

## 자계가속법에 의한 유도 전동기의 전력회생 구동

홍순일† · 홍정표\* · 정승환\*\*

(원고접수일 : 2007년 1월 11일, 심사완료일 : 2007년 4월 16일)

### Power Regenerating Drive of a Induction Motor by Field Acceleration Method

Soon-Il Hong† · Jeng-Pyo Hong\* · Seoung-Hwan Jung\*\*

**Abstract** : This paper presents a solution that an analytical model for an induction motor and the formula of regenerative power and instantaneous torque are derived, based on the spiral vector.

The torque is controlled linearly through variations of the slip angular velocity, based on the field acceleration method (FAM). And also PWM inverter fed induction motor drives is schemed to be easily a regenerative drive.

The voltage source inverter fed induction motor drives that regenerative power occurs with back current type is presented, to easily controlled the feedback power and to proper the adaption of energy shaving drives.

The experimental tests verify the performance of the FAM, proving that good behavior of the drive is achieved in the transient and steady state operating condition, and are discussed to save the power that regenerative power is measured at the operating acceleration or deceleration of servo system.

**Key words** : spiral vector(스파이럴 벡터), field acceleration method(FAM 자계가속법), a regenerative drive(회생구동).

#### 기호설명

	$\omega_r$	: 회전자 각속도.
	$\omega$	: 전원각속도.
	$s$	: 슬립.
$R_1, R_2$		: 고정자 및 회전자 저항.
$L_1, L_2$		: 고정자 및 회전자 누설 인덕턴스.
$M$		: 상호 인덕턴스.
$K_{sw}$		: 슬립각속도 계수.
$K_{e1}$		: 여자전압 계수.
	$e_s$	: 속도기전력변수.
	$e_1$	: 여자전압변수.
	$i_0$	: 여자전류변수.

† 교신저자(부경대학교 전기제어공학부 교수), E-mail:sihong@pknu.ac.kr, Tel:051)620-1431

\* 동의대학교 전임강사

\*\* 부경대학교 전기공학과 대학원

P : 전동기 극수.

$$p = \frac{d}{dt}$$

### 1. 서 론

가변주파수 전원에 의한 유도전동기 구동은 위치/이동제어 및 자동화 시스템 등 산업 분야에 널리 사용되고 있다. 유도전동기 고성능 구동을 위한 종래의 벡터제어는 많은 연산이 요구되므로 고속 마이크로컴퓨터 또는 멀티 프로세스에 의해 계산 속도를 충족할 필요가 있다.

유도전동기 동적해석에 많이 이용되고 있는 회전 2축 이론에 의한 회로방정식은 전산기 등에 의해 수치해석은 가능하지만 과도현상 및 정상상태를 겸해서 해석하는 것은 어렵다<sup>(1),(2)</sup>.

또한 스파이랄 벡터를 이용한 3상 농형유도전동기의 상분리법(phase segregation method)으로 나타낸 모델은 변수변환을 행하지 않고 한 상의 변수만으로 과도현상과 정상상태의 해석에 적용 가능하다. 또한 스파이랄 벡터에 의한 유도전동기의 해석은 과도현상의 영향이 적게 되는 것으로 제안되고 있다<sup>(3)</sup>.

유도전동기 고성능제어는 많은 연구가 있지만 유도전동기를 이용한 서보시스템에서 회생전력의 적극적 이용을 고려한 것은 적다<sup>(4),(5)</sup>. 이것은 유도전동기 구동에 전류형 인버터(Current Source Inverter)제어가 사용되고 있는 것이 한 원인이라 생각된다. CSI제어는 회생전력의 수식표현이 역전압형으로 되기 때문에 전원에 귀환하기 위해 전류형으로 변환하는 것이 어렵다.

반면에 전압형 인버터(Voltage Source Inverter)에 의한 유도전동기 구동은 회생전력이 역전류형으로 표현 되어 귀환하기 쉽지만 전력회생의 해석 등은 확립되어 있지 않다. 또한 회생전력 제어를 위해 PWM 컨버터를 사용한 방법도 제시되어 있지만 시스템의 구성이 복잡하고 대전력의 회생에는 고가가 되는 문제점이 있다<sup>(6),(7)</sup>.

연구 목적은 지금까지 언급한 문제점들을 피하기 위해서 자계가속법(FAM : Field Acceleration

Method)에 의한 유도 전동기 회생 구동으로 속도 성과 에너지 절약형 서보 시스템을 구현하는 것이다.

본 연구는 스파이랄 벡터에 기초하여 유도전동기 순시토크 제어와 회생전력 해석을 나타내었다. 자계가속법에 기초하여 회생구동이 쉬운 전압지령형의 전압 PWM 인버터에 의한 소형 유도전동기의 속도 서보시스템을 나타내었다.

제안한 속도서보 시스템은 전력 회생이 쉽고 전력절약 구동으로서의 적용이 적합함을 알 수 있다. 또한 전압입력형 FAM법의 유효성이 확인되었고 가감속시의 소비(회생)전력을 측정하여 실제 시스템에서 전력절약 정도를 검토하였다. 전동기 고정자 저항의 측정오차나 온도변화에 의해 변동이 생기는 경우 지령전압에 오차 요소가 포함되어 여자 전압에 맥동이 생겨 출력 토크에 영향이 나타남을 알 수 있다.

### 2. 스파이랄 벡터와 유도전동기 모델

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

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

스파이랄 벡터로 나타낸 유도전동기 회로방정식은 식(2)이다.

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 + (L_1 + \frac{3M}{2})p & \frac{3M}{2}p \\ \frac{3M}{2}(p - j\omega_r) & R_2 + (L_2 + \frac{3M}{2})(p - j\omega_r) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} \tag{2}$$

식(2)은 1차 a 상, 2차 r 상만으로 상분리하여 나타낸 것이다. 속도기전력  $e_s$ 는 식(3)과 같이 정의하고 회전속도에 비례한다.

$$e_s = -j\omega_r \left\{ \frac{3M}{2} i_1 + (L_2 + \frac{3M}{2}) i_2 \right\} \tag{3}$$

식(2)의 회로방정식은 임의의 매개 파라미터  $\alpha$

들 이용하여  $\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1^a \\ i_2^a \end{pmatrix}$  으로 변환하고

$a = (L_1 + \frac{3M}{2}) / (\frac{3M}{2})$  으로 정의하면 식(4)으로 되고 1차 누설 인덕턴스가 식에 포함되지 않게 된다.

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 + \frac{3M\alpha}{2}p & \frac{3M\alpha}{2}p \\ & \frac{3M\alpha}{2}(p - j\omega_r) \\ R_2 + (L_2\alpha + \frac{3M\alpha}{2})(p - j\omega_r) & \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2^a \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (4)$$

### 3. FAM법에 의한 토크와 회생전력

#### 3.1 전동기 토크

FAM법은 여자전류를 식(5)과 같이 원 벡터에 유지하는 것이다.

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

여기서  $\phi_0$ 는 여자전류 위상이고 식(4)은 여자전류  $i_0 = i_1 + i_2^a$  들 이용해 고쳐 쓰면 식(6)이 된다.

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= R_1 i_1 + \frac{3M\alpha}{2} \pi_0 \\ 0 &= \frac{3M\alpha}{2} (p - j\omega_r) i_0 + \alpha R_2 i_2^a + L_2 \alpha (p - j\omega_r) i_2^a \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

여기서 여자전압  $e_1$ 는 식(7)으로 정의된다.

$$\begin{aligned} e_1 &= j\omega \frac{3M\alpha}{2} i_0 \\ &= j\omega \frac{3M\alpha}{2} \sqrt{2}|I_0|e^{j(\omega t + \phi_0)} \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)을 식(6)에 대입하면 2차전류의 일반해는 식(8)이다.

$$i_2^a = -\frac{s}{R_2\alpha + s\omega L_2\alpha} e_1 + A e^{-\frac{\alpha R_2}{\alpha L_2} t} e^{j\omega_r t} \quad (8)$$

식(7), (8)에서 2차전류의 크기는 식(9)으로 된다.

$$|i_2^a| = s\omega \frac{3M\alpha}{2} |I_0| \frac{\sqrt{(R_2\alpha)^2 - (s\omega L_2\alpha)^2}}{(R_2\alpha)^2 + (s\omega L_2\alpha)^2} \quad (9)$$

따라서 3상 토크는 식(5)과 식(9)에서 식(10)이다.

$$\begin{aligned} T &= \frac{9PM}{4} \text{imag}[i_0^a i_2^a] \\ &= \frac{3P}{2} \left(\frac{3M\alpha}{2}\right)^2 s\omega |I_0|^2 \frac{\sqrt{(R_2\alpha)^2 - (s\omega L_2\alpha)^2}}{(R_2\alpha)^2 + (s\omega L_2\alpha)^2} \cos\theta_1 \left(1 - e^{-\frac{R_2}{L_2} t}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $\theta_1 = \tan^{-1} \frac{s\omega L_2}{R_2}$  이고 정격 토크의 범위에서 사용하는 경우  $s\omega t \gg \theta_1$  이다. 과도 시정수는 매우 작으므로 무시하면 토크는 슬립주파수에 비례한다.

#### 3.2 FAM법에 의한 회생전력

Fig. 1은 유도전동기의 전압형 인버터 구동에서 전력회생에 플라이 백(Fly back) 스위치를 갖는 전동기 1상분의 회생동작 모델을 나타낸 것이다. 가감속시 속도기전력  $e_s$ 가 플라이 백 시스템에 의해 전원(DC)으로 변환 된다.

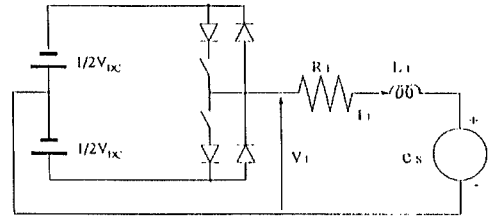


Fig. 1 A regeneration model of induction motor(1-phase)

회생전력은 슬립이 음(-)이고 부 토크 발생 때 이므로 식(10)에서 과도항을 무시하면 회생전력은 식(11)과 같다.

$$P_{RE} = \omega_r \frac{3P}{2} \left(\frac{3M\alpha}{2}\right)^2 s\omega |I_0|^2 \frac{\sqrt{(R_2\alpha)^2 - (s\omega L_2\alpha)^2}}{(R_2\alpha)^2 + (s\omega L_2\alpha)^2} \cos\theta_1 \quad (11)$$

어떤 PWM 주기에서 회생동작이 될 때 1차전류  $I_1$ 과 상전압  $V$ 는  $I_1 V < 0$ 의 조건이고 듀티비

(Duty ratio)는  $d_k$ 이면 회생되는 에너지는 식(12)이다.

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

한 PWM 주기의 평균 회생전력은  $-I_1 V_0$  이다.

### 4. 속도제어 시스템

Fig. 2는 회생전력의 제환이 쉬운 전압형 인버터에 의해 구동되는 속도제어 시스템을 나타내고 토크제어는 앞에서 도출한 전압입력형 FAM법이 다. 샘플링 속도의 고속화를 위해 소프트웨어는 어셈블리로 기술하고 정수연산을 행한다.

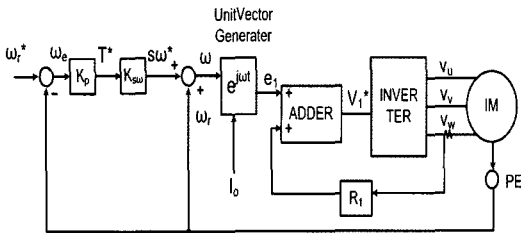


Fig. 2 VSI fed motor drive system by FAM

#### 4.1 제어 알고리즘

실험의 주목적이 토크제어 성능 조사이기 때문에 속도제어는 비례제어로 한다. 토크 지령치  $T^*$ 는 비례이득  $K_p$ 와 속도오차를  $\omega_e = \omega_r^* - \omega_r$ 로 하면 식(13)이다.

$$T^* = K_p \cdot \omega_e \quad (13)$$

토크 지령에 대응하는 슬립주파수는 식(10)에서 식(14)이 된다.

$$s\omega^* = K_{sw} \cdot T^* \quad (14)$$

식(9)에서 슬립각속도 계수는  $K_{sw} = \frac{2}{3} \frac{1}{P} \left( \frac{2}{3M\alpha} \right)^2 \cdot \frac{R_2}{|I_0|^2}$  이다. 전원 각속도  $\omega$ 는 회전자속도  $\omega_r$ 와 슬립

주파수  $s\omega$ 의 합이고, 여자전압  $e_1$ 는 식(7)에 의해 식(15)으로 구해진다.

$$e_1 = K_{e1} \omega e^{j(\omega t + \phi_0 + \frac{\pi}{2})} \quad (15)$$

여기서 여자전압 계수  $K_{e1} = \frac{2}{3} M\alpha\sqrt{2}|I_0|$ 이다. 이 여자전압에  $R_1$ 에 의한 전압강하를 보상하여 전압지령치는 식(15)이 된다.

$$V_1^* = R_1 i_1 + K_{e1} \omega \cos(\omega t + \phi_0) \quad (16)$$

Fig.3은 유도전동기 속도제어 시스템의 제어연산 흐름도를 나타낸다. Table 1은 300[W] 전동기 정수와 제어시스템 정수를 보이고 있다. 회전속도범위는 0~3000rpm이고 대응하는 동기주파수는 0~50Hz이다.  $|I_0| = 0.5$ 로 설정한다.

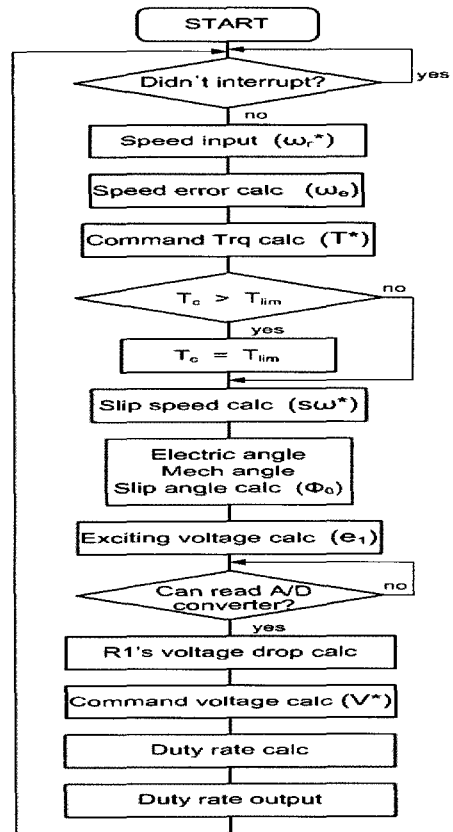


Fig. 3 The flower chart for control.

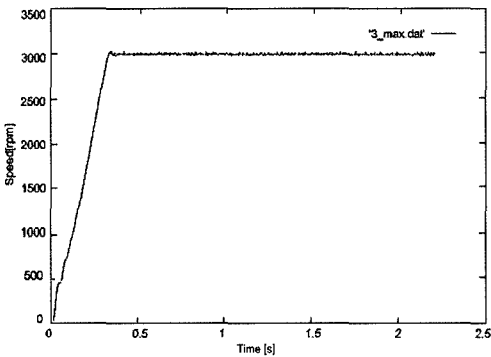
**Table 1 Motor and system parameters**

여자 전류	0.5A	$R_1$	5.86	$K_{el}$	0.1163
정격 속도	3000rpm	$R_2$	5.3	$K_{so}$	127
정격 전압	120V	$L_1, L_2$	0.164	토크 정수	0.0765
정격 전류	2.0A	$M$	0.143	토크 제한	0.54Nm

### 5. 실험검증

#### 5.1 구동실험

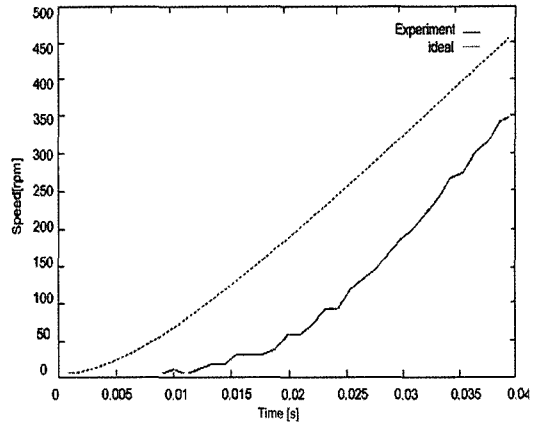
Fig. 4는 Table1의 정수를 이용하고 속도 지령치( $\omega_r^*$ )를 3000 rpm으로 했을 때의 속도응답이다. 그림에서 속도제어는 비례요소만으로 행하였지만 토크 제한이 있기 때문에 가속시 거의 일정 토크 지령이 나와 가속 부분은 일정 가속으로 되며 속도제어가 정상으로 행해지고 있는 것을 나타내고 있다.



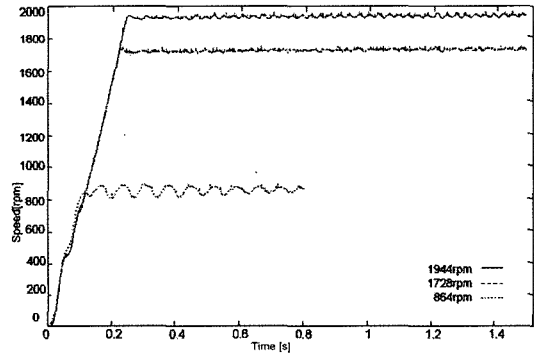
**Fig. 4 Speed response with  $\omega_r^* = 3000 \text{ rpm}$**

Fig. 5는 기동 직후 속도응답과 이론치를 시간축을 확대해서 나타낸 것이다. 속도 지령치를 준 후 가속이 시작되어 실제 정상응답이 출력 할 때까지 시간은 약 10 ms가 되었고 오버슈트가 발생하지 않는다. 이 결과에서 전압입력형 FAM법의 과도상태 영향을 확인 할 수 있다. 이론치와 실측치 사이에 오차가 있는 것은 전동기의 물리적 정수 특히 점성제동 계수가 정확하지 않기 때문이라 여겨진다.

Fig. 6은 속도 지령치 864 rpm, 1728 rpm 및 1944 rpm에 대한 속도응답을 나타낸다.



**Fig. 5 Speed response of extension with  $\omega_r^* = 3000 \text{ rpm}$  at start**



**Fig. 6 Speed response with  $\omega_r^* = 864, 1728 \text{ and } 1944 \text{ rpm}$**

모든 정수는 Table 1의 것을 이용했다. 모두 정상적으로 안정하게 동작하고 있지만 864 rpm의 저속에서는 속도맥동이 심한 것을 볼 수 있다.

전압입력형 FAM법의 지령치는 식 (16)에 나타낸 것처럼 여자전압 지령치와  $R_1$ 의 전압강하의 합으로 되기 때문에  $R_1$ 의 변동 또는 설정치의 오차는 토크 제어 성능에 큰 영향을 끼친다. Fig. 7에서  $R_1$ 의 실측치는 75°C로 환산한 5.86[Ω]을 사용하고 속도 지령치는 1728 rpm으로 한 경우 속도응답을 나타낸다.

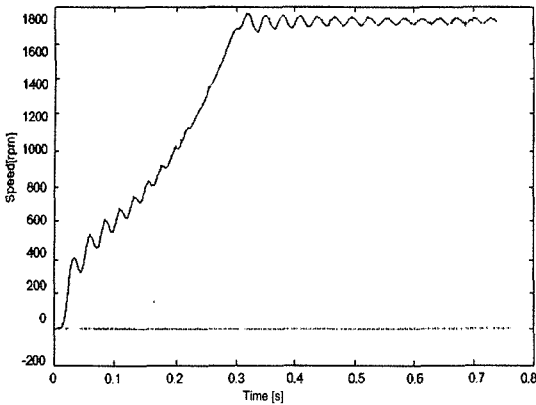


Fig. 7 The effect of speed response by change of  $R_1$

속도응답은 맥동이 크고 전류( $i_1$ )와 동기하여 맥동하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은  $R_1$ 의 측정값이 적절하지 않기 때문이라 생각된다.

전동기 정격보다도 낮은 무부하로 실험하였기 때문에 저항손실에 의한 발열이 작은 것으로 생각되어  $R_1$ 을 실온치(25°C)로 수정하여 실험하였다. Fig. 8은  $R_1$ 을 실온치로 수정하였을 때 속도응답을 나타내고 Fig. 7 보다 좋은 결과를 얻었다.

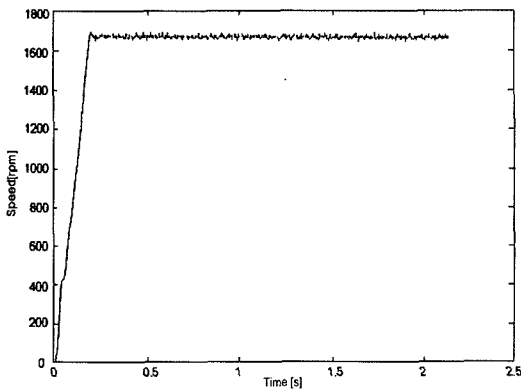


Fig. 8 Speed response after a adjustment of  $R_1$

$R_1, R_2$ 은 전동기의 온도변화에 의해 수치가 변화하기 쉽다.  $R_2$ 의 변동은 토크 과도항의 시정수와 정정치에 영향을 끼치지만 속도응답에 끼치는

영향은 비교적 적다. 그러나  $R_1$ 의 측정오차 또는 변동은  $i_0$ 의 안정성을 크게 좌우하기 때문에 제어 성능에 끼치는 영향이 크다. 한편 Fig. 7, 8을 보면  $R_1$ 의 변동은 전류에 동기한 토크의 맥동으로 나타나는 것을 볼 수 있고 식(16) 전압 지령치에서 알 수 있다.

그리고 이것은  $R_1$ 의 오차  $\Delta R_1$ 가 지령전압에 끼치는 오차전압이  $\Delta R_1 i_1$ 인 것에서 알 수 있다. 따라서 정토크 시의 토크 맥동을 감시해서  $R_1$ 의 변동을 추종해 보정하면 저속에서 속도맥동을 억제하는 것이 가능하다고 여겨진다.

5.2 회생전력

Fig. 9는 정격속도 3000 rpm에서 저속상태 1728 rpm으로 제동 할 때 속도(점선, speed/100), 전류(x축 부근의 정현파), 전압파형(실선)을 나타낸 것이다. 제동 전·후에서 전원주파수는 그대로 동기속도로 되기 때문에 이것과 비교하여 제동 중(속도응답의 뒷부분)에는 슬립이 부(-)로 되는 것을 알 수 있다.

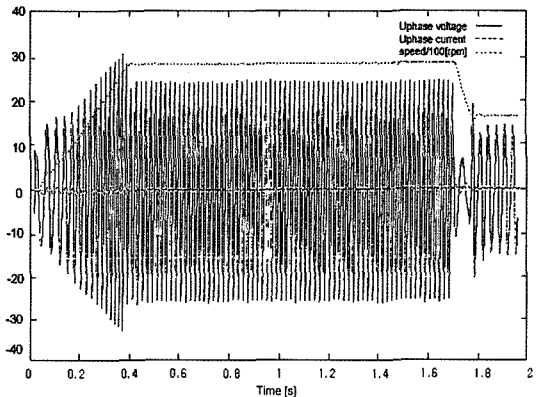


Fig. 9 Wave forms of a voltage and current at speed reduction.

Fig. 10은 같은 Fig. 9와 같은 조건의 실험에서 전압과 전류에서 회생 전력을 구해 그 결과를 도시한 것(점선)과 속도응답(실선)이다. 이것에서 제동시의 전력 회생(그림의 뒷부분)을 확인 할 수 있

다. 또 정상운전 시에 전력이 진동하고 있지만 이것은 앞에서 서술한 토크 맥동에 대응하는 것이다.

이 실험에서 발생한 회생에너지는 4.72[J]이고 소비시킨 에너지는 5.74[J]이다. 따라서 회생에너지를 모두 유효하게 이용한 경우 82%의 전력이 절약된다.

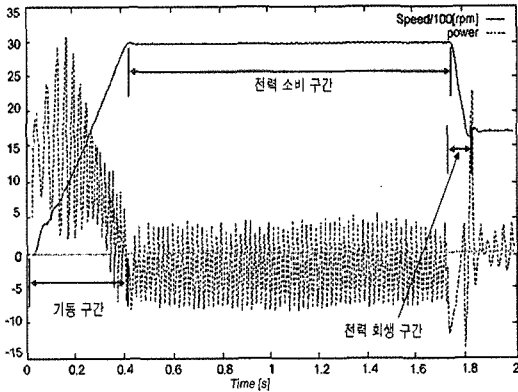


Fig. 10 A regenerative power at speed reduction.

## 6. 결 론

스파이럴 벡터에 기초하여 유도전동기 순시토크 제어와 회생전력 해석을 나타내었다. 자계가속법에 기초하여 회생구동이 쉬운 전압지령형의 전압원인 버터에 의한 유도전동기의 속도 서보시스템을 나타내었다.

회생전력의 전원으로 케환은 회생전력이 역전압형으로 생기는 전류형 인버터 제어에 비하여 역전압형으로 생기는 전압형 인버터 구동이 전력회생이 쉽고 전력절약 구동으로서의 적용이 적합함을 알 수 있다.

제한한 속도서보 시스템은 전압 입력형 FAM법의 유효성이 확인되었고 가감속시의 소비(회생)전력을 측정하여 실제 시스템에서 전력절약 정도를 검토하였다.

“본 논문은 2005년도 부경대학교 발전기금재단의 지원에 의하여 연구되었음 (과제번호 PR - 2005-012)”

## 참고문헌

- [1] D. Casadei, G. Serra, A. Tani, L. Zarri, and F. Profumo, "Performance analysis of a speed-sensorless induction motor drive based on a constant switching frequency DTC scheme," *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol. 39, no.2, pp. 476483, Mar./Apr. 2003.
- [2] J. Holtz and J. Quan, "Sensorless vector control of induction motors at very low speed using a nonlinear inverter model and parameter identification," *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol. 38, no. 4, pp. 1087-1095, Jul./Aug. 2002.
- [3] 山村 昌, 交流回路と交流機の Spiral Vector 理論, 日本 電氣學會誌, 109卷, PP. 517-523, 1992
- [4] Djordj M. Syjic and Slobodan N. Vukskoavic, "A New Induction Motor Drive Based on the Flux Vector Acceleration Method", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 1, p1299 pp. 173~180, 2005
- [5] C. Moucary, E. Mendes, and A. Razek, "Decoupled direct control for PWM Inverter-fed induction motor drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol. 38, no. 5, pp. 1307-1315, Sep./Oct. 2002.
- [6] Jinsheng Jiang and Joachim Holtz, "An Efficient Braking method for Controlled AC Drives With a Diode Rectifier Front End", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, NO. 5, pp.1299 ~ 1307, 2001
- [7] J. Jiang and J. Holtz, "An Efficient Braking method for Controlled AC Drives With a Diode Rectifier Front End", *IEEE*, pp.1446 ~ 1453, 2000.

## 저 자 소 개



### 홍순일(洪淳一)

2007 현재 부경대학교 전기제어 계측 공학부 교수, 1981 부산대학 공학석사 (전력전자), 1986 한국해양대학 공학박사 (제어공학) 1999 일본전기 통신대학 연구교수, 2000 대한전기학회 부산지부 회장. 관심분야 : 퍼지 시스템설계, 서보시스템 설계, 전동기 벡터제어, 전차 트로이선 가설 작업로봇.



### 홍정표(洪正杓)

2007년 현재 동의과학대학 전임강사, 부경대학교 기계공학부 박사과정, 1998년 부경대학교 전기공학과 졸, 2001 부산대학교 대학원 공학석사, 관심분야 : 퍼지 시스템설계, 전동기 벡터제어, 릴럭턴스 전동기 제어 설계, 전차 트로이선 가설 작업로봇.



### 정승환(鄭承環)

2007년 현재 부경대학교 전기제어 계측공학부 조교, 2004년 부경대학교 전기과 졸, 2007년 부경대학교 전기공학과 석사과정 수료, 관심분야 : 신재생 에너지 개발, 교류전동기 제어, 전동기 회생제어.