

# 슬라이딩 모드 기반의 이중여자 유도형 풍력발전시스템의 직접전력제어기법

金元相\*, 沈暲勳\*, 李敎範†, 鄭炳昌\*\*, 宋丞鎬\*\*\*

## Sliding-Mode Based Direct Power Control of a Doubly Fed Induction Generator for Wind Turbines

Won-Sang Kim, Gyung-Hun Sim, Kyo-Beum Lee, Byoung-Chang Jeong and Seung-Ho Song

### 요 약

본 논문은 이중여자 유도형(DFIG) 풍력발전시스템에서 유효전력과 무효전력을 직접적으로 제어하기 위한 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기법을 제시한다. 제안하는 제어기법은 슬라이딩 모드 기반의 전력제어기부와 전력회로부의 스위칭 지령값을 위한 공간전압벡터변조방식(SVM)으로 구성된다. 본 논문에서 제안하고 있는 공간전압벡터 변조방식을 이용한 슬라이딩 모드 기반의 전력제어기법은 고정된 스위칭 주파수에서 기기상수의 변화에 강인한 전력제어가 가능하고, 기존의 자속기준제어기법(FOC)에서 사용되었던 전류제어기와 축변환 없이 직접적으로 전력을 제어함으로써 제어구조가 간단하다. 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 제안하는 제어기법의 타당성을 확인한다.

### ABSTRACT

This paper presents a sliding mode controller (SMC) to directly control the active and reactive powers of a doubly fed induction generator (DFIG) for wind turbines. Sliding-mode control (SMC) and space-vector modulation (SVM) are combined to ensure high-performance operation. SMC scheme is designed to provide robust and fast power controls without frame transformation and current controller used in the conventional FOC drive. Simulation results and experimental results demonstrate that proposed methods preserve the effectiveness and robustness during variations of active and reactive power.

**Key Words** : Sliding mode controller, Doubly fed induction generator, Space-vector modulation, Frame transformation, Current controller, Field oriented control(FOC)

### 1. 서 론

이중여자 유도형 풍력발전 시스템은 가변속 운전방식으로서, 높은 효율과 4상한 유효전력 및 무효전력

특성과 규모가 작은 전력용 컨버터 등과 같은 장점들이 있기 때문에 최근에 풍력발전에서 많이 적용되고 있다<sup>[1]</sup>. 이중여자 유도형 발전기를 이용한 풍력발전 시스템은 그림 1에서 보듯이 발전기의 고정자가 계통에 직접적으로 연결되어있고 회전자는 슬립링을 통해 두 개의 컨버터에 연결되어 있다. 여기서 회전자에 연결되어 있는 컨버터를 회전자 측 컨버터라 하고 계통에 연결되어있는 컨버터를 계통 측 컨버터라 한다.

가변속 시스템은 기존의 고정속도 시스템에 비해 기계적인 스트레스의 감소와 전력변동을 줄일 수 있는

†교신저자 : 정회원, 아주대 전자공학부 조교수  
E-mail : jkyl@ajou.ac.kr  
\*정회원, 아주대 전자공학과 석사과정  
\*\*정회원, LS 산전 선임연구원  
\*\*\*정회원, 광운대 전기공학과 부교수  
접수일자 : 2007. 12. 5            1차 심사 : 2007. 12. 27  
2차 심사 : 2008. 2. 20            심사완료 : 2008. 3. 7

동적인 특성이 개선되는 장점이 있다<sup>[2]</sup>. 지금까지 이중 여자 유도형 풍력발전기의 제어기법과 성능평가는 발전기의 슬립에 따른 운전특성에 집중되어 왔다. 예를 들면 회전자 유효전력은 발전기 슬립이 영보다 작을 때 고정자에서 계통으로 전달되고 영보다 클 때는 반대방향으로 전달된다. 고정자 유효전력과 무효전력은 독립적으로 고정자 자속기준제어기법을 이용해서 제어된다<sup>[3]</sup>. 이러한 이유로 직류단 커패시터에 두 개의 컨버터를 연결하여 사용한다. 여기서 계통 측 컨버터는 직류단 전압과 계통의 무효전력을 제어하며, 동기 기준 좌표계를 이용한 자속기준제어기법으로 제어된다. 회전자 측 컨버터는 계통으로 전달되는 고정자 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어하며, 역시 자속기준 제어기법으로 제어된다<sup>[4]</sup>. 잘 알려진 자속기준제어기법의 단점은 고정자저항, 회전자 저항과 인덕턴스 등과 같은 기기상수들에 의해 성능이 크게 영향을 받는다는 점이다. 따라서, 기기상수들이 제어시스템에서 사용되는 값과 다르다면 성능은 저하된다.

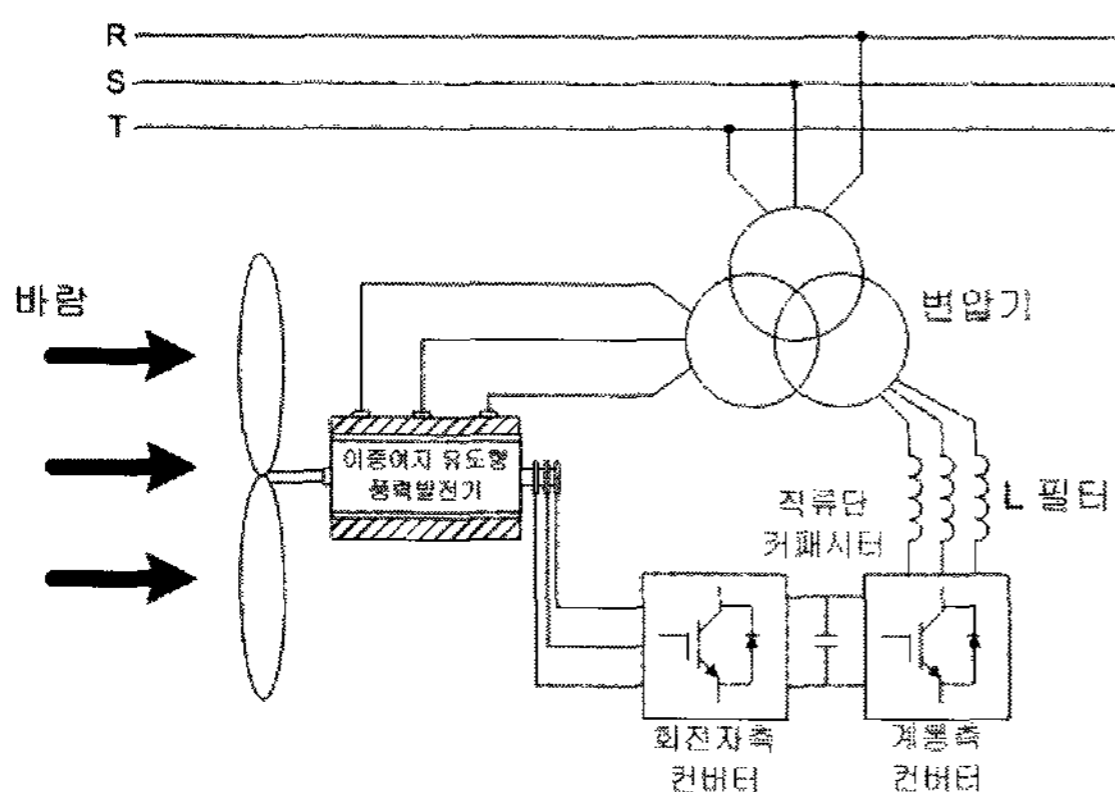


그림 1 이중여자 유도형 풍력발전시스템  
Fig. 1 Wind turbine system with doubly-fed induction generator

직접토크제어기법(DTC)이 1985년에 소개된 이후 직접토크제어기법의 원리는 빠른 동적특성을 요구하는 유도전동기의 구동장치에 널리 사용되었다<sup>[5]</sup>. 직접토크 제어기법은 간단한 구조를 가지고 있지만 정상상태에서 토크 및 자속과 전류의 변동이 생기고 스위칭 주파수가 가변한다는 단점이 있다. 이러한 단점들을 보완할 목적으로 방법들을 제시했다. 이는 직접토크제어방식에서 사용되었던 히스테리시스 제어를 이용해서 스위칭 지령값을 생성하는 방식이 아니라 공간 전압 벡터변조방식(SVM)을 이용해서 스위칭 지령값을 생성하는 방식이 소개되었다<sup>[6,7,8]</sup>. 또한 가변구조제어방식

(VSC)과 직접토크제어기법(DTC)을 함께 이용해서 자속과 토크를 제어하는 방식이 소개되었다<sup>[9]</sup>. 이러한 방식들은 직접토크제어방식의 장점인 간단한 제어구조 및 빠른 동적특성을 유지하면서 일정한 스위칭 주파수로 토크 및 자속과 전류의 변동을 줄일 수 있다는 장점을 가진다. 유도기의 직접토크제어기법에 근거한 이중여자 유도형 발전시스템에서 직접전력제어기법이 제안되었다<sup>[10]</sup>. 직접전력제어기법은 고정자의 유효전력과 무효전력의 정보를 이용하여 록-업 테이블로부터 전압 벡터를 선택함으로써 고정자 유효전력과 무효전력을 직접적으로 제어하는 방식이다. 히스테리시스 제어기 기반의 직접전력제어기법은 고정자의 유효전력과 무효전력을 빠르게 제어할 수 있고 기기상수의 변화에 대한 강인한 특성을 가진다. 하지만 이 기법은 유효전력 및 무효전력과 고정자전류의 변동이 생기며 스위칭 주파수의 가변으로 인해 전력회로부와 필터설계를 어렵게 한다.

슬라이딩 모드 제어(SMC)는 가변구조제어(VSC)의 종류로서 슬라이딩 평면 위에서 제어시스템의 구조를 변화시키는 불연속 스위칭 제어입력의 강인한 비선형 제어이다<sup>[11]</sup>. 시스템의 상태변수가 슬라이딩 평면을 운동하는 동안, 시스템은 외란과 모델링 불확실성(uncertainty)에 독립적인 운동을 가지는 불변(invariant)의 특성을 가진다.

본 논문에서는 슬라이딩 모드 제어기법을 기반한 직접전력제어기법을 제안한다. 자속기준제어기법은 전력 제어기 및 전류제어기와 축변환으로 구성되어 있는 복잡한 제어구조를 가지고 있다. 제안하는 제어기법은 슬라이딩 모드 기반의 전력제어기로 유효전력과 무효전력을 직접적으로 제어할 수 있는 간단한 제어구조를 가지며 기기상수 변화에 강인한 제어특성을 보인다. 정상상태에서 전력맥동과 스위칭 주파수를 일정하게 유지하기 위해 공간전압벡터변조방식이 이용된다. 또한 계통사고에 의해 발생하는 불평형 전원에 대해 정상분 전압과 역상분 전압을 분리하여 계통 측 컨버터에서 계통연계지점의 역상분 전압을 보상하는 알고리즘이 이용된다<sup>[12]</sup>. 이중여자 유도형 풍력발전시스템의 운전모드는 유효전력을 기준으로 구분된다<sup>[13]</sup>. 제안하는 전력제어기법을 전력제어모드에 적용하였으며 자동적인 모드전환으로 계통사고 발생시 회복이 가능하다.

## 2. 이중여자 유도형 풍력발전기의 직접전력제어기법 원리

### 2.1 이중여자 유도형 풍력발전기 모델링

이중여자 유도형 풍력발전기는 권선형 유도발전기로서 고정자는 계통에 연결되어 있으며 회전자 회로는 두 개의 컨버터와 직류단 커패시터를 통해 계통에 연결된다. 임의의 기준좌표계에서 이중여자 유도형 풍력발전기 모델링은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\lambda_s}{dt} + j\omega\lambda_s \quad (1)$$

$$V_r = R_r I_r + \frac{d\lambda_r}{dt} + j(\omega - \omega_r)\lambda_r \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \lambda_s &= \lambda_{ds} + j\lambda_{qs}, & \lambda_r &= \lambda_{dr} + j\lambda_{qr} \\ \lambda_{ds} &= L_s I_{ds} + L_m I_{dr}, & \lambda_{qs} &= L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \\ \lambda_{dr} &= L_r I_{dr} + L_m I_{ds}, & \lambda_{qr} &= L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \\ L_s &= L_{ls} + L_m \\ L_r &= L_{lr} + L_m \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$  과  $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}, \lambda_{dr}, \lambda_{qr}$  은 d-q축 고정자와 회전자의 전류와 자속,  $R_s$ 와  $R_r$ 은 고정자저항과 회전자 저항이고  $\omega_r$ 은 각속도이다. 임의 기준좌표계의 전압 방정식과 자속방정식을 등가회로로 표현하면 그림 2와 같다.

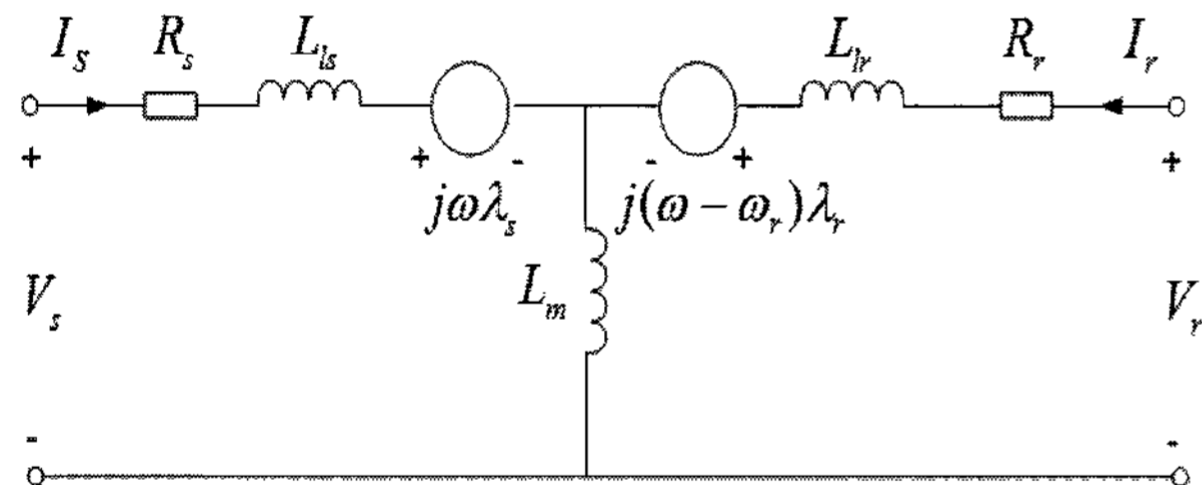


그림 2 이중여자 유도형 풍력발전기의 임의의 기준좌표계 등가회로  
Fig. 2 Equivalent circuit of a DFIG in the arbitrary reference frame

### 2.2 이중여자 유도형 풍력발전기의 직접전력 제어기법

직접전력제어기법에서는 그림 3과 같이 고정자 자속 벡터가 고정자 자속의 위치에 따라 회전하는 동기기준좌표계를 이용한다.

고정자는 계통에 직접적으로 연결되어있기 때문에 고정자 자속은 일정하다고 가정한다. 동기기준좌표계 ( $\omega_e = \omega_s$  - 고정자 자속속도,  $\lambda_s^e = \lambda_{ds}$ )를 이용하면 식 (1)의 고정자 전압벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$V_s^e = j\omega_s \lambda_s^e = j\omega_s \lambda_{ds} \quad (4)$$

식 (3)을 이용하면 고정자 전류는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_s^e = \frac{L_r \lambda_s^e - L_m \lambda_r^e}{L_s L_r - L_m^2} = \frac{\lambda_s^e}{\sigma L_s} - \frac{L_m \lambda_r^e}{\sigma L_s L_r} \quad (5)$$

여기서  $\sigma = (L_s L_r - L_m^2) / L_s L_r$  이다.

고정자의 유효전력과 무효전력은 다음과 같이 계산된다.

$$S = P_s + jQ_s = \frac{3}{2} V_s^e \times I_s^{e*} \quad (6)$$

식 (5)를 식 (6)에 대입하고 식 (6)을 실수부분과 허수부분으로 분리하면 고정자의 유효전력과 무효전력은 다음과 같다.

$$P_s + jQ_s = \frac{3}{2} j\omega_s \lambda_{ds} \times \left( \frac{\lambda_s^{e*}}{\sigma L_s} - \frac{L_m \lambda_r^{e*}}{\sigma L_s L_r} \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_s &= -k_\sigma \omega_s \lambda_{ds} \lambda_{qr} \\ Q_s &= k_\sigma \omega_s \lambda_{ds} \left( \frac{L_r}{L_m} \lambda_{ds} - \lambda_{dr} \right) \end{aligned}$$

고정자 자속이 일정하기 때문에 일정한 주기  $T_s$  동안 고정자 유효전력과 무효전력의 변화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta P_s &= -k_\sigma \omega_s \lambda_{ds} \Delta \lambda_{qr} \\ \Delta Q_s &= -k_\sigma \omega_s \lambda_{ds} \Delta \lambda_{dr} \end{aligned} \quad (8)$$

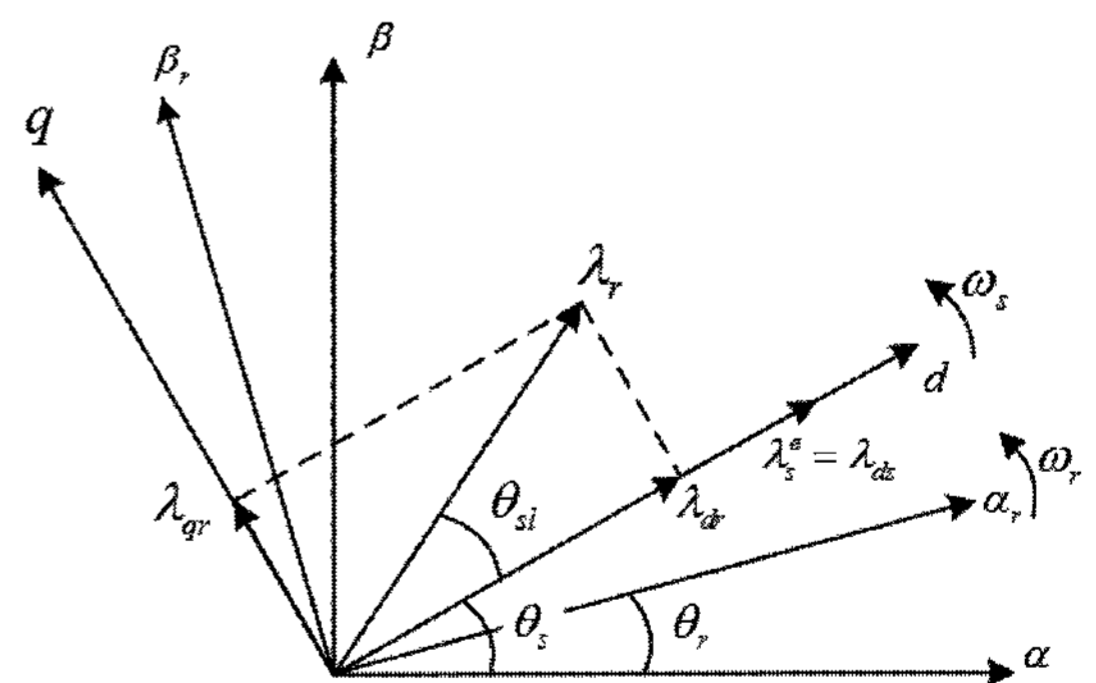


그림 3 d-q 동기기준좌표계 고정자 자속벡터와 회전자 자속 벡터  
Fig. 3 Stator and rotor flux vectors in the synchronous d-q frames

그림 3에서 동기기준좌표계의 회전자 전압은 다음과 같이 표현할 수 있다.

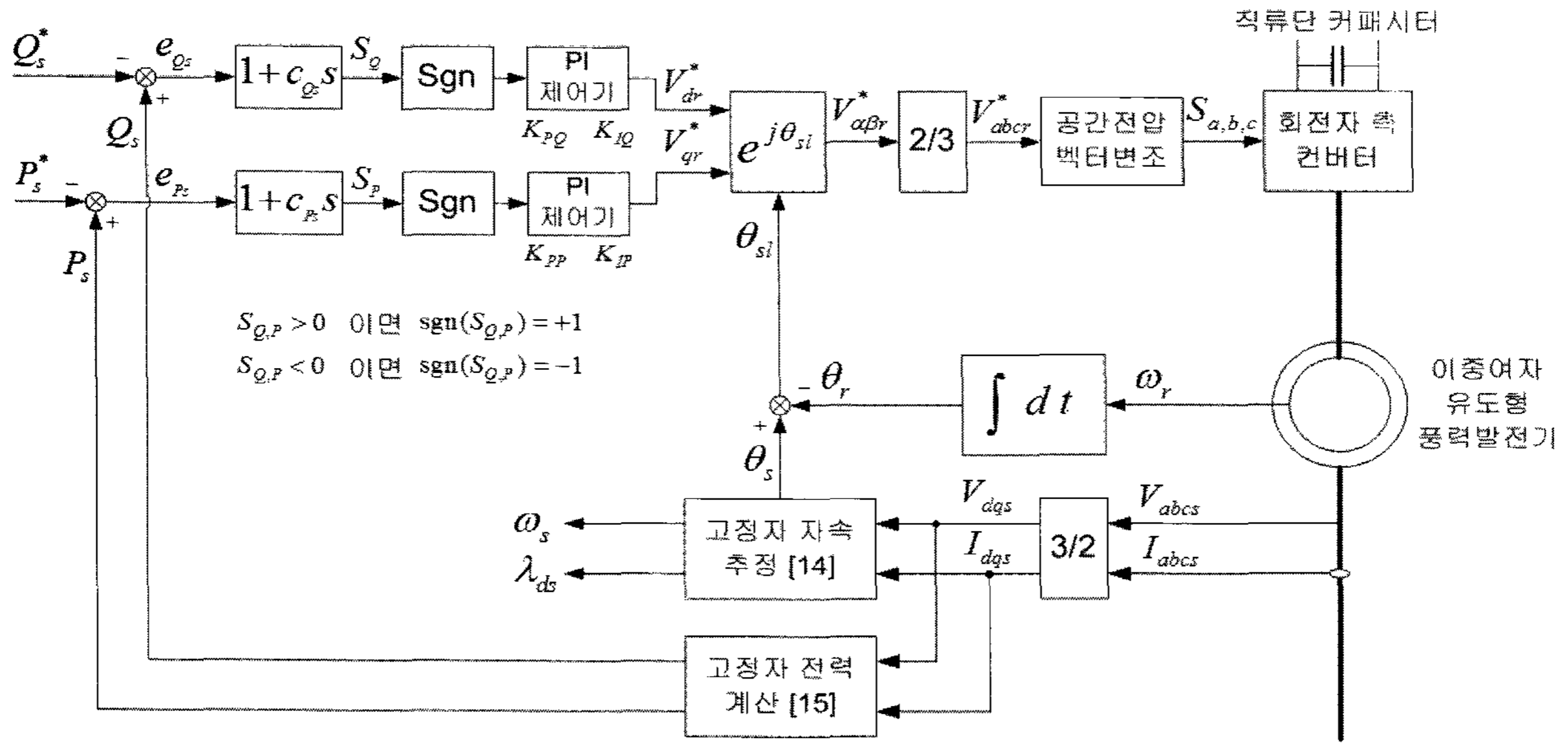


그림 4 제안하는 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기법의 개요도  
 Fig. 4 Schematic diagram of the proposed SM-DPC for a DFIG system

$$V_r^e = R_r I_r^e + \frac{d\lambda_r^e}{dt} + j\omega_{sl}\lambda_r^e \quad (9)$$

여기서  $\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r$ 은 슬립각속도이다. 식 (7) 및 (8)과 (9)를 결합하면 동기기준좌표계의 d-q 회전자 전압을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{dr} &= -\frac{1}{T_s} \frac{\Delta Q_s}{k_\sigma \omega_s \lambda_{ds}} + \omega_{sl} \frac{P_s}{k_\sigma \omega_s \lambda_{ds}} \quad (10) \\ V_{qr} &= -\frac{1}{T_s} \frac{\Delta P_s}{k_\sigma \omega_s \lambda_{ds}} + \omega_{sl} \left( \frac{L_r}{L_m} \lambda_{ds} - \frac{Q_s}{k_\sigma \omega_s \lambda_{ds}} \right) \end{aligned}$$

위 식에서 오른쪽의 첫 항목은 전력오차를 줄이고 두 번째 항목은 고정자 자속속도와 회전자 자속속도의 차인 슬립을 보상하기 위한 것이다. 계산은 간단한 곱셈과 나눗셈으로 이루어져 있고 수학적으로 복잡한 계산이 필요하지 않다는 것을 알 수 있다. 직접전력제어기법은 일정한 샘플링 주기  $T_s$  동안 유효 전력오차와 무효전력오차를 영으로 줄이기 위해 회전자 전압을 계산한다. 이 회전자 전압은 공간전압벡터 변조방식에 의해서 스위칭 지령값을 생성하고 회전자 축 컨버터에 인가된다.

### 3. 슬라이딩모드 기반의 직접전력제어기법

이중여자 유도형 풍력발전기의 슬라이딩모드 기반의 직접전력제어기법의 블록도는 그림 4와 같다. 구동장치는 일정한 고정자 자속에서 고정자 유효전력과 무효전력을 제어하기 위해 동작한다. 빠른 응답특성과 일정한 정상상태 오차를 유지하기 위해 슬라이딩 모드 제어기와 PI 제어기로 구성된다. 기준 회전자 전압  $V_{dr}^*$ 과  $V_{qr}^*$ 은 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{dr}^* &= (K_{PQ} + K_{IQ} \frac{1}{s}) \text{sgn}(S_Q) + \omega_{sl} \frac{P_s}{k_\sigma \omega_s \lambda_{ds}} \quad (11) \\ V_{qr}^* &= (K_{PP} + K_{IP} \frac{1}{s}) \text{sgn}(S_P) + \omega_{sl} \left( \frac{L_r}{L_m} \lambda_{ds} - \frac{Q_s}{k_\sigma \omega_s \lambda_{ds}} \right) \end{aligned}$$

여기서  $s = d/dt$ 이고  $\text{sgn}$ 은 시그넘 함수,  $K_{PQ}$ ,  $K_{IQ}$ ,  $K_{PP}$ 와  $K_{IP}$ 는 PI 제어기의 비례이득과 적분이득이고  $S = S_{Qs} + jS_{Ps}$ 는 슬라이딩 평면이다.

슬라이딩 평면  $S = S_{Qs} + jS_{Ps}$ 는 1차 동적시스템 슬라이딩 모드로 동작시키기 위해 설계된다.

$$\begin{aligned} S &= S_{Qs} + jS_{Ps} \\ &= e_{Qs} + s c_{Qs} e_{Qs} + j(e_{Ps} + s c_{Ps} e_{Ps}) \quad (12) \end{aligned}$$

여기서  $e_{Q_s} = Q_s^* - Q_s$ 와  $e_{P_s} = P_s^* - P_s$ 는 유효전력과 무효전력의 오차이다.

슬라이딩 모드에서 유효전력과 무효전력의 제어입력은 슬라이딩 평면( $S$ )으로 시스템상태를 제한하고 시스템의 상태는  $S=0$ 으로 동작한다. 1차 선형 무효전력과 유효전력의 오차 동적특성은 다음과 같다.

$$c_{Q_s} \frac{de_{Q_s}}{dt} = -e_{Q_s} \quad \text{그리고} \quad c_{P_s} \frac{de_{P_s}}{dt} = -e_{P_s} \quad (13)$$

여기서 설계상수  $c_{Q_s}$ 와  $c_{P_s}$ 는 정상상태에서 오차의 크기를 결정하는 상수이다.

무효전력과 유효전력오차 동적특성의 해는  $e_{Q_s}(t) = e_{Q_s}(t_1)e^{-(t-t_1)/c_{Q_s}}$ 와  $e_{P_s}(t) = e_{P_s}(t_1)e^{-(t-t_1)/c_{P_s}}$ 로서 기기상수의 변화와는 상관없음을 알 수 있다. 식 (10)과 (11)을 조합하면 무효전력과 유효전력의 동적특성은 다음과 같다.

$$\Delta Q_s = (K_{PQ} \text{sgn}(S_Q) + K_{IQ} \int \text{sgn}(S_Q)) \quad (14)$$

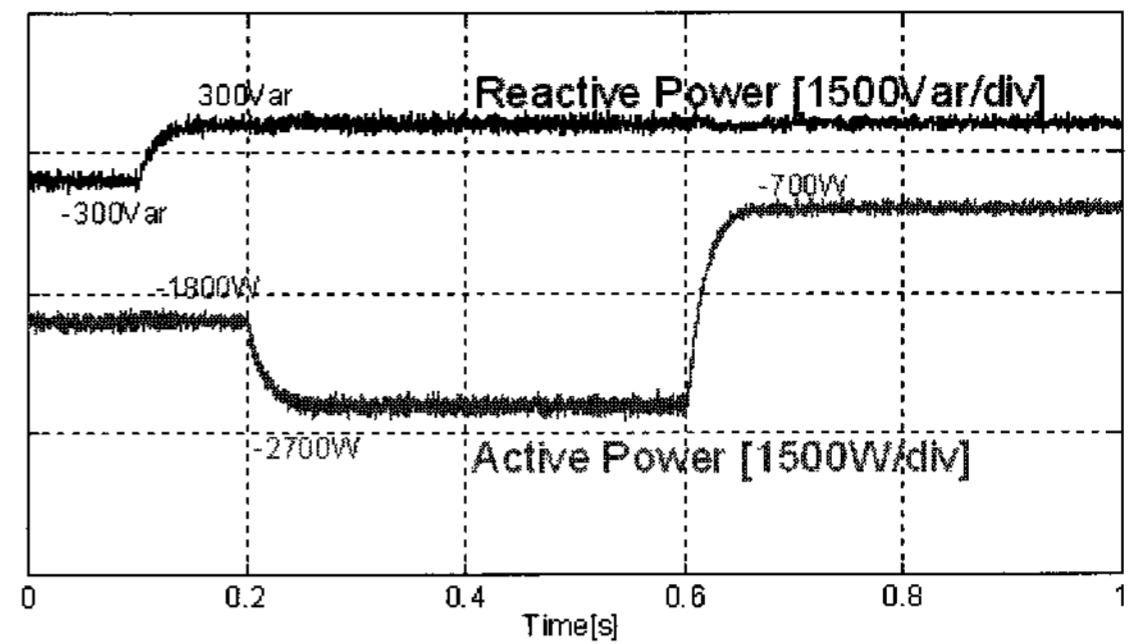
$$\Delta P_s = (K_{PP} \text{sgn}(S_P) + K_{IP} \int \text{sgn}(S_P))$$

위의 식에서 비레이득( $K_P$ )은 비 연속성분으로서 전력의 동적특성을 결정하고 적분이득 ( $K_I$ )은 정상상태에서 동작을 결정한다. 빠른 응답특성과 정상상태에서 작은 전력리플특성을 얻기 위해서 두 개의 이득을 적절하게 선택해야만 한다. 또한 기기상수의 변화에 대한 강인한 특성을 얻기 위해 설계과정<sup>[16]</sup>에서 슬라이딩 조건  $dS_{P,Q}^2/dt < 0$ 을 만족하는 범위에서 비레이득을 크게 설정한다.

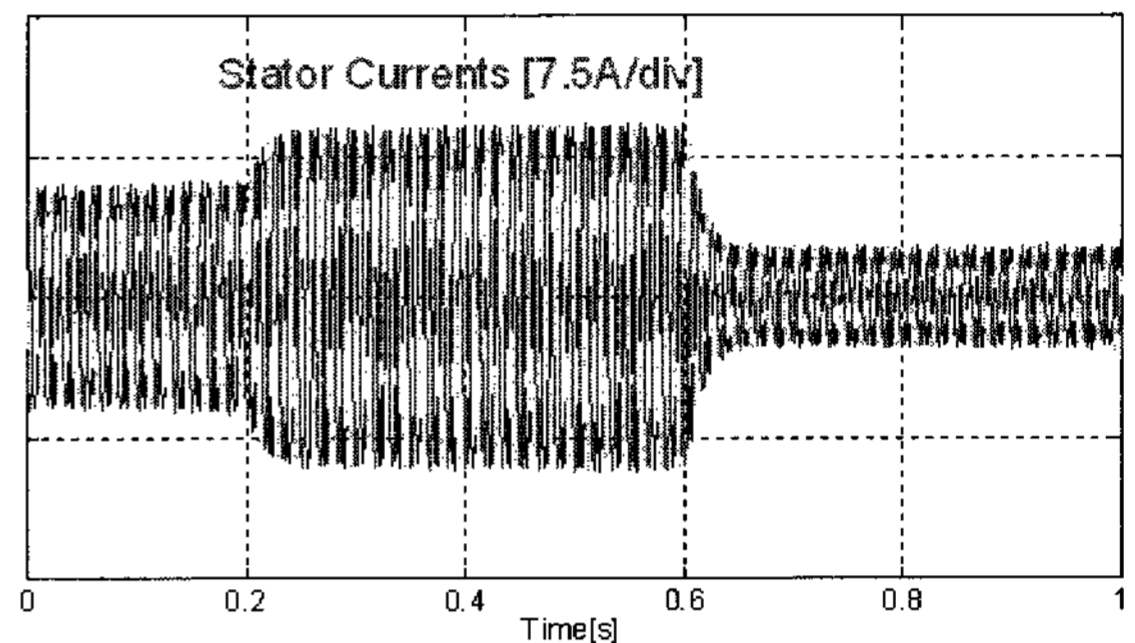
#### 4. 시뮬레이션 결과

제안하는 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기법의 타당성을 입증하기 위해 Simulink/Matlab을 이용해서 검증하였다. 이중역자 유도형 풍력발전기의 정격은 3KW, 220V, 60Hz, 4극이고 기기상수는  $R_s = 0.61\Omega$ ,  $R_r = 0.65\Omega$ ,  $L_s = 67.6$  그리고  $L_m = 63.9mH$ 이다.

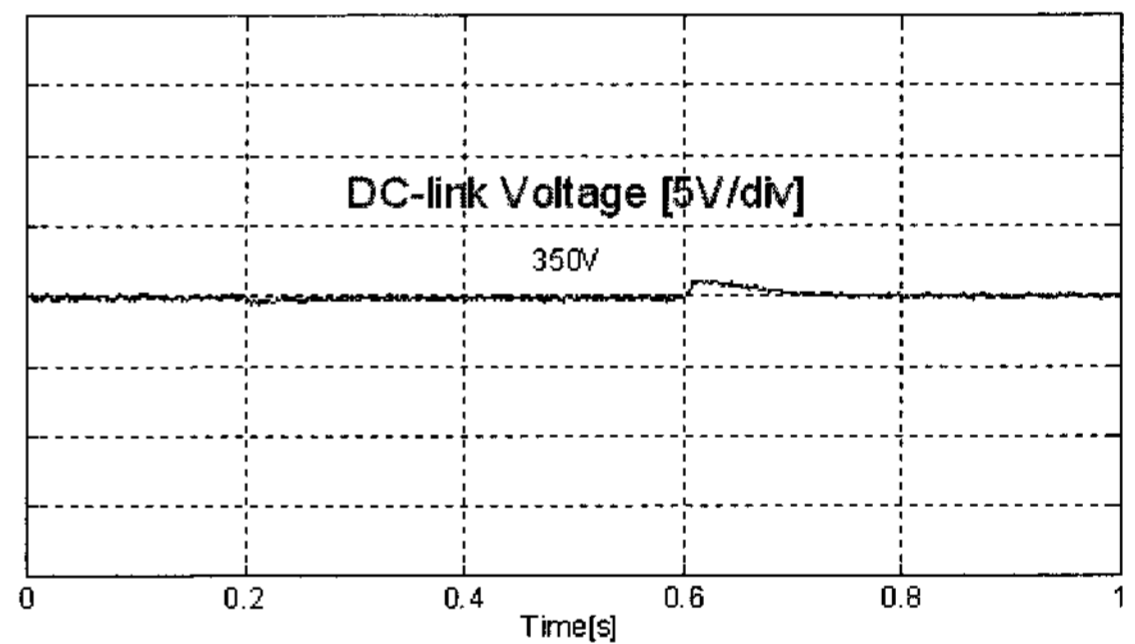
그림 5와 그림 6은 자속기준제어기법의 응답특성을 확인하기 위해 회전속도가 1800rpm으로 일정하게 유지되는 동안 유효전력의 계단변화를 0.2초일 때 -1800W에서 -2700W로 인가하고 무효전력의 계단변화를 0.1초일 때 -300W에서 300W로 인가했을 때 유



(a) 전력응답특성



(b) 고정자 전류특성



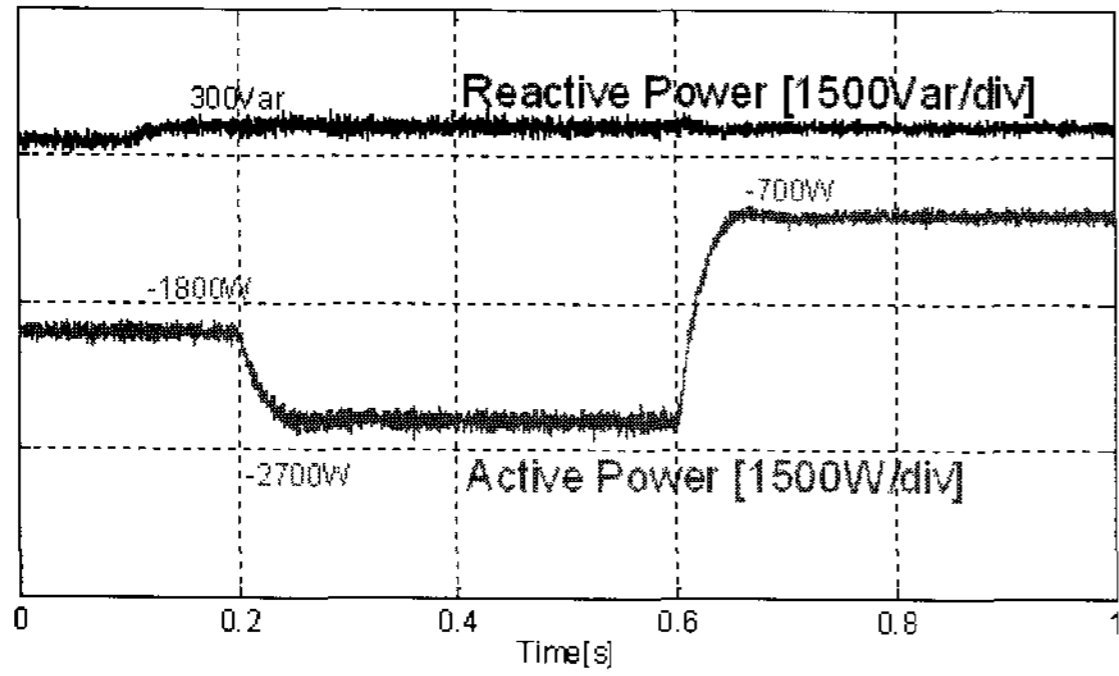
(c) 직류단 전압특성

그림 5 자속기준제어기법을 이용한 유효전력과 무효전력 응답특성(오차없는 상호 인덕턴스)

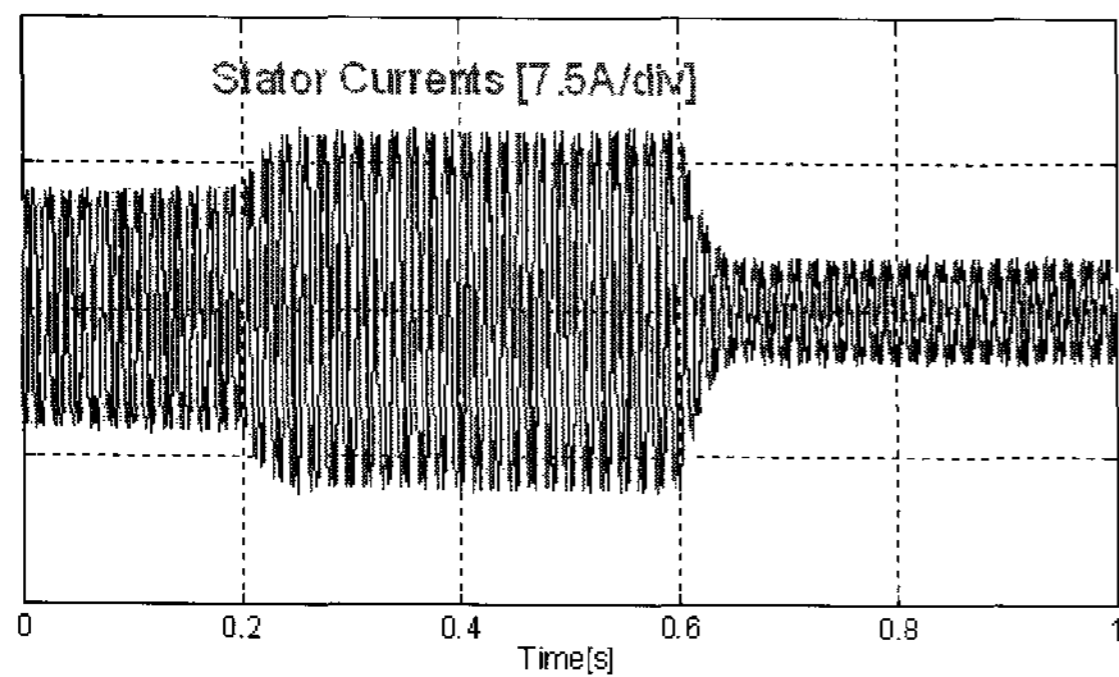
Fig. 5 Simulation results of power step responses(with nominal mutual inductance)

효전력응답특성, 무효전력응답특성, 고정자 전류특성과 직류단 전압특성을 보인다. (“-”는 발전기에서 계통으로 전력전달을 의미한다)

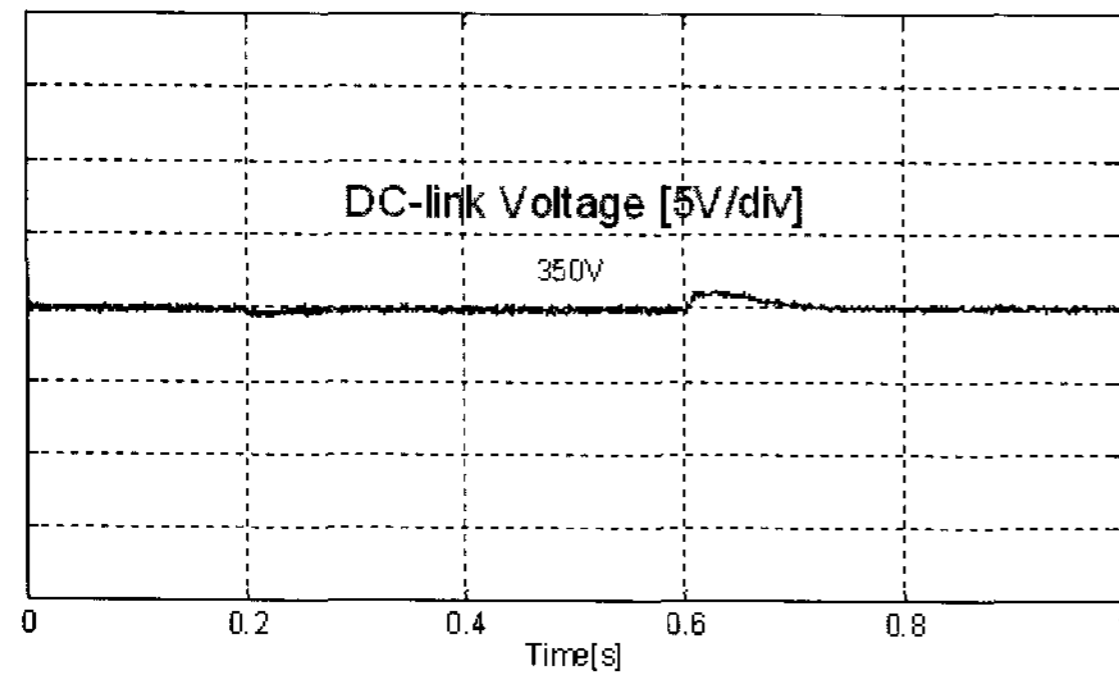
유효전력이 변화에 따라 무효전력과 직류단 전압은 일정하게 유지되고 고정자전류가 변화하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5와 그림6은 기기상수 변화(상호인덕터스 0%변화(그림 5)와 30%변화(그림 6))가 생길 때 자속기준제어기법의 응답특성을 보여준다.



(a) 전력응답특성



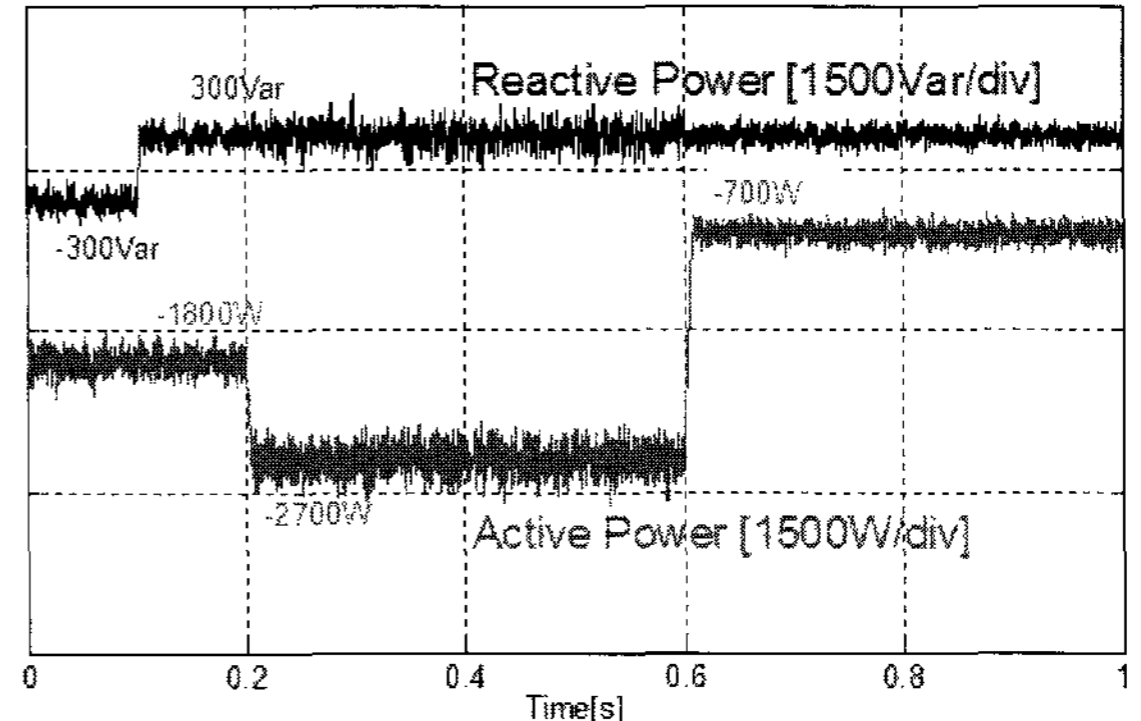
(b) 고정자 전류특성



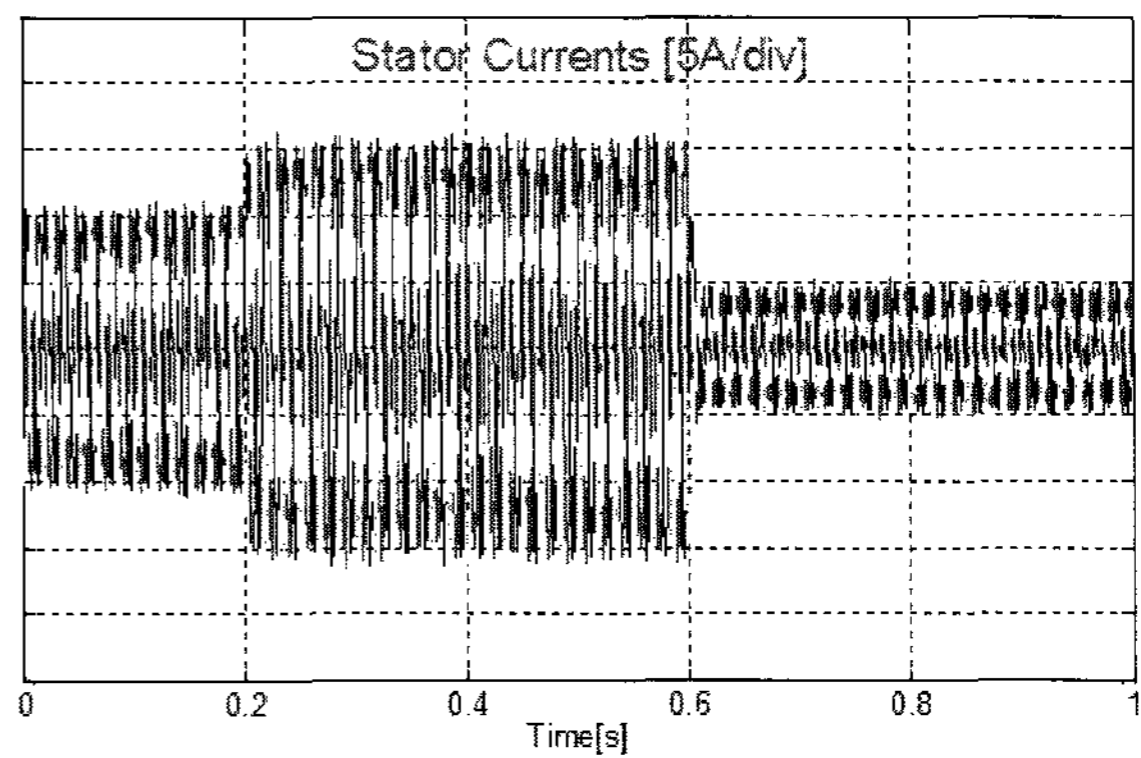
(c) 직류단 전압특성

그림 6 자속기준제어기법을 이용한 유효전력과 무효전력 응답특성(30%오차 상호인덕턴스)  
 Fig. 6 Simulation results of power step responses (with 30% error of mutual inductance)

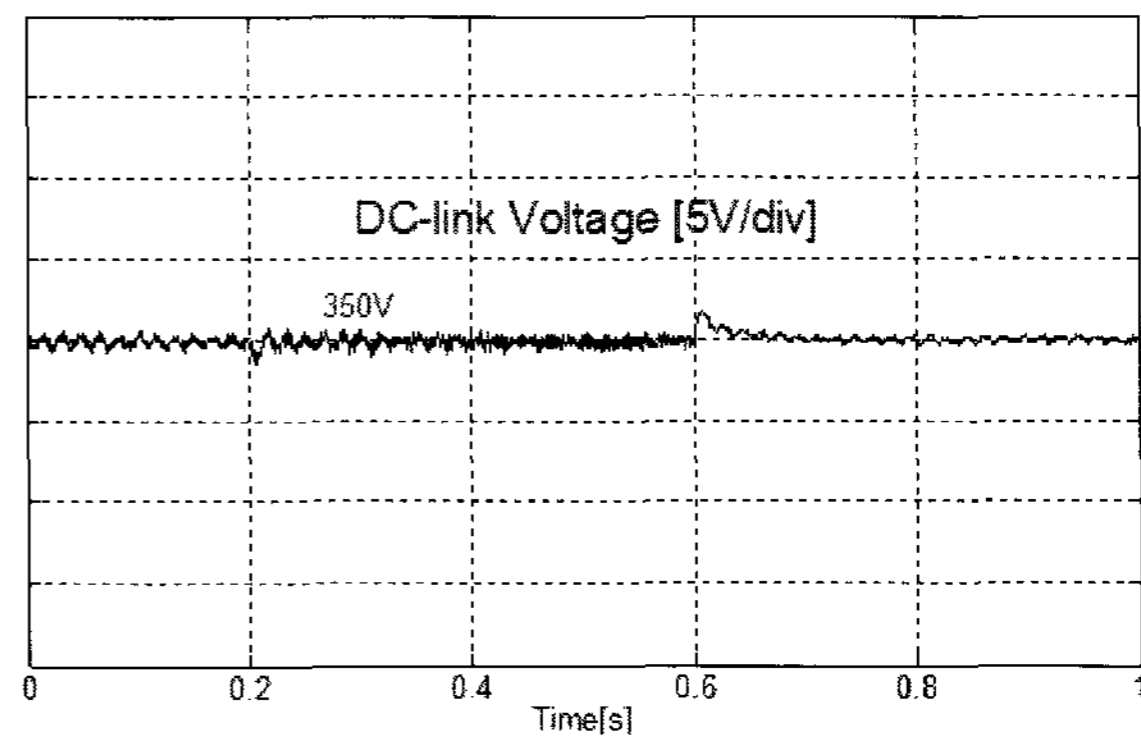
그림 5의 (a)에서 유효전력과 무효전력은 지령값에 따라 제어되고 있는 반면 그림 6의 (a)에서는 기기상수 변화가 생겼을 때 -300Var에서 무효전력은 제어되지 않고 유효전력은 -700W에서 오버슈트가 발생한다. 그림 7과 8은 자속기준제어기법과 동일한 조건에서 제안하는 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기법의



(a) 전력응답특성



(b) 고정자 전류특성

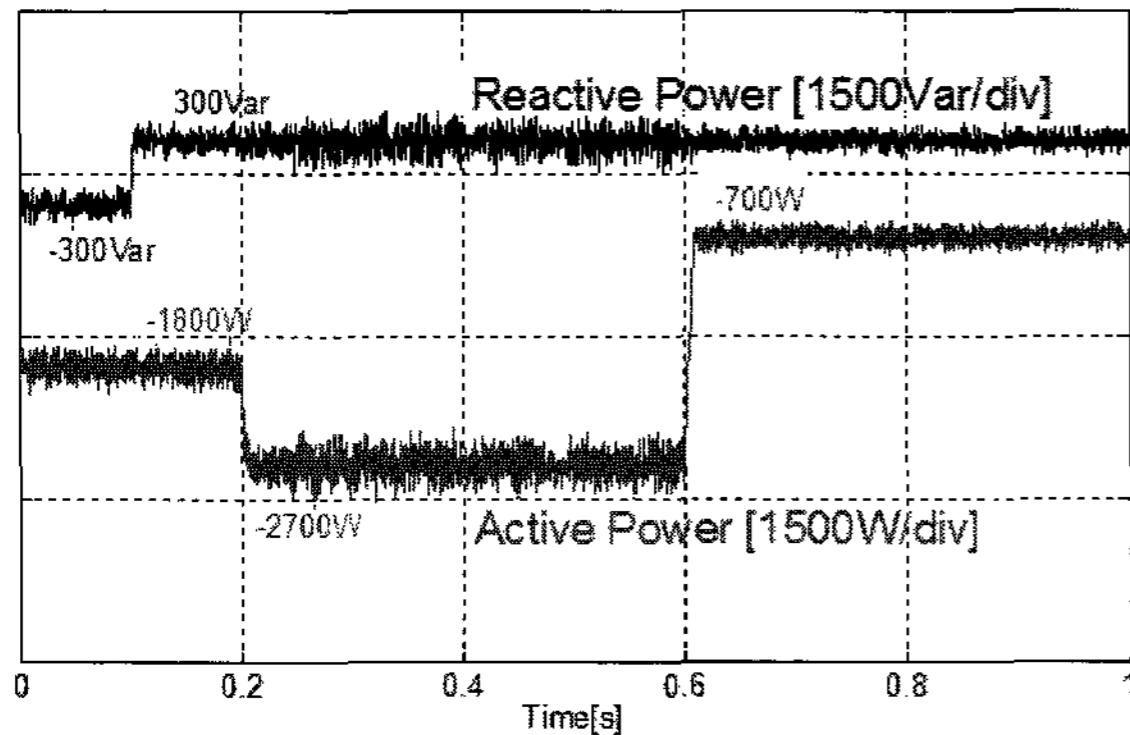


(c) 직류단 전압특성

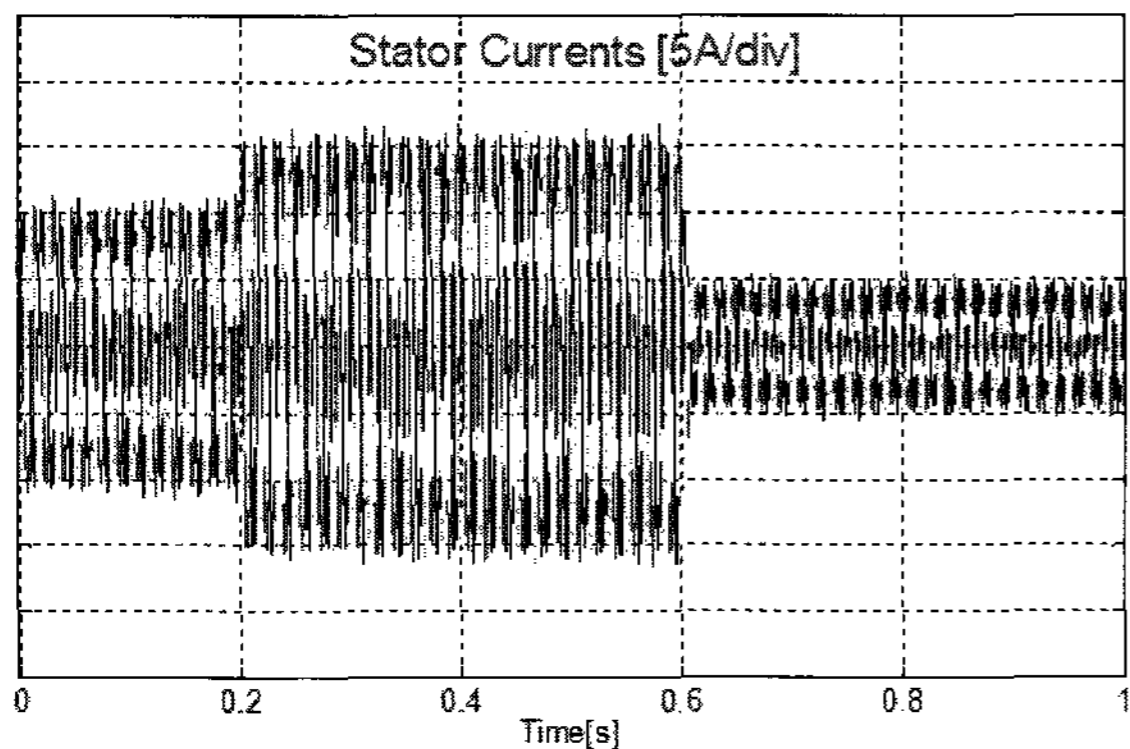
그림 7 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기법의 시뮬레이션 결과(오차 없는 상호인덕턴스)  
 Fig. 7 Simulation results in the SM-DPC drive (with nominal mutual inductance)

응답특성을 보여준다. 그림 5, 6과 비교해 볼 때 제안하는 제어기법은 전력맥동은 크지만 빠른 속응성(자속기준제어기법은 약 50ms이고 제안하는 제어기법은 약 10ms)을 보인다.

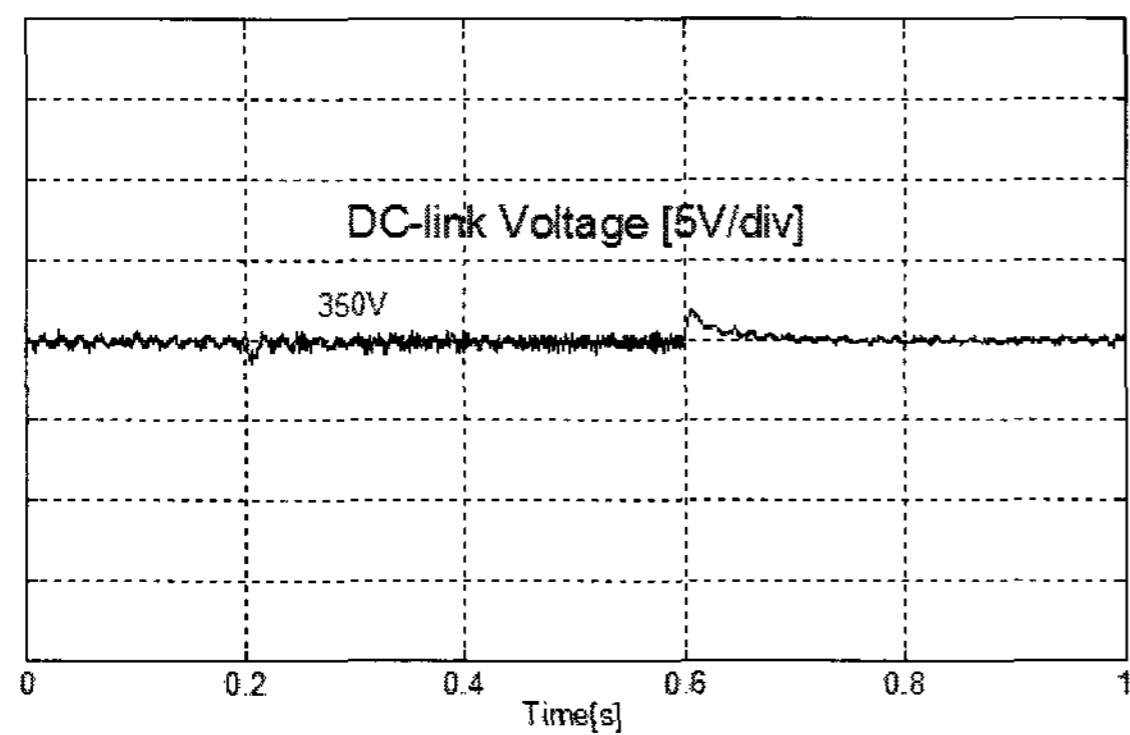
### 5. 실험 결과



(a) 전력응답특성



(b) 고정자 전류특성



(c) 직류단 전압특성

그림 8 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기법의 시뮬레이션 결과(30%오차 상호인덕턴스)

Fig. 8 Simulation results in the SM-DPC drive (with 30% error of mutual inductance)

기기상수의 변화에 대한 응답특성을 확인하기 위해 그림 6의 (a)와 그림 8의 (a)를 비교해 볼 때 제안하는 제어기법은 유효전력과 무효전력의 제어는 기기상수의 변화와 상관없이 강인한 제어특성을 보임을 확인할 수 있다.

그림 9와 그림 10은 제안하는 슬라이딩 모드 기반 직접전력제어기법의 타당성을 검증하기 위한 실험장치를 나타낸다. 실험에서 사용된 이중여자 유도형 풍력발전기의 정격과 기기상수들은 시뮬레이션과 같다. 싸이리스터 컨버터 구동장치를 이용한 5.5KW, 220V, 1750rpm 직류전동기로 발전기의 속도 혹은 토크를 제어한다. 본 실험에서는 직류전동기의 속도제어로 발전기를 제어한다. 전력 변환부는 2400 직류단 커패시터를 7.5KW IGBT의 컨버터 사이에 위치하게 하고 두 개의 컨버터로 구성된다. 회전자 측 전압원 컨버터는 회전자 권선에 연결되어 있고 계통 측 전압원 컨버터는 교류필터를 통해 고정자권선과 계통에 연결되어 있다.

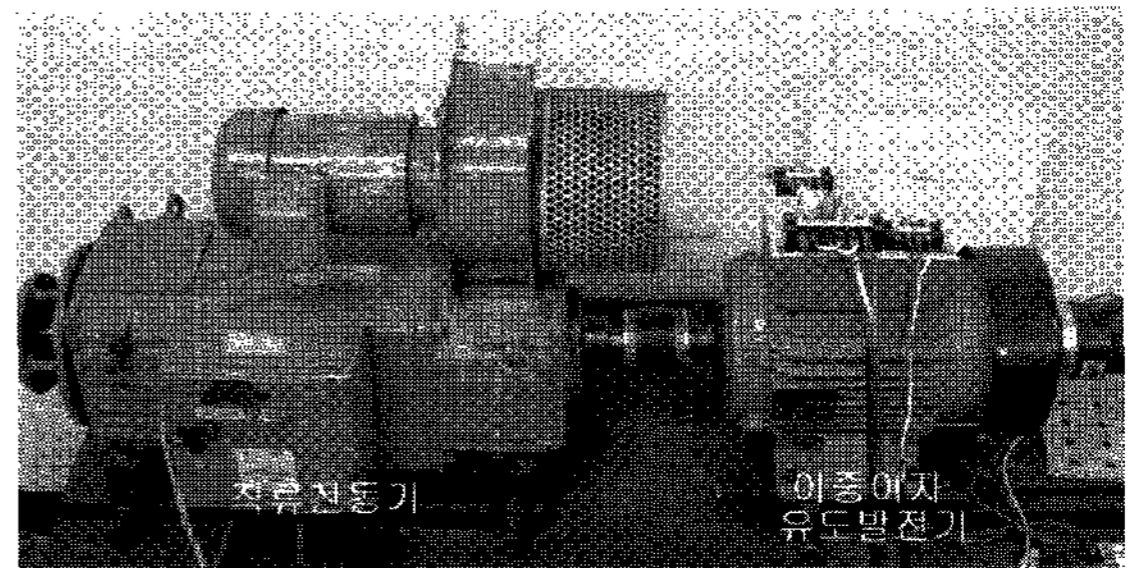


그림 9 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기법 시스템의 실험세트

Fig. 9 Experimental set of the SM-DPC system

컨버터의 스위칭 주파수는 5KHz이고 제어기의 주기는 100 $\mu$ s이다. 마이크로프로세서(TMS320VC33)와 12비트 AD컨버터는 빠른 연산능력을 제공하며 전류측정을 위해 홀센서를 이용한다. 공간전압벡터변조방식에

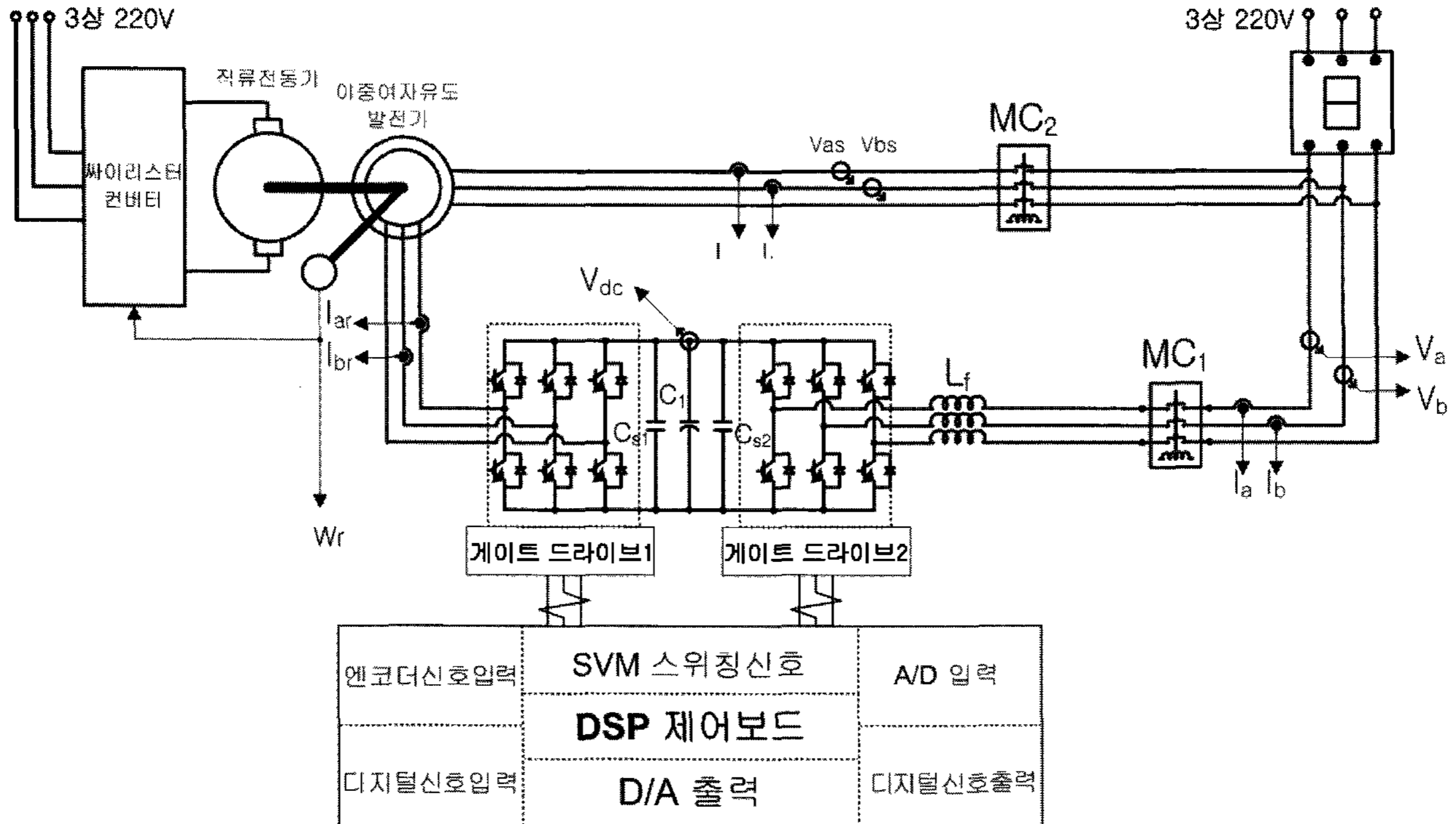


그림 10 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기법 시스템의 실험세트 구조도  
 Fig. 10 Block Diagram of the SM-DPC experiment set

서 출력되는 스위칭 지령값과 직류단 전압을 합성해서 생성된 기준전압을 이중역자 유도형 풍력발전기의 회전자에 인가한다.

실험에서 고정자와 계통을 연결시켜주는 자기접촉기 (Magnetic Contactor)는 2가지의 조건이 만족되어야만 동작을 하도록 한다. 첫 번째로 이중역자 유도형 풍력발전기로부터 발전되는 전력량 혹은 회전속도가 설정값 이상일 조건과 두 번째로 고정자 전압 및 주파수와 위상이 계통과 일치하는 조건을 만족하면 고정자의 영전류에서 자기접촉기와 회전자 측 컨버터는 동작한다.

그림 11은 고정자와 계통이 연결되는 과정을 보여준다. 약 0.24초에서 계통 전압위치와 고정자 전압위치를 비교하기 시작해서 약 0.3초에서 일치한다. 설정된 시간 동안 동기가 되었다고 판단되면 약 0.33초에서 자기접촉기가 동작된다. 자기접촉기의 동작으로 고정자 전류는 계통에 전달되고, 발전기는 속도 제어 모드에 따라 동작한다. 발전기의 유효전력이 설정된 기준값 이상 되면 전력제어모드로 전환한다.

제안하는 제어기법의 타당성을 확인하기 위해 발전기의 전력제어모드에서 실험을 수행하였다. 실험은 주로 유효전력응답특성 및 무효전력 응답특성 그리고 고

정자 전류특성을 확인하였다.

제어기법의 PI 제어기이득과 설계상수는 다음과 같다:

PI 이득 :  $K_{PQ}=0.5, K_{IQ}=500, K_{PP}=0.5, K_{PI}=500$ ;  
 설계 상수 :  $c_{Qs} = c_{Qr} = 0.0001$

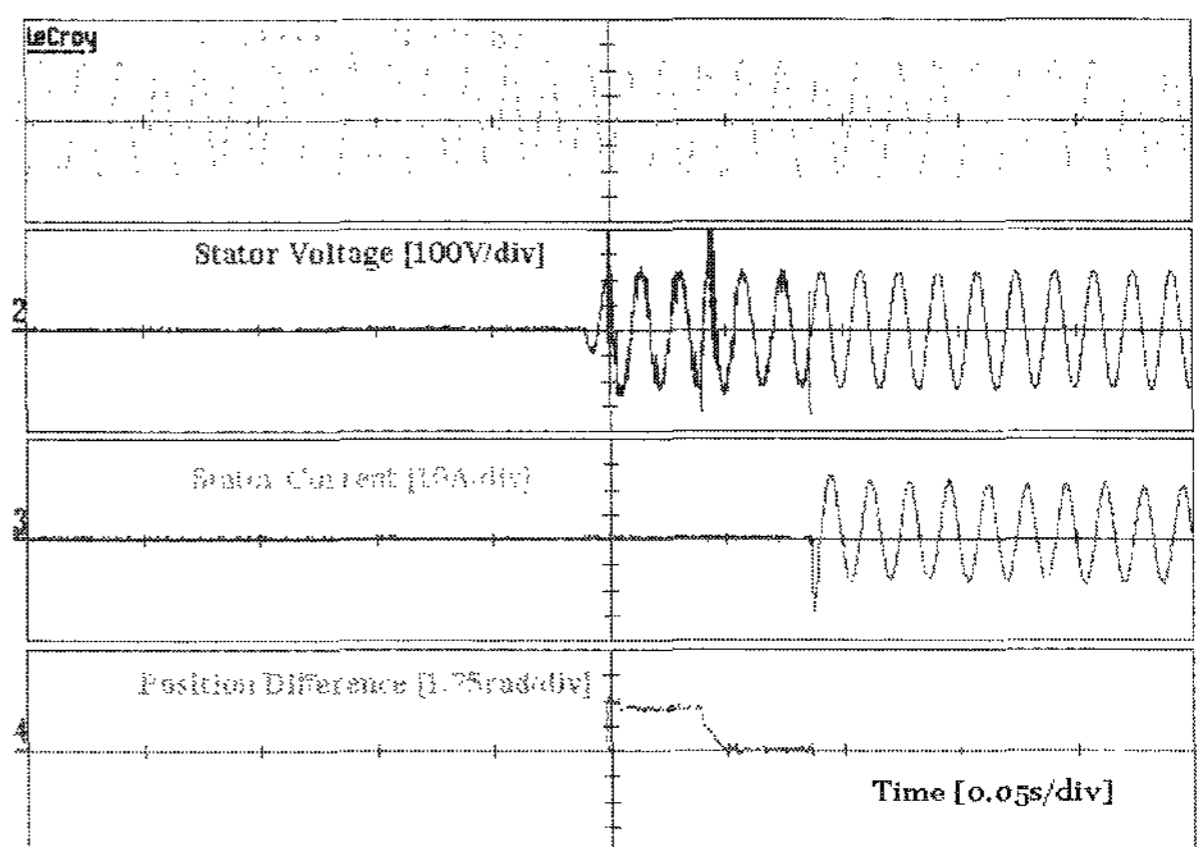


그림 11 고정자와 계통이 연결되는 과정의 실험결과  
 Fig. 11 Experimental results of the connection to the grid



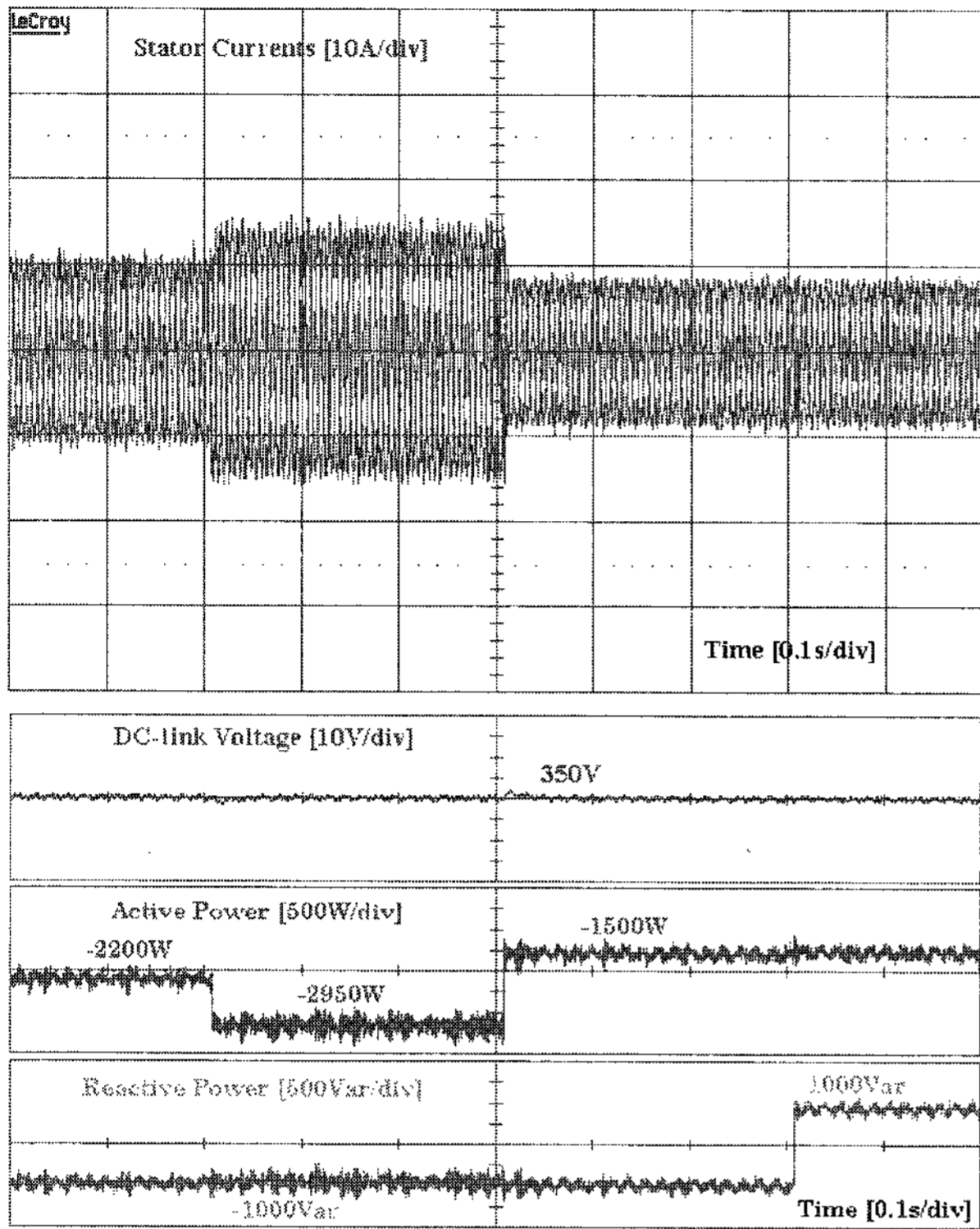


그림 12 제안하는 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기법  
시스템응답의 실험결과  
Fig. 12 Experimental results of the proposed SM-DPC  
step responses

그림 12에서는 유효전력 및 무효전력의 지령값 변화에 따른 전력응답특성과 고정자전류 응답특성을 보여준다. 유효전력의 지령값을 0.21초에서 -2200W에서 -2950W로 변화시키고 0.51초에서 다시 -2950W에서 -1500W로 변화시키고, 무효전력 지령값은 0.81초에서 -1000Var에서 1000Var로 변화시킨다. 무효전력의 변화와 상관없이 유효전력 변화에 따라 고정자전류가 변화하는 것을 알 수 있다. 그림 12에서는 제안하는 제어기법을 최대전력점추적(Maximum Power Point Tracking, MPPT)곡선에 적용해서 살펴본다. 그림 10에서 보듯이 이중여자 유도형 풍력발전기는 직류전동기의 속도에 따라 제어되고 있으며 회전속도는 발전기의 엔코더를 이용하여 측정한다. 측정된 회전속도로부터 최대전력점추적 곡선을 이용하여 발전기의 유효전력 지령값을 계산한다. 계산된 유효전력 지령값을 제안하는 알고리즘에 적용 하였을 때 응답특성을 볼 수 있다. 고정자전류는 유효전력의 변화에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다.

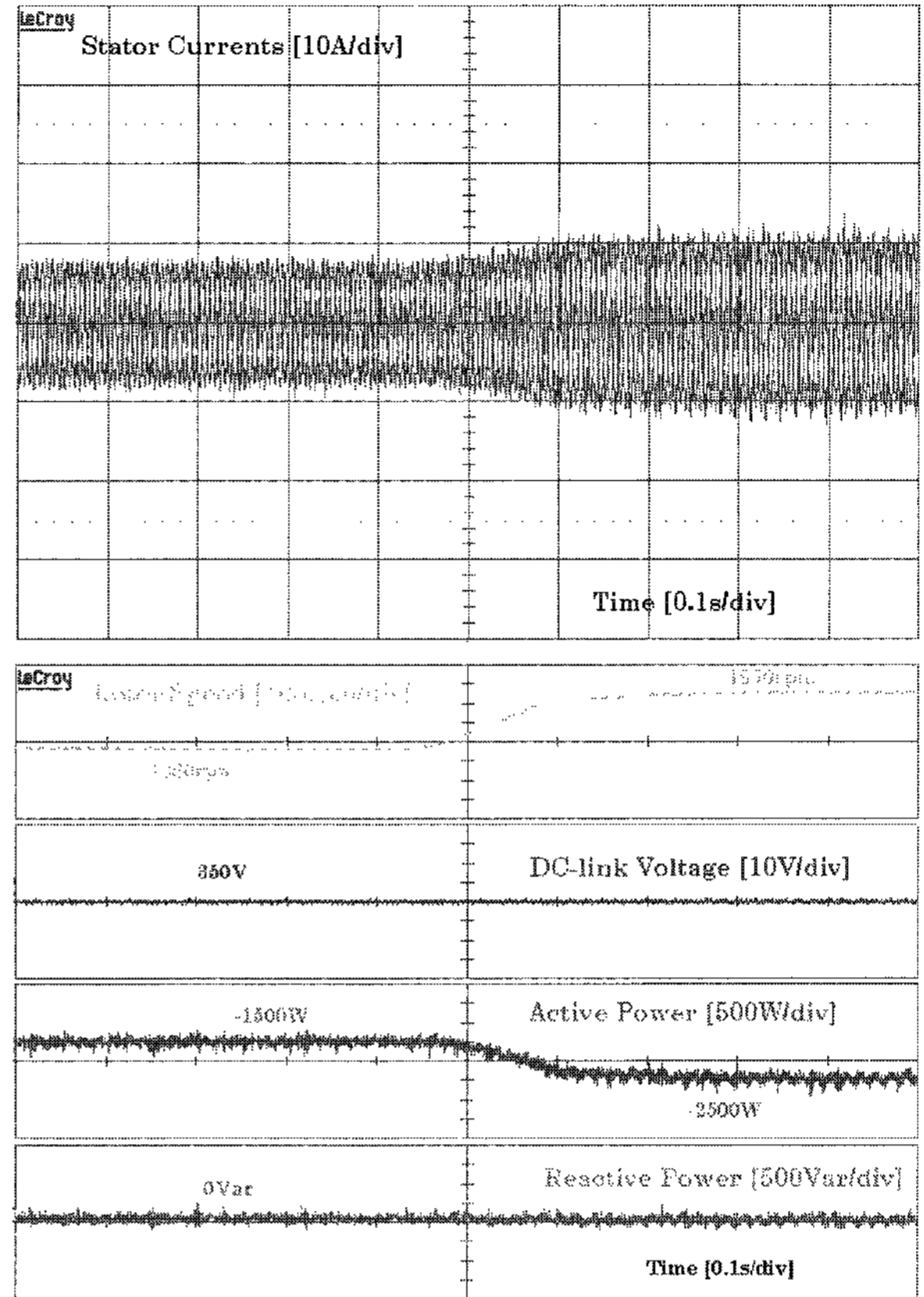


그림 13 풍력발전시스템의 실험결과  
Fig. 13 Experimental results of a complete  
generation system

## 6. 결 론

본 논문에서는 이중여자 유도형 풍력발전시스템에서 유효전력과 무효전력을 직접적으로 제어하고 기기상수 변화에 강인한 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기법을 제안하였다. 제안하는 제어기법은 기존의 자속기준제어기법에 비해 간단한 제어구조를 가지고 있다. 직접전력제어기법에서 히스테리시스 제어기에 의해 생기는 스위칭 주파수의 가변을 피하기 위해 공간전압벡터변조방식을 이용하여 스위칭 주파수가 고정되는 특성을 가진다. 시뮬레이션과 실험결과를 통해 제안하는 제어기법의 타당성을 입증하였다.

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-331-D00165).

## 참 고 문 헌

- [1] T. Ackermann, 'Wind Power in Power Systems' (John Wiley and Sons, 2005)
- [2] 송승호, 정병창, "이중여자 유도형 가변속 풍력발전기 제어 기술", *전력전자학회지*, 제11권 제1호, pp. 19-25, 2006. 2.
- [3] I. Boldea, 'Electric Drives'(Taylor & Francis, 2006)
- [4] S. Gomez and J. Rodriguez, "Grid Synchronization of Doubly Fed Induction Generators using Direct Torque Control", *2002 IECON*, pp. 3338-3343, 2002
- [5] B. K. Bose, 'Power Electronics and Motor Drives' (Academic, 2006)
- [6] K. B. Lee and F. Blaabjerg, "Sensorless DTC-SVM for Induction Motor Driven by a Matrix Converter Using a Parameter Estimation Strategy", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 5, No. 2, pp. 512-521, 2008, Feb.
- [7] N. R. N. Idris and A. H. M. Yatim, "Direct torque control of induction machines with constant switching frequency and reduced torque ripple", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 4, pp. 758-767, 2004, Aug.
- [8] 이교범, "비선형 모델을 이용한 Matrix Converter로 구동되는 축소차원 확장 루엔버거 관측기 기반의 센서리스 벡터제어의 성능개선", *전력전자학회지*, 제10권 제4호, pp. 363-372, 2005. 8.
- [9] C. Lascu, I. Boldea and F. Blaabjerg, "Variable-Structure Direct Torque Control - A Class of Fast and Robust Controllers for Induction Machine Drives", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 4, pp. 785-792, 2004, Aug.
- [10] R. Datta and V. T. Ranganathan, "Direct Power Control of Grid-Connected Wound Rotor Induction Machine Without Rotor Position Sensors", *IEEE Tran. Power Electronics*, Vol. 16, No. 3, 2001, May.
- [11] V. Utkin, J. Guldner and J. Shi, 'Sliding Mode Control in Electromechanical Systems' (Taylor & Francis, 1999)
- [12] T. Brekken and N. Mohan, "A Novel Doubly-fed Induction Wind Generator Control Schem for Reactive Power Control and Torque Pulsation Compensation Under Unbalanced Grid Voltage Conditions", *2003 IEEE Power Electronics Specialist Conference*, pp. 760-764, 2003.
- [13] 정병창, 송승호, 심동준, "가변 풍속시 운전모드 전환을 고려한 이중여자 유도형 풍력 발전기의 시뮬레이터," *전력전자학회 논문지*, 제11권 제4호, pp. 349-360, 2006. 8.
- [14] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, and J. R. Saenz, "Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 18, No. 2, 2003, June.
- [15] Y. Lei, A. Mullane, G. Lightbody, and R. Yacamini, "Modeling of the Wind Turbine With a Doubly Fed Induction Generator for Grid Integration Studies," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, 2006, Mar.
- [16] A. Proca, A. Keyhani, J. Miller, "Sensorless Sliding-Mode Control of Induction Motors Using Operating Condition Dependent Models," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 18, No. 2, pp. 205-212, 2003, June.

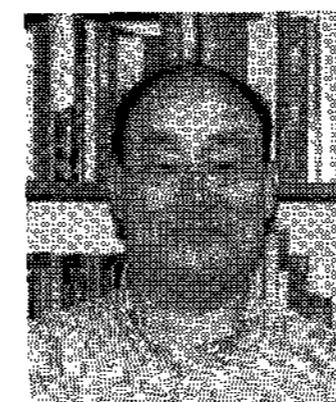
## 저 자 소 개

**김원상(金元相)**

1976년 3월 15일생. 2006년 전북대 전자정보공학부 졸업. 현재 아주대 전자공학과 석사과정.

**심경훈(沈暎勳)**

1980년 4월 4일생. 2006년 전북대 전자정보공학부 졸업. 현재 아주대 전자공학과 석사과정.

**이교범(李教範)**

1972년 6월 30일생. 1997년 아주대 공대 전자공학부 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 전기공학과 졸업(공학). 2003년~2006년 The Institute of Energy Technology, Aalborg University in Denmark. 2006년~2007년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2006년~현재 아주대 전자공학부 조교수.



**정병창(鄭炳昌)**

1976년 1월 26일생. 1998년 전북대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~2006년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2006년 4월~현재 LS산전 선임연구원.



**송승호(宋丞鎬)**

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공박). 1992년~1995년 포스콘 기술연구소 연구원. 2000년~2006년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2004년~2005년 미국 위스콘신대 방문교수. 2006년~현재 광운대 전기공학과 부교수. 당 학회 편집위원.