

# 2MW급 직접구동형 풍력발전기의 풍황 민감도 및 토크모드 스위칭 성능 해석

## A Sensitivity and Performance Analysis for Torque Mode Switching on 2MW Direct Drive Wind Turbine Generator

노 주 현\*  
(Joo-Hyun Rho)

**Abstract** - Wind turbine generators were designed on general regulations of wind condition. At real situations, it could be different from the design conditions. There are many control methods and definitions of transient region, because an efficient wind turbine generator control logic is the important matter in generator performance and annual energy production at real conditions. In this document, the power generation sensitivity for wind speed and turbulence intensities was defined to know the sensitive transient region. Wind conditions are applied for the ranges of 7~10m/s mean wind speed and 14~20% turbulence intensity. The sensibility of HR-D86 wind generator was increased in transient region(8~10m/s) on power curve diagram through a torque control to a pitch control. And then GH-bladed simulations was performed for performance analysis of the torque mode switching in transient region on 2MW direct drive wind generator(HR-D86) which is designed IEC class II for onshore. Through the sensitivity and performance analysis, the sensitivity for real wind condition could be the performance index for an wind generator. And the torque mode switching in transient region can increase the mean power generation on HR-D86 wind turbine generator.

**Key Words** : Wind generator, 2MW DD wind turbine, Sensitivity, Performance analysis, Torque mode switching

### 1. 서 론

오늘날 전 세계적인 지구 온난화 및 고유가의 대안으로써 신재생에너지 개발이 확대됨에 따라 유럽 등 선진국에서는 풍력발전 등에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다.[1] 국내에서도 태양광 및 풍력발전에 대한 연구 개발이 신성장 동력으로써 활발히 이루어지고 있으며 해상풍력 단지와의 같은 대규모 사업이 진행 중에 있다.[2,3] 대규모 풍력 단지 건설을 위한 풍력발전기의 선정 기준은 대체로 규정에 의한 설계등급과 풍력 발전기의 출력곡선으로 한정된 연간 발전량이 현실적으로 고려되고 있다.[4] 그러나 일반적인 규정에 따른 출력곡선의 풍환경과 각 설치장소에 따르는 실제 풍환경은 서로 다를 수 있다. 그리고 실물 발전기의 출력효율, 풍력터빈 블레이드의 공기역학적 특성과 제어기 등 여러 가지 요인에 의해 실제 발전기 성능은 변동 될 수 있다. 따라서 설계등급과 연간발전량을 고려하여 발전기를 선정한다 하더라도 설계상의 AEP(Annual Energy Production)와 실제 AEP간 또한 설치환경에 따른 이용률에 차이가 날 수 있게 되며 이는 장기간 운용되는 발전단지의 총발전량에 큰 영향을 줄 수 있는 요인이 될 수 있다.[2,5] 따라서 이와 같은 문제를 검토하기 위해 실제 풍환경에 따른 성능을 평가

하기 위한 다양한 평가 지표가 필요하며 나아가 이를 기반으로 하여 풍력발전기의 발전효율이 향상 될 수 있도록 설계되고 제어로직이 구성되어야 한다.

본 연구에서는 풍속과 난류강도 변화에 대한 출력의 민감도를 정의하여 시스템 평가지표로 활용하였으며 2MW급 직접구동형 풍력발전기들에 대하여 성능해석을 수행하여 출력변화가 민감한 전이영역(8~11m/s) 구간을 확인하였다. 이를 바탕으로 당사 직접 구동 2MW 풍력발전기 시스템(HR-D86)에 전이속도 영역에서의 성능과 안정성을 효과적으로 향상하기 위하여 노치필터와 토크모드 스위칭 등의 제어로직을 적용한 후 발전 성능이 향상됨을 GH-Bladed 전산 해석 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 2MW급 직접구동형 풍력발전기

##### 2.1.1 시스템 개요

분석 대상물은 국내 최초의 2MW급 직접구동 영구 자석형 풍력발전기(이하 HR-D86)로써 해외 라이선스에 의한 설계, 생산이 아닌 국내 독자 기술개발을 통해 표 1과 같은 설계사양으로 국책과제에 의하여 개발 완료하였다.

독자 기술개발은 긴 개발기간과 비용 상승 등의 단점이 있지만 향후 제품성능 향상이나 클래스 변경, 양산 설계 변

\* Corresponding Author : R&D Center, Hyundai Rotem Company, Korea.

E-mail: boondo0@snu.ac.kr

Received : August 05, 2014; Accepted : September 25, 2014

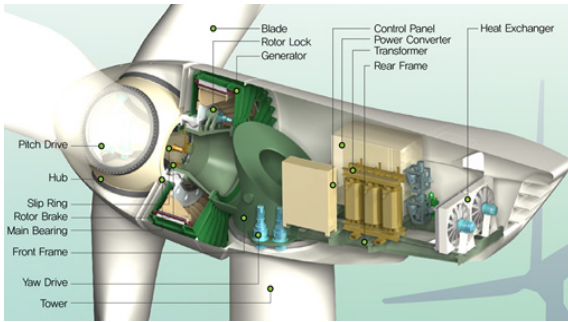


그림 1 2MW 직접구동형 풍력발전기  
Fig. 1 2MW Direct Drive wind turbine generator

표 1 HD-D86 사양  
Table 1 HD-D86 Specification

일반	터빈 Class	IEC II-A
	정격출력	2,000kW
	Cut-in 풍속	3m/s
	정격 풍속	10.7m/s
	Cut-out 풍속	25m/s
블레이드	동력전달체계	직접구동
	직 경	86m
블레이드	정격회전속도	16.66rpm
	블레이드 재질	GFRP
타워	형 식	튜브형
	허브높이	80m
발전기	형 식	영구자석, 동기발전기
	정격전압	660V
	냉각방식	수냉식
컨버터	형 식	AC - DC - ACPWM
	정류방식	Full power
	냉각방식	수냉식
피치	구동방식	전동식서보

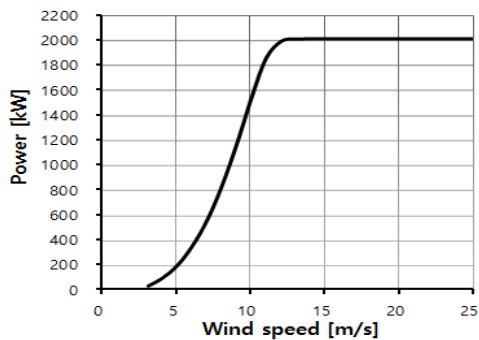


그림 2 출력 곡선  
Fig. 2 Power curve

경 등이 용이한 장점이 있다.

### 2.1.2 시스템 설계 성능 및 개발 개요

시스템의 목표 성능은 그림 2의 출력곡선과 같이 정격 풍

속 11m/s 근방에서 2MW의 전력을 생산할 수 있도록 하였다. 개발진행 개요는 그림 3과 같이 발전기 시제품을 제작, 기본 성능평가 실험을 완료한 후 본품 발전기와 컨버터를 제작 진행하고 그림 4와 같이 실험용 복합재 풍력 블레이드를 제작, 성능시험을 완료하였으며 Prototype을 그림 5와 같이 제작하였다.



그림 3 발전기 형식시험  
Fig. 3 Generator type test



그림 4 블레이드 시험  
Fig. 4 Rotor blade test



그림 5 HR-D86 풍력발전기  
Fig. 5 Wind turbine generator (HR-D86)

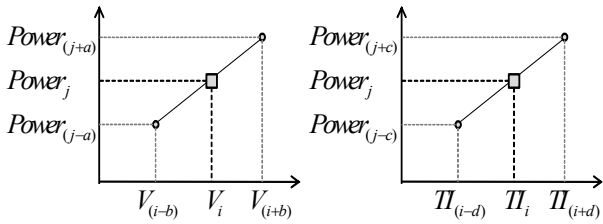


그림 6 민감도 정의  
Fig. 6 Definition of sensitivity

2.2 민감도 정의 및 풍황 조건

2.2.1 민감도 정의

일반적 설계 조건뿐만 아니라 실제 풍황에 따른 운용중의 성능을 예상하기 위하여 주요 풍황의 불확실한 인자에 대한 출력의 민감도를 분석하였다. 민감도는 그림 6 및 식 (1)과 같이 “10분 평균풍속 변화에 대한 풍력발전기 출력 변화량”과 식 (2)와 같이 “10분 평균 난류강도 변화에 대한 풍력발전기 출력 변화량”으로 정의한다. 또한 15m/s 풍황 조건에서의 편차  $\sigma$  및 난류강도  $TI$  는 식 (3)과 같이 정의한다.

$$Sensitivity(V) = \frac{Power_{(j+a)} - Power_{(j-a)}}{V_{(i+b)} - V_{(i-b)}} = \frac{\Delta Power}{\Delta V} \quad (1)$$

$$Sensitivity(TI) = \frac{Power_{(j+c)} - Power_{(j-c)}}{TI_{(i+d)} - TI_{(i-d)}} = \frac{\Delta Power}{\Delta TI} \quad (2)$$

$$\sigma_{15} = \frac{I_{15}(15m/s + aV_{hub})}{a+1}, \quad TI = \frac{\sigma_{15}}{V_{hub}} \quad (3)$$

2.2.2 풍황 조건

분석 대상인 2MW 육상용 풍력 발전기의 IEC 설계등급은 II-a이며, 설계풍속의 연평균풍속은 8.5m/s 난류강도는 18%로 설계되었다.[6,7] 이 설계 값에 대응하는 실제 바람조건을 묘사하기 위해 표2와 같이 평균풍속 6~15m/s 각각의 범위에서 난류강도를 바꿔가며 분석하였고 난류강도는 15~19%의 영역에서 각 평균풍속에 따라 정의하여 각 경우에서 성능을 GH-Bladed를 이용하여 시뮬레이션 하여 민감도를 분석하였다[8].

2.3 민감도 해석 결과

2.3.1 풍속에 따른 출력 민감도

풍속에 대한 출력의 민감도를 계산한 결과 그림 7과 같이 8~10m/s에서 풍속변화에 따른 민감도가 가장 크며, 이는 7~11m/s 영역에서 풍속의 변화에 대해 출력의 변화도 크다는 것을 보여준다. 정격풍속 10.7m/s 보다 더 빠른 풍속에서 풍속변화에 대한 민감도가 감소하는 것은 풍속이 증가했음에도 출력변화가 둔감해 진다는 것을 의미한다.

일반적인 발전기와 비교를 위해 몇 가지 다른 풍력 발전기 모델[8]을 시뮬레이션 한 결과 모두 (+)방향의 민감도를 보였고, 또한 다른 난류풍속모델을 적용하여 시뮬레이션 했

표 2 풍황 조건

Table 2 Wind condition

Wind Case	풍속 영역	TI Case	난류강도 영역
5.9 m/s	6m/s	14.9 %	15 %
6.1 m/s		15.1 %	
6.9 m/s	7m/s	15.9 %	16 %
7.1 m/s		16.1 %	
7.9 m/s	8m/s	16.9 %	17 %
8.1 m/s		17.1 %	
...		17.9 %	18 %
		18.1 %	
14.9 m/s	15m/s	18.9 %	19 %
15.1 m/s		19.1 %	

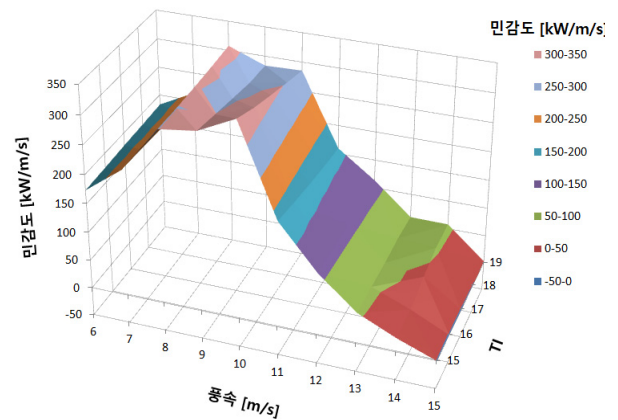


그림 7 풍속에 따른 출력 민감도  
Fig. 7 Power sensitivity about wind velocity

을 때 (+)방향의 민감도를 보인 것으로 보아 풍력시스템의 출력성능과 난류모델에 대한 특성으로 판단된다. 풍황 조건에 있어 난류풍속모델은 다양하게 적용될 수 있으며 난류모델이 달라질 때 동일한 풍력발전시스템에서 풍속에 대한 민감도 특성이 어떻게 변화하는 지를 확인해 본 결과, 앞서 언급된 바와 같이 8~10m/s 근처의 전이영역 풍속구간이

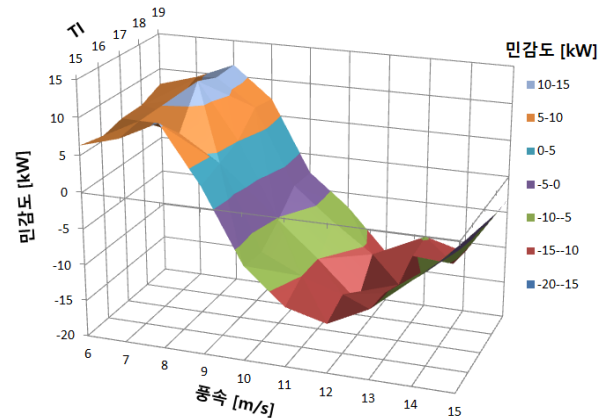


그림 8 난류 강도에 따른 출력 민감도  
Fig. 8 Power Sensitivity about turbulence intensity

본 풍력시스템에서 가장 민감한 영역이며 정의된 민감도 성능지수가 풍력터빈의 특성을 나타낼 수 있다. 따라서 전이 구간에서 효율적인 제어를 구성하는 것은 대상 풍력발전기 효율 및 풍력단지의 평균발전량을 향상시키는 방법으로 선택할 수 있다.

2.3.2 난류 강도에 따른 출력 민감도

그림 8과 같이 동일한 풍속에 대해서 난류강도에 대한 출력의 민감도는 크게 변하지 않는다. 또한, 민감도가 (+)인 9m/s이하의 풍속영역에서는 난류강도가 증가함에 따라 출력도 증가하는 현상을 보이며, 9m/s 이상의 풍속영역에서는 (-)의 민감도로, 난류강도가 증가함에 따라 출력은 감소하는 현상을 보이게 된다.

이와 관련한 선행 연구 자료에서 저풍속 영역에서 난류강도가 높을수록 고효율을 내며, 고풍속 영역에서 난류강도가 높을수록 낮은 출력을 산출함을 실측데이터로 확인된바 있으며, 15m/s 이상으로 풍속이 커지면 난류강도에 따른 민감도는 작아져 출력은 일정하게 출력하게 된다.[9,10] 당사 HR-D86 풍력 발전기는 약 9m/s를 중심으로 난류강도에 대한 민감도가 (+)에서 (-)로 변하는 특성을 갖고 있으며, 이 특성은 9~10m/s 풍속영역이 가장 민감한 제어영역임을 판단할 수 있다. 이처럼 발전량 변화를 민감하게 일으키는 현상에 대하여 대형 블레이드의 관성력과 타워 구조물 하중이 주요원인으로 예상될 수 있다. 이것은 직접구동형 풍력발전 시스템에 있어 블레이드 관성력 및 타워구조물은 일반적인 발전기와 가장 많이 차이 나는 부분으로 선행된 2MW DD 풍력발전기 성능해석 결과에서 선행 검토되었다.

2.4 풍력 발전기 제어시뮬레이션

일반적인 풍력발전기는 그림 9와 같이 정상상태 풍속조건에 의해 결정되는 로터의 회전수에 따른 토크 테이블에 의하여 제어될 수 있다. 로터의 회전수에 따라 기동구간을 제외하고 크게 세 개의 구간으로 구성된다.

Mode 1 구간인 저속영역에서는 블레이드의 피치각도  $\beta$  를 고정하고 최적으로 풍력 설계된 블레이드의 최대 압력계

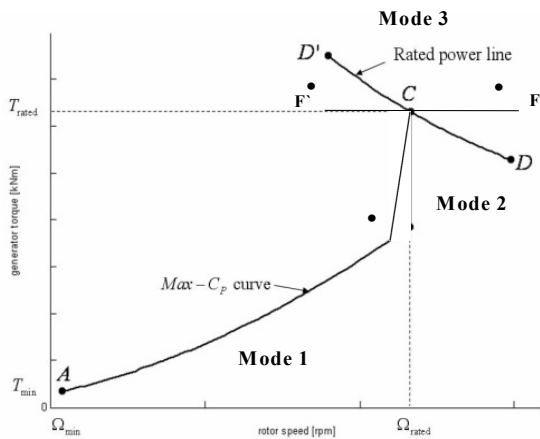


그림 9 제어 모드[12]  
Fig. 9 Control mode[12]

수  $C_p$  성능커브를 따라 발전기 토크가 설정되며 Mode 3 구간인 정격풍속 이상의 영역에서는 로터를 정격 회전속도  $\Omega_{rated}$  로 고정시킨 후 풍력터빈의 출력이 정격과외 커브를 따라 유지되도록 제어된다. 이를 위하여 블레이드의 피치각을 제어하여 RPM을 제어하게 된다. 마지막으로 Mode 2 천이 구간 또는 전이영역인 이 부분은 각 풍력발전기마다 어떠한 회전수 구간으로 정의하며 어떻게 제어하는 방법이 각각 다르게 선정되고 있으며 풍황에 따른 민감도가 큰 구간이다[11-12].

당사 HR-D86 제어기에서는 토크제어와 RPM제어 등 조건에 따른 모드스위칭 방법을 그림 10과 같이 적용하여 모델링한다.[13] 앞서 검토된 민감도가 높은 전이영역에서 그림 11과 같이 우선 기존방식의 토크제어(slope 1)로 적용하였을 경우와 증속과 감속시에 서로 다른 스케줄을 적용하여 Rated 조건에서 작동하다가 rpm이 감소하면서, 피치각이 1deg. 이하로 되면, 토크를 200kN/s의 속도로 급속히 감소시켜 원래의 토크라인으로 도달하도록 하고, rpm 증가에 따라 다시 원래의 테이블에 따라 제어하게 하는 모드스위칭 (slope 2)을 새로 적용하여 비교하였다. 일반적인 방식인 Slope 1은 로터 회전속도가 증가할 때와 감소할 때 모두 동일한 토크 스케줄을 적용하지만 Slope 2는 로터 회전속도가 감소하는 경우 블레이드의 회전 관성력을 이용하여 더 낮은 회전수에서도 많은 파워를 생산하는 것이 두 제어방식의 가장 큰 차이점이며 가속과 감속 조건에 따라서 모드를 스위칭해 주는 것이 대상 2MW 직접구동형 풍력발전기의 제어 특징이다.

스위칭 모드 적용에 따른 풍력발전기의 성능을 비교 분석하기 위하여 GH-Bleded 해석프로그램[8]을 이용하여 시뮬

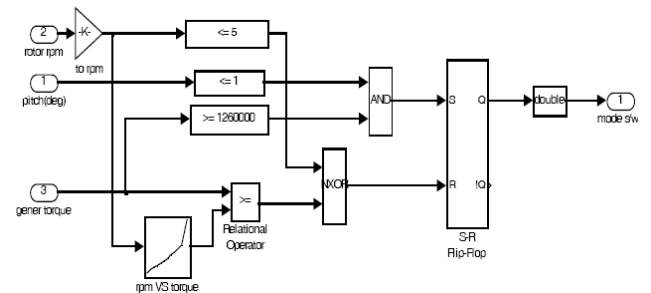


그림 10 풍력발전기 제어 모델  
Fig. 10 Wind turbine control model

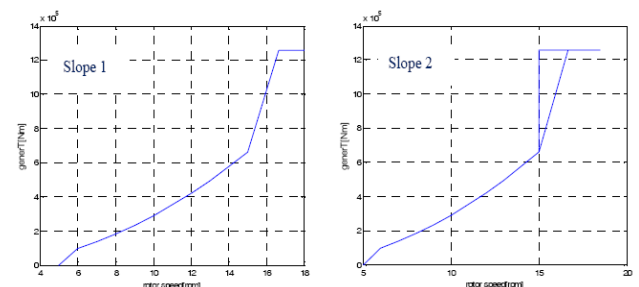


그림 11 토크 제어 스케줄  
Fig. 11 Torque schedule slope

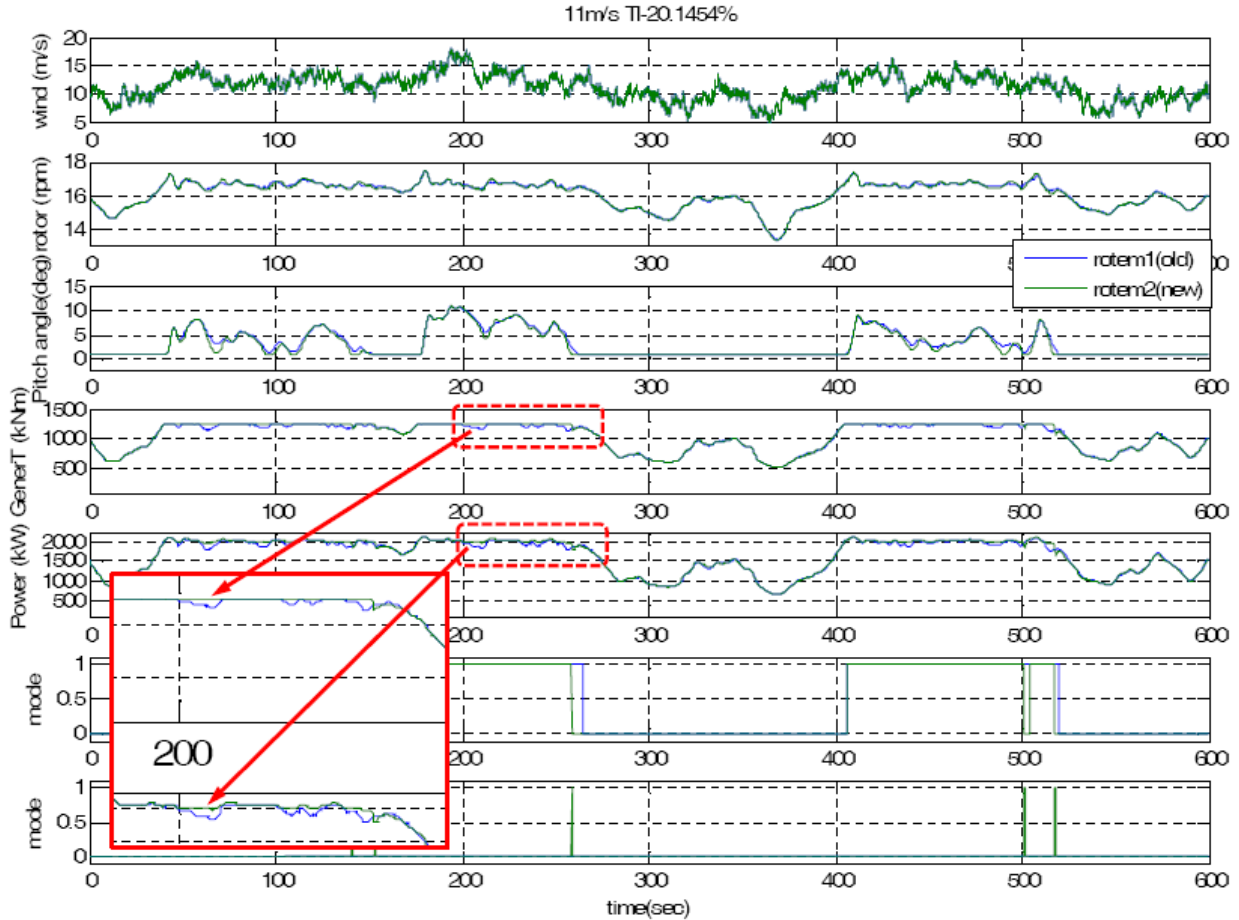
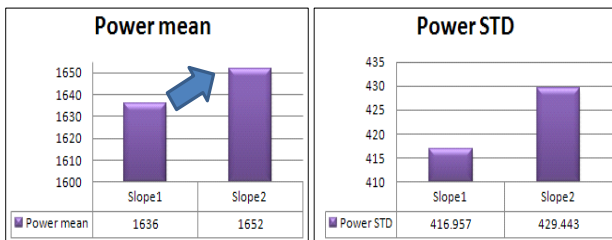
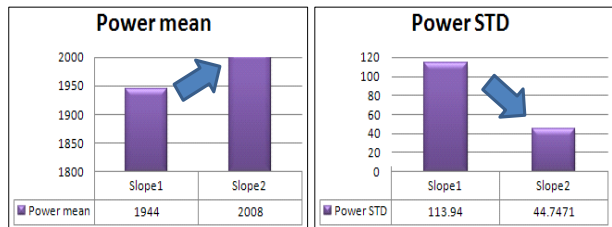


그림 12 모드 스위칭에 따른 응답 특성 비교  
 Fig. 12 Comparison of response to mode switching



(a)  $V_{hub} = 11m/s$



(b)  $V_{hub} = 18m/s$

그림 13 토크 모드 스위칭에 따른 성능 변화  
 (Slope 1: 모드 스위칭 없음, Slope 2: 모드 스위칭)  
 Fig. 13 Performance change on torque mode switching  
 (Slope 1: No switching, Slope 2: Mode switching)

레이션 하였으며 600s Bladed simulation data를 이용하였고 특히 전이영역 부분의 특성을 잘 나타낼 수 있도록 평균풍속 11m/s 난류강도 20.1%인 조건에서 최소 피치제어 각도 1deg. 조건으로 수행하였다.

그림 11과 같은 모드 스위칭에 따른 특성을 시뮬레이션한 결과 Slope 1(old)과 Slope 2(new)의 토크제어 대하여 그림 12와 같이 풍력 발전기의 응답 특성이 전이영역 부분에서 달라짐을 확인할 수 있었으며 이를 바탕으로 그림 13과 같이 HR-D86 풍력발전기의 성능 변화를 비교하였다. 전이영역에서의 제어방법 변경에 따른 비교 결과 평균 rotor회전수가 낮더라도 에너지 회수율(Power mean) 즉 발전효율이 향상됨을 확인하였다. 정격 풍속 이상의 18m/s 영역에서는 발전량의 표준편차(Power STD : Standard deviation)가 30%정도로 작아지며 이는 전력 품질면에서 성능이 향상됨을 알 수 있다. 그러나 11m/s 풍속 영역에서는 Vertical 제어 즉 Slope 2와 같이 제어하는 경우 rotor rpm 및 발전량의 표준편차(STD)가 오히려 증가하여 시스템 하중 측면에서 이를 보완할 수 있는 면밀한 추가검토가 필요할 것으로 예상된다.

### 3. 결 론

풍력발전기 선정 및 성능평가 기준이 될 수 있도록 일반

적인 최적설계 방법 중 하나인 민감도 분석방법을 이용하여 난류강도와 풍속에 대한 민감도 파라미터 분석방법을 독창적으로 제안하였다. 외란을 주는 요소로 선택된 난류강도와 풍속은 선행 연구된 파레토 셋 검토를 통해 선택되어진 풍력발전기 발전량에 영향을 주는 민감한 파라미터이며 이를 바탕으로 2MW급 직접구동형 풍력시스템(HR-D86)에 대한 출력 민감도 분석 및 제어기 구성에 따른 시스템 성능해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 풍속과 난류강도에 따른 발전능의 민감도는 풍력발전기의 설계 및 전이영역 구간 제어시 검토 되어야 할 성능지표로 활용할 수 있다.
- 2) 풍력 발전기의 출력 특성은 전이영역 구간(8~10m/s)이 가장 민감하며 이 구간을 중심으로 낮은 풍속에서는 난류강도가 증가함에 따라 출력이 증가하고, 높은 풍속에서는 난류강도가 증가함에 따라 출력이 감소한다.
- 3) HR-D86 풍력발전기의 경우 민감도 검토 결과에 따라 효과적인 전이영역을 선정하였으며 토크모드 스위칭 등을 토크제어 로직에 적용하여 발전 성능이 향상됨을 시뮬레이션 결과를 통하여 확인하였다.

### References

[1] BTM Consul ApS, "World Market Update 2009 Forecast", 2010-2014, 2010.

[2] Y.S. Shin et al., "Current situation and utilization rate as of both solar and wind power plant in Korea", Conference paper of The Korean Institute of Electrical Engineers(KIEE), pp. 441-413, 2012.

[3] M.S. Ryu, "Trends of domestic offshore wind sector", Journal of KGES, Vol. 13, No. 5, pp. 42-54, 2012.

[4] Kyung-Nam Ko, Jong-Chul Huh, "Introduction of Wind Engineering", 2006.

[5] Yeong-Hwan Kim, Se-Ho Kim, "The Study on the utilization of wind power plant in accordance with their capacity in Jeju island", Conference paper of The Korean Institute of Electrical Engineers(KIEE), pp. 827-873, 2012.

[6] Germanischer Lloyd, "Wind Energie Edition", Chapter4, 2003.

[7] IEC 61400-1, Ed.2

[8] E A Bossanyi, "GH-bladed Theory manual", Garrad Hassan, 2008.

[9] Yoo Neung Soo, Yoon Kwang Young, "A Study on the Effect of Wind Characteristics on the Wind Turbine Power Output", Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 12, No. 2, pp. 75-83, 2008.

[10] Tony Burton ect. "Wind Energy Handbook", JOHN WILEY & SONS, LTD, Chapter 5, 8, 2001

[11] Yoonsu Nam, et, al., "Dynamic Characteristic Analysis of a Wind Turbine Depending on Varying

Operational Conditions", Trans. Korean Soc. Mech. Eng A, Vol. 33, No 1, pp. 42-48. 2009.

[12] Yoonsu Nam, "Wind turbine control sysem", GS Intervision, 2013.

[13] Sang-Hyuk Im et. al., "Modeling of the variable speed wind turbine direct-driven by permanent magnet synchronous generator and characteristic analysis", Conference paper of The Korean Institute of Electrical Engineers(KIEE), pp. 849-850, 2013.

## 저 자 소 개



### 노 주 현(Joo-Hyun Rho)

1996 인하대학교 졸업  
 2010 서울대학교 대학원 졸업(박사)  
 현재 현대로템 기술연구소, 책임연구원  
 2MW 직접구동형 풍력발전기 개발  
 (공력 및 하중해석, 성능평가, 인증)