

学位論文の要旨

氏名	森辰也
学位論文題目	ダブルインバータ駆動二重三相永久磁石同期モータシステムにおいて小形・低コストを実現するスイッチング法の研究

本論文は、電動パワーステアリング等に用いられるダブルインバータ駆動二重三相永久磁石同期モータシステムの小形・低コスト化を目的として、ダブルインバータのスイッチング法に関する研究成果をまとめたものである。

近年、インバータ駆動永久磁石同期モータシステムの信頼性向上への要求から、エレベータや電動パワーステアリング等にインバータと巻線を二重化したダブルインバータ駆動二重三相永久磁石同期モータシステムが採用されている。このうち、電動パワーステアリングにおいては、冗長性を確保しながらも、システムの小形・低コスト化が非常に重要となる。ダブルインバータ駆動二重三相永久磁石同期モータシステムの小形・低コスト化を実現する従来の手法として、平滑コンデンサの小形化を実現する零相電圧相違法や電流センサの小形化を実現する下アーム3シャント方式が既に提案されている。

平滑コンデンサの小形化を実現する零相電圧相違法は、2台のインバータの零相電圧を異なる値に設定し、平滑コンデンサから2台のインバータへの放電のタイミングをずらすことで、平滑コンデンサを流れる電流を低減する方法である。この方法は、1台のバッテリーで2台のインバータを駆動するシステムにおいてのみ有効であり、2台のインバータの零相電圧の差が大きいほど、平滑コンデンサを流れる電流の低減効果が大きくなる。

これに対して、電流検出センサの小形化を実現する下アーム3シャント方式は、インバータの下アームのパワー素子に直列に配置したシャント抵抗によって電流を検出する方式である。この方式では、シャント抵抗の端子の電位は常に零近傍であるため、シャント抵抗およびその端子電圧増幅用オペアンプを非絶縁としたまま、安価な構成で電流を検出できる。インバータの下アームのパワー素子がオンするときに電流の検出が可能であるため、電流検出タイミングはインバータのキャリア三角波の山に設定され、変調方式としては高変調率時において有利な、3相の電圧のうち最も低い相の下アームパワー素子を常にオンさせる2相変調法が一般に使用される。さらなる小形・低コスト化をめざして、上記の下アーム3シャント方式と零相電圧相違法を組み合わせた場合、下アーム3シャント方式での電流検出に必要な下アームパワー素子のオン時間の制約により、零相電圧の差を十分に大きく設定することができなくなり、結果として平滑コンデンサの電流を十分

に低減できなくなる、つまり小形・低コスト化に支障をきたすという課題があった。

また、電流検出方式として下アーム3シャント方式よりも小形・低コストである母線1シャント方式がある。この方式は、インバータの直流母線の電流の値と検出タイミングにおけるインバータのスイッチング状態の情報からマイコンでの演算によりインバータ出力の3相電流を再構築する方式であり、検出した電流値と実際の電流のキャリア周期における平均値との誤差によってモータのトルクにリップルが生じるため、トルクリップルの低減が重要なダブルインバータ駆動二重三相永久磁石同期モータシステムに適用できないという課題があった。

これらの背景を踏まえ、本研究では、まず、1台のバッテリーで2台のインバータを駆動するシステムにおいて小形・低コスト化を実現する方法として、電流検出に下アーム3シャント方式を用いた上で平滑コンデンサを流れる電流を十分に低減するスイッチング法の検討を行った。さらに、小形・低コスト化を実現する方法として電流検出に母線1シャント方式を用いた状態でトルクリップルを抑制するスイッチング法の検討を行った。

第1章では、研究の背景、ダブルインバータ駆動二重三相永久磁石同期モータシステムの研究動向、解決すべき課題および本研究の目的を述べ、本論文の概要と本研究の位置付けについて言及した。

第2章では、1台のバッテリーで2台のインバータを駆動する二重三相永久磁石同期モータシステムにおいて、下アーム3シャント方式を用いた上で平滑コンデンサを流れる電流を低減するスイッチング法を提案した。提案法では、2台のインバータのキャリア三角波の位相を180度ずらし、2台のインバータに対する電圧指令を中間相電圧と最小相電圧との差異に応じてシフトすることにより、十分な電流低減効果を目指しており、実機試験により、2相変調法、零相電圧相違法および提案法を比較し、提案法が平滑コンデンサを流れる電流をより低減できることを示した。

第3章では、母線1シャント方式を用いたダブルインバータ駆動二重三相永久磁石同期モータシステムにおいてトルクリップルを低減するスイッチング法を提案した。具体的には、まず、二重三相永久磁石同期モータの電圧方程式に基づいて電流検出誤差およびトルク誤差を導出し、次に、そのトルク誤差を低減するスイッチング法を提案した。提案法においては、電流検出時刻におけるダブルインバータの2つの電圧ベクトルが互いに隣接するように、かつ二重三相永久磁石同期モータの回転子位置に応じたスイッチングを行う。実機試験により、提案するスイッチング法が母線1シャント方式を用いたシステムにおいてトルク脈動を低減できることを示した。この方法は、2台の独立したバッテリーに対しても適用できる。

第4章では、結論としてこれまでの章の総括を行った。第2章、第3章で提案、検討したスイッチング法を用いれば、ダブルインバータ駆動二重三相永久磁石同期モータシステムのさらなる小形・低コスト化が可能となり、幅広い用途に対しての貢献が期待できる。

Summary of Doctoral Dissertation

A study of voltage pulse pattern for PWM double inverters in order to reduce size and cost of double winding permanent magnet synchronous motor drive systems

Name: Tatsuya Mori

This dissertation summarized the research on optimum voltage pulse pattern for PWM double inverters in order to reduce size and cost of double winding permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive systems.

Recently, to realize higher reliability, the PWM double inverter fed double winding PMSMs, which have two windings and are driven by two inverters, are applied for elevator systems, electric power steering systems and so on. It is very important for electric power steering systems to reduce the size and cost of system. Until now, for reducing the size and cost of system, the neutral voltage shifting method and the three-shunt current sensing method have already been reported.

The neutral voltage shifting method sets neutral voltages in each inverter of the PWM double inverters to different values and changes the timing of the discharging of the dc link capacitor currents. As a result, the method can reduce the capacitance values of the dc link capacitors. In this method, the larger the difference between both neutral voltages is, the smaller the capacitor currents are.

The three-shunt current sensing method measures inverter lower-arm currents. In this case, the voltages across the shunt resistances are nearly zero and low-cost shunt resistors and operational amplifiers can be used to sense the inverter currents. The method can only measure the currents when low-side switches are on. And the currents are generally sensed at the instant of the peak value of carrier signal of inverter. Therefore, it is better that the low-side switch of the phase whose the voltage reference has minimum value is constantly on state even if the modulation index of inverter becomes high. For that reason, the two-phase modulation is used for the three-shunt current sensing method generally.

However, if the three-shunt current sensing method and the neutral voltage shifting method are combined in order to reduce the size and cost of system more, the difference between neutral voltages is not sufficiently for on-times of low-side switches to detect inverter current by using the three-shunt current method. In this case, the capacitor currents are not able to be reduced sufficiently.

Even though the single-shunt current sensing method needs less size and less cost than the three-shunt current sensing method, the double winding PMSM drive

system with the single-shunt current sensing method has not been reported. The reason is as the following. The single-shunt current sensing method needs knowledge of the dc link current and the corresponding switching state, and recreates each of three-phase currents of the inverter in a microprocessor. And the difference between recreated and average currents in one carrier period causes ripples in motor torque. It is very important to reduce torque ripples in the electric power steering applications. Therefore, until now, the single-shunt current sensing method has not been used in the application for the electric power steering systems in spite of its size and cost.

Based on the above backgrounds, the author proposed two voltage pulse patterns. One of them is a pulse pattern which can reduce capacitor currents in the dc link of PWM double inverters with the three-shunt current sensing method. The other is a pulse pattern for PWM double inverters with the single-shunt current sensing method to reduce torque ripples of double winding PMSM.

In Chapter 1, background, study trend of PWM double inverter fed double winding PMSM systems and purpose of this study are described. Also, the status of this study and the summary of this paper are mentioned.

In Chapter 2, the voltage pulse pattern, which can reduce capacitor currents in the dc link of PWM double inverters with the three-shunt current sensing method, is proposed. In the proposed voltage pulse pattern, the phase difference between carrier signals in each inverter of the PWM double inverters is set to 180 degrees, and the voltage references of double inverters are shifted in accordance with the difference between the voltage reference of the medium value and that of the minimum value. Conventional neutral voltage shifting method and proposed method are compared by the experimental results. In contrast to the neutral voltage shifting method, the proposed method can reduce capacitor currents in the dc link of double inverters more, while maintaining the harmonics of the inverter output current.

In Chapter 3, the voltage pulse pattern for PWM double inverters with the single-shunt current sensing method to reduce torque ripples of double winding PMSM is proposed. First, the current error and the torque error caused by the single-shunt current sensing method are analyzed based on the voltage equations of double winding PMSMs. Next, the voltage pulse pattern to reduce the torque error is derived. In the proposed voltage pulse pattern, two voltage vectors of double inverters at the instant of current detection are adjacent to each other and are changed in accordance with the rotor position of double winding PMSM. Experimental results demonstrate that the proposed voltage pulse pattern can reduce torque ripples caused by the single-shunt current sensing method. The proposed voltage pulse pattern is also available for multi battery systems.

In Chapter 4, the results of this study are summarized. Proposed voltage pulse patterns can contribute to a lot of kind of applications for reducing the size and cost of their systems.