

보조권선 전압제어에 의한 커패시터 런 유도전동기의 속도제어

論 文
48B-7-2

Speed Control of Capacitor-Run Induction Motor Using Voltage Control of the Auxiliary Winding

柳 俊 衡* · 李 光 遠**
(Joon-Hyoung Ryu · Kwang-Won Lee)

Abstract - This paper presents a speed control method for the capacitor-run induction motor. The equivalent circuit of the motor is analyzed using the forward(positive sequence) and backward(negative sequence) components, and simple circuit equations are obtained. Simulations for the speed control are performed by adjusting the voltage magnitude of the auxiliary winding. A prototype system has been implemented which consists of an inverter and a controller with TMS320C31 digital signal processor. The experimental results using 1/4hp capacitor-run induction motor show a good agreement with analyses.

Key Words : Capacitor motor, 2 phase motor, Transformation, Speed control

1. 서 론

정상상태에서 동작하는 단상 유도전동기의 해석에는 양방향 회전자장 이론이나 직교자장 이론을 널리 사용하며 동적 모델링에는 직교자장 이론을 많이 사용한다[1, 2]. 이 이론들은 정확한 등가회로 파라미터를 필요로 하는데, 보통 등가회로 파라미터는 전동기 시험(개방, 구속, 직류시험)에 의하여 구하게 된다. 좀더 정확한 특성해석을 위하여 이들 파라미터와 함께 전동기의 회전손실까지 고려한다[3, 4]. 현재 단상 유도전동기의 속도를 연속적으로 제어하는 방법은 전압의 크기를 조절하는 방법, 전원의 주파수를 가변하는 방법, 보조권선 전압의 위상차를 조절하는 방법 등이 있다. 전원전압의 크기를 조절하는 방법은 전압의 크기에 따라 운전시 슬립이 변하는 것을 이용하는 것인데 속도의 변화 폭이 좁은 단점이 있다. 전원의 주파수를 가변하는 방법은 주파수를 변조하는 제어회로가 복잡하고, 보조권선 전압의 위상차를 조절하는 방법은 위상차에 따라서 보조권선 전압의 크기를 같이 조절하는 방식이므로 제어 알고리즘이 복잡해진다[5-7]. 본 논문에서는 양방향 회전자장이론에 기초하여 커패시터 런 유도전동기의 전압과 전류를 정상 및 역상 성분으로 변환하고, 이 모형을 이용하여 커패시터 전동기의 속도를 제어할 수 있는 간단한 방식을 제안한다. 변환한 모형에서 전동기의 회로방정식은 정상 및 역상 성분으로 각각 분해되어 행렬형태로 간단하게 나타나기 때문에 양방향 회전자장

에 의한 효과를 바로 알 수 있다. 해석한 모형을 이용하여 커패시터 전동기를 2상 전동기로 생각하고 보조권선에 인가하는 전압을 제어하는 방법으로 속도제어 시뮬레이션과 실험을 하였다.

2. 정상 및 역상 성분에 의한 커패시터 전동기의 해석

그림 1은 일반적인 커패시터 전동기의 고정자 권선 연결 방법이다. 주권선은 교류 전압원에 직접 연결되고 보조권선은 운전 커패시터를 통하여 교류 전압원에 연결된다.

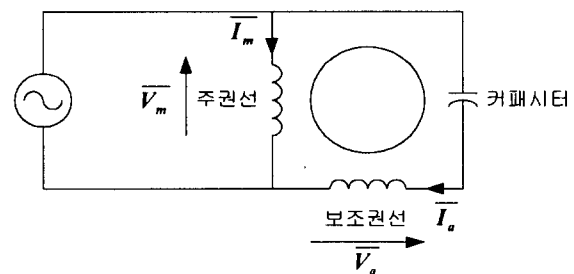


그림 1 커패시터 전동기의 권선 연결

Fig. 1 Capacitor motor connections

그림 1의 커패시터 전동기에서 주권선과 보조권선의 전기적 등가회로는 그림 2와 같이 표현되며, 회로방정식은 다음 식으로 정리된다[1, 2].

$$\begin{aligned} \overline{V}_m &= (Z_1 + \frac{Z_f}{2} + \frac{Z_b}{2})\overline{I}_m - ja(\frac{Z_f}{2} - \frac{Z_b}{2})\overline{I}_a \\ \overline{V}_a &= ja(\frac{Z_f}{2} - \frac{Z_b}{2})\overline{I}_m + \{Z_{1a} + a^2(\frac{Z_f}{2} + \frac{Z_b}{2})\}\overline{I}_a \end{aligned} \quad (1)$$

* 準 會 員 : 亞州大 工大 電子工學科 博士課程

** 正 會 員 : 亞州大 工大 電子工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 1月 4日

最終完了 : 1999年 6月 18日

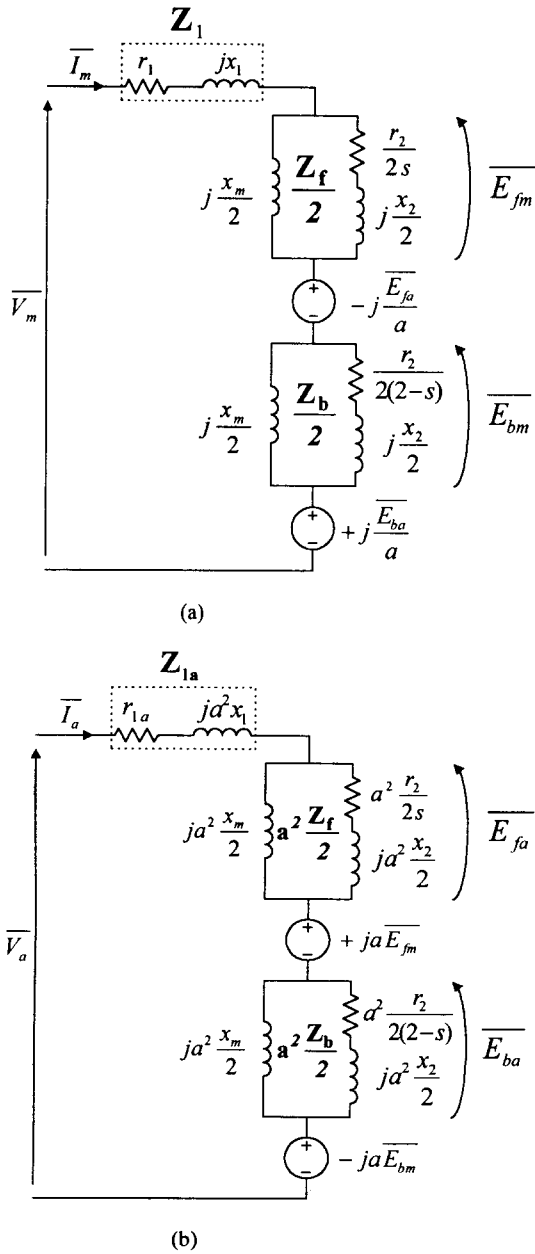


그림 2 커패시터 전동기의 등가회로
 (a) 주권선 등가회로 (b) 보조권선 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuits of a capacitor motor
 (a) main winding (b) auxiliary winding

그림 2의 등가회로 파라미터는 다음과 같다.

- r_1 : 고정자 권선 저항 r_2 : 회전자 저항
- x_1 : 고정자 권선 누설 리액턴스 a : 권선비
- x_2 : 회전자 리액턴스 x_m : 자화 리액턴스
- Z_1 : 주권선 임피던스 Z_{1a} : 보조권선 임피던스
- Z_f : 정상 임피던스 Z_b : 역상 임피던스

- \bar{E}_{fm} : 주권선 정상분 역기전력
- \bar{E}_{bm} : 주권선 역상분 역기전력
- \bar{E}_{fa} : 보조권선 정상분 역기전력
- \bar{E}_{ba} : 보조권선 역상분 역기전력

식(1)에서 보조권선의 전압과 전류를 주권선으로 환산하면

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_m \\ \frac{1}{a}\bar{V}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 + \frac{1}{2}Z_f + \frac{1}{2}Z_b & -j(\frac{1}{2}Z_f - \frac{1}{2}Z_b) \\ j(\frac{1}{2}Z_f - \frac{1}{2}Z_b) & \frac{Z_{1a}}{a^2} + \frac{1}{2}Z_f + \frac{1}{2}Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ a\bar{I}_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

를 얻는데, $Z_2 = Z_{1a}/a^2$ 라 놓으면

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_m \\ \frac{1}{a}\bar{V}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 + \frac{1}{2}Z_f + \frac{1}{2}Z_b & -j(\frac{1}{2}Z_f - \frac{1}{2}Z_b) \\ j(\frac{1}{2}Z_f - \frac{1}{2}Z_b) & Z_2 + \frac{1}{2}Z_f + \frac{1}{2}Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ a\bar{I}_a \end{bmatrix} \quad (3)$$

가 된다. 여기서 \bar{V}_m , $\frac{1}{a}\bar{V}_a$ 와 \bar{I}_m , $a\bar{I}_a$ 를 각각 정상 및 역상 성분 \bar{V}_f , \bar{V}_b 및 \bar{I}_f , \bar{I}_b 로 다음과 같이 변환하는 것을 생각한다.

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_m \\ \frac{1}{a}\bar{V}_a \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_f \\ \bar{V}_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_f \\ \bar{V}_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 1 & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_m \\ \frac{1}{a}\bar{V}_a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ a\bar{I}_a \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_f \\ \bar{I}_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_f \\ \bar{I}_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 1 & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ a\bar{I}_a \end{bmatrix}$$

위의 변환을 이용하여 식(3)을 정리하면

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_f \\ \bar{V}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_1}{2} + \frac{Z_2}{2} + Z_f & \frac{Z_1}{2} - \frac{Z_2}{2} \\ \frac{Z_1}{2} - \frac{Z_2}{2} & \frac{Z_1}{2} + \frac{Z_2}{2} + Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_f \\ \bar{I}_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

를 얻고, $Z_1 = Z_2$ 이면

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_f \\ \overline{V}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_f & 0 \\ 0 & Z_1 + Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I}_f \\ \overline{I}_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

이 되어 각 상이 독립적으로 분해된다.

식(4)와 식(5)의 변환행렬은 unitary 행렬이므로 전력은 정상 및 역상성분으로 변환하기 전에서나 변환한 후에서나 같은 식으로 표현된다. 즉,

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_m \\ \frac{1}{a} \overline{V}_a \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \overline{I}_m \\ a \overline{I}_a \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} \overline{V}_f \\ \overline{V}_b \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \overline{I}_f \\ \overline{I}_b \end{bmatrix}^* \quad (8)$$

'*': 켈레 복소수

와 같이 된다.

전력표현이 동일하므로 공극전력의 정상분 P_{gf} , 역상분 P_{gb} 는

$$P_{gf} = |\overline{I}_f|^2 * R_f, \quad P_{gb} = |\overline{I}_b|^2 * R_b$$

단, $R_f = \text{Re}\{Z_f\}$, $R_b = \text{Re}\{Z_b\}$ (9)

로 계산되고, 토크는 다음 식과 같다.

$$T = \frac{P_{gf} - P_{gb}}{\omega_s} \quad (10)$$

ω_s : 동기 각속도

3. 보조권선의 전압제어에 따른 특성

정상 및 역상 성분으로 변환한 커패시터 전동기의 회로 방정식을 이용하여 보조권선에 인가하는 전압의 변화에 따른 토크-속도 관계를 살펴본다.

보조권선의 전압을 주권선 전압과 비교하여 크기는 일정하고 위상을 변화시키는 경우와 위상을 $\pi/2$ 차가 나게 하고 크기를 변화시키는 경우로 나누어 생각한다.

크기는 일정하고 위상을 변화시킨 경우에는 식(4)에서 $\frac{1}{a} \overline{V}_a = e^{j\alpha} \overline{V}_m$ 으로 놓으면, 전압식이

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_f \\ \overline{V}_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 - je^{j\alpha} \\ 1 + je^{j\alpha} \end{bmatrix} \overline{V}_m \quad (11)$$

과 같이 되고 전류식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{I}_f &= \frac{1 - je^{j\alpha}}{\sqrt{2}(Z_1 + Z_f)} \overline{V}_m \\ \overline{I}_b &= \frac{1 + je^{j\alpha}}{\sqrt{2}(Z_1 + Z_b)} \overline{V}_m \end{aligned} \quad (12)$$

위상을 $\pi/2$ 차가 나게 하고 크기를 변화시키는 경우에는

식(4)에서 $\frac{1}{a} \overline{V}_a = jk \overline{V}_m$ 으로 놓으면, 전압식이

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_f \\ \overline{V}_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 + k \\ 1 - k \end{bmatrix} \overline{V}_m \quad (13)$$

과 같이 되고, 전류식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{I}_f &= \frac{1+k}{\sqrt{2}(Z_1 + Z_f)} \overline{V}_m \\ \overline{I}_b &= \frac{1-k}{\sqrt{2}(Z_1 + Z_b)} \overline{V}_m \end{aligned} \quad (14)$$

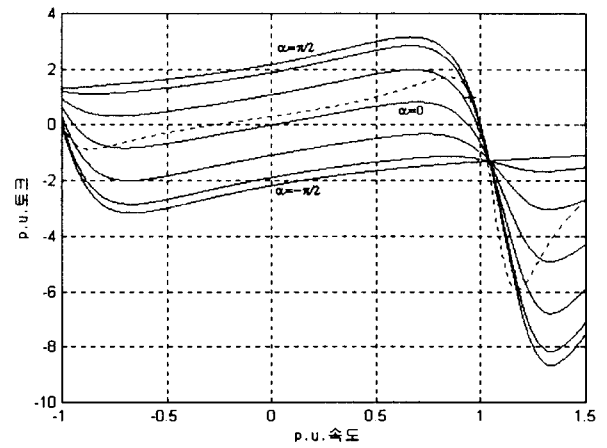


그림 3 토크-속도 특성곡선 : 위상변화

Fig. 3 Torque-Speed characteristics : variable phase

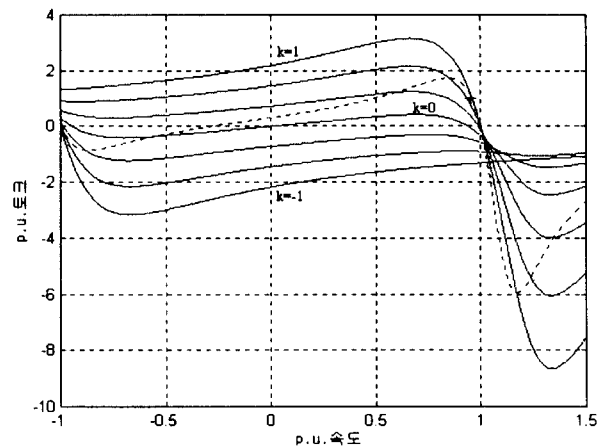


그림 4 토크-속도 특성곡선 : 크기변화

Fig. 4 Torque-Speed characteristics : variable magnitude

그림 3은 실험대상 전동기에 대하여 위상차이 α 를 $-\pi/2$ 에서 $\pi/2$ 까지 $\pi/6$ 씩 변화시키면서 얻은 토크-속도 특성곡선을 보여주며, 그림 4는 크기비 k 를 -1 에서 1 까지 $1/3$ 씩 변화시키면서 얻은 토크-속도 특성곡선을 보여준다. 그림 3

에서 $\alpha = \pi/2$ 일 때는 정회전하는 이상적인 2상 전동기가 되고, $\alpha = -\pi/2$ 일 때는 역회전하는 이상적인 2상 전동기이다. 또, $\alpha = 0^\circ$ 일 때는 보조권선까지 포함하여 순 단상 유도전동기가 된다. 그림 4에서는 $k=1$ 일 때 정회전하는 2상 전동기, $k=-1$ 일 때 역회전하는 2상 전동기이다. $k=0$ 일 때는 보조권선을 단락시킨 것과 같다. 그림 3과 그림 4에서 점선은 정격 커패시터가 연결되었을 때의 토크-속도 특성곡선이다.

토크-속도 특성곡선을 살펴보면 전동기가 어느 속도에서나 보조권선 전압의 위상을 빠르게 하면 토크가 정방향으로 증가하는 것을 알 수 있고, 보조권선 전압의 크기 비율을 증가시켜도 토크가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나, 보조권선 전압의 크기 비율을 증가시킬 때 토크의 변화 폭이 더 균일한 것을 살펴 볼 수 있다.

그림 5는 실험대상 전동기에 대하여 보조권선 전압의 크기비 k 가 0, 1/3, 2/3, 1일 때 속도에 따른 주권선과 보조권선 전류의 크기를 나타낸 것이고, 점선은 정격 커패시터가 연결되었을 때의 전류를 나타낸 것이다. 그림 5를 보면 저속영역에서는 정격 커패시터가 연결되었을 때 보다 k 가 1/3~1일 때 보조권선 전류가 더 많이 흐르고, 동기속도(p.u. 속도=1)부근에서는 k 가 0~2/3일 때 주권선 전류가 더 많이 흐른다. 그 이유는 저속영역에서는 보조권선 전류가, 동기속도 부근에서는 주권선 전류가 토크에 큰 영향을 주기 때문이다. 탭을 조정하거나 보조권선에 인가되는 전압을 낮추면 과전류를 낮출 수 있을 것이다.

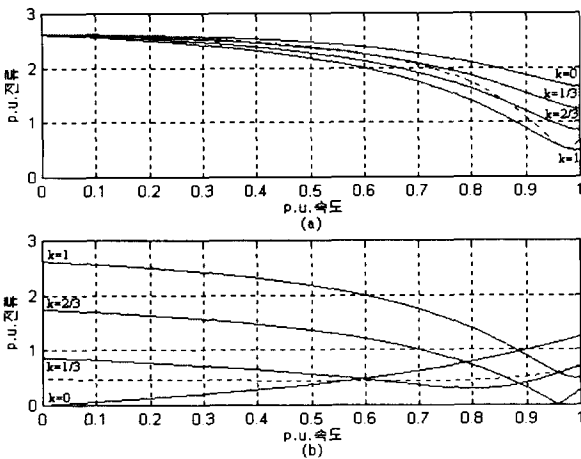


그림 5 전류-속도 특성곡선
(a) 주권선 (b) 보조권선
Fig. 5 Current-Speed characteristics
(a) main winding (b) auxiliary winding

4. 속도제어 실험

표 1의 전동기를 대상으로 보조권선 전압제어에 의한 속도제어 실험을 시도하였다.

4.1 시뮬레이션

그림 6은 속도제어 시뮬레이션 블록도이다. 블록도에서 PI 제어기가 속도오차를 입력받아 보조권선 전압의 크기를 나

타내는 k 값을 출력하면 이에 따라 전동기의 토크가 달라 지므로 속도를 제어하게 된다. 전동기 모형에서 토크의 계산은 그림 4의 특성을 표로 만들어 주어진 k 값과 속도 ω 에 따라 표를 읽는 것으로 하였다. 어느 순간의 k 값과 속도에서 그림 4의 토크를 발생시키기까지의 전기적 시상수는 무시하였고 전동기는 관성만 있는 것으로 가정하였다.

표 1 실험대상 커패시터 전동기의 파라미터
Table. 1 Parameters of the tested motor

1/4 hp - 1715 r/min	60Hz - 1 Φ
$V = 120$ V	$I = 2.8$ A
$x_1 = 6.0$ Ω	$x_2 = 6.0$ Ω
$x_m = 81.0$ Ω	$a = 0.9$
$r_1 = 7.4$ Ω	$r_{1a} = 6.8$ Ω
$r_2 = 4.6$ Ω	$J = 0.0023$ kg·m ²

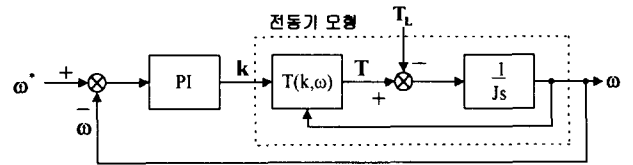


그림 6 속도제어 블록도
Fig. 6 Block diagram of speed control

그림 7, 8은 시뮬레이션 결과이다. 그림 7은 정격의 1/4부를 인가하고 기준 속도가 증가하는 형태로 변할 때의 속도응답과 PI 제어기 출력을 보여주고, 그림 8은 무부하에서 기준 속도가 정·역방향 운전 형태로 변할 때의 속도응답과 PI 제어기 출력을 보여준다. 그림 7과 그림 8의 시뮬레이션 결과를 보면 보조권선에 인가되는 전압의 크기만을 조절함으로써 전동기의 가감속 및 정·역방향 운전이 가능하다는 것을 알 수 있다.

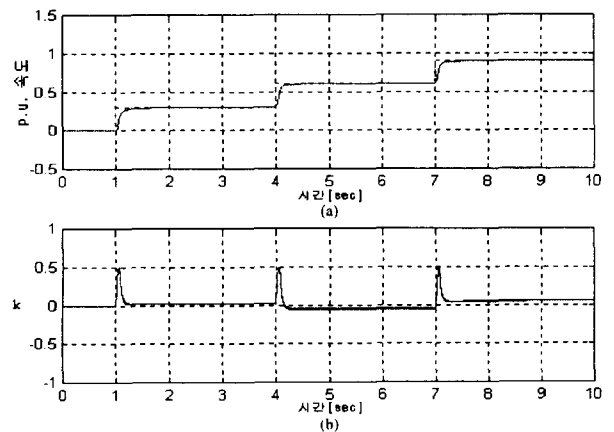


그림 7 속도 응답과 제어 입력 (a) 속도 (b) 제어입력
Fig. 7 Speed response and control input
(a) speed (b) control input

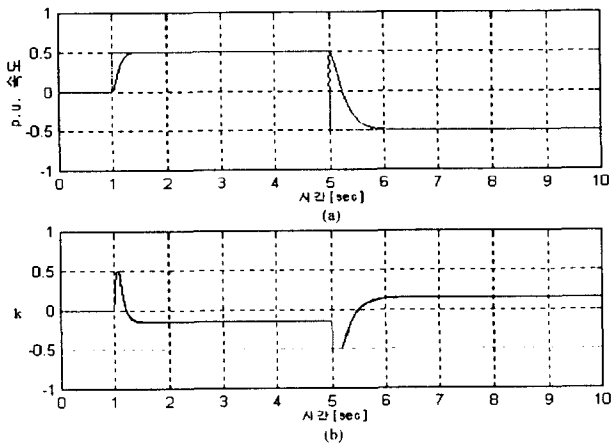


그림 8 정·역방향 운전과 제어입력
(a) 속도 (b) 제어입력

Fig. 8 CW & CCW running and control input
(a) speed (b) control input

4.2 실험

해석한 모형과 시뮬레이션 결과를 확인하기 위하여 그림 9와 같은 실험회로를 구성하였다. 보조권선에 전원을 인가하는 인버터는 IGBT Module을 이용하였고, 인버터에 인가하는 PWM 패턴과 디지털 제어기는 TMS320C31 디지털 신호처리소자를 이용하였다. 위상변화부에서는 주권선에 인가되는 전원의 파형($\sin \theta$)을 측정하여 이 전원과 $\pi/2$ 의 위상차를 가진 전원주파신호($\cos \theta$)를 만들어낸다[8]. 이 신호와 PI 제어기 출력을 곱하여 최종 PWM패턴에 필요한 듀티비 d 를 계산한다. PWM스위칭 주파수는 2160Hz로 하였다.

그림 10과 그림 11은 구성된 실험회로를 이용하여 구한 실험 파형이다. 그림 10은 정격의 1/4부하를 인가하고 기준 속도가 증가하는 형태로 변할 때의 속도응답과 제어입력 신호(k)를 보여주며, 그림 11은 무부하일 때 기준 속도가 정·역방향 운전 형태로 변할 때의 속도응답과 제어입력 신호(k)를 보여준다. 그림에서 전동기의 가속속과 정·역회전이 원하는 대로 이루어진 것을 알 수 있다. 시뮬레이션과 실험 파형의 제어입력 신호를 비교해 보면 시뮬레이션에서는 과도응답이 거의 나타나지 않는데, 이것은 시뮬레이션에서 토크를 테이블로 만들어 계산을 했기 때문이다. 그리고 제어입력 신호를 보면 0에 가까운 양 또는 음의 값이 되는데 그 이유는 무부하 또는 경부하이어서 토크가 거의 필요 없기 때문이다. 이것은 그림 4의 토크-속도 특성곡선을 보면 예측할 수 있다.

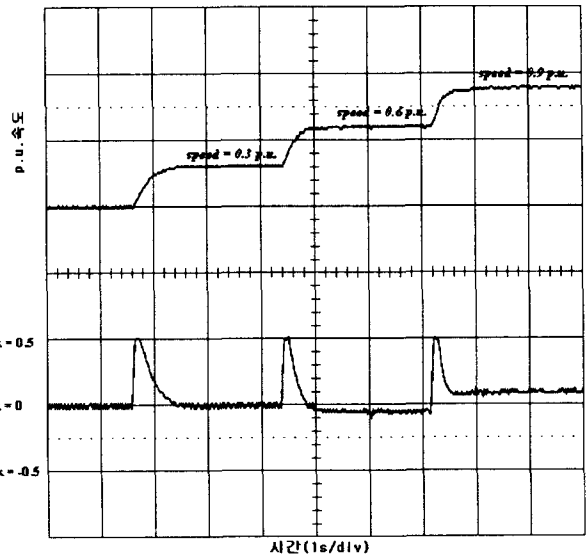


그림 10 가속 운전 응답(상)과 제어입력(하)
Fig. 10 Speed response and control input

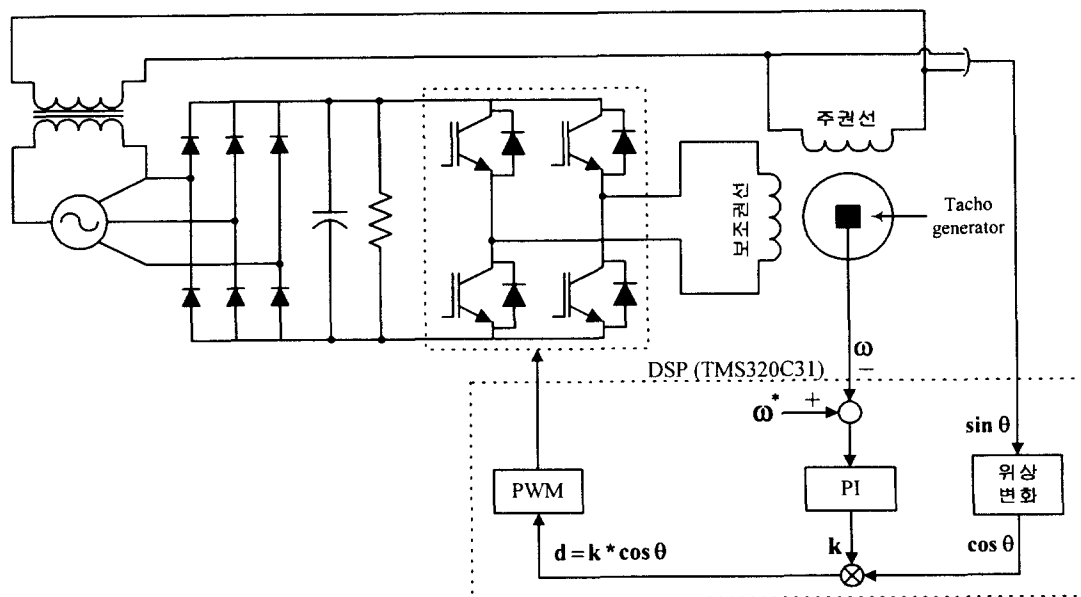


그림 9 실험회로 구성도
Fig. 9 Configuration of experimental system

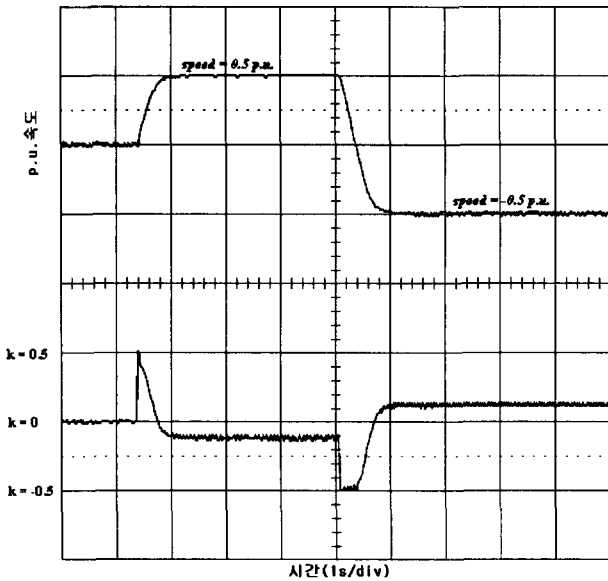


그림 11 정·역방향 운전응답(상)과 제어입력(하)
Fig. 11 CW & CCW running and control input

5. 결 론

정상 및 역상 성분 분해에 의하여 커패시터 전동기의 수학적 모형을 정리하였다. 이 모형은 등가회로의 회로방정식이 정상 및 역상 성분으로 각각 분해되고 행렬형태로 간단하게 표현되기 때문에 양방향 회전자장에 의한 효과를 바로 알 수 있다. 커패시터 전동기를 2상 전동기로 생각하고 보조권선 전압에 따른 토크-속도 특성을 해석하였다.

전동기의 주권선에 인가되는 전압과 보조권선에 인가되는 전압의 위상차를 일정하게 하고 크기만을 조절함으로써 복잡한 주파수 변환 없이 커패시터 전동기의 속도제어를 시도하였다. 1/4hp 커패시터 런 유도전동기를 이용하여 실험한 결과 보조권선에 인가되는 전압의 크기만을 조절함으로써 전동기의 정·역방향 운전 및 속도제어가 가능함을 보여주었다.

앞으로 주권선에 인가하는 전원과 90°의 위상차를 가진 전원을 만드는 방법을 좀 더 간단한 구조로 개선하고, 과전류를 줄일 수 있는 알고리즘을 연구하면 커패시터 전동기의 속도제어에 실용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] A. E. Fitzgerald, Electric Machinery. New York : McGraw-Hill. 1991.
[2] P. C. Krause, Analysis of Electric Machinery. New York : McGraw-Hill. 1986.
[3] Stephen D. Umans, "Steady-state, lumped-parameter model for capacitor-run, single-phase induction motors", IEEE Trans. Industry Application, Vol.32, No.1, pp.169-179, Jan/Feb 1996.
[4] E. R. Collins, Jr., "Improved methods for determining the equivalent circuit parameters for single-phase

induction motor models", IEEE IAS '93, pp.390-395, 1993.

[5] E. R. Collins, Jr., "Operating characteristics of single-phase capacitor motors driven from variable frequency supplies", IEEE IAS '91, pp.52-57, 1991.
[6] Edward Randolph Collins, "Torque and slip behavior of single-phase induction motors driven from variable-frequency supplies", IEEE Trans. Industry Application, Vol.28, No.3, pp.710-715, May/June 1992.
[7] E. R. Collins, Jr., "Single-phase induction motor adjustable speed drive : Direct phase angle control of the auxiliary winding supply", IEEE IAS '88, pp.246-252, 1988.
[8] Seshadri Sivakumar, "Kalman filter based high speed measurement and control of ac voltages for UPS applications", PESC '93, pp.907-912, 1993.

저 자 소 개



류 준 형 (柳俊衡)

1972년 9월 13일 생. 1997년 아주대 제어계측공학과 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자공학과 박사과정

Tel : (0331) 219-2487

E-mail : jhryu@madang.ajou.ac.kr



이 광 원 (李光遠)

1946년 3월 27일 생. 1969년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 한국과학기술연구원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1969~1980년 한국과학기술연구원 선임연구원. 1989년 한국과학기술연구원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 현재 아주대 전자공학부 교수

Tel : (0331) 219-2480

E-mail : lk@madang.ajou.ac.kr