

# 유도 전동기를 이용한 플라이휠 에너지 저장 및 재생 시스템 제어 기법

손장경\*, 전태원\*, 최경진\*, 노의철\*\*, 김홍근\*\*\*  
울산대학교\*, 부경대학교\*\*, 경북대학교\*\*\*

## A Control Strategy for Flywheel Energy Storage / Recovery System with Induction Machine

J.K. Son\*, T.W. Chun\*, G.J. Choi\*, E.C. Nho\*\*, H.G. Kim\*\*\*

Dept. of Electrical Eng., Univ. of Ulsan\*, Dept. of Electrical Eng., Univ. of Pukyong\*\*,  
Dept. of Electrical Eng., Univ. of KyungPook\*\*\*

### ABSTRACT

This paper proposed a control strategy for flywheel energy/recovery system with induction machine. The system is based on a vector controlled induction machine driving a flywheel and address the problem of regulating the DC-Link system voltage against input power shut-down. And we proposed the method to damp the oscillation of DC-Link. Experimental results are presented which verify the performance of the strategy.

로서의 응용에 제한이 있었으나 전력전자 기술의 발달로 인해 농형 유도발전기의 문제점인 초기여자의 확립, 좁은 발전영역 등을 해결 할 수 있기 때문에 농형 유도 발전기의 사용은 경제적으로 볼 때 의미가 있다<sup>[2]</sup>.

본 논문에서는 슬립주파수 제어와 벡터제어를 발전기에 적용하였을 때의 특성을 비교하고, 또한 벡터제어를 이용하여 전동 모드에서 발전 모드로의 전환 시 발전전압의 과도 특성을 개선하는 기법을 제시한다. 제시된 기법은 실험을 통하여 성능을 확인하였다.

### 1. 서 론

일반적으로 전기에너지를 저장하기 위해서 배터리를 사용하고 있으나, 배터리는 효율이 낮고, 유해가스를 발생하여 환경에 영향을 많이 미치며, 수명이 짧아 주기적으로 교체해야하는 등 유지보수 비용이 높은 편이다. 반면 전기에너지를 회전체의 관성 에너지로 변환하여 필요시 저장된 에너지, 운동 에너지를 전기에너지로 변환하여 사용하는 플라이휠 에너지 저장 및 재생 시스템은 수명이 반영구적이므로 반복 사용하더라도 유지보수의 필요성이 거의 없으며 환경친화적인 장점을 가지고 있다. 또한 차지하는 공간도 배터리 방식에 비해 30~40%정도 밖에 안 되어 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 에너지 저장 시스템은 최근 들어 공급전원에 이상이 감지된 후 예비 발전기가 기동 하여 부하에 전력을 공급 가능하게 될 때까지의 수~수십 초간의 에너지 공백을 없애기 위한 단기간 에너지 저장 장치로 각광을 받고 있다<sup>[1]</sup>.

농형 유도 발전기는 대부분의 분야에서 그 특성이 만족되지 않아 부하에 전력이 공급되는 발전기

### 2. 전동기 모드 제어

전기에너지를 플라이휠의 운동에너지로 저장하기 위해 평상시 플라이휠 에너지 저장 및 재생 시스템은 전동기 모드로 제어가 된다.

#### 2.1 유도 전동기 간접 벡터 제어

그림 1은 유도전동기 벡터제어 루우프이다. q-축 기준 전류는 기준 플라이휠 속도와 실제 플라이휠 속도의 차이를 속도제어기를 통과하여 얻어지고 d-축 전류는 실제 속도에 따라 약계자 제어가 이루어진다. d-축, q-축 전류제어기에서 만들어진 기준전압  $v_d$ ,  $v_q$ 는 삼각파와 비교하여 인버터의 PWM 신호를 발생한다. 한편 d-축 전류로 회전자 자속은 식 (1)로 구해질 수 있으며, 이 회전자 자속은 d-축 전류에 대하여 회전자 시정수  $T_r$ 에 의한 시간지연이 발생된다.

$$\lambda_{dr} = \frac{L_m i_{ds}}{1 + T_r p} \quad (1)$$

슬립주파수 식은 다음과 같으며, 회전자 자속이 일정할 경우에는 q-축 전류에 비례한다.

$$w_{sl} = \frac{L_m i_{qs}}{T_r \lambda_{dr}} \quad (2)$$

이 슬립주파수와 회전자속도를 더하여 동기각속도  $w_e$ 를 계산한 후, 이 동기각속도를 적분하여 동기위상각  $\theta_e$ 를 구한다.

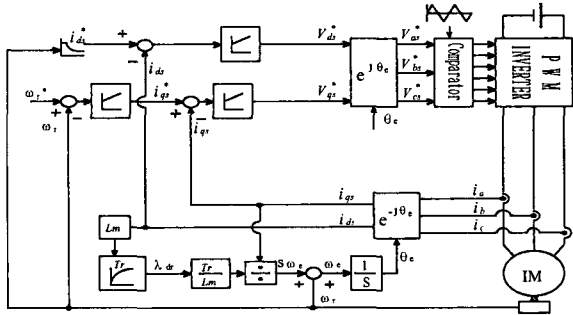


그림 1 유도전동기 벡터제어  
Fig.1 vector-controlled induction motor

## 2.2 실험 결과

실험에 사용된 유도 전동기와 플라이휠의 파라미터는 표 1과 같다. 그림 2는 기준속도를 정지 상태에서 3000rpm까지 약45초 동안 일정한 속도로 증가시켰을 때, 기준속도 및 회전자 속도, d-축 및 q-축 전류, d-축 및 q-축 전압의 과도 응답특성을 보인 것이다. 가속분 전류인 d-축 전류는 전동기 속도가 정격속도 이상일 경우 속도가 증가 시 감소되는 약계자제어가 되며, q-축 전류는 정상상태에 이르기 전까지 계속 증가가 되는 것을 볼 수 있다. 전동기속도가 정격속도 이하일 경우에는 전동기 전압은 속도에 비례하여 증가되며, 정격속도 이상일 경우에는 정격전압으로 유지된다. 전동기의 속도상승시간을 너무 짧게 설정하여, 정상상태 도달 시 속도가 overshoot가 약간 발생되고 전동기 전류 및 전압 역시 약간의 진동이 발생됨을 알 수 있다.

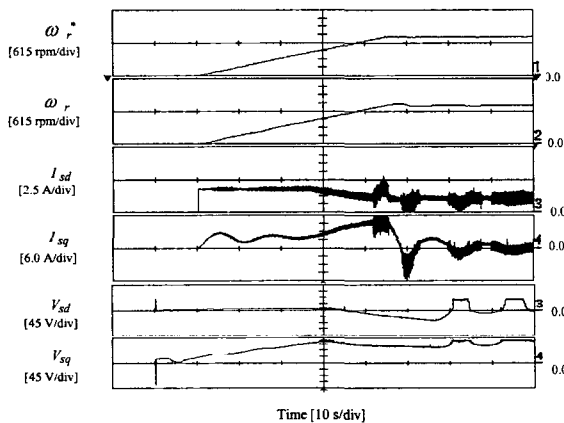


그림 2 전동기모드 과도응답 특성  
Fig.2 System response of motoring

## 3. 발전 모드 제어

전원의 정전이나 sag, swell 이 발생하였을 때에는 플라이휠에 저장되어 있는 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 부하에 원활한 전력을 공급하기위하여 유도전동기는 발전기로 동작된다. 이때 커패시터 전압은 전압 이득을 높이기 위해 400[V]로 제어된다. 슬립주파수제어와 벡터제어를 설명한다. 또한 벡터제어를 이용하여 모드 변환 시 슬립주파수 진동 억제 기법을 제시한다.

### 3.1 유도발전기 슬립주파수 제어

그림 3은 유도 발전기의 슬립주파수 제어 루우프이다. 직류링크 전압의 기준값과 실제 직류전압값을 비교하여 전압 오차 값이 PI제어기를 거치고, 이 PI제어기 출력이 유도전동기 슬립주파수가 된다. 한편 유도전동기가 발전기로 동작하기 위하여 회전자 속도가 동기속도보다 더 높아야 하므로, 동기각속도는 다음 식과 같이 회전자각속도에 제어기의 출력인 슬립각속도를 뺀 값이 된다.

$$w_e = w_r - w_{sl} \quad (3)$$

직류링크 전압이 기준 값보다 적을 경우에는 슬립각속도를 더 증가시켜 전동기각속도가 동기각속도 보다 더 크게 제어한다. 따라서 유도발전기의 출력전력을 증가시켜 직류링크 전압을 증가시킴으로써 기준 직류전압으로 실제 직류링크 전압을 제어한다. 한편 d-축 기준전압은 0으로 제어하고, 슬립제어를 위하여 q-축 기준전압은 전동기속도가 정격속도이하에서는 동기각속도에 비례한 값으로 결정되고, 전동기속도가 정격속도이상에서 동작시키기 위하여 전압 값은 정격전압 값으로 제한된다.

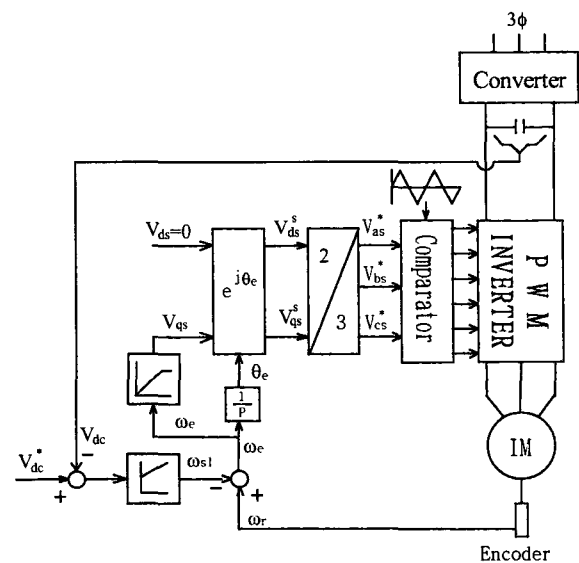


그림 3 유도발전기 슬립주파수 제어  
Fig. 3 Induction generator with slip control

### 3.2 유도발전기 벡터 제어

그림 4는 유도 발전기 벡터 제어 루우프이다. 직류링크 전압의 기준값과 실제 직류 전압 값을 비교하여 전압 오차 값이 PI제어기를 거치고, 이 PI제어기 출력이 유도기의 q-축 기준 전류가 된다. 슬립이 음이 되면, 즉 회전자회전 속도가 회전자계의 회전속도보다 커지면, 유도 전동기 기계적 출력은 음의 값이 되고 이는 유도기가 발전기로 동작함을 의미한다. 유도전동기는 동기 전동기와는 달리 고정자회로에서 여자 전류의 공급이 없으면 발전기로 동작할 수 없다. 따라서 d-축 전류는 전동기에서와 마찬가지로 정격속도 이하에서는 일정한 값으로 제어되고 정격 속도 이상에서는 d-축 전류를 감소시켜 약제자 제어를 한다.

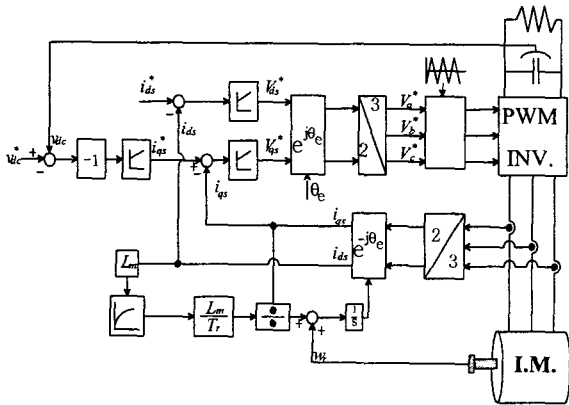


그림 4 유도 발전기 벡터 제어  
Fig.4 Vector-controlled induction generator

### 3.3 발전 모드 전환 시 과도 상태 개선 기법

벡터 제어에서 슬립은 식(2)로 계산되어진다. 회전자 자속이 일정하였을 때 슬립은 q-축 전류에 의해 결정된다.  $i_{qs}^e$ 는 리플 성분은 포함하고 있어 실제 q-축 전류로 슬립을 계산하면 슬립에 리플이 생기는 문제점이 있다. 따라서 실제로는  $i_{qs}^e$ 를 사용하지 않고  $i_{qs}^{e*}$ 를 사용해 슬립을 계산한다. 그러나 과도 상태에서  $i_{qs}^{e*}$ 를 사용해 슬립을 계산하면  $v_{dc}$  전압이 맥동하는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 슬립을 계산 시  $i_{qs}^e$ 와  $i_{qs}^{e*}$ 의 평균값으로 슬립을 계산하여  $v_{dc}$  전압이 진동하는 것을 막고 과도 상태 응답 특성을 개선하였다.

## 4. 실험 장치 및 실험 결과

### 4.1 실험 장치

그림 5는 실험장치 구성도이며 제어기는 32비트 DSP TMS320F2812를 사용하였다. DSP로 입출력

되는 모든 신호는 절연증폭기, Photocoupler, Optical Fiber를 통해 전기적으로 절연시켜 제어보드가 주변 잡음에 대해 충분한 Noise Margin을 갖도록 설계되어 있다. 그리고 D/A Converter를 이용하여 제어 알고리즘에 사용되는 변수를 오실로스코프로 관측할 수 있게 하였다. 그림 6은 실험 장치 사진이다.

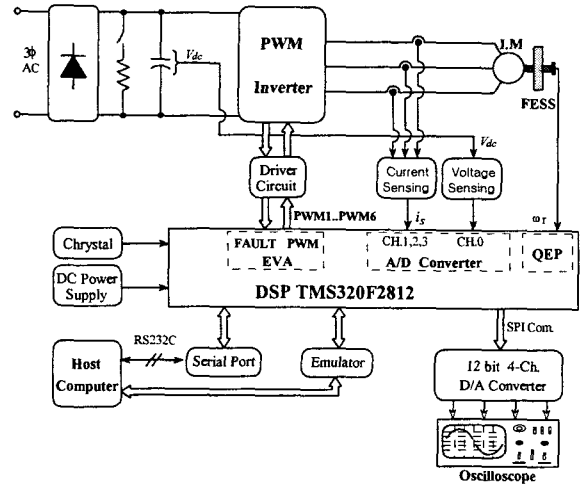


그림 5 실험 장치 구성도  
Fig. 5 System configuration

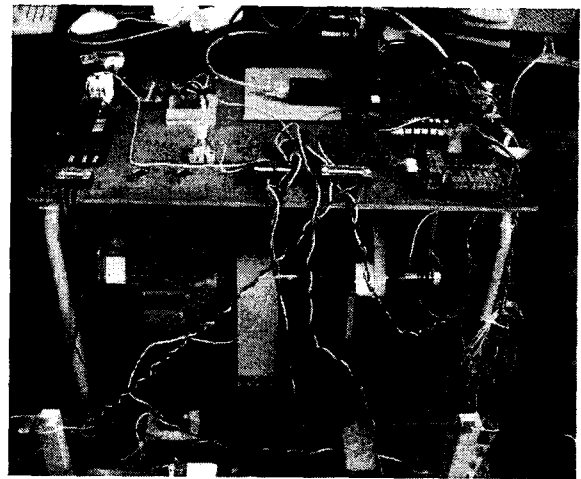


그림 6 실험 장치 사진  
Fig. 6 Photograph of experimental equipment

### 4.2 실험 결과

#### 4.2.1 발전 모드

슬립주파수와 벡터 제어 방식으로 발전시간을 비교하였다. 플라이휠을 3000rpm으로 플라이휠이 회전하고 있을 때 전원의 연결을 끊는 동시에 부하저항과 연결하여 기계적 에너지를 소비하였으며, 또한 부하저항이  $150[\Omega]$ ,  $250[\Omega]$ 에서 각각 발전특성을 비교하였다.

그림 7과 그림 8은 슬립제어와 벡터제어를 150[Ω] 부하 조건에서 이루어진 실험 파형이다. 발전시간은 슬립제어가 20초, 벡터제어가 25초로 벡터제어가 효율이 더 좋음을 볼 수 있다. 또한 정상상태에서 벡터제어가 슬립제어보다 커패시터 전압 리플 성분이 월등히 적음을 알 수 있다. 그림 9와 그림 10은 부하를 250[Ω]으로 하였을 때 커패시터 전압, 플라이휠 속도, 슬립주파수, 부하 전류 파형이다. 부하가 250[Ω] 경우 발전 시간이 각각 27초, 37초로 늘어남을 알 수 있다.

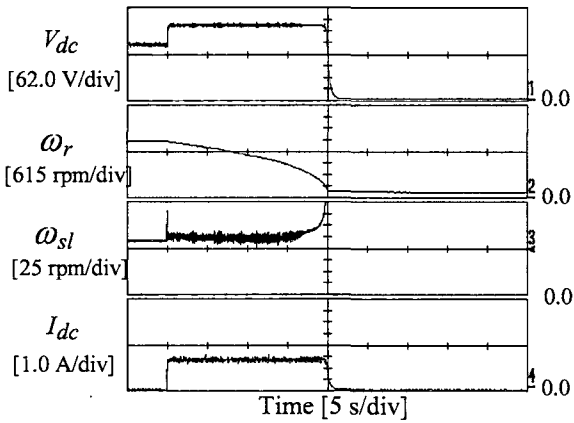


그림 7 슬립 제어 발전 파형(부하 150[Ω])  
Fig. 7 Generation with slip control(Load 150[Ω])

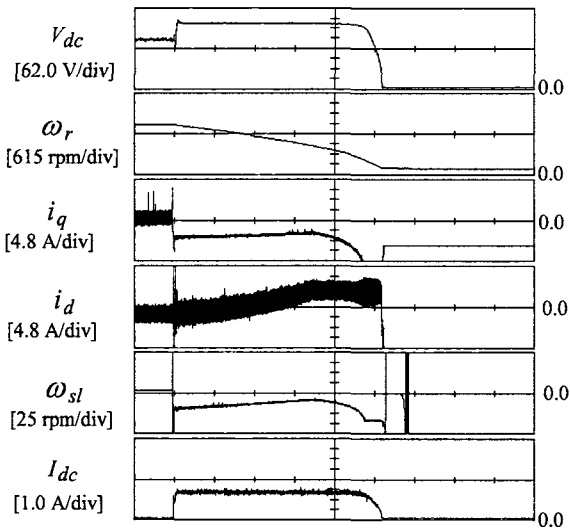


그림 8 벡터 제어 발전 파형(부하 150[Ω])  
Fig. 8 Vector-controlled generation(Load 150[Ω])

#### 4.2.2 발전기 모드 전환 시 과도 상태 개선 기법

그림 11과 그림 12는 각각  $i_{qs}^e$ 와  $i_{qs}^{e*}$ 로 슬립을 계산하였을 때의 과도 상태 응답 파형이다.  $i_{qs}^e$ 로 슬립을 계산하면 슬립주파수에 리플 성분이 포함되어 시스템 동특성이 떨어지는 것을 볼 수 있고  $i_{qs}^{e*}$ 로

계산 시 슬립주파수가 맥동하는 것을 볼 수 있다. 하지만 그림 13과 같이  $i_{qs}^e$ 와  $i_{qs}^{e*}$ 의 평균을 사용하여 슬립을 계산하면 슬립주파수에 리플 성분도 많이 줄어드는 것을 볼 수 있으며 응답 속도도 0.4초로 빠르게 응답하는 것을 볼 수 있다.

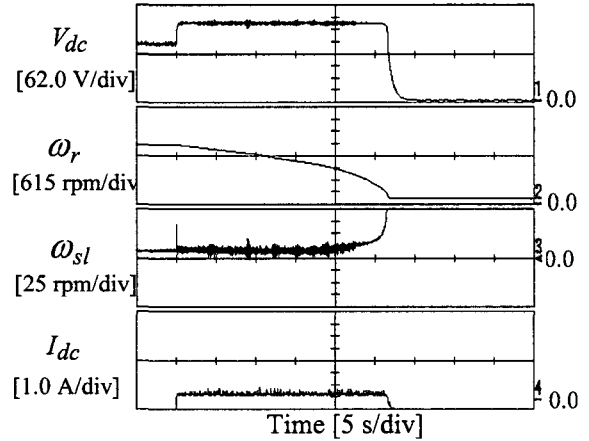


그림 9 슬립 제어 발전 파형(부하 250[Ω])  
Fig. 9 Generation with slip control(Load 250[Ω])

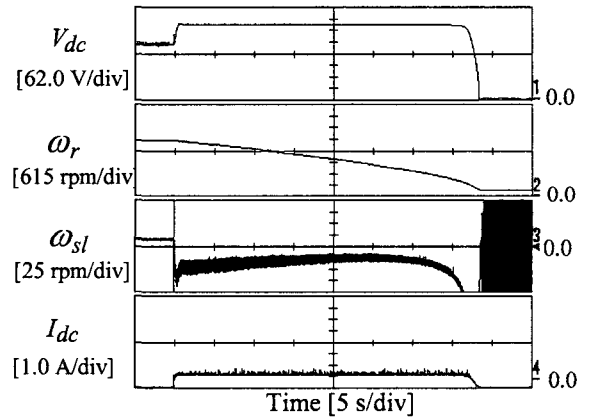


그림 10 벡터 제어 발전 파형(부하 250[Ω])  
Fig. 10 Vector-controlled generation(Load 250[Ω])

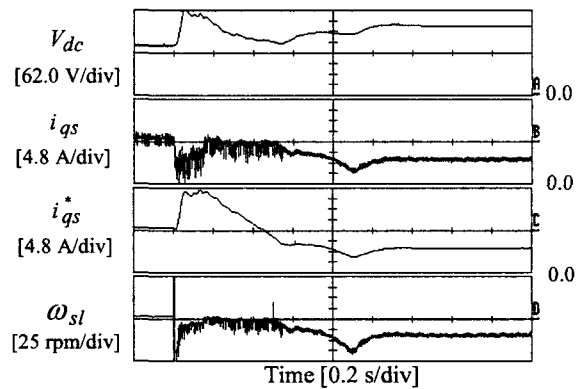


그림 11 실제 q축 전류로 슬립 계산  
Fig. 11 Slip calculation with real q-current

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초 전력 공학연구소 주관으로 수행된 과제(02-중-02)임

### 참고 문헌

- [1] N.G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities : Role of Power Electronics in Future Power System", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 76, No. 4, pp. 481-482, 1988, April.
- [2] D. Seyoum, C. Grantham, F. Rahman, " The Dynamic Characteristics of an Isolated Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine", *IEEE Trans.* Vol.39, No.4, pp936-9444, 2003
- [3] Roberto Cardenas, Greg M. Asher, John Clare, Ramon Blasco-Gimenez, " Control Strategy for Power Smoothing Using a Flywheel Driven by a Sensorless Vector-Controlled Induction Machine Operating in a Wide Speed Range", *IEEE Trans. Ind. Electron.* VOL.51, NO.3, pp603-614, June. 2004
- [4] D. W. Novotny and T. A. Lipo, *Vector Control and Dynamis of AC Drives*, Clarendon Press, 1996
- [5] R. Leidhold and G. Garcia, "Variable Speed Field-Oriented Controlled Induction Generator", *IEEE IAS Annal Meeting Conf.*
- [6] M. Ohta, M. Naruto, A. Kaga, H. Obi, N. Nakamo, "Advanced AC Propulsion with High Power GTO and Direct Digital Control for Electric Rolling Stock", *IEEE IAS Annual Meeting*, 1983

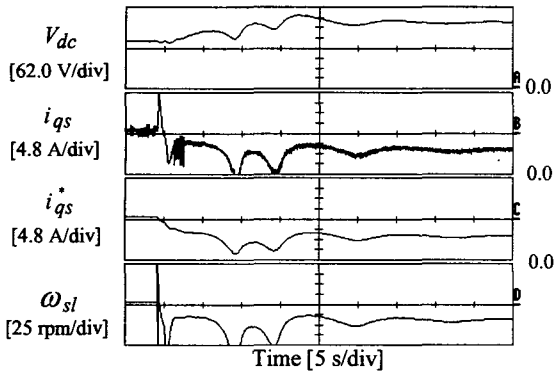


그림 12 기준 q축 전류로 슬립 계산  
Fig.12 Slip calculation with reference q-current

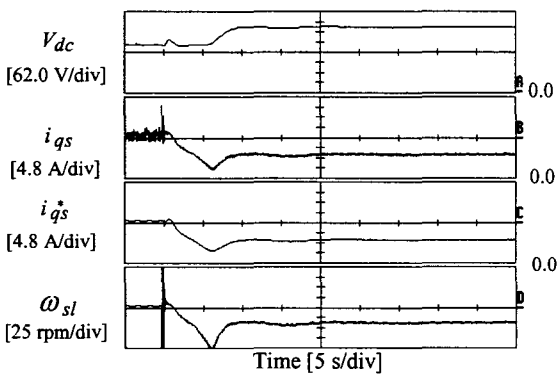


그림 13 평균값으로 슬립 계산  
Fig. 13 Slip calculation with proposed method

### 5. 결 론

본 논문에서는 유도 전동기의 발전 방법 중 대표적인 방법, 슬립주파수 제어와 벡터 제어를 비교 분석하였다. 또한 벡터 제어 시 전동기모드에서 발전 모드로의 전환과정에서 슬립주파수가 진동하는 것을 막는 기법을 제시하였다. 향후 플라이휠 에너지 저장 시스템을 이용한 UPS 등과 같은 실제 응용에 관한 연구가 이루어 져야 할 것이다.

표 1 유도기, 플라이휠 파라미터

유도기	용량	3.7 [KW]
	정격속도	1730 [rpm]
	정격전압	220 [V]
	정격 전류	15 [A]
	고정자 저항 $R_s$	0.59 [ $\Omega$ ]
	회전자 저항 $R_r$	0.425 [ $\Omega$ ]
	고정자 인덕턴스 $L_s$	52.47 [mH]
	회전자 인덕턴스 $L_r$	52.83 [mH]
	자기 인덕턴스 $L_m$	50.12 [mH]
	관성모멘트 $J$	0.13 [ $\text{Kg}\cdot\text{m}^2$ ]
플라이휠	지름	170 [mm]
	두께	80 [mm]
	관성모멘트 $J$	0.81 [ $\text{Kg}\cdot\text{m}^2$ ]
	재질	철