

에너지저장시스템을 이용한 전력계통의 과도안정도 향상

서규석
거제대학교 전기공학과

Transient Stability Enhancement of Power System by Using Energy Storage System

Gyu-Seok Seo

Dept. of Electrical Engineering, Koje College

요약 전력계통의 과도안정도를 향상시키기 위해 종래에는 무효전력 보상장치를 설치하는 방법을 주로 사용하였다. 전통적인 무효전력 보상장치 중 SVC(Static Var Compensator), 변압기의 탭 변환기는 값이 싸고 기계적 스위칭으로 동작하여 속도가 느리다는 단점이 있고, 전력전자기술을 바탕으로 하는 STATCOM(Static Synchronous Compensator)은 고속으로 동작할 수 있는 장점이 있어 최근에 각광을 받고 있지만 고가의 장치라는 단점이 있다. 또한, 무효전력 보상장치에 기반한 전통적인 방법은 무효전력만을 공급하여 과도안정도를 향상시키기에 대형 전동기의 트립에 의한 급격한 전압붕괴를 막을 수 없다. 반면에 에너지 저장시스템은 무효전력과 유효전력을 동시에 공급할 수 있다. 즉, 선로사고로 인하여 부하에 유효전력의 공급이 감소하는 것을 ESS를 통한 유효전력을 공급함과 동시에 적절한 무효전력의 공급을 통하여 과도안정도를 향상시킬 수 있다. 전력계통의 사고 시 유효전력의 빠른 공급은 과도안정도 향상에 매우 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 대형 전동기 부하와 같은 큰 동적부하를 가지는 전력계통에 대하여 에너지저장시스템을 사용한 과도안정도 향상방법을 제시한다. 또한, 유효전력과 무효전력을 보상하는 방법이 기존의 방법보다 더 효과적으로 과도안정도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

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

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

1. 서론

최근 지구온난화의 문제, 자원고갈의 문제에 대응하기 위하여 태양광이나 풍력발전과 같은 신재생에너지원의 사용이 각광을 받고 있다. 하지만 신재생 에너지

원을 기존의 전력계통과 연계할 시 높은 투자비, 출력의 변동성의 문제가 발생하고 이러한 문제를 해결하는 방안으로 에너지저장시스템(ESS: Energy Storage System)의 사용이 주목을 받고 있다. 전력계통에 적용되는 ESS의 주된 용도는 전력계통의 목표주파수를 유지하기 위

*Corresponding Author : Gyu-Seok Seo(Koje Univ.)

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

Received September 5, 2017

Revised October 16, 2017

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

한 주파수 조정, 침투부하 저감을 통한 부하의 평준화 그리고 신재생에너지 출력변동율의 최소화 등이다[1]. 또한 ESS는 전력계통의 과도안정도 향상에도 효과적으로 사용이 가능하다[2-3]. 본 논문에서는 전력계통의 과도안정도를 향상시키기 위한 ESS의 제어방법을 제안한다. 전력계통에서 과도안정도를 향상시키는 방법은 무효전력 보상장치를 설치하여 안정도를 향상시키는 방법이 주로 사용된다. 전통적인 무효전력보상장치 중 SVC(Static Var Compensator), 변압기의 탭 변환기는 값이 싸고 기계적 스위칭으로 동작하여 속도가 느리다는 단점이 있고, 전력전자기술을 바탕으로 하는 STATCOM (Static Synchronous Compensator)는 고속으로 동작할 수 있는 장점이 있어 최근에 각광을 받고 있지만 고가의 장치라는 단점이 있다. 이러한 장치들은 과도안정도 향상에 기여할 수 있지만 무효전력만을 공급할 수 있으므로 부하가 집중된 모선에 연결된 선로의 사고 시 유효전력을 공급이 감소하여 과도안정도를 효과적으로 증진시킬 수 없다.

전력계통에 ESS를 적용할 때 가장 큰 장점은 유효전력과 무효전력을 동시에 독립적으로 유연하게 제어할 수 있다는 것이다[4]. 즉 선로사고로 인하여 부하에 유효전력의 공급이 감소하는 것을 ESS를 통한 유효전력의 공급함과 동시에 적절한 무효전력의 공급을 통하여 과도안정도를 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 전동기와 같은 많은 동적 부하를 가지는 모의 시스템을 선정하고 선로 사고를 가정하여 사고제거후의 과도안정도를 향상시키기 위해 ESS를 사용하여 시뮬레이션 한 결과를 제시한다. 본 논문에서 사용한 에너지 저장시스템 모델은 전력계통 해석툴인 PSSE[5]에서 제공하는 ESS모델인 CBEST이고, SVC와 STATCOM모델 또한 PSSE의 라이브러리에 내장된 모델을 사용한다. ESS의 유효전력과 무효전력을 투입량을 제어하는 방법으로 과도안정도를 향상시키는 방법을 제시한다. 기존의 장치를 이용하는 경우와 ESS를 이용하는 경우를 비교하여 유효전력과 무효전력 모두를 보상하는 ESS가 더 효과적으로 과도안정도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

2. 본론

2.1 과도안정도 향상을 위한 설비모델

본 논문에서 사용한 에너지저장시스템(ESS) 모델은 PSSE 라이브러리에 내장된 CBEST모델이다. 이 모델은 배터리의 동적인 특성을 나타내는 미분방정식을 블록선도로 나타낸 것으로 제 1동요 안정도(first-swing stability)를 향상시키기 위해 사용할 수 있다. Fig.1은 CBEST의 블록선도를 나타낸 것이다. 이 모델은 유효전력의 공급이 주목적이지만 무효전력도 동시에 공급이 가능하다.

Fig.1(a)의 P_{AUX} 는 시스템의 주파수 변동을 반영하는 보조신호인데 PSSE의 CHAAUT 모델을 사용한다. Fig.1(b)에 표시된 수식에서 I_{ACMAX} 의 크기에 따라 I_{QMAX} 가 결정되고 CBEST가 공급하는 유효전력과 무효전력의 제한치가 결정된다. CBEST에서 보조신호를 주지 않으면 즉 CHAAUT모델을 연결하지 않으면 유효전력 출력은 없어지고 무효전력 출력만 공급하게 된다.

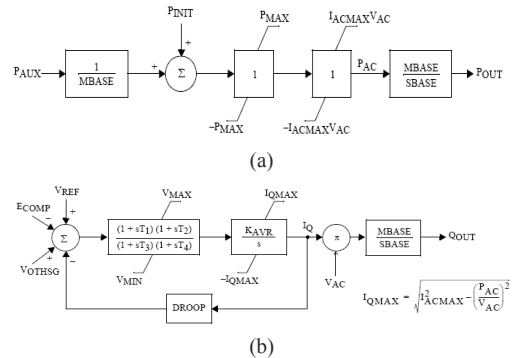


Fig. 1. CBEST block diagram of PSSE (a)Active power path (b)Reactive power path

이것은 STATCOM의 기능과 일치하게 된다. 본 논문에서 사용한 PSSE의 SVC모델은 Switched-Shunt Capacitor를 모델링한 CSSCST이다. SVC가 연결된 모선의 전압이 지정되면 이 전압을 유지하기 위하여 단계별로 설정된 용량만큼의 무효전력이 투입된다.

2.2 테스트 시스템

Fig.2는 본 논문에서 제안한 방법을 모의하기 위하여 사용한 IEEE 14 bus test system[6]이다. ESS를 이용한 과도안정도 향상을 모의하기 위하여 테스트 시스템의 일부 부하의 크기와 선로임피던스를 수정하였다. 각 모선의 부하는 대형 유도전동기의 비가 40%, 소형 유도전동

기의 비가 15%으로 되어 전체 부하중 동적부하의 비를 55%으로 구성하여 전력계통의 사고 시에 과도안정도의 여유도가 낮게 구성한다. 이러한 부하의 모델링은 PSSE의 부하 모델 CLODBL을 이용하면 가능하다. 14번 모선(BUS14)는 발전기에서 가장 멀리 떨어져 있고 동적부하가 집중되어 있어 선로 사고에 가장 민감하다.

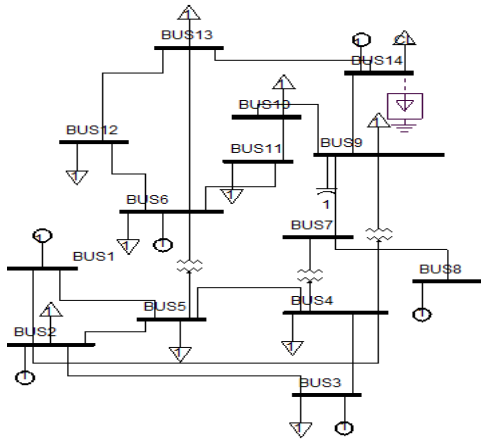


Fig. 2. IEEE 14Bus Test System for PSSE

따라서 과도안정도를 향상을 위한 무효전력보상장치, ESS와 같은 설비들은 BUS14에 설치한다. 과도 안정도의 여유도는 특정 선로에 3상 단락사고를 낸 후 일정 시간 후에 사고를 제거하여 임계고장제거시간 CCT(Critical Clearing Time)[7]을 계산하여 평가한다. BUS9와 BUS14를 연결하는 선로에 사고가 발생한 경우 시스템 전체의 CCT를 결정할 수 있다. 테스트 시스템에서 동기발전기는 BUS1과 BUS2에 설치되어 있고, 동기발전기는 PSSE의 GENROU모델을 사용하고 여자시스템은 IEEET1모델을 그리고 터빈-조속기는 TGOV1 모델을 사용한다. BUS3, BUS6 그리고 BUS8에는 무효전력만 공급하는 동기조상기가 연결되어 있고 터빈-조속기 모델이 없다. PSSE를 사용하여 과도 안정도 향상을 위한 ESS의 제어를 모의할 때 PSSE는 ESS을 발전기로 취급한다.

2.3 과도안정도 향상 모의

2.3.1 보상장치가 없는 경우

사고가 없는 정상적인 상태에서 테스트 시스템의 모든 모선의 부하에는 정상적으로 전력이 공급되고, 그 중

에서 BUS14의 부하는 BUS9와 BUS14사이의 선로에 의해 대부분의 전력을 공급받게 된다. BUS14의 근처에 3상 단락사고가 0.4초의 시각에 발생한다고 가정하고 BUS9와 BUS14사이의 선로를 제거하는 과정을 모의하여 CCT를 구한 결과는 0.04s이다. Fig.3은 이때의 주요 모선의 전압응답을 나타낸 것이다.

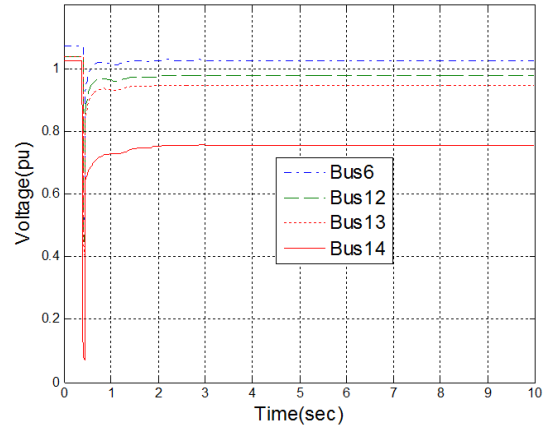


Fig. 3. Voltage Response of Test System Without Control

이 경우의 CCT는 매우 작은 값이고 실제 사고 시에 시스템이 안정도를 회복하지 못할 가능성이 높다. 또한 모선의 전압이 일정한 값으로 회복되지만 과도안정도를 위한 보상장치가 없기 때문에 BUS14의 전압은 매우 낮아 전동기를 트립시킬 수 있어 궁극적으로 시스템의 붕괴로 이어질 수 있다.

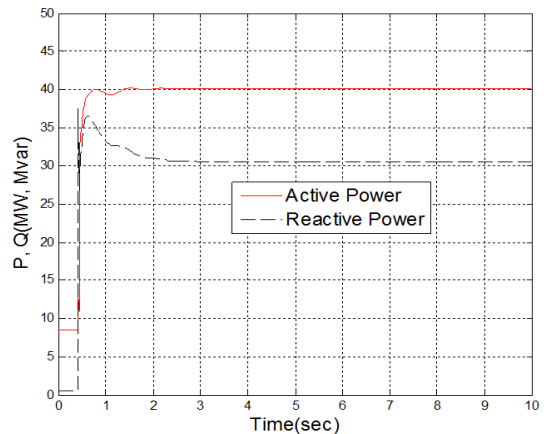


Fig. 4. Active and Reactive Power Flow of Line Between Bus13 and Bus14 Without Control

Fig.4는 BUS13과 BUS14사이에 연결된 선로의 유효전력과 무효전력의 흐름을 나타낸 것인데, 0.4초의 시각에 사고가 발생한 후 사고가 제거되는 과정과 과도상태를 거쳐 수렴한 유효전력과 무효전력의 크기는 사고전보다 크게 증가한다. 이것으로 인하여 사고 후에는 사고전보다 선로에서의 전압강하가 커지고 BUS14의 전압은 크게 감소하게 된다.

2.3.2 SVC를 이용한 보상을 하는 경우

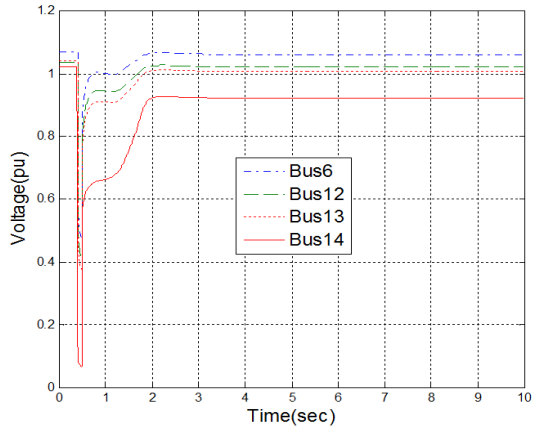


Fig. 5. Voltage Response of Test System With SVC Control

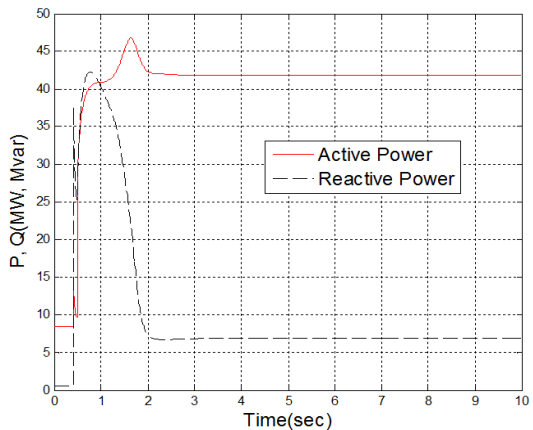


Fig. 6. Active and Reactive Power Flow of Line Between Bus13 and Bus14 With SVC Control

전력계통의 사고에 가장 민감한 BUS14에 20Mvar의 SVC를 설치하여 BUS14의 근처에 3상 단락사고가 0.4초의 시각에 발생한다고 가정하고 BUS9와 BUS14사이의 선로를 제거하는 과정을 모의하여 CCT를 구한 결과

는 0.08s이다. 이 결과는 보상장치가 없는 경우보다 CCT가 0.04s 향상된 결과이다. Fig.5는 고장제거시간인 0.08s일 때의 주요 모선의 전압응답을 나타낸 것이다. 사고가 제거된 후에 과도상태를 지나 수렴한 전압의 크기는 Fig.3의 결과보다 크다.

Fig.6은 BUS13과 BUS14사이에 연결된 선로의 유효전력과 무효전력의 흐름을 나타낸 것인데 SVC에 의해 선로의 무효전력의 흐름이 감소하여 BUS14의 전압상승에 기여한다.

2.3.3 STATCOM을 이용한 보상을 하는 경우

본 논문에서 사용한 CBEST모델은 20MW용량의 배터리를 가지고 있다. 이 모델을 BUS14에 연결한 후 Fig.1에서 보조신호 P_{AUX} 를 강제적으로 0으로 만들면 CBEST는 20MVar의 무효전력만 공급하는 STATCOM 동작을 하게 된다. 앞의 경우와 같은 과정을 통하여 계산한 CCT는 0.09s이다. SVC의 경우에 비하여 CCT는 0.01s 만큼 증가한다.

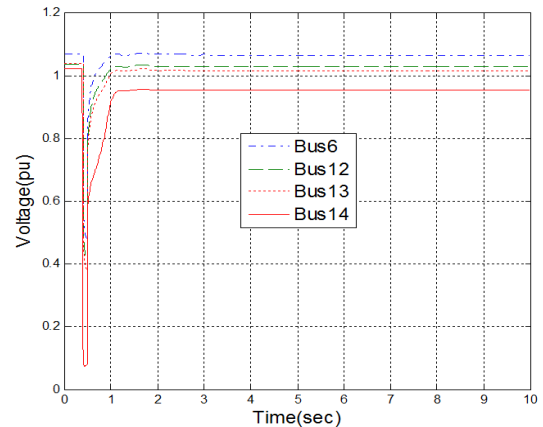


Fig. 7. Voltage Response of Test System With STATCOM Control

Fig.7은 고장제거시간이 0.09s일 때의 주요모선의 전압응답을 나타낸 것이다. Fig.7의 결과는 Fig.5와 비교할 때 최종적으로 수렴한 전압의 크기가 상승한다. 기계적 장치인 SVC보다 더 빠르게 동작하는 STATCOM이 좀 더 효과적으로 과도안정도를 향상시킨다.

2.3.4 ESS을 이용한 보상을 하는 경우

Fig.1에서 P_{AUX} 의 값을 제어하면 CBEST의 배터리

가 공급한 유효전력의 출력을 제어할 수 있다. 먼저 CBEST의 배터리 용량 20MW를 100% 유효전력으로 공급하는 경우의 앞의 경우와 같은 과정을 통하여 계산한 CCT는 0.08s이다. Fig.8은 고장제거시간이 0.08s일 때 전압응답을 나타낸 것이다.

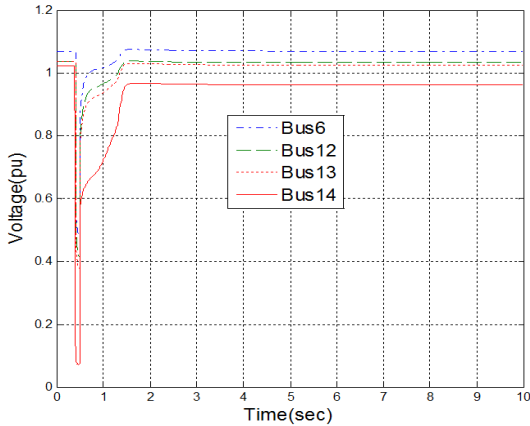


Fig. 8. Voltage Response of Test System With ESS 100% Active Power Control

STATCOM의 경우와 비교하여 CCT가 0.01s 만큼 감소한다. Fig.4에서 보인 것처럼 테스트 시스템의 가장 취약한 BUS14는 사고 제거 후에 공급되어야 할 유효전력과 무효전력이 크고, 연결 선로를 통하여 인접 모션에서 공급되어야 하기 때문에 과도 안정도가 좋지 못하다.

유효전력을 100% 공급하는 경우 유효전력의 출력이 100%으로 도달하는 동안 무효전력이 공급되지 못하여 과도안정도가 낮아진다. 따라서 ESS가 유효전력과 무효전력을 동시에 공급하도록 제어를 하는 것이 바람직하다.

배터리 용량의 50%의 비율로 유효전력을 공급할 때 구한 CCT는 0.11s이다. Fig.9는 고장제거시간이 0.11s 일 때 주요모션의 전압응답을 나타낸 것이다. 유효전력과 무효전력을 동시에 공급기 때문에 앞서 제시한 모든 결과보다 가장 큰 CCT를 얻을 수 있고, 또한 과도상태를 거쳐 수렴한 전압의 크기도 가장 크다. BUS14에 직접 연결한 ESS를 통하여 유효전력과 무효전력을 동시에 공급함으로써 인접 모션 BUS13으로부터 큰 전력의 전송으로 인한 손실을 줄여 과도안정도를 높일 수 있다.

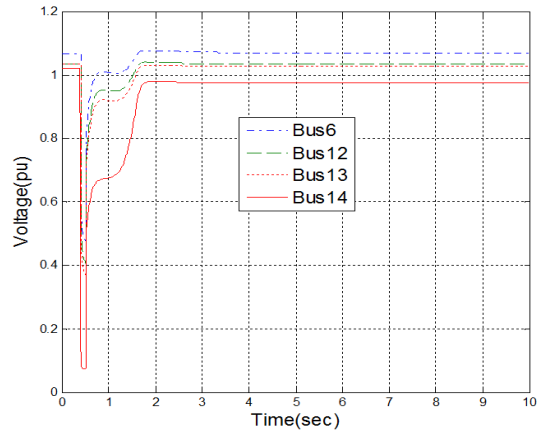


Fig. 9. Voltage Response of Test System With ESS 50% Active Power Control

Fig.10은 ESS의 배터리용량 대비 공급되는 유효전력의 비를 40%, 50%, 60% 그리고 70%로 BUS14에 공급할 때 BUS14의 전압응답을 나타낸 것이다.

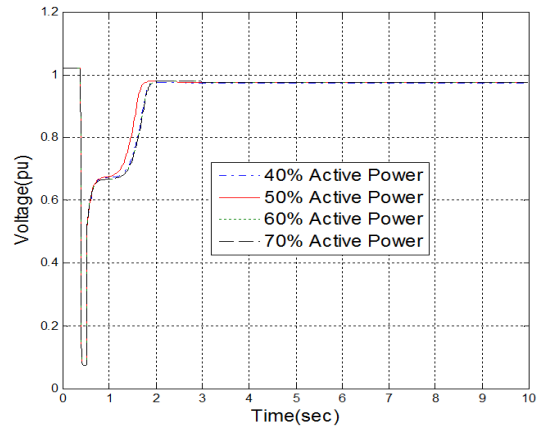


Fig. 10. Voltage Response of BUS14 With ESS 40%, 50%, 60% and 70% Active Power Control

모든 경우에 대하여 최종적인 수렴 전압의 크기는 같다. 50%의 비율일 때 응답속도가 조금 더 빠르다. 이외의 비율로 수많은 시뮬레이션을 수행해 본 결과 40% 미만 또는 70%이상의 경우 전압응답의 속도가 매우 늦어 지거나 수렴전압의 크기가 크게 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 본 논문의 시뮬레이션 결과 유효전력과 무효전력을 동시에 공급하는 경우는 유효전력의 공급량을 ESS의 배터리 용량의 50%로 하는 것이 최적의 결과를 가져온다.

3. 결론

본 논문에서는 전동기와 같은 동적인 부하의 비율이 매우 큰 전력계통의 과도 안정도를 향상시키는 방안으로써 에너지 저장 시스템을 취약 모선에 직접 연결하여 제어하는 방안을 제시하였다. 또한 기존의 과도안정도 향상을 위한 장치와 비교하여 취약모선에 직접 설치한 ESS가 유효전력과 무효전력을 동시에 공급함으로써 더 효과적으로 과도안정도를 향상시킬 수 있음을 보였다. 즉 기존의 보상장치에 비하여 CCT와 취약모선의 최종 수렴전압의 크기가 더 커진다. 무효전력의 공급은 취약 모선의 전압을 상승시키고 유효전력의 공급은 부하모선으로부터 멀리 떨어진 발전기로부터 공급되어야 할 유효전력을 직접 공급함으로써 전력계통에 대한 충격을 완화하여 과도안정도를 향상시킬 수 있다. ESS의 배터리 용량에 대한 최적의 공급 유효전력의 비는 50%이다. 기존의 무효전력보상장치와 ESS 모두 과도안정도 향상에 효과가 있으므로 이들의 협조를 통한 과도안정도 향상에 관한 연구가 필요하다.

References

- [1] T. Kouskson, P. Bruel and A. Jamil, "Energy Storage : Application and Challenges", *PSolar Energy Materials & Solar Cells 120*, pp. 59-80, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.015>
- [2] A. K. Srivastave, Ramon Zamora and Douglas Bowman "Impact of Distributed Generations with Storage Devices on the Electric Grid", *IEEE Systems Journal*. vol. 6, pp. 110-117, March 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2011.2163013>
- [3] Ken-ichi Kawabe and Akihiko Yokoyama, "A New Control Scheme of Batteries and Facts Devices for Transient Stability Improvement in Multi-Machine Power System", 17th Power Systems Computation Conference, Stockholm Sweden Aug. 22-26, 2011.
- [4] A. Sundaram, "Statically Controlled Energy-Storage Devices Compared to Traditional Methods for Improving Power System Stability and Power Quality", EPRI, Palo Alto, CA, 2002. 1001672.
- [5] "PSSE-32 Program Application Guide vol. I, II", Shaw Power Technologies Inc.
- [6] "Power Systems Test Case Archive - IEEE 14 Bus Power Flow Test Cases",
<https://www.e.washington.edu/research/pstca/>
- [7] 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 전기공학과 교수

<관심분야>

배전시스템 운영 및 제어, 스마트 그리드