

연계선로의 조건 변화에 따른 DFIG와 FSIG 풍력발전시스템의 운전특성 비교

(Comparison of Operating Characteristics for DFIG and FSIG wind Turbine Systems with
Respect to Variable Interconnecting Line Conditions)

노경수* · 김태호

(Kyoung-Soo Ro · Tae-Ho Kim)

Abstract

This paper analyzes the steady-state output characteristics of variable-speed wind turbine systems using doubly-fed induction generators(DFIG) compared with fixed-speed induction generator(FSIG) wind turbine systems. It also presents simulations of a grid-connected wind turbine generation system for dynamics analysis on MATLAB/Simulink and compares the responses between DFIG and FSIG wind turbine systems with respect to wind speed variation, impedance changes and X/R ratio changes of interconnecting circuits. Simulation results show the variation of generator's active output, terminal voltage and fault currents at the interconnecting point. Case studies demonstrate that DFIG wind turbine systems illustrate better performance to 3-phase fault than FSIG's.

Key Words : Wind Turbine System, DFIG, FSIG, Fault Current, MATLAB/Simulink

1. 서 론

세계적으로 지구온난화 문제 및 화석연료 사용 증가에 의한 환경오염 문제에 대한 대책으로 대체에너지 개발에 대한 관심이 확대되고 있다. 그 중에서도 풍력 발전시스템에 대한 관심의 증가와 함께 상용화가 급속히 진행되고 있으며 보다 활발한 보급을 위해 대응량화에 대한 연구개발이 한창 진행되고 있다.

풍력발전은 회전자축의 회전속도에 따라 DFIG(doubly-fed induction generator)를 이용한 가변속운전과 정속운전(FSIG, fixed-speed induction generator)으로 구분된다. FSIG의 경우 유도발전기의 자화전류를 보상하기 위한 무효전력 보상용 커패시터를 필요로 하기 때문에 부하탈락 시에 유도발전기 모선의 과전압, 전압안정도의 문제를 유발할 수 있지만 발전시스템의 구조가 간단하고 계통과의 동기를 위한 별도의 장비를 사용하지 않아 제어가 간단하게 된다는 이점이 있다.

한편 DFIG를 이용한 가변속운전은 FSIG보다 속도 제어범위가 넓고 회전자에 설치되는 인버터의 용량도 작아지며 낮은 풍속에서 더 많은 에너지를 흡수할 수

* 주저자 : 동국대학교-서울 전자전기공학부 교수

Tel : 02-2260-3346, Fax : 02-2260-3346

E-mail : ksro@dgu.ac.kr

접수일자 : 2009년 11월 23일

1차심사 : 2009년 11월 26일, 2차심사 : 2010년 4월 22일

심사완료 : 2010년 6월 16일

있다. 정격풍속 이상의 풍속에서 터빈에 저장된 관성 에너지에 의하여 FSIG에 비해 부드러운 출력이 가능한 반면에 제어가 복잡하다는 단점을 제외하고는 주목받고 있는 풍력발전시스템이다.

풍력발전시스템을 전력계통에 적용하기 위한 연구 동향을 살펴보면, Chen 등은 풍력발전시스템의 속도 제어를 위한 퍼지 제어를 제안하였으며 발전기의 출력과 회전속도를 입력으로 하여 풍차가 원하는 속도로 회전하도록 풍차축의 토크를 조절하도록 하였다 [1]. Li 등은 PSpice를 이용하여 DFIG의 정상상태에서 d축과 q축의 전압 변화에 대한 고정자권선의 출력, 회전자권선의 출력 변화를 연구하였다[2]. Foster 등은 FSIG의 풍력발전시스템 인근에 DFIG 풍력발전시스템을 설치하여 통합제어를 수행하면 외란이 발생할 경우 DFIG를 제어하여 계통의 전압안정에 기여할 수 있음을 보여주고 있으며[3], Datta 등은 DFIG와 FSIG를 포함하는 풍력발전시스템에 대해 운전범위 및 에너지 획득량에 대해 비교하였다[4]. Holdsworth 등은 풍력발전이 연계되는 계통이 강인가, 또는 약인가에 따라 외란에 대한 DFIG와 FSIG의 안정도 해석을 수행하였으며[5], 위의 어느 경우도 같은 조건에서 DFIG와 FSIG에 대한 동특성을 비교하지는 않았다.

본 논문에서는 FSIG를 이용한 정속운전에 반해 DFIG를 이용한 가변속 풍력발전시스템의 정상상태에서의 출력특성을 분석하고자 하며, 계통 연계임피던스의 변화 및 연계선로의 X/R비 변화에 따른 FSIG와 DFIG 풍력발전시스템의 동특성을 비교, 분석하고자 한다. 외란에 대한 동특성 해석을 위해 계통연계 풍력발전시스템을 MATLAB/Simulink에서 모델링하였으며 3상 단락고장에 대해 DFIG와 FSIG 풍력발전의 발전기 출력, 연계지점의 전압 및 전류의 변동을 관찰하여 DFIG와 FSIG의 특징을 비교, 분석하고자 한다.

2. DFIG의 정상상태 출력특성 분석

풍력발전시스템은 회전자축의 회전속도에 따라 FSIG와 DFIG로 구분되며 전형적인 FSIG 풍력발전시스템의 구성은 그림 1과 같다[6]. 풍력터빈은 기어 박스를 통해 농형 유도발전기로 연결되며 항상 전력계

통 또는 역률 보상용 커패시터로부터 무효전력을 공급받는다. 커패시터(Q_{PF})는 무효전력을 보상하는데 사용되며 아울러 전력계통으로부터 풍력터빈이 단락될 때 과전압에 대한 적절한 보호수단이 된다. FSIG 풍력발전시스템은 1[%] 정도의 매우 작은 동기속도 이상의 범위에서 속도의 변화가 작기 때문에 일반적으로 정속운전시스템이라고 한다. FSIG는 모든 풍속에서 일정한 속도로 운전해야 하기 때문에 정격 풍속 이외의 다른 풍속에서는 최대 출력을 생산하지 못하는 단점이 있다.

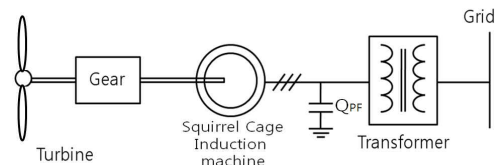


그림 1. FSIG 풍력발전시스템의 기본 구성
Fig. 1. Configuration of FSIG Wind Turbine System

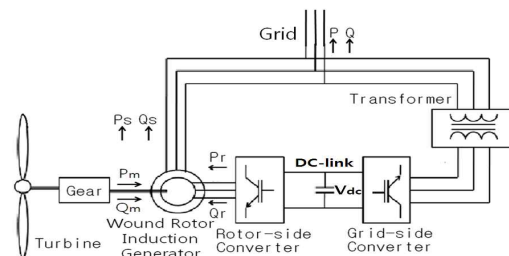


그림 2. DFIG 풍력발전시스템의 기본 구성
Fig. 2. Configuration of DFIG Wind Turbine System

그림 2는 전형적인 DFIG 풍력발전시스템의 구성이다. DFIG의 고정자권선은 직접 일정한 주파수의 전력계통에 연결되는 반면 회전자의 슬립링은 back-to-back 전압원 컨버터와 변압기를 통해 전력계통에 연결된다. 회전자측 컨버터는 고정자권선의 자속제어를 기초로 하여 유도발전기의 유효/무효전력을 제어한다. 전력계통측 컨버터는 dc-link 전압조정을 역할을 하여 dc-link 전압을 일정하게 유지시켜 전력계통으로 전력 전달이 가능하게 한다. Dc-link에 연결된 전압원 컨버터를 이용하여 얻어지는 가변의 회전자

전압을 주입함으로써 유도발전기의 가변속 운전이 가능하게 된다. 정격 풍속 이상의 풍속에서는 출력을 제한하기 위하여 날개의 피치각을 제어한다. 풍속의 변화에 대응하여 풍차의 회전속도를 조절할 수 있기 때문에 최대출력을 추적하며 운전할 수 있게 된다.

그림 2에서 표시된 고정자권선의 출력, 회전자권선의 출력, 유도발전기로 전달되는 기계적인 입력의 방향은 동기속도 이하의 속도에서 발전 모드로 운전하는 DFIG 풍력발전시스템의 전력의 흐름을 나타낸다. 이에 반해 동기속도 이상의 속도에서 발전 모드로 운전하는 경우 회전자권선의 출력의 흐름이 반대로 된다. 이러한 전력의 관계는 손실을 무시할 경우 다음과 같이 표현된다[7].

$$P_m = P_s(1-s) = P_s + P_r \quad (1)$$

- 여기서, P_m = 유도발전기로 전달되는 기계적 입력
- P_r = 회전자권선이 전달하는 출력
- P_s = 고정자권선이 전달하는 출력
- s = 회전자의 슬립

그림 3은 DFIG의 정상상태에서의 등가회로이다. 그림 3에서 r_s, L_{ls} 은 각각 고정자권선의 저항과 누설 인덕턴스를 나타내고, r_r, L_{lr} 은 각각 회전자권선의 저항과 누설 인덕턴스를 나타낸다. L_m 은 자화 인덕턴스를 나타내며 I_s, I_r, I_m 은 각각 고정자권선의 전류, 회전자권선의 전류, 자화 전류를 나타내고 V_s, V_r 은 고정자권선 및 회전자권선의 전압을 나타낸다. FSIG의 등가회로는 V_r/s 부분이 단락된 형태가 된다.

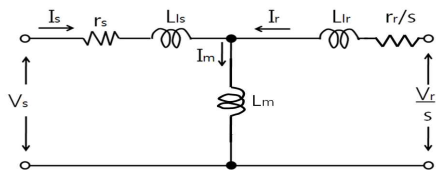


그림 3. 정상상태에서 DFIG의 등가회로
Fig. 3. Equivalent Circuit of DFIG Wind Turbine System

DFIG를 이용하는 가변속운전 풍력발전시스템에서

는 회전자 전압의 제어를 통해 유효전력과 무효전력의 제어가 가능하다. 그림 3의 등가회로를 이용하여 DFIG 풍력터빈에서 회전자 전압의 변화에 대한 고정자권선의 유효/무효전력 및 회전자권선의 유효/무효전력 관계를 나타낸 것이 그림 4부터 그림 7까지이다. 각 그림에서는 회전자 전압이 $V_r = 0, V_r > 0, V_r < 0$ 인 경우 각각의 특성곡선을 나타내고 있다. 그림 4의 'a'점은 동기속도 이상(super-synchronous)에서 한 운전점의 고정자권선 유효전력을 나타내며 이에 대응하는 다른 출력의 운전점은 그림 5부터 그림 7에 'a'로 표시하였다. 마찬가지로 'b'점은 동기속도 이하(sub-synchronous)에서 한 운전점의 고정자권선 유효전력을 나타내며 이에 대응하는 다른 출력의 운전점은 다른 그림에서 'b'로 표시하였다. 그림 4의 가운데 곡선은 V_r 이 0인 경우로써 그림 3의 등가회로에서 V_r/s 가 단락된 경우와 같으므로 FSIG의 특성을 보여준다. $V_r < 0$ 인 경우 회전자권선의 출력이 회전자로부터 계통쪽으로 전달되어 동기속도 이상의 구간인 'a'점에서 발전하는 것을 보여주고, $V_r > 0$ 인 경우 회전자 출력이 계통쪽에서 회전자로 주입되어 동기속도 이하의 구간인 'b'점에서 발전하는 것을 보여준다.

그림 5는 회전자 전압의 변화에 따른 DFIG의 회전자권선에서의 유효전력의 변화를 보여준다. $V_r > 0$ 인 경우 동기속도 이하의 구간에서 유효전력이 계통으로부터 회전자로 공급되는 것을 보여주고, $V_r < 0$ 인 경우 동기속도 이상의 구간에서 유효전력이 회전자로부터 계통으로 공급되는 것을 알 수 있다. 그림 6은 회전자 전압의 변화에 따른 DFIG의 고정자권선에서의 무효전력의 변화를 보여준다. 동기속도 이상인 운전점과 동기속도 이하인 운전점에서의 고정자권선의 무효전력은 같은 부호를 가지는 것을 보여주며 이것은 두 운전점에서 계통으로부터 무효전력을 흡수하는 것을 나타내고 있다. 그림 7은 회전자 전압의 변화에 따른 DFIG의 회전자권선에서 무효전력의 변화를 보여준다. 이 경우 동기속도 이상인 운전점과 동기속도 이하인 운전점에서의 회전자권선의 무효전력은 반대 부호를 나타내고 있으며 이것은 회전자권선의 유효전력과 같은 부호를 가지는 것을 알 수 있다.

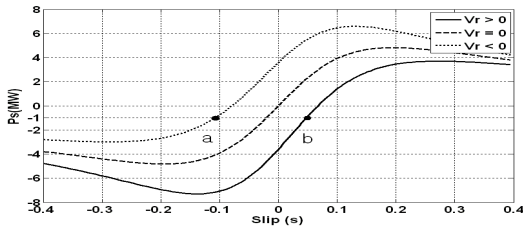


그림 4. DFIG 풍력터빈의 고정자권선의 유효전력
Fig. 4. Real power of stator winding in DFIG

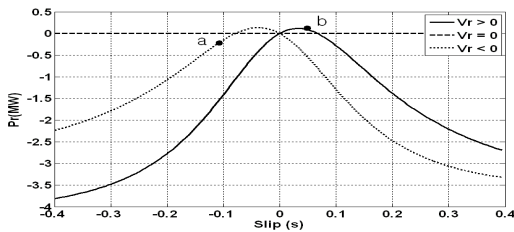


그림 5. DFIG 풍력터빈의 회전자권선의 유효전력
Fig. 5. Real power of rotor winding in DFIG

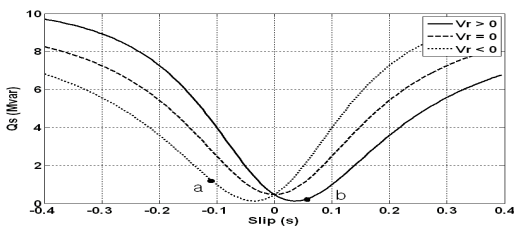


그림 6. DFIG 풍력터빈의 고정자권선의 무효전력
Fig. 6. Reactive power of stator winding in DFIG

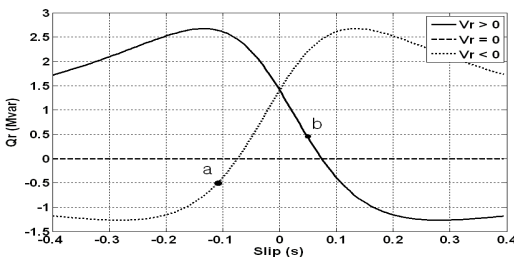


그림 7. DFIG 풍력터빈의 회전자권선의 무효전력
Fig. 7. Reactive power of rotor winding in DFIG

표 1은 위에서 언급한 그림 4에서 그림 7에 표시된 발전 모드의 두 운전점에서 고정자권선의 유효/무효 전력, 회전자권선의 유효/무효전력의 부호 변화를 정리한 것이다.

표 1. 발전 모드에서 DFIG의 유효/무효전력의 부호
Table 1. Sign of real/reactive power for DFIG in generating mode

	$s < 0$ 동기속도 이상	$0 < s < 1$ 동기속도 이하
P_s	< 0	< 0
P_r	< 0	> 0
Q_s	> 0	> 0
Q_r	< 0	> 0

3. 풍력발전시스템 모델링

앞 장에서 소개한 FSIG 및 DFIG를 이용한 가변속 풍력발전시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 그림 8과 같은 간단한 배전계통을 설정하였으며 이 그림은 풍력터빈이 배전계통과 연계된 풍력발전시스템의 개략적인 구조를 나타낸다. FSIG의 경우 그림 8에서 A로 표시된 점선안의 부분이 그림 1을 나타내며, DFIG의 경우 점선안의 부분이 그림 2를 나타내어 계통 부분이 그림 8의 E 지점과 연결된다.

본 연구에서는 DFIG와 FSIG의 특징을 비교하기 위해 MATLAB/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하고자 한다. 이를 위해 그림 9는 계통연계 풍력발전시스템의 모델링을 Simulink 모델로 표현한 것이다. E 지점에 연결된 풍력 터빈은 DFIG를 이용하는 경우를 표시하고 있다.

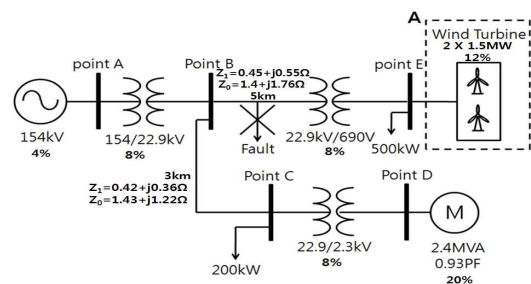


그림 8. 계통연계 풍력발전시스템의 개요도
Fig. 8. Basic diagram of grid-connected wind turbine system

그림에서 보는 바와 같이 3상 전원, 3상 선로, 3상 변압기, DFIG 풍력 터빈(또는 FSIG 풍력 터빈), 3상 부

연계선로의 조건 변화에 따른 DFIG와 FSIG 풍력발전시스템의 운전특성 비교

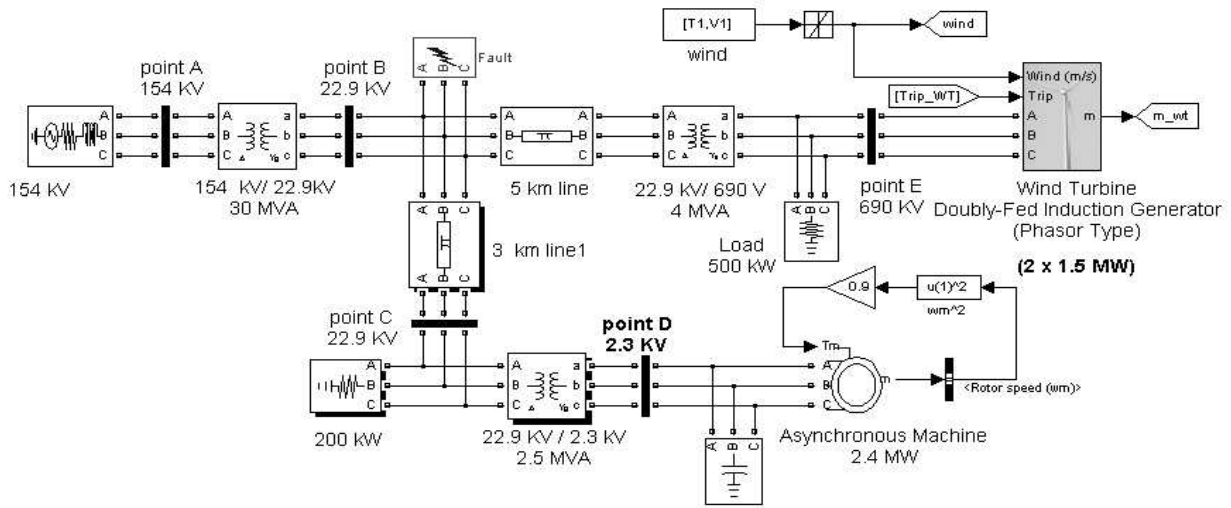


그림 9. 계통연계 풍력발전 시스템의 Simulink 모델
Fig. 9. Simulink model for grid-connected wind turbine system

하 등으로 계통이 구성되고, 풍력발전시스템과 연계된 변압기 1차측의 B지점의 3상 단락에 따른 풍력발전시스템의 고장전류에 대한 시뮬레이션 결과를 알아보기 위한 사고모델이 접속되어 있다. 부하는 저항성 부하와 유도성 부하의 결합이며 3상 변압기는 모두가 $\Delta-Y$ 접지식 결선이다. 표 2는 본 시뮬레이션에서 사용한 풍력발전시스템의 데이터를 나타내고 있다.

표 2. 풍력발전 시스템의 데이터
Table 2. Data for wind turbine system

	DFIG	FSIG
정격 출력	2×1.5[MW]	2×1.5[MW]
단자전압/주파수	690[V]/60[Hz]	690[V]/60[Hz]
R_s/R_r	0.00488[pu]/ 0.00549[pu]	0.00488[pu]/ 0.00549[pu]
L_{ls}/L_{lr}	0.09241[pu]/ 0.09955[pu]	0.09241[pu]/ 0.09955[pu]
L_m	3.95279[pu]	3.95279[pu]
정격 풍속	13[m/s]	13[m/s]
Q_{PF} (커패시터용량)	.	300[kvar]
V_{DC} (DC link 전압)	1,200[V]	.

4. 사례연구

그림 9의 모델로 여러 사례(즉 정상상태에서 풍속의 변화, 3상단락 고장에서 연계선로의 강인성 및 연계선로의 X/R비 변화)에 대해 시뮬레이션을 수행하여 DFIG와 FSIG의 운전특성을 비교, 관찰하고자 한다.

4.1 풍속변화에 대한 동작 특성

그림 10은 100초 동안 풍속의 변화를 나타내며 이러한 풍속이 풍력 터빈에 인가되었을 때의 발전기의 회전자 속도 및 DFIG의 출력특성에 대한 시뮬레이션 결과가 그림 11 및 그림 12에 나타내고 있다.

그림 11은 풍속 변화에 따른 발전기의 회전자 속도의 변화를 보여준다. FSIG의 경우 회전자 속도는 거의 변하지 않는 것을 알 수 있으며 이에 반해 DFIG의 경우 회전자 속도의 변동이 뚜렷하게 나타난다. 이는 동기속도 이상 또는 이하에서 운전이 가능한 가변속 운전 특성을 보여주는 것으로 회전자의 속도 변화에 따라 터빈에서 관성력을 저장하기 때문에 FSIG보다 기계적인 스트레스가 줄어들고 낮은 풍속에서 동작할 때 소음이 줄어드는 특징이 있다.

그림 12는 DFIG에서 풍속의 변화에 따른 회전자권선의 출력(P_r), 고정자권선의 출력(P_s) 및 기계적 입력(P_m)의 변화를 보여주고 있다. 회전자 속도가 동기 속도 이상의 구간에서는 P_r , P_s , P_m 의 크기가 모두 양의 값으로 기계적 입력이 들어와 고정자 출력과 회전자 출력이 모두 계통으로 나가는 것을 알 수 있다. 한편 회전자 속도가 동기속도 이하의 구간에서는 P_s , P_m 의 크기는 양의 값이며 P_r 의 크기는 음의 값으로 P_r 이 계통에서 회전자로 유입되는 것을 알 수 있다.

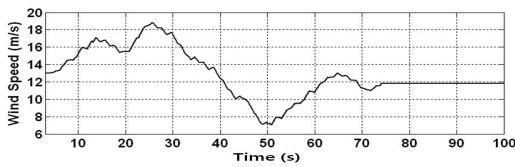


그림 10. 풍속 변화
Fig. 10. Wind variation

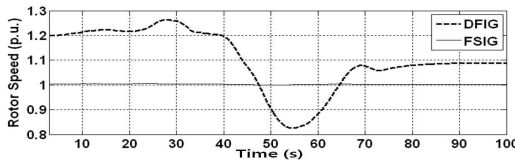


그림 11. 풍속 변화에 대한 발전기 회전자속도
Fig. 11. Variation of generator's rotor speed

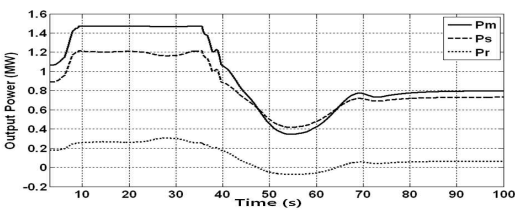


그림 12. 풍속 변화에 대한 DFIG의 회전자 출력, 고정자 출력 및 기계적 입력
Fig. 12. Variation of rotor power, stator power and mechanical input power

4.2 연계선로의 강인성에 따른 동작 특성

그림 13부터 그림 18은 Simulink 모델의 B 지점에서 3상단락 고장이 90초에서 0.06초간 발생하였을 때 연계선로 강인성의 변화에 따른 DFIG와 FSIG의 동작 특성에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 연계

선로의 임피던스가 높다는 것은 연계선로가 약한계통(weak grid)이고 연계선로의 임피던스가 낮다는 것은 연계선로가 강한계통(strong grid)이다. 따라서 연계선로 강인성은 연계 임피던스와 같은 맥락으로 볼 수 있으며 연계 임피던스의 변화는 B 지점과 E 지점 사이의 거리 변화로 1[km], 5[km], 25[km]로 변화를 주어 시뮬레이션하였다.

DFIG와 FSIG 모두 B 지점과 E 지점 사이의 거리가 커짐에 따라 선로 임피던스가 증가하고 약한 계통(weak grid)이 되기 때문에 3상 단락고장에 따른 전압의 변동이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

그림 13과 그림 14에서 보면 DFIG는 FSIG에 비하여 연계 임피던스가 증가함에 따라 출력 변동의 폭이 작고, 정상상태로의 회복이 빠른 것을 볼 수 있다. 그림 15와 그림 16을 비교해 보면 출력의 경우와 마찬가지로 DFIG가 FSIG에 비하여 고장에 의한 진동이 적고 정상상태로의 회복이 빠른 것을 볼 수 있다. 또한 그림 17과 그림 18을 비교하면 DFIG는 90초에서 고장 발생 후 고장전류의 피크치가 3.5 p.u. 정도 되는 것에 비하여 FSIG는 고장 발생 후 고장전류의 피크치가 7.5 p.u.까지 상승하는 것을 볼 수 있다. 그리고 전압의 경우와 마찬가지로 전류의 경우에도 DFIG는 FSIG에 비하여 정상상태로의 회복이 빠른 것을 볼 수 있다.

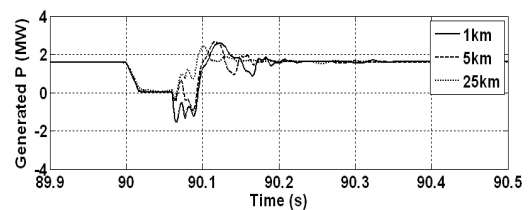


그림 13. DFIG의 발전기 출력
Fig. 13. Generator output power of DFIG

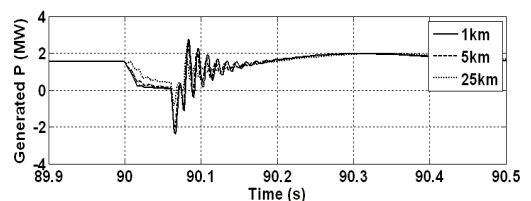


그림 14. FSIG의 발전기 출력
Fig. 14. Generator output power of FSIG

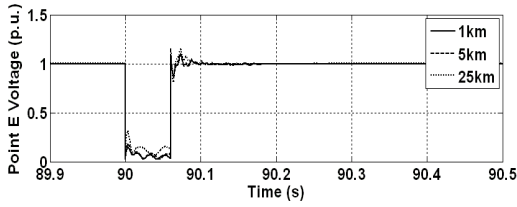


그림 15. DFIG의 E지점에서의 전압
Fig. 15. Voltage of point E for DFIG

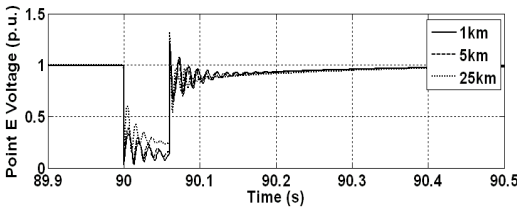


그림 16. FSIG의 E지점에서의 전압
Fig. 16. Voltage of point E for FSIG

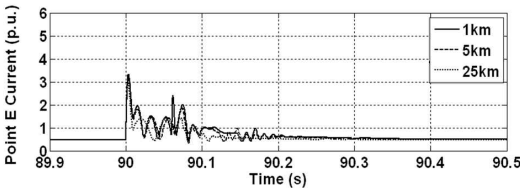


그림 17. DFIG의 E지점에서의 전류
Fig. 17. Current of point E for DFIG

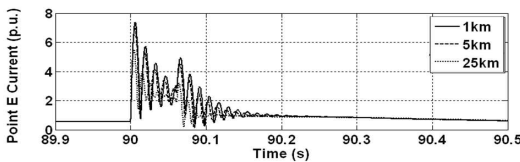


그림 18. FSIG의 E지점에서의 전류
Fig. 18. Current of point E for FSIG

4.3 연계선로의 X/R비 변화에 대한 동작 특성

그림 19부터 그림 24는 연계선로의 X/R비 변화에 따른 DFIG와 FSIG의 동작특성에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 연계선로의 X/R비는 지중선로와 가공선로를 구분하는 것으로 지중선로는 X/R비가 약 2 정도이고 가공선로는 약 10 정도이다.

그림 19, 그림 21, 그림 23은 DFIG에 지중·가공선

로가 연계되어 있는 경우 3상 단락고장에 따른 DFIG의 출력 변화, E 지점에서의 전압 및 전류의 변화를 보여준다. 그림 20, 그림 22, 그림 24는 FSIG에 지중·가공선로가 연계되어 있는 경우 3상 단락고장에 따른 FSIG의 출력의 변화, E 지점에서의 전압 및 전류의 변화를 보여준다. X/R비가 큰 가공선로인 경우에 E 지점에서의 전압 변동이 큰 것을 볼 수 있으며 X/R비가 작은 지중선로의 경우에 E 지점에서의 전류 변동이 큰 것을 볼 수 있다.

그림 19와 그림 20을 비교해 보면 DFIG는 FSIG에 비하여 X/R비의 변화에 따라 출력 변동의 폭이 작은 것을 볼 수 있다. 그림 21부터 그림 24를 비교해 보면 E 지점의 전압, 전류 모두 출력의 경우와 마찬가지로 DFIG가 FSIG에 비하여 고장에 의한 진동이 적고 정상상태로의 회복이 빠른 것을 볼 수 있다. 따라서 시뮬레이션 결과로 보아 DFIG의 응답특성이 FSIG의 응답특성보다 우수함을 알 수 있다.

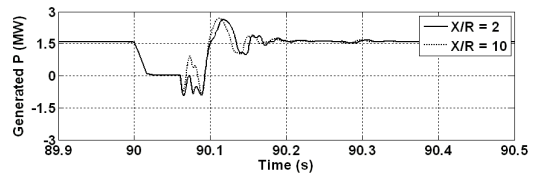


그림 19. DFIG의 발전기 출력
Fig. 19. Generator output power of DFIG

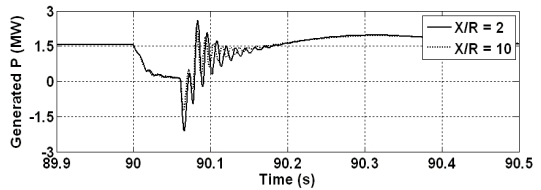


그림 20. FSIG의 발전기 출력
Fig. 20. Generator output power of FSIG

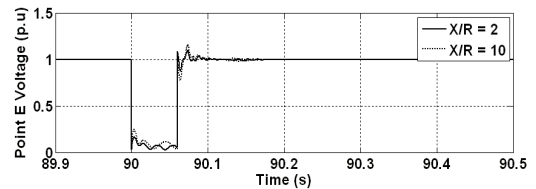


그림 21. DFIG의 E지점에서의 전압
Fig. 21. Voltage of point E for DFIG

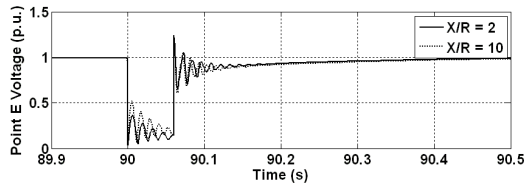


그림 22. FSIG의 E지점에서의 전압
Fig. 22. Voltage of point E for FSIG

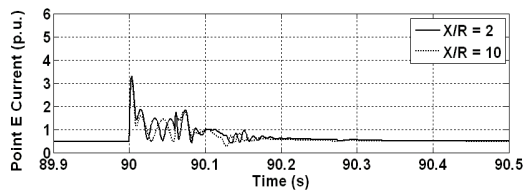


그림 23. DFIG의 E지점에서의 전류
Fig. 23. Current of E point for DFIG

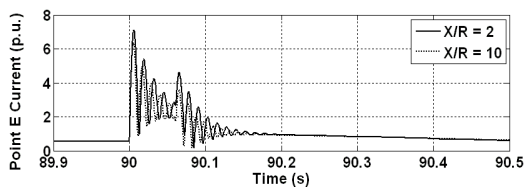


그림 24. FSIG의 E지점에서의 전류
Fig. 24. Current of point E for FSIG

5. 결 론

본 연구는 FSIG를 이용한 정속운전에 반해 DFIG를 이용한 가변속 풍력발전시스템의 정상상태에서의 출력특성을 분석하였으며, 계통의 연계조건에 따른 FSIG와 DFIG의 동특성을 비교, 분석하였다. Simulink에서 수행한 다양한 시뮬레이션 결과를 통해 DFIG와 FSIG의 차이점을 살펴보면 다음과 같다.

- 연계선로의 선로 임피던스가 증가함에 따라 약한 계통이 되기 때문에 3상 단락고장에 따른 전압의 변동이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.
- 본 연구에서 모의한 연계선로의 X/R비 변화에 대해 3상 단락사고와 같은 계통의 고장이 발생하였을 때 DFIG의 경우가 FSIG보다 정상상태로의 회복이 빠른 것을 볼 수 있었다.

이와 같은 결과를 토대로 살펴보면, DFIG는 풍속에 따른 운전특성이 FSIG보다 좋기 때문에 DFIG 풍력발전시

스템은 상용화된 풍력에너지의 효율적인 이용을 위해 계통에 적용될 가능성이 더욱 확대될 것으로 사료된다.

References

- [1] Z. Chen, S.A. Gomez, M. McCormick, "A Fuzzy Logic Controlled Power Electronic System for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems", Power Electronics and Variable Speed Drives, pp. 114-119, 2000.
- [2] Shuhui Li, Sitanshu Sinha, "A Simulation Analysis of Double-Fed Induction Generator for Wind Energy Conversion Using PSpice" Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-8, 2006.
- [3] S. Foster, L. Xu, and B. Fox "Coordinated control and operation of DFIG and FSIG based Wind Farms", IEEE Power Tech, pp. 522-527, 2007.
- [4] R. Datta and V. T. Ranganathan, " Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine A Comparison With Alternative Schemes", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 17, No. 3, pp. 414-421, 2002.
- [5] L. Holdsworth, X.G. Wu, J.B. Ekanayake and N. Jenkins, "Comparison of fixed speed and doubly fed induction wind turbines during power system disturbances" IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 150, No. 3, pp.343-352, 2003.
- [6] S. N. Bhadra, D. Kastha and S. Banerjee, "Wind Electrical Systems" Oxford University Press, 2005.
- [7] M. Godoy Simoes and Felix A. Farret, "Alternative Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2008.
- [8] Ion Boldea, "Variable Speed Generators", CRC Taylor & Francis, 2006.
- [9] Thomas Ackermann, "Wind Power in Power System", John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

◇ 저자소개 ◇



노경수(盧昊洙)

1963년 3월 27일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1997년 미국 Virginia Tech 전기공학과 졸업(박사). 2005년 미국 Arizona State University 방문교수. 현재 동국대학교-서울 전기공학과 교수.



김태호(金泰昊)

1982년 6월 10일생. 2008년 동국대 공대 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 삼성전기 직원.