

이중여자 유도형 풍력발전기의 전력제어를 위한 스위칭 이득기반의 선형궤환제어기법

김원상*, 심경훈*, 주성탁*, 김서형*, 이교범*
*아주대학교 전자공학과

A Linear Feedback Method with Switched Gains to Control the Active and Reactive Powers of a Doubly Fed Induction Generator for Wind Turbines

Won-Sang Kim*, Gyung-Hun Sim*, Sung-Tak Jou*, Seo-Hyoung Kim
and Kyo-Beum Lee*

*School of Electrical and Computer Engineering, AJOU University

ABSTRACT

본 논문은 이중여자 유도형(DFIG) 풍력발전 시스템에서 유효전력과 무효전력을 직접적으로 제어하기 위해 가변구조제어의 일종인 스위칭 이득기반의 선형궤환(LFSG)제어기법을 제시한다. 개조된 직접전력제어기법(DPC)과 공간벡터변조방식(SVM)은 제안하는 제어기법을 실현하기 위해 이용된다. 개조된 직접전력제어원리를 이용해서 설계된 LFSG제어기법은 널리 사용되고 있는 자속기준제어기법(FOC)에 비해서 간단한 제어구조로 강인성과 빠른 응답특성을 보인다. 시뮬레이션결과를 제안하는 제어전략의 타당성과 강인성을 확인해준다.

1. 서론

이중여자 유도형 풍력발전 시스템은 가변속 운전방식으로, 높은 효율과 4상한 유효전력 및 무효전력 특성과 규모가 작은 전력용 컨버터 등과 같은 장점들이 있기 때문에 최근에 풍력발전에서 많이 적용되고 있다^[1]. 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.

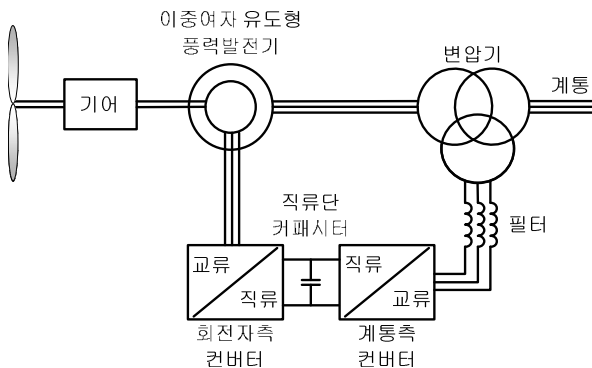


그림 1. 이중여자 유도형 풍력발전시스템

Fig. 1. Wind turbine system with doubly-fed induction generator.

여기서 계통 측 컨버터는 직류단 전압과 계통의 무효전력을

제어하며, 동기 기준 좌표계를 이용한 자속기준제어기법(FOC)으로 제어된다. 회전자 측 컨버터는 계통으로 전달되는 고정자 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어하며, 역시 자속기준제어기법으로 제어된다^[2]. 잘 알려진 자속기준제어기법의 단점은 고정자저항, 회전자 저항과 인덕턴스 등과 같은 기기상수에 의해 성능이 크게 영향을 받는다는 점이다. 따라서, 기기상수가 이 제어시스템에서 사용되는 값과 다르다면 성능은 저하된다.

가변구조제어(VSC)는 슬라이딩 평면 위에서 제어시스템의 구조를 변화시키는 불연속 스위칭 제어입력의 강인한 비선형제어어이다^[3]. 시스템의 상태변수가 슬라이딩 평면을 운동하는 동안, 시스템은 외란과 모델링 불확실성(uncertainty)에 독립적인 운동을 가지는 불변(invariant)의 특성을 가진다.

본 논문에서는 가변구조제어의 일종인 스위칭 이득기반의 선형궤환제어기법을 제안한다. 자속기준제어기법은 전력제어기 및 전류제어기와 축변환으로 구성되어 있는 복잡한 제어구조를 가지고 있다. 제안하는 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^[4]. 이중여자 유도형 풍력발전시스템의 운전모드는 유효전력을 기준으로 구분된다^[5,6]. 제안하는 전력제어기법을 전력제어모드에 적용하였으며 자동적인 모드전환으로 계통사고 발생시 회복이 가능하다.

2. 전력제어를 위한 스위칭 이득기반의 선형궤환제어기법

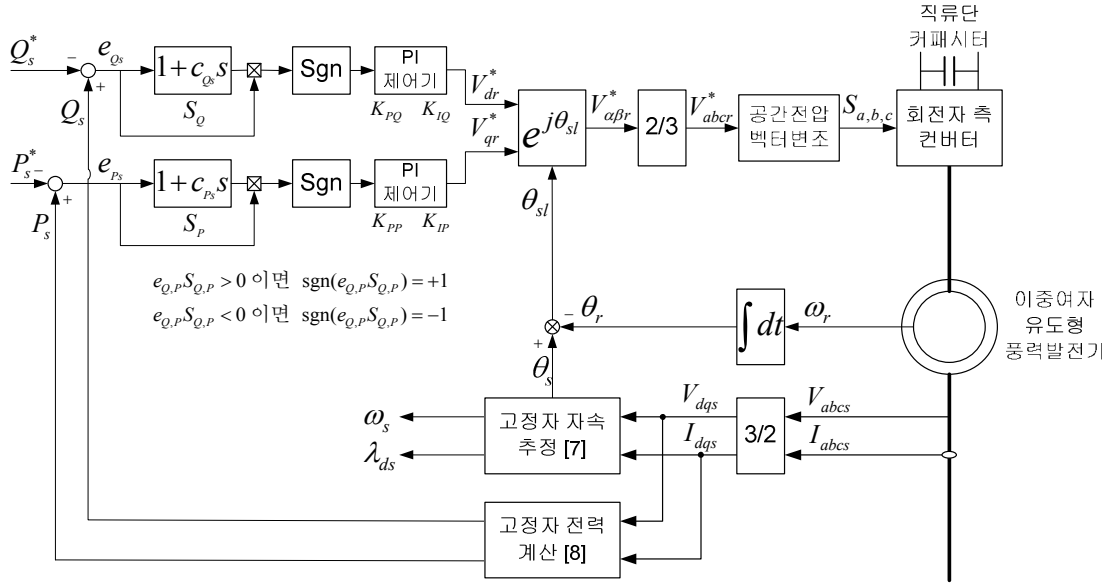
2.1 직접전력제어기법

임의의 기준좌표계에서 이중여자 유도형 풍력발전기 모델링은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

(2)



2. 제안하는 스위칭 이득기반의 선형제한제어기법의 개요도
 Fig. 2. Schematic diagram of the proposed LFSG for a DFIG system.

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 ω_r 은 각속도이다.

직접전력제어기법에서는 고정자 자속벡터가 고정자 자속의 위치에 따라 회전하는 동기기준좌표계를 이용한다. 고정자는 계통에 직접적으로 연결되어있기 때문에 고정자 자속은 일정하다고 가정한다. 동기기준좌표계 ($\omega_c = \omega_s$ - 고정자 자속속도, $\lambda_s^c = \lambda_{ds}$)를 이용하면 식 (1)의 고정자 전압벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$V_s^c = j\omega_s \lambda_s^c = j\omega_s \lambda_{ds}$$

(3)

고정자 전류는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_s^c = \frac{L_r \lambda_s^c - L_m \lambda_r^c}{L_s L_r - L_m^2} = \frac{\lambda_s^c}{\sigma L_s} - \frac{L_m \lambda_r^c}{\sigma L_s L_r}$$

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

고정자의 유효전력과 무효전력은 다음과 같이 계산된다.

$$S = P_s + jQ_s = \frac{3}{2} V_s^c \times I_s^{c*}$$

(5) 식 (4)를 식 (5)에 대입하고 식 (5)을 실수부분과 허수부분으로 분리하면 고정자의 유효전력과 무효전력은 다음과 같다.

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

$$P_s = -k_\sigma \omega_s \lambda_{ds} \lambda_{qr}$$

$$Q_s = k_\sigma \omega_s \lambda_{ds} \left(\frac{L_r}{L_m} \lambda_{ds} - \lambda_{dr} \right)$$

(6)

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

$$\Delta P_s = -k_\sigma \omega_s \lambda_{ds} \Delta \lambda_{qr}$$

$$\Delta Q_s = -k_\sigma \omega_s \lambda_{ds} \Delta \lambda_{dr}$$

(7)

식 (6) 및 (7)과 동기좌표계로 변환 한 식(2)를 결합하면 동기기준좌표계의 d-q 회전자 전압을 얻을 수 있다.

$$V_{dr} = -\frac{1}{T_s} \frac{\Delta Q_s}{k_\sigma \omega_s \lambda_{ds}} + \omega_{sl} \frac{P_s}{k_\sigma \omega_s \lambda_{ds}} \quad (8)$$

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

2.2 스위칭 이득기반의 선형제한제어기법

이중여자 유도형 풍력발전기의 스위칭 이득기반의 선형제한제어기법의 블록도는 그림 2와 같다. 구동장치는 일정한 고정자 자속에서 고정자 유효전력과 무효전력을 제어하기 위해 동작한다. 제안하는 제어기법은 선형제어기로서 전력오차에 따라서 PI 제어기의 비례이득과 적분이득의 부호가 달라지는 특성을 가진다. 제안하는 제어기법을 설계하기 위해 슬라이딩평면은 다음과 같이 선택할 수 있다.

$$S = S_{Qs} + jS_{Ps} = e_{Qs} + s c_{Qs} e_{Qs} + j(e_{Ps} + s c_{Ps} e_{Ps}) \quad (9)$$

여기서 $s = d/dt$ 이고 $e_{Qs} = Q_s^* - Q_s$ 와 $e_{Ps} = P_s^* - P_s$ 는 유효전력과 무효전력의 오차이다.

도달(reaching phase) 모드 후에 슬라이딩 모드에서 유효전력과 무효전력의 제어입력은 슬라이딩 평면(S)으로 시스템상태를 제한하고 시스템의 상태는 $S=0$ 으로 동작한다. 설계상수 c_{Qs} 와 c_{Ps} 는 슬라이딩모드에서 1차 동적시스템으로 동작하도록 결정한다. c_{Qs} 와 c_{Ps} 가 작을 경우 전력의 빠른 속응성을 얻을 수 있지만 가변구조제어의 동작영역은 줄어들게 된다. 극단적으로 영으로 설계 할 경우 제안하는 제어기법은 선형제어기로 동작하게 된다. 이러한 이유로 설계상수 c_{Qs} 와 c_{Ps} 를 적절하게 결정하는 것은 중요하다.

(8)의 회전자 전압을 PI 제어기로 구성 할 경우 비례이득과 적분이득은 기기상수 값으로 결정된다. 따라서, 기기상수가 변화하면 제어성능에 영향을 미치게 된다. 안정성문제를 고려하기 위해 리아푸노프 함수 $V(S(t)) = 0.5S^{2p,q}(t)$ 로 정의하고 미분하면 $dS_{P,Q}^2/dt < 0$ 이 되도록 제어입력을 다음과 같이 설계한다.

$$u = e_{P,Q} \text{sgn}(e_{P,Q} S_{P,Q})$$

(10)

여기서 sgn은 시그넘 함수이다.

기준 회전자 전압 V_{dr}^* 과 V_{qr}^* 은 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$V_{dr}^* = (K_{PQ} + K_{IQ} \frac{1}{s}) e_{Qs} \text{sgn}(e_{Qs} S_Q) + \omega_{sl} \frac{P_s}{k_\sigma \omega_s \lambda_{ds}}$$

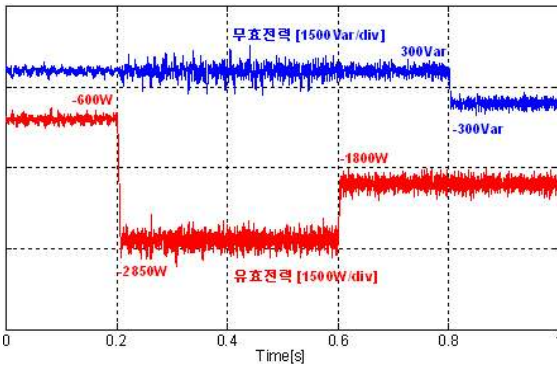
$$V_{qr}^* = (K_{PP} + K_{IP} \frac{1}{s}) e_{Qs} \text{sgn}(e_{Qs} S_P) + \omega_{sl} (\frac{L_r}{L_m} \lambda_{ds} - \frac{Q_s}{k_\sigma \omega_s \lambda_{ds}})$$

(11)

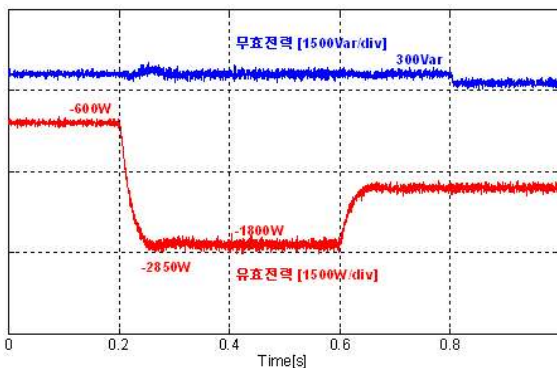
여기서 K_{PQ} , K_{IQ} , K_{PP} 와 K_{IP} 는 PI 제어기의 비례이득과 적분이득이다.

2. 시뮬레이션결과

제안하는 제어기법의 타당성을 입증하기 위해 Simulink/Matlab을 이용해서 검증하였다. 이중여자 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.



(가) 제안하는 제어기법(LFSG)



(나) 자속기준제어기법(FOC)

그림 3. 40%의 상호인덕턴스가 변화 할 때 제안하는 제어기법(LFSG)과 자속기준제어기법(FOC)의 전력 응답특성

Fig. 3. Simulation results of power step responses in the LFSG and FOC drive when the mutual inductance variation occurs.

그림 3는 제안하는 제어기법과 자속기준제어기법의 응답특성을 확인하기 위해 회전속도가 1800rpm으로 일정하게 유지되는 동안 유효전력의 계단변화를 0.2초일 때 -600W에서 -2850W로 인가하고 무효전력의 계단변화를 0.8초일 때 300Var에서 -300Var로 인가했을 때 유효전력응답특성, 무효전력응답특성을 보인다(“-”는 발전기에서 계통으로 전력전달을 의미한다). 그림 3(가)와 (나)는 40%의 상호인덕턴스 변화(LFSG(3(가))와 FOC(3(나)))가 생길 때 응답특성을 보여준다. 그림 3(가)에서 유효전력과 무효전력은 지령값에 따라 제어되고 있는 반면 그림 3(나)에서는 기기상수 변화가 생겼을 때 -300Var에서 무효전력은 제어되지 않고 유효전력은 오버슈트가 발생한다. 그림 3으로부터 제안하는 제어기법은 유효전력과 무효전력의 제어는 기기상수의 변화와 상관없이 강인한 제어특성을 보임을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 이중여자 유도형 풍력발전시스템에서 유효전력과 무효전력을 직접적으로 제어하고 기기상수 변화에 강인한 특성을 얻기 위해 스위칭 이득기반의 선형회환(LFSG)제어기법을 제안하였다. 제안하는 제어기법은 기존의 자속기준제어기법에 비해 간단한 제어구조를 가지고 있으며 스위칭 주파수의 가변을 피하기 위해 공간전압벡터변조방식을 이용하여 스위칭 주파수가 고정되는 특성을 가진다. 시뮬레이션결과를 통해 제안하는 제어기법의 타당성을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] T. Ackermann, 'Wind Power in Power Systems' (John Wiley and Sons, 2005)
- [2] I. Boldea, 'Electric Drives'(Taylor & Francis, 2006)
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 송승호, 정병창, "이중여자 유도형 가변속 풍력발전기 제어 기술", *전력전자학회지*, 제11권 제1호, pp. 19-25, 2006. 2.
- [6] 정병창, 송승호, 심동준, "가변 풍속시 운전모드 절환을 고려한 이중여자 유도형 풍력 발전기의 시뮬레이터," *전력전자학회 논문지*, 제11권 제4호, pp. 349-360, 2006. 8.
- [7] 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.
- [8] 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.