容量が電気二重層キャパシタより低いため、電圧変動が大きい。そのため、加減速の途中でバリエーションの切替えを行う必要がある。電解コンデンサに蓄えられるエネルギーをオブザーバにより推定し、加減速終了後にその総和がゼロ (図中において $\Delta E_{cp1} + (-\Delta E_{cp2}) + \Delta E_{cp3} = 0$) となるように切替える方法を採用する。

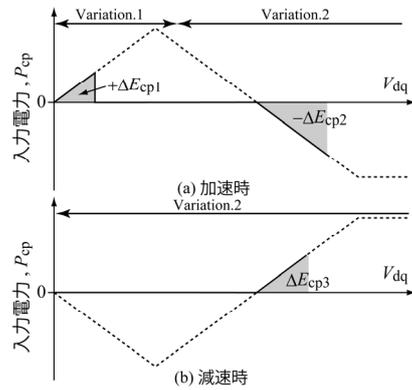


図5 電解コンデンサの代用を可能にする制御方式

4. 研究成果

(1) 提案する制御方式

キャリア比較パルス幅変調(PWM)をベースにした制御方式の実装を行い、想定通りの動作を得ることができた。また空間ベクトル変調(SVM)に比べて、制御に必要な演算時間を1/3に圧縮出来ることを確認した。次に本制御方式を実装した提案装置の性能結果を記す。

① 駆動性能

図6(a)と(b)はそれぞれ今回開発した制御方式を組み込んだ提案装置と従来装置による三相モータの駆動結果である。速度Nと電流 i_d, i_q に着目して比較を行うとわかるように提案装置は従来装置と同じ駆動性能で三相モータを駆動できることを確認した。

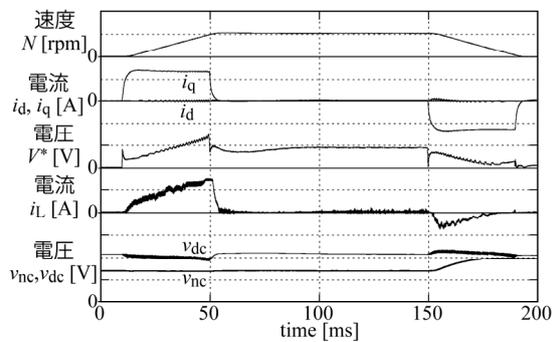


図6(a) 従回路の動作波形

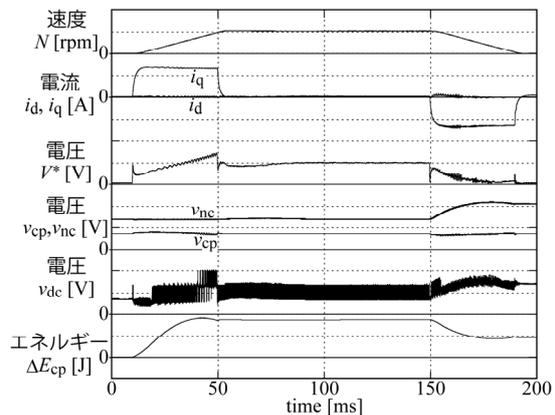


図6(b) 提案回路の動作波形

② 効率について

図6に示した実験条件での効率は提案装置で66.8%, 従回路で58.3%であり8.0%以上の効率改善効果が確認できた。また図7は単相モータを想定した場合の効率比較である。この結果からも提案装置は従来装置に比べて効率を大きく改善できることを確認できた。

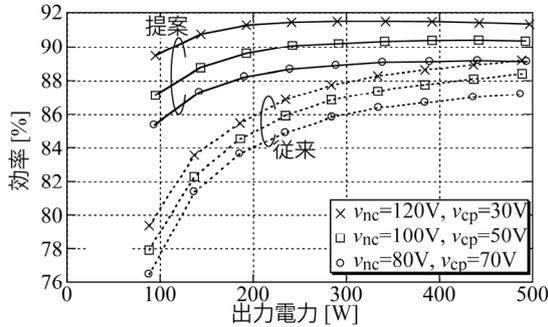


図7 効率の測定結果

③ 出力波形について

図8は提案回路と従回路の出力電圧波形を示したものである。提案回路は3つの振幅レベルを有していることが確認でき、その結果、出力電流の全高調波歪(THD)は提案回路で1.99%, 従回路で3.94%であり2%近く改善できることを確認した。

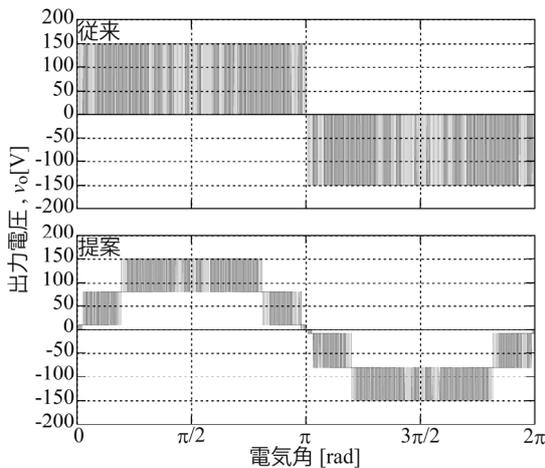


図8 出力電圧

以上から提案装置が従来装置に比べて同じ駆動性能を維持しつつ、優れた効率・出力波形特性を有することが確認できた。

(2) CP回路のコンデンサの充電方法

図9はバリエーションの切換えによって行った蓄電デバイスの電圧制御結果である。0.5V という非常に狭いレンジの中に電圧を制御できることを確認できる。また切換え方を最適化することによって4%もの効率改善効果を確認でき、開発した制御方法が有効に機能していることが確認できた。

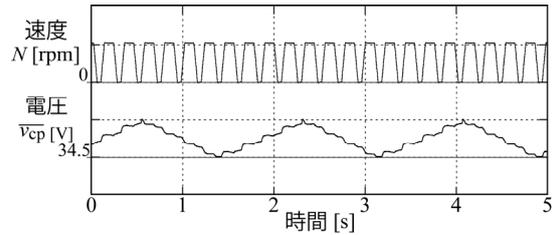


図9 電圧制御時の波形

(3) 弱め界磁制御の導入

弱め界磁制御を提案装置に適用し動作特性の検証を行った。図10(a)と(b)に弱め界磁を行わない時と行った時の動作結果を示す。速度Nと電流*i_d*, *i_q*を比較することでわかるように弱め界磁を行うことで動作性能を改善できていることが確認できた。また蓄電デバイスのエネルギーの変化量が弱め界磁を用いることによって減少しており、運転効率にわずかではあるがプラス働いていることを確認した。これにより弱め界磁制御が有効に機能していることが確認できた。

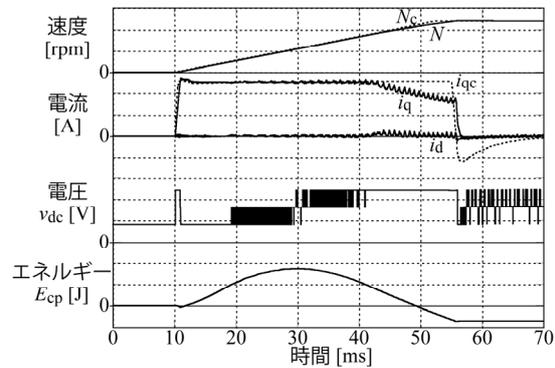


図10(a) 弱め界磁を行わない時の波形

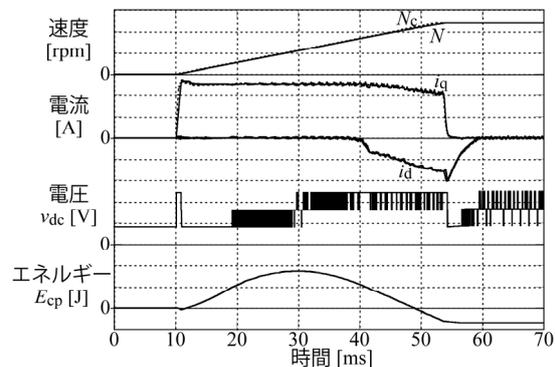


図10(b) 弱め界磁を行った時の波形

(4) 蓄電デバイスが低静電容量の時の動作確認

図11は蓄電デバイスがアルミ電解コンデンサである時の制御方法を採用した時の動作結果である。連続した加減速運転の下でも電解コンデンサの電圧 *v_{cp}* は一定の繰り返しパターンを保っており、モータ速度は指令に追従できていることが分かる。これにより開発した制御方式が有効に動作していることを確認できた。

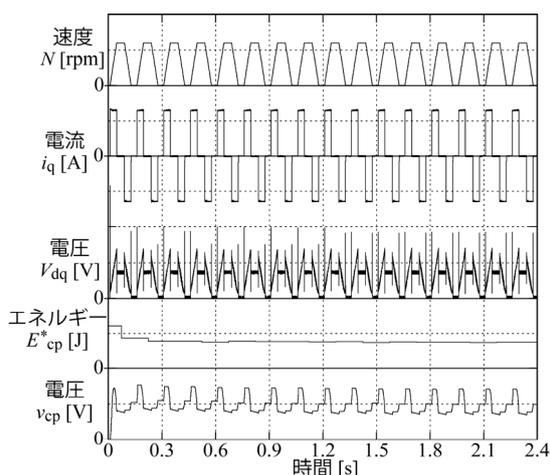


図 11 電解コンデンサを使用した時の波形

松本 洋和 (MATSUMOTO Hirokazu)
 福岡大学・工学部・准教授
 研究者番号：40526406

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① Hirokazu Matsumoto, Yasuhiko Neba and Hiroyuki Asahara, Variable-Form Carrier-Based PWM for Boost-Voltage Motor Driver With a Charge-Pump Circuit, IEEE Transaction on Power Electronics(査読有り), Vol.62, 2015, p4728-4738.

DOI: 10.1109/TIE.2015.2404304

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① 松本洋和、根葉保彦、チャージポンプ回路を用いた昇圧形モータドライバの電圧制御シミュレーション、平成 27 年電気・情報関係学会九州支部連合大会、平成 27 年 9 月 26 日～9 月 27 日、福岡大学(福岡県・福岡市)
- ② Hirokazu Matsumoto and Yasuhiko Neba, Study on A Boost Motor Driver with Low-Capacitance Charge-Pump Circuit, IEEE PEDS 2015, June 9-12, 2015, Sydney (Australia)
- ③ 松本洋和、根葉保彦、チャージポンプ回路を用いた昇圧形モータドライバの電圧制御シミュレーション、平成 27 年電気学会全国大会、平成 27 年 3 月 24 日～3 月 26 日、東京都市大学世田谷キャンパス(東京都)
- ④ 松本洋和、根葉保彦、麻原寛之、チャージポンプ回路内のコンデンサが低静電容量である時の昇圧形モータドライバの動作性能の検証、平成 26 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会、平成 26 年 9 月 18 日～9 月 19 日、鹿児島大学郡元キャンパス(鹿児島県・鹿児島市)

〔その他〕

福岡大学工学部電気工学科ホームページ
<http://te.tec.fukuoka-u.ac.jp/matsumoto/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者