

단상 유도전동기의 이용률 변동에 대한 최적효율 산정기법

論 文

55P-4-1

Method of Optimum Efficiency to Coefficient of Utilization for Single Phase Induction Motor

金 養 鎬[†] · 金 榮 善^{*}
(Yang-Ho Kim · Young-Sun Kim)

Abstract - In this paper, deduced suitable optimization to request output condition after taking closely characteristic data of single phase induction motor(SIM) which is the possibility becoming economic is coming to be demanded. Motor proper move connection data took advantage of result of existing data and iron loss and copper loss, mechanical loss took advantage of statistical data, and decide motor move taking advantage of saving data and secondary resistance and optimum purpose of method that is proposed through single phase induction motor and comparison performance evaluation having on the same output parameter. That decide material factor, electric power damage ratio, and coefficient of utilization for optimum function by method that search request output and optimum values of efficiency case by case and decided is proper that is saved after take magnetizing reactance relationship. This research result which it sees against a material expense with use coefficient of utilization which is included in loss expense decides the same plan variable back the place efficiency is useful and will be applied.

Key Words : Single phase induction motor, Optimum efficiency, Coefficient of utilization

1. 서 론

단상유도전동기는 상용화된 전원을 변환장치 없이 직접 사용할 수 있어 가전제품 전 분야의 동력원으로 사용되고 있다. 특히 콘덴서 구동형 단상유도전동기는 다른 단상유도전동기에 비해 효율이 높고 기동특성이 우수하여 경제적이면서도 고효율화를 위한 제품의 구현에 적합하다.

콘덴서 구동형 단상유도전동기는 보조권선에 콘덴서를 결합한 구조로써 주권선과 보조권선의 기자력차에 의해 평형 다상기와는 달리 불평형의 타원 자계가 형성된다. 따라서 등가회로의 구성은 회전자계설의 이론을 바탕으로 불평형 상태를 각각의 대칭분으로 분해해서 해석하는 대칭좌표계법을 이용한다[1-3].

본 연구에서는 단상유도전동기의 설계시 손실전력 비용과 재료비용과의 관계를 고려하여 최적효율을 산정하는 방법을 제시하였다. 재료비용과 전력 요금의 상대적 상승률에 따라 전동기이 이용률에 대한 최적 효율을 찾아 전동기 설계시 참고자료로 활용하고자 하였다.

2. 단상 유도전동기 등가회로 유도

단상 유도전동기의 등가회로 유도에는 회전자계를 이용하는 2상 유도전동기의 결상 운전에 해당하므로 이에 대칭좌표법을 이용하여 단상유도전동기의 등가회로를 구하기로 한다.

2.1 대칭좌표법에 의한 등가회로 유도

단상 유도전동기는 그림 1과 같이 회전자계로 동작하는 2상 유도전동기의 결상 운전에 해당되므로 단상 유도전동기의 등가회로는 2상 유도전동기에 대칭좌표법을 적용하여 구할 수 있다. 그림 1과 같이 스위치 S_1 은 ON, S_2 는 OFF되고, 인가전압은 2상 평형전압이 인가된 것으로 하여 전원이 접속된 A상을 기준으로 대칭좌표법을 적용한다.

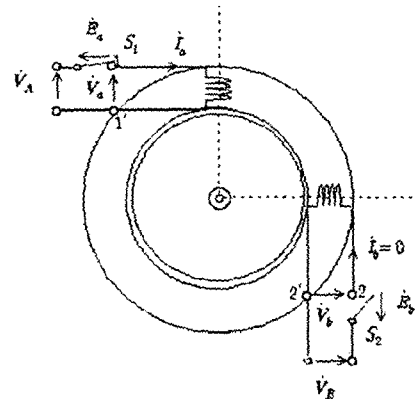


그림 1 2상 유도전동기의 단상운전
Fig. 1 Single phase operation of two phase induction motor

[†] 교신저자, 正會員 : 檀國大 工大 電氣工學科 博士課程
驛園專門大學 電子情報科 兼任教授

E-mail : kimlab@dankook.ac.kr

^{*} 正會員 : 成均館大 情報通信工學部 研究教授 · 工博
接受日字 : 2006年 3月 22日
最終完了 : 2006年 11月 2日

그림 1에서 A 상과 B 상에 대칭좌표법을 적용하면 각상의 전동기 단자 전압 \dot{V}_a, \dot{V}_b 는 다음과 같다.

$$\dot{V}_a = \dot{V}_A - \dot{E}_a = \dot{V}_A \quad (1)$$

$\dot{E}_a = 0$: 스위치 S_1 의 단자 전압

$$\dot{V}_b = \dot{V}_B - \dot{E}_b \quad (2)$$

$\dot{E}_b \neq 0$: 스위치 S_2 의 단자 전압

식 (1), (2)에 대하여 2상 전동기의 단자를 중심으로 대칭좌표법을 적용하여 전압의 정상분과 역상분 $\dot{V}_{a1}, \dot{V}_{a2}$ 그리고 전류의 정상분과 역상분 $\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{a2}$ 를 구하면 식 (3)~(6)과 같다.

$$\dot{V}_{a1} = \frac{1}{2}(\dot{V}_a + j\dot{V}_b) = \dot{V}_1 - j\frac{\dot{E}_b}{2} \quad (3)$$

여기서, $\dot{V}_1 = \frac{1}{2}(\dot{V}_A + j\dot{V}_B) = \dot{V}_A$: 인가전압의 정상분

$$\dot{V}_{a2} = \frac{1}{2}(\dot{V}_a - j\dot{V}_b) = \frac{1}{2}j\dot{E}_b \quad (4)$$

여기서, $\frac{1}{2}(\dot{V}_A - j\dot{V}_B) = 0$: 인가전압의 역상분

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{2}(\dot{I}_a + j\dot{I}_b) = \frac{1}{2}\dot{I}_a \quad (5)$$

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{2}(\dot{I}_a - j\dot{I}_b) = \frac{1}{2}\dot{I}_a \quad (6)$$

여기서, $\dot{I}_b = 0$

이러한 2상 유도전동기의 정상분 임피던스와 역상분 임피던스를 각각 \dot{Z}_P, \dot{Z}_N 라 하고 정상분 전압 \dot{V}_{a1} 와 역상분 전압 \dot{V}_{a2} 를 \dot{Z}_P 와 \dot{Z}_N 로 나타내면 식 (7)~(10)과 같다.

$$\dot{V}_{a1} = \dot{Z}_P \dot{I}_{a1} = \frac{\dot{Z}_P}{2} \dot{I}_a \quad (7)$$

여기서, $\dot{I}_{a1} = \frac{1}{2}\dot{I}_a$

이며,

$$\dot{V}_{a2} = \dot{Z}_N \dot{I}_{a2} = \frac{\dot{Z}_N}{2} \dot{I}_a \quad (8)$$

여기서, $\dot{I}_{a2} = \frac{1}{2}\dot{I}_a$

이다. 식(7), (8)과 같은 대칭분을 써서 2상 전동기에서 전원에 접속된 A상의 전압 \dot{V}_a 을 대칭분 전압으로 나타내면 식 (9), (10)과 같이 정상분 전압 \dot{V}_{a1} 과 역상분 전압 \dot{V}_{a2} 를 직렬로 합성한 것과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} \\ &= \frac{1}{2}\dot{Z}_P \dot{I}_a + \frac{1}{2}\dot{Z}_N \dot{I}_a \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{V}_a = \dot{V}_A = \dot{V}_1 \quad (10)$$

단상 유도전동기는 그림 1과 같이 2상 유도전동기의 한상만 전원에 접속된 것과 같으므로 식 (9), (10)에서 전압 \dot{V}_a 와 \dot{I}_a 를 단상 유도전동기의 것 즉, $\dot{V}_a = \dot{V}_A = \dot{V}_1$ 로부터 $\dot{V}_a = \dot{V}$ 와 $\dot{I}_a = \dot{I}$ 로 대처하여 회로화한 그림 2가 단상 유도전동기의 등가회로가 된다.

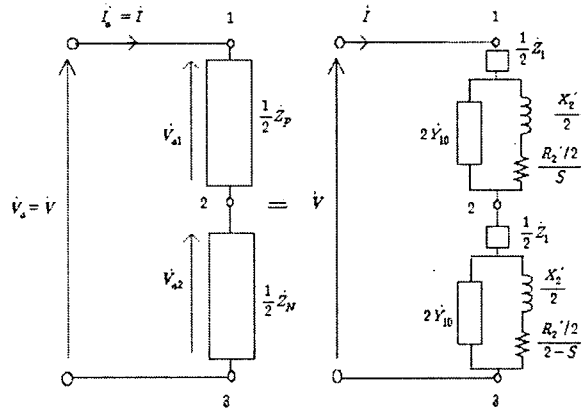


그림 2 단상 유도전동기의 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of single phase induction motor

2.2 콘덴서 구동형 단상유도전동기의 등가회로

본 논문에서는 콘덴서 구동형 단상유도전동기의 주권선부 분만을 취하여 순 단상유도전동기의 정상상태로 가정하고, 전동기의 크기가 커질 때 여자 인덕턴스의 크기도 비례하며, 다른 정수들은 변화가 없다는 전제하에 제안한 기법을 적용하기로 한다. 그림 2의 경우를 철손 저항을 입력력으로 이용하여 세부 등가회로를 도시하면 다음 그림 3과 같다[4].

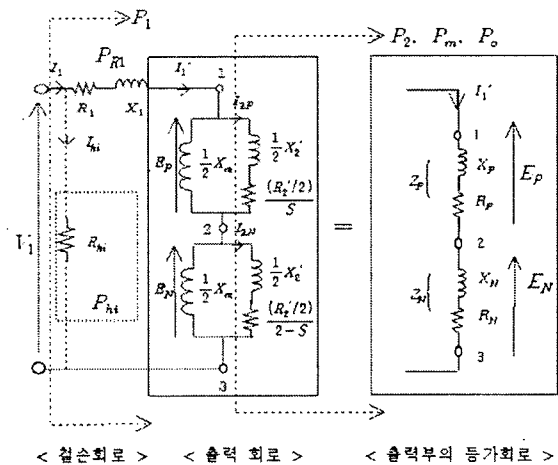


그림 3 단상 유도전동기의 등가 회로

Fig. 3 Equivalent circuit of SIM

2.3 이상적 단상유도전동기의 최대효율

그림 3의 단상유도전동기의 등가회로에서 출력부만을 추출하고 이상(ideal)화하여 그림 4와 같이 정상분과 역상분 저항만을 고려하여 단상유도전동기의 이론적 최대효율을 구하기로 한다.

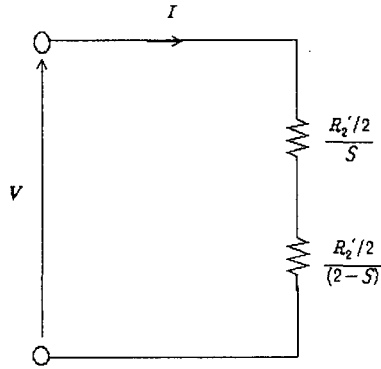


그림 4 이상적 단상유도전동기의 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of ideal SIM

그림 4의 등가회로로부터 $R_2'/2 = R_2$, $X_2'/2 = X_2$ 이라 두고 전류를 구하면

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{\frac{R_2}{S} + \frac{R_2}{(2-S)}} \quad (11)$$

여기서,

- I : 전류
- V : 전압
- Z : 임피던스
- S : 슬립
- R_2 : 1차 환산 2차 저항($= R_2'/2$)

이고, 입력전력 P_i 는

$$P_i = V I \quad (\cos \theta = 1) \quad (12)$$

이며, 기계적 손실을 무시하면 출력전력은

$$\begin{aligned} P_o &= T_o(1-S) = (T_m - T_l)(1-S) \\ &= T_m(1-S) = P_m(1-S) \\ &= \frac{V^2 S(2-S)(1-S)^2}{2 R_2} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

- P_m : 발생 출력
- P_o : 축 전력
- T_m : 발생 토크
- T_o : 축 토크
- T_l : 기계 손실

이다. 그러므로 단상 유도전동기의 이상적 최대효율 η_{ideal} 은

$$\begin{aligned} \eta_{ideal} &= \frac{P_o}{P_i} = \frac{V^2 S(2-S)(1-S)^2}{V^2 S(2-S)} \\ &= (1-S)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

임을 알 수 있다.

3. 이용률에 대한 최적효율 산정

단상 유도전동기의 이용률에 대한 효율 최적화 기법을 제안하면 다음과 같다.

3.1 단상 유도전동기 효율의 주요인

효율에 영향을 주는 주요인으로는 여자 리액턴스와 여타 정수들이 관여하나 전동기의 크기와 직접 관련 있는 여자 리액턴스 성분이 가장 주요한 성분으로 본 논문에서는 여자리액턴스를 이용하기로 한다.

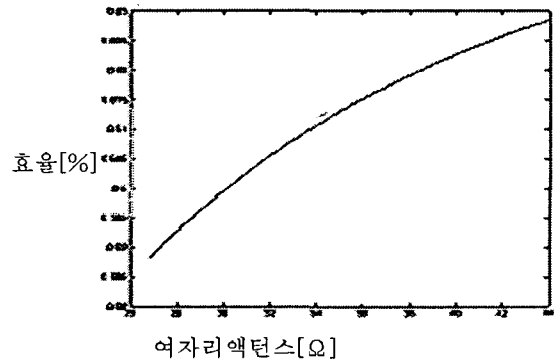


그림 5 여자리액턴스 증가에 대한 효율

Fig. 5 Efficiency increasing magnetizing reactance

프로그램으로 계산된 결과에 따라 여자 리액턴스의 크기가 커짐에 따라서 효율도 점차적으로 증가함을 보인다. 위와 같은 결과를 토대로 단상유도전동기의 경우에 여자 리액턴스(X_m)의 크기가 커짐에 따라 효율도 증가함을 알 수 있고, 이는 동일 출력에서 여자 리액턴스의 크기가 효율에 주요한 영향을 준다는 것을 의미한다.

3.2 이용률 변동에 대한 최적효율 산정기법

여자 리액턴스와 효율의 관계로부터 재료비용과 손실전력 비용의 합을 T 라 할 때 정격 출력 전동기에서 효율 η 는

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_L} \quad (15)$$

- 여기서, P_o : 출력
- P_L : 손실

위 식 (15)로부터 손실 전력 P_L 을 구하면

$$P_L = \left(\frac{1-\eta}{\eta}\right) P_O = L \cdot P_O \quad (16)$$

여기서, L : 손실율

이다. 손실율을 이용하면 요구출력으로부터 손실전력을 구할 수 있으며, 재료비용과 손실전력 비용이 포함된 합을 T 라 하면

$$T = \alpha \cdot X_m + \beta \cdot P_L \quad (17)$$

여기서, α : 재료비 계수
 β : 전동기 이용계수

이다. 식 (17)에 식 (16)을 대입하면

$$T = \alpha \cdot X_m + \beta L \cdot P_O \quad (18)$$

전동기의 이용계수 β 에 포함되는 이용률은 연간 이용시간(약 4,350시간)에 대한 연간 총시간(약 8,700시간)과의 비율로 전동기의 평균 이용률을 약 0.5 [p.u] 를 기준으로 하였을 때, 식 (18)에서 비용합의 최소값을 구하기 위해 재료비용과 이용률이 포함된 손실전력 비용의 합이 0인 값을 구하면,

$$\alpha \cdot X_m + \beta L \cdot P_O = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\beta}{\alpha} = -\left(\frac{X_m}{P_O}\right) \cdot \frac{1}{L} \quad (20)$$

위 식 (20)에서 우항은 단상유도전동기로부터 얻어 낼 수 있다. 또한 이용계수 안에 포함된 전동기 이용률 U_m 이라 두고 임의의 출력 전동기에 대한 손실율을 L_h 로 하면 식 (20)은

$$\frac{\alpha_h}{\beta_h} = -\left(\frac{L_h}{X_m}\right) \cdot P_O \cdot U_m \quad (21)$$

여기서,

- α_h / β_h : 재료비용과 손실전력 비용의 기준값
- L_h : 출력 전동기에 대한 손실율
- P_O : 요구(정격)출력
- X_m : 여자 리액턴스

전동기 이용률 U_m 을 0.5 [p.u] 라 할 때, 단상유도전동기 기준효율(KS)을 49[%] 인 1/4 마력 단상유도전동기의 여자 리액턴스를 전동기로부터 구하고 재료비용과 손실전력 비용의 기준값을 γ_h^{ref} 라 두면 식 (21)로부터

$$\gamma_h^{ref} = \left(\frac{\eta-1}{\eta}\right) \left(\frac{P_O}{X_m}\right) U_m \quad (22)$$

이다. 이와 같은 관계를 고려하여 구해진 손실율 기준값 L_h 로부터 이용률에 대한 요구 출력 h 에 대한 최적 효율을 구하는 과정을 보면 식 (15)~(22)로부터

$$\eta_h = \frac{P_O U_m}{P_O U_m - \gamma_h^{ref} X_m} \quad (23)$$

$$\eta_h = \frac{1}{1 - \left(\frac{X_m \gamma_h^{ref}}{P_O U_m}\right)} \quad (24)$$

이며,

$$\eta_h = \frac{1}{1 - \left(\frac{X_m}{P_O}\right) \left(\frac{\alpha_h}{\beta_h}\right) \left(\frac{1}{U_m}\right)} \quad (25)$$

여기서, α_h / β_h 는 음수이므로(\because 식(21)에서 우항이 음수) 식 (25)의 분모 부분을 정리하면

$$\eta_h = \frac{1}{1 + \frac{\Delta}{U_m}} \quad (26)$$

$$\text{여기서, } \Delta = \left(\frac{X_m \gamma_h^{ref}}{P_O}\right)$$

으로 얻어지며, 식 (23)~(26)과 같이 Δ 가 고정이라면 이용률 U_m 이 커질수록 효율은 높아짐을 알 수 있다.

4. 적용사례 연구

본 연구에서 제안한 기법으로 단상유도전동기의 등가회로 정수를 기존의 데이터나 주어진 전동기로부터 참고문헌 [1,2,5] 등의 실측 방법을 이용하여 전동기의 등가회로 정수를 구할 수 있다.

4.1 전동기의 등가회로 정수 도출 실험

제안한 최적효율 산정기법에 적용하기 위한 등가회로 정수는 참고문헌 [2]~[6]의 실측치와의 비교치를 참고 하였으며, 220[V], 0.21[KW], 4극, 60[C/S] 의 컨덴서 기동형 단상유도전동기(S.M Motor)에서 다음과 같은 결과를 참고하였다.

- 고정자 권선의 저항 측정 : 3.95 [Ω], (27°C)
- 무부하 시험 : 전류 2.6 [A], 전압 220[V], 전력 145 [W]
- 구속시험 : 전류 3.95 [A], 전압 73.7 [V], 전력 263 [W]

이며, 주어진 실측값을 참고문헌 [5]의 방법으로 단상유도 전동기 등가회로 정수를 구하여 정리하면 다음 표 1과 같다.

표 1 단상유도전동기 등가회로 정수

Table 1 Parameters of equivalent circuit for SIM

구분 회로 정수 용량	고정자		회전자		여자 리액턴스
	$R_1[\Omega]$	$X_1[\Omega]$	$R_2[\Omega]$	$X_2[\Omega]$	$X_m[\Omega]$
1/4 마력	3.95	3.9499	5.7774	7.8997	58.1524
1/4 마력 (참고문헌[6])	3.48	5.316	5.873	9.215	41.993

표 1의 결과를 제안한 산정 기법에 적용하여 효율 기준값 (49 [%])으로부터 전동기의 이용률에 대하여 0.5[p.u]에서 1.0[p.u] 까지 증가시킨 후 구한 결과를 제시하였다.

4.2 단상유도전동기 등가회로 정수에 대한 시험 결과

본 절에서는 주어진 실측값을 상기 서술한 단상유도전동기 등가회로 정수에 대하여 시뮬레이션한 결과와 실험결과를 비교하여 나타내었다. 시뮬레이션은 MatLab. V7.1로 시행하였으며, 이 결과를 실험치와 비교하기 위하여 1/4마력 단상유도전동기(S.M ELECTRIC Motor)에 대하여 실험을 시행하였다.

표 2 시험용 단상유도전동기 제반사항

Table 2 Parameters of Experimental Motor

항 목	치 수	항 목	치 수
정격출력	0.21 KW, 1/4 마력	극수	4
전 압	220 V	기동방식	컨덴서 기동형
전 류	2.8 A	회전수	1710 rpm
효 율	49 %	주파수	60 Hz

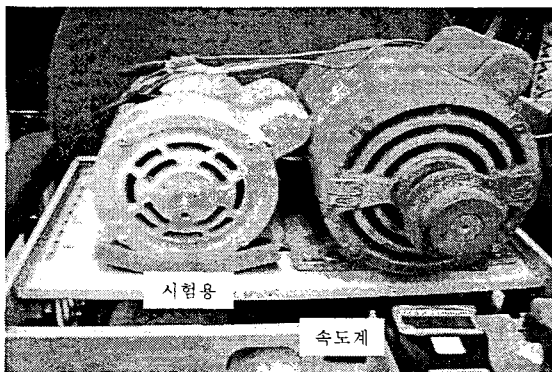
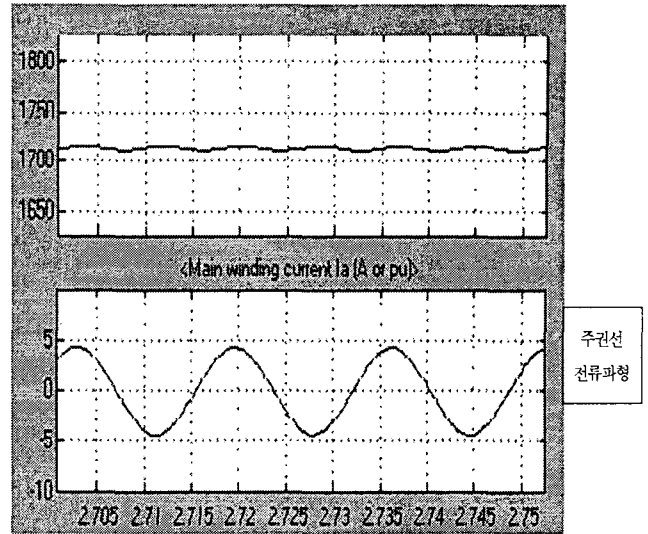
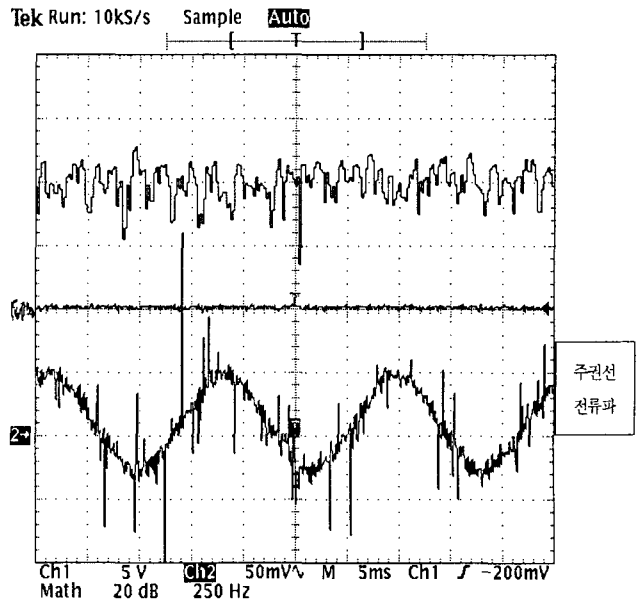


그림 6 시험용 단상유도전동기(1/4마력)
Fig. 6 SIM for Experimental Test(1/4 HP)



(a) 시뮬레이션 결과



(b) 실험 결과

그림 7 콘덴서 기동 SIM에 대한 주권선 전류 파형
Fig. 7 Main current waveform of Condenser-run SIM

그림 7과 같이 실측 후 시뮬레이션한 결과 주권선 전류의 파형은 일치하며, 회전수도 사양에 비교적 일치하므로 구해진 단상 유도전동기의 회로 정수값으로 채택하여 사용하기로 한다.

4.3 이용률 변동에 대한 최적효율 산정 결과

단상유도전동기의 측정 시험결과 얻은 데이터를 제안한 이용률에 대한 최적 효율 산정 기법으로 계산하여 결과를 살펴보면 그림 8과 같다.

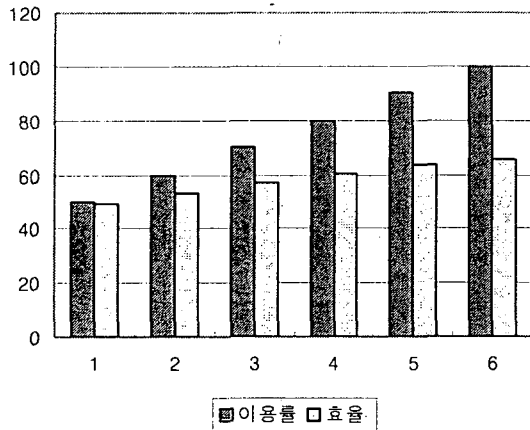


그림 8 단상유도전동기 이용률과 효율(1/4마력)
Fig. 8 Coefficient of Utilization and Efficiency for SIM(1/4 HP)

그림 8의 결과를 보면 단상 유도전동기(1/4마력) 컨덴서 기동형의 경우에 이용률이 높아질수록 효율은 증가하였으며, 그 증가율은 이용률이 증가함에 따라 둔화되며 재료비용과 손실전력 비용의 상대적 변화율에 따라 변화됨을 알 수 있다.

5. 결 론

전동기의 운전에 따른 손실전력비를 줄이기 위해서 효율을 높이면 전동기의 크기가 크게 되어 재료량이 많이 소요되므로 제작비가 증가하게 된다. 이와 같이 재료비와 손실전력비는 반비례 관계를 가지는 반면에 이용률이 높아지면 전력손실 비용이 줄어들게 되므로 전동기 효율과는 비례하는 특성을 가진다.

따라서 상기와 같은 전동기 이용률이 손실 전력비용 감소와 이에 따른 재료비와의 관계를 고려하여 단상유도전동기의 평균수명에 대해 최적의 효율을 산정하는 최적 효율 산정 기법을 1/4마력에 대하여 실험으로 정수를 구하고 제시하였다.

제한한 기법을 적용한 결과 전동기의 이용률이 높은 장소나 현장에서의 전동기는 고효율 성능을 확보하여야만 주어진 제반 조건에서 손실전력 비용을 최소화할 수 있다는 결론을 얻었으며, 단상유도전동기의 재료비용과 손실전력비용의 상대적 변화에 따라 최적 효율은 다소 변화하며, 추후 이와 유사한 전동기에 대해 좀 더 정량적이고 다양한 변수를 고려한 최적효율에 대해 접근함으로써 날로 높아져가는 에너지 비용과 재료비용의 변화에 대한 대처가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] 강규홍, 하경호, 홍정표, 김규택, 정승규, " 등가회로법과 수치해석의 결합에 의한 콘덴서 구동형 단상 유도전동기의 회로정수 산정 및 특성 해석", 전기학회논문지, Vol. 49B, No.11, 2000

[2] 원종수, "콘덴서 런 단상유도전동기의 설계적 고찰 보조 권선 및 콘덴서 용량치의 선정", 전기학회지, Vol. 31, No. 2, 1982
 [3] 오궁렬, "순단상유도전동기의 등가회로와 도식적 특성 산정법 및 정수결정에 의한 특성산정법", 전기학회지, Vol. 22, No. 1, 1973
 [4] 천희영, 정연택, 배진호, 이형재, 전기기계, 치정문화사, pp.333- 471, 1971
 [5] E. R. Collins, Jr., P. B. Boyd, "Improved Methods for Determining the Equivalent Circuit Parameters for Single-Phase Induction Motor Models", IEEE Trans. pp. 390-395, 1993
 [6] 박수강, 백형래, "원칩 마이컴을 이용한 단상유도전동기의 주권선 제어에 관한 연구", 전기학회 논문지, Vol. 49-B, No. 1, 2000

감사의 글

이 논문을 지원해주신 한영전기공업(주)와 한국특수 모터펌프 관계자 여러분께 감사드립니다.

저 자 소 개



김 양 호 (金 養 鎬)

1966년 6월 14일생. 1991년 단국대 전기공학과 학사. 1994년 동 대학원 전기공학과 석사. 1999 동 대학원 박사과정 수료. 현재 경원전문대학 전자정보과 겸임교수. 한영전기공업(주) 기술연구소장. 관심분야 : 전동기 및 변압기 설계, 소

방설비 시스템

Tel : 02-709-2583

E-mail : kimlab@dankook.ac.kr



김 영 선 (金 榮 善)

1970년 10월 15일생. 1995년 단국대 과학교육과(물리) 학사. 1997년 동 대학원 전기공학과 석사. 2006년 동대학원 전기공학과 박사. 2001년-2002년 정명C&T(주) 기술연구소 연구원, 2002년-2005년 한국교육과정평가원 연구원. 2006년-현

재 성균관대 정보통신공학부 연구교수.

관심분야 : 전자장 수치해석, 전기기기 설계 및 해석, 자성 유체 유동, 다중물리현상 해석

Tel : 031-290-7177

E-mail : youngsun@skku.edu