

PMSG 풍력발전 시스템의 출력 제어 및 주파수 제어 연구

A Study on Frequency Control and Active Power Control of Wind Turbine Generation System for PMSG

이 광 수* · 김 문 겸†
(Kwang-Soo Lee · Mun-Kyeom Kim)

Abstract - This paper proposes active power control and frequency support control schemes of wind turbine generation system by using modified Maximum Power Point Tracking(MPPT) of Permanent Magnet Synchronous Generator(PMSG). Most wind turbine generation system is completely decoupled from the power system and power output control with pitch control. According to the frequency deviation, however, MPPT control can not contribute to the frequency change of the power system due to its active power output control. For solving this, the de-loaded(DL) control scheme is constructed for the frequency support control, which is based on applying the active power output control in the rotor speed control of PMSG. The rotor speed by used in the proposed DL control scheme is increased more than the optimal rotor speed of MPPT, and then this speed improvement increases the saved kinetic energy(KE). In order to show the effectiveness of the proposed control scheme, the case studies have been performed using the PSCAD/EMTDC. The results show that the proposed active power output control scheme(DL control and KE discharge control) works properly and the frequency response ability of the power system can be also improved with the frequency support of wind farm.

Key Words : Permanent Magnet Synchronous Generator(PMSG), De-loaded control(DL), Frequency support control, Kinetic Energy discharge control

1. 서 론

최근 대규모 해상 풍력발전 단지의 건설 등에 의해 풍력발전 점유율이 급격하게 증가하고 있다. 하지만 이를 통해 계통의 기존 동기발전기들의 출력 및 주파수 제어를 위한 관심이 감소하고 주파수 조정 능력이 떨어지는 문제가 발생한다. 따라서 현재 대규모 풍력발전 단지의 경우 계통의 동기발전기와 동등한 수준으로 주파수 제어에 참여가 요구되는 실정이며 이에 풍력발전기에 대한 출력 제어 및 주파수 제어를 위한 다양한 측면에서의 활발한 연구를 수행 할 필요가 있다. 최근 연구가 진행되고 있는 풍력발전기의 주파수 제어 기법으로는 Inertial response control, Proportional control, Kinetic energy discharge control 크게 3가지 기법을 제시할 수 있다. 먼저, Inertial response control은 계통의 주파수 변화율에 비례하여 회전자 회전속도(rotor speed)를 변화시켜 주파수 제어에 참여한다[1]. 다음으로, Proportional control은 기존 동기발전기의 droop 제어와 동일한 방법으로 출력증감을 통하여 주파수 제어에 참여하는 것을 의미한다[2]. 마지막으로, Kinetic energy discharge control은 풍력발전기의 turbine blade와 rotor에 저장된 운동에너지(Kinetic Energy: KE)를 Rate of Change of Frequency(ROCOF)를 고려하여 정해진 크기의 출력제어를 통해 계통의 주파수 제

어에 참여하는 방식을 의미한다[3]. 이러한 3가지 기법은 Maximum Power Point Tracking(MPPT) 기법과 함께 적용하여 풍력발전기의 출력 제어 및 주파수 제어에 참여할 수 있다. 하지만 MPPT를 통한 출력제어 기법으로는 기존 동기발전기의 droop 제어와 거의 동등한 수준으로 운전하기 위해 필요한 예비력의 확보가 어렵다. 이를 해결하기 위해서 예비력의 확보가 가능하며 회전자 회전속도를 증가시켜 높은 KE reserve를 얻을 수 있는 de-loaded(DL) control scheme 개발 및 추가적인 제어기의 구성이 필요하다. 또한 Permanent Magnet Synchronous Generator(PMSG) 타입의 풍력발전기를 사용할 경우 full scale converter에 따른 DC-link 용량 및 전압이 높으며, 비교적 큰 관성지수를 갖는다는 점을 고려할 때 계통에서 요구되는 주파수 제어에 참여할 수 있는 폭이 더 클 것으로 기대된다.

이에 본 논문에서는 PMSG 풍력발전기의 출력을 제어하여 안정적으로 일정하게 예비력을 확보할 수 있는 DL control scheme과 출력 제어 시 증가하는 회전자 회전속도에 의해 확보되는 KE를 활용한 frequency support control scheme을 제안한다. 제안하는 DL control은 출력 제어 시 회전자 회전속도가 큰 폭으로 감소하는 경우가 발생할 수 있기 때문에, 이로 인한 불안정을 방지하기 위해서 회전자 회전속도를 기준으로 최대 출력을 결정하고 이 출력을 제안하는 제어기로 구현하였다. 반면, KE discharge control은 계통의 주파수가 감소하는 경우에 KE reserve를 활용하여 frequency support control에 적극 참여 하는 것을 목적으로 한다. 제안하는 PMSG 풍력발전기의 출력 제어 및 주파수 제어는 PSCAD/EMTDC를 사용하여 소규모 계통을 모델링

* Dept, of Electrical Engineering, Dong-A University, Korea
† Corresponding Author : Dept, of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Korea
E-mail : mkim@cau.ac.kr

Received : January 17, 2014; Accepted : March 31, 2014

하여 검증하였으며, 사례연구를 통해 계통의 frequency response 특성을 향상시킬 수 있음을 보였다.

2. 전체 제어기의 구성

풍력발전 시스템의 전체 구조는 블레이드와 PMSG 그리고 발전기를 제어하는 컨버터 모델로 구성된다. 그림 1은 PMSG 풍력발전 시스템의 구성을 보인다. PMSG는 고정자 권선을 통해 Machine Side Converter(MSC)와 Grid Side Converter(GSC)에 연결된다. MSC는 풍력발전기의 유효전력과 무효전력 출력 제어가 가능하고, GSC는 계통으로 공급되는 무효전력 용량에 대해서 DC-link 전압 제어를 통해 확보할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 DL control 및 KE discharge control을 통한 frequency support control의 이론 및 제어기 구성은 3장과 4장에서 제시한다.

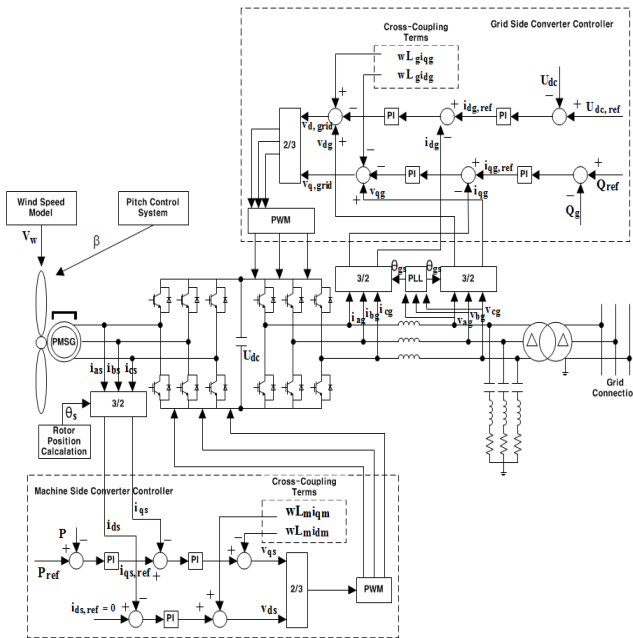


그림 1 PMSG 풍력발전 시스템 구성

Fig. 1 Configuration of PMSG wind turbine generation system

2.1 Generator Modeling

본 장에서는 PMSG 타입의 벡터 제어에 대한 수학적인 모델링을 다루며 3상 PMSG 타입의 전압방정식은 다음과 같이 정의된다[4].

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{d}{dt}(l_s + M) & -\frac{1}{2} \frac{d}{dt} M & -\frac{1}{2} \frac{d}{dt} M \\ -\frac{1}{2} \frac{d}{dt} M & R_s + \frac{d}{dt}(l_s + M) & -\frac{1}{2} \frac{d}{dt} M \\ -\frac{1}{2} \frac{d}{dt} M & -\frac{1}{2} \frac{d}{dt} M & R_s + \frac{d}{dt}(l_s + M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 v_{as} , v_{bs} , v_{cs} 는 고정자 a, b, c상전압이고, i_{as} , i_{bs} ,

i_{cs} 는 고정자 a, b, c상전류이다. a, b, c상 고정자권선에 유기되는 속도기전력은 e_{as} , e_{bs} , e_{cs} 이고, R_s 는 고정자 권선저항, l_s 는 고정자 권선의 누설 인덕턴스, M 는 고정자 권선 사이의 상호 인덕턴스이다. 평형 3상 회로에서 각 상전류의 합은 0이 되며 $L_s = l_s + (3/2)M$ 일 때(동가인덕턴스(L_s)), 전압 방정식을 간략화하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{d}{dt} L_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s + \frac{d}{dt} L_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s + \frac{d}{dt} L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$v_{as} = R_s i_{as} + L_s \frac{di_{as}}{dt} + e_{as} \quad (3)$$

$$v_{bs} = R_s i_{bs} + L_s \frac{di_{bs}}{dt} + e_{bs} \quad (4)$$

$$v_{cs} = R_s i_{cs} + L_s \frac{di_{cs}}{dt} + e_{cs} \quad (5)$$

식 (3)-(5)을 벡터 형태로 통합하면 다음과 같다.

$$V_{abcs} = R_s I_{abcs} + L_s \frac{dI_{abcs}}{dt} + E_{abcs} \quad (6)$$

PMSG의 회전자에 의해서 고정자 권선에 쇄교하는 자속의 수를 Ψ_a , Ψ_b , Ψ_c 라 하고, 자속의 최대값을 Ψ_f 라 하면 고정자 권선에 쇄교하는 자속의 크기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Psi_a &= \Psi_f \cos \theta \\ \Psi_b &= \Psi_f \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) \\ \Psi_c &= \Psi_f \cos \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \end{aligned} \quad (7)$$

이때 동기위상각 θ 는 회전속도 w_r 로 계산되며 $\theta = \int w_r dt$ 라 하면, 3상 고정자 권선에 유기되는 기전력은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} e_{as} &= -w_r \Psi_f \sin \theta \\ e_{bs} &= -w_r \Psi_f \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) \\ e_{cs} &= -w_r \Psi_f \sin \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \end{aligned} \quad (8)$$

3상 상태방정식을 d-q 정지좌표계(Stationary reference frame, $w=0$)로 변환하기 위해서는 다음과 같은 변환 행렬을 곱한다.

$$T(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (6)에 식 (9)를 곱하면

$$T(0) V_{abc} = R_s T(0) I_{abc} + L_s \frac{dI_{abc}}{dt} T(0) + T(0) E_{abc} \quad (10)$$

$$V_{dq}^s = R_s I_{dq}^s + L_s \frac{dI_{dq}^s}{dt} + E_{dq}^s \quad (11)$$

고정자에 유기되는 기전력은 식 (8)에 식 (11)를 대입하여 다음과 같이 구한다.

$$E_{dq}^s = \begin{bmatrix} -w_r \Psi_f \sin\theta \\ w_r \Psi_f \cos\theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

정지좌표계의 쇄교자속은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ds}^s \\ \Psi_{qs}^s \end{bmatrix} = T(0) \begin{bmatrix} \Psi_f \cos\theta \\ \Psi_f \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \Psi_f \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_f \cos\theta \\ \Psi_f \sin\theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

회전기기의 제어를 수행하기 위해서는 정지좌표계 상태방정식을 동기좌표계로 변환해야 하며, 동기위상각을 사용한 변환 행렬을 식 (11)에 곱하여 정리하면 다음과 같다.

$$V_{dq}^c = R_s I_{dq}^c + L_s \frac{dI_{dq}^c}{dt} + L_s \begin{bmatrix} 0 & -w_r \\ w_r & 0 \end{bmatrix} + E_{dq}^c \quad (14)$$

3상 상태방정식을 동기좌표계 d-q로 변화하면 식 (14)와 같고 이를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^c \\ v_{qs}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{dL_s}{dt} & -w_r L_s \\ w_r L_s & R_s + \frac{dL_s}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^c \\ i_{qs}^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ds}^c \\ e_{qs}^c \end{bmatrix} \quad (15)$$

고정자 유기기전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_{ds}^c \\ e_{qs}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ds}^e \\ e_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ w_r \Psi_f \end{bmatrix} \quad (16)$$

최종적으로 PMSG의 동기좌표계 d-q 전압방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^c \\ v_{qs}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{dL_s}{dt} & -w_r L_s \\ w_r L_s & R_s + \frac{dL_s}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^c \\ i_{qs}^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ w_r \Psi_f \end{bmatrix} \quad (17)$$

PMSG의 회전자에는 에너지의 입력과 출력이 없으므로, 전자기적 토크로 간주할 수 있으며 이는 식 (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} p \Psi_f i_{qs} \quad (18)$$

최종적으로 유효전력과 무효전력은 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$P_m = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \quad (19)$$

$$Q_m = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \quad (20)$$

2.2 Machine-Side Converter Controller Modeling

PMSG의 MSC 제어방식은 DFIG의 rotor side converter(RSC) 제어방식과 유사하며 유효전력 및 무효전력 제어를 하는 것을 목적으로 하고 있다. MSC 제어방식은 발전기의 고정자 측을 통해 계통으로 유입되는 유효전력 및 무효전력 출력을 제어할 수 수행한다. 고정자 측 자속 벡터에 좌표계의 d축을 맞춰 조정하고, d-q reference frame에 의해 유효전력 및 무효전력 출력을 정의할 수 있으며, PMSG의 고정자 측 전압방정식과 자속방정식은 다음과 같이 정의된다[5].

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - w_m \Psi_{qs} \quad (21)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + w_m \Psi_{ds} \quad (22)$$

$$\Psi_{ds} = L_{ds} i_{ds} + \Psi_f \quad (23)$$

$$\Psi_{qs} = L_{qs} i_{qs} \quad (24)$$

여기서 R_s 와 L_{ds} , L_{qs} 는 고정자의 저항 및 인덕턴스이다. 식 (21)-(22)에 식 (23)-(24)를 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{di_{ds}}{dt} L_{ds} - w_m L_{qs} i_{qs} \quad (25)$$

$$v_{qr} = R_s i_{qs} + \frac{di_{qs}}{dt} L_{qs} + w_m L_{ds} i_{ds} + \Psi_f \quad (26)$$

위의 식 (25)-(26)은 인가된 전압에 의해 전류를 제어하는 방법을 보여준다. 이에 따른 전기적 토크는 다음과 같이 정의된다.

$$T_e = \frac{3}{2} p \Psi_f i_{qs} \quad (27)$$

여기서 p 는 pole pair를 의미한다. 아래의 식 (28)-(29)를 통해서 PMSG의 유효전력 및 무효전력 출력은 q축 및 d축 전류에 의해 제어할 수 있음을 의미한다. MSC의 d-q축 전류제어 루프는 그림 2와 같다.

$$P_m = T_e w_m = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \quad (28)$$

$$Q_m = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} - v_{qs} i_{qs}) \quad (29)$$

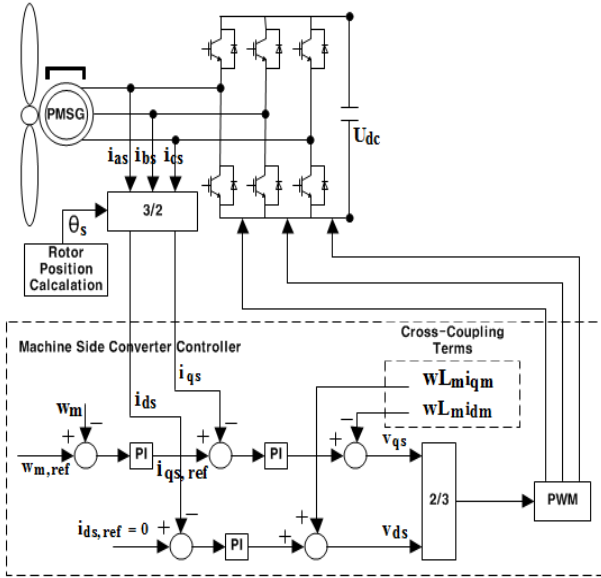


그림 2 MSC 전류 제어 루프
Fig. 2 MSC current control loop

2.3 Grid-Side Converter Controller Modeling

PMSG의 GSC 제어의 목적은 back-to-back 컨버터의 DC-link 전압을 제어하고 계통으로의 무효전력 출력에 대한 제어를 수행하는 것이다. 고정자 전압 벡터에 회전 좌표계의 d축을 맞춰 조정하고, d-q reference frame에 의해 유효전력 및 무효전력 출력은 다음과 같이 정의할 수 있다[6].

$$P_g = \frac{3}{2}(v_{dg}i_{dg} + v_{qg}i_{qg}) \quad (30)$$

$$Q_g = \frac{3}{2}(-v_{dg}i_{qg} + v_{qg}i_{dg}) \quad (31)$$

식 (30)-(31)을 통해 GSC는 d축과 q축 전류제어에 의해 유효전력 및 무효전력 출력이 결정됨을 보여준다. 이에 따라 d축 전류제어를 통하여 DC-link의 전압제어가 가능하고, q축 전류제어를 통하여 계통으로의 무효전력 출력을 제어할 수 있다. 다음으로 PMSG의 GSC와 계통의 전압방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$v_{as} = R_f i_{ag} + \frac{di_{ag}}{dt} L_f + v_{ag} \quad (32)$$

$$v_{bs} = R_f i_{bg} + \frac{di_{bg}}{dt} L_f + v_{bg} \quad (33)$$

$$v_{cs} = R_f i_{cg} + \frac{di_{cg}}{dt} L_f + v_{cg} \quad (34)$$

여기서 R_f , L_f 는 GSC와 계통 사이의 임피던스이고, 위 식을 계통 전압에 대해서 d-q reference frame에서 다시 정의하면 다음과 같다.

$$v_d = R_f i_{dg} + \frac{di_{dg}}{dt} L_f - w_e L_f i_{qg} + v_{dg} \quad (35)$$

$$0 = R_f i_{qg} + \frac{di_{qg}}{dt} L_f - w_e L_f i_{dg} + v_{qg} \quad (36)$$

식 (35)-(36)에서 $v'_{dg} = R_f i_{dg} + (di_{dg}/dt)L_f$, $v'_{qg} = R_f i_{qg} + (di_{qg}/dt)L_f$ 라고 하면 위 식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$v_{d,grid} = v'_{dg} + (w_e L_f i_{qg} + v_{dg}) \quad (37)$$

$$v_{q,grid} = v'_{qg} + (w_e L_f i_{dg}) \quad (38)$$

여기서 cross coupling term($w_e L_f i_{qg} + v_{dg}$ 과 $w_e L_f i_{dg}$)을 제거하면, GSC의 d-q축 전류제어 루프는 그림 3과 같다.

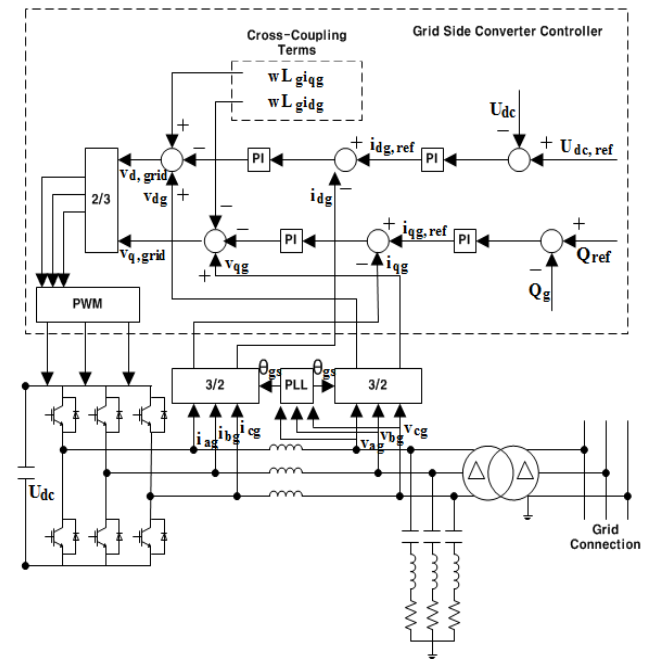


그림 3 GSC 전류 제어 루프
Fig. 3 GSC current control loop

2.4 DC-link Controller

일반적으로 DC-link의 전압을 일정하게 유지하는 가장 큰 목적은 back-to-back converter의 에너지의 손실을 최소화 하여 그대로 전달하기 위함이다. 이에 본 논문에서는 그림 4와 같이 GSC에서 d축 전류제어를 통하여 DC-link의 전압레벨을 항상 일정한 제어가 가능하도록 DC-link controller를 구현하였다.

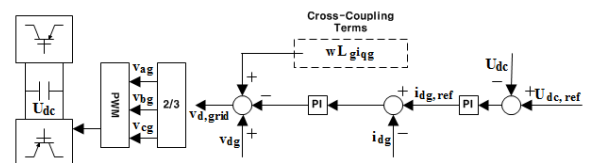


그림 4 DC-link 제어기
Fig. 4 DC-link controller

3. PMSG 풍력발전기의 출력 제어

3.1 MPPT 출력제어

일반적으로 풍력발전기의 최대 출력점 추종(MPPT: Maximum Power Point Tracking)제어는 피치 각 제어 (pitch angle control)와 발전기 축 q축 전류 제어를 통해 이루어진다. 풍속 증가에 따른 토크와 회전속도관계에 의해 출력은 식 (39)와 같이 정의된다[7].

$$P_m = T_m \times \omega_m \tag{39}$$

여기서, P_m 은 터빈의 기계적 출력, T_m 은 터빈의 기계적 토크, ω_m 은 기계적 회전자 회전속도를 의미한다. 기계적 토크가 증가하게 되면 전기적 토크(T_e)가 증가하고 계통으로 공급되는 전기적 출력이 증가하게 된다. 토크제어는 풍속이 증가하는 경우 식 (39)에 의해서 회전속도가 증가하게 되고 토크기준 MPPT 제어기는 식 (40)에 의해서 새로운 출력 지령을 제공할 수 있다.

$$P_{ref} = \omega_m^3 \times K_{opt} \tag{40}$$

주어진 풍속에서 얻을 수 있는 최적의 기계적인 출력은 다음 식에 의해 정의된다.

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 C_{Popt}(\beta, \lambda_{opt}) \tag{41}$$

기계적 출력에 의해 정의된 블레이드의 최적의 주속비(tip speed ratio)는 다음과 같다.

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{opt} R}{V_w} \tag{42}$$

여기서 P_{max} 는 생성된 최대전력, ρ 는 air density(= 1.205 kg/m³), R 는 로터의 반지름, V_w 는 풍속, λ 는 주속비, β 는 블레이드 피치 각, C_{Popt} 는 주속비와 블레이드 피치 각의 함수로 최적의 출력 계수, λ_{opt} 는 최적의 주속비, ω_{opt} 는 특정 풍속(m/s)에서 최적의 회전속도(rad/s)를 의미한다. 최적의 출력 계수 C_{Popt} 의 계산은 β 가 0($C_{Popt} = 0.4412$, $\beta = 0$)으로 설정되어있을 때 얻을 수 있다. 따라서 C_{Popt} 의 방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$C_{Popt}(\lambda_{iopt}) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_{iopt}} - 13.2 \right) \exp\left(\frac{-18.4}{\lambda_{iopt}} \right) \tag{43}$$

$$\frac{1}{\lambda_{iopt}} = \frac{1}{\lambda_{opt} - 0.02\beta} - \frac{0.003}{1 + \beta^3} \tag{44}$$

다음의 그림 5-6은 PMSG 풍력발전기의 유효전력 출력을 제어하는 MPPT controller 구성도이다. 그림 5는 회전자 회전속도를 통해 유효전력 출력을 조정하는 역할을 하도록 구성되어 있다.

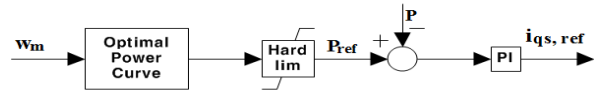


그림 5 MPPT 제어기
Fig. 5 MPPT controller

그림 6은 pitch angle controller의 구성을 보인다. 일반적으로 pitch angle control는 터빈 블레이드의 효율을 감소시킴으로서 발전기 정격 회전속도와 생산되는 전력량을 제어할 수 있다. 하지만 본 논문에서는 발전기 축의 전류제어를 통해 PMSG 풍력발전기의 출력을 직접 제어하므로 pitch angle control은 출력제어 시 회전속도가 제한된 최대 회전속도(1.2pu) 이상으로 증가할 경우 동작된다.

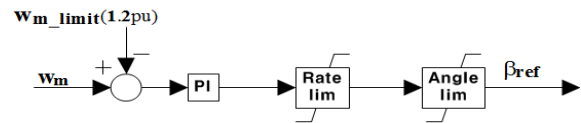


그림 6 피치각 제어기
Fig. 6 Pitch angle controller

이와 같은 pitch angle control은 DL operation 시 풍속이 지속적으로 증가하는 경우에도 최대 회전속도 이하로 제어할 수 있고, 풍속이 감소하는 경우에는 pitch angle은 서서히 감소하여 0°로 돌아간다.

3.2 DL Control Scheme

본 논문에서 제안하는 DL control scheme은 최대출력곡선(Optimal power curve)을 바탕으로 하며 계통운영자의 출력지령에 따른 일정한 출력을 유지하기 위한 PMSG 풍력발전기의 유효전력 출력제어를 목적으로 한다. DL operation 시 풍속에 따른 최적의 출력을 결정하고, 출력지령은 이를 바탕으로 결정된다. 기계적 회전자 회전속도 지령은 기계적 특성에 대한 look-up 테이블을 읽어 풍속에 대한 최대출력 곡선에 의해 얻을 수 있다. 그림 7은 최대 출력점을 기준으로 우측 90%의 출력점에서 DL operation을 수행할 경우 회전속도와 출력량을 보인다.

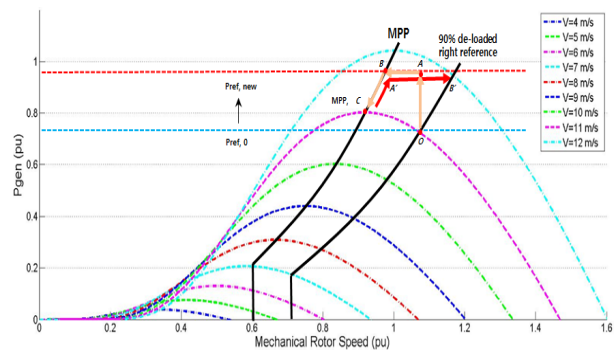


그림 7 90% 최대출력곡선
Fig. 7 90% Optimal power curve

그림 7은 풍력발전기의 DL operation 시 운전점의 변화를 나타낸다. 그림과 같이 풍속이 11m/s 인 경우 최대 출력점(C점)에서 운전할 수 있지만 KE reserve의 확보를 위해서 90% DL right reference(O점)에서 운전한다. 계통의 주파수가 감소함에 따라 새로운 출력지령(Pref, new)이 결정되고 DL control을 통해 확보된 KE reserve를 활용하여 즉각적으로 O점에서 A점으로 운전점이 이동하고, A점에서 B점까지 일정시간 동안 출력을 유지한다. 이때 출력과 기계적 입력력의 mismatch 때문에 회전속도는 계속 감소한다. B점에 도달하면 MPPT curve에 따라 회전속도 및 출력이 동시에 감소한다. 풍속에 따른 기계적 출력과 최대 가능출력이 같아지는 C점에서 회전속도가 안정화된다. 이는 계통 주파수가 안정화 될 때까지 가능한 최대 출력을 제공함을 의미한다. 그림과 같이 풍속이 12m/s로 증가하여 최대 가능출력이 출력지령보다 큰 경우 C점에서 출력 지령을 수행하기 위해 A'점으로 이동하고 회전속도 증가를 위해 B'점으로 이동한다.

다음의 그림 8은 DL control scheme을 통한 출력 제어기의 구성을 보여준다. 여기서 f_{system} 은 계통의 주파수이고 $f_{nominal}$ 은 공칭주파수(60Hz)이며 R은 속도조정비율(speed adjustment rate)을 의미한다. 또한 두 가지 경우의 DL control을 모의하기 위하여 sub optimal power curve는 95%와 90% 두 가지 모드로 구성된다.

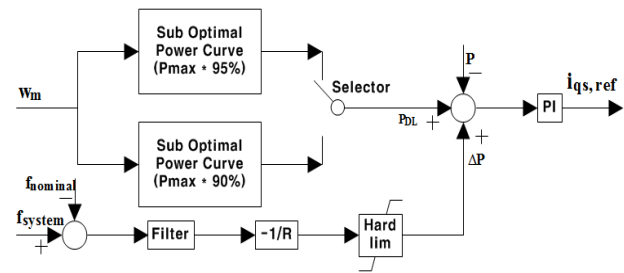


그림 8 DL 제어기 구성
Fig. 8 Configuration of DL controller

4. PMSG 풍력발전기 주파수 제어 방안

4.1 KE 증가를 위한 DL Operation

KE discharge control은 inertial response control 및 proportional control과 달리 converter 제어를 통해 다양한 출력제어가 가능한 PMSG 풍력발전기의 제어특성을 사용하여 짧은 시간 동안의 주파수 제어가 요구될 시 미리 정의된 추가적인 출력을 제공하여 주파수 제어가 가능하며 다른 두 가지 방식에 비해서 상대적으로 큰 contribution을 제공할 수 있는 장점이 있다. PMSG 풍력발전기의 DL Operation 시 회전속도는 최적 회전속도보다 증가한다. 회전속도가 증가함에 따라 증가하는 KE reserve는 식 (45)을 통하여 계산할 수 있다[8].

$$KE_{res} = \frac{J}{2}(w_{DL}^2 - w_{m,opt}^2) \quad (45)$$

여기서 J는 관성 모멘트, w_{DL} 은 DL operation 시 증가하는 회전속도, $w_{m,opt}$ 은 최적 회전속도이다. 출력제어 시 회전속도(w_{DL})가 정해진 풍속에 대한 최적 회전속도($w_{m,opt}$ optimal machine speed)보다 증가하게 된다. 이와 같이 증가한 회전속도는 PMSG 풍력발전기의 운동에너지를 크게 증가시키며, 풍력발전기가 출력제어로 인한 예비력 뿐만 아니라 주파수 제어에 활용 가능한 추가적인 Energy reserve를 확보하는 것을 가능케 한다. 즉, PMSG 풍력발전기의 DL control을 통해 확보된 KE reserve는 짧은 시간동안 주파수 제어에 안정적으로 참여할 수 있으므로 계통의 주파수 제어 능력을 향상시킬 수 있다.

4.2 Frequency Support Control Scheme

본 논문에서 제안한 DL control scheme은 주파수 제어에 참여하여 지속적으로 큰 contribution을 제공하기 위해 과도한 KE discharge를 할 경우 풍력발전기의 회전속도를 크게 감소시키고, 심한 경우 이로 인해 풍력발전기가 불안정해질 수 있다. 따라서 DL control 시 증가하는 KE를 계통의 short-term frequency control에 안정적으로 활용할 수 있는 frequency support control scheme을 제안한다. 그림 9는 제안하는 frequency support control scheme의 개념도이다. 먼저 정상 상태에서 PMSG 풍력발전기는 DL control mode에서 운전한다고 가정하고, 계통에 외란이 발생하여 주파수 감소가 발생할 경우 KE discharge mode로 전환한다.

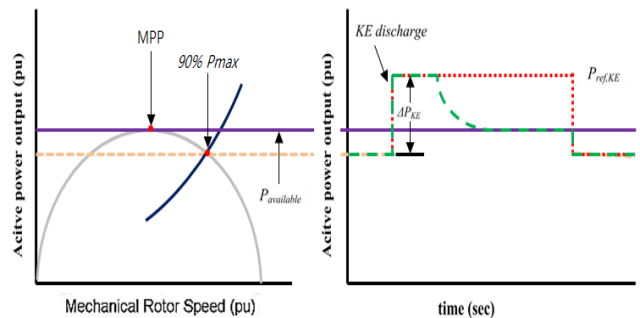


그림 9 frequency support control 적용 시 출력변화
Fig. 9 Active power output change according to frequency support control

KE discharge는 frequency support control을 위해 PMSG 풍력발전기의 출력이 ΔP_{KE} 만큼 증가하며, 공급시간 동안 해당 출력을 유지하는 것을 목적으로 한다. 따라서 해당 운전 상태에서 KE discharge에 따른 기계적 출력과 회전속도(w_m)의 관계식은 식 (46)과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{mech} = (P_{ref} + \Delta P_{KE}) + Jw_m \frac{dw_m}{dt} + losses \quad (46)$$

KE discharge는 PMSG 풍력발전기의 출력이 최대 가능 출력까지 감소하면 끝나게 되며, 정해진 공급시간동안 해당 출력을 유지하게 된다. 이후 풍력발전기의 출력과 출력지령은 풍력발전기가 정상상태로 돌아가면 $90\%P_{max}$ 로 회복된

다. 그림 10은 KE discharge control을 적용한 제어기 구성도이다.

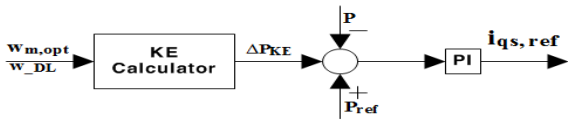


그림 10 KE discharge 제어기
Fig. 10 KE discharge controller

5. 사례연구

5.1 모의 계통 모델링

본 논문에서 제안하는 PMSG 풍력발전 시스템의 출력 제어 및 주파수 제어 방안을 검증하기 위하여 두가지 경우의 모의계통을 구성하였다. 먼저, 첫 번째 모의 계통은 그림 11과 같이 2MW급 PMSG 풍력발전기의 응답 특성을 검증하기 위하여 1기 무한모션으로 구성하였고, 두 번째 모의 계통은 그림 12와 같이 Wind Farm1(WF1)과 Wind Farm2(WF2) 2개의 풍력발전단지(각 풍력발전단지는 2MW급 PMSG 풍력발전기 5기 구성)와 2기의 Thermal Unit(52MW Steam Turbine, 50MW Gas Turbine)과 계통의 부하로 구성하였다. 이때, 부하는 정상상태에서 100MW의 용량을 갖도록 소규모 모의 계통을 PSCAD/EMTDC를 통해서 모델링 하였다. 이에 대한 발전기 모델링에 필요한 parameter 데이터는 Appendix에 상세히 첨부하였다.

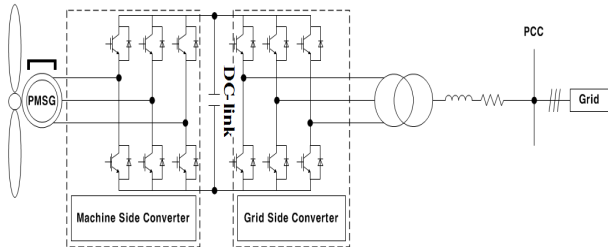


그림 11 PMSG 풍력발전기 계통 구성
Fig. 11 Configuration of PMSG wind turbine generation system

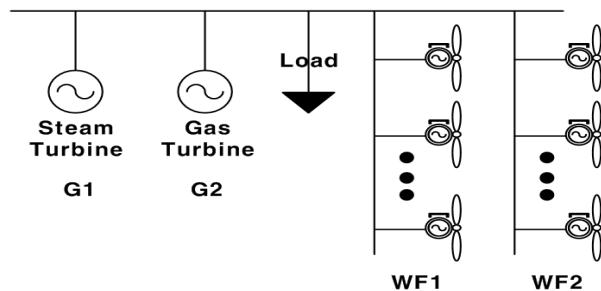


그림 12 PMSG 풍력발전단지 계통 구성
Fig. 12 Configuration of wind farm with PMSGs

5.2 풍력발전기의 모의 계통

제안하는 MSC 및 GSC의 제어변수에 대한 reference의 변화에 따른 응답 특성을 확인하고, PMSG 풍력발전기의 출력 제어에 대한 모의는 다음과 같이 진행하였다.

- Case 1: MSC 및 GSC의 제어 시 풍속의 변화(9~11m/s)에 따른 응답 특성을 모의 하였다.
- Case 2: 5% DL 및 10% DL control mode일 때 출력의 변화를 모의 하였다.
- Case 3: DL control mode에서 KE discharge control mode로 전환됨에 따른 출력의 변화를 모의 하였다.

그림 13-17은 풍속의 변화와 그에 따른 응답 특성을 보여준다. 그림 13은 모의에 사용된 풍속의 변화(25초 9m/s, 75초 11m/s, 125초 10m/s)를 나타낸다. 그림 14는 풍속의 변화에도 항상 일정한 에너지를 공급하기 위해 DC-link 전압은 초기 풍속의 급격한 변화에 따른 변동이 나타나지만 25초부터 거의 일정하게 1pu를 유지함을 볼 수 있다. 그림 15-16은 PMSG 풍력발전기의 유효전력 출력과 무효전력 출력을 보인다. 반면, 그림 17은 출력의 변화와 거의 동일한 회전속도의 변화를 보인다. Case 1의 결과를 통하여 PMSG 풍력발전시스템 모델링은 풍속 및 지령의 변화에 거의 정확하게 응답함을 확인할 수 있다.

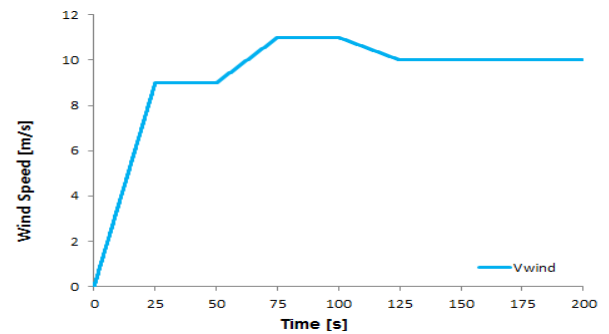


그림 13 모의에 사용된 풍속 변화(Case 1)
Fig. 13 Variation of wind speed used in the simulation in Case 1

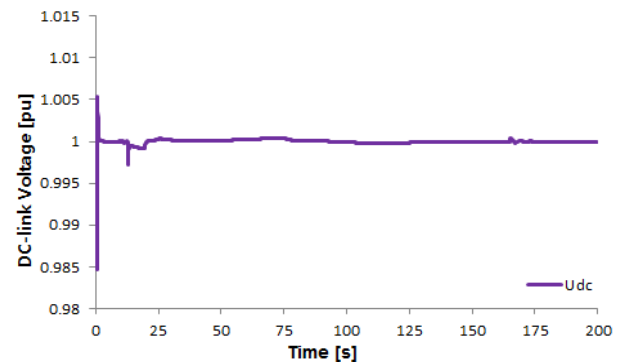


그림 14 DC-link 전압 변화(Case 1)
Fig. 14 Variation of DC-link voltage in Case 1

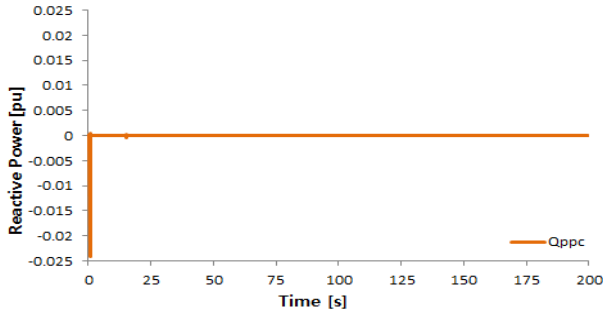


그림 15 무효전력 출력 변화(Case 1)
Fig. 15 Variation of reactive power output in Case 1

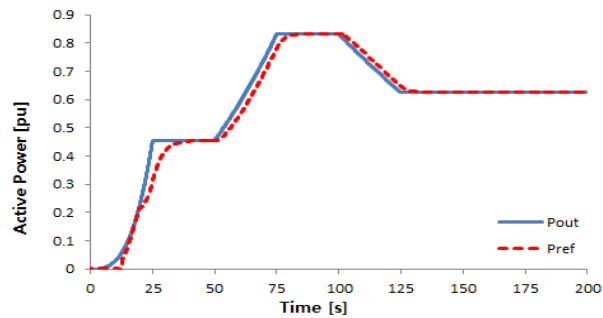


그림 16 유효전력 출력 변화(Case 1)
Fig. 16 Variation of active power output in Case 1

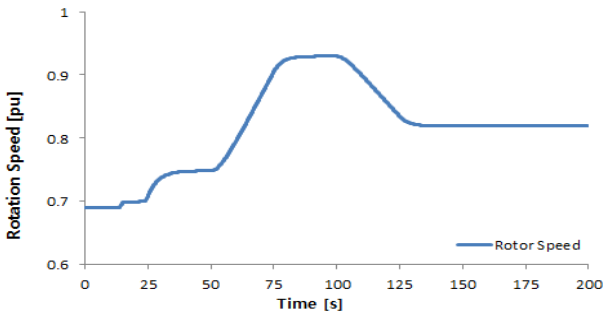


그림 17 회전속도 변화(Case 1)
Fig. 17 Variation of rotation speed in Case 1

풍력발전기의 경우 풍속에 따른 출력의 불확실성으로 인하여 항시 풍속에 따른 최대 출력을 낼 수 있도록 운용되고 있고 실정에 따라 많은 양의 출력감소는 풍력발전기의 운용 효율 저하를 가져오게 됨으로 통상적으로 5~10%로 설정하고 있다[8]. 또한 DL control mode는 출력의 감소량만큼 머신의 회전속도가 증가하게 되고 최적 회전속도보다 회전속도를 증가시키는 경우 머신에 기계적인 스트레스가 작용하게 됨으로 머신에 큰 무리가 가지 않는 0.7pu~1.2pu 사이로 범위가 지정되고 있다. 따라서 그림 18-19는 Case 1과 같은 풍속의 변화에 대해 125초 때 각각 5% DL, 10% DL operation(최대출력의 95% 및 90%의 유효전력 출력) 시에 대한 출력의 변화를 보인다. 그림 18은 최대출력제어의 경우와 5% DL 및 10% DL control에 따른 출력의 감소에 대한 변화를 나타낸다. 그림 19는 이러한 출력의 변화에 따른 회전자 회전속도의 변화를 나타낸다. Case 2의 결과에 따라

출력이 감소하는 경우 회전속도가 크게 증가함을 볼 수 있으며 이는 더 큰 KE reserve를 확보할 수 있음을 의미한다.

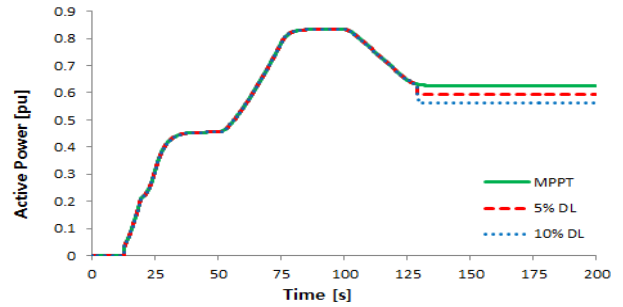


그림 18 DL control에 따른 유효전력 출력 변화(Case 2)
Fig. 18 Variation of active power output according to DL operation in Case 2

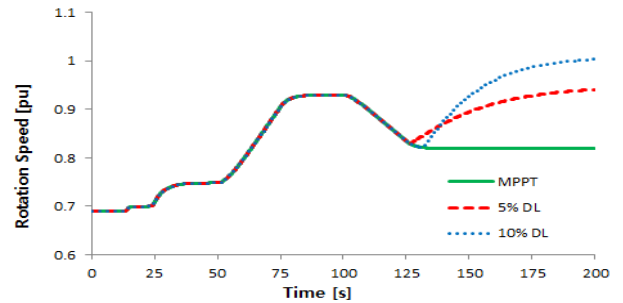


그림 19 DL operation에 따른 회전속도 변화(Case 2)
Fig. 19 Variation of rotation speed according to DL operation in Case 2

그림 20-21은 125초부터 각각 5% DL, 10% DL control mode로 동작하고 160초 때 KE discharge control mode로 전환될 시 출력의 변화를 보인다. 그림 20은 출력 제어를 통해 확보된 KE reserve를 사용함에 따른 출력의 변화를 보인다. 그림 21은 추가적인 출력을 제공함에 따른 회전속도의 감소에 대한 변화를 보인다. Case 3의 결과를 통해 KE reserve를 사용하면 가용 가능한 최대 출력보다 더 높은 출력을 일정시간동안 제공할 수 있음을 검증하였다.

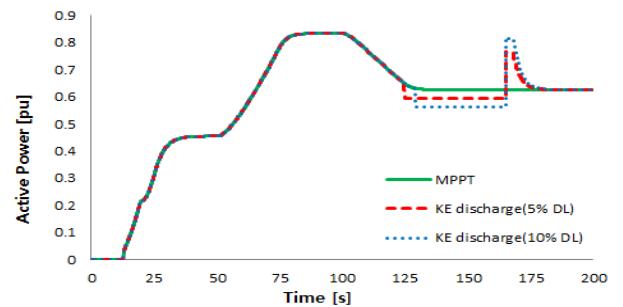


그림 20 KE discharge operation에 따른 유효전력 출력 변화 (Case 3)
Fig. 20 Variation of active power output according to KE discharge operation in Case 3

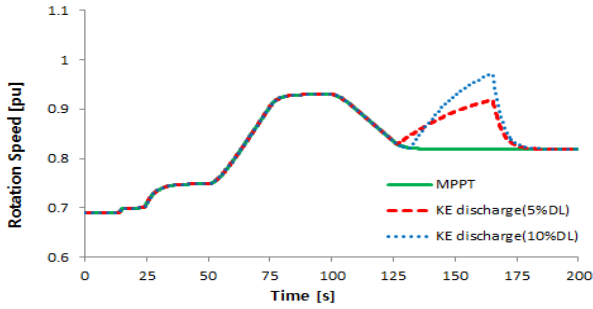


그림 21 KE discharge operation에 따른 회전속도 변화(Case 3)
 Fig. 21 Variation of rotation speed according to KE discharge operation in Case 3

5.3 풍력발전단지의 모의 계통

본 논문에서 제안하는 주파수 제어 방안을 검증하기 위해서 부하의 급격한 증가(160초 20MW 부하 증가)에 따른 계통의 주파수가 큰 폭으로 감소하는 경우를 모의하며 이때 PMSG 풍력발전단지는 각각 다른 풍속에서 출력을 5% DL 및 10% DL control mode를 동작하며, 160.1초에서 KE discharge control mode로 전환하여 KE reserve를 사용하여 추가적인 출력을 제공함에 따른 계통의 주파수 변화를 분석한다.

그림 22는 각 풍력발전단지에 적용한 풍속의 변화(WF1: 25초 9m/s, 75초 11m/s, 100초 10m/s, WF2: 25초 11m/s, 75초 10m/s, 100초 9m/s)를 보인다. 그림 23은 각 풍력발전단지에 적용된 풍속의 변화에 따른 출력 제어 시 각 풍력발전단지의 출력 변화를 보인다. 그림 24는 WF1의 출력과

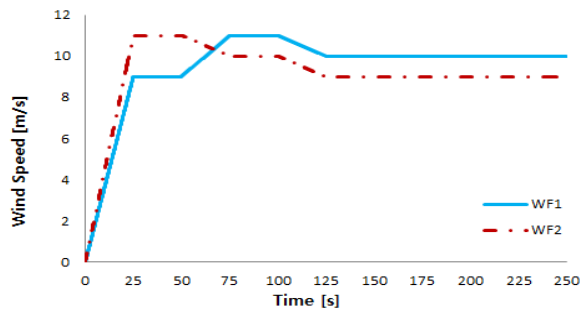


그림 22 각 풍력발전단지의 풍속 데이터
 Fig. 22 Wind speed data for each WF

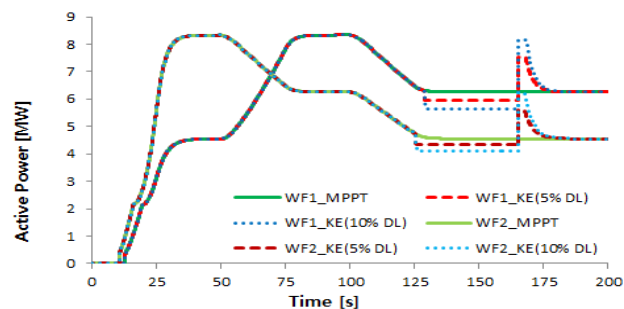


그림 23 각 풍력발전단지의 유효전력 출력 변화
 Fig. 23 Variation of active power output for each WF

WF2의 출력을 합한 실질적으로 계통에 공급되어지는 출력의 변화를 나타낸다. 그림 25는 160초에 외란 발생 시 즉각적으로(160.1초) 미리 정해진 KE reserve를 사용하여 계통에 추가적인 출력을 제공함으로써 주파수 최저점 및 주파수 회복 속도가 증가함을 볼 수 있다.

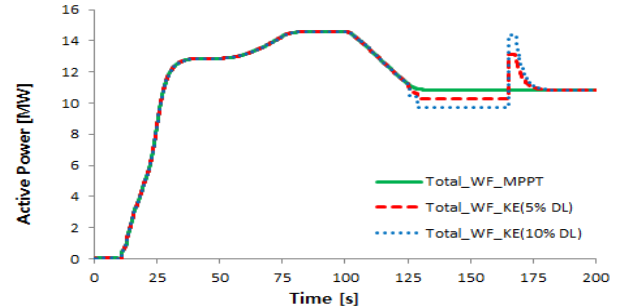


그림 24 전체 풍력발전단지의 유효전력 출력 변화
 Fig. 24 Variation of active power output for total WF

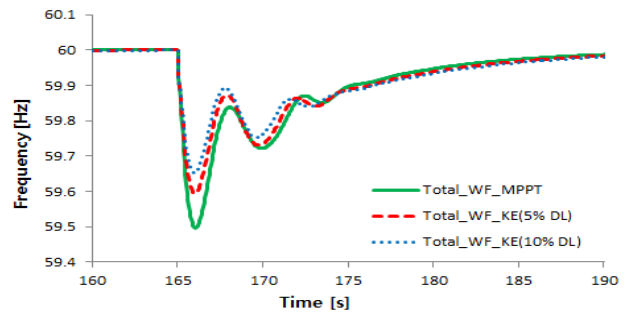


그림 25 계통 주파수 변화
 Fig. 25 Variation of power system frequency

6. 결 론

본 논문에서는 PMSG 풍력발전기가 포함된 전력계통의 안정도 향상을 위하여 출력 제어 기법 및 주파수 제어 기법을 제안하고 논의하였다. 또한 제안하는 DL control scheme에서는 PMSG 풍력발전기가 sub optimal power curve를 바탕으로 회전자 회전속도를 통해서 최대 가능 출력을 산정하고 추가적으로 최대 가능 출력보다 일정수준 낮은 출력으로 운전하여 예비력을 확보하고 이에 따른 회전자 회전속도의 증가로 인한 KE reserve를 확보한다. 또한 PMSG 풍력발전기의 DC-link의 전압을 제어하여 계통으로 공급되는 유효전력 출력을 제어하고 확보된 KE reserve를 활용하여 계통의 frequency support control에 강력한 contribution을 제공할 수 있도록 모델링 하였다. 제안하는 PMSG 풍력발전기의 출력 제어 및 주파수 제어 방안의 검증을 위해 풍력발전기 1기 무한모션 계통 및 2기의 동기발전기와 풍력발전 시스템을 포함한 소규모 계통을 PSCAD/EMTDC를 사용하여 모델링 하고 사례연구를 수행하였다. Case 1의 결과를 통해 MSC 및 GSC의 응답 특성을 확인 하였으며, Case 2의 결과를 통해 DL control mode의 경우 회전자 회전속도 증가에 따른 KE reserve의 확보가 가능함을 검증 하였으며, Case 3의 결과를 통해 일정시간동안 미리 정해진 추가적인

출력을 제공할 수 있음을 증명하였다. 또한 풍력발전단지의 주파수 제어 모의 결과를 통해서 외란발생시 즉각적으로 미리 정해진 KE reserve 만큼의 추가적인 출력을 계통에 제공함으로써 계통의 최저 주파수 지점 및 주파수 회복속도가 큰 폭으로 증가함을 검증하였다. 또한, 본 논문은 대규모 풍력발전단지 건설 등에 의한 풍력발전 점유율 증가에 따른 계통의 관성 부족에 대한 방안을 제안하고, 풍속의 급격한 변화 또는 출력 지령의 변화에 대해 모의함으로써 계통의 안정도 향상을 증가 시킬 수 있다는 점에서 의미를 가진다. 따라서 본 연구 결과를 통해 최근 급격히 증가하는 해상 풍력발전단지의 출력제어 및 운전전략의 수립에도 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2013년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임.(No. R13TA17)

References

[1] G.Ramtharan and N.Jenkin, "Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines", IET Renew Power Gener, vol.1, no.1, pp.1, Mar, 2007.

[2] M.Kayikci, and J.V.Milanovic, "Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbance", IEEE Trans. Power Syst, vol.24, no.2, pp.859-867, May, 2009.

[3] Ping-Kwan Keung. "Windfarm Operations: Control of Windfarm Power and Kinetic Energy Discharge as Fast Reserve", Master of Engineering, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 2007.

[4] H. Huang C. Mao J. Lu D. Wang, "Small-signal modelling and analysis of wind turbine with direct drive permanent magnet synchronous generator connected to power grid", IET Renew. Power Gener, vol.6, pp.48-58, 2012.

[5] Bicholas P.W. Strachan, Dragan Jovicic, "Dynamic Modelling, Simulation and Analysis of an Offshore Variable-Speed Directly-Driven Permanent-Magnet Wind Energy Conversion and Storage System (WECS)", Proc. IEEE/OES Oceans 07, Aberdeen, 2007

[6] Gi-Chan Pyo, "Generation Control Strategy for Wind Farm Considering Inertia of Wind Turbine", ph.D, Seoul National University, 2013.

[7] R.G. de Almeida and J. A. Pecas Lopes, "Primary Frequency Control Participation Provided By Doubly Fed Induction Wind Generators", in Proc.15th Power Systems Computation Conf, Liege, Belgium, pp.22-26, Aug, 2005.

[8] A.Teninge, C.Jecu, D.Roye, S.Bacha and J.Duval,

"Contribution to frequency control through wind turbine inertial energy storage", IET Renew. Power Gener, vol.3, pp.358-370, 2009.

7. Appendix

A.1 PMSG 풍력발전기 Parameter

PMSG 풍력발전기의 터빈 모델과 동기발전기 모델은 PSCAD 라이브러리에 포함된 Machine 모델을 사용하였으며 세부 parameter는 다음의 표 1과 같다.

표 1 풍력 터빈 모델 parameter

Table 1 Wind turbine model parameter

Description	Notation	Value
Blade Radius	R	38 m
Air Density	ρ	1.205 kg/m ³
Maximum Cp	$C_{p,max}$	0.4412
Rated Wind Speed	$V_{w, rated}$	12 m/s

표 2 PMSG 발전기 모델 parameter

Table 2 PMSG generator model parameter

Description	Notation	Value
Rated Generator Power	$P_{m, rated}$	2 MW
Rated RMS Line to Line Voltage	$V_{m, rated}$	0.69 kV
RatedMachine Speed	$w_{m, rated}$	376.99 rad/s
Pole Pairs	P	11
Gen+Turbine Inertia Const.	H	5.7267 sec
PM Flux	Ψ_f	136 Wb
Stator D-axis Inductance	L_{md}	0.334 H
Stator Q-axis Inductance	L_{mq}	0.217 H
Stator Leakage Inductance	L_{si}	0.0334 H
Stator Resistance	R_s	0.08 Ω

A.2 Steam Turbine Parameter

모의 계통에서 사용된 발전기는 정격용량 520MW, droop constant 0.05의 값을 가지는 제주 TP#2의 PSS/E model data를 사용하였으며, 본 논문에서는 정격용량을 52MW로 parameter값들을 비례하여 감소시켜 적용하였다.

표 3 Steam 터빈 동기발전기 모델 parameter

Table 3 Steam turbine synchronous machine model parameter

Notation	Value	Notation	Value
H	5.4 s	X_l	0.161 pu
X_d	1.456 pu	X_q	1.405 pu
X_d'	0.206 pu	X_q'	0.500 pu
X_d''	0.147 pu	X_q''	0.147 pu
$X_{d0'}$	3.735 s	$X_{q0'}$	0.305 s
$X_{d0''}$	0.032 s	$X_{q0''}$	0.080 s
Rated RMS L-N Voltage	7.976 kV	Rated RMS Line Current	0.2008 kA

A.3 Gas Turbine Parameter

모의 계통에서 사용된 발전기는 정격용량 50MW, droop constant 0.05의 값을 가지는 제주 GT#3의 PSS/E model data를 사용하였다.

표 4 Gas 터빈 동기발전기 모델 parameter

Table 4 Gas turbine synchronous machine model parameter

Notation	Value	Notation	Value
H	1.86 s	X_l	0.15 pu
X_d	1.94 pu	X_q	1.92 pu
X_d'	0.2259 pu	X_q'	0.402 pu
X_d''	0.1723 pu	X_q''	0.1723 pu
$X_{d0'}$	10.4 s	$X_{q0'}$	0.83 s
$X_{d0''}$	0.03 s	$X_{q0''}$	0.055 s
Rated RMS L-N Voltage	7.976 kV	Rated RMS Line Current	0.2008 kA

저 자 소 개



이 광 수 (李 光 秀)

1986년 7월 6일생. 2012년 동아대학교 전기공학과 졸업. 2014년 동아대학교 대학원 전기공학과 석사과정 졸업.



김 문 겸 (金 文 謙)

1976년 10월 12일생. 2004년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2006년 서울대학교 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(공학석사). 2010년 동대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(공학박사). 2014년 3월~현재 중앙대학교 에너지시스템공학부 조교수.