주파수의 최대 변화율을 이용한 풍력단지 가상관성제어

Virtual Inertial Control of a Wind Power Plant using the Maximum Rate of Change of Frequency

김 두 연* · 김 진 호* · 이 진 식* · 김 연 희* · 전 영 환** · 강 용 철†

(Dooyeon Kim · Jinho Kim · Jinshik Lee · Yeon-Hee Kim · Yeong-Han Chun · Yong Cheol Kang)

Abstract - In a conventional power system, the frequency is recovered to the nominal value by the inertial, primary, and secondary responses of the synchronous generators (SGs) after a large disturbance such as a generator tripping. For a power system with high wind penetration, the system inertia is significantly reduced due to the maximum power point tracking control based operation of the variable speed wind generators (WGs). This paper proposes a virtual inertial control for a wind power plant (WPP) based on the maximum rate of change of frequency to release more kinetic energy stored in the WGs. The performance of the proposed algorithm is investigated in a model system, which consists of a doubly fed induction generator-based WPP and SGs using an EMTP-RV simulator. The results indicate that the proposed algorithm can improve the frequency nadir after a generator tripping. In addition, the algorithm can lead the instant of a frequency rebound and help frequency recovery after the frequency rebound.

Key Words : Virtual inertial control, Maximum rate of change of frequency, and Frequency support

1. 서 론

전력망은 각각 용량이 다른 다수의 발전기와 부하로 구성되어 운전되고 있는 거대하고 복잡한 시스템이므로, 효율적이고 안정적인 운영을 위해서는, 전력망에 연결되어 있는 각종 전력기기의 운전에 대한 기준이 필요하다. 전력망의 주파수가 규정 범위를 초과하게 되면, 발전기, 전동기 등의 각종 기기의 손상을 초래하므로, 전력망의 주파수는 일정한 값으로 유지 되어야 한다. 따라서 각국의 전력망에서는 발전기의 운전에 대한 주파수의 범위를 규정하고 있으며, 국내 전력망의 경우는 발전기의 연속운전 기준을 60Hz-58.5Hz 범위로 정하였고, 58.5Hz-57.5Hz의 범위에서는 20초 동안의 운전시간을 초과하면, 발전기는 소내 기기보호를 위하여 전력망에서 분리되도록 하고 있다[1].

만약 전력망에서 발전기 탈락이나 부하 증가와 같은 외란이 발생하게 되면, 전기에너지가 부족하므로 전력망의 주파수는 감소하게 된다. 국내에서는 주파수가 59Hz가 되면 발전기의 연쇄적인 탈락을 방지하기 위해 저주파수 부하차단(Under frequency load shedding, UFLS) 계전기가 작동하여 6%부하를 차단시키고, 매 0.2Hz 감소시, 추가로 6%부하를 탈락시킨다. 따라서 외란 발생 이후 전력망의 최저 주파수는 계통 신뢰도를 결정짓는 중요한 기준이 되고, 부하 차

단을 방지하기 위해서는 전력망의 주파수가 59Hz 이하가 되지 않도록 해야 한다.

외란 발생 시 전력망 주파수의 하락을 막기 위해, 기존 전력망에서는 동기 발전기의 회전자 운동에너지가 자연적으로 방출되는 관성응답, 발전기가 보유한 순동예비력으로부터 출력하는 드롭(Droop) 제어, 전력망의 제어 센터에서 지령을 받아 행하는 자동발전제어(Automatic generation control)를 통해 주파수 제어를 수행한다[2]. 여기서 동기 발전기의 관성응답과 드롭 제어는 외란 이후 초기에 주파수의 하락을 억제하는데 매우 중요한 역할을 수행한다.

한편, 풍력에너지의 발전단가는 이미 화력발전단가와 근접한 수준에 도달하였고, 각종 제어능력의 향상으로 인하여, 전 세계적으로 풍력에너지의 사용이 증가하고 있다. 전 세계에서 생산되는 전기에너지 중 풍력에너지가 차지하는 비율은 2011년은 3.5% 이었고, 2020년, 2030년에 각각 8.3%, 15.8%로 증가할 전망이다[3]. 우리나라의 경우에는 풍력에너지 수용률의 목표를 2013년, 2020년, 2027년에 각각 0.22%, 3.42%, 4.64%로 세웠다[4].

현재 풍력발전용으로 주로 사용되는 가변속 풍력발전기는 풍속에 따라 최대출력을 내기 위해 회전자 속도를 제어하는 최대출력추종(Maximum power point tracking, MPPT) 제어를 수행한다. MPPT 제어는 전력망 주파수의 변동에 관계없이 수행되므로, 풍력발전의 수용률이 높으면, 전력망의 관성이 감소하게 된다. 이로 인해 전력망에 외란이 발생하면 주파수 하락이 커지는 문제가 발생할 것으로 예상되므로, 풍력발전기의 주파수 제어 기능이 필요하다.

따라서 풍력발전기가 전력망의 주파수 회복에 기여할 수 있는 많은 방법들이 제안되었다[5-8]. 참고문헌 [5, 6]에서는 풍력발전기의 MPPT 제어에 의한 유효전력 기준값에, 전력망 주파수 변화율(Rate of change of frequency, ROCOF)

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Chonbuk National University, Korea

E-mail : yckang@jbnu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Chonbuk National University, Korea

** Dept. of Electrical Engineering, Hongik University, Korea

Received : May 20, 2013; Accepted : June 17, 2013

루프에 의해 생성된 유효전력 기준값을 더하는 방식을 제안하였다. 주파수 변화율은 외란 발생 직후에는 큰 값을 가져 주파수 회복에 기여도가 크지만, 시간이 지남에 따라 이 값이 점차 감소하므로 주파수 회복 기여도가 감소한다. 또한 주파수 반동 이후에는 주파수 변화율의 부호가 반대가 되어, 풍력단지의 출력이 감소하므로, 주파수 회복에 대한 기여도가 적어진다.

참고문헌 [5, 6]의 단점을 보완하기 위해, 주파수 변화율 루프에, 주파수 변화량에 비례하는 기준값을 생성하는 루프를 추가하는 방법이 제안되었다[7, 8]. 주파수 변화량 루프의 출력과 주파수 변화율 루프의 출력은 위상차가 있어, 주파수 변화율이 작아지면 주파수 변화량이 큰 값을 가진다. 그러므로 이 방식은 기존 방법보다 더 많은 출력을 내고, 양의 값의 출력을 내는 시간이 증가하므로 기존 방법보다 주파수 하락을 억제할 뿐만 아니라, 주파수 반동 시점도 다소 빨라지는 장점이 있다. 하지만, 이 방법은 시간이 지남에 따라 주파수 변화량이 감소하여 보조 루프의 출력이 감소하므로, 주파수 회복이 느린 단점이 있다.

본 논문에서는 주파수의 최대 변화율을 이용한 풍력단지 가상관성제어방법을 제안한다. 제안한 방법은 외란 발생 후에 풍력단지가 큰 출력을 낼 수 있도록 하기 위해서, 주파수의 최대 변화율을 기반으로 한 기준값을 MPPT 기준값에 더한다. 이 방법은 외란 직후에 보조루프가 일정한 출력을 내게 함으로써 풍력단지가 큰 출력을 내므로, 주파수 최저점이 증가하고, 주파수 반동시점이 빨라질 뿐만 아니라, 주파수 반동 이후에도 주파수 회복이 빠른 장점을 가지고 있다. 제안한 방법의 성능을 검증하기 위해, EMTP-RV 시뮬레이터를 이용하여 동기기와 풍력단지로 구성된 모의 계통을 구현하였고, 다양한 풍속에서 사례 연구를 수행하였다.

2. 주파수의 최대 변화율을 이용한 풍력단지의 가상관성제어

현재 주로 사용되고 있는 가변속도 풍력발전기는 MPPT 제어를 수행하기 때문에 외란이 발생할 때 기존 동기기와 같은 관성응답을 나타낼 수 없다. 본 절에서는 주파수 하락 시 풍력발전기가 가상관성제어를 수행하도록 하는 기존 방법들을 요약하고 제안한 방법에 대해서 기술한다.

2.1 ROCOF를 이용한 가상관성제어[5, 6]

전력망에 발전기 탈락 등의 외란이 발생하면, 부족한 에너지를 보충하기 위해, 동기발전기 회전자의 운동에너지가 자연적으로 방출되므로, 발전기의 주파수는 감소된다. 이러한 현상을 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$P_{m,sys} - P_{e,sys} = 2H_{sys} \times f_{sys} \times \frac{df_{sys}}{dt} \quad (1)$$

여기서, $P_{m,sys}$ 은 전력망에 공급되는 유효전력의 총합이고, $P_{e,sys}$ 는 전력망 부하가 소모하는 유효전력의 합이다. 또한, H_{sys} 는 현재 운전 중인 발전기 전체의 등가 관성정수이고, f_{sys} 는 전력망의 주파수이다. 식 (1)의 우변을 계산하면 매 순간 전력망에서 부족한 유효전력의 양을 알 수 있다.

풍력발전기가 전력망에서 부족한 유효전력의 일부를 보상하기 위해, 참고문헌 [5, 6]에서는 ROCOF를 이용한 가상관성제어방법을 제안하였고, 그림 1에 이에 대한 블록도를 나타내었다. 보조 루프를 통하여 생성되는 유효전력 기준값인 ΔP_{in} 은 식 (2)와 같이 ROCOF에 풍력발전기의 관성정수인 H 와 f_{sys} 를 곱하여 계산된다.

$$\Delta P_{in} = 2H \times f_{sys} \times \frac{df_{sys}}{dt} = K \times f_{sys} \times \frac{df_{sys}}{dt} \quad (2)$$

여기서, K 는 ROCOF 계인이다.

따라서 풍력발전기의 유효전력 기준값인 P_{ref} 은 식 (3)과 같이, MPPT 제어의 기준값인 P_0 와 ROCOF를 이용하여 생성한 유효전력 기준값인 ΔP_{in} 의 합으로 구성된다.

$$P_{ref} = P_0 + \Delta P_{in} \quad (3)$$

한편, 풍력발전기의 기계적 입력 P_m 과 전기적 출력 P_e 와 풍력발전기 회전자 속도 ω_r 의 관계식은 식 (4)와 같다.

$$P_m - P_e = J \omega_r \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4)$$

여기서, J 는 풍력발전기 회전자의 관성모멘트이다.

외란 이전에 풍력발전기는 MPPT 제어를 수행하고 있으므로, P_e 가 P_0 가 되고, P_m 과 P_0 가 같아 풍력발전기의 회전자는 정속으로 운전된다. 하지만, 외란 발생 시에는 식 (3)과 같이 P_{ref} 가 P_0 에 ΔP_{in} 을 더한 값이 되어, 외란 이전보다 증가한다. 식 (3)을 식 (4)에 대입하면 식 (5)와 같다. 이 경우에는 풍력발전기의 P_e 가 P_m 보다 크기 때문에 회전자 속도는 감소한다.

$$P_m - P_e = P_m - (P_0 + \Delta P_{in}) = J \omega_r \frac{d\omega_r}{dt} \quad (5)$$

그림 4는 외란 시 풍력단지 가상관성제어방법을 적용한 경우의 주파수와 보조루프의 출력을 나타낸다. ROCOF를 이용하는 가상관성제어방법(기존 방법 1)의 경우에는, 외란 직후에, 큰 ROCOF에 의해 ΔP_{in} 이 크므로 주파수의 최저점을 높일 수 있다. 하지만 시간이 지남에 따라 ROCOF가 감소하여 ΔP_{in} 이 점점 작아지므로 전력망 주파수 제어에 대한 기여도가 작아진다. 또한, 주파수 반동 이후에는 ROCOF

f_{sys} : 전력망 주파수 K : ROCOF 계인

P_0 : MPPT 제어에 의한 유효전력 기준값

ΔP_{in} : ROCOF 루프에 의한 유효전력 기준값

P_{ref} : 풍력발전기 유효전력 기준값

그림 1 ROCOF를 이용한 가상관성제어 루프
Fig. 1 Virtual inertial control loop using ROCOF

가 양수가 되어 ΔP_{in} 은 음의 값을 가지므로, ROCOF에 의한 제어 방법이 가상관성제어를 수행하지 않는 경우보다 주파수 회복이 느림을 알 수 있다.

2.2 ROCOF와 주파수 변화량을 이용한 가상관성제어[7, 8]

위와 같은 단점을 보완하기 위해서 참고문헌 [7, 8]에서는, ROCOF 루프에 주파수 변화량에 의해 생성되는 ΔP 를 추가한 가상관성제어방법을 제안하였고, 이에 대한 블록도를 그림 2에 나타내었다. 여기서, ΔP 는 식 (6)과 같다.

$$\Delta P = -\frac{1}{R}(f_{sys} - f_{nom}) \quad (6)$$

여기서 R 은 드롭 계인이며, f_{nom} 은 전력망의 정격주파수이다. 따라서, 이 경우 풍력발전기의 P_{ref} 은 P_0 , ΔP_{in} , ΔP 로 구성되며, 이를 식 (4)에 대입하면 식 (7)과 같다.

$$P_m - P_e = P_m - (P_0 + \Delta P_{in} + \Delta P) = J\omega_r \frac{d\omega_r}{dt} \quad (7)$$

그림 4의 기존 방법 2는 ROCOF와 주파수 변화량을 이용한 가상관성제어방법을 나타낸다. 기존 방법 2의 보조루프 출력이 기존 방법 1의 출력보다 항상 큰 값을 가져, 주파수 하락이 적다. 또한, 항상 양의 값을 가지므로, 기존 방법 1에 비해 주파수 반등이후 회복 능력이 향상되었다. 하지만, 주파수제어를 수행하지 않는 경우보다 주파수 회복이 느림을 알 수 있다.

2.3 주파수의 최대 변화율을 이용한 가상관성제어

본 논문에서는, ROCOF 방법을 개선하기 위해 주파수 변화량 루프를 추가하지 않으면서, 주파수 하락시 기존 방법보다 많은 출력을 낼 수 있도록, 주파수 변화율의 최대값을 기반으로 유효전력 기준값을 생성하는 방법을 제안하였다. 그림 3에 주파수의 최대 변화율을 이용한 풍력발전기의 가상관성제어 루프를 나타내었으며, 제안한 방법의 P_{ref} 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{ref} = P_0 + \max(\Delta P_{in}) \quad (8)$$

식 (8)을 식 (4)에 대입하면, 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$P_m - P_e = P_m - \{P_0 + \max(\Delta P_{in})\} = J\omega_r \frac{d\omega_r}{dt} \quad (9)$$

f_{nom} : 전력망의 정격 주파수 R : 드롭 계인
 ΔP : 주파수 변화량 루프에 의한 유효전력 기준값

그림 2 ROCOF와 주파수변화량을 이용한 가상관성제어 루프
 Fig. 2 Virtual inertial control loop using ROCOF and the frequency deviation

그림 3의 max는 과거의 max 출력과 현재의 ROCOF와 비교하여 큰 값을 출력한다. 한편, 풍력발전기가 운전범위를 벗어나는 것을 방지하기 위해서 회전자 속도가 한계 운전범위인 0.68pu보다 작으면 제안한 루프는 차단된다.

그림 4에 나타난 바와 같이, 제안한 방법은 기존 방법 1에 비해 항상 큰 값을 출력하며, 기존 방법 2에 비해 외란 초기에는 출력이 다소 적지만, 그 이후에는 기존 방법 2보다 큰 값을 계속 출력한다. 따라서 기존 방법에 비해 주파수 하락이 감소되고, 주파수 반등 시점이 빠를 뿐만 아니라, 주파수 반등 이후에 주파수 회복 특성이 우수하다.

그림 3 주파수의 최대 변화율을 이용한 가상관성제어 루프
 Fig. 3 Virtual inertial control loop using the maximum ROCOF

(a) 전력망 주파수

(b) 가상관성제어의 보조루프 출력

그림 4 풍력단지의 가상관성제어방법 비교

Fig. 4 Comparison of the virtual inertial control algorithms of a wind power plant

3. 모의 계통

제안한 가상관성제어방법의 성능을 검증하기 위해 EMT-P-RV를 사용하여 그림 5의 모의 계통을 모델링했다. 모의계통에는 5기의 동기발전기(900MVA)와 1기의 DFIG

풍력단지(100MVA)가 연계되어 있으며, $500\text{MW} + j9\text{MVAr}$ 의 복소전력을 소비하는 부하가 있다. 동기발전기와 풍력단지에 대해서 다음 소절에 자세히 기술한다.

3.1 동기발전기

모의 계통에는 정격용량이 150MVA인 동기발전기 2기와 200MVA인 동기발전기 3기가 접속되어 있다. 모의 계통의 동기발전기는 모두 IEEEG1 기력거버너 모델을 사용하고 이를 그림 6에 나타냈다. 또한 표 1은 기력거버너 모델에서 사용되는 각 계수를 나타낸다. 전력망 주파수 변동 시 1차 제어를 수행하기 위해 동기기들의 드롭을 5%로 설정했다.

3.2 풍력단지

모의 계통에서 풍력단지는 정격용량이 100MVA인 DFIG 1기로 등가화 된 집합모델을 사용한다. 그림 7에 DFIG 발전기의 출력곡선을 나타내었고, 기동풍속, 정격풍속, 중단풍속은 각각 4m/s, 11m/s, 25m/s이다. DFIG는 전력망 주파수가 정격으로 유지되는 동안 MPPT 제어를 수행한다고 가정한다. 이를 위해 DFIG의 유효전력 기준값을 $k_g \omega_r^3$ 로 설정하였다[9]. 본 논문에서 사용하는 DFIG 모델의 운전범위는 동기속도를 기준으로 하여 0.68pu~1.33pu이다[10].

본 논문에서 주파수 변화를 계산에 사용된 미분기는 0.1

그림 5 모의 계통

Fig. 5 Model system configuration

그림 6 IEEE G1 기력거버너 모델

Fig. 6 IEEE G1 steam governor model

표 1 IEEE G1 model의 계수

Table 1 Coefficients of the IEEE G1 model

K	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	P_{MN}
20	0.3	0	0.4	0	0.3	0	0	0	0.33
T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	U_o	U_c	P_{MAX}
0.1	0	0.25	0.3	10	0.4	0	0.3	-0.5	1

초 간격으로 전력망 주파수의 편차를 구하고, 그 편차를 0.1 초로 나눠 미분 값을 구한다. 또한, 기존 방법 1, 2와 제안한 방법에서의 ROCOF 루프의 K 계인은 모두 풍력발전기의 관성과 관련된 값으로 $2H$ 로 표현된다. 여기서 H 는 블레이드의 관성 $H_{turbine}$ 과 발전기의 관성 $H_{generator}$ 을 합한 값이다. 본 논문에서는 $H_{turbine}$ 은 4이고, $H_{generator}$ 는 1이기 때문에 H 는 5가 되어 K 를 10으로 선정하였다. 기존 방법 2의 R 계인은 저 풍속(6m/s)에서 기존 방법 2의 가상관성제어 수행 시, 주파수 최저점 이전에서 보조 루프가 차단되어 주파수 하락이 더 심해지는 것을 방지하기 위해 0.2로 선정하였다. 만약 R 계인을 더 작은 값으로 선정하면 더 많은 에너지가 방출되어 주파수 최저점 이전에서 회전자 속도가 최저 속도에 이르러 기존 방법 2의 루프가 차단되기 때문이다. 표 2에는 각 제어방법의 루프 계인을 나타내었다.

그림 7 풍력단지의 출력 곡선

Fig. 7 Power curve of a wind power plant

표 2 여러 제어 방법의 루프 계인

Table 2 Loop gains of the control algorithms

	기존방법 1	기존방법 2	제안한 방법
P_{ref}	$P_0 + \Delta P_{in}$	$P_0 + \Delta P_{in} + \Delta P$	$P_0 + \max(\Delta P_{in})$
계인	$K=10$	$K=10, R=0.2$	$K=10$

4. 사례연구

가상관성제어방법의 성능은 풍속에 영향을 받는다. 따라서, 정격풍속(11m/s)과, 정격풍속의 70%인 풍속(8m/s), 저 풍속(6m/s)의 세 가지 경우에 성능을 검증하였다. 주파수 하락을 모의하기 위해 100MW를 출력하는 5번 동기발전기를 20초에 탈락시켰다. 또한, 제안한 방법의 유효성을 검증하기 위해, 100MVA 풍력단지가 동일한 용량의 동기기로 대체한 경우의 성능을 비교하였다. 회전자의 운전속도가 최저 운전 범위를 벗어나지 않도록 하기 위해서, 회전자 속도가 0.68pu가 되면, 가상관성제어 루프를 차단하였다.

4.1 사례1: 11m/s

그림 8은 정격 풍속인 경우의 결과를 나타낸다. 그림 8(a)에서 나타난 바와 같이, 기존 방법 1, 기력 6기, 기존 방법 2, 제안한 방법의 경우의 최저 주파수는 각각 59.017Hz, 59.067Hz, 59.082Hz, 59.089Hz 이다. 제안한 방법이 기존 방법 1, 2를 사용할 때보다 주파수 하락이 적었고, 주파수 반등시점과 주파수 반등 이후에 주파수 회복이 가장 빠른 것을 알 수 있다. 또한, 제안한 방법은 동기기만 있는 경우보

(a) 전력망 주파수

(b) 풍력단지 출력

(c) MPPT 기준값

(d) 보조루프 출력

(e) 회전자 속도

그림 8 사례1의 결과
Fig. 8 Results for case 1

다도 주파수 하락이 적었다.

그림 8(b)의 풍력단지의 출력은 그림 8(c)의 P_0 와 그림 8(d)의 가상관성제어 루프의 출력을 합한 값이다. 그림 8(b)의 파형이 그림 8(d)의 파형과 다른 이유는 다음과 같다. 가상관성제어로 인해 풍력발전기의 회전자 속도가 감소되었으며, P_0 가 회전자 속도의 제곱에 비례하므로, 회전자 속도의 감소로 인해 P_0 가 감소되었기 때문이다. 한편, 그림 8(c)의 P_0 가 다른 이유는, 각 제어 방법의 기여도에 따라 풍력단지의 에너지 방출량이 달라지고, 회전자 속도가 달라지므로(그림 8(e)), 회전자 속도의 제곱에 비례하는 P_0 가 달라진다.

그림 8(e)에서 나타난 바와 같이, 제안한 방법은 주파수 제어를 위해 많은 운동에너지를 방출하므로, 회전자 속도의 감소량이 기존방법보다 크다. 따라서 제안한 방법의 경우에는 기계적인 입력이 감소하여, 주파수가 회복하여 수렴하는 시점인 40초 이후에서 풍력단지 출력은 외란 이전보다 더 작은 값을 가지므로(그림 8(b) 참조), 풍력단지 입장에서는 경제적인 손해를 유발할 수 있다. 하지만, 이러한 손해에 대한 보상 문제는 본 논문의 범위를 벗어나므로 이에 대한 논의는 생략한다.

(a) 전력망 주파수

(b) 풍력단지 출력

(c) 회전자 속도

그림 9 사례2의 결과
Fig. 9 Results for case 2

4.2 사례2: 8 m/s

그림 9는 사례 2의 결과를 나타내었다. 그림 9(a)에서 나타난 바와 같이, 기존 방법 1, 기력 6기, 기존방법 2, 제안한 방법으로 구성된 전력망의 최저 주파수는 각각 59.018Hz, 59.067Hz, 59.082Hz, 59.089Hz 이다. 사례 1과 마찬가지로 제안한 방법이 기존제어 방법들을 사용할 때보다 주파수 하락이 적었으며, 주파수 반등시점과 주파수 반등 이후에 주파수 회복이 가장 빠른 것을 알 수 있다. 또한 동기기만 있는 경우보다 주파수 하락이 적었다.

4.3 사례3: 6 m/s

그림 10은 풍속이 다소 낮은 사례 3의 결과를 나타내었다. 그림 10(a)에서 나타난 바와 같이, 기존방법 1, 기력 6기, 기존방법 2, 제안한 방법으로 구성된 전력망의 최저 주파수는 각각 59.024Hz, 59.067Hz, 59.088Hz, 59.095Hz 이다. 제안한 방법이 기존제어 방법들을 사용할 때보다 주파수 하락이 적었으며, 주파수 반등시점도 빠른 장점이 있다. 또한 동기기만 있는 경우보다 주파수 하락이 적음을 알 수 있다. 하지만, 외란 이전에 회전자속도가 0.723pu인, 낮은 풍속영역에서 풍력단지가 가상관성제어를 수행하면 운동에너지의 방

출로 인해 회전자 속도는 그림 10(c)와 같이 한계 운전범위인 0.68pu까지 감소된다.

따라서 제안한 방법과 기존 방법 2의 경우, 그림 10(c)의 회전자 속도가 한계 운전범위인 0.68pu보다 적으면 주파수 제어를 위한 보조루프는 제거된다. 보조루프가 제거되는 순간에는 풍력단지의 출력이 감소되지만, 그 이후에는 회전자 속도가 증가되므로(그림 10(c)) 다시 풍력단지의 출력이 증가됨을 알 수 있다(그림 10(b)). 이에 따라 회전자 속도는 상승하여 운전범위 내로 회복되고, 주파수 반등 이후에 제안한 방법의 주파수 회복능력은 기존 방법 2와 유사하나, 기존 방법1과 기력 6기 경우보다 다소 떨어짐을 알 수 있다.

표 3에 각 사례에 대한 결과를 정리하여 나타내었다.

표 3 주파수 최저점 비교

Table 3 Comparison of the frequency nadirs

주파수 최저점 (Hz)				
구 분	기력 6기	기존방법 1	기존방법 2	제안한방법
사례1	59.067	59.017	59.082	59.089
사례2	59.067	59.018	59.082	59.089
사례3	59.067	59.024	59.088	59.095

5. 결 론

본 논문에서는 주파수의 최대 변화율을 이용한 풍력단지 가상관성제어방법을 제안하였다. 제안한 방법은 주파수의 최대 변화율을 이용하므로, 외란 후에 풍력단지가 큰 출력을 낼 수 있기 때문에, 전력망 주파수 회복에 기여가 크다.

다양한 풍속에서 제안한 방법의 성능을 검증한 결과, 제안한 방법은 주파수의 최대 변화율을 사용하므로 기존 방법보다 주파수 하락이 적었으며, 주파수 반등시간이 빨라지고, 주파수 반등 이후의 회복 특성이 우수함을 알 수 있었다. 특히, 동기기로만 구성된 경우보다 주파수 하락이 적음을 알 수 있었다. 하지만, 풍속이 낮은 경우에는 회전자의 운동에너지가 크지 않아, 가상관성제어를 수행하면 운전 한계 범위에 빨리 도달하므로, 주파수 제어에 대한 기여가 다소 제한된다.

제안한 방법은 외란 발생 시 풍력단지가 주파수 하락을 감소시킬 수 있으므로, 풍력발전의 수용률이 높은 전력망인 경우에도 주파수 유지에 기여도를 높일 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0009146)

References

- [1] Specification of power system reliability and power quality, *Ministry of Knowledge Economy*, December 2009.
- [2] Operational standard of the ancillary service for a

그림 10 사례3의 결과

Fig. 10 Results for case 3

power system operation, *Korea Power Exchange*, Aug. 2010.

- [3] Global Wind Energy Outlook 2012, *GWEC*, November 2012.
- [4] The 6th basic plan of electricity supply and demand, *Ministry of Knowledge Economy*, Feb. 2013.
- [5] J. B. Ekanayake, L. Holdsworth, and N. Jenkins, "Control of doubly fed induction generator wind turbine," *IEE Power Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 28–32, Feb. 2003.
- [6] J. B. Ekanayake and N. Jenkins, "Comparison of the Response of Doubly Fed and Fixed-Speed Induction Generator Wind Turbines to Changes in Network Frequency", *IEEE Trans. on Energy conversion*, vol. 19, No. 4, pp. 800–802, December 2004.
- [7] J. Morren, S. Haan, W. L. Kling, and J. A. Ferreira, "Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control," *IEEE Trans. on Power systems*, vol. 21, no. 1, pp. 433–434. Feb. 2006.
- [8] G. Ramtharan, J. B. Ekanayake, and N. Jenkins, "Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines," *IET Renew. Power Gen.*, vol. 1, pp. 3–9, 2007.
- [9] B. Shen, B. Mwinyiwiwa, Y. Zhang, and B. Ooi, "Sensorless Maximum Power Point Tracking of Wind by DFIG Using Rotor Position Phase Lock Loop," *IEEE Trans. Power Elect.* vol. 24, no. 4, pp. 942–951. 2009.
- [10] S. Engelhardt, I. Erlich, C. Feltes, J. Kretschmann, and F. Shewarega "Reactive power capability of wind turbines based on doubly fed induction generators," *IEEE Trans. on Energy Convers.* vol. 26, no. 1, pp. 1–9, Mar. 2011.

저 자 소 개

김 두 연 (金 斗 兗)

1985년 4월 14일생. 2011년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 현재 전북대 대학원 전기공학과 석사과정, 전북대 풍력에너지전력망적응기술연구센터 연구원

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : kimddoong@jbnu.ac.kr

김 진 호 (金 鎭 鎬)

1987년 1월 18일생. 2013년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 현재 전북대 대학원 전기공학과 석사과정, 전북대 풍력에너지전력망적응기술연구센터 연구원

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : wannabebalck@jbnu.ac.kr

이 진 식 (李 眞 植)

1985년 11월 22일생. 2011년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 현재 전북대 대학원 전기공학과 석사과정, 전북대 풍력에너지전력망적응기술연구센터 연구원

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : 2jinshik@jbnu.ac.kr

김 연 희 (金 煙 熙)

1979년 4월 10일생. 2006년 전북대 공대 전자정보공학부 졸업. 2008년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정, 전북대 풍력에너지전력망적응기술연구센터 연구원

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : love35021@jbnu.ac.kr

전 영 환 (全 瑩 煥)

1961년 2월 8일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1985~1994년 한국전기연구소 근무. 1996년~1998년 동경대 조수 역임. 1998년~2002년 한국전기연구원 그룹장. 현재 홍익대 전자전기공학부 교수

Tel : 02-320-1620

Fax : 02-320-1110

E-mail : yhchun@hongik.ac.kr

강 용 철 (姜 龍 澈)

1964년 8월 2일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 전북대 공대 전기공학과 교수, 전북대 풍력에너지전력망적응기술연구센터 소장, 전북대 스마트그리드연구센터 연구원

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : yckang@jbnu.ac.kr