

負荷中性点を用いた二段昇圧コンバータによる モータ低速運転時のモータ損失低減法の検討

五十嵐 大介*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Investigation of a Motor Loss Reduction Method in Low Speed Range for a Two-stage Boost Converter
using the Neutral Point of a Motor
Daisuke Ikarashi, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

近年、バッテリーを用いてモータを駆動する技術が電気自動車や鉄道車両で必要とされている。これらのシステムではインバータとモータの損失低減のため、バッテリー電圧を昇圧回路で昇圧しているが、昇圧リアクトルが装置の大形、高コスト化の一因となる。そこで、著者らはモータの中性点に昇圧回路を接続した二段昇圧コンバータを提案した⁽¹⁾。提案回路では従来回路と比べ、昇圧リアクトルへの印加電圧を低減できるため、昇圧回路を小形、低損失化できる。しかし、提案回路ではゼロ相電圧をモータに印加するため低速時に鉄損が従来回路に比べ増加する。

本論文ではゼロ相電圧によるモータ鉄損低減を目的として提案回路にPAM制御(Pulse Amplitude Modulation)とPWM制御を併用し、インバータ損失とモータ損失について実験的評価を行う。その結果、低速時のモータ損失を最大約85%低減し、その有効性を確認したので報告する。

2. 提案回路のゼロ相電圧

図1に従来回路図を示す。従来回路では、バッテリーの電圧を昇圧回路により昇圧し、モータを駆動する。この結果、モータに流れる電流を低減でき、高効率を期待できる。しかし、従来回路では、昇圧回路の昇圧リアクトルが装置の大形、高コスト化の要因となる。

図2に提案回路図を示す。提案回路では、モータの負荷中性点にバッテリーと昇圧回路を接続する。これにより、提案回路のインバータ回路では、モータの漏れインダクタンスを利用して2倍に昇圧動作を行うことができる。そのため、提案回路では従来回路と比較して、昇圧回路のスイッチング損失を1/2に低減でき、リアクトルへの印加電圧も低減できるため、リアクトルも小形、低損失化できる。

しかし、提案回路では中性点を接続しているため、2つのゼロ相電圧がモータ巻き線に印加される。インバータ上アームスイッチ全ONの場合には、負荷両端には直流リンク電圧 E_{dc1} と中性点電圧 E_{dc2} の差分の電圧が印加され、インバータ下アーム全ONの場合には、負荷両端には、 $-E_{dc2}$ が印加される。

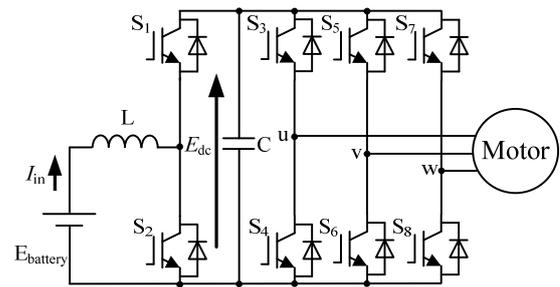


Fig. 1 Conventional circuit.

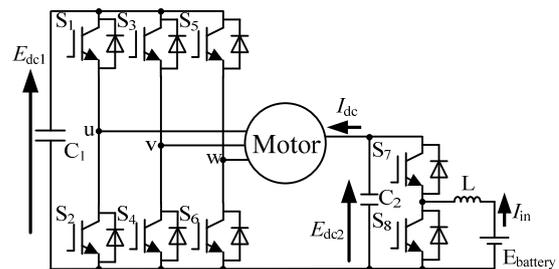
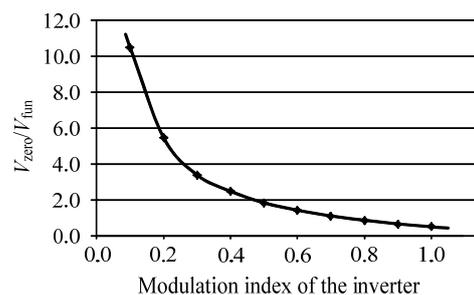


Fig. 2. Proposed circuit.



V_{zero} : Zero phase voltage based on the neutral point of the motor
 V_{fun} : Fundamental frequency components of load phase voltage

Fig. 3. The relationship between the modulation index and the zero phase voltage based on the neutral point of the motor.

図3に直流リンク電圧を定格値で一定としたときの負荷相電圧の基本波成分に対するゼロ相電圧成分の割合とインバータ変調率との関係を示す。変調率が低下するにつれて、負荷相電圧に含まれるゼロ相電圧成分の振幅が増加することがわかる。従来のモータ駆動システムでは、インバータの直流中点を基準とした相電圧にゼロ相電圧を含んでいて

も、線間電圧でキャンセルされるため、モータ巻き線に印加される電圧(負荷中性点基準の相電圧)は、ゼロ相分を含まない。しかし、提案方式はモータ中性点を接続するため、モータ巻き線に印加される電圧にゼロ相電圧を含む。

特に低変調率時には、ゼロ相電圧成分の振幅が増加するため、これがモータ鉄損増加の原因となる。ゼロ相電圧により発生する磁束はモータ巻き線の巻き線方向によって強め合ったり弱め合ったりする。強め合う場合、磁束が飽和しスロット間のティース部でモータ鉄損が増加する。

3. 提案回路への PAM 制御の併用

図4に提案回路にPAM制御を併用した際の制御ブロックを示す。ここではPWM制御とPAM制御を併用し、インバータはPWMで変調率を一定に保ち、直流リンク電圧を変化させることでインバータの出力電圧を制御する。このため、モータ低速運転時に変調率を高くすることで、ゼロ電圧ベクトル期間を短くし、かつ、直流リンク電圧も低下させることで、モータ巻き線に印加されるゼロ相電圧を低減する。提案回路では、初段の昇圧回路とインバータ回路で二段昇圧を行っているため、PAM制御も二段階で行う。まず、低速領域では、昇圧回路は停止させ、インバータ回路の昇圧比のみにより出力電圧を制御する。昇圧比の制御は、インバータ指令値にゼロ相指令を重畳することで実現できる⁽²⁾。このとき、入力電圧を V_{in} 、出力電圧指令値を V_{out}^* とするとゼロ相電圧指令値 V_0^* は(1)式で表される。

$$V_0^* = \frac{V_{in} - 0.5 \cdot V_{out}^*}{0.5 \cdot V_{out}^* + V_{in}} \dots\dots\dots(1)$$

インバータの昇圧動作のみでは、出力最大相電圧は入力電圧 V_{in} で制限されるため、出力電圧がそれ以上必要となる速度では、ゼロ相電圧指令はゼロとして、昇圧回路によるインバータ出力電圧制御へ切り替える。

4. 実験結果

図5に提案回路PWM制御とPAM制御でのインバータ損失測定結果を示す。1.5kW、6極、36スロットのIPMモータを用いて、無負荷状態でモータ速度を変化させたときの損失を測定した。PAM制御では、低速時の直流リンク電圧を低減できるため、インバータ損失を低減できる。その結果、インバータ損失を最大約40%低減できることがわかった。なお、無負荷時には従来回路PWM制御時のインバータ損失は提案回路PWM制御時とほぼ同等にできる。

図6に提案回路PWM制御のみとPAM制御でのモータ損失測定結果を示す。提案回路PWM制御時と比較して、提案回路PAM制御時ではモータ損失を最大85%低減でき、従来回路PWM制御時とほぼ同程度となる。これは、PAM制御で負荷相電圧に含まれるゼロ相電圧成分の振幅を低減し、

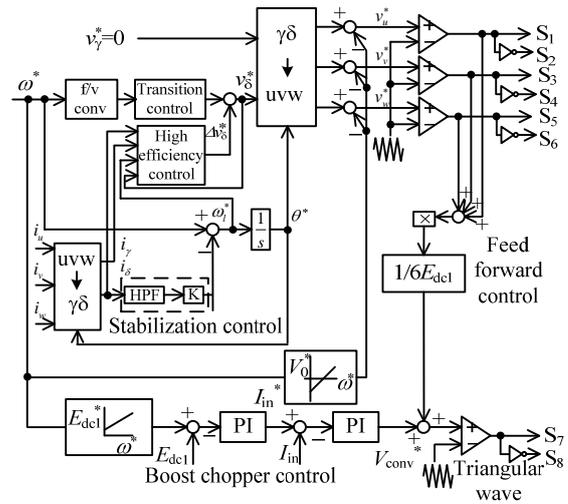


Fig. 4 Control block diagram of PAM control.

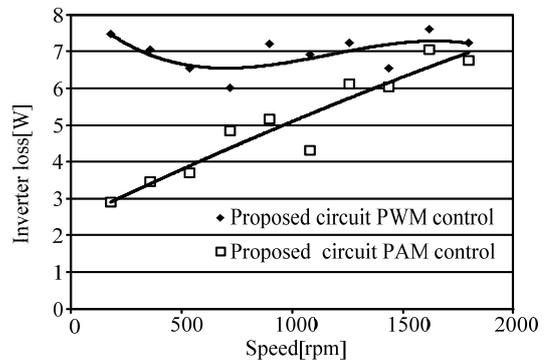


Fig. 5. Inverter loss comparison of the PWM control with the PAM control in the proposed circuit.

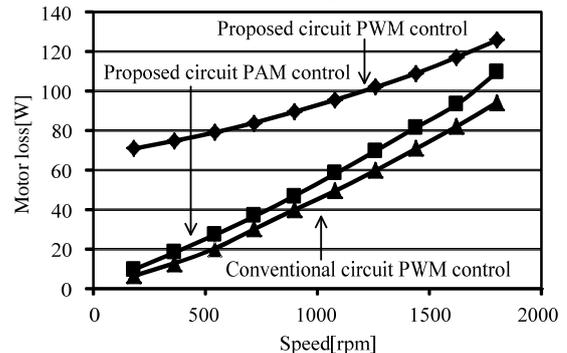


Fig. 6. Motor loss comparison of the PWM control with the PAM control in the proposed circuit.

モータ鉄損を低減できたためである。これより、提案回路へのPAM制御適用が有効であることを確認した。今後は、詳細な鉄損の解析と提案システムと従来システムの体積比較を行う予定である。

文献

- (1) J.Itoh, D.Ikarashi : IPEC-Sapporo, 2311-3, 2010
- (2) 片桐・伊東:平成19年電気学会全国大会, Vol.4, pp.142-143