

전류위상 변화 시 고정자 권선방법에 따른 이중 3상 영구자석 동기 전동기의 특성 해석

The Characteristics Analysis of a PMSM with Current Angle Variations according to Stator Winding Arrangements

김 태 형^{*}

Tae Heoung Kim^{*}

Abstract

A Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) for an electrical power steering system (EPS) is adopting various dual three-phase type stator windings to get the high fault tolerance capability when the motor runs at the failure condition. In this paper, we analyze the effects of stator winding arrangements on the characteristics such as torque and efficiency of the PMSM with leading and lagging current angle variations using finite element method. As a result, the most valuable design criteria are proposed to select stator winding method. Especially, we suggest the most appropriate winding method in terms of torque and efficiency, extending constant output area and decreasing noise and torque ripples.

요 약

효율 및 제어성이 우수한 영구자석 전동기는 최근 자동차 조향장치 시스템용으로 많이 응용되고 있으며, 인버터 고장 발생 시에도 일정시간 운전이 가능하여 안전성과 신뢰성을 확보할 수 있도록 다양한 형태의 이중 3상 구조의 고정자 권선방법을 적용하고 있다. 본 논문에서는 진상 및 지상의 전류위상 변화 시 각각의 권선방법이 전동기 특성에 미치는 영향을 유한요소해석을 통해 분석하고, 그 결과 이중 3상 고정자 권선을 갖는 동기전동기 설계 시 특성 측면에서 가장 적절한 권선방법을 선정할 수 있도록 설계전략을 제시한다. 구체적으로 토크 및 효율 측면과 약계자 제어를 통한 정출력 영역 확대 측면, 그리고 저진동 및 저소음을 위한 토크 리플 저감 측면에서 각각 유리한 권선방법을 제시한다.

Key words : PMSM, Dual Three Phase, FEM, Current Angle, Torque Ripple

1. 서론

고출력밀도, 고제어성 및 저소음의 특징을 갖고 있는 영구자석 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motors : PMSM)는 이러한 장점들 때

문에 다양한 산업분야에 널리 응용되고 있다. 최근 들어서는 고효율 및 고신뢰성이 요구되는 자동차 전기조향장치(Electric Power Steering : EPS) 시스템용으로 많이 적용되고 있다[1]. 특히 자동차 EPS용 동기 전동기는 운전 시 인버터 고장에 의한

* Professor, Dept. of Electrical Engineering, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

★ Corresponding author

E-mail : ktheoung@gnu.ac.kr, Tel : +82-55-772-1717

※ Acknowledgment

Manuscript received May. 20, 2020; revised Jun. 23, 2020 ; accepted June. 24, 2020.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

문제 발생 시에도 안전을 위하여 일정시간 구동이 가능할 수 있도록 이중 3상 고정자 권선(Dual Three-Phase Stator Winding) 방법을 채택하고 있다[2]. 이 권선방법은 6상(Six-Phase)이라고도 불리 우는데, 3상 고정자 권선을 이중으로 결선하고 각각을 독립 인버터로 구동하기 때문에 하나의 인버터에서 고장이 발생하는 경우에도 또 다른 정상적인 인버터로 전동기가 구동되어 일정시간 동안 운전을 가능하게 해준다. 하지만 고장이 없는 완전 정상적인 경우에 비해서는 전동기의 출력이 반으로 저감되어진다. 일반적으로 많이 사용되어지는 12슬롯-10극 PMSM에서는 이러한 이중 3상 고정자 권선방법을 세 가지 형태로 구성할 수 있는데, 전동기의 여러 가지 특성측면에서 각각의 장단점을 비교하여 용도에 맞는 가장 적절한 권선방법을 선정할 필요가 있다. 본 논문에서는 인버터에 의해 제어되는 전류위상의 변화가 전동기 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 진상(Leading Phase) 및 지상(Lagging Phase)의 전류위상 발생 시 각각의 권선방법이 토크 및 효율, 철손 등의 전동기 특성에 미치는 영향을 유한요소해석 시뮬레이션을 통해 고찰하고, 그 결과 이중 3상 고정자 권선을 갖는 PMSM 설계 시 전류위상의 변화를 고려할 경우 가장 적절한 고정자 권선방법을 선정하는데 도움이 될 수 있는 설계전략을 제시한다.

II. 이중 3상 고정자 권선방법 및 전류위상

1. 고정자 권선방법

그림 1은 이중 3상 고정자 권선을 갖는 12슬롯-10극 PMSM을 보여준다. 두 개의 각각 독립된 인버터로 구동되고 각각의 고정자 권선은 그림 2와 같이 세 가지 방법으로 구성할 수 있다[2][3]. 그림 2의 (a) 방법1은 고정자의 반을 동일 3상 권선으로 분리하는 경우이고, (b) 방법2는 이웃하는 2개의 동일 상의 권선들을 고정자 원주방향으로 기계각 120도 위치에 있는 다른 상의 권선들과 모아 3상을 구성하는 경우이고, (c) 방법3의 경우는 이웃하는 동일 상의 권선 중 하나와 반대편에 위치한 권선을 하나의 상으로 하고 이를 기계각 60도에 위치한 다른 상들에게도 적용하여 3상 권선을 구성하는 경우이다.

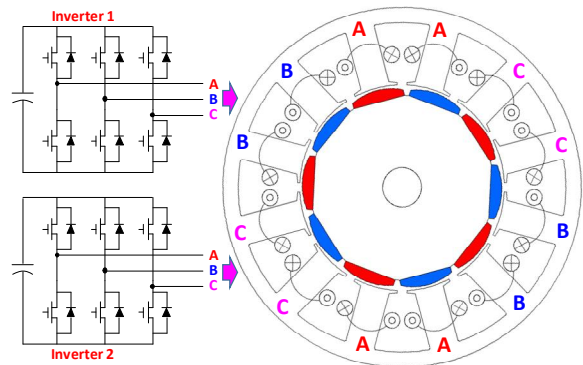


Fig. 1. 12-Slot 10-Pole PMSM with a dual 3phase stator windings.

그림 1. 이중 3상 고정자 권선을 갖는 12슬롯-10극 영구자석 동기 전동기

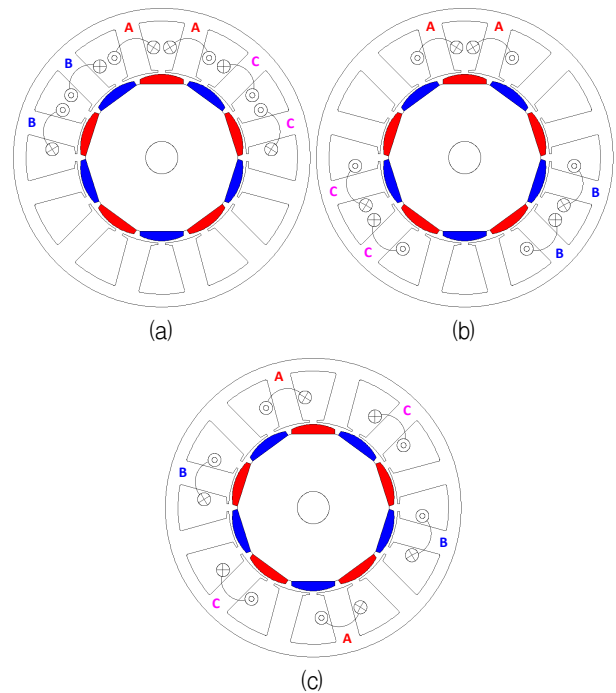


Fig. 2. Separated 3phase stator windings. (a) Method 1 (b) Method 2 (c) Method 3

그림 2. 독립된 3상 고정자 권선방법 (a) 방법1 (b) 방법2 (c) 방법3

2. 전류위상 변화

일반적으로 그림 1과 같이 영구자석이 표면에 부착되어 있는 표면 부착 형 PMSM은 d축 및 q축 인덕턴스가 동일하기 때문에 전류 당 최대토크를 발생시키기 위해 d축 전류(i_d)를 항상 0으로 유지하는 최대토크제어를 수행한다. 이를 위해서 엔코더 등의 회전자 위치센서 및 전류센서를 이용하여 그림 3과 같이 전동기의 상 역기전력과 상전류가 동일한

위상을 갖도록 제어한다. 하지만 전동기 및 인버터의 이상발생 시 정확한 최대토크제어의 수행이 불가능할 수 있기 때문에 그림 4에서 볼 수 있듯이 진상 혹은 지상의 위상을 갖는 상전류가 발생할 수 있다.

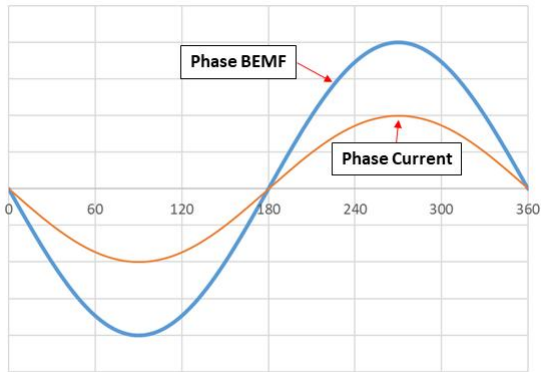


Fig. 3. Phase comparison in the maximum torque control.
그림 3. 최대토크제어 시 위상비교

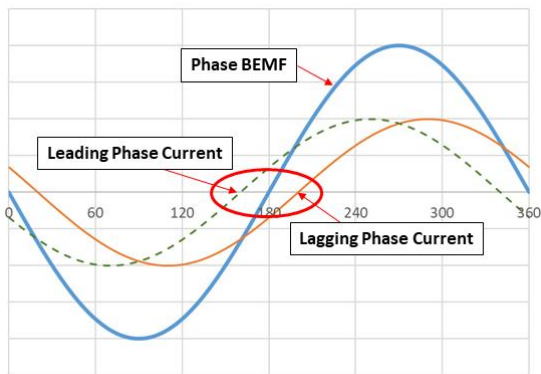


Fig. 4. Leading or lagging phase currents.
그림 4. 진상 및 지상 상 전류 파형

III. 전류위상 변화에 따른 전동기 특성 해석 및 결과 분석

그림 5는 전류위상 변화 시 고정자 권선방법에 따른 전동기의 발생 토크 및 전류가 역기전력과 동 위상일 경우와의 오차율[%]을 보여준다. 전체적으로 발생 토크는 방법3이 상당히 우수함을 알 수 있지만, 토크 변화는 전류 위상의 진상과 지상에 따라 각 권선방법에 있어서 다른 양상을 가지고 있음을 볼 수 있다. 진상일 경우는 방법3이 방법1, 2에 비해 급격히 토크가 저감되지만 지상일 경우는 방법1과 2에서 토크 변화가 더 크게 발생하게 된다.

그림 6의 효율 특성도 토크와 동일한 양상을 보여주고 있는데, 이 두 특성으로 보면 정출력 영역을 보다 높은 속도까지 구현하기 위해서는 진상에서 토크 변화가 적은 방법1과 2가 유리하고, 인버터의 불완전 제어에 의한 지상 위상 발생 시에는 방법3이 특성 측면에서 가장 장점을 가지고 있음을 판단할 수 있다.

그림 7은 전류위상 변화 시 발생하는 전동기 철손을 비교하였다. 철손은 전류위상 제어를 위한 해석 및 구현을 어렵게 만드는 요소 중 하나이므로 가능하면 변화가 적은 것이 유리하다. 그림에서 알 수 있듯이 비록 철손량 측면에서는 방법3이 가장 적은편이지만 전체 전류 위상에서 방법1과 2의 변화가 적음을 알 수 있다. 또한 자동차 조향시스템에 적용되는 전동기는 사용자가 직접 진동을 손으로 느낄 수 있기 때문에 토크 리플의 저감 역시도 매우 중요하다. 토크 리플의 절대량과 변화율면에서도 방법1과 2가 방법3에 비해 전체 전류 위상에서 유리함을 알 수 있다.

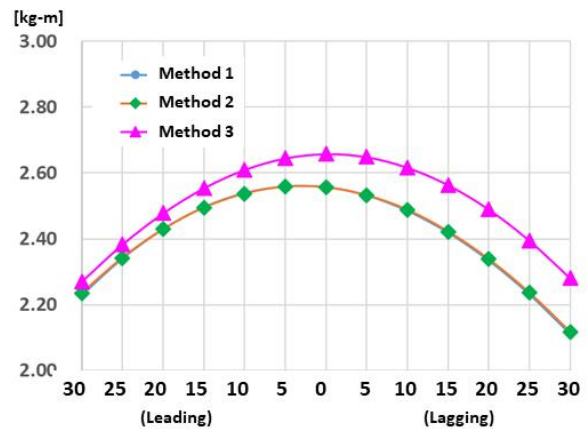


Fig. 5. Torque comparison according to the variation of phase current angles.

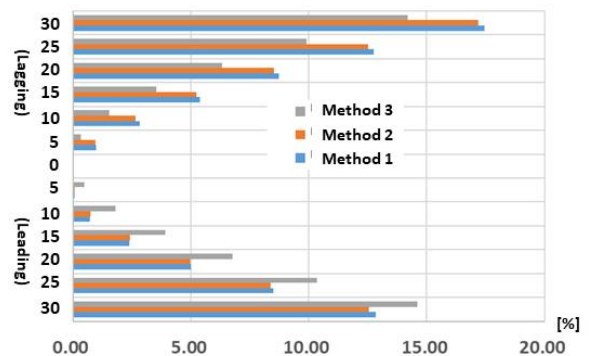


그림 5. 전류위상 변화 시 토크 비교

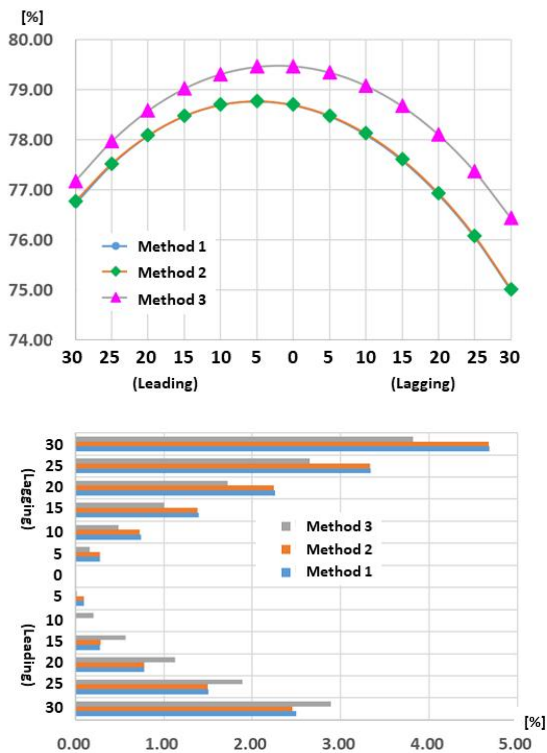


Fig. 6. Efficiency comparison according to the variation of phase current angles.

그림 6. 전류위상 변화 시 효율 비교

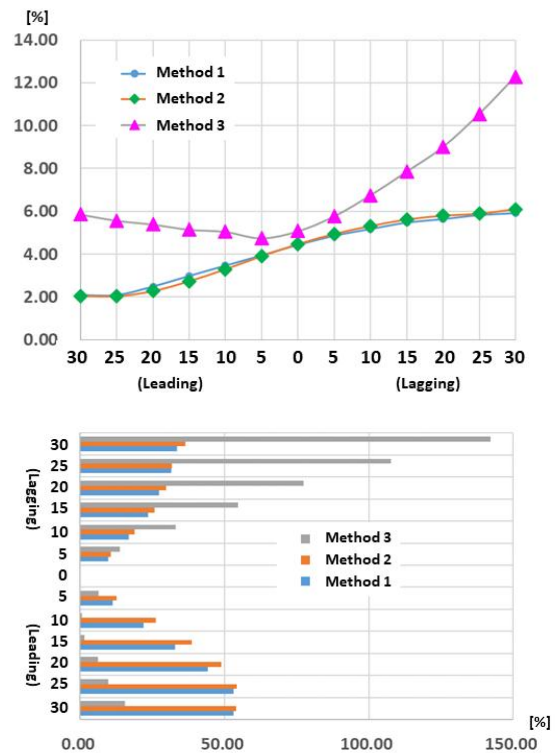


Fig. 8. Torque ripple comparison according to the variation of phase current angles.

그림 8. 전류위상 변화 시 토크 리플 비교

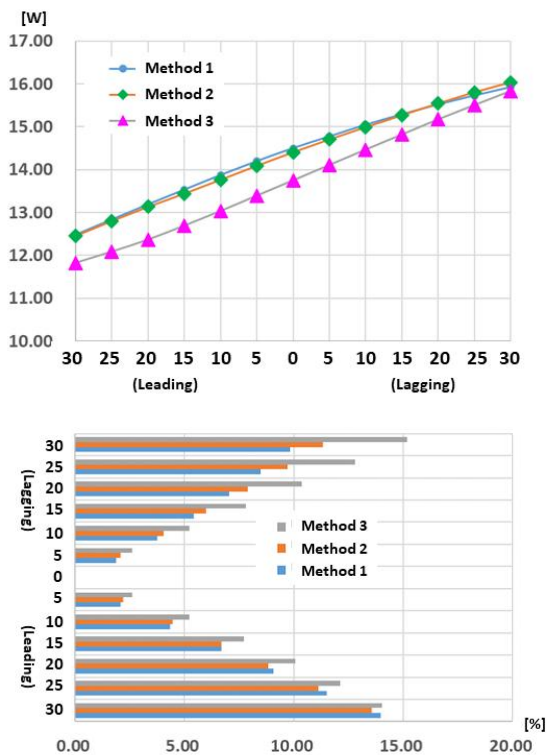


Fig. 7. Iron losses comparison according to the variation of phase current angles.

그림 7. 전류위상 변화 시 철손 비교

IV. 결론

고장 발생 시에도 일정시간 운전이 가능하도록 이중 3상 고정자 권선을 갖는 PMSM의 전류 위상 변화 시 각각의 권선방법이 전동기 특성에 미치는 영향에 관해 분석하였다. 전반적인 토크 및 효율 측면에서는 방법3이 상당히 유리하지만, 약계자 제어를 통한 정출력 영역 확대면에서는 방법1과 2가 우수함을 알 수 있었다. 또한 저진동 및 저소음을 위한 토크 리플 저감 측면에서도 방법1과 2가 방법3에 비해 유리한 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과들은 향후 이중 3상 PMSM의 고정자 권선방법 설계 및 선택에 많은 도움이 될 수 있으리라 판단된다.

References

[1] N. Bianchi, M. D. Pre, and S. Bolognani, "Design of a Fault-Tolerant IPM Motor for Electric Power Steering," *IEEE Trans. Vehi. Tech.*, vol.55, no.4, pp.1102-1111, 2006.

DOI: 10.1109/PESC.2005.1582041

[2] M. Barcaro, N. Bianchi, and F. Magnussen, "Analysis and Tests of a Dual Three-Phase 12-Slot 10-Pole Permanent-Magnet Motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.46, no.6, pp.2355-2362, 2010.

DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316094

[3] Tae Heung Kim, "The Effect of Different Arrangements of Stator Windings on Iron Losses in a Dual Three-Phase 12-Slot 10-Pole BLAC Motor," *JEET*, vol.14, no.3, pp.1281-1286, 2019.

DOI: 10.1007/s42835-019-00161-6

BIOGRAPHY

Tae Heung Kim (Member)



1993 : BS degree in Electrical Engineering, Hanyang University.

1995 : MS degree in Electrical Engineering, Hanyang University.

2005 : PhD degree in Electrical Engineering, Hanyang University.

1995~2002 : Research Engineer, LG Electronics.

2005~ : Professor, Gyeongsang National University