Two phase modulation for inverter-driven hybrid-excitation-type synchronous machines

ハイブリッド励磁形同期機駆動用インバータの駆動方式に関する研究

Hiroataka SUZUKI, Takehisa HIRAYAMA, Muhamed Fitri Bin Hanafi and Hideki OHGUCHI

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Tokai University, 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292 Japan

TEL: x81-463-58-1211(EX.6243) FAX: x81-463-50-2426 e-mail: ohguchi@tsc.u-tokai.ac.jp

(Received 27 December, 2019 Accepted 12 February, 2020)

A novel inverter without the chopper for the field circuit was proposed for hybrid-excitation-type synchronous machines. In this inverter, a switch is connected between the neutral point of the armature windings of the machine and the field circuit. The field flux in the machine is increased when the switch is on, and is unchanged when off. By using a circuit simulator, we have clarified that two phase modulation can be used to the inverter when the switch is off.

Keywords : Hybrid-excitation-type synchronous machine, Permanent magnet, Inverter, Two phase modulation

I. INTRODUCTION

現在、様々な機械に永久磁石モータ (PM モータ) が採用されている。永久磁石モータが採用される理由として、回転子に内蔵された永久磁石が磁束を発生させることで誘導機のように回転子に二次電流が流れないため損失が低減し、高効率化と小型・軽量化を実現可能なためであることが挙げられる。PM モータの適用例として、自動車様が挙げられる。自動車用主機モータは、低速域では大トルクかつ最高回転速度が高いという特徴がある。また、高トルクを発生させるためには界磁磁束が高い方が良く、高速回転させるためには界磁磁束が低い方が適する。

近年、自動車用 PM モータの高効率化を実現するべくモータ内の磁束を調整できる可変磁束モータの研究が進められている。可変磁束モータの 1 つである¹ハイブリッド励磁形同期機は、永久磁石と直流界磁巻線により界磁磁束を得ることができ、また永久磁石からの界磁を増減可能である。すなわち、可変磁束モータは、モータの運転中に電機子鎖交磁束を調整することが可能であり低速域での電流低減が可能となる利点がある。その反面、従来のハイブリッド励磁形同期機を駆動するためのパワ

ーエレクトロニクス装置はインバータとチョッパ二つ必要なため装置が大型化する可能性がある。装置の簡素化を目的として、本研究ではハイブリッド励磁形同期機駆動装置をインバータのみとした回路を²提案した。

インバータの変調方式の 1 つとして³二相変調がある。これは、元の正弦波の電圧指令値に零相成分を重畳する方式である。二相変調を行う上で、通常零相成分の電流は流れない。一方、界磁回路を制御するには零相成分を流す必要があり、Fig. 1 のモータ電機子巻線の中性点 O と界磁回路を界磁制御スイッチ S_0 を介して接続すると、二相変調の指令値に含有される零相電圧による電流も流れると考えられる。この場合、インバータは動作困難となると考えられるものの、零相電流が流れる回路において二相変調を適用した場合に、回路にどのような電流が流れるのか明らかとなっていない。そこで、本研究では提案回路において、界磁回路オフにおける二相変調の適用可否と、界磁回路オンにおける二相変調適用時のインバータ動作の明確化を目的とし、シミュレーションにより検証したので報告する。

II. METHODS

Fig. 1 に提案する簡素化したハイブリッド励磁形同期機駆動装置の回路図を示す。本回路は、(a)インバータ、(b)モータ等価回路、(c)界磁制御スイッチ S_0 、(d)界磁回路

SAS Award was given to this paper presented as Poster Presentation at the 2019 SAS Symposium.

から構成される。(a)のインバータは、直流を交流に変換する回路であり、6つのIGBTでスイッチングを行いPWM制御を行う。(b)のモータ等価回路は、誘起電圧、巻線抵抗、漏れインダクタンスで構成される。(c)の界磁制御スイッチ S_0 は、界磁回路の動作のオン・オフを切り替えるためのスイッチである。(d)の界磁回路は、平滑コンデンサと抵抗で構成され、抵抗は界磁巻線の巻線抵抗を表す。(d)の界磁回路の一方は界磁制御スイッチ S_0 を介してモータ電機子巻線の中性点 O へ接続され、他方はインバータのNラインへ接続される。界磁制御スイッチ S_0 をオンとすると界磁磁束が増加し、オフとすると界磁は永久磁石のみとなる。また、Fig. 2 に示すようにハイブリッド励磁形同期機は、(i)永久磁石、(ii)固定子鉄心、(iii)ヨーク、(iv)回転子鉄心、(v)界磁巻線、(vi)シャフトから構成される。永久磁石と直流界磁巻線から界磁磁束を得ることができ、また永久磁石からの界磁を増減可能となる。

インバータの変調方式として二相変調を適用する。

Fig. 3 に二相変調の波形を示す。 v_u^* は元の正弦波の相電圧の指令値、 v_u^{**} は零相を重畳した相電圧指令値、 v_{uv} は線間電圧である。Fig. 3 より、 v_u^{**} は正弦波ではないものの、 v_{uv} は正弦波となる。すなわち、インバータ出力線間電圧は正弦波となる。また、二相変調は三相変調に対してスイッチング回数が2/3回に低減するためスイッチング損失が低減するとともに電圧利用率が向上するという利点がある。

Fig. 1. Circuit configuration for hybrid-excitation-type synchronous machines.

Fig. 2. Structural drawing for hybrid-excitation-type synchronous machine.

今回界磁制御スイッチ S_0 をオンまたはオフとした場合において、Fig. 1 に示すインバータへ二相変調を適用し、回路動作をシミュレーションにより明確化する。本研究では回路シミュレータ PSIM を用いた。

Table 1 に解析条件を示す。

Fig. 3. Voltage waveforms of two-phase modulation.

Table 1. Simulation conditions.

Modulation method	Target value of current amplitude	Inverter output frequency	S_0
Two-phase modulation	4.3A	50 Hz	off on

III. RESULTS

Fig. 4 に S_0 =オフとしたときの、Fig. 5 に S_0 =オンとしたときのインバータ出力電流波形をそれぞれ示す。

Fig. 4. Inverter output current waveform when S_0 =off.

Fig. 5. Inverter output current waveform when S_0 =on.

Fig. 4 より界磁制御スイッチ S_0 オフ時はインバータ出力電流が交流電流となり目標値と同じ波高値約 4.3A、周波数 50 Hz の電流が出力されていることが分かる。また、Fig. 5 より界磁制御スイッチ S_0 オン時はインバータ出力電流の波高値が目標値の 15 倍を超え、かつ電流波形が歪み、三相同一かつ三倍の周波数の電流が出力されていることが分かる。通常の二相変調では流れない零相電流が流れたためインバータ出力電流が増加し、電流波形に歪みが生じたと考えられる。また、二相変調波形生成のための零相電圧は交流であり、この交流成分に対して界磁回路に備えるコンデンサは低インピーダンスとなる。そのため、零相電圧に起因する零相電流がコンデンサを流れることで、インバータ出力電流が増加し、電流波形が歪んだと考えられる。

IV.CONCLUSION

本研究では、ハイブリッド励磁形同期機駆動用の装置をインバータのみとした回路において、二相変調を適用した時の回路動作の明確化を目的とし、回路シミュレータ PSIM を用いて解析を行った。結果、界磁制御スイッチ

S_0 をオフにした場合には二相変調を適用できることを示した。一方、界磁制御スイッチ S_0 をオンにした場合にはインバータ出力電流が歪み、三相同一かつ三倍の周波数の電流が流れることが分かった。以上より、提案する簡素化した装置に二相変調を適用する場合には、界磁制御スイッチ S_0 をオフにし駆動する必要があることが今回の解析により明らかとなった。

今後の課題として、ハイブリッド励磁形同期機の設計が挙げられる。

REFERENCES

- ¹ T. Mizuno, K. Nagayama, T. Ashikaga and T. Kobayashi, *Electrical Engineering in Japan*, 117, pp. 110-123 (1996) (in Japanese).
- ² T. Hirayama, H. Suzuki, Muhamed Fitri Bin Hanafi and H. Ohguchi, 2019 SAS symposium ABSTRACTS, H-9 (2019) (in Japanese).
- ³ The Institute of Electrical Engineers of Japan, *Semiconductor power conversion circuit*, pp. 124-125 (1987) (in Japanese).