

# 타워 효과로 인한 풍력터빈의 주기적인 출력 맥동 완화를 위한 출력 평활화 기법

도진호, 송승호  
광운대학교

## Power Smoothing Control for Mitigation of Periodic Power Fluctuation of Wind Turbine due to Tower Effect

Jin-Ho Do, Seung-Ho Song  
Kwangwoon University

### ABSTRACT

풍력발전은 높은 효율과 경제성을 갖춘 재생발전원으로 전 세계적으로 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 풍력발전기는 구조적 특성으로 인하여 바람 전단 및 타워 효과를 수반하며 이로 인해 출력에 리플이 발생하게 된다. 터빈 구조에 의한 주기적인 출력 리플은 전력품질 저하의 원인이 되며, 풍력발전시스템의 토크 맥동으로 인해 회전계의 마모와 수명저하의 원인이 된다. 따라서 타워 효과와 같은 풍력터빈 자체의 구조적인 출력 맥동을 평활화하는 효과적인 제어 전략이 필요하다. 본 논문에서는 출력 리플의 원인인 바람 전단 및 타워 효과의 모델에 관해 설명하고, MATLAB/Simulink를 통해 풍력발전시스템에 적용하였다. 또한, 이동 평균 필터를 이용해 출력을 평활화하는 제어 방식을 제안하였다.

### 1. 서론

전 세계적으로 탄소 중립 달성을 위하여 신재생 에너지의 보급이 증가하고 있으며, 풍력발전은 청정성과 높은 효율로 인하여 더욱이 주목받고 있다. 하지만 풍력터빈은 바람 전단과 타워 효과로 인해 블레이드에서 회수되는 바람 에너지가 주기적인 리플을 가지게 된다. 적절한 제어가 구성되지 않으면 계통에 전달되는 출력에도 리플이 발생하며, 계통에 불안정을 야기할 수 있다. 따라서 풍력발전시스템의 출력을 평활화하는 여러 가지 연구가 진행된 바가 있다.<sup>[1]</sup>

본 논문에서는 영구자석형 동기발전기를 사용하는 2.45MW급의 풍력터빈을 MATLAB/Simulink를 통해 구현하였다. 바람 전단과 타워 효과를 수식화하여 바람 에너지의 주기적인 맥동을 모델링하였으며, 기존 MPPT 제어 루프에 이동 평균 필터와 고역 통과 필터를 사용하여 풍력발전기 출력의 맥동 성분을 완화하였다.

### 2. 풍력터빈의 구조적 특성

#### 2.1 바람 전단

바람 에너지는 일반적으로 고도가 높아짐에 따라 지수함수 형태로 증가하며, 이 현상을 바람 전단(WS, Wind Shear)으로 부른다. 풍력터빈의 한 회전 당 3개의 블레이드는 최적점과 최고점을 세 번 마주함으로 바람 전단에 의한 출력 맥동은 풍력터빈의 회전 속도의 3배의 주파수 성분을 가지며 이를 3p 주파수로 부른다. 바람 전단 효과는 식 (1)과 같이 표현된다.  $r$ 은

블레이드의 반지름,  $\theta$ 는 풍력터빈의 회전각,  $H$ 는 풍력터빈 허브의 높이,  $\alpha$ 는 경험적 바람전단지수를 의미한다.

$$v_{ws} = \left( \frac{r \cos \theta + H}{H} \right)^\alpha \quad (1)$$

#### 2.2 타워 효과

풍력터빈의 블레이드가 타워 앞을 지나갈 때 받는 바람 에너지가 감소하는데, 이를 타워 그림자 효과(TSE, Tower Shadow Effect)로 부른다. 풍력터빈의 한 회전 당 블레이드는 타워 앞을 세 번 지나가며, 따라서 블레이드의 출력은 한 회전 당 세 번 감소하는 3p 주파수 성분을 가진다. 타워 효과는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$v_{tse} = \begin{cases} 1 & \text{for } -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ \frac{a^2(r^2 \sin^2 \theta - x^2)}{(r^2 \sin^2 \theta - x^2)^2} & \text{for } \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (2)$$

$a$ 는 타워의 반지름,  $r$ 은 블레이드의 길이,  $\theta$ 는 풍력터빈의 회전각,  $x$ 는 타워와 블레이드의 거리를 의미한다.

#### 2.3 등가 풍속

바람 전단과 타워 효과를 고려하여 블레이드가 받아들이는 등가 풍속은 식(3)과 같다. 타워 효과는 바람 전단에 비해 풍력발전시스템에 상당히 큰 영향을 미친다.

$$V_{eq} = V_{wind} v_{ws} v_{tse} \quad (3)$$

### 3. 풍력터빈 출력 맥동 저감을 위한 제어 기법

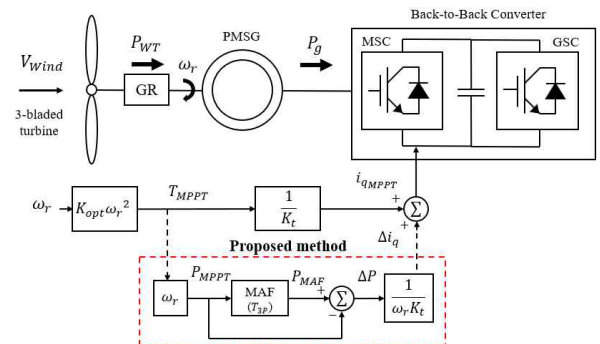


그림 1 제안하는 제어기 및 풍력발전시스템의 블록선도  
Fig. 1 Block diagram of wind generation system with proposed control scheme

기존 풍력발전기의 토크 지령은 풍력터빈의 회전 속도를 기준으로 출력 지령을 생성한다.<sup>[2]</sup> 풍력터빈의 회전 속도 역시 바람 에너지의 변동에 영향을 받아 맥동함으로 기존의 풍력발전기 출력은 리플을 포함한다. 출력 지령의 리플 성분을 제거하기 위하여 이동 평균 필터(MAF, Moving Average Filter)를 사용하였다.

$$P_{MAF} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_{MPPT}[n] \quad (3)$$

이동 평균 필터를 적용 시 데이터의 개수가 많을수록 맥동 성분의 제거를 기대할 수 있지만, 시간 지연이 커지는 단점이 있다. 본 논문에서는 가변속 풍력터빈을 고려하여 터빈 회전 속도에 따라 사용하는 데이터의 개수가 변동하며, 3p의 출력 리플의 한주기, 즉 풍력터빈 회전의 1/3 주기 동안의 풍력발전기 출력 지령  $P_{MPPT}$  을 평균하였다.

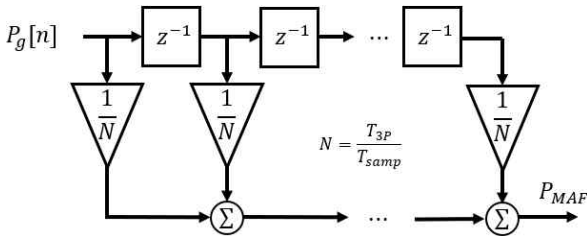


그림 2 MAF를 이용한 연속 평균 방법  
Fig. 2 Block diagram of MAF

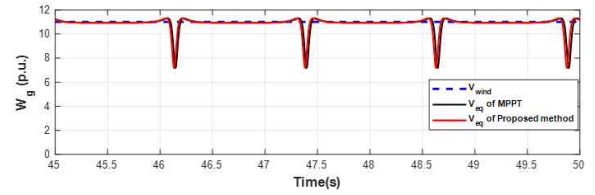
#### 4. MATLAB/Simulink 시뮬레이션 결과

표 1 시뮬레이션 파라미터  
Table 1 Parameters for the simulation

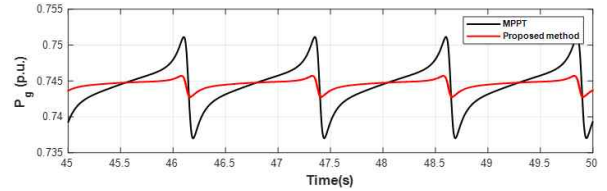
풍력터빈 파라미터			
정격 출력	2.45 [MW]	정격 풍속	12.12 [m/s]
기어비	77	블레이드 길이	41 [m]
정격 속도	18.3 [rpm]	타워 높이	80 [m]
풍속 모델 파라미터			
$\alpha$	0.3	a	3 [m]
x	8 [m]		

표 1의 파라미터를 갖춘 2.45MW급 PMSG 타입 풍력발전기를 대상으로 풍속이 고정된 환경에서 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 진행하였다.

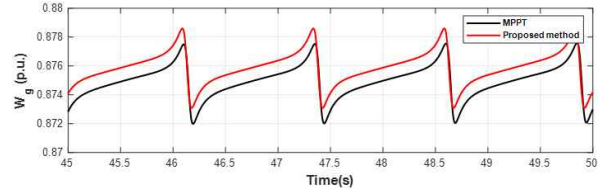
그림 3.(a)에서는 바람 진단과 타워 효과로 인해 11m/s의 고정 풍속이 입력되는 상황에서 블레이드가 받아들이는 풍속  $V_{eq}$ 가 변동하는 모습을 확인할 수 있다. 그림 3.(b)에서는 기존에 사용된 MPPT 제어기와 제안된 제어기를 사용했을 때 풍력터빈의 출력을, 그림 3.(c)에서는 풍력터빈 회전 속도를 비교하였다. 제안된 제어기를 사용했을 때 풍력터빈의 출력의 리플이 3p 주파수 기준으로 20%로 감소하였다. 또한, 제안된 제어기를 사용 시 풍력터빈의 평균 회전 속도가 0.001 p.u. 상승한 모습을 확인할 수 있다.



(a) 풍속  $V_{wind}$  및  $V_{eq}$



(b) 풍력터빈 출력  $P_g$



(c) 풍력발전기 회전 속도  $\omega_g$

그림 3 고정 풍속에서의 풍력터빈 시뮬레이션 결과  
Fig. 3 Results of simulation with fixed wind speed

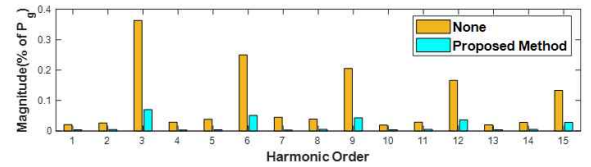


그림 4 고정 풍속에서의 풍력터빈  $P_g$ 의 FFT  
Fig. 4 Result of FFT of wind generator power output with fixed wind speed simulation

그림 4는 풍력발전기 출력을 FFT 분석한 결과를 나타낸다. 3p 외의 타워 효과에 의하여 발생한 3np 성분의 출력 리플도 절반 아래로 감소하였다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 기존에 널리 사용되는 MPPT를 위한 토크 제어기에 제안된 출력 리플 저감 알고리즘을 적용하여 출력에 포함된 고조파 특성을 비교하였다. 일반적으로 풍력터빈의 큰 관성 때문에 속도 변동이 심하지 않지만, 여전히 기존의 MPPT는 속도의 리플이 출력 지령에 반영되는 한계점이 있었다. 한편 제안된 제어기는 이동 평균 필터를 사용하여 출력 리플의 맥동을 20% 이하로 줄일 수 있었다.

향후 다수대의 풍력터빈이 설치된 풍력단지에서 발생하는 출력의 맥동을 분석 및 저감하는 연구를 진행할 필요가 있다.

#### 참고 문헌

- [1] HU, Weihao, et al. "Flicker mitigation by active power control of variable-speed wind turbines with full-scale back-to-back power converters" IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009
- [2] 남윤수, "풍력터빈의 제어", GS인터비전, 2009.