

풍력발전용 농형유도발전기의 최대출력제어

구 성영 이 동춘
영남대학교 전자정보공학부

Maximum Output Control of Cage-Type Induction Generator for Wind Power Generation

Seung-Young Koo, Dong-Choon Lee
School of Electrical Engineering and Computer Science, Yeungnam University

Abstract - In this paper, a maximum power control of a low-cost and rugged cage-type induction generator system is proposed, where the machine-side PWM converter is used for maximum power generation and field excitation control, and the line-side PWM inverter is used for the dc link voltage control and source-side power factor control. Simulation results through Matlab Simulink have been demonstrated.

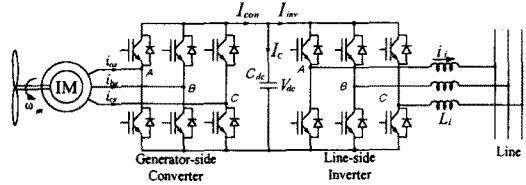


그림 1 Ac/dc/ac컨버터를 이용하는 농형유도발전기 시스템

1. 서 론

풍력발전용 발전기로 동기기가 사용되는데 동기기는 주로 대용량에 사용되고 소용량의 발전에는 유도기가 일반적으로 사용된다. 유도발전기 중에서 권선형은 슬립전력제어에 의해 가변속 운전이 쉽게 얻어지므로 그동안 많이 사용되어 왔다[1]. 그러나 권선형은 슬립링을 가지므로 유지보수에 대한 문제점이 존재한다. 그러나, 농형유도기는 구조상 권선형에 비해 견고하고 유지보수 비용이 거의 들지 않는 장점을 지니고 있어 최근에는 농형에 관한 연구가 활발히 전개되고 있다[2].

농형유도기를 발전기로 이용할 경우 초기에 여자전력을 공급하여야 한다. 이를 위해 농형 유도발전기의 출력단에 커패시터 뱅크를 연결하는 방법이 있고[3] 또 PWM 인버터를 이용하여 무효전력을 공급하는 여자방식이 있다[4]. 그러나 이러한 방법은 변하기 쉬운 발전기의 출력주파수가 일정주파수의 부하에 바로 연결되는 문제가 있다. 한편, ac/dc/ac PWM 컨버터를 사용하면 여자전력을 원활히 공급할 수 있을 뿐만 아니라 발전된 출력전력을 부하로 직접 전달할 수 있다[5]. 그리고 풍력터빈이 일정속으로 운전될 경우 풍력에너지가 최대로 이용되지 못하므로 풍속에 따라 최대 출력전력을 발생하는 회전속도로 터빈을 운전시키는 가변속 발전시스템이 풍력발전 분야에 확산되고 있다[6].

본 논문에서는 농형 유도발전기 시스템에 ac/dc/ac PWM 컨버터를 사용하여 발전기의 여자 및 출력전력을 제어하는 기법을 제안하고 Matlab Simulink를 이용한 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증한다.

2. 풍력터빈의 특성

먼저 풍력터빈의 공기역학적 특성이 간단히 고찰된다. 풍력터빈은 수평형과 수직형으로 구분되는데 본 연구에서는 수평형 터빈을 대상으로 한다.

풍력터빈의 특성은 터빈의 전력계수(Cp)와 주속비(tip-speed ratio)의 곡선에 의해 주어진다. 주속비는 식(1)과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V} \quad (1)$$

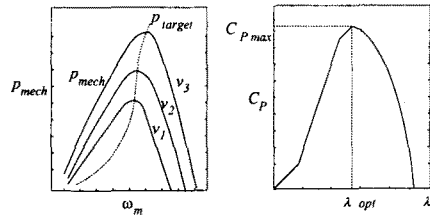


그림 2 풍력터빈의 출력특성 곡선

- λ : 주속비
- ω_m : 풍차의 회전속도([rad/sec])
- R : 풍차의 반지름(m)
- V : 풍속(m/sec)

풍력터빈에 의해 발생하는 전력은 식(2)와 같다.

$$P_{mech} = 0.5 \rho A C_p V^3 \quad (2)$$

- P_{mech} : 풍력터빈에 포획된 전력
- ρ : 공기밀도[Kg / m³]
- A : 터빈의 단면적
- C_p : 풍력터빈의 전력계수

C_p 는 λ 의 함수로 표현되는데 $C_{p,max}$ (최대 C_p)에서 풍력터빈이 동작한다면 발생출력은 최대가 된다. 그림 2는 풍력터빈의 출력특성을 나타내고 있다.

그림 2에서와 같이 풍속을 변수로 하여 최대 출력을 발생하는 속도지령치는 식(1)에 의해서 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt} \times V}{R_m} \quad (3)$$

따라서, 풍속에 대한 최대출력과 토크 값은 식(2)와 (3)에 의해서 각각 식(4)와 식(5)가 된다.

$$P_{target} = 0.5 \rho \pi R_m^5 \frac{C_{p,max}}{\lambda_{opt}^3} \omega_m^{*3} \quad (4)$$

$$T_{target} = \frac{P_{target}}{\omega_m^*} = 0.5 \rho \pi R_m^5 \frac{C_{p,max}}{\lambda_{opt}^3} \omega_m^{*2} \quad (5)$$

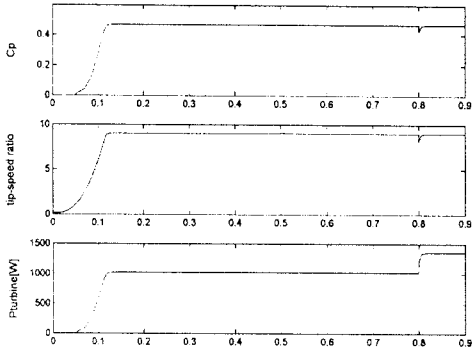


그림 3 최대 출력 제어시의 C_p 와 λ

이러한 풍력터빈의 출력은 유도발전기의 기계방정식을 통해서 축전력으로 전달된다. 기계방정식은 식(6), (7)과 같다.

$$T_m - T_{load} = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \omega_m J \frac{d\omega_m}{dt} &= P_{mech} - P_{load} \\ &= 0.5 \rho A C_p V^3 - P_{load} \end{aligned} \quad (7)$$

본 논문에서 연구대상으로 선정된 풍력터빈은 기어박스가 없는 직결식이며, 정격풍속, 정격 회전자속도, 정격출력은 각각 $v = 14m/sec$, $N = 1200rpm$, $P_m = 2.7kW$ 와 같다. 또한 $C_{pmax} = 0.47$, $\lambda_{opt} = 9$ 로, 그리고 회전자 반경은 $R = 1.05m$ 로 선정하였다.

풍속의 변화에 대하여 최대전력제어를 수행하면 기동 이후 터빈이 항상 최대 C_p 와 λ_{opt} 값을 유지하며 동작함을 그림 3에서 알 수 있다.

3. 농형유도발전기의 출력전력제어

본 연구에서는 농형유도발전기의 전력변환시스템을 ac/dc/ac PWM 컨버터로 구성하였으며 발전된 전력을 계통에 연계하는 것으로 가정한다. 발전기측 PWM 컨버터는 최대전력점에서의 발전을 위해 속도제어를 수행하고 이와 동시에 발전기의 여자전류를 공급하여 자속제어를 수행한다. 계통측 PWM 인버터는 직류링크 전압제어와 단위역률제어를 수행하고 계통으로 전력을 전달한다.

3.1 발전기측 컨버터의 제어

발전기측 PWM 컨버터의 제어블럭도는 그림 4와 같다. 가변주파수 가변전압의 전력이 PWM 컨버터에 의해서 직류링크단으로 전달된다. 농형유도발전기는 간접 벡터제어에 의해서 토크제어를 위한 유효전력분 전류와 발전기의 자속제어를 위한 무효전력분 전류를 독립적으로 제어한다.

가변속 발전시스템에서 최대전력을 발생하기 위해서는 그림 2에서의 P_{target} 을 따라 발전이 수행되어야 하며 이는 발전기의 속도제어를 통해 얻을 수 있다. 이러한 속도제어를 통해 가변속 발전시스템은 일정속 발전시스템보다 우수한 에너지 변환효율을 얻을 수 있다. 최대전력점은 C_p 가 최대인 λ_{opt} 점을 유지할 때 발생하며 최대전력을 발생할 수 있는 속도지령치 식(3)을 이용한다.

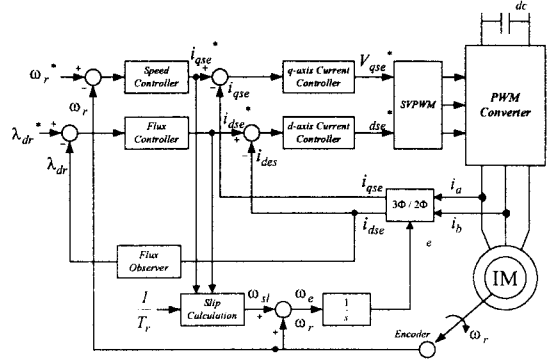


그림 4 발전기측 PWM 컨버터의 제어블럭도

농형유도발전기는 초기의 전압확립을 위해 여자전류를 공급받아야 하는데 이는 유도기를 우선 전동기 모드로 동작시킴으로써 이루어진다. 자속이 확립되면 풍력터빈에 의해 발생된 전력을 이용하여 발전기로 동작된다.

농형유도발전기의 모델방정식은 다음과 같다.

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + \frac{d\lambda_{ds}^e}{dt} - \omega \lambda_{qs}^e \quad (8)$$

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \frac{d\lambda_{qs}^e}{dt} + \omega \lambda_{ds}^e \quad (9)$$

$$0 = R_r i_{dr}^e + \frac{d\lambda_{dr}^e}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr}^e \quad (10)$$

$$0 = R_r i_{qr}^e + \frac{d\lambda_{qr}^e}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr}^e \quad (11)$$

$$\lambda_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^e \quad (12)$$

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^e \quad (13)$$

$$\lambda_{dr}^e = L_r i_{dr}^e + L_m i_{ds}^e \quad (14)$$

$$\lambda_{qr}^e = L_r i_{qr}^e + L_m i_{qs}^e \quad (15)$$

회전자자속 기준 간접벡터제어에 의하면 회전자 자속이 d-축에만 존재하고 q-축은 식(16)과 같이 0이 된다.

$$\lambda_{qr}^e = 0 \quad (16)$$

농형유도기의 토크는 식(17)과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e i_{qs}^e \quad (17)$$

또한, 회전자 전압방정식으로부터 슬립이 다음과 같이 표시된다.

$$\omega_{sl} = \frac{R_r}{L_r} \frac{L_m}{\lambda_{dr}^e} i_{qs}^e \quad (18)$$

그리고 동기각속도는 다음과 같다.

$$\omega_e = \omega_{sl} + \omega_r \quad (19)$$

마지막으로, 회전자 자속은 식(20)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{L_r}{R_r} \frac{d\lambda_{dr}^e}{dt} + \lambda_{dr}^e = L_m i_{ds}^e \quad (20)$$

벡터제어가 적용된 경우 고정자 전압방정식은 다음과 같이 표현된다.

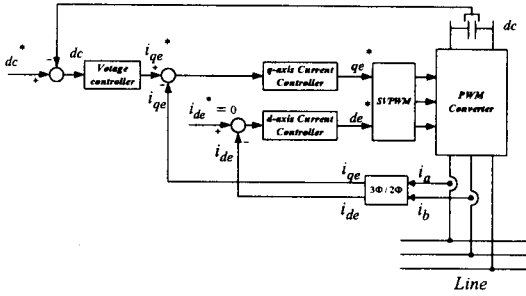


그림 5 계통측 PWM 인버터의 제어블럭도

$$v_{ds}^e = (R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}) i_{ds}^e + p \sigma L_s i_{ds}^e - \omega_e \sigma L_s i_{qs}^e - R_r \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e \quad (21)$$

$$v_{qs}^e = (R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}) i_{qs}^e + p \sigma L_s i_{qs}^e + \omega_e \sigma L_s i_{ds}^e + \omega_r \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e \quad (22)$$

그림 4는 유도발전기의 속도제어와 자속제어를 수행하는 벡터제어 블럭도를 보인다.

3.2 계통측 인버터의 제어

계통측 PWM 인버터의 제어블럭도는 그림 5와 같다. 계통측 PWM 인버터는 발전된 전력을 계통으로 공급하고 출력전류의 역률제어 역할을 수행한다. 계통측의 출력전력이 증가하면 직류링크 전압이 감소하고 반대일 경우 직류링크 전압이 증가한다. 따라서 출력전력의 제어를 통해서 직류링크 전압을 제어할 수 있다. 유효전력분 전류인 i_{qe} 전류의 제어를 통해서 발전전력을 계통으로 공급하고 무효전력분 전류인 i_{de} 의 제어를 통해서 출력전력의 역률을 제어한다.

3상 계통 전압과 인터페이스 인덕터로 구성된 3상 PWM 인버터의 전압방정식은 식(23)~(25)와 같다.

$$e_a = R_i i_a + L_i \frac{di_a}{dt} + V_a \quad (23)$$

$$e_b = R_i i_b + L_i \frac{di_b}{dt} + V_b \quad (24)$$

$$e_c = R_i i_c + L_i \frac{di_c}{dt} + V_c \quad (25)$$

여기서 e_a, e_b, e_c 는 계통전압, i_a, i_b, i_c 는 계통의 상전류, V_a, V_b, V_c 는 제어전압이다.

위의 전압방정식을 d-q 동기좌표계에서 표현하면 식(26)~(27)과 같다.

$$0 = R i_{de} + L \frac{di_{de}}{dt} - \omega L i_{qe} + v_{de} \quad (26)$$

$$E = R i_{qe} + L \frac{di_{qe}}{dt} + \omega L i_{de} + v_{qe} \quad (27)$$

직류링크 전압제어는 발전기의 출력과 계통으로 전달되는 인버터의 출력과의 차이를 고려함으로써 이루어진다.

$$P_{in} - P_{out} = \frac{C_{dc}}{2} \frac{dV_{dc}^2}{dt} \quad (28)$$

$$P_{in} = V_{dc} I_{dc} = V_{dc}(i_{as}S_a + i_{bs}S_b + i_{cs}S_c) \quad (29)$$

여기서, P_{in} 은 발전기의 출력, P_{out} 은 계통으로 공급되는 전력이고 S_a, S_b, S_c 는 발전기측 PWM 컨버터의 스위칭 함수이다.

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션을 위해 Matlab simulink를 사용하였다. 표 1과 2는 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 나타낸다. Ac/dc/ac PWM 컨버터의 스위칭주파수는 5[kHz]이며 공간벡터변조법을 사용하였다. 직류링크단의 커패시터 값은 2700[μF]으로 선정하였으며 계통은 3상 교류 220[V], 60[Hz]의 상용전원이다.

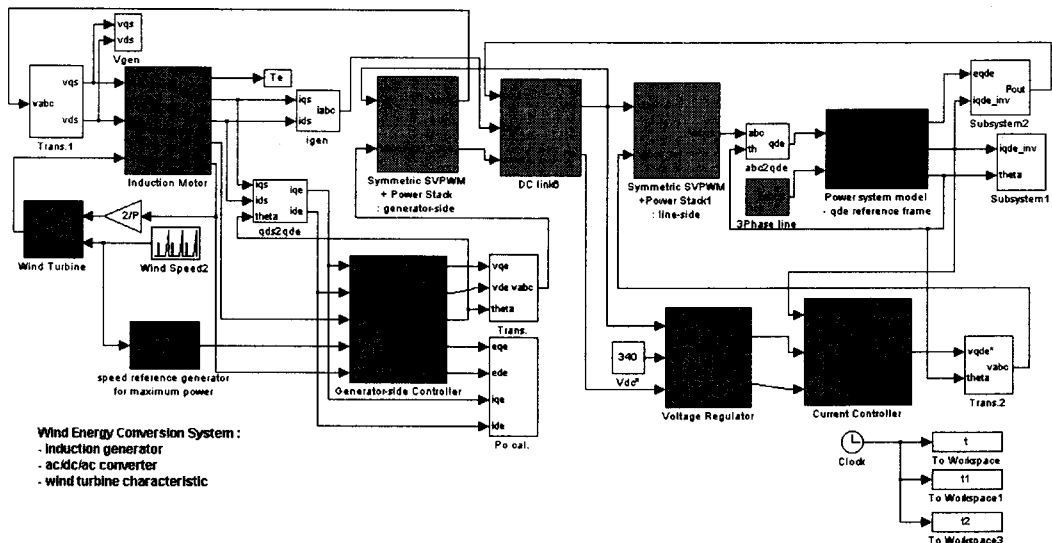


그림 6 풍력발전시스템의 Simulink 블럭도

4.2 시뮬레이션 결과

그림 6은 시뮬레이션을 위해 Matlab Simulink로 구성한 전체 풍력발전 시스템의 블럭도를 나타낸다. 풍력터빈특성을 모의하는 블럭과 농형유도발전기 모델링 그리고 전력변환회로와 제어부로 구성된다.

그림 7은 풍력특성을 모의하는 블럭도를 나타낸다. 농형유도발전기의 초기 전압확립을 위해 0~0.5초동안 전동기로 구동시키고 그 이후에 풍력터빈의 토크를 인가한다. 또한 풍속의 변화에 대한 최대전력제어 특성을 관찰하기 위해서 0.6초에서 0.7초 구간 동안 풍속을 10[m/sec]에서 11[m/sec]로 변화시켰다. 발전기측 PWM 컨버터 제어기에서 전류제어기, 속도제어기, 자속제어기의 차단주파수는 각각 6000[rad/sec], 600[rad/sec], 60[rad/sec]이다.

그림 8은 기동시의 전동기 모드에서 자속제어를 통해 자속이 확립되는 과정을 보인다. 추정된 자속이 일정하게 유지됨을 보인다.

그림 9는 전동기 모드에서 발전기모드로 천이되는 과정을 보인다. 즉, 속도제어를 통해서 전력계수를 $C_p \max$ 로 유지시킴으로써 목표전력인 P_{target} 을 발생시킬 수 있음을 보인다.

그림 10은 최대전력 발생을 위한 속도제어기의 응답과 토크 T_e 가 i_{qsc} 에 의해서 제어됨을 보여준다. 그림 8부터 10의 결과로서 농형유도발전기의 토크와 자속이 독립적으로 제어됨을 알 수 있으며 풍속의 변화에 대해서 가변속도로 최대전력을 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 11는 직류링크단의 입력전력과 출력전력이 식 (28)과 같이 평형을 유지하여 직류링크단의 전압이 제어됨을 보여준다.

표 1 풍력터빈의 파라미터

파라미터	값
풍력터빈의 정격전력	2.7[kW]
정격풍속	14 [m/sec]
회전자의 정격속도	1200 [rpm]
공기밀도	1.25 [kg/m ³]
블레이드의 반경	1.05 [m]

표 2 3hp 농형유도발전기의 파라미터

파라미터	값
정격출력	2.2 [kW]
정격전압	220 [V]
고정자 저항	0.83 [Ω]
회전자 저항	0.91 [Ω]
고정자 누설 인덕턴스	3.25 [mH]
회전자 누설 인덕턴스	3.25 [mH]
상호 인덕턴스	166 [mH]
극수	6
정격속도	1150 [rpm]

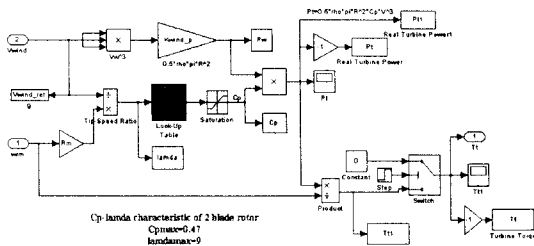


그림 7 풍력터빈의 모델

그림 12과 13는 계통측 PWM 인버터에 의해서 각각 직류링크단의 전압제어와 단위역률제어가 수행됨을 보인다. 그림 12를 통해서 직류링크 전압이 풍속 변동시에도 일정전압을 유지하는 전압제어 응답특성을 알 수 있다. 인버터의 전압, 전류제어기의 차단 주파수는 각각 300[rad/sec], 3000[rad/sec]이다.

출력 컨버터의 무효전력분 전류 i_{de} 의 제어를 통해서 계통의 역률을 단위역률로 제어할 수 있음을 그림 13로 알 수 있다. 전압과 전류의 위상이 180° 위상차로 계통측으로 전력이 전달됨을 알 수 있다.

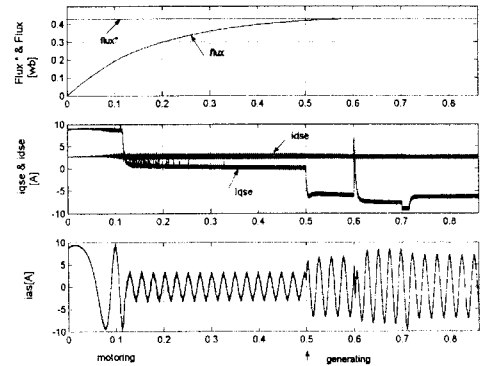


그림 8 무효전력분 전류에 의한 자속제어

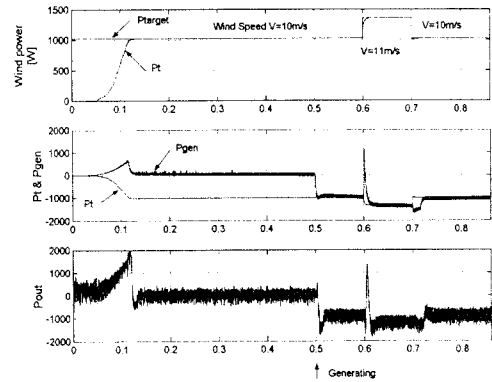


그림 9 풍력발전에 의한 전력전달

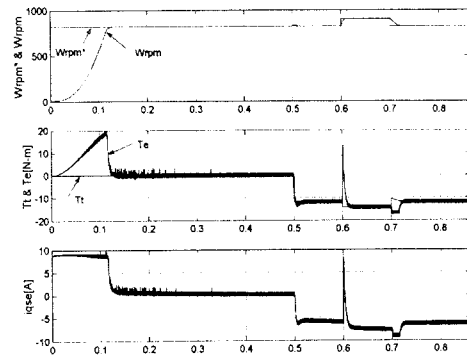


그림 10 속도제어기의 응답

4. 결 론

본 연구에서는 풍력발전을 위하여 저가이고 견고한 장점을 가진 농형유도발전기를 대상으로 ac/dc/ac PWM 컨버터를 이용하여 최대출력제어를 연구자 하였다. 풍속의 변화에 대응하여 가변속으로 발전을 수행하여 풍력에너지를 변환효율을 최대로 이용하였다. 발전기측 컨버터의 q축전류는 발전기가 풍력터빈의 최대전력점에서 운전할 수 있도록 토크를 제어하였으며 d축전류는 발전기의 여자전류를 일정한 양으로 유지하여 자료가 포화되는 것을 막아 넓은 운전영역에서 발전을 가능케 한다. 그리고 부하측 인버터는 부하에 일정전압 일정주파수의 전력을 공급하기 위해서 사용하였으며 직류링크 전압제어, 역률제어도 수행되었다. Matlab Simulink를 이용한 시뮬레이션을 통해 제시한 알고리즘이 타당함을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.Pena, J.C.Clare and G.M.Asher, "A Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine", Proc. of IEE EPA, vol.143, pp.380~387, 1996.
- [2] P.K.Shadhu and J.K.Chatterjee, "Three-Phase Induction Generators : A Discussion on Performance", Electric Machines and Power Systems, vol.27, pp.813~832, 1999
- [3] Li Wang and Jian-Yi Su, "Dynamic Performances of an Isolated Self-Excited Induction Generator under Various Loading Conditions", IEEE Trans. on EC, vol.14, pp.93~100, 1999.
- [4] C.Colliez, A.Tounzi and F.Piriou, "Vector Control of an Autonomous Induction Generator Connected to a PWM Rectifier", Proc. of EPE'97, vol.2/3, pp.2.711~2.716, 1997.
- [5] N. Horiuchi, T. Kawahito and T. Suzuki, "Power Control of Induction Generator by V/F Control for Wind Energy Conversion System", JIEE., vol.118-B, pp.1170~1176, 1998.
- [6] E. Muljadi, C. P. Butterfield and P. Migliore, "Variable Speed Operation of Generators with Rotor-Speed Feedback in Wind Power Applications", Trans. of ASME, vol.118, pp.270~277, 1996.

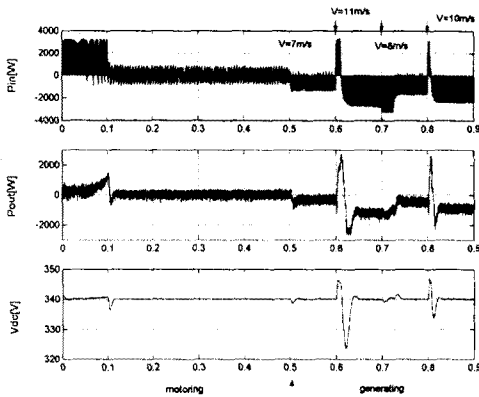


그림 11 직류링크단의 전력흐름

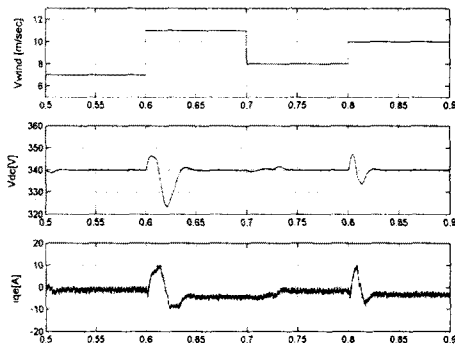


그림 12 직류링크 전압제어기의 응답

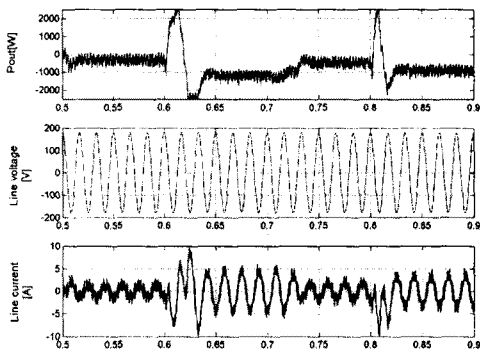


그림 13 출력상전압과 상전류의 단위역률제어