자계벡터 가속법에 의한 유도형 서보전동기의 전력회생 구동

홍순일, 홍정표, 정승환
부경대학교 전기제어공학부

The Regenerative Drive of Induction Servo Motor by the Flux Acceleration Method

Soon-ill Hong, Jeng-pyo Hong, Seoung-hwan Jung
Division of Electrical & Control, Pukyong University

Abstract

This paper based on spiral vector, three phase induction motor is described a detailed modeling by a phase segment methode. Based on this model, A torque control and the equation of regenerative power for the induction motor drive, based on the field acceleration method(FAM), is presented.

The speed control system is designed to be applied voltage source inverters that is easy the current type feedback of power regeneration for motor drive.

The ability of shaving power to be measured power regeneration has been investigated in speed acceleration and reduction. And it is change of stator resistance that the voltage commands include error, the ripple of exited voltage and torque occur from the results.

The experimental tests verify the performance of the proposed regenerative drive for FAM, proving that good behavior of the drive is achieved in the transient and steady-state operating conditions.

I. 서 론

유도전동기 동작해석에 많이 이용되고 있는 회전 2축 이론에 의한 회로방정식은 과도현상 및 정상상태를 겸해서 해석적으로 해를 구하는 것은 어렵다.

과도현상과 정상상태의 통일적인 해석을 위해서 山村昌氏에 의한 감쇠회전 벡터(Spiral vector)가 제안되고 있다 [1, 2].

스파이랄 벡터를 이용한 상분리법(phase segregation method)에 의한 3상농형 유도전동기의 등가회로는 변수변환을 행하지 않고 한 상의 변수만으로 과도현상과 정상상태 해석에 적용 가능하다. 유도전동기의 계자가속법(FAM :Field Acceleration Method)이 제안되고 있다 [3, 4].

유도전동기 고성능제어는 많은 연구가 있지만 서보시스템에서 회생전력의 적극적 이용을 고려한 것은 적다.

본 연구는 스파이랄 벡터에 기초한 유도전동기 모델의 해석을 나타내고 이 해에 기초한 자계가속법(Field Acceleration Method)에 의해 순시 토크 제어와 회생전력 해석을 나타내었다. 전압지령형의 PWM제어에서 전압형 인버터에 의해 전동기가 동작할 때 전력회생이 수식으로 해석 하였다.

II. 스파이랄 벡터와 전동기 모델

Spiral vector에 의한 전류는 식(1)과 같이 정의 되는 함수이다.

$$i = Ae^{\delta t}, \quad \delta = -\lambda + j\omega \tag{1}$$

여자전류 $i_0^a = i_1 + i_2^a$를 이용하면 스파이랄 벡터에 의한 유도전동기 전압 전류 방정식은 (2) (3)이다.

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 + \frac{3M_a}{2}p & \frac{3M_a}{2}p \\ \frac{3M_a}{2}(p - j\omega_m) & R_2 + (L_{2a} + \frac{3M_a}{2})(p - j\omega_m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2^a \end{pmatrix}$$

(2)

여기서 α 는 (3)와 같이 정의한다.

$$\alpha=\frac{L_1+\frac{3M}{2}}{\frac{3M}{2}} \tag{3}$$

유도 전동기 슬립 S는 (4)으로 정의된다.

$$s=\frac{\omega_m-\omega_r}{\omega_m} \tag{4}$$

FAM법은 여자전류 i_0를 (5)과 같이 원 벡터에 유지하는 것이다.

$$i_0=\sqrt{2}|I_0|e^{j(\omega t+\phi_0)} \tag{5}$$

이 때 고정자 전압과 여자 전압은 다음이다.

$$v_1=R_1 i_1+j\omega\frac{3M\alpha}{2}i_0 \tag{6}$$

$$e_1^a=j\omega\frac{3M\alpha}{2}\sqrt{2}|I_0|e^{j(\omega t+\phi_0)} \tag{7}$$

(7)식을 (3)에 대입한 일반해는 (8)이다.

$$i_2^a=-\frac{s}{R_{2\alpha}+s\omega L_{2\alpha}}e_1^a+|I_2^a|Ae^{-\frac{R_{2\alpha}}{L_{2\alpha}}t}e^{j\omega_r t} \tag{8}$$

전동기의 회전 각속도 ω_r은 식 (9)이다. 그리고 토크는 (10)이다.

$$\omega_r=\frac{1-s}{P/2}\omega\,[\mathrm{rad/s}] \tag{9}$$

$$T_3=\frac{3P}{2}\left(\frac{3M\alpha}{2}\right)^2 s\omega|I_0^a|^2\frac{\sqrt{(R_{2\alpha})^2-(s\omega L_{2\alpha})^2}}{(R_{2\alpha})^2+(s\omega L_{2\alpha})^2}\cdot\cos\Theta_2(1-e^{-\frac{R_{2\alpha}}{L_{2\alpha}}t}) \tag{10}$$

여기서 $\Theta_2=\tan^{-1}\frac{s\omega L_{2\alpha}}{R_{2\alpha}}$ 이다. (10)에서 슬립주파수가 작은 영역에서는 토크는 슬립주파수에 비례한다.

Ⅲ. FAM법에 의한 회생구동 시스템

그림 1은 실제 인버터에 의한 전동기 구동에서 전력회생에 플라이 백(Fly back) 스위치를 갖는 전동기 1상분의 회생동작 모델을 나타낸 것이다.

(10)에서 부 토크 발생은 슬립 각속도가 음(-)으로 되는 것이고 그림1의 회생모델에서 회생전력은 과도항을 무시하면 (11)과 같다. 전원으로 귀환하는 전력은 R_1에 의한 손실을 제외한 부분이다.

$$P_{03}=\frac{9PM}{4}\omega_r imag[i_0\cdot i_2^a]=3\omega_r\frac{P}{2}\left(\frac{3M\alpha}{2}\right)^2 s\omega|I_0|^2\frac{\sqrt{(R_{2\alpha})^2-(s\omega L_{2\alpha})^2}}{(R_{2\alpha})^2+(s\omega L_{2\alpha})^2}\cos\Theta_2 \tag{11}$$

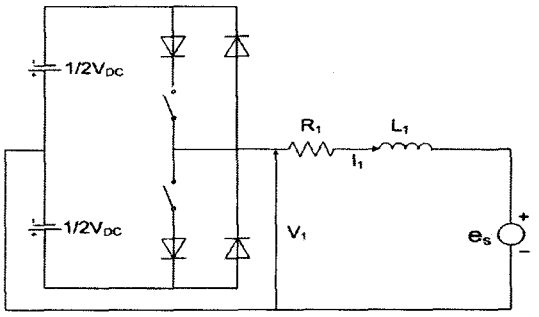

그림 1. 회생동작모델(1상분)

그리고 회생된 에너지는 (12)이고 전압은 (13)이다.

$$E=-(2r_{PWM}-1)\frac{1}{f_{PWM}}I_1\frac{1}{2}V_{DC} \tag{12}$$

$$V=\frac{1}{2}V_{DC}(2r_{PWM}-1) \tag{13}$$

인버터 전압은 (16)의 관계이기 때문에 이 PWM 주기의 평균 회생전력은 $-I_1 V$. I_1가 음의 경우에도 같은 모양으로 되고 결국 전압형 PWM 인버터에서 회생전력은 $-I_1 V$ 이다.

속도제어 시스템은 회생전력의 궤환이 쉬운 전압지령형 인버터에 의해 행하여지고 토크 제어는 전압입력형 FAM법이다. 그림 2는 앞에 서술한 사양을 기초로 구성한 속도제어 시스템을 나타내고 그림 3은 유도한 제어 알고리즘에 기초한 제어 프로우 차트이다. 속도제어는 어셈블러로 기술하고 정수연산을 행했다.

실험의 주목적이 토크 제어 성능 조사이기 때문에 속도제어는 비례요소만의 피드백 제어로 했다. 토크 지령치 T^*는 이득을 K_p, 속도오차를 ω_e로 하면 (14)이다.

$$T^* = K_p \cdot \omega_e \quad (14)$$

토크 지령에 대응하는 슬립주파수는 (14)에서 (15)가 된다.

$$s\omega^* = K_{s\omega} \cdot T^* \quad (15)$$

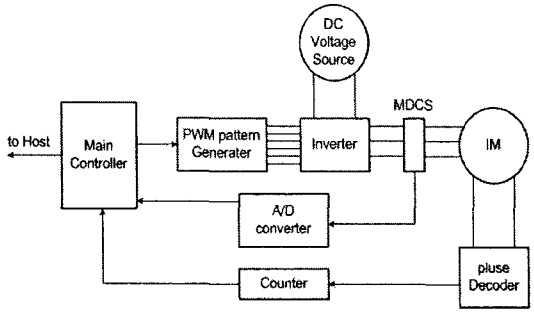

그림 2. 유도전동기 속도제어 시스템

여기서, 슬립각속도 계수는

$K_{s\omega} = \frac{2}{3}\frac{1}{P}\left(\frac{2}{3M\alpha}\right)^2 \cdot \frac{R_2}{|I_0^a|^2} = \frac{31.85}{|I_0^a|}$ 이다. 전원 각속도 ω는 회전자속도 ω_r와 슬립주파수 $s\omega$의 합이 되고, 여자전압 e_1는 (7)에 의해 식(16)으로 구해진다.

$$e_1 = K_{e1}\omega e^{j(\omega t + \phi_0 + \frac{\pi}{2})} \quad (16)$$

여기서 $K_{e1} = \frac{2}{3}M\alpha\sqrt{2} = 0.333|I_0^a|$이다. 이 여자전압에 R_1에 의한 전압강하를 보상하여 전압 지령치는 식(17)이 된다.

$$V_1^* = R_1 i_1 + K_{e1}\omega\cos(\omega t + \phi_0) \quad (17)$$

여기서. 제 1항의 $|i_1|$은 5A에 제한한다. 그리고 전압 지령치를 직류전원전압으로 나눈 것이 최종적인 출력의 Duty 비가 된다. 표 1은 300W 전동기 정수와 정수에서 결정한 파라미터이다.

K_p는 토크 제어 성능에는 영향을 끼치지 않기 때문에 시행착오에 의해 결정했다. 사용한 전동기의 회전 속도범위는 0~3000rpm이고 대응하는 동기주파수는 0~50Hz이다.

여자전류	0.5A	R_1	5.86	K_{e1}	0.1163
정격속도	3000rpm	R_2	5.3	$K_{s\omega}$	127
정격전압	120V	L_1 L_2	0.164	토크정수	0.0765
정격전류	2.0A	M	0.143	토크제한	0.54Nm

표 1 전동기 정수

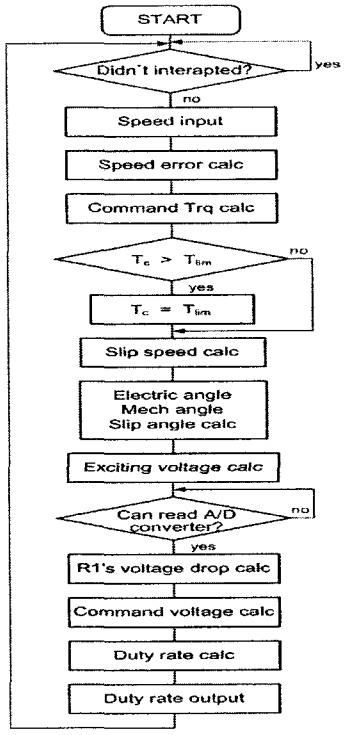

그림 3. 제어 프로우 차트

Ⅳ. 실험 및 결과

1. 속도제어

그림 4는 속도 지령을 3000rpm으로 했을 때의 속도 응답이다. 그림에서 가속 부분은 대체로 일정 가속으로 되며 토크 제어가 정상으로 행해지고 있는 것을 나타내고 있다.

그림 5는 기동 직후 속도응답을 확대해서 나타낸 것이다. 속도 지령치를 준 후 가속이 시작되어 실제 응답이 출력될 때까지의 시간은 약 10[msec]가 되었고 이 결과에서 전압입력형 FAM법의 과도항의 영향이 확인 가능하다. 이론치와 실측치 사이에 오차가 있지만 이것은 전동기의 물리적 정수 특히, 점성제동 계수가 정확하지는 않기 때문이라 여겨진다.

그림 6은 속도 지령치 864 [rpm], 1728 [rpm], 1944 [rpm]에 대한 속도응답을 나타낸 것이다. 모든 정수는 표 1의 것을 이용했다. 모두 정상적으로 안정하게 동작하고 있지만 저속에서는 토크 맥동이 심한 것을 볼 수 있다.

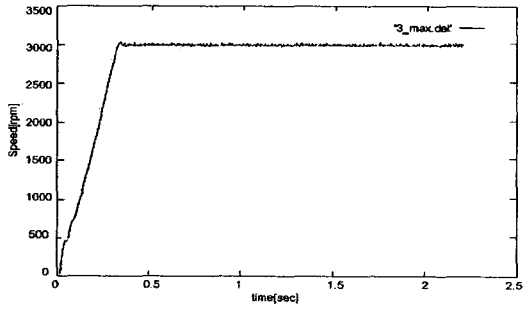

그림 4. 속도 응답(3000rpm)

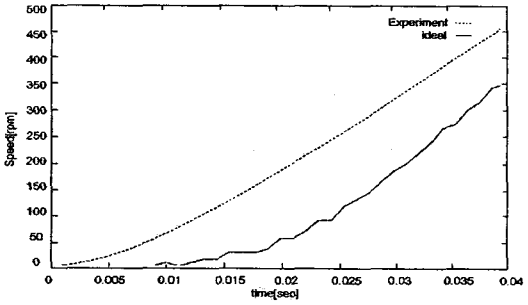

그림 5. 가속 시 속도 응답(3000rpm) 확대

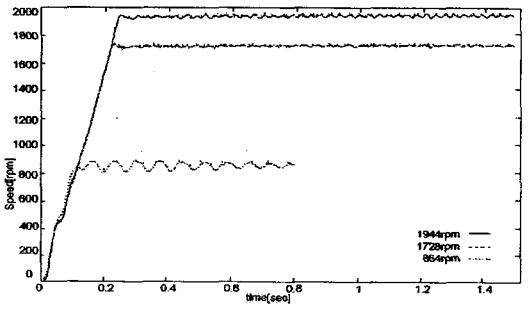

그림 6. 속도 응답

2. 회생전력

그림 7은 정격속도 3000[rpm]에서 저속상태 1728[rpm] 으로 제동 할 때 전류, 전압파형을 나타낸 것이다. 제동 전·후의 전원주파수는 그대로 동기속도로 되기 때문에 그것과 비교해 제동 중에는 슬립이 부(-)로 되는 것을 알 수 있다.

그림 8은 그림 7과 같은 조건의 실험에서 전압과 전류에서 전력을 구해 출력(Plot)한 것이다. 이것에서 제동시의 전력 회생을 확인 가능하다. 또 정상운전 시에 전력이 진동하고 있지만 이것은 앞에서 서술한 토크 맥동에 대응하는 것이다.

이 실험에서 발생한 회생에너지는 4.72[J], 소비시킨 에너지는 5.74[J]이고, 회생에너지를 모두 유효 이용 가능한 경우는 82%의 전력이 절약된다.

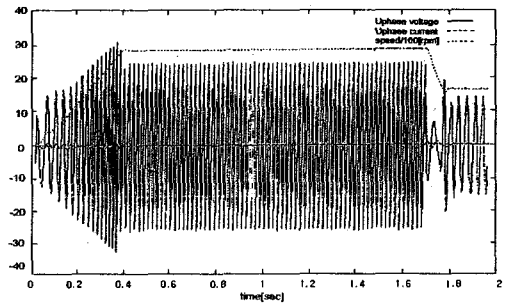

그림 7. 감속 시에 전압, 전류파형

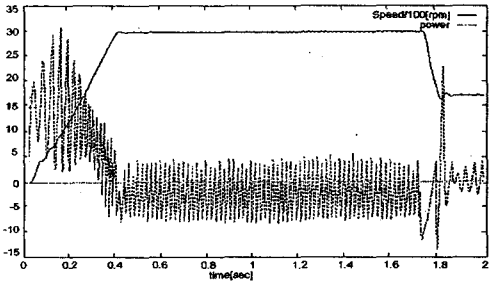

그림 8. 전력회생

V. 결 론

(1) 전류입력형과 전압입력형 FAM법을 검토하여 전압입력형 FAM법의 유효성이 확인되었다.

(2) 전압지령형 인버터에 의해 유도전동기 전력회생 구동 시스템은 구성이 간편하고 회생전력을 쉽게 취할 수 있는 것을 나타내었다.

참 고 문 헌

[1] 山村 昌 , 交流回路 と 交流機 の 스파이랄 벡터 理論, 日本 電氣學會誌, 109卷, PP. 517-523, 1992

[2] Ching-Tsai Pan and Ting-yu Chang, " A Fixed structure Discrete-Time Sliding Mode Controller for Induction Motor Drive", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 9, No.4, PP. 645-651, 1994.

[3] Djordje M. Stojie and Slobodan N. Vokosavic, " A New Induction Motor Drive Based on the Flux Vector Acceleration Method " IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 20, No.1, PP. 173-180, 2005.

[4] Kieiju Matsui, Uito Mizuno, "Improved Power Regenerative Controls by Using Thyristor Rectifier Bridge of Voltage Source Inverter and a Switching Transistor", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 5, p1010 ~ 1016, 1992.