

유도전동기 효율개선을 위한 교류전압제어기의 디지털제어

권 동 빈 · 이 승 철 · 정 승 기
광운대학교

The Digital Control of AC Voltage Controller for
Efficiency Improvement of Induction Motor

Dong-Bin Kwon · Seung-Chul Lee · Seung-Gi Jeong
Kwangwoon University

ABSTRACT

A method which improves the efficiency of induction motor by controlling the input voltage by the three phase AC voltage controller is studied at the sides of theory and practice. At first, the principle of decreasing the input power and improving the efficiency by adjusting the amplitude of the input voltage according to the load rate is shown. Secondly, the mathematical model of the three phase AC voltage controller-induction motor system is derived to translate the dynamic characteristics. The validity of the dynamic model is verified by simulation. The new driving method is also proposed, which regulates the rated speed's driving by the speed estimation from the firing angle and the magnitude reverse induced-voltage information. As a result, the digital control system is constructed. Experimental results show desirable characteristics of proposed system.

1. 서 론

유도전동기의 효율개선을 위한 방안으로는 유도전동기 자체의 구조를 개선하는 방법과 운전방식의 개선을 통한 방안으로 나눌수 있다. 이 중 운전방식의 개선을 통한 효율향상은 직용용도와 부하패턴에 맞는 적절한 전압, 회전수(극수), 마력수의 선정등이 포함되며 전력반도체소자를 이용한 적절한 구동장치의 적용이 그 대상이 된다. 본 논문에서는 운전방식을 통해 유도전동기의 효율을 향상시키는 방식으로 SCR로 구성되는 교류전압제어기(AC voltage controller)를 사용하여 위상제어를 통한 인가전압제어방식을 적용하였다. 인가전압 제어에 의한 유도전동기의 효율개선 효과는 정현파교류 인가의 경우 이미 입증된 바 있다^[1]. 그러나 정현파를 유지하는 전압제어방식은 현실적으로 불가능하며 교류전압제어기에 의한 위상제어를 통해 이루어져야 한다. 이러한 제어기의 필요에 따라 F. J. Nola는 일정역률제어 방식을 실용화 시켰다^[2, 3]. 그리고 Lipo 등은 위상제어의 경우에 있어서도 충분히 효율개선의 효과를 거둘수 있음을 밝혔으며 이와 함께 기존의 역률을 제어하는 방식에 문제가 있음을 지적하였다^[4]. 즉 일정역률제어방식은 이론적으로 가능한 효율개선처에 훨씬 미치지 못하는 효과만을 지니고 있다는 것이다. 이렇게 개선효과가 떨어지는 가장 주된 이유는 제어기가 최대효율에 해당하는 최적전압을 정확하게 추종해내지 못하는 데에 있다.

따라서 본 연구에서는 주어진 전동기에서 부하조건의 변화와 무관하게 최대효율 운전을 행할 수 있는 제어방안으로 교류전압제어기를 이용한 정격속도 제어방식을 제안한다. 이의 실증을 위해서 교류전압제어기가 적용되었을 때 유도전동기가 갖는 효율특성을 실험을 통해 규명하고 이론적인 측면에서의 고찰을 행하도록 한다. 또 제안된 제어방식이 갖는 동특성을 검증하기 위해 과도특성 모델을 도출하고 시뮬레이션을 행한다. 마지막으로 점도차과 역기전압의 크기로 속도를 추정하여 정격속도 운전을 구현하는 디지털 제어시스템을 구성하여 제안한 제어방식의 타당성을 입증하였다.

2. 일차전압제어와 유도전동기의 효율특성

2-1. 수치해석을 통한 일차전압제어시 유도전동기의 효율특성

유도전동기의 입력전압변화시 특성을 살펴보기위해 그림 1의 등가회로를 사용한 수치해석을 통하여 인가전압을 가변하여 토오크의 변화를 살펴보면 그림 2(a)와 같이 전압의 감소에 따라 토오크도 비례하여 감소함을 알 수 있다. 그러나 역률과 효율 곡선은 그림 2(b)와 같이 인가전압의 변화에도 불구하고 일정한 특성을 나타낸다. 이는 결국 최적효율상대인 정격속도를 유지하면 최적효율운전이 가능하다는 결론을 얻게 된다.

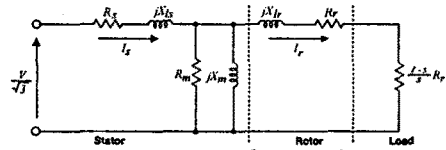


그림 1. 유도전동기의 상단 등가회로

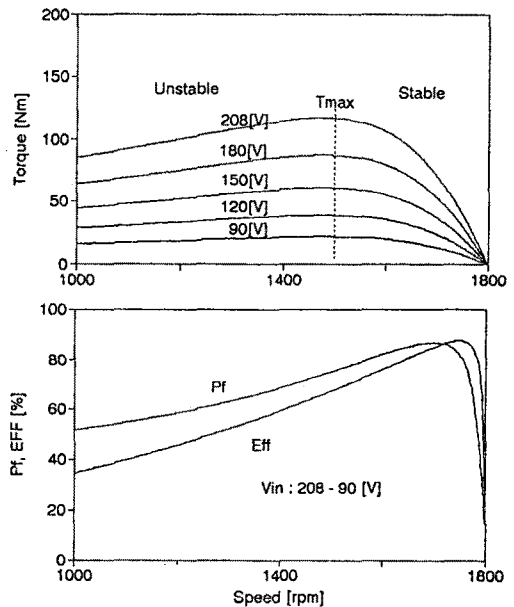


그림 2. (a) 입력전압의 변화에 따른 유도전동기의 토오크변화
(b) 입력전압이 변화에 따른 유도전동기의 역률, 효율변화

2-2. 일차전압제어에 의한 효율개선의 원리

그림 3(a)의 그림은 유도전동기의 토오크 특성을 나타낸다. 전동기에 정격전압이 인가된 상태에서 부하토포크 T_L 이 T_0 로 일정한 값을 갖고 있다고 하면 이때의 운전점은 A가 된다. 부하토포크가 T_0 에서 T_1 으로 감소하면 동작점은 B지점으로 이동한다. 전동기의 속도를 A점에서의 원래 속도로 감소시키기 위해서는 부하토포크가 감소한 비례만큼 전동기의 토오크를 감소시켜야 한다. 이렇게 하였을 때 C점이 새로운 동작점이 된다. 이 과정에서의 전동기의 입력전력은 그림 3(b)에 나타난것과 같이 처음의 입력 P_A 가 부하의 감소에 따라 P_B 로, 그리고 전압의 감소에 따라 다시 P_C 로 변화한다. 따라서 감소된 부하상태에서 전압이 변화하기 전의 입력 P_B 와 전압을 변화시킨 다음의 입력 P_C 간의 차이만큼 입력이 절약되게 된다. 이러한 차이가 생기는 이유는 전동기의 토오크가 슬림에 거의 비례하는 반면 입력력은 철손에 해당하는 만큼 일정량의 덩이 존재하기 때문이다.

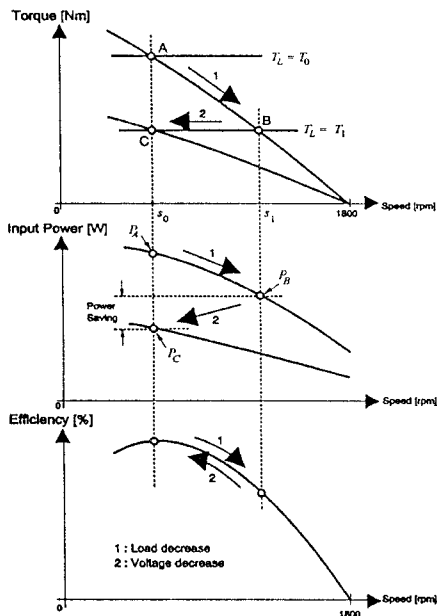


그림 3. 일차전압제어에 의한 효율개선의 원리
 (a) 일차전압제어에 의한 토오크의 변화
 (b) 일차전압제어에 의한 입력전력의 변화
 (c) 일차전압제어에 의한 효율의 변화

3. 일차전압제어의 실험 및 실험결과

일차전압 제어를 통한 유도전동기 전력절감을 실험적으로 확인하기 위하여 그림 4의 시스템을 구성, 실험을 행하였다. 대상 전동기는 10 hp의 전동기를 사용하였고 유도전동기에 연결된 분권리류전동기를 통해 저항부하를 사용하여 부하를 인가하였다. 유도전동기의 입력전압을 가변시키기 위해 3상 단권변압기를 사용하였고 변압기와 전동기 사이에서 입력 전압, 전류, 전력을 측정하였다.

그림 5 - 8에 유도전동기의 속도와 입력전압의 변화에 따른 제반 특성의 실험결과를 나타내었다.

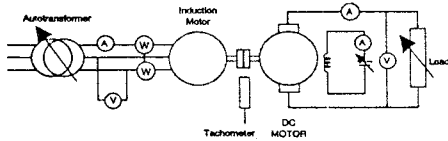


그림 4. 실험장치의 구성도

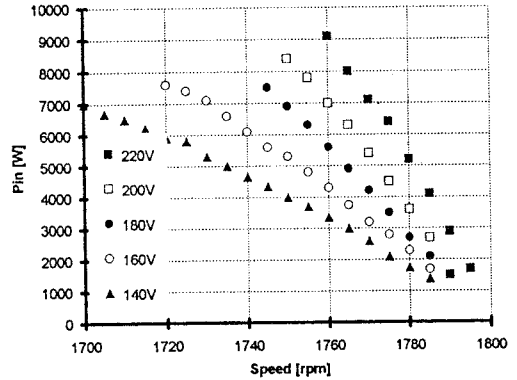


그림 5. 입력전압변화에 따른 입력전력 특성

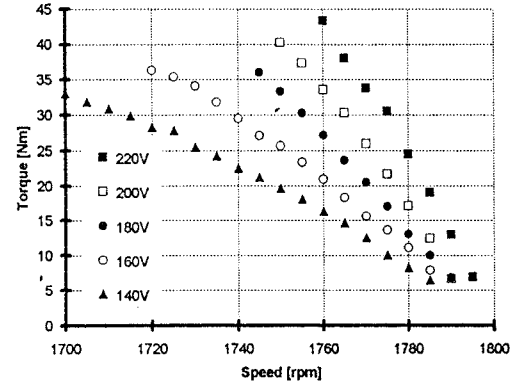


그림 6. 입력전압변화에 따른 토오크 특성

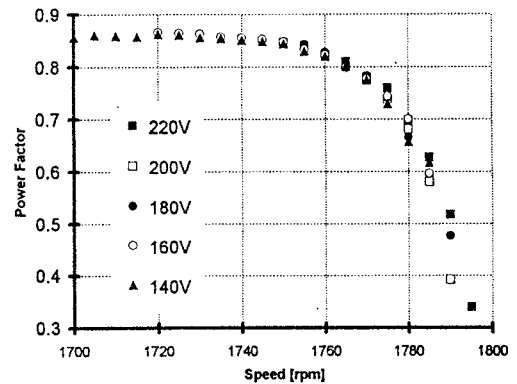


그림 7. 입력전압변화에 따른 역률 특성

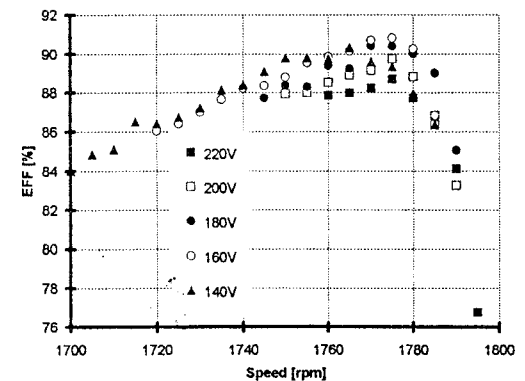


그림 8. 입력전압변화에 따른 효율 특성

4. 모형화 및 시뮬레이션

본 장에서는 유도전동기에 교류전압 제어형 교류전압제어기가 적용되었을 경우 그 특성을 시뮬레이션하기 위한 모델을 유도하고 이를 사용, 시뮬레이션을 수행한 결과를 제시하였다. 그림 9은 교류전압 제어기를 통해 전원에 접속된 농형 유도전동기 회로를 표현하고 있다.

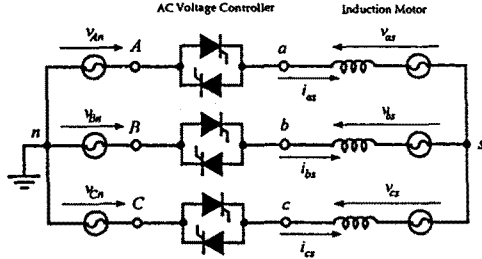


그림 9. 교류전압제어기-유도전동기 시스템의 구조

4-1. 유도전동기 모델

교류전압 제어기의 스위칭 상태에 따른 모델의 변경을 용이하게 하기 위해 유도전동기의 고정자 측에 고정된 고정좌표계 dq 변환을 적용하였다. 고정 좌표계에서 농형 유도전동기의 일반적인 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{\phi r} \\ v_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & L_m p \\ L_m p & -\omega_r L_m & R_r + L_r p & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & L_m p & \omega_r L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\phi r} \\ i_{ds} \\ i_{\phi s} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 p는 미분연산자를 나타내며 L_m 은 자화인덕턴스, L_s 와 L_r 은 각각 고정자와 회전자 자기인덕턴스, 그리고 ω_r 은 회전자 각속도이다.

4-2. 교류전압 제어기의 동작모드

3상 교류전압 제어기 각 상의 역병렬 SCR은 주어진 점호신호의 상태에 따라 해당 상의 전원을 전동기에 접속하거나 끊거나 하는 역할을 한다. 따라서 각 상의 접속상태에 따라 다음과 같이 5개의 모드로 구분된다.

모드 0 : a상 b상 c상 전부 도통하는 상태

모드 1 : a상 불통, b상 c상 도통하는 상태

모드 2 : b상 불통, c상 a상 도통하는 상태

모드 3 : c상 불통, a상 b상 도통하는 상태

모드 4 : a상 b상 c상 전부 불통하는 상태

4-3. 교류전압제어기와 결합된 유도전동기의 모델

가. 3상 모두 도통시 (모드 0)

$$\begin{bmatrix} v_{\phi r} \\ v_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & L_m p \\ L_m p & -\omega_r L_m & R_r + L_r p & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & L_m p & \omega_r L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\phi r} \\ i_{ds} \\ i_{\phi s} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

나. b, c 상이 도통할 경우의 전압방정식(모드 1)

$$\begin{bmatrix} v_{bc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{2}R_s - \sqrt{2}L_s p & 0 & -\sqrt{2}L_m p \\ -\omega_r L_m & R_r + L_r p & -\omega_r L_r \\ L_m p & -\omega_r L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{\phi r} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

다. c, a 상이 도통할 경우의 전압방정식(모드 2)

$$\begin{bmatrix} v_{ca} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\sqrt{2}R_s + 2\sqrt{2}L_s p & -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}L_m p & \frac{1}{\sqrt{2}}L_m p \\ -\omega_r L_m - \sqrt{3}L_m p & R_r + L_r p & -\omega_r L_r \\ -\sqrt{3}\omega_r L_m + L_m p & \omega_r L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{\phi r} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

라. a, b 상이 도통할 경우의 전압방정식 (모드 3)

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\sqrt{2}R_s + 2\sqrt{2}L_s p & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}L_m p & \frac{1}{\sqrt{2}}L_m p \\ -\omega_r L_m + \sqrt{3}L_m p & R_r + L_r p & -\omega_r L_r \\ \sqrt{3}\omega_r L_m + L_m p & \omega_r L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{\phi r} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

마. a, b, c 상이 모두 도통하지 않을 경우의 전압방정식 (모드 4)

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r + L_r p & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\phi r} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

바. 중성점 및 스위칭전압

그림 9으로부터 전원전압과 전동기의 상전압간의 관계가

$$v_{\phi a} = v_{An} - v_{sn} + v_{aA} \quad (7)$$

$$v_{\phi b} = v_{Bn} - v_{sn} + v_{bB} \quad (8)$$

$$v_{\phi c} = v_{Cn} - v_{sn} + v_{cC} \quad (9)$$

로 표현되므로 이 세 식을 합산하면 $v_{\phi a} + v_{\phi b} + v_{\phi c} = 0$ 의 조건으로부터

$$v_{sn} = \frac{1}{3} (v_{aA} + v_{bB} + v_{cC}) \quad (10)$$

와 같이 중성점간 전위차를 표현할 수 있다. 평형상태에서 모드 0에서는 이 값이 0이되며 모드 4에서는 전원과 전동기가 완전히 분리되어 있으므로 전위차를 정의 할 수 없다. 반면 모드 1-3에서는 3개의 스위칭 중 2개는 도통하므로 중성점간 및 스위칭 양단에 어떤 전압이 나타나게 된다. 예컨대 모드 1에서는 $v_{bB} = v_{cC} = 0$ 이므로

$$v_{sn} = \frac{1}{3} v_{aA} \quad (11)$$

즉 중성점 간에는 도통하지 않는 스위칭 양단전압의 3분의 1에 해당하는 전압이 나타난다. 이때 스위칭 양단전압은 다음과 같이 전원과 전동기의 선간전압의 차이 만큼에 해당하게 된다.

$$v_{aA} = v_{ab} - v_{AB} \quad (12)$$

4-4. 시뮬레이션 및 실험파형

그림 10-15에 시뮬레이션 결과 및 실험파형을 나타내었다. 시뮬레이션 상에서는 SCR의 전압강하와 스너버 회로의 영향 등이 고려되어 있지 않으므로 실제의 실험과 약간의 오차가 나타나지만 전체적인 파형이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 4-3절에서 밝혀진 바와같이 역기전압과 소자양단전압은 서로 비례관계의 수식이 성립한다. 여기서 정격속도를 유지하는 점호각과 소자양단전압의 관계를 살펴보면 그림 16과 같다. 결국 정격속도로 운전하기 위해서는 역기전력에 해당하는 점호각을 발생시키면 된다. 여기서 역기전력의 검출은 소자양단전압을 검출하여 쉽게 일어낼 수 있다.

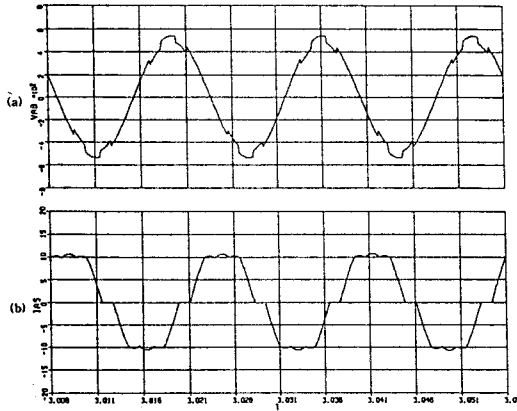


그림 10. 점화각 = 95° 의 시뮬레이션 결과
 (a) 선간전압 (200V/div)
 (b) 상전류 (5A/div)

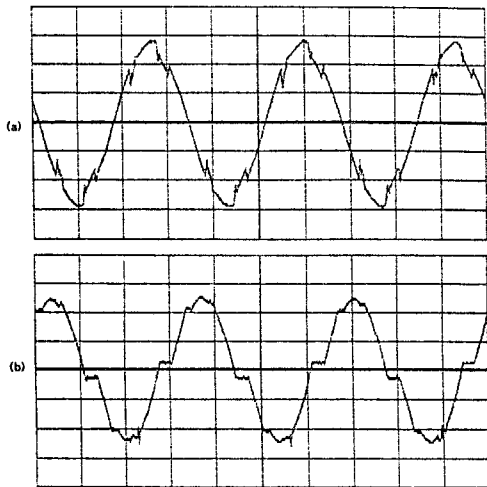


그림 11. 점화각 = 95° 의 실험파형
 (a) 선간전압 (200V/div)
 (b) 상전류 (5A/div)

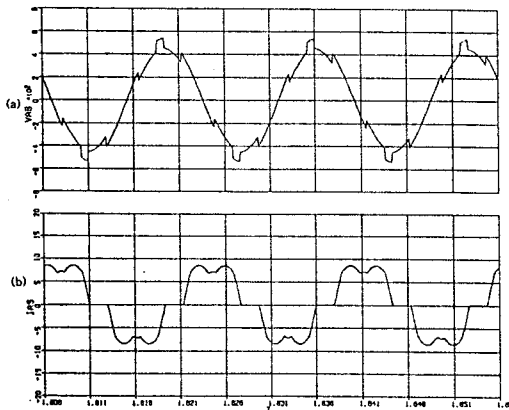


그림 12. 점화각 = 100° 의 시뮬레이션 결과
 (a) 선간전압 (200V/div)
 (b) 상전류 (5A/div)

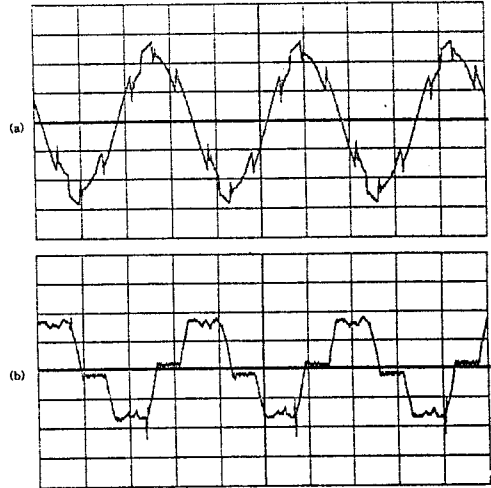


그림 13. 점화각 = 100° 의 실험파형
 (a) 선간전압 (200V/div)
 (b) 상전류 (5A/div)

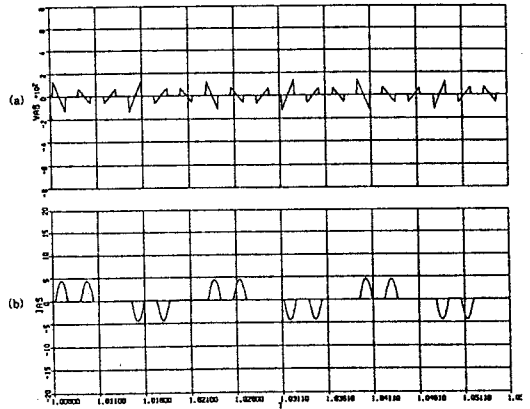


그림 14. 점화각 = 135° 의 시뮬레이션 결과
 (a) 선간전압 (200V/div)
 (b) 상전류 (5A/div)

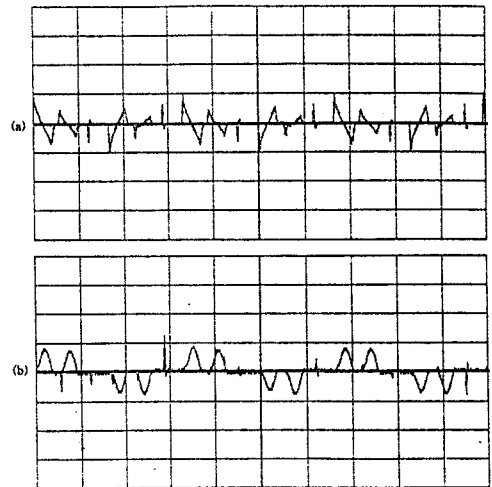


그림 15. 점화각 = 135° 의 실험파형
 (a) 선간전압 (200V/div)
 (b) 상전류 (5A/div)

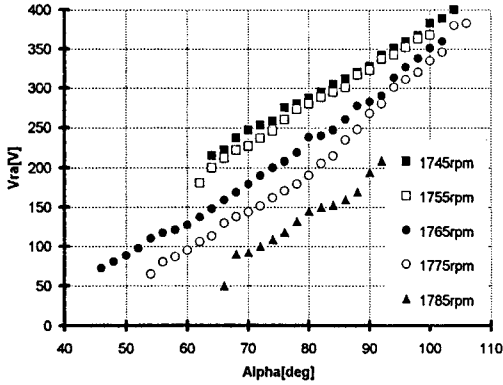


그림 16. 점화각과 소자양단전압 사이의 관계

5. 시스템 구성 및 실험

5-1. 시스템 구성

교류전압제어기에 의한 유도전동기 효율특성 개선을 실험적으로 확인하기 위하여 그림 17과 같은 실험장치를 구성하였다. 전체 시스템은 크게 전력회로부와 신호처리부, 그리고 마이크로프로세서 제어부로 구성된다.

또한, 정격속도를 유지하기 위한 역기전압제어의 제어 알고리즘을 그림 18에 보였다.

먼저 기동시는 램프형태로 점화각을 발생시켜 속도를 상승시키고 속도가 정격에 가까워진후는 정격속도 운전모드로 전환된다. 현재의 점화각을 검출하고 이에 해당하는 기준 역기전압과 실제의 역기전압의 오차를 PI제어기를 통과시키면 역기전압이 같아지는 방향으로 점화각이 이동된다. 따라서 그림 16의 정격속도시 역기전압의 선상을 움직이며 운전되므로 정격속도 즉 최대효율운전을 가능하게 하는 운전방식을 이룰 수 있다.

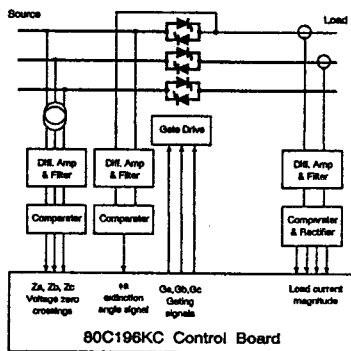


그림 17. 교류전압제어기-유도전동기 제어 시스템의 구성

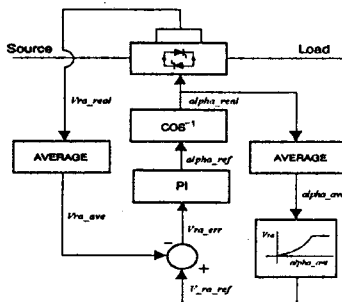


그림 18. 정격속도 제어 알고리즘

5-2. 실험결과

실험을 통하여 부하변동시에도 유도전동기의 회전속도를 정격속도로 유지할 수 있었다. 이것은 3장의 실험결과에서 알 수 있듯이 유도전동기가 최적효율상태로 운전되고 있음을 의미하며 실제로 그로인한 입력전압감소효과를 얻을 수 있었다. 그림 19은 정격부하에서 50% 정도의 경부하로 전환되었을 때의 입력전력 및 전압, 전류의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 정격부하에서 50% 정도의 경부하로 전환되었을 때 유도전동기는 정격속도보다 높은 속도로 운전되게 된다. 따라서 정격속도이상으로 운전되는 유도전동기는 최대효율점에서 벗어날 수 밖에 없다. 이때 정격속도제어를 실행하여 유도전동기의 속도를 정격속도로 낮추어 최적효율운전을 이룸으로써 50% 부하시 입력전력의 약 10% 정도를 절감 할 수 있었다.

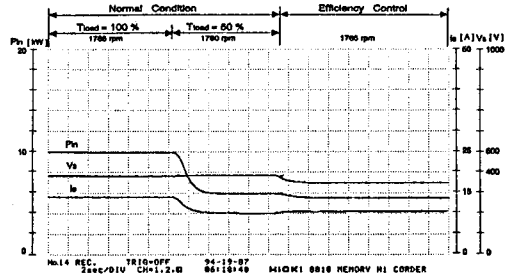


그림 19. 정격속도제어에 의한 입력전력, 전압, 전류의 응답

6. 결론

본 연구에서는 유도전동기의 인가전압 제어를 통해 효율을 향상시키는 방안을 이론적인 측면과 실제 구현의 측면에서 다루었다. 유도전동기가 정격속도로 회전할때 최대 효율을 유지한다는 이론을 실험을 통해 입증하였고, 교류전압제어기의 특성으로 나타나는 점화각과 역기전압의 크기로 속도를 추정하여 정격속도 운전을 구현하는 새로운 운전방안을 제시하였다.

이러한 방안을 실제적으로 확인하기 위해 80C196KC 마이크로 콘트롤러를 사용한 디지털 제어시스템을 구성하였고 실험을 통해 입력전력을 절감할 수 있음을 확인하였다.

이상의 연구를 통해 가변속제어를 필요로 하지 않는 일반적인 범용 유도전동기의 응용분야에 일차전압 제어의 사용, 상당량의 에너지 절감효과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

실험용 유도전동기의 사양

1. 명판기재사항

출력	7.5 kW, 10 HP	주파수	60 Hz
전압 및 전류	220 V / 27.2 A	회전자 구조	A
	380 V / 15.7 A		
극수	4	기동계급	H
회전수	1765 rpm	절연계급	B

2. 측정상수

$R_s = 0.127 \Omega$	$R_r = 0.110 \Omega$
$L_{ls} = 1.0637 \text{ mH}$	$L_{lr} = 1.0637 \text{ mH}$
$L_m = 26.7905 \text{ mH}$	$R_m = 515 \Omega$

참고문헌

- [1] N. Mohan, "Evaluation and Comparison of state of Art Techniques for Energy Conversion by Reduced Losses in AC Motors", EPRI Report, EM-2037, Sept 1981.
- [2] F. J. Nola, "Power Factor Control System for AC Induction Motor", U.S. Patent 4 052 648, Oct 4, 1977.
- [3] Save Power in AC Induction Motors, NASA Tech. Brief MFS-23280, Summer 1977.
- [4] T. W. Jain, N. L. Schmitz and D. W. Novotny, "Characteristic Induction Motor Slip Values for Variable Voltage Part Load Performance Optimization", IEEE Power Engineering Soc. Winter Meeting, Jan 31-Feb 3, 1982, Paper 82 WM 229-3.