

풍력발전 한계운전용량에 대한 계통영향 분석

명호산*, 김봉언**, 김형택**, 김세호***

*제주대학교 풍력특성화협동과정(hosan219@jejunu.ac.kr), **제주대학교 풍력특성화협동과정,
***제주대학교 전기공학과(hosk@jejunu.ac.kr)

Analysis of effect on power system considering the maximum penetration limit of wind power

Myung, Ho-San* Kim, Bong-eon** Kim, Hyeong-Taek** Kim, Se-Ho***

*Multidisciplinary Graduate School Program For Wind Energy, Jeju National University(hosan219@jejunu.ac.kr), **Multidisciplinary Graduate School Program For Wind Energy, Jeju National University, ***Faculty of Electrical Eng., Jeju National University(hosk@jejunu.ac.kr),

Abstract

About supply and demand to see that you need to match, the limitations of wind power capacity is low demand and the commitment of the general generator will exist between the minimum generation. if the turbine's output can be controlled, The limitation of wind power capacity will be adopted based on instant power generation. Namely, The minimum limits of wind power generation based load operation by calculating the amount that is higher than if the output should be restricted to highest operation. in this paper , we committed to the demand for low enough that the combination of the general generator of wind power capacity to accommodate the operation of determining whether the limit is intended to. For this , power system analysis program PSS/E was used, Jeju system by implementing the model simulations were performed.

Keywords : PSS/E(Power System Simulator for Engineering), DFIG(Doubly-Fed Induction Generator), PMSG (Permanent-magnet Synchronous Generator), STATCOM(Static Synchronous Compensator), STATCON (Static Condenser), FACTS(Flexible AC Transmission System), UFR(Under Frequency relay), FRT (Fault Ride Through)

1. 서 론

전 세계적으로 풍력발전에 대한 투자 확대는 화석연료의 한계성에 대한 대체자원이자,

이산화탄소 감축에 대한 긍정적 역할을 주도한다. 하지만 전력계통에서 풍력발전이 차지하는 비율의 증가는 계통운영에 있어서 양질의 전력을 소비자에게 공급하기 위하여 또 다른

제반시설 및 연계기준에 대한 가이드라인을 요구하게 한다.^{1,4)}

풍력발전 설비의 증가는 계통운영자 입장에서 불안정 요소가 커짐을 의미한다. 달리 말하자면 불안요소를 없애기 위해서는 안정 가이드라인을 세워 그 이상의 풍력발전량을 제한해야 한다. 즉 풍력발전의 한계용량에 대한 가이드라인이 요구된다.²⁾

일반적으로 풍력발전의 한계용량은 수요와 투입되는 일반발전기의 발전량에 따라 달라진다. 최저수요와 최저발전량을 기준으로 한계용량을 산정할 경우, 제한적인 풍력발전의 설비용량으로 풍력사업은 위축될 것이며, 임의의 지역이 갖는 풍력에너지를 충분히 활용하지 못하게 된다. 풍력발전기의 유효전력 출력을 제어할 수 있다고 가정한다면 순시 전력량에 대하여 출력을 제한함으로써 풍력발전의 설비용량을 증설할 수 있을 것이다. 최근 한국전력공사에서 고시하는 풍력발전기의 계통연계기준의 내용을 살펴보면, 풍력발전기는 계통운영자 지시에 따라 원하는 출력을 20~100% 범위 내에서 제어할 수 있도록 한다고 고시되어 있다.³⁾

한계운전용량을 산정하는 목적은 변동성이 강한 풍력발전 설비가 계통에 연계되었을 때 미치는 영향을 최소화하기 위함이다. 한계운전용량을 기준으로 출력을 무조건 제한하게 된다면, 계통에 미치는 영향은 최소화될 것이다. 하지만 제한되는 출력량에 대한 아무런 보상이 없기 때문에, 무조건인 출력제한 조건은 제한되는 출력량과 증설되는 설비용량으로 인한 경제적 이익이 서로 부합될 때만 가능할 것이다.³⁾

본 논문에서는 부하별 투입되는 일반발전기의 최소발전량 기준으로 풍력발전의 한계운전용량을 산정하고 풍력한계운전용량의 계통수용성 여부를 평가하고자 PSS/E 전력계통해석 프로그램을 이용하여 안정도여부를 평가하였다. 이는 투입된 일반발전기 조합만으로도 안정적으로 계통운영이 가능한지를

판별하기 위함이다.

2. 최소발전량 기준 부하별 풍력한계운전용량

일반적으로 풍력발전의 한계용량은 최저수요에서 투입된 일반발전기의 최소발전량을 뺀 양으로 산정된다. 최저수요 발생기간 중에 투입되는 일반발전기가 최소 발전량으로 운전할 경우, 풍력발전량이 더해져 최저수요를 초과할 때 일반발전기로부터의 하향 운전예비력이 존재하지 않아, 발전기 탈락이 불가피하게 된다. 하지만 일반발전기는 부하변동에 대한 예비력과 계통사고에 대한 책임이 가능한 최소운전이 필요하며, 일반발전기의 탈락은 이러한 역할 수행능력을 저하시키게 됨을 의미한다.³⁾ 즉, 풍력발전량을 기준으로 일반발전기의 발전량을 제어하는 것이 아니라 일반발전기의 최소발전량을 기준으로 풍력발전의 운전한계를 결정해야 한다.

실제 계통에서 임의 부하 n 이 발생될 확률(A)와 부하 n 이 발생될 때 풍력한계운전용량 이상으로 발생될 확률(B)은 극히 일부로 나타낸다. 여기서 사건 A와 B가 동시에 일어날 확률은 더욱 낮게 나타나, 부하별 제한되는 풍력발전량은 극히 일부가 될 것이다.³⁾

최소발전운영을 위한 발전기 조합은 경제성과 송전 손실 및 무효전력 공급능력, 그리고 지리적 분산 등을 고려하면서 N-1 상정사고 조건을 만족해야 한다.⁴⁾ 표 1은 부하구간별 투입되는 발전기의 최소발전량을 나타낸 것이다. 부하범위는 부하구간 범주 군에서 최소부하이상~최대부하미만을 의미한다. 최소발전량은 공급가능 용량에서 투입된 발전량을 뺀 운전예비력이 풍력발전 용량을 제외했을 때 부하분담이 가능하도록 산정하였다. 부하구간별 최대부하에서 투입되는 발전기의 최소발전량을 뺀 양은 해당 부하구간에서의 풍력한계용량이 된다.

Table. 1 Minimum output of each load and operating reserve [MW]

Range of load	Supply capacity of using generator	Minimum load operation of using generator	Operating reserve
300~400	540	156	140
400~500	640	206	140
500~600	680	232	80
600~700	790	274	90
700~800	830	316	30

일반발전기가 추가 투입되는 시점에서는 최소발전량 기준 풍력한계운전용량이 감소하지만 부하 증가에 따라 풍력한계용량 또한 점진적으로 증가하게 된다. 이런 식으로 각 부하별 풍력발전의 한계운전용량을 구할 수 있으며, 그림 1은 이에 대한 결과를 도식한 것이다. 그림 1은 2013년 기준 제주계통에 설치 예정 및 기존 풍력발전 설비용량을 합한 300MW를 적용하여 평가한 것이다.

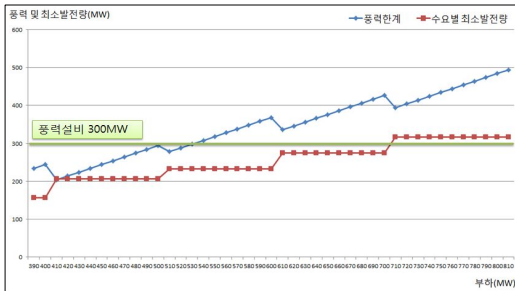


Fig. 1 Minimum output of each load and maximum penetration limit of wind power

임의의 부하구간에 대하여 투입되는 일반발전기의 조합은 상정사고 이후에도 계통이 붕괴되지 않고 안정적으로 유지할 수 있는 발전기들로 조합되어야 한다.⁴⁾ 다시 말하자면, 부하구간별 최소발전량 기준 산정하는 풍력발전의 한계운전용량은 계통의 안정운전을 위한 가드라인을 의미한다. 풍력발전기의 출력이 제한된다면 풍력발전의 설비용량을 무

한적으로 증설하여도 상관없겠지만, 풍력발전의 출력제한에 대한 손실은 감안해야 한다.

3. 컴퓨터 해석

3.1 제주계통 모델 구현

부하별로 산정된 풍력발전의 한계운전용량에 대하여 계통수용성 여부를 평가하고자 PSS/E를 이용한 계통 모의실험을 실시하였다. 제주계통특성을 최대한 반영하기 위해 전력거래소로부터 제주계통 데이터를 수집하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다.

2013년 기준 풍력발전 설비용량은 기존용량과 증설예정 용량을 합하여 300MW로 예상된다. 추가 건설되는 풍력발전기의 형식은 발전효율을 향상시킨 DFIG 방식이거나 PMSG이 대부분을 차지할 것으로 보인다.

컴퓨터 해석을 위한 풍력발전기의 형식은 현재 가장 널리 사용되는 있는 DFIG 풍력발전기를 사용하였으며, PSS/E 프로그램에서 제공하는 GE사의 1.5MW급 풍력발전기 모델을 사용하였다. 2011년 연말에 준공예정인 STATCOM 50MVA 2기의 모델링을 위하여 PSS/E 프로그램에서 제공하는 FACTS설비 중 하나인 STATCON의 제어 모델인 CSTCNT를 사용하였다. 이는 한라모선(190)과 신제주(140) 모선의 전압을 기준 값으로 설정하고 기준 전압범위에 유지토록 무효전력을 순시 적으로 공급하여 전압안정도 향상에 기여한다.⁵⁾⁶⁾

본 논문에서는 연계선 운전 시 역송전을 고려하지 않은 상태에서 부하별 풍력한계용량을 산정하였기 때문에, PSS/E 시뮬레이션에서 연계선 동작 모드는 정출력 제어 모드로 운전되도록 설정하였다.

3.2 상정사고 시 계통응답 특성 분석

제주계통에서 발생할 수 있는 가장 큰 상정사고는 단위 발전기 1기의 사고로 인한 정지, 154kV모선에서의 삼상 단락사고, 돌풍 및 태

풍으로 인한 대규모 풍력발전단지의 계통 연계 차단 등이다. 최근에는 전력전자 설비의 증가와 대규모 풍력단지의 계통연계 그리고 연계선 추가 건설로 무효전력에 대한 예비력이 크게 부족할 것으로 예상된다. 계통사고 이후 전압이 저하될 때, 풍력발전기는 일정 시간동안 지속적으로 계통과 연계되어야 하며 전압안정도 향상을 위해 필요한 경우 무효전력을 공급할 수 있는 능력을 갖추어야 한다.

위에서 언급한 상정사고에 대하여 부하별 최소발전량 기준 풍력발전의 한계운전용량에 대한 계통응답특성을 분석하기 위하여, 다음과 같은 상정사고를 적용하여 컴퓨터 해석을 실시하였다.

- 1초 정상운전 후, 한라모선(190)에 연결된 부하 차단(한라 MTR #1, 2)
 - 순시 무효전력공급 장치의 유·무에 따른 전압안정도 평가
- 1초 정상운전 후, 전체 풍력단지 계통연계 차단
 - 전체 풍력발전 탈락 이후, 최소 투입된 발전기들에 의한 계통운영 가능성 여부 검토
- 1초 정상운전 후, 안덕모선(190) 삼상단락 사고발생, 6 cycle 후 고장 제거
 - 모선 사고 이후, 전압전하로 인한 제주 계통 영향 분석

Table. 2 Capacity of penetration limit of wind power of each load[MW]

Load	Minimum output	Capacity of penetration limit of wind power
400	156	244
500	206	294
530	232	298
700	300	300

표 2는 부하별로 평가된 최소발전량 및 풍력한계운전용량을 나타낸다. 전체 부하별 풍

력한계운전용량에 대해 모의를 실시하지 않고, 부하가 400MW인 경우만을 평가하였다. 이는 부하 400MW일 때, 투입되는 발전량이 가장 작아 상정사고 적용 시, 계통에 미치는 영향이 가장 클 것으로 예상되기 때문이다.

3.3 실험결과 및 고찰

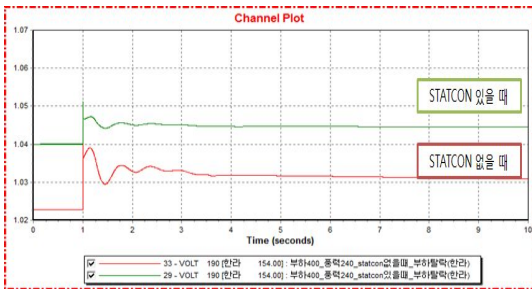
(1) 한라모선에서의 부하탈락

한라모선에 연결된 부하는 한라1MTR(191)과 한라 2MTR(192)을 통해 유효전력 48.4MW, 무효전력 14.1Mvar이 수전 받고 있다. 그림 2는 부하탈락 이후, (a) STATCON 유·무에 따른 한라모선(190)의 전압변화, (b) 제주계통 주파수 변화, (c) 연계선 #1,2의 유효전력 변화를 나타낸 것이다.

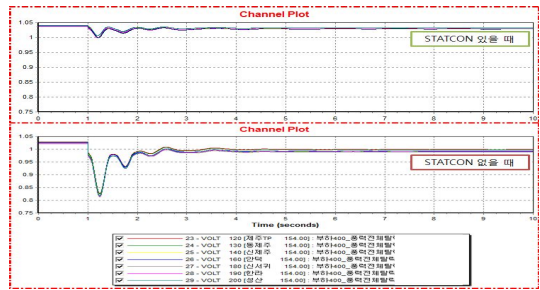
그림(a)에서 한라모선의 전압변화는 STATCON 유·무에 따라 다르게 나타났다. 1초에 한라모선과 연결된 부하가 모두 탈락하면서 순간적으로 전압이 상승하여 STATCON이 연결된 경우, 순간적인 전압상승분을 제외하고 정상상태 1.04pu에서 최대 1.05pu까지 상승하였으나, 과도상태에서 전압변동이 심하지 않고 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 하지만 STATCON이 없는 경우, 정상상태 1.02pu에서 최대 1.04pu까지 상승하였으며, 부하탈락 이후 과도상태에서 전압이 심하게 흔들리며 서서히 정상상태에 도달한다.

그림(b)에서 계통주파수는 STATCON 유·무에 따라 별다른 차이가 없음을 알 수 있다. 부하 탈락이후 순간적으로 주파수가 최대 60.15Hz까지 상승하였으며 4초 이후 정상상태에 도달하여 주파수는 60.04Hz에 수렴한다.

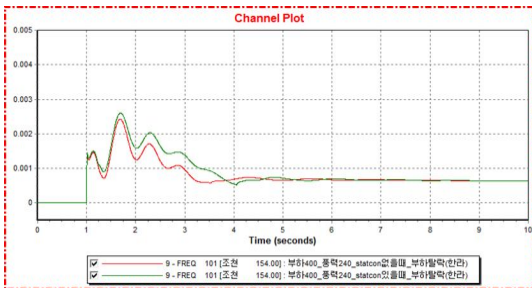
그림(c)는 연계선 #1, 2의 유효전력 출력변화를 나타낸 것이다. 연계선 #1, 2는 최소발전운전을 하여 각각 20MW씩 수전 받고 있었으며 한라모선에 연결된 부하(48.4MW)가 탈락되는 순간, 유효전력 출력을 감발하여 0.2초 이내에 총 40MW의 출력을 감소시켜 계통 주파수 안정화에 기여한다.



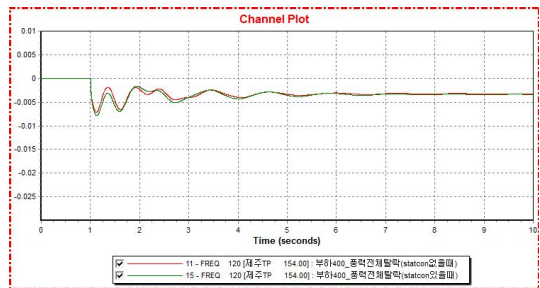
(a) Change of voltage at Halla Bus(190)



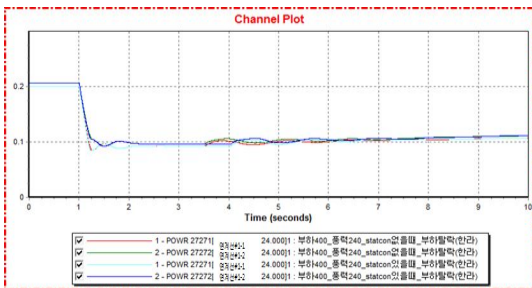
(a) Change of voltage in power system



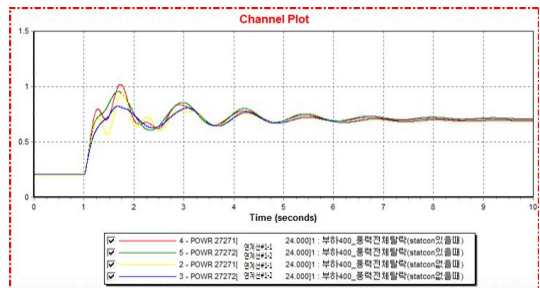
(b) Change of frequency in power system in Jeju



(b) Change of frequency in power system in Jeju



(c) Change of active power at HVDC



(c) Change of active power at HVDC

Fig. 2 Case of load shedding at Halla bus

Fig. 3 Case of fault of all wind farm

(2) 풍력발전(244MW) 탈락 시

제주 계통과 연계된 풍력발전 용량 244MW 이 순간적으로 탈락되었을 때, 전압 및 주파수와 연계선의 유효전력 변화를 분석하였다. 풍력단지를 제주지역의 동·서 지역으로 양분했을 때 동쪽지역에 125MW이 서쪽지역에 119MW의 풍력발전이 계통과 연계된다. 그림 3은 풍력발전량 244MW가 탈락했을 때, (a) STATCON 유·무에 따른 전압 변화, (b) 제주계통 주파수 변화, (c) 연계선의 유효전력 변화를 나타내었다.

그림 (a)는 순동 무효전력공급 장치인 STATCON 이 신제주 모선(140)과 한라 모선(190)에 설치되기 전·후의 제주계통 모선의 전압 변화를 나타낸 것이다. 먼저 STATCON이 없는 경우, 풍력발전이 탈락한 이후 전압 강하가 심하여 최대 0.82pu까지 순간적으로 전압이 저하되며, 약 2초간의 과도상태를 지나, 정상상태 0.99pu에 도달하는 것을 알 수 있다. STATCON이 각각 신제주 모선과 한라모선에 설치된 경우, 풍력발전이 탈락한 이후 최대 1.0pu까지 전압이 저하되었으나 STATCON에

의해 전압이 안정화되며, 과도상태를 지나 약 1.5초 이내 정상상태에 도달하여 1.2pu를 유지하게 된다.

그림 (b)는 풍력발전 탈락 이후 계통 주파수 변화를 나타낸다. 풍력탈락 이후 주파수는 최대 59.55Hz까지 떨어져 UFR 동작 없이 과도상태를 지나 59.89Hz에 도달하게 된다. STATCON 유·무에 관계없이 주파수 변화는 비슷한 양상을 보이고 있다.

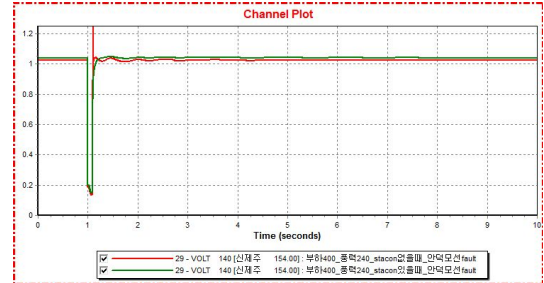
그림 (c)는 풍력발전 탈락 이후 연계선의 유효전력 변화를 나타낸다. 순간적인 풍력발전량 244MW 탈락으로 연계선은 1초 이내 최대 출력 운전으로 주파수 조정을 위한 출력의 변화를 보이고 있으며, 과도상태 이후 탈락된 풍력발전량만큼 수전 받게 된다. 연계선의 빠른 응답 특성으로 계통에서 탈락된 풍력발전량만큼의 전력을 확보하여 계통 주파수 안정화에 기여 한다.

(3) 안덕 모선(190)에서 삼상단락 사고 발생 시

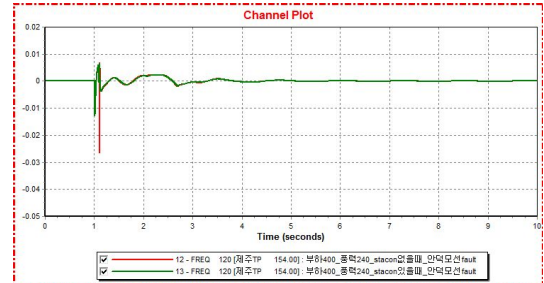
그림 4는 1초 정상운전 후, 안덕 모선(190)에 삼상단락 사고를 가하고, 6cycle 이후 사고를 제거한 경우, (a) STATCON 유·무에 따른 전압, (b) 계통 주파수변화, (c) 연계선의 유효출력변화를 나타내었다. 이때, 풍력발전기 형식은 이중유도여자방식의 발전기로써 전기제어시스템을 통해 FRT기능을 갖추어 저전압 발생 시 즉각적인 계통 연계차단이 아닌 전압저하 정도와 지속시간을 고려하여 계통연결을 유지한다.

그림(a)에서 전압은 안덕 모선 삼상단락 사고발생 이후, 최대 0.17pu까지 떨어지며 STATCON 유·무에 따라 과도상태에서 정상상태에 도달하기까지 전압변동이 다르게 나타난다. STATCON이 있을 경우 전압이 저하된 이후 정상상태도달까지 큰 진동 없이 정상상태에 도달하지만, STATCON 없는 경우 사고를 제거하는 순간 전압은 큰 폭으로

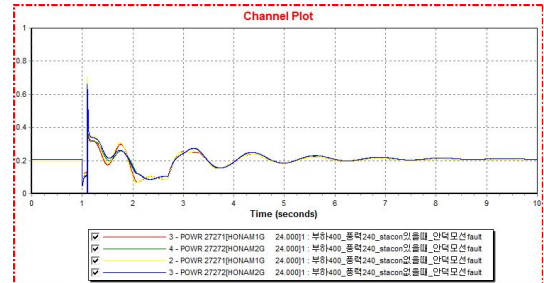
상승하였다가 진동을 유발하며 정상상태에 도달하게 된다.



(a) Change of voltage at Shinjeju Bus(140)



(b) Change of frequency in power system in Jeju



(c) Change of active power at HVDC

Fig. 4 Case 3-phase fault at Andeok Bus

그림(b)에서 STATCON이 있는 경우, 주파수는 안덕모선 삼상단락 사고 발생하는 순간 59.24Hz까지 떨어진다. 0.1초 이후 사고가 제거되면 주파수는 진동을 보이며 60Hz에서 서서히 수렴하게 된다. STATCON이 없는 경우 주파수는 사고순간은 STACON이 있을 때와 같이 59.24Hz에 도달하지만, 사고를 제거하는 순간 주파수는 순간적으로 58.38Hz까지 떨어

진다. UFR 동작영역은 10cycle동안 저주파수를 유지해야하므로 순간적인 주파수저하로 인한 부하차단은 발생하지 않는다.

그림(c)에서 연계선의 출력은 사고 발생 시 순간적인 출력저하를 보이고 있다. 이는 안덕모선 삼상단락 사고발생으로 순간적으로 계주계통 전압은 저전압 상태를 보이고 이로 인해 연계선 DC 전압 저하로 출력은 감소하게 된다. 사고 제거 이후 DC 전압은 전압 감발율(pu/sec) 속도에 따라 회복되며, 이후 유효전력은 과도상태를 지나 서서히 정상상태에 수렴하게 된다.

4. 결 론

부하별 최소발전량 기준으로 산정된 풍력한계용량에 대해 계통 수용성 여부를 평가하고자 계통실험을 실시하였다. PSS/E를 이용하여 부하탈락, 계통과 연계된 풍력발전기 전체 탈락, 안덕모선 삼상단락 사고 등 상정사고에 따라 계통에 미치는 영향을 분석해 보았다.

부하별 풍력한계용량에 대한 평가한 결과, STATCON 유·무에 따라 국부적인 전압변동과 과도상태에서 진동의 크기가 달라졌으나 계통이 붕괴되는 경우는 발생하지 않는다. 순동 무효전력 공급 장치인 STATCON으로 인해 전압안정도가 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 계통 주파수 측면에서도 UFR 동작 없이 부하 및 풍력발전 탈락 이후에도 계통이 안정화됨을 확인할 수 있었다. 연계선의 경우 역송전을 고려하지 않았으며, 4ploe 모두 정출력 제어 모드로 운전된다. 연계선의 빠른 응답특성과 순동 무효전력 공급 장치의 STATCON로 계통은 사고이후 빠르게 안정화됨을 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과로부터, 부하별 산정된 풍력한계용량에 대하여 계통이 안정적으로 수용할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(NO.20094020200020)

참 고 문 헌

1. E.A. Demeo. W. Grant, "Wind Plant Integration Costs, Status, and Issues", IEEE power & energy, 12. 2005
2. Holttinen and R. Hirvonen. "Power System Requirements for Wind Power." (Wind Power in Power Systems, T. Ackermann, Ed. John Wiley & Sons, 2005, pp.143~167.)
3. KEPCO, "Research on the Maximum Penetration Limit of Wind Power and the Operation Scheme of the Jeju Power System" (Final report), 2008. 7.
4. KPX, "A Study on the Operating Reserve for Jeju power system" (Final report), 2011. 4.
5. MKE, The 5th Electricity Supply and Demand Plan, 2010.
6. PTI, PSS/E User Manual, version 32, June 2009