

学位論文の要旨

氏名

今給黎 明大

学位論文題目

電流可逆チョップ付PWMインバータ駆動PMモータシステムの
定出力領域における高効率化に関する研究

本論文は、低電圧の電源を用いた永久磁石 (PM) モータ駆動システムの定出力領域 (高速駆動時に一定電力の制約のもとで駆動される領域) における高効率化について、制御、電子デバイスの視点から方法およびその効果をまとめたものである。

PMモータの高速駆動を実現する従来の制御方法には、弱め磁束制御や直流リンク電圧制御を用いる方法がある。弱め磁束制御とは、インバータによってPMモータの永久磁石磁束を弱める負の d 軸電流を制御し、PMモータの端子電圧を電源電圧以下に保って駆動する方法である。一方、直流リンク電圧制御とは、電流可逆チョップを用いて高速駆動時のPMモータ端子電圧の上昇に応じて、直流リンク電圧を昇圧して駆動する方法である。

本研究で取り扱う電流可逆チョップ付PWMインバータは、弱め磁束制御、直流リンク電圧制御のどちらも適用できる。しかしながら、これまで定出力領域の高効率化という視点で、両制御をどのように組み合わせるべきかについて議論した文献はみられない。また、本システムの適用用途であるハイブリッド自動車、電気自動車等のシステムでは、高速走行に相当する定出力領域の高効率化が重要な課題である。これらの背景を踏まえ、本研究では、制御の視点から定出力領域のシステム効率を最大にする制御を提案し、提案制御法の適用によるシステム効率改善の検討を行った。一方、電子デバイスの視点では、実用化が始まった次世代電子デバイスであるSiC-MOSFETを積極的に活用することによるシステム効率改善の検討を行った。

第1章では、研究の背景、定出力領域におけるPMモータ駆動方法の研究動向および本研究の目的を述べ、本論文の概要の説明とともに本研究の位置付けについて言及した。

第2章では、定出力領域において弱め磁束制御と直流リンク電圧制御の併用量を調整する制御法を提案した。ここで、定出力領域で弱め磁束制御を適用するとPMモータ銅損の増加によりシステム効率が低下する。また、直流リンク電圧制御を適用すると電流可逆チョップ損失の増加によりシステム効率が低下する。提案制御法は、両制御を適切に併用することによりシステム損失を最小にする制御法であり、定出力領域でシステム効率が最大となるところで常にPMモータを駆動する制御法である。

第3章では、PMモータの dq 軸モデル、最大トルク/電流制御、弱め磁束制御、直流リンク電圧制御等の制御式の導出を行い、シミュレーションに用いるPMモータの解析モデルを導出した。また、インバータの空間ベクトル変調、電流可逆チョップの三角波比較変調の説明を行った。

第4章では、定出力領域のシステム効率を議論するために、本研究で新たに構築した「各部損失を等価電流源で模擬したシミュレーションモデル」の説明を行った。このシミュレーションモデルは、従来のシミュレーションモデルと電流可逆チョップ、インバータ、PMモータの各損失を模擬した等価電流源から構成される。このシミュレーションモデルによって、提案制御法を適用した場合のシステム損失の変化を詳細に模擬することができる。構築したシミュレーションモデルは、実機で使用する電子デバイス、リアクトル、PMモータが適用用途ごとに異なるような場合でも、システム効率を計算し設計に役立てることができるため、ツールとして有効である。さらに、PMモータ駆動システム以外のシステム効率の検討にも用いることができるため、他の高効率化に関する検討が必要なシステムの設計にも応用できるツールとして有効である。

第5章では、提案制御法を用いれば定出力領域のシステム効率を2%程度改善できることをシミュレーションにより確認した。また、バッテリー電圧が低い場合とPMモータの銅損と鉄損の値が逆転する場合において、システム効率を改善できることを明らかにした。以上の検討により、提案制御法の有効性を示した。さらに、提案制御法を実機へ適用する方法として、提案制御法の直流リンク電圧指令値作成方法についてまとめた。

第6章では、ハイブリッド自動車や電気自動車、そして産業用途のモータ駆動でも広く用いられている電子デバイスであるIGBTを使用し、電流可逆チョップ付PWMインバータを試作した。これを用いた実験により、提案制御法によって定出力領域のシステム効率を5%程度改善できることを示した。また、実験結果とシミュレーション結果との比較によって、システム各部の効率がシミュレーション、実験とも同様な傾向を示すことを確認した。以上により、構築したシミュレーションモデルの有効性以及提案制御法の有効性を実機においても示した。

第7章では、第6章で試作した電流可逆チョップ付インバータの電子デバイスを次世代電子デバイスであるSiC-MOSFETに置き換えて、定出力領域における提案制御法適用時のシステム効率を評価し、制御、デバイスの視点で試みたシステム効率改善手法によって、定出力領域におけるシステム効率を7%（提案制御法：+5%、SiC-MOSFET：+2%）と改善できることを示した。これより、定出力領域における高効率化のためには、提案制御法+SiC-MOSFETの積極的な適用が有効であること、コストの点でSiC-MOSFETの適用が難しい場合は、提案制御法のみ適用でも定出力領域におけるシステム効率の改善が可能であることを明らかにした。

第8章では、結論としてこれまでの章の総括を行った。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

A study of high efficiency drive in constant power region for PM motor driven by PWM inverter with voltage booster

Name: Akihiro Imakiire

This thesis summarized the research on methods and effects of improvement of system efficiency in constant power region for permanent magnet (PM) motor drive system using low voltage power source, from the view point of control and power device.

To realize the high-speed drive of PM motor, there are two main conventional control methods. Those are the flux weakening control and the DC link voltage control. The flux weakening control is a method to limit the terminal voltage of the PM motor below power supply voltage by an inverter. The inverter controls d -axis current to weaken the magnetic flux of PM motor. On the other hand, the DC link voltage control is a method to boost the DC link voltage by a voltage booster according to increase of terminal voltage of the PM motor in high-speed region.

A pulse width modulated (PWM) inverter with voltage booster can be applied both flux weakening control and DC link voltage control. However, no literature has discussed on combination of these two controls to achieve high efficiency in the constant power region until now. In addition, in case that the PWM inverter with voltage booster is used for such as hybrid and electric vehicles, improving the system efficiency for not only driving on urban area but also on high-speed area (constant power region) is very important.

Based on the above backgrounds, the author proposes a control to minimize the system loss in the constant power region, and investigates the improvement of the system efficiency by applying proposed control. Furthermore, the author investigates the improvement of the system efficiency by utilizing SiC-metal oxide semiconductor field effect transistors (MOSFETs) which are next-generation power devices.

In Chapter 1, the background, study trend of PM motor drive method in constant power region and purpose of this study are described. Also, the status of this study and the summary of this thesis are mentioned.

In Chapter 2, a control method which adjusts the ratio of combination of the flux weakening control and the DC link voltage control is proposed. The flux weakening control increases the copper loss of the PM motor. On the other hand, the DC link voltage control increases the loss of the voltage booster. In the other words, each control causes different losses in the constant power region.

Proposed control makes a system loss minimize in the constant power region with adjusting the ratio of both controls appropriately.

In Chapter 3, dq axis model of PM motor, equations for the maximum torque per ampere control, the flux weakening control and the DC link voltage control are derived to produce an analytical model of the PM motor drive system. The analytical model is used for simulation with loss calculation. In addition, the space vector modulation for inverter and the triangular carrier PWM modulation for voltage booster are also explained.

In Chapter 4, a newly simulation model which estimates each parts of system losses as an equivalent current source is built to calculate the system losses in the constant power region. The simulation model consists of the equivalent current sources which simulates each loss of voltage booster, inverter and PM motor. By using the simulation model, the loss of the system can be simulated in detail when the proposed control is applied. In case that parts or machine such as power module, DC reactor and PM motor are changed in actual machine according to specific application, the simulation model is still effective as the tool which it can be used to design from the point of the system efficiency and performance. Furthermore, it is shown that proposed simulation model is effective as the tool which can be used for the examination of the system performance of not only the PM motor drive systems but also the other drive systems.

In Chapter 5, by the simulation results, it is confirmed that proposed control can improve the system efficiency up to around 1 % in constant power region. Especially, for lower battery voltage and larger value of iron loss of the PM motor, it is cleared that proposed control can improve a system performance. In this chapter, for applying the proposed control to an actual machine, the reference value using the simulation model are also shown. By the above investigation, the effectiveness of the proposed control is clarified.

In Chapter 6, a prototype drive system is made using insulated gate bipolar transistors (IGBTs) which are used hybrid vehicles, electric vehicles and industrial applications widely. By the experiment using the prototype drive system, it is confirmed that the system efficiency can be improved maximum 5 % in constant power region by proposed control. As a result, it is shown from the simulation results that proposed control is effective even for different set of PM motor and power devices. As mentioned above, the effectiveness of the simulation model and proposed control is confirmed in actual PM motor drive system.

In Chapter 7, the power devices, IGBTs, of the prototype drive system in Chapter 6 are replaced by SiC-MOSFETs. The SiC-MOSFETs are next-generation power devices. The system efficiency in constant power region is evaluated when the prototype drive system is used and proposed control is applied. It is confirmed that the system efficiency in the constant power region is improved by maximum 7 % (proposed control: 5 %, SiC-MOSFET: 2 %). Therefore, positive use of proposed control and SiC-MOSFETs is recommended. When applying the SiC-MOSFETs is difficult by reason of cost, even only proposed control can be improve the system efficiency in constant power region.

In Chapter 8, the results of this study are summarized.