

컨텐츠 단상 유도전동기의 컨텐서  
용량의 최적 선정에 관한 연구

이병삼\*, 김경호, 허두석, 조윤현,  
동아대학교 전기공학과

Optimal Selection of Capacitor for a Capacitor Run  
Single-Phase Induction Motor

Byung Sam Lee\*, Kyung Ho Kim, Du Suck Heo, Yun Hyun Cho  
Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University

**Abstract** - The recent emphasis on energy conservation demands an improvement of the efficiency of single-phase induction motors. To take the efficiency operation of the capacitor run single-phase induction motor with auxiliary and main winding, it is very important to select the capacitance value. This paper describes the theoretical analysis method of a single-phase induction motor which is based on the rotating field theory, using the method of symmetrical components. The optimal selection method of capacitance is proposed.

1. 서 론

최근의 에너지 절약에 대한 인식의 확대에 의하여 단상 유도전동기의 효율 향상에 관한 요구가 증가하고 있다. 단상 유도전동기는 3상 유도전동기와 비교하면 효율, 역률이 나쁘고 동일 출력시 치수, 중량이 커지고 기동토크를 얻기 위해서는 기동권선이나 콘텐서등의 보조장치를 필요하므로 구조가 복잡하고 제조비용이 올라가는 단점이 있다. 그러나, 일반적인 단상 전원에 간단히 연결하여 사용할 수 있어 가정용 농업용 및 소규모 공업용으로 1kw급미만의 소용량에 널리 사용되어 있다. 제작 비용을 고려했을 때 최상의 방법은 최적 설계를 통하여 최대 효율을 얻는 방법이다. [1][2]

본 논문에서는 단상 유도전동기의 특성 해석방법과 운전용 콘텐서의 최적화 방법을 제시하였다. 또한, 특성 해석 및 최적화 프로그램을 개발하여 양산 및 신규 단상 유도전동기에 대한 성능 향상과 설계 개발 기간을 단축을 추구하였다. 해석 결과의 타당성을 입증하기 위하여 유한요소법(FEM)을 이용하여 해석과 비교하였다.

2. 단상 유도전동기의 운전 특성

2.1 회전 자계 이론

단상 유도전동기의 일반적 해석은 회전자계이론을 적용한다. 단상권선에 교류가 흐르는 경우에 생기는 교번자계를 진폭이 이 교번자계의 절반에 해당하고, 서로 반대 방향으로 회전하는 두 개의 회전자계로 분해할 수 있다. 단상분포권선이 만드는 교번기자력의 기본파 성분만 다음과 같이 표시된다.[3]

$$F_1 = kw_1 F_m \sin \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x$$

$$= \frac{kw_1 F_m}{2} \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) + \frac{kw_1 F_m}{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x)$$

(1)

식(1)에서 정방향으로 회전하는 기전력  $F_1$ 와 역방향으로 회전하는 기전력  $F_b$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$F_1 = \frac{kw_1 F_m}{2} \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)$$

$$F_b = \frac{kw_1 F_m}{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x)$$

(2)

이 현상을 이용하여 그림 1과 같이 회전자계와 같은 방향으로 회전하는 정상분전동기와 반대방향으로 회전하는 역상분전동기로 나누어 생각할 수 있다.

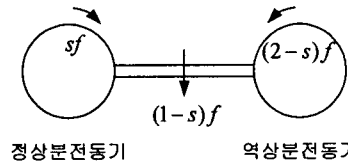


그림 1 두 회전 기자력  
Fig. 1 Two rotating mmf

2.2 등가회로 및 전동기 특성

단상 유도전동기는 기동토크를 발생시키기 위해서 보조 권선을 추가한다. 일반적으로 보조권선은 공간적으로 주 권선에 직교하고 권선 전류는 서로 90°의 전기각이 되어야 한다. 주권선과 보조권선이 권선에 대하여 비대칭적인 구조이기 때문에 대칭좌표법을 이용하여 평형 전동기로 변환하여야 한다. 그림 2는 평형 2상 전동기로 변환된 콘텐서 운전형 전동기의 구성도이다.[1]

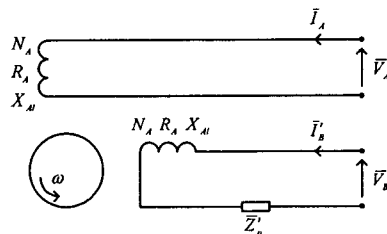


그림 2 대칭적 콘텐서 운전형 전동기의 구성도  
Fig 2 Schematic representation of a symmetrical capacitor run single-phase induction motor

외부 임피던스도 변환되어야 한다. 결과적으로 외부 임피던스는 다음 식 (3)과 같다.

$$\bar{Z}_P' = \frac{\bar{Z}_P}{k_{AB}^2} + (R_B' - R_A) + j(X_{B1}' - X_{A1})$$

(3)

여기서,  $k_{AB}$ 은 주권선과 보조권선 비이다.

전동기의 전압 방정식은 대칭좌표법으로 정상분과 역상분을 이용하여 전류와 임피던스항으로 표현하여 식 (4)와 같다.

$$\bar{V}_A = \bar{Z}_f \cdot \bar{I}_{Af} + \bar{Z}_b \cdot \bar{I}_{Ab} \quad (4)$$

$$\bar{V}_{B'} = (\bar{Z}_f + \bar{Z}_{P'}) \bar{I}_{Bf}' + (\bar{Z}_b + \bar{Z}_{P'}) \bar{I}_{Bb}'$$

보조권선의 등가회로도 거의 동일하다. 그러나, 입력 전압이 전기각으로  $90^\circ$  차이가 나므로,  $\bar{V}_A = \bar{V}_B$ 와

$\bar{V}_{B'} = \frac{\bar{V}_B}{k_{AB}}$ 의 관계와 식 (4)로부터 보조권선 전압 방정식 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{V}_B &= k_{AB}(\bar{Z}_f + \bar{Z}_{P'})j\bar{I}_{Af} - k_{AB}(\bar{Z}_b + \bar{Z}_{P'})j\bar{I}_{Ab} \\ &= \bar{Z}_f \bar{I}_{Af} + \bar{Z}_b \bar{I}_{Ab} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)을 이용하여 정상분과 역상분 전류비를 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{k}_{bf} = \frac{\bar{I}_{Ab}}{\bar{I}_{Af}} = \frac{\bar{Z}_{P'} + \bar{Z}_f(1 + \frac{j}{k_{AB}})}{\bar{Z}_{P'} + \bar{Z}_b(1 - \frac{j}{k_{AB}})} \quad (6)$$

단상 유도전동기의 두 고정자 권선에 대하여 식 (4)의 전압 방정식과 식 (6)의 전류비를 이용하여 그림 3의 등가회로로 나타낼 수 있다.

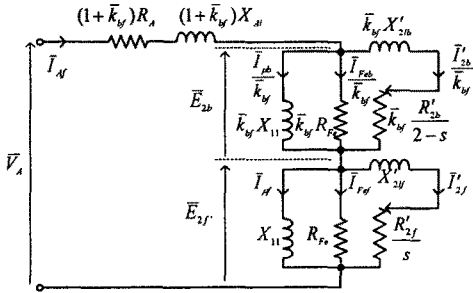


그림 3 주권선 등가회로  
Fig 3 Equivalent circuit of main winding

### 2.3 최적 운전 콘덴서 선정

보조권선내에 운전용 콘덴서를 포함시키면, 두 고정자 권선의 전류는 크기와 위상이 변화한다. 콘덴서에 의하여 주권선의 전류의 크기는 감소하고, 반면에 보조권선의 전류의 크기는 증가한다. 전류 위상은 주권선에서는 일정하게 유지하지만, 보조권선에서는 단상 전압에 대하여 앞선 위치로 변화한다. 이것은 역률의 증가를 야기시키고 다른 형태의 회전자계를 형성하게 된다. 이 운전용 콘덴서를 최적 선정함으로써 전동기의 효율을 향상시킬 수가 있다.

선정된 최적 콘덴서는 공극에 거의 원형의 회전자계를 형성하여 최대 효율, 고정자 권선의 최소 온도 상승, 역상분 회전자계의 최소화한다.

정상분과 역상분 전류비가 0이라고 가정하면, 역상분 회전자계와 전류는 존재하지 않는다. 따라서 다음을 얻을 수 있다.

$$\bar{Z}_{P'} = -\bar{Z}_f(1 + \frac{j}{k_{AB}}) \quad (7)$$

식 (3)과 식 (9)을 이용하여 보조권선에 연결된 외부 임피던스의 최적 방정식은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{p,opt} &= -k_{AB}^2 \left[ \frac{R_B}{k_{AB}^2} + j \frac{X_{Bf}}{k_{AB}^2} + \bar{Z}_{2f}(s) \right] \\ &\quad - j k_{AB} [R_A + j X_{A1} + \bar{Z}_{2f}(s)] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, 최적의 외부 임피던스  $\bar{Z}_{p,opt}$ 는  $\bar{Z}_{2f}(s)$ 에 의한 슬립의 함수이다.

## 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

### 3.1 전동기 사양

본 논문에서 단상 유도전동기의 운전 특성 해석을 위하여 사용한 전동기 사양을 표 1에 나타내었다.

항목	사양
극수	4
정격 출력	1492 [W]
정격 전압	115 [V]
정격 주파수	60 [Hz]
공극	0.33 [mm]
운전용 콘덴서 용량	150 [ $\mu$ F]

표 1 전동기 사양

### 3.2 슬립에 따른 전동기 운전 특성 변화

슬립이 0.0에서 0.2로 변화할 때, 그림 4는 토크 곡선, 그림 5는 고정자의 전류곡선, 그림 6은 효율곡선을 각각 나타내었다.

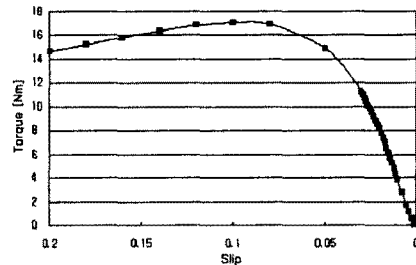


그림 4 전동기 토크 곡선  
Fig 4 Torque curve of prototype motor

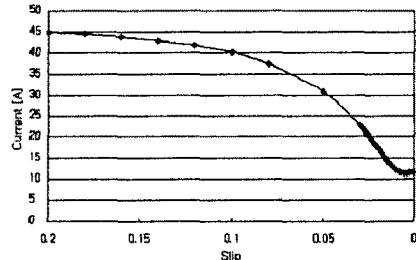


그림 5 전동기 전류 곡선  
Fig 5 Current curve of prototype motor

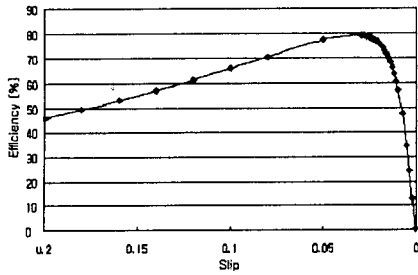


그림 6 전동기 효율 곡선  
Fig 6 Efficiency curve of prototype motor

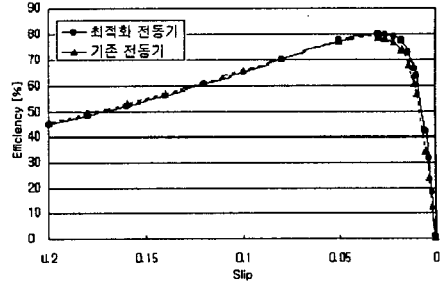


그림 8 최적 전동기와 효율 특성 비교  
Fig 8 Performance efficiency of sample motor and optimized motor

### 3.4 Flux2D를 이용한 특성 해석 결과 비교

본 논문의 시작기 전동기에 대한 자속분포 특성을 고찰하기 위하여 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 그림 7는 정격부하에서의 자속선도를 나타낸다.

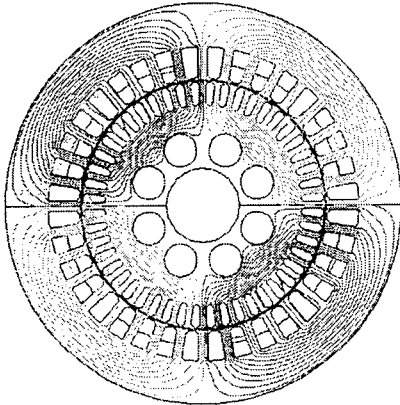


그림 7 전동기의 자속선도  
Fig 7 Flux of sample motor

표 2는 이론적 해석결과와 유한요소법을 이용한 해석결과를 비교한 것이다.

항목	이론치	FEM 해석치	오차[%]
토크	8.09	8.26	2.1
입력	1971.9	1941.7	-1.5
선전류	17.5	17.76	1.5
효율	78.91	80.4	1.9

표 2 유한요소법을 이용한 정격 특성 비교

### 3.5 최적 운전 콘덴서 선정에 의한 특성 비교

본 논문에서 제시한 식(8)의 최적 임피던스 방정식을 이용하여 주어진 전동기의 최적 운전 콘덴서의 용량은 130  $\mu$ F이다. 기존의 전동기와 최적 운전 콘덴서를 사용했을 때의 전동기 효율을 그림 8에서 비교하였다. 최적 운전 콘덴서를 사용한 경우에는 정격 부하 운전시 81.34%의 효율이 나타났다. 결과적으로 최적 운전 콘덴서를 선정함으로써 2.43%의 효율 향상을 달성하였다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 단상 유도전동기의 운전 특성 및 기동 특성 해석과 효율 향상을 위한 최적 운전 콘덴서를 선정하는 방법을 제시하였다.

단상 유도전동기의 이론적 해석은 대칭좌표법에 의하여 회전자계이론을 기초로 하였다. 고정자와 회전자 저항, 공극 자속 밀도, 자화 리액턴스, 철손 저항 등은 온도와 자기적 포화에 따라서 반복 계산을 수행하도록 하였다.

최적 운전 콘덴서를 선정을 통하여 추가적인 비용을 최소화하면서 효율을 향상을 연구하였다.

해석 결과의 타당성을 검증하기 위해서 유한요소법(FEM)을 통한 특성 해석 결과와 비교, 검토 하였다.

## (참 고 문 헌)

- [1] H. Huang, "Optimal Placement of the Run Capa Single-Phase Induction Motor Designs", IEEE T Energy Conversion, VOL. 3, No. 3, September 198
- [2] Yifan Zhao, Tian-Hua Liu and Thomas A. "Adjustable ac Capacitor for a Single-Phase Ind Motor", IEEE Trans. Industry Applications, VO No.3, May/June 1993.
- [3] Cyril G. Veinott, "Theory and Design of Small In Motors", McGraw-Hill Book Co., 1956.
- [4] E. Lopukhina, V. Miasyan, G. Semenchukov, torques of single phase induction motors with two and three phase windings", Electr. Techno. USSR, pp. 22-34, 1982.
- [5] M. Yasubayashi, K. Kato, "An auxiliary phase method for balanced operation of capacitor motor", Chubu Inst. Technol., VOL.13A, 1977.
- [6] Alexander Domijan, Yuexin Yin, "Single Phase In Machine Simulation Using The Electromag Transients Program: Theory and Cases", IEEE T Energy Conversion, VOL 9, No.3, September 1994.