

고조파를 고려한 극변환(2/4극) 콘덴서 구동형 단상유도전동기 특성해석

남 혁, 홍정표, 정승규, 정태욱*, 백승민*

창원대학교 전기공학과, *LG전자 디지털 어플라이언스 사업본부 연구소

Characteristic Analysis of Capacitor-Run Single-Phase Pole Change Induction Motor Considering Harmonics

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 - This paper proposes the analysis method for the pole change motor that is a capacitor-run single-phase induction motor. As the Magneto motive force(MMF) at 2-pole becomes severe distortion, it is necessary to consider the harmonics for the characteristic analysis of the motor. Therefore, the performance of motor is analyzed by equivalent circuit considering the harmonic components. The validity of the proposed analysis method for the pole change motor is verified through simulations and experimental results.

1. 서 론

시스템의 부하 특성에 대응할 수 있는 가변속 전동기의 필요성이 커짐에 따라 현재 인버터 구동형 3상 유도전동기, BLDC 전동기, 스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)와 같은 전동기가 사용되고 있다. 이와 같은 전동기들은 성능이나 효율적이 측면에서는 우수한 특성을 가지고 있지만 경제성이 떨어진다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 적은 비용으로 가변속 능력을 갖는 전동 시스템 개발에 대한 필요성이 요구되어짐에 따라 고가의 인버터나 드라이브를 사용하지 않고 간단한 극변환 스위치만을 사용한 극수의 변환을 통하여 가변속 운전이 가능한 극변환형 전동기에 대한 관심이 대두되고 있다.

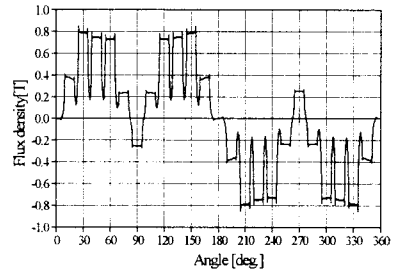
본 논문에서는 4극으로 기동하여 운전중인 콘덴서 구동형 단상유도전동기를 주권선의 결선을 바꾸어 2극으로 극변환 하는 2/4극 극변환 전동기에 대해서 다루고 있다. 특히, 2극에서는 주권선만으로는 정현적인 공극기자력 확보에 어려움이 있어 별도의 보상권선을 주권선과 병렬로 연결하였다. 4극 운전시 콘덴서 구동형 단상유도전동기는 다상 평형기와는 달리 주권선과 보조권선의 기자력 차에 의한 자기적인 불평형으로 인하여 특성해석상에 어려움은 있으나, 정현적인 권선 분포로 인하여 고조파의 영향은 거의 나타나지 않는다[1]. 그러나, 2극 운전시에는 주권선과 보상권선에 의한 공극기자력에는 무시할 수 없는 저차고조파가 포함되어 있으며 이 고조파들은 실제 전동기 특성에 큰 영향을 미치므로 고조파를 고려한 특성해석은 필수적이다.

본 연구에서는 등가회로법을 이용하여 특성 해석을 수행하였고, 회로정수는 집중정수(Lumped parameter)로 고려하여 산정하였다. 4극시 불평형 자계는 회전자계설의 이론을 바탕으로 불평형 상태를 대칭 성분으로 분해하여 해석하는 대칭좌표계법(symmetrical-coordinate method)을 이용하였으며 기본파만을 고려하였다[1],[2]. 2극에서는 기본파 등가회로 이외에 고조파 성분의 등가회로를 고려하였다. 이때, DFT(Discrete fourier Transformation)를 이용한 고조파 분석을 통하여 고조파 등가회로의 회로 정수를 산정 반영하였다. 특성해석에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 특성해석결과를 실제 제작된 전동기의 실험 결과와 비교·분석하였다.

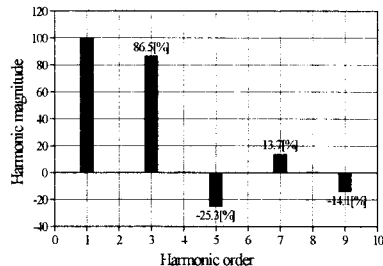
2. 본 론

2.1 보상권선의 필요성

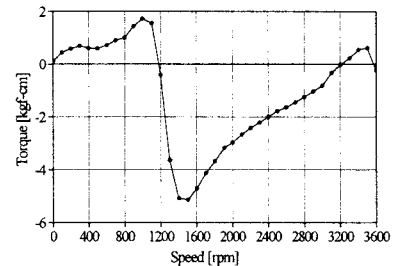
그림 1은 2극 운전시 주권선에 의한 공극자속밀도 분포 및 고조파 분석 결과와 실험에 의한 토크 특성을 나타낸 것이다. 그림 1(a)의 공극자속밀도에는 그림 1(b)에서와 같이 상당히 큰 제 3, 5고조파가 포함되어 있다는 것을 알 수 있으며 그림 1(c)의 속도에 따른 토크 결과에서는 특히, 제 3고조파의 영향으로 인하여 토크가 1200[rpm]부근에서 동기화가 이루어지고 큰 역토크가 발생함을 나타내고 있다. 또한, 이 역토크로 인하여 최대토크는 크게 감소하였음을 분석할 수 있다. 따라서, 보상권선은 주권선에 의한 공극자속밀도를 보상하여 역토크를 감소시키고 극변환 토크 및 최대 토크를 확보할 수 있도록 한다.



(a) 공극자속밀도 분포



(b) 공극자속밀도의 고조파 분석 결과



(c) 회전속도에 따른 토크 특성

그림 1. 주권선 여자에 의한 2극 특성

2.2 해석이론

4극에서는 대칭좌표계법에 의한 기본파와 등가회로를 구성하여 해석을 수행하고, 2극에서는 고조파를 고려한 등가회로로부터 주권선과 보조권선에 대해 별도로 해석한 결과를 중첩시켜 특성을 해석한다.

2.2.1 4극에 대한 해석이론

4극에 대한 등가회로 구성은 자기적인 불평형 상태를 해석하기 위해 회전자계설을 바탕으로 하여 불평형 자계를 대칭 성분으로 분해해서 해석하는 대칭좌표계법을 이용하였다. 그림 2는 대칭좌표계법에 의한 주권선 보조권선 전압을 나타낸 것이며 식 (1), (2)는 그림 2로부터 주권선과 보조권선 전압을 각각 대칭성분으로 표현한 것이다[2]. 등가회로 회로정수 산정시 등가회로 해석의 신뢰성에 큰 영향을 미치는 여자리액턴스의 포화계수는 각 슬립에 대해 반복 계산을 통하여 수렴시키는 방법으로 산정하였다. 그림 3은 슬립에 따라 포화계수를 고려하는 단상유도기 등가회로 해석 방법에 대한 흐름선도이다[1].

$$\vec{V}_M = \vec{V}_P + \vec{V}_N \quad (1)$$

$$\vec{V}_A' = j\vec{V}_P - j\vec{V}_N \quad (2)$$

여기서, \vec{V}_M 은 주권선 전압, \vec{V}_A' 은 주권선에 치환된 보조권선 전압, \vec{V}_P , \vec{V}_N 은 각각 정방향, 역방향 전압을 나타낸다.

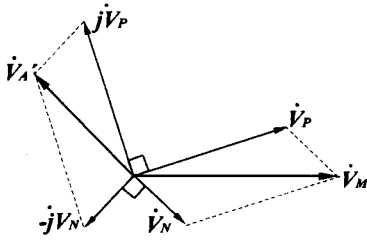


그림 2. 대칭좌표계에 의한 주권선과 보조권선의 전압

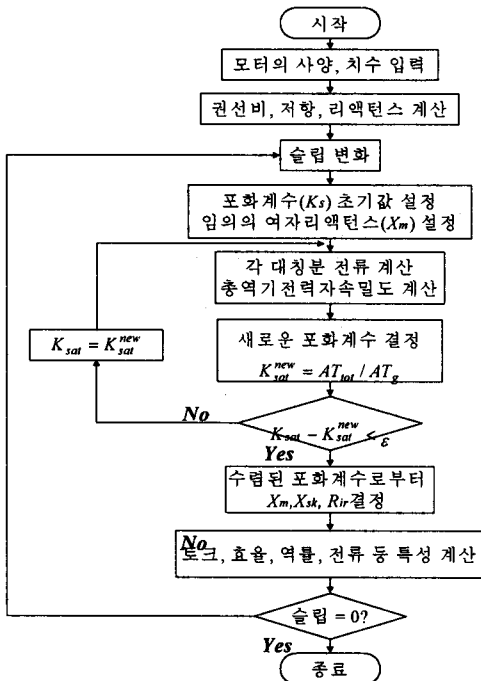


그림 3. 등가회로에 의한 특성해석 흐름선도

2.2.2 2극에 대한 해석이론

가. 공극자속밀도의 고조파 분석
철심의 투자율이 무한대이고 평활철심으로 가정하여 DFT를 이용한 해석적 방법으로 공극자속밀도 n 차 고조파의 크기 $[VH]_n$ 는 식 (3)과 같다.

$$[VH]_n = \frac{2}{\text{Num}} \sum_{i=0}^{\text{Num}} [VP]_i \sin\left(\frac{2\pi ni}{\text{Num}}\right) \quad (3)$$

여기서, Num은 데이터 개수, $[VP]_n$ 은 각 데이터에 대한 기자력의 크기를 나타내며 기본파에 대한 고조파의 기자력비는 고조파 등가회로의 회로정수 산정에 중요한 요소가 된다[5].

나. 등가회로 구성

2극 운전시 공극자속밀도 포함되어 있는 고조파는 전동기의 특성에 큰 영향을 미치므로 그림 4와 같이 기본파 이외에 고조파 고려한 등가회로 구성하여 해석한다 [3]. 이에 대한 특성해석 흐름선도는 그림 5와 같다. 각 고조파 등가회로에 대한 2차측 고조파의 정방향 및 역방향 성분의 슬립은 각각 식 (4), (5)와 같다[4].

$$s_{pn} = 1 - n(1 - s) \quad (4)$$

$$s_{nn} = 1 + n(1 - s) \quad (5)$$

여기서 n 은 고조파 차수, s 는 기본파에 대한 슬립을 나타낸다.

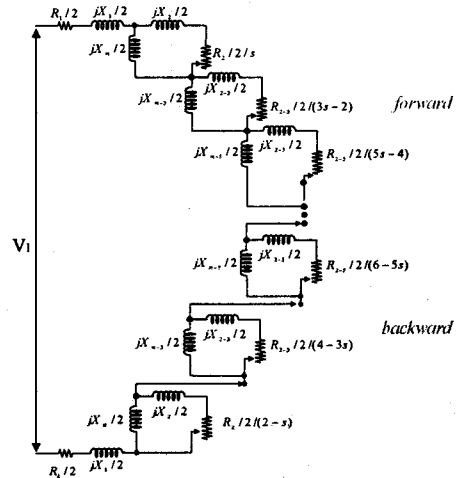


그림 4. 고조파를 고려한 등가회로

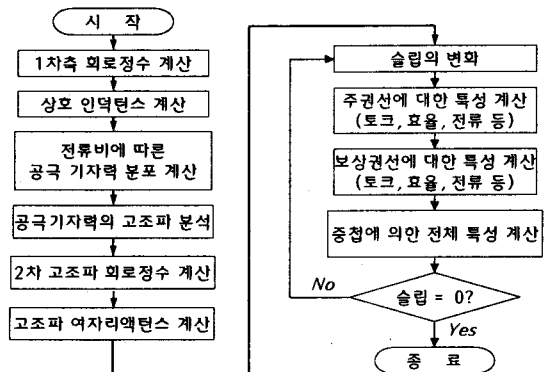


그림 5. 2극 특성해석 흐름선도

$V_1, R_1, X_1, R_2, X_2, X_m$ 은 기본파에 대한 등가회로의 전압 및 회로정수와 동일하며 $X_{m-n}, R_{2-n}, X_{2-n}$ 는 각각 고조파에 대한 여자리액턴스와 2차측 저항 및 누설 리액턴스 성분을 나타낸다. 극변환 단상유도기의 공극자속밀도에 포함되어 있는 고조파는 홀수 고조파가 지배적으로 존재하고 전동기 특성에 큰 영향을 미치는 제 3, 5, 7, 9 고조파 성분을 등가회로 해석에 반영하였다.

2.3 해석 결과 및 분석

2.3.1 전동기 제원

표 1은 주권선, 보조권선 및 보상권선으로 구성된 극변환 단상유도전동기의 제원을 나타낸다.

2.3.2 공극자속밀도 및 고조파 분석

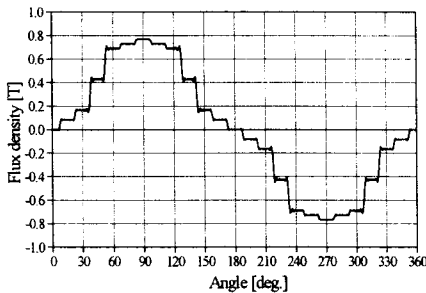
그림 6은 주권선과 보상권선에 의한 2극 운전시 공극자속밀도 분포와 고조파를 분석한 결과를 나타낸 것으로서, 제 3, 5고조파가 기본파에 대하여 각각 17.6[%], -7.3[%]로 다른 홀수 고조파에 비해 크게 나타나며, 전동기는 이 두 고조파에 의해 저속에서 역토크의 발생 가능성을 예측할 수 있다.

2.3.3 해석결과 및 분석

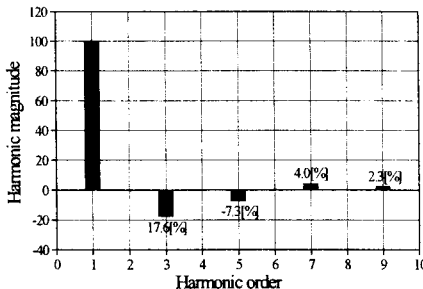
그림 7과 그림 8은 회전속도에 따른 4/2극 토크 및 2극 전류에 대한 특성해석 결과를 실험치와 비교한 것이다. 그림 7의 4극 토크 특성에서는 고조파의 영향을 거의 받지 않기 때문에 곡선상에 굴곡 현상은 거의 나타나지 않았다.

표 1. 해석모델에 대한 제원

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



(a) 공극자속밀도 분포



(b) 고조파 분석 결과

그림 6. 공극자속밀도의 고조파 분석

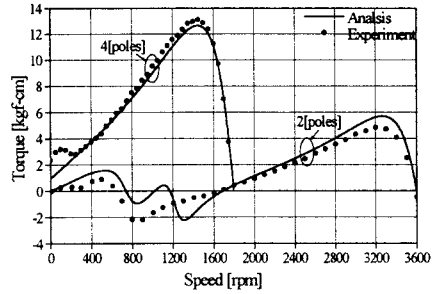


그림 7. 4/2극에서의 회전속도-토크 변화 곡선

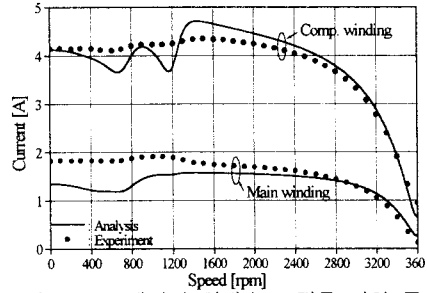


그림 8. 2극에서의 회전속도-전류 변화 곡선

반면에, 2극 토크 특성에서는 고조파 분석 결과로부터 제 3, 5고조파의 영향을 받아 720[rpm], 1200[rpm] 부근에서 역토크가 발생하였다. 이 역토크는 1700[rpm]에서의 기본파 성분에 의한 토크를 저감시켜 극변환 할 수 있는 토크가 거의 확보되지 않았으며, 기본파 성분에 의한 최대토크에도 영향을 미쳐 그 값을 저감시키는 결과를 나타내었다. 한편, 실험치에서는 제 3고조파보다는 오히려 제 5고조파의 영향이 크게 나타나는데 이것은 철심에서 발생하는 포화현상에 의한 것으로 해석적 방법에 의한 공극자속밀도 산정시, 가정으로부터 발생하는 오차로 판단되어 진다.

3. 결 론

본 논문에서는 등가회로법을 이용한 2/4극 극변환형 단상유도전동기의 특성 해석 방법에 대하여 제시하였다.

4극에서는 대칭좌표계법을 이용하여 기본파에 대한 등가회로를 구성하여 특성해석을 수행하였고, 4극과는 달리 2극에서는 고조파가 전동기 특성에 직접적인 영향을 미치게 되므로 기본파 등가회로 이외에 고조파 성분 등가회로를 고려하였다. DFT를 이용한 공극자속밀도의 고조파 분석 결과를 회로정수산정에 반영하였다. 이러한 등가회로에 의한 특성해석 결과로부터 2극에서 저차고조파의 영향에 의한 역토크 발생, 극변환 토크 저감 및 최대토크 저감에 대한 현상을 파악할 수 있었다. 또한, 실제 제작된 전동기의 실험치와 비교 분석을 통하여 본 해석 방법의 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 홍정표 외, "유한요소법과 등가회로 해석의 결합에 의한 콘덴서 구동형 단상유도전동기의 특성해석," 대한전기학회 학계학술대회논문집, B, pp.837-839, 2000
- [2] 三宅 博, 小形ACモータの設計と制御~BASICからCADまで~, 総合電子出版社, 1981
- [3] P. L. Cochran, Polyphase Induction Motors -Analysis, Design, and Application, Marcel Dekker, 1989
- [4] 朴旻鎬, 誘導機器, 東明社, 1998
- [5] C. G. Veinott, Theory and Design of Small Induction Motors, McGRAW-HILL, 1959