

계통주파수 지원을 수행하는 가변 속도 풍력터빈의 실시간 MPPT 운전점 추정

김예찬, 송승호
광운대학교

Real-Time MPPT Operating Point Estimation for Variable Speed Wind Turbines even during Grid Frequency Support

Ye-Chan Kim, Seung-Ho Song
Kwangwoon University

ABSTRACT

본 연구는 MPPT가 아닌 계통주파수 지원을 수행하는 가변 속도 풍력터빈의 MPPT 운전점을 실시간으로 추정하는 방법을 제안한다. MPPT 운전점 추정기는 블레이드 상태 추정기와 MPPT 상태 추정기가 결합된 모델로써, MPPT를 수행하지 않는 풍력터빈이 동일한 풍속 조건에서 MPPT를 수행하였을 경우의 상태를 추정한다. MPPT 운전점 추정기는 1% 드롭제어를 수행하는 4.3MW Type 4B 풍력터빈 모델에 적용되며, Matlab/Simulink 시뮬레이션을 통해 블레이드 상태 추정기 오차에 따른 MPPT 운전점 추정기 성능이 평가된다.

1. 서론

전력계통에서의 풍력터빈의 비중이 증가함에 따라, 풍력터빈이 계통을 지원하도록 하는 다양한 규정 및 보조서비스 시장이 신설되는 추세에 있다. 따라서 기존의 최대 전력점 추정(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 제어만을 수행하던 풍력터빈은 계통주파수를 안정화하기 위해 주파수 드롭, 합성관성 등의 유효전력 제어를 수행할 필요성이 증가하고 있다.

동일한 풍속 조건일지라도 풍력터빈의 출력제어 방식이 다르다면, 시간에 따라 풍력터빈의 속도 및 출력 운전점이 크게 달라질 수 있다. 즉, 계통주파수 지원을 목적으로 풍력터빈이 유효전력을 제어한다면 전반적인 블레이드 효율 감소 및 풍력터빈의 과감속 가능성을 감수해야 한다. 계통주파수를 지원하는 풍력터빈이 실시간으로 MPPT 제어 시의 운전점을 추정할 수 있다면, 풍력터빈의 운전점과 MPPT 운전점 추정값을 비교하여 계통에 공급하는 유효전력을 효율적으로 제어할 수 있다.

본 논문은 IEC 61400-27-1에서 규정하는 4.3MW Type 4B 풍력터빈 시스템을 대상으로, MPPT 제어를 수행하지 않는 풍력터빈이 MPPT 운전점을 추정하는 모델을 제안한다.^[1] 이러한 MPPT 운전점 추정기는 블레이드 상태 추정기와, 추정된 블레이드 상태에 기반하여 MPPT 제어를 수행할 경우의 풍력터빈 상태를 추정하는 MPPT 상태 추정기가 결합된 모델이다. MPPT 운전점 추정기의 정확도는 블레이드 출력 추정값 오차에 큰 영향을 받으므로, 시뮬레이션을 통해 오차 크기에 따른 절대 백분율 오차(Absolute Percentage Error, APE) 구하여 추정기 성능을 평가한다.

2. Type 4B 풍력터빈 모델^[2]

2.1 블레이드 시스템

그림 1은 IEC 61400-27-1에서 규정하는 Type 4B 풍력터빈 시

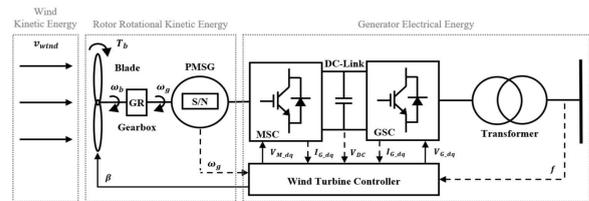


그림 1 Type 4B 풍력터빈 시스템 구성도
Fig. 1 Type 4B wind turbine system diagram

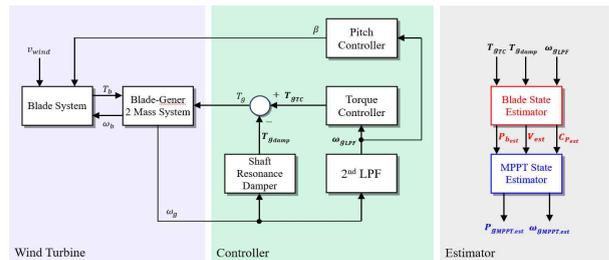


그림 2 제어기와 추정기를 포함한 풍력터빈
Fig. 2 Wind turbine including controller and estimator

스템을 나타낸다. 그림 1의 블레이드는 그림 2에서 블레이드 시스템과 2 질량 시스템의 블레이드 질량으로 분리된다. 블레이드 시스템은 바람의 운동에너지를 회전운동에너지로 변환하는 역할을 하며, 블레이드 출력 P_b 은 식 (1)과 같다.

식 (1)에서 ρ 는 공기밀도, R 는 블레이드 길이, C_p 는 블레이드 효율, λ 는 주속비, V 는 풍속이다.

$$P_b = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda) V^3 \quad (1)$$

2.2 블레이드-발전기 2 질량 시스템

풍력터빈의 기계 시스템은 회전관성이 큰 블레이드와 그렇지 않은 발전기가 한 축으로 결합된 형태이다. 두 관성체에 의한 토크로 인해 회전축에 약간의 비틀림이 발생하는데, 이는 주기적인 축 비틀림 토크를 유발한다. 블레이드와 발전기가 각각 동일한 크기의 토크를 회전축에 입력하더라도 발생하는 축 비틀림 토크의 크기는 다른데, 이는 관성의 크기가 다르기 때문이다. 따라서 발전기 회전 속도에 대한 영향 또한 식 (2), (3)과 같이 다른 것을 알 수 있다.

식 (2)와 (3)에서 J_g 는 발전기 관성, J_b 는 블레이드 관성, ω_g 는 발전기 속도, ω_b 는 블레이드 속도, T_g 는 발전기 토크, T_b 는 블레이드 토크, K_{sh} 는 회전축 강성, GR 는 기어비이다.

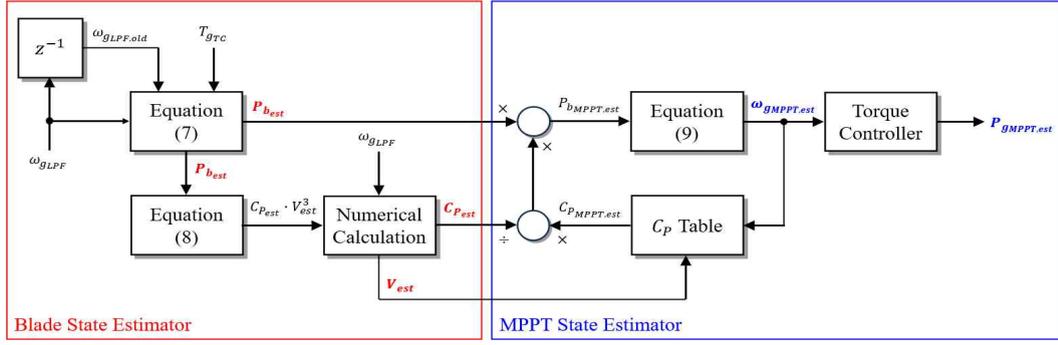


그림 3 MPPT 운전점 추정 모델
Fig. 3 MPPT operating point estimation model

$$\frac{\omega_g/GR}{T_b} = \frac{1}{J_b J_g s} \frac{K_{sh}}{s^2 + K_{sh}(1/J_b + 1/J_g)} \quad (2)$$

$$\frac{\omega_g/GR}{T_g GR} = \frac{1}{J_g s} \frac{s^2 + K_{sh}/J_b}{s^2 + K_{sh}(1/J_b + 1/J_g)} \quad (3)$$

3. 풍력터빈 제어 시스템

3.1 발전기 토크 제어기

발전기 속도가 최저속도와 정격속도 범위 내일 경우, 발전기 토크 제어기는 MPPT 제어를 수행하며 발전기 토크는 식 (4)와 같다. 반면, 최저속도 또는 정격속도에 도달하게 되면 PI 속도 제어를 수행하며 발전기 토크는 식 (5)와 같다.

식 (4)와 (5)에서 T_{grc} 는 토크 제어기의 발전기 출력 토크, K_{MPPT} 는 MPPT 상수, ω_{gLPF} 는 저역통과필터를 거친 발전기 속도, K_{psc} 와 K_{isc} 는 각각 PI 속도제어 비례 및 적분 이득, ω_{ref} 는 발전기 속도 지령이다.

$$T_{grc} = (K_{MPPT}) \omega_{gLPF}^2 = \left(\frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p,max}}{\lambda_{opt}^3} \right) \omega_{gLPF}^2 \quad (4)$$

$$T_{grc} = K_{psc}(\omega_{ref} - \omega_{gLPF}) + K_{isc} \int (\omega_{ref} - \omega_{gLPF}) dt \quad (5)$$

3.2 축 공진 댐퍼

2 질량 시스템의 축 공진을 억제하기 위해, 대역통과필터를 통해 회전속도에 공진주파수 ω_n 대역만을 통과시켜 식 (6)과 같이 댐핑 토크 T_{gdamp} 를 생성한다. 이때, 식 (2), (3)에 공진주파수를 대입해 식 (6)과 같이 댐핑 이득을 선정한다. 대역통과필터에 적용되는 공진주파수는 $\sqrt{K_{sh}(1/J_b + 1/J_g)}$, 제동비 ζ_{BPF} 는 0.45이다.

$$T_{gdamp} = \left(\frac{\omega_g/GR}{T_b} \frac{T_g GR}{\omega_g/GR} \right) G_{BPF} \omega_g \quad (6)$$

$$= \left(\frac{J_g}{J_b + 2J_g} \right) \frac{2\zeta_{BPF} s}{s^2 + 2\zeta_{BPF} \omega_n s + \omega_n^2} \omega_g$$

4. MPPT 운전점 추정 모델

4.1 블레이드 상태 추정기

그림 3은 블레이드 상태 추정기(붉은 상자)와 MPPT 상태 추정기(푸른 상자)가 결합된 MPPT 운전점 추정 모델을 보여준다. 구동축 손실이 없다고 가정할 때, 블레이드 토크는 발전기 토크와

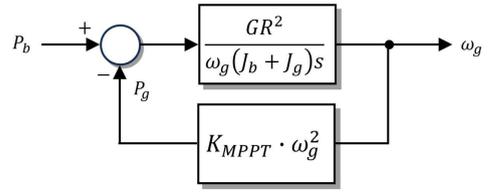


그림 4 MPPT에서의 발전기 속도 블록선도
Fig. 4 Block diagram of generator speed in MPPT

가속분 토크로 구분된다. 따라서 블레이드 토크 추정값 $P_{b,est}$ 는 식 (7)과 같이 계산된다. 이때, 발전기 토크에서 댐핑 토크는 제외하는데, 축 공진 성분은 블레이드 토크에서 제외되어야 하기 때문이다.

식 (7)에서 T_{samp} 는 제어 샘플링 시간, $\omega_{gLPF,old}$ 는 ω_{gLPF} 의 이전 값이다.

블레이드 토크 추정값을 식 (1)에 대입하면 식 (8)을 유도할 수 있다. 주속비 추정값 λ_{est} 는 $R\omega_{gLPF}/(GR \cdot V)$ 이며, 이를 사전 입력된 블레이드 효율 C_p 테이블에 대입하면, 풍속에 대한 블레이드 효율을 계산할 수 있다. 즉, 컴퓨터 수치해석 기법을 사용해 풍속추정값 V_{est} 과 블레이드 효율 추정값 $C_{p,est}$ 을 계산할 수 있다.

$$P_{b,est} = \left[(T_g - T_{gdamp}) + \frac{(J_b + J_g)(\omega_{gLPF} - \omega_{gLPF,old})}{GR^2 \cdot T_{samp}} \right] \omega_{gLPF} \quad (7)$$

$$C_{p,est} V_{est}^3 = \frac{2P_{b,est}}{\rho \pi R^2} \quad (8)$$

4.2 MPPT 상태 추정기

그림 4는 MPPT 제어에서 블레이드 출력에 따른 발전기 속도를 블록선도로 나타낸다. 이를 전달함수로 표현하면 식 (9)와 같다. 즉 식 (9)에 MPPT 블레이드 출력 추정값 $P_{MPPT,est}$ 를 입력하면 MPPT 발전기 출력 $\omega_{gMPPT,est}$ 을 계산할 수 있다. $P_{b,est}$ 은 $P_{b,est}$ 에 $C_{p,est}$ 를 나누고 MPPT 블레이드 효율 추정값 $C_{p,MPPT,est}$ 을 곱하여 계산할 수 있다. 그림 3을 보면 $\omega_{gMPPT,est}$ 와 V_{est} 를 C_p 테이블에 입력하여 $C_{p,MPPT,est}$ 를 계산하는 루프를 형성하는 것을 확인할 수 있다. 한편, MPPT 발전기 출력 추정값 $P_{gMPPT,est}$ 는 $\omega_{gMPPT,est}$ 를 3.1의 발전기 토크 제어기에 입력하여 얻어진다.

$$\omega_g = \sqrt[3]{\left(\frac{1}{K_{MPPT} s + 3K_{MPPT} \omega_g GR^2 / (J_b + J_g)} \right) P_b} \quad (9)$$

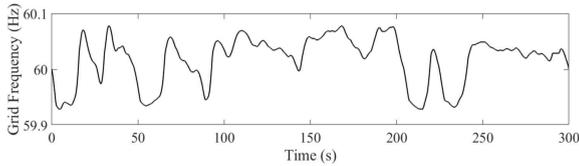


그림 5 계통주파수 프로파일
Fig. 5 Profile of grid frequency

5. MPPT 운전점 추정 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션 조건

그림 5는 추정 시뮬레이션 중 주파수 드롭 제어에 적용된 주파수 프로파일을 나타내며 평균 60.022, 최대 60.097, 최소 59.910Hz에 표준편차 0.0531로 설정되었다. 그림 6의 상단 검은 파형은 풍속 프로파일을 나타내며 평균 6, 최대 7.116, 최소 5.007m/s, 난류 강도 16%로 설정되었다.

추정 시뮬레이션에는 유니슨 4.3MW U151 풍력터빈 모델이 적용되었으며, 각각 풍력터빈 1은 MPPT 제어를 풍력터빈 2는 1%의 주파수 드롭 제어를 수행한다. 제안하는 추정기는 풍력터빈 2에 적용되며, 추정값은 풍력터빈 1과 비교된다.

한편 블레이드 상태 추정기가 실제 추정하는 값은 발전기에 전달되는 구동축 출력이며, 이에 구동축 효율을 나눠야 정확한 블레이드 출력을 추정할 수 있다. 이로 인해 블레이드 출력 추정값은 다른 추정 변수들에 비해 실제값과의 오차가 크게 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 블레이드 출력 추정값에 임의의 추정 오차율 $\epsilon_{P_{best}}$ 을 곱하여, $\epsilon_{P_{best}}$ 크기에 따른 제안하는 추정기의 추정 성능을 분석하였다.

5.2 제안하는 추정기 성능 평가

그림 6은 상단에서부터 풍속, 발전기 출력 및 속도를 보여준다. 그림 6의 검정 실선은 시뮬레이션에 적용된 실제 풍속이며, 적색 실선은 MPPT를 수행하는 풍력터빈 1, 청색 실선은 주파수 드롭을 수행하는 풍력터빈 2의 상태를 나타낸다. 녹색 파선은 $\epsilon_{P_{best}}$ 가 0일 경우, 풍력터빈 2에 적용된 제안하는 추정기의 추정값을 나타낸다.

그림 6의 발전기 출력에서 풍력터빈 2는 주파수 드롭을 수행하므로 풍력터빈 1의 파형에 그림 5의 계통주파수의 형상이 더해지며, 이에 따라 풍력터빈 2의 발전기 속도는 풍력터빈 1과 크게 다르게 나타난다. 그러나 제안하는 추정기는 풍력터빈 2에 적용되었음에도 실제 풍속 및 풍력터빈 1의 파형에 매우 근접한 추정값을 출력한다. 이는 추정기에 적용된 파라미터가 정확하다면 MPPT 운전점으로부터 크게 벗어난 풍력터빈에서도 제안하는 추정기가 정밀하게 동작한다는 것을 의미한다.

표 1은 각 추정값에 대한 절대 백분율 오차(APE)의 평균을 퍼센트 단위로 정리한 표로, APE는 $[\text{실제값} - \text{추정값}] / \text{실제값}$ 에 절대값을 취해 계산된다. 추정 오차율 $\pm 10\%$ 단위를 기준으로 풍속과 MPPT 발전기 속도의 APE 평균은 약 $\pm 3.3\%$, MPPT 블레이드 출력 및 발전기 속도의 APE 평균은 약 $\pm 9.3\%$ 이다. 이는 블레이드와 발전기 출력이 각각 풍속과 발전기 속도의 세제곱에 비례하기 때문이며, 따라서 풍속과 MPPT 발전기 속도 추정값은 상대적으로 블레이드 출력 추정 오차의 영향을 덜 받는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 MPPT 운전점을 실시간으로 추정하는 방법을 제안하였으며, Matlab/Simulink 시뮬레이션을 통해 제안하는 추정기의 성능을 분석하였다. 실제 MPPT 운전점과 추정값을 비교하기 위해 동일한 조건에서 두 대의 4.3MW Type 4B 풍력터빈 모델에 각각 MPPT와 주파수 드롭을 수행하도록 시뮬레이션하였다.

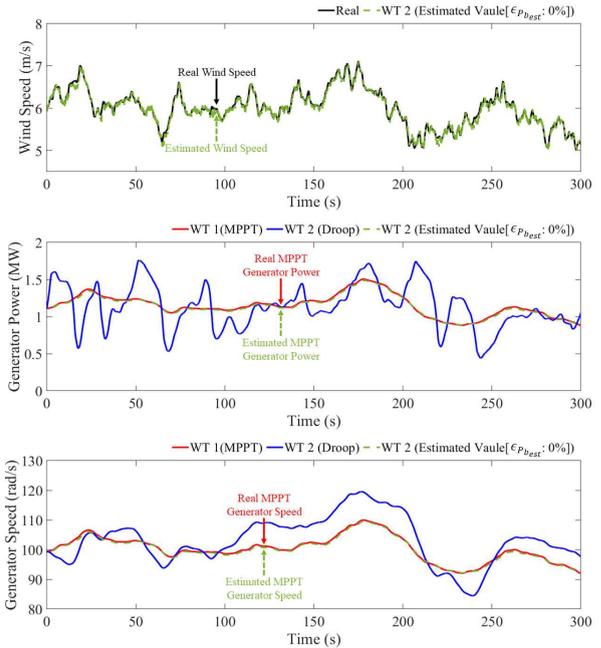


그림 6 Matlab/Simulink 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Matlab/Simulink simulation results

표 1. 시뮬레이션 조건에 따른 추정기 절대 백분율 오차 정리
Table 1. Estimator APE Summary Across Simulation Cases

추정 오차율 $\epsilon_{P_{best}}$	APE 평균[%]			
	풍속	MPPT 블레이드 출력	MPPT 발전기 출력	MPPT 발전기 속도
-20%	6.603	18.465	18.674	6.661
-10%	3.227	9.331	9.476	3.264
0%	0.775	2.333	0.455	0.156
10%	3.194	9.938	9.838	3.178
20%	6.244	19.953	19.983	6.261

시뮬레이션 결과를 통해 구동축 손실이 없다면 정확한 블레이드 출력을 추정할 수 있으며, 블레이드 출력 추정값에 임의의 추정 오차율을 곱하여 시뮬레이션하였을 경우, 상대적으로 풍속과 MPPT 발전기 속도가 오차에 대한 추정 민감도가 적다는 것을 알 수 있다.

제안하는 추정기를 통해 풍력터빈이 실시간으로 MPPT 운전점을 추정할 수 있다면, 계통에 공급하는 유효전력을 효율적으로 제어하기 위한 지표로 사용될 수 있으며, 또한, 계통주파수 지원과 관련된 그리드코드 규정 준수 및 보조서비스의 금액 정산에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 20223030020110, 전력망 안정성 확보를 위한 MW급 풍력터빈 합성 관성 기술 개발)

참고 문헌

- [1] *Wind energy generation systems - Part 27-1: Electrical simulation models - Generic models*, IEC, July, 2020
- [2] 김정재, 송승호, “영구자석형 동기기에 의한 가변속 풍력발전 시스템의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델 개발”, 전력전자학회 논문지, 제10권, 제6호, pp. 610-617, 2005. 12.