

보조권선 전압제어에 의한 커패시터 런 단상 유도전동기의 속도제어

류 준형 이 광원
아주대학교 전자공학부 제어계측공학과

Speed Control of Capacitor Run Single-Phase Induction Motor Using Voltage Control of the Auxilliary Winding

Joon-Hyoung, Ryu Kwang-Won, Lee
School of Electronics Engineering, AJOU University

Abstract - This paper presents a speed control method for the capacitor run single-phase induction motor. The equivalent circuit of a capacitor motor is analyzed using the forward and the backward components, and simple circuit equations are obtained. Simulations for the speed control are performed by adjusting the voltage magnitude of the auxiliary winding.

1. 서 론

유도전동기의 속도변화는 회전자계의 동기속도를 변화시키거나 혹은 슬립을 변화시킴으로써 이루어진다.[1][2][3] 이 논문은 보조권선에 인가하는 전원을 조절하여 커패시터 런 단상 유도전동기의 속도를 제어하는 방법을 연구한 것이다. 토크 특성식은 주권선과 보조권선에 흐르는 전류의 크기와 위상차의 함수이므로 보조권선의 전원을 조절하여 토크를 변화시킬 수 있다.[4] 주권선에 정격전압을 인가하고 보조권선에 인가하는 전압을 제어하는 방법으로 속도제어 시뮬레이션을 하였다.

2. 커패시터 전동기의 수학적 모형

그림 1은 일반적인 커패시터 전동기의 연결회로이다. 주권선은 교류 전압원에 직접 연결되어있고 보조권선은 런 커패시터를 통하여 교류 전압원에 연결되어있다.

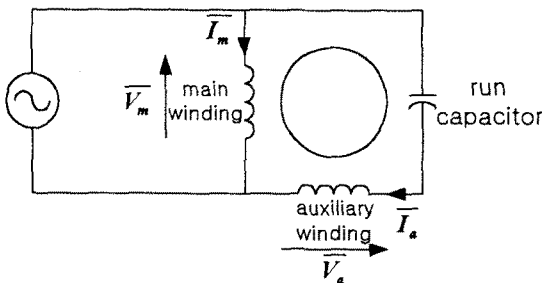


그림 1. 커패시터 전동기의 권선 연결

그림 1에서 런 커패시터를 제거한 커패시터 전동기의 등가회로는 그림 2와 같이 표현되며 회로방정식은 다음 식으로 정리된다.[1]

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

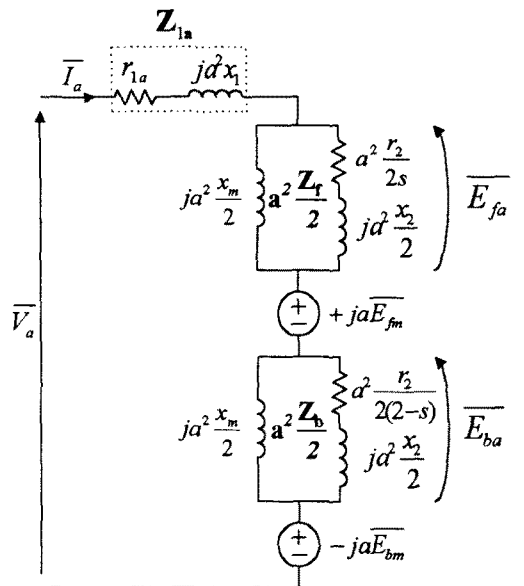
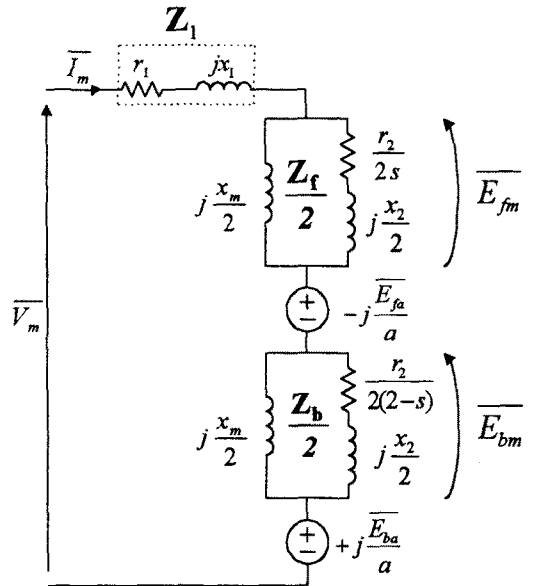


그림 2. 커패시터 전동기의 등가회로

Z_1 : 주권선 임피던스 Z_{1a} : 보조권선 임피던스
 Z_f : 정방향 임피던스 Z_b : 역방향 임피던스
 a : 권선비

식(1)을 약간 변형하여 정리하면

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

를 얻는데 이 식에서 보조권선의 전압, 전류를 $\frac{1}{a} \bar{V}_a$, $a \bar{I}_a$ 로 나타낸 것은 자속과 기자력을 주권선과 맞추기 위한 것이다. 여기서 $Z_2 = Z_{1a}/a^2$ 이라 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. \bar{V}_m , $\frac{1}{a} \bar{V}_a$ 와 \bar{I}_m , $a \bar{I}_a$ 를 각각 정방향 및 역방향 성분 \bar{V}_f , \bar{V}_b 및 \bar{I}_f , \bar{I}_b 로 다음과 같이 나타내기로 한다.

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

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

위의 변환을 이용하여 정리하면

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

를 얻고 $Z_1 = Z_2$ 이면

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

이 되어 각 성분이 독립적으로 분해된다. [4]

식(4)와 (5)의 변환행렬은 unitary 행렬이므로 전력의 표현이 다음과 같이 동일하게 된다.

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

$P_{gf} = |I_f|^2 * R_f$, $P_{gb} = |I_b|^2 * R_b$ 라 놓으면 전동기 토크식은 다음과 같게 된다.

$$T = \frac{P_{gf} - P_{gb}}{\omega_s} \quad (9)$$

ω_s : 동기 각속도, $R_f = Re\{Z_f\}$, $R_b = Re\{Z_b\}$

3. 토크 특성

정, 역방향 성분으로 변환한 커패시터 전동기의 방정식을 이용하여 보조권선에 인가하는 전압의 위상을 변화시

키는 경우와 크기를 변화시키는 경우에 대하여 속도-토크 관계를 계산한다.

첫째, 위상을 변화시킨 경우에는 주권선에 정격전압을 인가하고 보조권선에는 런 커패시터를 제거하고 주권선에 인가한 전압과 크기는 같고 일정한 위상차를 가진 전압이 인가되는 것으로 가정한다. 식(4)에서 $\frac{1}{a} \bar{V}_a = e^{j\alpha} \bar{V}_m$ 으로 놓는다면

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_f \\ \bar{V}_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 + je^{j\alpha} \\ 1 - je^{j\alpha} \end{bmatrix} \bar{V}_m \quad (10)$$

과 같이 되고 전류식은 다음과 같다.

$$\bar{I}_f = \frac{1 + je^{j\alpha}}{\sqrt{2}(Z_f + Z_1)} \bar{V}_m \quad (11)$$

$$\bar{I}_b = \frac{1 - je^{j\alpha}}{\sqrt{2}(Z_b + Z_1)} \bar{V}_m$$

둘째, 크기를 변화시키는 경우에는 주권선에 정격전압을 인가하고 보조권선에는 주권선과 $\frac{\pi}{2}$ 의 위상차를 가지면서 크기를 조절한 전압이 인가되는 것으로 가정한다. 식(4)에서 $\frac{1}{a} \bar{V}_a = jk \bar{V}_m$ 으로 놓는다면,

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_f \\ \bar{V}_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 + k \\ 1 - k \end{bmatrix} \bar{V}_m \quad (12)$$

과 같이 되고, 전류식은 다음과 같다.

$$\bar{I}_f = \frac{1 + k}{\sqrt{2}(Z_f + Z_1)} \bar{V}_m \quad (13)$$

$$\bar{I}_b = \frac{1 - k}{\sqrt{2}(Z_b + Z_1)} \bar{V}_m$$

보조권선에 인가하는 전압의 위상을 변화시킨 경우와 크기를 변화시킨 경우에 구한 \bar{I}_f , \bar{I}_b 를 토크 특성식(9)에 대입하여 토크를 계산할 수 있다.

그림 5는 위상차 α 를 $-\frac{\pi}{2}$ 에서 $\frac{\pi}{2}$ 까지 $\frac{\pi}{6}$ 씩 변화시키면서 얻은 토크-속도 특성곡선을 보여주며, 그림 6은 크기비 k 를 -1에서 1까지 1/3씩 변화시키면서 얻은 토크-속도 특성곡선을 보여준다.

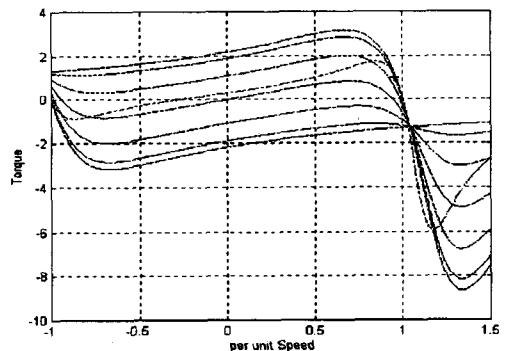


그림 5. 토크-속도 곡선 : 위상변화

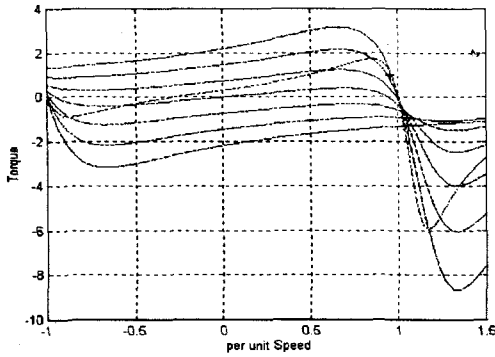


그림 6 . 토크-속도 곡선 : 크기변화

위상을 변화시킨 경우와 크기를 변화시킨 경우의 토크-속도 특성곡선을 살펴보면 크기를 변화시킨 경우가 위상을 변화시킨 경우보다 더 선형적임을 살펴볼 수 있다. 표 1과 표 2는 계산에 사용된 전동기의 정격과 파라미터이다.

표 1 . 전동기 정격

$V = 120 \text{ V}$	$I = 2.8 \text{ A}$
$\frac{1}{4} \text{ hp} - 1715 \text{ r/min}$	$60\text{Hz} - 1\phi$

표 2 . 전동기 파라미터

$x_1 = 6.0 \Omega$	$x_2 = 6.0 \Omega$
$x_m = 81.0 \Omega$	$a = 0.9 \Omega$
$r_1 = 7.4 \Omega$	$r_{1a} = 6.8 \Omega$
$r_2 = 4.6 \Omega$	

4. 속도제어 시뮬레이션

그림 7은 속도제어 시뮬레이션 블록도이다.

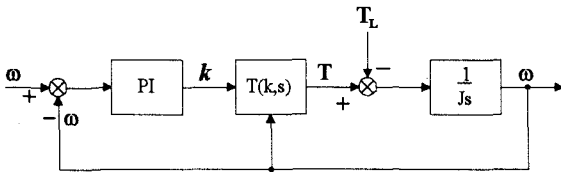


그림 7 . 속도제어 블록도

PI 제어기가 속도오차를 입력으로 받아 보조권선 전압의 크기를 나타내는 k값을 출력하게 된다. 이 k값과 속도를 이용하여 토크를 계산하게 된다. 부하는 관성만 있는 것으로 가정하였다.

그림 8은 기준 속도를 가감속 패턴으로 주었을 때의 속도응답과 PI 제어기의 출력을 보여주고, 그림 9는 기준 속도를 정·역회전 패턴으로 주었을 때의 속도응답과 PI 제어기의 출력을 보여준다. 그림 8과 그림 9를 보면 제어기의 출력에 오버슈트가 생기는데, 제어기의 이득을 조절하면 줄일 수 있으나 속도 응답곡선에 오버슈트가 더 커지게 된다. 이것은 전동기의 비선형성을 감안하지 않아서 생기는 것으로 판단된다. 시뮬레이션 결과를 보면 보조권선에 인가되는 전압의 크기만을 조절함으로써 전동기를 가감속 및 역회전시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

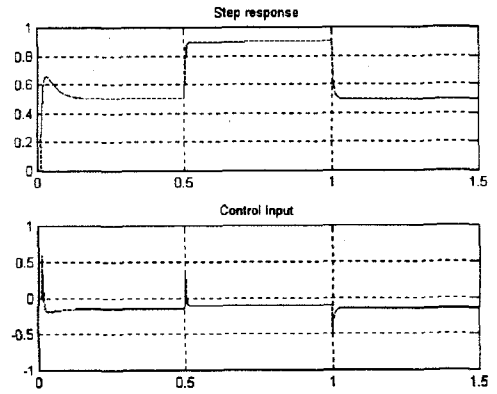


그림 8 . 가감속 제어

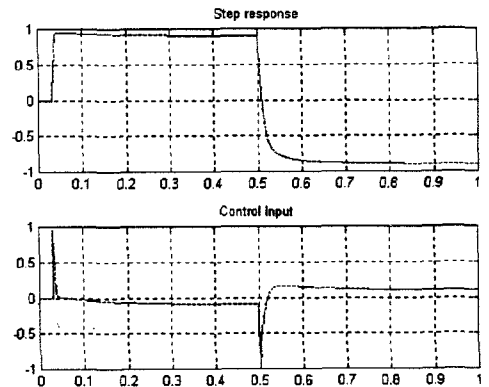


그림 9 . 정·역회전 제어

5. 결 론

보조권선 전압제어에 의한 커패시터 런 단상 유도전동기의 속도제어를 시도하였다. 등가회로의 회로방정식을 정방향 및 역방향 성분으로 각각 분해하여 해석하고 토크를 계산하였다. 커패시터 전동기를 2상 전동기로 생각하고 보조권선 전압의 크기를 제어하는 방법으로 속도제어 시뮬레이션을 해 보았다. 시뮬레이션 결과를 보면 전동기의 주권선에 인가되는 전압과 보조권선에 인가되는 전압의 위상차를 일정하게 하고 크기만을 조절함으로써 전동기의 가감속과 역회전을 할 수 있음을 볼 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. E. Fitzgerald, Electric Machinery. New York : McGraw-Hill, 1991, Sec 8.1-8.5, 11.1-11.4
- [2] E. R. Collins, Jr., "Operating characteristics of single-phase capacitor motors driven from variable frequency supplies", IEEE IAS '91, pp.52-57, 1991.
- [3] 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.
- [4] 류 준형, "정·역방향 성분 분해에 의한 커패시터 전동기의 해석", 대한전기학회 전기기기연구회 춘계 학술발표회 합동 논문집, pp.79-83, 1998.