

## 콘덴서 구동형 단상유도전동기의 특성해석 및 효율개선을 위한 최적설계

\*임 달호, \*\*홍 정표, \*윤 상백, \*손 병옥, \*\*\*김 기봉

\* 한양대학교 전기공학과 \*\* 한양대학교 산업과학연구소, \*\*\* 삼성전기(주) 전동연구실

### Characteristic Analysis and Optimum Design for Efficiency Improvement of the Single-Phase Permanent-Split Capacitor Motor

\*Dal-Ho Im, \*\*Jung-Pyo Hong, \*Sang-Baeck Yoon, \*Byung-Ook Son, \*\*\*Ki-Bong Kim

\* Dept. of Electrical Eng, HanYang Univ. \*\*Research Institute of Industrial Science, HanYang Univ.

\*\*\* Samsung Electro-Mechanics Co.

#### Abstract

This paper describes the characteristic analysis and the optimum design of the single-phase permanent-split capacitor motor. The equivalent circuit is constructed by the symmetrical coordinate method and proved its validity by comparing with the experimental data. Then, the numerical optimization technique is applied to improve the efficiency of the motor.

#### 1. 서 론

단상 유도전동기는 평형 다상 유도전동기와 달리 상간의 불평형이 존재하여 이를 고려한 해석방법에 어려움이 따르고, 다상 유도전동기에 비해 효율의 저하와 전원 주파수의 두배에 해당하는 진동 토크(vibrational torque)가 발생하여 진동, 소음 등의 문제점을 갖고 있기 때문에 등가회로 구성시 평형 다상 유도전동기와는 다른 방법이 요구된다[1][2].

단상유도전동기의 등가회로의 정밀성을 갖기 위해서는 등가회로에 가장 큰 영향을 미치는 여자리액턴스 산출이 매우 중요하게 된다. 또한, 기존의 최적설계는 시행착오(Try & Error)에 의한 설계자의 오랜 경험에 의하여 좌우되어 왔는데 이 방법은 제작비용 및 시간이 많이 들 뿐 아니라 정확한 값을 얻을 수 없다. 최근에 이러한 단점을 극복하기 위하여 최적화 기법을 이용한 최적설계 연구가 이루어지면서 모터의 최적설계변수를 도출하여 특성향상 및 용도에 맞는 설계방법이 제시되고 있다[3].

본 연구에서는 콘덴서 구동형 단상유도전동기의 특성 분석을 위하여 대칭좌표계법(Symmetrical-Coordinate Method)을 이용한 등가회로를 구성하였다[4]. 회로정수 계산시 저항 및 누설리액턴스는 기존의 회로정수를 이용하였고, 여자리액턴스 계산은 포화계수를 고려하기 위하여 포화계수에 초기 값을 부여한 뒤, 구성된 회로 방정식으로부터 반복 계산함으로써 여자리액턴스를 구하는 방법을 제안하였다. 제안한 해석방법을 이용하여 단상유도전동기의 제반특성을 분석하였고, 해석결과와 실험결과를 비교 검토하여 등가회로 구성의 타당성을 확인하였다.

또한, 등가회로를 통한 해석을 바탕으로 최적화 알고리즘을 이용한 최적설계를 시행하였다[5].

#### 2. 등가회로에 의한 단상 유도전동기의 특성해석

##### 2.1 대칭좌표계법에 의한 등가회로 구성

그림2.1, 그림2.2는 각각 주권선 및 주권선에 대하여 치환된 보조권선의 등가회로도이다.

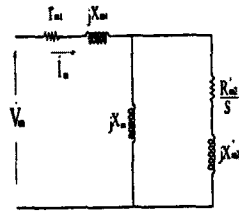


그림2.1 주권선의 등가회로

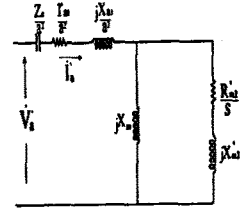


그림2.2 주권선에 대해 치환된 보조권선의 등가회로

여기서,

$$a = \frac{Z_a k_{wa}}{Z_m k_{wm}}, \quad I_a' = a I_a, \quad V_a' = \frac{V_a}{a}$$

이고,  $Z_c/a^2$ ,  $X_a/a^2$ ,  $r_{a1}/a^2$  는 주권선에 대해 치환된 보조권선의 1차측 리액턴스이며,  $Z_m k_{wm}$ ,  $Z_a k_{wa}$  는 2주권선, 보조권선의 유효도체수이고  $k_{wm}$ ,  $k_{wa}$  는 권선계수이다. 대칭좌표계법으로부터 주권선과 보조권선의 입력전원을 각각의 대칭성분으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_m = V_{pm} + V_{nm} \quad (2.1)$$

$$V_a' = V_{pa} + V_{na} = j(V_{pm} - V_{nm}) \quad (2.2)$$

여기서,  $V_{pm}$ ,  $V_{nm}$  는 각각 주권선의 정,역상분전압이고,

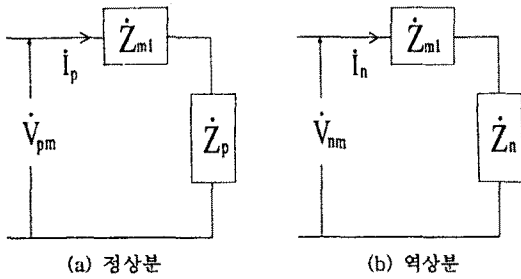
$V_{pa}$ ,  $V_{na}$  는 각각 보조권선의 정,역상분전압이다.

$V_m$  과  $V_a'$  는 기지의 값이므로 다음과 같이 구해진다.

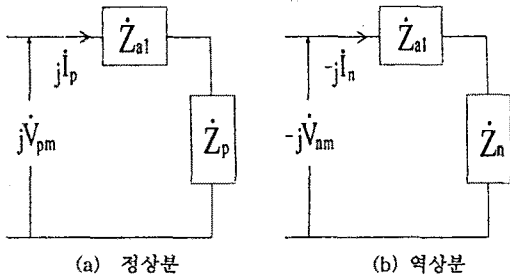
$$V_{pm} = \frac{V_m - j V_a'}{2} \quad (2.3)$$

$$V_{nm} = \frac{V_m + j V_a'}{2} \quad (2.4)$$

정상분 및 역상분 전류  $I_p$ ,  $I_n$ 은 그림2.3, 그림2.4와 같이 정상분, 역상분으로 분리하여 나타낸 주권선, 보조권선의 등가회로로부터 계산할 수 있다.



(a) 정상분 (b) 역상분  
그림2.3 대칭좌표 성분으로 나타낸 주권선의 등가회로



(a) 정상분 (b) 역상분  
그림2.4 대칭좌표 성분으로 나타낸 보조권선의 등가회로

식(2.1), 식(2.2)와 그림2.3 및 그림2.4로부터 각 대칭분 전류는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_p = \frac{V_{pm} [Z_{a1} + Z_n - j(Z_{m1} + Z_n)/a]}{(Z_{m1} + Z_p)(Z_{a1} + Z_n) + (Z_{a1} + Z_p)(Z_{m1} + Z_n)} \quad (2.5)$$

$$I_n = \frac{V_{nm} [Z_{a1} + Z_p + j(Z_{m1} + Z_p)/a]}{(Z_{m1} + Z_p)(Z_{a1} + Z_n) + (Z_{a1} + Z_p)(Z_{m1} + Z_n)} \quad (2.6)$$

식(2.5)와 식(2.6)으로부터 주권선 전류( $I_m$ ) 및 보조권선 전류( $I_a$ )는 다음과 같다.

$$I_m = I_p + I_n \quad (2.7)$$

$$I_a = j(I_p - I_n)/a \quad (2.8)$$

## 2.2 회로정수 산출

저항 및 누설 리액턴스는 기존의 회로정수식을 사용하였고, 여자리액턴스 식은 식(2.9)와 같이 계산된다[6][7].

$$X_m = 0.6 \frac{f l \tau_p Z_{eff}^2}{PK_c K_s g} \times 10^{-5} \quad (2.9)$$

여기서,  $f$ 는 주파수,  $l$ 은 직중길이,  $\tau_p$ 는 극간격,  $Z_{eff}$ 는 유효도체수,  $P$ 는 극수,  $K_c$ 는 카터계수,  $K_s$ 는 포화계수이다. 본 연구에서 포화계수를 고려한 여자리액턴스는 다음과 같은 순서로써 계산하였다.

- ① 포화계수( $K_s$ )에 초기값을 부여한다.
- ② 초기 여자리액턴스를 계산한다.

- ③ 무부하시의 회로방정식으로부터 역기전력  $E$ 를 계산한다.

$$E = jX_m I_{a0} + I_{a0} (jx_2 + r_2/2)$$

- ④ 계산된 역기전력으로부터 자속  $\phi$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$\phi = \frac{|E|}{2.22 Z_{eff} f}$$

- ⑤ 각 부분의 면적을 계산하여 각 부분의 자속밀도  $B$ 를 계산한다.
- ⑥ 철심의 투자율을 계산하여 자재강도  $H$ 를 구한 뒤 각 부분의 기자력 손실을 구한다.
- ⑦ 새로운 포화계수를 계산한다.
- ⑧ 계산된 포화계수로부터 새로운 여자리액턴스를 계산한다.
- ⑨ 수렴할 때까지 ③-⑧을 반복 계산한다.

## 3. 최적화 알고리즘을 이용한 최적설계

최적화 알고리즘은 여러가지가 있으나, 본 연구에서는 목적함수는 이차로, 제약조건은 일차로 부문제(sub-problem)화하여 탐색방향을 결정하기 위하여 헷세행렬(Hessian matrix)을 반복 수정하는 순차이차계획법(sequential quadrature programming)을 정식화하였다[5]. 수렴판정으로는 강하조건(descend condition)으로서 식(3.1)과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{k+1} \leq P_k - \alpha_j \beta_k \quad (3.1)$$

여기서,  $P_k$ 는  $k$ 번째 스텝에서의 쉐니크니(Pshenichny)의 강하함수(descend function)이고,  $\alpha_j$ 는 이동거리(step size)이다. 식(3.1)을 만족하게 되는 새로운 설계변수 값은 식(3.2)와 같이 표현된다.

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_j d^{(k)} \quad (3.2)$$

여기서,  $d^{(k)}$ 는 탐색방향이다. 헷세행렬  $H$ 는 반복횟수마다 BFGS 공식에 의하여 반복 수정된다[5].

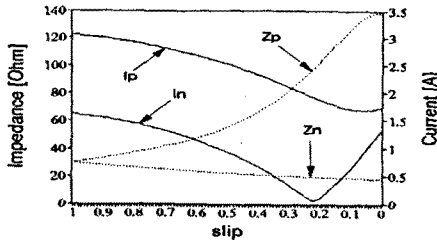
## 4. 해석결과 및 최적설계 결과 분석

표1은 본 연구에서 해석한 모델의 제원으로서 4극이고 정격출력은 0.33kW이며 정격슬립은 0.15이다.

표 1 해석 모델의 제원

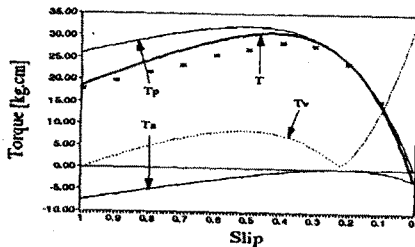
고 정 자		회 전 자	
슬롯 수	24 [개]	슬롯 수	34 [개]
직중길이	55 [mm]	직중길이	54.5 [mm]
외경	107[mm]	외경	67.5 [mm]
내경	68 [mm]	내경	12.0 [mm]
주권선	106-53	도체도전율	$2.8 \times 10^7$ [ S/m]
보조권선	106-53	공극 길이	0.25 [mm]
콘덴서용량	16.0 [ $\mu F$ ]		

그림4.1은 슬립에 따른 정상분, 역상분의 임피던스와 전류의 특성 변화도이다.



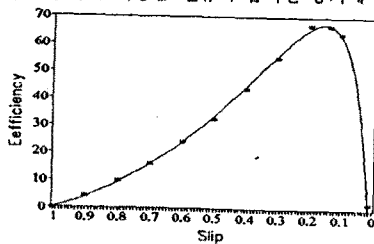
..... 임피던스 — 전류  
 그림 4.1 슬립에 따른 정상분 및 역상분 임피던스와 전류 변화

그림 4.1에서 슬립에 따른 정상분, 역상분 임피던스 변화 특성은 저슬립 부근으로 갈수록 임피던스의 불평행이 심화되어 감을 알 수 있고, 전류특성 중 역상분 전류는 저슬립 부근에서 급격히 증가함을 알 수 있다.

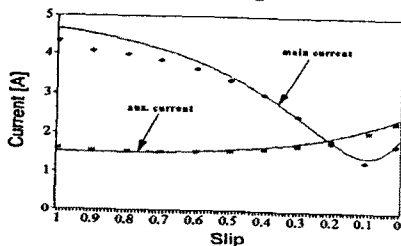


— 해석치 —\*— 실험치  
 그림 4.2 토크와 진동 토크

그림 4.2는 슬립에 따른 토크와 진동토크의 해석 결과이다. 여기서  $T$ 는 토크,  $T_p$ ,  $T_n$ 은 정,역상분 토크,  $T_v$ 는 진동토크이다. 고슬립 부근에서는 해석치와 실험치의 오차가 발생하고 있지만, 저슬립 부근에서는 실험치와 거의 일치하는 결과를 얻으므로써 해석이 타당함을 알 수 있다. 전동기의 진동, 소음 등에 영향을 미치는 진동 토크의 진폭은 저슬립 부근에서 급격히 증가하고 있는데, 이는 그림 4.1에 나타난 바와 같이 임피던스 불평행 상태의 심화와 역상분 전류의 급격한 증가에 기인한다.



— 해석치 —\*— 실험치  
 그림 4.3 효율



— 해석치 —\*— 실험치  
 그림 4.4 주권선 전류 및 보조권선 전류

그림 4.3은 효율특성 결과로서 전반적으로 잘 일치한다. 그림 4.4에서 주권선 전류 특성은 고슬립 부근에서 오차가 발생함을 볼 수 있는데, 이는 고슬립 부근에서 회전자와 권선에 의한 모터의 포화현상을 충분히 고려하지 못한것에 기인한다고 판단된다. 그러나, 저슬립 부근에서의 오차는 매우 적어 본 해석방법이 매우 타당함을 알 수 있었다.

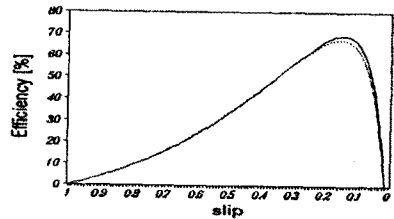
표 2 최적화 결과(목적함수 : 효율( $s=0.15$ ))

	최적화 시행 전	최적화 시행 후
보조권선 도체수	106-53	122-61
콘덴서 [ $\mu F$ ]	16	13
효율 [%]	67.3	69.2

표 2는 최적화 결과이다. 설계변수로는 효율 특성에 큰 영향을 미치는 주요 설계파라미터 중의 하나인 콘덴서의 용량과 권수 비로 하였다[3].

권수 비를 변화시키기 위하여 주권선은 일정하게 유지하고 보조권선의 도체수를 변화시켰으며, 주권선과 보조권선의 배치에 따른 기자력 분포는 기존의 분포와 같도록 하였다. 제약 조건으로는 기동 토크, 주권선 및 보조권선의 전류밀도, 정적율로 하였다. 제약조건의 범위는 다음과 같다.

- 기동 토크( $T_s$ )  $\geq 17$  [kg · cm]
- 주,보조권선의 전류밀도 ( $J_m$ )  $\leq 8$  [A/mm<sup>2</sup>]
- 슬롯내 도체의 정적율 ( $F_s$ )  $0.3 \leq F_s \leq 0.5$



... 최적화 수행 전 — 최적화 수행 후  
 그림 4.5 효율

그림 4.5은 최적화 수행 후 효율 특성결과이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 대칭 좌표계법을 이용하여 콘덴서 구동형 단상 유도전동기의 등가회로를 구성하여 실험치와 비교하였다. 해석치와 실험치의 오차는 저슬립 부근에서는 상당히 잘 일치하는 결과를 얻음으로써 등가회로 구성이 타당함을 확인하였으며, 이를 바탕으로 최적화 이론을 적용하여 콘덴서의 용량과 권수비를 설계변수로 하여 효율 향상을 확인하였다.

## 참고 문헌

- [1] Cyril G. Veinott, book, *Theory and Design of Small Induction Motors*, McGRAW-HILL, 1959
- [2] John H.Kuhlmann, book, *Design of Electrical Apparatus*, JOHN WILEY & SONS, 1950
- [3] H.Huang, E. F. Fuchs, "Optimal Placement of the Run Capacitor in Single-Phase Induction Motor Designs", IEEE, Energy Conversion vol.3, No.3 pp.647-652, 1988
- [4] F.W. Suhr, "Symmetrical Components as Applied to the Single-Phase Induction Motor", Trans. AIEE, pp.651-656, 1941
- [5] Jasbir S. Arora, book, *Optimum Design*, McGRAW-HILL, 1989
- [6] 三宅 博, 小形 AC モータの設計と制御, 綜合電子出版社, 1984
- [7] 藤見 和信, 費用モータ設計マニュアル, 綜合電子出版社, 1992