

PSCAD/EMTDC를 이용한 계통 연계 풍력 유도 발전기의 운전 특성에 관한 연구

論 文

51B-12-8

A Study on Operational Characteristics of Wind Turbine Induction Generators Interconnected with Distribution Networks Using PSCAD/EMTDC

張 成 一* · 鄭 鍾 贊** · 金 光 鎬***

(Sung-Il Jang · Jong-Chan Jeong · Kwang-Ho Kim)

Abstract - This paper describes operational characteristics of wind turbine induction generators interconnected with distribution networks using PSCAD/EMTDC. Due to the simple and durable structure, induction generators are the most common type used in wind power generation. Generally, induction generators are classified into two groups according to the shape of rotor, one is squirrel-cage type and the other is wound-rotor type. In this study, we simulate the start-up and the output variation of generators interconnected with distribution networks and compare the operational characteristics of squirrel-cage type and wound-rotor type induction generators located in the unfaulted distribution lines about the disturbance occurred on the associated distribution feeders emanated from the substation to which wind turbine generator is connected. In order to obtain the realistic results, we use the radial distribution network of IEEE 13-bus model.

Key Words : Induction Generator, Wind Turbine Generator

1. 서 론

우리나라의 발전사업 민영화 계획과 세계적인 에너지환경 변화 및 대규모 발전설비 비용의 증가에 따라 대체에너지 형태의 분산전원이 최근 많은 관심을 끌고 있다. 특히, 에너지 생산비용이 타 발전설비에 비하여 적은 풍력발전시스템은 우리나라의 경우, 처음 제주도에 시험 설치된 이후 현재 전국 많은 지방자치단체의 주도하에 풍력발전단지 형태로 건설이 추진되고 있다. 과거 섬이나 도서지역에 편중되었던 풍력 발전시스템은 점차적으로 독립된 전원이 아닌, 기존 전력시스템과 연계하여 생산된 전력을 계통으로 공급하는 형태로 발전되고 있다. 그러나 이러한 풍력발전기의 계통연계는 단방향의 전력 조류만을 허용하던 기존 배전 시스템의 보호, 운용 및 관리 등에 여러 가지 새로운 영향을 미치게 될 것이다 [1-3]. 따라서 전력계통에 연계 운전될 풍력발전기의 종류별 운전특성과 계통 연계 특성 및 풍력발전시스템의 출력 변동으로 인한 계통 영향 등을 비교 분석하는 것은 매우 중요하다.

일반적으로 풍력발전기에서 사용되는 발전기는 풍력발전기의 운전특성과 계통 연계특성의 적합도에 따라 여러 가지 형태로 사용되어 왔다. 특히, 풍력발전은 풍속과 풍량 등 기 후조건의 변화에 따라 큰 출력 변화를 나타내므로 이러한

풍황 변화에 대하여 안정된 전력을 생산할 수 있고 구조가 간단하며 견고한 유도기 형태의 발전기들이 현재 가장 많이 보급되어 있다. 풍력 유도 발전기는 회전자에 형태에 따라 두 가지로 분류될 수 있는데, 첫 번째로 회전자의 양끝 부분을 단락 시킨 농형 유도 발전기이다. 농형 풍력 유도 발전기는 좁은 영역의 슬립(0~2%)에서 동작하며, 블레이드 제어 방법(피치(pitch)제어와 스톨(stall)제어)을 통하여 바람의 속도와 양에 대하여 일정한 슬립의 회전자 회전속도를 얻도록 운전된다. 풍력 유도 발전기의 다른 형태로 회전자에 권선을 감고, 외부저항을 회전자 권선에 연결하여 넓은 영역의 슬립(0~10%이상)까지 동작 할 수 있는 권선형 유도 발전기가 있다 [4].

본 논문에서는 유도 발전기의 연계 특성과 풍력 발전기 출력변동에 따른 연계 배전계통에서의 영향을 모의하였으며, 풍력발전기 연계 배전선과 공통된 모선을 가진 외부 배전선에서의 사고에 대한 풍력 유도 발전기 형태별 운전특성을 비교 분석하였다. 전력계통 과도현상 해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 농형과 권선형 유도 발전기 및 풍력발전기 연계용 IEEE 13-bus 배전 계통을 구성하였다. 다양한 모의를 통하여, 계통 연계 시 풍력발전단지의 용량에 따라 연계 배전 시스템에서 발생하는 과도현상의 정도가 다르게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 이와 같은 계통의 과도 상태는 풍력 발전기 출력 변동에 의해서도 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 외부 배전선 사고에 의해 발생하는 계통 전압 강하의 영향으로 풍력발전기의 회전자 속도가 증가하게 되는데, 권선형 풍력 유도발전기의 경우 회전자에 연결된 외부 저항을 제어함으로써 농형 풍력 유도발전기 보다 넓은 회전자 속도범위에서 발전 전력을 계통으로 안정되게 공급 할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

* 正 會 員 : 江 原 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

** 準 會 員 : 江 原 大 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程

*** 正 會 員 : 江 原 大 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2002 年 7 月 5 日

最 終 完 了 : 2002 年 10 月 15 日

2. 풍력 유도 발전기의 개요 및 종류

2.1 풍력발전기의 일반적인 구조

풍력 발전이란 공기의 유동이 가진 공기역학적 운동에너지 특성을 이용하여 회전자를 회전시켜 기계적 에너지로 변환시키고 이 기계적 에너지로 전기적 에너지를 얻는 기술이다. 풍력 발전기는 지면에 대한 회전축의 방향에 따라 수평형과 수직형으로 분류되고, 주요 구성 요소로는 날개와 허브로 구성된 회전자와 회전을 증속하여 발전기를 구동시키는 증속 장치, 발전기 및 각종 안전장치를 제어하는 제어 장치, 유압 브레이크 장치와 전력 제어 장치 및 철탑 등으로 구성된다. AC 풍력발전기의 일반적인 구조는 그림 1과 같다.

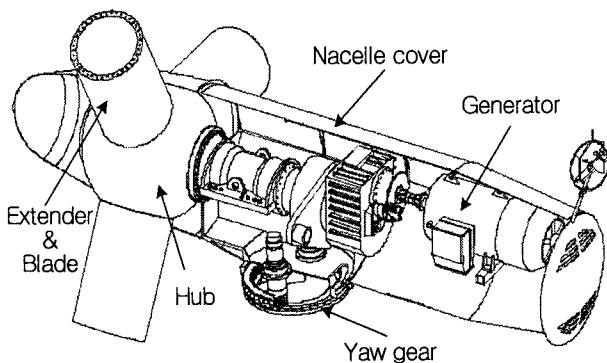


그림 1 풍력발전기 구조 (NORDEX N-43)
Fig. 1 Structure of wind turbine (NORDEX N-43)

2.2 풍력 유도 발전기의 구조 및 발전원리

유도기는 고정자와 베어링이 포함된 회전자로 구성되어 있으며 고정자와 회전자 사이에는 공극이 존재한다. 유도발전기는 동기발전기에 비하여 조속기와 여자기 같은 주변장치가 불필요하므로 매우 간단한 형태를 가지고 있다. 고정자 권선의 교류전류는 전원에서 직접 공급되며 회전자 권선에서는 고정자 교류 전압의 유도 작용에 의해 교류전류가 흐르게 된다. 유도기가 계통주파수의 동기속도 이상으로 회전하면 전력을 배전계통으로 공급할 수 있는 유도발전기로 동작할 수 있다 [4]. 배전계통으로 전력을 공급하기 위하여 동기속도보다 빠르게 회전자가 회전하면 음의 슬립을 가지며, 유도발전기의 출력 양에 따라 슬립은 음의 값으로 증가 혹은 감소한다. 한편, 유도기 형태의 풍력 발전기는 여자기와 조속기가 설치되어 있지 않아 풍향 변동에 대하여 기계적인 피치(pitch)제어와 스톨(stall)제어만으로 전기적인 출력을 조절해야하므로 일정한 전력을 생산할 수 있는 회전자의 속도가 한정되어 있으며 반드시 계통과 연결되어 있어야만 발전이 가능하다는 단점을 가지고 있다. 따라서 유도 풍력발전기가 운전되고 있는 배전선에서 사고가 발생하여 전원이 차단되었을 경우, 여자기와 조속기를 제어하여 일정한 출력을 생산할 수 있는 동기발전기와는 다르게 유도 발전기 단독으로는 전력을 부하로 공급할 수 없다.

2.3 유도 발전기의 종류 및 특징

유도 발전기는 회전자 권선의 형식에 따라 농형(squirrel-cage type)과 권선형(wound-rotor type)으로 분류될 수 있다. 농형 권선은 회전자 슬롯 속에 삽입된 알루미늄 또는 동봉으로 이루어져 있으며 양끝 부분이 단락되어 있다. 이와는 달리 권선형은 고정자 권선과 같은 형식의 회전자 권선을 가지며 회전자 권선의 끝부분은 3개의 슬립 링과 연결되어 있다. 고정 브러시를 슬립 링에 접촉하면 회전자 권선은 외부 회로와 연결된다. 회전자 권선과 연결된 외부저항은 권선형 유도발전기의 출력제어에 이용된다. 농형 유도발전기는 권선형 발전기에 비해 간단하고, 경제적이며 튼튼하다는 장점을 가지고 있으나 좁은 영역의 회전자속도에서만 전력을 생산할 수 있다는 단점이 있다. 반면 권선형 유도 발전기는 회전자 권선에 연결된 외부저항의 제어를 통하여 -10% 슬립 이상까지 동작영역을 확장할 수 있다.

3. 풍력 발전기 연계 계통 모델링

배전계통에 풍력발전기들이 투입되는 것은 단일 전원으로 운전되고 있는 전력시스템에 새로운 전원이 연결되어 전력을 계통으로 공급하는 것을 의미하며 연계된 풍력발전기의 운전 특성에 따라 배전계통에 여러 가지 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 특히 풍력발전기의 계통 연계와 급격한 출력 변동 등은 계통에 큰 과도현상을 발생시킬 수 있다. 본 연구에서는 풍력발전기의 계통연계에 따른 과도현상을 해석하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 농형과 권선형 풍력 유도 발전기 및 풍력발전기 계통 연계용 IEEE 13-bus 배전 시스템을 구성하였다.

3.1 농형 풍력 유도 발전기 모델링

PSCAD/EMTDC에서는 동기발전기는 물론 유도기 형태의 발전기 등 다양한 종류의 전원기기들을 제시하고 있으며, SQC100 농형 유도기 모듈을 그림 2에 나타내었다. 그림에서 A, B, C는 배전계통에 연결되는 3상 전원을 의미하며 W, S, T는 발전기의 출력을 조절하는 외부단자를 표현한다. 여기서, W는 풍력 유도발전기의 회전속도를, S는 발전기 출력특성 제어 변수를, 그리고 T는 음의 값으로 유도발전기의 외부 입력이 된다. SQC100 모듈은 입력 변수로써 회전자의 회전속도(W) 또는 입력 토크(T)를 사용할 수 있는데 이들 사이의 전환은 제어 변수 S에 의해 가능하다. S가 0이면 유도발전기는 토크제어 모드로 동작하여 T단자에 연결되어 있는 입력을 기준으로 동작하며, 1일 경우 스피드 제어 모드로 동작하여 W단자에 연결되어 있는 입력을 기준으로 동작하도록 구성되어 있다 [5]. SQC100 모듈은 풍력발전기의 정격용량이 주어지면 자동적으로 전형적인 내부파라미터가 생성되고, 제어변수 W, S, T에 의해 발전기로서 동작될 수 있다. 농형 풍력 유도발전기는 750 kVA의 용량을 갖는 전형적인 발전기로 가정하여 모델링 하였다.

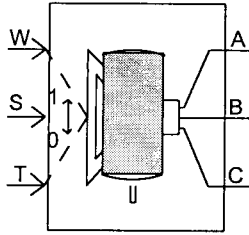


그림 2 EMTDC에서의 농형 유도 발전기 모듈(SQC100)
Fig. 2 Squirrel-cage type induction generator module in EMTDC(SQC100)

3.2 권선형 풍력 유도 발전기 모델링

EMTDC에서 제공하는 권선형 풍력 유도발전기 모듈을 그림 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 권선형 유도기 모듈은 농형 풍력 유도발전기 모듈과는 달리 외부저항 연결단자 a, b, c가 회전자에 연결되어 있으며 이 외부저항의 크기를 제어함으로써 농형 발전기에 비하여 넓은 슬립 영역에서 동작할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 그림에서 TL은 농형 모듈에서의 T단자와 같은 역할을 한다. 본 연구에서는 SIEMENS 750 kVA 풍력발전기의 데이터를 이용하여 권선형 풍력 유도 발전기 모델링 하였으며, SIEMENS 750 kVA 풍력발전기 내부파라미터를 표 1에 나타내었다.

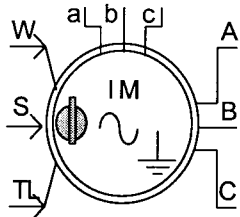


그림 3 EMTDC에서의 권선형 유도 발전기 모듈
Fig. 3 Wound-rotor type induction generator module in EMTDC

표 1 SIEMENS 750 kVA 발전기 사양
Table 1 Generator data of SIEMENS 750 kVA

파라미터	값
정격용량 [kVA]	750
정격전압(선간) [V]	690
고정자 저항 [Ω]	0.00393
고정자 리액턴스 [Ω]	0.060
회전자 저항 [Ω]	0.00467
회전자 리액턴스 [Ω]	0.0667
자화 리액턴스 [Ω]	3.13
회전자 관성 [kgm ²]	31

3.3 유도기 발전기 등가 회로 모델

연계 계통을 포함한 3상 유도기의 IEEE 추천 단상 등가 회로로서 고정자 철손저항과 마찰손 및 풍손을 제거한 등가 회로 모델을 그림 4에 나타내었다 [4]. 유도 발전기는 일반

적으로 회전자의 회전속도가 동기속도와 일치했을 때 계통에 연계 되는데, 동기속도에서는 슬립이 영이 되므로 유도발전기의 회전자의 영향이 사라져 계통은 그림에서와 같이 고정자 권선데이터와 자화 리액턴스만의 회로로 구성될 수 있다. 따라서 풍력 유도발전기 계통 연계 시 계통에서 발생하는 과도현상은 발전기 사양과 연계 계통의 특성에 따라 변동하게 된다.

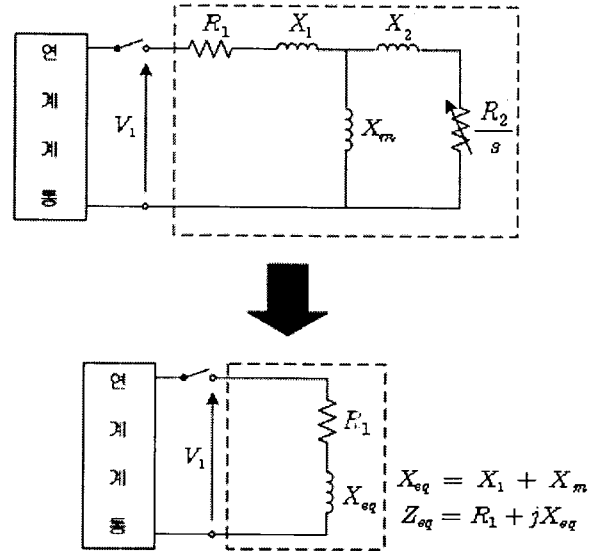


그림 4 계통에 연계된 유도발전기의 등가 회로
Fig. 4 The equivalent circuit of an induction generator connected with power network

여기서;

- V_1 = 상당 단자 전압
- R_1 = 상당 고정자 권선저항
- X_1 = 상당 고정자 리액턴스
- X_m = 상당 고정자 자화 리액턴스
- s = 슬립
- X'_2 = 1차측 환산 상당 회전자 리액턴스
- R'_2 = 1차측 환산 상당 회전자 권선저항을 나타낸다.

3.4 유도발전기의 운동 방정식

동기기와는 다르게 유도발전기는 외부 전원이 연결되어 있을 경우에만 전력을 생산할 수 있는 전원으로서 일정한 회전자 속도에 대한 유도기 내부의 전자기 토크(T_e)는 식 1과 같이 전압의 제곱에 비례하여 형성 된다 [9].

$$T_e = KsV^2 \tag{1}$$

여기서, K 는 유도기 사양에 따라 결정되는 상수이며 s 는 슬립을 나타내고 있다.

회전자의 동적 특성은 식 2와 같은 운동 방정식(Swing equation)에 의하여 결정되며 입출력의 불평형은 회전체의 감속 또는 가속의 결과로 나타난다 [10].

$$J \frac{dw}{dt} = T_m - T_e \quad (2)$$

여기서 J 는 회전자 관성 모멘트이고 T_m 은 기계적 토크, T_e 는 전자기 토크, w 는 회전자 속도를 의미하며, 식에서는 베어링 마찰, 풍손, 자기손실 등에 대한 제동토크는 고려하지 않았다. 유도 발전기의 경우 일정한 전자기 토크에 비하여 기계적 토크가 증가하거나 혹은 일정한 기계적 토크에 비하여 계통의 전압 강하로 인해 전자기 토크가 감소하는 경우에는 회전자를 가속시키게 된다. 회전자의 가속은 식 2에서와 같이 기계적 특성을 결정짓는 회전자 관성 모멘트에 많은 영향을 받는다. 따라서 큰 용량을 갖는 유도 발전기의 경우 작은 용량의 발전기에 비하여 관성 모멘트가 크므로 심한 입출력 불평형에 대하여 오랜 기간 동안 안정된 상태로 운전될 수 있다.

3.5 연계배전계통 모델링

풍력발전기가 연계 운전될 배전 계통은 용량이 5000 kVA인 변압기와 선간전압이 4.16 kV인 IEEE 13-bus 데이터로 구성하였다 [6]. IEEE 13-bus 계통은 단상과 삼상 부하들이 혼재되어 있으며 분산부하와 집중부하들로 구성되어 있다. 분산부하의 경우 편의상 앞단 버스에 집중 부하의 형태로 연결된 것으로 가정하였다. 우리나라는 풍력발전단지의 전체용량이 3000 kVA 이하일 경우, 전용선의 설치없이 배전계통에 직접 연계하는 것이 일반적이므로 풍력발전기를 계통 말단 Bus 75에 연계하였다 [8]. 그림 5는 IEEE 13-bus 배전계통 단선도를 나타내며, 표 2, 3, 4는 계통에 연결되어있는 부하의 종류 및 크기에 관한 데이터이다.

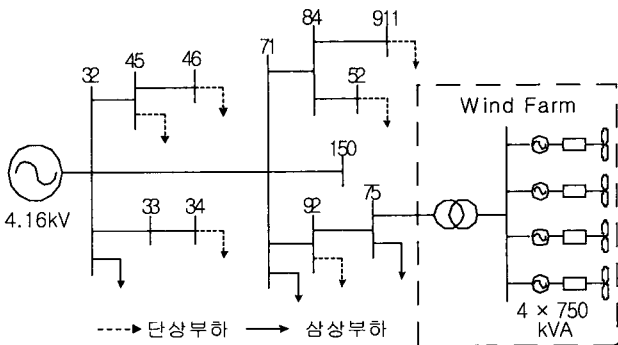


그림 5 IEEE 13-bus 계통 단선도
Fig. 5 IEEE 13-bus circuit diagram

표 2 배전선 분로 커패시터

Table 2 Distribution line shunt capacitors

BUS NO.	PHASE A kVAR	PHASE B kVAR	PHASE C kVAR
75	200.0	200.0	200.0
911			100.0
total	200.0	200.0	300.0

표 3 배전선 부하

Table 3 Distribution line bus loads

BUS NO.	PH-1 kW	PH-1 kVAR	PH-2 kW	PH-2 kVAR	PH-3 kW	PH-3 kVAR
34	42.63	20.18	0.00	0.00	0.00	0.00
45	0.00	0.00	170.53	125.09	0.00	0.00
46	0.00	0.00	230.22	131.97	0.00	0.00
52	127.90	85.79	0.00	0.00	0.00	0.00
71	383.70	219.95	383.70	219.95	383.70	219.95
75	486.02	189.07	68.21	60.55	289.91	212.65
92	0.00	0.00	0.00	0.00	170.53	151.38
911	0.00	0.00	0.00	0.00	170.53	80.74
total	1040.25	514.99	852.66	537.56	1014.67	664.72

표 4 배전선 분산부하

Table 4 Distribution line distributed load

BUS A	BUS B	PH-1 kW	PH-1 kVAR	PH-2 kW	PH-2 kVAR	PH-3 kW	PH-3 kVAR
32	71	16.48	9.45	66.40	38.06	116.97	67.05

4. 풍력발전기의 계통 연계 기법

유도기 형태의 풍력발전기가 계통에 연계될 때 풍력발전기의 회전자 속도에 따라 배전계통에 미치는 영향이 크게 달라질 수 있으므로 풍력발전기의 계통 연계는 고정자의 회전자계속도와 같은 동기속도에서 이루지는 것이 일반적이다. 한편, 회전자의 속도가 고정자의 회전자계속도와 같은 동기속도에서 풍력 발전기가 계통에 연결될지라도 순간적으로 풍력발전기가 전력계통에 투입되면 계통의 변화가 급격하게 발생할 수 있다. 따라서 다이리스터의 점호각을 동기 속도 부근에서 180도에서 0도로 점차적으로 변화시키면서 풍력발전기를 배전계통에 투입하는 소프트 컷-인(Soft Cut-in)방법이 이용된다.

4.1 동기 속도 계통 연계

풍력 유도 발전기는 계통의 회전자계 속도보다 빠르게 회전할 때 발전기로서 동작하게 된다. 따라서 계통의 회전자계 속도 이하에서 풍력발전기들이 배전계통에 투입되면 전동기와 같이 동작하여 큰 돌입전류가 배전계통에 흐르며, 이로 인한 전압강하가 급격히 발생할 수 있어 과전류 계전기나 저전압 계전기의 오작동을 발생시킬 가능성이 있다. 마찬가지로 회전자계의 속도보다 큰 속도에서 풍력발전기가 배전계통에 투입될 때에도 계통에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 이에 유도기 형태의 풍력발전기의 계통 연계는 배전 시스템에서 발생하는 과도현상을 감소시키기 위하여 고정자의 회전자계 속도와 같은 동기속도에서 이루어지는 것이 일반적이다.

4.2 소프트 컷-인(Soft cut-in) 기법

풍력 유도 발전기가 계통의 회전자계 속도와 같은 동기속도에서 배전계통에 투입된다 할지라도 일시에 연결되면 계통에 과도 상태가 발생할 수 있으며 유도 발전기 자체에 대한 기기손상 등 부정적인 영향이 미칠 수 있다. 그러므로 일반적인 풍력발전기의 계통 연계는 동기속도 부근에서 계통에 점차적으로 연결시켜주는 소프트 컷-인(Soft cut-in) 기법이 이용된다. 그림 6은 본 연구에서 이용된 Mita-Teknik의 WP4060 제어 유닛의 소프트 컷-인(Soft cut-in) 기법을 나타내는 그림으로 동기속도 부근에서 다이리스터의 점호각을 180도에서 0도로 점차적으로 변화시켜 풍력발전기를 계통에 연결한다. 이후 풍력발전기가 계통에 전기적으로 완전히 연결되면 바이패스 접촉기(Bypass contactor)를 이용하여 도통시켜준다 [7]. 본 연구에서는 유도기의 회전자 속도가 동기속도의 98%가 될 때까지는 다이리스터의 점호각을 180도로 인가하여 연계 계통과 유도 발전기가 전기적으로 절연된 상태를 유지하도록 하였다. 그리고 기계적 입력 토크의 증가로 회전자의 속도가 동기속도의 98%이상으로 증가하면 다이리스터의 점호각을 서서히 감소시키고, 회전자 속도가 동기속도와 같게 될 때 다이리스터의 점호각도 0으로 되도록 제어하여 풍력유도발전기를 계통에 전기적으로 완전히 연결시켰다. 이후 바이패스 접촉기(Bypass contactor)를 이용하여 도통시켜 주었다. 소프트 컷-인(Soft cut-in) 기법을 이용한 풍력 유도 발전기의 계통 연계는 배전 계통에서 나타나는 과도현상을 상당부분 개선시킬 수 있다. 그림에서 L1, L2, L3는 연계 배전선의 삼상을 의미 한다.

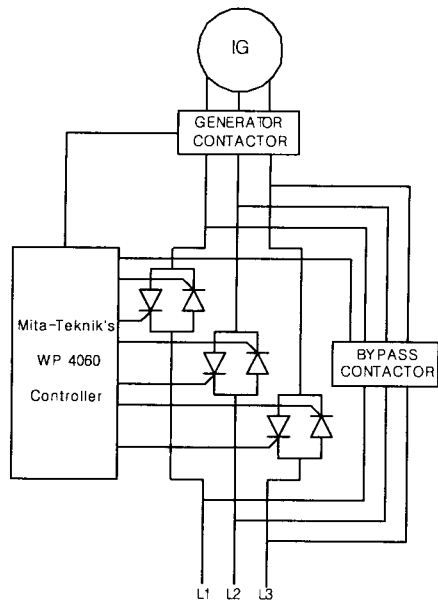


그림 6 소프트 컷-인 (Mita-Teknik's WP4060 control units)
Fig. 6 Soft cut-in (Mita-Teknik's WP4060 control units)

5. 풍력 유도 발전기 계통 연계 운전 특성

본 연구에서는 풍력 유도 발전기의 계통 연계 운전 특성을 살펴보기 위하여 세 가지 경우에 대하여 모의를 수행 하

였다. 풍력발전단지의 계통 연계 시 풍력단지의 용량에 따른 배전계통의 영향이 첫 번째이며 풍력 발전기 출력 변동에 따른 연계 배전계통에 대한 영향이 두 번째이다. 세 번째 모의에서는 외부 배전선 사고에 대한 농형과 권선형 풍력 유도 발전기의 동적 특성을 살펴보았다.

5.1 풍력발전단지의 계통 연계 운전

풍력발전단지의 용량에 따른 연계 버전 계통에 대한 영향을 살펴보기 위하여 농형 유도발전기들로 구성된 풍력발전단지의 발전기들을 1기, 2기, 4기로 변화시키면서 계통 연계를 모의하였다. 시뮬레이션에서는 풍력발전기의 계통 연계 시 배전계통에서 발생하는 과도상태를 억제하기 위하여 그림 6에서 제시된 소프트 컷-인(Soft cut-in) 기법을 이용하였다.

1기의 농형 풍력발전기로 구성된 풍력발전단지의 계통 연계에 관한 모의로써, 0.5 초에서 풍력발전단지가 계통에 투입되었을 경우 변전소 모선 측 계전점 전류, 전압 및 풍력발전기 연계 지점의 전압 특성을 그림 7에 나타내었다. 여기서, 배전 변압기 용량을 기준으로 계산된 정격전류, 정격전압을 1 pu로 설정하였을 때, 풍력발전단지가 투입되기 전에는 계전점 전류는 0.59 pu이며 계전점 전압과 연계점 전압은 각각 0.97 pu와 0.87 pu를 나타내고 있다. 풍력발전기가 계통에 투입됨에 따라 돌입전류가 최대 부하전류의 0.73 pu까지 증가 후 감소하며, 계전점 전압과 연계점 전압은 각각 정격의 0.95 pu와 0.78 pu까지 급격히 감소하였다가 이후 서서히 증가한다. 풍력발전단지의 용량이 계통 용량에 비하여 작으므로 연계 시 최대 정격 전류를 초과하지 않는 것을 볼 수 있다. 과도상태 이후 계통 부하의 일부를 풍력발전기에서 공급하므로 계전점 전류는 감소하며, 이로 인하여 계전점 전압과 연계점 전압은 투입 전의 전압에 비하여 소폭 상승한다.

그림 8은 0.5 초에서 2기의 유도발전기로 구성된 풍력발전 단지를 계통에 투입하였을 경우의 계전점 전류, 전압 및 연계점 전압의 변화이다. 1기의 풍력발전단지 계통 연계 운전특성에 비하여 전류, 전압의 변화가 상당부분 증가하는 특성을 보였다. 계전점 전류의 경우 돌입전류가 최대부하전류까지 증가 후 감소하였으며 계전점 전압은 0.92 pu까지 감소하였다가 증가한다. 그리고 연계점 전압도 0.70 pu까지 감소하는 특성을 보인다. 연계 이후 계전점 전류는 풍력발전 단지의 발전 용량 증가로 인하여 0.34 pu까지 감소하며 이로 인하여 계전점 전압과 연계점 전압은 0.975 pu와 0.91 pu까지 상승하였다.

그림 9는 4기의 유도발전기로 구성된 풍력발전단지의 계통 연계 특성에 관한 모의 결과이다. 큰 용량을 갖는 풍력발전단지의 계통연계로 인하여 계전점 전류는 1.28 pu까지 증가 후 감소하며 계전점 전압은 0.90 pu까지 감소 후 점차적으로 증가한다. 연계점 전압은 0.58 pu의 순시 전압 강하가 발생하여 연계점 주위의 부하들에게 전압강하로 인한 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 현재 부하용량이 최대 부하용량에 비하여 작으므로 풍력단지의 연계로 인한 계전기의 오작동은 일어나지 않았다. 그러나 부하용량이 최대 부하용량에 근접하여 운전되고 있을 때에 풍력발전단지가 투입되면

돌입전류로 인하여 과전류, 부족전압 계전기의 오작동을 일으킬 가능성이 있다. 연계 후 계전점 전류는 0.17 pu까지 감소하며 계전점 전압은 0.98 pu까지 상승한다. 그리고 연계점 전압의 경우 0.93 pu까지 상승하여 풍력발전단지 연계 운전 전에 비하여 0.06 pu 증가하였다.

5.2 풍력발전기 출력 변동

풍력 발전기의 기계적 입력이 풍량과 풍속 등의 변화에 따라 급격하게 변동하면 연계 배전 계통에 적지 않은 영향을 미칠 수 있으므로 피치(pitch) 제어와 스톱(stall) 제어를 통하여 발전기 출력 변화가 점차적으로 이루어질 수 있도록 운전되어야 한다. 풍력발전기의 기계적 입력 변동이 계통에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음과 같은 모의를 수행하였다. 소프트 컷-인 기법을 이용하여 0.5 sec에서 농형 풍력발전기를 계통에 투입하고, 1.5 sec에서 풍력발전기의 기계적 입력 토크를 0.05 sec 동안 50%에서 100%로 급격히 증가시킨 경우와, 2 sec까지 0.5 sec동안 점진적으로 증가시킨 경우에 대한 모의 결과를 그림 10, 11에 각각 나타내었다. 식 2에 의하면 기계적 입력 토크 T_m 이 급격히 변동되면 회전자의 회전속도는 진동하면서 가속하게 되는데, 모의에서는 슬립이 -2%까지 감소 후 2.1 sec에서 정상 상태 슬립 -1.2%에 도달하였다. 그림에서와 같이 회전자의 회전속도가 진동하는 기간동안 발전기는 안정된 유효전력과 무효전력을 계통으로 공급하지 못하는 것을 확인하였다. 이와는 반대로 기계적 입력 토크를 0.5 sec 동안 50%에서 100%로 서서히 증가시킨 경우는 발전기 출력특성과 계전점 전압, 전류의 변동이 작은 것을 알 수 있다. 따라서 계통에 발생하는 과도

현상을 최소화하기 위해서는 적절한 피치(pitch) 제어와 스톱(stall) 제어를 통해 풍력발전기의 기계적 입력 토크를 점진적으로 변화시켜야 할 필요가 있다.

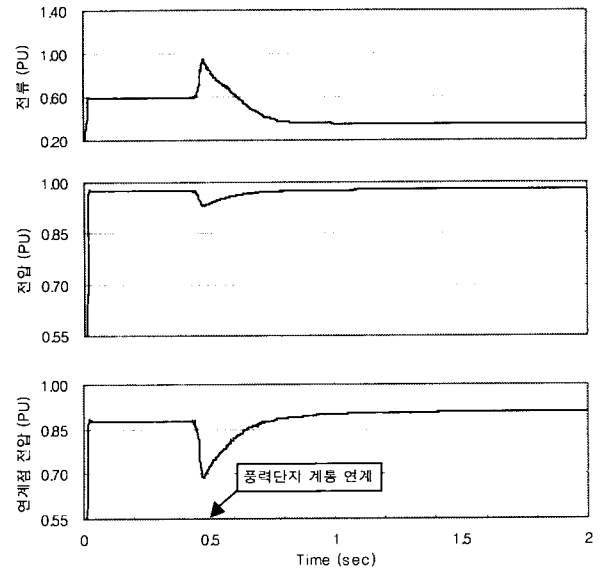


그림 8 2기의 유도발전기로 구성된 풍력발전단지의 계통 연계 시 계전점 전류, 전압 및 연계점 전압 특성

Fig. 8 The Characteristics of voltage and current at the PCC and voltage of interconnection point for the connection of wind farm composed with two-induction generators to distribution network

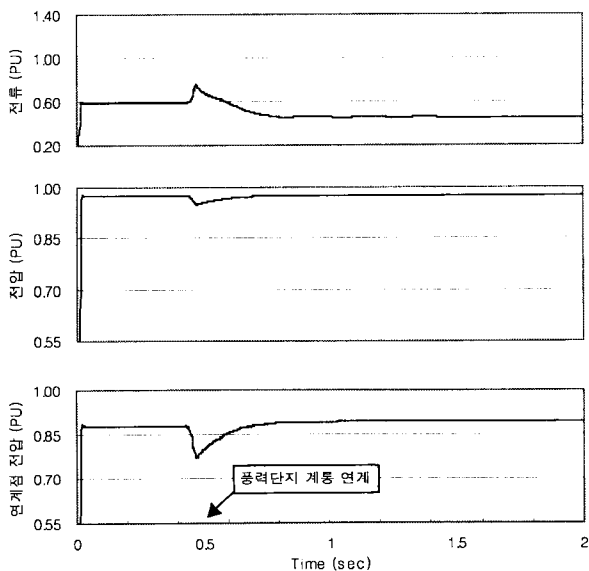


그림 7 1기의 유도발전기로 구성된 풍력발전단지의 계통 연계 시 계전점 전류, 전압 및 연계점 전압 특성

Fig. 7 The Characteristics of voltage and current at the PCC and voltage of interconnection point for the connection of wind farm composed with single-induction generator to distribution network

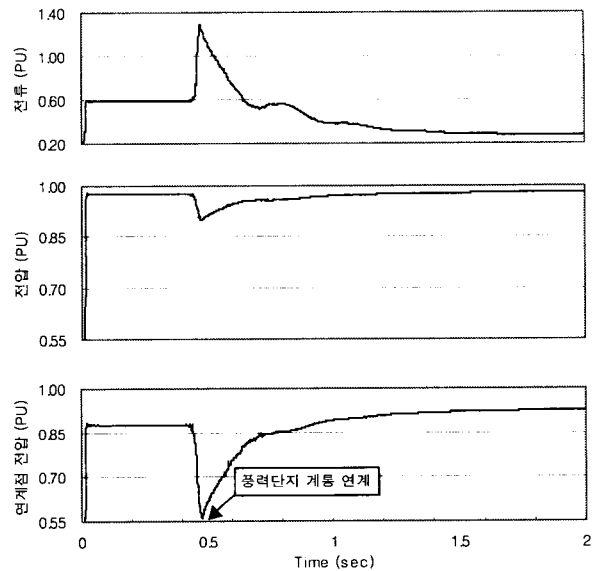


그림 9 4기의 유도발전기로 구성된 풍력발전단지의 계통 연계 시 계전점 전류, 전압 및 연계점 전압 특성

Fig. 9 The Characteristics of voltage and current at the PCC and voltage of interconnection point for the connection of wind farm composed with four-induction generators to distribution network

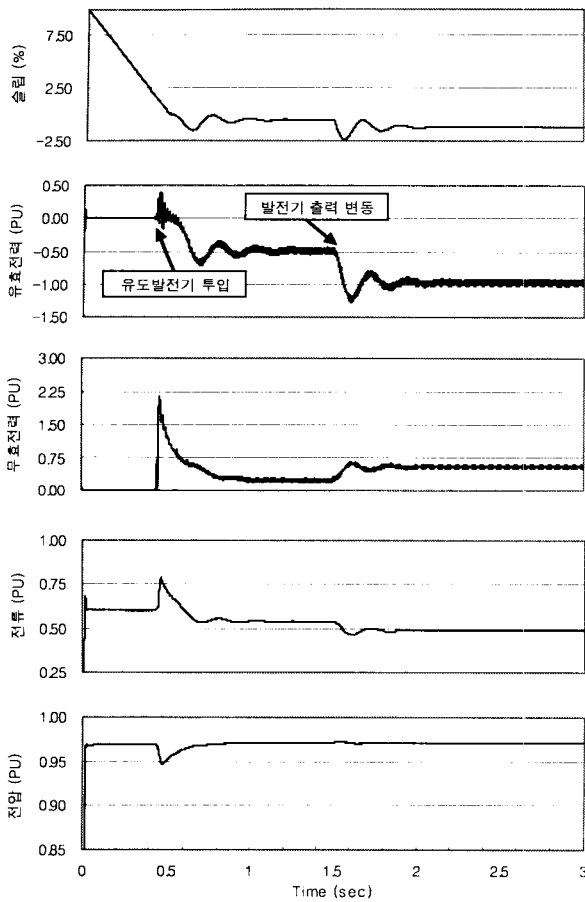


그림 10 풍력 발전기 출력 변동에 따른 연계 계통 영향 분석(출력을 50%에서 100%로 급격히 증가)

Fig. 10 The simulation result for the change of power of wind turbine generator (abrupt increasement of generator output from 50% to 100%)

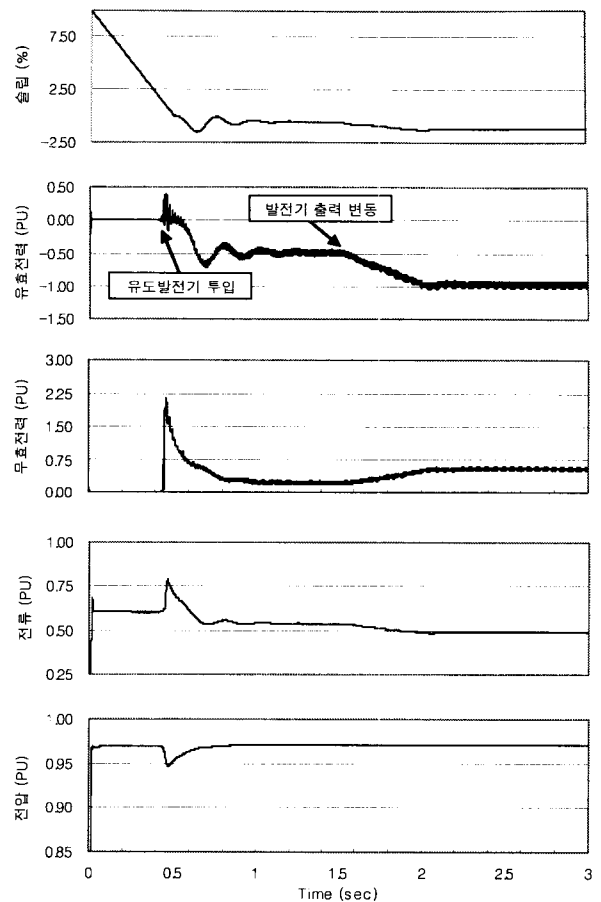


그림 11 풍력 발전기 출력 변동에 따른 연계 계통 영향 분석(출력을 50%에서 100%로 서서히 증가)

Fig. 11 The simulation result for the change of power of wind turbine generator(gradual increasement of generator output from 50% to 100%)

5.3 외부 배전선 사고에 대한 풍력발전단지 운전 모의

외부 배전선 사고에 대한 풍력발전단지의 영향을 모의하기 위하여 단일 피더로 이루어진 IEEE 13-bus에 같은 용량의 배전선을 추가하여 그림 12와 같이 구성하였다. 이는 풍력발전단지가 설치되어 있지 않은 배전선 B에서 발생한 사고에 의해 배전선 A에 연계 운전되고 있는 풍력발전단지에서의 영향을 분석하기 위한 모의 계통도이다. 본 연구에서의 풍력 발전기들은 80%의 출력으로 동작하고 있는 것으로 가정하여 모의 하였다.

A. 배전선 사고에 대한 유도 발전기의 운전 특성

대부분 배전선에서 발생한 사고는 가능한 신속하게 배전 계통으로부터 제거시켜 사고로 인한 현상을 최소화 시켜야 하지만, 배전선 보호기간의 보호협조에 의해 차단기 동작까지는 일정한 동작대기시간이 필요하게 된다. 따라서 재폐로계전기나 차단기에 의해 사고가 제거되기 이전까지는 풍력발전기가 사고의 영향을 그대로 받게 되는 불안정한 상태

로 남아 있게 되어 발전기로서 동작하지 못하는 경우도 발생할 수 있다. 간선의 전압이 외부 배전선 사고의 영향으로 감소하면 자기적 토크가 기계적인 외부 입력토크에 비하여 작아지므로 발전기 회전자의 속도가 서서히 가속된다. 이후 사고가 제거되어 정격전압이 연계 계통에 인가되면 큰 회전자 속도를 가진 유도발전기에 의해 계통에 돌입전류가 발생하고 계전점의 전압이 감소하는 특성을 나타낼 수 있다. 만약, 사고 지속 시간이 짧을 경우 유도발전기의 가속된 회전 에너지가 계통의 회전 자계의 에너지보다 작아 일정한 과도 현상 후 정상상태로 복구되지만, 반대로 사고 지속 시간이 길어지게 되면 가속된 회전 에너지가 계통의 회전 자계 에너지보다 커지게 되어 회전자의 속도가 계속해서 증가하여 발전기로서 동작하지 못하게 될 수 있다 [1]. 본 연구에서는 외부 배전선 사고에 대한 농형·권선형 풍력 유도 발전기의 운전특성을 비교 분석하기 위하여 배전선 B의 32번 버스와 33번 버스 사이에서 3상 지락 사고를 0.5 sec에서 발생시키고 0.8 sec와 1 sec에서 각각 사고를 제거한 후 정상상태로 복구시켜, 사고 지속 시간에 따른 풍력유도발전기 형태별 영향을 모의 분석하였다.

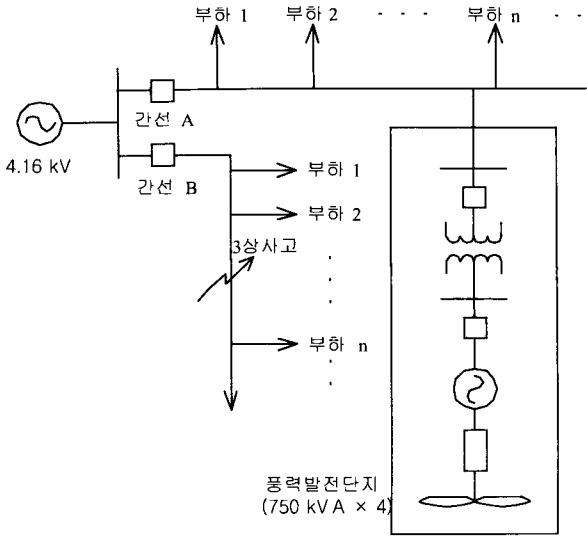


그림 12 외부 배전선 사고 모의용 배전 계통도
 Fig. 12 Schematic diagram of the investigated network with wind farm for fault conditions

B. 농형 풍력 유도 발전기 운전 특성

그림 13과 14는 농형 풍력 유도발전단지가 연계되어 있는 배전 계통에서 삼상 지락사고를 0.5 sec에서 발생시키고 사고 지속 시간을 각각 0.3 sec 0.5 sec로 달리하여 외부 배전선 사고를 발생시켰을 경우, 풍력단지를 구성하고 있는 농형 발전기의 회전자 속도와 계전점 및 연계점 전압의 변화를 나타내고 있다. 그림 13은 사고 지속 시간을 0.3 sec로 설정한 경우의 모의 결과로서 사고 지속 시간이 짧아 회전자의 회전 속도가 크게 증가하지 않았으므로 사고 제거 이후 일정한 과도상태를 지나 정상상태로 복귀하게 된다. 그러나 그림 14의 경우 사고 지속 시간을 0.5 sec로 설정하면 사고 제거 시간까지 발전기의 회전속도가 계속해서 증가하여 사고가 제거되어도 사고 이전의 정상상태로 복귀하지 못하고 부하처럼 동작하여 계통으로부터 전력을 소비하는 특성을 나타내었다.

C. 권선형 풍력 유도 풍력 발전기 운전 특성

그림 15와 16은 권선형 유도 발전기로 이루어진 풍력단지가 계통에 연계되어 있을 경우, 사고 지속 시간에 따른 모의 결과를 나타낸 것이다. 사고조건을 농형 발전기에 대한 사고 모의 경우와 같도록 설정하여 농형과 권선형의 운전특성을 비교 하였다. 권선형 발전기의 경우 회전자 외부에 연결된 저항을 제어하여 운전가능 슬립 영역을 -10% 이상까지 확대 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 외부 배전선 사고에 의한 전압강하로 회전자 속도가 가속이 될 때, 슬립이 증가함에 따라 외부저항을 늘리면 입출력 불평형에 대한 영향을 감소시킬 수 있으므로 발전기를 안정적으로 운전시킬 수 있다. 그림 15는 사고 지속 시간이 0.3 sec 일 경우에 대한 권선형 유도 발전기의 운전특성 모의 결과로 사고의 영향에 따라 슬립이 6% 까지 증가 후 사고 전 정상상태로 복귀한다. 농형 발전기에 대한 외부 배전선 사고 모의 결과에 비하여 큰 슬립 증가에도 불구하고 계전점 및 연계점 전

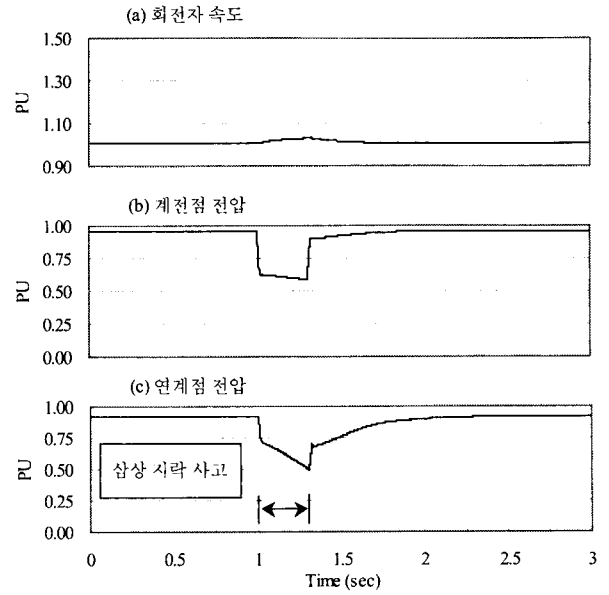


그림 13 외부 배전선 사고에 의한 농형 유도 발전기의 회전자 속도, 계전점 및 연계점 전압 변동 (0.3 sec의 사고 지속 시간)

Fig. 13 The variation of rotor speed for squirrel-cage type induction generator and voltage at the PCC and interconnection point result from the fault occurred in the associated network (fault duration time is 0.3 sec)

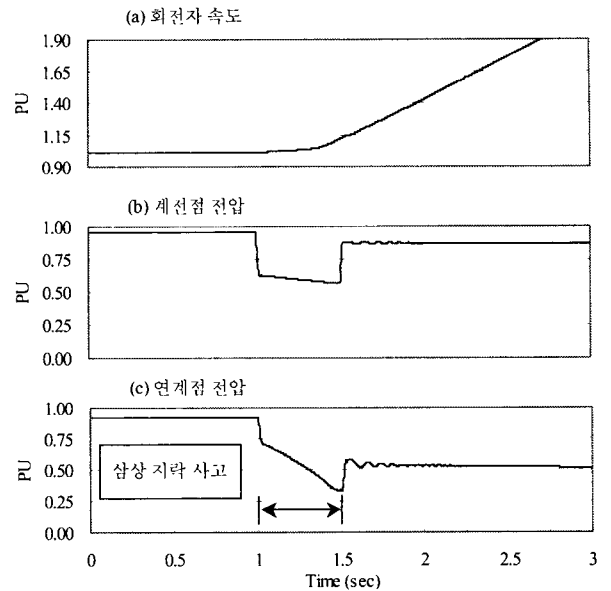


그림 14 외부 배전선 사고에 의한 농형 유도 발전기의 회전자 속도, 계전점 및 연계점 전압 변동 (0.5 sec의 사고 지속 시간)

Fig. 14 The variation of rotor speed for squirrel-cage type induction generator and voltage at the PCC and interconnection point result from the fault occurred in the associated network (fault duration time is 0.5 sec)

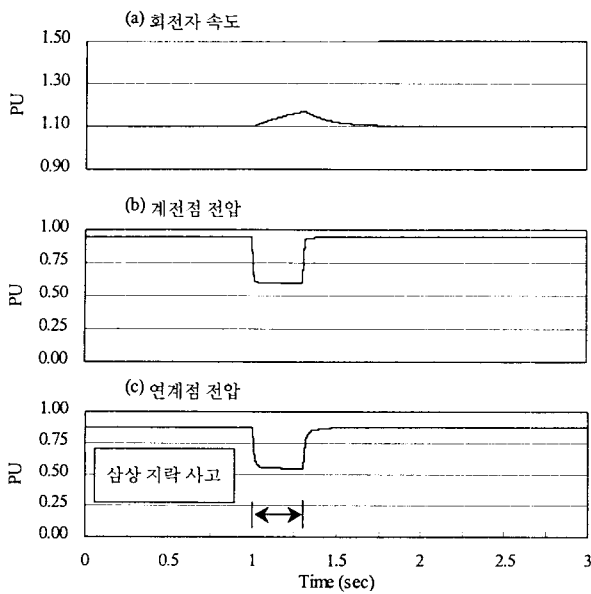


그림 15 외부 배전선 사고에 의한 권선형 유도 발전기의 회전자 속도, 계전점 및 연계점 전압 변동 (0.3 sec의 사고 지속 시간)

Fig. 15 The variation of rotor speed for wound-rotor type induction generator and voltage at the PCC and interconnection point result from the fault occurred in the associated network (fault duration time is 0.3 sec)

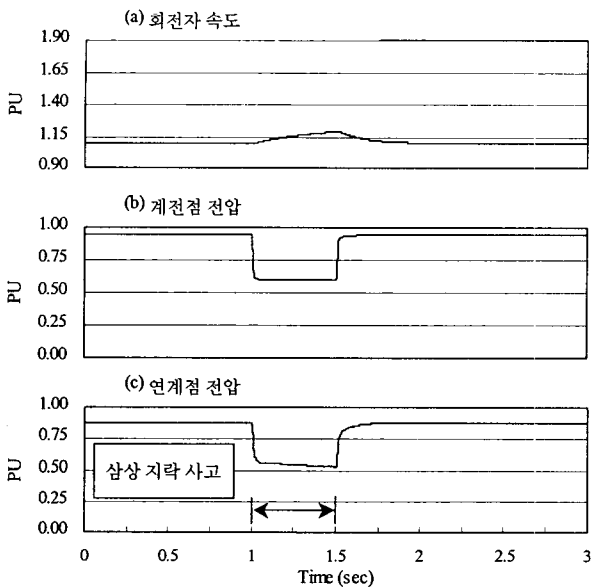


그림 16 외부 배전선 사고에 의한 권선형 유도 발전기의 회전자 속도, 계전점 및 연계점 전압 변동 (0.5 sec의 사고 지속 시간)

Fig. 16 The variation of rotor speed for wound-rotor type induction generator and voltage at the PCC and interconnection point result from the fault occurred in the associated network (fault duration time is 0.5 sec)

압이 사고 제거 후에 과도상태 기간이 짧은 것을 알 수 있다. 그림 16은 사고 지속 시간이 0.5 sec일 때의 모의 결과이다. 농형의 경우 사고 지속 시간이 0.5 sec로 길어지게 되면 회전자의 속도가 증가하여 사고 제거 후에 발전기로서 동작하지 못하였지만, 권선형 유도발전기는 외부저항의 영향으로 정상적인 발전기로 동작하는 모의 결과를 얻었다. 그러나 권선형 풍력 유도 발전기 경우에도 전력을 생산할 수 있는 슬립영역이 존재하므로 만약, 사고 지속시간이 더욱 길어지게 되면 외부 저항 제어에 의한 방법으로도 정상적인 출력을 얻을 수 없게 된다.

6. 결 론

본 논문에서는 농형과 권선형 풍력 유도발전기의 계통 연계 운전 특성에 대한 비교 분석 결과를 제시하였다. 모의결과, 풍력발전단지의 용량 증가에 따라 연계 시 배전계통에서 발생하는 과도현상이 더욱 심하게 나타났다. 1기의 유도 발전기에 비하여 4기의 유도 발전기로 구성된 풍력발전단지의 계통연계는 연계 시 계전점 전류는 최대 부하전류를 기준으로 55% 이상 증가하며 계전점 및 연계점 전압은 정격전압을 기준으로 각각 5%, 20% 이상 감소하는 특성을 보였다. 이와 같은 풍력발전기 용량 증가에 따른 연계 배전 계통의 큰 과도현상은 배전선 보호용 과전류, 저전압 계전기의 오동작을 일으킬 수 있다. 그리고 배전계통에 연계되어 있는 풍력발전기의 급격한 기계적 입력 토크의 변동은 계통 전압, 전류에 과도현상을 일으킬 수 있으므로 피치(pitch) 제어와 스톨(stall) 제어를 통하여 발전기 출력 변화가 점차적으로 이루어질 수 있도록 운전되어야 함을 알 수 있었다. 이상과 같은 비교분석을 통해, 농형 풍력 유도 발전기와는 다르게 권선형 풍력 유도발전기의 경우, 외부 배전선 사고 시 회전자 권선에 연결되어 있는 외부 저항을 제어함으로써 넓은 영역의 슬립에서도 안정된 출력을 나타내는 장점을 갖고 있음을 보였다.

향후에는 본 연구의 결과를 기반으로 계통 조건과 사고 조건을 달리하여 연계 운전되고 있는 풍력발전단지의 영향을 고려하고, 안정적인 풍력발전단지의 출력을 얻기 위하여 연계 배전계통의 보호 제어에 대한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

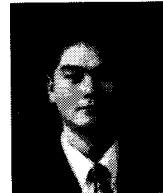
본 연구는 에너지관리공단의 풍력발전시스템의 실증연구단지 조성 및 실증에 대한 연구사업을 통해 이루어 졌으며 이에 감사를 드립니다.

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, pp 246-251, 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] Manitoba HVDC Research Centre, "PSCAD/EMTDC User's Manual." Canada 1986.[6] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders." IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991
- [7] Mita-Teknik, "Technical Information - Calibration routine for WP4060 Connection Model." 1999. 9
- [8] 한국전력공사 계통운영처, "타사 발전기 병렬운전 연계 선로 보호업무 지침" 1996. 8.
- [9] M. S. Sarma, "Electric Machines, Steady-State Theory and Dynamic Performance." West Publishing Company, 1985.
- [10] 이봉용, "전력계통공학" 문운당, 1991

저 자 소 개



장 성 일 (張 成 一)

1971년 8월 30일생. 1996년 강원대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 033-254 0312, Fax : 033-241-3775

E-mail : sijang@kwnu.kangwon.ac.kr



정 증 찬 (鄭 鍾 贊)

1975년 12월 24일생. 2001년 삼척대 전기공학과 졸업. 현재 강원대 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 033-255-0312, Fax : 033-241-3775

E-mail : xhacker@chollian.net



김 광 호 (金 光 鎬)

1966년 1월 17일생. 1988년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년~현재 강원대학교 전기전자정보통신공학부 부교수. 2001년~현재 차세대전력기술 연구센터

Tel : 033-250-6298, Fax : 033-241-3775

E-mail : khokim@kangwon.ac.kr