

# PSCAD/EMTDC를 이용한 풍력발전시스템의 새로운 시뮬레이션 방법에 관한 연구

|         |
|---------|
| 論 文     |
| 52A-6-3 |

## Study on a Novel Simulation Method of Wind Power Generation System Using PSCAD/EMTDC

韓 相 根\* · 朴 敏 遠\*\* · 劉 仁 根\*\*\*  
(Sang-Geun Han · Minwon Park · In-Keun Yu)

**Abstract** - This paper proposes a novel simulation method of WPGS (Wind Power Generation System). The rotation speed control method of turbine under variable wind speed using the pitch control is proposed. Moreover, when wind speed exceeds the cut-out wind speed, the turbine will be stopped by controlling pitch angle to 90°, otherwise it will be controlled to steady-state operation.

For the purpose of effective simulation, the SWRW (Simulation method for WPGS using Real Weather condition) is used for the utility interactive WPGS simulation in this paper, in which those of three topics for the WPGS simulation: user-friendly method, applicability to grid-connection and the utilization of the real weather conditions, are satisfied.

It is impossible to consider the real weather conditions in the WPGS simulation using the EMTP type of simulators and PSPICE, etc. External parameter of the real weather conditions is necessary to ensure the simulation accuracy. The simulation of the WPGS using the real weather conditions including components modeling of wind turbine system is achieved by introducing the interface method of a non-linear external parameter and FORTRAN using PSCAD/EMTDC in this paper.

The simulation of long-term, short-term, over cut-out and under cut-out wind speeds will be performed by the proposed simulation method effectively. The efficiency of wind power generator, power converter and flow of energy are analyzed by wind speed of the long-term simulation. The generator output and current supplied into utility can be obtained by the short-term simulation. Finally, transient-state of the WPGS can be analyzed by the simulation results of over cut-out and under cut-out wind speeds, respectively.

**Key Words** : wind power generation system, wind turbine, PSCAD/EMTDC, pitch control

### 1. 서 론

현대 산업사회의 에너지 소비 증가에 따른 석탄, 석유등의 화석에너지 고갈에 대비하고, 화석에너지 사용으로 인한 환경 오염문제를 감소시키기 위해 환경 친화적이고 에너지원이 풍부한 대체에너지 분야에 대한 관심이 고조 되고 있으며, 특히 풍력발전시스템은 태양열, 태양광 발전시스템 등에 비해 발전단가가 낮고 출력 용량이 크기 때문에 더욱 각광 받고 있다[1]. 일부 선진국에서는 풍력발전시스템이 이미 상용화되어 설비의 대용량화, wind farm 조성 등에 대한 연구가 이루어지고 있고[2], 국내에서는 해외 기술에 의한 일부 풍력발전설비를 설치하여 운전 중이며, 최근 국가적인 지원 정책과 국내 연구자들의 관심 증대로 인해 풍력발전의 계통

연계, 역률 보상, 최대출력 제어에 대한 연구 등이 이루어지고 있다. 그러나, 풍력발전시스템에 대한 연구는 연구비에 대한 부담으로 인해 연구속도가 지연되고 있으므로, 다양한 종류의 풍력터빈, 발전기, 전력변환장치 등을 쉽게 모의할 수 있는 풍력발전시스템 시뮬레이터 개발이 연구자들 사이에 강력히 요구된다[3].

본 논문에서는 이러한 풍력발전시스템 연구의 어려움을 극복하기 위한 대안으로 PSCAD/EMTDC를 이용하여 다양한 풍력발전시스템의 현상을 모의할 수 있는 새로운 시뮬레이션 방법을 제안하고자 한다. 구체적으로 SWRW(Simulation method for WPGS using Real Weather Conditions)를 사용하여 실제 기상상태를 고려한 풍력발전시스템의 시뮬레이션을 수행하게 되며, 그림 1은 본 논문에서 제안한 SWRW의 개념을 나타낸 것이다. SWRW에서는 풍력발전시스템 관련 연구자들이 요구하는 다음과 같은 세 가지 점을 고려하였다 [4, 5].

\* 準 會 員 : 昌原大學校 電氣工學科 碩士課程  
\*\* 正 會 員 : 次世代超電導應用技術開發事業團 · 工博  
\*\*\* 正 會 員 : 昌原大學校 電氣工學科 教授 · 工博  
接受日字 : 2002年 12月 13日  
最終完了 : 2003年 4月 28日

- 1) 사용자 측면에서 사용하기 쉬운 방법
- 2) 기존시스템과의 연계가능성
- 3) 실제 기상조건을 이용

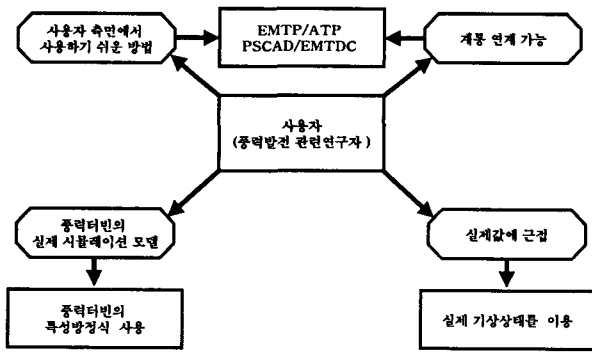


그림 1 SWRW의 개념도  
Fig. 1 Conceptual diagram of the SWRW

그림 1에서 보듯이, SWRW는 연구자들이 요구한 조건들을 수용하는 특별한 시뮬레이션 방법이 될 수 있다.

본 논문에서는 EMTDC를 이용한 비선형 외부파라미터와 포트란 언어와의 인터페이스 방법을 도입함으로써 실제 기상상태 데이터를 이용한 풍력발전시스템의 시뮬레이션이 가능하게 되었다[6]. 풍력터빈 컴포넌트는 피치제어 알고리즘과 원형 2차 시스템을 이용한 관성개념을 포함하는 모델을 EMTDC상에서 사용할 수 있도록 새롭게 모델링하였다[7,8]. 또한, 바람에 의해 발생된 전압 전류는 풍속에 의해 가변되므로 전력변환장치를 사용하여 적정 전압 및 전류 크기로 변환하여 부하나 계통으로 공급해야 한다. 그러므로, 본 논문에서는 다이오드 정류기와 전류제어 전압원 인버터를 모델링하여 불안정한 전류를 정현적으로 만들어 계통에 공급되도록 하였다. 이러한 시뮬레이션 방법을 이용하여 계통연계형 풍력발전시스템의 정상상태와 과도상태를 모의하였고, 그 결과를 분석하였다. 특히 풍력발전시스템이 동작 중일 때의 과도현상 시뮬레이션은 아직 시도되지 않은 부분으로, 풍력발전시스템이 과도 상태일 경우 전력변환장치에서 나타나는 현상 및 계통에 미치는 영향 등을 분석하였다.

2. 실제기상상태를 이용한 풍력발전시스템 시뮬레이션

풍력발전시스템의 시뮬레이션은 많은 연구자들에 의해 시도되었지만 부분적으로 이루어졌을 뿐 시스템 전체를 모의한 시뮬레이션 법은 거의 없었다. 시스템 전체를 모의한 시뮬레이션도 Long-term의 경우만 모의하였을 뿐 과도현상까지는 분석하지 않았으며, 일정풍속 또는 임의의 풍속을 만들어 시스템을 모의하는 방법을 사용하고 있고, 실제 기상상태를 고려한 시뮬레이터는 아직 개발되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서 제안한 실제 기상조건을 사용하고, long-term, short-term 시뮬레이션이 가능할 뿐만 아니라, 과도현상 시뮬레이션도 할 수 있는 시뮬레이션 방법은 새로운 개념의 효시가 될 것이다.

2.1 풍력터빈의 특성방정식

풍력발전시스템의 출력은 풍속과 주속비(TSR: Tip-Speed

Ratio), 출력계수(Cp: Power Coefficient)에 의해 결정된다. 풍속에 의해 결정되는 출력계수-주속비의 특성곡선은 그림 2와 같이 나타나며, 이것을 이용하여 출력 제어를 한다. 주속비는 풍속과 회전자 끝의 회전속도의 비율로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[9].

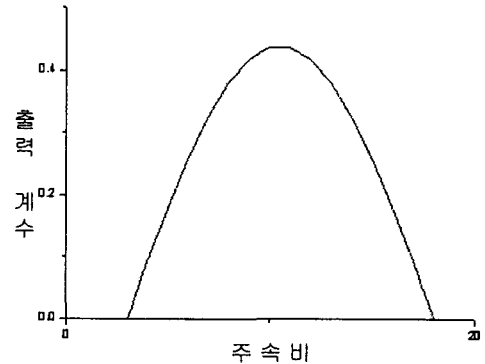


그림 2 출력 계수 대 주속비  
Fig. 2 Power coefficient versus tip-speed ratio

$$\lambda = \frac{r\omega_m}{v_m} \tag{1}$$

- $\omega_m$  = 회전자의 기계적 각속도 [rad/s]
- $v_m$  = 풍속 [m/sec]
- $r$  = 회전자의 반지름 [m]
- $\lambda$  = 회전자 블레이드의 주속비

바람이 가지고 있는 전체 에너지 중에서 회전자가 입력받는 에너지의 비율을 출력계수 Cp라하며 이론상 최대 값은 Betz'법에 의해 0.59이나 실제 가능한 최대 값은 0.44정도이고, 일반적으로 평균 20%이상이지만 그 값은 풍속에 의해 매우 가변적이다. Cp는  $\lambda$ 와 B의 함수로 표현된다[10].

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

B = 블레이드의 피치각 [deg]

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

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

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

$$C_T(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} : \text{토크 계수}$$

A = 회전자의 회전 단면적 [m<sup>2</sup>]

$\rho$  = 공기밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

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

$P$  = 기압  
 $T$  = 절대온도  
 $R$  = 가스 상수

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

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

$H_m$  = 고도  
 $\rho_0 = 1.225[\text{kg/m}^3]$

### 2.2 외부 데이터와의 인터페이스

기상조건 등의 외부 파라미터가 필요한 시뮬레이션의 경우 임의의 풍속이나 일정 풍속을 사용한 시뮬레이션의 결과는 신뢰성이 비교적 낮다고 할 수 있다. 그러나, 그림 3의 개념도와 같이 EMTDC를 이용한 비선형 외부 파라미터와 포트란언어와의 인터페이스 방법을 도입함으로써 최초로 실제 기상조건 데이터를 이용한 풍력발전시스템의 시뮬레이션이 가능하게 되었다.

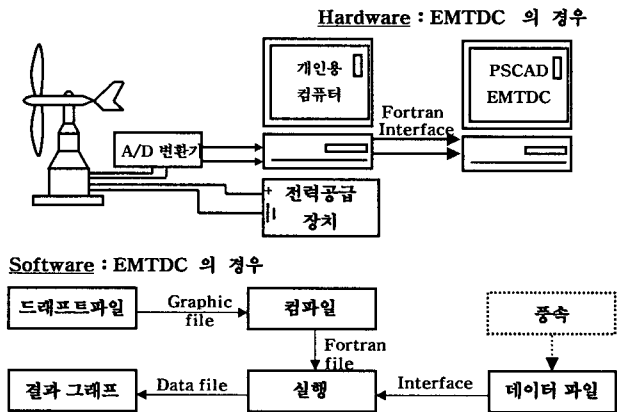


그림 3 실제 기상조건을 이용한 시뮬레이션의 개념도  
 Fig. 3 Simulation concept using real weather conditions

### 2.3 풍력터빈의 모델링

PSCAD/EMTDC 및 EMTP/ATP Drawer의 경우는 전압원, 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.

본 논문에서는 실제 기상상태인 풍속  $V_m$ 과  $C_o$ 를 입력으로 사용하여 풍력 특성 방정식에 입력하여 출력 값으로 토크를 얻을 수 있도록 하였고, 이 출력 토크를 피드백하여 PI 제어기를 이용한 피치각 제어를 할 수 있도록 모델링하였다. 또한, 원형 제어2차 제어시스템을 이용하여 터빈의 관성 및 피치각 제어 속도 등을 고려하였다.

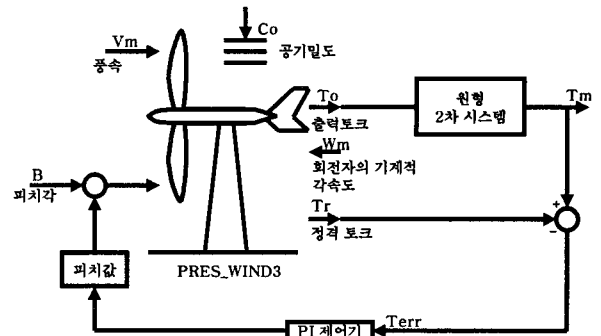


그림 4 풍력 터빈의 토크제어 흐름도  
 Fig. 4 Torque control flow of a wind turbine

표 1 풍력터빈 모델의 초기치 파라미터  
 Table 1 Initial parameters of wind turbine model

| 목 차     |                           |
|---------|---------------------------|
| 외부입력    | 풍 속                       |
|         | 피치각                       |
|         | 공기밀도                      |
|         | 회전자의 기계적 각속도              |
| 파라미터 입력 | 회전자의 반지름                  |
|         | 저차단속도(Cut-in wind speed)  |
|         | 고차단속도(Cut-out wind speed) |
|         | 정격토크                      |
| 출력      | 출력토크                      |

그림 4는 실제 EMTDC의 Draft 상에서 표현된 풍력 터빈 컴포넌트의 외형과 토크제어의 흐름도를 나타낸 것이다. 본 논문에서 제안한 새로운 개념의 풍력터빈 컴포넌트를 통하여 터빈의 용량 등을 다양하게 고려할 수 있는 시뮬레이션이 가능해졌을 뿐만 아니라, 풍력발전시스템 분야의 연구에 있어 비용절감과 연구기간 단축시킬 수 있게 되었다.

동기발전기를 사용한 풍력발전시스템에서 풍력터빈의 회전속도가 동기발전기의 동기속도보다 빠르게 회전한다면 동기발전기에 악영향을 미칠 것이다. 그러므로, 바람이 정격풍속 이상으로 불 때 풍력터빈의 회전속도를 제어해주어야만 한다. 이에 대한 대책으로 본 논문에서는 풍속에 대해 블레이드의 피치각을 제어하여 풍력터빈의 회전속도를 동기속도로 유지시켜 주었다. 또한, 원형2차 시스템을 사용하여 풍력터빈의 관성을 고려하였다. 그림 5는 풍속에 대한 피치각 제어를 나타낸 제어알고리즘이다. 풍속과 공기밀도를 외부에서 입력받아 풍력터빈의 특성방정식을 통해 풍력터빈의 출력토크를 구한다. 이때 풍속이 cut-in wind speed 보다 약할 경우 풍력터빈은 회전하지 않도록 설정하였고, 풍속이 cut-out wind speed 보다 강할 경우 블레이드의 피치각을 급격히 증가시켜 터빈을 정지시킨다. 풍력터빈이 회전할 수 있는 풍속하에서 풍력터빈은 관성을 무시할 수 없으므로 이에 대한 대책이 필요하다. 그러므로, 본 논문에서는 원형2차 시스템을 사용하여 풍력터빈의 관성을 고려하였다. 또한 풍력터빈의 회전속도를 동기속도로 유지시키기 위해 동기발전기에 입력되는 토크가 정격토크 이상일 경우 정격토크와 비교하여 그 오차를 PI제어하여 피치각을 제어한다. 이로써, 풍력터빈의 회전속도는 동기발전기의 허용범위 내에서 동작을 할 것이다.

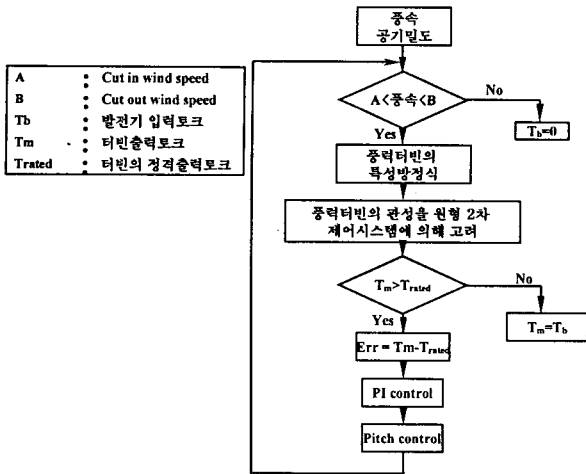


그림 5 피치각 제어 알고리즘  
Fig. 5 Control algorithm of pitch angle

2.4 풍력터빈의 시뮬레이션

그림 6은 본 논문에서 제안한 실제 기상상태를 이용한 풍력발전시스템 시뮬레이션의 풍력터빈 컴포넌트에 입력하기 위해 100초 동안 측정된 실제 풍속 데이터이다. 이 데이터는 cut-out wind speed 이상일 경우 발생하는 과도현상을 분석하기 위해 바람이 아주 강한 날의 풍속을 측정된 것이다. 그림 7은 그림 6의 풍속데이터를 풍력터빈 컴포넌트에 입력하였을 때 출력되는 토크와 그때의 피치각을 나타낸 것이다.

본 논문에서 모델링한 풍력터빈 컴포넌트는 정격 풍속 이상일 경우 그 출력토크가 정격을 유지하기 위해 피치각 제어가 되도록 만들어졌으며, cut-out wind speed 이상일 경우에는 풍력터빈과 발전기의 보호를 위해 피치각을 급격히 크게 하여 터빈의 회전을 정지시키도록 만들어졌다. 또한 풍력터빈의 종류에 따라 무게, 크기가 다르므로 관성 값도 달라지게 된다. 그러므로, 다양한 종류의 풍력터빈을 시뮬레이션할 수 있도록 관성 값을 변화시켜줄 수 있게 풍력터빈을 모델링하였다.

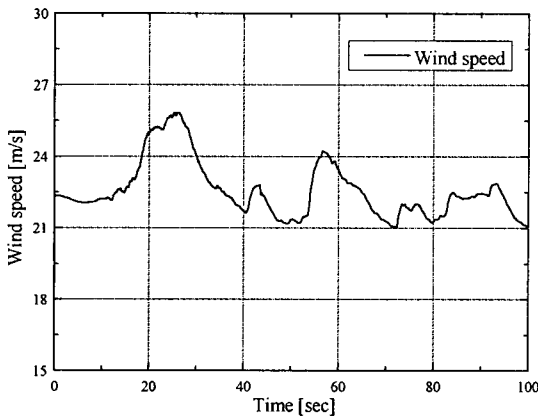


그림 6 100초 동안 측정된 실제 풍속데이터  
Fig. 6 The real wind speed data for 100 [sec]

블레이드의 피치각 제어 또한, 물리적인 동작을 하므로 cut-out wind speed 이상일 경우 갑자기 변하지 않고 그림 6에서와 같이 일정 속도로 증가하고 감소함을 알 수 있으며 이로 인해 풍력터빈은 갑자기 멈추지 않고 일정시간이 지난 뒤에 동작을 멈추게 된다.

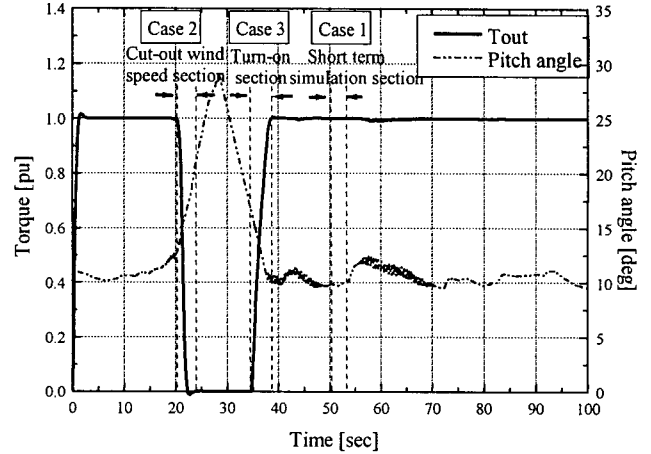


그림 7 블레이드의 피치각과 풍력터빈의 출력토크  
Fig. 7 Pitch angle of blade and output torque of wind turbine

그림 7에서 Tout는 풍력터빈의 출력토크를 나타내고, Pitch angle은 블레이드의 피치각을 나타낸다. 본 논문에서는 long-term, short-term, cut-out wind speed 이상일 경우, 다시 turn on 될 경우를 시뮬레이션 하였다. Long-term 시뮬레이션은 100초 동안 시뮬레이션 하였고, short-term 시뮬레이션은 Case1 구간, cut-out wind speed 이상일 경우에는 Case2 구간, 다시 turn on 될 경우는 Case3 구간에서 하였다.

2.5 전력변환장치의 시뮬레이션

풍력발전시스템을 단독운전으로 동작시킬 경우 부하의 정격 전압만을 고려해주면 되기 때문에 전압제어형 전압원 인버터를 사용한다. 그러나, 계통에 연계하여 동작시킬 경우는 계통의 용량이 풍력발전시스템의 용량에 비해 커서 인버터 출력전압을 계통전압이 유지시켜주기 때문에 고려하지 않아도 된다. 그러므로, 계통 연계형 풍력발전시스템에서는 계통의 전력품질을 고려한 정현적인 전류를 공급해야 하므로 전류제어형 전압원 인버터를 사용한다.

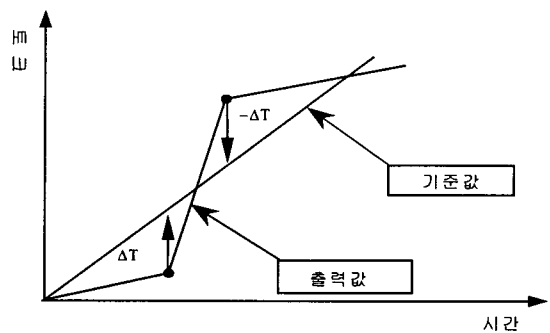


그림 8 히스테리시스 인버터의 제어개념  
Fig. 8 Control concept of hysteresis inverter

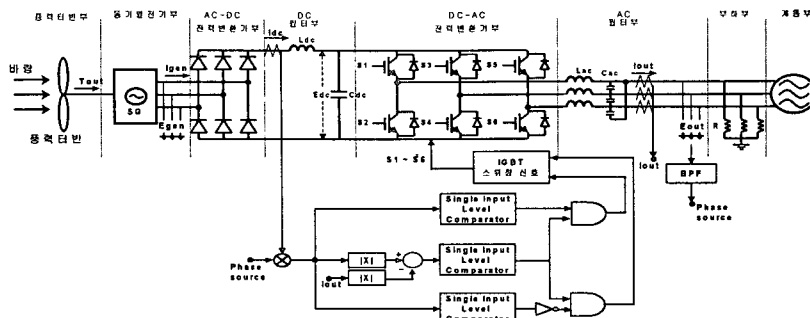


그림 9 전류제어 전압원인버터 스위칭 제어 방식  
 Fig. 9 Switching control method of current-controlled voltage source inverter

인버터의 스위칭 신호를 제어하는 방법 중 현재 주로 사용되고 있는 방법에는 PWM 방식, 히스테리시스 방식이 있다. PWM 제어 방식은 제어개념이 간단하고 계산량도 적기 때문에 초기의 인버터에 사용되었다. 그러나 계산량이 적은 만큼 출력에 고조파가 많이 발생하므로 LC필터의 용량이 커지게 되고, 제작비용도 고가가 된다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 단점이 있는 PWM 방식 인버터 대신 히스테리시스 방식의 인버터를 사용하였다. 히스테리시스 방식 인버터는 고속 계산이 가능한 CPU를 필요로 하므로 하드웨어 구성시 DSP를 이용한 인버터 신호부 제작이 필요하다.

그림 8은 히스테리시스 방식 인버터의 제어개념을 나타낸 것이다. 히스테리시스 방식 인버터의 스위칭 신호 제어개념은 어떤 기준 값이 있을 경우 출력 값을 피드백 받아 기준 값과 비교하여 출력 값이 작을 경우 스위치를 ON시켜 출력 값을 올려주고 출력 값이 클 경우 스위치를 OFF시켜 출력 값을 내려 기준 값에 추종하도록 스위칭 시켜주는 방식이다.

그림 9는 저자 등이 시뮬레이션한 히스테리시스 방식의 전류제어 전압원 인버터의 스위칭 제어를 나타낸 것이다. 정류기 출력 전류 Idc를 피드백 받아 계통전압 주파수와 위상을 맞추어 인버터 출력과 비교하고, 그 오차를 구하여 오차 값을 제어신호에 반영하여 정현적인 출력을 만들어준다. 본 논문에서는 이러한 제어 알고리즘을 PSCAD/EMTDC상에서 주어진 컴포넌트를 이용하여 구현하였고, 이를 시뮬레이션하였다. 그림 9에서 인버터 구동 신호인 S1~S6은 S1-S4, S3-S6, S5-S2와 같이 쌍으로 동작하며, 스위칭 제어 블록도는 각 상마다 하나의 블록도로 구성되어진 것을 하나의 블록도로 나타낸 것이다.

3. 시뮬레이션 결과분석

본 논문에서 제안한 실제 기상상태를 이용한 풍력발전시스템의 시뮬레이션 구성도는 그림 10과 같다.

실제 기상상태가 입력되면 풍력터빈 컴포넌트에 의해 토크가 계산되고, 계산된 토크는 원형2차 시스템에 의해 관성의 영향을 고려한 출력토크가 발생되며, 이 출력토크는 풍력발전기로 입력이 된다. 또한, 피치각 제어를 위해 출력토크를 피드백하여 정격토크와 비교하고 그 오차를 검출한다. 이 오차 값을 PI제어기를 통해 제어하여 블레이드의 피치각으로 입력시키면 풍력터빈의 출력토크는 정격토크로 유지될 것이다.

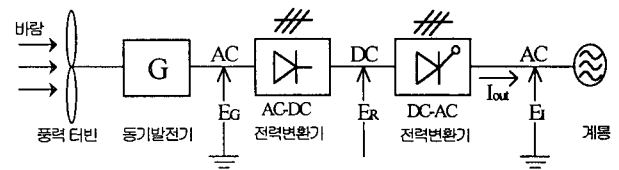


그림 10 풍력발전시스템의 시뮬레이션 구성도  
 Fig. 10 Structure of the WPGS simulation

그러나, 블레이드의 피치제어는 물리적인 제어이므로 제어하는데 시간이 소요되어 바람의 변화가 심하면 출력토크를 일정하게 유지시키지는 못할 것이다. 그러나, 이 변화는 발전기에 큰 영향을 줄만큼 크지는 않다.

표 2 시뮬레이션 파라미터  
 Table 2 Simulation parameters

|             |                      |               |                    |          |           |          |
|-------------|----------------------|---------------|--------------------|----------|-----------|----------|
| 풍력터빈        | 회전자의 반지름             | 24 [m]        | Cut in wind speed  | 4 [m/s]  |           |          |
|             | 정격 출력                | 750[kW]       | Cut out wind speed | 25[m/s]  |           |          |
|             | 회전속도범위               | 14 ~ 31 [rpm] | Rated wind speed   | 16[m/s]  |           |          |
| 시뮬레이션 파라미터  | 시뮬레이션 시간             | Long-term     | 100 sec            | 단위 계산 시간 | Long-term | 100 μsec |
|             |                      | Case 1        | 4 sec              |          | Case 1    | 10 μsec  |
|             |                      | Case 3        |                    |          | Case 2    | 10 μsec  |
|             | 데이터 입력 주기            | Long-term     | 100 Hz             | Case 1   | 10 μsec   |          |
|             |                      | Case 2        |                    | Case 2   | 10 μsec   |          |
|             |                      | Case 3        |                    | Case 3   | 10 μsec   |          |
| AC-DC 전력변환기 | 폴브릿지 다이오드 정류기        |               |                    |          |           |          |
| DC-AC 전력변환기 | 히스테리시스형 전류제어 전압원 인버터 |               |                    |          |           |          |
| DC 필터 AC 필터 | C <sub>dc</sub>      | 100 μF        | L <sub>dc</sub>    | 1 mH     |           |          |
|             | C <sub>ac</sub>      | 0.15 μF       | L <sub>ac</sub>    | 55 mH    |           |          |
| 계통          | 계통전압                 |               |                    |          | 6.6 kV    |          |
|             | 계통주파수                |               |                    |          | 60 Hz     |          |
|             | 계통용량                 |               |                    |          | 1 MVA     |          |

피치각 제어가 된 출력 토크와 회전속도는 발전기로 입력되어 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시킨다. 발전기에서는 AC전압을 발생시키는데 이것은 풍속의 영향을 직접적으로 받기 때문에 전력계통에 연계시키거나 단독운전으로 사용하기 위해서는 전력변환장치가 필요하다.

본 논문에서는 계통연계형 풍력발전시스템의 long-term, short-term, 과도상태(cut-out wind speed 이상일 경우, Turn-on되는 경우)를 시뮬레이션 하였다. 표 2 는 본 논문에서 실행한 시뮬레이션의 파라미터들을 나타낸 것이다.

그림 11과 그림 12는 long-term 시뮬레이션 하였을 때의 발전기 출력전력과 인버터 출력전력을 나타낸 것이다. 이 시뮬레이션의 입력 풍속은 그림 6의 데이터를 사용하였다. Long-term 시뮬레이션의 분석을 통해 풍력에 대한 에너지의 흐름을 분석하였고, 시뮬레이션의 효율을 증명하였다. 본 논문에서 사용한 시스템은 750kW급 발전시스템이며, 시스템의 효율은 84%이다. 또한 cut-out wind speed는 25m/s인 시스템을 모의하였다.

본 논문에서는 short-term 시뮬레이션을 통해 풍력발전시스템이 계통에 미치는 영향을 분석하였다. 그림 13은 발전기(SG)의 출력 전류를 나타낸 것인데, 정류기(REC)와 리액턴스의 영향으로 그림과 같이 찌그러지게 된다. 그림 14는 인버터(INV)의 출력 전류를 나타낸 것이며, 그림과 같이 깨끗한 정현파 전류를 계통으로 공급하는 것을 알 수 있다. 그림 15는 계통전압으로서 풍력발전시스템과 같은 분산형 전원에 비해 그 용량이 크기 때문에 항상 정현파 전압을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

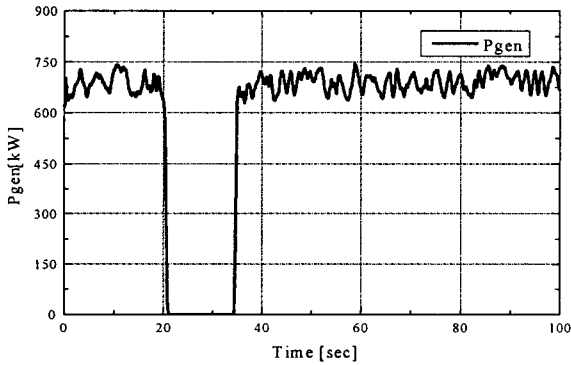


그림 11 Long-term시 발전기(SG)의 출력  
Fig. 11 Output power of generator(SG) at long-term simulation

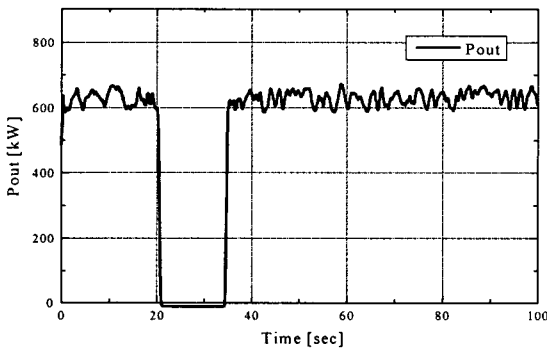


그림 12 Long-term시 인버터(INV)의 출력  
Fig. 12 Output power of inverter(INV) at long-term simulation

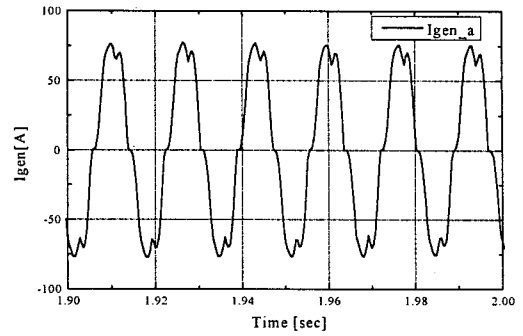


그림 13 발전기(SG) 출력 전류(case 1)  
Fig. 13 Output current of generator(SG) (case 1)

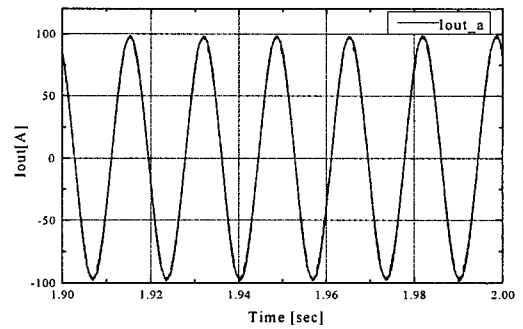


그림 14 인버터(INV) 출력 전류(case 1)  
Fig. 14 Output current of inverter(INV) (case 1)

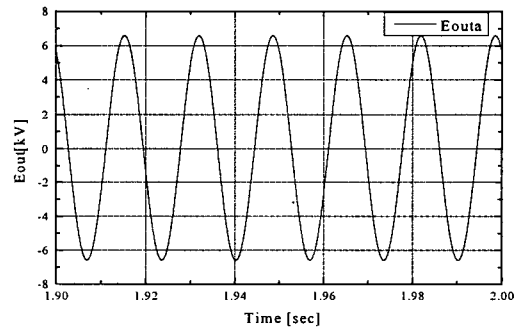


그림 15 계통전압 (case 1)  
Fig. 15 System voltage (case 1)

그림 16은 Case 2에서의 발전기 출력 전류를 나타낸 것이다. 풍속이 cut-out wind speed 이상이 되면 풍력 터빈과 발전기를 보호하기 위하여 블레이드의 피치각을 급격히 크게 하여 풍력터빈을 정지시키는 것을 볼 수 있다. 이때의 발전기 출력은 아주 빨리 줄어들어 거의 0인 상태가 되는 것을 그림 16에서 확인할 수 있다. 또한, 그때의 인버터 출력은 그림 17과 같이 발전기 출력과 같이 급격히 줄어들게 된다. Cut-out wind speed 이상일 경우 그림 17과 같이 계통으로 공급되던 전류가 갑자기 줄어들게 된다. 이러한 현상은 계통에 전압강하 등의 악영향을 미치는데, 이는 그림 18과 같이 나타난다. 이것을 좀더 정확히 분석하기 위하여 그림 19와 같이 전압강하부분을 확대하여 나타내었다. 그림 19를 분석함으로써 풍력발전시스템의 출력이 급격히 줄어들 경우,

계통의 전압 강하율을 아주 쉽게 알아볼 수 있게 되어 풍력 발전시스템이 계통에 미치는 영향을 분석하는데 큰 도움이 될 것이다.

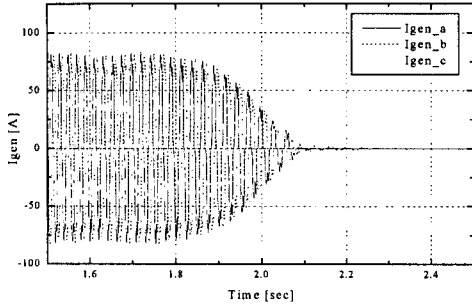


그림 16 발전기(SG) 출력 전류 (case 2)  
Fig. 16 Output current of generator(SG) (case 2)

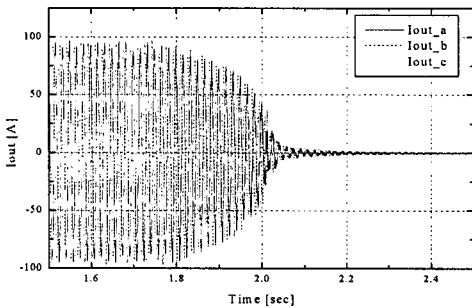


그림 17 인버터(INV) 출력 전류 (case 2)  
Fig. 17 Output current of inverter(INV) (case 2)

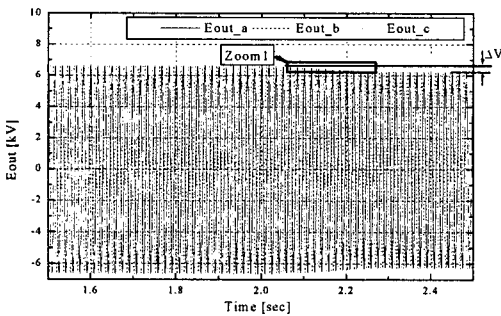


그림 18 계통전압 (case 2)  
Fig. 18 System voltage (case 2)

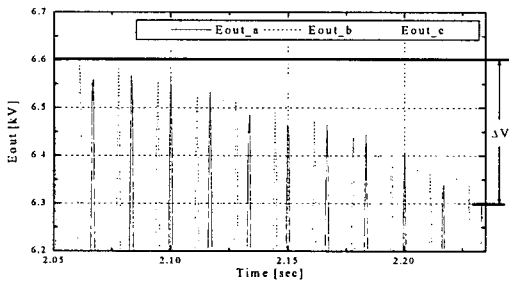


그림 19 그림 18의 Zoom1 부분 확대  
Fig. 19 Magnifying of Zoom1 part of Fig. 18

그림 20은 cut-out wind speed 이상으로 불던 바람이 그 이하로 떨어질 경우(case 3), 풍력발전시스템의 발전기 출력을 나타낸 것이다. 이때 블레이드의 피치각은 피치각 제어에 의해 급격히 작아져 풍력터빈이 정격출력을 낼 때까지 변할 것이다. 그러므로 풍력터빈의 회전속도는 급격히 빨라지게 되고, 출력토크도 빠른 속도로 증가할 것이다. 이로 인해 발전기 출력은 그림 20과 같이 나타난다. 그리고, 인버터 출력은 그림 21에서와 같이 발전기 출력과 유사하게 증가하게 되는 것을 확인할 수 있다. Case 3에서의 시뮬레이션은 발전기가 계통에 갑자기 투입되었을 경우 계통에 미치는 영향을 분석하기 위한 것이다. Case 3일 경우 풍력발전시스템이 계통에 미치는 영향인 전압 상승현상을 그림 22와 같이 확인할 수 있다. 그림 23은 정확한 분석을 위해 전압 상승이 일어나는 부분을 확대하여 나타낸 것이다.

본 논문에서는 long-term, case 1, 2, 3에서의 시뮬레이션을 통해 풍력발전시스템에서 일어날 수 있는 현상들을 아주 쉽게 분석할 수 있었다. 특히 과도현상에서 일어나는 현상들을 전력계통의 다양한 조건으로 시뮬레이션하여, 분석하는 것이 가능하게 되었다.

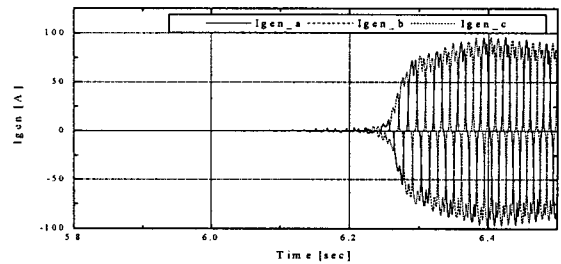


그림 20 발전기(SG) 출력 전류 (case 3)  
Fig. 20 Output current of generator(SG) (case 3)

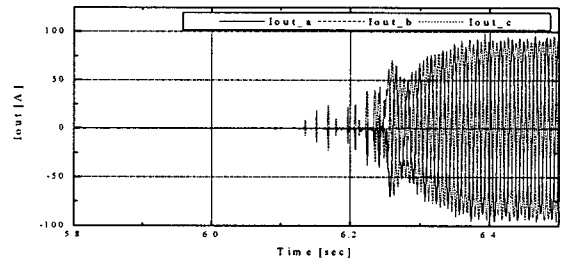


그림 21 인버터(INV) 출력 전류 (case 3)  
Fig. 21 Output current of inverter(INV) (case 3)

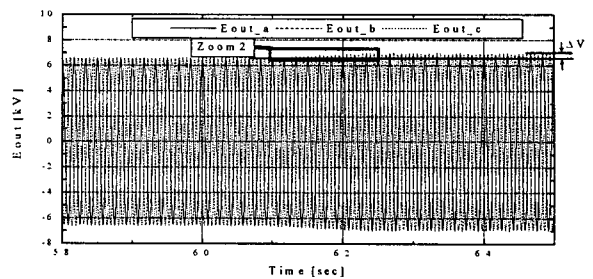


그림 22 계통전압 (case 3)  
Fig. 22 Utility voltage (case 3)

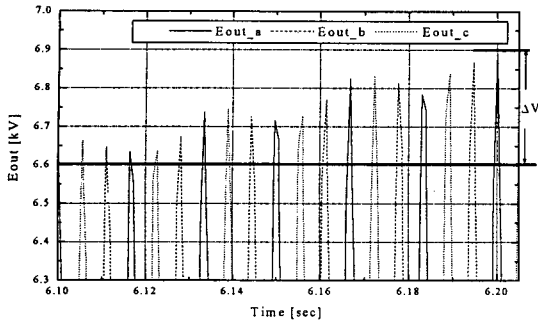


그림 23 그림 22의 Zoom2 부분 확대  
Fig. 23 Magnifying of Zoom2 part of Fig. 22

#### 4. 결 론

본 논문에서는 풍력발전시스템의 새로운 시뮬레이션 방법을 제안하고, 제안한 시뮬레이션 방법을 이용하여 long-term, short-term 및 과도상태일 때의 시뮬레이션을 수행하였고, 결과 분석을 통해 그 효용성을 입증하였다. 특히, EMTDC를 이용한 비선형 외부 파라미터와 포트란언어와의 인터페이스 방법을 도입함으로써 최초로 실제 기상조건 데이터를 이용한 풍력발전시스템의 시뮬레이션을 가능하게 하였다.

Long-term 시뮬레이션을 통해 풍력에 대한 에너지의 흐름을 분석함으로써 풍력발전의 경제성 분석 및 시스템 규모의 크기 결정 등에 기여를 할 것이다. 또한, 기존의 풍력발전시스템의 long-term 시뮬레이션뿐만 아니라, short-term 시뮬레이션을 하였다. short-term 시뮬레이션을 통해 풍력발전시스템의 파라미터 분석과 시스템이 계통에 미치는 영향 등에 대한 연구에 기여할 것이다.

본 논문에서는 지금까지 풍력발전시스템 시뮬레이션에서 다루어지지 않았던 과도현상 시뮬레이션을 통해 과도 상태 시 풍력발전시스템이 계통에 미치는 영향을 분석하여 실제 시스템에서 일어나고 있는 순간적인 전압변동 현상 등을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 시뮬레이션 방법에 의해 풍력 발전 시스템의 용량과 풍력터빈의 제어방법을 자유롭게 변화시키면서 다양한 시뮬레이션이 가능하게 되었으며, 이는 관련 분야의 연구에 크게 기여할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부(기초전력공학공동연구소 : 02-지역-01)지원과 2002년도 에너지기술 학술진흥사업, 과학기술부·한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터 및 2002년 창원대학교 연구비의 일부지원에 의해 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] Mukund R. Patel, "Wind and Solar Power System", CRC Press. pp. 35-69, 1999
- [2] Jose Luis Rodriguez-Amenedo, Santiago Arnalte, Juan Carlos Burgos, "Automatic Generation Control of a Wind Farm With Variable Speed Wind Turbines", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 17, No. 2, pp.279-284, 1999
- [3] Sang-Geun Han, Minwon Park, In-Keun Yu, "Study on the simulation for synchronous generator type wind power system using PSCAD/EMTDC", ICEE, Vol. 1, pp. 161-165, 2002
- [4] 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, pp. 1499-1505, 2001
- [5] M. Park, B.T. Kim and I.K. Yu, "A study on the simulation scheme for utility interactive PV generation system", 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 13-18, 2001
- [6] 한상근, 박민원, 유인근, "실제 데이터를 이용한 가변속 풍력발전시스템의 시뮬레이션", 대한전기학회 하계학술대회, pp.1342-1344, 2002
- [7] "PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software Manual", Manitoba HVDC Research Centre, 1996
- [8] Benjamin C.Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice hall, pp340-351, 1993
- [9] 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, 1997
- [10] A. Murdoch, "Control Design and Performance Analysis of a 6MW Wind Turbine-Generator" IEEE, Trans. Vol. PAS-102, No. 5, 1983



## 저 자 소개



### 한 상 근 (韓 相 根)

1977년 1월 17일생. 2002년 창원대 전기공학과 졸업. 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 055-281-3150

E-mail : hansg@mail.changwon.ac.kr



### 박 민 원 (朴 敏 遠)

1970년 2월 12일생. 1995년 창원대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 오사카 대학 전기공학과 졸업(박사). 현재 차세대초전도응용기술사업단

Tel : 055-280-1043

E-mail : paku@keri.re.kr



### 유 인 근 (劉 仁 根)

1954년 2월 18일생. 1981년 동국대 전기공학과 졸업. 1983년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1985년 6월~1988년 2월 한국전기연구원 선임연구원(지중송전 연구실장). 1990년 12월~1992년 2월

University of Texas at Arlington(Post- Doc.). 1996년 12월~1998년 2월 Brunel University, UK (Visiting Scholar). 1998년 3월~현재 창원대학교 전기공학과 교수

Tel : 055-279-7512

E-mail : yuik@sarim.changwon.ac.kr