

위상각 전압제어기에 의한 단상유도전동기 기동특성 개선

Improvement of Starting Characteristics of Single Phase Induction Motor by Phase Angle Voltage Controller

林亮壽, 白亨來
(Yang-Su Lim, Hyung-Lae Baek)

Abstract - The common drive method of the single phase induction motor(SPIM) is to install a start capacitor and a centrifugal switch in series with the auxiliary winding. In this paper, the phase angle voltage sequence controller is proposed to eliminate a start capacitor and a centrifugal switch of SPIM.

In comparison with the capacitor start system of SPIM, the proposed control system shows that it contributes to saving the starting current about 57% and to improving of the starting efficiency of SPIM. The proposed starting characteristics of the SPIM is obtained with this strategy through simulation and experimental results.

I. 서론

산업사회의 급속한 발달과 함께 전기에너지의 수요는 지속적으로 증가되고 있음에 따라 에너지 절약과 공산품의 생산비를 낮추기 위해 고성능, 고효율의 전력기기 개발이 요구되고 있다. 최근 단상유도전동기 업계에서도 기존전동기보다 효율이 뛰어나고 신뢰성, 소형화, 저 소음 등의 개발을 기대하고 있다.[1],[2],[3]

단상유도전동기는 다른 전동기에 비교하여 구조가 간단하고 견고하며 단상전원을 얻기 쉽다는 이점이 있기 때문에 가정용, 산업용으로 전기기기 등의 구동력으로 널리 쓰이고 있다. 그러나 3상 유도전동기와 달리 단상유도전동기 자체로는 회전자속을 발생시킬 수 없으므로 기동토크를 발생시키는 외부 기동장치를 필요로 하며, 가장 많이 사용되는 외부 기동장치인 기동용 콘덴서와 기동용 스위치는 열악한 환경에는 사용이 불가능하며 기능 저하시에는 전동기 수명을 단축 및 소손시키는 문제점들이 있다. 이러한 점을 보완하기 위한 가변 주파수 제어방법과 가변 콘덴서 제어방법 등은 기동전류 파형이 비정현적이며 정·역전 절환시 외부 기동스위치를 필요로 한다.[4],[5],[6] 따라서 본 연구에서는 단상유도전동기의 보조권선에 가해지는 전압과 위상차에 의하여 기동전류와 기동시간이 결정되므로 보조권선 위상제어와 전압제어를 순서적으로 행함에 따라 단상유도전동기의 기동전류를 최소화하여 효율을 개선하였고 소프트 기동이 가능하며 아크가 많은 기계적 스위치 대신에 회전부분이 없는 정지형 기동장치를 제안하였다. 또한 본 기동장치 동작특성을 고찰하기 위하여 전동기의 토크와 속도특성, 주권선과 보조권선의 전압, 전류 특성을 시뮬레이션 및 실험을 통해 비교 분석하였다.

II. 단상유도전동기 수학적 모델

농형 단상유도전동기의 d-q 모델을 통하여 고찰하면 다음과 같다.[7] 농형 단상유도전동기는 기동시 한 상으로만 기동토크를 만들 수 없으므로 기동 토크를 만들기 위해서는 단상권선 외에 기동권선을 가지고 있어야 한다. 단상유도전동기는 주권선과 자기적으로 보통 전기각으로 90° 떨어져 있는 위치에 보조권선이 주권선과 병렬로 접속되어 있다.

단상유도전동기는 기동시 2상 운전으로 해석될 수 있다.[8],[9] 그림 1은 콘덴서 기동 단상유도전동기의 회로도이며 주권선의 전류를 i_{qs}^s , 보조권선의 전류를 i_{ds}^s 라 하면 T형 등가 회로도는 그림 2의 (a), (b)와 같이 나타 낼 수 있다.

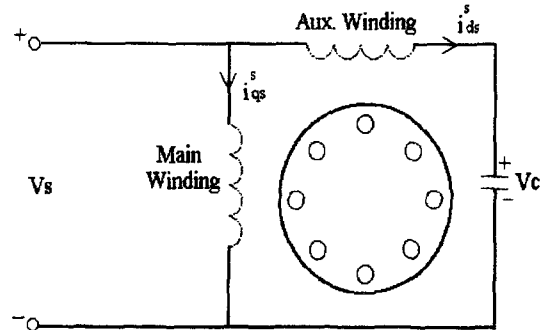


그림 1. 단상유도전동기 회로
Fig. 1. Circuit of single phase induction motor

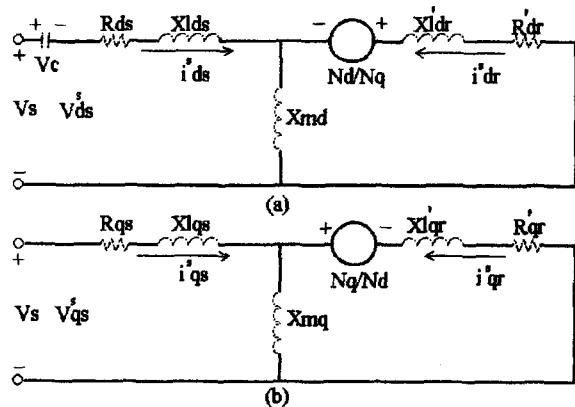


그림 2. T형 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of T type

주권선 전압은 다음 식과 같이 나타내며

$$V_{as}^s = V_s \tag{2-1}$$

보조권선전압은 다음 식과 같이 나타낸다.

$$V_{ds}^s = V_s - \frac{1}{c} \int i_{ds}^s dt \tag{2-2}$$

위의 T 형 등가회로도의 전류의 방향을 화살표 방향으로 하여 전압방정식을 세우면

$$\begin{aligned} V_{as}^s &= (R_{as} + \frac{p}{\omega_b} X_{as}) \cdot i_{as}^s + (\frac{p}{\omega_b} X_{mq}) \cdot i_{gr}^s \\ V_{ds}^s &= (R_{ds} + \frac{p}{\omega_b} X_{ds}) \cdot i_{ds}^s + (\frac{p}{\omega_b} X_{md}) \cdot i_{dr}^s \\ 0 &= (\frac{p}{\omega_b} X_{mq}) \cdot i_{as}^s - (\frac{N_q}{N_d} \cdot \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{md}) \cdot i_{ds}^s \\ &+ (\frac{R_{qr} + p}{\omega_b} X'_{qr}) \cdot i_{qr}^s - (\frac{N_q}{N_d} \cdot \frac{\omega_r}{\omega_b} X'_{dr}) \cdot i_{dr}^s \\ 0 &= (\frac{N_d}{N_q} \cdot \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{mq}) \cdot i_{as}^s + (\frac{p}{\omega_b} X_{md}) \cdot i_{ds}^s \\ &+ (\frac{N_d}{N_q} \cdot \frac{\omega_r}{\omega_b} X'_{qr}) \cdot i_{qr}^s + (R_{dr} + \frac{p}{\omega_b} X'_{dr}) \cdot i_{dr}^s \end{aligned} \tag{2-3}$$

과 같이 되고, q축의 파라미터 정의는 다음과 같다.

- R_{as} : 주권선 1차측 저항
- R'_{qr} : 주권선 2차측 (회전자) 저항을 1차측으로 환산한 저항
- X_{ks} : 주권선 1차측 누설리액턴스
- X_{mq} : 주권선 자화리액턴스
- $= (\frac{N_q}{N_r}) \cdot X_{mr}$

X'_{lr} : 주권선 2차측 누설리액턴스를 1차측으로 환산한 리액턴스

$X_{as} = X_{ks} + X_{mq}$: 주권선 1차측 자기리액턴스

$X'_{qr} = X'_{lr} + X_{mq}$: 주권선 2차측 자기리액턴스를 1차측으로 환산한 리액턴스

N_q : 주권선 1차측 권선비

N_r : 2차측 (회전자) 권선에 대한 유효 권수비

X_{mr} : 주권선 1차측 2차측 상호리액턴스

d축의 파라미터 정의는 다음과 같다.

R_{ds} : 보조권선 1차측 저항

R'_{dr} : 보조권선 2차측 저항을 1차측으로 환산한 저항

X_{ds} : 보조권선 1차측 누설리액턴스

X_{md} : 보조권선 자화리액턴스

$$= (\frac{N_d}{N_r}) \cdot X_{ar}$$

X'_{lr} : 보조권선 2차측 누설리액턴스를 1차측으로 환산한 리액턴스

$X_{ds} = X_{ks} + X_{md}$: 보조권선 1차측 자기리액턴스

$X'_{dr} = X'_{lr} + X_{md}$: 보조권선 2차측 자기리액턴스를 1차측으로 환산한 리액턴스

N_d : 보조권선의 권선비

X_{ar} : 보조권선과 회전자 권선과의 상호리액턴스

그 외의 파라미터는

V_s : 전원 전압

p : 미분 연산자

i_{as}^s : 주권선 전류

i'_{qr} : 주권선 전류로 환산한 회전자측 전류

i_{ds}^s : 보조권선 전류

i'_{ds} : 보조권선 전류로 환산한 회전자측 전류

ω_b : 동기 각속도, ω_r : 회전자 각속도

과 같이 되고, 각각의 전류는 다음식으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{ds}^s &= (\lambda_{ds} - \lambda_{dm}) / L_{lds} \\ i_{as}^s &= (\lambda_{qs} - \lambda_{qm}) / L_{lqs} \\ i_{dr}^s &= (\lambda_{dr} - \lambda_{dm}) / L_{ldr} \\ i'_{dr} &= (\lambda_{qr} - \lambda_{qm}) / L_{lqr} \end{aligned} \tag{2-4}$$

여기서 λ_{qm} 과 λ_{dm} 은 전동기의 공극자속으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \lambda_{qm} &= \lambda_{qs} - L_{lqs} \cdot i_{as}^s \\ \lambda_{dm} &= \lambda_{ds} - L_{lds} \cdot i_{ds}^s \end{aligned} \tag{2-5}$$

위 전류의 값에 의해서 토오크의 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{P}{2} \frac{N_d}{N_q} \frac{X_{mq}}{\omega_b} (i_{as}^s \cdot i'_{dr} - i_{ds}^s \cdot i'_{qr}) \tag{2-6}$$

P : 전동기의 극수 (pole)

III. 시스템 구성

그림 3은 본 연구에서 제시한 개선된 기동장치의 전체 시스템 구성 블록도 이다.

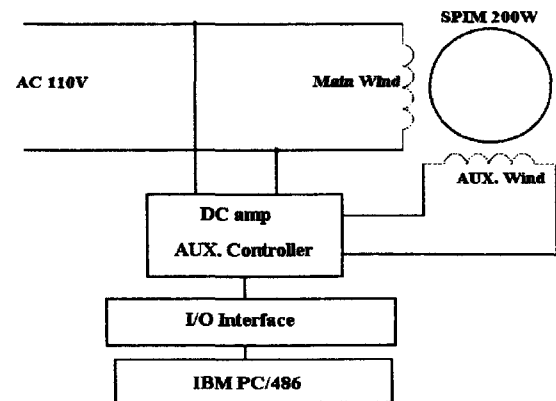


그림 3. 전체 시스템 구성 블록도

Fig. 3. The configuration block diagram of whole system

주권선과 보조권선에는 동기된 위상차를 갖는 전원을 인가하므로 위상제어 신호는 위상각 제어기에 의해 발생하며 출력전압은 진폭제어기로 진폭을 가변하여 전압제어가 가능하도록 구성하였다.[10]

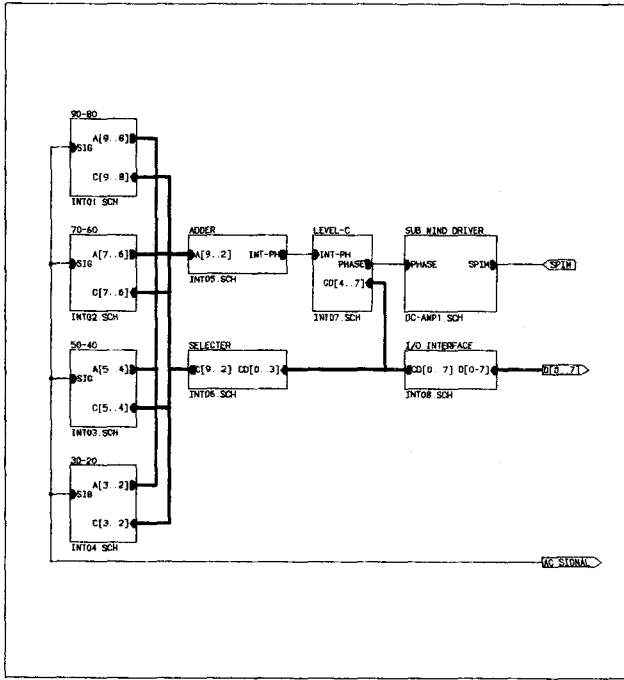


그림 4. 각부 회로의 블럭도
Fig. 4. Block diagram of phase angle voltage controller

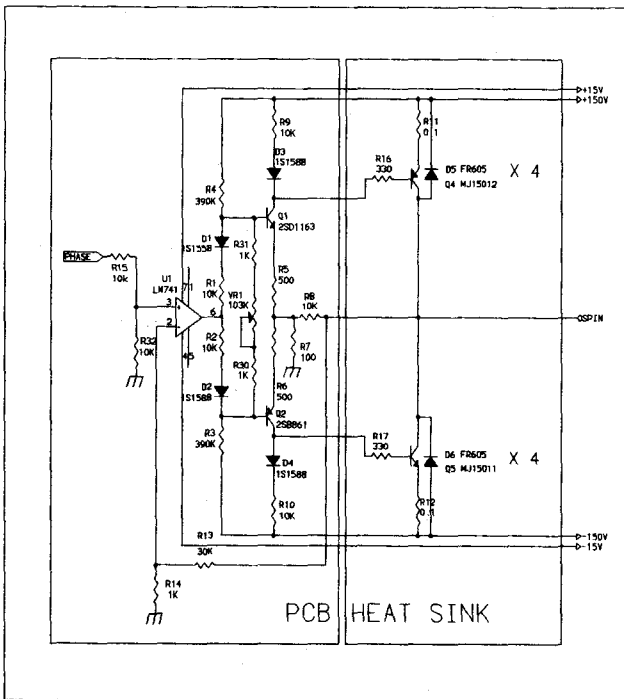


그림 5. 보조권선 구동회로
Fig. 5. Auxiliary winding drive circuit

보조권선에 인가할 최종신호는 DC증폭기로 전압전류를 증폭하여 보조권선의 구동전원으로 사용하며, 시스템제어는 IBM PC와 I/O 인터페이스로 구성하였다.

이를 구현하기 위한 회로의 블럭도는 그림 4와 같다. 컴퓨터로부터 출력된 제어신호는(INT08) 적분기에 의해 위상각 범위를 20° ~ 90° 까지 8단계로 설계하여 이 중 한개의 신호를 보조권선의 위상각으로 선택(INT05, INT06)하고 입력을 8개로한 가산기를 사용하여 얻은 하나의 출력은 MC1458의 듀얼 연산증폭기를 사용하였으며 위상각 신호는 배율적으로 조정하여 다시 증폭함으로써 전원전압을 1~15 단계로 나누어 전압제어가 가능하도록 Level-C로 진폭을 조절(INT07)하였다. 또한 그림 5는 보조권선 구동회로 연산증폭기의 내압이 낮고 출력전압도 ±15V이므로 진폭이 부족하기 때문에 후단에 다량론 회로를 채용하여 보조권선을 구동(DC-AMP 1)한다.

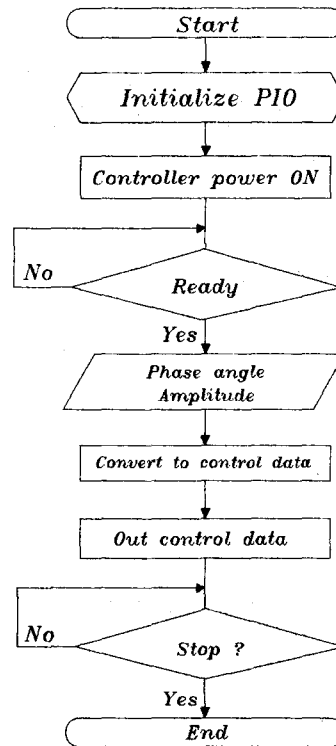


그림 6. 시스템 흐름도
Fig. 6. Flow chart of control system

기동특성 실험을 위한 신호발생과 제어 알고리즘에 대한 시스템 흐름도는 그림 6과 같다.

IV. 시뮬레이션

단상유도전동기의 기동시 특성을 검토하기 위해서 IBM-PC/ 486 Computer를 이용하여 시뮬레이션을 행하였고 Computer에 사용된 언어는 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)을 사용하였다. 프로그램에 사용된 전동기는 단상유도전동기 4극 1/2[HP], 110[V], 60[Hz], 210W의 전동기로 기동시는 주권선과 보조권선의 불균형 회전자계를 이용하여 기동하고 동기속도의 75%에서 보조권선을 개방하여 운전시에는 단상권선으로 운전된다.

기동시 불균형 회전자계를 만들기 위해서는 상용전원에 병렬로 연결되어 있는 주권선과 보조권선의 전압에 위상차를 만들어 주어야 한다.

콘덴서 기동형에서는 보조권선에 기동 콘덴서를 삽입하여 보조권선과 주권선의 위상차를 발생시키고 회전자계를 형성하여 기동토크를 발생한다.

그림 7은 기동시 주권선과 보조권선의 위상차가 0°, 30°, 60°, 90° 일 때의 각각의 슬립에 따른 토크의 곡선을 나타내고 있다.

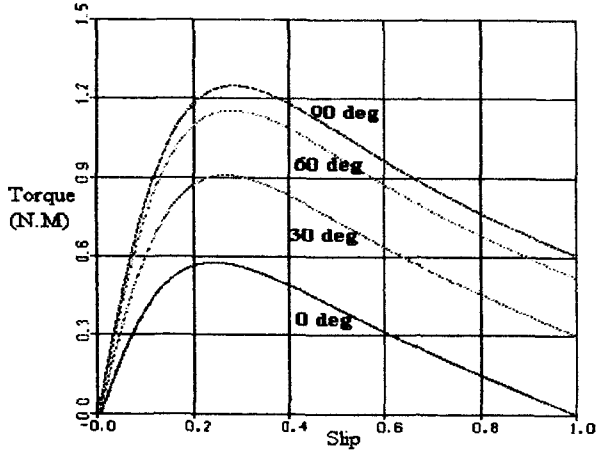


그림 7. 토크-슬립 특성
Fig. 7. Torque - Slip characteristics

그림 7에서와 같이 기동시 주권선과 보조권선의 위상차가 90° 일 때 가장 큰 기동토크를 발생하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 위상각 전압제어 유도전동기의 특성실험을 하기 위하여 유도전동기의 위상각 가변과 전압가변에 의한 시뮬레이션을 행하였다. 위상각 제어에서는 90°에서 전동기의 기동특성이 가장 우수하였고 전압제어에서는 보조권선의 전압이 상용전압 보다 낮은 단계에서 기동시간은 0.1초 정도 길어지나 기동시 전류의 피크치는 낮아지는 것을 알 수 있었다.

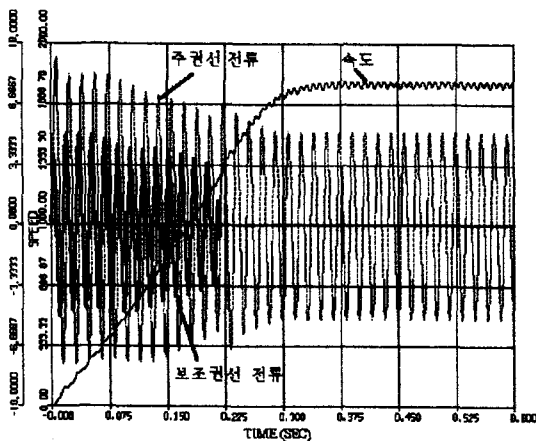


그림 8. 콘덴서 구동방식의 전류파형과 속도
Fig. 8. Current waveform and speed of condenser starting system

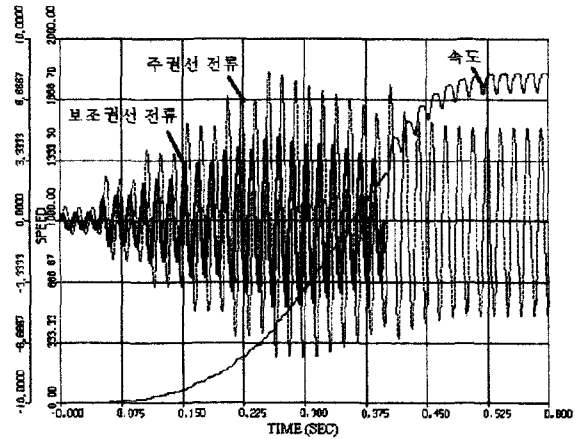


그림 9. 위상각 전압제어 방식의 전류파형과 속도(10V)
Fig. 9. Current waveform and speed of phase angle voltage control (10V)

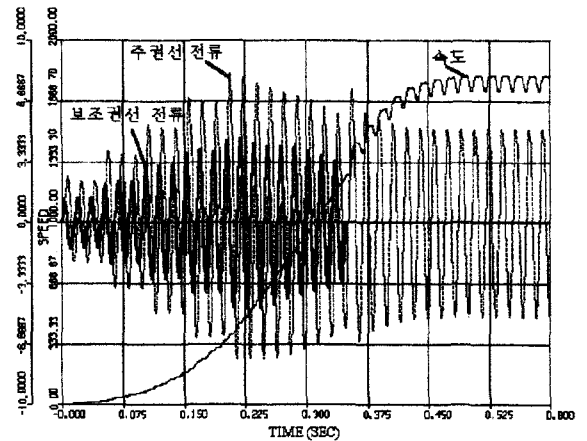


그림 10. 위상각 전압제어 방식의 전류파형과 속도(30V)
Fig. 10. Current waveform and speed of phase angle voltage control (30V)

이 결과를 토대로 주권선과 보조권선의 위상차를 90°에 고정하고 주권선과 보조권선의 전압을 상용전압 보다 낮게 하여 기동하고 순서적으로 높여 가며 전동기가 충분히 기동되었을 때 입력전압을 상용전원으로 전환하는 제어 알고리즘을 이용하여 기동시 기동시간을 최대한 단축하며 기동전류를 감소시킬 수 있는 위상각 전압제어 방식 기동에 대한 시뮬레이션을 행하였다. 그림 8은 콘덴서 기동형 단상유도전동기에 110V의 상용전원을 바로 인가하였을 때 각 권선의 전류곡선과 속도곡선이다. 그림 9는 10V에서 순차적으로 전압을 증가시켜 유도전동기에 인가 하였을 때의 주권선과 보조권선의 전류를 나타내었다. 그림 8과 비교하여 보면 전압 인가시 전류의 피크치는 감소하였으나 기동시간이 약간 늦어졌으며 전동기의 속도가 전압을 인가한 직후 즉시 기동되는 것이 아니고 0.07 sec 후에 속도가 증가하는 것을 알 수 있었다.

그림 10에서는 입력전압을 30V에서 순서적으로 정상전압

으로 가하였을 경우의 특성곡선으로 그림 9 와 비교할 경우 기동시간이 짧아지는 것을 알 수 있다.

V. 실험 결과

단상유도전동기의 토오크와 속도를 측정하기 위해 전기동력계를 사용하였으며 기존의 콘덴서 기동 단상유도전동기 실험과 전동기의 콘덴서를 제거한 상태에서 진폭제어기로 보조권선전압을 가변 공급하고 적분기로 두권선의 위상차를 가변하여 실험하였다. 그리고, 시스템의 제어는 C언어로 프로그래밍된 IBM PC를 사용하였다. 주 측정 장비로는 기동시와 정상운전시 주권선과 보조권선의 전압과 전류, 위상차 그리고, 기동시의 토오크와 속도를 측정하기 위해서 LeCroy 9504A DSO를 사용하였고, 전동기의 입력, 역률, 임피던스와 주권선과 보조권선의 전압과 전류값을 측정하기 위해 PM3000 Power Analyzer를 사용하였으며 전류 측정은 Hall CT를 이용하였다. 실험에 사용된 전동기 사양은 표 1과 같다.

표 1. 전동기 사양

Table 1. Configuration of single phase induction motor

정격출력	0.21KW	기동전류	24/12A
극 수	4P	기동토오크	0.38 Kgm
정격전압	110/220V	절연계급	5종
정격전류	6.4/3.2A	회 전 수	1710 rpm
주 파 수	60Hz	정동토오크	0.33 Kgm
효 율	45%	콘 덴 서	200 μF

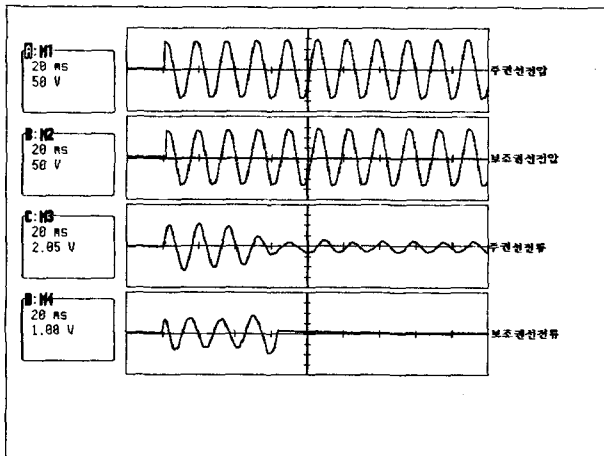


그림 11. 콘덴서 기동형 단상유도전동기의 전압과 전류파형
Fig. 11. Voltage and current waveform of condenser starting SPIM

그림 11은 콘덴서 기동형 단상유도전동기의 주권선 보조권선의 전압과 전류 파형으로 기존의 구동방식으로 기동한 경우로 주권선 전류는 19A, 보조권선 전류는 7A, 기동시간은 65.7ms로 나타났으며, 그림 12는 본 연구에서 제안한 위상각 전압제어 방식의 주권선, 보조권선의 전압과 전류 파형으로 주권선 전류는 11A, 보조권선 전류는 3.3A, 기동시간

은 154.5ms로 나타내었다. 보조권선의 전압파형이 순서적인 증가를 볼 수 있었고 주권선, 보조권선의 기동전류가 콘덴서 기동 방식의 기동시 보다 감소하였으나 기동시간은 0.09초 길어짐을 알 수 있다.

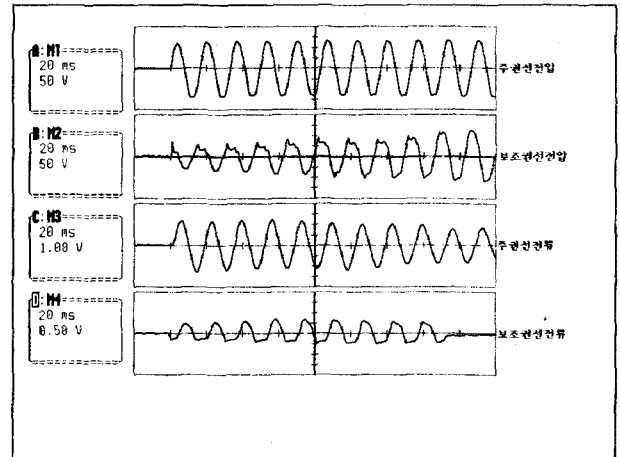


그림 12. 위상각 전압제어 방식 전압과 전류파형
Fig. 12. Voltage and current waveform of phase angle voltage control system

그림 13은 콘덴서 기동방식의 무부하, 50%부하, 정격부하에 따른 전동기의 속도와 토오크 특성 곡선을 나타낸다.

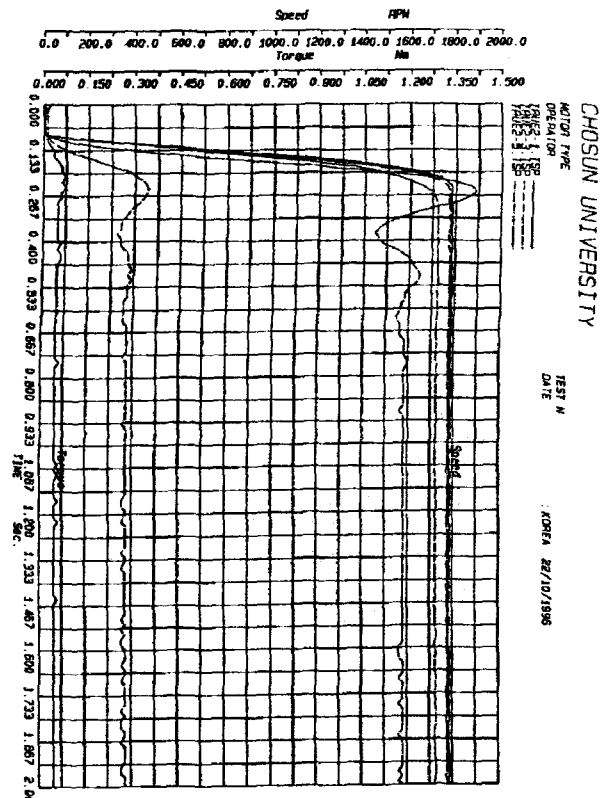


그림 13. 콘덴서 기동방식의 속도, 토오크 특성곡선
Fig. 13. Speed, Torque characteristics curve of condenser starting system

그림 14는 위상각 전압제어 방식의 무부하, 50%부하, 정격 부하에 따른 전동기의 속도와 토크 특성곡선을 나타낸다.

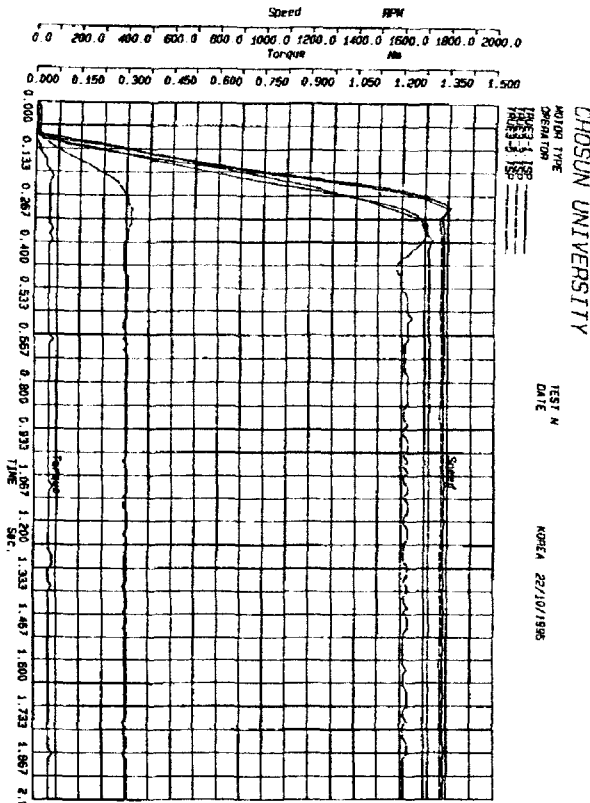
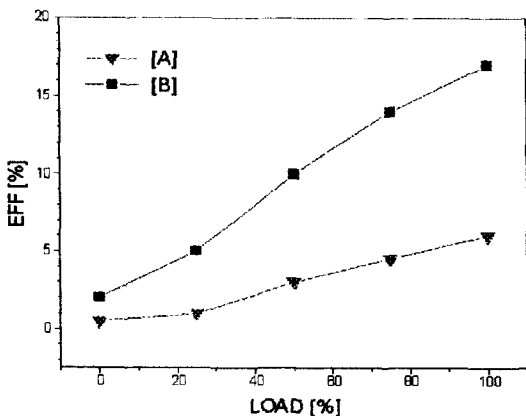


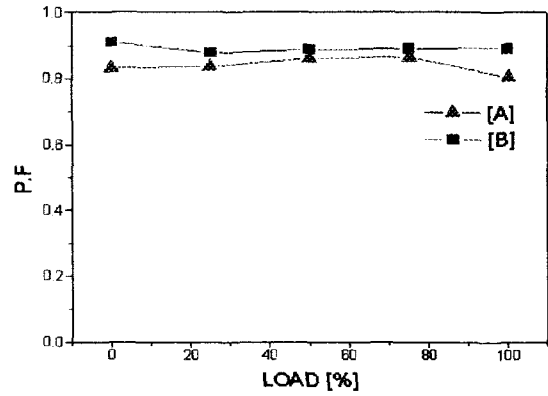
그림 14. 위상각 전압제어 방식의 속도, 토크 특성곡선
 Fig. 14. Speed, Torque characteristics curve of phase angle voltage system

그림 13과 그림 14의 특성곡선에서 위상각 전압제어 방식은 맥동 토크 성분이 감소되었지만 기동시간이 길어짐을 알 수 있다.



[A]: 콘덴서 기동 전동기 [B]: 위상각 전압제어 방식

그림 15. 기동시의 평균효율
 Fig. 15. Average efficiency (at starting interval)



[A]: 콘덴서 기동 전동기 [B]: 위상각 전압제어 방식

그림 16. 기동시의 평균역률
 Fig. 16. Average power factor (at starting interval)

기동시의 부하변화에 따른 두 전동기의 평균효율, 역률특성을 그림15와 16에 나타냈다. 콘덴서 기동 유도전동기와 비교하여 기동시 효율이 약 12%정도 향상되었고, 역률도 높아졌음을 확인할 수 있다.

VI. 결론

단상 콘덴서 유도전동기 원심력 스위치는 전동기의 수명을 좌우하게 된다. 스위치가 오동작됨으로써 파급되는 현상은 과전류로 콘덴서가 소손되고 기능 불능으로 전동기의 코일이 소손되게 된다.

본 연구에서는 단상유도전동기의 원심력스위치와 기동콘덴서를 제거하고 효율개선을 위하여 이론적 고찰 및 시스템의 모델링에 의한 시뮬레이션을 행하였고 구동시스템을 설계 제작하여 기동특성 실험과 결과 검토를 하였다.

위상각 전압제어 방식의 전동기는 콘덴서 기동 전동기와 비교하여 기동시 주권선전류는 57%, 보조권선전류는 47%정도 감소시켜 소프트 스타트함으로써 전동기의 기동시 과전류로 인한 전동기의 충격을 감소함은 물론 전동기 수명을 개선할 수 있었고 기동 효율을 12%정도 개선하였다. 따라서 본 연구의 결과를 토대로 주권선과 보조권선을 동시에 제어하고 소형화, 저 가격화 등을 보안하면 기동과 정지를 자주하는 전기기기의 구동력에 이용함으로써 에너지 절약에 기여할 수 있으리라 사료된다.

본 연구는 한국전력공사지원 기술개발사업에 의하여 수행된 결과의 일부임

참고문헌

[1] E. R. Collins, Jr., H. B. Puttgen, W. E. Sayle, II "Single-Phase Induction Motor Adjustable Speed Drive Direct Phase Angle Control of the Auxiliary Winding Supply", IEEE, pp. 246-252, 1990.

- [2] Abdollah Khoei, S. Yuvarajan, "Steady State Performance of a Single Phase Induction Motor Fed by a Direct ac-ac Converter", IAS, pp. 128-132, 1989.
- [3] Md. Bashir Uddin Momena Akhtar, Md. Rezwan Khan, M.A. Choudhury "Phase Shifting by Static Pwm Cycroinverters for Starting Single Phase Induction Motors", PCC-Yokohama '93, pp. 532-537, 1993.
- [4] E. Randolph Collins Jr., "Torque and Slip Behavior of Single-Phase Capacitor Motors Driven from Variable Frequency Supplies", IEEE, pp. 61-66, 1990.
- [5] E. R. Collins, Jr., R. E. Ashley, III "Operating Characteristics of Single-Phase Capacitor Motors Driven from Variable Frequency Supplies", IEEE, pp. 52-57, 1991.
- [6] Eduard Mujjad, Yifan Zhao, Tian-Hua Liu, Thomas A.Lipo, "Adjustable ac Capacitor for a Single-Phase Induction Motor", IEEE Tran. on Industry Applications, Vol. 29, NO. 3, pp. 479-485, May/JUN, 1993.
- [7] Tian-Hun Liu, Pi-chieh Wang, "Adjustable Switched Capacitor Control for a Single-Phase Induction Motor", IECON, pp. 1140-1145, 1993.
- [8] Tian-Hu Liu, Pi-chieh Wang, "Implementation of a Single Phase Induction Motor Control on a DSP Based System", PESC, pp. 514-521, 1994.
- [9] Do-hyun Jang, Jong-Soo Won, "Voltage Frequency, and Phase-Difference Angle Control of PWM Inverters-Fed Two-Phase Induction Motors", IEEE, Tran. on Power Electronics, Vol.9, NO. 4, pp. 377-383, July. 1994.
- [10] Hyung Lae Baek et al., "Starting characteristics by auxiliary Winding Sequence Control for a Single-Phase Induction Motor" IECON' 96, pp. 1222-1227, 1996.



임양수 (林亮壽)

1956년 10월 5일생. 1980년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 서강전문대 소방안전관리과 전임강사



백형래 (白亨來)

1949년 5월 14일생. 1971년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 건국대 전기공학과 졸업(공학). 1996년 현재 조선대 공대 전기공학과 교수. 전력전자학회 학술 이사.