

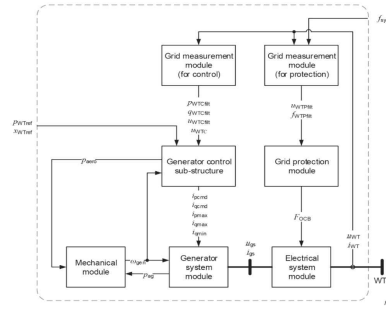
풍력터빈의 기계 및 공기역학적 특성에 의한 풍력 단지의 유효전력 변동성 분석

김예찬*, 조민준*, 송승호*
 광운대학교*

Analysis of Active Power Variability for Wind Farm due to Mechanical and Aerodynamic Characteristics of Wind Turbines

Ye-Chan Kim*, Jo Minjun*, Seung-Ho Song*
 Kwangwoon University*

Abstract - 본 연구는 풍력터빈의 기계 및 공기역학적 특성을 고려한 공기역학 모듈 (Aerodynamics module)을 모의하고, 이를 IEC 표준의 Type 4B 풍력터빈 시스템과 결합하는 방법을 제안한다. 공기역학 모듈은 입력받은 허브 풍속에 바람 전단 및 타워 간섭 효과를 적용하여, 터빈 회전면적에 대한 회전자 등가 풍속 및 블레이드 공력을 출력한다. 공기역학 모듈은 Type 4B 풍력터빈의 기계 모듈(Mechanical module)과 결합되어 현실적인 유효전력 및 회전속도의 변동을 구현한다. 제안된 Type 4B 풍력터빈 모델은 Matlab/Simulink 시뮬레이션에서 구현되며, 동일한 허브 풍속 조건에서 각각의 공기역학적 효과가 풍력 단지의 유효전력 변동에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다.



〈그림 1〉 Type 4B 풍력터빈 모델의 모듈형 구조

1. 서 론

전세계적으로 풍력발전의 설비용량은 매년 증가하고 있으며, 전력계통에 풍력터빈이 미치는 영향 또한 높아지고 있다. 따라서 국제 전기기술 위원회(International Electro-technical Commission, IEC)에서는 다양한 유형과 정격의 풍력터빈 모델이 대규모 전력계통 시뮬레이션과 호환될 수 있도록, 풍력터빈에 대한 표준 RMS(Root Mean Square) 시뮬레이션 모델 및 관련 규정을 공표하였다.

IEC 61400-27-1^[1]은 Type 별 풍력터빈의 표준화 모델을 제시하며, 그중 전체 용량의 전력변환장치를 사용하며 기계 모듈을 포함하는 최신 풍력터빈 모델은 Type 4B로 정의한다. Type 4B의 단순화된 공기역학 및 유효전력 제어 모듈은 전반적인 계통 안정성 분석에 걸리는 시간을 단축할 수 있는 장점이 있다. 그러나 현실점에서 풍력발전 수용률이 수 십% 이상 증가하게 되면서, 터빈 자체의 기계 및 공기역학적 특성에 의한 유효전력 변동이 계통 안정성에 지대한 영향을 미치고 있다. 따라서 전력계통에 풍력터빈이 미치는 영향을 정확히 분석하기 위해서는, 더욱 구체적인 공기역학 모듈이 구현되어야 한다.

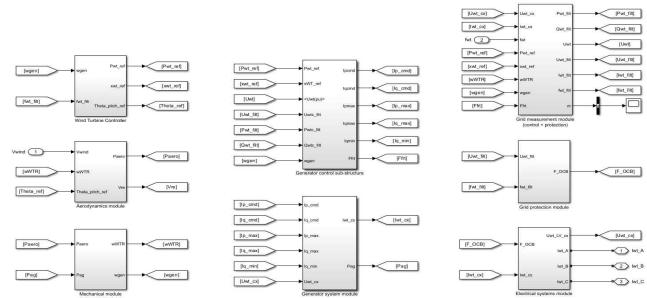
본 논문에서는 블레이드, 타워의 터빈 기계 구조물과 바람 간의 상호작용을 고려한 공기역학 모듈을 기존의 Type 4B 표준 모델과 결합하여, 더욱 구체적인 풍력터빈 모델을 제안한다. 블레이드의 회전에 의한 높이 변화로 발생하는 바람 전단 효과, 블레이드가 타워를 지나가면서 발생하는 타워 그림자 효과가 공기역학 모듈에 적용된다. 이러한 공기역학적 효과를 통해 허브 풍속은 블레이드 회전면적 전체에서 등가화된 회전자 등가 풍속으로 변경되어, 현실적인 풍력터빈의 유효전력 변동을 구현할 수 있다.

Matlab/Simulink 시뮬레이션에서 구현된 제안하는 풍력터빈 모델은 풍력 단지를 구성하며, 각 공기역학적 효과가 계통에 공급되는 유효전력에 어떠한 영향을 미치는지 분석된다. 풍력 단지를 구성하는 3개의 풍력터빈에는 동일한 평균 풍속과 난류 강도를 가지는 별도의 허브 풍속이 입력된다.

2. 본 론

2.1 Type 4B 풍력터빈

2.1.1 IEC 61400-21-1 Type 4B 풍력터빈 모델^[1]



〈그림 2〉 제안하는 Type 4B 풍력터빈 시뮬레이션 모델

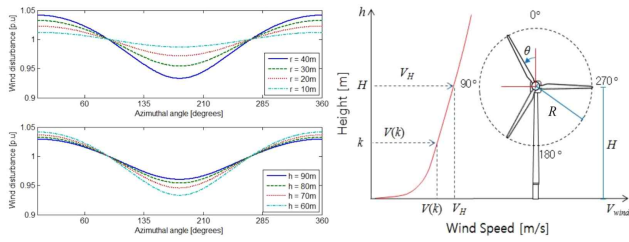
그림 1은 IEC 61400-27-1에서 규정하는 Type 4B 풍력터빈 모델의 모듈형 구조를 보여준다. 그림 1의 좌측부터 Mechanical module(기계 모듈), Grid measurement module(계통 측정 모듈), Generator control sub-structure module(발전기 제어 하위구조 모듈), Generator system module(발전기 시스템 모듈), Grid protection module(계통 보호 모듈), Electrical system module(전기 시스템 모듈)로 구성되어 있다.

그림 1과 같이 별도의 공기역학 모듈을 제시하지 않으며, 풍력터빈 외부의 상위 제어기로부터 유효전력 지령 p_{WTref} 와 무효전력 또는 전압 지령 x_{WTref} 을 입력받는다. 기계 모듈은 블레이드와 발전기의 2 질량 시스템으로 구성되며, 공기역학 모듈의 기계 출력 p_{aero} 는 p_{WTref} 로 대체되어 기계 모듈에 입력된다. 즉, 일정한 회전속도를 유지하면서 축 비틀림에 의한 유효전력 진동을 모의했음을 알 수 있다.

2.1.2 제안하는 Type 4B 풍력터빈 모델

그림 2는 제안하는 풍력터빈 모델의 Matlab/Simulink 모델을 보여준다. 해당 모델은 후술할 공기역학 모듈과 별도의 풍력터빈 제어기가 추가되었으며, 전기 시스템 모듈의 출력 전압·전류가 정현파인 EMT 모델이다.^[2] 기본적인 공기역학 모듈은 식 (1)에 의해 p_{aero} 를 출력한다. 여기서 ρ 는 공기밀도, R 는 블레이드 길이, C_p 는 블레이드 효율, V_{RE} 는 회전자 등가 풍속이다.

$$p_{aero} = 0.5\rho\pi RC_p V_{RE}^3 \tag{1}$$



〈그림 3〉 블레이드 길이와 허브 높이에 의한 바람 전단

2.2 풍력터빈의 공기역학적 효과^[3]

2.2.1 바람 전단 효과

그림 3의 우측은 고도가 증가함에 따라 블레이드 등가 풍속 V_{BEws} 가 어떻게 변화하는지 보여준다. 바람 전단(Wind Shear)은 고도가 높아질수록 풍속이 지수적으로 증가하는 현상을 설명하는 효과로써, 지면과 가까울수록 공기밀도와 지표면 마찰이 증가하기 때문에 발생한다.

블레이드가 수직 상방에 위치하는 0°에서는 블레이드 중심점 높이가 허브 높이보다 높으므로, 그림 3의 좌측 파형과 같이 블레이드 등가 풍속은 최고점에 있으며 허브 풍속보다 높은 것을 볼 수 있다. 이후 블레이드가 수직 하방인 180°까지 회전하면서 블레이드 중심점 높이가 감소하므로, 블레이드 등가 풍속은 점진적으로 감소하여 최저점에 도달하게 된다.

고도가 높을수록 지수적으로 증가하는 풍속 특성으로 인해, 허브 높이가 높을수록 그림 3의 우측과 같이 풍속의 기울기가 급격해진다. 한편, 블레이드 길이가 길수록 블레이드 중심점 높이의 변화가 증가한다. 이러한 특징으로 인해 허브 높이와 블레이드 길이가 증가할수록, 그림 3의 좌측 파형과 같이 블레이드의 한 회전 동안, 등가 풍속의 진폭이 증가한다. 따라서 바람 전단에 의한 단일 블레이드 등가 풍속을 간략화하여 표현하면 식 (2)와 같다. 식 (3)은 바람 전단에 따른 회전자 등가 풍속 V_{REws} 을 표현한다.

$$V_{BEws} = V_H \left(\frac{R \cos \theta + H}{H} \right)^\alpha \quad (2)$$

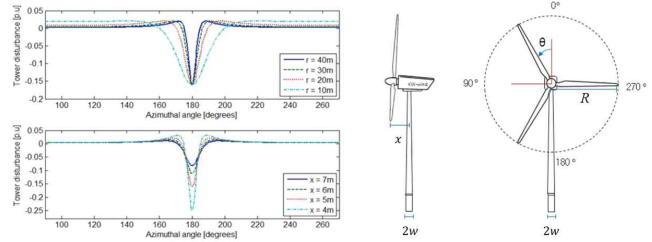
$$V_{REws} = \frac{V_{BEws1} + V_{BEws2} + V_{BEws3}}{3} \quad (3)$$

식 (2)에서 V_H 는 허브 풍속, H 는 허브 높이, θ 는 블레이드 회전각도, α 는 경험적 바람 전단 지수이다. 아래의 표 1은 지형에 따른 경험적 바람 전단 지수를 나타낸다. 식 (3)에서 V_{BEws1} , V_{BEws2} , V_{BEws3} 은 각각 바람 전단에 의한 블레이드 등가 풍속을 나타낸다.

그림 3 좌측 파형과 같이 V_{REws} 에는 터빈 회전속도 3P 주파수 성분이 포함되는데, 이는 식 (3)에서 각 블레이드가 120°의 각도 차를 두고 회전하기 때문이다. 더욱이 V_{REws} 의 한 주기 평균은 V_H 보다 낮은 값을 가지는데, 이는 블레이드가 270°→90°으로 회전할 경우의 V_{BEws} 증가량보다, 90°→270°으로 회전할 경우의 V_{BEws} 감소량이 크기 때문이다.

〈표 1〉 지형에 따른 경험적 바람 전단 지수

지형	α
평평한 지면, 호수 또는 바다	0.10
평평하고 잔디로 덮인 지면	0.14
나무가 적으며 높은 작물 또는 낮은 덩굴이 있는 지면	0.20
나무가 많거나 적은 건물이 존재하는 지면	0.24



〈그림 4〉 블레이드 길이 및 타워 간의 거리에 의한 타워 그림자

2.2.2 타워 그림자 효과

타워가 존재하는 수직 하방을 블레이드가 가로지르면 타워 앞의 바람이 재배향되어 블레이드 등가 풍속 V_{BEts} 가 변화하게 되는데, 이러한 공기역학적 변화를 타워 그림자 효과(Tower Shadow)라고 한다. 타워 지름에 해당하는 영역은 타워 구조물에 의해 바람을 가로막으며, 바람의 흐름 타워 주위로 흩뜨려 놓는다. 따라서 그림 4의 좌측 파형과 같이 타워에 근접할수록 V_{BEts} 가 소폭 증가하다, 타워 지름 영역에 진입하면 V_{BEts} 는 대폭 감소하게 된다.

위와 같은 풍력터빈의 기계·공기역학적 특성으로 인해 타워 지름이 길수록 타워 그림자 효과가 더욱 길고 강하게 발생한다. 반대로 블레이드 끝단과 타워 간의 거리가 클수록 그림 4 좌측 파형과 같이 타워 그림자 효과는 약화된다. 한편, 풍력터빈의 타워는 지면에서부터 허브까지 고도가 증가할수록 점진적으로 얇아진다. 따라서 블레이드 길이가 길수록 블레이드 끝단은 지면과 가까워지므로 타워 지름이 증가하는 효과를 보인다. 이러한 타워 그림자 효과에 따른 단일 블레이드 등가 풍속을 간략화하여 표현하면 식 (4)와 같다. 식 (5)는 타워 그림자 효과에 따른 회전자 등가 풍속 V_{REts} 을 표현한다.

$$V_{BEts} = V_H \frac{w^2(R^2 \sin^2 \theta - x^2)}{(R^2 \sin^2 \theta + x^2)^2} \quad (4)$$

$$V_{REts} = \frac{V_{BEts1} + V_{BEts2} + V_{BEts3}}{3} \quad (5)$$

식 (4)에서 w 는 타워 반지름, x 는 블레이드 끝단과 타워 간의 거리이다. 아래의 표 1은 지형에 따른 경험적 바람 전단 지수를 나타낸다. 식 (5)에서 V_{BEts1} , V_{BEts2} , V_{BEts3} 은 각각 타워 그림자 효과에 의한 블레이드 등가 풍속을 나타낸다.

바람 전단과 마찬가지로 타워 그림자 효과 또한 단일 블레이드가 유발하므로 3P 주파수 성분 및 터빈 회전속도의 3배수 고조파 성분이 V_{REts} 에 포함된다. 반면 바람 전단과 달리, 타워 그림자에 의한 V_{REts} 의 평균값 감소는 미미하다.

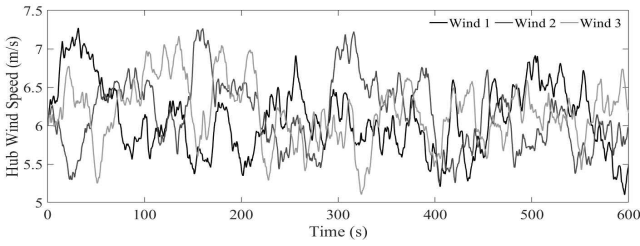
2.3 풍력 단지 시뮬레이션

2.3.1 시뮬레이션 조건

앞선 공기역학적 효과들이 각각 계통에 공급되는 유효전력에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 유니슨 U151 4.3MW 육상풍력터빈 모델을 기반으로 표 2의 파라미터를 가지는 Type 4B 풍력터빈을 구현하였다. 풍력 단지 모델은 3대의 풍력터빈으로 구성하였다. 터빈 수량을 적게 설정한 이유는 풍력 단지에 대한 각 풍력터빈의 영향을 증가시켜, 바람 전단과 타워 그림자 효과에 의한 유효전력 변동을 파악하기 쉽게 하기 위함이다.

그림 5는 3대의 풍력터빈에 개별적으로 입력될 허브 풍속의 파형을 나타낸다. 동일한 풍력 단지 내의 풍속임을 고려하여, 각각의 허브 풍속은 평균 6, 난류 강도 16%의 동일한 정보를 가지지만 시계열에 따라 독립적으로 변화하도록 구현하였다.^[4]

시뮬레이션에서는 풍력터빈에 적용된 공기역학 모듈만이 다른 동일한 풍속 조건과 풍력 단지 3개가 구성된다. 그림 6과 같이 유효전력 결과 파형에서 바람 전단 효과가 적용된 풍력 단지는 적색, 타워 그림자 효과가 적용된 풍력 단지는 청색, 아무 효과도 적용되지 않은 풍력 단지는 녹색 실선으로 나타난다.



〈그림 5〉 허브 풍속 프로파일

〈표 2〉 풍력터빈 파라미터

명칭	기호	값	단위
블레이드 길이	R	75.5	m
허브 높이	H	125	m
경험적 바람 전단 지수	α	0.2	-
타워 반지름	w	3	m
블레이드 끝단과 타워 간의 거리	x	8	m

2.3.2 시뮬레이션 결과 분석

그림 6은 Type 4B 풍력터빈에 적용된 각각의 공기역학 모델에 따른 풍력터빈과 단지의 10분 유효전력 결과 파형을 나타낸다. 그림 6(a)는 상단에서부터 풍력 단지를 구성하는 각각의 풍력터빈 1, 2, 3의 유효전력을 p.u. 단위로 나타낸 결과이며, 그림 6(b)는 3대의 풍력터빈 출력이 합산된 풍력 단지의 유효전력을 p.u. 단위로 나타낸 결과와 이에 대한 확대 파형이다.

그림 5의 풍속 1이 입력된 풍력터빈 1의 유효전력은 입력된 풍속 1에 지역 통과 필터를 거쳐 고주파 성분을 제거한 형상과 유사하다. 이는 풍력터빈 2, 3도 마찬가지이며, 적용된 공기역학 모델과 관계없이 유효전력은 입력된 허브 풍속의 변화 추세를 추종하는 것을 그림 6(a)를 통해 확인할 수 있다.

그림 6(a)의 적색 실선은 평균적으로 녹색 실선 대비 약 5% 감소하였는데, 2.2장에서 설명과 같이 바람 전단의 회전자 등가 풍속이 허브 풍속 대비 약 1~2% 감소하였기 때문이다. 반면 청색 실선은 녹색 실선과 거의 동일하게 변화하는데, 타워 그림자 효과의 회전자 등가 풍속은 허브 풍속과 거의 동일하기 때문이다. 또한, 회전속도 3배수 고조파 성분은 풍력터빈의 관성에 의해 억제되기 때문에 그림 6(a)의 유효전력 파형에는 거의 나타나지 않는다.

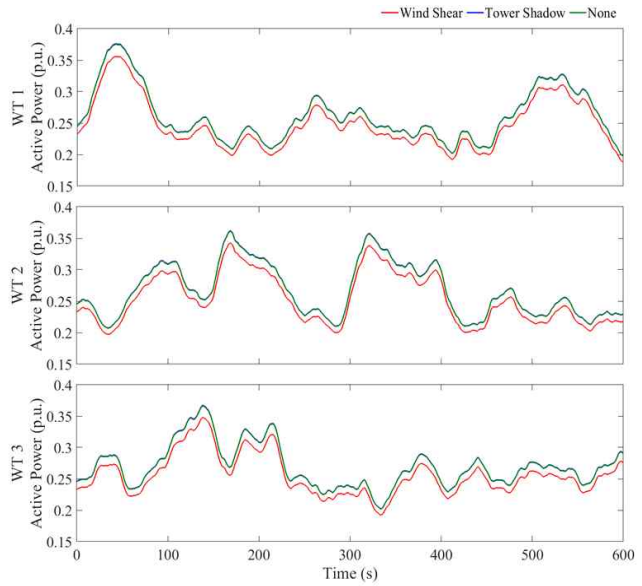
그림 6(b)의 풍력 단지는 개별 풍력터빈보다 적은 유효전력 변동성을 보인다. 풍력 단지는 각 풍력터빈의 유효전력을 합산하므로 자연스럽게 유효전력을 완화(smoothing)하며, 단지를 구성하는 풍력터빈의 수량이 증가할수록 유효전력에 대한 스무딩 효과는 강화된다.

그림 6(a)와 유사하게 그림 6(b)의 적색 실선은 평균적으로 녹색 실선 대비 약 5% 감소하였으며, 청색 실선은 거의 감소하지 않았다. 그러나 확대 파형에서 청색 실선은 녹색 실선에 수 Hz 대역의 여러 변동 성분을 포함하고 있음을 확인할 수 있다. 적색 실선 또한, 회전속도 3P 성분의 변동 성분을 포함하고 있다. 풍력 단지에 미치는 영향을 정리하면 바람 전단 효과는 유의미한 유효전력 감소를 야기하며, 타워 그림자 효과는 수 Hz 성분 대역의 진동 성분을 유효전력에 추가한다.

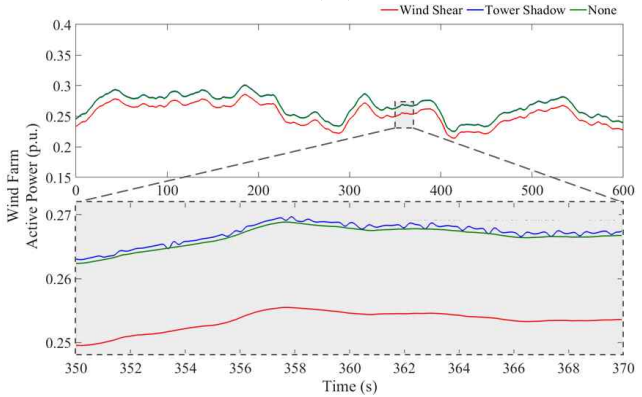
3. 결 론

본 논문에서는 풍력터빈의 기계·공기역학적 상호작용에 의한 대표적인 효과인 바람 전단과 타워 그림자 효과를 설명하였으며, 이를 공기역학 모델에 적용하여 IEC 표준의 Type 4B 풍력터빈 시스템과 결합하는 방법을 제안하였다. 또한, 시뮬레이션을 통해 현실적인 공기역학 모델이 풍력 단지의 유효전력 변동성에 미치는 영향을 분석하였다.

시뮬레이션 결과를 통해 풍력 단지 레벨에서 바람 전단 효과는 수 %의 유효전력 감소를, 타워 그림자 효과는 수 Hz 성분 대역의 진동 성분을 유효전력에 추가한다는 것을 확인하였다.



(a) 풍력터빈 1, 2, 3 유효전력



(b) 풍력 단지 유효전력(확대 파형)

〈그림 6〉 공기역학 모델에 적용된 효과에 따른 풍력터빈과 단지의 유효전력 결과

제안하는 풍력터빈 모델은 기존의 Type 4B 표준 모델을 계승하면서 보다 구체적인 풍력터빈의 공기역학 특성을 추가한 EMT 모델이다. 해당 모델을 통해 풍력발전 수용률이 높은 전력계통 시스템에서 계통의 안정도를 더욱 정밀히 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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, 2020. 7
- [2] 김정재, 송승호, "연구자석형 동기기에 의한 가변속 풍력발전 시스템의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델 개발", 전력전자학회 논문지, 제10권, 제6호, pp. 610-617, 2005. 12.
- [3] 유명수, 김수빈, 송승호, 최영도, 윤기갑, "풍력발전시스템의 터빈 구조에 의한 주기적인 출력변동 요소 연구", 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 262-264, 2015. 10.
- [4] 남윤수, 풍력터빈 시스템 제어, GS인터비전, 2013. 3.