

출력성능 향상을 위한 풍력발전기 피치제어 알고리즘에 관한 연구

김성주
서남대학교

A Study on Pitch Control Algorithm for Power Enhancement of Wind Turbine system

Sung Ju Kim
Seonam University

ABSTRACT

전북 부안군에 설치된 30kW급Dual-rotor 풍력발전기의 Main Rotor Blade를 대상으로 공기역학적 모델링을 하였다. 각종 바람 상황과 풍속에 따라 변화하는 RPM 상황을 고려하여 전산모의 실험을 수행하였다. 또한 출력성능을 향상시키기 위하여 최대 출력을 계산하고 이를 추종하도록 하는 직접 출력 제어 알고리즘을 제안하였다.

1. 서 론

풍력발전 시스템에서의 피치제어는 블레이드가 가지고 있는 공기역학적 특성을 이용하여 최대의 출력을 얻어내는데 그 목적을 두고 있다. 그러나 블레이드의 공기역학적 특성을 이미 알고있다고 하더라도 풍속과 블레이드의 회전수, 그리고 피치각과의 관계는 정의되어 있지 않아 기존의 연구들에서도 블레이드의 회전을 일정하다고 가정하거나 혹은 풍속과 블레이드 끝단속도의 비인 주속비(Tip speed ratio: TSR)를 변수로 하여 제어하는 연구가 진행된 바 있다. 그러나 국내의 풍황 조건 등을 고려해 볼 때, 정격출력을 얻을 수 있는 상황은 매우 빈도가 적으며, 실제적 연구를 위해서는 정격 출력 이하의 풍속에서 최대의 출력을 얻어낼 수 있는 피치제어 알고리즘의 개발이 필수적이다.

현재 제주도에서 운용중인 600kW급 Vestas사의 풍력발전 시스템(Vestas-V44-600K)의 피치제어 시스템의 경우 오랜 시간의 필드테스트를 통하여 출력형태를 파악하고, 이 출력형태에 따른 피치각의 최적치를 찾는 방법을 통하여 시스템을 운용하고 있다.¹⁾ 즉, 임의의 풍속의 바람이 불어올 경우 제어 시스템은 이미 저장되어 있는 최적 피치각을 컨트롤러에서 제어하는 방식으로 운용되고 있다. 이러한 시스템은 발전기 및 인버터 시스템의 운용과 연관되어 효율적으로 운용될 수 있는 반면, 한편으로 시스템의 설치 장소에 따른 풍황의 변화에 능동적으로 대처할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이러한 형태의 피치 제어방식은 현재 세계적으로 일반화되어 직접 운용에 적용되고 있는 실정이나, 국내 풍황 사정을 고려할 때 풍황의 변화가 잦은 지역에서도 최대 출력을 확보할 수 있는 알고리즘에 대한 연구는 필수적으로 수행되어야 한다.

본 연구에서는 NACA 63-215 로터 블레이드의 공력 데이터를 이용하여 풍력발전 시스템을 모델링하였고, 이 모델을 통하여 필요한 데이터 계측을 바탕으로 피치각 명령에 대한 출력값을 계산하여 최적의 피치각 명령을 생성하는 알고리즘을 제안하고 이를 이용하여 주속비의 변화상황, 급속한 풍속의 변화 상황 등에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 피치제어 방식

풍력발전 시스템의 운전방식은 크게 스톱 제어방식과 피치제어 방식으로 나눌 수 있다. 스톱 제어방식은 그림 1에서 보는바와 같이 최대 공력계수가 스톱영역 근처에서 발생하도록 블레이드를 설계한 후, 이 영역안에 피치각을 갖도록 고정된 피치각으로 운전을 하고, 정격이상의 풍속에서는 스톱을 발생시켜 출력을 안정화시키는 형태의 운전방법이다. 그래서 풍속의 변화에 따른 출력의 변화가 비교적 적고 구조적으로 간단하다는 장점을 가지고 있다. 반면 피치제어방식은 풍속의 변화에 따라 블레이드의 피치각을 제어하여 줌으로써, 최대의 출력을 얻어내도록 최적의 받음각을 유지시켜 주는 방식이다. 블레이드의 피치각은 유압(Hydraulic)이나 전기적 모터에 의하여 작동되며 최근에는 유압과 모터를 같이 혼용하는 형태도 등장하였다. 위의 두가지 방식은 모두 각각의 장단점을 가지고 있어 풍력발전기가 설치되는 지역의 풍황과 운용여건 등을 고려하여 선정하는 것이 필요하다.

2.2 공력 모델링

유체가 그 흐름과 수직평면상에 존재하는 디스크를 통과할 경우 그 흐름의 속도는 감소하고 흐름의 체적은 증가한다. 그림 2는 디스크면을 통과하는 유체의 흐름을 도시하고 있다. A영역에서의 흐름은 로터 디스크를 통과함으로써 유선의 확산에 의하여 속도가 감소하며 이때 유선의 속도성분은 축 속도 성분과 반경방향성분과 회전 속도성분의 합으로 이루어진다. 유선이 디스크 표면을 지날 때 발생하는 동력과 추력은 A,B,C,D 각 지점에서의 속도 및 압력차이와 모멘텀 평형이론에 의하여 예측된다. 이때 각 지점에서는 축방향 성분만이 존재한다고 가정하고 Rankine-Froude의 고전 모델링 이론을 이용하여 추력을 계산할 수 있다.²⁾

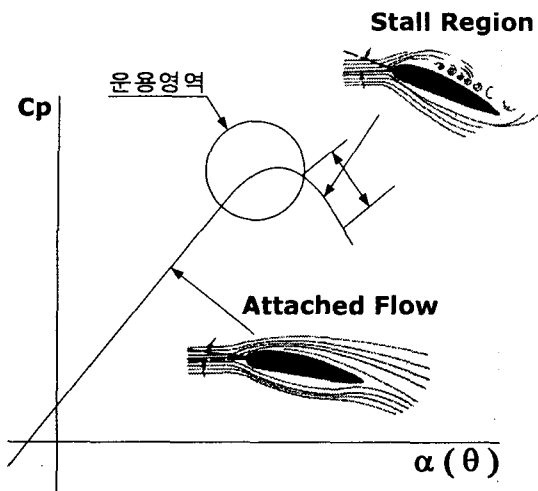


그림 1. 받음각에 따른 동력계수의 변화

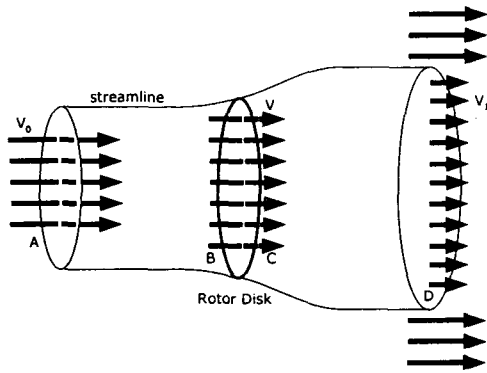


그림 2. 로터 디스크를 통과하는 유체의 흐름

그림 2에서는 블레이드의 공기역학적 특성과 기하학적 특성치를 정의하였다. 여기에서 V_0 는 입력풍속, V_r 은 블레이드 단면에서의 상대속도(Relative Velocity)이고 α 는 받음각, θ 는 피치각, ϕ 는 유입각(Inflow Angle), a 는 축간섭인자(Axial Induction Factor), a' 은 회전간섭인자(Rotational Induction Factor), r 은 블레이드 단면까지의 거리, Ω 는 회전수를 나타낸다. 또한 dD , dT , dL , dH , dQ 는 각각 미소 항력, 추력, 양력, 수평방향의 힘, 토크이다.

이들 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립하며,

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_0} \quad (1)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{1-a}{\lambda_r(1+a')} \right) \quad (2)$$

여기에서 λ_r 은 블레이드 단면에 대한 주속비이다. 블레

이드 미소단면 dr 에 작용하는 미소 양력과 항력은 식 (3), (4)와 같이 정의되어진다.

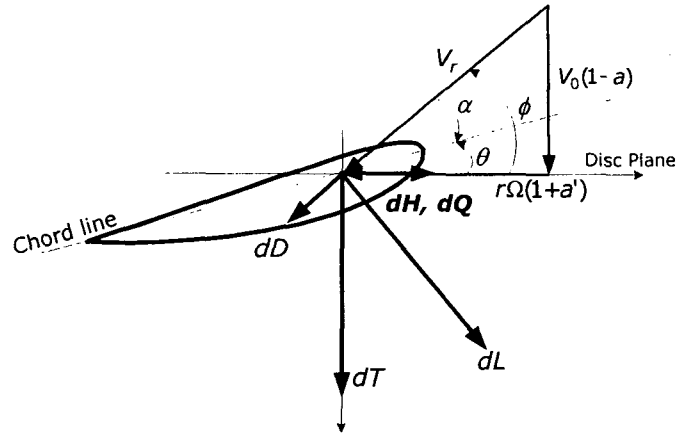


그림 3. 블레이드의 기하학적 특성치

$$dL = \frac{1}{2} \rho V_r^2 c dr C_l \quad (3)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho V_r^2 c dr C_d \quad (4)$$

여기에서 ρ 는 공기의 밀도, c 는 코드(Chord)길이, C_l , C_d 는 각각 양력계수, 항력계수이다. 블레이드의 회전에 의하여 발생하는 미소 추력 dT 와 미소토크 dQ , 미소 동력 dP 를 공력성분과 유입각의 함수로 표현하면,

$$dT = dL \cos \phi + dD \sin \phi = \frac{1}{2} \rho V_r^2 c (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) dr \quad (5)$$

$$dQ = (dL \sin \phi - dD \cos \phi) r = \frac{1}{2} \rho V_r^2 c (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r dr \quad (6)$$

$$dP = \Omega dQ \quad (7)$$

가 되며 최종적으로 출력 P 는

$$P = \Omega Q \quad (8)$$

와 같이 결정되며 여기에서 회전토크 Q 는 (9)식과 같다.

$$Q = \frac{1}{2} \rho N_{BC} \int_0^R V_r^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r dr \quad (9)$$

2.3 피치제어 알고리즘

정격 이하의 풍속에서는 최대의 출력을 얻어낼 수 있고, 정격이상의 풍속에서는 풍력발전기의 정격출력을 유지하도록 하기 위하여 그림 4에서 보는바와 풍속입력에 의하여 최적 TSR을 결정한 후, 일정범위의 피치각 지령에 대한 출력값을 계산하여 출력값의 최고치를 결정한후 이때의 피치각을 피치각 지령으로 결정한다.

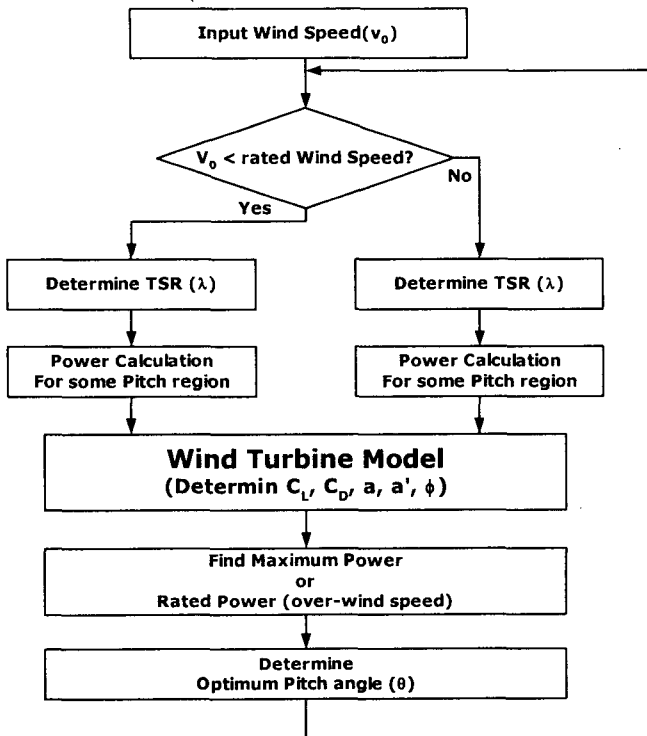


그림 4. 피치제어 알고리즘 블록 다이어그램

2.4 시뮬레이션

앞에서 모델링한 풍력발전기 모델에 실제 물성치를 대입하고, 주속비의 변화에 따른 출력과 실제 풍향데이터를 이용하여 피치제어 시뮬레이션을 수행하였다. 요각 (Yaw Angle) 오차는 없고 피치각 명령에 대한 피치모터는 시정수 없이 추종하고, 대기밀도 ρ 는 1.226 kg/m^3 로 가정하였다. 또한 부하는 고정 풀부하(Constant Full Load)라고 가정하였으며, 시뮬레이션은 상용 S/W인 Matlab을 사용하였다.

본 연구에 사용된 블레이드의 물성치는 표 1과 같다. 그림 5는 풍속을 0에서 15 m/s까지 선형적으로 증가시켰을 때 출력되는 파워를 도시하였다. 정격 출력은 12m/s에서 나타나고 있는데 이는 피치각이 최적의 상태가 아님을 알 수 있다. 이러한 상황은 최적의 피치각 명령을 내려줌으로써 개선될 수 있다. 또한 주속비가 7일 때와 10일 때 모두 12m/s에서 정격 출력을 나타내나 주속비가 4일 경우 14m/s의 풍속에서 정격출력을 얻을 수 있었다. 출력곡선은 예상한바와 같이 3차 곡선 형태의 출력을 나타낸다. 또한 주속비와 파워사이의 출력곡선을 그려보면

표 1. 블레이드의 물성치

| | DATA |
|----------------------|-------------|
| 1. Blade Type | NACA 63-215 |
| 2. Number of Blade | 3 |
| 3. Blade Length | 5.5 m |
| 4. Chord of Root | 0.36 m |
| 5. Chord of Tip | 0.18 m |
| 6. Blade Twist Angle | 3 deg. |

주속비가 6에서 7정도의 값을 중심으로 대칭을 이룬다는 것을 그림 7을 통하여 확인할 수 있다. 그림 13에서는 풍속이 12m/s에서 시뮬레이션 한 결과이며, 만약 풍속을 변화시켰을 경우 다른 결과가 예상된다.

그림 7, 8은 풍속이 급하게 변화하는 상황을 고려하여 주속비를 변화시키며 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 주속비를 변화시키면서도 불구하고 출력은 차이가 없었다. 그러나 피치각의 변화를 살펴보면 주속비를 8로 설정하였을 때의 최적 피치각은 -3° 에서 나타나며, 주속비를 7로 설정하였을 때 최적 피치각은 -5° 에서 발생한다. 여기서 풍속이 일정할 경우 나타나는 파워는 주속비에 따라서 결정된다는 사실을 알 수 있으며, 이러한 주속비는 피치각에 따라서 발생함을 알 수 있다. 그러나 실제의 상황에서는 블레이드의 관성, 마찰력, 요각의 풍향과의 불일치 등에 의하여 주속비는 항상 최적의 상황을 연출하지 못한다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 피치 제어 알고리즘은 주속비나, 요각에 상관없이 주어진 상황에서 얻을 수 있는 최고의 파워를 얻을 수 있다는 결론을 유추해낼 수 있다.

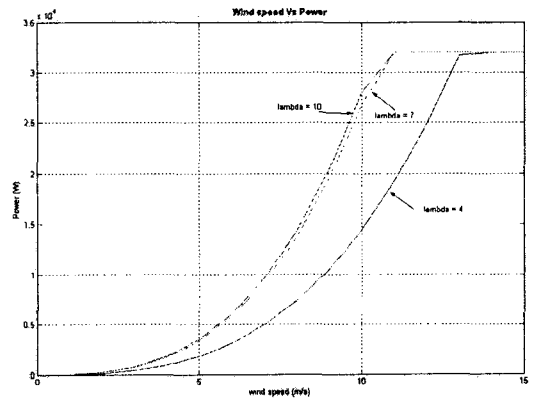


그림 5. 풍속변화에 따른 출력의 추이 (피치각=0도)

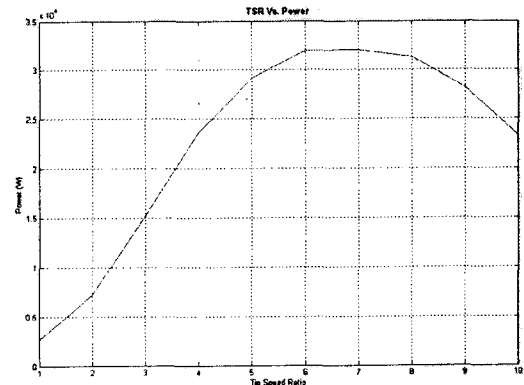


그림 6. TSR 변화에 따른 출력의 추이 (풍속 12m/s)

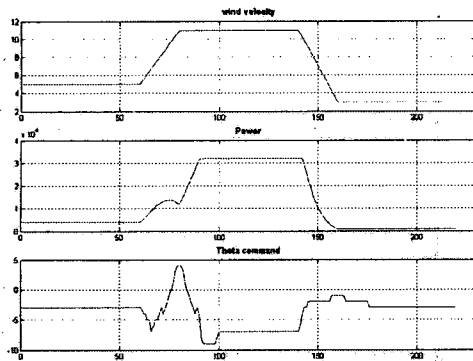


그림 7. 풍속의 변화에 따른 출력과 피치각 변화($\lambda = 8$)

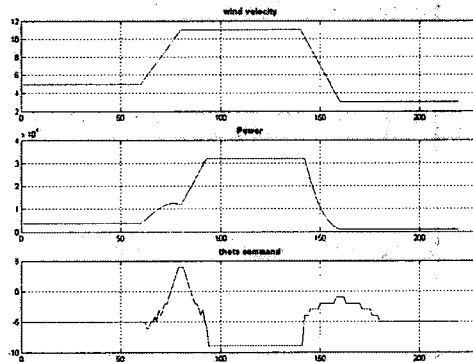


그림 8. 풍속의 변화에 따른 출력과 피치각 변화($\lambda = 7$)

3. 결 론

풍력 발전기에 있어서 출력은 동력계수 및 풍속의 함수이며, 이때의 동력계수는 블레이드의 특성과 바람과의 관계에 의해서 결정되어진다. 그러므로 NACA 63-215 블레이드에 대한 공기역학적 특성과 모멘텀 이론, 블레이드 요소 이론을 이용하고 블레이드를 최적 설계하는 과정을 도입하여 블레이드를 모델링하였다. 이와 같이 모델링된 풍력 발전기를 이용하여 풍속이 완만하게 변화하는 상황, 주속비가 변화했을 때의 상황, 급속한 풍황의 변화 상황, 그리고 정격풍속 이상의 바람이 불어오는 상황에 대하여 상용 S/W인 Matlab을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

본 연구에서 설계된 알고리즘은 피치 컨트롤 시스템의 알고리즘 연구라는 특성상 시스템의 시정수 등을 고려하지 않고 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 기존의 결과들과 비교할 때 성능의 향상을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Vestas, "Vestas V39/V42/V44-500/600kW Generating System Manual", 1997.
- [2] 동경민, "상반회전 풍차 블레이드의 공력성능 구조 동역학 해석에 관한연구", 전북대학교 정밀기계공학과, 2002, 석사학위논문.