

가변 풍력시스템의 시뮬레이션

김재곤, 구자봉, 허옥열
인하대학교 전기공학과

Simulation of Variable Wind Energy System

Jae-Gon Kim, Ja-Bong Ku, Uk-Youl Huh
Dept. of Electrical Engineering, Inha University

Abstract - In this paper, mathematically modeled equations were derived for wind turbine under the analysis of aerodynamics. On the basis of these equations, maximum power controller is implemented by simulink in matlab. In order to achieving maximum power, variable speed control method is used for obtaining maximum power coefficient in the variable wind speed because we can have maximum changing efficiency in these coefficients. Also, the maximum power control of wind generator system uses a synchronous generator and a inverter circuit

1. 서 론

지난 20세기 동안 인류의 문명과 기술발전에 크게 공헌해 온 화석연료에너지원의 감소는 우리의 일상생활에 위협요소로 다가오고 있으며, 아울러 무한한 에너지원으로 생각했던 원자력 발전 또한 쉽게 받아 들일수 없는 에너지원이다. 이러한 측면에서 풍력발전은 무한한 풍력자원을 이용한 무공해 에너지원으로 최근 전 세계적으로 관심이 고조 되고 있으며, 다가오는 에너지 문제를 해결하기위해서는 화석연료 에너지원을 보다 효율적으로 이용함과 동시에 대체에너지원의 이용을 높이는 기술개발이라고 할 수 있겠다. 따라서 전 세계에서는 1970년대 에너지 위기 이후 학문적 이론을 바탕으로 신기술의 도입과 집중투자에 의해 소형에서 수 MW급 발전시스템에 이르기 까지 많은 연구결과를 남겼다. 이러한 연구결과들은 상업화로 이어져 그 수요가 날로 증가하고 있으며 여러 나라에서 자체 개발 연구에 노력하고 있다.[2] 풍력발전은 블레이드에 의해서 풍력에너지를 기계적 에너지로 변환하는 과정이 필요하다. 따라서 풍력터빈에 의해서 기계적 에너지로 변환되는 과정에 대한 고찰이 필요하며, 에너지의 변환 흐름에 따라 블레이드, 동력전달부 등의 기계적인 부분과 발전기 전력변환회로 등의 전기적인 부분의 각각에 대한 이해도 필요하다. 또한 바람이 갖는 속도의 크기나 방향은 상당히 동적인 특성을 지니고 있기 때문에 단시간의 풍황 자료만으로는 그 지역의 풍황 특성을 예측하기 곤란하며, 동시에 그 지역에 가장 적절한 시스템의 설계에도 많은 제한을 갖기 때문에 이에 대한 고찰 또한 필요하다. 이와 같이 풍력발전시스템의 특성을 파악하고 고효율 시스템을 개발하기 위해서는 블레이드와 동력전달부등 풍력발전시스템 각각부분의 특성을 모의 하는 것이 필수적이다, 따라서 본 논문에서는 풍황에 대한 확률분포 함수로 나타내었으며, 풍력 터빈의 공기역학적 특성을 파악하여 최대 출력 계수를 유도 하였다. 또한 최대전력을 얻기 위한 방법으로 가변속 제어를 사용하여, 풍속에 변화에 대해서 항상 최대 출력계수 지점에서 풍력 발전기가 동작 하므로 최대전력을 얻을 수 있는 시스템을 matlab simulink를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 풍황자료의 통계 분석방법

풍력발전시스템의 설치 입지 선정 및 시스템의 용량 등 기본적인 재원의 확보를 위해서는 정확한 지역적 풍황 특성의 파악이 선결되어야 한다. 보통 바람은 수시로 크기와 방향이 변하기 때문에 과거의 수많은 발생 경우에 의존하여 이를 통계적으로 처리 분석하여 모델링 하는 방법을 많이 이용하며 풍속의 경우 풍속분포를 Weibull 분포, Rayleigh 분포, Gamma 분포, Log-normal 분포 등으로 가정하나, 이중 Weibull 분포가 실제 분포와 가장 일치하는 것으로 알려져 있다. 이는 풍속이 어느 특정 풍속 V 일 확률을 표시하는 확률분포 함수 $P(V)$ 는 식 (1)과 같이 표현 된다

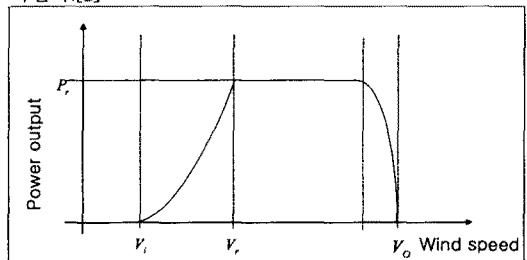
$$P(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left\{-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right\}$$

(1)

여기서 c 값은 분포된 풍속의 평균값에 관계하며 k 는 분포된 풍속의 편차 크기를 나타내는 상수이다.[8][3]

2.2 풍력발전시스템의 출력특성

다음 그림 1은 출력제어를 하는 풍력발전 시스템의 출력특성곡선으로서 풍속의 변화에 따른 출력을 나타낸 것으로, 정지상태에서 풍속이 증가하여 시동풍속(V_i)에 이르면 회전익이 회전하기 시작하여 정격 회전수에 이르기 까지 속도 제어를 수행한다. 정격회전수(V_r)에 이르면 발전을 시작하고 이 때부터는 출력제어 단계로 들어간다. 정격출력 상태에서는 바람의 요동에 따라 급격한 출력 변화로 발생하는 과부하로부터 시스템을 보호하기 위해 일정 출력을 유지하도록 제어한다. 풍속이 더욱 증가하여 정격출력 상태를 넘어가면 발전을 중단하고 다시 속도제어 단계로 들어가서 정격회전수가 유지되도록 제어를 하거나 계속해서 풍속이 증가하면 시스템을 정지시킨다.[1]



[그림 1]. 풍속의 변화와 출력의 관계

이러한 출력특성의 모델링은 justus [1976]에 의한 2차 방정식으로 표현 되었다

$$\begin{aligned}
 P(V) &= 0 & (0 \leq V \leq V_1) \\
 &= P_r(A + BV + CV^2) & (V_1 \leq V \leq V_r) \\
 &= P_r & (V_r \leq V \leq V_0) \\
 &= 0 & (V_0 \leq V)
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 각 계수 들은 다음과 같다

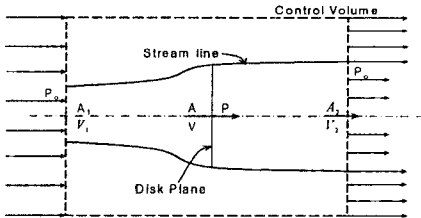
$$\begin{aligned}
 A &= -BV_1 - CV_1^2 \\
 B &= [(V_m^2 - V_r^2) - (V_m/V_r)^3(V_r^2 - V_1^2)]/D \\
 C &= [(V_m/V_r)^3(V_r - V_1) - (V_m - V_1)]/D \\
 D &= (V_r - V_1) (V_m^2 - V_1^2) - (V_m - V_1) (V_r^2 - V_1^2) \\
 V_m &= (V_r - V_1)/2
 \end{aligned} \quad (3)$$

이르 이용하여 연간 단위 면적당 풍력발전시스템의 출력은 식 (4)와 같이 표현 된다,

$$P/A = \left[\int_0^\infty F(V)P(V)dv \times 8760 \right] / A \quad (4)$$

2.3 풍력터빈의 공기 역학적 특성

풍력터빈은 크게 수평형과 수직형으로 구분할 수 있으며 본 논문에서는 수평형 터빈을 대상으로 하며, 회전익의 공력 해석을 위해 그림 2와 같이 운동량 이론을 사용 하였다.



[그림 2]. 유체의 흐름 형태

여기서 질량 m[kg]인 공기의 풍속이 v[m/s] 일 때 유체가 갖는 운동에너지 \$E_w\$는 식(5)과 같고,

$$E_w = \frac{1}{2}mv^2 \quad [J] \quad (5)$$

이때 공기가 갖는 풍력은 식(6)와 같이 정의 된다

$$P_{air} = \frac{1}{2}\rho Av^3 [W] \quad (6)$$

여기서 \$\rho\$[kg/m³]는 공기의 밀도, A[m²]는 풍력 터빈의 회전 단면적이다. 식(6)는 풍속에 의해서 발생할 수 있는 이상적인 풍력이고 실제로 터빈에 일정속도의 바람이 도달 후 풍력에너지가 100% 기계적 에너지로 변환한다면 터빈 뒷단의 풍속이 0으로 감소하나 이는 공역학적으로 불가능 하다. 따라서 풍력터빈에 의해 기계적인 출력으로 흡수되는 풍력은 그림 1과 같이 터빈의 회전자 에서 풍력의 감소분에 해당한다. 실제로 풍력터빈에 의한 기계적 출력은 상류풍속과 하류풍속 사이에 차에 해당한다. 풍력터빈에 의해서 발생하는 기계적 출력은 식(7)과 같다.

$$P = \frac{1}{2}[\rho A \frac{v_1 + v_2}{2}](v_1 - v_2) \quad (7)$$

여기서 \$V_1\$[m/s]은 상류 풍속, \$V_2\$[m/s]는 하류 풍속이다. 식 (7)은 식(8)와 같이 표현된다.

$$P = \frac{1}{2}[\rho A \frac{v_1 + v_2}{2}](v_1 - v_2) = \frac{1}{2}\rho A V_1^3 \frac{(1 + \frac{v_2}{v_1})(1 - (\frac{v_2}{v_1})^2)}{2} = \frac{1}{2}\rho A V_1^3 C_p \quad (8)$$

여기서 \$C_p\$는 풍력터빈의 출력계수 혹은 회전자 효율로 정의된다. 식(8)은 풍력터빈에 의해서 변환되는 기계적인 출력을 나타내는 식으로 상류출력의 일부분이 풍력터빈에 의해서 획득됨을 보여준다. \$C_p\$ 값은 주어진 상류풍속의 \$V_1\$과 하류풍속 \$V_2\$의 비에 의해서 결정되고 이론적으로 하류풍속이 상류 풍속의 \$\frac{1}{3}\$일 때 최대값 0.593을 가진다. 이는 식(8)이 최대출력을 가지기 위한 미분한 값이 0이 되는 조건을 구하면 알 수 있다.

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4}\rho A [V_1^3 - 2V_1V_2 - 3V_2^2] = 0 \quad (9)$$

따라서 \$V_2 = V_1/3\$이 된다, 이 조건을 식 (8)에 대입하면 최대 출력은 식(10)과 같이 구할 수 있다

$$P_{max} = \frac{8}{27}\rho A v_1^3 \quad (10)$$

최대 회전자 효율은 식(11)과 같다

$$C_{pmax} = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho A v_1^3} = 0.593 \quad (11)$$

2.4 풍차의 출력 특성곡선

최대 전력 계수를 Betz의 계수라고도 한다. 최대전력은 이론적으로 발생할 수 있는 값이고 실제적으로는 \$C_{pmax}\$가 0.5이하의 값을 가진다, 2블레이드 타입의 고속터빈의 경우 일반적으로 0.5이하의 값을 가지고 저속의 터빈의 경우는 0.2~0.4의 값을 가진다. 풍력터빈에 의해서 발생하는 전력은 식(12)과 같이 요약할 수 있으며 풍력터빈의 특성은 터빈의 전력계수 \$C_p\$와 주속비의 곡선에 의해서 주어진다. 주속비는 식(13)과 같이 정의 된다

$$P_{mech} = \frac{1}{2}\rho A v^3 C_p \lambda^3 \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V} \quad (13)$$

전력계수와 주속비의 곡선은 풍차의 종류에 따라 다른 형태의 특성을 나타냄을 아래의 그림3을 통해 알 수 있다. 이 그림에서 풍차가 최대효율로 운전되는 각 값의 최대점(\$\lambda_{max} C_{p,max}\$)을 알 수 있다 [9]

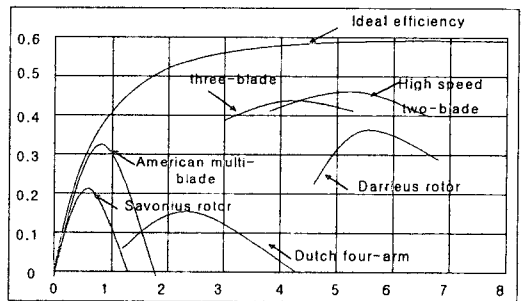


그림3. 풍차의 종류에 따른 출력계수와 주속비 특성

3. 최대전력 응용

일정속 발전시스템은 풍력터빈이 풍속의 변화에 대해서 항상 최대 C_p 에서 동작하지 않고 일정한 속도에서 동작하므로 발전효율을 최대로 할 수 없다. 그러나 가변속 발전시스템은 항상 C_{pmax} 에서 발전하도록 풍력 터빈의 속도를 가변 시키므로 최대의 변환 효율을 기대할 수 있다. 이론과 실제 경험에 의하면 가변속도 운전에 의한 방법이 그렇지 않은 경우보다 20~30% 에너지를 더 생산해 내는 것으로 나타났다. 이와 같이 C_{pmax} 에서 풍력터빈이 동작한다면 발생출력은 최대가 된다. 따라서 식(9)를 이용하여 최대출력을 발생하는 속도 지령치를 구하면 식(14)과 같다

$$w_m = \frac{\lambda_{opt} \times v}{R_m}$$

(10)

따라서 최대출력과 토크 값은 식(12)과 식(14)에 의해서 식(15)과 식(16)와 같이 정의 된다

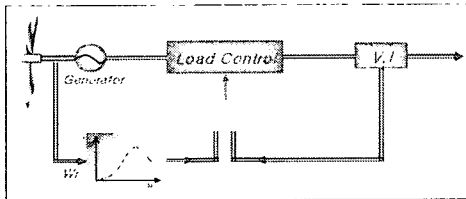
$$P_{target} = \frac{1}{2} \rho \pi R_m^5 \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} w_m^3$$

(15)

$$T_{target} = \frac{P_{target}}{w_m} = \frac{1}{2} \rho \pi R_m^5 \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} w_m^2$$

(16)

따라서 출력 P와 로터의 각속도와의 그래프에서 보면 하나의 최대 출력점을 얻을 수 있다. 만약 이 최대 출력점에서 운전을 한다면 풍차의 속도가 미세하게 변한다 해도 출력에는 어떠한 영향을 주지 않을 것이다. 이러한 원리를 다음의 그림에 나타내었다

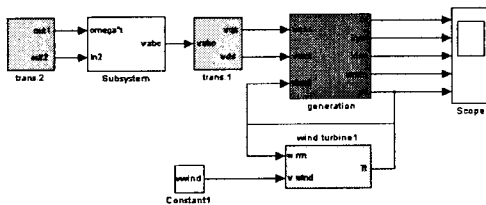


[그림 4]. 최대전력 운용 구조

이 방법은 속도 측정 장치의 오차나 풍차의 설계에 별반 지장이 없기 때문에 적은 비용으로 최대전력을 운용 할 수 있다.

4. 시뮬레이션

제한한 최대전력 운용 구조의 타당성을 검증하기 위해서 그림 5와 같이 matlab simulink를 사용하여 시뮬레이션을 실시 하였다.

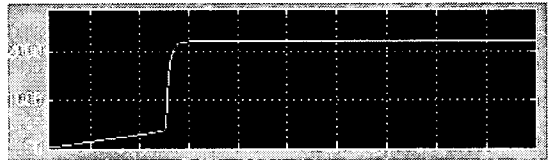


[그림. 5] 시뮬레이션 블록도

시뮬레이션에 사용한 파라미터는 표 1과 같다.

풍력 터빈	발전기
cp_max=0.47	p =6
lamda_opt=9	정격출력=2.2[kw]
rm=1.05	정격속도=1150[rpm]

[표. 1]시뮬레이션 파라미터



5. 결과 및 고찰

본 논문에서는 풍속에 대응하여 가변속도로 발전기를 구동 하므로써 풍력에너지를 변환효율을 최대 전력점에서 운전할 수 있도록 제어 하였다. matlab simulink를 이용한 모의 실험결과, 풍속이 변동하는 동안 풍력터빈의 속도제어를 통해 최대출력을 획득할 수 있음을 확인 하였다. 또한 풍력발전시스템의 가변속도로 제어하기위해 풍속, 최대 출력을 고려한 단순한 모델을 도출하였다. 향후에는 다양한 풍력발전 시스템에 적용함과 동시에 전력 계통연계에 연계 하였을 때 나타나는 현상을 모의 하여 풍력발전 시스템의 기동 및 특성에 대하여 연구를 진행할 계획이다

[참 고 문 헌]

- [1] "Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines", DOE/NASA workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbines, Cleveland, Ohio. Viterna, L.A. and Corrigan, R.D. 1966.
- [2] "Global Wind Energy Market Report", AWEA Report, 1999.
- [3] Randall C. Maydew and Paul C. "Aerodynamic Performance and Horizontal Axis turbine", J of energy(USA), vol 5, on 3, pp189~190, 1981
- [4] R.J. Templin, "Aerodynamic Performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine", national Research and Council Canada, Laboratory Technical Report, LTR-LA-160, 1974
- [5] M.R. Patel, "Wind and Solar Power Systems", CRC Press, pp. 35~92, 1999
- [6] A.R. Bergen and V. Vittal, "power System Analysis", Prentice Hall, 2000.
- [7] M.G. Simoes, B.K. Bose, and R. j. Spiegel, "design and Performance Evaluation of a fuzzy-logic based Variable-Speed Wind generation system", IEEE trans. on IA, vol.33, no.4, pp.956~965, 1997
- [8] 허종철, 조경호, 김준현, 김은일, "제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구 용역(II)", 제주도, 2000.
- [9] 이춘식 외, "한·독 태양·풍력 복합발전에 관한 연구", 과학기술처, 2N418-3400 2, 1988.