

論文

Dual-Rotor 풍력 발전 시스템 성능 해석 및 피치 제어에 관한 연구

조윤모*, 노태수**, 정성남**, 김지언***

Performance Analysis and Pitch Control of Dual-Rotor
Wind Turbine Generator System

Yun Mo Cho*, Tae Soo No**, Sung Nam Jung** and Ji Yon Kim***

ABSTRACT

In this paper, preliminary results for performance prediction of a dual-rotor wind turbine generator system are presented. Blade element and momentum theories are used to model the aerodynamic forces and moments acting on the rotor blades, and multi-body dynamics approach is used to integrate the major components to represent the overall system. Not only the steady-state performance but the transient response characteristics are analyzed. Pitch control strategy to control the rotor speed and the generator output is proposed and its performance is verified through the nonlinear simulation.

초 록

본 논문에서는 이중 로터 풍력 발전 시스템에 대한 모델링 및 성능 예측 결과를 제시하였다. 풍력 모델은 블레이드 요소 및 모멘텀 이론에 근거하였으며, 시스템 동역학 모델은 다물체 역학을 적용하였다. 이중 로터 풍력 발전 시스템의 정상 상태는 물론 이중 여자 유도 발전기를 탑재한 발전 시스템에 대하여 풍속 변화에 따른 과도 응답을 분석하였고, 로터 회전수 및 발전 출력 제어를 위하여 주 및 보조 로터의 피치가 제어 전략의 도출 및 비선형 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

Key Words : Dual Rotor(이중 로터), Multibody Dynamics(다물체 역학), Pitch Control(피치 제어), Dual Rotor Wind Turbine Generator(이중 로터 풍력 발전)

1. 서 론

풍력 발전 시스템이란 바람이 가지고 있는 운동 에너지를 로터 블레이드를 통해 회전력으로 변환시키고, 이를 이용하여 발전기를 구동시켜 전기 에너지를 생산하는 방식의 발전 시스템을 의미한다[1]. 부존 에너지 자원들의 고갈이 다가

오고 있는 현실과 2005년 2월 발효된 UN 기후 변화협약의 구체적 실천 지침인 도쿄의정서에 대한 대응방안으로서 풍력 발전과 같은 신재생 에너지 관련 기술 개발의 필요성이 절실하게 대두되고 있는 실정이다[2].

일반적으로 풍력 발전 시스템의 정확한 성능 예측이나 해석을 위해서는 실제적인 수학적 모델 또는 이미 설치된 시스템의 운용 결과를 근거한 System Identification 기법이 이용되기도 한다[3,4]. 이러한 성능 예측 및 해석에 사용되는 소프트웨어로는 Garrad Hassan(GH)의 "BLADED"와 NWTC(National Wind Technology Center)의 "FAST", "Modes" 등이 있다[5,6]. 그러나 국내의 경우, 풍력 발전 시스템에 대한 연구 및 개발 실

† 2005년 3월 3일 접수 ~ 2005년 5월 16일 심사완료

* 정회원, 전북대 항공우주공학과 대학원

** 정회원, 전북대 기계항공시스템공학부

연락처, E-mail : rotthee@chonbuk.ac.kr

전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14번지

*** 정회원, (주)코원텍

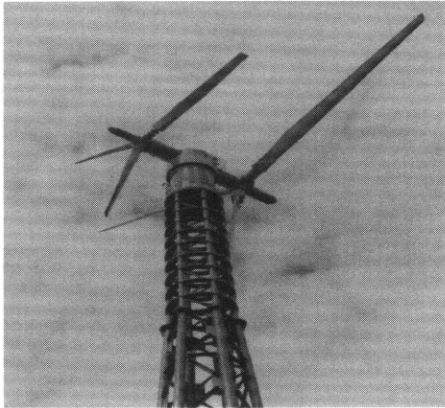


Fig. 1. Dual-Rotor Horizontal/Vertical Axis Wind Turbine Generator System

적이 미진하며, 국내 기술로서 개발된 풍력 발전 시스템 성능 해석 시뮬레이션 프로그램 또한 전무한 실정이다. 그러나 최근 일반적인 수평축 풍력 발전 시스템 뿐 아니라 Fig. 1에 보이는 바와 같은 새로운 개념의 이중 로터 풍력 발전 시스템의 성능을 예측하기 위한 기초적인 연구가 진행되고 있다[7,8].

본 논문에서는 이중 로터 풍력 발전 시스템의 성능 해석에 관한 연구로써 전체 풍력 발전 시스템의 정상 상태 및 과도 응답 특성 분석을 수행하였다. 로터 블레이드의 공기역학적 모델링에 있어서 가장 보편적인 기법으로 쓰이는 블레이드 요소-모멘텀 이론(Blade Element-Momentum Theory)[9,10]에 근거한 이중 로터 풍력 발전 시스템의 공력을 계산하였고, 다몸체 역학을 이용하여 로터 블레이드, 저속 및 고속 회전축, 기어 시스템, 발전기를 포함하는 전체 시스템을 구성하였다. FORTRAN 기반의 비선형 시뮬레이션 프로그램을 작성하였고, 이를 이용하여 이중 로터 풍력 발전 시스템의 각종 응답 특성 분석을 수행하였다. 특히 이중 여자 유도 발전기를 탑재한 경우 무부하 및 부하 상태에서의 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 정격 풍속 이상에서 로터의 과회전 방지 및 출력 안정화를 위한 피치 제어 전략을 수립하였으며, 비선형 시뮬레이션을 통하여 성능을 확인하였다.

II. 기본 공력 이론

2.1 블레이드 요소-모멘텀 이론

블레이드 요소-모멘텀 이론은 Fig. 2에 보이는 바와 같이 블레이드의 길이 방향으로 거리 r 에

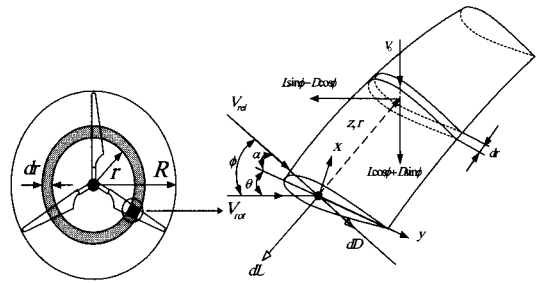


Fig. 2. Geometrical Configuration and Velocity Relationship

서 폭 dr 을 갖는 블레이드 요소에 대해 블레이드 단면 에어포일의 양력 및 항력 등의 공력 자료, 시위 길이 및 블레이드 길이, 피치각, 회전 속도 및 풍속 등을 입력하여, 각 단위 요소의 회전에 의해 생성되는 고리를 지나는 공기의 모멘텀 변화에 따른 공력을 블레이드의 길이 방향을 따라 적분하여 계산하는 방법이다[11]. 이때 단위 요소의 회전에 의해 생성되는 고리는 주의의 다른 고리와는 간섭이 없다는 가정이 적용된다. 상세한 수식 유도 과정 및 풍력 발전의 기본 수식들은 참고문헌[12]에 상세히 제시되어 있다.

2.2 등가후류모델을 이용한 성능예측

본 논문에서 고려하는 이중 로터 풍력 발전 시스템은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 보조 로터를 Upwind 방향으로, 주 로터를 Downwind 방향으로 위치시켜 기어 시스템에 의해 각 로터가 상호 역회전하도록 구성되어 있다[13,14]. 보조 로터 회전면에서의 자유 흐름은 로터 블레이드에 의한 에너지의 흡수로 유속이 감소하고 유관이 확장하게 되며, 이러한 유동의 특성을 파악하는 것은 본 논문에서 고려하는 이중 로터 풍력 발전 시스템의 이해와 출력 특성 및 성능 해석을 위한 중요한 자료가 된다[12].

본 논문에서는 보조 로터를 통과한 후류의 속도 변화, 즉 후류 위치 및 반경 방향으로의 속도 변화를 고려하지 않는 에너지 등가 개념(Energy Equivalent Concept)을 이용한 성능 예측 이론을 제안하였다. Fig. 3에 보이는 바와 같이 보조 로터를 통과한 후 주 로터에 도달하는 흐름은 후류의 영향 및 상호 간섭으로 인하여 복잡한 속도 특성을 갖는다. 본 논문에서는 간단하게 보조 로터에 의해 감속되는 유동 영역과 주 로터에서 보조 로터에 해당하는 면적을 제외한 영역을 감속되지 않은 유동 영역으로 나누었다. 이때 동일한 에너지를 갖는 주 로터 평균 유속을 다음과 같이

계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho U_M^\beta A_A + \frac{1}{2} \rho U_{A_\infty}^\beta (A_M - A_A) \\ = \frac{1}{2} \rho U_{M_\infty}^\beta A_M \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 공기 밀도이며, A_M 과 A_A 는 각 로터의 회전면적, U_{M_∞} 과 U_{A_∞} 는 각 로터의 자유 흐름 풍속 그리고 U_M 은 보조 로터 뒷면의 감속된 풍속이다. 식 (1)의 양변을 정리하여 주 로터 면에서의 평균 풍속으로 표현하면

$$U_{M_\infty}^\beta = U_M^\beta \frac{A_A}{A_M} + U_{A_\infty}^\beta \left(1 - \frac{A_A}{A_M}\right) \quad (2)$$

와 같고, 모멘텀 이론에 의해 로터 뒷면에서 회전에 의한 영향이 없다고 할 때 이상적으로 감속되는 풍속 $U_M = (2/3)U_{A_\infty}$ 을 대입하여 정리하면

$$U_{M_\infty} = U_{A_\infty} \sqrt[3]{1 - \frac{19}{27} \frac{A_A}{A_M}} \quad (3)$$

와 같다[10]. 본 논문에서는 이러한 에너지 증가 개념을 적용한 이중 로터 후류 모델을 이용하여 이중 로터 풍력 발전 시스템의 성능 예측을 수행하였으며, 단일 로터 풍력 발전 시스템과의 비교를 위해 이중 로터 풍력 발전 시스템의 동력 계수 D_P 를 다음과 같이 정의하였다.

$$D_P = \frac{P_A + P_M}{\frac{1}{2} \rho U_{A_\infty}^\beta A_M} \quad (4)$$

여기서 P_A 와 P_M 은 각각 주 및 보조 로터에서 발생하는 동력으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} P_A &= \frac{1}{2} \rho U_{A_\infty}^\beta A_A \cdot C_P \\ P_M &= \frac{1}{2} \rho U_{M_\infty}^\beta A_M \cdot C_P \end{aligned} \quad (5)$$

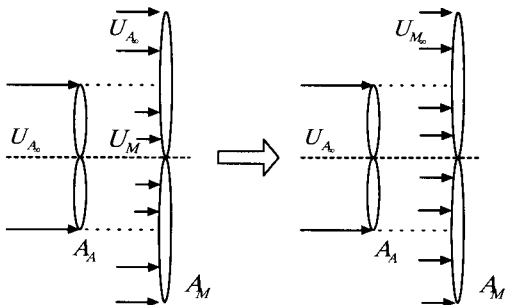


Fig. 3. Flow Interaction Between Rotors

위 식에서 C_P 는 단일 로터 풍력 발전 시스템의 동력 계수로서, 이때 주 및 보조 로터는 같은 공기역학적 성능을 갖는다고 가정하였다.

식 (4)에 식 (3)과 식 (5)를 대입하여 정리하면

$$D_P = C_P \left(1 + \frac{8}{27} \frac{A_A}{A_M}\right) \quad (6)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 같은 방법으로 단일 로터의 추력 계수 C_T 및 토크 계수 C_Q 와 이중 로터의 추력 계수 D_T 및 토크 계수 D_Q 의 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_T &= C_T \left\{ \frac{A_A}{A_M} + \left(1 - \frac{19}{27} \frac{A_A}{A_M}\right)^{\frac{2}{3}} \right\} \\ D_Q &= C_Q \left\{ \frac{A_A}{A_M} \frac{R_A}{R_M} + \left(1 - \frac{19}{27} \frac{A_A}{A_M}\right)^{\frac{2}{3}} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

본 논문에서 고려하는 이중 로터 풍력 터빈 시스템의 경우, 보조 및 주 블레이드의 길이비는 1:2(면적비는 1:4)로서, 이를 식 (3), (6) 그리고 식 (7)에 적용하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned} U_{M_\infty} &= 0.9375 U_{A_\infty} & D_P &= 1.074 C_P \\ D_T &= 1.129 C_T & D_Q &= 1.004 C_Q \end{aligned} \quad (8)$$

III. 정상 상태 성능 해석

3.1 풍력 터빈 시스템 구성 및 제원

본 논문에서 고려하는 이중 로터 풍력 발전 시스템의 성능 해석을 위하여, Fig. 3과 같이 각각 3개의 블레이드를 갖는 주 로터와 보조 로터만을 고려하였다. 블레이드 및 기타 주요 제원은 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Dual-Rotor Wind Turbine System Blade Properties

	Auxiliary Rotor	Main Rotor	Unit
No. of Blades	3	3	
Rotor Length	15.146	30.292	m
Rated Wind Speed	10.0	≃ 9.38	m/s
Tip Speed Ratio	7.0	≃ 7.46	
Power Output	1000		kW
Airfoil	NACA 63(3)-418		

본 논문의 이중 로터 풍력 발전 시스템에 사용되는 블레이드는 참고문헌[15]의 자료를 이용하였다. 전체 블레이드의 3차원 형상은 Fig. 4에 도시되어 있고, 시위 길이 및 비틀림각의 분포는 Fig. 5 및 Fig. 6에 각각 도시하였다. 블레이드 에어포일로 NACA63(3)-418을 사용하였고, 에어포일의 공력 특성, 즉 받음각에 따른 양력 및 항력 계수는 Fig. 7 및 Fig. 8에 각각 도시하였다. 풍력 발전 시스템의 특성상 저풍속 운전이나 시동 운전시 블레이드 특정 영역에서는 높은 받음각에 의한 실속 영역 상태에 있으므로 Viterna와 Corrigan의 확장 기법을 이용하여 높은 받음각 영역까지 공력 자료를 확장하였다[16].

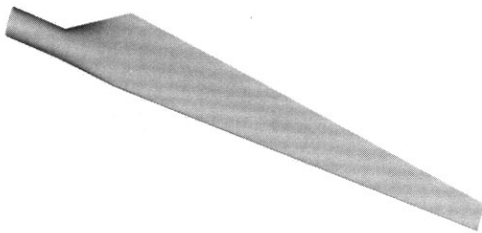


Fig. 4. 3D Blade Shape

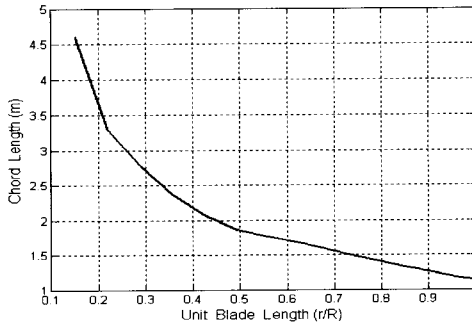


Fig. 5. Chord Length Distribution

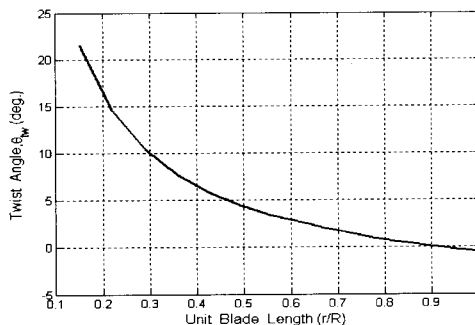


Fig. 6. Twist Angle Distribution

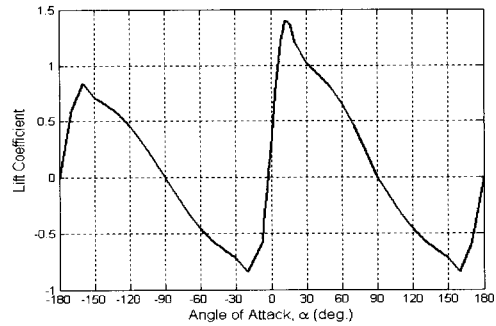


Fig. 7. NACA63(3)-418 Lift Coefficient

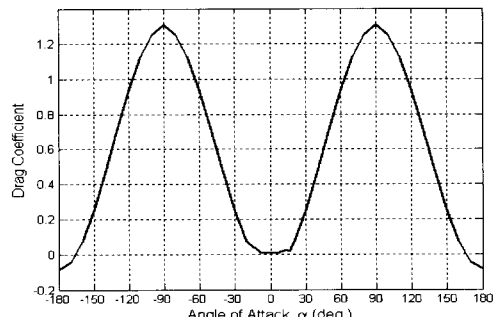


Fig. 8. NACA63(3)-418 Drag Coefficient

3.2 정상 상태 성능 예측

풍력 발전 시스템의 성능 예측에 있어서 풍속 및 끝단속도비(Tip Speed Ratio)에 따른 출력 특성의 예측은 매우 중요하다. 본 논문에서는 블레이드 요소-모멘텀 이론과 이중 로터 후류 모델에 근거하여 정상 상태 성능을 예측하였다. 시스템 제원은 참고문헌[15]에서 설계된 1MW급 단일 로터 풍력 발전 시스템용 로터를 주 로터로, 1/2 크기로 축소된 모델을 보조 로터로 사용하였다. 또한 주 및 보조 로터는 유사한 끝단속도비로 운용된다고 가정하기 위하여, 기어비를 2:1로 하였다(참고 : 1MW 단일 로터 풍력발전 시스템은 정격 풍속 12m/s를 기준으로 설계되었으며, 설계 끝단속도비는 7, 설계 블레이드 피치각은 0 deg.임).

Fig. 9와 Fig. 10은 풍속별 끝단속도비에 따른 공력에 의한 토크(Aerodynamic Torque)와 동력(Aerodynamic Power)을 보이고 있다. 토크는 끝단속도비 5.5, 동력은 끝단속도비 7에서 최대 출력이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 풍속이 10m/s 이상일 경우, 공력에 의한 동력이 1MW를 넘으며 따라서 적절한 출력 제어가 필요함을 의미한다.

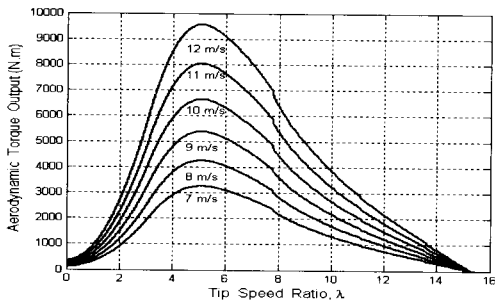


Fig. 9. Aerodynamic Torque Output vs. Tip Speed Ratio

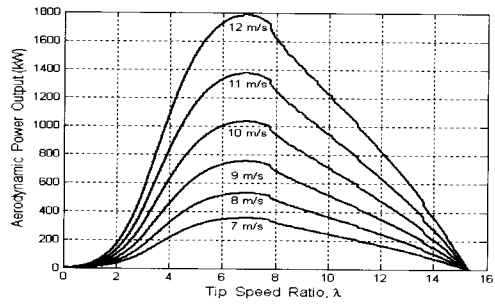


Fig. 10. Aerodynamic Power Output vs. Tip Speed Ratio

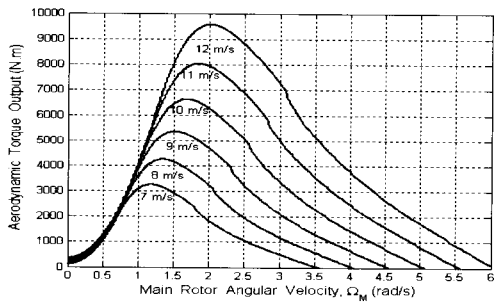


Fig. 11. Aerodynamic Torque Output vs. Angular Velocity

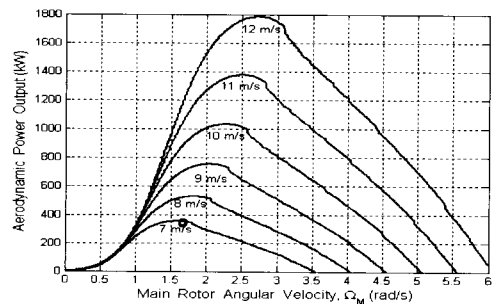


Fig. 12. Aerodynamic Power Output vs. Angular Velocity

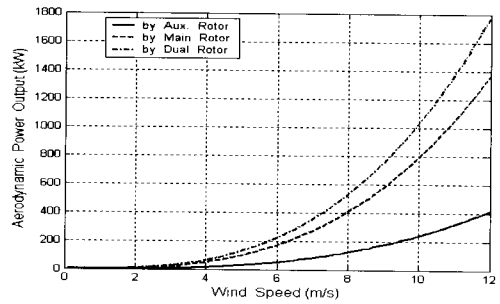


Fig. 13. Aerodynamic Power Output vs. Wind Speed

Fig. 11과 Fig. 12는 풍속별 발전기 회전 속도에 따른 공력에 의한 토크와 동력의 변화를 도시하고 있다. 이와 같은 정보는 로터 블레이드에서 취득 가능한 토크 및 출력으로서 발전기의 사양을 결정하는 기본 자료로 활용된다.

Fig. 13에는 풍속에 따라 주 로터와 보조 로터에서 발생할 수 있는 동력의 변화를 보이고 있다. 풍속이 증가함에 따라 보조 로터에 의한 출력의 증가보다 주 로터에 의한 출력의 증가가 더 크다. 10m/s의 풍속에서 주 로터는 출력의 약 80%를, 보조 로터에서 약 20%를 생산하고 있음을 알 수 있다.

IV. 과도 응답 성능 해석

4.1 풍력 발전 시스템 구성 및 제원

지금까지 발전기 모델이 없는 풍력 터빈 시스템에 대한 성능 예측을 보였으며, 지금부터는 실제 부하(발전기)가 있는 풍력 발전 시스템의 과도 응답 해석 결과를 보이고 있다. Fig. 14에 보이는 바와 같이 각각 3개의 블레이드를 갖는 주 로터와 보조 로터, 로터의 회전 운동을 발전기에 전달하는 저속 및 고속 회전축 그리고 수직으로 연결되어 있는 발전기 등 총 9개의 몸체로 구성된 시스템 모델링을 수행하였다[17,18]. 블레이드 및 기타 주요 구성품의 제원은 앞의 Table 1 및 Table 2와 같다.

본 논문에서는 발전기 모델로 현대중공업의 이중 여자 유도 발전기(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)[19]를 고려하였으며, 이 이중 여자 유도 발전기의 사양을 Table 3에 제시하였다. 그리고 Fig. 15와 Fig. 16에는 발전기의 회전 속도에 따른 발전기의 요구 토크 및 발생 동력 관계를 도시하였다.

본 논문에서 고려하는 이중 로터 풍력 발전 시스템을 Fig. 14와 같이 저속 및 고속 회전축 그리고 발전기가 기어 시스템에 의해 일정한 기어 비(Gear Ratio)로 서로 상대적인 운동을 구속하는 다몸체 시스템으로 간주하였으며, 따라서 각 회전축 및 발전기 사이에는 일정한 회전비가 정의되어야 한다. 이때, 보조 로터 및 주 로터 블레이드의 풍력 성능이 동일하고 또한 유사한 끝

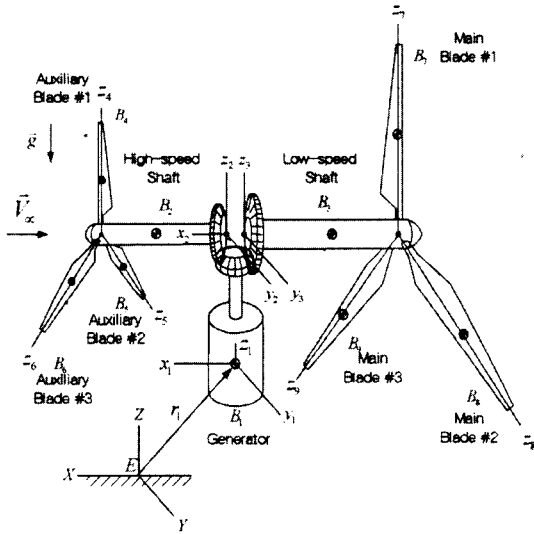


Fig. 14. Multibody Dynamics Model of Dual-Rotor Horizontal/Vertical Axis Wind Turbine Generator System

Table 2. Dual-Rotor Wind Turbine Generator System Mass Properties

Components	Mass Properties (Unit: $kg, kg \cdot m^2$)
Generator	$m_1 = 140$ $I_{xx} = 70$ $I_{yy} = 140$ $I_{zz} = 140$
High Speed Shaft	$m_2 = 360$ $I_{xx} = 720$ $I_{yy} = 1110$ $I_{zz} = 1110$
Low Speed Shaft	$m_2 = 600$ $I_{xx} = 2700$ $I_{yy} = 2600$ $I_{zz} = 2600$
Auxiliary Blade	$m_{4,5,6} = 240$ $I_{xx} = 18362.9$ $I_{yy} = 18352.1$ $I_{zz} = 10.8$
Main Blade	$m_{7,8,9} = 360$ $I_{xx} = 110177.5$ $I_{yy} = 110112.6$ $I_{zz} = 64.8$

Table 3. Generator Characteristics

Type	Property		Unit
	Doubly-Fed wound-rotor Induction Generator		
Speed Range	800~1600 (83.8~167.6)	RPM (rad/s)	
Over Speed	1920 (201.1)	RPM (rad/s)	
Mass	Rotator : 140	kg	
Rotor Inertia	70	$kg \cdot m^2$	

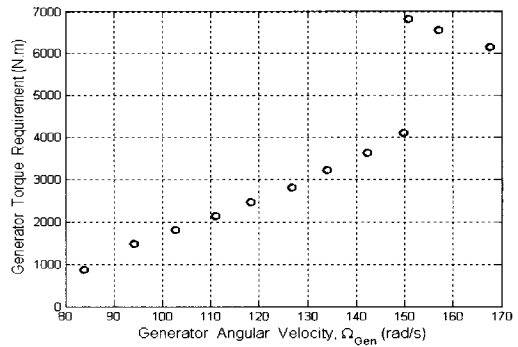


Fig. 15. Generator Torque Requirement

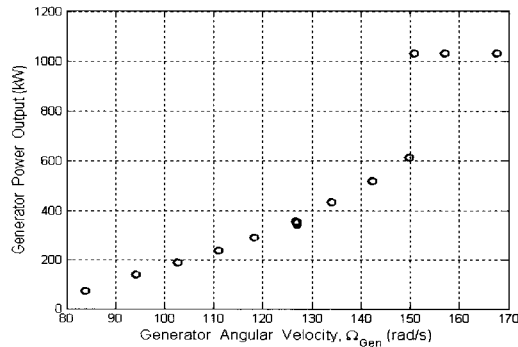


Fig. 16. Generator Power Output

단속도비로 운용된다고 가정하였다. 주 로터의 반경이 보조 로터 반경의 2배이므로 회전 속도를 다음과 같이 설정하였다.

$$\Omega_A : \Omega_M = 2 : 1 \quad (9)$$

위 식에서 Ω_A 와 Ω_M 은 각각 보조 로터와 주 로터 회전축의 회전 속도이다. 실제 후류 영향에 의하여 보조 및 주 로터에 입력되는 풍속의 크기가 다르므로 끝단속도비를 매우 정밀하도록 동일하게 유지할 수는 없지만 식 (8)에서 보인 바와 같이 풍속의 감속은 미미하므로 성능 해석에 미

치는 영향도 미미할 것으로 판단된다.

이중 로터 풍력 발전 시스템 모델과 현대중공업의 이중 여자 유도 발전기 모델과의 연계를 위해, 발전기와 주 로터 및 보조 로터간의 기어 비 (Gear Ratio)를 다음과 같이 계산하였다. 이중 여자 유도 발전기의 특성상 일정 회전 속도 이상에서 유효 발전이 시작된다. 본 논문에서 사용하는 이중 여자 유도 발전기의 회전속도 Ω_{Gen} 가 126.7rad/s일 때, Fig. 16에 보인 바와 같이 이때 약 356kW의 출력이 가능하다. 한편 이중 로터 풍력 발전 시스템으로부터 취득이 가능한 출력은 풍속 및 피치각의 조합에 따라 다르다. Fig. 11을 참조로 발전기의 유효 발전 개시에 적합한 풍속 및 주 로터 회전 각속도 Ω_M 를 각각 7m/s와 1.6rad/s로 설정하였다. 따라서 회전비는 다음과 같다.

$$\frac{\Omega_{Gen}}{\Omega_M} = \frac{126.7}{1.6} = 79.1875 \approx 80 \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)으로부터 보조 로터와 주 로터는 2:1, 발전기와 주 로터는 80:1, 보조 로터와는 40:1의 회전비를 갖도록 기어비를 설계하였다.

4.2 운전 영역 해석

이중 로터 시스템에 의한 공력 토크 및 가용 출력 그리고 발전기에 의한 부하 토크 및 발전 동력의 결과를 이용하여 전체 풍력 발전 시스템의 운전 영역을 예측할 수 있다. Fig. 17에는 이중 로터에 의한 공력 토크(Fig. 11) 및 발전기에서 필요한 부하 토크(Fig. 15)를, Fig. 18에는 이중 로터에 의한 가용 출력(Fig. 12) 및 발전기에서 생산하는 발전 동력(Fig. 16)을 발전기의 회전속도를 기준으로 하여 도시하였다.

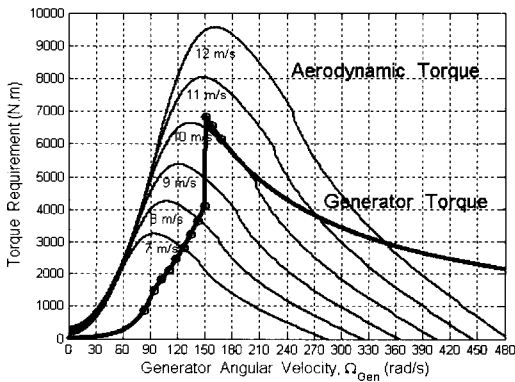


Fig. 17. Aerodynamic and Load Torque

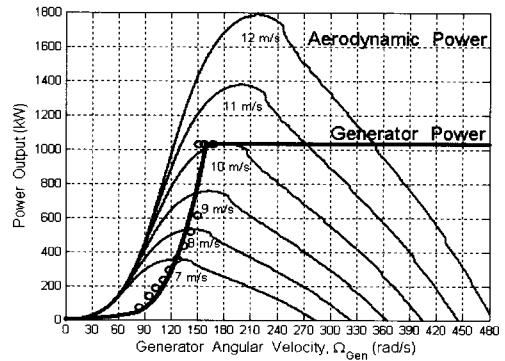


Fig. 18. Rotor and Generator Power

4.2.1 무부하 운전 응답 특성

풍력 발전 시스템의 운용중 예기치 못한 위급 상황의 발생이나 사고로 인하여 발전기와 계통 (Grid) 사이의 연결이 끊어질 수 있다. 이때 풍력 발전 시스템은 무부하 상태로 운전이 되며 바람에 의한 공력 토크의 지속적인 유입으로 로터 및 발전기는 가속하게 된다.

Fig. 17의 X축으로부터 이러한 무부하 상태에서 발전기의 최종 회전속도를 예측할 수 있다. 예를 들어 풍속 7m/s에서 무부하 운전시, 주 로터는 약 3.5rad/s로, 발전기는 약 280rad/s까지 가속되어 기계적/구조적 한계에 도달하게 되며, 이러한 과도한 운전상태는 보조 또는 주 로터 블레이드의 피치각 제어 또는 적절한 제동 장치로 제어할 수 있다. Fig. 19는 비선형 시뮬레이션을 통한 무부하 운전의 과도 응답을 보이고 있다. 정지 상태에서 7m/s의 바람이 불어올 때, 초기에 서서히 회전을 시작하여 급격하게 가속한 후 약 60초 후에 정상 상태에 도달하고 있다.

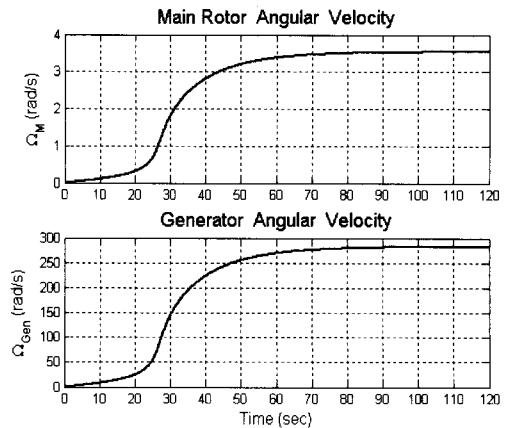


Fig. 19. Operation with No Load Torque at Constant Wind Speed

이는 초기에 각각의 블레이드들이 높은 받음각의 실속 영역에 있는 이유로 공력 효율이 작으나 로터의 회전수가 증가함에 따라 공력 효율이 증가하고 따라서 공력 토크도 급격하게 증가한다. 하지만 회전수가 증가함에 따라 블레이드의 항력 증가가 수반되어 결국 블레이드에 의한 공력 토크는 항력과 균형을 이루는 상황을 유지하게 된다.

4.2.2 부하 운전 응답 특성

정상적인 운전 상태, 즉 발전기에 의한 부하 토크 및 전력 생산이 이루어지는 상황에 대한 정상 상태 및 과도 응답을 분석하였다. Fig. 20에 풍속의 변화에 따른 발전기의 회전속도 및 발전기의 출력을 도시하였다. 정지 상태에서 풍속이 7m/s에서 10m/s를 거쳐 12m/s로 점차 계단 상승하는 풍향(Wind Profile)을 가정하였다. 풍속 변화에 따라 각 단계별 발전기의 회전속도는 약 120rad/s, 150rad/s, 360rad/s로 변하며, 이는 Fig. 17에서도 예측이 가능하다.

풍속이 10m/s 이상인 경우, 발전기로부터의 출력은 정격에 해당하는 1MW를 유지하지만, 풍속이 12m/s에 도달하면 발전기는 과회전 상태에 도달하며 적절한 피치 제어를 통하여 회전 속도를 줄여야 한다. 풍력 발전 시스템의 특징으로 풍속 영역에 따라 응답 특성이 다르다는 점이다. Fig. 20에 보이듯이, 풍속이 7m/s에서 10m/s로

증가하는 지점과 10m/s에서 12m/s로 증가하는 지점에서 시스템의 과도 응답 속도가 현저하게 다를 수 있으며, 이러한 특성은 풍속에 따른 피치 제어기 설계시 고려되어야 한다.

V. 피치 제어

5.1 피치 제어의 필요성 및 기본전략

앞에서 기술한 바와 같이 일정 풍속 이상에서는 발전기 또는 로터 시스템이 과회전 상태에 도달하게 되며, 이를 제어하지 않고 방치할 경우 풍력 발전 시스템의 기계적/구조적인 한계를 넘는 상태에서 운전하게 된다. 이중 여자 유도 발전기는 컨버터/인버터(Converter/Inverter)를 통한 전력 변환으로 정격 회전수 이상에서도 일정한 출력으로 내지만, 발전기의 회전자, 회전력을 전달하는 로터 회전축 등을 보호하기 위하여 일정한 회전 속도내에서 운용이 되도록 해야 하며, Table 3에 보인 바와 같이 800~1600RPM, 즉 84~168rad/s의 회전 속도 범위내에서 운용되어야 한다.

발전기의 회전 속도는 궁극적으로 로터 블레이드의 회전 속도에 연동되어 있으며 로터의 회전수는 풍속 및 블레이드 피치각에 의하여 결정된다. 본 논문에서 다루고 있는 이중 로터 풍력 발전 시스템의 경우, 보조 및 주 로터 블레이드 피치각 제어를 통한 회전수 조절이 가능할 것이다. 따라서 블레이드 피치각에 따른 성능 분석이 이루어져야 한다. 즉, 일정한 풍속에 대하여 보조 및 주 로터 블레이드의 피치각 변화시 발전기 출력 및 로터 회전수의 예측이 선행되어야 한다. Fig. 21은 풍속 12m/s에서 보조 및 주 로터 블레이드 피치각 조합에 따른 발전기의 정상 상태 회전수를 도시하였다. 보조 및 주 로터 블레이드 피치각을 모두 0도로 고정하였을 경우 발전기의 회전속도는 약 350rad/s에 이르게 되며 이는 앞서 시뮬레이션을 통하여 확인한 바 있다.

Fig. 17과 Fig. 18을 참조로 발전기의 회전속도가 약 150rad/s 이상일 경우 과회전 상태라 정의하면 Fig. 21로부터 발전기의 회전속도가 150rad/s로 유지되게 하는 피치각 조합을 찾을 수 있다. 여러 가지 조합의 가능성 중에서 1) 주 로터 피치각은 고정된 상태에서 보조 로터의 피치각만을 변경하거나 또는 2) 보조 로터 피치각은 고정된 상태에서 주 로터의 피치각만을 변경, 마지막으로 3) 보조 및 주 로터의 피치각을 동시에 변경하는 전략이 가능하다.

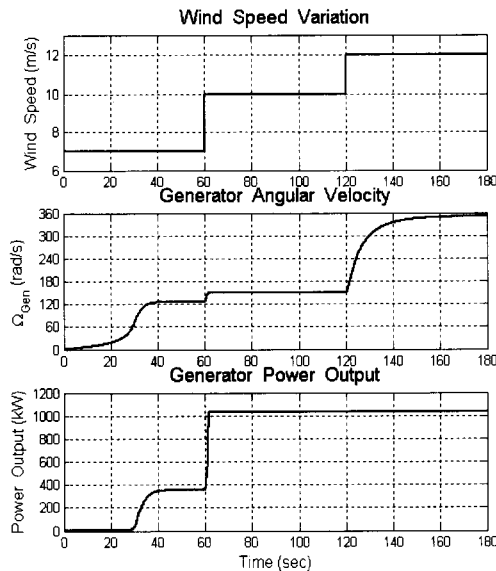


Fig. 20. Operation with Load Torque at Varying Wind Speed

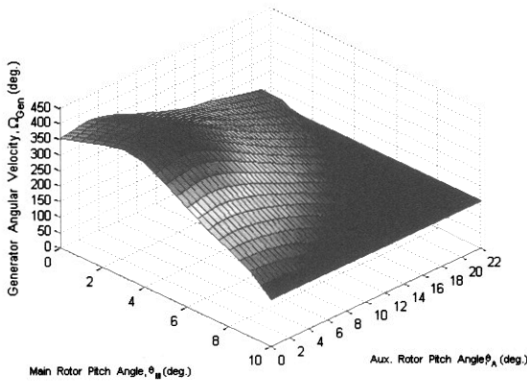


Fig. 21. System Performance with Different Combination of Main and Aux. Blade Pitch Angles

특정 전략의 선택 기준은 보조 및 주 로터 피치각 변경을 위한 서보 모터의 용량, 응답 속도, 제어 정밀도 등을 고려해야 한다. 예를 들어 Fig. 21에서 예측할 수 있듯이 주 로터 피치각 변경에 따른 출력 변화폭이 크며, 보조 로터 피치각 변화에 따른 출력 변화는 주 로터의 피치각 영역에 따라 다르다. 이러한 사항들을 기반으로 기본적인 피치 제어 전략을 구상해 보면 큰 단위 및 장주기의 풍속 변화시 주 로터 피치각 제어를 적용하고, 작은 단위 및 단주기의 풍속 변화시 보조 로터의 피치각 제어를 적용하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

이중 로터 풍력 발전 시스템의 피치 제어를 위하여 Closed-Loop형 피치 제어 알고리즘을 구성하였다. 피치각 제어 명령은 각 풍속별 발전기를 정격의 회전 속도로 유지시키는 피치각과 발전기가 과속도 영역에서 운전시 정격의 회전속도로 복귀할 수 있도록 하는 함수식으로 이루어져 있으며, 식 (11)과 같이 표현할 수 있다. 즉, 정격 풍속 이상에서 발전기의 회전 속도 제어를 위한 사전 지령(Feedforward Command)과 발전기의 과속 회전시 발전기의 회전 속도 제어를 위한 귀환 지령(Feedback Command)이다.

$$\theta_c = \theta^*(\bar{V}_\infty) + K(\Omega_{Gen} - \Omega_{Gen}^*) \quad (11)$$

여기서 θ_c 는 피치각 제어 명령이며, Ω_{Gen} 과 Ω_{Gen}^* 은 발전기의 회전속도 및 정격 회전속도를 나타낸다. 그리고 \bar{V}_∞ 는 일정 시간 동안의 풍속의 평균으로 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{V}_\infty = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V_\infty(t) dt \quad (12)$$

여기서 t 는 피치각 지령 시간, T 는 풍속의 평균 계산을 위한 Sampling 시간이다. 또한 식 (11)과 같은 피치각 제어 명령은 비선형 시뮬레이션 프로그램을 통한 풍력 발전 시스템의 피치 제어에 적용시 피치각 제어 명령 적용 과정을 작동기(Actuator) 모델로 고려하여, 식 (13)과 같은 1차 지연 시스템(First Order Delay System)으로 간주하였다.

$$\frac{\theta}{\theta_c} = \frac{1}{\tau_c s + 1} \quad (13)$$

여기서 θ 는 풍력 발전 시스템의 피치 제어 시스템 적용 피치각이며, τ_c 는 작동기의 시상수이다.

5.2 시뮬레이션 결과

풍속이 지속적으로 불규칙하게 변할 때, Closed-Loop형 피치각 제어를 통하여 주 로터 및 보조 로터를 개별적으로 제어할 경우 이중 로터 풍력 발전 시스템의 응답 특성을 비선형 시뮬레이션 프로그램을 통하여 분석하였다.

5.2.1 주 로터를 제어하는 경우

지속적으로 변하는 풍속에서 Closed-Loop에 의하여 주 로터만을 제어하였을 경우 반응하는 이중 로터 풍력 발전 시스템의 운동 특성을 보이고 있다. 풍황(Wind Profile)이 Fig. 22와 같이 지속적으로 변할 때, 피치각 제어 지령을 위한 풍속은 Fig. 23과 같이 10초 Sampling 시간으로 평균화한 풍속을 적용하였다. Fig. 24에는 풍속이 증가하고 150초에서 피치 제어를 시작할 때의 주 로터 블레이드의 피치각 지령과 실제 적용 피치각을 도시하였으며, 작동기로 가정한 피치 제어 모터의 시상수로 인하여, 약간 지체된 실제 적용 피치각을 보이고 있다. Fig. 25에는 피치각 제어 시작후 약 20여초 후에 발전기의 회전속도가 정상 운전 속도로 회복하였음을 알 수 있다.

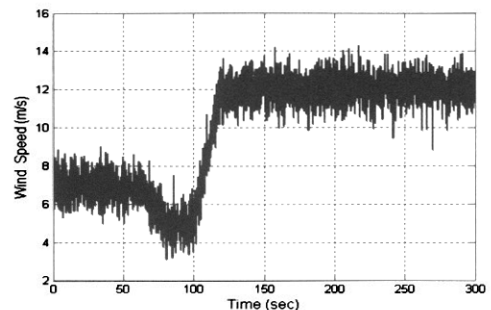


Fig. 22. Continuously Changed Wind Speed

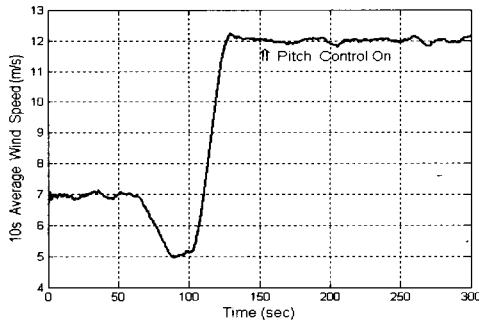


Fig. 23. Wind Speed Profile

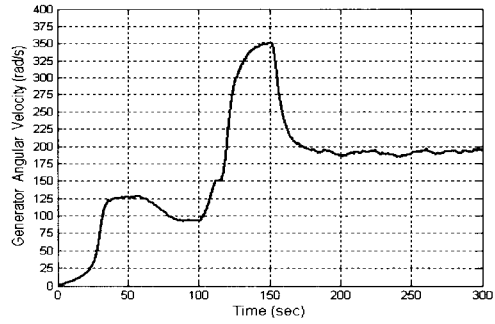


Fig. 27. Generator Angular Velocity Time History

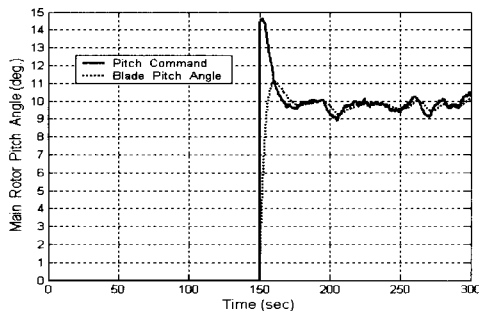


Fig. 24. Main Rotor Pitch Command Time History

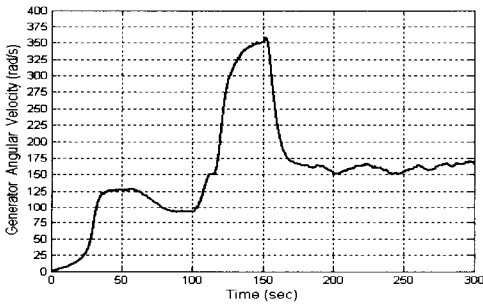


Fig. 25. Generator Angular Velocity Time History

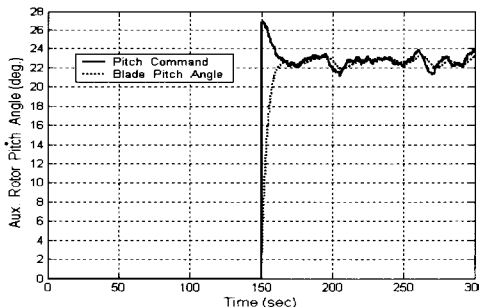


Fig. 26. Aux. Rotor Pitch Command Time History

5.2.2 보조 로터를 제어하는 경우

다음에는 보조 로터만을 제어하였을 경우의 풍력 발전 시스템의 운동 특성을 도시하였다. Fig. 21에서 발전기의 회전속도를 정상으로 유지시키는 피치각이 Fig. 26과 같이 약 22도가 됨을 예상할 수 있으며, 이를 Fig. 27과 같은 시뮬레이션 결과를 통하여 확인하였다. 보조 로터만으로 발전기의 회전 속도 제어를 하려면 주 로터 피치각에 비하여 약 2배의 피치각 회전이 필요하며, 이는 풍력 발전 시스템의 설계시 고려되어야 할 사항이다.

동일한 풍속 변화 모델을 적용한 시뮬레이션 결과인 Fig. 25와 Fig. 27을 비교할 때, 위 두 가지 전략의 차이점은 응답 속도이며, 앞서 분석한 바와 같이 주 로터 피치 제어의 응답 속도가 보조 로터에 비해 빠르고, 효율적임이 확인되었다.

5.2.3 주 로터 및 보조 로터 동시 제어

Fig. 22에 보인 바와 같이 계속적으로 변하는 풍속에 대응하여 주 로터와 보조 로터 피치각의 다양한 조합을 이용하면 발전기의 출력은 물론 회전수를 일정하게 제어할 수 있다. 주 또는 보조 로터를 개별적으로 제어할 때보다 두 로터를 동시에 제어하는 것이 더욱 효과적임을 예상할 수 있으며, 두 로터간 상호 협조적인 공력 성능의 조화를 통하여, 더욱 효율적인 시스템 제어가 이루어 져야겠다.

VI. 결 론

본 논문에서는 이중 로터 풍력 발전 시스템의 성능 특성 해석을 위하여, 풍력 발전 시스템의 로터 블레이드에 대한 공기역학적 모델링의 방법으로 블레이드 요소-모멘텀 이론을 이용하여 공력 계산을 수행하였다. 특히 에너지 증가 개념을

적용한 후류 모델에 근거하여 이중 로터 풍력 발전 시스템과 단일 로터 풍력 발전 시스템의 성능을 비교하였다. 발전기는 (주) 코원텍에서 제공한 현대중공업의 이중 여자 유도 발전기 자료 그리고 블레이드 제원 및 공력 특성은 전북대학교 공기역학연구팀에서 제공한 자료를 사용하였다. 그리고 다몸체 역학을 기반으로 로터 블레이드, 저속 및 고속 회전축, 기어 시스템 그리고 발전기를 포함하는 전체 시스템 모델링을 작성하여, 성능 해석을 수행하였다.

풍력 발전 시스템의 정상 상태 성능 해석을 위하여 풍속 및 끝단속도비에 따른 각 구성품의 회전 속도 및 발전기 출력 전력을 예측하였다. 또한 FORTRAN 기반의 비선형 시뮬레이션을 이용하여 풍속 변화시 시스템의 무부하 및 부하 상태에서의 과도 및 정상 상태 응답을 고찰하였다.

정격 이상의 풍속에서 로터 및 발전기의 과회전 상태를 방지하기 위하여 보조 및 주 로터 블레이드의 피치 제어가 필요함을 예시하였고, 초보적인 Closed-Loop형 피치 제어 전략을 제시하였다. 피치 제어 전략에 있어서 사전에 분석된 성능 분석 자료를 근거로 풍속에 따른 주 또는 보조 로터 블레이드의 제어 방식이 가능함을 비선형 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

향후 연구에서는 타워의 높이와 로터의 회전에 따른 블레이드 고도의 변화에 대한 밀도 보정, 타워 그림자 효과(Tower Shadow Effect) 그리고 주 및 보조 로터간 후류 모델의 개선, 블레이드 Coning Effect, 타워 진동 등 출력 성능에 영향을 미치는 요인들을 고려하여 더욱 실제에 가까운 모델링을 구성할 계획이다.

후 기

이 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 에너지관리공단 주관으로 수행된 'Dual-rotor 풍력 발전 시스템 성능 평가 및 피치 제어에 관한 연구'의 일부임을 밝히며 연구비 지원에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 최재승, 김규홍, 이정태, "한국형 풍력터빈의 요구조건 검토", 한국항공우주학회지, 제30권, 제1호, 2002, pp. 165-172.
- 2) <http://www.gihoo.or.kr/>
- 3) Naruhito, K., Tomoyuki, M. and Sayosi, Y., "Modeling and Analysis of the NEDO 500-kW Wind Generator", Electrical Engineering in Japan, Vol 135, No. 3, 2001, pp. 37-47.
- 4) Ph. Delarue, A. Bouscayrol, A. Tounzi, X. Guillaud and G. Langicu, "Modeling, control and simulation of an overall wind energy conversion system", Renewable Energy 28, 2003, pp. 1169-1185.
- 5) <http://www.garradhassan.com/>
- 6) <http://wind.nrel.gov/designcodes/>
- 7) (주) 코원텍, "30kW급 Dual-rotor 풍력발전기 실증 연구", 산업자원부, 2002.
- 8) Sung Nam Jung, Tae-Soo No, Ki-Wahn Ryu, "Aerodynamic performance prediction of a 30kW counter-rotating wind turbine system", Journal of Renewable Energy, Vol. 30, Issue 5, April 2005, pp. 631-644.
- 9) R. T. Griffiths, "The effect of aerofoil characteristics on windmill performance", Aeronautical Journal, Paper No. 251, July, 1977, pp. 322-326.
- 10) David A. Spera, Wind Turbine Technology, ASME Press, 1994, Ch. 5.
- 11) Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, Handbook of wind energy, John Wiley & Sons, 2001, Ch. 3.5.
- 12) 동경민, 정성남, "후류영향을 고려한 상반회전 풍력발전 시스템의 공력성능 예측에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제30권, 제7호, 2002, pp. 20-28.
- 13) 동경민, 상반회전 풍차 블레이드의 공력성능 및 구조 동역학 해석에 관한 연구, 석사학위논문, 전북대학교, 2002.
- 14) 윤성준, Upwind/Downwind 방식의 수평축 풍력터빈에 대한 풍동 성능 시험 연구, 석사학위논문, 전북대학교, 2003.
- 15) 이창수, 1MW급 수평축 풍력터빈 블레이드의 최적 외형 설계 및 공력 하중 해석, 석사학위논문, 전북대학교, 2005.
- 16) L. A. Viterna, R. D. Corrigan, "Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines", Proceedings, Workshop on Large Horizontal Axis Wing Turbine, NASA, P-2203, DOE Publication, CONF-810752, Cleveland, OH, NASA Lewis Research Center, pp. 69-85, 1981.
- 17) 노태수, "다몸체 시스템의 운동 방정식 형성 방법", 한국항공우주학회지, 제22권, 제6호, 1994, pp. 134-140.
- 18) 조윤모, 노태수, 민병문, 이현화, "이중 로터 풍력발전 시스템 모델링 및 시뮬레이션에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제32권, 제6호, 2004, pp. 87-95
- 19) Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Specification for Three Phase Induction Generator, Ref. APP-44653RM11675, 2004. 12.