

STATCOM을 이용한 풍력단지가 연계된 전력계통의 과도안정도 향상

서규석*, 박지호¹
¹거제대학교 선박전기과

Transient Stability Enhancement of Power System Connected to a Wind Farm Using STATCOM

Gyu-Seok Seo*, Ji-Ho Park¹

¹Dept. of Electrical Engineering, Koje College

요약 풍력단지가 연계된 전력계통의 과도안정도를 보장하기 위해서는 전력계통과 풍력단지의 접속점에 풍력발전기가 충분한 무효전력을 공급할 수 있어야 한다. 하지만 개별의 풍력터빈은 안정도를 유지하기 위한 충분한 무효전력 공급능력을 가지지 못한다. 또한 풍력단지와 접속점 사이의 케이블은 리액턴스가 크고 이에 따른 무효전력 손실도 크다. STATCOM(Static Synchronous Compensator)은 고속으로 동작할 수 있고 충분한 무효전력을 공급할 능력을 가지고 있기 때문에 과도안정도를 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 풍력단지가 연계된 전력계통의 과도안정도 향상에 있어서 STATCOM의 유효성을 보인다. 접속점에 STATCOM을 설치하고 동적 모의를 한 결과 과도 안정도가 향상되는 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract To ensure the transient stability of power system connected to a wind farm, wind power plant must be able to supply reactive power at the point of the common coupling(PCC). The reactive power capability of each individual wind turbine may not sufficient to maintain stability. Also, there are large reactive power losses in connection cables between wind farm and PCC. The static synchronous compensator(STATCOM) is considered for transient stability enhancement, because it provides many advantages such as the fast response time and superior reactive power support capability. In this paper, the effectiveness of a STATCOM in enhancing transient stability of power system connected to a wind farm is presented. The results of dynamic simulations show that STATCOM installed at the PCC can enhance transient stability.

Key Words : Transient Stability, STATCOM, Reactive Power, PCC

1. 서론

풍력발전의 총용량이 전체 발전량의 일부분만을 차지할 만큼 크지 않았던 과거에는 지속적인 풍력단지의 전력계통에 대한 연계는 주 관심사가 아니었다. 최근에는 공해물질을 배출하는 화석연료를 대신할 수 있고 발전원가의 절감할 수 있는 청정의 신재생 에너지원인 풍력자원이 풍력발전관련 기술의 혁신으로 인하여 쉽게 전기에

너지로 변환되고 이것을 가능하게 하는 풍력단지의 수용률은 지속적이고 극적으로 증가하고 있는 추세이다[1]. 하지만 풍력단지는 지리적으로 기후적으로 풍력자원이 풍부한 지역에 설치되므로 넓은 지역에 걸쳐 분포하고 많은 풍력터빈이 존재하므로 기존의 전력계통에 연계하기 위해서 하나의 접속모선을 통하여 연결된다. 이 때 각각의 풍력터빈과 접속모선을 연결하는 케이블은 길이가 길고 큰 리액턴스 성분을 가지게 되므로 동적안정도와

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2012R1A1A1042577)

*Corresponding Author :Gyu-Seok Seo(Koje College)

Tel: +82-55-680-1558 email: gsseo@koje.ac.kr

Received March 4, 2015

Revised April 17, 2015

Accepted June 11, 2015

Published June 30, 2015

전력의 품질에 영향을 미친다[2]. 즉 풍력단지와 전력계통의 연결선로에서 무효전력의 손실이 크다. 최근에 많이 사용되고 있는 이중여자방식의 풍력발전기는 자체적으로 무효전력을 제어하는 능력을 가지고 있지만 무효전력의 용량이 작다. 따라서 기존의 동기발전기를 포함한 새로운 풍력발전 단지가 연계된 전력계통에 대한 안정적인 운영에 대한 해석이 필요하다. 이러한 문제에 대한 해결책은 풍력단지의 접속모선에 무효전력 보상장치를 설치하여 안정도를 향상시키는 것이다. 무효전력보상장치의 대표적인 예가 값이 싸고 기계적 스위칭으로 동작하는 Switched-Shunt, 변압기의 탭 변환기이다. 하지만 이러한 장치들은 정상상태의 전압조정은 개선시킬 수 있지만 동작속도가 느려서 전력동요, 전압동요 그리고 고조파 문제를 일으킬 수 있다[3]. 또한 이러한 장치의 빈번한 스위칭은 과도적인 과전압을 일으킬 수 있고, 풍력터빈에 스트레스를 유발하여 추가적인 유지보수비용을 발생시킨다. 그러므로 고속으로 동작할 수 있는 무효전력 보상장치가 필요하다.

전력전자기술을 바탕으로 하는 STATCOM (static synchronous compensator)는 이러한 목적에 적합한 장치이다. 최근의 대전력 반도체 스위칭 기술의 비약적인 발전과 디지털 제어기술은 가격이 싸고 빠른 동작을 하는 STATCOM을 출현시켰다. STATCOM은 풍력단지의 전력계통에 대한 연계에 있어서 비용효율과 신뢰도가 높은 신재생 풍력에너지를 제공하는데 도움을 줄 수 있다. 본 논문에서는 STATCOM을 풍력단지의 전력계통의 접속모선에 설치하여 순동무효전력을 확보함으로써 과도 안정도를 향상시키는 방안을 PSSE를 이용하여 구현하고 결과를 보인다[4].

2. 본론

2.1 무효전력보상장치와 STATCOM

무효전력을 보상하는 대표적인 장치는 Switched -Shunt, ULTC(Under Load Tap Changing) 변압기 등이다. Switched-Shunt는 리액터와 커패시터를 조합하여 무효전력을 공급 또는 흡수한다. 일정 용량의 리액터와 커패시터를 차단기를 통하여 병렬로 연결하여 공급 또는 흡수하고자 하는 무효전력의 크기에 따라 리액터와 커패시터의 기계적 스위칭을 통하여 무효전력을 제어한다.

Fig. 1은 PSSE에서 구현된 Switched-Shunt의 예를 보인 것인데, CBB1 ... CBB5는 차단기를 나타낸다. ULTC 변압기는 부하시에 탭을 조절할 수 있는 기능을 가지고 있어 탭비에 따라 무효전력을 제어할 수 있다.

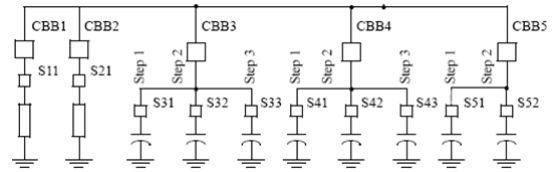


Fig. 1. Example of switched-shunt in PSSE

Fig. 2는 PSSE에 사용된 2권선 변압기 모델인데 t_1 과 t_2 의 비를 변경함에 따라 전압을 조정하여 무효전력의 흐름을 제어할 수 있다.

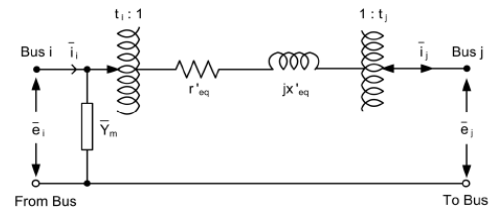


Fig. 2. PSSE Two-winding Transformer model

Switched-Shunt 그리고 ULTC변압기는 무효전력을 제어하기 위해서는 기계적 스위칭을 수반하는데 빈번한 스위칭은 공진과 과도적인 과전압을 일으키고 기계장치에 스트레스를 주어 기계장치의 유지보수 비용을 증가시킨다. 반면에 전력전자 기술에 기반을 둔 전자스위칭 장치는 기계적 관성을 수반하지 않기 때문에 동작속도가 매우 빠르고 과도적인 과전압도 작고, 부드럽고 완만한 형태의 무효전력 출력을 얻을 수 있게 만든다. 전자스위칭 장치는 시스템의 수명을 길게 할 수 있고, 유지보수비용이 줄어든다. STATCOM은 이러한 전자스위칭을 이용하는 새로운 유형의 무효전력보상장치이다. 동기조상기와 비슷한 특성을 가지지만 기계적 관성이 없는 전기장치로써 동기조상기에 비하여 투자비, 운전비용 그리고 유지비용이 낮고 동적특성이 더 좋다[5].

Fig. 3은 STATCOM의 등가회로이다. 내부전압원의 크기가 연결모선 전압크기보다 크면 무효전력을 공급하고, 반대로 내부전압원의 전압크기가 연결모선의 전압크

기보다 작으면 무효전력을 흡수한다. 이때 STATCOM은 유효전력을 공급 또는 흡수하지 않는다.

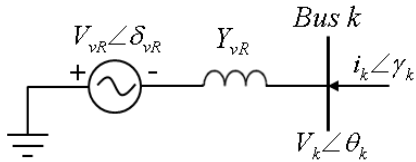


Fig. 3. STATCOM equivalent circuit

2.2 순동무효전력의 확보

순동무효전력의 확보는 전압안정도와 과도안정도의 유지를 위해서 필요한 것이다[6]. 특히 전력계통의 단락 사고와 같은 긴급한 상황에서는 신속하게 무효전력을 공급해야만 안정도를 유지할 수 있다. 신속한 무효전력의 공급을 위해서는 STATCOM의 사용이 적합하다. STATCOM이 설치된 모선에서는 사고에 대비하여 순간적으로 무효전력을 공급할 수 있는 순동무효전력을 확보해야한다. STATCOM의 충분한 순동무효전력을 확보하기 위해서는 정상상태에서 전압조정에도 많은 무효전력을 소비하지 않아야 한다. 이를 위해서 기존의 조상설비인 Switched-Shunt와 ULTC변압기와의 협조가 필요하다. 정상상태에서는 가급적 Switched-Shunt와 ULTC변압기를 이용하여 전압을 제어하고 STATCOM은 가용할 수 있는 무효전력을 확보하는 것이다. 본 논문에서는 참고문헌 [6]에서 제시한 방법을 이용하여 순동무효전력을 확보하고 그 결과를 본 논문의 과도 안정도 모의에 사용한다.

3. 사례연구

3.1 테스트 시스템

본 논문에서는 STATCOM을 이용한 과도안정도 향상을 모의 하기 위하여 Fig. 4의 IEEE 14 bus test system을 일부 수정하여 사용한다[7]. 원래의 시스템은 총부하가 259MW이지만 306MW으로 증가시키고, 14번 모선의 부하를 55MW으로 가장 크게 변형시켰다. BUS9와 BUS14을 연결하는 선로의 임피던스를 임의로 작게 하여 전력조류를 변경시켰다. 또한 각 모선의 부하의 구성을 PSSE에서 사용하는 CLODBL을 이용하여 대형모터의 비를 40%, 소형모터의 비를 30%, 기타 부하를 30%으로 구성하여 사고에 민감하게 반응하도록 구성된

다. 시스템에 사고가 발생할 때 가장 많은 영향을 받는 모선은 부하가 가장 큰 14번 모선이다. 테스트 시스템에서 모선1(BUS1)이 슬랙모선이고 모선2(BUS2)는 40MW의 동기발전기 연결되어 있는데, 시스템의 특정 모선을 모선2의 동기발전기와 같은 용량의 풍력단지와 연계되도록 수정한 후 모선2의 동기발전기는 제거한다. 특정 선로에 3상 단락사고를 낸 후 일정 시간 후에 사고를 제거하여 임계고장제거시간 (Critical Clearing Time: CCT)을 계산하고 안정한 시스템인 경우 전압의 회복정도를 파악하여 STATCOM의 과도안정도향상을 모의한다[8].

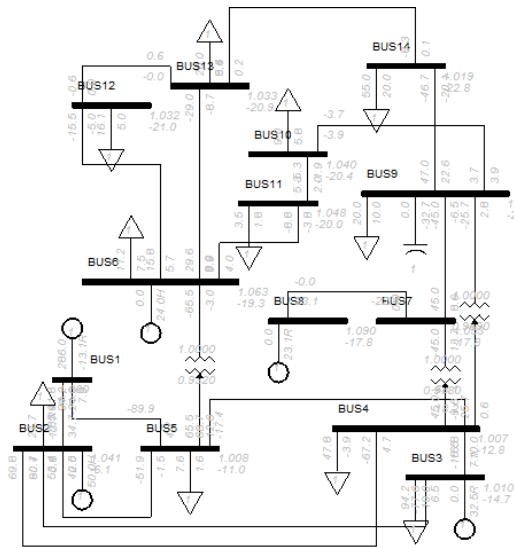


Fig. 4. IEEE 14Bus test system

3.2 테스트 시스템의 과도안정도 해석

Fig. 4에서 주어진 시스템을 앞 절에서 설명한 대로 시스템을 수정하여 풍력단지가 연계되지 않은 경우에 대하여 과도안정도를 먼저 모의한다. 각 모선의 동기발전기의 과도리액턴스 데이터는 PSSE에서 제시한 표준 데이터를 사용하였고, 동기발전기는 PSSE의 GENROU모델을 사용하고 여자시스템은 IEEET1모델을 그리고 터빈-조속기는 TGOV1 모델을 사용하였다. 단 BUS3, BUS6 그리고 BUS8에 연결된 동기조상기는 터빈-조속기 모델이 없다. 부하가 가장 큰 BUS14가 시스템의 사고에 대하여 가장 민감할 것이므로 BUS14 주변 선로의 3상 단락사고를 가정하여 과도 안정도를 모의한다. BUS9와 BUS14을 연결하는 선로에 3상 단락사고를 가정했을 때 CCT는 0.07s이다. Fig. 5는 고장제거시간이

0.07s일 때 주요모선의 전압응답을 나타낸 것이다. 부하가 가장 큰 BUS14의 회복전압이 가장 낮다.

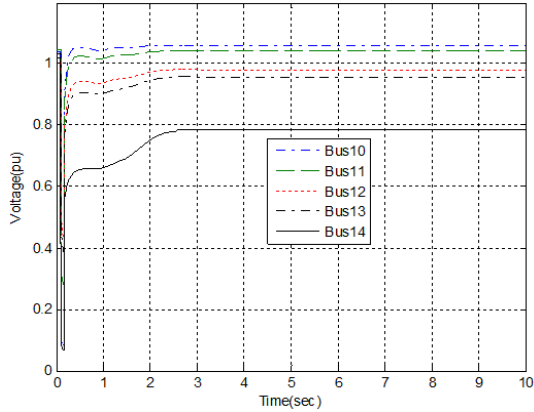


Fig. 5. Voltage response of test System without wind farm

3.3 풍력단지가 연계된 경우의 과도안정도

3.3.1 풍력단지가 BUS3에 연계된 경우

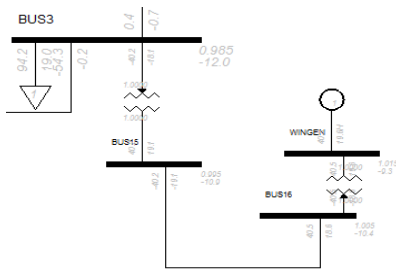


Fig. 6. Wind farm connected to BUS3

Fig. 4의 테스트 시스템에서 BUS3에 Fig. 6처럼 풍력 단지를 연결시키고 3.2절과 똑같은 사고를 모의 한다. 단 BUS3에 풍력단지를 연계시킨 상태에서 조상설비와 STATCOM에 의한 무효전력 보상은 없는 상태이다.

BUS9와 BUS14을 연결하는 선로에 3상 단락사고를 가정했을 때 CCT는 0.05s이다. Fig. 7은 고장제거시간이 0.05s일 때 주요모선의 전압응답을 나타낸 것이다. Fig. 5의 결과처럼 부하가 가장 큰 BUS14의 회복전압이 가장 낮다. 또한 응답곡선에 나타난 모든 모선의 회복전압이 Fig. 5보다 낮다. 즉 기존의 계통의 BUS3에 풍력 단지를 연계하면 연계선로의 무효전력 손실 때문에 과도안정도는 더 악화된다.

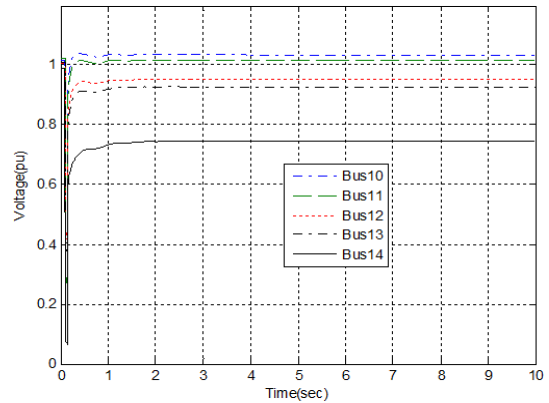


Fig. 7. Voltage response of test system with wind farm at the BUS3

이제 BUS3에 Switched-Shunt와 STATCOM을 연결하고 BUS3과 BUS15사이의 변압기를 ULTC 변압기로 수정한 후 STATCOM의 순동무효전력을 확보할 때의 과도안정도를 모의한다. 먼저 정상상태에서 조상설비를 이용하여 STATCOM의 순동무효전력을 20MVar 크기로 확보한다. 이 때 앞의 경우와 같은 선로에 사고를 가정하고 구한 CCT는 0.07s이다. Fig. 8은 고장제거시간이 0.07s일 때의 전압응답이다.

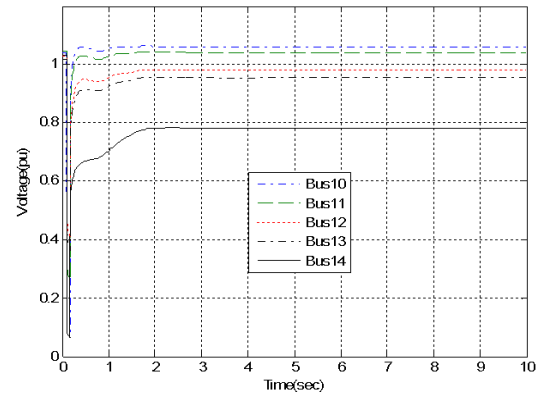


Fig. 8. Voltage response with 20MVar reactive power reserve of STATCOM

모의 결과에서 CCT와 사고제거 후의 전압의 크기는 풍력단지가 연계되기 전의 값으로 회복되었고, Fig. 5와 8을 비교하면 Fig. 8의 경우가 최종전압으로의 수렴속도가 더 빠르다. BUS8에 연결된 동기조상기는 무효전력 공급원이다. 이것이 시스템에서 분리되는 BUS8과 BUS7사이의 선로에 사고를 가정하는 경우는 풍력단지

가 연결된 상태에서 순동무효전력을 확보하지 않은 경우의 CCT는 0.11s 이고, 순동무효전력을 20Mvar으로 확보하면 CCT가 0.21s로 증가한다.

사고제거 후에 BUS8의 동기조상기가 분리되어 부족하게 되는 무효전력을 STATCOM에서 확보한 순동무효전력으로 공급하게 되어 CCT가 증가한다.

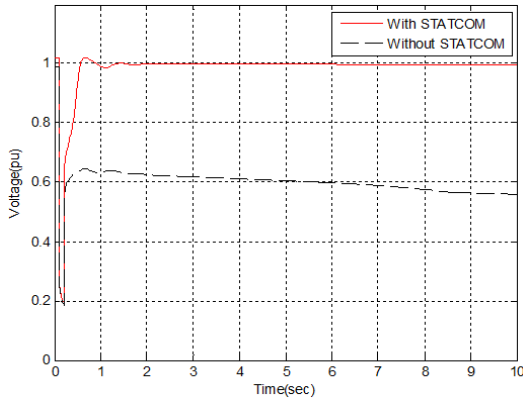


Fig. 9. Voltage response of BUS14 with line fault between BUS8 and BUS7(wind Farm at BUS3)

Fig. 9는 사고제거시간이 0.11s일 때 STATCOM의 제어가 있는 경우와 없는 경우의 BUS14의 전압응답이다. STATCOM의 순동무효전력을 이용한 제어가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 전압 회복특성이 매우 좋다.

3.3.2 풍력단지가 BUS6에 연계된 경우

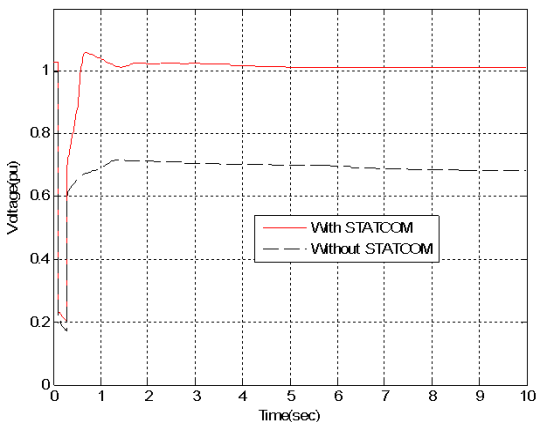


Fig. 10. Voltage response of BUS14 with line fault between BUS8 and BUS7(wind farm at BUS6)

풍력단지가 BUS6에 연계되어 있을 때 BUS7과 BUS8의 연결선로에 사고를 가정할 때 순동무효전력이 없는 경우는 CCT가 0.19s이고 STATCOM의 순동무효전력을 20Mvar 확보했을 때 CCT는 0.32s이다. 풍력단지가 BUS3에 연결된 경우에 비하여 상대적으로 CCT가 높은 이유는 테스트 시스템이 사고 전의 정상상태에서 BUS3은 1.01pu로 유지하지만, BUS6의 전압은 1.07pu의 높은 전압으로 유지하고 있기 때문이다. Fig. 10은 두 경우의 모선14의 전압응답을 고장제거시간이 0.19s일 때 비교한 것이다. STATCOM의 순동무효전력이 확보된 경우가 전압 특성이 더 우수하다.

3.3.3 풍력단지가 BUS8에 연계된 경우

풍력단지가 BUS8에 연계되어 있을 때 BUS14에 가장 큰 영향을 미치는 사고는 BUS7과 BUS9사이의 선로의 사고이다. 사고제거로 선로가 개방되면 풍력단지에서 BUS14으로의 무효전력은 리액턴스가 큰 두 대의 변압기를 거쳐야만 전달되기 때문이다.

순동무효전력이 없는 경우는 CCT가 0.12s 인데, BUS14가 풍력단지에 가까이 위치하고 있어 CCT가 크다. STATCOM으로 순동무효전력을 20Mvar 확보했을 때의 CCT는 0.14s이다. CCT의 차이가 크지 않은 이유는 무효전력을 공급하는 경로에 두 대의 변압기가 큰 무효전력을 소비하기 때문이다.

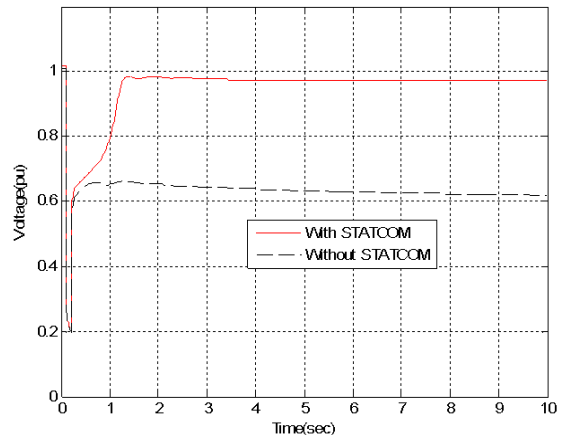


Fig. 11. Voltage response of BUS14 with line fault between BUS8 and BUS7(wind farm at BUS8)

Fig. 11은 두 경우의 BUS14의 전압응답을 고장제거시간이 0.12s일 때 비교한 것이다. 전압회복 특성은

STATCOM으로 보상한 경우가 매우 좋다. 즉 CCT는 크게 개선되지 않지만 시스템의 전압회복 특성은 크게 좋아짐을 알 수 있다.

4. 결론

기존의 전력계통에 풍력단지를 연계할 때 발생할 수 있는 과도안정도의 약화문제를 본 논문에서는 연계점에 STATCOM을 설치하여 과도안정도를 향상시키는 방안을 모의 하였다. 과도안정도 약화의 주된 원인이 연계선로의 무효전력 손실이기 때문에 사고 발생 시에 무효전력을 신속하게 공급할 수 있는 STATCOM은 과도 안정도를 증진시킬 수 있다. 선로 사고와 같은 긴급상황에서 고속으로 무효전력을 공급하기 위하여 기존의 조상설비와 STATCOM의 협조를 통한 순동무효전력 확보가 필요하다. 테스트 시스템에서 기존의 모선에 풍력단지를 연계시킬 때 조상설비를 설치하여 STATCOM이 20Mvar의 순동무효전력을 확보한 상태에서 사고를 모의한 결과 과도안정도가 향상되었다. 풍력단지가 연계된 위치에 따라 CCT가 최소 0.02s, 최고 0.13s까지 더 증가하였다. CCT가 최소로 증가한 경우는 BUS3에 연계된 경우는 풍력단지가 BUS3에 연결되어 있고 BUS9와 BUS14사이의 선로에 사고가 발생한 경우이다. CCT가 최대로 증가한 경우는 BUS6에 연계된 경우는 풍력단지가 BUS3에 연결되어 있고 BUS7과 BUS8사이의 선로에 사고가 발생한 경우이다. CCT의 증가가 작은 경우에도 사고제거후의 최대부하를 가진 모선의 전압회복 특성은 풍력단지가 연계되기 전의 상태이상으로 향상되었다. CCT가 크게 증가하지 않는 경우는 사고전 정상상태에서 연계모선의 유지 전압의 크기가 상대적으로 작기 때문인데 조상설비를 확충하여 순동무효전력을 더 많이 확보한다면 CCT를 더욱 크게 하여 과도안정도를 향상시킬 수 있다.

References

[1] <http://www.gwec.net/global-figures/market-forecast-2012-2016/>
 [2] E. Muljadi, C.P. Butterfield, "Wind Farm Power System Model Development," World Renewable Energy Congress VIII, Colorado, Aug-Sept 2004

[3] J.W. Smith and D.L. Brooks, "Voltage impacts of distributed wind generation on rural feeders," in Proc. IEEE PES transmiss. Distrib. Conf. Exhib., Oct. 28-Nov. 2, 2001, vol. 1, pp 492-497
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDC.2001.971283>
 [4] "PSSE-32 Program Application Guide Vol. 1", Shaw Power Technologies Inc.
 [5] X.P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal "Flexible AC Transmission Systems: Modeling and Control", Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
 [6] J.H. Park and Y.S. Baek "Coordination Control of Voltage Between STATCOM and Reactive Power Compensation Devices in Steady-State", Journal of Electrical Engineering & Technology Vol.7 No. 5, pp. 689-697, 2012
 DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/JEET.2012.7.5.689>
 [7] "Power Systems Test Case Archive - IEEE 14 Bus Power Flow Test Cases", <https://www.e.washington.edu/research/pstca/>
 [8] J.D. Glover, M. S. Sarma and T. J. Overbye "Power Sytem: Analysis and Design", CENGAGE Learning, 4th Edition, 2010.

서 규 석(Gyu-Seok Seo)

[정회원]



- 2003년 2월 : 경북대학교 전기공학과 (공학사)
- 2005년 2월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2009년 2월 ~ 현재 : 거제대학교 선박전기와 교수

<관심분야>

배전시스템 운영 및 제어, 스마트 그리드

박 지 호(Ji-Ho Park)

[정회원]



- 1991년 2월 : 경북대학교 전기공학과 (공학사)
- 1996년 8월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 거제대학교 초빙교수

<관심분야>

전력계통 안정도, 스마트 그리드