

2MW급 해상용 영구자석 직접 구동형 풍력 발전기의 정상상태 특성 해석

The Steady-State Characteristic Analysis of 2MW PMSG based Direct-Drive Offshore Wind Turbine

신평호* · 최정철** · 유철*** · 김대진**** · 경남호*****† · 고희상*****

Pyungho Shin*, Jungchul Choi**, Chul Yoo***, Daejin Kim****, Namho Kyong*****† and
Heesang Ko*****

(Received 10 March 2015; accepted 28 May 2015)

Abstract : In order to support various studies for assessment of onshore and offshore wind turbine system including foundations, the land-based version of 2MW PMSG direct drive wind turbine has been analyzed using HAWC2 that account for the coupled dynamics of the wind inflow, elasticity, and controls of the turbine. this work presents the steady-state response of the system and natural frequency of the first thirteen structure turbine modes as a function of wind speed. Rotor, generator speeds, pitch angle, power production, thrust force, deflections of tower and blade are compared for one case below and one case above the rated wind speed.

Key Words : Land-and sea-based wind turbines(육해상 풍력발전기), Direct drive(직접 구동형), Rated rotor speed (정격로터 속도), Permanent Magnet Synchronous Generator(영구자석 동기발전기), Pitch angle(피치각도), Peak power coefficient(최고점 출력 파워계수)

1. 서 론

는 방식은 온실가스 배출이 불가피하므로 풍력 발전은 그 대안으로서 근래 20 년간 급성
기존 화석연료를 사용하여 전기를 생산하 장해왔다. 풍력 에너지 산업에서 해상풍력발

***** 경남호(교신저자) : 한국에너지기술연구원, 책임연구원
E-mail: nhkyong@kier.re.kr, Tel : 064-800-2220

*신평호: 한국에너지기술연구원, 연구원

**최정철: 한국에너지기술연구원, 선임연구원

***유철: 한국에너지기술연구원, 선임연구원

****김대진: 한국에너지기술연구원, 연구원

*****고희상: 한국에너지기술연구원, 선임연구원

***** Namho Kyong(corresponding author) : Korea Institute of Energy Research, Department of Wind Energy, Senior researcher.

E-mail : nhkyong@kier.re.kr, Tel : 064-800-2220

전기술은 상대적으로 새로운 분야이며 세계적으로 넓은 바다 부지를 활용하기 위한 천해 및 심해 해역에 적절한 해상풍력 발전기술을 도출하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국 국립 재생에너지연구소인 NREL(National Renewable Energy Laboratory)을 비롯하여 일본, 유럽등지에서는 최근 깊은 바다에서 해상풍력발전기술을 개발하려는 목적으로 개념 연구와 IEA를 통한 국제 공동 연구를 수행하고 있다. NREL 에서는 대수심 바다에서의 풍력 에너지를 이용하기 위하여 적합한 전형적인 5MW 규모의 풍력발전기를 설계하고 그 사양을 제시하였다.¹⁾ NREL에서 육상 혹은 해상에서 사용할 수 있고 고정식 혹은 부유식 해상 풍력 발전기 연구를 위해 사양이 공개된 5MW 급 풍력발전기는 가격, 효율 면까지도 고려하여 개발된 것이다. NREL 풍력발전기 모델을 기반으로 고정식 및 부유식 해상 기초에 대한 연구는 이미 국내외 다수 기관에서 수행된바 있으며 공탄성 코드 계산 결과 검증 을 위하여 이를 사용한 바 있다.^{2),3)} 해상 풍력 발전의 경제성은 기기 유지/보수 비용이 결정적인 역할을 하므로 향후, 부품 수가 적고 고장 확률이 적은 직접 구동식 풍력발전기의 사용이 현격히 증가할 것으로 예상되고 있다.⁴⁾ 기존의 국내에서 풍력 발전기 모델은 NREL 5MW, Risoe 10MW 혹은 상용 공탄성코드에서 제시하는 모델이 사용되어져 왔으며 영구 자석 발전기 직접구동식 풍력 발전기에 대한 모델이나 제어는 제시 된 적이 없었다. 당 연구에서는 제주 월정 해역에 설치된 2MW급 직접 구동형 영구자석형 풍력 발전기를 모델링하기 위하여 HAWC2 을 이용한 거동 예측을 수행하였고, 육상 풍력과 같은 고정 토목기초를 가정하여 여러 풍속조건에 대해 정상 발전 상태인 경우의 풍력발전기 각 부위의 반응

에 대한 결과를 얻었다. HAWC2는 다양한 외부환경 하에서의 풍력발전기의 동적 거동을 시뮬레이션 할 수 있는 코드로서 풍력발전기 시스템의 설계 및 연구목적으로 사용되고 있으며 일반 고정식 육상 및 해상 풍력발전기의 거동 해석에 사용될 수 있을 뿐만 아니라 부유식 해상풍력 발전기 거동을 해석할 수 있다.

2. HAWC2 프로그램

해상에 설치된 풍력발전기에는 바람, 제어, 공력학, 파도, 조류, 수력학 등 복잡한 힘들이 상호작용을 한다. 이러한 힘들을 예측하고 거동 상황을 해석적인 방법으로 모사하기 위해 HAWC2 (Horizontal Axis Wind turbine Code 2nd generation) 를 도입하여 활용하였다. HAWC2 는 풍력 발전기의 시간영역에서 거동과 하중해석을 수행하는 공수탄성(Aero-hydro-servo-elastic code) 코드이다.⁵⁾

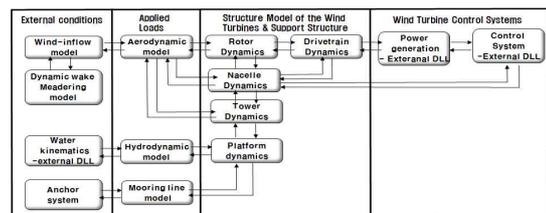


Fig. 1 Interfacing module to achieve aero-hydro-servo-elastic simulation in HAWC2

Fig.1에서 처럼 HAWC2는 각각의 모듈들이 전체 연동이 되어 상호작용을 함으로서 육·해상 풍력발전기의 공수 탄성 시뮬레이션을 수행한다. 이러한 특성은 파도와 바람이 시스템의 전력생산, 하중, 운동에 영향을 미칠 수 있기 때문에 시스템의 파도와 바람에 의한 하중으로부터 동적 거동을 분석하는데 중요하다. HAWC2는 계류(Mooring), 수력(Hydrodynamic)

시스템 모듈을 고려하지 않으면 육상 풍력발전기를 모델링하는데 여전히 적용될 수 있다. HAWC2 에서 공탄성모델은 공기역학에 대하여 진보된 Blade Element Momentum(BEM) 이론과 구조 역학에서의 다중물체 유한 요소 형식에 기반을 두고 있다.

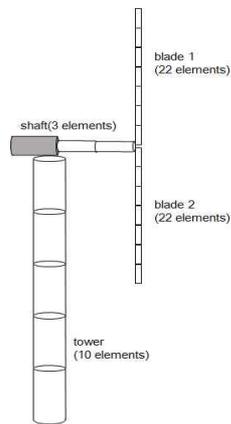


Fig. 2 Multibody systems[6, 7]

Fig.2에서 풍력발전기는 독립적인 구조의 몸체들로 표현을 할 수 있다. 그 몸체들은 타워, 구동축, 허브, 날개를 이루는 여러 개의 빔으로 구성되어 있고, 각각의 빔은 관성과 유연성을 고려하기 위해 TB(Timoshenko Beam)로 가정한다. 그 빔들은 구속조건에 의하여 서로 연결이 되어있고 질량과 관성을 가진다. Fig.2에서 다중물체 시스템이 움직일 때 관성과 질량과 관련된 힘들이 고려되어 진다.

HAWC2에서는 물리적인 감쇠 모델이 이방성 감쇠 특성의 모델링이 가능하도록 제시를 한다. Table. 1에서 제시한 것처럼 TB의 요소들에 대하여 레일리 감쇠 파라미터를 6가지를 제시하였다. M_x, M_y, M_z 는 질량에 비례하는 감쇠이고 K_x, K_y, K_z 는 강성에 비례하는 감쇠로 칭하여진다. 이러한 감쇠 모델은 주요 몸체(Main body)의 x, y, z 방향으로 달리 설정이

되어 질 수 있다.⁸⁾ 기존의 감쇠 모델과 다르게, HAWC2 에서 레일리 감쇠모델은 2가지의 주요한 진동의 형상에 대하여 개별적으로 조절이 될 수 있다. 2가지의 주요한 진동 형상은 요소의 축에 대한 비틀림(Torsion)과 2개의 횡단방향에 대한 굽힘(Bending)이다.

Table. 1 Rayleigh damping used for HAWC2

Rayleigh damping parameters		
Factor	M_x	Mass proportional damping
	M_y	
	M_z	
	K_x	Stiffness proportional damping
	K_y	
	K_z	

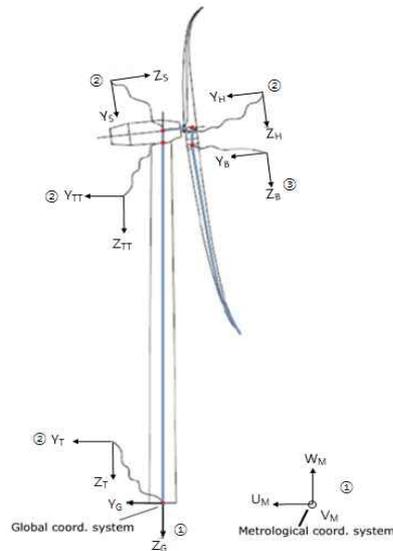


Fig. 3 HAWC2 coordinate systems[9]

Fig.3 에는 HAWC2 에 대한 좌표 시스템을 보여준다. 기본 바람 방향(Wind direction)과 전체적인 기본 좌표 시스템 (Global coordinate system)이 ①로 표현된 2개의 좌표계이다. ②로 표현된 좌표 시스템은 하부구조물의 첫 번째 마디(Node)에 부여된 주요 몸체(Main body)

의 좌표계들이며 ③으로 표현된 좌표계는 날개의 좌표계로서 공력과 구조거동을 결합하기 위하여 날개(Blade)의 뿌리에서 선단까지를 z축, 코드 방향(Chord wise)으로는 x축, 저압측(Suction side)으로 향하여 y축을 가지도록 정의를 하고 있다.⁹⁾

3. 직접 구동형 풍력발전기 제원

2MW급 직접구동형 풍력 발전기제원은 동적특성을 위해서 제주 월정리 해역에 설치된 풍력발전기 모델의 정보를 근간으로 하였다. Table. 2는 2MW 직접 구동형 풍력 발전기의 모델에 대한 제원을 보여 준다.

Table. 2 Gross properties chosen for the KIER PMSG 2MW direct drive wind turbine

Rating	2MW
Rotor Orientation, Configuration	Upwind, 3blades
Control	Variable Speed, Collective Pitch
Drivetrain	Gearless
Rotor diameter, hub diameter	70.64m, 2.64m
Cut in, Rated, Cut-out Wind speed	3m/s, 13m/s, 25m/s
Cut in, rated rotor speed	9 rpm, 22,5 rpm
Rated tip speed	83.21 m/s
Overhang, Shaft tilt, Precone	4.2m, 5°, 0°
Rotor mass	35,060 kg
Nacelle Mass + Gen. stator mass	46,319 kg
Tower Mass	145,934 kg
Global coordinate location of overall CM	x: 0 m, y:-0.83 m, z: 43.5 m

Table. 2에서 도출된 풍력발전기 전체 구조의 무게 중심은 global 좌표계를 기준으로 x:0

m, y:-0.83 m, z:43.5 m 위치하는 것을 HAWC2 계산에 의하여 도출하였다. 이 결과는 y축은 기본바람방향으로 +이므로 y: -0.83m이면 tower top의 중심에서부터 바람방향과 반대 방향으로 무게 중심이 위치한다. 이것은 direct-drive 풍력 발전기모델의 generator가 rotor bearing 의 외형을 둘러싸여 설치하도록 설계되었기 때문이다.

이 계산 결과는 HAWC2 의 파라미터 값을 입력할 때 tower top과 shaft의 주요 몸체에 concentrated mass에 해당되는 수치 값을 입력하여 얻은 계산결과이다. Concentrated mass 로 입력된 값들은 관성이 포함된 절점의 숫자, 무게중심, 질량, 관성모멘트이다. Tower top의 주요몸체의 concentrated mass 입력부분에는 nacelle의 무게 중심 값을 입력을 하였다. shaft의 주요몸체의 concentrated mass 입력부분에는 hub와 영구자석형 발전기의 질량과 관성모멘트 값을 입력하였다.¹⁾

4. 제어 시스템

풍력발전기에서 제어는 전력을 생산하기 위하여 일반적으로 2개의 기본적인 제어시스템에 의존한다. 첫 번째는 발전기 토크 제어(generator torque control)이고 다른 하나는 피치 제어(blade pitch control)이다. 발전기 토크 제어는 정격 구동 이전에서 전력생산을 최대화하기 위하여 작동한다. 피치 제어의 목적은 정격 풍속이상에서 발전기속도를 조절하기 위한 것이다. 발전기 토크는 최적의 선단 속도 비를 유지하기 위하여 low pass filter에 의하여 걸러진 발전기 속도(generator torque)의 제곱에 비례한다.

Table. 3 은 2MW 직접 구동형 풍력 발전기의 모델에 대한 전체 시뮬레이션에서 제어기 부분에 입력 값을 제시하였다. 풍력발전기 모델의 공기역학적 로터 파워, 풍속, 로터 회전

속도, 날개 피치각도, 로터 반경의 값으로 선단 속도비와 파워계수 값을 계산하였다. 계산결과 최고점 출력 파워계수(Peak power coefficient)는 선단속도비가 7.17이면서 날개 피치 각(blade pitch angle)이 0° 일 때 0.482의 계산 값이 도출되었다. 이러한 풍력 발전기의 구동 자료(Operational data)로부터 HAWC2 제어기 프로그램인 HS2PID를 이용하여 region 1,2,3 에서 발전기 회전력 제어와 날개 피치 제어의 비례제어 게인(k_p), 적분 게인(k_i), 공기역학적 게인 스케줄링(Aerodynamic gain scheduling), optimal C_p tracking factor의 계산 값을 조절하였다. 따라서 Table2 에 제시된 모든 파라미터 값들은 풍속에 따른 풍력발전기 정상상태의 반응에 대한 전체 계산에서 제어기 부분의 입력 값으로 반영이 되었다.

Table. 3 Baseline control system properties

Peak power coefficient	0.482
Tip speed ratio at peak power coefficient	7.17
Rotor-collective pitch angle at peak power coefficient	0°
Rated mechanical power	2151 kW
Optimal C_p tracking K factor	$0.153 \text{ GNm}/(\text{rad}/\text{s})^2$
k_p of torque controller	$1.742 \text{ GNm}/(\text{rad}/\text{s})$
k_i of torque controller	$0.391 \text{ GNm}/\text{rad}$
k_p of pitch controller	$1.370 \text{ rad}/(\text{rad}/\text{s})$
k_i of pitch controller	$0.693 \text{ rad}/\text{rad}$
Coefficient of linear term in aerodynamic gain scheduling	4.0245°
Maximum generator torque	848.9kNm
Minimum pitch angle setting	0°
Maximum pitch angle setting	90°
Maximum absolute blade pitch rate	4°

5. 전체 시스템 고유진동수

Table. 4 First 13 full system natural frequency for KIER PMSG 2MW direct drive wind turbine

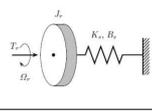
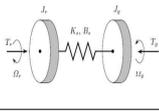
Turbine mode		
	Fixed shaft	Bearing shaft
Description	[Hz]	[Hz]
1 st tower transverse	0.4577	0.4570
1 st tower longitudinal	0.4693	0.4632
1 st rotor torsion(fixed-free)	1.0040	-
1 st asymmetric rotor flap/yaw	1.0503	1.0055
1 st asymmetric rotor flap/tilt	1.1093	1.0499
1 st symmetric rotor flap	1.4482	1.1098
1 st rotor edge 1	2.0724	2.0727
1 st rotor edge 2	2.1165	2.1145
2 nd asymmetric rotor flap/yaw	2.4707	2.4702
1 st rotor torsion(free-free)	-	2.5049
2 nd asymmetric rotor flap/tilt	2.5228	2.8303
2 nd symmetric rotor edge	3.2496	3.0799
2 nd symmetric rotor flap	4.864	3.2421

Table. 4에서 각각 축 고정(Fixed shaft)과 축 베어링(Bearing shaft)의 경우에 대하여 고유진동수 모드(Mode) 별로 제시를 하였다. 고유진동수 계산 시 날개는 최소각도인 0° 으로 설정을 하였다. 축 고정의 경우는 공기역학적 감쇄(Aerodynamic damping)을 고려하지 않았다. 축 고정의 계산 결과는 강제로 브레이크를 걸어 고정된 회전수 발전기(Generator)의 상황에서 계산된 결과이다. 따라서 HAWC2 계산 시에 축 고정의 경우 발전기의 위치의

절점에 shaft가 회전하지 않고 고정하도록 구속 조건을 주었다. 축 고정에서 1st torsion natural frequency(fixed-free)는 1.0040 Hz, 축 베어링에서 1st torsion natural frequency(free-free)는 2.5049 Hz 계산 결과 값을 도출하였다.

Fig.4는 로터 회전속도(rotor speed)와 고유주파수(Natural frequency)의 campbell diagram 결과 값을 보여 준다. Fig.4에서 점선을 이루는 두개의 직선의 기울기는 풍력발전기 모델의 exciting 1P frequency 와 exciting 3P frequency 를 보여 준다. exciting 1P frequency 는 0.4Hz, exciting 3P frequency 는 1.2Hz 의 값을 가진다. Fig.4는 로터 회전속도가 9rpm에서 3P의 성분과 1st Tower transverse, Longitudinal의 고유주파수가 매우 근접하는 것을 볼 수 있다. 즉, 풍속 3-5m/s범위에서 로터 회전속도가 8.9994 rpm 으로 회전을 하여 3P의 성분과 매우 근접하는 것을 확인 할 수 있다. 로터 회전속도는 8.9994 rpm에서 저풍속인 3-5m/s 범위에 해당하므로 3P의 성분이 tower의 고유주파수에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 10), 11), 12)

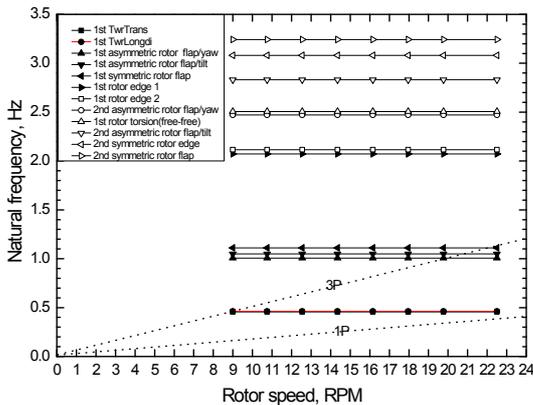


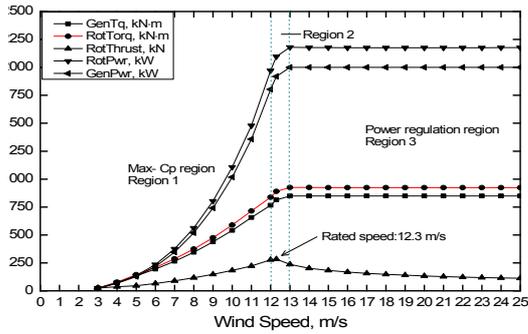
Fig. 4 Natural frequency of the first thirteen structure turbine modes computed with HAWC2 as function of rotor speed with the variation of pitch angle and wind speed

6. 정상상태의 거동

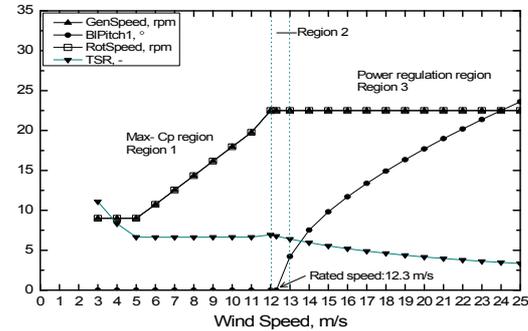
정상상태의 일정한 풍속(3-25m/s)에서 HAWC2 계산함으로써 풍력발전기에 대한 정상상태의 반응 결과를 얻었다. 시뮬레이션 시간은 모든 천이 거동(Transient behavior)이 사라지고 난 후의 충분히 긴 450s - 600s에서 계산을 수행하였고, 그 정상상태의 결과 값을 사용하였다. 모든 유용하고 적절하여 가능한 자유도와 함께 BEM 이론이 적용되어 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5의 (a), (b), (c)에서 여러 개의 파라미터에 대한 계산된 결과를 보여준다. Fig.5 (b)에서 최적의 풍력발전 효율을 유지하기 위해서 Region1의 5-11m/s 영역 범위에 선단속도비의 값이 6.64 으로 일정한 것을 확인하였다. 이 선단속도비 값을 유지하기 위하여 발전기파워와 로터파워는 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 풍속 3m/s-12.3 m/s 범위에서 발전기파워와 로터 파워의 곡선은 아래의 식 (1-1)에서 풍속의 3제곱에 비례하여 증가한다.

$$P = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A v^3 \right) = \frac{C_p}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (1-1)$$

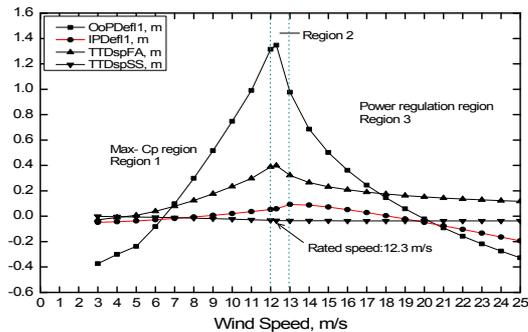
Fig.5 (a)의 Region 3에서 발전기파워와 로터파워 곡선은 풍속에 상관없이 피치제어에 의하여 고정된 회전속도를 조절함으로써 일정한 정격 출력을 유지한다. 풍속 12.3 m/s 이상에서는 타워에 날개가 부딪치는 현상을 피하기 위하여 피치각도가 0°부터 증가하여 peak shaving 이 작동을 한다. 피치각도가 12.3 m/s에서 증가하기 시작하는 것을 Fig.5 (b)에서 확인할 수 있다. Fig.5 (c) OopDef11의 곡선은 기동풍속(3m/s)에서부터 풍속에 따라 3 m/s ~ 12.3 m/s 까지 증가하여 12.3 m/s에서 최고



(a) "GenTq" represents the electrical torque of the generator. "RotTq" represents the mechanical torque. "RotThrust" represents the rotor thrust. "RotPwr" and "GenPwr" represents the mechanical power within the rotor and the electrical output of the generator.



(b) "GenSpeed" represents the rotational speed of the generator. "BIPitch1" represents the pitch angle of Blade 1. "RotSpeed" represents the rotational speed of the rotor. "TSR" represents the tip-speed ratio.



(c) "OoPDefl1" and "IPDefl1" represent the out-of-plane and in-plane tip deflections of Blade 1 relative to the undeflected blade-pitch axis. "TTDspFA" and "TTDspSS" represent the fore-aft and side-to-side deflection of the tower top relative to the centerline of the undeflected tower.

Fig. 5 Steady-state response as a function of wind speed

점에 도달한다. 12.3 m/s ~ 25 m/s 영역에서 차단풍속(25 m/s)까지 풍속에 따라 감소하는 반응을 보인다. 이러한 반응의 특성은 Fig.5 (a)의 로터 추력이 곡선의 최고점의 기인된 결과이다. 로터 추력 최고점은 발전기 회전력 제어가 작동하여 로터추력이 12.3 m/s에서 최고점에 도달하여 피치제어가 작동하기 시작하고 피치각도가 증가하면서 로터 추력 값은 떨어지게 된다. 이러한 반응은 Fig.5 (c)의 TTDspFA의 곡선에서도 확인할 수 있다. Tower top의 기울어지는 양은 최대 0.398m로서 추력에 의해서 풍향과 일치하는 방향으로 기울어짐을 확인하였다.

7. 결 론

향후 고정식 및 부유식 해상 풍력 발전기의 거동 및 지지구조물 기술을 취득하려는 목적으로 2MW PMSG Direct Drive 풍력발전기의 모델링에 기반한 정상상태 특성 해석을 수행하였다. 국내 해역 수심 50-150m에서의 실증에 적합하고 경제성 확보 가능성이 높을 것으로 예상된다. 본 논문에서는 풍속에 따라 풍력발전기 전체 시스템의 모드별 고유주파수와 정상상태의 반응을 계산하였다. 풍력 발전기 시스템의 고정 회전축과 베어링 회전축에 대한 모드별로 고유주파수를 비교 하였다. 풍속에 따른 정상상태에서 로터, 발전기속도, 회전력, 전력량, 추력, 피치 각도, 선단 속도비, 타워 윗면, 날개 끝 기울어짐에 대한 영역별 (Region1,2,3) 거동 해석 결과를 제시하였다. 본 논문을 통해 영구 자석 직접 구동형 풍력 발전기에 대하여 모델링을 하고 그 정당성을 보여 주었으며 향후 해상용 직접구동형 풍력 발전기에 대한 특성해석에 활용 될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다.(B5-2473)

Reference

1. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report NREL/TP-500-38060 pp1-63, Feb., 2009.
2. Pyungho Shin, Namho Kyong, Jungchul Choi, and Heesang Ko, A comparison of aero-hydro-elastic simulation for the load analysis of a wind turbine with monopile foundation, Proceeding of the Korea Wind Energy Association, pp128, Jun., 2014.
3. Pyungho Shin, Jungchul Choi, Chul Yoo, Namho Namho Kyong and Heesang Ko, Integrated wave and wind-induced response of the catenary moored spar-type wind turbine, Proceeding of the Korea Wind Energy Association, pp169. Dec., 2014.
4. Latha Sethuraman, Yihan Xing, Zhen Gao, Vengatesan Venugopal, Markus Mueller, and Torgeir Maon, 5MW direct-drive generator for floating spar-buoy wind turbine: development and analysis of a fully coupled mechanical model, Proc IMechE PartA: J power and Energy 0(0) pp1-12, Jun., 2014.
5. Madjid Karimirad, Modeling aspects of a floating wind turbine for coupled wave-wind-induced dynamic analyses, Renewable Energy 53, pp.299-305, 2013.
6. Shabana, Dynamics of multibody systems, cambridge university press, pp1-11.
7. <http://www.hawc2.dk/HAWC2-info/Structural-formulation>.
8. Morten Hartvig Hansen, Anisotropic damping of timoshenko beam elements, Riso-R-1267(EN), pp5-6, May, 2001.
9. Larsen T. J, Hansen, A. M, How 2 HAWC2, the user's manual, Riso-R-1597(ver. 4-5)(EN) pp22, 2014.
10. Morten H. Hansen, Anca Hansen, Torben J. Larsen, Stig Øye, Poul Sørensen and Peter Fuglsang, Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine, RISØ-R-1500(EN), pp31-32, Jan, 2005.
11. Kooijman, H. J. T., Lindenburg, C., Winkelaar, D., and van der Hooft, E. L., "DOWEC 6MW Pre-Design: Aero-elastic modeling of the DOWEC 6 MW pre-design in PHATAS," DOWEC Dutch Offshore Wind Energy Converter 1997 - 2003 Public Reports [CD-ROM], DOWEC 10046_009, ECN-CX--01-135, Petten, the Netherlands: Energy Research Center of the Netherlands, pp35-36, Sep., 2003.
12. Malcolm, D. J. and Hansen, A. C., WindPACT Turbine Rotor Design Study, NREL/SR500-32495, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, pp29, Aug., 2002.