

풍력단지 제어를 위한 생산가능 출력에 대한 연구

Study on the Available Power of a Wind Turbine for Wind Farm Control

오용운* · 백인수*† · 남윤수* · 라요한*

Yong Oon Oh*, In Su Paek*† Yoon Su Nam* and Yo Han La

(Submit date : 2013. 12. 16., Judgment date : 2013. 12. 18., Publication decide date : 2014. 2. 18.)

Abstract : A study on the available power of a wind turbine to be used for wind farm control was performed in this study, To accurately estimate the available power it is important to obtain a suitable wind which represents the three dimensional wind that the wind turbine rotor faces and also used to calculate the power. For this, two different models, the equivalent wind and the wind speed estimator were constructed and used for dynamic simulation using matlab simulink. From the comparison of the simulation result with that from a commercial code based on multi-body dynamics, it was found that using the hub height wind to estimate available power from a turbine results in high frequency components in the power prediction which is, in reality, filtered out by the rotor inertia. It was also found that the wind speed estimator yielded less error than the equivalent wind when compared with the result from the commercial code.

Key Words : 풍력 단지 제어기(Wind farm controller), 계통운영자(Transmission System Operator), 생산가능 출력(Available power), 등가 풍속(Equivalent wind), 바람 추정(Wind estimation)

기 호 설 명

$P_{available}^{WF}$: 풍력 단지 전체 생산 가능 출력
 $P_{available}^{WT_1}$: 첫 번째 풍력 터빈의 생산 가능 출력
 P_{ref}^{WFC} : 계통 운영자에 의한 풍력 단지 출력
지령

$P_{ref}^{WT_1}$: 풍력 단지 제어에 의한
첫 번째 풍력 터빈의 출력 지령
 ρ : 공기 밀도 [kg/m^3]
 R : 로터 회전 반경 [m]
 v : 풍속 [m/s^2]
 C_Q : 토크 계수 [.]

*† 백인수(교신저자) : 강원대학교 기계메카트로닉스 공학과
E-mail : paek@kangwon.ac.kr, Tel : 033-252-6371
*오용운, *남윤수, *라요한 : 강원대학교 기계메카트로닉스
공학과

*† In Su Paek(corresponding author) : Department of Mechanical
and Mechatronics Engineering, Kangwon National University.
E-mail : paek@kangwon.ac.kr, Tel : 033-252-6371
*Yong Oon Oh, *Yoon Su Nam, *Yo Han La : Department
of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon
National University.

- T_a : 공력 토크 [Nm]
- J_r, J_g : 로터, 발전기 회전 관성 질량 [kgm²]
- N : 기어박스의 증속비
- Ω_r : 로터 회전 속도 [rpm]
- P_e : 전기적 출력 파워 [W]
- T_{loss} : 공력 손실 [Nm]

H_{SF} 필터 계수

- a : 0.55
- b : $\gamma R/\bar{v}$
- \bar{v} : 허브 높이에서의 평균 풍속
- γ : 감쇠 계수 (값이 커질수록, 차단 주파수 작아짐)

H_{NSF} 필터 계수

- ω_p : $2\pi \frac{3p}{60}$ [rad/s]
- p : 로터 회전 속도 [rpm]
- σ : 간섭효과 조절인자 (값이 커질수록, 타워 간섭효과가 작아짐)

1. 서 론

신재생 에너지에 대한 관심과 더불어 풍력 터빈에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 기존 연구는 개별 풍력터빈 제어에 대한 연구에 집중되어왔다면 최근에는 개별 풍력터빈이 모여 이루어진 대규모 풍력단지에 대한 제어에 관심이 커지고 있다. 풍력단지 제어는 출력 분배에 대한 연구와 후류 영향에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 풍력단지 제어기(Wind Farm Controller, WFC)는 계통 운영자(Transmission System Operator, TSO)와의 통신을 통해 이루어지며 계통 운영자로부터 제어 지령을 받아 개별풍력터빈 제어를 위한 지령을 결정한다. 풍력단지 제어기는 각 개별 풍력터빈이 생산 가능한 출력(Available Power)을 알고 있어야 하며 이로부터 개별풍력터빈의 출력 분

배량을 결정 할 수 있다. 본 연구는 기존에 연구된 풍력 단지 유효전력 제어 방법을 소개하고 이때 사용되는 생산 가능한 출력을 산출하는 방법에 대해 제시하였다.

2. 풍력단지의 유효전력 제어

풍력단지 제어기는 계통운영자의 임의의 유효전력 급전지시에 따라 정격 출력의 20~100% 범위 내에서 풍력터빈 또는 풍력발전 단지의 유효전력 출력을 조정할 수 있어야 한다. 대표적으로 출력 증발률 제한(Power gradient constraint), 최대 출력 제한(Absolute production constraint), 일정 출력 감소 운전(Delta production constraint) 규정이 있으며, 계통 운영자의 급전 지시에 따라 이 기준에서 요구하는 유효전력 출력 제어를 수행할 수 있도록 풍력터빈 또는 풍력발전 단지에 자동 및 원격 제어 설비를 갖추어야 한다. 그림 1은 위에서 언급한 세 가지 출력 제한 방법에 대한 그래프이다. 만약 제어 규정이 중복 적용되어야 하는 경우 계통 및 풍력 발전기 보호가 제일 우선 시되며 다음으로 위에 언급한 순서에 따라 유효

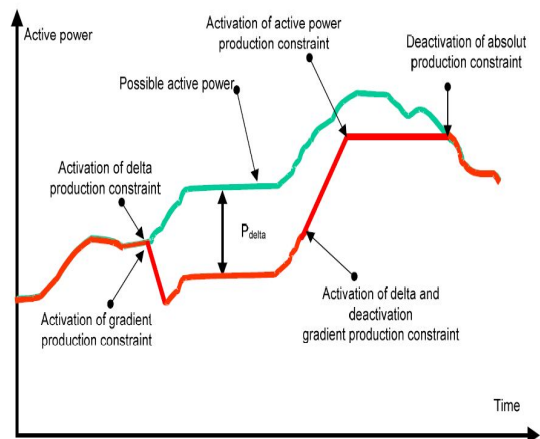


Fig. 1 Active power control

전력 출력 제어를 수행해야 한다. 풍력터빈의 증가로 대단위 풍력단지가 형성되면서 풍력 단지를 하나의 풍력발전소라 볼 수 있다. 즉, 계통 운영자는 각각의 풍력터빈에 직접적으로 지령을 내리는 것이 아닌 풍력단지 제어기에 지령을 내리게 되며, 풍력발전단지 제어기는 계통 운영자의 지령을 추종하기 위해, 개별 풍력터빈에 출력배분 지령을 내려 풍력단지를 통합적으로 제어하게 된다. 식(1)은 풍력단지 제어기가 풍력단지를 통합적으로 제어하기 위한 간단한 출력 배분 제어에 관한 식이다.

$$P_{ref}^{WT_1} = \frac{P_{available}^{WT_1}}{P_{available}^{WF}} P_{ref}^{WFC} \quad (1)$$

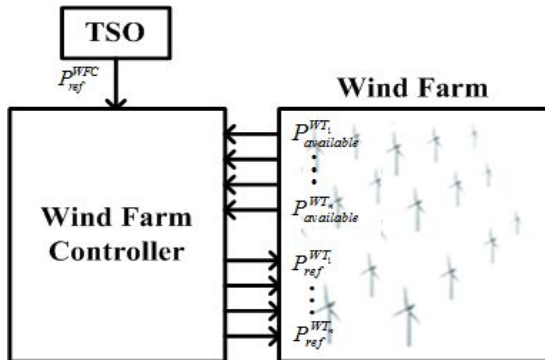


Fig. 2 Block diagram of wind farm dispatch control

식(2)는 풍력 단지 전체 생산 가능 출력에 대한 변수를 설명해 주는 식이다. 즉, 풍력단지 제어기에서 계산된 출력 지령은 각각의 풍력터빈으로 전달되어 지령에 따른 개별적인 제어가 이루어지게 된다. 그림 2는 앞서 설명한 출력 배분 방법을 블록으로 표현한 그림이다. 풍력단지로부터 생산 가능 출력을 받아 계통운영자가 내리는 출력 지령에 맞게 출력 배분을 통해 각 풍력터빈으로 지령이 전달되는 형태이다.

$$P_{available}^{WF} = \sum_{i=1}^n P_{available}^{WT_i} \quad (2)$$

3. 생산 가능 출력(Available Power)

각각의 풍력터빈은 출력 분배 제어를 위해 생산 가능 출력을 계산하여야 한다. 생산 가능 출력을 산출하기 위해서 그림 3과 같이 풍속-출력 곡선 그래프를 통해 룩업테이블(Look-up table) 형식으로 풍속에 맞는 해당 출력을 찾는 방법을 사용하였다.

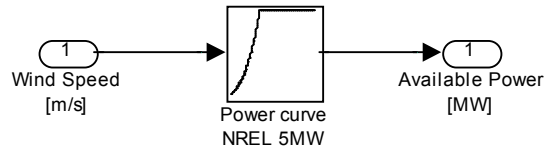


Fig. 3 Available power calculation algorithm

3.1 등가 풍속(Equivalent Wind)

바람에 의해 회전 날개에 생성되는 공력 토크는 동력전달축의 구동원이며, 풍력터빈 출력 파워에 직접적인 영향을 미친다. 아래 식(3)은 공력토크 T_a 에 관한 식이다.

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \left(\frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \right) v^2 = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_Q v^2 \quad (3)$$

풍력터빈 전용 설계/해석 소프트웨어를 사용하여 얻어진 공력 토크와의 오차를 최소화 하도록 선정된 단일 풍속을 등가 풍속 $v_{eq}(t)$ 이라 한다. 참고 문헌[3]에서 제시한 등가 풍속을 얻는 방법은 그림 4와 같다. 회전 로터가 회전 평면의 바람을 자르면서 생기는 공력 토크가 발생되는데, 이때 풍속에 존재하는 고주파수 성분들은 회전 로터에 의하여 필터링 된다. 이러한 현상을 허브 높이 풍속에 모사하기

위한 식(4)의 구조 필터(structural filter)를 사용하였으며, 3개 블레이드의 대칭 구조로 인한 공력 토크에 존재하는 3p 성분을 모사하기 위하여 식(5)의 3p 바람 샘플링 필터(rotational sampling filter)를 사용하게 된다. 두 필터를 사용하여 등가 풍속을 얻을 수 있으며 식(3)에 대입하여 공력 토크를 산출할 수 있다. 식(4)와 (5)의 필터 파라미터들은 GH Bladed와 같은 풍력터빈 전용 소프트웨어로부터 얻어진 공력 토크와의 편차를 최소화 하도록 튜닝 되어 진다.

$$H_{SF}(s) = \frac{\sqrt{2} + bs}{(\sqrt{2} + b\sqrt{a}s)(1 + bs/\sqrt{a})} \quad (4)$$

$$H_{RSF}(s) = \frac{\omega_p^2 + \sigma^2}{\omega_p^2} \frac{(s + \omega_p)^2}{(s + \sigma + j\omega_p)(s + \sigma - j\omega_p)} \quad (5)$$

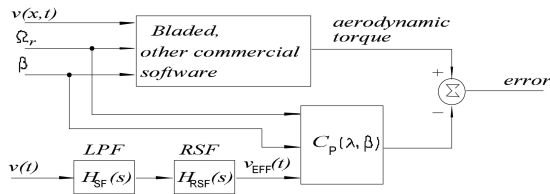
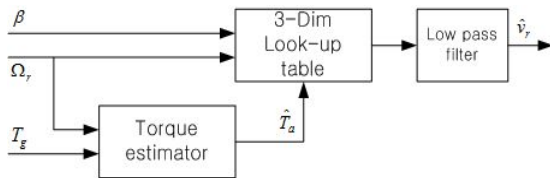


Fig. 4 Equivalent wind speed generation algorithm

3.2 풍속 추정기(Wind speed Estimator)

로터의 회전속도는 센서를 통해 측정할 수 있지만 풍속의 경우 풍력터빈에 설치된 풍속계(Anemometer)로 측정 시 정확한 풍속을 측정하기 어렵다. 풍속계의 설치 위치는 로터를



지나서 너셀(Nacelle) 끝단에 위치하게 된다.

이는 이미 로터를 지나간 바람을 뜻하므로 풍력터빈이 바람에너지를 흡수한 상태이며 후류에 의한 바람 강하가 일어난 상태이다. 그러므로 정확한 바람 측정이 아니므로 풍속을 추정할 수 있는 풍속 추정기가 필요하다. 그림 5는 풍속 추정기의 개략도를 보여주고 있다. 우선 공력토크가 추정되고, 3차원 룩업테이블을 이용하여 바람을 추정하는 구조로 되어 있다. 추정된 바람은 저역통과필터를 사용하여 고주파를 제거한다. 풍력터빈의 공력토크는 드라이브 트레인의 운동방정식으로부터 추정할 수 있다. 추정된 공력토크는 식(6)과 같다.

$$T_a = (J_r + J_g N^2) \frac{d\Omega_r}{dt} + \left(\frac{P_c}{\Omega_r} \right) + T_{loss} \quad (6)$$

풍력터빈으로 불어오는 풍속에 대한 추정은 공력토크의 관계식인 식(3)을 이용하여 추정할 수 있다. 여기서 C_Q 는 v, Ω_r, β 로 이루어진 함수이다. ρ, π, R 값은 풍력터빈 모델이 정해지면 상수 값이 되며, 로터의 회전 속도와 피치 각은 풍력터빈에서 측정될 수 있는 값이다. 만약, 공력토크의 추정이 제대로 이루어진다면 공력토크 T_a , 로터의 회전속도 Ω_r , 피치 각 β 3개의 변수들로 식(3)의 관계를 만족하는 풍속의 v 의 값을 추정할 수 있다. 하지만 토크계수 C_Q 의 값이 v, Ω_r, β 의 비선형 함수 이므로 식(3)을 사용하여 3개의 입력변수에 대한 풍속을 실시간으로 계산하는 것은 어려운 일이다. 따라서 실시간풍속 추정을 위해 오프라인 상에서 공력토크, 로터의 회전속도, 피치 각을 입력으로 하고 추정풍속을 출력으로 하는 3차원 룩업테이블을 구축하여 이를 사용한다. 3차원 룩업테이블을 구축하기 위해서는 식(7)을 이용하여 각 작동점마다 공력토크 값의 오차 T_a^{err} 가 최소가 되는 풍속 \hat{v} 를 계산한다. 식(7)의 반복적인

계산 과정을 통해 실시간 풍속추정을 위한 3차원 룩업테이블을 완성할 수 있다.

$$T_a^{err} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_Q(\hat{v}, \Omega_{r0}, \beta_0) \hat{v}^2 - T_{a0} \quad (7)$$

4. 시뮬레이션

대상 풍력터빈은 NREL 5MW이며 GH Bladed를 이용하여 평균 풍속 12m/s, 난류 강도 19.5%의 조건으로 600초 시뮬레이션 하였다. 그림 6은 허브 높이의 풍속, 허브 높이의 풍속을 사용한 등가풍속, 추정된 풍속을 나타내고 있다. 풍속 추정의 경우 그림 7의 첫 번째 창의 스텝 출력 명령에 따라 계산되는 로터의 회전속도, 피치 각, 발전기 토크를 사용하였다. 즉, 풍력터빈에 요구되는 풍력지령이 변화하여도 풍속 추정을 문제없이 수행함을 뜻한다. 3개의 풍속을 비교하면 등가 풍속은 허브 높이 풍속의 3p 성분만 존재하며 추정된 풍속은 허브 높이 풍속의 저주파수 파형대로 따라감을 알 수 있다. 그림 7은 전기적 출력과 허브 높이 풍속, 등가 풍속, 추정된 풍속의 생산가능 출력에 대한 그래프이다. 그림 7의 첫 번째 창의 경우 5MW로 최대 출력을 항상 하도록 지령이 들어왔을 때의 풍력터빈의 출력과, 0~100초 사이까지는 5MW, 100~200초는 4MW, 200~300초는 2MW, 300~400초는 4MW, 400~500초는 5MW로 출력하도록 지령이 들어올 때의 풍력터빈의 출력을 나타낸다. 그림 7에서 알 수 있듯이, 출력 지령에 비해 바람에서 추출할 수 있는 풍력터빈의 출력이 낮은 경우는 지령에 못 미치게 발전을 하게 된다. 그림 7의 두 번째에서 4번째 창은 각각 허브 높이의 풍속, 등가풍속, 추정된 풍속을 이용한 생산가능 출력의 계산 결과를 나타낸다. 그림 7에서 알 수 있듯이, 생산 가능 출력은 동일

한 바람에 대해서는 풍력터빈에 내려지는 출력 지령이 바뀌어 풍력터빈의 작동상태가 변한다고 하더라도 영향을 받지 않고 동일한 생산가능 출력을 계산하여야 한다. 즉, 첫 번째 창과 같이 동일한 바람에 대해 5MW(최대출력) 지령이나 정격보다 낮은 스텝 출력 지령이 들어오더라도 항상 동일한 출력을 예측할 수 있어야 한다.

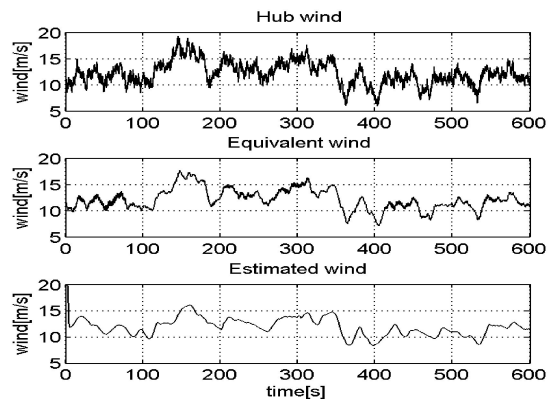


Fig. 6 Comparison of wind speed

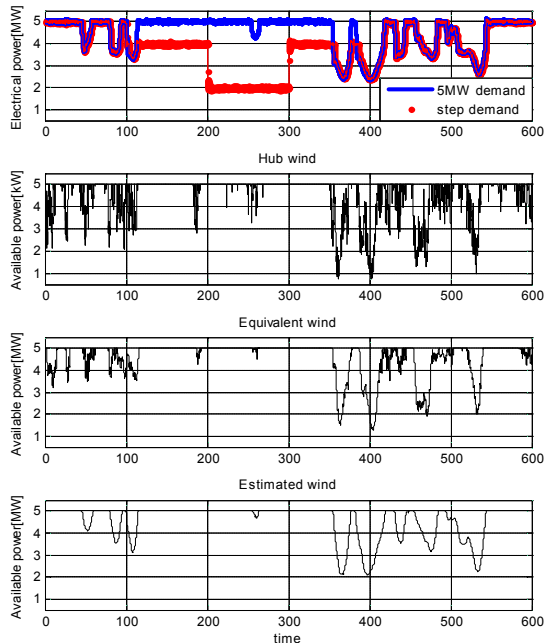


Fig. 7 Electrical power and comparison of available power

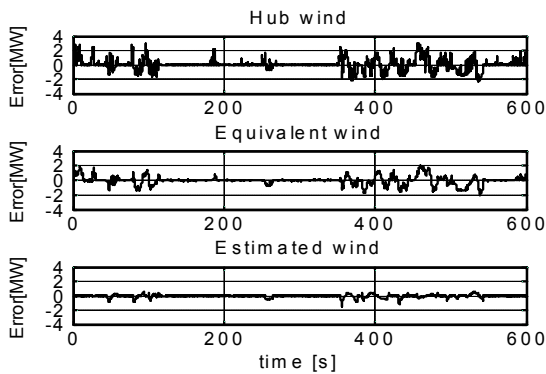


Fig. 8 Error of available power

그림 6에 제시된 세 가지 다른 풍속을 이용하여 계산한 생산가능 출력을 비교하여 보면, 허브 높이 풍속을 이용한 경우 생산가능 출력 예측결과에 상당히 고주파수 성분이 존재함을 알 수 있으며 그에 반해 등가 풍속이나 추정된 풍속은 상대적으로 고주파수 성분이 제거된 결과를 얻었다. 실제 풍력터빈의 출력은 그림 7의 첫 번째 창이나, 등가풍속, 추정된 풍속을 이용한 생산가능 출력 예측과 같이 로터의 질량관성에 의해 고주파 성분이 제거된 것과 유사한 결과를 보여주게 된다. 그림 8은 그림 7의 첫 번째 창에 제시된 5MW (최대출력) 지령에 의해 풍력터빈이 생산해낸 출력과, 세 가지 다른 풍속을 이용하여 계산한 생산가능 출력의 오차를 보여주고 있다. 표 1은 그림 8의 출력 차이에 대한 평균과 표준편차를 보여준다. 그림 8과 표 1에서 제시된 바와 같이, 세 가지 풍속을 이용한 생산가능 출력 예측결과 중 추정된 풍속을 이용한 결과가 GH Bladed 시뮬레이션에서의 풍력터빈의 출력 예측 결과와 가장 유사한 것을 확인 할 수 있다.

Table. 1 Simulation result

	평균	표준편차
허브 높이 풍속	0.0234	0.7556
등가 풍속	-0.0431	0.5721
추정된 풍속	-0.0362	0.2018

5. 결 론

풍력터빈의 증가로 대단위 풍력단지가 형성되면서 계통 운영자는 각각의 풍력터빈에 직접적으로 지령을 주는 것이 아닌 통합 제어시스템의 형태로 출력 배분 제어를 해야 한다. 풍력단지 제어기는 각 개별 풍력터빈이 생산 가능한 출력을 알고 있어야 하며 이로부터 개별 풍력터빈의 출력 분배량을 결정할 수 있다. 본 연구는 기존에 연구된 풍력단지 유효 전력 제어 방법을 소개하고 생산 가능한 출력을 구하는 두 가지 방법을 제시 하였다. 허브 높이 바람, 등가풍속, 추정된 풍속을 이용하여 구한 생산 가능 출력을 비교한 결과, 허브 높이 풍속의 경우 고주파수 성분을 포함하여 실제와는 다른 결과를 갖는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 5MW 지령에 따른 GH Bladed 시뮬레이션 출력 파워와 각각의 생산가능 출력과의 차이를 비교한 결과, 추정된 바람을 이용한 결과가 가장 근사한 결과를 가지는 것을 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양 청정에너지 개발 사업 “10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전 시스템 개발 및 인프라 구축”의 지원으로 수행 되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Sørensen, P., A. D. Hansen, F. Iov, F. Blaabjerg and M. H. Donovan. Wind farm models and control strategies. Risø-R-1464(EN), 2005.
2. Ultra E., Wind turbines connected to grids with voltages above 100kV, Regulation document TF 3.2.5, 2004.

3. T.Petru and T.Thiringer, Modeling of wind turbines for power system studies, IEEE Trans. On power systems, Vol.17, No.4, 2002.
4. Nam, Y.S., Wind Turbine System Control, GS intervision, pp.89~108, 2013.
5. van der Hooft E.L., van Engelen T.G., Feed forward control of estimated wind speed, ECN-C-03-137, ECN, 2003.
6. Yoonsu Nam, Jeonggi Kim, Insu Paek, Young-Hwan Moon, Seog-Joo Kim and Dong-Joon Kim, Feedforward Pitch Control Using Wind Speed Estimation, Journal of Power Electronics, Vol.11, No.2, 2011.