

# 회전자 속도에 따라 변하는 계인에 기반한 가변속 풍력발전기 출력 평활화

## Power Smoothing of a Variable-Speed Wind Turbine Generator Based on the Rotor Speed-Dependent Gain

김 연 희\* · 강 용 철\*  
(Yeonhee Kim · Yong Cheol Kang)

**Abstract** - In a power grid that has a high penetration of wind power, the highly-fluctuating output power of wind turbine generators (WTGs) adversely impacts the power quality in terms of the system frequency. This paper proposes a power smoothing scheme of a variable-speed WTG that can smooth its fluctuating output power caused by varying wind speeds, thereby improving system frequency regulation. To achieve this, an additional loop relying on the frequency deviation that operates in association with the maximum power point tracking control loop, is proposed; its control gain is modified with the rotor speed. For a low rotor speed, to ensure the stable operation of a WTG, the gain is set to be proportional to the square of the rotor speed. For a high rotor speed, to improve the power smoothing capability, the control gain is set to be proportional to the cube of the rotor speed. The performance of the proposed scheme is investigated under varying wind speeds for the IEEE 14-bus system using an EMTP-RV simulator. The simulation results indicate that the proposed scheme can mitigate the output power fluctuation of WTGs caused by varying wind speeds by adjusting the control gain depending on the rotor speed, thereby supporting system frequency regulation.

**Key Words** : Power smoothing, Rotor speed-dependent gain, Releasable kinetic energy, Frequency deviation loop.

### 1. 서 론

풍력발전 수용률이 높은 전력계통은 가변속 풍력발전기의 최대출력제어 기능으로 인하여 동기발전기뿐만 아니라 인버터 기반 전력계통보다 시스템 관성이 작아진다[1, 2]. 이러한 계통에서는 큰 외란 발생 시에 주파수 유지가 어렵게 되므로, 일부 계통 운영자들은 풍력발전기의 출력 증발률에 제한을 두거나, 풍력발전기가 계통 주파수 조정에 참여하는 것을 의무화하기도 한다[3, 4].

한편, 풍속이 연속적으로 심하게 변동하면 풍력발전기의 출력도 심하게 변동되어 계통 주파수를 허용 범위내로 유지하기 어렵게 된다[5-7]. 특히 풍력발전의 수용률이 높은 경우, 주파수를 허용 범위내로 유지하기 위해서는 풍력발전기의 출력 평활화가 요구된다.

참고문헌 [8-10]에 풍력발전기에 배터리, 초전도저장장치, 플라자 회일 등의 별도의 에너지 저장장치를 이용하는 풍력발전기

의 출력 평활화 방식이 제안되었다. 이 방식은 추가적인 에너지 저장장치를 이용하므로 풍력발전기의 출력을 평활화하는 데는 효과적이거나, 그 효과는 추가로 설치되는 에너지 저장장치의 용량과 그 순간의 가용 용량에 따라 달라진다. 또한, 이 방식은 에너지 저장장치를 설치하고 유지하는데 많은 비용이 소요될 뿐만 아니라, 에너지 저장장치에서 소모되는 손실로 인하여 경제성이 약화되는 문제점이 있다.

별도의 에너지 저장장치를 사용하지 않는 풍력발전기 출력 평활화 방식은 풍력발전기의 최대출력제어기에 보조 제어 루프를 추가하여 풍력발전기의 출력을 제어함으로써 출력을 평활화한다 [11, 12]. 이 방식은 가변속 풍력발전기의 회전자 운전 범위가 동기발전기의 회전자 운전 범위보다 매우 넓은 특성을 이용한다. 즉, 주파수 편차/주파수 변화율이 양수이면 풍력발전기의 출력을 일시적으로 감소시켜 회전자에 에너지를 저장하고, 음수이면 출력을 일시적으로 증가시켜 회전자로부터 에너지를 방출함으로써 출력을 평활화 한다. 이 방식은 별도의 장치가 필요하지 않으므로 추가 비용이 발생하지 않는 장점이 있지만, 풍력발전기의 회전자 운전 범위에서만 에너지를 방출하거나 흡수할 수 있다. 또한, 이 방식에서 사용하는 보조 제어 루프의 계인은 고정값이다. 따라서 계인이 크면 회전자 속도가 낮은 구간에서 풍력발전기의 안정적인 운전을 보장할 수 없고, 계인이 작으면 회전자 속도가 높은 구간에서 출력 평활화 성능이 제한된다.

본 논문에서는 회전자 속도에 따라 변하는 계인에 기반한 가

\* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,  
WeGAT Research Center, and Smart Grid Research Center,  
Chonbuk National University, Korea

E-mail : yckang@jbn.ac.kr

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

Received : February 23, 2016; Accepted : March 1, 2016

변속 풍력발전기의 출력 평활화 방식을 제안한다. 제안한 방식은 최대출력제어 루프와 주파수 편차 루프를 이용하며, 주파수 편차 루프의 계인을 회전자 속도에 따라 변경한다. 즉, 회전자 속도가 동기속도 이하인 구간에서는 회전자 속도가 최저 속도 한계값에 도달하지 않게 하기 위해서 회전자 속도의 제곱에 비례하도록 주파수 편차 루프 계인을 정하였고, 회전자 속도가 동기속도 이상인 구간에서는 출력 평활화 성능을 향상시키기 위해 주파수 편차 루프 계인을 회전자 속도의 세제곱에 비례하도록 정하였다. 제안한 방식의 성능을 검증하기 위해 EMTP-RV를 이용하여 IEEE 14 모선 시스템을 구현하여, 풍력발전기의 입력 풍속이 연속적으로 변동하는 경우에 제안한 방식의 성능을 검증하였다.

## 2. 회전자 속도에 따라 변하는 계인에 기반한 가변속 풍력발전기의 출력 평활화

가변속 풍력발전기의 회전자 운전 범위는 동기발전기의 회전자 운전 범위보다 매우 넓으므로, 가변속 풍력발전기는 필요에 따라 회전자의 운동에너지를 저장하거나 방출할 수 있다. 본 논문에서는 풍력발전기 회전자의 운동에너지를 일시적으로 저장 또는 방출하여, 변동풍속에 의해 변동하는 풍력발전기의 출력을 평활화하는 방식을 제안한다. 제안한 방식에서는 최대출력제어 루프와 병행하여 주파수 편차 루프를 사용하고, 주파수 편차 루프의 계인을 회전자 속도를 기반으로 하여 변경한다.

그림 1은 제안한 가변속 풍력발전기 출력 평활화 방식의 블록도를 나타낸다. 제안한 방식에서 출력 기준값( $P_{ref}$ )은 최대출력제어 루프의 출력( $P_{MPPT}$ )과 주파수 편차 루프의 출력( $\Delta P$ )의 합으로 구성되며, 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$P_{ref} = P_{MPPT} + \Delta P \quad (1)$$

$P_{MPPT}$ 는 식 (2)와 같이 회전자 속도의 세제곱에 비례하도록 정하였다[13].

$$P_{MPPT} = k_g \omega_r^3 \quad (2)$$

여기서,  $k_g$ 는 상수로, 본 논문에서는 0.512로 설정하였다[13].

제안한 방식에서는  $\Delta P$ 를 식 (3)과 같이 정하였다.

$$\Delta P = C_0 K_a(\omega_r) \Delta f \quad (3)$$

여기서,  $C_0$ 는 상수로, 본 논문에서는 150으로 설정하였으며,  $K_a(\omega_r)$ 은 회전자 속도에 따라 다르게 산정되는 계인이다.

본 논문에서는 풍력발전기의 출력 평활화 성능을 향상시키기 위해,  $K_a(\omega_r)$ 이 회전자 속도에 따라 증가하는 형태로 정하였다. 즉, 회전자 속도가 낮은 구간에서는 과도한 제어로 인하여 풍력발전기의 안정성을 해치지 않도록 계인을 작게 정하였으며, 회전자 속도가 높은 구간에서는 풍력발전기의 출력 평활화 성능을 향상하기 위해서 계인을 크게 정하였다. 이를 위해 동기속도를 기준으로 두 구간으로 나누어  $K_a(\omega_r)$ 을 정하였으며, 이를 그림 2에 나타내었다.

### 2.1 동기속도 이하인 구간에서의 $K_a(\omega_r)$

풍력발전기의 출력 평활화 성능을 향상시키기 위해서는 계인이 크면 클수록 좋다. 하지만, 회전자 속도가 낮은 구간에서 계인이 크면, 풍력발전기는 많은 에너지를 방출하게 되고, 이로 인해 회전자 속도가 감소하여 최저 운전 한계값에 도달할 수 있다. 이렇게 되면, 풍력발전기는 출력 평활화 루프를 분리시키게 되고, 이에 따라 풍력발전기의 출력이 급변하게 되어, 계통 주파수가 급격하게 변하는 결과를 초래하게 된다. 따라서 본 논문에서는 회전자 속도가 낮은 구간에서는 회전자 속도가 최저 운전 한계값에 도달하는 것을 방지하면서 출력 평활화 성능을 향상시키기 위해,  $K_a(\omega_r)$ 을 식 (4)와 같이 정하였다.

$$K_a(\omega_r) = -11.11(\omega_r - 1)^2 + 1 \quad (4)$$

### 2.2 동기속도 이상인 구간에서의 $K_a(\omega_r)$

$P_{MPPT}$ 가 회전자속도의 세제곱에 비례하므로 동기속도 이상인 구간에서는  $P_{MPPT}$ 가 큰 값을 갖는다. 따라서 출력 평활화 성능을 향상시키기 위해서는 모든 회전자 속도에서  $\Delta P$ 의 크기가  $P_{MPPT}$ 의 크기와 상응해야 한다. 이를 위해 동기속도 이상인 구간에서의  $K_a(\omega_r)$ 을 식 (5)와 같이 회전자 속도의 세제곱에 비례하도록 정하였다.

$$K_a(\omega_r) = \omega_r^3 \quad (5)$$

## 3. 모델 계통

제안한 방식의 성능을 검증하기 위해, EMTP-RV를 이용하여 IEEE 14 모선 시스템을 구현하였고(그림 3 참조), 여기에 12, 13, 14 모선에 각각 1개씩 총 3개의 풍력단지를 연계하였다. 또한, 풍력발전기 제어에 필요한 계통 주파수는 계통 연계점 측정 전압을 PLL 방식을 적용하여 계산하였다[14]. 이때 측정 전압의 샘플링 주파수는 3,840 Hz이고, 측정된 전압은 컷오프 주파수가 1,920 Hz인 2차 중점방지 저역통과 필터를 통과시켰다.

동기발전기는 스팀발전기로 구성하였으며, IEEEG1 스팀 터빈 거버너 모델을 이용하였고[15], 드롭 계인은 5%로 설정하였으며[16], 총 부하는 600 MW, 73.5 MVar이다.

## 4. 사례 연구

그림 3의 모델 계통에서 풍력 수용률이 15%인 경우에 각 풍력단지의 입력 풍속이 시간에 따라 변동하게 하여 제안한 풍력발전기 출력 평활화 방식의 성능을 검증하였다. 본 논문에서 풍력수용률은 풍력단지 설치용량을 총 부하로 나눈 값으로 정하였다[17]. 이에 따라 풍력단지의 총 설치용량은 90 MW이며, 개별 풍력단지의 설치용량은 30 MW이다. 제안한 방식의 성능은 고정 계인이 25인 기존 방식(참고문헌 [11])과, MPPT 제어 방식과 비교하였다.

각 풍력단지의 입력 풍속 크기를 세 종류의 풍속 즉, 저풍속, 중풍속, 고풍속으로 모의하였으며, 이들의 평균 속도는 각각 7 m/s, 9 m/s, 11 m/s이다. 그림 4는 시간에 따라 변동하는 각 풍력단지의 입력 풍속을 나타내며, 검정색, 파랑색, 빨강색은 각각 저풍속, 중풍속, 고풍속을 나타내며, 풍력단지 1의 입력 풍속, 풍력단지 2의 입력 풍속, 풍력단지 3의 입력 풍속을 나타낸다.

그림 5는 MPPT 제어 방식, 기존 방식, 제안한 방식의 계통 주파수와 풍력단지의 전체 출력을 나타낸다. 그림 5(a)에서 나타난 바와 같이, 제안한 방식의 경우, 계통 주파수 변동폭이 MPPT 제어 방식과 기존 방식보다 작음을 확인할 수 있다. 제안한 방식의 주파수 편차의 실효값은 0.0229 Hz로 기존 방식보다 0.0148 Hz만큼 작으며, MPPT 제어 방식보다는 0.0207 Hz만큼 작다. 이와 같이 제안한 방식은 계통 주파수 유지에 현저한 기여를 함을 확인할 수 있다. 그 이유는 그림 5(b)와 같이 제안한 방식이 MPPT 제어 방식과 기존 방식보다 단지 출력을 현저하게 평활화하였기 때문이다. 즉, 제안한 방식이 주파수 편차가 양수일 때 MPPT 제어 방식과 기존 방식보다 회전자에 에너지를 저장함으로써 출력을 감소시킬 수 있으며, 반대 경우에는 회전자에 저장된 에너지를 방출함으로써 출력을 증가시킬 수 있기 때문이다.

한편, 제안한 방식 적용 시 3개의 풍력단지에서 생산된 총 에너지는 197.66 MWh로, 기존 방식에 비해 약 2.37%가 감소되었으며, MPPT 제어 방식보다 2.91%가 감소되었다. 즉, 출력 평활화 성능이 높아질수록 이로 인한 에너지 손실의 증가는 불가피함을 알 수 있다.

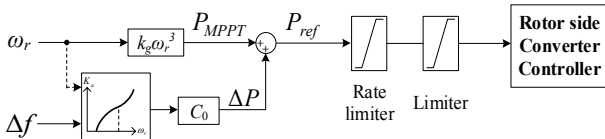


그림 1 제안한 풍력발전기 출력 평활화 방식의 블록도  
 Fig. 1 Block diagram of the proposed power smoothing scheme

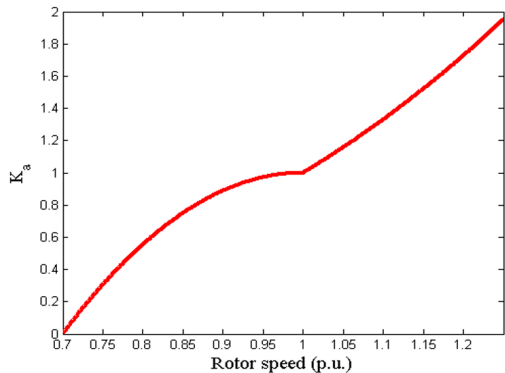


그림 2 회전자 속도에 따라 변하는 계인  $K_g(\omega_p)$   
 Fig. 2 Proposed rotor speed-dependent gain,  $K_g(\omega_p)$

회전자 속도에 따라 변하는 계인에 기반한 가변속 풍력발전기 출력 평활화

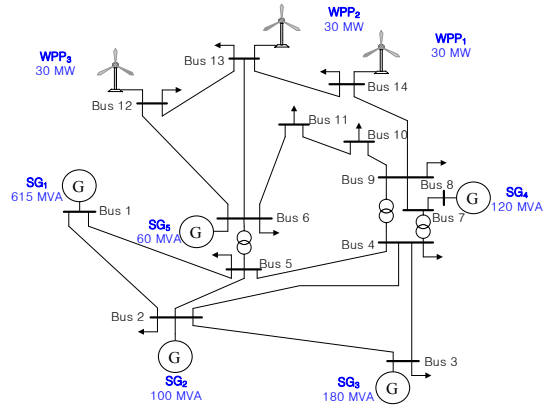


그림 3 IEEE 14 모선 시스템

Fig. 3 IEEE 14-bus system

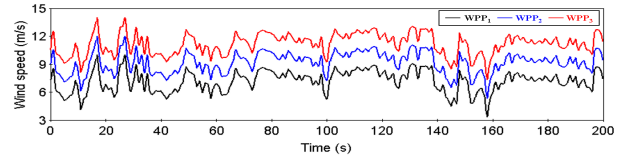
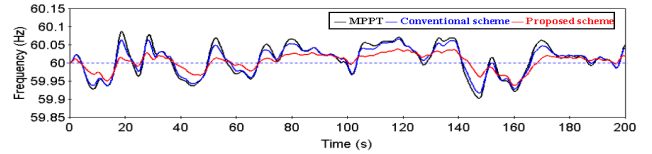
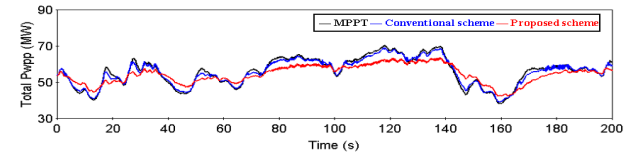


그림 4 풍력단지 입력 풍속

Fig. 4 Wind speeds for WPP1, WPP2, and WPP3



(a) 계통 주파수



(b) 풍력단지 전체 출력

그림 5 계통 주파수와 풍력단지 전체 출력

Fig. 5 Frequency and total outputs of three WPPs

그림 6은 입력 풍속이 저풍속인 풍력단지 1의 결과이다. 주파수 편차가 음수인 경우에는 출력 평활화를 위해서는 풍력단지의 출력이  $P_{MPPT}$  보다 커야하기 때문에  $\Delta P$ 가 양수이어야 한다. 반면에 주파수 편차가 양수인 경우에는 풍력단지 출력이  $P_{MPPT}$  보다 작아야하기 때문에  $\Delta P$ 가 음수이어야 한다. 그림 6(a)에 나타난 것과 같이, 주파수 편차가 음수인 구간에서, 제안한 방식의 풍력단지 출력은 기존 방식과 MPPT 제어 방식보다 크며, 주파수 편차가 양수인 구간에서는 제안한 방식의 출력이 가장 작다. 이는 제안한 방식의 계인이 기존 방식의 계인보다 크기 때문이며, 이는 그림 6(e)에서 확인할 수 있다.

제안한 방식은 출력 평활화를 위해 회전자에 저장되어 있는

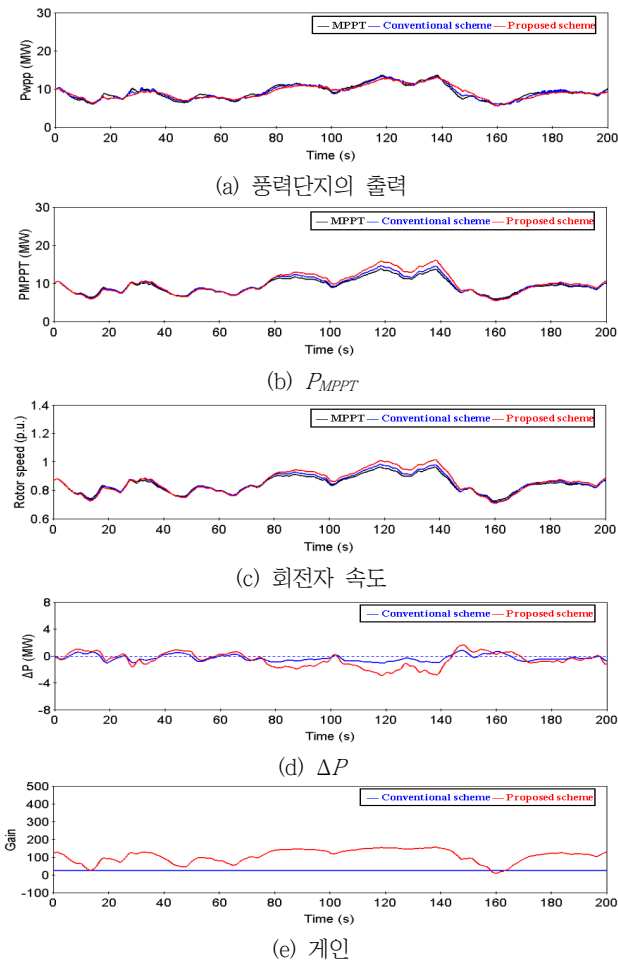


그림 6 풍력단지 1의 결과(저풍속)  
 Fig. 6 Results of WPP<sub>1</sub> for a low wind speed

에너지를 일시적으로 방출 또는 흡수하므로 회전자 속도의 변동 폭이 MPPT 제어 방식과 기존 방식에 비해 큼을 그림 6(c)에서 확인할 수 있다. 특히 117.4초부터 121.7초와 136.2초부터 139.3초까지의 구간에서 회전자 속도가 1 p.u.를 넘었다. 이 구간에서 제안한 방식의  $P_{MPPT}$ 의 변동폭이 MPPT 제어 방식과 기존 방식의 그것보다 크며, 제안한 방식의  $\Delta P$ 의 크기도 MPPT 제어 방식과 기존 방식의 그것보다 크게 된다. 하지만 결과적으로는  $\Delta P$ 의 감소량이  $P_{MPPT}$ 의 증가량보다 크므로 제안한 방식의 풍력단지 출력이 MPPT 제어 방식과 기존 방식보다 더 평활해진다. 하지만, 저풍속의 경우에는 풍력단지의 입력 풍속이 낮아 회전자 속도가 낮고 계인의 크기가 작으므로, 제안한 방식의 효과가 MPPT 제어 방식과 기존 방식에 비해 크지 않다.

한편, 풍력단지 1의 경우에는 입력 풍속이 낮기 때문에 모든 구간에서 회전자 속도가 1.25 p.u.를 넘지 않았으며, 피치 제어가 동작하지 않았다.

그림 7은 입력 풍속이 중풍속인 풍력단지 2의 결과이다. 풍력단지 2의 입력 풍속은 풍력단지 1의 입력 풍속보다 크다. 풍력단

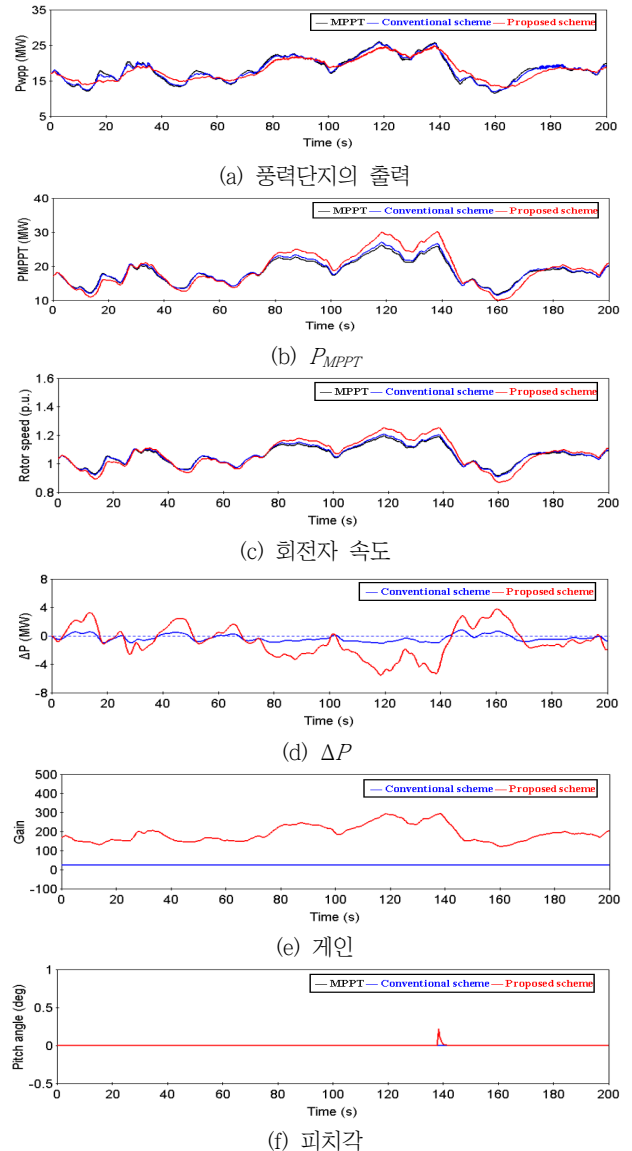


그림 7 풍력단지 2의 결과(중풍속)  
 Fig. 7 Results of WPP<sub>2</sub> for a medium wind speed

지 2의 결과는, 풍력단지 1의 결과와 마찬가지로, 주파수 편차가 음수이면 제안한 방식의 풍력단지 출력이 가장 크고, 주파수 편차가 양수이면 제안한 방식의 풍력단지 출력이 가장 작음을 알 수 있다.

풍력단지 2의 입력 풍속이 풍력단지 1의 그것보다 크기 때문에, 풍력단지 2의 회전자 속도가 풍력단지 1의 회전자 속도보다 크게 되므로, 회전자 속도의 변동폭도 큼을 확인할 수 있다. 따라서, 제안한 방식의  $P_{MPPT}$ 의 변동폭과  $\Delta P$ 의 크기도 MPPT 제어 방식과 기존 방식보다 크다. 하지만 저풍속의 경우와 마찬가지로  $\Delta P$ 의 감소량이  $P_{MPPT}$ 의 증가량보다 크므로 제안한 방식의 풍력단지 출력이 MPPT 제어 방식과 기존 방식보다 더 평활해진다. 한편, 풍력단지 2의 기존 방식의  $\Delta P$ 는 풍력단지 1의 그것과 같

다. 그 이유는 기존 방식의 경우 회전자 속도와 무관하게  $\Delta P$ 를 계산하기 때문이다.

또한, 중풍속의 경우, 제안한 방식의 풍력단지의 출력이 저풍속의 그것보다 더 평활해짐을 확인할 수 있다. 그 이유는 중풍속의 경우의 회전자 속도가 저풍속의 경우보다 더 높아 계인이 커지기 때문이다.

풍력단지 2의 경우에는, 그림 7(f)에 나타난 것과 같이 제안한 방식을 사용할 경우 피치 제어가 1회 동작하였으나, 기존 방식의 경우에는 피치 제어가 여전히 동작하지 않았다. 이는 제안한 방식 적용 시 회전자 속도의 변동폭이 커져 1.25 p.u.를 넘는 구간이 발생하였기 때문이다.

그림 8은 입력 풍속이 고풍속인 풍력단지 3의 결과이다. 입력 풍속이 3개 풍력단지 중 가장 크기 때문에 회전자 속도 또한 가장 크며, 회전자 속도가 1.25 p.u.에 머물러 있는 구간이 다른 두 개의 풍력단지보다 오래임을 알 수 있다. 고풍속 경우의  $P_{MPPT}$ 는 중풍속, 저풍속의 경우와 다르다. 즉, 제안한 방식의  $P_{MPPT}$ 는 기존 방식의 그것과의 차이가 중풍속의 경우보다 크지 않다. 그 이유는 기존 방식과 제안한 방식의 결과에서 회전자 속도가 1.25 p.u.를 유지하고 있는 구간이 비슷하기 때문이다.

한편, 고풍속 경우의 회전자 속도가 중풍속의 회전자 속도보다 크고, 회전자 속도가 1.25 p.u.를 오랫동안 유지하기 때문에, 제안한 방식에 의한 주파수 편차 루프의 계인이 크므로  $\Delta P$ 의 크기는 중풍속의 그것보다 크다. 따라서 제안한 방식의  $\Delta P$ 의 크기도 가장 크게 되므로, 제안한 방식의 풍력단지 출력의 평활화 효과가 가장 우수하다.

풍력단지 3의 경우, MPPT 제어 방식, 기존 방식, 제안한 방식 모두 회전자 속도가 1.25 p.u.를 초과하지 않게 피치 제어가 동작한다. 하지만, 제안한 방식 적용 시, 피치 제어가 동작하는 구간이 풍력단지 2에 비해 매우 넓어졌음을 그림 8(f)에서 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 회전자 속도에 따라 변하는 계인에 기반한 가변속 풍력발전기의 출력 평활화 방식을 제안하였다. 제안한 방식에서는 주파수 편차 루프의 계인을 회전자 속도가 동기속도 이하이면 회전자 속도의 제곱에 비례하도록 정하였으며, 회전자 속도가 동기속도 이상이면 회전자 속도의 세제곱에 비례하도록 정하였다.

IEEE 14 모션 시스템에 제안한 방식을 적용해 본 결과, 저풍속, 중풍속, 고풍속의 경우, 제안한 방식이 변동풍속에 의해 변동되는 풍력발전기의 출력을 기존 방식보다 더욱 평활시킴을 확인하였다. 또한, 풍속이 높은 경우에 제안한 방식의 출력 평활화 성능이 더 우수함을 확인하였다.

제안한 방식은 변동풍속으로 인한 풍력발전기의 출력 변동을 감소시킬 수 있으며, 계통 주파수 변동을 완화시키는데 기여할 수 있다. 하지만, 과도한 풍력발전기 출력 평활화는 큰 에너지 손실이 불가피 하므로, 풍력발전기의 출력 평활화 효과와 경제성을 동시에 고려해서 계인을 산정하여야 한다.

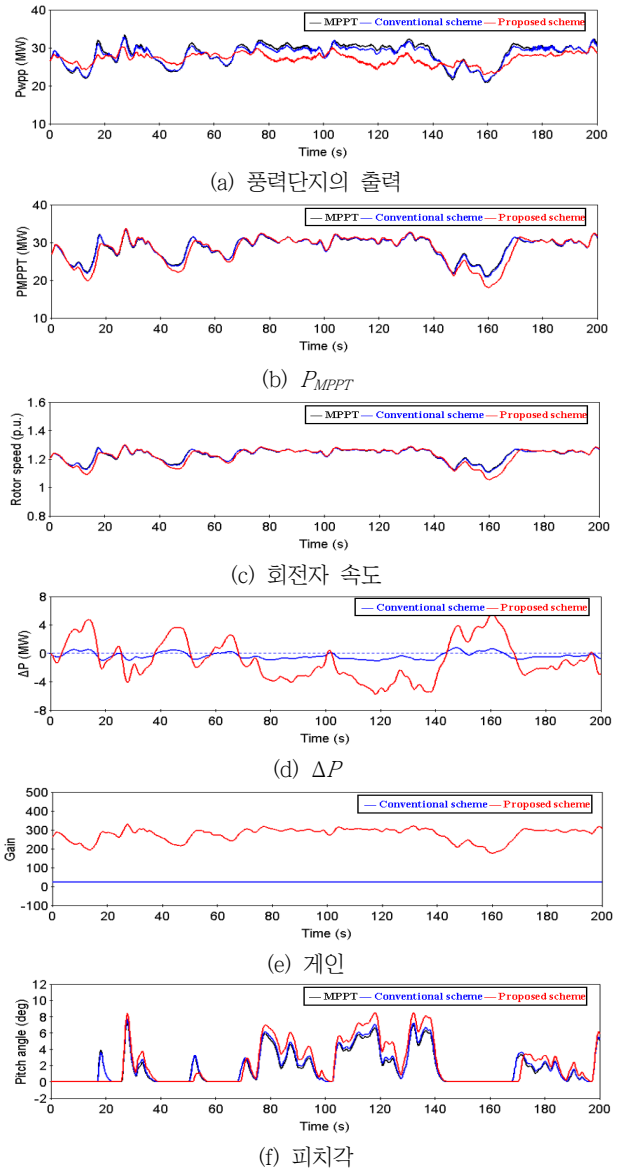


그림 8 풍력단지 3의 결과(고풍속)  
Fig. 8 Results of WPP<sub>3</sub> for a high wind speed

### 감사의 글

이 논문은 2015년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0028509).

### References

[1] N. W. Miller, M. Shao, S. Venkataraman, C. Loutan, and M. Rothleder, "Frequency response of California and WECC under high wind and solar conditions," in Proc.

- IEEE PES General Meeting, 2012, pp. 1-8.
- [2] L. Ruttledge, N. W. Miller, J. O'Sullivan, and D. Flynn, "Frequency response of power systems with variable-speed wind turbines," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 683-691, Oct. 2012.
- [3] E. Fagan, S. Grimes, J. McArdle, P. Smith, and M. Stronge, "Grid code provisions for wind generators in Ireland," in *Proc. IEEE PES General Meeting*, 2005, vol. 2, pp. 1241-1247.
- [4] EirGrid, "Controllable wind farm power station grid code provisions, EirGrid (Ireland) Grid Code," ver. 3.1, 2008.
- [5] I. D. Margaris, A. D. Hansen, N. A. Cutululis, P. Sorensen, and N. D. Hatziaargyriou, "Impact of wind power in autonomous power systems - Power fluctuations - Modelling and control issues," *Wind Energy*, vol. 14, no. 1, pp. 133-153, 2011.
- [6] N. Miller, D. Manz, H. Johal, S. Achilles, L. Roose, and J. P. Griffin, "Integrating high levels of wind in island systems: Lessons from Hawaii," in *Proc. IEEE ICSET 2010*, Kandy, Sri Lanka, 2010.
- [7] J. Kondoh, "Autonomous frequency regulation by controllable loads to increase acceptable wind power generation," *Wind Energy*, vol. 13, no. 6, pp. 529-541, 2010.
- [8] A. Uehara, T. Senjyu, A. Yona and T. Funabashi, "Frequency control by coordination control of WTG and battery using load estimation," in *Proc. 2009 Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems*, Taipei, Taiwan, 2009.
- [9] H.-Y. Jung, D.-J. Park, H.-R. Seo, M. Park, and I.-K. Yu, "Power quality enhancement of grid-connected wind power generation system by SMES," in *Proc. IEEE/PES Power Systems Conf. Exposition*, 2009, Seattle, WA, 2009, pp. 1-6.
- [10] R. Takahashi and J. Tamura, "Frequency control of isolated power system with wind farm by using flywheel energy storage system," in *Proc. 2008 Int. Conf. Electrical Machines*, Vilamoura, Portugal, 2008.
- [11] M. Wang-hansen, R. Josefsson, and H. Mehmendovic, "Frequency Controlling Wind Power Modeling of Control Strategies," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 954-959, Oct. 2013.
- [12] I. D. Margaris, S. A. Papathanassiou, N. D. Hatziaargyriou, A. D. Hansen, and P. Sorensen, "Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 189-199, Apr. 2012.
- [13] B. Shen, B. Mwinyiwiwa, Y. Zhang, and B.-T. Ooi, "Sensorless maximum power point tracking of wind by DFIG using rotor position phase lock loop (PLL)," *IEEE Trans. Power Elect.*, vol. 24, no. 4, pp. 942-951, Apr. 2009.
- [14] S. Li, J. Hu, S. Wang, H. He, L. Wang, and G. Liu, "A novel inertial control strategy for full-capacity wind turbine with PLL by optimizing internal potential response," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2014*, Hangzhou, China, Oct. 2014, pp. 3024-3028.
- [15] R. T. Byerly, O. Aanstad, D. H. Berry, R. D. Dunlop, D. N. Ewart, B. M. Fox, L. H. Johnson, and D. W. Tschappat, "Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-92, pp. 1904-1915, Nov. 1973.
- [16] J. Sutter, J. Maleche, and C. Muriithi, "Analysis of power system transient stability due to increased integration of geothermal power," presented at the 39th Work shop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA, Feb. 24-26, 2014.
- [17] T. Ackermann, "Overview of Integration Studies - Methodologies and Results," in *Wind Power in Power System*, 2nd ed. England: John Wiley & Sons, Ltd., 2012.

## 저 자 소 개



### 김 연 희 (Yeonhee Kim)

1979년 4월 10일생. 2006년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 2008년 전북대학교 대학원 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : love35021@jbnu.ac.kr



### 강 용 철 (Yong Cheol Kang)

1964년 8월 2일생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재, 전북대학교 전기공학과 정교수.

Tel : 063-270-2391

Fax : 063-270-2394

E-mail : yckang@jbnu.ac.kr