커패시터 구동형 단상유도전동기의 권선설계에 대한 연구

논 문
60-4-15

A Study of Winding Design for Capacitor Run Single phase Induction Motor

함 상 환* · 임 중 빈* · 이 주†
(Sang-Hwan Ham · Jong-Bin Im · Ju Lee)

Abstract - This paper is concerned with winding design in capacitor-run single phase motor. Winding design in single phase induction motor is more complicated than that in three phase induction motor, because of using concentric winding in the single phase. Various winding designs are possible, and accordingly layout of the slot is calculated by formula. And then accurate design of winding is available. Using the design process in this paper, we can get the base model with slot layout and turns of windings of 1.12 kW single phase induction motor, and it is verified by finite element analysis. In this paper, winding design and winding layout of single-phase induction motor using concentric winding are suggested.

Key Words : Capacitor run single phase induction motor, Concentric winding design

1. 서 론

단상 유도전동기는 상용 전원을 별도의 변환장치 없이 직접 사용할 수 있으며, 구조가 간단하여 신뢰성이 높고 제작이 용이할 뿐 만 아니라 저가격 등의 장점을 갖고 있으며 브러쉬 구조가 없으므로 내환경성에서 우수한 특성을 갖기 때문에 특히 가전분야에 널리 사용되고 있다[1]. 또한 최근 3상 유도전동기의 최저효율제의 시행에 따라 단상 유도전동기의 고효율화에도 많은 관심을 가지게 되었으며 이와 더불어 단상 유도전동기의 고효율 설계에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으나 단상 유도전동기의 권선의 기본 설계에 대한 내용을 자세하게 다룬 문헌이나 논문이 거의 없는 실정이다 [2]~[4].

단상 유도전동기의 기본 설계는 3상 유도전동기와 거의 유사하나, 단상이라는 특징으로 인하여 주권선과 보조권선이라는 두 권선의 비대칭 2상 구조를 갖게 됨에 따라 권선 설계 시 차이가 발생하게 된다. 또한 3상 유도전동기의 경우 일반적으로 중권을 쓰기 때문에 권선 설계 시 간단하게 권선 배치를 수행할 수 있지만, 단상의 경우 대부분 동심권(Concentric Winding)을 사용하기 때문에 다양한 권선 구조가 존재할 수 있으며, 이에 따른 권선 배치도 수식적으로 고려해주어야 정확한 권선 설계가 가능하다. 따라서 본 논문에서는 동심권을 이용한 단상 유도전동기의 권선 설계와 권선 배치에 대한 방법을 제시한다.

* 정 회 원 : 한양대학교 전기공학과 박사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 한양대학교 전기생체공학부 교수

E-mail : julee@hanyang.ac.kr

접수일자 : 2011년 2월 8일

최종완료 : 2011년 3월 28일

2. 단상 유도전동기 기본 설계

단상유도전동기의 기본 설계의 경우 3상 유도전동기의 설계와 크게 다르지 않다. 단상 유도전동기의 설계 수준은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

그림 1 단상 유도전동기의 기본 설계 수준

Fig. 1 Basic design flow of single phase induction motor

먼저 요구조건과 제약조건 등 경험적인 상수를 통하여 단상 유도전동기의 사양을 결정하고 출력식을 이용하여 고정자 외경, 고정자 내경과 축방향 길이 등의 고정자 주요 치수를 결정한다. 다음으로 역기전력 식을 이용한 고정자의 권선 설계를 수행한다. 이때 주권선과 보조권선을 각각 설계 해주어야 한다.

권선 설계 후, 자기회로를 이용하여 고정자 슬롯 설계, 회전자 설계를 수행한다. 마지막으로 등가회로를 통하여 요구 성능을 만족하는지 검증한다.

그림 1에서 나타난 것과 같은 설계 수순과 같이 단상 유도전동기의 기본 설계를 수행할 수 있지만 권선 설계시 주권선과 보조권선의 상당 직렬턴수 계산과 주권선과 보조권선의 권선 배치 등을 모두 고려해야하므로 권선 설계 방법을 정립하지 않으면 기본 설계 시 많은 혼란을 가져올 수 있다. 또한 등가회로를 이용한 성능 계산의 경우도 3상 유도전동기와 달리 그 과정이 복잡하여 특성을 예측하는 것이 쉽지 않지만 이와 관련한 내용은 본 논문에서는 다루지 않는다.

3. 단상 유도 전동기 동심권 권선 설계

권선 설계에 가장 중요한 것은 상당 직렬 턴수의 계산이다. 일반적으로 단상 유도전동기는 기동특성을 고려하여, 주권선과 보조권선의 전기적인 위상차를 만들기 위하여 주권선과 보조권선의 턴수를 다르게 가져간다. 먼저 유도기전력 식을 이용하여 주권선의 상당 직렬 턴수를 계산한 다음, 주권선과 보조권선의 턴수비를 사용하여 보조권선의 턴수를 계산한다. 식 (1)은 주권선의 상당 직렬 턴수를 계산하는 식을 나타낸 것이다.

$$W_m = \frac{K_E V_s}{\pi \sqrt{2} \Phi_m \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{2} K_{wm} f_1} \quad (1)$$

여기서, K_E 는 철심의 포화로 인하여 기자력이 감소되는 영향을 고려하는 경험적 계수로 고효율 설계 시에는 포화가 거의 없다고 가정하면 1에 가까운 값으로 가정할 수 있다. V_s 는 입력전압, Φ_m 은 주권선의 극당 자속, K_{wm} 은 주권선의 권선계수, f_1 은 입력 주파수이다. 여기에서 보다 정확한 상당 직렬 턴수 계산을 위해서는 권선 계수를 정확한 계산이 필요하다. 하지만 단상유도전동기의 경우 일반적으로 동심권을 사용하고 있으므로 3상 유도전동기에서 사용하는 중권의 권선 계수 계산방식과는 차이가 존재한다.

단상 유도전동기는 그림 2와 같이 동심권을 주로 많이 사용하며, 이 때 주권선과 보조권선의 극당 상당 슬롯수를 각각 결정할 수 있다. 즉, 주권선과 보조권선의 극당 상당 슬롯수에 따라 다양한 조합의 권선 구조가 나타날 수 있기 때문에 권선 설계 시 이를 수식화하여할 필요성이 존재한다. 각 슬롯마다 같은 턴 수로 감을 수도 있지만, 그림 3과 같이 일반적으로는 전동기의 소음, 진동 등을 줄이기 위하여 권선을 정현적으로 분포시키기 때문에 각 슬롯마다 턴 수가 다

르게 나타난다. 따라서 권선 설계 전 권선계수를 계산하기가 쉽지 않다.

동심권은 중심을 기준으로 다른 턴수, 다른 코일 피치를 가진 코일로 구성되어있다. 각 코일의 기자력 파형은 사각파이고, 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 각 코일 구형파의 기자력 합은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. [3]

$$a_1 = \frac{4}{\pi} (C_1 \sin B_1 + C_2 \sin B_2 + C_3 \sin B_3) \quad (2)$$

여기서 C_1 , C_2 , C_3 는 각 코일의 턴수, B_1 , B_2 , B_3 는 각 코일 피치의 전기각이다.

그리고 분포시키지 않고 집중권으로 감았을 때의 기자력 크기는 다음의 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_f = \frac{4}{\pi} (C_1 + C_2 + C_3) \quad (3)$$

따라서 위 두 식을 이용하여 분포계수를 계산하면 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{wm} = \frac{C_1 \sin B_1 + C_2 \sin B_2 + C_3 \sin B_3}{C_1 + C_2 + C_3} \quad (4)$$

위 식을 통해 알 수 있듯이 동심권의 경우는 권선 설계가 완료되어야 권선계수를 계산할 수 있다. 따라서 설계시 초기 권선 계수 값을 가정하고 설계를 수행하고 반복을 통하여 수렴시키는 과정을 수행해야한다. 그림 4는 권선 설계 과정을 나타낸 것이다.

주권선과 보조권선 모두 권선계수를 수렴시켜야하며, 몇 번의 반복을 통하여 정확한 턴 수 계산이 가능해진다.

그림 5는 주권선과 보조권선의 슬롯을 4-3구조로 선정하여 실제 기자력을 정현적으로 만들기위하여 각 턴수를 그에 맞게 분포시킨 것이다.

그림 2 동심권의 기자력 분포

Fig. 2 MMF distribution of concentric winding

그림 3 정현적인 기자력을 위한 동심권 구조

Fig. 3 Structure of concentric winding for sinusoidal MMF

그림 4 권선 계수를 고려한 단상 유도전동기 권선 설계 수순

Fig. 4 Winding design flow of single phase induction motor considered winding factor

그림 5 단상유도전동기 4-3 구조의 권선 구조

Fig. 5 Winding distribution for 4-3 winding structure of single phase induction motor

이는 주권선의 상당 직렬 턴수를 계산한 다음 이를 삼각 함수를 이용하여 정현적으로 분포 시킬 수 있다. 식 (5)는 권선을 정현적으로 분포시키기 위한 삼각함수식을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} & \text{(for } n=1) \\ N_1 &= N_t \frac{1}{2p_1} \cos\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{4}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \text{(for } n \geq 2) \\ N_n &= N_t \frac{1}{2p_1} \cos\left(\frac{\beta_n + \beta_{n+1}}{4}\right) - N_{n-1} - N_{n-2} - \dots - N_1 \end{aligned}$$

여기서, β_n 은 코일피치로 전기각으로 나타내며, N_t 는 한 상의 직렬 턴수 W_m 을 이용하여 다음의 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$N_t = \frac{W_m}{\cos\left(\frac{\beta_q}{4}\right)} \quad (6)$$

4. 단상 유도전동기 동심권 권선 배치

위의 그림 5와 같이 권선을 분포시키기 위해서는 먼저 각 코일의 코일 피치 β_n 을 알아야한다. 이를 정확하게 계산하기 위해서는 각 권선 구조에 따른 권선배치를 정확하게 파악해야한다. 주권선과 보조권선이 전기적으로 90도의 위상차를 가지고, 각 권선의 극당 상당 슬롯수만큼 배치가 되어야되기 때문에 각 구조마다 이를 추정하는데 시간이 걸린다. 따라서 정확하고 빠르게 권선을 배치시키기 위하여 이를 수식화할 필요가 있다.

먼저 주권선의 배치는 최외각 코일이 차지하는 슬롯수를 계산해야한다. 주권선의 극당 상당 슬롯수 q_m 와 주권선에서의 빈 슬롯의 개수 s_{me} 를 이용하여 계산할 수 있다.

$$s_m = 2q_m + s_{me} \quad (7)$$

그림 5에서와 같이 권선을 감을 경우 발생하는 빈 슬롯의 개수는 다음 식 (8)을 통하여 간단히 계산할 수 있다.

$$s_{me} = \frac{(N_s - 2q_m \cdot 2p_1)}{2p_1} \quad (8)$$

따라서 위 두 식을 이용하여 주권선에서의 각 코일의 코일피치는 다음의 식 (9)와 같이 계산할 수 있다.

$$\beta_n = \frac{360}{N_s} p_1 (s_m - 1 - 2(n-1)) \quad (9)$$

보조권선 배치의 경우 공간적으로 전기각 90도 위상차가 나도록 배치해야한다. 다음의 식 (10)은 전기각 90도에 해당되는 슬롯의 개수이다.

$$s_q = \frac{90}{\frac{360}{N_s} p_1} \quad (10)$$

주권선의 코일 중심과 보조권선의 중심이 서로 전기각으로 90도 위상차가나는 위치를 계산하고, 보조권선을 중심으로 다시 보조권선의 최외각 코일의 시작위치 s_{ai} 를 계산하면 다음 식과 같다.

$$s_{ai} = \theta \left(\frac{1}{2}(s_m + 1) + s_q, 0 \right) - \theta \left(\frac{s_{ac}}{2}, 0 \right) - q_a \quad (11)$$

여기서 θ 는 반올림을 나타낸다. 또한 q_a 는 보조권선의 극당 상당 슬롯 수, s_{ac} 는 보조권선의 빈 슬롯의 개수로 주권선과 동일하게 계산하되 아래 식 (12)의 계산값이 정수가 아니거나 빈 슬롯수 s_{ac} 가 홀수일 경우는 $s_{ac} = s_{ac} + 1$ 로 바꾸어 계산한다.

$$\frac{1}{2}(s_m + 1) + s_q \quad (12)$$

그리고 주권선과 동일한 방법으로 보조권선이 최외각 코일의 슬롯수 s_a 를 계산할 수 있고, 이를 이용해 정현적으로 분포시켜 각 권선의 턴수를 계산한다.

일정한 제약 없이 권선을 배치시키다 보면, 극피치보다 코일 피치가 길어져 같은 권선끼리 같은 슬롯으로 들어가 2층권으로 감기는 경우가 존재한다. 차후 권선 직경 계산 및 슬롯 면적 계산 시 주의할 필요가 있으므로 중복되는 권선의 배치를 파악하는 것이 중요하다.

중복되는 슬롯 수는 다음 식 (13)과 같이 계산할 수 있다.

$$s_o = 2p_1(2q_a + s_{ac}) - N_s \quad (13)$$

5. 설계 및 특성해석

다음의 표 1은 본 논문에서 설계할 단상유도전동기의 사양을 나타낸 표이다.

표 1 단상 유도전동기의 설계 사양

Table 1 Design specifications of single phase induction motor

설 계 사 양	값	단 위
입력 전압	220	V
주파수	60	Hz
출력	1.12	kW
극 수	4	-
목표 효율	87	%

본 논문에서 설명한 권선 설계 방식을 이용하면 다음의 그림 6과 같이 권선을 감을 수 있다.

그림 6에서 나타난 권선을 기반으로 고정자 및 회전자 설계할 수 행한 최종모델의 구조는 다음 그림 7과 같다. 위의 그림 7에서 나타난 설계 모델에 유한요소법을 이용하여 특성을 해석한 결과는 그림 9, 10, 11과 같다

그림 6 단상유도전동기의 주권선과 보조권선의 설계

Fig. 6 Design of main and armature winding of single phase induction motor

그림 8, 9, 10 각각은 정상상태에서의 주권선과 보조권선의 전류 특성, 토크 특성, 그리고 속도 특성을 나타낸다. 정상 상태에서의 주권선과 보조권선의 전류값의 실효치는 각각 2.50 [A]와 5.18 [A]의 값을 갖음을 알 수 있다.

이 결과를 정리하면 아래의 표 2와 같다. 표 2에서 알 수 있듯이 기본 설계 수순과 위 권선방법만을 이용하여 기본모델을 간단히 찾아낼 수 있고 충분히 목표효율을 만족시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 7 단상 유도전동기의 최종 설계 모델

Fig. 7 Geometry of the design model

그림 8 1.12kW 단상 유도전동기의 전류 특성

Fig. 8 Current characteristics of single phase induction motor(1.12kW)

그림 9 1.12kW 단상 유도전동기의 토크 특성

Fig. 9 Torque characteristic of single phase induction motor(1.12kW)

그림 10 1.12kW 단상 유도전동기의 속도 특성

Fig. 10 Speed characteristic of single phase induction motor(1.12kW)

표 2 단상 유도전동기의 특성 해석 결과

Table 2 Characteristic analysis results of single phase induction motor(1.12kW)

항 목	값	단 위
정격 속도	1774	RPM
정격 슬립	0.014	
정격 토크	6.03	NM
출력	1.12	kW
효율	89.1	%

3. 결 론

단상 유도전동기의 경우 고정자, 회전자 설계의 경우 삼상 유도전동기와 동일하게 설계를 수행하지만, 그 차이가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 단상 유도전동기의 기본 설계 수순을 제시하였다. 특히 단상 유도전동기에서의 복잡한 권선설계를 수식화하여 단상유도전동기 설계를 쉽게 접근할 수 있도록 하였다. 1.12 kW의 단상유도전동기를 예로하여 권선 배치 및 턴수 계산을 수행하여 목표값에 근접한 기본 모델을 얻을 수 있음을 유한요소해석을 통하여 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(기초연구사업((구)국가지정연구실사업)No. 2008-0060145)

참 고 문 헌

- [1] E. Fuchs, et al ; "Design analysis of capacitor-start, capacitor-run single-phase induction motors,". Energy Converting, IEEE Transaction on, vol. 5, pp.327-336, 2002
- [2] Ion Boldea, Syed A. Nasar " The induction machine handbook", CRC Press, 2001
- [3] Cyril G. Veinott ; "Theory and design of small induction motors", McGraw-Hill Book Company, 1959
- [4] O. Smith ; "High-efficiency single-phase motor", Energy Converting, IEEE Transactions on, Vol. 7, pp. 560-569, 2002
- [5] K. Waldschmidt ; "A computer Procedure for Single-Phase Induction Motor Calculation and Design", Power Apparatus and Systems, IEEE Transaction on, vol. 82, pp. 867-875, 2007

저 자 소 개

함 상 환 (咸 相 瓊)

1980년 4월 7일생. 2006년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2006년 - 현재 한양대학교 전기공학과 석박사통합과정
Tel : (02)2220-0349
E-mail : goodhami@hanyang.ac.kr

임 종 빈 (任 宗 彬)

1978년 4월 25일생. 2005년 한양대 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2005년~현재 한양대학교 전기공학과 석박사통합과정.
Tel : (02)2220-0349
E-mail : jbin0425@naver.com

이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공학박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~2009년 한양대 공대 전기제어생체공학부 부교수. 2009년~현재 한양대 공대 전기제어생체공학부 정교수.
Tel : (02)2220-0342
E-mail : julee@hanyang.ac.kr