동력시스템공학회지 제28권 제1호 pp. 62-69 2024년 2월 ISSN 2713-8429(Print) ISSN 2713-8437(Online) Journal of Power System Engineering https://doi.org/10.9726/kspse.2024.28.1.062 Vol. 28, No. 1, pp. 62-69, February 2024

# 나셀라이다 측정값을 이용한 윈드비어 방향에 따른 풍력발전기 출력변동 특성

## Characteristics of Wind Turbine Power Production Variation with Wind Veer Direction Using Nacelle Lidar measurements

## 투멘바야르 운다르마\* · 양경부\*\* · 고경남\*\*\* †

Undarmaa Tumenbayar\*, Kyoungboo Yang\*\* and Kyungnam Ko\*\*\*†

(Received 22 January 2024, Revision received 28 February 2024, Accepted 28 February 2024)

**초록**: 높이에 따른 풍향 변화, 즉, 윈드비어가 풍력발전기의 출력성능에 미치는 영향을 알아보기 위하 여, 본 연구에서는 제주도 북동쪽에 위치한 풍력발전단지의 2MW 풍력발전기 나셀 위에 설치된 나셀 라이다로 바람조건을 측정하였다. 풍력발전기의 출력을 SCADA 시스템에서 취득하였다. 나셀라이다 측정값의 정확도 검토는 나셀라이다와 기상탑의 허브높이 풍속을 비교하여 수행되었다. 윈드비어 발생 빈도와 허브높이에서의 바람 장미를 분석하였다. 윈드비어는 풍향이 높이에 따라 시계방항으로 변동하 는 비어링윈드 조건, 풍향이 높이에 따라 반시계방향으로 변동하는 백킹윈드 조건 그리고 높이에 따 라 풍향 변동이 거의 없는 노비어의 3가지 조건으로 구분하였다. 이 조건을 적용하여 풍력발전기의 출 력곡선을 산출하고 서로 비교되었다. 또한 노비어 조건을 기준으로 비어링윈드과 백킹윈드의 연간에너 지발전량의 상대오차를 산출하여 비교 분석하였다. 그 결과, 비어링윈드 조건에서 연간에너지발전량의 상대오차 값은 0.9%에서 4.5% 사이로 분석되었으며, 이는 풍력발전기의 출력이 증가함을 보여 준다. 반면 백킹윈드 조건의 상대오차 값은 -0.4%에서 -0.2% 사이로 풍력발전기의 출력이 감소함을 보였다.

키워드: 풍력에너지, 출력곡선, 연간에너지발전량, 나셀라이다, 윈드비어

Abstract : In order to find out the effect of the wind direction shift with height, wind veer, on wind turbine power performance, wind conditions using a nacelle lidar installed on a 2 MW wind turbine were measured at a wind farm located on the northeastern part of Jeju Island. The power outputs were collected from SCADA system of the turbine. The accuracy of the nacelle lidar measurements was checked by comparing the wind speeds from the nacelle lidar with those from a nearby met mast. Wind veer frequencies and wind rose at the hub height of the turbine were analyzed. The wind veer types were divided into three: veering wind which is clockwise wind direction change with height, backing wind meaning counterclockwise and no veer wind that is little wind direction change with height. The power curves were derived from dataset of the three types of wind veer, which were compared one another. Also, the relative error of annual energy

***†고경남(https://orcid.org/0000-002-0853-7094) : 교수, 제주	*** † Kyungnam Ko(https://orcid.org/0000-002-0853-7094) :		
대학교 전기에너지공학과	Professor, Department of Electrical and Energy Engineering, Jeju		
E-mail · gnkor2@ieiunu ac kr. Tel · 064-754-4401	National University.		
* Emilia A = 0 = 1 = 1 / (++++++) / (	E-mail : gnkor2@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-4401		
*우덴마아드 준다드미(nups://orcid.org/0000-003-4/30-5555) :	*Undarmaa Tumenbayar(https://orcid.org/0000-003-4736-5333):		
박사과정, 제주대학교 대학원 풍력특성화협동과정	Ph.D. Candidate, Multidisciplinary Graduate School Program for		
**양경부(https://orcid.org/0009-0008-5678-7072) : 연구위원,	Wind Energy, Graduate School, Jeju National University.		
블루이코노미저랴여구워	**Kyoungboo Yang(https://orcid.org/0009-0008-5678-7072) :		
2     2 2   0 - 0   0	Chief Researcher, Blue Economy Strategy Institute,		

production (AEP) was analyzed for veering and backing conditions using no veer condition as a reference. The findings revealed that the relative errors of the veering wind condition ranged between 0.9% and 4.5% which led to overperformance of the wind turbine, while backing wind condition had relative errors ranged from -0.4% to -0.2% which resulted in underperformance of the wind turbine.

Key Words: Wind Energy, Power Curve, AEP, Nacelle Lidar, Wind Veer

### 1. 서 론

원드비어(Wind veer)는 지상으로부터 높이에 따 른 바람의 풍향 변화를 정의한 것으로, 주로 마찰 력과 압력 구배 또는 코리올리스(Coriolis)힘의 균 형에 의해 발생한다. 윈드비어는 지상으로부터 높 이가 높아짐에 따라 풍향이 변동하는 방향을 기 준으로 비어링윈드(Veering wind)와 백킹윈드 (Backing wind)로 분류한다. 지구 북반구에서 풍향 이 높이에 따라 시계방향으로 변하는 현상을 비 어링윈드라 하고, 이는 주로 따뜻한 공기의 변화 와 관련하여 나타난다. 반면 풍향이 높이에 따라 반시계방향으로 변하는 현상이 백킹윈드이며, 이 는 일반적으로 찬 공기의 변화와 관련이 있다.<sup>1,2</sup>

최근 몇 년간 풍력발전과 관련한 연구를 살펴 보면 윈드비어의 특성,<sup>34)</sup> 윈드비어가 풍력발전기 출력에 미치는 영향<sup>5.6)</sup> 그리고 윈드비어에 의한 터빈 후류 변화<sup>7.8)</sup>로 분류해 볼 수 있다. 윈드비어 의 특성은 주야간 또는 계절 조건에 따라 달라질 수 있다. Shu et al.<sup>9)</sup>은 4년간의 라이다 측정 데이 터를 활용하여 바람 특성의 계절적 및 주야간 변 동에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과, 낮에 비하 여 밤에 나타나는 윈드비어의 값이 더 높은 것을 확인하였다.

현대의 대형 풍력터빈은 로터직경이 매우 커지 면서 특정 조건에서 터빈 로터에 상당히 큰 윈드 비어를 받을 수 있다. 이러한 경우 터빈의 허브 높이에서의 풍향은 로터 전체의 풍향을 대표하지 못하며, 이는 풍력발전기 뒤에 발생하는 후류에 영향을 미칠 수 있다. 풍력발전기 후류의 특성은 윈드비어를 고려했을 때 더 명확히 나타나며,<sup>10)</sup> Englberger et al.<sup>11)</sup>은 윈드비어의 각도는 풍력발전 기 로터를 통과한 후 감소하였음을 보였다. 풍력발전기 출력에 미치는 윈드비어의 영향에 관한 여러 연구가 수행되었는데, Wagner et al.<sup>12)</sup>은 이를 시뮬레이션하여 시계방향의 작은 윈드비어 는 풍력발전기의 출력을 증가시키는 반면, 반대방 향의 윈드비어는 출력을 감소시킴을 보였다. 또한 저녁에 비해 아침에 더 큰 윈드비어가 나타나는 것을 발견하였고,<sup>13)</sup> 큰 비어링윈드 각도는 작은 백킹윈드 각도보다 더 큰 풍력발전기 출력 감소 를 나타낸 반면, 작은 비어링윈드 각도는 풍력 발전기의 출력을 상승시킨다고 보고하였다.<sup>(4)</sup> Murphy et al.<sup>15)</sup>은 실험적 연구를 통해 비어링윈드 가 풍력발전기의 출력을 약 1.3% 상승시킨 반면, 백킹윈드는 약 0.7%의 출력이 감소함을 보여 주 었다.

이러한 기존 연구 사례들은 대부분 지상으로부 터 풍향의 변동을 측정하기 위해 높은 기상탑과 지상기반 라이다 시스템을 사용하였다. 여기서 기 상탑으로 측정된 바람데이터는 풍력자원평가<sup>16</sup> 시 에 가장 많이 사용된다. 라이다시스템은 레어저빔 을 공기중에 방사하여 공기 중에 떠다니는 에어 러졸 입자에 부딪치고 돌아오는 반사광을 분석하 여 풍속, 풍향 등을 측정한다. 이러한 라이다를 활 용한 출력성능평가<sup>17)</sup> 연구가 전 세계적으로 진행 중이며, 최근 한국에서도 꾸준히 연구되고 있다. 다양한 목적으로 개발된 라이다들 중, 지상기반 라이다는 지상으로 연직방향으로 보통 40 m에서 200 m의 높이까지 바람조건을 측정하는 반면, 나 셀라이다는 풍력발전기의 나셀 위에 설치되며 수 평방향으로 보통 50 m에서 400 m의 거리에서의 바람조건을 측정하는 장비이다.

윈드비어에 관한 논문들 중에 지상기반 라이다 로 진행된 연구가 다수 있지만, 나셀라이다를 이 용한 연구결과는 별로 없는 실정이다. 본 연구에 서는 나셀라이다로 측정된 풍속 및 윈드비어 데 이터를 분석하여 여러 윈드비어링 조건이 시험대 상 풍력발전기의 출력곡선 및 연간에너지발전량 (Annual Energy Production, AEP)에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 풍력발전기의 로터 직경에 작용하는 윈드비어 각도에 따라 3가지 윈드비어 링 유형을 정의하였고, 이에 따른 출력곡선을 상 호 비교하였다. 마지막으로 연간에너지발전량의 상대적 차이를 비교하고 검토하였다.

#### 2. 분석조건 및 측정장비

#### 2.1 동복 풍력발전단지

본 연구를 위한 데이터 측정은 제주도에 위치 한 동복 풍력발전단지에서 수행되었으며, Fig. 1에 동복 풍력발전단지의 위치 및 시험대상 풍력발전 기와 기상탑 그리고 나셀라이다의 측정영역을 나 타내었다. 동복 풍력발전단지의 시험대상 풍력발 전기는 풍력단지에서 가장 북쪽에 위치하고 있으 며, 기상탑은 대상 풍력발전기로부터 북쪽으로 약 220 m 떨어져 설치되어 있고, 나셀라이다는 시험 대상 풍력발전기의 나셀 위에 설치되어 있다. 시 험대상 풍력발전기에서 약 150 m 거리에는 지표 면보다 20 m 이상 깊게 굴착되어 있는 쓰레기매 립장이 존재하고 있는 복잡지형이다. 유효 측정방 위구간은 IEC 61400-12-1 Ed. 3<sup>18)</sup>에 제시된 다음 식을 이용하여 설정하였다.

$$\theta = 1.3 \arctan\left(2.5(2.5D/L + 0.15) + 10\right)$$
(1)

여기서, D은 풍력발전기의 로터 직경이고, L은 풍력발전기 간 이격거리이다. 식 (1)로부터 계산 된 시험대상 풍력발전기의 유효 측정방위구간은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 273~93°이다.

Fig. 2는 동복 풍력발전단지에 설치되어 있는 시험대상 풍력발전기와 기상탑, 나셀라이다를 보 여 주고 있다. 기상탑은 80 m 높이의 격자형 구조 (Lattice)이며, 나셀라이다는 Wind Iris 2nd ed.으로 풍력발전기의 나셀 위에 설치되어 있다. 풍력발전 기의 허브높이는 80 m이며, 로터 직경은 87 m이다.



Fig. 1 Location of the test instruments at the Dongbok wind farm



Fig. 2 Test wind turbine and test instruments

#### 2.2 측정장비

Table 1은 동복 풍력발전단지에 설치되어 있는 기상탑, 나셀라이다 및 시험 풍력발전기의 세부 사양을 나타낸다.

동복 풍력발전단지에 설치된 기상탑에는 풍속 계, 풍향계, 온도계, 습도계 및 대기압계가 설치되 어 있고, 풍속계와 풍향계는 측정 불확도가 가장 낮은 1등급 Thies 제품이다. 나셀라이다는 풍력발 전기 나셀 위에 설치되어 풍력발전기로부터 전방 50~400 m 거리 내 총 10개의 측정거리에서 1 Hz 샘플링 간격으로 풍속, 풍향 등을 계측한다. 풍력 발전기의 풍속, 풍향 및 출력 등의 신호는 풍력발 전기의 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) 시스템에서 취득된 10분 평균자료를

Category		Description		
Met mast	Cup anemometer	Thies first class advanced		
	Wind vane	Thies first class advanced		
	Thermometer	PT 100 CLA		
	Hygrometer	Potronic hygrometer		
	Barometer	P-GE 6/11		
Nacelle lidar	Model	Wind Iris 2nd ed		
	Measurement range	50~400 m		
	Data sampling rate	1 Hz		
	No. of measurement point	10		
	Analyzed measurement distance	240 m		
Wind turbine	Model	HJWT 2000		
	Rated power	2,000 kW		
	Hub height	80 m		
	Rotor diameter	87 m		
	Cut-in / Rated / Cut-out WS	3 / 12 / 25 m/s		
	SCADA system	Gateway		

Table 1 Specification of the measurement instruments and test wind turbine

사용하였다. 기상탑 및 나셀라이다의 데이터 측정 기간은 2018.10.2.~2019.4.10.이다.

## 3. 분석 방법

윈드비어는 기상탑 허브높이 근처에서 측정된 기온, 대기압, 상대습도로부터 공기밀도를 구한 다음 아래 수식으로 표준화하였다.

$$Windveer = \frac{\Delta WD}{\Delta Z} \ [deg./m]$$
 (2)

여기서, ΔWD은 풍력발전기 로터 단면의 풍향 각도 차이고 ΔZ은 높이 차이다. 측정된 출력 곡선은 0.5 m/s의 빈(bin) 방법을 적용하여 각 풍속 구간에 대해 풍속과 출력의 평 균값을 계산하여 산출하였다.

연간에너지발전량(AEP) 산출식은 다음과 같다.

$$\begin{split} AEP = N_{b} \sum_{i=0}^{\infty} \{ (F(V_{i}) - F(V_{i-1})) \} \left( \frac{P_{i-1} + P_{i}}{2} \right) \\ [MWh/y] \end{split} \tag{3}$$

여기서, Nb는 1년간 총시간이다. Vi는 i번째 빈 의 평균 풍속이고, Pi는 i번째 빈의 평균 출력이다. 기상탑과 나셀라이다 그리고 풍력발전기에서

적정된 데이터는 높은 신뢰성 확보를 위해 다음 조건에 해당하는 데이터를 제외하였다.

- 유효 측정방위구간 외의 데이터
- Data Availability가 80% 미만 데이터
- CNR가 -23 dB 미만 데이터
- 허브높이 풍속이 3 m/s 미만 데이터
- 기상탑, 나셀라이다 및 풍력발전기 에러 데
   이터

그 결과, 10분 평균 데이터로 총 6,997개(전체 취득데이터의 28.7%)의 유효 데이터를 사용하여 분석하였다.

#### 4. 분석 결과

#### 4.1 데이터 기초 분석

나셀라이다에서 측정된 데이터의 풍속 정확도 를 검토하기 위해 기상탑에서 측정된 데이터와의 상관관계를 검토하였다.





동력시스템공학회지 제28권 제1호, 2024년 2월 65



Fig. 4 Wind rose at hub height

Fig. 3은 나셀라이다의 풍력발전기 전방 240 m 거리에서 측정된 허브높이의 풍속과 기상탑의 80 m 높이에서 측정된 풍속 데이터와의 선형회귀 분 석 결과를 보여 주고 있다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 기상탑과 나셀라이다에서 측정된 풍속 간 결정계수(Coefficient of determination, R<sup>2</sup>)는 0.921 을 보이며 나셀라이다 측정 데이터가 기상탑 측 정데이터와 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 4는 기상탑에서 측정한 풍력발전기 허브높 이에서의 바람장미(Wind rose)를 보여 주는 것으 로 측정 높이에서 주풍향은 북서풍이다.

#### 4.2 윈드비어 분석

지상으로부터의 높이에 따른 풍향의 변화는 풍 력발전기 출력에 영향을 미칠 수 있다.

Fig. 5는 풍력발전기 로터 영역에서 발생하는 비어링윈드와 백킹윈드 현상을 묘사한 것으로, 비 어링윈드는 풍향이 높이에 따라 시계방향으로 변



Fig. 5 Wind veer definition

동하고 백킹윈드는 풍향이 높이에 따라 반시계방 향으로 변동한다.

본 연구에서는 윈드비어의 영향을 검토하기 위 해 로터 직경에서의 윈드비어링 조건을 3가지 유 형인 비어링윈드와 백킹윈드, 그리고 노비어(No veer) 조건으로 구분하였고, 노비어 조건은 풍향변 동 각도가 ±0.01 deg./m의 데이터로 정의하였다.

Fig. 6은 시험대상 풍력발전기에서 관측된 윈드 비어의 발생빈도를 나타낸다. 높이에 따라 시계방 향으로 회전하는 비어링윈드은 42.1%를 차지하 고 있으며, 높이에 따라 반시계방향으로 회전하는 백킹윈드는 총 데이터의 57.9%를 차지하고 있다. 측정 기간 동안 윈드비어 각도의 평균값은 -0.023 deg/m로 비어링윈드보다 백킹윈드의 발생이 더 많았다.

Fig. 7은 풍속에 따른 평균 윈드비어의 변화를 보여 준다. 풍속이 증가함에 따라 윈드비어의 값



Fig. 6 Wind veer frequency across the rotor diameter



Fig. 7 Wind veer variation with wind speeds

은 감소하고 있으며, 윈드비어의 변동은 낮은 풍 속에서 더 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 일 반적인 퐁력발전기의 시동풍속이 3~4 m/s임을 감 안하면 윈드비어 변동이 큰 3 m/s 이하는 무시될 수 있을 것으로 보이고, 정격풍속 이후인 약 12 m/s 이상에서는 큰 윈드비어가 발생하지 않았으 며, 4~11 m/s 운전범위에서 윈드비어의 영향을 받 을 것으로 판단된다.

#### 4.3 출력곡선

Fig. 8은 비어링 윈드 조건과 백킹윈드 조건 그 리고 노비어 조건에서의 풍력발전기의 출력곡선 변화를 보여 준다. 그림에서 에러바는 1×표준편 차(1o)를 나타낸다. 3가지 조건에서의 나셀라이 다 풍속을 이용하여 산출된 출력곡선들은 거의 유사한 결과를 보여 주고 있어 윈드비어에 의한 영향을 관찰하기 어렵다. 따라서 윈드비어의 영향 을 더 자세하게 살펴보기 위해 4.4 절에서 각 출 력곡선에 대한 연간에너지발전량을 분석하였다.



Fig. 8 Comparison of power curves for Veering, Backing and No-veer conditions

#### 4.4 연간에너지발전량

윈드비어의 영향을 검토하기 위해 산출한 각 출력곡선의 AEP는 특정 풍속분포인 레일리 (Rayleigh) 분포를 이용하여 연평균 풍속 4~11 m/s의 범위에서 IEC61400-12-1 Ed. 3 규정에 따 른 식 (3)으로 계산되었다. Table 2는 시험대상 풍 력발전기의 각 연평균 풍속에서의 비어링윈드, 백

Table 2 Calculated AEP for wind veer conditions

Types	AEP [GWh/y]				
	Min	1/4Q	Median	3/4Q	Max
Veering	1.70	4.31	7.04	9.29	10.83
No veer	1.63	4.24	6.97	9.21	10.73
Backing	1.62	4.23	6.96	9.19	10.71

킹윈드와 노비어 조건에 대한 AEP를 다섯숫자요 약으로 보여 주고 있다. 그 결과, 산출된 AEP는 1.62~10.83 GWh/y로 계산되었다. 전체적으로 백킹 윈드 조건의 중앙값이 가장 작았고 비어링윈드 조건이 가장 높은 중앙값을 보이고 있다. 또한 비 어링윈드 조건에서 도출된 AEP는 모든 연평균 풍 속 범위에서 높은 값을 가지고 있어 노비어 조건 의 AEP 대비 풍력발전기의 출력이 상승하는 것으 로 나타났다. 반면, 백킹윈드 조건의 연간에너지 발전량은 노비어 조건보다 낮은 값을 보이고 있어 풍력발전기의 출력이 감소하는 것으로 판단된다.

3가지의 윈드비어링 조건에 따라 도출된 출력 의 상대적 차이를 검토하기 위해 연간에너지발전 량의 상대오차를 계산하였다. 상대오차는 다음 식 (4)를 이용하여 계산하였다.

$$Relative error = \frac{AEP_{each\ type} - AEP_{noveer}}{AEP_{noveer}} \times 100[\%]$$
(4)

여기서, *AEP*<sub>each</sub> <sub>type</sub>는 각 비어링 조건의 연간에 너지발전량이고, *AEP*<sub>no</sub> veer는 노비어 조건의 연간 에너지발전량이다.

Fig. 9는 윈드비어 조건별 산출된 AEP의 상대 오차를 보여 주는 것으로 연평균 풍속이 높아질 수록 상대오차는 감소함을 알 수 있다. 비어링윈 드와 백킹윈드의 평균 상대오차는 각각 1.63%와 -0.23%로 백킹윈드보다 비어링윈드의 연간에너지 발전량의 상대오차가 높게 나타나고 있다. 비어링 윈드 조건의 AEP 상대오차 값은 0.9%에서 4.5% 를 보이고 있는데, 이는 풍력발전기의 출력이 상 승하였음을 의미한다. 반면 백킹윈드 조건의 상대 오차 값은 -0.2%에서 -0.4% 사이로 풍력발전기의 출력이 감소되었다고 볼 수 있다. 비어링윈드의 경우 낮은 연평균 풍속에서 AEP의 상대오차가 크 게 나타나고 있으며, 연평균 풍속 8 m/s부터는 큰 변화가 없다. 따라서 낮은 풍속에서 윈드비어로 인한 출력영향이 높음을 확인할 수 있다. 반면, 백 킹윈드 조건의 연간에너지발전량의 상대오차는 전체적으로 낮으며, 연평균 풍속 5 m/s 이후로는 0에 가까운 낮은 오차 값을 나타내고 있다.



Fig. 9 Comparison of AEP relative error for veering and backing conditions

## 5. 결 론

본 연구에서는 윈드비어가 풍력발전기의 출력 성능에 미치는 영향을 검토하기 위하여 3가지 윈 드비어 조건을 정의하고 각각에 대한 출력과 연 간에너지발전량을 산출하여 비교하고 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

 1) 연구 사이트에서 나셀라이다를 이용하여 측 정 기간 동안에 분석된 비어링윈드는 42.1%를 차 지하였고, 백킹윈드는 57.9%로 백킹윈드의 비중이 높았다.

 2) 3가지 윈드비어 조건에서 산출된 2 MW 풍 력발전기의 출력곡선을 이용하여 AEP를 계산한 결과, 연평균 풍속 4~11 m/s에서의 AEP는 1.62~
 10.83 GWh/y 범위로 계산되었다.

3) 비어링윈드 조건의 AEP 상대 오차는 연평균 풍속에 따라 0.9~4.5%를 보였고, 백킹윈드 조건의 AEP 상대 오차는 -0.2~-0.4%를 보였다. 따라서 본 연구에서 비어링윈드는 풍력발전기 출력을 향상 시키는 요소로 작용하였으며, 백킹윈드는 출력을 감소시키는 요소로 작용하였다.

#### 후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으 로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021R1A2C2009315). 이 논문은 제1저자인 투 멘바야르 운다르마의 2023년 2학기 제주대학교 박사학위 논문 내용을 확장 및 보충 연구하여 작 성하였음.

#### Author contributions

U. Tumenbayar; Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Writing original draft, Visualization. K. Yang; Writing review & editing. K. Ko; Writing - review & editing, Supervision, Project administration. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

#### References

 Z. Shu, Q. Li, Y. He and P. W. Chan, 2020, "Investigation of marine wind veer characteristics using wind lidar measurements", Atmosphere, 11, 1178.

(https://doi.org/10.3390/atmos11111178)

 C. Ansorge and H. Wurps, 2022, "Wind veer and wind speed in turbulent Ekman flow", Copernicus Meetings.

(https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-7575)

 M. J. Churchfield and S. Sirnivas, 2018, "On the effects of wind turbine wake skew caused by wind veer", In Proceedings of the 2018 wind energy symposium, 755.

(https://doi.org/10.2514/6.2018-0755)

4. M. Howland and J. Dabiri, 2020, "Influence of atmospheric boundary layer wind speed and

direction shear on utility-scale yaw misaligned turbines", In Proceedings of the APS Division of Fluid Dynamics Meeting Abstracts, G03-004.

- U. Tumenbayar and K. Ko, 2023, "Wind power variation by wind veer characteristics with two wind farms", Scientific Reports, 10771, 13(1). (https://doi.org/10.1038/s41598-023-37957-6)
- A. Englberger, J. K. Lundquist and A. Dörnbrack, 2020, "Should wind turbines rotate in the opposite direction?", Wind Energy Science Discussions, 1-20.

(https://doi.org/10.5194/wes-2019-105)

- S. N. Gadde and R. J. A. M. Stevens, 2019, "Effect of Coriolis force on a wind farm wake", In Proceedings of the Journal of physics: Conference series; IOP Publishing, 1256, 12026. (https://doi.org/10.1088/1742-6596/1256/1/012026)
- G. Narasimhan, D. Gayme and C. Meneveau, 2021, "Effect of veer on a yawed wind turbine wake in neutral and stable atmospheric boundary layer", In Proceedings of the APS Division of Fluid Dynamics Meeting Abstracts, H03-007.
- Z. Shu, Q. S. Li, P. W. Chan and Y. C. He, 2020, "Seasonal and diurnal variation of marine wind characteristics based on lidar measurements", Meteorological Applications, 27, e1918. (https://doi.org/10.1002/met.1918)
- P. Brugger, F. C. Fuertes, M. Vahidzadeh, C. D. Markfort and F. Porté-Agel, 2019, "Characterization of wind turbine wakes with Nacelle-Mounted Doppler LiDARs and model validation in the presence of wind veer", Remote Sensing, 11, 2247.

(https://doi.org/10.3390/rs11192247)

 A. Englberger and J. K. Lundquist, 2020, "How does inflow veer affect the veer of a wind-turbine wake?", In Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series IOP Publishing, 1452, 12068. (https://doi.org/10.1088/1742-6596/1452/1/012068)

- R. Wagner, M. Courtney, T. J. Larsen and U. S. Paulsen, 2010, "Simulation of shear and turbulence impact on wind turbine performance", DTU, ISBN 8755038018.
- M. Sanchez Gomez and J. K. Lundquist, 2020, "The effects of wind veer during the morning and evening transitions", In Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series IOP Publishing, 1452, 12075.

(https://doi.org/10.1088/1742-6596/1452/1/012075)

- M. Sanchez Gomez and J. K. Lundquist, 2020, "The effect of wind direction shear on turbine performance in a wind farm in central Iowa", Wind Energy Science, 5, 125-139. (https://doi.org/10.5194/wes-5-125-2020)
- 15. P. Murphy, J. K. Lundquist and P. Fleming, 2020, "How wind speed shear and directional veer affect the power production of a megawatt-scale operational wind turbine", Wind Energy Science, 5, 1169-1190. (https://doi.org/10.5104/wag.5.11(0.2020))

(https://doi.org/10.5194/wes-5-1169-2020)

- 16. J. H. Son, K. N. Ko, J. C. Huh and I. H. Kim, 2017, "Mutual Application of Met-Masts Wind Data on Simple Terrain for Wind Resource Assessment", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, 21(6), 1-11. (https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.6.031)
- D. H. Shin, K. N. Ko and M. S. Kang, 2017, "Characteristics Analysis and Reliability Verification of Nacelle Lidar Measurements", Journal of the Korean Solar Energy Society, 37(5), 31-30.

(https://doi.org/10.7836/kses.2017.37.5.001)

 International Electrotechnical Commission Wind energy generation systems Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines; 2022; 3; ISBN 2831886376.