

최대 전압 강하에 비례하는 무효전류 공급 루프를 이용한 DFIG 풍력단지의 계층전압제어

Hierarchical Voltage Regulation of a DFIG-based Wind Power Plant Using a Reactive Current Injection Loop with the Maximum Voltage Dip for a Grid Fault

박 건* · 김 진 호* · 강 용 철*
(Geon Park · Jinho Kim · Yong Cheol Kang)

Abstract - In a power grid that has a high wind power penetration, the fast voltage support of a wind power plant (WPP) during the grid fault is required to stabilize the grid voltage. This paper proposes a voltage control scheme of a doubly-fed induction generator (DFIG)-based WPP that can promptly support the voltage of the point of common coupling (PCC) of a WPP during the grid fault. In the proposed scheme, the WPP and DFIG controllers operate in a voltage control mode. The DFIG controller employs two control loops: a maximum voltage dip-dependent reactive current injection loop and a reactive power to voltage loop. The former injects the reactive power in proportion to the maximum voltage dip; the latter injects the reactive power in proportion to the available reactive power capability of a DFIG. The former improves the performance of the conventional voltage control scheme, which uses the latter only, by increasing the reactive power as a function of the maximum voltage dip. The performance of the proposed scheme was investigated for a 100-MW WPP consisting of 20 units of a 5-MW DFIG under various grid fault scenarios using an EMTP-RV simulator. The simulation results indicate that the proposed scheme promptly supports the PCC voltage during the fault under various fault conditions by increasing the reactive current with the maximum voltage dip.

Key Words : DFIG, Hierarchical voltage regulation of a WPP, Maximum voltage dip, Reactive current injection loop

1. 서 론

전세계 풍력발전기 설치 용량은 2020년에 801 GW까지 증가할 것으로 예상된다[1]. 풍력발전기 설치용량이 증가함에 따라 풍력발전기의 운전이 전력망의 주파수 또는 전압의 유지에 주는 영향이 커진다. 풍력에너지의 수용률이 높은 전력망의 경우, 풍력발전기 또는 풍력단지는 전력망의 안정적인 운영을 위해 동기발전기의 주파수와 전압 제어와 유사한 기능을 갖추어야 한다[2, 3].

풍력단지가 전력망의 전압안정도에 유지에 기여를 하기 위해 각종 외란이 발생하였을 때, 풍력단지의 연계점 전압을 계통운영자가 지정하는 범위 내로 유지해야한다. 전력망 연계기준에 따르면 전력망 사고 시에도 전력망과의 연계를 유지해야 할 뿐만 아니라, 사고 기간 동안 무효전류 또는 무효전력을 공급해야 한다[4, 5]. 따라서 다수의 풍력발전기들로 구성된 풍력단지의 연계점 전압을 제어하기 위해서, 풍력단지는 풍력단지내의 풍력발전기의

무효전력 출력을 조정하는 능력을 갖추어야 하며, 이를 위해서는 단지제어기와 발전기제어기를 사용하는 계층적 전압제어 방법이 필요하다[6-10].

풍력단지의 계통 연계점 전압을 제어하는 계층적 전압 제어에 관한 방법들이 제안되었다[11-13]. 참고문헌 [11]에서는 단지제어기와 이중여자 유도발전기(Doubly-fed induction generator, DFIG) 제어가 전압 제어 모드로 운전된다. 단지제어기는 연계점 전압 제어를 위해 각 DFIG 제어기에 전압 지령값을 전달하고, DFIG 제어기는 고정형 무효전력-전압(Q-V) 특성을 이용하여 DFIG 단자 전압과 연계점 전압을 제어한다. 이 방식은 외란에 대한 풍력단지의 반응이 빠르지만, 고정된 Q-V 특성을 이용하므로, 이용 가능한 DFIG의 무효전류 공급 능력보다 적은 양의 무효전력을 공급하므로 전압 제어 성능이 낮다.

참고문헌 [11]의 방식을 개선하기 위해 참고문헌 [12]에서는 DFIG의 적응형 Q-V 특성을 이용하는 풍력단지의 전압 제어 방식을 제안하였다. 이 방식은 DFIG의 Q-V 계인을 유효전력 출력에 따라 달라지는 무효전력 공급능력에 비례하여 결정하고, 이를 이용하여 무효전력을 공급한다. 따라서 사고 시 참고문헌 [11]의 방식보다 많은 양의 무효전력을 공급하므로 전압 유지능력을 개선되었다. 그런데 사고 시 과도한 무효전력 공급은 사고 제거 이후 연계점과 DFIG 단자에 과전압을 발생시킬 수 있다. 사고 제거 이후의 과전압을 감소하기 위해 참고문헌 [13]에서는, DFIG 제어기와 단지제어기에 고주파 필터를 이용하였다.

† Corresponding author, Dept. of Electrical Engineering, WeGAT Research Center, and Smart Grid Research Center, Chonbuk National University, Korea
E-mail : (yckang@jbnu.ac.kr)
* Dept. of Electrical Engineering and WeGAT Research Center, Chonbuk National University, Korea.
E-mail : ({powerupme, jkim}@jbnu.ac.kr)

Received : June 24, 2016; Accepted : June 29, 2016

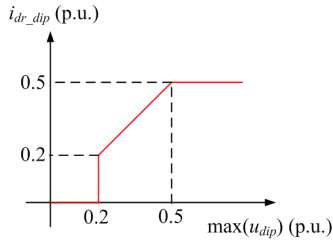


그림 2 제안한 최대 전압 강하 비례 무효전류 공급 루프의 특성
Fig. 2 Characteristics of the proposed maximum voltage dip-dependent reactive current injection loop

이 방식은 사고 제거 이후 DFIG의 무효전력 출력을 신속히 감소시켜 연계점과 DFIG 단자에서 과전압을 억제한다. 그런데 참고 문헌 [12]과 [13]의 적응형 Q-V 특성은 DFIG의 정상상태 운전 조건에서 결정된 무효전력 공급 능력에 따라 결정된다. 하지만, 전력망 사고와 같은 과도상태에 DFIG의 회전자측 컨버터 (Rotor-side converter, RSC)가 공급할 수 있는 무효전력은 정상 상태에의 무효전력 공급 능력보다 더 많은 무효전력을 공급할 수 있다.

본 논문에서는 전력망 사고 시 DFIG 컨버터의 가용한 무효전류 공급 능력을 활용하여 풍력단지의 전압 제어 방식의 성능을 향상시키기 위해 최대 전압 강하에 비례하는 무효전류 공급 제어 루프를 제안한다. 제안한 루프는 참고문헌 [12]에서 제안한 Q-V 특성 루프와 병렬로 사용되며, 전력망 사고 시 DFIG의 측정 단자전압으로부터 최대 전압 강하를 측정하고, 그에 비례하여 무효전류를 공급함으로써 사고 기간에 풍력단지 내 DFIG의 무효전류 공급을 DFIG 컨버터의 전류 제한값까지 증가시킬 수 있다. 따라서 DFIG 풍력단지의 연계점 전압 유지능력이 향상된다. 또한, 제안한 방법은 전력망 사고 제거 이후 풍력단지의 연계점과 DFIG 단자의 과전압을 억제하기 위해 고주파 필터를 이용하여 DFIG의 무효전력 출력을 감소시킨다. EMT-P-RV를 사용하여 다양한 사고 조건에서 제안한 방식의 성능을 검증하였다.

2. 최대 전압 강하에 비례하는 무효전류 공급 루프를 이용한 풍력단지의 전압제어

2.1 단지 제어기

그림 1(a)는 제안한 방법의 단지제어기를 나타낸다. 단지제어기는 전압 제어 모드로 운전되며 각 DFIG에 전압제어 지령값 Δu_{ref} 을 0.1 초 주기로 전달하여 풍력단지 내 DFIG의 무효전력 출력을 조정한다. 또한 고주파 필터를 이용하여 연계점 전압 회복을 감지하고 이를 과전압 억제에 이용하며, 고주파 필터의 전달 함수는 다음과 같다.

$$G_m(s) = \frac{K_1 s}{K_2 + K_3 s} \tag{1}$$

여기서, 본 논문에서는 K_1 과 K_3 은 1, 그리고 K_2 는 0.5로 설정하였다.

고주파 필터의 출력값인 h^i 는 전력망 사고 제거 시 단지제어기의 적분기에 누적된 값을 제거하며 각 DFIG 제어기에 전달된다.

2.2 DFIG 제어기

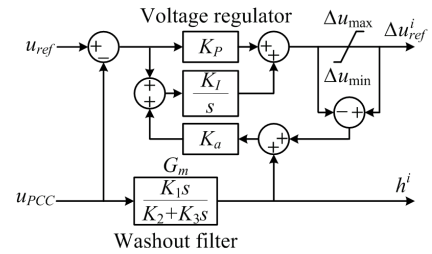
그림 1(b)에 나타낸 DFIG 제어기의 전압제어 루프는 적응형 Q-V 특성 루프와 최대 전압 강하 비례 무효전류 공급 루프로 구성된다. 적응형 Q-V 특성 루프는 참고문헌 [13]과 동일한 루프이다. 적응형 Q-V 특성 루프는 전압 오차 신호를 적응형 Q-V 계인과 곱하여 DFIG가 출력할 무효전력 공급량을 결정한다. 적응형 Q-V 특성의 계인은 다음과 같이 결정된다.

$$k_Q^i = \frac{Q_{max}^i - Q_{min}^i}{\Delta u} \tag{2}$$

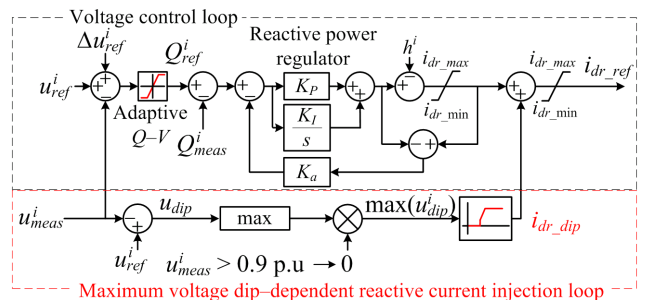
여기서, Q_{max}^i 와 Q_{min}^i 는 i 번째 DFIG의 최대 그리고 최소 무효전력 공급능력이고 Δu 는 선형 구간의 폭을 나타낸다[13]. 본 논문에서 Δu 는 0.1 p.u.로 설정하였다.

제안한 방법의 최대 전압 강하 비례 무효전류 공급 루프는 전력망 사고 시 DFIG 단자에서 발생하는 전압강하의 크기에 비례하여 DFIG가 무효전류를 공급한다. 전력망 사고에 의해 DFIG 단자에서 발생하는 전압 강하는 다음과 같이 결정된다.

$$u_{dip}^i = u_{ref}^i - u_{meas}^i \tag{3}$$



(a) 단지제어기



(b) DFIG 제어기

그림 1 제안한 방법의 단지제어기와 DFIG 제어기
Fig. 1 WPP and DFIG controllers in the proposed scheme

여기서, u_{ref}^i 는 i 번째 DFIG 제어기의 전압제어 기준값이고, u_{meas}^i 은 i 번째 DFIG의 측정된 단자 전압이다. 본 논문에서는 최대 전압 강하 비례 무효전류 공급 루프 동작을 위해 u_{dip}^i 의 최대값을 이용한다.

제한한 루프는 DFIG의 단자 전압의 전압 강하가 0.2 p.u. 이상일 때 동작하며, 전압 강하가 0.2 p.u. 미만인 경우 동작하지 않는다. 최대 전압 강하 비례 무효전류 공급 루프는 DFIG 단자에서 측정된 전압 강하의 크기를 이용하여 사고 기간 동안 DFIG 제어기의 무효전류 지령값을 증가시키며, 제한한 루프에 의해 공급되는 무효전류는 다음과 같다.

$$i_{dr_dip} = \begin{cases} 0 & (\max(u_{dip}^i) < 0.2) \\ \max(u_{dip}^i) & (0.2 \leq \max(u_{dip}^i) < 0.5) \\ 0.5 & (0.5 \leq \max(u_{dip}^i)) \end{cases} \quad (4)$$

제한한 무효전류 공급 루프는 전압 강하가 0.2 p.u. 이상일 시 최대 전압 강하에 비례하여 무효전력을 공급하므로, 사고 발생시 참고문헌 [13] 보다 많은 양의 무효전력을 공급하여 전압 제어 성능이 향상된다.

또한, 사고 종료 이후 발전기 단자전압이 0.9 p.u. 이상으로 상승할 경우 최대 전압 강하를 0 p.u.로 초기화하여 무효전류 지령값 증가값을 0 p.u.로 만든다. 제안한 방법의 무효전류 공급 함수는 그림 2와 같다. 또한, DFIG 제어기는 단지제어기의 고주파 필터 출력인 h 를 전달받아 무효전력 제어루프의 비례-적분 제어기 출력을 감소시켜 사고 제거 이후 과전압 억제가 가능하다.

3. 후류 모델

풍력단지로 불어오는 바람은 속도는 풍력발전기를 통과하면서 본래 갖고 있던 운동에너지의 일부를 잃게 되어 감속되며, 이를 후류효과라고 한다[14]. 후류효과에 의해 각 풍력발전기의 유효 전력 출력이 다르며, 이에 따라 풍력단지 내 각 풍력발전기는 다른 무효전력 공급능력을 가지게 된다. 따라서 풍력단지의 전압제어 방식을 설계하기 위해서는 풍력단지의 후류효과를 고려해야 한다[15].

각 풍력발전기의 풍속을 계산하기 위해 본 논문에서는 참고문헌 [16]에서 제안한 후류 계산 방식을 참조하였다. 각 풍력발전기의 풍속은 다음과 같이 계산된다.

$$v_j = v_{j0} - \sqrt{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \beta_i^2 (v_{wk}(x_{ij}) - v_{j0})^2} \quad (5)$$

여기서, v_{j0} 는 후류의 영향을 받지 않는 j 번째 풍력발전기의 입력 풍속이고, x_{ij} 는 i 번째 풍력발전기와 j 번째 풍력발전기 사이의 거리이고, $v_{wk}(x_{ij})$ 는 i 번째 풍력발전기로 불어오는 감속된 풍속이다. β_i 는 i 번째 풍력발전기의 후류영역이 j 번째 풍력발전기의 터빈에 영향을 미치는 면적 비율이고, 그리고 n 은 풍력단지 내 풍력발전기의 수이다.

4. 사례연구

제안한 방법의 성능을 검증하기 위해 DFIG 풍력단지가 전력망에 연계된 모의 계통(그림 3)을 EMTP-RV를 이용하여 모델링하였다. 풍력단지는 5-MW DFIG 20기로 구성되어 있으며, 각 피더에 4기의 DFIG가 2.3/33 kV 승압 변압기를 통해 피더 케이블에 연결되어 있다. 총 5개의 피더케이블은 33/154 kV 해상변전소에 접속된다. 해상변전소로부터 연계점까지의 거리는 10 km이며 154 kV급 케이블을 통해 연결되어 있다. 각 DFIG사이의 간격은 1 km로 설정하였고 전력량과 풍력단지의 단락비는 4로 설정하였다. 한편 풍력단지 제어기는 전압제어 지령값(Δu_{ref})을 0.1 초 주기로 DFIG 제어기에 전송하도록 설정되었다.

전력망 사고 시 제안한 방법의 성능을 검증하기 위해 풍력단지의 연계점과 전력망 사이에 3상 단락사고를 모의하였고, 이를 참고문헌 [11]과 [13]에서 제안한 방법들과 비교하였다. 표 1은 세 가지 사례에서 식 (5)를 이용하여 계산한 풍력단지 내 각 DFIG의 입력 풍속을 나타낸다.

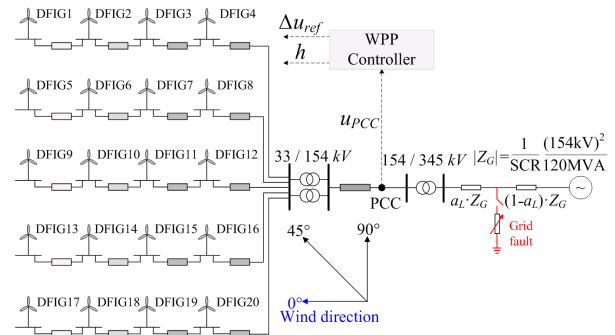


그림 3 모의 계통

Fig. 3 Model system

표 1 각 풍력발전기 입력 풍속

Table 1 Wind speeds of all DFIGs (m/s)

For Cases 1, 2 with 10 m/s, Wind Direction of 0°				For Case 3 with 12 m/s, Wind Direction of 0°			
Col.1	Col.2	Col.3	Col.4	Col.1	Col.2	Col.3	Col.4
8.62	8.69	8.83	10.00	10.37	10.43	10.59	12.00
8.62	8.69	8.83	10.00	10.37	10.43	10.59	12.00
8.62	8.69	8.83	10.00	10.37	10.43	10.59	12.00
8.62	8.69	8.83	10.00	10.37	10.43	10.59	12.00
8.62	8.69	8.83	10.00	10.37	10.43	10.59	12.00

4.1 사례 1 : 0.5 p.u. 전압 사고, 150 ms 지속, 풍속 10 m/s, 풍향 0도

그림 4는 사례 1에 대한 결과를 나타내고, 그림 4(a)는 연계점 전압, 그림 4(b)는 연계점 무효전력, 그림 4(c)는 DFIG4 단자 전압, 그림 4(d)는 제안한 최대 전압 강하 비례 무효전류 공급 루

프의 출력, 그리고 그림 4(e)는 DFIG4가 공급하는 무효전류량을 나타낸다.

그림 4(c)에 나타난 바와 같이, 연계점과 가장 가까운 DFIG4의 단자 전압이 7.017초에 0.66 p.u.로 하락하는 것을 알 수 있다. 제안한 무효전류 공급 루프가 0.34 p.u.의 최대 전압 강하를 감지하고 그림 4(d)와 같이 0.34 p.u.의 무효전류 지령값을 상승시킨다. 따라서, 그림 4(e)에서 보여준 바와 같이 제안한 방식의 공급 무효전류량은 0.84 p.u.로 기존방법 [11]의 0.58 p.u., 기존방법 [13]의 0.74 p.u. 보다 높은 것을 알 수 있다. 또한, 제안한 방법은 기존 방법보다 빠르게 무효전류를 공급함을 알 수 있다.

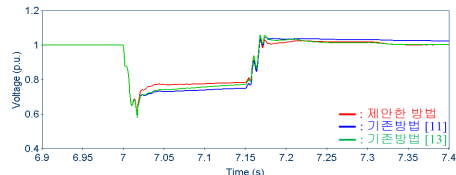
그림 4(b)와 나타난 바와 같이 제안한 제어 방식에 의해 연계점에 공급하는 무효전력은 0.52 p.u.로 기존방법 [11]와, 기존방법 [13]보다 각각 0.25 p.u., 0.09 p.u. 높을 뿐만 아니라, 무효전력 공급의 속도가 매우 빠름을 알 수 있다. 따라서 그림 4(a)와

같이 사고 기간에 회복되는 연계점 전압이 0.78 p.u.로 기존방법 [11]의 0.75 p.u., 기존방법 [13]의 0.77 p.u.보다 높으며, 제안한 방법이 기존방법에 비해 연계점 전압 회복에 대한 기여가 향상되었음을 확인할 수 있다.

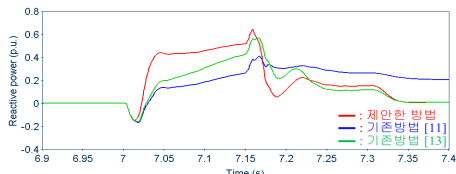
한편, 제안한 방식의 경우, 사고 제거 이후의 연계점 및 발전기 단자 전압이 기존 방식에 비해 작고, 기준값에 빠르게 수렴함으로써, 과전압을 방지하는데 효과적임을 알 수 있다.

4.2 사례 2 : 0.4 p.u. 전압 사고, 150 ms 지속, 풍속 10 m/s, 풍향 0도

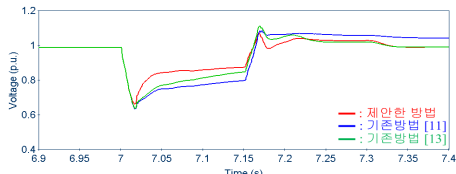
그림 5는 사례 2에 대한 결과를 나타낸다. 사례 1에 비해 연계점 전압 및 DFIG 단자전압이 더 낮게 떨어지기 때문에 DFIG 제어기에서 측정되는 최대 사고 전압 강하가 더 크게 측정되며



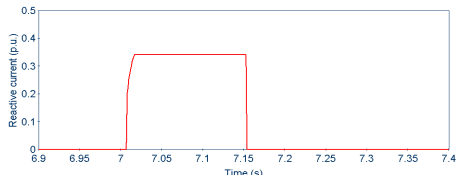
(a) 연계점 전압



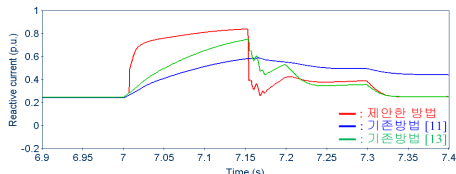
(b) 연계점 무효전력



(c) DFIG4 단자 전압

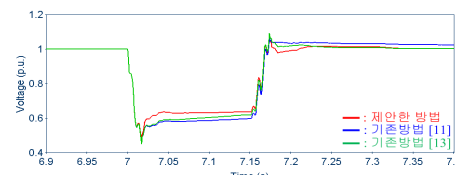


(d) 제안한 루프의 출력(DFIG4)

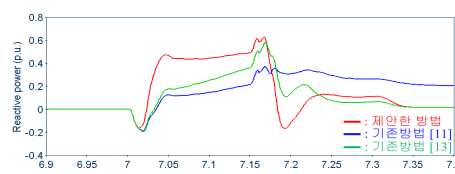


(e) DFIG4 무효전류 공급 지령

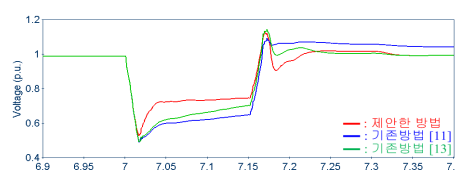
그림 4 사례 1의 결과
Fig. 4 Results for Case 1



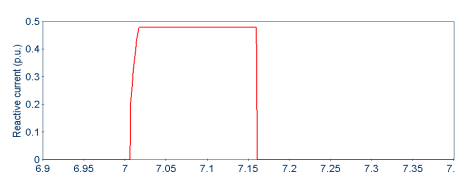
(a) 연계점 전압



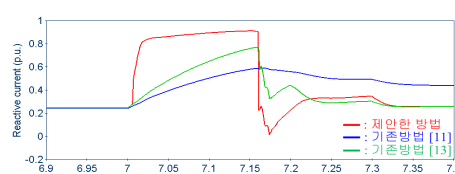
(b) 연계점 무효전력



(c) DFIG4 단자 전압



(d) 제안한 루프의 출력(DFIG4)



(e) DFIG4 무효전류 공급 지령

그림 5 사례 2의 결과
Fig. 5 Results for Case 2

로, 제안한 루프의 출력이 사례 1에 비해 높다.

그림 5(c)를 참조하면 DFIG4의 제어기가 측정한 단자전압이 7.017초에 0.52 p.u.로 하락하고, 이는 사례 1의 0.66 p.u.보다 0.14 p.u. 더 하락했음을 알 수 있다. 따라서 그림 5(d)와 같이 제안한 루프의 출력이 0.48 p.u.로 사례 1의 0.34 p.u.보다 0.14 p.u. 상승한다. 제안한 루프의 출력이 증가했기 때문에, 그림 5(e)와 같이 제안한 DFIG 제어기가 사고 기간에 공급하는 무효전류량은 0.9 p.u.로 사례연구 1에 비해 0.06 p.u.로 상승했으며 기존 방법 [11]의 0.58 p.u., 기존방법 [13]의 0.76 p.u. 보다 높은 것을 알 수 있다.

그림 5(b)를 참조하면 연계점에 공급되는 무효전력이 제안한 방법은 0.49 p.u., 기존방법 [11]는 0.22 p.u., 그리고 기존방법 [13]은 0.36 p.u.이고 그림 5(a)를 참조하면 연계점 전압이 제안한 방법은 0.64 p.u., 기존방법 [11]는 0.60 p.u., 기존방법 [13]

은 0.62 p.u.이다. 이는 사고 전압 강하가 사례 1보다 크기 때문에 기존방법 [11], [13]의 연계점에 공급하는 무효전류량과 연계점 전압 회복에 대한 기여도가 사례 1보다 크다는 것을 확인할 수 있다.

4.3 사례 3 : 0.4 p.u. 전압 사고, 150 ms 지속, 풍속 12 m/s, 풍향 0도

그림 6은 사례 3에 대한 결과를 나타낸다. 사례 2에 비해 DFIG 풍력단지에 입력되는 풍속이 높기 때문에, DFIG 풍력단지가 출력하는 유효전류량이 크게 되고 따라서 기존방법 [13]과 제안한 DFIG 제어기의 적응형 Q-V 특성 루프에서 공급되는 무효전력이 감소하게 된다. 따라서, 사고 초기에 각 DFIG가 공급하는 무효전류량이 감소하게 되어 연계점과 DFIG의 단자전압이 사례 2에 비해 약간 더 감소함을 알 수 있다.

그림 6(c)를 참조하면 DFIG4의 단자전압이 7.017초에 0.5 p.u.로 하락하고 이는 사례 2의 0.52 p.u.보다 0.02 p.u. 더 하락했음을 알 수 있다. 따라서 그림 6(d)와 같이 제안한 루프의 출력이 0.5 p.u.로 사례 2의 0.48 p.u.보다 0.02 p.u. 상승한다. DFIG4의 제안한 루프의 출력이 0.5 p.u.로 제안한 사고 크기 비례 무효전류 공급 루프가 최대 출력을 낼 수 있다. 반면에, 풍속이 사례 2보다 증가하여 따라 적응형 Q-V 특성 루프의 출력이 감소했기 때문에 제안한 DFIG 제어기가 공급하는 사고기간 무효전류량은 0.78 p.u.로 사례 2에 비해 0.12 p.u. 감소했으나 기존방법 [11]의 0.66 p.u., 기존방법 [13]의 0.66 p.u. 보다 높은 것을 알 수 있다.

연계점에 공급되는 무효전력이 제안한 방법은 0.39 p.u., 기존방법 [11]는 0.17 p.u., 그리고 기존방법 [13]은 0.23 p.u.이며, 연계점 전압이 제안한 방법은 0.62 p.u., 기존방법 [11]는 0.59 p.u., 기존방법 [13]은 0.6 p.u.이다.

사례 2와 3의 결과로부터 제안한 방식은 풍속이 높은 경우에 전압 유지에 대한 기여가 큼을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 최대 전압 강하에 비례하는 무효전류 공급 루프를 이용한 DFIG 풍력단지의 전압제어를 제안한다. 제안한 제어 루프는 DFIG 단자에서 측정된 전압으로부터 최대 전압 강하를 계산하고, 이에 비례하는 무효전류 루프의 출력값을 생성한다. 또한, 이 값은 Q-V 특성 루프의 출력과 합쳐져 DFIG가 출력해야 할 무효전류 기준값을 생성하며, 이 기준값은 RSC의 가용한 무효전류 공급능력까지 증가할 수 있다.

다양한 전력망 사고의 크기와 풍력단지의 풍속 조건에서 제안한 방법의 성능을 검증한 결과, 제안한 방법은 최대 전압 강하에 비례하는 무효전류 공급 루프를 사용하므로 사고 시 연계점에 공급되는 무효전력을 기존 방법들 보다 많이 공급하여, 연계점 전압을 높게 유지할 수 있을 뿐만 아니라, 기존 방법에 비해 신속하게 전압을 유지함을 알 수 있다.

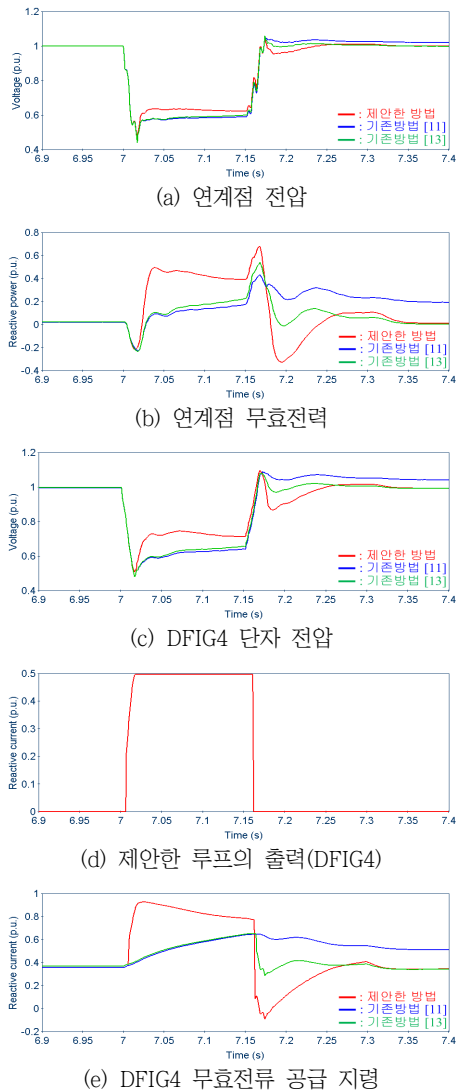


그림 6 사례 3의 결과
Fig. 6 Results for Case 3

References

- [1] Global Wind Energy Council, "Global wind energy outlook 2014".
- [2] M. Tsili and S. Papathanassiou, "A review of grid code technical requirements for wind farms," *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 3, pp. 308-332., Sept. 2009.
- [3] E.ON Netz GmbH, "Grid Code: High and Extra High Voltage", Aug. 2006.
- [4] S. Zhang, K. J. Tseng, S. S. Choi, T. D. Nguyen, and D. L. Yao, "Advanced control of series voltage compensation to enhance wind turbine ride through," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 2, pp. 763-772, Feb. 2012.
- [5] H. Xu, J. Hu, and Y. He, "Operation of wind-turbine-driven DFIG systems under distorted grid voltage conditions: Analysis and experimental validations," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 5, pp. 2354-2366, May 2012.
- [6] M. Tsili and S. Papathanassio, "A review of grid code technical requirements for wind farms," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 3, no. 3, pp. 308-332, Sep. 2009.
- [7] National Grid, "The Grid Code-Issue 4, Revision 5," Dec. 31, 2010.
- [8] *EirGrid Grid Code, ver. 3.5*, EirGrid plc, Ireland, Mar. 2011.
- [9] M. Mohseni and S. M. Islam, "Transient control of DFIG-based wind power plants in compliance with the Australian grid code," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 6, pp. 2813-2824, Jun. 2012.
- [10] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, R. Guzman, and A. Borrell, "Reactive power control for distributed generation power plants to comply with voltage limits during grid faults," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 11, pp. 6224-6234, Nov. 2014.
- [11] J. Fortmann and I. Erlich, "Use of a deadband in reactive power control requirements for wind turbines in European grid code", *11th international work shop on large scale integration of wind power into power systems*, Lisbon, Portugal, 13-15 Nov. 2012.
- [12] J. Kim, J. K. Seok, E. Muljadi, Y.C. Kang, "Adaptive Q-V scheme for the voltage control of a DFIG-based wind power plant," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 5, pp. 3586-3599, May 2016.
- [13] J. Kim, E. Muljadi, J. W. Park and Y. C. Kang "Hierarchical control scheme for improving transient voltage recovery of a DFIG-based WPP," *9th international conference on power electronics*, Seoul, Korea, Jun. 2015.
- [14] N. O. Jensen, "A note on wind generator interaction," Risø Nat. Lab., Tech. Rep. RISO-M-2411, Roskilde, Denmark Nov. 1983.
- [15] J. Kim, J. Lee, Y. Suh, B. Lee, and Y. C. Kang "Fault response of a DFIG-based wind power plant taking into account the wake effect," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 9, pp. 827-834, May. 2014.
- [16] F. Koch, M. Gresch, F. Shewarega, I. Erlich, and U. Bachmann "Consideration of wind farm wake effect in power system dynamic simulation," *Power Tech*, Russia, Jun. 2005.

저 자 소 개

**박 건 (Geon Park)**

1990년 1월 10일생. 2014년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정, 전북대 풍력에너지전력망적응기술 연구센터 연구원

Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394

E-mail : powerupme@jbnu.ac.kr

**김 진 호 (Jinho Kim)**

1987년 1월 18일생. 2013년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정, 전북대 풍력에너지전력망적응기술 연구센터 연구원.

Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394

E-mail : jkim@jbnu.ac.kr

**강 용 철 (Yong Cheol Kang)**

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 풍력에너지전력망기술연구센터(ERC) 소장, 전북대 스마트 그리드연구센터 연구원

Tel : 063-270-2391 Fax : 063-270-2394

E-mail : yckang@jbnu.ac.kr