

고조파 저감을 위한 극변환 전동기의 권선 설계

남 혁, 홍정표, 정승규, 정태욱\*, 백승민\*  
 창원대학교 전기공학과, \*LG전자 디지털 어플라이언스 사업본부 연구소

Winding Design of Pole Change Motor for Harmonics Reduction

Hyuk Nam, Jung-Pyo Hong, Seung-Kyu Jeong\*, Tae-Uk Jung\*\*, Seung-Myun Baek\*\*  
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Nat'l Univ., \*EM-Tech, \*\*DA Lab(C)

**Abstract** - The winding design of a capacitor-run single-phase induction motor for changing two poles(2-/4-pole) is proposed for reducing the harmonics of Magneto Motive Force(MMF) in the airgap at 2-pole. To improve motor performance, it is important to analyze exactly the harmonics and design the winding pattern for its harmonics reduction. The winding design method to reduce the harmonics is suggested in this paper and its characteristics are analyzed by using equivalent circuit considering harmonic components. The various performances of the pole change motor with the proposed winding pattern are compared with the experimental results.

1. 서 론

가전 분야에 있어 동력을 필요로 하는 장치의 대부분이 전동기를 구동원으로 이용하고 있다. 특히, 단상유도전동기는 상용 전원을 별도의 변환 장치 없이 구동할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 그 중에서 콘덴서 구동형 단상유도전동기는 다른 단상유도전동기와 비교하여 효율이 높고 기동 특성이 우수하여 경제적이면서도 고효율화를 위한 제품의 구현에 적합하여 가전제품의 구동원으로 널리 이용되고 있다[1]. 한편, 시스템의 부하 특성에 대응할 수 있는 가변속 전동기의 필요성이 커짐에 따라 고가의 인버터나 드라이브를 사용하지 않고 간단한 극변환 스위치만을 사용한 극수의 변환을 통하여 가변속 운전이 가능한 극변환형 전동기에 대하여 많은 관심이 집중되고 있다.

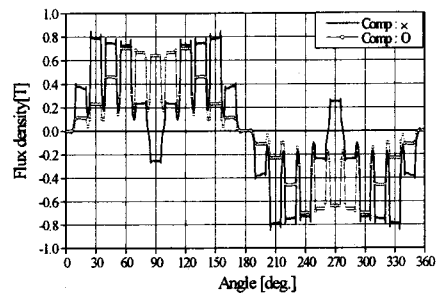
본 논문에서는 4극으로 기동하여 운전중인 콘덴서 구동형 단상유도전동기를 주권선의 결선을 바꾸어 2극으로 극변환 하는 2/4극 극변환 전동기에 대해서 다루고 있다. 특히, 2극에서는 주권선만으로는 정현적 공극자속밀도, 즉, 공극기자력 확보의 어려움으로 별도의 보상권선을 주권선과 병렬로 연결한다. 그러나, 보상권선의 권선 분포에 따라서 공극기자력에 포함될 수 있는 저차고조파로 인하여 저속에서 역토크 발생, 극변환 토크 및 최대토크 감소 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 전동기에 있어서 공극기자력의 고조파를 정확하게 분석하여 특성 해석에 반영하고 이를 바탕으로 하여 고조파 저감을 위한 보상권선 설계는 상당히 중요하다.

본 연구에서는 해석적인 방법을 통한 공극기자력 및 그에 대한 고조파를 분석하고 이를 등가회로의 회로 정수 산정에 반영하여 특성 해석을 수행하였다. 또한, 고조파 저감을 위한 보상권선 결정 방법을 제시하여 이상 기동 현상을 제거할 수 있는 보상권선을 설계하였다. 이 보상권선이 권선된 전동기를 제작하여 실험을 통한 전동기 특성을 분석하였으며, 특성 해석에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 해석치를 실험치와 비교·분석하였다.

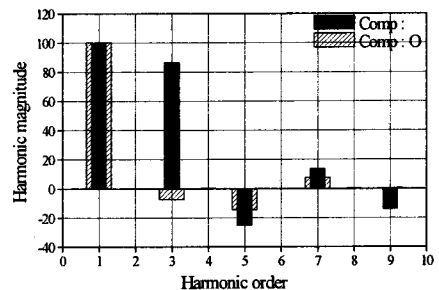
2. 본 론

2.1 보상권선의 유무에 따른 전동기 토크 특성

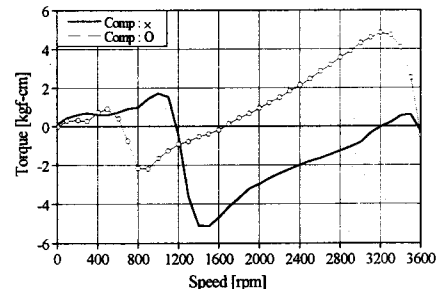
그림 1은 보상권선의 유무에 따라서 2극 운전시 FEM에 의한 공극자속밀도 분포 및 고조파 분석 결과와 실험에 의한 토크 특성을 나타낸 것이다. 그림 1(a)에서 보상권선은 주권선에 의한 공극자속밀도가 보다 정현적인 형태가 되도록 공극자속밀도를 보상하는 역할을 한다. 그림 1(b)에서 보상권선의 영향으로 특히, 제3 고조파는 현저하게 감소하고, 이로 인하여 그림 1(c)의 토크특성 곡선에서 제 3고조파의 지배적인 영향으로 인한 1200[rpm] 부근에서의 큰 역토크는 상당히 감소하고 어느 정도의 최대토크도 확보되었다.



(a) 공극자속밀도 분포



(b) 공극자속밀도의 고조파 분석 결과



(c) 회전속도에 따른 토크 특성

그림 1. 주권선 여자에 의한 2극 특성

## 2.2 2극에 대한 해석이론

4극에서 대칭좌표계법에 의한 기본파에 대한 등가회로를 구성하여 해석하는 방법과는 달리, 2극에서는 고조파를 고려한 등가회로로부터 주권선과 보상권선에 대해 별도로 해석한 결과를 중첩하여 특성해석을 수행한다.

### 2.2.1 고조파를 고려한 등가회로

그림 2는 고조파를 고려한 등가회로이다.

$V_1, R_1, X_1, R_2, X_2, X_m$ 은 기본파에 대한 등가회로의 전압 및 회로정수와 동일하며  $X_{m-n}, R_{2-n}, X_{2-n}$ 은 각각 고조파에 대한 여자리액턴스와 2차측 저항 및 누설리액턴스 성분을 나타낸다[2]. 각 고조파 등가회로에 대한 2차측 고조파의 정방향 및 역방향 성분의 슬립은 식 (1), (2)와 같다[3].

$$s_{pm} = 1 - n(1 - s) \quad (1)$$

$$s_{nm} = 1 + n(1 - s) \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 고조파 차수를,  $s$ 는 기본파에 대한 슬립을 나타낸다.

### 2.2.2 특성해석 흐름선도

그림 3은 2극에 대한 특성해석 흐름선도를 나타낸다. 고조파 성분은 고조파 등가회로의 여자리액턴스 및 2차측 회로정수에 직접적인 영향을 미치므로 고조파에 대한 분석을 2극 해석시 상당히 중요한 부분이 된다.

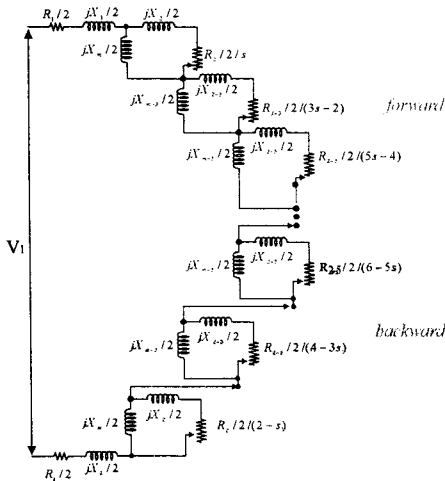


그림 2. 고조파를 고려한 등가회로

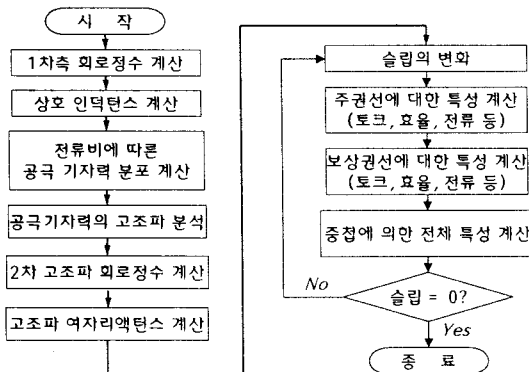


그림 3. 2극 등가회로 특성해석 흐름선도

가. 해석적 방법에 의한 공극기자력 산정

해석적 방법에 의한 공극기자력은 먼저, 한 슬롯내의 도체가 전 공극에 미치는 기자력을 계산하며, 마찬가지로 모든 슬롯내의 도체에 대하여 동일하게 적용하고, 이를 중첩시켜 기자력을 산정한다. 이때, 아래의 세 가지 가정이 부여된다.

- ① 철심의 투자율은 무한대이다.
- ② 고정자는 평활 철심이다.
- ③ 주권선과 보상권선의 위상차는 없다.

$\theta$  [deg.]의 위치에  $i$  [A]의 전류가 흐르고 있는  $N$  개의 도체가 존재한다고 할 때,  $\alpha$  [deg.]위치에서의 공극기자력은 식 (3)과 같다[4].

$$MMF = \frac{Ni}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n(\alpha - \theta) \quad [AT] \quad (3)$$

여기서,  $n$ 은 고조파 차수를 나타내고,  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ )는 기자력이 미치는 지점을 나타낸다.

나. 공극기자력의 고조파 분석

DFT(Discrete Fourier Transformation)를 이용한 공극기자력의  $n$ 차 고조파의 크기  $[VH]_n$ 는 식 (4)와 같다.

$$[VH]_n = \frac{2}{\text{Num}} \sum_{i=0}^{\text{Num}} [VP]_i \sin\left(\frac{2\pi ni}{\text{Num}}\right) \quad (4)$$

여기서 Num은 데이터 개수,  $[VP]_i$ 은 각 데이터에 대한 기자력의 크기를 나타낸다. 그리고, 기본파에 대한 고조파의 기자력비는  $[VH]_n/[VH]_1$ 로써 나타내며, 이 기자력비는 고조파 등가회로의 여자리액턴스와 2차측 회로정수를 구하는데 매우 중요한 요소가 된다[5].

### 2.3 고조파 저감을 위한 보상권선 설계

2극에서는 주권선과 보상권선에 의한 공극기자력이 정현적이 되도록 보상권선의 배치 및 분포를 조절함으로써 저차고조파 성분들을 저감시킬 수 있다. 그림 4는 공극기자력의 고조파 성분들을 최소화하기 위한 보상권선 결정 방법에 대한 한 흐름선도이다. 이때, 공극기자력의 기본파에 대한 각 고조파 성분들의 평균값의 비인 왜형율은 공극기자력의 고조파에 의한 왜곡현상을 나타낸 것으로 왜형율이 클수록 공극기자력에 포함되어 있는 고조파 성분은 많다는 것을 의미한다. 왜형율을 산정하는 식은 식 (5)와 같이 나타낸다[6].

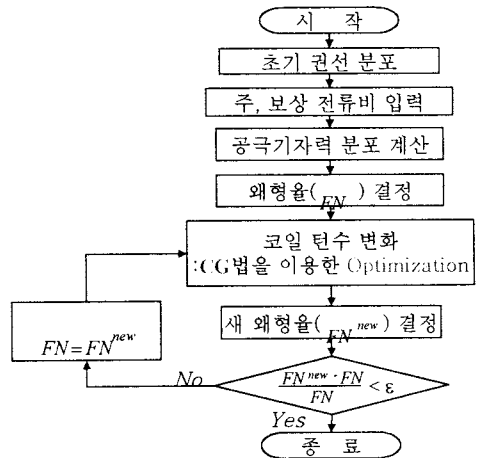


그림 4. 고조파 저감을 위한 보상권선 설계 흐름선도

$$[FM]_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=1,3,5,\dots} [VH]_n^2}}{[VH]_1} \quad (5)$$

여기서,  $[FM]_i$ 는 주권선과 어떤 보상권선 분포에 의한 공극기자력의 왜형률,  $[VH]_n$ 은  $n$ 차 고조파에 대한 기자력 크기,  $[VH]_1$ 은 기본파에 대한 기자력의 크기를 나타낸다.

## 2.4 해석 결과 및 분석

### 2.4.1 전동기 제원

표 1은 주권선, 보조권선 및 보상권선으로 구성된 극 변환 전동기의 제원을 나타낸다.

### 2.3.2 공극기자력 및 고조파 분석

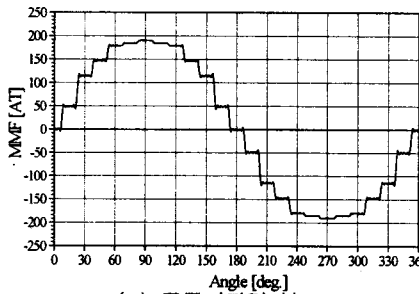
그림 5는 공극기자력 고조파 저감을 위해 설계된 보상권선을 시행한 극변환 전동기에 대하여 2극 운전시 주권선과 보상권선에 의한 공극기자력 분포와 그에 대한 고조파 분석 결과이다. 공극기자력은 정현적인 파형에 근접하며, 저차고조파들은 5[%] 이내로 매우 적은 값을 나타낸다.

### 2.3.3 해석결과 및 분석

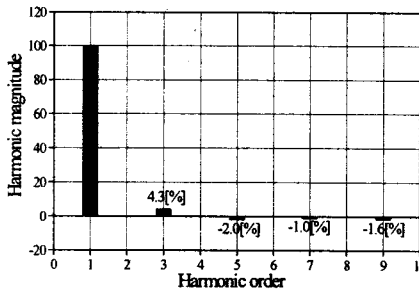
그림 6,7은 회전속도에 따른 2/4극 토크 및 2극 전류에 대한 특성해석 결과를 실험치와 비교한 것이다. 그림 6의 4극뿐만 아니라 2극 토크 특성에서도 고조파의 영향을 거의 받지 않아 굴곡현상이 나타나지 않았다.

표 1. 해석모델에 대한 제원

세부항목	치수	단위
인가전압	220	V
극수	4/2	
주 파수	60	Hz
고정자/회전자 슬롯수	24/34	
공극의 길이	0.3	mm
회전자 외경	60	mm
고정자 적층길이	48	mm



(a) 공극기자력 분포



(b) 고조파 분석 결과

그림 5. 공극기자력 및 고조파 분석

표 2. 토크 특성 (단위 kgf·cm)

	해석치	실험치
기동 토크	5.65	5.53
극변환 토크	5.42	5.24
4극 최대토크	5.56	5.71
2극 최대토크	15.3	14.4

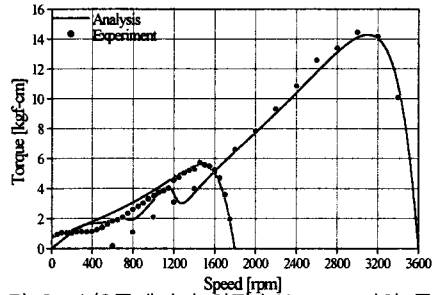


그림 6. 4/2극에서의 회전속도-토크 변화 곡선

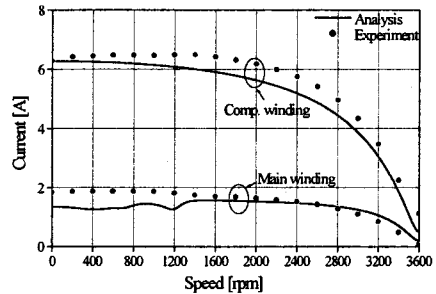


그림 7. 2극에서의 회전속도-전류 변화 곡선

표 2는 토크에 대한 특성을 해석치와 실험치를 비교하여 나타낸 것이다. 고조파로 인하여 발생하던 역토크의 영향을 받지 않기 때문에 극변환시 토크뿐만 아니라 2극에서의 최대토크도 충분히 큰 값을 확보하였다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 등가회로를 이용하여 2/4극 극변환 전동기의 특성 해석을 수행하였다. 4극에서는 대칭좌표계법을 이용하여 기본파에 대한 등가회로를 구성하여 전동기 특성을 해석하였으며, 4극과는 달리 2극에서는 고조파가 전동기 특성에 직접적인 영향을 미치게 되므로 기본파 등가회로 이외에 고조파 성분 등가회로를 고려하였다. 또한, 2극에서 발생하는 저차고조파를 저감시키기 위한 보상권선 설계 방법을 제시하여 권선을 설계하였다. 설계된 보상권선을 시행한 전동기의 실험치를 해석치와 비교·분석하였으며 2극 운전시 저차고조파의 영향이 매우 저감되었음을 검증하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 홍정표 외, "유한요소법과 등가회로 해석의 결합에 의한 큰덴서 구동형 단상유도전동기의 특성해석," 대한전기학회 하계 학술대회논문집, B, pp.837-839, 2000
- [2] P. L. Cochran, *Polyphase Induction Motors -Analysis, Design, and Application*, Marcel Dekker, 1989
- [3] 朴旻鎬, 誘導機器, 東明社, 1998
- [4] B. Heller, V. Hamata, *Harmonic field effects in induction machines*, Academia, Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, 1977
- [5] C. I. G. Veinott, *Theory and Design of Small Induction Motors*, McGRAW-HILL, 1959
- [6] 李允鍾, 新編電氣機械, 東明社, 1986