

단상유도기의 권선법 및 슬롯 구조에 따른 특성 해석 연구

황요한*, 김기찬, 원성홍, 정대성, 이주
한양대학교 전기공학과

A Study on the Characteristic Analysis of Winding Method and Slot Structure for Single Phase Induction Motor

Yo-Han Hwang*, Ki-Chan Kim, Sung-Hong Won, Dae-Sung Jung, Ju Lee
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper presents a study on the winding method and structure of core of single phase induction motor in order to design the high efficiency motor. In case of single phase induction motor, winding fill factor and the number of turns in each slot are not uniform in general. Moreover, these can be the critical parameters for high efficiency design in case the size of motor should be restricted within certain volume. Therefore, we should analyze the effects of these parameters related to efficiency parameter. The characteristic analysis was performed by using FEM.

1. 서 론

고유가 행진의 지속과 에너지 자원 한계에 대한 위기감이 고조됨으로써 여느 때와는 다르게 에너지 절약에 대한 관심이 지속적으로 증가함으로써 전동기에 대한 고효율화가 중요하다 볼 수 있다. 현재에는 구조가 간단하여 신뢰성이 높고 제작이 용이할 뿐만 아니라 저가격등의 장점을 갖고 있는 단상유도기가 가전분야 외에 산업용기기분야의 폭넓은 시장을 가지고 있지만 주권선과 보조권선의 불평형 자계에 의한 진동 현상과 회전자 동손에 의한 효율 저하 등의 단점이 존재하게 된다. 따라서 이러한 단점들을 보완한 새로운 고효율 단상유도기에 대한 관심이 증대되고 있고 고효율화 시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 필요한 상황이다.

본 논문에서는 효율을 높이기 위해 고려해야 할 사항으로써 단상유도기 권선 법에 관련한 특성 해석과 권선 점적율을 고려한 슬롯 구조에 대한 연구를 수행하였다. 단상유도기 고정자 슬롯의 주권선, 보조권선의 턴 수는 각 슬롯별로 다른데, 슬롯별 권선 턴 수 조합에 따른 전동기 성능을 명확히 이해하여야만 우수한 성능의 모터 설계를 수행할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 권선 턴 수를 슬롯별로 고려하고, 여러 조건을 가정된 결과들을 계산, 비교, 분석함으로써 각 슬롯의 턴 수에 대한 적절한 설계 방법을 규명하였으며 슬롯별 권선 점적율이 일정하도록 슬롯을 변경하면서 얻은 결과를 고찰함으로써 우수한 전동기 특성을 보이는 슬롯 구조에 대한 연구를 수행하였다. 구체적인 연구 내용으로는 주 모델과 비교 모델의 기저력 파형 FFT분석을 통한 고조파의 분석과 THD를 비교함으로써 슬롯별 턴 수에 따른 특성을 연구 하였으며 점적율을 최대화 하는 슬롯 구조를 갖는 모델에 대해서 해석한 결과를 주 모델과 비교해 봄으로써 더 우수한 특성을 나타내는 슬롯 형상을 보였다. 해석 연구는 유한요소법(FEM), FFT, THD등의 방법을 사용하여 수행하였다.

2. 권선 턴 수 배열에 대한 분석

2.1 해석 모델

주 모델의 정격 특성은 다음의 표 1에서 보이고 있으며 연구를 진행하면서 각 모델의 비교, 분석은 주 모델의 정격 토크를 발생하는 부분을 기준으로 하였다.

표 1. 주 모델의 정격 사양

항 목	값	항 목	값
Power(W)	57	Line current(A)	0.4
Torque(Nm)	0.34	main current(A)	0.2
Speed(rpm)	1600	Aux. current(A)	0.3
Voltage(V)	220	pole number	4

표 2. 모델의 권선 턴 수

	권 선	C1	C2	C3
주 모델	주권선	130T	165T	110T
	보조권선	142T	175T	115T
비교 모델	주권선	135T	135T	135T
	보조권선	144T	144T	144T

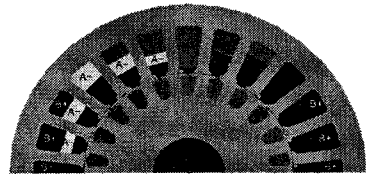


그림 1. 주 모델의 권선 구조

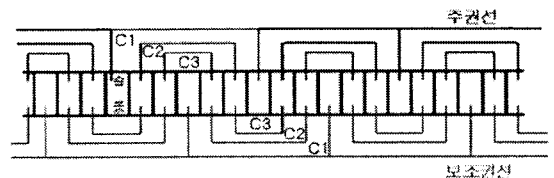


그림 2. 주 모델 및 비교 모델의 권선 배치

표 2와 그림 1, 2에서는 본 연구의 대상이 된 모델의 권선 턴 수와 배치, 슬롯별 점적율을 보이고 있다. 권선은 그림에서 보는 바와 같이 주권선, 보조권선으로 구성되어 있으며 집중권으로 감겨져 있다. 주권선의 직경은 0.3mm, 보조권선의 직경은 0.4mm로 하였다. 비교 모델의 경우 각 슬롯의 턴 수만을 다르게 하였고 그 외의 모든 사항은 주 모델과 동일하게 하였다.

2.2 결과 분석

두 모델의 결과 비교를 위한 해석 방법으로는 유한요소법(FEM)을 사용하였으며 각 권선에서 발생하는 합성 기자력파형의 FFT분석을 실시하였다. FFT분석을 통한 THD를 모델별로 산출함으로써 주권선, 보조권선의 권선 턴 수 배열에 의해 발생하는 기자력의 왜곡정도를 알아 보고, 그 결과를 비교함으로써 더 좋은 전동기 특성이 나타나는 모델을 보였다. 해석은 시간차분법에서 시간 간격은 전기각 5° 로 유지하고 시물레이션을 기계각 5회전으로 하였다. 2차원 해석으로 스큐는 고려하지 않았고 정격 전압을 투입하여 정상상태가 되었을 때의 파라미터를 산출하여 두 모델을 비교하였다.

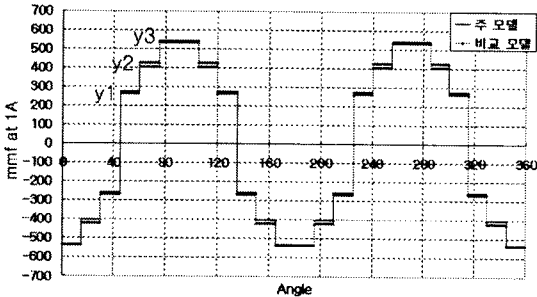


그림 3. 모델별 주권선 기자력 파형

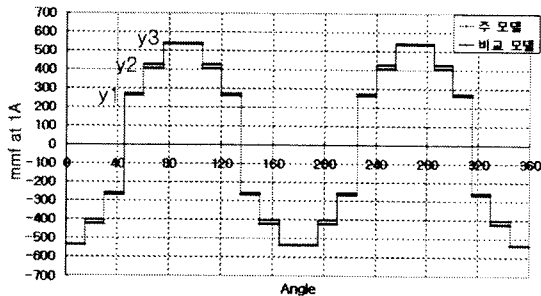


그림 4. 모델별 보조권선 기자력 파형

그림 3, 4는 FFT분석을 하기 위한 각 모델의 주권선 및 보조권선에 나타나는 기자력 파형을 보이고 있다. 각 그림에서 파형의 크기는 주 권선의 경우 y1, y3에서는 주 모델이, y2에서 비교모델이 더 크며 보조 권선의 기자력 크기 또한 주권선의 경우와 같은 경향을 보인다.

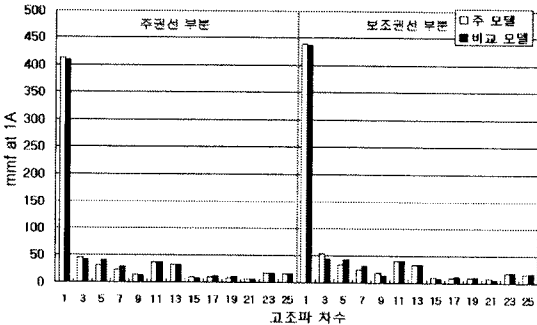


그림 5. 모델별 권선에 따른 기자력 FFT분석

그림 5는 모델별 권선에 따른 각각의 기자력 파형을 FFT분석한 그림이다. 주권선, 보조권선 모두 3고조파를 제외한 모든 고조파에서 비교모델이 더 높게 나왔다. 이러한 두 모델의 FFT분석 결과를 이용하여 각 모델에서의 THD를 계산할 수 있다. 다음은 THD를 구하는 수식이다.

$$\%THD = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{x_{sh}}{x_{s1}}\right)^2} \times 100 \quad (1)$$

여기서 x_{s1} 은 기본파 성분, x_{sh} 는 고조파 성분을 말한다. 우리는 THD를 구함으로써 기자력 파형의 왜곡정도를 알 수가 있고 THD를 낮춤으로써 전동기의 특성도 개선시킬 수가 있다. 다음은 각 모델에 대한 THD와 그에 따른 전동기의 정확한 특성 비교를 위해 주 모델의 정격에 해당하는 토크 부분에서 비교하였다.

표 3. THD에 따른 모델 비교

	주 모델	비교모델
토크(Nm)	0.34	0.34
주권선 기자력 THD(%)	20.97	21.89
보조권선 기자력 THD(%)	20.83	21.91
슬립	0.172	0.161
입력 power(W)	65.27	73.48
출력 power(W)	53.21	53.9
동손(W)	12.07	19.5
철손(W)	10.54	10.92
효율(%)	65.36	58.56

유한요소법에서의 효율 및 출력 계산은 일반적으로 우리가 알고 있는 단순한 입력과 출력의 비가 아닌 다음의 식(2)로부터 구할 수 있다. 표 3에서 나타낸 출력은 축출력이 아닌 속도와 토크에 관계된 출력을 보였으며 여기서 기계손 및 표류부하손은 고려되지 않았다.

$$\text{효율} = \frac{\text{출력} - \text{기계손} - \text{철손} - \text{표류부하손}}{\text{출력} + \text{동손}} = \frac{\text{축출력}}{\text{입력}}$$

$$\text{출력} = 2\pi \times \frac{\text{rpm}}{60} \times \text{토크} \quad (2)$$

결과 비교에서 THD가 전동기의 중요한 특성에 영향을 주는 것을 알 수 있고, 비교 모델보다 다소 양호한 THD를 갖는 주 모델에서 손실이 줄어드는 것을 볼 수 있으며 특히 동손에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. THD는 고조파를 줄임으로써 개선 될 수 있으며 고조파는 그림 3, 4의 y1, y2, y3에서 고조파를 최소화 할 수 있는 권선 턴 수를 찾아내야 한다. 따라서 THD를 줄이기 위한 슬롯별 권선 턴 수 조합을 찾아냄으로써 전동기의 특성을 향상시킬 수가 있다. 그림 6은 각 권선별 전류 파형을 비교한 그림이다. 보조권선의 크기는 비슷하나 주 권선에서 THD가 높은 모델의 전류가 크게 뒀을 보였다.

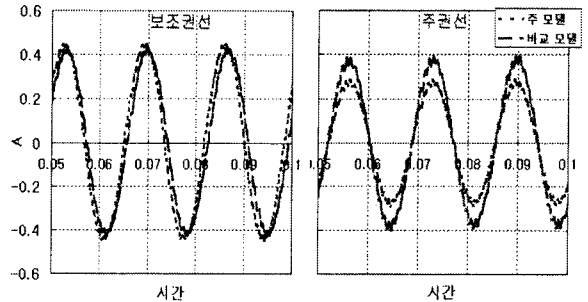


그림 6. 전류 파형 비교

3. 슬롯 형상에 따른 전동기 특성

3.1 해석 모델

슬롯별 권선 점적율을 고려한 슬롯 형상에 따라 나타나

는 전동기의 특성에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 점적율을 최대로 하는 슬롯 형상을 적용 시켰을 때의 결과를 주 모델과 비교하였다.

권선의 점적율을 최대로 하는 슬롯의 형상을 만들기 위해서, 슬롯의 치수와 주 모델의 여러 조건들은 계속 동일하게 유지한 상태에서 단지 슬롯의 높이만을 조절하여 점적율을 최대로 하였다. 점적율을 계산하기 위해서는 주권선, 보조권선의 직경, 슬롯별로 다르게 감기는 턴 수를 알아야하고 슬롯의 면적을 알아야한다. 그림 7, 표 4는 그림 1의 주 모델에서 권선 면적과 슬롯 면적의 비율을 약 1로 가져갈 수 있는 슬롯의 높이와 해석 모델에 대하여 나타내었다.

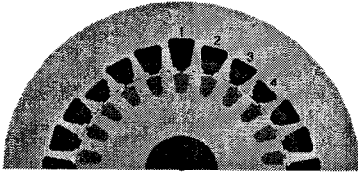


그림 7. 권선 점적율을 최대로 하는 슬롯 형상

표 4. 변경된 슬롯의 높이

슬롯 번호	변경 전 점적율(%)	변경 전 높이(mm)	변경 후 높이(mm)
1	66	9.32	5.75
2	55	9.32	4.6
3	48	9.32	3.89
4	34	9.32	2.4

여기서, 슬롯에 따른 권선 턴 수와 배치의 주 모델에서의 조건과 동일하다.

3.1 결과 분석

주 모델의 특성 분석을 통한 결과와 점적율을 최대로 하기 위해 슬롯 형상을 변경한 모델의 분석 결과를 비교하여 우수한 전동기 특성을 나타내는 슬롯 형상을 보였다.

표 5. 슬롯 변경 전, 후의 특성 비교

	슬롯 변경 전	슬롯 변경 후
토크(Nm)	0.34	0.34
슬립	0.172	0.178
입력 power(W)	65.27	65.32
출력 power(W)	53.21	53.1
동손(W)	12.07	12.08
철손(W)	10.54	8.3
효율(%)	65.36	68.5
토크 리플(Nm)	0.16	0.26

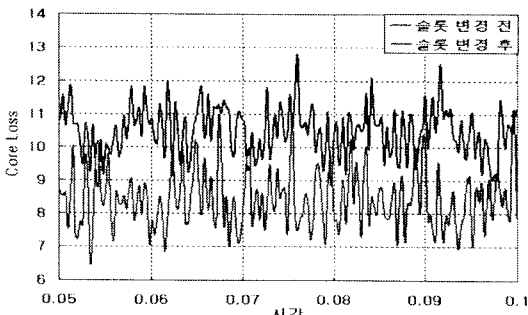


그림 8. 슬롯 변경 전, 후의 철손 비교

표 5에서 보인 것은 주 모델의 정격에 해당하는 토크를

발생하고 있는 경우를 비교한 것이다. 점적율을 높이기 위해 슬롯 형상을 변경한 경우의 모터 특성이 보다 우수하게 나오는 것을 볼 수 있다. 표 5에 제시한 비교에서 슬롯 변경 후에 전체적인 효율이 증가하였으며 철손과 토크 리플이 줄어들음을 알 수 있다. 그림 8은 철손 비교에 대한 그림이다.

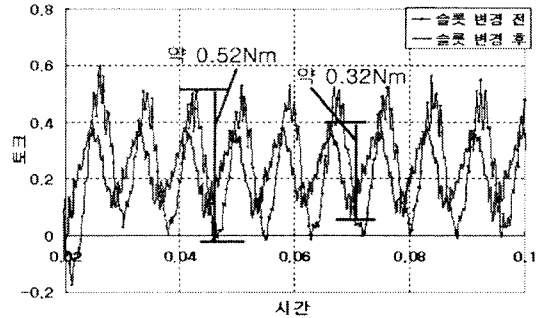


그림 9. 슬롯 변경 전, 후의 토크 리플 비교

그림 9은 슬롯 변경 전, 후의 토크 리플에 대해서 보이고 있다. 점적율을 높게 하였을 경우 토크가 증가하고, 그와 더불어 토크 리플은 감소하는 것을 볼 수가 있다. 이 때, 주 모델의 토크 리플은 약 0.26Nm정도이고 슬롯 변경 후 모델의 토크 리플은 약 0.16Nm 정도이다. 토크 리플이 감소함으로써 전동기는 더욱 우수한 특성을 갖게 된다는 것을 알 수가 있으며 우수한 전동기 설계를 위해서는 슬롯별 권선 점적율을 고려함으로써 전동기의 제반 특성을 향상시킬 수가 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 단상 유도기 권선과 관련하여 슬롯에 따른 권선 턴 수 배열에 대한 분석을 하였고 권선의 점적율을 고려하여 슬롯별 권선 점적율이 일정하도록 슬롯을 변경했을 경우의 결과를 고찰함으로써 우수한 전동기 특성을 보이는 슬롯 구조와 권선 턴 수 배열에 관한 해석 연구를 수행하였다.

권선 턴 수 배열에 관한 분석은 기차력 파형의 FFT 분석을 통하여 산출된 THD가 전동기의 특성에 영향을 주는 것을 모델의 비교를 통해 분석함으로써 전동기 설계 시 각 슬롯의 턴 수에 대해서 고조파를 최소로 하는 턴 수 조합으로 전동기의 특성을 향상시킬 수 있음을 보였다.

슬롯 형상에 따른 전동기 특성은 슬롯 변경 전과 후의 특성을 비교, 분석함으로써 점적율을 최대로 하였을 경우에 전동기 특성이 좋게 됨을 보였다.

전동기 설계를 위해서 고려해야할 사항이 많이 있지만 본 논문에서 다룬 권선법 및 슬롯 구조에 대한 특성 연구에 관한 결과를 활용함으로써 보다 우수한 특성을 갖는 전동기를 설계 할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 에너지관리공단에서 시행한 프라미엄급 고효율 단상 유도전동기 설계/해석 사업으로 수행되었음
과제번호(2005-01-0031-3-010)

[참고 문헌]

- [1] 임달호, "전기계의 유한요소법", 1986, 동명사
- [2] 박冕鎬, "유도기기", 1969, 동명사
- [3] M. Enokizono and T. Miyazaki, "Study on torque improvement of single-phase induction motor by using FEM", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 35, NO. 5, SEPTEMBER 1999
- [4] CYRIL G. VEINOTT, E.E., D.Eng. "Theory and Design of Small Induction Motors", 1959, McGRAW-HILL