

## 유도기를 이용한 플라이휠 에너지 저장 및 재생 시스템 제어 기법

孫壯庚<sup>†</sup>, 全泰園<sup>†</sup>, 李弘熙<sup>\*\*</sup>, 魯義哲<sup>\*\*\*</sup>, 金興根<sup>\*\*\*\*</sup>

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

Jang-Kyung Son, Tae-Won Chun, Hong-Hee Lee, Eui-Cheol Nho, and Heung-Gun Kim

#### 요 약

본 논문에서는 플라이휠에너지를 이용한 다이나믹 UPS 시스템에서 유도기를 이용하여 플라이휠의 에너지를 저장 및 재생하는 시스템 제어 기법을 제시하였다. 유도발전기의 슬립주파수 제어와 벡터제어 기법의 특성을 비교하고, 또한 벡터제어 기법을 사용 시 전동 모드에서 발전 모드로의 전환할 때 직류링크 커패시터 전압의 과도 특성을 개선하는 기법을 개발하였다. 32비트 DSP를 사용한 실험을 통하여 이 기법의 성능을 확인하였다.

#### ABSTRACT

The paper proposed a control strategy for flywheel energy/recovery system with induction machine at the dynamic UPS system using the flywheel stored mechanical energy. The performances for the vector controlled induction generator are compared with those for the induction generator using slip control method. The strategy to improve the transient responses for dc link capacitor voltage is suggested at the transition from the motoring mode to the generating mode. The strategy proposed by the paper is verified with experiment results using 32bit DSP.

**Key Words** : Flywheel, dynamic UPS, induction generator, vector control, slip control

### 1. 서 론

일반적으로 UPS에서 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 플라이휠의 관성 에너지로 변환하여 필요시 저장된 에너지, 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 사용하는 다이나믹 UPS는 수명이 반영구적이므로 반복 사용하더라도 유지보수의 필요성이 거의 없고 환경친화적인 장점을 가지고 있다. 또한 공간도 배터리 방식에 비해 30~40%정도 절약할 수 있다. 이러한 장점들 때문에 최근 들어 공급 전원에 이상이 감지된 후 예비 발전기가 기동하여 부하에 전력을 공급 가능하게 될 때까지의 수~수십 초 간의 에너지 공백을 없애기 위한 단기간 에너지 저장 장치로 다이나믹 UPS에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>[1-3]</sup>.

플라이휠 구동용 기기로 영구자석형 동기전동기/발

<sup>†</sup>교신저자 : 정회원, 울산대, 전기전자정보시스템공학부 교수  
E-mail : twchun@mail.ulsan.ac.kr

<sup>\*</sup>정회원, 울산대 대학원 전기전자정보시스템공학부 졸업(석사)

<sup>\*\*</sup>정회원, 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수

<sup>\*\*\*</sup>정회원, 부경대 공대 전기제어계측공학부 부교수

<sup>\*\*\*\*</sup>정회원, 경북대 전자전기공학부 교수

접수일자 : 2004. 12. 21      1차 심사 : 2005. 8. 23

2차 심사 : 2005. 9. 6      심사완료 : 2005. 9. 8

전기와 유도전동기/발전기를 많이 사용되고 있다. 영구 자석형 동기전동기/발전기는 회전속도가 높은 고속 플라이휠에 많이 사용되며 발전기로 운전 시 유도기기에 비하여 제어가 더 간단하며 효율이 더 높다는 장점이 있다. 이에 비하여 유도발전기는 초기 여자확립 등 제어가 조금 더 어려우며 효율이 떨어진다는 단점이 있으나 설치비용이 저렴하다는 장점이 있다<sup>[45]</sup>.

따라서 본 논문에서는 유도기를 이용하여 플라이휠의 에너지를 저장 및 재생하는 시스템 제어 기법을 제시하였다. 유도발전기의 슬립주파수 제어와 벡터제어 기법의 특성을 비교하고, 또한 벡터제어기법을 사용 시 전동 모드에서 발전 모드로의 전환할 때 커패시터 전압의 과도 특성을 개선하는 기법을 제시하고, 실험을 통하여 이 기법의 성능을 확인하였다.

## 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 플라이휠에 에너지를 저장하기 위한 유도 전동기 벡터제어 루프이다.

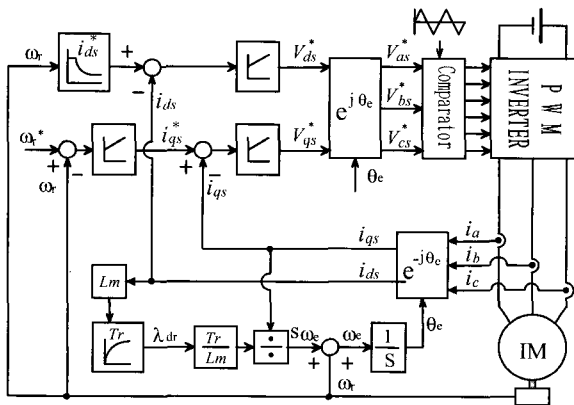


그림 1 유도전동기 벡터제어  
Fig. 1 Vector control of induction motor

속도제어 및 회전자속제어를 수행하며 정격속도 이상 운전 시 자속분 전류인 d축 전류를 감소시키는 약계자 제어를 수행한다. 기준3상 전압과 삼각파와 비교하여 인버터의 PWM 신호를 발생시키는 삼각파비교 방식을 사용하였다. 한편 d축 전류로 회전자 속을 계산한 후 슬립주파수는 다음 식과 같이 회전자 자속

과 q축 전류로 구해진다<sup>[6]</sup>.

$$w_{sl} = \frac{L_m i_{qs}^e}{T_r \lambda_{dr}} \quad (1)$$

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

### 2.2 실험 결과

용량이 3.5[KW]인 유도기와 관성모멘트가 0.81 [Kg·m<sup>2</sup>]인 플라이휠로 실험을 수행하였으며, 유도기와 플라이휠의 정격과 사양은 표 1과 같다.

표 1 유도기와 플라이휠의 정격과 사양

Table 1 Specification and parameters for induction machine and flywheel

|      |                |                           |
|------|----------------|---------------------------|
| 유도기  | 용량             | 3.7 [KW]                  |
|      | 정격속도           | 1730 [rpm]                |
|      | 정격전압           | 220 [V]                   |
|      | 정격 전류          | 15 [A]                    |
|      | 고정자 저항 $R_s$   | 0.59 [Ω]                  |
|      | 회전자 저항 $R_r$   | 0.425 [Ω]                 |
|      | 고정자 인덕턴스 $L_s$ | 52.47 [mH]                |
| 플라이휠 | 회전자 인덕턴스 $L_r$ | 52.83 [mH]                |
|      | 자기 인덕턴스 $L_m$  | 50.12 [mH]                |
|      | 관성모멘트 $J_M$    | 0.13 [Kg·m <sup>2</sup> ] |
|      | 반경             | 170 [mm]                  |
|      | 두께             | 80 [mm]                   |
|      | 관성모멘트 $J_f$    | 0.81 [Kg·m <sup>2</sup> ] |
|      | 재질             | 철                         |

그림 2는 기준속도를 정지상태에서 3000rpm까지 약 45초 동안 기준속도로 증가시켰을 때, 기준속도 및 회전자 속도, d축 및 q축 전류의 과도 응답특성을 보인 것이다. 자속분 전류인 d축 전류는 전동기속도가 정격속도 이상일 경우 속도가 증가 시 감소되는 약계자제어가 되며, q축 전류는 과도상태에서는 전동시 속도를 기준속도로 제어하기 위하여 양의 값을 가지나 정상상태에서는 플라이휠의 관성부하이므로 거의 0으로 제어된다.

이 플라이휠 구동장치에서 축적된 에너지는 다음 식과 같이 전체 관성모멘트는 플라이휠 관성모멘트에 전 동기 회전자 관성모멘트를 합친 것이며, 유도전동기가 3000rpm 운전 시 약 46,400[J]의 기계적 에너지가 축적된다.

$$E = \frac{1}{2} (J_f + J_M) \omega_r^2 = \frac{0.94}{2} (2\pi \times 50)^2 = 46,400 J \quad (2)$$

따라서 손실을 무시할 경우에는 2[KW] 부하에 연속적으로 약 23.2초 동안 공급할 수 있다.

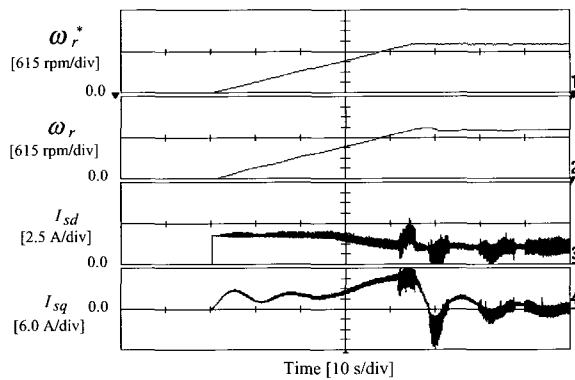


그림 2 전동모드 시 과도응답 특성  
Fig. 2 Transient response at motoring mode

### 3. 발전 모드 제어

3상 교류전원의 정전이나 sag, swell 이 발생하였을 때에는 플라이휠에 저장되어 있는 운동에너지를 전기 에너지로 변환하여 부하에 원활한 전력을 공급하기 위하여 유도전동기는 발전기로 동작된다. 이때 직류링크 커패시터 전압은 전압 이득을 높이기 위해 400[V]로 제어되며, 유도발전기의 슬립주파수제어와 벡터제어 기법을 각각 설명한다. 또한 벡터제어기법을 사용할 경우 전동모드에서 발전모드로 전환 시, 커패시터 전압의 진동을 억제시키는 기법을 제시한다.

#### 3.1 유도발전기 슬립주파수 제어

그림 3은 유도가 발전기로 동작 시 주파수 변화에 대하여 정격속도에 대한 전동기 속도의 비를 백분율한 값에 대한 발전기 토크 특성을 보인 것이다. 전동기 속도가 일정 시 주파수가 증가되면 즉 슬립주파수가 증가되면 토크 즉 발전 전력이 증가됨을 알 수 있다.

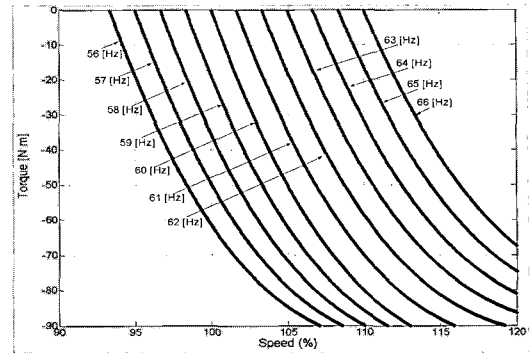


그림 3 유도발전기의 속도-토크 특성  
Fig. 3 Speed-torque characteristic curve of induction generator

그림 4는 그림 3에서 보여준 특성을 이용한 유도 발전기의 슬립주파수 제어 루프이다.

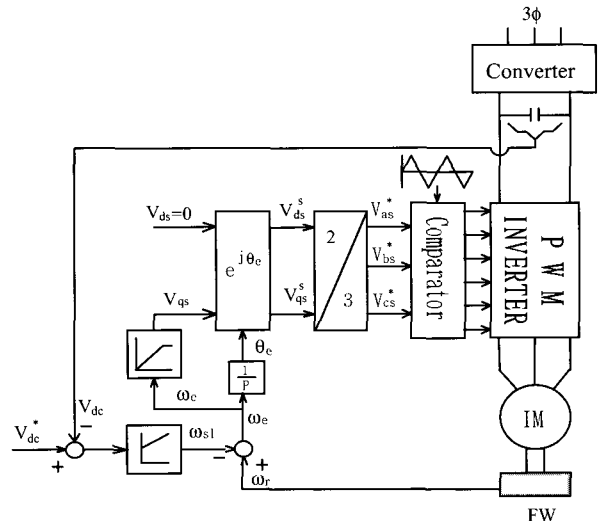


그림 4 유도발전기 슬립주파수 제어  
Fig. 4 Slip control of induction generator

직류링크 전압의 기준값과 실제 직류전압 값을 비교하여 전압 오차 값을 PI제어기를 거치고, 이 PI제어기 출력이 유도전동기 슬립주파수가 된다. 한편 유도전동기가 발전기로 동작하기 위하여 회전자 속도가 동기속도보다 더 높아야 하므로, 동기각속도는 회전자각속도에 제어기의 출력인 슬립각속도를 뺀 값이 된다.

직류링크 전압이 기준 값보다 적을 경우에는 슬립각속도를 더 증가시켜 전동기각속도가 동기각속도 보다 더 크게 제어한다. 한편 q축 기준전압은 전동기속도가 정격속도이하에서는 동기각속도에 비례한 값으로 결정되고, 전동기속도가 정격속도이상에서 동작시키기 위하여 전압 값은 정격전압 값으로 제한된다.

### 3.2 유도발전기 벡터 제어

유도 발전기 벡터 제어 루프하기 위하여 그림 1의 유도전동기 벡터제어에서 그림 5에서와 같이 속도제어 대신 직류링크 전압을 제어하고, 직류링크전압 제어기의 출력은 기준 q축 전류가 된다. 이 q축 전류를 음의 값으로 제어함으로써 슬립 값이 음이 되어 유도기가 발전기로 동작된다. 그리고 유도기는 동기 발전기와 달리 외부 여자전류의 공급이 없으므로 자속분 전류인 d축 전류를 유도전동기에서와 마찬가지로 약계자 제어를 수행하여 발전 중에 최적의 전동기 자속 값으로 유지시킨다.

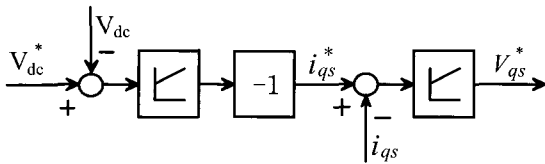


그림 5 유도발전기 벡터제어  
Fig. 5 Vector controlled induction generator

### 3.3 발전 모드 전환시 과도 상태 개선 기법

플라이휠 구동시스템은 정상시에 전동모드로 운전하고 있을 때 직류링크 커패시터 전압이 약 300[V] 정도로 유지하며, 전원에 문제가 발생되어 전동모드에서 발전모드로 전환 시 발전모드에서는 이 커패시터전압을 400[V]로 증가되어 제어된다. 이 모드 전환 시 슬립이 갑자기 변화되고 이 슬립에 비례하는 q축 전류 역시 급격히 변화됨으로써, 커패시터 전압에 overshoot 발생 또는 기준 전압 값인 400[V]로 수렴하는 시간에 큰 영향을 준다.

본 논문에서는 발전모드 전환 시 커패시터 전압의 과도응답 특성을 개선하기 위한 기법을 제시하였다. 회전자 자속이 일정하였을 때 슬립은 q축 전류에 의해 결정된다. 따라서 실제 q축 전류를 슬립계산에 사용할 경우에는 모드 전환 시 이 q축 전류가 급격히 상승되고 따라서 슬립 역시 빠르게 상승되고 또한 실제 q축 전류에 포함된 리플 성분으로 인하여 커패시터 전압에 모드 전환시점에서 overshoot가 발생된다. 이번에는 기준 q축 전류로 슬립 계산 시에는 슬립에 리플성분은 없으나 과도상태에서는 기준 q축 전류와 실제 전류사이의 오차가 많이 있으므로 커패시터 전압에 맥동이 발생되면서 기준값으로 수렴시간이 길어진다. 따라서 본 논문에서는 슬립을 계산 시 식 (3)와 같이 기준 q축 전류와 실제 q축 전류의 평균값으로 슬립을 계산하여 커패시터전압의 overshoot를 억제하면서 과도 상태

응답 특성을 개선하고자 한다.

$$w_{sl} = \frac{L_m}{T_r \lambda_{dr}} \frac{i_{qs}^e + i_{qs}^*}{2} \quad (3)$$

## 4. 실험 결과

### 4.1 실험 장치

플라이휠 구동시스템을 제어하기 위하여 클럭주파수가 150MHz에 32비트 DSP TMS320F2812를 사용하였으며, 그림 6은 이 DSP를 사용한 실험장치 구성도이다.

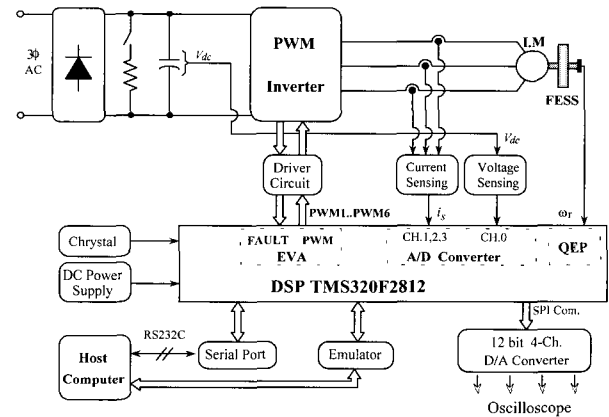


그림 6 실험 장치 구성도  
Fig. 6 System configuration

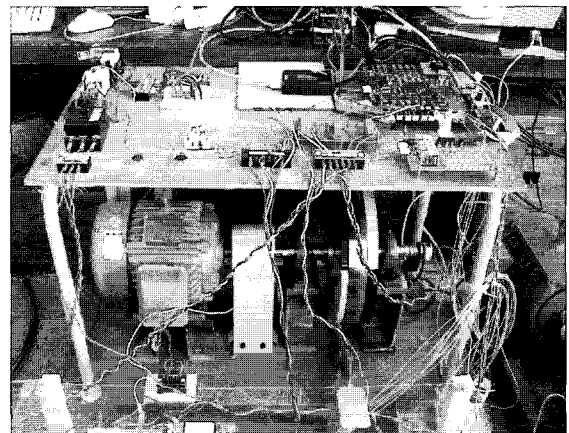


그림 7 실험장치 사진  
Fig. 7 Photograph of experimental equipment

이 DSP로 입출력 되는 모든 신호 즉 커패시터 전압, 3상 교류 전압 및 전류, 엔코더 펄스, PWM 신호

등은 절연증폭기, photocoupler, 광섬유를 통해 전기적으로 절연시켜 제어보드가 주변 잡음에 영향을 최소화시키는 설계를 하였다. 그리고 전압 및 전류값은 DSP 내부 A/D 컨버터, 엔코더 펄스는 QEP 기능을 사용함으로써 주변회로를 간략시켰다. 12비트 4-채널의 D/A 컨버터를 이용하여 제어 알고리즘에 사용되는 주요 변수를 오실로스코프로 관측할 수 있게 하였다. 한편 그림 7은 실험 장치 사진이다.

4.2 실험 결과

4.2.1 발전 모드

유도기가 발전모드로 동작 시 슬립주파수 제어방식과 벡터 제어 방식의 발전특성을 서로 비교하였다. 플라이휠을 3000rpm으로 플라이휠이 회전하고 있을 때 발전모드로 전환하기 위하여 전원의 연결을 끊는 동시에 부하저항과 연결하여 기계적 에너지를 소비하였으며, 부하가 1.2[KW], 0.7[KW]에서 각각 발전특성을 비교하였다.

그림 8과 9는 슬립주파수 제어와 벡터제어를 1.2[KW] 부하 조건에서 이루어진 실험결과이다.

그림 8에서 커패시터 전압은 발전모드 시 400[V]로 제어되고 플라이휠에 축적된 에너지가 감소함에 따라 속도에 감소되며, 음의 값을 가지는 슬립, a상전류를 보인 것이다. 그림 9에서는 벡터제어 시 커패시터전압, 속도, d축 및 q축 전류, a상 교류전류의 응답을 보인 것이다. 자속분 전류인 d축 전류는 정격속도이상에서는 속도가 감소함에 따라 증가되고, q축 전류는 음의 값으로 제어되어 유도기가 발전기로 동작한다.

두 제어방식에서 발전시간을 비교하면 슬립제어 시 약 20초, 벡터제어 시 약 24초로 벡터제어의 발전시간이 슬립제어에 비하여 약 20%이상 증가됨을 알 수 있다. 즉 벡터제어가 발전모드에서 자속분 전류를 분리 제어함으로써 자속을 최적 값으로 유지시킬 수 있으나, 슬립제어에서는 과도한 자속이 발생될 수 있다. 따라서 같은 부하조건에서 슬립 제어 시 a상 전류 크기가 벡터제어보다 더 크게 됨을 알 수 있다.

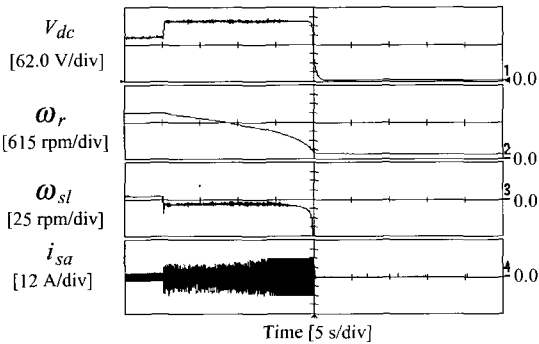


그림 8 슬립제어 발전특성 (부하 1.2[KW])  
Fig. 8 Generating responses of slip control (Load= 1.2[KW])

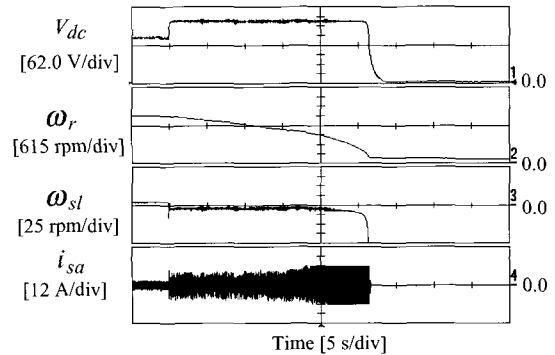


그림 10 슬립제어 발전특성 (부하 0.7[KW])  
Fig. 10 Generating responses of slip control (Load=0.7[KW])

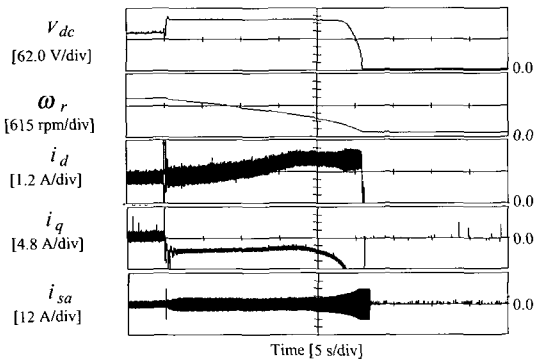


그림 9 벡터제어 발전특성 (부하 1.2[KW])  
Fig. 9 Generating responses of vector control (Load=1.2[KW])

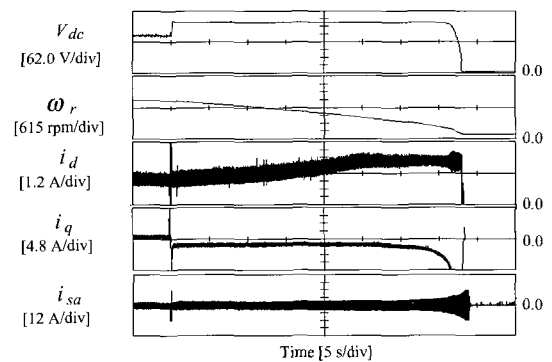


그림 11 벡터제어 발전특성 (부하 0.7[KW])  
Fig. 11 Generating responses of vector control (Load=0.7[KW])

그림 10과 11은 부하를 0.7 [KW]로 감소시켰을 때 슬립주파수 제어와 벡터제어의 실험결과를 각각 보인 것이다. 부하가 감소됨에 따라 부하전류, 슬립값 등이 감소되고, 발전시간은 더 증가되지만 벡터제어할 경우 슬립제어보다 역시 발전시간이 더 증가됨을 알 수 있다.

**4.2.2 발전기 모드 전환시 과도응답 실험결과**

그림 12, 13, 14는 발전모드로 전환 시 슬립계산에서 실제 q축 전류를 사용할 경우, 기준 q축 전류를 사용할 경우, 두 전류의 평균값을 사용하였을 경우 커패시터 전압과 함께 전동기 q축 전류, 기준 q축전류 및 슬립주파수의 과도응답 특성에 대한 실험결과를 각각 보인다.

그림 12와 같이 슬립계산에서 실제 q축 전류를 사용하였을 경우는 급격한 q축 전류의 변화 및 리플성분에 의해 커패시터 전압에 overshoot가 발생된다. 그림 13과 같이 기준 q축 전류로 슬립계산 시 커패시터 전압에 맥동이 발생되며 기준값에 수렴시간이 길어진다.

그림 14는 두 q축 전류의 평균값을 사용할 경우 실험결과에서 보면 커패시터 전압이 overshoot없이 빠르게 수렴됨을 보여준다.

**5. 결 론**

본 논문에서는 플라이휠 에너지를 사용하는 다이나믹 UPS시스템에서 유도기를 이용하여 플라이휠의 에너지를 저장 및 재생하는 시스템 제어 기법을 제시하였다. 유도발전기를 벡터제어로 하였을 경우 부하의 상관없이 슬립제어 보다 발전되는 시간이 약 20%이상 증가되었다. 그리고 기준 q축 전류와 실제 전류의 평균값으로 슬립을 계산할 경우 전동 모드에서 발전 모드로의 전환할 때 커패시터 전압의 과도 응답 특성이 많이 개선됨을 시험결과로 확인하였다. 향후 플라이휠 에너지 저장 시스템을 이용한 UPS 시스템에 이 기법을 적용하는 연구를 수행할 예정이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제(02-중-02)임

**참 고 문 헌**

[1] N.G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities

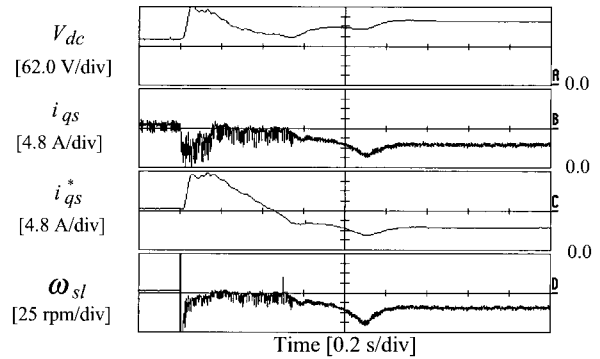


그림 12 실제 q축 전류로 슬립 계산  
Fig. 12 Slip calculation with real q-axis current

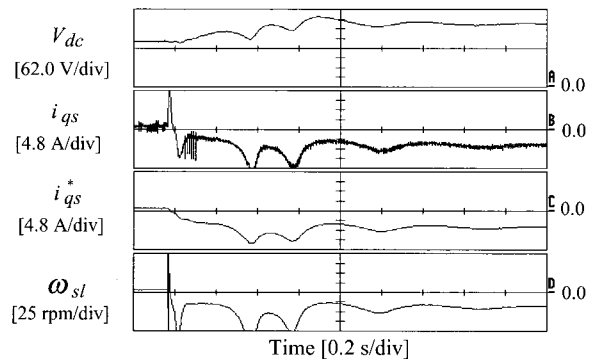


그림 13 기준 q축 전류로 슬립 계산  
Fig. 13 Slip calculation with reference q-axis current

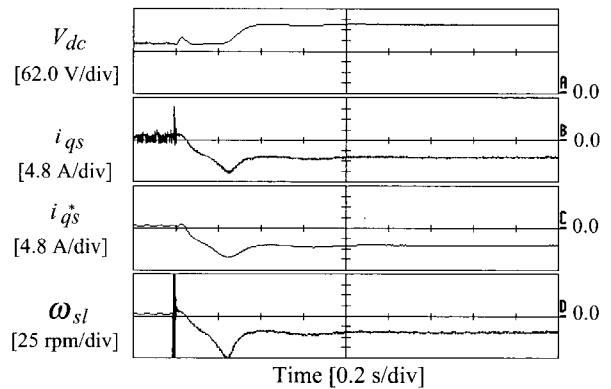


그림 14 평균 q축 전류 값으로 슬립 계산  
Fig. 14 Slip calculation with average q-axis current

: Rule of Power Electronics in Future Power System", Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 4, pp. 481-482, 1988, April.  
[2] 홍순찬, " 브리지 전력시스템-Flywheel UPS를 중심으로 -", 전력전자학회지 8권 2호, 2003년 4월, pp. 43-49.

- [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] R.G. Lawrence K. L. Craven, and G. D. Nichols, "Flywheel UPS," IEEE Industry Applications Magazine, May/June, pp. 44-50, 2003.
- [5] H.Darrelmann, "Comparison of High Power Short Time Flywheel Storage Systems", Proceedings of the IEEE INTELEC '99, pp.30-32, 1999.
- [6] D. W. Novotny and T. A. Lipo, *Vector Control and Dynamis of AC Drives*, Clarendon Press, 1996.



**김흥근(金興根)**

1956년 4월 24일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과(공학박). 1990년~1991년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수. 현재 경북대 전자전

기공학부 교수.

저 자 소 개



**손장경(孫壯庚)**

1978년 10월 3일생. 2003년 울산대 전기공학부 졸업. 2005년 울산대 대학원 전기전자정보시스템공학부 졸업(석사).



**전태원(全泰園)**

1959년 1월 30일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997~1997년 Univ. of Tennessee 방문교수. 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수.



**이홍희(李弘熙)**

1957년 10월 5일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994~1995년 Texas A&M 방문교수. 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수.



**노의철(盧義哲)**

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학박). 1997년~1998년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수.

1995년~현재 부경대 공대 전기제어계측공학부 부교수.