

이중여자 유도발전기를 이용한 가변속운전과 정속운전 풍력발전시스템의 운전특성 비교

논문

58-7-9

Comparison of Characteristics for Variable Operation using Doubly-fed Induction Generator and Fixed Speed Operation in Wind Turbine System

노 경 수[†] · 김 태 호^{*}
(Kyoung-Soo Ro · Tae-Ho Kim)

Abstract - This paper analyzes the steady-state operating characteristics of doubly-fed induction generator(DFIG) and fixed-speed induction generator(FSIG) in wind turbine system. It also presents a modeling and simulation 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, 3-phase fault and 1-phase ground fault of the network. Simulation results show the variations of generator's active/reactive output, rotor speed, terminal voltage, fault current, etc. Case studies demonstrate that DFIG illustrates better performance compared to FSIG.

Key Words : DFIG, FSIG, Wind Turbine, Variable Speed, MATLAB/Simulink

1. 서 론

최근 세계 여러 나라들은 화석에너지 고갈과 환경오염에 대한 대책의 일환으로 대체에너지 개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 또한 교토의정서 등의 환경협약은 대체에너지원의 실용화 연구에 활성화를 불러일으키고 있다. 그 중에 풍력발전시스템의 관심이 증가하고 새로운 기술개발과 대용량화에 힘쓰고 있는 실정이다.

풍력발전이란 공기의 유동이 가진 운동에너지의 공기역학적 특성을 이용하여 회전자를 회전시켜 기계적 에너지로 변환시키고 이를 이용하여 전기를 얻는 기술을 말한다. 회전자속의 속도에 따라 DFIG (doubly-fed induction generator)를 이용한 가변속운전과 정속운전(FSIG, fixed-speed induction generator)으로 구분된다. FSIG의 경우 유도기의 자화전류를 보상하기 위한 무효전력 보상용 콘덴서를 필요로 하기 때문에 부하탈락 시에 유도기 모선에 과전압, 전압안정도의 문제를 유발할 수 있지만 발전시스템의 구조가 간단하게 되고 계통과의 동기를 위한 별도의 장비를 사용하지 않아서 제어가 간단하게 된다는 이점이 있다.

한편 DFIG를 이용한 가변속운전은 FSIG보다 속도 제어 범위가 넓고 회전자에 설치되는 인버터의 용량도 작아지며 낮은 풍속에서 더 많은 에너지를 흡수 할 수 있다. 정격풍속 이상의 풍속에서 터빈에 저장된 관성에너지에 의하여

FSIG에 비해 부드러운 출력이 가능한 반면에 계통과의 동기를 위한 별도의 장비를 사용해야 하고, 제어가 복잡하다는 단점을 제외하고는 주목받고 있는 풍력발전시스템이다.

DFIG 풍력발전시스템을 전력계통에 적용하기 위한 연구 동향을 살펴보면, Muller 등은 DFIG의 역학적 모델에서 벡터 제어를 통해 유효전력과 무효전력을 따로 분리하여 제어하는 것을 보여주었다 [1]. Cartwright 등은 DFIG 풍력발전시스템에서 회전자속 전압원 컨버터를 이용한 무효전력 제어와 동등한 OLTC(on-load tap changer)를 이용한 제어를 통해 전압제어방법을 제시하였다[2]. Foster 등은 FSIG의 풍력발전시스템 인근에 DFIG 풍력발전시스템을 설치하여 통합제어를 수행하면 외란이 발생할 경우 DFIG를 제어하여 계통의 전압 안정에 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 대해 정상상태에서 풍속의 변화에 따른 운전특성 및 3상 단락고장과 1상 지락고장에서의 동특성을 비교하지 않고 있다.

본 논문에서는 정상상태에서 FSIG와 DFIG를 이용한 풍력발전시스템의 운전특성을 분석하였으며, 외란에 대한 동특성 해석을 위해 계통연계 풍력발전시스템을 MATLAB/Simulink에서 모델링하였다. 위의 참고문헌과의 차별성을 부각하기 위해 같은 조건의 풍속 변화 및 3상 단락고장과 1상 지락고장에 따라 DFIG와 FSIG의 발전기 유/무효 출력, 회전자 각속도, 단자전압, 고장전류 등에 대하여 폭넓게 변동을 관찰하여 DFIG와 FSIG의 특성을 비교, 분석하고자 한다.

[†] 교신저자, 정회원 : 동국대학교 전기공학과 부교수

E-mail : ksro@dgu.ac.kr

^{*} 준 회원 : 동국대학교 전기공학과 석사과정

접수일자 : 2009년 2월 26일

최종완료 : 2009년 6월 12일

2. 정속운전과 가변속운전

풍차가 바람이 가지는 운동에너지로부터 변환하는 기계적 에너지를 전력으로 표현하면 다음의 비선형 식으로 표현할 수 있다[6-7].

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\beta, \lambda) \quad [W] \quad (1)$$

여기서, A = 풍차 날개의 회전 단면적 [m^2]

v = 풍속 [m/s]

ρ = 공기 밀도 [kg/m^3]

C_p = 출력계수 (power coefficient)

λ = 주속비 (tip-speed ratio)

β = 피치각 (pitch angle)

그리고 주속비는 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{wR}{v} \quad (2)$$

여기서, w = 풍차의 회전속도 [rad/s]

R = 풍차날개의 반지름 [m]

일반적으로 풍차의 출력계수(C_p)는 바람이 가지는 전력과 풍차로부터 변환되는 전력의 비로 정의되고, 출력계수와 주속비(λ)사이의 상관관계는 다음 식과 같이 된다.

$$C_p(\beta, \lambda) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda} - 0.002\beta - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{\lambda}} \quad (3)$$

C_p 의 이론적인 최대값은 0.593이며 실제로 잘 설계된 풍차의 경우 약 0.45까지 가능하다. 그림 1은 피치각 변화에 따른 출력계수와 주속비 사이의 특성을 나타내고 있다. 피치각 제어는 풍속이 정격풍속 이상일 때 작동하며 풍속이 낮을 때 피치각의 값은 0이 되기 때문에 최대 출력계수는 이 피치각의 값을 포함한다[8].

풍력발전시스템은 회전자 축의 회전속도에 따라 FSIG와 DFIG로 구분되며 전형적인 FSIG 풍력 터빈 시스템의 구성은 그림 2와 같다[9]. 이 시스템은 일반적으로 농형 유도발전기를 사용하고 고정자권선을 통해 전력이 전달된다. 전력계통과 연결된 농형 유도발전기는 기어 박스를 통해 터빈과 연결되며 항상 전력계통으로부터 무효전력을 공급받는다. 커패시터는 무효전력을 보상하는데 사용되며 아울러 전력계통으로부터 풍력터빈이 단락될 때 과전압에 대한 적절한 보호수단이 된다. FSIG 풍력발전시스템은 1% 정도의 매우 작은 동기속도 이상의 범위에서 속도가 변화한다. 속도의 변화가 적기 때문에 일반적으로 정속운전시스템이라고 한다. FSIG는 모든 풍속에서 일정한 속도로 운전해야 하기 때문에 정격 풍속의 다른 풍속에서는 최대 출력을 발생하지 못한다.

FSIG의 주속비 λ 는 풍속의 변화에 따라 크게 변하게 되는데 이 주속비의 변화는 곧 출력계수와 풍차의 출력(P_m) 변화를 유발하게 된다. 따라서 풍속의 변화에 대응하여 항

상 가능한 최대 출력을 얻는 것이 FSIG의 경우에는 불가능하게 된다. 잘 구성된 FSIG 풍력발전시스템은 가변속 운전에서 1년 동안 발생하는 에너지의 약 80% 정도를 끌어 낼 수 있다. 정격 풍속 이상의 높은 풍속에서 정격출력으로 출력을 제한하기 위해 날개의 피치각 제어 또는 스톱 제어가 사용된다.

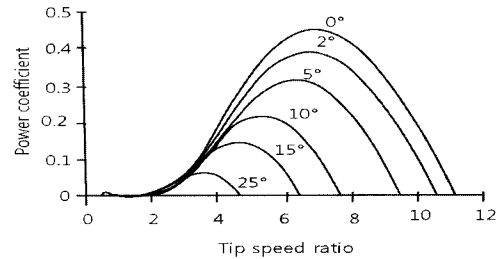


그림 1 피치각 변화에 대한 풍차의 출력계수(C_p)와 주속비(λ) 특성곡선

Fig. 1 C_p - λ characteristic curve of a wind turbine for different pitch angles.

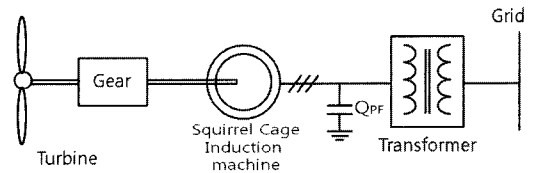


그림 2 FSIG 풍력 터빈의 기본 구성

Fig. 2 Basic configuration of FSIG wind turbine

그림 3은 전형적인 DFIG 풍력발전시스템의 구성이다. 일반적으로 권선형 유도기는 대용량의 DFIG 풍력발전시스템에의 적용이 증가하고 있다. DFIG 발전기의 회전자는 기어 박스를 통해 터빈과 연결되어 있고, 회전자 2차권선으로 슬립링을 통하여 전류가 들어오거나 나올 수 있다. 정격 풍속 이상의 풍속에서는 출력을 제한하기 위하여 날개의 피치각을 제어한다. 풍속의 변화에 대응하여 풍차의 회전속도를 조절할 수 있기 때문에 최적의 주속비를 유지할 수 있으며 이로 인해 최대출력을 추적하며 운전할 수 있게 된다. 고정자 권선은 직접 일정한 주파수의 전력계통에 연결되는 반면 회전자의 슬립링은 back-to-back 전압원 컨버터와 변압기/필터를 통해 전력계통에 연결된다. 회전자축 컨버터는 고정자 자속 제어를 기초로 하여 유도기의 유효/무효 전력을 제어한다. 전력계통 축 컨버터는 dc-link 전압조정기 역할을 하여 dc-link 전압을 일정하게 유지시켜 전력계통으로 전력 전달이 가능하게 한다[9]. Dc-link에 연결된 전압원 컨버터를 이용하여 얻어지는 가변의 회전자 전압을 주입함으로써 유도발전기의 가변속 운전이 가능하게 된다.

그림 3에서의 고정자 출력, 회전자 출력, 유도기로 전달되는 기계적인 입력의 흐름은 동기속도 이하의 속도에서의 전력의 흐름을 나타낸다. 이에 반해 동기속도 이상의 속도에서는 회전자 출력의 흐름이 반대로 된다. 이러한 전력의 관계는 손실을 무시할 경우 다음과 같이 표현된다[10].

$$P_m = P_s(1 - s) = P_s + P_r \quad (4)$$

여기서, P_m = 유도발전기로 전달되는 기계적 입력

P_r = 회전자에 전달하는 출력

P_s = 고정자에 전달하는 출력

s = 회전자의 슬립

그림 4는 DFIG의 정상상태에서의 등가회로이다. 그림 4에서 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 고정자, 회전자, 자화 전류를 나타내고 V_s, V_r 은 고정자 및 회전자 전압을 나타낸다. FSIG의 등가회로는 V_r/s 부분이 단락된 형태이다.

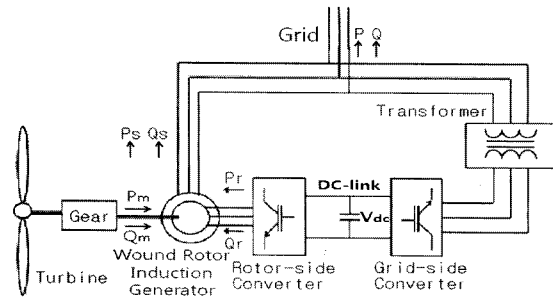


그림 3 DFIG 풍력 터빈의 기본 구성
Fig. 3 Basic configuration of DFIG wind turbine

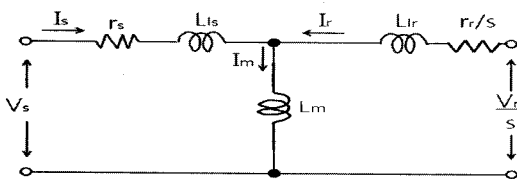


그림 4 정상상태에서 DFIG의 등가회로
Fig. 4 Steady-state equivalent circuit of DFIG

등가회로를 통해 DFIG의 출력-슬립(속도) 특성곡선을 그림 5에 보여주고 있다. 이 그림에서는 회전자 전압인 V_r 이 $V_r = 0, V_r > 0, V_r < 0$ 인 경우 각각의 특성곡선을 나타내고 있다. 가운데 곡선은 회전자 전압 V_r 이 0인 경우로써 등가회로에서 V_r/s 가 단락된 경우와 같으므로 FSIG의 특성을 보여준다. $V_r < 0$ 인 경우 회전자 출력이 회전자로부터 계통 쪽으로 전달되어 동기속도 이상(super-synchronous)의 구간인 점 "a"에서 발전하는 것을 보여주고, $V_r > 0$ 인 경우 회전자 출력이 계통 쪽에서 회전자로 주입되어 동기속도 이하(sub-synchronous)의 구간인 점 "b"에서 발전하는 것을 보여준다. DFIG 풍력발전시스템은 풍속에 따라 터빈의 속도가 변하기 때문에 풍력 터빈의 각 풍속에서의 최대의 출력으로 발전할 수 있다.

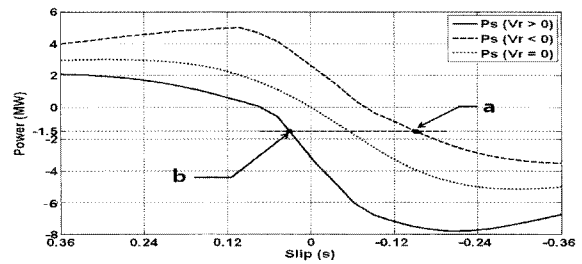


그림 5 DFIG에서 풍력 터빈의 출력-슬립(속도)특성
Fig. 5 Wind turbine power-slip(speed) characteristics of DFIG

3. 풍력발전 시스템의 모델링

앞에서 소개한 FSIG 및 DFIG를 이용한 가변속 풍력발전시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 그림 6과 같은 간단한 배전계통을 설정한다. 그림 6은 풍력터빈이 배전계통과 연계된 풍력발전 시스템의 개략적인 구조를 나타낸다. 본 연구에서는 DFIG와 FSIG의 특성을 비교하기 위해 MATLAB/ Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. FSIG의 경우 그림 6에서 A로 표시된 점선안의 부분이 그림 2를 나타내며, DFIG의 경우 점선안의 부분이 그림 3을 나타내어 계통 부분이 그림 6의 F지점과 연결된다.

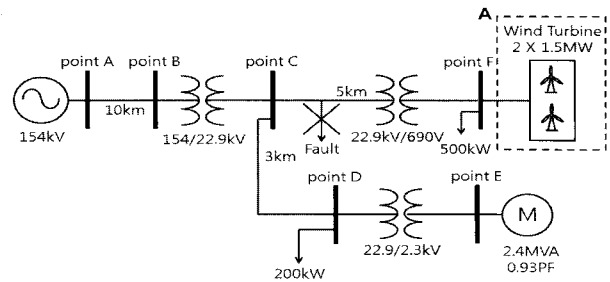


그림 6 계통연계 풍력발전 시스템의 개요도
Fig. 6 Scheme of grid-connected wind turbine generation system

본 연구에 사용된 발전기의 파라미터 값은 정격출력 1.5MW, 공칭전압 690V, 공칭주파수 60Hz를 나타내고, 시뮬레이션 모델은 Simulink library의 풍력 터빈 이중-역자 유도발전기와 풍력 터빈 유도발전기를 사용한다.

실제 풍속은 항상 변동하므로 출력을 제어하기 위해 바람의 변화에 따라 날개의 피치각을 변화하여 제어하는 피치각 제어를 사용한다. 그림 7은 피치각 제어의 원리를 설명하는 것으로써 피치 제어기로 들어오는 가변의 입력은 측정된 출력과 기준 출력의 차이에 대한 오차 신호이다. 피치 제어기는 피치 작동장치를 동작시켜 피치각을 변경한다. 피치각이 커지면 날개의 회전속도가 줄어들게 되어 발전기에 전해지는 전력이 약해진다. 이러한 피치각 제어는 기계적인 복잡성은 있으나 제어성능이 양호하기 때문에 풍력발전시스템에서 널리 이용된다.

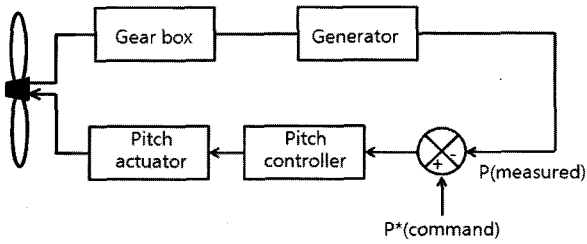


그림 7 피치각 제어의 폐환 루프
Fig. 7 Feedback loop for pitch angle control

그림 8은 계통연계 풍력발전시스템의 모델링을 Simulink 모델로 표현한 것이다. F지점에 연결된 풍력 터빈은 DFIG를 이용하는 경우를 표시하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 3상 전원, 3상 선로, 3상 변압기, DFIG 풍력 터빈(또는 FSIG 풍력 터빈), 3상 부하 등으로 계통이 구성되고, 풍력발전 시스템과 연계된 변압기 1차측의 C지점의 3상 단락과 1상 지락에 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 1은 본 시뮬레이션에서 사용한 풍력발전시스템의 데이터를 나타내고 있다.

4. 사례연구

그림 8의 모델로 여러 가지 사례에 대한 시뮬레이션을 수행하여 시뮬레이션 모델의 정당함을 검증하고, 정상상태에서 풍속의 변화에 대해서 그리고 3상단락 고장에 대해서 DFIG와 FSIG의 운전특성을 관찰하여 비교하고자 한다. 각 단자에서의 전압과 전류는 단위법(p.u.)으로 표현하며 DFIG와 FSIG의 출력은 F지점에서 측정한다.

표 1 풍력발전 시스템의 데이터
Table 1 Data for wind turbine system

	DFIG	FSIG
정격 출력	2×1.5MW	2×1.5MW
단자전압/주파수	690V/60Hz	690V/60Hz
R_s/R_r	0.00488pu/0.00549pu	0.00488pu/0.00549pu
L_{ls}/L_{lr}	0.09241pu/0.09955pu	0.09241pu/0.09955pu
L_m	3.95279pu	3.95279pu
정격 풍속	13m/s	13m/s
Q_{PF}	.	300kvar
V_{DC}	1200V	.

4.1 풍속변화에 대한 DFIG와 FSIG의 동작특성

그림 9는 100초 동안 풍속의 변화를 나타내며 이러한 풍속이 풍력 터빈에 인가되었을 때의 시뮬레이션 결과를 그림 10부터 그림 14에 나타내고 있다. 풍속 변화에 대해 DFIG와 FSIG에 대한 발전기 단자전압, 발전기 유/무효 출력, 회전자 속도 등의 특성 변화를 관찰하고자 한다.

그림 10은 풍속 변화에 따른 DFIG와 FSIG의 발전기 단자전압의 변화를 보여주고 있다. DFIG는 FSIG에 비하여 풍속 변화에 따른 전압 변동이 거의 없는 것은 회전자측 컨버터에 의한 발전기 단자전압이 제어되기 때문이며 FSIG의 경우에는 전압제어가 이루어지지 않으므로 아래 그림 12의 발전기 무효전력 변화에 따라 발전기 단자전압이 변하게 된다.

그림 11과 그림 12는 풍속의 변화에 따른 DFIG와 FSIG의 유효전력과 무효전력 출력의 비교를 보여주는 것이다. 풍속이 정격풍속 이상일 때 풍차는 피치각을 변화하여 발전기가 정격 출력을 추종하여 출력 하도록 제어하는 점은 DFIG와 FSIG가 같은 특성을 보여준다. 그림 11에서 DFIG의 유

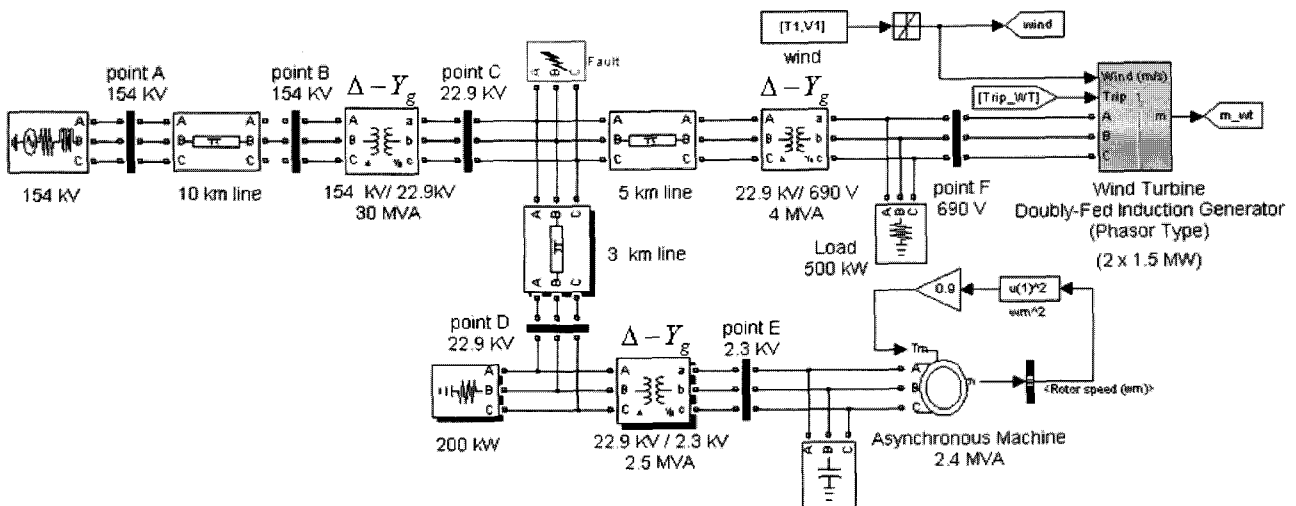


그림 8 계통연계 풍력발전 시스템의 Simulink 모델
Fig. 8 Simulink model of grid-connected wind turbine generation system

효전력 변화가 FSIG보다 부드러운 과형을 보여주는 것은 피치각 제어와 회전자축 컨버터의 출력제어가 함께 수행된 결과이다.

그림 12에서는 DFIG와 FSIG의 무효전력 출력을 비교하고 있다. FSIG는 그림 11에서 발전기 유효전력 출력이 변동함에 따라 그림 12에서 발전기가 흡수하는 무효전력 또한 변동함을 볼 수 있다. 한편 DFIG는 FSIG의 단점중의 하나인 무효전력흡수 문제를 해결하고 있다. 그림 10에서 보는 바와 같이 발전기 단자전압이 거의 일정하게 제어되므로 발전기 무효전력 역시 거의 0의 값을 유지하는 것을 알 수 있다.

그림 13은 풍속변화에 따른 발전기의 회전자 속도의 변화를 보여준다. FSIG의 경우 그림 11의 출력 변동폭이 큰 것과 비교하여 회전자 속도는 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 FSIG 풍력발전시스템의 속도-토크(출력) 특성을 보여주고 있다. DFIG의 경우 그림 11의 출력 변동 폭의 변화와 비슷하게 회전자 속도의 변동이 나타난다. 이는 동기 속도 이상 또는 이하에서 운전이 가능한 가변속운전 특성을 보여주는 것으로 회전자의 속도 변화에 따라 터빈에서 관성력을 저장하기 때문에 FSIG보다 기계적인 스트레스가 줄어들고 낮은 풍속에서 동작할 때 소음이 줄어드는 특징이 있다.

그림 14는 DFIG에서 풍속의 변화에 따른 회전자 출력(P_r), 고정자 출력(P_s) 및 기계적 입력(P_m)의 변화를 보여주고 있다. 회전자 속도가 고정자 속도보다 빠른 동기속도 이상의 구간에서는 P_r , P_s , P_m 의 방향이 모두 같은 방향으로 기계적 입력이 들어와 고정자 출력과 회전자 출력 모두 계통으로 나가는 것을 보이고 있다. 한편 회전자 속도가 고정자 속도보다 느린 동기속도 이하의 구간에서는 P_s , P_m 의 방향과 P_r 의 방향이 반대 방향으로 동기속도 이상의 구간과는 반대로 P_r 이 회전자로 유입되는 것을 알 수 있으며 이 그림에서 앞의 (4) 식이 성립하는 것을 확인할 수 있다.

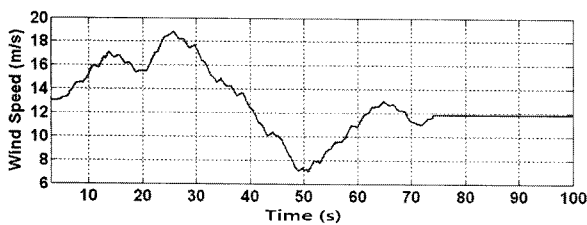


그림 9 풍속 변화
Fig. 9 Wind speed variation

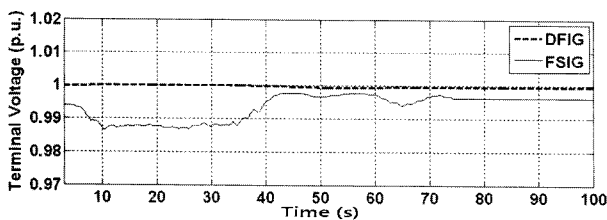


그림 10 풍속 변화에 대한 발전기 단자전압
Fig. 10 Generator terminal voltage for wind speed

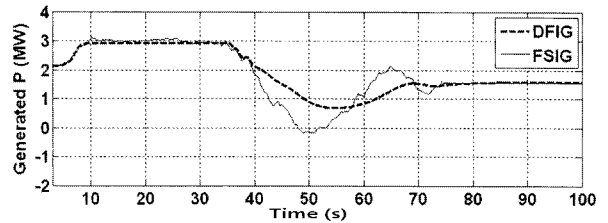


그림 11 풍속 변화에 대한 발전기 유효전력 출력
Fig. 11 Generator active power output for wind speed

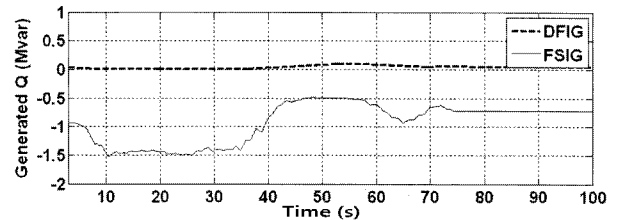


그림 12 풍속 변화에 대한 발전기 무효전력 출력
Fig. 12 Generator reactive power output for wind speed

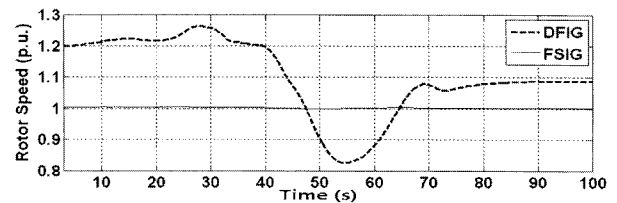


그림 13 풍속 변화에 대한 발전기 회전속도
Fig. 13 Generator rotational speed for wind speed

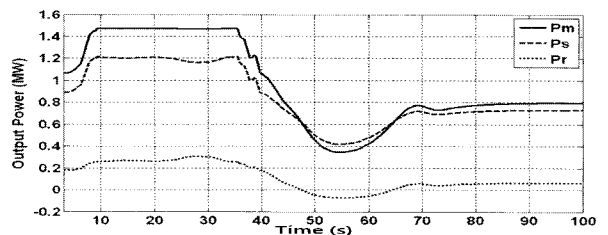


그림 14 풍속 변화에 대한 DFIG의 회전자, 고정자 출력 및 기계적 입력
Fig. 14 Rotor, stator and mechanical power of DFIG for wind speed

4.2 3상 단락고장에 대한 DFIG와 FSIG의 동작특성

그림 8의 시뮬레이션 모델 C지점에서 3상 단락고장이 발생하였을 경우에 대하여 계통과 발전기 단자전압, 발전기 출력, 회전자속도 등을 관찰한다. 고장은 90초에서 0.06초간 발생에 대하여 시뮬레이션을 수행하고 FSIG와 DFIG의 응답 특성을 비교한다.

그림 15는 3상 단락고장이 발생하였을 때 발전기 출력 변동을 보여주고 있다. 고장이 발생함에 따라 출력이 진동하고 고장 해소 후에 정상상태로 차츰 회복함을 볼 수 있다. DFIG는 FSIG에 비하여 고장 발생에 따른 출력 진동이

적고 고장상태 후 정상상태로의 회복이 FSIG보다 빠른 것을 볼 수 있다.

그림 16과 그림 17은 각각 DFIG와 FSIG의 경우에 대해 3상 단락고장에 따른 발전기 회전자 속도의 변동을 보여주고 있다. 회전자 속도는 고장 발생 구간인 90초에서 속도가 증가하고 0.06초 이후 고장이 해소되면서 다시 정상상태로 되돌아가는 특성을 보여주고 있다. DFIG는 터빈에서 관성력을 저장하기 때문에 속도 변동이 부드럽고 고장해소 후 정상상태로 회복이 빠른 반면 FSIG는 고장발생에 따른 회전자 속도 변화가 큰 것을 볼 수 있다.

그림 18과 그림 19는 각각 3상 단락고장에 따른 C지점과 F지점에서 전압의 실효값을 나타내고 있다. C지점의 전압은 3상 단락고장에 의한 직접적인 고장지점이기 때문에 급격히 0으로 하락한 후에 고장 해소 후 회복됨을 볼 수 있다. DFIG는 FSIG에 비하여 고장에 의한 진동이 적고 정상상태로의 회복이 FSIG보다 빠른 것을 볼 수 있다. F지점의 전압이 정확히 0으로 하락하지 않는 것은 선로와 변압기의 임피던스 성분이 원인으로 여겨진다.

그림 20과 그림 21은 각각 C지점과 F지점에서 고장에 따른 전류의 실효값을 나타낸다. DFIG와 FSIG의 두 경우 모두 고장이 발생한 90초에서 고장전류는 크게 증가하고 고장 해소 후 회복됨을 볼 수 있다. 전압의 경우와 마찬가지로 전류의 경우에도 DFIG는 FSIG에 비하여 정상상태로의 회복이 빠른 것을 볼 수 있다.

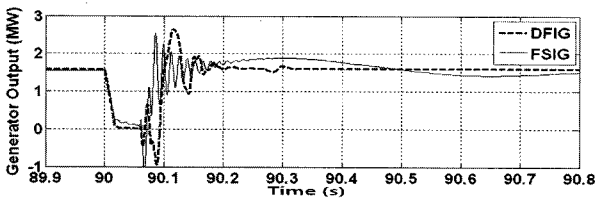


그림 15 발전기 출력 (F지점)
Fig. 15 Generator output (Point F)

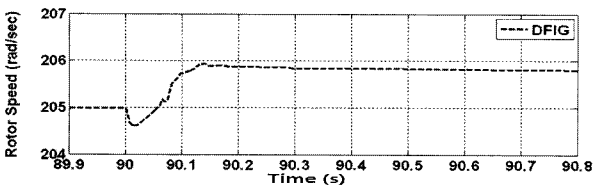


그림 16 DFIG의 발전기 회전속도
Fig. 16 Generator rotational speed of DFIG

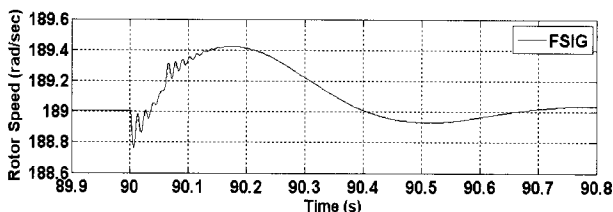


그림 17 FSIG의 발전기 회전속도
Fig. 17 Generator rotational speed of FSIG

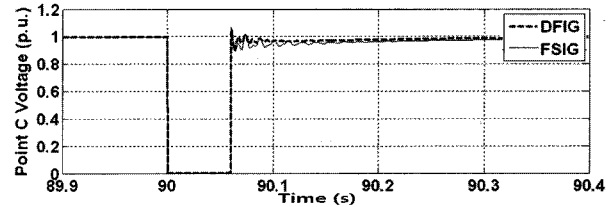


그림 18 C지점에서의 전압
Fig. 18 Voltage at point C

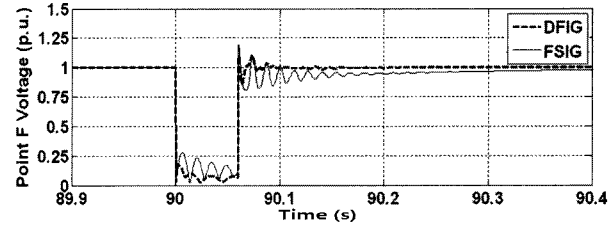


그림 19 F지점에서의 전압
Fig. 19 Voltage at point F

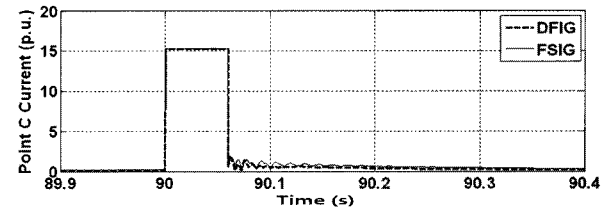


그림 20 C지점에서의 전류
Fig. 20 Current at point C

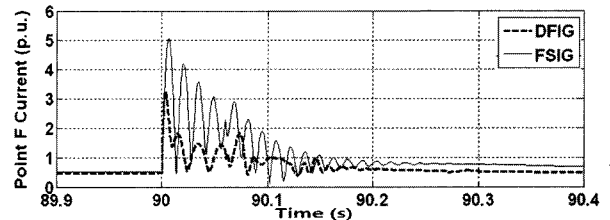


그림 21 F지점에서의 전류
Fig. 21 Current at point F

4.3 1상 지락고장에 대한 DFIG와 FSIG의 동작특성

다음으로 그림 8의 시뮬레이션 모델 C지점에서 1상 지락 고장이 발생하였을 경우에 대하여 계통과 발전기 단자전압, 발전기 출력, 회전속도 등을 관찰한다. 고장은 3상 단락고장과 같이 90초에서 0.06초간 발생에 대하여 시뮬레이션을 수행하고 FSIG와 DFIG의 응답 특성을 비교한다.

그림 22는 1상 지락고장이 발생하였을 때 발전기 출력 변동을 보여주고 있다. 3상 단락고장과는 다르게 FSIG의 경우 출력의 변동 폭이 DFIG에 비해 적지만, DFIG는 FSIG에 비하여 고장 발생에 따른 출력 진동이 적고 고장상태 후 정상상태로의 회복이 FSIG보다 빠른 것을 볼 수 있다.

그림 23과 그림 24은 각각 DFIG와 FSIG의 경우에 대해

1상 지락고장에 따른 발전기 회전자 속도의 변동을 보여주고 있다. 회전자 속도는 고장 발생 구간인 90초에서 속도가 증가하고 0.06초 이후 고장이 해소되면서 다시 정상상태로 되돌아가는 특성을 보여주고 있다.

그림 25와 그림 26은 각각 1상 지락고장에 따른 F지점에서 a상 전압과 전류의 실효값을 나타내고 있다. 3상 단락고장과는 다르게 F지점의 고장전압과 고장전류 값이 감소한 것을 볼 수 있지만, 3상 단락고장과 마찬가지로 F지점의 a상 전압과 전류 모두 DFIG가 FSIG에 비하여 고장에 의한 진동이 적고 정상상태로의 회복이 FSIG보다 빠른 것을 볼 수 있다. 따라서, 시뮬레이션 결과로 보아 DFIG의 응답특성이 FSIG의 응답특성보다 우수함을 알 수 있다.

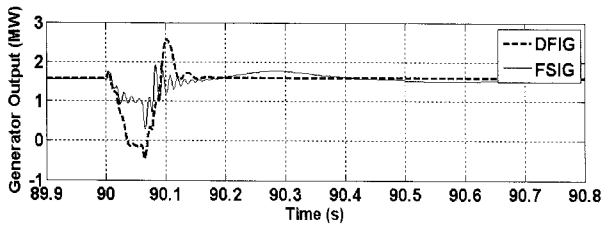


그림 22 발전기 출력 (F지점)
Fig. 22 Generator output (Point F)

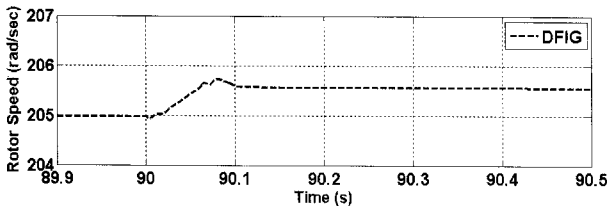


그림 23 DFIG의 발전기 회전속도
Fig. 23 Generator rotational speed of DFIG

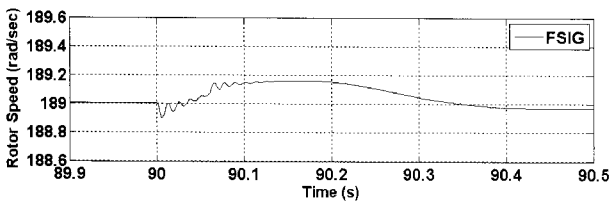


그림 24 FSIG의 발전기 회전속도
Fig. 24 Generator rotational speed of FSIG

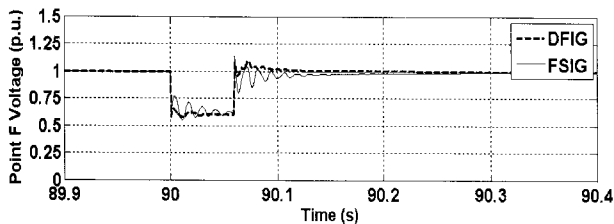


그림 25 F지점에서의 전압
Fig. 25 Voltage at point F

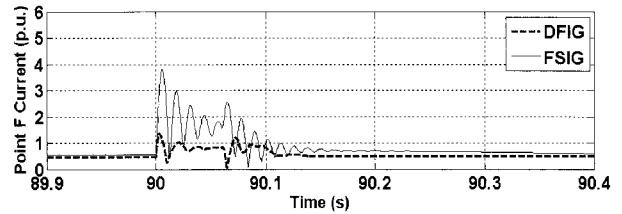


그림 26 F지점에서의 전류
Fig. 26 Current at point F

5. 결 론

본 연구는 정상상태에서 FSIG과 DFIG를 이용한 가변속 운전 풍력발전시스템의 운전특성을 분석하였으며, 동특성 해석을 위한 계통연계 풍력발전시스템을 모델링하고 여러 가지 상황에 대해 시뮬레이션을 통하여 DFIG와 FSIG의 운전특성을 비교, 분석한 결과를 얻고자 하였다. Simulink에서 수행한 다양한 시뮬레이션 결과를 통해 DFIG와 FSIG의 차이점을 살펴보면 다음과 같다.

- DFIG는 회전자측 컨버터의 제어에 의해 FSIG보다 전압 및 무효전력의 변동이 거의 없게 될 수 있었다.
- 시뮬레이션 결과를 통해 풍속의 변화에 대한 DFIG와 FSIG의 발전기 단자전압, 유효/무효 출력의 변화 등의 특성을 비교하여 DFIG가 FSIG보다 운전 특성이 우수함을 알 수 있었다.
- 본 연구에서 모의한 3상 단락사고와 1상 지락사고와 같은 계통의 고장에서 DFIG의 경우 FSIG보다 정상상태로의 회복이 빠른 것을 볼 수 있었다.

이와 같은 결과를 토대로 살펴보면, DFIG는 풍속에 따른 운전특성이 좋으며 계통의 무효전력을 제어할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 DFIG 풍력발전 시스템은 상용화된 풍력에너지의 효율적인 이용을 위해 시스템에 적용될 가능성이 더욱 확대될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] S. Muller, M. Deicke, and Rik W. De Doncker "Doubly Fed Induction Generator System for Wind Turbines", IEEE Industry Applications Magazine, May | June 2002, pp. 26-33
- [2] P. Cartwright, L. Holdsworth, J.B. Ekanayake and N. Jenkins "Co-ordinated Voltage Control Strategy for a Doubly-fed Induction Generator (DFIG)-based Wind Farm", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 4, July 2004, pp. 495-502
- [3] S. Foster, L. Xu, and B. Fox "Coordinated control and operation of DFIG and FSIG based Wind Farms", IEEE Power Tech 2007, pp. 522-527
- [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, September 2002, pp.

414-421

- [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, May 2003, pp.343-352
- [6] J.G. Slootweg, S.W.H. de Haan, H. Polinder, W.L. Kling, "General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, Feb. 2003, pp. 144-151.
- [7] A.D. Hansen, P. Sørensen, L. Janosi, J. Bech, "Wind farm modelling for power quality", IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001, pp. 1959-1964.
- [8] Rui Melicio and V.M.F. Mendes, "Doubly Fed Induction Generator Systems For Variable Speed Wind Turbine", 9th Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering (9CHLIE), 2005
- [9] S. N. Bhadra, D. Kastha and S. Banerjee, "Wind Electrical Systems" Oxford University Press, 2005
- [10] M. Godoy Simoes and Felix A. Farret, "Alternative Energy Systems - Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2008
- [11] Ion Boldea, "Variable Speed Generators", CRC Taylor & Francis, 2006
- [12] J. Ekanayake, L. Holdsworth and N. Jenkins, "Control Of DFIG Wind Turbines", Power Engineer, February 2003

저 자 소 개



노 경 수 (盧 炘 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(공학박사). 2005년 미국 Arizona State University 방문교수, 현재 동국대학교 전기공학과 부교수.

Tel, Fax : 02-2260-3346,

E-mail : ksro@dgu.ac.kr



김 태 호 (金 泰 昊)

1982년 6월 10일생. 2008년 동국대 공대 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 입학. 현재 동국대학교 전기공학과 석사과정.

E-mail : kumaru@nate.com