Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 16, No. 4 pp. 2737-2743, 2015

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.4.2737
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

STATCOM과 조상설비를 이용한 풍력단지가 연계된 전력계통의 전압제어

서규석[1*], 박지호[1]
[1]거제대학교 선박전기과

Voltage Control of Power System Connected to a Wind Farm by Using STATCOM and Reactive Power Compensators

Gyu-Seok Seo[1*], Ji-Ho Park[1]
[1]Dept. of Electrical Engineering, Koje College

요 약 풍력발전은 풍력단지가 전력계통과 접속되는 모선의 전압을 유지 또는 제어하기 위한 충분한 무효전력을 공급할 수 있어야 한다. 하지만 풍력단지와 계통 접속점(POI - Point of Interconnection) 모선을 연결하는 선로의 무효전력 손실 때문에 풍력터빈의 무효전력공급은 접속점의 전압을 제어하기에는 불충분하다. 이 문제는 접속점에 STATCOM(Static Synchronous Compensator)과 같은 부수적인 무효전력 보상장치를 설치하여 해결할 수 있다. 본 논문에서 제시하는 STATCOM과 Switched-Shunt, 탭변환 변압기와 같은 기존의 무효전력 보상장치의 협조제어를 사용하면 더욱 효과적으로 접속점 모선의 전압을 제어할 수 있다. 본 논문에서 제시한 방법을 이용하여 초기부하에 대하여 임의의 부하 변동률을 가지는 모의 시스템에 적용한 결과 접속점 모선의 전압강하는 60%이상 개선되었고 부하 모선의 전압은 정격전압의 95%이상을 유지하였다.

Abstract The wind power plant must be able to produce reactive power at the POI bus of a wind farm connected to power system to keep or control the voltage of POI bus. But, the reactive power capability of wind turbines may not be sufficient to control the voltage of POI bus due to the reactive power losses in connection lines between wind farm and POI bus. The solution of this problem is to install an external STATCOM. The proposed cooperative control method of STATCOM and conventional reactive power compensators such as Switched-shunt and tap changing transformer can control the voltage of POI bus more efficiently. The simulation results are shown that the voltage drop of POI Bus of Test System with the arbitrary load change rate to initial loads is improved more than 60% and the voltage of load bus is maintained more than 95% of rated voltage.

Key Words : Reactive Power, Voltage Control, STATCOM, Reactive Power Compensators

1. 서론

전 세계적으로 설치된 풍력발전단지의 발전용량은 지속적으로 증가하고 있다[1]. 실제로 전력을 생산하는 발전설비 중 풍력발전이 가장 빠른 성장속도를 보이고 있다. 지속적인 풍력발전용량의 증가는 기존의 전력계통의 운영과 계획에 큰 영향을 미친다[2]. 그 이유는 기존의 전력계통에 풍력발전단지를 연계하는 것은 전압제어와 무효전력보상 문제를 발생시킬 수 있어 이에 대한 대책을 고려해야 되기 때문이다. 풍력터빈은 공기력 회전자,

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 January 9, 2015 Revised April 3, 2015
Accepted April 9, 2015 Published April 30, 2015

기계식 변속기, 유도발전기, 무효전력보상기 그리고 스텝업 변압기 등으로 구성된다. 풍속의 변화에 따라 풍력터빈은 무효전력을 흡수 또는 공급하게 된다. 이러한 무효전력의 변화는 풍력단지가 연계된 기존의 전력계통의 전압에 영향을 미치게 되고 풍력단지의 규모가 클수록 계통에 대한 영향은 커진다. 농형유도발전기는 무효전력을 항상 흡수하게 되므로 안정도에 심각한 문제를 발생시켜 현재는 거의 사용되지 않고 있다. 이중여자유도발전기(DFIG)를 이용한 풍력터빈은 무효전력을 제어하는 능력을 가지고 있지만, 대규모 풍력단지에 연계되는 풍력터빈은 그 수가 매우 많으므로 DFIG을 개별적으로 제어하여 무효전력을 제어하는 것은 불가능하다. 따라서 풍력단지에서는 풍력단지가 전력계통에 연계되는 접속점 모선(POI Bus - Point of Interconnection Bus)의 전압을 제어하기 위해 무효전력 보상장치를 설치하여 전체적인 무효전력을 제어하게 된다. 시간에 따라 풍력터빈의 출력이 변하고 또한 전력계통의 부하의 크기도 변하게 된다. 이러한 변화는 전력계통의 전압에 변동을 주어 전압안정도 문제를 일으키게 되는데 무효전력 보상을 통하여 전력계통의 이러한 전압변동을 최소화할 수 있다.

전력전자기술을 기반으로 하는 STATCOM (Static Synchronous Compensator)은 주어진 용량에 대하여 연속적으로 무효전력을 제어하게 되므로 유지하고자 하는 전압에 맞게 무효전력을 공급 또는 흡수하여 정밀하게 전압을 제어할 수 있다. 기존의 연구들에서는 주로 FACTS 장치만을 이용한 무효전력의 제어 또는 에너지 저장장치를 통한 무효전력의 보상에 관한 연구에 초점을 두었다[4-6].

하지만 STATCOM과 같은 FACTS 장치는 고가의 장비이므로 기존의 무효전력보상장치인 콘덴서와 변압기 탭과의 협조제어를 통하여 무효전력을 제어하는 것이 좀 더 경제적이고 효과적이다. 본 논문에서는 풍력단지가 연계된 전력계통의 전압을 STATCOM과 기존의 무효전력보상장치와의 협조제어를 통하여 부하변화에 대하여 제어하는 방법을 PSSE를 이용하여 구현하고 그 결과를 보인다[7].

2. 본론

2.1 STATCOM과 기존의 조상설비

Fig. 1은 PSSE에서 사용된 FACTS 모델이다. 이 모델은 크게 2가지 부분으로 구성되는데 병렬가지 부분이 무효전력을 발생 또는 흡수하는 STATCOM이고, 직렬가지는 선로의 유효전력과 무효전력을 제어하는 부분으로 이 두 부분을 모두 사용하면 UPFC (Unified Power Flow Controller)를 구성하게 된다. STACOM 동작을 하기 위해서는 전력조류 입력 데이터에서 직렬가지에 해당되는 부분의 데이터를 모두 0으로 설정하면 된다.

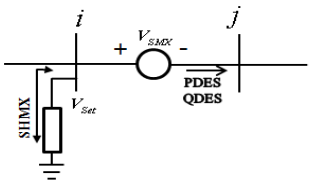


Fig. 1. FACTS model of PSSE

Fig. 1의 V_{set}값을 지정하면 이 전압을 유지하기 위해서 STATCOM은 무효전력을 흡수 또는 공급하게 된다. 흡수되는 무효전력을 양의 값으로 정한다. FACTS 장치를 포함한 전력조류계산 식은 등가회로를 통하여 유도되고 PSSE에서 구현된다[8].

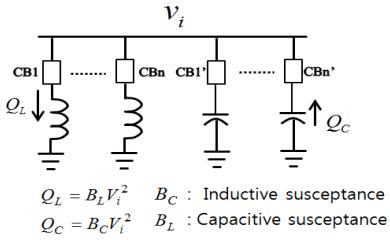


Fig. 2. Switched-Shunt model of PSSE

Fig. 2는 PSSE의 Switched-shunt 모델을 나타낸 것이다. 차단기 CB1 … CBn 의 동작에 따라 모선에서 무효전력을 흡수하게 되고 또한 차단기 CB1′ … CBn′ 의 동작에 따라 모선에 무효전력을 공급하게 된다. 즉 차단기 동작의 조합에 의하여 계단식으로 흡수 또는 공급하는 무효전력량이 결정된다.

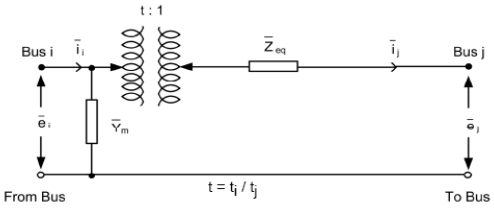


Fig. 3. Tap Changing Transformer model of PSSE

Fig. 3은 PSSE의 탭변환 변압기를 나타낸 것이다. 변압기의 1차권선과 2차권선의 비 t를 변경하여 전압을 변경한다.

2.2 STATCOM과 조상설비의 전압제어

기존의 전력계통에 풍력단지를 연계시키면 풍력단지와 전력계통을 연결하는 선로에 큰 무효전력 손실이 발생하게 되고, 접속점 POI 모선의 전압은 접속 전에 비하여 낮아진다. 무효전력을 보상하기 위하여 풍력단지의 개별 풍력발전기를 제어하는 것은 불가능하므로 POI 모선에 STATCOM과 기존의 조상설비의 협조를 통하여 무효전력을 보상하여 전압을 제어하는 방법을 제시한다. 전압을 제어하기 위한 STATCOM과 조상설비간의 협조제어 방법은 아래와 같은 순서에 의해서 모의를 진행한다.

① POI 모선의 유지 목표전압을 설정한다.

② 고속으로 동작하는 STATCOM 먼저 목표전압을 제어하기 위해 동작한다.

③ STATCOM 공급할 수 있는 무효전력의 한계를 벗어나면, Fig. 2의 차단기 CB1 … CBn 와 CB1′ … CBn′의 동작을 조합하여 무효전력을 공급한다. 즉 차단기 CB1 … CBn 중에서 닫혀 있는 차단기는 순차적으로 개방시키고, 차단기 CB1′ … CBn′ 중에서 열려있는 차단기를 순차적으로 닫는다. 이 동작을 목표전압에 도달하거나 또는 Switched-Shunt의 한계용량에 도달할 때까지 진행한다.

④ STATCOM 흡수할 수 있는 무효전력의 한계를 벗어나면, Fig. 2의 차단기 CB1 … CBn 와 CB1′ … CBn′의 동작을 조합하여 무효전력을 흡수한다. 즉 차단기 CB1′ … CBn′ 중에서 닫혀 있는 차단기는 순차적으로 개방시키고, 차단기 CB1 … CBn 중에서 열려있는 차단기를 순차적으로 닫는다. 이 동작을 목표전압에 도달하거나 또는 Switched-Shunt의 한계용량에 도달할 때까지 진행한다.

⑤ STATCOM과 Switched-Shunt 모두가 한계 용량에 도달하고도 목표전압에 도달하지 못하면 변압기의 탭을 동작시킨다.

⑥ 변압기의 탭이 동작 한계에 도달하고도 목표전압에 도달하지 못하면 POI 모선의 목표전압을 재설정하고 단계 ①로 가서 위의 과정을 반복한다.

위에서 설명한 6단계의 협조제어 알고리즘은 전력조류계산을 기반으로 이루어진다. 즉 각 단계와 단계사이에 전력조류계산을 수행하여 전압을 계산하여 목표전압과 비교하게 된다. PSSE을 이용하여 이것을 구현하는 것은 매우 복잡하다. 하지만 PSSE는 Python 프로그래밍 언어와 인터페이스를 제공하고 있다. 즉 Python 프로그램에서 PSSE의 관련기능을 함수처럼 불러 사용하는 것이 가능하다. 본 논문은 Python과 PSSE의 인터페이스를 이용하여 협조제어 알고리즘을 구현하였다.

3. 사례연구

3.1 테스트 시스템

Fig. 4는 본 논문에서 사용한 IEEE 14 Bus Test System이다[9].

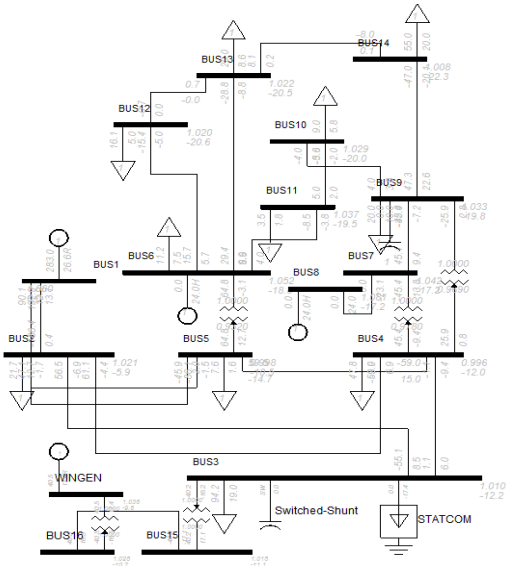


Fig. 4. Modified IEEE 14Bus Test System

시스템에서 슬랙모선은 BUS1이고 동기발전기 2기(Bus1, Bus2)가 연결되어 총발전량은 272.MW이고, 부하는 259MW이지만 사례연구를 위하여 원래의 시스템의 일부 선로 및 부하 데이터를 수정하여 총발전량은 323.5MW, 부하는 306.1MW으로 변경한다. BUS3에 풍력단지를 연계선로를 이용하여 연결한다. 이때 BUS2에 설치되어 있던 40MW용량의 동기발전기를 제거하고

BUS3에 연계된 풍력단지가 40.5MW의 전력을 공급하도록 한다.

3.2 부하변동률 적용

풍력단지의 연계에 의한 모선전압의 변동과 더불어 부하의 시간에 대한 변화를 적용하여 전압제어를 수행한다. Fig. 5는 본 논문에서 적용한 부하변동률이다. 이것은 전력거래소에서 제시하는 일부하 변동률을 참고하여 임의로 구성한 것이다. 변동률 1은 현재 부하크기를 의미한다. 24시간동안 현재 부하크기에서 최대 25.64%감소하거나 최대 16.7%증가한다.

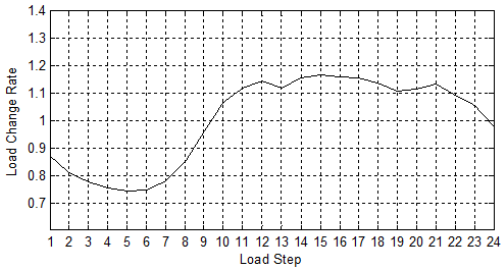


Fig. 5. Load Change Rate

3.3 풍력단지가 연계된 경우의 전압제어

Fig. 4에서 모선 BUS3에 풍력단지를 연계하기 위하여 추가된 모선은 BUS15, BUS16 그리고 WINGEN 모선이다. WINGEN모선에 40.5MW용량의 풍력단지가 연결되어 있다. 이 용량은 1.5MW 풍력발전기 27대가 연결되어 발생시키는 출력이다. 풍력단지가 연결되기 전의 BUS3의 전압은 1.01pu이지만 풍력단지를 연계하면 0.98pu까지 전압이 떨어진다. 연계전의 전압으로 상승시키기 위해 BUS3에 용량 ±20MVA의 STATCOM과 용량 ±10MVA의 Switched-Shunt를 연결하고 BUS3과 BUS15에 연결된 변압기의 탭비는 0.925에서 1.075까지 0.00625스텝으로 움직인다. STATCOM용량만으로 풍력단지 연계전의 전압을 회복할 수 있지만 Fig. 5의 부하변동률에 적용하면 BUS3의 전압을 풍력단지 연계전의 전압으로 회복시키지 못한다. BUS3의 전압을 부하변동전의 전압으로 최대한 유지시키면 나머지 모선의 전압의 변동를 최소화시킬 수 있다. Fig. 6은 풍력단지 접속점 모선인 BUS3의 전압을 제어하지 않은 경우의 부하변동에 따른 중요 모선의 전압변화를 나타낸 것이다. 부하 변동률이 1보다 작아 부하가 감소하는 구간에서는 전압이 상승하고, 부하변동률이 1보다 커서 부하가 증가하는 구간에서는 전압이 강하한다. Load Step 0은 부하변동률을 적용하기 전의 현재 부하를 의미한다. 부하가 감소하는 구간에서는 BUS3의 전압은 풍력단지가 연계되기 전의 전압 1.01pu에 비하여 최대 0.0156pu 증가하고, 부하가 증가하는 구간에서는 BUS3의 전압은 최대 0.0844pu 감소한다. 동기발전기가 연결된 슬랙 모선인 BUS1에 직접 연결된 BUS2의 전압변동이 가장 작고, 나머지 모선은 전압이 0.95pu 즉 정격 전압의 95%이하로 강하하는 구간이 존재한다. BUS6은 동기조상기의 전압제어로 부하가 감소하는 구간에서는 전압이 제어가 되지만 부하가 증가하는 구간에서는 큰 폭으로 전압이 강하한다.

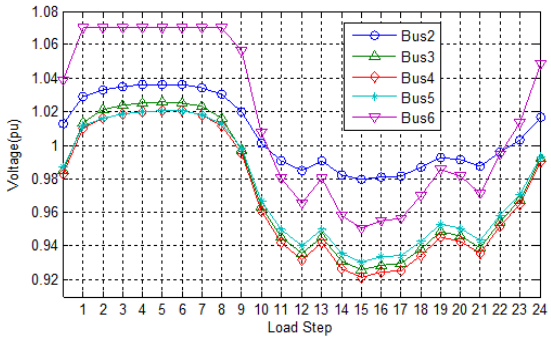
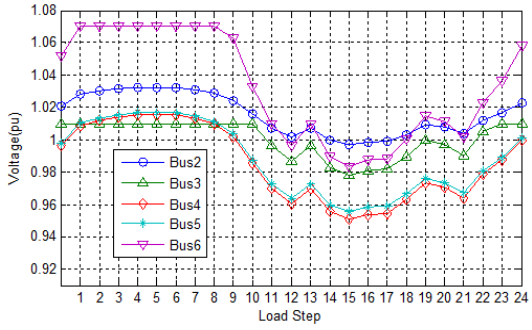
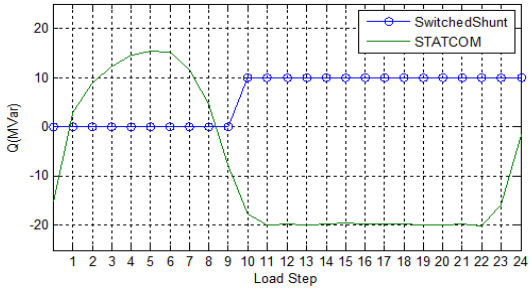


Fig. 6. Bus Voltage Deviation without Voltage Control of BUS3

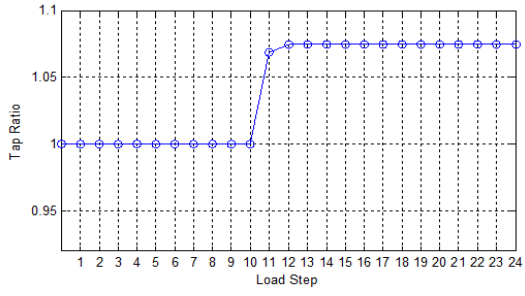
Fig. 7은 2.2절에서 제안한 STATCOM과 기존의 조상설비간의 협조제어 방법을 적용했을 때의 부하변동에 따른 중요 모선의 전압변화를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 부하가 감소하는 구간에서는 STA- TCOM이 무효전력을 흡수하여 BUS3은 목표전압 1.01을 유지하고 부하가 초기의 부하보다 증가하는 Load Step10에서는 STATCOM용량만으로 불충분하여 Switched-Shunt가 한계 용량까지 동작하여 목표 전압을 유지한다. Load Step11에서부터 변압기의 탭이 동작하지만 Load Step 12에서 바로 탭의 최대 동작한계에 도달하여 목표전압을 벗어나 최대 0.0318pu 강하한다. 하지만 이 전압 변동 폭은 Fig. 6의 경우보다 대폭 줄어든 수치이다. 또한 BUS3의 전압이 목표전압으로 제어되는 구간에서 나머지 모선의 전압도 작은 폭의 변동만을 보이며 잘 유지된다. 부하가 증가하여 목표전압을 유지 못하는 구간에서도 나머지 모선의 전압은 큰 폭으로 강하하지 않고 정격전압의 95%이상의 전압을 유지하게 된다.



(a)

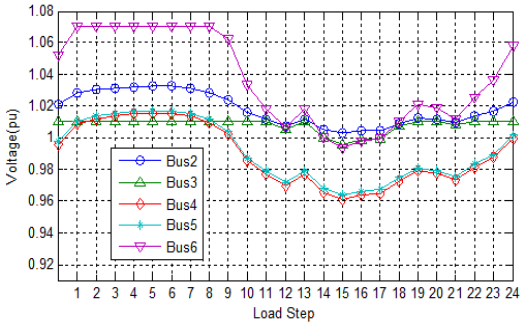


(b)

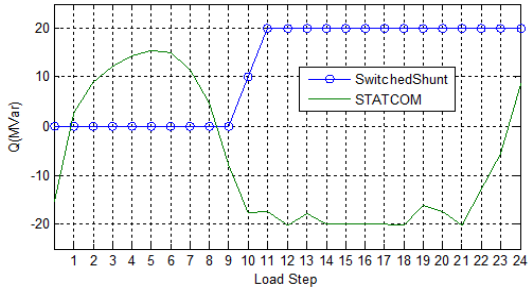


(c)

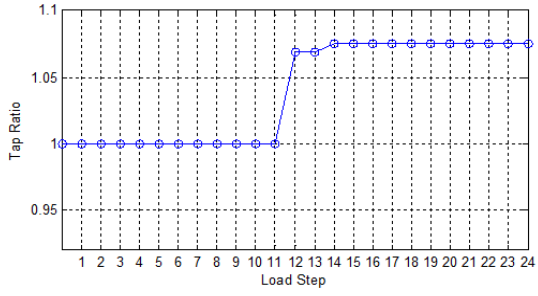
Fig. 7. Bus Voltage Deviation with Voltage Control of BUS3



(a)



(b)

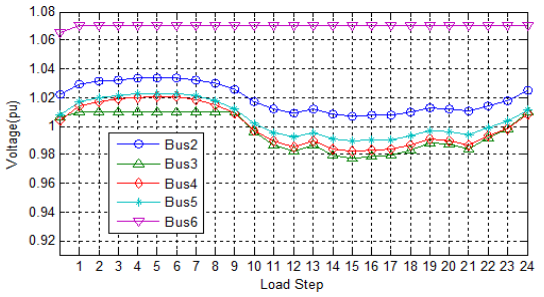


(c)

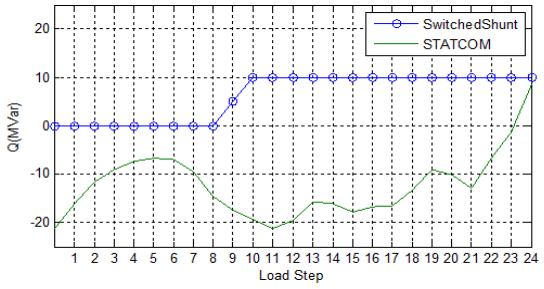
Fig. 8. Bus Voltage Deviation with Voltage Control o: BUS3(Switched-Shunt = 20MVA)

Fig. 8은 Switched-Shunt의 용량을 20MVA으로 증가시킨 경우의 결과이다. 각 모선의 전압 변동폭은 Fig. 7의 경우에 비하여 작아진다. 부하가 증가하는 구간에서의 BUS3의 전압은 목표전압에 대하여 최대 0.0141pu 강하하여 Fig. 7의 경우의 전압강하량의 44%이다. 나머지 모선의 전압은 모두 정격전압의 96%이상을 유지한다. BUS3에 공급되는 무효전력의 증가가 부하변화에 대하여 목표전압의 유지범위를 넓게 만들고 이것이 BUS3과 연결된 모선들의 전압강하를 개선시킴을 알 수 있다.

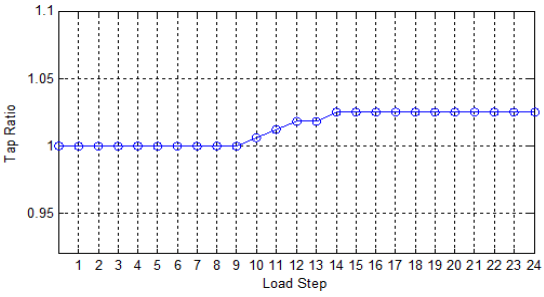
Fig. 9는 BUS6에 풍력단지가 연계된 경우의 전압 변동을 나타낸 결과이다. Fig. 9의 결과를 보면 전압의 변동은 Fig. 7보다 작고, 조상설비의 용량이 더 큰 경우인 Fig. 8의 결과보다 오히려 더 변동이 작다. 이것은 제어대상이 되는 BUS6이 BUS3보다 계통의 중심에 위치하여 부하 변동에 대하여 무효전력을 부하모선으로 더 잘 전달하기 때문이다. 또한 변압기 탭의 동작 횟수도 줄어든다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Bus Voltage Deviation with Voltage Control of BUS6

탭의 변환은 기계적 스위칭 동작이므로 잦은 스위칭은 변압기에 손상을 줄 수 있어 스위칭 횟수는 작은 것이 바람직하다. STATCOM의 동작에서 부하가 증가하는 구간에서 무효전력 공급여유가 있는 구간이 넓다. 또한 변압기 탭이 한계에 도달하지 않아 동작여유가 있으므로 임의로 탭을 증가시켜 STATCOM의 무효전력 공급여유를 더 확보할 수 있다. 선로사고와 같은 긴급한 상황에서 과도안정도를 유지하려면 순간적으로 많은 무효전력이 필요한데 STATCOM의 순동무효전력을 많이 확보할수록 과도안정도가 높아진다. Fig. 8의 모의조건처럼 Switched-Shunt의 용량을 20MVA으로 증가시키면 변압기 탭의 스위칭 횟수는 더 줄어들고 STATCOM의 순동무효전력의 용량도 더 증가하는 결과를 가져온다.

4. 결론

본 논문은 기존의 전력계통에 풍력단지가 연계되는 경우 발생할 수 있는 전압안정도를 높이는 방법을 모의하였다. 전력계통과 풍력단지가 연계되는 접속점 모선에 STATCOM과 기존의 조성설비간의 협조제어 방법을 이용하여 24시간의 부하변동에 대한 전압을 제어한 결과를 보였다. 테스트 시스템에 적용하여 모의한 결과 정상상태에서 제어 모선의 전압강하는 60%이상 개선되었고 제어 모선과 연결된 부하 모선의 전압도 정격의 95%이상을 유지하였다. 같은 용량의 STATCOM에 대하여 조상설비의 용량증가는 전압변동을 더욱 작게 만들 수 있다. 또한 부하 중심에 가까운 위치에 풍력단지를 연계하고 제안한 방법으로 전압을 제어하면 전압안정도는 물론 선로사고와 같은 긴급한 상황에 대처할 수 있는 순동무효전력의 확보도 가능하다.

References

[1] Global Wind Energy Council(GWEC), "Global Wind Energy Outlook 2014", Oct. 2014, http://www.gwec.net/publications/global-wind-energy-outlook

[2] Rolf Grünbaum, "Voltage and Power Quality Control in Wind Power Application Means of Dynamic Compensation", *Technical Report*, ABB Power, May, 1999.

[3] N.K. Roy, H.R. Pota and M.J. Hossain "Reactive Power Management of Distribution Networks with Wind Generation for Improving Voltage Stability", *Renewable Energy*, Vol. 58, pp 85-94, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.030

[4] Saeed Amini, Md. Taakoli and Amin Hajizadeh, “Reactive Power Compensation In Wind Power Plant Using SVC and STATCOM,” *International Journal of Emerging Sciece and Engineering*, Vol. 2, Issue2, pp 18-21, 2014.

[5] A.K. Srivastava, A.A. Kumar and N.N. Schilz, “Impact of Distributed Generation with Energy Storage Devices on the Elextric Grid,” *IEEE Systems Journal*, Vol. 6, No. 1, pp 110-117, 2012.

DOI: http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2011.2163013

[6] E. Muljadi, and R. Yinger, “Energy Storage and Reactive Power Compensator in a Large Wind Farm,” *AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,* pp 1-10, 2004.
DOI: http://dx.doi.org/10.2514/6.2004-352

[7] "PSSE-32 Program Application Guide Vol. 1", Shaw Power Technologies Inc.

[8] Fuerte-Esquivel C.R. and Acha E. “Newton- Raphson Algorithm for the Reliable Solution of Large Power Networks with Embedded FACTS Devices,” *IEE Proc.-Gener. Trans. Distrib.*, Vol 143, No.5, pp 447-454, 1996.

[9] “Power Systems Test Case Archive - IEEE 14 Bus Power Flow Test Cases”, https://www.ee.washington.edu/research/pstca/

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 선박전기과 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