

창의 전기기술을 선도하는  
대한전기학회



[www.kiee.or.kr](http://www.kiee.or.kr)

KIEE Summer Conference 2015

# 2015년도 제46회 대한전기학회 하계학술대회

일시: 2015년 7월 15일(수) ~ 17일(금)

장소: 무주 덕유산 리조트(전북 무주군)

◆ 주 최 : 대한전기학회

◆ 후 원 : 미래창조과학부, 산업통상자원부, 한국전력공사, 한국전기공사협회,  
한국과학기술단체총연합회

BP 59 **Multiplex 권선을 통한 전동기의 토크 향상 및 토크 리플 개선**

Shuang Liu\*, Ning Wang, 윤명환, 홍정표(한양대)

BP 60 **반응표면법을 이용한 ISG용 WFSM의 계자 유기 전압 및 토크 리플 저감 최적 설계**

박진철\*, 홍년한, 황성우, 채승희, 홍정표(한양대)

BP 61 **AFPM발전기의 코깅토크 저감 및 특성 향상에 관한 연구**

장중근\*, 주성준, 김창엽(호서대)

BP 62 **Spoke type 전동기의 최대토크와 최소토크리플을 위한 형상 최적 설계**

이진경\*, 김영현, 이중호(한밭대), 김홍석(경남테크노파크)

BP 63 **권선계자형 동기전동기의 토크리플 저감을 위한 회전자의 스큐와 비대칭 설계 모델의 비교 분석**

이상현\*, 신영철, 유석현, 감기찬(한밭대)

BP 64 **Single Phase Lien Start Permanent Magnet Motor의 토크리플 저감을 위한 보조 권선 최적화**

강민철\*, 김규탁(창원대)

BP 65 **매입형 영구자석 전동기의 코깅 토크 저감을 위한 노치 최적 설계**

홍승기\*, 여한결, 정현교(서울대)

▶ **전기기기 (10)**

7월 16일(목) / 발표시간 : 13:00~14:20 / 만선하우스

좌장 : 최경달(한국산업기술대)

BP 66 **고전압 펄스 모듈레이터의 고속 인터록 제어**

김상희\*, 박성수, 권세진, 이흥수, 강흥식, 고인수(포항공대 가속기연구소), 김동수, 서민호, 이수형, 문용조(다원시스)

BP 67 **PWM 전류제어를 고려한 영구자석형 기기의 손실계산 프로세스**

강경호\*, 조상준, 유석진(현대로템)

BP 68 **복소지수함수 응답을 이용한 시스템 추정과 제어**

안현진\*, 심관식, 임영철, 최준호(전남대), 김의선(신경대)

BP 69 **SRM의 비선형적인 인덕턴스 측정방법**

노정민\*, 김재혁(원광대)

BP 70 **SRM의 강인제어를 위한 전류제어기법 비교**

이영수\*, 김재혁, 정민창(원광대)

BP 71 **Wavelet Transform을 이용한 PD 신호 De-Noiseing에 관한 연구**

양훈석\*, 김상현, 김종왕, 이항범(숭실대), 김지호(에너지테크)

BP 72 **블로워 전동기 가변속 운전방식에 따른 소비전력 비교분석**

김정태\*, 배성우(영남대)

BP 73 **고압전동기 권선온도 냉각설비 개선 사례 연구**

최인석\*, 홍정조, 이은춘, 홍영재, 홍현표(한국수자원공사)

BP 74 **선형 영구자석 기기의 오버행에 따른 특성해석**

구민모\*, 최장영, 신현재(충남대), 홍기용(선박해양플랜트연구소)

BP 75 **IPM 전동기의 구동 방식에 따른 진동 특성 분석**

이경득\*, 이원식, 김규탁(창원대)

BP 76 **보조치 및 Offset 적용에 따른 양측식 PMLSM의 추력 특성 연구**

김선중\*, 김용재(조선대), 정상용(성균관대)

BP 77 **IPM 동기모터의 불가역감자 특성 비교 연구**

정석원\*, 권혁성, 정현교(서울대)

BP 78 **비접촉 선형 영구자석 기어의 Pole Piece에 따른 추력 특성 분석**

김민석\*, 김용재(조선대), 정상용(성균관대)

BP 79 **슬롯 오픈이 전동기 소음에 미치는 영향 고찰**

김수철\*, 홍정표(한양대), 김규식, 이병화, 박광민, 이봉현(자동차부품연구원)

BP 80 **퍼지 논리 제어기를 사용한 축방향지지력 제어**

Yingjie He\*, Fengge Zhang(심양공업대), 안진우(경성대)



# 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.

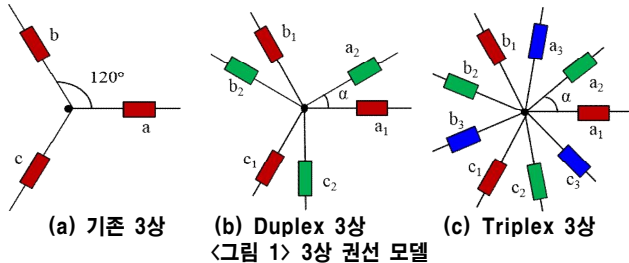
### 1. 서 론

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 권선세트로 이루어진 권선법이다. 예를 들어, <그림 1>의 (b)와 같이 2개의( $x=2$ ) 3상 권선 세트로 구성된 전동기를 duplex 3상이라 하고 (c)와 같이 3개의( $x=3$ ) 3상 권선 세트로 구성된 전동기를 triplex 3상이라고 부른다. 각 세트의 3상 권선은 독립적인 인버터로 구동된다.  $\alpha$ 값은 인접한 권선 세트의 위상차이고  $\alpha$ 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  $\alpha$ 값이 30°일 경우, triplex 권선의  $\alpha$ 값이 40°일 경우의 토크는 각각 식 (2), (3)과 같다.

Duplex 3상:

$$\text{세트1: } T = T_{avg} + T_6 \cos(6\omega_e t) + T_{12} \cos(12\omega_e t) + T_{18} \cos(18\omega_e t) \dots$$

$$\text{세트2: } T = T_{avg} + T_6 \cos[6(\omega_e t - \alpha)] + T_{12} \cos[12(\omega_e t - \alpha)] + \dots \quad (2)$$

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

$$\text{합성토크: } T = 2T_{avg} + 2T_{12} \cos(12\omega_e t) \dots$$

Triplex 3상:

$$\text{세트1: } T = T_{avg} + T_6 \cos(6\omega_e t) + T_{12} \cos(12\omega_e t) + T_{18} \cos(18\omega_e t) \dots$$

$$\text{세트2: } T = T_{avg} + T_6 \cos \left[ 6 \left( \omega_e t - \frac{2\pi}{9} \right) \right] + T_{12} \cos \left[ 12 \left( \omega_e t - \frac{2\pi}{9} \right) \right] + \dots$$

$$\text{세트3: } T = T_{avg} + T_6 \cos \left[ 6 \left( \omega_e t - \frac{4\pi}{9} \right) \right] + T_{12} \cos \left[ 12 \left( \omega_e t - \frac{4\pi}{9} \right) \right] + \dots \quad (3)$$

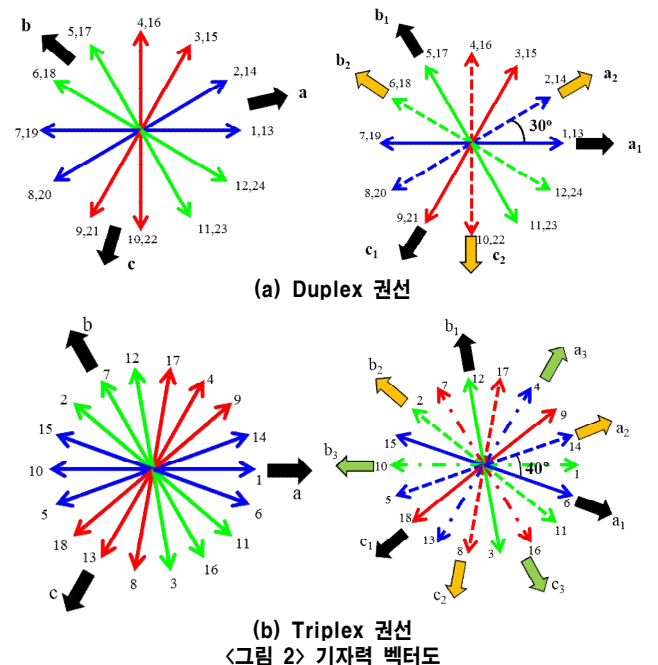
$$\text{합성토크: } T = 3T_{avg} + 3T_{18} \cos(18\omega_e t) \dots$$

$\nu$ 는 전류의 고조파 차수,  $m$ 은 상수,  $n$ 은 역기전력의 고조파 차수,  $I_{\nu}$ 는 전류의  $\nu$ 차 고조파 크기,  $\omega_m$ 은 기계각속도,  $\omega_e$ 는 전기각속도,  $T_{avg}$ 는 평균 토크,  $E_n$ 은 역기전력의  $n$ 차 고조파 크기,  $\alpha$ 는 인접한 권선 세트의 위상차이다.

기존 3상의 경우, 각 상의 위상차가 120°이며 토크에 6차 고조파 성분이 존재한다. 하지만, multiplex 권선을 적용하면 각 상의 위상차가 30°, 40°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 단절 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,  $\alpha_{ph}$ 는 인접한 벡터 사이의 각도,  $p$ 는 극 쌍수,  $s$ 는 multiplex 권선 세트 수,  $q_{ph}$ 는 한 상의 벡터 수이다.

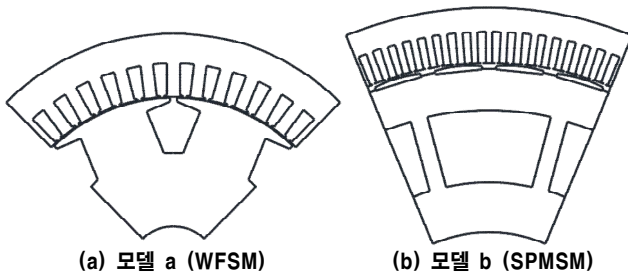
식 (4)를 이용해 권선 계수를 구하면, 기존 3상의 경우 <그림 2>의 (a)와 <그림 2>의 (b)가 각각 0.966 그리고 0.960이지만, duplex 3상, triplex 3상을 적용하면 두 경우 모두 권선 계수가 1이 된다. 따라서 역기전력이 증가하고 동일한 전류 인가 시 더 큰 토크를 얻을 수 있다.

### 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

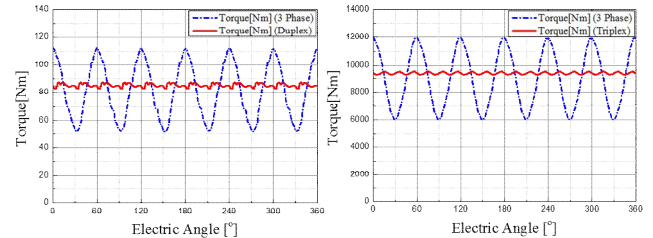
2.1에서 언급한 대로 multiplex 권선은  $x$ 대의 인버터로 각각 구동된다. 이 때 인버터 사이즈를 줄이기 위해 multiplex 권선에 기존의 3상 전동기보다  $\frac{1}{x}$  배만큼의 전류를 인가한다.

#### <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

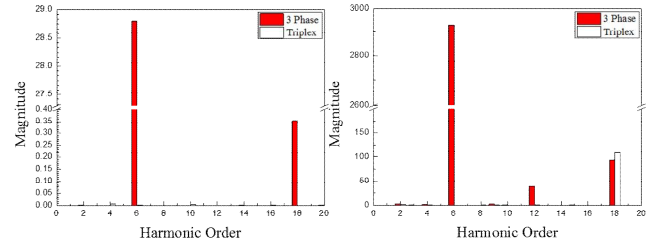
#### 3.2 해석 결과

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



(a) 모델 a (WFSM) (b) 모델 b (SPMSM)

<그림 4> 토크 비교 결과



(a) 모델 a (WFSM) (b) 모델 b (SPMSM)

<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 수식적으로 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