PSS/E를 이용한 제주계통의 DFIG 풍력발전단지 및 HVDC 동적모델 개발

논 문
60-12-1

Development of Dynamic Models for DFIG Wind Farms and HVDC in Jeju Power System Using PSS/E

남 순 열† · 강 상 희* · 남 해 곤** · 최 준 호***
(Soon-Ryul Nam · Sang-Hee Kang · Hae-Kon Nam · Joon-Ho Choi)

Abstract - Since main portion of the required electric power in Jeju Island is provided from the mainland through two HVDC lines, Jeju HVDC has a most significant impact on Jeju power system. Average wind speed of Jeju Island is the highest among several candidates in South Korea. So, Jeju Island has been a suitable site for the construction of wind farms where several wind farms are now operating and several others to be sited. Since the large-scale wind generation could have adverse impacts on the stable operation of Jeju power system, wind power is also important for the stability of Jeju power system. Therefore, accurate modeling of Jeju HVDC and wind farms is required for stability analysis of Jeju power system. In this paper, PSS/E-based dynamic modeling of Jeju HVDC and DFIG wind farms is proposed. Model-writing technique of PSS/E is used to develop USRAUX model and USRMDL model for controlling the frequency of HVDC and imposing an operation limit of wind power, respectively. Dynamic characteristics of Jeju HVDC and DFIG wind farms are analyzed through the dynamic simulations. The simulation results show the effectiveness of the developed models for Jeju power system.

Key Words : DFIG wind farm, Dynamic model, Jeju HVDC, Jeju power system, Model-writing technique, PSS/E

1. 서 론

제주 전력계통은 육지와 연계된 HVDC와 도내의 자체 화력발전으로 구성되어 있다. 제주계통의 전력수급은 경제성을 고려하여 기저부하는 화력발전의 출력으로 감당하고 전력수요의 변동은 HVDC가 담당하고 있으며 제주 HVDC는 전체 부하의 50[%] 또는 160[MW] 이내에서 수전하도록 운전되고 있다. 제주 HVDC는 전류/전력제어 모드로 운전되는데 제주 계통의 주파수 제어 기능을 포함하고 있다. 제주계통의 전력수급 불균형에 의한 주파수 편차의 보정 (Load Frequency control, LFC) 기능은 HVDC가 단독으로 담당하고 다른 발전기들은 운전원의 지시에 의하여 정상상태 출력을 변경하는 비동기(isochronous) 운전을 하고 있다. 이와 같이 제주부하의 많은 양을 공급하고 있는 HVDC는 빠른 응동특성으로 인하여 제주계통의 안정도에 가장 큰 영향을 미친다.

제주지역은 풍력자원이 풍부하여 600[MW] 이상의 풍력발전 개발이 가능한 것으로 알려져 있다. 제주의 풍력 품질은 양호하지 못하여 풍력발전 최대 변동률이 1분 주기로는 설치용량의 20[%], 10분 주기로는 설치용량의 40[%]로 그 변동이 매우 가파르다. 이에 반하여 제주계통은 2008년도 최대부하가 533[MW], 최소부하는 313[MW]로 부하규모가 매우 작아 풍력발전의 변동이 제주 전력계통의 주파수 제어와 안전에 큰 영향을 준다[1]. 따라서 제주도와 같은 도서지역에서는 계통의 안정도를 위해 풍력발전의 설치용량을 제한할 필요성이 대두되고 있으며 설치한계용량 산정방법과 관련된 연구들이 일부 수행되고 있다[2-4]. 설치한계용량 산정에 필요한 계통의 안정도 해석을 위해서는 대상 계통의 정확한 모델링이 필요하며 전력계통에 대한 모의 프로그램의 사용이 필수적이다. 현재 보급되고 있는 상용 모의 프로그램은 크게 동특성 해석프로그램(PSS/E, EUROSTAG, TSAT, DigSILENT 등)과 과도현상 해석프로그램(EMTP, PSCAD/EMTDC, EMTP-RV, Matlab 등)으로 나누어 볼 수 있다. 과도현상 해석프로그램은 전압 및 전류 신호의 순시치 파형을 구할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 상세 모델링을 사용하기 때문에 육지 계통과 연계된 제주 계통과 같이 일정규모 이상의 계통에 대한 해석이나 분 단위 이상의 해석에는 적합하지 않기 때문에 계통의 안정도 및 동특성 해석에는 동특성 해석프로그램이 주로 사용된다.

제주계통의 동특성 해석을 위해서는 제주계통의 안정도에 가장 큰 영향을 미치는 HVDC와 풍력발전기를 포함한 풍력발전단지의 정확한 모델링이 요구된다. 풍력발전기 모델링과 관련된 연구는 주로 과도현상 해석프로그램을 이용한 풍력발전기 모델링 및 이를 활용한 풍력발전기 자체의 동특성 분석[5], 풍력발전기 보호[6], 저전압시 계통연계 유지(Low Voltage Ride Through) 성능 향상기법[7] 등에 관한 연구가

* 시니어회원 : 명지대학교 전기공학과 교수
** 시니어회원 : 전남대학교 전기공학과 교수
*** 정 회 원 : 전남대학교 전기공학과 부교수
† 교신저자, 정회원 : 명지대학교 전기공학과 부교수
E-mail : ptsouth@mju.ac.kr
접수일자 : 2011년 8월 15일
최종완료 : 2011년 9월 29일

진행되고 있다. HVDC 모델링과 관련된 연구 또한 과도현상 해석프로그램을 이용한 HVDC 모델링[8] 및 이를 활용한 HVDC 제어 파라미터 정정[9], HVDC 동특성 분석[10] 등에 관한 연구가 진행되고 있으나 동특성 해석프로그램을 이용한 풍력발전단지 및 HVDC 모델링에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 동특성 해석프로그램을 이용한 제주계통의 정확한 동특성 해석을 위해서 HVDC 및 풍력발전단지를 포함한 제주계통의 PSS/E 동적모델을 수립하고자 한다.

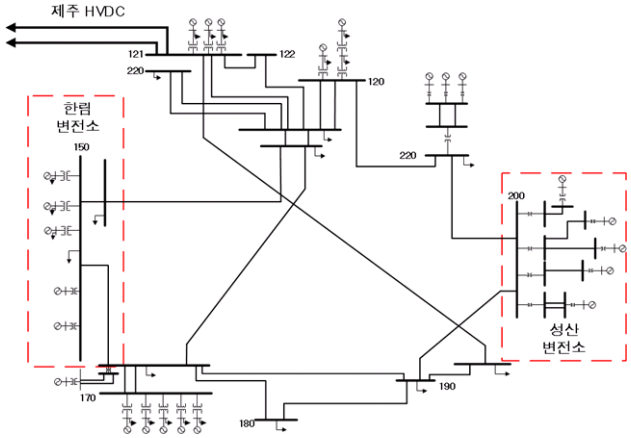


그림 1 제주지역의 전력계통도
Fig. 1 Jeju power system

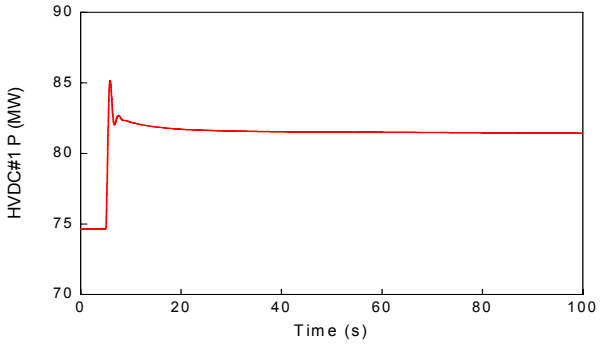
2. 제주계통의 HVDC 모델링

제주계통에서는 HVDC 정지와 남제주 기력(3호기와 4호기)의 정지가 계통 안정도에 가장 심각한 영향을 미치게 된다[11]. HVDC 정지에 대해서는 저주파 계전기를 사용한 부하차단으로 전력의 수급 불균형에 대처하고 있으며, 그 외의 다른 사고에 대해서는 HVDC가 전력편차를 보정하도록 하고 있으므로 HVDC의 동특성은 제주계통의 안정도에 있어서 매우 중요하다. 따라서 제주 HVDC의 동특성 분석은 제주계통 안정도 해석에 필수적이며 이를 위한 모의 조건은 다음과 같다.

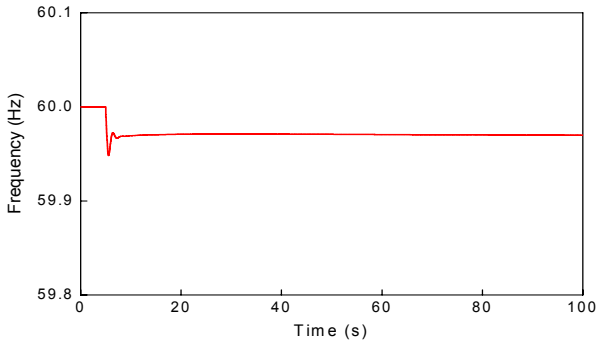
- 제주계통: 2006년 기저부하 385[MW], 112[MVar]
- HVDC: CDC4T(75[MW]×2회선) + CPAAUT 모델

육지계통을 포함한 제주계통의 조류계산을 위한 PSS/E 데이터들은 전력거래소의 RAW 데이터를 기본으로 하였으며 조류계산에 필요한 스윙(Swing) 모선은 계통의 부하조건이나 발전력 배분에 따라 달라지므로 발전력 여유 등을 고려하여 육지계통과 제주계통의 스윙 모선으로는 각각 영흥 1G 모선과 제주TP#2 모선을 선택하였다. 제주계통의 동적모의를 위한 PSS/E 데이터들 역시 전력거래소의 동적모의 데이터를 기본으로 하였으며 육지계통을 포함한 제주계통의 발전기들과 남제주 기력 3, 4호기를 추가하였다. 제주계통에서는 급전우선순위(Merit Order)에 따라 HVDC#1과 HVDC#2를 포함한 제주TP#2, 제주TP#3, 남제TP#3, 남제TP#4 등의 발전기들을 투입하였으며 무효전력 공급을 위해서 조상GP#1과 조상GP#2를 투입하였다.

부하량 변화에 따른 제주 HVDC의 동특성 분석을 위해서 제주계통의 부하를 모의 시작 5초 후에 5[%] (19.25[MW]) 증가시켰다. 부하량 증가에 의한 주파수 변동으로 인해 HVDC#1의 유효전력은 74.63[MW]에서 81.27[MW]로 증가하게 되며 주파수는 59.97[Hz]로 수렴하게 된다.



(a) HVDC#1의 유효전력
(a) Active power of HVDC#1



(b) 계통주파수
(b) System frequency

그림 2 부하량 증가에 따른 제주 HVDC의 모의결과 (CPAAUT 모델 이용)
Fig. 2 Simulation results when the load is increased by 5[%] (CPAAUT model)

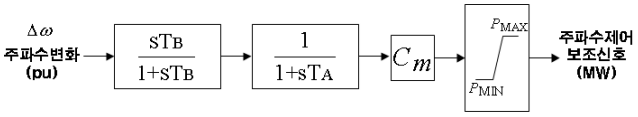


그림 3 CPAAUT 모델의 제어 다이어그램 [12]
Fig. 3 Control block diagram of CPAAUT model [12]

실제 제주계통에서는 부하량의 순간적인 변화를 HVDC가 전적으로 담당하여 60.00[Hz]의 정격주파수가 유지되도록 HVDC가 운전되고 있다. 실제 제주계통의 운전과 PSS/E 동적모의에서 나타나는 차이는 제주 HVDC의 주파수제어 보조신호에 기인한다. 제주 HVDC에 대한 기존의 PSS/E 동적모의에서는 주파수제어 보조신호로서 PSS/E에서 제공하고

있는 CPAAUT 모델을 사용하고 있다. CPAAUT 모델에서는 주파수 변화에 대한 적분항이 없기 때문에 CPAAUT 모델의 C_m 값에 따라 HVDC의 수하(Droop) 특성이 결정된다. 따라서 제주계통의 부하량 변화로 인해 주파수 변화가 발생할 경우 HVDC의 수하 특성과 제주 발전기들의 수하 특성에 따라 발전력 배분이 일어나 HVDC#1의 유효전력은 6.64[MW] 만큼만 증가하게 되고 계통주파수는 정격주파수가 아닌 59.97[Hz]로 수렴하게 된다.

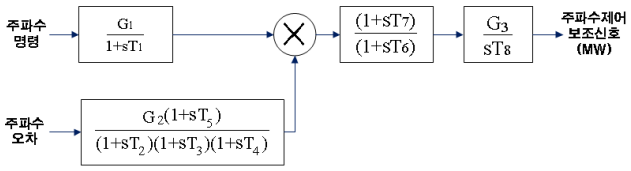
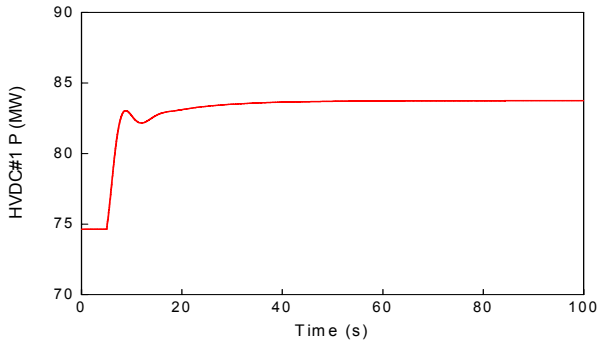


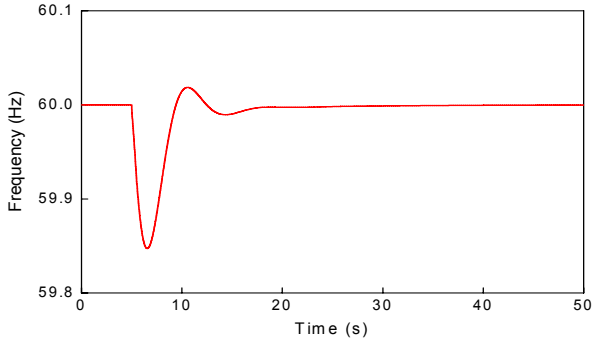
그림 4 제주 HVDC용 주파수제어 보조신호에 대한 제어 다이어그램

Fig. 4 Control block diagram of the auxiliary frequency control signal for Jeju HVDC



(a) HVDC#1의 유효전력

(a) Active power of HVDC#1



(b) 계통주파수

(b) System frequency

그림 5 부하량 증가에 따른 제주 HVDC의 모의결과 (USRAUX 모델 이용)

Fig. 5 Simulation results when the load is increased by 5[%] (USRAUX model)

실제 제주계통에서는 정격주파수 60.00[Hz]와 동기조상기 속도로 측정한 계통주파수를 동적 보상을 통해서 편차를 구하고 이 주파수 편차를 적분하여 HVDC 전력 요구 값으로 사용하고 있다. 본 논문에서는 참고문헌 [11]에서 제시한 파라미터 값들을 참조하여 주파수 변화에 대한 적분항을 포함하는 제주 HVDC용 주파수제어 보조신호를 그림 4와 같이 개발하였으며, PSS/E 동적모의에서는 모델구현(Model Writing) 기법[13]을 이용하여 USRAUX모델로 구현하였다.

제주 HVDC용 주파수제어 보조신호인 USRAUX 모델의 동특성 검증을 위해서 그림 2와 동일한 조건으로 제주계통의 부하를 모의 시작 5초 후에 5[%] (19.25[MW]) 증가시켰다. 그림 5는 USRAUX 모델을 이용한 모의 결과를 보여 주고 있다. 예상되는 바와 같이 제주계통의 부하량 증가에 따른 주파수 감소에 의해 제주 HVDC#1의 유효전력은 74.63[MW]에서 83.37[MW]로 증가하며, 주파수는 정격주파수인 60.00[Hz]로 수렴하게 된다.

3. 제주계통의 풍력발전단지 모델링

PSS/E에서는 “Wind Turbine Package”라는 보조프로그램을 통해서 Acciona, Enercon, Fuhrlaender, GE, Mitsubishi, Siemens, Vestas 등의 다양한 풍력발전기 모델에 대한 라이브러리를 제공하고 있다. 본 논문에서는 상세한 모델링 데이터를 제공하고 있는 GE 사의 1.5MW 이중여자 유도발전기(Doubly Fed Induction Generator, DFIG) 모델을 이용하여 풍력발전단지를 구성하였다. 제주도의 풍력발전단지는 주로 동부 및 서부 해안가를 중심으로 양분되어 건설되거나 건설되고 있다. 본 논문에서는 이러한 지리적 특성을 고려하여 서부 해안가의 한림변전소와 동부 해안가의 성산변전소에 각각 60[MW] (1.5[MW] × 40기) 풍력발전단지를 구성하였으며, 동적모의에서는 PSS/E 32.0.2 및 Wind Turbine Package의 GE 1.5MW 모델 5.1.0을 사용하였다.

이중여자 유도발전기는 기존의 권선형 회전자를 가진 유도발전기이며, 회전자권선은 컨버터를 통하여 계통에 연결되고, 이중여자 유도발전기의 기본 주파수 성분의 전기적 동적 성능은 이 컨버터에 의해서 좌우된다. 즉 일반 동기발전기에서의 성능이 토크각, 여자기 성능, 그리고 동기화에 의해 결정되는 것과는 다른 양상이다. 이중여자 유도발전기의 컨버터는 다른 전압형 컨버터처럼 변압기 리액턴스 뒤의 전압을 합성하고, 따라서 이중여자 유도발전기에서는 유효/무효전력을 임의로 조절할 수 있다.

이중여자 유도발전기는 정격출력 부근에서 보통 120[%] 속도 또는 -20[%] 슬립(slip)에서 운전된다. 컨버터 여자주파수의 제어를 통해서 회전자 속도는 정격속도의 ±30[%] 범위에서 제어가 가능하며 고정자와 회전자 유효전력은 근사적으로 슬립에 비례하여 배분된다. 회전자 속도가 동기속도보다 큰 경우 회전자는 계통에 전력을 공급하고, 동기속도보다 작을 때는 반대로 전력을 흡수한다. 회전자 여자주파수와 고정자/회전자간의 전력배분은 매우 빠른 컨버터 제어기에 의해 이루어지는데, 컨버터 제어기의 시정수는 한 주기보다 작은 매우 빠른 시간 응답특성을 보이므로 대규모 전력계통에서 동적모의를 위한 이중여자 유도발전기의 모델은 매우 간단해진다.

GE 1.5MW 이중여자 유도발전기 모델은 세부적으로 발전기/컨버터 모델(GEWTG1), 컨버터제어 모델(GEWTE1),

풍력터빈 모델(GEWTT), 피치제어 모델(GEWTP) 등 4개의 세부모델이 필요하며, 그림 6은 각 세부모델의 연결구조를 보여주고 있다.

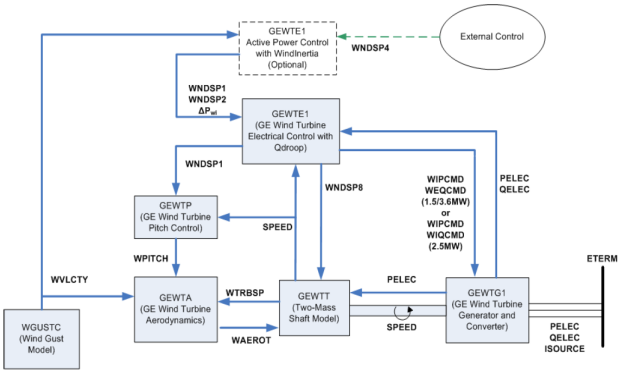


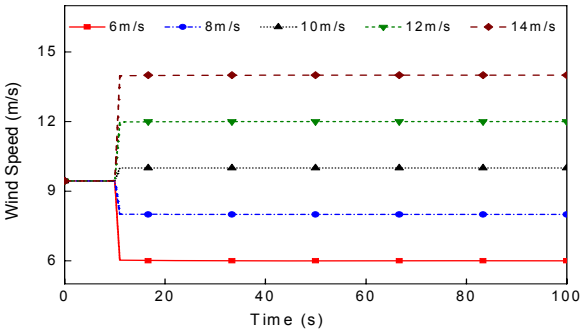
그림 6 GE 1.5MW 이중여자 유도발전기 세부모델의 연결구조 [14]

Fig. 6 Connection structure of detailed models used for GE 1.5MW DFIG model [14]

각 세부모델의 주요 기능은 다음과 같다.

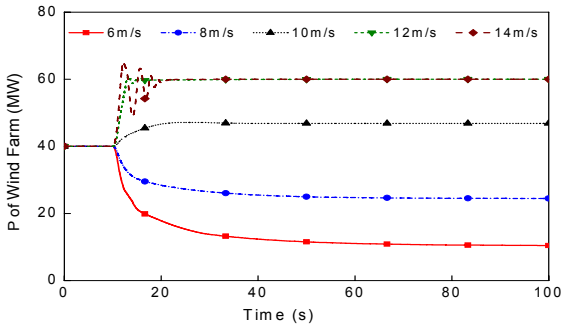
- 발전기/컨버터 모델은 컨버터제어 모델로부터의 지령에 응답하여 유효/무효전력을 계통으로 주입한다. 즉, 풍력발전기 시스템과 계통 사이의 인터페이스 역할을 수행한다.
- 컨버터제어 모델은 유효/무효전력 지령을 발전기/컨버터 모델에 보내고, 폐루프 무효전력 제어, 토크제어 시스템을 포함한다.
- 풍력터빈 모델은 기계적 출력, 풍력터빈의 속도를 계산한다. 이 모델은 터빈 공기역학 특성, 회전자의 운동방정식을 포함한다.
- 피치제어 모델은 회전자속도와 컨버터 토크지령의 입력신호를 사용하여 피치제어를 수행한다.

풍속 감소에 따른 동특성 분석을 위해서 초기 풍속을 9.44[m/s]로 유지하다가 10 초부터 1 초 동안 풍속을 6.00[m/s]로 감소시켰다. 풍속 감소로 인하여 한림 풍력발전단지의 유효전력 발전량은 40.00[MW]에서 11.54[MW]로 감소하였다. 6.00[m/s]의 풍속은 GE 1.5MW 모델의 정격 풍속인 11.00[m/s] 이하이므로 피치각은 0.00°를 유지하였으며 회전자 속도는 풍속 감소에 따라 1.17[PU]에서 0.80[PU]로 감소하였다. 다음으로 풍속 증가에 따른 동특성 분석을 위해서는 초기 풍속은 동일하게 9.44 m/s로 유지하다가 10초부터 1초간 풍속을 14.00[m/s]로 증가시켰다. 풍속 증가로 인하여 한림 풍력발전단지의 유효전력 발전량은 40.00[MW]에서 60.00[MW]로 증가하였다. 풍속이 정격 풍속인 11.00[m/s] 이상이 됨에 따라 정속도 운전을 위한 피치각 제어를 통해 피치각은 0.00°에서 9.58°로 증가하게 되며 회전자 속도는 1.17[PU]에서 정격 속도인 1.20[PU]로 증가 후 일정하게 유지하였다.



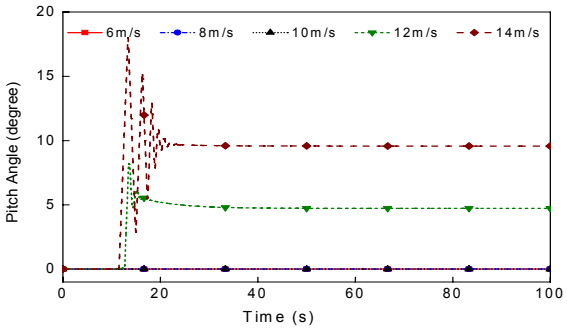
(a) 풍속

(a) Wind speed



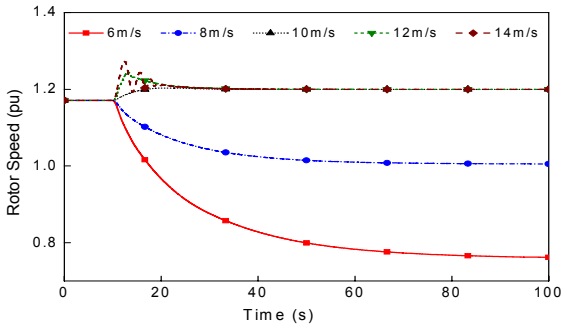
(b) 한림 풍력발전단지의 유효전력

(b) Active power of Hallim wind farm



(c) 피치각

(c) Pitch angle



(d) 회전자 속도

(d) Rotor speed

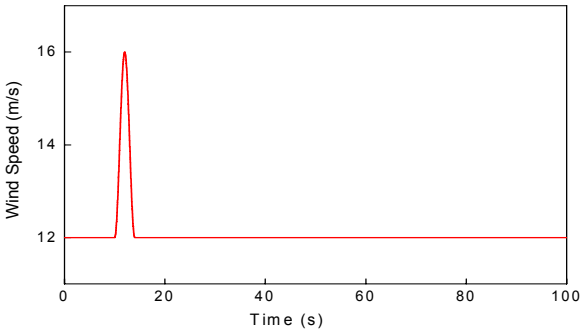
그림 7 풍속 변화에 따른 풍력발전단지의 모의 결과

Fig. 7 Simulation results of a DFIG wind farm with variation of wind speed

풍속 변화에 대한 이중여자 유도발전기의 동특성을 자세히 분석하기 위해서 10초부터 1초 동안 풍속을 8.00[m/s], 10.00[m/s], 12.00[m/s]로 변화시켰다. 예상되는 바와 같이 풍속을 8.00[m/s]로 감소한 경우에는 한림 풍력발전단지의 유효전력 발전량은 24.98[MW]로 감소하였으며 풍속이 10.00[m/s] 및 12.00[m/s]로 증가한 경우에는 유효전력 발전량이 각각 46.85[MW] 및 60.00[MW]로 증가하였다. 정격 풍속 이하에서는 피치각을 0.00°로 유지하면서 풍속 증감에 비례하여 회전자 속도가 증감하였으며 정격 풍속 이상에서는 회전자 속도를 1.20[PU]로 유지하면서 풍속 증가에 비례하여 피치각이 증가하였다. 즉, 이중여자 유도발전기의 특성에 따라 정격 풍속 이하에서는 가변속 운전을 하고 정격 풍속 이상에서는 피치각 제어를 통해 정속도 운전을 하는 것을 알 수 있었다.

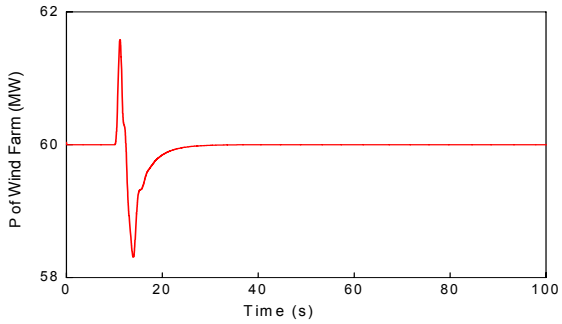
순간적인 풍속 변화에 따른 이중여자 유도발전기 모델의 동특성 분석을 위해서 초기 풍속을 12.00[m/s]로 유지하다가 10초부터 2초 동안 풍속을 4[m/s] 만큼 증가시킨 후 이어지는 2초 동안 풍속을 4[m/s] 만큼 감소시켰다. 초기 풍속이 정격 풍속 이상이므로 이중여자 유도발전기는 순간적인 풍속의 변화에 따라 유효전력 발전량 및 회전자 속도를 일정하게 유지하도록 피치각 제어가 이루어졌다.

제주계통에서는 발전기 최소발전용량 및 동적 안정도 등의 이유로 풍력발전의 설치용량이 제한되고 있다. 부하상황에 따라 풍력발전의 출력을 제한할 수 있을 경우 풍력발전의 설치한계용량은 운전한계용량의 개념으로 바뀔 수 있으며, 결과적으로 풍력발전 설치용량을 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 제주계통의 안정도 향상에도 기여할 수 있게 된다. 이를 위해서는 풍력발전기의 전력 지령치(Power Reference) 제어가 필수적으로 요구되지만 PSS/E의 이중여자 유도발전기 기본모델인 WT3 모델뿐만 아니라 GE 1.5MW 모델에서도 전력 지령치에 대한 제어 기능을 제공하지 않고 있다. 본 논문에서는 GE 1.5MW 모델의 피치 제어 블록(Pitch Control Block)에서 전력 지령치에 해당하는 P_{MX} 값을 풍력발전 운전한계용량에 따라 동적으로 정정할 수 있도록 사용자정의 모델을 개발하였으며, PSS/E 동적모의에서는 모델 구현 기법을 이용하여 USRMDL 모델로 구현하였다.



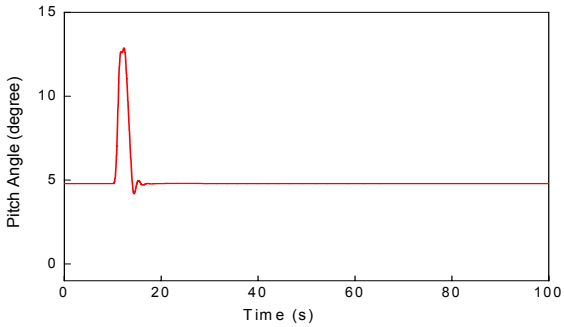
(a) 풍속

(a) Wind speed



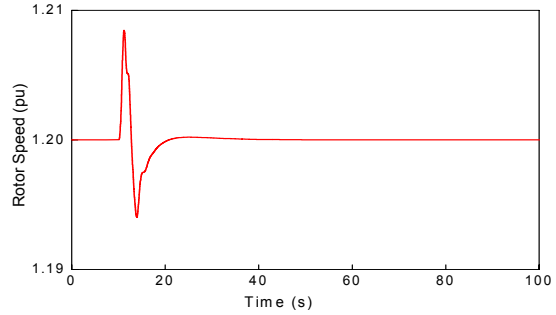
(b) 한림 풍력발전단지의 유효전력

(b) Active power of Hallim wind farm



(c) 피치각

(c) Pitch angle



(d) 회전자 속도

(d) Rotor speed

그림 8 순간적인 풍속변화에 따른 풍력발전단지의 모의결과

Fig. 8 Simulation results of a DFIG wind farm with a wind gust

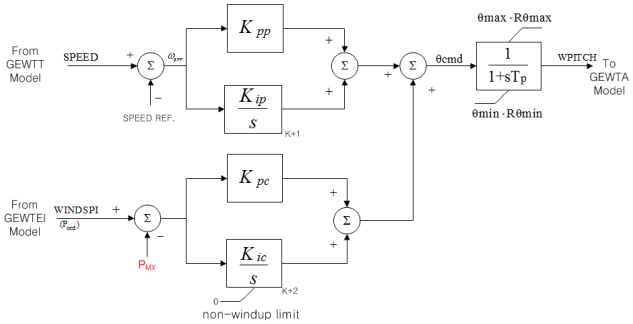


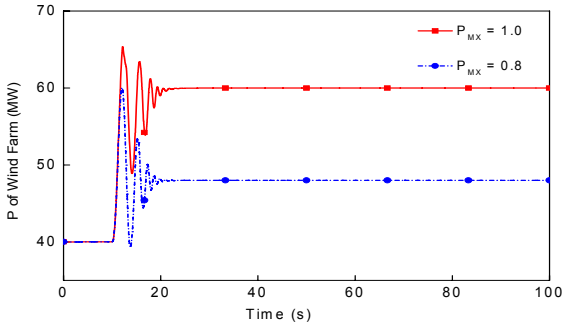
그림 9 전력 지령치 제어를 위한 사용자정의 모델 [14]

Fig. 9 Control block diagram of the pitch angle used in the GE 1.5MW DFIG model [14]

전력 지령치 제어에 따른 동특성 분석을 위해 한림 풍력발전단지와 성산 풍력발전단지의 발전량이 각각 40.00[MW]가 되도록 초기풍속을 9.44[m/s]로 설정하고 모의 시작 10초 후부터 1초 동안 한림 풍력발전단지와 성산 풍력발전단지의 풍속을 14.00m/s로 증가시켰다.

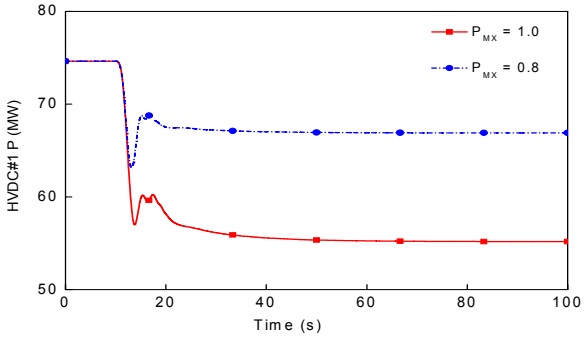
전력 지령치 제어를 하지 않는 경우에는 P_{MX}의 값을 1.0[PU]로 정정하였다. 모의 시작 10초 후의 풍속이 정격풍속 11.00[m/s] 이상인 14.00[m/s]가 됨에 따라 한림 풍력발전단지와 성산 풍력발전단지의 발전량이 각각 40.00[MW]에서 60.00[MW]로 증가하게 된다. 제주계통의 풍력발전량 변화는 HVDC가 담당하게 되므로 HVDC#1의 유효전력 공급량은 74.64[MW]에서 55.35[MW]로 감소하게 된다. 정속도 운전을 위한 피치각 제어를 통해 풍력발전기의 피치각은 0.00°에서 9.58°로 증가하게 되고 회전자 속도는 1.17[PU]에서 1.20[PU]로 수렴하게 된다. 풍력발전량 변화에 따라 계통주파수는 60.38[Hz]까지 상승 후 60.00[Hz]로 수렴하게 된다.

전력 지령치 제어를 통해 P_{MX}의 값을 0.8[PU]로 제한한 경우에는 모의 시작 10초 이후의 풍속이 정격풍속 이상인 14.00[m/s]가 됨에 따라 한림 풍력발전단지와 성산 풍력발전단지의 발전량이 각각 40.00[MW]에서 0.8[PU]에 해당하는 48.00[MW]까지만 증가하게 된다. 정속도 운전 및 P_{MX} 제한에 따른 피치각 제어를 통해 풍력발전기의 피치각은 0.00°에서 11.13°까지 증가하게 되고 회전자 속도는 전력 지령치 제어를 하지 않는 경우와 동일하게 1.17[PU]에서 1.20[PU]로 수렴하게 된다. P_{MX}가 1.0[PU]인 경우보다 풍력발전량 변화가 작기 때문에 계통주파수는 60.38[Hz]보다 작은 60.29[Hz]까지 상승 후 60.00[Hz]로 수렴하게 된다.



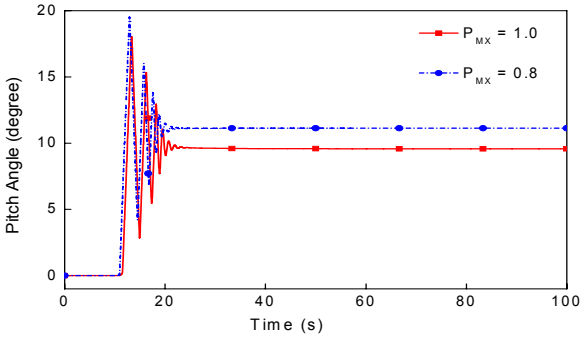
(a) 한림 풍력발전단지의 유효전력

(a) Active power of Hallim wind farm



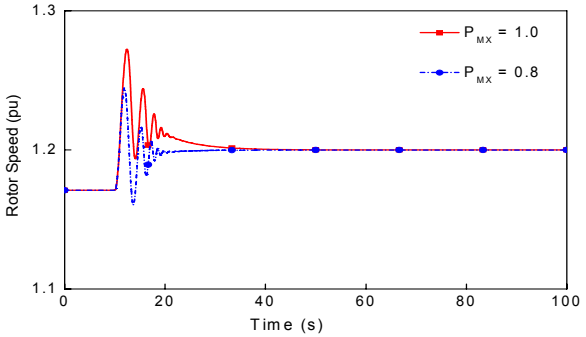
(b) HVDC#1의 유효전력

(b) Active power of HVDC#1



(c) 피치각

(c) Pitch angle



(d) 계통주파수

(d) System frequency

그림 10 전력 지령치 제어 여부에 따른 모의결과

Fig. 10 Simulation results without and with power reference control scheme

4. 결 론

본 논문에서는 PSS/E를 이용하여 제주계통 DFIG 풍력발전단지 및 HVDC 모델링을 개발하였다. 제주계통에 대한 정확한 PSS/E 동적모의를 위해서 제주 HVDC용 주파수제어 보조신호를 개발하였고 모델구현 기법을 통해 USRAUX 모델로 구현하였다. 제주계통 부하증가에 대한 PSS/E 동적모의를 통해 HVDC용 주파수제어 보조신호인 USRAUX 모델의 동특성을 검증하였다. GE 1.5MW DFIG 모델을 이용하여 DFIG 풍력발전단지를 모델링하였으며 전력 지령치 제어를 통해 풍력발전기의 출력을 제한할 수 있도록 사용자정의 모델을 개발하여 모델구현 기법을 통해 USRMDL 모델로 구현하였다. 풍속 변화 및 전력 지령치 제어에 따른 PSS/E 동적모의를 통해 DFIG 풍력발전기의 동특성을 분석하였다. 향후 연구에서는 HVDC 정지, 대용량 발전기 정지, 풍력발전 변동 등에 대한 제주계통의 안정화 방안을 도출할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(2009T100100585) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] 문승일, “제주도 풍력발전의 한계운전 용량 산정과 활성화 방안”, 전기의 세계, pp.67 - 73, 2008.

[2] D. Weisser, R. S.Garcia, “Instantaneous wind energy penetration in isolated electricity grids: concepts and review”, Renewable Energy, pp.1299 - 1308, 2005.

[3] J. W. Park, Y. H. Park, S. I. Moon, “Instantaneous Wind Power Penetration in Jeju Island”, IEEE PES, pp.1 - 7, 2008.

[4] S. I. Moon, G. C. Pyo, J. W. Park, “Study on development of Grid code and operation scheme of Jeju Island with high wind penetration”, World Energy Council Congress, pp.1 - 12, 2010.

[5] 김찬기, 한상열, 추진부, 계통 연계형 권선형 유도발전기의 동작특성 연구”, 전력전자학회논문지, pp.247 - 257, 2006.

[6] Y. C. Kang , H. G. Kang, J. H. Lee, “D-q Equivalent Circuit-based Protection Algorithm for a Doubly-fed Induction Generator in the Time Domain”, Journal of Electrical Engineering & Technology, pp.371 - 378, 2010.

[7] T. H. Nguyen, D. C. Lee, “Improved LVRT Capability and Power Smoothening of DFIG Wind Turbine Systems”, Journal of Power Electronics, pp.568 - 575, 2011.

[8] 김찬기, “제주-해남 HVDC 시스템의 EMTDC 모델링”, 전력전자학회논문지, pp.1 - 12, 2001.

[9] 김찬기, “HVDC 시스템의 제어 게인에 대한 분석 및 정정”, 전력전자학회논문지, pp.184 - 191, 2006.

[10] 권영훈, 김용학, 김찬기, 최영도, “제주계통에 적용 가능한 유형별 HVDC 시스템의 동적 안정도 연구”, 전력전자학회논문지, pp.270 - 277, 2008.

[11] 남해곤 외, “제주계통의 정밀진단을 통한 적정 부하차단량 산정 및 계통안전화 방안”, 최종보고서, 전력거래소 제주지사, 2007.

[12] Siemens Power Technologies International. “PSS/E Model Library”, Siemens, 2010.

[13] Siemens Power Technologies International. “PSS/E Program Operation Manual”, Siemens, 2010.

[14] K. Clark, N. W. Miller, J. J. Sanchez-Gasca. “Modeling of GE Wind Turbine-Generators for Grid Studies. GE Energy”, 2009.

저 자 소 개

남 순 열 (南 淳 烈)

1996년 서울대 전기공학부 졸업. 1998년 동대학원 전기공학부 졸업(석사). 2002년 동대학원 전기공학부 졸업(박사). 현재 명지대 전기공학과 부교수.

Tel : 031-330-6361

E-mail : ptsouth@mju.ac.kr

강 상 희 (姜 相 熙)

1985년 서울대 전기공학부 졸업. 1987년 동대학원 전기공학부 졸업(석사). 1993년 동대학원 전기공학부 졸업(박사). 현재 명지대 전기공학과 교수.

Tel : 031-330-6364

E-mail : shkang@mju.ac.kr

남 해 곤 (南 海 鯤)

1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1980년 University of Houston 석사(전기공학). 1986년 University of Texas at Austin 박사(전기공학). 현재 전남대학교 전기공학과 교수.

Tel : 062-530-1745

E-mail : hknam@chonnam.ac.kr

최 준 호 (崔 峻 豪)

1996년 숭실대 전기공학과 졸업. 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전남대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 062-530-1742

E-mail : joono@chonnam.ac.kr