

실제 데이터를 이용한 가변속 풍력발전시스템의 출력제어 시뮬레이션

한상근\*, 박민원\*\*, 유인근\*  
 \*창원대학교, \*\*차세대초전도응용기술개발사업단

Output Control Simulation of Variable Speed Wind Power System using Real Data

Sang-Geun Han\*, Minwon Park\*\*, In-Keun Yu\*  
 \*Changwon National University, \*\*CAST

**Abstract** - Wind is a significant and valuable renewable energy resource. It is safe and abundant and can make an important contribution to future clean, sustainable and diversified electricity supplies.

Unlike other sources of energy, wind does not pollute the atmosphere nor create any hazardous waste. In some countries wind energy is already competitive with fossil and nuclear power even without accounting for the environmental benefits of wind power. The cost of electricity from conventional power stations does not usually take full account of its environmental impact (acid rain, oil slick clean up, the effects of climate change, etc).

In this paper, a transient phenomenon simulation method for Wind Power Generation System(WPGS) under real weather conditions has been proposed. The simulation method is expected to be able to analyze easily under various conditions with considering the sort of wind turbine, the capacity of system and the converter system. Wind turbine connected to the synchronous generator and power converter was simulated.

1. 서 론

산업사회의 발달로 인한 에너지 소비 증가와 화석에너지 고갈에 대한 위기, 환경 오염문제 등으로 대체에너지에 대한 관심이 고조되고 있다. 그 중에서도 풍력발전시스템은 환경 친화적이고 무한정의 자원을 가지고 있으며, 화석에너지와의 가격경쟁성 등의 장점으로 인해 세계적인 관심이 대두되고 있다. 그림 1은 발전원별 생산원가를 비교하여 나타낸 것이다.

그러나 풍력발전시스템은 연구 설비비가 고가이고 설치기간 또한 길기 때문에 실제 설비에 의한 연구는 상당히 어렵다. 현재까지 거의 모든 연구는 실제 설비에 대한 연구로서 누구나 쉽게 할수 없는 분야로 알려져 있었다. 그래서 풍력발전 시스템에 대한 연구를 활발히 하기 위해선 시뮬레이션에 의한 연구가 필요하다.[1]

본 논문에서는 EMTTP형 시뮬레이터를 이용한 분산형 전원시스템의 시뮬레이션법[2]을 이용하여 새로운 풍력발전 시스템의 모델링 방법을 제시하고자 한다. 또한 EMTTP 및 EMTDC 상에서 사용할 수 있는 풍력 터빈 컴포넌트를 개발할 것이며, 이 컴포넌트에는 관성 등의 물리적 특성을 고려하여 실제시스템의 특성과 유사한 동작을 하도록 할 것이다. 이 컴포넌트의 제어 알고리즘은 터빈의 관성, 발전기의 관성 등을 적용한 원형 2차 제어 시스템을 사용할 것이며, 피치각 제어시에도 실제 시스템의 특성에 따라 변화시킬 수 있도록 모델링할 것이다.

Electricity price, c\$CU/kWh

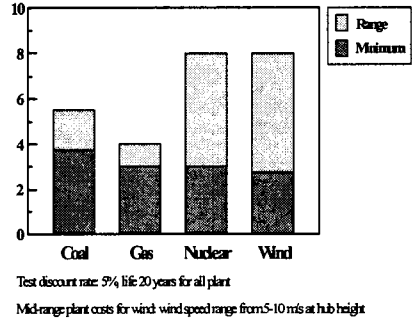


그림 1 발전원별 생산원가 비교

저자 등은 실제 기상상태를 EMTDC상의 컴포넌트에 입력이 가능한 독특한 시뮬레이션 방법을 이용할 것이다[3]. 이는 실제 시스템과 같은 원리로 시뮬레이션할 수 있도록 한 방법으로 기존의 풍력 발전 시스템의 시뮬레이션에서는 사용하지 않은 독특한 시뮬레이션 방법이다.

2. 실제 기상상태를 이용한 풍력발전 시스템 시뮬레이션

2.1 풍력 터빈의 특성방정식

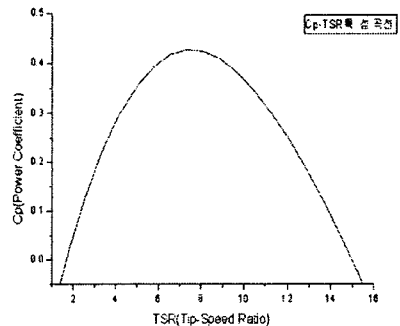


그림 2 출력 계수와 주속비

풍력 발전 시스템의 출력은 풍속과 TSR(Tip-Speed Ratio), Cp(Power Coefficient)에 의해 결정된다. 풍속에 의해 결정되어지는 Cp - TSR 특성곡선을 이용하여 출력을 제어하며, TSR은 풍속과 회전자 끝의 회전속도의 비율로 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$\lambda = \frac{r\omega_m}{v_m} \quad (1)$$

$\omega_m$  = mechanical angular velocity of the rotor [rad/s]

$v_m$  = wind speed [m/sec]

$r$  = wind turbine rotor radius [m]

$\lambda$  = Tip speed ratio

바람이 가지고 있는 전체 에너지 중에서 회전자가 입력 받는 에너지의 비율을 출력계수  $C_p$ 라 하며 이론상 최대 값은 Betz' 법에 의해 0.59이나 실제 가능한 최대 값은 0.44정도이며 일상적으로 평균 20%이상이지만 그 값이 풍속에 의해 매우 가변적이다[1].  $C_p$ 는  $\lambda$ 와 B의 함수로 표현된다.[5]

$$C_p = (0.044 - 0.0167B) \sin\left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3B}\right] - 0.00184(\lambda - 3)B \quad (2)$$

$B$  = blade pitch angle [deg]

풍력 터빈의 출력과 풍력 터빈에 의해 발생하는 토크는 다음과 같이 표현된다.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} A \rho v_m^3 C_p(\lambda) \quad (3)$$

$$T_{wind} = \frac{P_{wind}}{\omega_m} = \frac{1}{2} A \rho C_p(\lambda) \frac{v_m^3}{\omega_m} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2} \rho A r \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} v_m^2 = \frac{1}{2} \rho A r C_T(\lambda) v_m^2$$

$$C_T(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} : \text{torque coefficient.}$$

$A$  = area swept by the rotor blades [ $m^2$ ]

$\rho$  = air density [ $kg/m^3$ ]

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (5)$$

$P$  = air pressure

$T$  = temperature on the absolute scale

$R$  = gas constant

일반적으로 공기 밀도는 식 (6)과 같이 고도만을 변수로 갖는 간단한 식으로 나타낼 수 있다

$$\rho = \rho_0 - 1.194 \cdot 10^{-4} \cdot H_m \quad (6)$$

$H_m$  = the site elevation in meters

$$\rho_0 = 1.225 [kg/m^3]$$

## 2.2 풍력 터빈의 모델링

PSCAD/EMTDC 및 EMTP/ATP Drawer의 경우는 전압원 전원, 저항 및 발전기 등과 같은 컴포넌트를 팔레트 상에서 연결하여 컴파일한 후 컴파일을 통해 생성된 프로그램을 계산하여, 원하는 부분의 결과를 얻을 수 있는 형식으로 되어 있다.

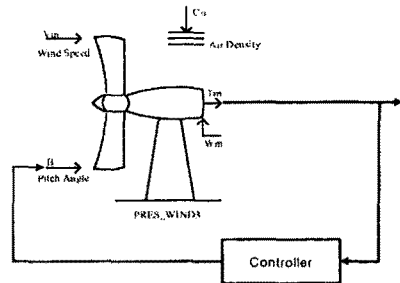


그림 3 풍력 터빈의 토크측어 다이어그램

표 1 풍력터빈 모델의 초기치 파라미터

Flow	Content
External input	Wind speed
	Pitch angle
	Air density
	Mechanical angular velocity of the rotor
Parameter input	Radius of the rotor
	Cut in wind speed
	Cut out wind speed
Output	Regular torque

본 논문에서는 새로운 풍력 터빈 모델을 하나의 컴포넌트로 만들어 시뮬레이션상에서 이용하였다. 표 1에서 표현된 외부입력을 식 (4)에 대입하여 계산하고 그에 따른 계산 결과를 표 1의 출력 값으로 표현하였다.

그림 3은 실제 EMTDC의 Draft 상에서 표현된 풍력 터빈 컴포넌트의 외형이다. 본 논문에서 제안한 새로운 개념의 풍력터빈 컴포넌트를 통하여 터빈의 용량 등을 다양하게 고려할 수 있는 시뮬레이션이 가능해졌을 뿐만 아니라, 풍력 발전 시스템 분야의 연구에 있어 비용절감과 연구기간 단축시킬 수 있게 되었다.

## 2.3 실제 데이터를 이용한 시뮬레이션 방법

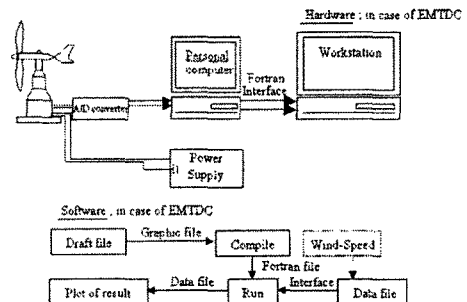


그림 4 실제 기상조건을 이용한 시뮬레이션의 개념도

EMTP와 EMTDC 등의 전력 시스템용 과도현상 디지털 시뮬레이션 도구를 이용한 풍력 발전시스템의 시뮬레이션의 경우는 실제의 기상 조건을 모의한다는 것은 불가능하다. 그로 인해 기상조건 등의 외부 파라미터가 필요한 시뮬레이션의 경우는 그 결과의 신뢰성은 비교적 낮다고 할 수 있다. 그러나, 그림 4의 개념도와 같이 EMTDC를 이용한 비선형 외부 파라미터와 포트란언어

와의 인터페이스 방법을 도입함으로써 최초로 실제 기상 조건 데이터를 이용한 풍력발전시스템의 시뮬레이션이 가능하게 되었다.

### 2.4 피치각 제어를 이용한 출력 제어 방법

본 논문에서 사용한 출력제어 방법은 가장 일반화된 피치각 제어 방법을 사용하여 그 특성을 해석하였다. 피치각 제어의 알고리즘은 터빈의 출력 토크를 피드백 받아 PI제어를 사용하여 피치각을 제어하는 방식이다. 또한 블레이드 관성을 고려하여 블레이드 특성에 따라 피치각의 변화 속도를 정할 수 있게 하였다.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

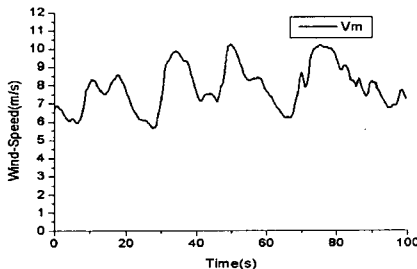


그림 6 실제 측정된 풍속 데이터

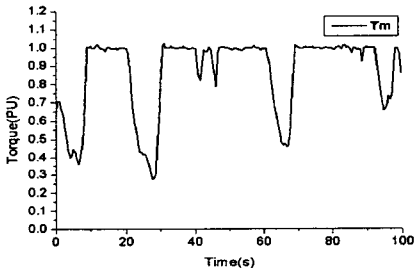


그림 7 이상적인 피치각 제어시의 풍력터빈 출력토크

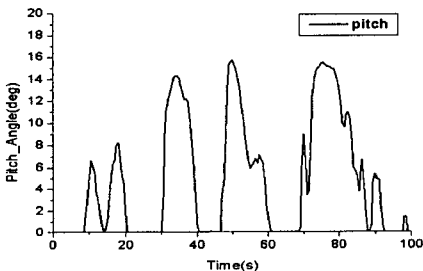


그림 8 이상적인 피치각 제어시의 피치각

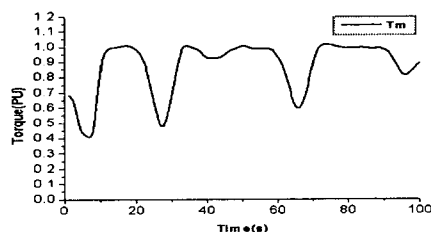


그림 9 관성을 감안한 모의 시스템의 풍력터빈 출력토크

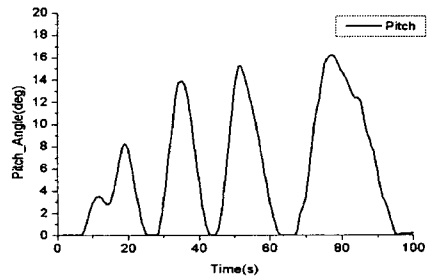


그림 10 관성을 감안한 모의 시스템의 블레이드 피치각

그림 6는 풍력터빈 컴포넌트에 입력된 풍속데이터로서 100초간 측정된 실제 풍속이다. 입력된 풍속에 의한 터빈의 출력토크는 원형 2차 제어 시스템[6]을 사용하여 터빈의 관성특성까지 고려하였으며 터빈의 출력 토크를 피치각으로 제어하여 발전기가 탈조되는 것을 방지하였다. 그림 7은 피치각 제어시 관성을 고려하지 않았을 때 풍력터빈의 출력 토크를 나타낸다. 이 값은 이상적인 것으로서 출력 토크가 정격 토크 이상일 경우 그림 8과 같이 피치각이 급격히 커져 출력토크를 일정하게 유지시킨다. 그러나 실제 시스템에서는 피치각의 최대 변화 속도를 가지므로 그림 7과 같은 결과는 얻을 수 없다. 그림 9는 피치각의 최대 변화 속도가 8 °/s인 블레이드를 가지는 풍력터빈[7]을 모의 실험하여 얻은 출력 토크를 나타낸다. 그림 7과 비교하여 토크변화가 완만함을 확인할 수 있다. 그림 10은 이때의 피치각을 나타낸다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 풍력발전 시스템 모델링을 실현 시켰으며, 실제 기상 상태를 이용하여 EMTDC상에서 시뮬레이션이 가능하도록 하였다. 또한 기존의 풍력 터빈 컴포넌트를 수정 보완하여 보다 실제설비와 유사한 출력값을 얻을 수 있었다. 특히 관성 등의 물리적인 특성을 원형 2차 제어 시스템을 이용하여 그 특성을 보장하였다. 이로써 모델링한 풍력 터빈 컴포넌트의 특징을 개선시킬 수 있었으며, 그에 따라 시스템의 제어 알고리즘을 수정하여 모델링한 풍력발전 시스템을 개선시켰다.

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 일부지원에 의한 것입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Mukund R. Patel, "Wind and Solar Power System", IEEE Transactions on Energy Conversion, CRC Press, pp35-69, 1999
- [2] "PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software Manual", Manitoba HVDC Research Centre, 1996
- [3] Minwon Park, "A Novel Simulation Method for PV Power Generation System using Real Field Weather Condition and its Application", Trans. IEE of Japan, Vol. 121-B, No. 1, Nov., 2001
- [4] Bogdan S. Borowy "Dynamic Response of Stand-Alone Wind Energy Conversion System with battery Energy Storage to Wind Gust" IEEE, Trans. on Energy Conversion, Vol. 12, No. 1, March 1997
- [5] A. Murdoch, "Control Design and Performance Analysis of a 6 MW Wind Turbine-Generator" IEEE, Trans. Vol. PAS-102, No. 5, May 1983
- [6] Benjamin C.Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice hall, pp340-351, 1993
- [7] Eduard Muljadi, "Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 1, pp240-246, 2001