

풍력터빈 발전기가 연계된 전력계통에서 에너지저장시스템이 과도안정도에 미치는 영향

서규석
거제대학교 전기공학과

Transient Stability Enhancement of Power System by Using Energy Storage System

Gyu-Seok Seo
Dept. of Electrical Engineering, Koje College

요 약 전력계통의 과도안정도를 향상시키기 위한 종래의 방법은 STATCOM(Static Synchronous Compensator), SVC(Static Var Compensator)와 같은 무효전력 보상장치를 이용하는 것이다. 하지만 무효전력 보상장치에 기반한 전통적인 방법은 대형 전동기의 트립에 의한 급격한 전압붕괴를 막을 수 없다. 반면에 에너지 저장시스템은 무효전력과 유효전력을 동시에 공급할 수 있다. 전력계통의 사고 시 유효전력의 빠른 공급은 과도안정도 향상에 매우 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 대형 전동기부하와 같은 큰 동적부하를 가지는 전력계통에 대하여 에너지저장시스템을 사용한 과도안정도 향상방법을 제시한다. 또한 유효전력과 무효전력을 보상하는 방법이 기존의 방법보다 더 효과적으로 과도안정도를 향상시킴을 확인하였다.

Abstract A conventional method to improve transient stability in power system is the use of reactive power compensation devices such as STATCOM and SVC. However, this traditional method cannot prevent a rapid voltage collapse brought on by motors stalling due to system fault. On the other hand, ESS(Energy Storage System) provides fast-acting, flexible reactive and active power control. The fast active power compensation with energy storage system plays a significant role in transient stability enhancement after a major fault of power system. In this paper, transient stability enhancement method by using energy storage system is proposed for the power system including a dynamic load such as large motor. The effectiveness of energy storage system compared to conventional devices in enhancing transient stability of power system is presented. The results of simulations show that the simultaneous injection of active and reactive power can enhance more effectively transient stability.

Keywords : Active Power, Energy Storage System, Reactive Power, STATCOM, SVC

1. 서론

최근 화석에너지의 고갈과 환경문제에 대한 중요성이 언급되면서 태양광, 바이오, 풍력과 같은 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다[1]. 신재생에너지를 이용한 발전의 전력계통에 대한 연계는 전통적인 동기발전기와

는 다른 특성을 가진다. 전기는 생산과 동시에 소비되는 특성을 가지고 있으므로 변동하는 부하에 맞게 적절한 양의 전력이 항상 생산되어야 한다. 신재생 에너지를 이용한 발전 설비들은 부하의 변동에 따르는 공급전력을 연속적이고 유연하게 제어할 수 없다. 이러한 상황에서 에너지저장시스템 기술은 전력계통의 안정화에 아주 중

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

Tel: +82-10-3828-2448 email: gsseo@koje.ac.kr

Received March 6, 2019

Revised April 8, 2019

Accepted June 7, 2019

Published June 30, 2019

요한 역할을 한다. 전력 사용량이 적을 때 생산된 전력을 에너지저장시스템에 저장하고 최대수요전력이 발생하는 시간에 저장된 전력을 공급함으로써 발전단가가 비싼 발전설비를 대체하는 효과가 있어 비용을 절감할 수 있다. 또한 전력계통의 사고로 인한 공급전력의 부족은 주파수와 전압의 변동을 유발하는데 이러한 문제는 에너지저장시스템을 이용하면 제어가능하다. 에너지저장시스템은 유효전력과 무효전력을 독립적으로 공급이 가능하여 전력계통의 과도안정도 향상에도 중요한 역할을 할 수 있다[2,3]. 본 논문은 신재생에너지를 이용한 발전시스템인 풍력터빈 발전기가 연계된 전력계통에 있어서 에너지저장시스템이 과도안정도에 미치는 영향을 해석한다.

풍력터빈 발전기의 전력계통에 대한 연계가 지속적으로 증가하고 있다. 풍력터빈 발전기의 증가는 전력계통의 안정도를 약화시키는 결과를 가져온다. 풍력터빈 발전기는 무효전력의 용량이 작고 풍력단지와 접속모선 사이의 케이블의 큰 리액턴스는 선로의 전압강하를 증가시켜 전압안정도와 과도안정도에 나쁜 영향을 미친다. 특히 전동기와 같은 동적인 부하가 집중된 모선을 연결하는 선로에 사고가 발생하면 과도안정도의 여유도는 매우 낮아진다. 이에 대응하기 위하여 SVC(Static Var Compensator), STATCOM (Static Synchronous Compensator)과 같은 FACTS(Flexible AC Transmission Systems)제어기가 많이 사용되고 있다[4,5].

기존의 에너지저장시스템의 주된 역할은 날씨의 변화에 따른 신재생발전의 불연속적인 출력으로 인한 문제를 제어하거나 첨두부하를 대비한 전력의 저장이다. 부하 모선에 대형 전동기가 집중적으로 포함되어 있는 전력계통에 풍력터빈 발전기의 연계가 증가하면 선로사고와 같은 긴급한 상황에서 전력계통의 과도안정도는 매우 취약하게 된다. 본 논문에서는 이러한 과도안정도에 취약한 전력계통에서 에너지저장시스템의 과도안정도에 미치는 영향을 분석한다.

2. 본론

2.1 풍력터빈 발전기

대부분의 풍력터빈은 농형유도발전기, 이중여자방식의 유도발전기 그리고 영구자석형 동기발전기 시스템 중 하나를 사용한다. 고정속도 풍력터빈은 농형유도발전기를 사용하는데 유효전력과 무효전력의 제어가 힘들어 출력의 변동이 심하다. 반면 가변속도 풍력터빈은 이중여자

방식의 유도발전기를 사용하여 넓은 범위의 풍속에 대해 높은 출력을 발생시킬 수 있도록 제어가 가능하다. 전력계통 해석틀인 PSSE [6]는 4가지 타입의 표준화된 풍력발전기를 제공하는데 이중여자방식의 풍력발전기는 타입3이다. 본 논문에서는 테스트시스템 사용된 풍력발전기는 PSSE에서 제공하는 타입3의 발전기를 사용한다.

2.2 에너지저장 시스템

풍력터빈 발전기의 출력 전력은 풍력에너지가 연속적으로 존재하지 않기 때문에 간헐적인 특성을 나타내고 이러한 문제를 해결하기 위한 합리적인 해결방법은 에너지저장시스템(ESS: Energy Storage System)을 사용하는 것이다. 하지만 최근에 ESS는 전력계통의 과도안정도를 개선시키고 전압변동을 극복하기 위한 용도로 개발되어 사용이 되기도 한다. 배터리를 사용한 에너지저장시스템은 전력계통에서 신속한 유효전력의 보상을 위한 검증된 기술의 하나이다. 본 논문에서 사용한 에너지저장시스템은 PSSE에 내장된 CBEST 배터리 모델이다. 이 모델은 배터리의 동적인 특성을 모의할 수 있도록 개발되었고 배터리의 단자전압을 조정하여 전력의 입출력의 크기를 제어한다. 또한 컨버터를 이용하여 유효전력과 무효전력을 독립적으로 공급할 수 있는 기능을 가진다. 본 논문에서는 전동기 부하가 집중된 모선에 ESS를 설치하여 유효전력과 무효전력의 보상이 과도안정도에 미치는 영향을 모의한다.

2.3 모의 시스템

본 논문에서는 ESS가 전력계통의 과도 안정도에 미치는 영향을 모의하기 위하여 Fig.1의 모의 시스템을 사용한다.

Fig.1의 시스템은 풍력터빈발전기와 ESS가 없는 IEEE 14 bus test system[7]을 논문의 목적에 맞게 일부 선로 데이터와 모선의 부하량을 변경하고 풍력터빈발전기와 ESS를 추가하였다. 모선14(BUS14)의 부하는 55MW으로 가장 큰 변화를 주었다. 또한 각 모선의 부하는 대형 유도전동기의 비가 30%, 소형 유도전동기의 비가 20%가 되도록 수정하였다. 즉 시스템이 사고에 민감하게 반응하도록 재구성하였다. 원 시스템의 모선 1(BUS1)은 슬랙 모선으로 용량이 매우 큰 동기발전기가 연결되어 있다. BUS2는 40MW용량의 동기발전기가 연결되어 있고 나머지 일부 모선에 동기조상기가 연결되어 있는데 논문의 목적에 맞게 BUS2, BUS3 그리고 BUS8

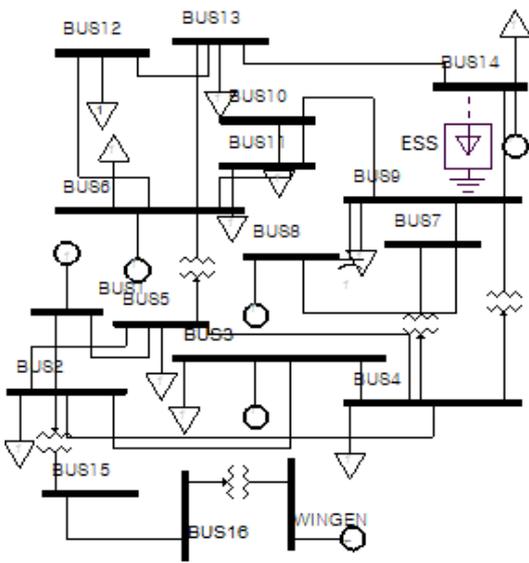


Fig. 1. Modification of IEEE 14Bus test System

등에 풍력터빈 발전기를 연결하고 BUS14에 ESS를 연결한다. BUS14와 연결된 선로에 3상 단락사고를 가정하고 이 선로를 제거하여 과도안정도를 모의한다. 과도안정도의 영향은ESS가 설치되기 전후와 ESS가 유효전력과 무효전력을 공급하는 방법에 따라 시스템의 임계고장제거 시간 CCT(Critical Clearing Time)[8]과 전동기가 집중된 모선의 전압회복정도를 기준으로 파악한다.

2.4 ESS의 과도안정도영향 모의

모의 시스템에서 모선의 부하는 변경된 부하를 사용하고 BUS1과 BUS2의 발전기는 원 시스템과 마찬가지로 동기발전기를 연결한 상태에서 BUS13과 BUS14사이의 선로의 3상 단락사고를 가정한 과도안정도 모의의 CCT는 0.08s, BUS14의 모선의 사고제거 후의 회복전압은 0.78pu로 매우 낮아 전동기가 트립될 가능성이 매우 높아 시스템이 안정하다고 말할 수 없다. 동기발전기를 대신하여 풍력터빈발전기가 연계되는 경우 CCT와 사고제거후의 모선의 전압은 더 낮아질 수 있다.

2.4.1 BUS2에 풍력터빈 발전기가 연결된 경우

모선2(BUS2)에 동기발전기 대신 40MW용량의 풍력터빈 발전기를 연결하여 BUS13과 BUS14사이의 선로의 3상 단락사고의 CCT는 0.06s이고 사고의 가장 큰 영향을 받는 BUS14의 회복전압은 0.77pu으로 동기발전기가 연결된 경우보다 낮아서 과도안정도 여유는 더 낮아

진다. 따라서 과도안정도 향상 대책이 필요하다. Fig.2는 고장제거 시간이 0.06s일 때의 주요모선의 전압응답을 나타낸 것이다. BUS14의 전압이 가장 낮게 나타난다. 시스템의 사고에 대하여 BUS14가 가장 취약하다.

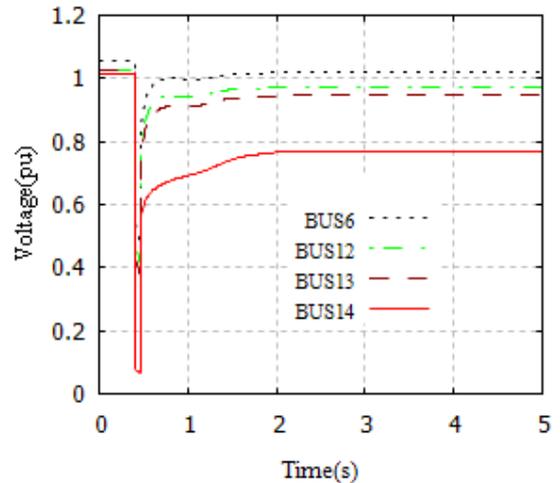


Fig. 2. Voltage Response with Wind-Turbine Generator at the BUS2

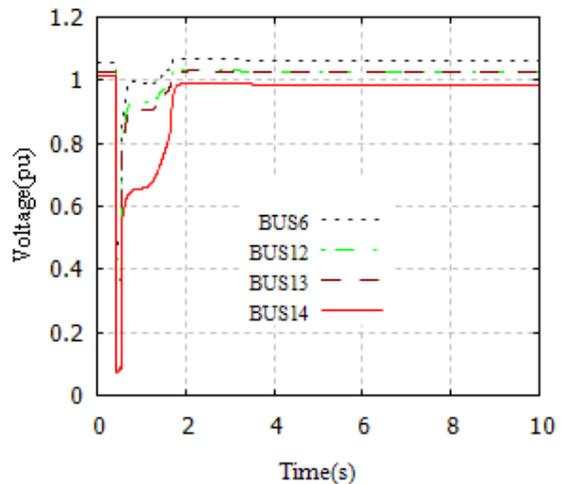


Fig. 3. Voltage Response with Wind-Turbine Generator at the BUS2 and ESS 100% Active Power Supply at the BUS14

사고에 가장 취약한 모선 BUS14에 ESS를 연결하면 과도안정도 여유를 높일 수 있다. 용량 27MVA의 ESS를 BUS14에 연결하고 사고제거 후에 100% 유효전력으로 공급하면 CCT는 0.12s가 되고 취약 모선인 BUS14의

전압은 0.98pu로 크게 상승한다. Fig.3은 고장제거 시간이 0.12s일 때의 주요모선의 전압응답을 나타낸 것이다. ESS가 제공하는 유효전력을 ESS 용량의 40%~60%의 범위로 제한시키고 무효전력이 같이 공급되게 하면 CCT는 0.14s로 증가하고 BUS14의 전압은 0.99pu가 된다. ESS 용량의 40%~60%범위를 벗어나는 경우는 100%으로 공급하는 경우와 같거나 오히려 좋지 못한 결과를 보였다. 같은 용량의 SVC(Static Var Compensator)를 이용하여 무효전력만을 보상하는 경우는 CCT가 0.1s 이고 BUS14의 전압은 0.91pu까지 회복된다. Fig.4는 고장제거 시간이 0.1s일 때의 전압응답을 나타낸다. Fig.3과 Fig.4의 결과를 비교하면 기존의 무효전력 보상장치를 이용한 보상에 비하여 ESS를 이용한 보상이 과도안정도 향상에 더 효과적임을 알 수 있다. 또한 ESS의 유효전력과 무효전력을 동시에 공급하는 것이 더 효과적임을 알 수 있다.

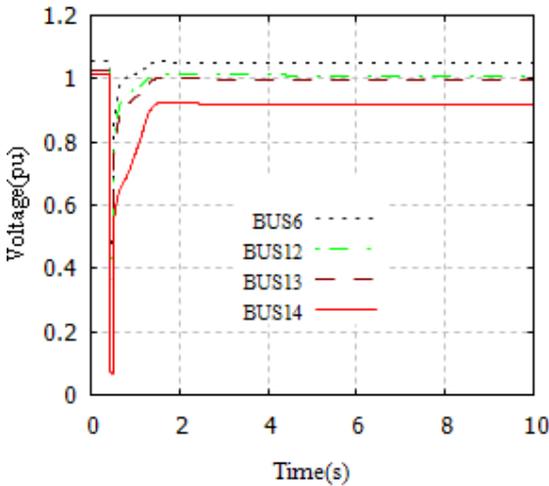


Fig. 4. Voltage Response with SVC at the BUS14

2.4.2 BUS3에 풍력터빈 발전기가 연결된 경우

BUS3에 용량 40MW의 풍력터빈 발전기를 연결한 상태에서 BUS13과 BUS14사이의 선로의 3상 단락사고에 대한 CCT는 0.05s이고 BUS14의 회복전압은 0.77pu가 된다. 과도안정도 여유가 매우 낮다. Fig.5는 고장제거 시간이 0.05s일 때의 전압응답을 나타낸 것이다.

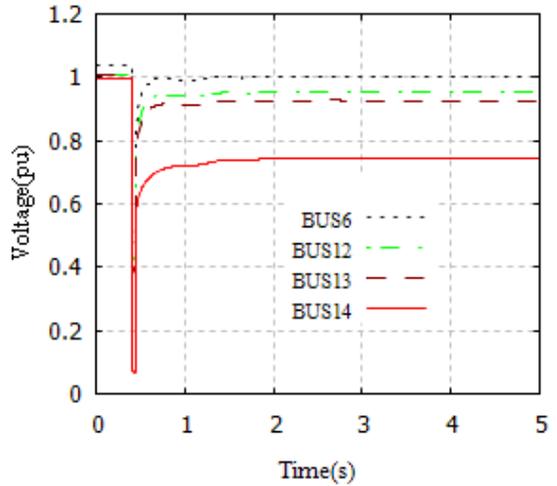


Fig. 5. Voltage Response with Wind-Turbine Generator at the BUS3

과도안정도 여유를 높이기 위하여 용량 27MVA의 ESS를 이용하여 BUS14를 유효전력 100%로 보상하면 CCT는 0.11s, BUS14의 전압은 0.97pu로 높아진다. Fig.6은 고장제거 시간이 0.11s일 때의 전압응답을 나타낸 것이다.

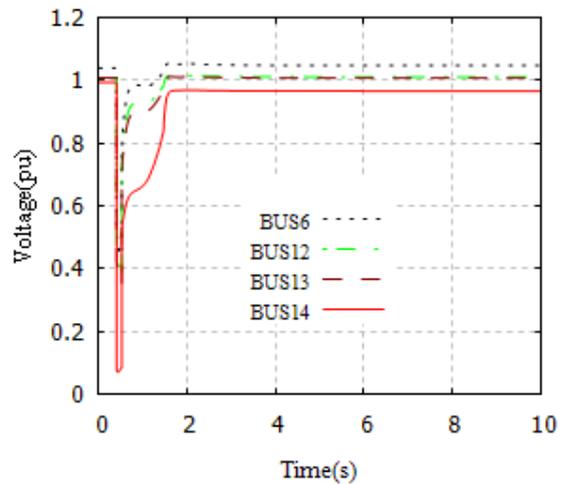


Fig. 6. Voltage Response with Wind-Turbine Generator at the BUS3 and ESS 100% Active Power Supply at the BUS14

반면 ESS가 보상하는 유효전력을 40%~ 60%의 범위 내에서 제한하고 무효전력을 같이 공급하면 CCT는 0.13s, BUS14의 전압은 0.97pu가 된다. 회복전압은 같

지만 CCT가 더 커진다. 즉 과도안정도 여유가 높아진다. 이 범위 밖의 용량에 대해서는 100%로 공급하는 경우와 같거나 오히려 좋지 못한 결과를 보였다. 같은 용량의 SVC를 이용하여 무효전력만을 보상하는 경우는 CCT가 0.1s 이고 BUS14의 전압은 0.89pu까지 회복된다. 즉 BUS2에 풍력터빈 발전기가 연결된 경우와 마찬가지로 기존의 보상장치보다 ESS가 더 효과적으로 안정도를 향상시킴을 알 수있다.

2.4.3 BUS8에 풍력터빈 발전기가 연결된 경우

BUS8에 용량 40MW의 풍력터빈 발전기를 연결한 상태에서 BUS13과 BUS14사이의 선로의 3상 단락사고에 대한 CCT는 0.06s이고 BUS14의 회복전압은 0.75pu가 된다. Fig.7은 고장제거시간이 0.06s일 때의 전압응답을 나타낸 것이다.

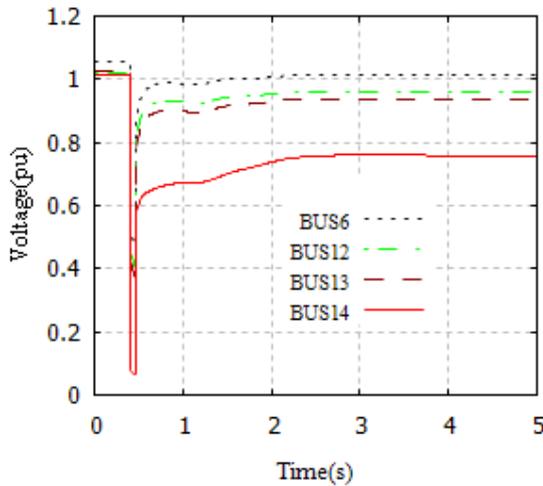


Fig. 7. Voltage Response with Wind-Turbine Generator at the BUS8

BUS14에서 용량 27MVA의 ESS를 이용하여 유효전력 100% 출력으로 보상하면 CCT는 0.12s, BUS14의 전압은 0.98pu로 높아진다. ESS의 유효전력을 40%~60%의 범위내에서 제한하고 무효전력을 같이 공급하면 CCT는 0.17s, BUS14의 전압은 0.99pu가 된다. 이 범위 밖의 용량에 대해서는 100%로 공급하는 경우와 같거나 오히려 좋지 못한 결과를 보였다. 앞의 경우들과 마찬가지로 ESS를 이용하여 유효전력과 무효전력을 동시에 보상하는 것이 더 좋은 보상결과를 나타냄을 알 수 있다. Fig.8은 ESS가 유효전력을 용량의 60%로 제한하고

무효전력과 같이 보상할 때의 전압응답이다. 반면 동일 용량의 SVC로만 보상하는 경우의 CCT는 0.12s, BUS14의 회복전압은 0.94pu이다. CCT는 100% 유효전력으로 보상하는 ESS의 경우와 같지만 회복전압의 크기에서 차이가 난다.

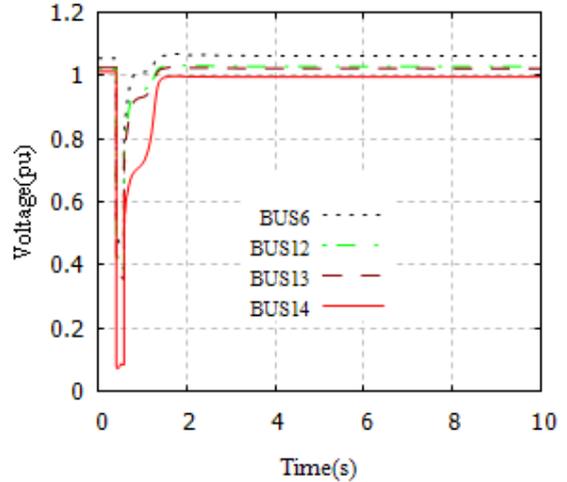


Fig. 8. Voltage Response with Wind-Turbine Generator at the BUS8 and ESS 60% Active Power Supply at the BUS14

Table1은 3가지 경우에 대한 모의결과를 요약하여 제시한 것이다. WTG는 풍력터빈 발전기가 연결된 모션을 나타낸다.

Table 1. Simulation Results

WTG	Value	No ESS	With ESS (P=100%)	With ESS (40%~60%)	With SVC
BUS2	CCT	0.06s	0.12s	0.14s	0.1s
	Voltage (BUS14)	0.77pu	0.98pu	0.99pu	0.91pu
BUS3	CCT	0.05s	0.11s	0.13s	0.1s
	Voltage (BUS14)	0.77pu	0.97pu	0.97pu	0.89pu
BUS8	CCT	0.06s	0.12s	0.17s	0.12s
	Voltage (BUS14)	0.75pu	0.98pu	0.99pu	0.94pu

Table1의 모든 경우에서 ESS가 유효전력과 무효전력을 동시에 공급할 때 과도안정도의 여유가 높다.

이것은 선로가 끊어지는 사고가 발생하면 부하에 필요한 유효전력과 무효전력이 발전기로부터 원활하게 공급되는 못하는 것을 부하모션에서 직접공하기 때문이다.

3. 결론

본 논문은 신재생에너지원으로 각광받고 있는 풍력터빈 발전기가 연계된 전력계통에 있어서 ESS가 과도안정도에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 풍력터빈 발전기가 전력계통에 연계되면 전력계통의 과도안정도를 악화시킨다. 특히 발전기에서 멀리 떨어진 전동기와 같은 동적인 부하가 집중된 모선은 사고에 민감하여 안정도에 악영향을 미친다. ESS는 주로 최대수요전력의 제어하기 위한 발전기의 잉여전력을 저장하는 장치로 사용된다. 본 논문에서는 ESS를 이용하여 부하가 집중된 모선에 연결한 결과 3상 단락사고와 같은 전력계통의 외란에 대하여 모의한 모든 경우에 대하여 ESS보상이 없는 경우보다 ESS보상을 한 경우가 CCT는 2배이상 커졌고, 취약모선의 회복전압은 전동기가 트립될 수 있는 전압에서 정격에 가까운 전압으로 회복되었다. 또한 ESS의 출력을 모두 유효전력으로 공급하는 경우보다 유효전력을 ESS용량의 40%~60%로 제한시키고무효전력을 같이 공급하는 경우가 안정도가 높아짐을 확인하였다. ESS용량의 40%~60%범위를 벗어나는 경우는 100%으로 공급하는 경우와 같거나 오히려 좋지 못한 결과를 보였다.

References

- [1] International Energy Agency, "Renewables", <https://www.iea.org/topics/renewables/>
- [2] A. Chakraborty, S. K. Musunuri, A. K. Srivastava and A. K. Kondabathini, "Integrating STATCOM and Battery Energy Storage System for Power System Transient Stability: A Review and Application", Advance in Power Electronics, Vol. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/676010>
- [3] A. K. Srivastava, A. A. Kumar, and N. N. Schulz "Impact of Distributed Generations with Energy Storage Devices on the Electric Grid", IEEE System's Journal, Vol. 6, NO. 1, March 2012 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2011.2163013>
- [4] X. P. Zhang, C. Rehtanz, and B. Pal, "Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control", Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28241-6>
- [5] Saeed Amini, Md. Taakoli, and Amin Hajizadeh, "Reactive Power Compensation in Wind Power Plant Using SVC and STATCOM", International Journal of Emerging Science and engineering, Vol. 2, Issue2, march 2014.
- [6] "PSSE-32 Program Application Guide Vol. 1", Shaw

Power Technologies Inc.

- [7] "Power Systems Test Case Archive - IEEE 14 Bus Power Flow Test Cases", <https://www.ee.washington.edu/research/pstca/>
- [8] Paul. M. Anderson and A. A. Fouad "Power System Control and Stability", IEEE Press, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310158>

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 전기공학과 교수

<관심분야>

배전시스템 운영 및 제어, 스마트 그리드