

농형 풍력 유도발전기의 운전 특성에 관한 연구

정성일·정종찬\*·최정환·박재열·김광호  
 강원대학교 전기전자정보통신공학부

A Study on the Operational Characteristics of a Squirrel-cage type Wind Turbine Induction Generator

Sung-Il Jang · Jong-Chan Jeong\* · Jeong-Hwan Choi · Je-Young Park · Kwang-Ho Kim  
 Dept. of Electrical and Computer Engineering, Kangwon National University

**Abstract** - The electric power network paralleled with wind turbine generator may have the negative impacts on the protection, operation, and management caused by the operation of wind turbine generator. Therefore, it is necessary to investigate the operating characteristic of wind turbine generator. This paper describes model of a squirrel-cage type wind turbine induction generator and the soft cut-in connection method for reducing the transient state on power network, and simulates various cases of wind turbine operations. The radial distribution network of IEEE 13-bus are modeled and tested by PSCAD/EMTDC.

인 출력증가와 감소를 필요로 함을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

2. 농형 풍력 유도 발전기의 개요

2.1 풍력발전기의 일반적인 구조

풍력 발전기란 공기의 운동 에너지를 이용하여 발전기 회전자를 회전시켜 전기에너지를 얻는 기술이다. 풍력 발전기는 지면을 기준으로 날개축의 설치방향에 따라 수평형 및 수직형으로 분류되고, 주요 구성 요소로는 날개와 허브로 구성되는 회전자, 회전력을 증속하여 발전기를 구동시키는 증속부, 발전기 및 각종 안전 장치를 제어하는 제어부, 유압 브레이크 장치와 전력 제어 장치 및 철탑 등으로 구성된다. 그림 1은 AC 풍력발전기의 일반적인 구조이다.(6)

1. 서 론

최근 들어 다양한 대체에너지를 이용한 발전형태 중 에너지 생산비용이 타 발전설비에 비하여 적은 풍력발전 시스템이 많은 주목을 받고 있다. 특히 향후에 건설되는 풍력발전기들은 과거 도서지역에 설치되어 운전되었던 독립 전원 형태에서 벗어나, 계통에 연계되어 생산된 전력을 계통으로 공급하는 연계 전원형태가 주가 될 것으로 예상된다. 풍력발전기의 연계운전 시에는 계통이 다양한 영향을 받을 수가 있는데, 이러한 영향을 최소화하기 위해서는 풍력발전기가 연계되어있는 배전계통에서 풍력발전기의 계통 투입으로 발생하는 현상과 풍황의 변화에 따른 풍력발전기들의 운전특성을 살펴보는 것이 매우 중요하다.

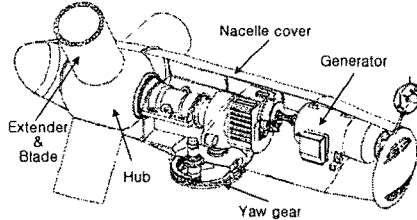


그림 1 풍력발전기 구조 (NORDEX N-43)

2.2 풍력 유도 발전기의 구조 및 발전원리

유도기는 크게 고정자와 베어링을 포함하는 회전자로 구성되어있으며 고정자와 회전자 사이에는 폭이 균일한 공극을 갖는다. 농형 권선은 회전자 슬롯 속에 끼어 넣어진 알루미늄 또는 동봉으로 이루어져 있으며 양측 끝부분은 단락되어 있다.(4) 유도발전기는 동기 발전기에 비하여 조속기와 여자기와 같은 주변장치가 불필요하므로 매우 간단한 형태를 가지고 있으며, 고정자 권선의 교류전류는 전원에서 직접 공급되며 회전자 권선에는 고정자 교류 전압의 유도 작용에 의해 교류전류가 흐르게 된다. 유도기의 회전자속도를 동기속도 이상으로 회전시키면 전력을 배전계통으로 공급하는 발전기로 동작한다. 회전자가 계통의 동기속도보다 빠르게 회전하면 슬립은 음의 값을 가지며, 유도발전기의 출력 양에 따라 증감한다.

풍력발전시스템에서 사용되는 발전기는 운전과 기동특성에 따라 여러 형태로 제작되고 있다. 특히, 풍황 변화에 대하여 일정한 전압크기와 주파수의 전력을 생산할 수 있고, 유지보수 비용이 적은 유도기 형태의 발전기가 큰 비중을 차지하고 있으며, 이 중에서도 구조가 간단하고 견고한 장점을 가진 농형 유도발전기가 많이 사용되고 있다. 일반적으로 농형 풍력 유도 발전기는 슬립 0~2%에서 동작하며, 다른 풍력발전기와 마찬가지로 pitch 컨트롤과 stall 컨트롤을 통하여 풍속과 풍량 변화에 대하여 일정한 회전자속도를 얻도록 운전한다.

3. 풍력발전기의 계통 연계 기법

본 논문에서는 농형 유도 풍력발전기가 연계되어 있는 배전계통이 발전기의 기동과 운전 특성에 따라 어떠한 영향 받는지를 분석하였으며, 또한 이때 배전계통에서 발생하는 과도현상을 감소시킬 수 있는 풍력발전기 운전 기법들에 대하여 기술하였다. PSCAD/EMTDC를 이용하여 농형 유도 발전기와 IEEE 13-bus 배전 계통을 구성하였다. 모의를 통해, 풍력발전기의 계통 투입시 발생하는 과도현상은 동기속도 부근에서 싸이리스터의 점호각을 점차적으로 조절하여 배전계통에 투입하면 최소화시킬 수 있다는 것을 보였다. 또한 풍황의 조건에 따라 풍력발전기의 출력이 변동하므로 급격한 풍력발전기의 출력 제어는 계통에 과도현상을 미칠 수 있어 점진적

풍력 유도발전기의 계통 연계는 고정자의 회전자계 속도와 같은 동기속도에서 이루어진다. 한편, 회전자의 속도도 고정자의 회전자계속도와 같은 동기속도에서 풍력발전기를 계통에 투입하여도, 배전계통에 일시적인 과도 현상이 발생하게 되므로, 이를 최소화하기 위해 싸이리스터를 이용하여 점호각을 동기속도 부근에서 서서히 변화시키면서 풍력발전기를 배전계통에 투입하는 Soft Cut-in 방법이 주로 사용된다.

### 3.1 동기 속도 계통 연계

농형 풍력 유도 발전기는 동기속도보다 빠른 속도로 회전자가 회전할 때 발전기로서 동작하게 된다. 따라서 계통의 동기속도 이하에서 발전기를 계통에 투입하게 되면, 풍력발전기는 전동기 같이 동작하게 되어 큰 돌입전류가 배전계통에 흐르며, 급격한 전압강하가 발생하여 과전류 계전기나 저전압 계전기의 오작동을 발생시킬 가능성이 있다. 이와는 반대로 동기속도보다 회전자 속도가 큰 상태에서 풍력발전기를 배전계통에 투입하면, 연계 순간 큰 용량의 발전기로 동작하여 계통에 심각한 영향을 미치게 된다. 따라서 농형 풍력 유도발전기의 계통 투입은 배전시스템에서 발생하는 과도현상을 최소화시키기 위하여 고정자의 회전자제 속도와 같은 동기속도에서 이루어져야 한다.

### 3.2 Soft Cut-in 기법

농형 풍력 유도 발전기가 회전자제 속도와 같은 동기속도에서 배전계통에 투입이 되어도 계통의 순간적인 변화로 인하여 계통에 과도 현상이 발생할 수 있다. 과도 현상 억제를 위하여 일반적인 유도 풍력발전기의 계통 연계는 동기속도 부근에서 발전기를 계통에 점진적으로 연결시켜주는 Soft Cut-in 기법(6)을 이용한다. 그림 2는 Soft Cut-in 기법을 적용할 경우의 회로도이다. 동기속도 부근에서 싸이리스터의 점호각을 서서히 변화시켜 풍력발전기를 계통에 투입한 후 풍력발전기가 계통에 전기적으로 연결되면 bypass contactor를 close시켜 완전히 도통 시켜준다. 이와 같은 soft cut-in 기법 이용하면 농형 풍력 유도 발전기 계통 연계시 배전 계통에 나타나는 과도현상을 크게 감소시킬 수 있다.

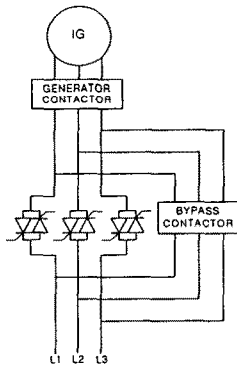


그림 2 Soft cut-in 기법

## 4. 풍력 발전기 연계 계통 모델링

본 논문에서는 풍력발전기 계통 연계에 대한 모의를 위하여 과도현상 해석을 위하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 농형 풍력 유도 발전기를 모델링하였으며, 실제적인 계통연계 모의를 위하여 IEEE 13-bus의 연계 배전 시스템을 구성하였다.

### 4.1 풍력발전기 모델링

PSCAD/EMTDC에서는 동기발전기는 물론 유도 발전기 등 다양한 형태의 발전기를 제시하고 있으며, 본 연구에서 이용한 농형 유도기 형태는 그림 3과 같다. 그림 우측의 A, B, C는 계통에 연결되는 3상 전원을 의미하며, 좌측 W, S, T는 발전기의 출력을 조절하는 외부 제어 단자를 표현한다. W는 풍력 유도발전기의 회전 속도를, S는 발전기 출력특성 제어 변수를, 그리고 T는 음의 값으로 유도발전기의 외부의 기계적 입력이 된다. 농형의 경우 내부 용량이 주어지면 일반적인 내부파라미터를 생성하므로 750 [kVA]의 일반적인 풍력발전기로

모델링하였다.

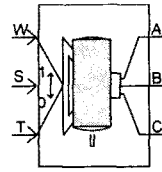


그림 3 EMTDC 농형 유도 발전기 모델

### 4.2 연계배전계통 모델링

풍력발전기가 연계 운전 될 배전 계통은 5000 [kVA]의 변압기 용량을 가지며 선간 전압이 4.169 [kV]인 IEEE 13-bus 데이터틀 이용하였다.(5) 모델링 된 풍력발전기는 계통 말단 bus-75에 투입하였다.(7) 그림 4는 IEEE 13-bus 배전계통도를 나타내고 있다.

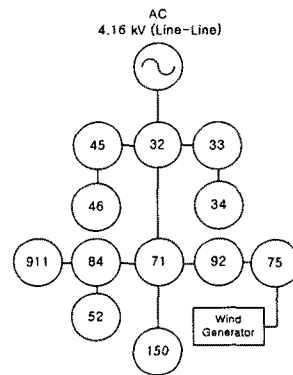


그림 4 IEEE 13-bus 계통 단선도

## 5. 농형 풍력 유도 발전기 운전 특성

### 5.1 농형 풍력 유도 발전기의 계통 연계 특성

풍력발전기의 연계 특성을 고찰하기 위하여 다음의 3가지 경우에 대하여 모의하였다. 첫 번째로 풍력발전기를 비동기속도에서 계통에 투입하는 경우이며, 두 번째는 계통 연계를 동기속도에서 행하는 것이다. 마지막으로 풍력발전기의 계통 연계시 과도현상을 최소화하기 위해 Soft Cut-in 기법을 이용한 경우이다.

첫 번째는 풍력발전기 비동기 속도 계통 투입에 관한 모의이다. 회전자속도가 동기속도의 0.8 [PU]에 이르는 0.5초에 풍력발전기를 계통에 투입 한 경우에 있어서 배전계통 계전점 전류, 전압의 특성을 그림 5에 나타내었다. 여기서의 기준 전류, 전압은 배전 변압기 용량을 기준으로 계산된 값을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 동기속도보다 작은 회전자 속도에서 풍력발전기를 계통에 투입하게 되면 돌입전류가 최대 부하전류의 93%까지 급격히 증가하며, 계통의 전압은 정격의 93.5%까지 감소한다. 과도 상태 후 정상시 계전점 전류는 풍력발전기가 계통부하 일부를 담당하므로 감소한다.

그림 6은 동기속도에서의 계통 연계에 대한 모의 결과로써 풍력발전기 회전자 속도가 동기속도에 이르는 0.5초에 계통 투입을 한 경우의 배전계통 계전점 전류, 전압의 변화이다. 그림 5의 비동기속도의 투입에 비하여 돌입전류, 전압 변화 등 과도현상이 현저히 감소하며 정상상태로 단 시간에 복귀하는 것을 볼 수 있다. 그러나 계전점 전류는 최대 부하전류의 86%까지 증가하며, 계전점 전압은 정격전압의 94.5%까지 감소하여 여전히 큰 과도현상을 보인다. 정상상태에 있어서의 출력특성은

첫 번째 모의 결과와 같다.

마지막으로, 싸이리스터를 이용하여 점호각을 동기속도 부근부터 서서히 변화시켜 풍력발전기를 계통에 투입하는 Soft Cut-in 기법에 대한 모의이다. 싸이리스터는 비동기 속도에서 배전계통과 풍력발전기를 전기적으로 절연시켜주는 역할을 하며, 풍력발전기의 회전자 속도가 동기속도에 가까워지면 점호각을 점차적으로 변화시키면서 풍력발전기를 계통에 투입하도록 제어함으로써 풍력발전기 기동시 발생하는 과도현상을 최소화시킬 수 있다. 이 기법에 의한 계통 연계 모의 결과를 그림 7에 나타내었다. 계통 연계시 계전점 전류, 전압은 각각 최대 부하전류와 정격전압의 76%, 95%까지 변동한다. Soft Cut-in 기법을 통한 계통 연계는 비동기투입이나 동기투입에 비하여 돌입전류의 크기가 작으며, 전압 과도상태도 미소함을 알 수 있다.

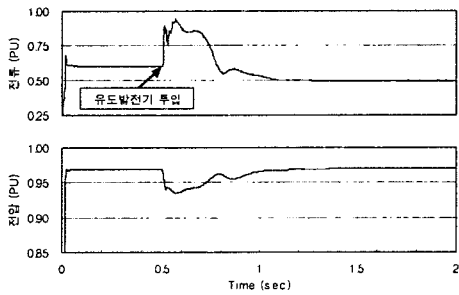


그림 5 비동기 속도에서 계통 연계시 나타나는 계전점 전압, 전류

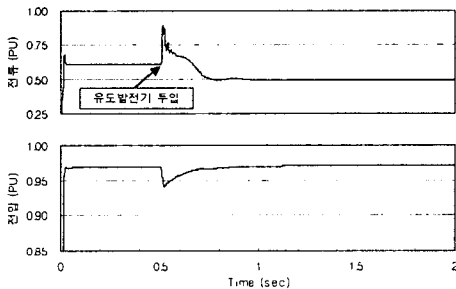


그림 6 동기 속도에서 계통 연계시 나타나는 계전점 전압, 전류

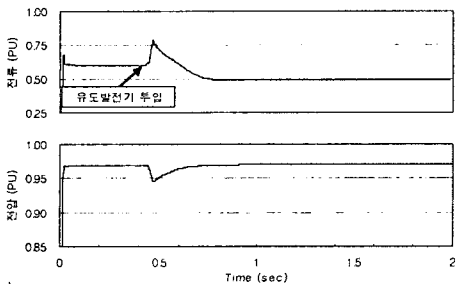


그림 7 Soft Cut-in 기법을 이용한 계통 연계시 나타나는 계전점 전압, 전류

## 5.2 풍황의 변화에 따른 발전기 출력특성 분석

일반적으로 풍력 발전 시스템에서는 풍황조건에 따라 발전기의 출력이 변동하게 된다. 만약, 풍황 조건에 따라 발전기의 출력을 급격히 증가 혹은 감소시키면 배전계통에 적지 않은 영향을 미칠 수 있으므로 풍력발전기는 피치 제어와 스톱 제어를 이용하여 서서히 출력을 변동시킨다. 풍황의 변동에 따른 농형 풍력 유도 발전기의 출력변화가 계통에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음과 같은 모의를 수행하였다. 먼저, 0.5초에서 농형 풍력 유도 발전기를 계통에 투입하고, 1.5초에서 0.05초 사이에 풍력발전기의 출력을 50%에서 100%로 급격히 증가한 경우와 1.5초에서 2초 사이에 출력을 50%에서 100%로 서서히 증가시킨 경우이다. 두 가지 모의에 대한 결과는 그림 8, 9에 각각 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 급격한 풍력 발전기 출력 변동은 계통에 큰 과도상태를 일으킬 수 있으며, 이와는 달리 출력 변동을 서서히 변화시킨 경우는 계통 전류, 전압 변화가 작은 것을 볼 수 있다. 따라서 계통에 발생하는 과도현상을 최소화하기 위해서는 풍황 급격한 변화에 대하여 기계적인 출력제어를 통하여 풍력발전기의 출력이 서서히 변화하도록 조절하여야 할 것으로 사료된다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 농형 풍력 유도발전기의 기동 및 운전 특성에 대한 연구결과를 제시하였다. 과도현상 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 농형 풍력 유도발전기를 모델링 하였으며, 농형 풍력 유도발전기의 연계 배전계통으로는 IEEE 13-bus 사용하였다. 모의 결과, 농형 풍력 유도 발전기 계통 투입시 배전계통에 발생하는 과도현상을 최소화시키기 위하여 동기속도 부근에서 싸이리스터의 점호각을 점차적으로 변화시켜 발전기를 계통에 투입하는 Soft Cut-in 기법이 효과적임을 보였다. 또한 풍력발전기는 풍황에 따라 배전 계통의 전류, 전압에 미치는 영향에 있어 상당한 차이를 보이므로, 계통 운전시 이를 고려하는 것이 바람직하다는 점도 기술하였다. 본 논문의 결과는 풍력발전기의 계통연계에 대한 현상을 분석하는데 이용 될 수 있다.

향후에는 다양한 형태의 풍력발전기가 배전계통에 투입되었을 경우에 배전계통에 나타나는 현상을 모의하기 위하여, AC/DC/AC 형태의 동기발전기의 모델링과 기동 및 운전 특성에 대하여 연구를 진행할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 에너지관리공단의 풍력발전시스템의 실증연구 단지 조성 및 실증에 대한 연구사업을 통해 이루어 졌으며 이에 감사를 드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Salman K. Salman, Ibrahim M. Rida, "Investigating the Impact of Embedded Generation on Relay Settings of Utilities' Electrical Feeders." IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April 2001
- [2] Stephen L. Ostrow, "WARPTM: A Modular Wind Power System for Distributed Electric Utility Application." IEEE, No. 0-7803-2043-3/95, 1995
- [3] Philip P. Barker, Robert W. de Mello, "Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part1- Radial Distribution Systems." IEEE, No. 0-7803 6420 1/00, 2000
- [4] Paresh C. Sen, "Principles of Electric Machines and Power Electronics." WILEY, Copyright © 1997
- [5] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders." IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991
- [6] Mita-Teknik, "Technical Information - Calibration

routine for WP4060 Connection Model" 1999. 9  
 [7] 한국전력공사 계통운영처, "타사 발전기 병렬운전 연계선  
 로 보호업무 지침" 1996. 8.

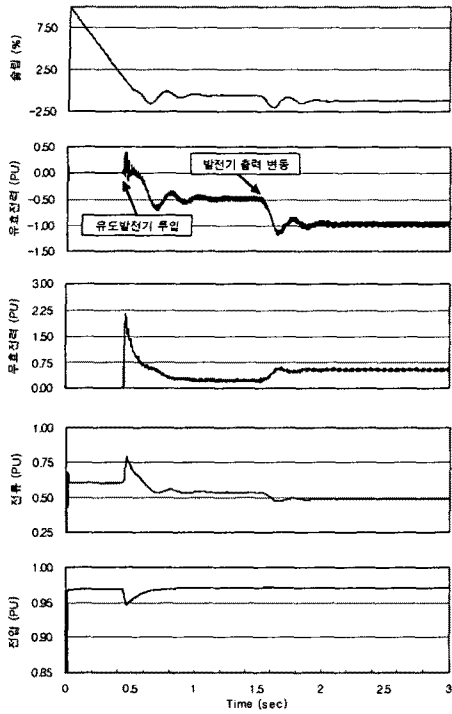


그림 8 풍향 변동에 따른 유도 발전기의 출력 특성  
 및 계전점 전류, 전압의 변화 (발전기 출력변  
 동을 50%에서 100%로 급격한 증가)

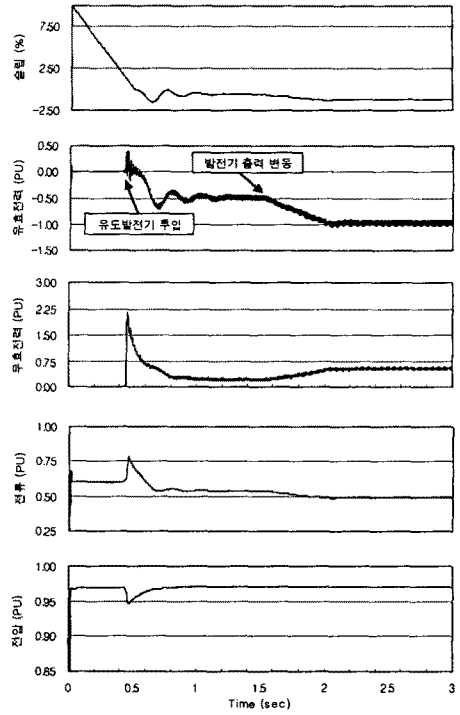


그림 9 풍향 변동에 따른 유도 발전기의 출력 특성  
 및 계전점 전류, 전압의 변화 (발전기 출력변  
 동을 50%에서 100%로 점진적 증가)