

# 단층권 12-Slot 10-Pole 영구자석 동기 전동기의 비대칭 치폭에 따른 특성 해석

## The Characteristic Analysis of a Single-Layer 12-slot 10-pole PM Synchronous Motor with Asymmetric Teeth Widths

김 태 형\*

Tae-Heoung Kim\*

### Abstract

Single-layer winding configuration in a 12-slot 10-pole Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) has been adopting in electrical power steering (EPS) systems to get the high fault tolerance capability of the motor. However, the motor with single-layer winding has magnetic circuit saturations in the teeth, which deteriorates its performance. In this paper, we propose asymmetric teeth widths to get over the demerit, and analyze the effect of the teeth width ratio variations on the performances of the PMSM. As a result, we suggest the most valuable teeth width ratio for designing the PMSM with a single-layer winding configuration.

### 요 약

단층권을 갖는 12-Slot 10-Pole 영구자석 동기전동기는 고신뢰성이 요구되는 자동차 전기조향장치 시스템용으로 응용되고 있다. 하지만, 권선이 감겨져 있는 치에는 전류에 의한 기자력이 집중되는 구조이기 때문에 자기회로의 포화로 인한 기자력 감소가 발생하고, 이는 전동기의 성능을 저하시키게 된다. 본 논문에서는 이와 같은 단점을 개선하기 위해 고정자에 비대칭 치폭을 제안하고, 다양한 치폭 비 변경에 따른 전동기의 특성을 정밀 해석한다. 그 결과, 단층권을 갖는 자동차 전기조향장치용 PMSM 설계 시 특성 측면에서 가장 효율적인 치폭 비를 제시한다.

*Key words* : PMSM, Iron Losses, FEM, Single Layer, Teeth Widths

### 1. 서론

최근 들어 자동차 전기조향장치(Electric Power Steering : EPS) 시스템으로 고효율, 고출력밀도 및 저소음의 장점을 갖고 있는 영구자석 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motors : PMSM)

가 매우 각광을 받고 있다[1]. 이러한 EPS 시스템용 PMSM은 특히 전동기 고정자 권선의 고장으로 인한 문제 발생 시에도 일정시간동안 안전하게 운전이 될 수 있도록, 고정자 상간 고장(Phase-to-Phase fault) 방지를 목적으로 동일 슬롯에는 동일 상만이 위치하는 단층권(Single-layer winding)을 시행하

\* 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 Sep. 14, 2018; revised Nov. 26, 2018; accepted Nov. 29, 2018

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.

고 있다[2]-[3]. 이와 같은 단층권은 물리적으로 상들을 분리시키기 때문에 상간 절연이 가능하여 고신뢰성을 가질 수는 있지만, 한편으로 권선의 끝단(End-turn) 길이가 다소 길어지게 되어 고정자 동손(Stator copper loss)이 증가할 수 있고, 고정자 치에 기자력이 집중되어 자기회로 포화(Magnetic Circuit Saturation)로 인한 철손 증가 및 토크 감소가 있을 수 있다. 따라서 이러한 단점의 보완이 필요한데, 이를 해결하기 위해 기자력이 집중되는 자기회로 부분, 특히 치부분의 폭을 변경함으로써 성능을 개선시키는 것이 가능하다. 본 논문에서는 단층권을 갖는 PMSM의 고정자 치폭 변경에 따른 여러 가지 특성을 정밀 분석하고자 한다. 전동기 효율에 직접 영향을 미치는 전동기 발생 토크 및 철손을 부하(Load)에 따라 분석하고, 특히 유한요소(FEM) 해석을 이용해 얻어진 순시 자속밀도 분포로부터 고조파 철손을 계산한다. 해석 결과, 단층권을 갖는 PMSM 설계 시 전동기 특성 개선에 가장 적합한 치폭을 제시한다.

II. 본론

1. 단층권을 갖는 PMSM 해석 모델

가. 해석 모델 설계 사양

그림 1은 단층권을 갖는 12-Slot 10-Pole의 분수 슬롯 PMSM을 나타낸다. 상간 절연을 위해서 동일 슬롯에는 동일 권선이 감겨있는 구조이며, 따라서 권선이 고정자 치에 교대로 감겨져 있다. 표 1은 전동기의 설계사양들을 보여준다.

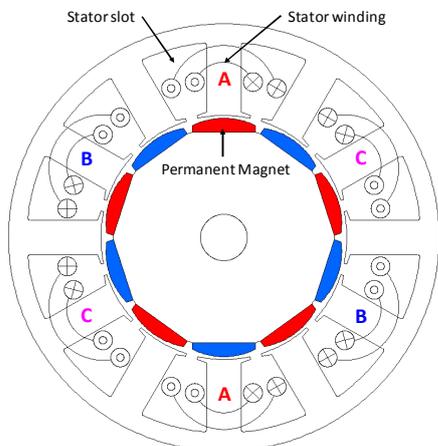


Fig. 1. 12-Slot 10-Pole PMSM with a single-layer winding. 그림 1. 단층권 12-Slot 10-Pole 영구자석 동기 전동기

Table 1. Specifications of the PMSM.

표 1. 영구자석 동기 전동기 설계사양

Section	Item	Value	Unit
Stator	Number of phases	3	
	Number of slots	12	
	Number of turns/teeth	11	turns
	Stack width	30	mm
	Outer diameter	90	mm
Rotor	Number of poles	10	
	Outer diameter	50	mm
	Inner diameter	10	mm
Rated	Power	650	W
	Speed	1200	rpm
Material	Magnet(NdFeB)	1.4	T
	Steel(50PN600)	0.5	mm

나. 고정자 치폭 변경

권선이 감겨져 있는 고정자 치는 토크를 내기 위한 전류가 흐를 경우 기자력(Magneto-motive force)에 의해서 권선이 없는 치에 비해 더 많은 자속이 흐르게 된다. 따라서 자기회로의 포화에 의한 기자력 감소가 발생하게 되고, 그 결과 발생 토크의 저하 및 철손의 증가로 인해 전동기 효율이 감소하게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 동일한 점적률을 가질 수 있도록 동일한 슬롯 면적을 확보하면서 권선이 있는 치의 폭은 증가시키고, 없는 치의 폭은 감소시키는 방법이 가능하다. 즉 그림 2에서 권선이 있는 치폭 A는 넓게 증가시키고, 치폭 B는 감소시킨다. 본 논문에서는 치폭 비(A/B)를 실제 구현 가능한 1.0-2.0 사이로 변경시키면서 전동기 특성을 고찰한다.

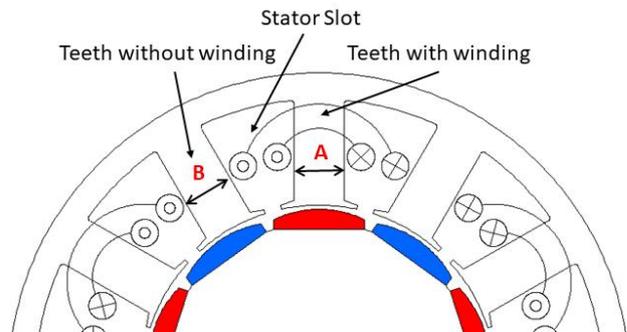


Fig. 2. Teeth width variation.

그림 2. 치폭 변경

## 2. 치폭 변경에 따른 특성 해석 및 결과 분석

### 가. 무부하 특성

그림 3은 치폭 변경에 따른 전동기의 무부하 역기전력 특성을 나타낸다. 기존 동일 치폭(치폭 비=1.0)에 비해 치폭 비를 변경함에 따라 역기전력이 증가하는 성능 개선이 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 하지만 치폭 비가 1.6보다 커지는 경우는 성능 개선의 효과가 다소 감소하고 있는데, 이는 권선이 감겨져 있지 않는 부분의 자기회로 넓이가 오히려 급격히 감소하게 되어, 이 부분의 포화에 의한 기자력 감소 및 유효자속에 대한 누설 자속의 증가가 커지기 때문이다. 그림 4는 무부하 철손 특성을 보여준다. 철손은 치폭 비가 증가함에 따라 감소하게 되는데, 이는 치폭을 증가시킴으로 인해 그림 5에서 볼 수 있듯이 치 자속 밀도가 낮아지게 되고, 자속 밀도가 낮아지는 부분은 증가하는 부분(폭이 감소하는 치부분)에 비해서 체적이 상대적으로 크기 때문에 동일한 철량을 사용하는 경우 전체적인 철손은 감소하게 된다.

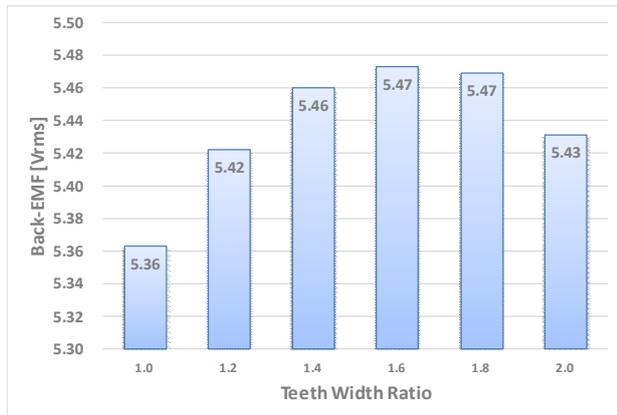


Fig. 3. No-load back-EMF.

그림 3. 무부하 역기전력

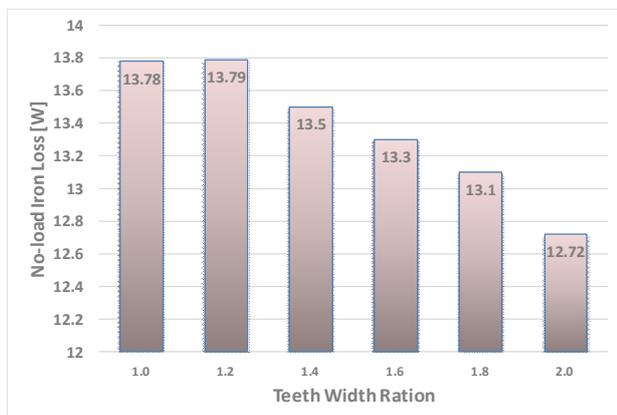


Fig. 4. No-load iron loss.

그림 4. 무부하 철손

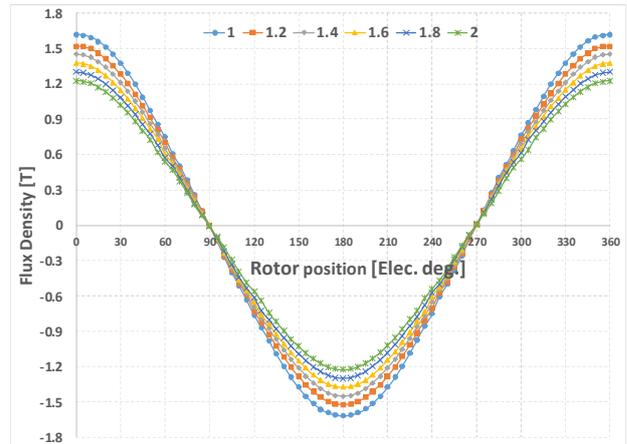


Fig. 5. Teeth flux density.

그림 5. 치 자속 밀도

### 나. 부하 특성

그림 6은 치폭 변경에 따른 전동기의 정격부하시 발생토크를 나타낸다. 치폭 비가 증가함에 따라 1.8까지는 동일 치폭에 비해 토크가 증가하지만, 1.8보다 커지는 경우는 오히려 토크가 감소함을 볼 수 있다. 또한, 1.4까지는 토크가 상당히 증가하다가, 그 이상에서는 동일 치폭에 비해서는 비록 크다고 할지라도 토크가 감소하고 있는 경향을 볼 수 있다. 이 이유는 권선이 있는 치 부분에서는 당연히 자속포화가 줄어들기 때문에 발생 토크가 커지게 되지만, 권선이 없는 치 부분도 자속의 통로가 되기 때문에 오히려 과도한 치폭 감소로 인한 자속포화와 기자력 감소가 발생하기 때문이다. 따라서 최적의 치폭 비 선정에 의한 전동기의 특성 개선이 가능함을 알 수 있다. 그림 7은 치폭 비 변경에 따른 정격부하 시 철손을 나타낸다. 무부하일 경우에는 반대로 치폭 비가 증가함에 따라 철손이 증가하

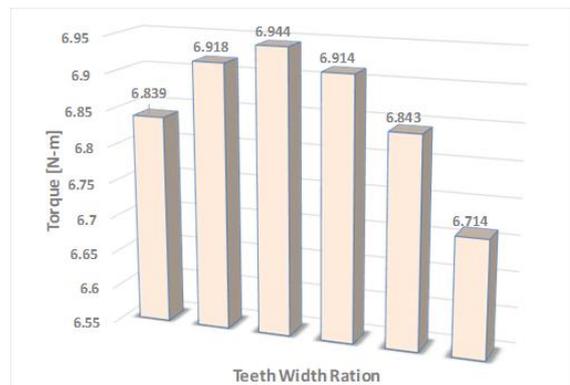


Fig. 6. Rated-load torque.

그림 6. 정격부하 토크

고 있는데, 이 원인은 발생 토크와 마찬가지로 전류에 의해 만들어지는 자속의 상당량이 그림 8에서 볼 수 있듯이 권선이 없는 치에도 흐르게 되고, 따라서 자속밀도가 커짐에 따라 철손 발생이 증가하게 된다. 하지만 철손 량의 차이는 상당히 작기 때문에 치폭 비 변경에 의한 특성은 주로 발생토크에 영향을 미치게 된다. 따라서 그림 9에서처럼 전동기의 효율도 발생 토크가 최대로 되는 1.4의 치폭 비에서 최대로 된다.

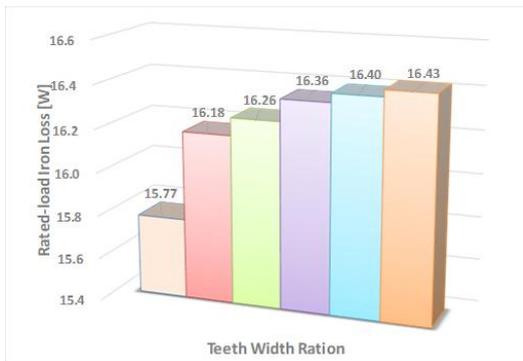


Fig. 7. Rated-load iron loss.  
그림 7. 정격부하 철손

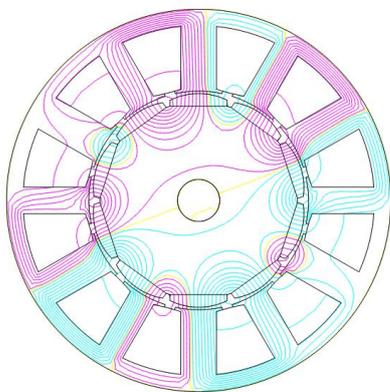


Fig. 8. Flux lines (Teeth width ratio=1.6).  
그림 8. 자속선 분포도 (치폭 비=1.6)

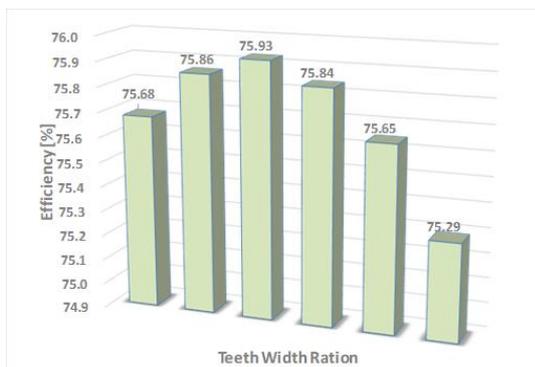


Fig. 9. Rated-load efficiency.  
그림 9. 정격부하 효율

### III. 결론

고신뢰성이 요구되는 자동차 전기조향장치 시스템에 적용되는 단층권 영구자석 동기 전동기는 구조적으로 자기회로 포화에 의한 기자력이 감소되는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이를 개선하고자 고정자 비대칭 치폭을 제안하였다. 다양한 치폭 비 변경에 따른 여러 가지 전동기 특성을 비교 검토하였으며, 그 결과 치폭 비의 변경이 성능 개선에 효과가 있음을 확인하였다. 특히 치폭 비가 1.4 정도에서 발생 토크 및 효율이 최대가 됨을 알 수 있었고, 향후 단층권을 갖는 PMSM의 설계에 많은 도움이 되리라 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.*, vo.55, no.4, pp.1102-1111, 2006. DOI:10.1109/TVT.2006.877716

[2] N. Bianchi, S. Bolognani, M. D. Pre, and G. Grezzani, "Design Considerations for Fractional-Slot Winding Configurations of Synchronous Machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vo.42, no.4, pp.997-1006, 2006. DOI:10.1109/TIA.2006.876070

[3] 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.*, vo.46, no.6, pp.2355-2362, 2010. DOI:10.1109/TIA.2010.2070784