

Multiplex 권선을 통한 전동기의 토크 향상 및 토크 리플 개선

유 상, 왕 녕, 윤명환, 홍정표
한양대학교

Torque Increase and Torque Ripple Reduction of Motor Using Multiplex Winding

Shuang Liu, Ning Wang, Myung-Hwan Yoon, Jung-Pyo Hong
Hanyang University

Abstract - 전동기의 고정자 권선법에는 통상적인 3상 권선법과 multiplex 3상 권선법이 있다. 본 논문에서는 multiplex 3상 권선 전동기의 장점인 토크와 토크 리플 성능 향상에 대해 연구하였고 그 원인을 분석하였다. 8극 48슬롯 권선계자형 동기전동기(WFSM)에 대해 기존 3상 권선법과 duplex 3상 권선법을 비교 분석하였으며, 32극 144슬롯 표면 부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)에 대해 유한요소해석법을 이용하여 기존 3상과 triplex 3상 권선법을 비교 분석하였다. 마지막으로 두 종류의 전동기에서 multiplex 권선법의 장점을 알아보고자 평균 토크와 토크 리플을 비교하였다.

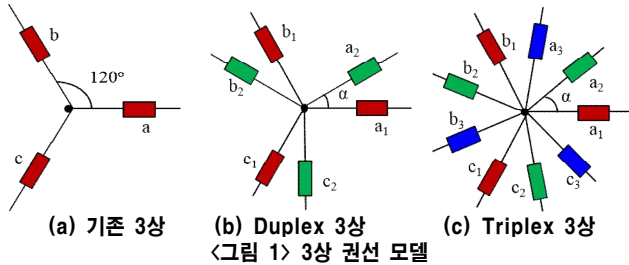
1. 서 론

최근 심각한 환경오염으로 인해 대체 연료에 대한 관심이 높아지면서 전기에너지를 이용하는 전동기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 엘리베이터, 전기자동차, 가전 등 다양한 분야에서 전동기를 사용하고 있기 때문에 더 높은 신뢰성을 갖는 전동기 구동 방식이 요구되며, 이에 따라 multiplex 3상 권선으로 구동하는 전동기에 대한 연구가 늘어나고 있다. multiplex 3상 권선 전동기는 2대 이상의 인버터로 각각 3상을 구동하여 인버터의 크기를 저감할 수 있고 한 대의 인버터가 고장난 경우 다른 인버터를 통해 대체 할 수 있어 신뢰성을 확보할 수 있다. 동시에 multiplex 3상 권선 전동기는 통상적인 3상 권선 전동기보다 토크 증가, 토크 리플 저감 등의 장점이 있다. 본 논문에서는 multiplex를 통한 토크 증가 및 토크 리플 개선 효과를 다루었다. 그리고 이러한 권선법의 성능 개선 효과를 검증하기 위해 WFSM과 SPMSM 두 종류의 전동기를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 Multiplex 3상 권선

Multiplex 3상 권선법은 x 개의($x \geq 2$) 3상 권선세트에 이루어진 권선법이다. 예를 들어, <그림 1>의 (b)와 같이 2개의($x=2$) 3상 권선 세트에 구성된 전동기를 duplex 3상이라 하고 (c)와 같이 3개의($x=3$) 3상 권선 세트에 구성된 전동기를 triplex 3상이라고 부른다. 각 세트의 3상 권선은 독립적인 인버터로 구동된다. α 값은 인접한 권선 세트의 위상차이고 α 값을 적절히 조절하여 multiplex 3상 권선 전동기를 구동할 수 있다.



2.2 토크 리플 저감

기존 3상 전동기의 토크는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{1}{\omega_m} \sum_{m=1}^3 \sum_{\nu} \sum_n \left\{ I_{\nu} E_n \cos \left[\nu \left(\omega_e t - \frac{2\pi m}{3} \right) \right] \times \cos \left[n \left(\omega_e t - \frac{2\pi m}{3} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

$$= T_{avg} + T_6 \cos(6\omega_e t) + T_{12} \cos(12\omega_e t) + T_{18} \cos(18\omega_e t) \dots$$

<그림 1>과 같이 duplex 권선의 α 값이 30° 일 경우, triplex 권선의 α 값이 40° 일 경우의 토크는 각각 식 (2), (3)과 같다.

Duplex 3상:

$$\begin{aligned} \text{세트1: } T &= T_{avg} + T_6 \cos(6\omega_e t) + T_{12} \cos(12\omega_e t) + T_{18} \cos(18\omega_e t) \dots \\ \text{세트2: } T &= T_{avg} + T_6 \cos[6(\omega_e t - \alpha)] + T_{12} \cos[12(\omega_e t - \alpha)] + \dots \\ &= T_{avg} - T_6 \cos(6\omega_e t) + T_{12} \cos(12\omega_e t) - T_{18} \cos(18\omega_e t) \dots \\ \text{합성토크: } T &= 2T_{avg} + 2T_{12} \cos(12\omega_e t) \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Triplex 3상:

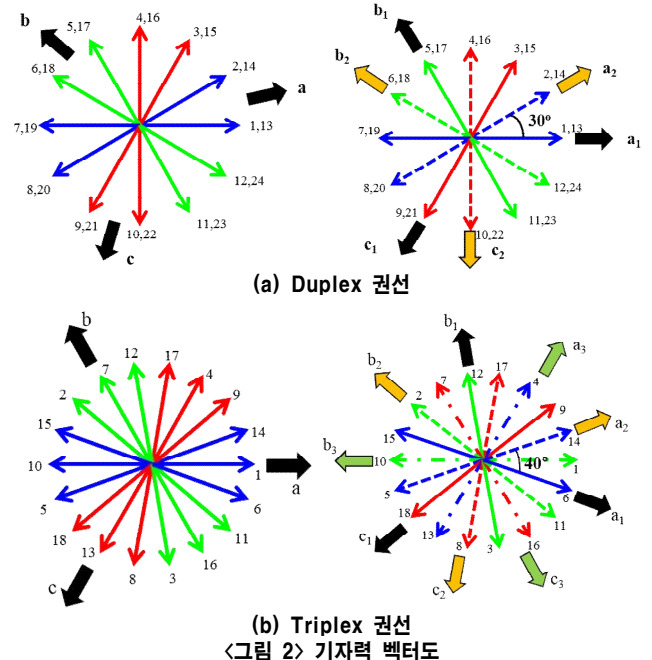
$$\begin{aligned} \text{세트1: } T &= T_{avg} + T_6 \cos(6\omega_e t) + T_{12} \cos(12\omega_e t) + T_{18} \cos(18\omega_e t) \dots \\ \text{세트2: } T &= T_{avg} + T_6 \cos \left[6 \left(\omega_e t - \frac{2\pi}{9} \right) \right] + T_{12} \cos \left[12 \left(\omega_e t - \frac{2\pi}{9} \right) \right] + \dots \\ \text{세트3: } T &= T_{avg} + T_6 \cos \left[6 \left(\omega_e t - \frac{4\pi}{9} \right) \right] + T_{12} \cos \left[12 \left(\omega_e t - \frac{4\pi}{9} \right) \right] + \dots \\ \text{합성토크: } T &= 3T_{avg} + 3T_{18} \cos(18\omega_e t) \dots \end{aligned} \quad (3)$$

ν 는 전류의 고조파 차수, m 은 상수, n 은 역기전력의 고조파 차수, I_{ν} 는 전류의 ν 차 고조파 크기, ω_m 은 기계각속도, ω_e 는 전기각속도, T_{avg} 는 평균 토크, E_n 은 역기전력의 n 차 고조파 크기, α 는 인접한 권선 세트의 위상차이다.

기존 3상의 경우, 각 상의 위상차가 120° 이며 토크에 6차 고조파 성분 존재한다. 하지만, multiplex 권선을 적용하면 각 상의 위상차가 $30^\circ, 40^\circ$ 로 바뀌어서 상간 상호 작용을 통해 토크의 6차 고조파 성분이 제거되어 토크 리플 감소 효과를 얻을 수 있다.

2.3 평균 토크 증가

8극 48슬롯과 32극 144슬롯 극 수, 슬롯 수 조합에 duplex 3상, triplex 3상을 각각 적용하고 기존 3상과 비교하였다. 기존 3상과 multiplex 권선의 기저력 벡터도는 <그림 2>와 같다. 스쿠 및 단결 권 등은 적용하지 않았으므로 전동기의 권선 계수는 분포 계수와 같다.



$$k_d = \frac{\sin\left(\frac{q_{ph}}{2} \frac{\alpha_{ph}}{2}\right)}{\frac{q_{ph}}{2} \sin\left(\frac{\alpha_{ph}}{2}\right)}, \alpha_{ph} = \frac{2\pi t}{z}, q_{ph} = \frac{z}{3t} \quad (4)$$

k_d 는 분포 계수, t 는 극 쌍수와 슬롯 수의 최대공약수, z 는 슬롯 수, α_{ph} 는 인접한 벡터 사이의 각도, p 는 극 쌍수, s 는 multiplex 권선 세트 수, q_{ph} 는 한 상의 벡터 수이다.

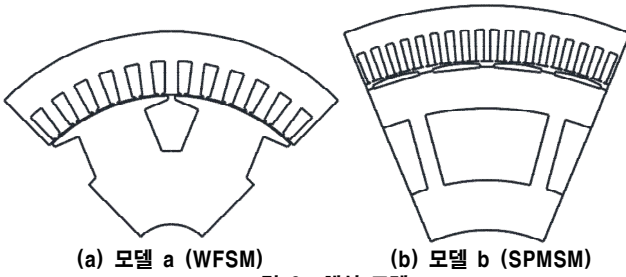
식 (4)를 이용해 권선 계수를 구하면, 기존 3상의 경우 <그림 2>의 (a)와 <그림 2>의 (b)가 각각 0.966 그리고 0.960이지만, duplex 3상, triplex 3상을 적용하면 두 경우 모두 권선 계수가 1이 된다. 따라서 역기전력이 증가하고 동일한 전류 인가 시 더 큰 토크를 얻을 수 있다.

3. FEM 해석

다음으로 유한요소해석법을 이용하여 multiplex 권선법의 효과를 확인하였다.

3.1 해석 조건

전동기의 형상과 파라미터는 <그림 3>, <표 1>에 각각 제시하였다. 권선법을 제외한 모든 전동기의 구조는 동일하다.



<그림 3> 해석 모델

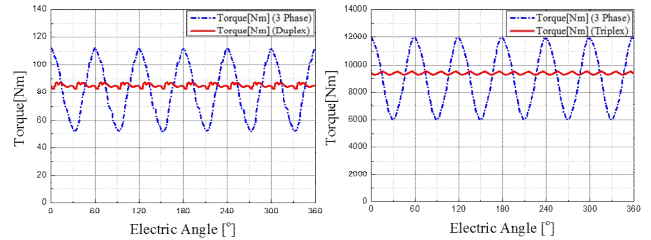
2.1에서 언급한 대로 multiplex 권선은 x 대의 인버터로 각각 구동된다. 이 때 인버터 크기를 줄이기 위해 multiplex 권선에 기존의 3상 전동기보다 $\frac{1}{x}$ 배만큼의 전류를 인가한다.

<표 1> 해석 조건

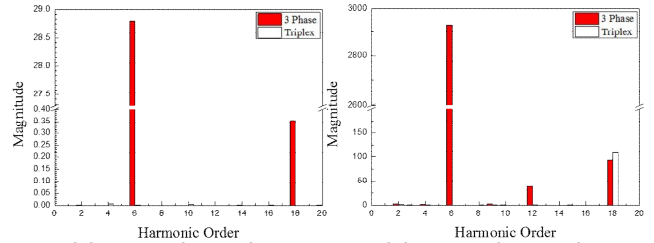
	모델 a		모델 b	
전동기 종류	WFSM		SPMSM	
극 수/슬롯 수	8/48		32/144	
고정자 외경 [mm]	220		670	
회전자 외경 [mm]	160		560	
공극 길이 [mm]	0.5		3.5	
적층 길이 [mm]	80		300	
철심 재질	35PN230		50PN470	
계자 권선 턴 수	150		-	
계자 전류 [A_{rms}]	7.505		-	
자석 길이 [mm]	-		85	
자석 두께 [mm]	-		10	
	기존 3상	Duplex 3상	기존 3상	Triplex 3상
상당 직렬 턴 수	64	64	144	144
병렬 회로 수	4	4	4	4
상 전류 [A_{rms}]	171.5	85.75	324	108
전류 위상 각 [$^\circ$]	0	0	0	0

3.2 해석 결과

<그림 4>, <그림 5>와 <표 2>에 multiplex 권선과 기존 3상 권선의 구동 효과를 나타내었다.



<그림 4> 토크 비교 결과



<그림 5> 토크의 고조파 분석

기존 3상 보다 multiplex 권선을 이용하면 토크의 6차 고조파 성분이 대부분 제거되어 토크 리플 감소 효과를 나타내었다.

<표 2> 해석 결과

	모델 a		모델 b	
	기존 3상	Duplex 3상	기존 3상	Triplex 3상
평균 토크 [N]	83.3	85.4	9036.1	9367.7
토크 리플 [%]	73.19	5.46	65.75	2.76
토크 향상 [%]	2.25		3.67	

2.3에서 언급한 대로 multiplex 권선 전동기의 분포 계수는 1이 되므로 평균 토크는 증가하고, 토크 고조파의 6차, 18차 등의 성분이 상쇄되어 토크 리플이 감소하는 효과를 확인하였다.

4. 결 론

본 논문은 multiplex 3상 권선을 적용한 전동기에 대해 토크, 권선 계수를 수치적으로 검토하였다. 유한요소해석을 이용하여 토크 특성을 분석하고, 이를 기존 3상 전동기의 특성과 비교하였다.

- 1) Multiplex 상 간 위상차 때문에 합성토크의 토크 리플 6차 고조파 성분이 상쇄되므로 토크 리플이 감소한다.
- 2) Multiplex 모델의 권선 계수가 기존 3상 전동기보다 크기 때문에 평균 토크가 증가한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kashif Saeed Khan, "Comparative analysis of multiphase machines", Electric Power Engineering, pp. 11-14, 2008
- [2] Soon-O Kwon, Fang Liang, Gyu-Hong Kang and Jung-Pyo Hong, "Space harmonic Analysis for Magnetic Field Distribution", ICEMS, 503-M11-018, pp. 20-21, 2004
- [3] Ki-Yong Nam, Wol-Taik Lee, Choon-Man Lee and Jung-Pyo Hong, "Reducing Torque Ripple of Brushless DC Motor by Varying Input Voltage", IEEE Trans. on Magnetics, 42, No.4, pp. 1307-1310, 2006.
- [4] Miller, T. J. E., and M. I. McGilp, "Analysis of multi-phase permanent-magnet synchronous machines", Electrical Machines and Systems, ICEMS 2009, International Conference on IEEE, pp. 1-6, 2009