
수평 병렬형 풍력 발전기의 요각 및 MPPT 제어

이국선* · 최 익** · 조 황* · 백주훈*

MPPT and Yawing Control of a New Horizontal-Axis Wind Turbine with Two Parallel-Connected Generators

Kook-Sun Lee* · Ick Choy** · Whang Cho* · Ju-Hoon Back*

요 약

범용적으로 사용되고 있는 수평형 풍력 터빈(HAWT)은 블레이드가 장착된 터빈이 회전부인 너셀에 고정되어 타워의 최상단에 지지되는 구조이다. 터빈에서 생산되는 전력은 너셀 내부에서 증속기를 통하여 발전기로 들어가게 된다. 발전기에서 생산되는 전력은 타워를 통해서 지상과 송전선으로 연결되므로 너셀의 요잉이 발생하는 경우 송전선의 꼬임이 발생하게 된다. 따라서 이를 방지하기 위한 슬립링이나 추가적인 요잉 제어 알고리즘이 필요한 단점이 있다. 제안하는 새로운 구조의 HAWT는 베벨기어와 증속축을 이용하여 송전선 문제를 해결하였다. 또한, 병렬로 접속된 두개의 발전기를 이용하여 요잉이 용이할 뿐 아니라 생산 전력을 분산시킴으로써 인버터의 용량을 줄일 수 있다. MPPT 알고리즘과 요잉 제어를 수행하는 시뮬레이션을 통해서 제안하는 구조가 풍력 발전에 효과적임을 보였다.

ABSTRACT

Commonly used horizontal-axis wind turbines (HAWT) have the following structure: two or three blades, a nacelle which contains power converting equipments, generators, and a tower which supports the nacelle. The generated power is transmitted from the nacelle to the ground. Due to this structure, the power transmission lines are twisted when the nacelle is yawing. Thus, slip ring or additional yaw control mechanism is required. We propose a new structure of HAWT which is free of this transmission line problem. Moreover, the size of inverter can be reduced since two generators are connected in parallel in our mechanism so that power is distributed. A controller for yawing is developed so that it works in harmony with the controller for power generation. A MPPT (Maximum Power Point tracking) algorithm is implemented for the proposed system and efficiency of the system is validated by simulation.

키워드

Wind turbine, HAWT, VAWT, MPPT
풍력 발전기, 수평형 풍력 발전기, 수직형 풍력 발전기, 컨버터, 인버터

1. 서 론

풍력 터빈은 1980년대부터 활발히 연구가 진행되었

으며, 80-m 높이의 풍력 터빈이 지구 표면적의 13% 정도에 해당하는 해안가에 설치 될 경우 세계 전력 소모량의 5배에 해당하는 전력을 생산할 수 있으므로

* 광운대학교 제어계측학과(ks1222@gmail.com)

** 교신저자 : 광운대학교 제어계측학과(ickchoy@kw.ac.kr)

접수일자 : 2011. 12. 13

심사(수정)일자 : 2011. 12. 24

게재확정일자 : 2012. 01. 25

그 잠재적인 가치가 매우 크다고 할 수 있다[1].

풍력 터빈은 바람을 이용하여 기구적으로 발생하는 전력을 전기적으로 변환하여 공급해야 하므로 이를 용이하게 하기 위해 다양한 구조가 연구되어 왔다[2].

터빈의 기구적인 형태에 따라서 크게 수직형풍력발전기(VAWT)와 수평형풍력발전기(HAWT)로 나뉠 수 있다[3]. VAWT의 경우 발전기가 지상에 설치되므로 로터의 회전으로 인한 추가적인 요잉 메카니즘이 필요 없다는 장점이 있으나 HAWT에 비하여 기동 토크 작고, 유지 보수가 쉽지 않다는 단점으로 인해서 HAWT가 더 많이 쓰이고 있다. 반대로 HAWT의 경우에는 발전기가 타워 최상단의 너셀 내부에 설치되므로 송전선 꼬임을 방지하기 위한 슬립링이나 추가적인 요잉 메카니즘이 필요하다[4-9].

이러한 관점에서 그림 1의 제안하는 수평 병렬형 풍력 터빈은 좋은 해결책이 될 것이다. 블레이드와 로터는 기존의 HAWT와 동일하게 설치된다. 또한, 두 대의 발전기는 VAWT와 같이 지상에 설치되어 송전선 꼬임을 해결할 수 있다. 로터에서 생산된 동력은 지상과 수평하게 설치된 두개의 베벨 기어와 수직으로 설치된 중공축을 통해서 지상의 발전기로 전달된다.

그림 2의 개념도에서 보이는 것과 같이 상단의 수평 베벨기어와 발전기 한 대가 샤프트를 통해서 연결되어 있으며, 이 샤프트는 중공축 샤프트를 통과하고 있다. 중공축 샤프트는 다른 한 대의 발전기와 상단의 수평 베벨기어로 연결되어 있다. 두 대의 수평 베벨기어는 로터와 수직 베벨기어로 연결되어 발전기는 서로 반대방향과 정방향의 회전이 모두 가능 하도록 되어 있다. 이러한 구조와 제안하는 병렬형 발전기의 제어 방법을 통하여 별도의 추가적인 메카니즘 없이 요잉 제어가 가능하다.

하는 경우 두 대의 발전기(G1,G2)는 서로 반대 방향으로 회전한다. 두 번째로 로터가 회전하지 않고, 너셀만 회전하는 경우 발전기는 같은 방향으로 회전한다. 앞서 설명한 내용은 속도 수식 1과 마찰력을 고려

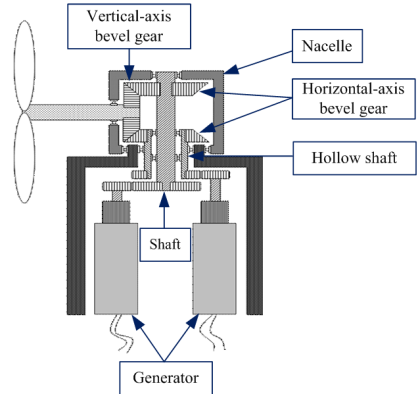


그림 1 제안하는 풍력 터빈
Fig. 1 Proposed wind turbine

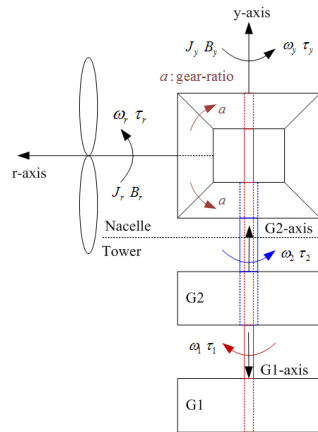


그림 2. 제안하는 풍력 터빈의 개념도
Fig. 2 Overview of proposed wind turbine

하지 않는 경우 토크 수식 2로 표현 할 수 있다.

II. 제안하는 풍력 터빈

2.1. 제안하는 풍력 터빈의 메카니즘

동작의 이해를 돕기 위해서 두 가지 간단한 상황을 고려한다. 첫 번째로 너셀이 y-축(요축)으로 회전하지 않고, 바람에 의해서 로터만 r-축(로터 축)으로 회전

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a-1 & 1 \\ a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2a} \begin{bmatrix} 1-a \\ 1 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 (ω_1, ω_2) , (τ_1, τ_2) 는 각각 발전기의 속도와 토크이고, (ω_r, ω_y) 와 (τ_r, τ_y) 는 각각 바람으로 인해 발생하는 로터 축, 요축의 속도와 토크이다.

수식 1,2를 이용하여 수식 3,4를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_y \end{bmatrix} = \frac{1}{2a} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -a & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & a \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

초기 상태에서 수식 4로부터 τ_1, τ_2 가 동일하게 제어되는 경우 τ_y 는 발생하지 않으므로 너셀은 회전하지 않는다. 반대로, τ_1, τ_2 가 동일하게 제어되지 않는 경우 τ_y 가 발생하여 너셀이 회전하게 된다.

상기의 두가지 동작이 터빈이 동작하면서 복합적으로 나타나게 되며 거의 효율을 고려하지 않은 경우 모든 동력은 두 대의 발전기로 분배 되므로 한 대의 발전기를 사용 할 때와 동일한 용량의 인버터로 두 배의 전력을 생산 할 수 있다.

또한, 이러한 구조를 이용하여 제안하는 풍력 터빈은 요잉 제어를 효과적으로 수행 할 수 있다. 이는 다음과 같이 간단히 설명 될 수 있다. 초기에 로터가 일정 속도로 회전하고 있는 경우($\omega_r = \omega_0$), 발전기의 회전 속도(ω_1^0, ω_2^0)는 수식 5와 같다. 여기서 발전기의 축 방향이 서로 반대임을 유의하고 설명의 편의상 앞으로 증속비, a 는 1:1로 가정한다.

$$\omega_0 = \begin{bmatrix} \omega_1^0 \\ \omega_2^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

위와 같이 발전기는 자연스럽게 서로 반대 방향으로 회전한다. 여기서 요잉 토크가 바람에 의해서 발생한 경우, 너셀의 속도, $\omega_y = \Delta\omega$ 가 발생하여 발전기의 회전 속도는 초기 속도, ω_0 로부터 새로운 속도, ω_1 으로 변하게 되며 아래와 같이 표현 된다.

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} \omega_1^1 \\ \omega_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_0 - \Delta\omega \\ \omega_0 + \Delta\omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

수식 5, 6으로부터 발전기는 로터로부터 전달되는 동력을 유지시키면서 자연스럽게 너셀의 요잉이 가능함을 알 수 있다.

2.2. 기존 방식과의 차이점

2.1절에서 설명한 내용과 기존 방식과의 차이점을 기술한다. 그림 3은 기존의 수동 요잉 방법을 표현한 것이다. 그림에서 보이는 것과 같이 풍력터빈에 꼬리 날개(Tail Hinge)를 장착하여 바람 방향과 블레이드가 서로 마주 볼 수 있도록 요잉 토크를 발생 시킨다. 이러한 구조는 소형 풍력 터빈에서 사용되고 있다. 그림 4는 기존의 능동 요잉 방법으로 요잉 모터를 이용하여 수동적인 방법보다 정확한 제어가 가능 하

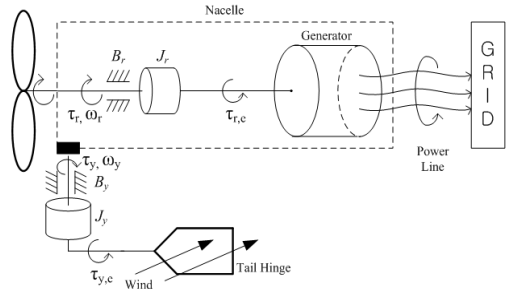


그림 3. 기존의 수동 요잉 메카니즘
Fig. 3 Conventional passive yaw mechanism

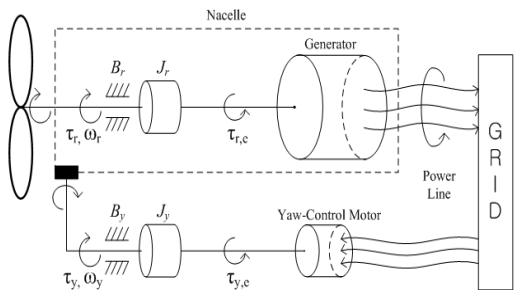


그림 4. 기존의 능동 요잉 메카니즘
Fig. 4 Conventional active yaw mechanism

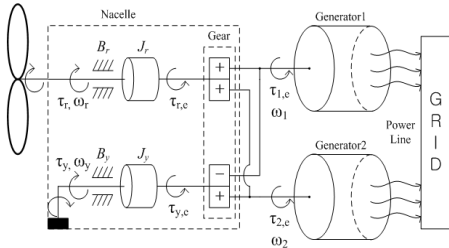


그림 5. 제안하는 요잉 메카니즘
Fig. 5 Proposed yaw mechanism

지만 이를 위한 추가적인 제어가 필요하고 전력이 소비된다. 여기서 두가지 방법 모두 너셀의 요잉으로 인한 송전선 꼬임 현상이 발생한다.

반면에 제안하는 그림 5의 풍력 터빈은 발전기 나셀 내부가 아닌 지상에 설치되므로 송전선 꼬임 현상으로부터 자유롭다. 제안하는 풍력 터빈의 동역학은 수식 7과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_r - \tau_{e,r} &= J_r \dot{\omega}_r + B_r \omega_r \\ \tau_y - \tau_{e,y} &= J_y \dot{\omega}_y + B_y \omega_y \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $(\tau_{e,r}, \tau_{e,y})$ 는 각각 발전기의 토크($\tau_{1,e}, \tau_{2,e}$)로부터 생성되는 로터축, 요축 토크이다.

III. 발전기와 터빈 모델

3.1. PMSM

그림 6은 표면 부착형 영구자석 동기 전동기 (SPMSM)으로 본 연구에서는 두 대의 SPMSM이 발전기로 사용되었다. SPMSM의 3상 전압 방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} v_a &= R_s i_a + L_s \frac{di_a}{dt} - K_e \omega_m \sin(\theta_e) \\ v_b &= R_s i_b + L_s \frac{di_b}{dt} - K_e \omega_m \sin(\theta_e - \frac{2}{3}\pi) \\ v_c &= R_s i_c + L_s \frac{di_c}{dt} - K_e \omega_m \sin(\theta_e + \frac{2}{3}\pi) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 L_s, R_s 는 각각 고정자 내부 인덕턴스, 저

항 값이고, v, i 는 각각 고정자 축의 전압, 전류, K_e 는 역기전력 상수이다.

좌표 변환을 통해서 수식 8의 3상 전압 방정식을 고정자 좌표계($\alpha-\beta$)로 변환 할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_\alpha &= R_s i_\alpha + L_s \frac{di_\alpha}{dt} - K_e \omega_m \sin(\theta_e) \\ v_\beta &= R_s i_\beta + L_s \frac{di_\beta}{dt} + K_e \omega_m \cos(\theta_e) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $\omega_m, \omega_e, \theta_e$ 는 각각 기계적인 각속도, 전기적인 각속도, 전기각이다. 또 다른 좌표변환을 사용하여 회전자 좌표계($d-q$)로도 변환 할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_d &= R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_s i_q \\ v_q &= R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_s i_d + K_e \omega_m \end{aligned} \quad (10)$$

수식 10의 d 축 전류가 0으로 제어되는 경우 토크, τ_e 는 아래와 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$\tau_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f i_q \quad (11)$$

여기서 λ_f 는 회전자 영구 자석의 자속이고, P 는 영구자석의 극 수이다. ω_e 와 ω_m 은 $\omega_e = (P/2)\omega_m$ 의 관계를 갖는다.

수식 10과 같이 표현되는 회전자 좌표계의 $d-q$ 축 전류는 전향보상과 decoupling을 통하여 전류 제어기 설계를 용이하게 할 수 있다. 이를 위한 보상 입력,

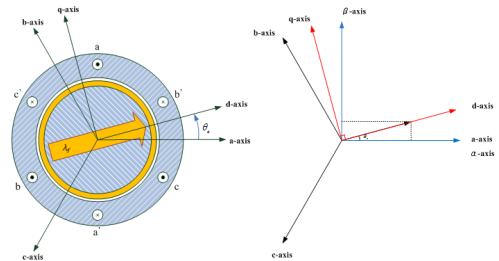


그림 6. 표면 부착형 영구자석 동기 전동기(SPMSM)
Fig. 6 Surface mounted permanent magnet synchronous machine

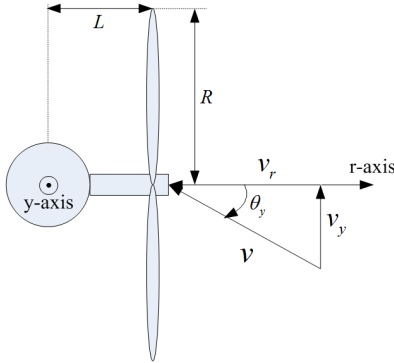


그림 7. 위쪽 방향에서 바라본 터빈 형상
Fig. 7 Top view of the wind turbine

(v_d^c, v_q^c) 는 아래와 같이 주어진다.

$$v_d^c = -\omega_c L_s i_q, \quad v_q^c = \omega_c L_s i_d + K_e \omega_m \quad (12)$$

3.2. Wind Turbine

이 절에서는 요측 각도를 고려한 터빈 모델을 설명한다. 그림 7에서 보이는 것과 같이 바람의 방향과 터빈의 요각에 의해서 바람의 속도는 수식 13과 같이 로터 축과 요측으로 분산 된다.

$$\begin{aligned} v_r &= v \cos(\theta_y) \\ v_y &= v \sin(\theta_y) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 v 는 바람의 속도, θ_y 는 터빈의 로터 축과 바람 방향의 각도이다.

로터에서 바람으로 생성되는 전력은 출력 계수, C_p 에 비례하는 것으로 알려져 있으며 요측으로도 이와 비슷하게 C_p' 에 비례할 것으로 가정한다. 따라서 아래와 같이 터빈의 생산 전력을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_r &= 0.5 C_p \rho_a A_r v_r^3 \\ P_y &= 0.5 C_p' \rho_a A_r v_y^3 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 ρ_a 는 공기 밀도, A_r , A_y 는 각각 로터축과 요측의 공기와 접촉 면적이다.

출력 계수(C_p, C_p')는 각각 수식 15와 같이 3차의

방정식으로 간략화 되었다.

$$\begin{aligned} C_p(\lambda_r) &= C_{p,3} \lambda_r^3 + C_{p,2} \lambda_r^2 + C_{p,1} \lambda_r \\ C_p'(\lambda_y) &= C_{p,3}' \lambda_y^3 + C_{p,2}' \lambda_y^2 + C_{p,1}' \lambda_y \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 λ_r, λ_y 는 주속비로 아래와 같이 표현 된다.

$$\lambda_r = \frac{\omega_r R}{v_r}, \quad \lambda_y = \frac{\omega_y L}{v_y} \quad (16)$$

마지막으로 토크는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_r &= P_r / \omega_r \\ \tau_y &= \begin{cases} P_y / \omega_y & (0 \leq \theta_y \leq \pi) \\ -P_y / \omega_y & (-\pi \leq \theta_y \leq 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

본 연구에서 사용된 바람 모델은 제어를 설명하기 위해 매우 간략화 되었음을 밝혀둔다. 자세한 내용은 참고 문헌에 기술되어 있다.[10,11]

그림 8은 수식 13~17을 이용하여 생성한 각속도에 따른 속도/파워 곡선이다. 보이는 것과 같이 θ_y 가 증가할수록 바람으로 생성되는 전력이 감소하는 것을 알 수 있다.

IV. 제어기 설계

본 연구에서는 수식 10과 같은 decoupling 입력과 PI 전류 제어가 사용되었다. 이는 일반적으로 사용되는 방법으로써 자세한 내용은 생략 되었다. 여기서는 병렬형 윈드 터빈의 MPPT 알고리즘 적용과 요각 제어를 위한 제어기 설계 방법을 다룬다.

4.1. MPPT Algorithm

그림 9는 병렬형 윈드 터빈을 위한 발전기 시스템이다. 발전기 토크는 수식 11과 같이 전류에 비례하고, 로터의 토크는 수식 4와 같이 발전기 두 대 각각의 토크 출력의 합으로 표현되므로 로터의 최대 출력을 위한 MPPT 알고리즘은 발전기 출력 전류의 합,

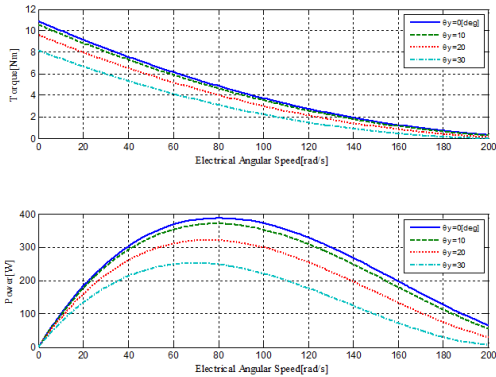


그림 8. 터빈의 토크-각속도, 파워-각속도 곡선
Fig. 8 Torque and power curves of wind turbine

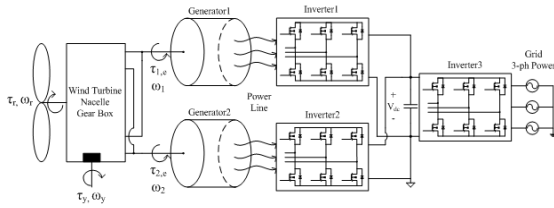


그림 9. 병렬형 윈드 터빈의 발전기 시스템
Fig. 9 Proposed wind generator system

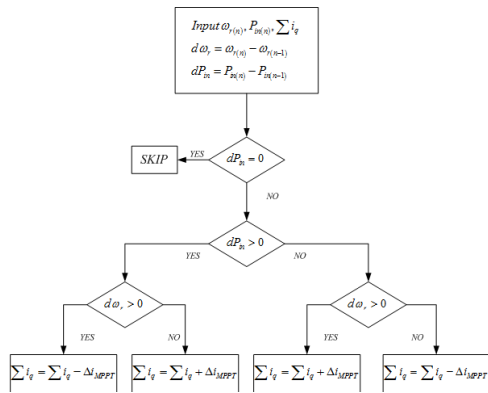


그림 10. P&O 알고리즘
Fig. 10 P&O algorithm

$\sum i_q = i_{q,1} + i_{q,2}$ 을 이용하여 수행할 수 있다. 이러한 점에서 기존의 P&O 알고리즘을 그림 10과 같이 적용할 수 있다. 앞으로 발전기의 전류 제어를 위한 제어 입력은 각각 $\sum i_q^*$, $i_{q,1}^*$, $i_{q,2}^*$, Δi_q^* 로 표현한다.

4.2. Yaw Control with MPPT Algorithm

수식 4로부터 두 대 발전기의 전류가 동일하게 제어되는 경우($i_{q,1} = i_{q,2}$) 발전기로부터 전달되는 요축 토크, $\tau_y = 0$ 이다. 반대로 발전기의 전류가 서로 다른 값을 갖도록 제어 되는 경우($i_{q,1} \neq i_{q,2}$) 요축 토크가 발생한다. 이러한 점을 이용하여 요축 제어를 위한 제어를 그림 11과 같이 구현할 수 있다.

또한, 앞 절의 내용과 그림 11의 요잉 제어를 이용하여 그림 12와 같이 추가적인 요잉 메카니즘 없이도 MPPT 제어와 능동 요잉이 가능 하다.

V. 시뮬레이션

그림 9와 같은 시스템을 시뮬레이션 하기 위해서 3대 인버터의 평균 모델(Averaged Model)이 사용되었다[12]. 그림 9에서 인버터1,2는 3상 AC-DC 부스트 컨버터로써 그림 12와 같은 제어가 적용되었다[13,14]. 인버터 3은 캐패시터에 충전되는 DC 링크 전압을 계통으로 보내기 위한 DC-AC 인버터로 동작한다. 터빈의 출력 특성은 그림 8과 동일하다[15].

비람의 방향이 변하는 경우에도 요축과 MPPT 제어가 잘 수행되고 있는지 확인하기 위해서 0~6초 동안 θ_y 를 0으로 시키고 6초가 되었을 때 θ_y 를 60[deg]로 변화 시켰다. MPPT 알고리즘은 0.1초마다 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 표 1에 정리하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation and parameter

이름	심볼	값
상 인덕턴스	L_s	17.5[mH]
상 저항	R_s	1[Ω]
역기전력 상수	K_e	0.75[V/(rad/s)]
관성 모멘트	J_r, J_y	0.026[kgm ²]
마찰 계수	B_r, B_y	0.148[Nm · s/rad]
DC 링크 전압	V_{dc}	380[V]

그림 13에서 DC-link 전압은 380[V]에 매우 빠르게 도달하였고, 바람의 방향이 변하는 6초에서 매우

적으로 전력이 감소하나 요각 제어기와 MPPT 제어기의 동작으로 다시 원래의 최대 전력 지점으로 돌아오게 된다.

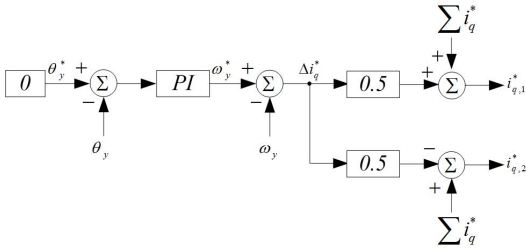


그림 11. 요잉 제어
Fig. 11 Yaw control

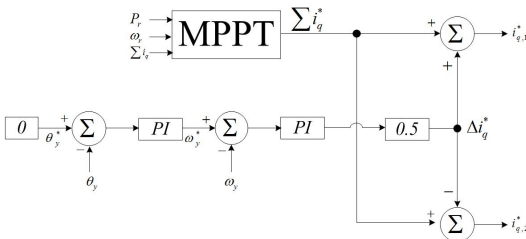


그림 12. 요잉 제어와 MPPT 알고리즘
Fig. 12 Yaw control with MPPT algorithm

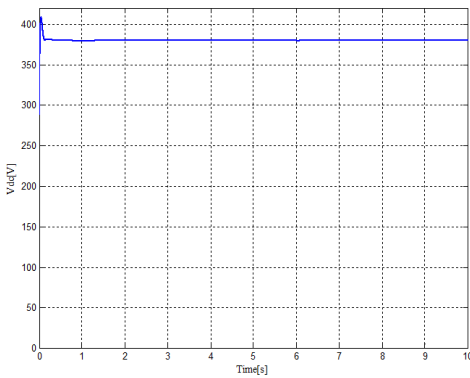


그림 13. DC-link 전압
Fig. 13 DC-link voltage

적은 변동량이 보인다. 또한, 그림 14,15를 통해서 로터의 각속도/토크가 두 대의 발전기로 잘 분배되고 있음을 확인 하였다. 이를 통해서 컨버터와 인버터가 제 기능을 잘 수행하고 있음을 알 수 있다.

마지막으로 그림 16으로부터 로터의 출력 전력이 최대 전력 지점인 390[W]에서 잘 유지 되는 것을 알 수 있다. 특히, 바람의 방향이 변화하는 6초에서 순간

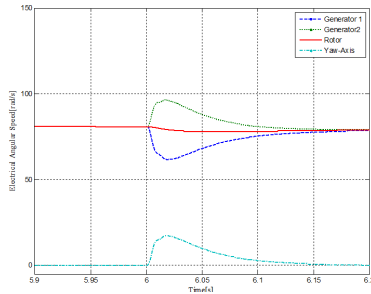
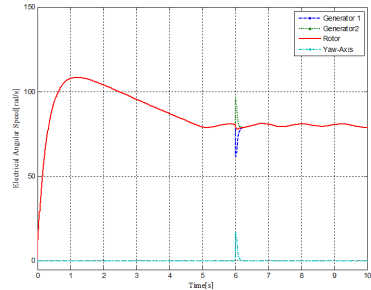


그림 14. 발전기, 로터축, 요축 각속도
Fig. 14 Angular speed

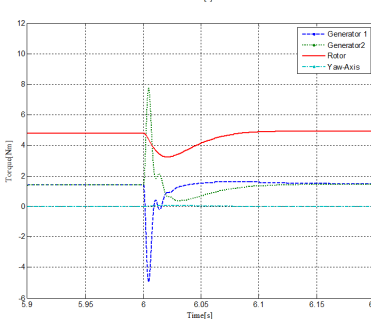
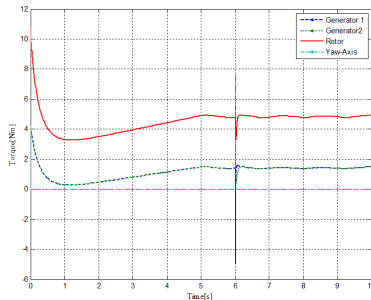


그림 15. 발전기, 로터축, 요축 입력 토크
Fig. 15 Torque

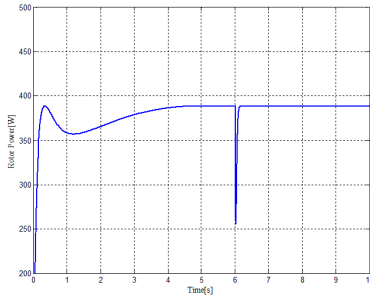


그림 16. 로터의 출력 전력
Fig. 16 Rotor power

VI. 결론

새로운 형태의 수평형 풍력 터빈(HAWT)을 제안 하였다. 제안한 풍력 터빈은 기존의 HAWT가 갖는 송전선 꼬임 현상이 없고 추가적인 메카니즘 없이 수동 요잉뿐 아니라 병렬형 발전기의 제어를 통해서 능동 요잉을 할 수 있다. 병렬형으로 발전기를 구성할 경우 입력 전력이 분산되므로 적은 용량의 인버터로 도 발전기 시스템을 구현할 수 있다. 시뮬레이션을 통해서 제안 하는 풍력 터빈이 MPPT 알고리즘과 능동 요잉을 동시에 잘 수행 할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음

감사의 글

본 연구는 2012(3차년도)년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20093021020030)

참고 문헌

[1] E.F. Camacho, T. Samad, M. Garcia-Sanz, and I. Hiskens, "Control for Renewable Energy and Smart Grids", The Impact of Control Technology, Control Systems Society, pp. 69-88, 2011.
[2] F. Blaabjerg, Z. Chen, R. Teodorescu, and F.

Iov, "Power Electronics in Wind Turbine Systems", in Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC, Vol. 1, pp.1-11, Aug., 2006.
[3] R.C. Maydew and P.C. Klimas, "Aerodynamic performance of vertical and horizontal axis wind turbines", Journal of Energy, Vol. 5, pp. 189-190, May-June., 1981.
[4] M. Islam, D. Ting, and A. Fartaj, "Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, No. 4, pp.1087-1109, 2008.
[5] J.F. Manwell, J.G. McGowan, and A.L. Rogers, "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application", John Wiley and Sons, 2010.
[6] F.A. Farret, L.L. Pfischer, and D.P. Bernardon, "Active yaw control with sensorless wind speed and direction measurements for horizontal axis wind turbines", in Proceedings of the 2000 Third IEEE International Caracas Conference, pp. I25/1-I25/6, 2000.
[7] W. Cui, F. Yu, X. Liu, and J. Whitty, "Analysis of the passive yaw mechanism of small horizontal-axis wind turbines", in World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, pp.1-5, Sept., 2009.
[8] F. A. Farret, L. L. Pfischer, and D. P. Bernardon, "Sensorless active yaw control for wind turbines", in The 27th Annual Conference of the IEEE, IECON'01, Vol. 2, pp.1370-1375, 2001
[9] Y. Nishizawa, H. Tokuyama, Y. Nakajo, and I. Ushiyama, "Yaw Behavior of Horizontal-Axis Small Wind Turbines in an Urban Area", Wind Engineering, Vol. 33, No. 1, pp.19 - 30, 2009.
[10] M.O.L. Hansen, Aerodynamics of wind turbines, Earthscan/James & James, 2008.
[11] K. Selvam, S. Kanev, J.W. van Wingerden, T. van Engelen, and M. Verhaegen, "Feedback - feedforward individual pitch control for wind turbine load reduction", International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol.19, No. 1, pp.72 - 91, 2009.
[12] R.W. Erickson and D. Maksimović, "Fundamentals of power electronics", Kluwer Academic, 2001.

- [13] Y. Chang, L. Jinjun, W. Xiaoyu, Y. Xin, and W. Zhaoan, "Small-signal modeling of three-phase boost rectifier under non-sinusoidal condition", in Applied Power Electronics, 20th IEEE Annual Conference and Exposition, APEC, pp.1195-1199, Feb., 2008.
- [14] F.C. Lee, D. Borjevic, Y. Jiang, and H. Mao, "Simple high performance three-phase boost rectifiers," in The 25th Annual Conference of the IEEE, PESC'94Record, Vol. 2, pp.1158-1163, June., 1994.
- [15] Z. Wang and L. Chang, "A Novel Vdc Voltage Monitoring and Control Method for Three-Phase Grid-Connected Inverter", in Power Electronics Specialists Conference of the IEEE, pp.1221-1226, June., 2007.

저자 소개



이국선(Kook-Sun Lee)

2009년 광운대학교 전자통신학과 졸업(공학사)
 2011년 광운대학교 대학원 제어계측학과 졸업(공학석사)

2011년~현재 광운대학교 제어계측학과 박사과정

※ 관심분야 : 전력 전자, 제어 시스템



최 익(Ick Choy)

1979년 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사)
 1981년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1990년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

1982년~2003년 한국과학기술연구원 책임연구원

2003년~현재 광운대학교 로봇학부 교수

※ 관심분야 : 서보제어, 전력전자, 전동기제어



조 황(Whang Cho)

1981년 인하대학교 기계공학과 졸업(공학사)

1985년 텍사스 주립대(Austin) 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)

1989년 텍사스 주립대(Austin) 대학원 기계공학과 졸업(공학박사)

1990년~현재 광운대학교 로봇학부 교수

※ 관심분야 : 지능로봇시스템, 무인비행체제어



백주훈(Ju-Hoon Back)

1997년 서울대 기계설계학과 졸업.

1999년 동 대학교 석사

2004년 동 대학교 전기공학부 박사.

2008년~현재 광운대학교 로봇학부

조교수

※ 관심분야 : 다개체 시스템, 풍력 발전 제어시스템, 비선형 제어