

## 교류 전압 제어기에 의한 유도 전동기의 효율 개선에 관한 연구

이 승 철 \*      정 승 기  
광운 대학교

### A Study on the Efficiency Improvement of Induction Motor with AC Voltage Controller

Lee Seung-Chul\*    Jeong Seung-Gi  
Kwangwoon University

#### Abstract.

This paper proposes a minimum power factor control for maximum efficiency operation of an induction motor, under low load condition. Minimum input or maximum efficiency operation is achieved by properly adjusting the amplitude of the stator voltage, with the three phase AC voltage controller. Through the simulation, the relationships between the delay angle and input power under various load conditions are examined. Experimental results are also given, which show good coincidence with the simulation results.

#### I. 서 론

최소 입력전력과 최대 효율운전은 슬립의 특성으로 나타나는데, 이는 유도전동기를 부분부하로 운전할때 고정자 전압을 적절히 인가함으로써 얻을 수 있다. 이러한 두가지 특성을 얻기위해 전동기를 SCR 교류 전압제어기로 운전 하면서 입력전력과 절호각에 따른 역률각을 비교한 결과 주목할 만한 결과가 얻어짐을 알았다. 부하를 변화 시켜가며 입력전력과 최소 역률각을 살펴본 결과, 저부하 영역에서는 최소 역률각과 최소 입력의 추이가 거의 일치함을 알았다.

F.J.Noia에의해 발표된 일정역률 제어기는 역률을 일정하게 고정 하였으나 최소의 역률각을 유지하는 방법으로 더욱 높은 효율운전이 가능함을 알 수 있었다. 3상 또는 단상 전동기의 고정 주파수와 가변 주파수에 모두 적용이 가능하나 본 논문에서는 3상의 고정 주파수의 경우만 다루기로 한다.

#### II. 본론

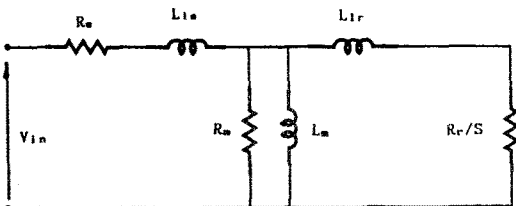


그림1. 유도전동기의 상단 등가회로

#### 1. 효율 개선 이론

전압제어에 의한 효율개선은 인가된 전압을 감소시켜 최대 자속보다 작은 영역에서 전동기를 운전함으로써 이루어진다. 이때 발생된 토크는 부하토크와 일치하는 점에서 동작하는데, 감소된 자속은 철손과 동손을 줄이며 고정자 전류에 의한 자화성분도 줄어들게 된다. 감소된 공극자속은 최대 정격 자속에서 운전하는 것보다 부하토크를 건디기 위해 보다 큰 슬립이 요구된다. 슬립이 커지면서 회전자 손실과 고정자 동손은 증가하게 된다. 이때 감소성분과 증가성분을 적절히 조절함으로써 기본 손실 성분을 최소화 할 수 있다.

유도기기는 일반적으로 부하토크는 독립변수로 슬립, 역률, 입력전력, 효율 등은 종속 변수로서 간주할 수 있다. 그림1 에서 슬립 S 만이 변수이며 입력임피던스, 역률, 입력전력과 효율 등은 슬립의 함수로서 표현된다. 입력전압을 일정히 일정하면 부하토크는 슬립 S가 변화함으로써 공급된다. 슬립이 변할때, 역률, 전류, 입력전력과 효율 등도 변하게 된다. 반대로, 슬립을 일정하게, 전동기의 전압을 부하에 추종하도록 공급한다면, 효율과 역률 등은 고정된다. 따라서 최적의 슬립주파수에 해당하는 역률값을 일정하게 유지한다면, 어떤부하 영역에서 더욱 좋은 효율로 운전할 수 있다.

#### 2. 유도기의 d-q 등가모델

3상 유도전동기의 전압방정식을 얻기 위하여 고정자권선이 대칭이며 분포권이라 가정한다. 3상 정지 좌표계에서 유도기의 전압식은

$$V_{abc} = R_{el} i_{abc} + \frac{d\psi_{abc}}{dt} \quad (2-1)$$

변환행렬 Sdq 는

$$S_{dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

식을 정리하여 유도기를 행렬형태로 표현하면 (2-2)

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & \omega_r L_m & PL_m & \omega_r L_m \\ -\omega_r L_m & R_s + PL_s & -\omega_r L_m & PL_m \\ PL_m & (\omega_r - \omega_r)L_m & R_r + PL_r & (\omega_r - \omega_r)L_r \\ -(\omega_r - \omega_r)L_m & PL_m & -(\omega_r - \omega_r)L_r & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

이며, 여기서 P는 미분 연산자이다. (2-3)

유도기의 발생 토크는

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{qr} i_{ds}) \quad (2-4)$$

가 된다. 유도기의 토크 평형식은

$$T_e = \frac{2}{P} J \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{2}{P} B\omega_r + T_l \quad (2-5)$$

이 고 T<sub>l</sub>은 부하 토크이다.

3. 시뮬레이션을 위한 시스템 해석

그림2에 3상 교류 전압제어기의 배선도를 보았다.

상태1 : a, b, c 상 모두 전원측 단락상태  $i_{as}=i_{bs}=i_{cs}=0$

상태2 : a 상만 개방상태  $i_{as}=0$

상태3 : b 상만 개방상태  $i_{bs}=0$

상태4 : c 상만 개방상태  $i_{cs}=0$

상태5 : 2개의 상 또는 3상 모두 개방상태  $i_{as}=i_{bs}=i_{cs}=0$

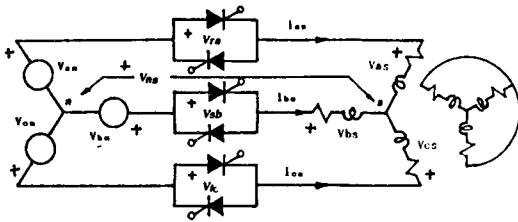


그림2. 3상 교류 전압제어기의 배선도

상태1: 3상 전원이 직접 인가된 상태이다. 따라서 행렬(2-3)을 고정좌표축 형태로 변환하고, 농형 유도 전동기는 고정좌역만 전원을 공급하고 회전자는 단락 시켰으므로, 행렬식은

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & 0 & PL_m & 0 \\ 0 & R_s + PL_s & 0 & PL_m \\ PL_m & -W_r L_m & R_r + PL_r & -W_r L_r \\ W_r L_m & PL_m & W_r L_r & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

이다.

상태 2: 중성점간의 궤환 경로가 없으므로

$$i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad (2-7)$$

영상분 전류가 없으면 영상분 전압도 없으므로

$$V_{as} + V_{bs} + V_{cs} = 0 \text{ 가 성립한다.} \quad (2-8)$$

위의 전압식은

$$\begin{aligned} V_{as} &= V_{an} + V_{ns} - V_{ra} \\ V_{bs} &= V_{bn} + V_{ns} - V_{rb} \end{aligned} \quad (2-9)$$

$$\begin{aligned} V_{cs} &= V_{cn} + V_{ns} - V_{rc} \\ V_{ab} &= V_{bc} = 0 \end{aligned} \quad (2-10)$$

식(2-9)의 양변을 각각 더하여(2-7)(2-8)식을 대입하면

$$V_{ns} = 3V_{na} \quad (2-11)$$

따라서 전원과 전동기 중성점 전위의 3배의 전압이 개방된 스위치 양단에 나타난다. 전류식은

$$i_{as} = 0 \quad (2-12)$$

$$i_{bs} = -i_{cs} \quad (2-13)$$

의 관계가 성립하므로,

$$i_{qs} = i_{as} = 0 \quad (2-14)$$

$$i_{ds} = -\frac{1}{\sqrt{3}} (i_{bs} - i_{cs})$$

$$= -\frac{1}{\sqrt{3}} i_{bs} \quad (2-15)$$

행렬식으로 표현하면,

$$\begin{bmatrix} V_{bc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{3}(R_s + L_s P) & 0 & -\sqrt{3} L_m P \\ -W_r L_m & R_r + L_r P & -W_r L_r \\ 3 L_m P & W_r L_r & R_r + L_r P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

와 같다.

Ⅰ. 실험결과

그림3.은 유도 전동기의 파라미터를 구한 후 등가 회로상의 임피던스 산출법으로 전동기의 속도에 대한 입력전력을 비교한 그래프이다. 직선상이 이론치이며 실측된 입력은 □ 표의 점으로 표시하였으며 파라미터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_s &= 0.8387[\Omega] & R_r &= 0.6644[\Omega] \\ L_{ls} &= 0.0021[H] & L_{lr} &= 0.0049[H] \\ L_m &= 0.06853[H] & R_m &= 499[\Omega] \end{aligned}$$

전동기의 정격은 다음과 같다.

정격출력: 2.2kW(3HP)  
 입력전압: 220V(3상)      정격전류: 9.3A  
 극수: 4                      정격회전수: 1723rpm

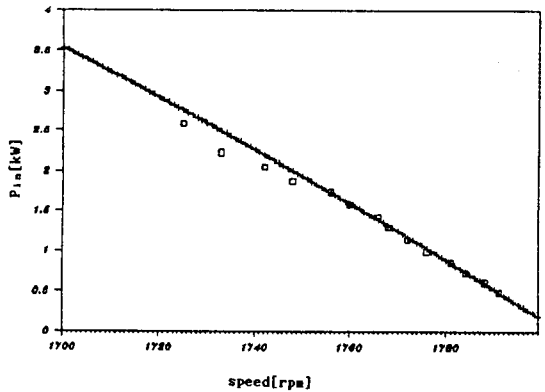
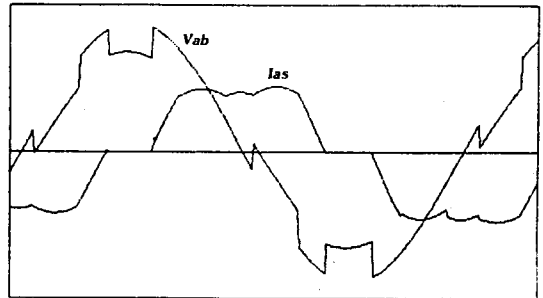
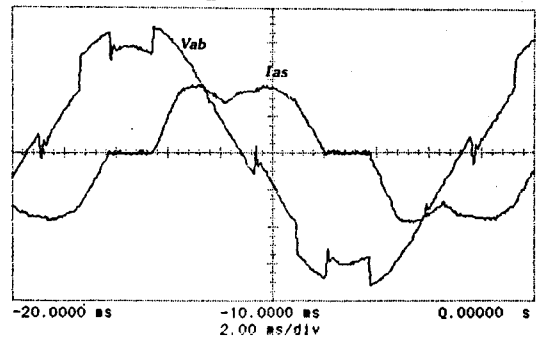


그림3. 전동기 회전수에 대한 입력전력

그림4.는 시뮬레이션을 통해 구한 선간전압과 상전류를 관측된 실제 파형과 비교하였다.



(a) 시뮬레이션 파형



(b) 관측 파형

그림4. 정부하 400W, 절호각 76° 인 경우

그림5는 전구간 도통시 입력전력이 같은 경우의 실험치와 시뮬레이션 결과의 그래프이다. 정부하 100W, 400W, 1200W의 경우 점호각 변화에 대한 입력전력의 변화를 나타내었다. 그래프에서 저부하 영역에서는 점호각 증가시 입력전력이 작아지는 영역이 풍부하나 중부하 일수록 영역이 적다.

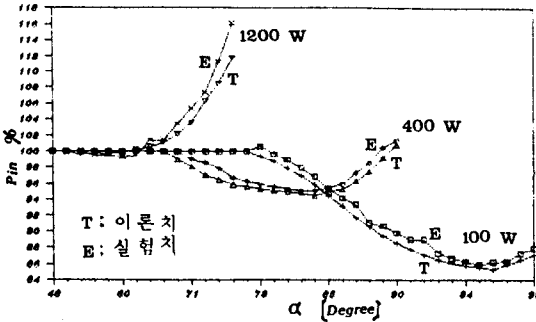


그림5. 점호각 변화에 대한 입력전력.

그림6은 부하물 100W - 1.4kW 까지 변화시키면서 최소 역률각과 효율이 최대인 역률각을 나타낸 그래프이다. 700W 이하에서는 두 그래프가 매우 근접해 있으나 중부하 일수록 멀어지는 경향이 있다. 낮은 부하 조건에서는 최소역률각과 최대 효율곡선이 같아지며 부하에 따라 최대 효율의 역률각은 변화한다는 것을 알 수 있다.

□ : 최대 효율의 역률각  
+ : 최소 역률각

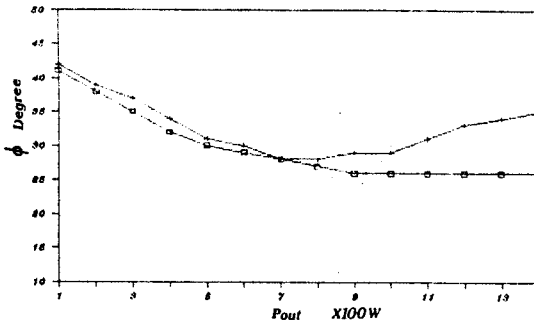


그림6. 부하에 대한 최소 역률각과 최대효율 역률각 특성.

## Ⅴ. 결론

본 연구에서는 유도 전동기를 최대 효율로 운전하기 위한 방안으로 입력 전력과 역률각과의 관계에 대해 다루었다. 역률각은 전압과 전류의 위상차로서 비교적 검출방법이 간단하기 때문에 제어회로를 손쉽게 구성할 수 있는 장점이 있다. 저 부하영역에서 최대 효율운전은 최소의 역률각을 유지하는 방법으로 운전함으로써 가능하다는 결론을 얻었다. 그러나, 중부하 영역에서의 최소 역률각 운전은 효과가 좋지 않았다. 본 연구는 저부하 영역에서 일정 역률 제어기의 단점을 보완할 수 있는 방안으로 제시할 수 있다.

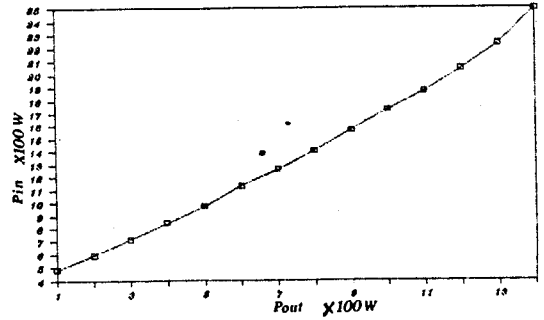


그림7 부하전력에 대한 이론식 입력전력

## 參考 文獻

1. P.C KRAUSE AND C.H.THOMAS, "Simulation of Symmetrical Induction Machinery", IEEE TRANS.PAS-84, No11 1965.
2. TIMOTHY M.ROWAN AND THOMAS A.LIPO, "A Quantitative Analysis of Induction Motor Performance Improvement by SCR Voltage Control", IEEE TRANS. IND. APP. VOL. LA-19. No4 1983.
3. T. A. LIPO, "The analysis of induction motor voltage control by symmetrically triggered Thyristers", IEEE Trans. PowerApp. Syst., Vol. PAS-90, PP. 515-525, Mar./Apr. 1971.
4. Improved power Factor Controller, NASA Tech. Briets MFS-25323, Summer 1980.