

자체기동발전원으로서 BESS의 활용가능성 분석 및 용량 산정에 관한 연구

A Study on the Feasibility Analysis and Capacity Estimation of BESS for Self-Starting Generators

김 차 년* · 유 원 근** · 김 현 태*** · 이 흥 재†
(Cha-Nyeon Kim · Won-Kun Yu · Heon-Tae kim · Heung-Jae Lee)

Abstract - So far BESS(Battery Energy storage system) has been widely applied to power systems rapidly. Usually it has been used to regulate the renewable energy output and to adjust the power system frequency. In 2013, EPRI has reported a study of utilizing BESS to replace two black start generators of American Electric Power(AEP) that will be demolished. If the BESS can be used as a self-starting generator, it is possible to shorten the long-distance primary transmission line and shorten the restoration time because BESS is capable of the high-speed start and there is no restriction on the installation position. This paper presents a possibility of using BESS as a self-starting generator by using PSCAD/EMTDC in Korean power systems. Herein, the process to estimated the required capacity of BESS is also presented.

Key Words : BESS(Battery Energy Storage System), Self-starting generator, PSCAD/EMTDC

1. 서 론

현대의 전력계통은 점차 대형화 되고 있으며, 지속적인 부하의 증가로 인해 계통 안정도 한계 근처에서 운영되고 있는 실정으로 대규모 정전사고 확률이 증대되고 있다. 최근 빈발하고 있는 선진국에서의 대규모 정전사태 및 국내에서 발생한 9.15 순환정전 사태를 통하여 볼 때 광역정전사고로 인한 경제적, 사회적 손실은 매우 지대하므로 이러한 사고가 발행하였을 때 신뢰성 있는 신속한 복구를 수행하는 것은 사고의 예방과 더불어 매우 중요하다. 이러한 정전전 또는 광역정전 발생 시 세계 여러 국가의 초기 대응방안은 전체계통을 개방한 후 우선공급계통을 가압하여 정전구간을 순차적으로 복구하여 전체계통을 복구하는 방식을 채택하고 있으며 우리나라도 동일한 방식을 채택하고 있다. 그러나 이러한 방식은 우선공급계통을 구성하는 과정에서 장거리 무부하 선로를 가압하게 되며 이로 인하여 페란티 현상 등 여러 가지 문제가 발생할 가능성이 있다[1]. 최근 설치 용량이 급속도로 증가하고 있고 대응량화 되는 BESS(Battery Energy Storage

System)설비에 대하여 기존의 신재생에너지 출력 안정, 전력계통 주파수 조정 이외의 활용방안에 대한 연구[3-8]가 발표되고 있으며, 2013년 미국 EPRI에서는 AEP(American Electric Power)의 철거 예정인 Black Start용 발전기 2대의 교체를 위하여 BESS를 이용한 우선공급발전소 기동에 대한 연구가 보고되었다 [2]. 또한 지멘스에서는 독일 가스터빈 발전소의 Black Start를 위한 2.85[MW]/720[KWh]의 BESS를 공급한 바 있으나 연구 결과는 발표되지 않았다. 이러한 BESS는 고속 기동이 가능하고 설치위치에 대한 제약이 없으므로 BESS를 이용하여 자체기동발전기를 대체할 수 있다면 위치 제약에서 벗어나 장거리 시송전 선로를 축소 할 수 있을 것으로 기대되며 정전복구시간의 단축도 가능할 것으로 기대된다. 국내에서도 9.15 순환정전사태 이후로 정전에 대한 사회적 관심이 높아짐에 따라 정전복구계획의 신뢰성 확보뿐만 아니라 정전복구시간 단축이 요구되는 실정으로 이에 따른 연구가 필요한 시점이다. 본 논문에서는 국내 시송전 계통을 대상으로 BESS의 자체기동발전기 대체 가능성을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 검토하였고 울산복합화력과 한림복합화력을 대상으로 자체기동발전기를 대체하는데 소요되는 BESS의 용량을 산정하였다.

2. 사례대상 시송전 계통

국내 시송전 계통은 7개 지역으로 나누어져 있으며 본 논문에서 검토한 시송전 계통은 영남지역 예비 시송전 계통과 제주지역 주 시송전 계통이다. 다음 그림 1은 영남지역 예비 시송전 계통

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kwangwoon University, Korea.

E-mail: hjlee@kw.ac.kr

* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kwangwoon University, Korea.

** Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Seoil University, Korea.

***Dept. of Ministry of Trade, Industry and Energy Notification, Korea.

Received : November 14, 2017; Accepted : March 13, 2018

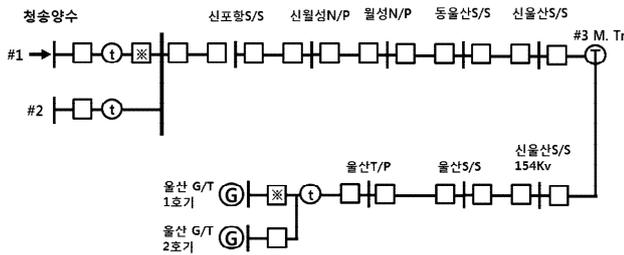


그림 1 영남지역 예비 시송전선로
Fig. 1 Yeongnam spare primary transmission line

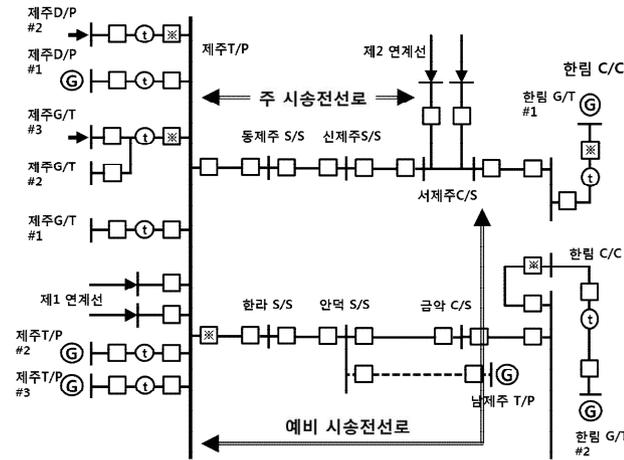


그림 2 제주지역 시송전 선로
Fig. 2 Jeju power primary transmission line

이며, 그림 2는 제주지역 주 시송전 계통이다. 영남지역 예비 시송전 계통에서의 자체기동 발전기는 청송양수로 지정되어 있으며 우선공급발전소는 울산복합#1 발전소이다. 그리고 제주지역 주 시송전 계통에서의 자체기동 발전기는 제주GT#3 발전기이며 우선공급발전소는 한림복합#1 발전소이다.

2.1 영남예비 시송전 선로 우선공급발전소 기동절차

영남 예비 시송전 선로에서의 우선공급 발전소는 울산복합#1 발전소이며 가스터빈 2대(GT#1, GT#2)와 스팀터빈 1대(ST#1)으로 구성되어 있다. 전계통 정전 시 자체기동발전기로부터 시송전 선로를 통해 발전소 154[kV] 모선이 가압되어 우선적으로 소내 부하전력을 수전 받고 기동모터 등 발전기 기동을 위한 전동기 부하가 기동을 준비한다. 이 때 GT#1을 우선기동하고 여기서 출력되는 전력을 이용하여 GT#2와 ST#1을 기동하게 된다. 다음 그림 3은 우선공급발전소 기동절차이며 그림 4는 전동기 부하측면에서의 발전기 기동절차이다.

2.2 제주지역 주시송전 선로 우선공급발전소 기동절차

울산복합#1발전소와 같이 한림복합#1발전소도 가스터빈2대(GT#1, GT#2)와 스팀터빈 1대(ST#1)으로 구성되어 있으며 전계

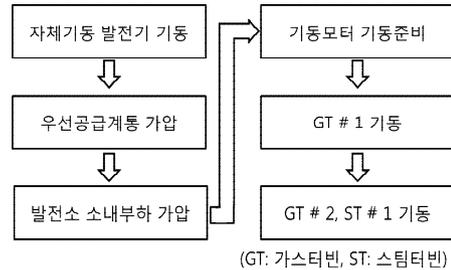


그림 3 우선공급발전소 복구 절차
Fig. 3 Primary power plant restoration process diagram

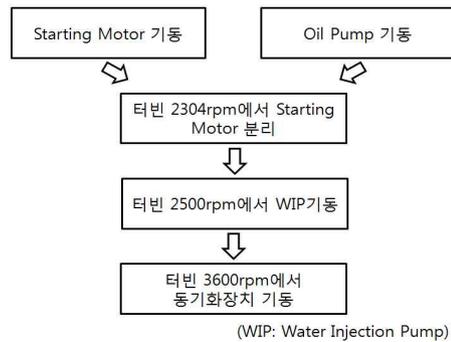


그림 4 발전기 기동절차
Fig. 4 Generator Start-Up procedure

통 정전 시 발전소 복구절차는 울산복합#1발전소와 대동소이하다. 그러나 한림복합#1발전소에서의 기동모터는 자체 디젤발전기를 이용하여 기동하는 점이 다르다.

3. 복구절차 모의

3.1 영남예비 시송전 선로 우선공급발전소 기동모의

그림 1의 영남지역 예비 시송전 선로를 살펴보면 자체기동발전기인 청송수력에서부터 울산복합발전소까지 상당한 거리의 장거리 선로로 구성되어 있다(약205.665[km]). 그러나 위치제약에서 자유로운 BESS의 특성을 고려할 때 현재 자체기동발전기 위치에서 가압하여 대체 가능성을 분석하는 것은 타당하지 않다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같이 BESS 설치 위치를 고려하여 모의를 수행하였다.

- 1) 울산T/P 변전소
- 2) 울산복합발전소 D/L

기준에 보고된 시송전선로의 동특성 분석을 위한 연구에서는 장거리 선로 가압에 따른 여러 가지 현상에 초점을 두고 분석하기 위하여 우선공급발전소의 기동절차를 고려하지 않았다. 그러나 본 논문에서는 전력변환 기술기반의 BESS를 자체발전기동원으로 사용하며, 시송전선로를 축소하여 모의를 수행한다. 그러므로 우선공급발전소 기동절차를 상세히 모의 할 필요가 있다. 따

표 1 울산복합#1 발전소 부하구성

Table 1 Ulsan Combined#1 Power Plant Load Configuration

부 하	용 량
소내부하	2[MVA](pf 0.95)
기동모터	2000[hp]
오일펌프	75[kW]
워터인젝션 펌프	150[kW]

표 2 모의 시나리오

Table 2 Simulation scenarios

[s]	내 용
0	BESS 기동
5	울산복합 소내부하 가압 (2[MVA], pf=0.95)
7	기동모터, 오일펌프 가동
25	기동모터 분리
26	워터 인젝션 펌프 가동
50	모의 종료

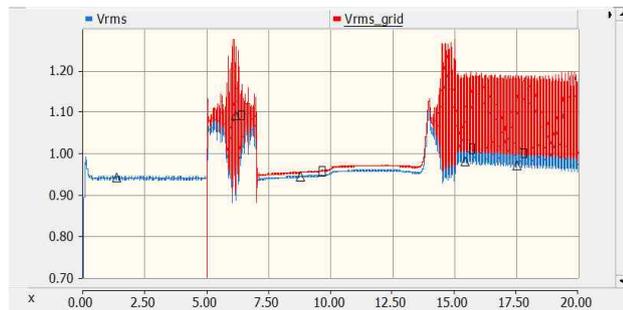


그림 5 계통 전압 파형_울산 T/P 변전소 설치(Vrms[Δ] : PCS 전압, Vrms_grid[□] : 계통전압)

Fig. 5 Voltage profile_Installed Ulsan T/P substation(Vrms [Δ] : PCS voltage, Vrms_grid[□] : grid voltage)

라서 표 1과 같이 상대적으로 용량이 큰 전동기 3대를 전동기 부하로 설정하였고 나머지 소내부하는 2[MVA](pf 0.95)로 설정하였다. 울산복합#1의 복구절차 모의를 위한 부하구성은 다음 표 1과 같다. 모의시나리오는 그림 4의 발전기 기동절차에 기준하여 구성하였다. 표 2는 복구절차 모의 시나리오이다.

3.1.1 울산 T/P 변전소 설치

울산 T/P 변전소에서 울산복합#1발전소까지의 시송전 선로를 포함하여 복구절차를 진행하였을 경우 그림 5와 같이 5초에 울산복합#1발전소 소내부하 가압 시 전압 파형이 안정하지 않는 것을 확인할 수 있으며 7초에 대용량 모터 가압 후 일정 수준 이상의 부하가 접속되면서 안정되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 기동모터가 기동이 끝나고 발전소 기동절차에 의해서 기동모터가 분리된 후 다시 전압 변동이 발생하고 기동에 실패하였다.

3.1.2 이상현상 분석

BESS를 울산 T/P변전소에 설치하여 가압한 경우 발생한 문제는 선로 임피던스에 의한 영향으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 선로 임피던스 영향에 의한 이상현상 가능성을 검토하였다. 다음 표 3은 본 논문에서 검토한 시송전 선로 데이터이다.

표 3 시송전 선로 데이터

Table 3 Transmission Line Data

선로	단위	값
울산 T/P ~ 울산복합#1발전소	[kV]	154
	[m]	7221
	R[pu]	0.000707
	X[pu]	0.007164
	B[pu]	0.154930
신제주 ~ 한림복합#1발전소	[kV]	154
	[m]	21000
	R[pu]	0.01215
	X[pu]	0.05422
	B[pu]	0.05325

표 4 X, B 비율에 의한 이상현상 발생 가능성

Table 4 Possibility of abnormality due to X, B ratio

X, B 비율	이상현상 발생
$B \approx X$	×
$B \approx 5 \times X$	×
$B \approx 11 \times X$	×
$B > 11 \times X$	○

표 3에서 보는 바와 같이 B값이 X값보다 약 20배의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 선로 임피던스의 X, B 값의 비율을 가변하여 모의를 수행하였다. 다음 표 4는 X, B 비율을 가변하여 모의한 결과이다. 표 4에서 보와 같이 X와 B값의 비율에 따라 이상현상이 발생할 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 6은 B값이 X값의 11배 정도일 때의 모의결과이다.

3.1.3 울산복합발전소 D/L단 설치

그림 6에서 보는 바와 같이 기동모터 가압 시 전압강하가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 울산복합발전소 D/L에 BESS를 설치하여 복구절차 진행시에는 전압강하를 보상하기 위하여 초기 가압 전압을 1.05[pu]로 설정하여 진행하였다. 다음 그림 7은 울산복합발전소 D/L에 BESS를 설치하였을 때의 모의 결과이다. 그림 7을 살펴보면 안정하게 기동이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 BESS를 이용하여 복구를 진행할 경우 장거리 선로를 이용하여 우선공급발전소를 기동하는 것은 예기치 않은 문제가 발생할 가능성이 있음을 확인할 수 있다.

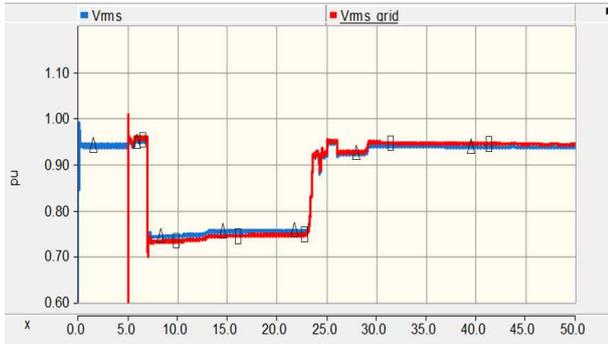


그림 6 계통 전압 파형_B $\approx 11 \times X$ 인 경우(Vrms[Δ] : PCS전압, Vrms_grid[\square] : 계통전압)

Fig. 6 Voltage profile_B $\approx 11 \times X$ (Vrms[Δ] : PCS voltage, Vrms_grid[\square] : grid voltage)

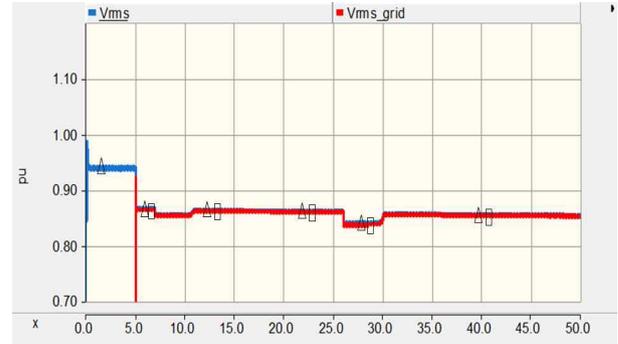


그림 8 계통 전압 파형_신제주 변전소 설치(Vrms[Δ] : PCS전압, Vrms_grid[\square] : 계통전압)

Fig. 8 Voltage profile_Installed Shinjeju Substation(Vrms[Δ] : PCS voltage, Vrms_grid[\square] : grid voltage)

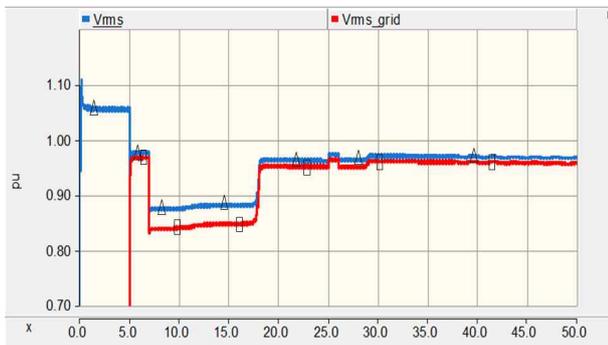


그림 7 계통 전압 파형_울산복합발전소 D/L 설치(Vrms[Δ] : PCS전압, Vrms_grid[\square] : 계통전압)

Fig. 7 Voltage profile_Installed Ulsan#1 D/L(Vrms[Δ] : PCS voltage, Vrms_grid[\square] : grid voltage)

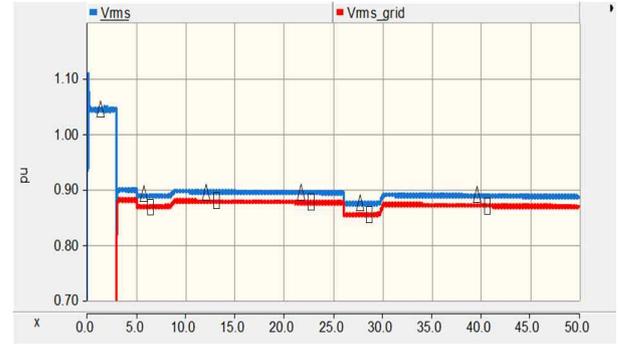


그림 9 계통 전압 파형_한림복합발전소 D/L 설치(Vrms[Δ] : PCS전압, Vrms_grid[\square] : 계통전압)

Fig. 9 Voltage profile_Installed Hanrim#1 D/L(Vrms[Δ] : PCS voltage, Vrms_grid[\square] : grid voltage)

표 5 모의시나리오

Table 5 Simulation scenarios

[s]	내용
0	BESS 기동
5	한림복합 소내부하 가압 (2[MVA], pf=0.95)
7	오일펌프 기동
26	워터 인젝션 펌프 기동
50	모의 종료

- 1) 신제주 변전소
- 2) 한림복합발전소 D/L

전술한 바와 같이 한림복합#1발전소는 발전기 기동 시 기동모터를 자체 디젤발전기로 기동하므로 모의를 위한 전동기 구성은 오일펌프, 워터인젝션펌프만 고려하여 모의를 수행하였다. 또한 소내부하는 2[MVA](pf 0.95)로 설정하였다. 다음 표 5는 복구절차 모의 시나리오이다.

3.2.1 신제주 변전소 설치

다음 그림 9에서 보는 바와 같이 우선공급발전소 D/L에 설치한 경우 안정적으로 기동이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

3.2 제주지역 시송전 선로 우선공급발전소 기동모의

그림 2의 제주지역 주 시송전 선로를 살펴보면 자체기동발전기인 제주 GT#3에서부터 한림복합발전소까지 영남지역 예비시송전 선로와 마찬가지로 상당한 거리의 장거리 선로로 구성되어 있다(약 115.7km). 따라서 전 항과 같이 BESS 설치 위치를 고려하여 모의를 수행하였다.

4. 배터리 용량 산정

4.1 울산복합#1 발전소

울산복합#1발전소 기동 시 시송전 선로를 포함하여 기동하였

표 6 기동시간 및 소비전력량

Table 6 Start-up time and kWh [자료출처 : 울산복합]

항 목	출력 [kW]	운전시간 [분]	소비 전력량 [kWh]
소내소비전력	159.6	18	47.8
Starting Motor	1528.7	6	152.8
Water Injection Pump	149.2	12	29.8
계	1,837.5	36	230.4

표 7 기동시간 및 소비전력량

Table 7 Start-up time and kWh [자료출처 : 울산복합]

항 목	출력 [kW]	운전시간 [분]	소비 전력량 [kWh]
소내소비전력	159.6	18	47.8
Water Injection Pump	149.2	12	29.8
계	308.8	30	77.6

을 경우 이상현상으로 인해 기동에 실패하였으므로 울산복합#1발전소 기동에 소요되는 배터리 용량은 발전소 D/L에 설치한 경우에 대하여 용량을 선정하였다. 또한 울산복합#1 발전소의 가스터빈을 기동부터 계통병입까지 배터리에서 공급해야할 부하는 기동 및 계통병입 시퀀스에 의한 부하로 산정하였다.(매우적은 부하(Ignitor 등) 무시) 배터리 용량은 표 6과 같이 산정된 소비전력량에 따라 보수율(1/0.8=1.25), PCS효율 (0.8~0.85), 방전심도(0.8), 여유계수 1.2를 적용하고, 기동실패 마진 2회를 감안하여 기동횟수 3회를 적용하여 산출하였다.

즉, $230.4 \times 1.25(\text{보수율}) \times 3(\text{회}) \div [0.8(\text{효율}) \times 0.8(\text{방전심도})] \times 1.2(\text{여유계수}) = 1,620[\text{kWh}]$ 로 산정되므로 정격용량을 고려하여 2[MWh]를 선정하였다. 그리고 울산복합#1 발전소 Starting Motor의 기동방식은 직입기동(전전압 기동)방식으로 기동 시 기동토크에 필요한 출력을 수초 동안 큰 출력을 배터리가 공급해야 한다. 또한, 직입기동 방식에서의 전동기 기동에 필요한 기동전류는 전동기 정격의 약 5~6배 정도이므로 배터리의 순간 출력은 $1.529 \times 5 \sim 6 = 7.64 \sim 9.17[\text{MW}]$ 로 산정할 수 있다. 따라서 배터리 용량은 2[MWh], 출력은 9.2[MW]로 선정하였다.

4.2 한림복합#1 발전소

한림복합#1과 같은 경우 기동모터 기동 시 자체 디젤 발전기를 사용하므로 표 5에서의 기동시간과 소비전력량 중에서 기동모터 항목을 제외하여 다음 표 7과 같이 부하를 산정하였다. $77.6 \times 1.25 \times 3 = 291[\text{kWh}]$ 이므로 배터리 정격용량은 300[kWh]로 선정하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 자체기동발전원으로서의 BESS 활용 가능성을

상세히 검토하기 위하여 사례대상 우선공급발전소 기동절차를 반영한 복구절차를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의를 수행하였으며, 배터리용량은 가스터빈 기동부터 계통병입까지의 절차(기동 및 병입 시퀀스)를 기반으로 부하용량과 부하사용 시간을 고려하여 산정하였다. 또한 순간출력이 필요한 기동모터의 기동용량을 고려하여 BESS의 순간 출력도 산정하였다.(다만, 한림복합은 비상발전기로 기동하므로 고려하지 않음)

모의결과 BESS를 우선공급발전소의 변압기에 설치하는 경우와 적절한 선로 임피던스 비율을 가지는 시송전 계통에서 자체기동발전기를 대체하여 설치하는 경우에는 자체기동발전원으로 충분히 활용 가능성을 확인하였다. 영남지역 예비 시송전 계통에서 울산 T/P 변전소에 설치하여 가압하는 경우 발생한 이상현상 검토 결과 선로 임피던스 X, B값의 비율에 따른 이상현상 발생 가능성을 확인하였다. 그러므로 BESS를 자체기동발전원으로 시송전 계통을 구성하는 경우에는 우선공급발전소 변압기에 직접 설치하는 것이 가장 바람직하며 시송전선로를 경유하는 경우에는 B/X 비율이 적은 선로를 이용하는 것이 필수적인 조건임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제이며(NO. 20174010201620) 2018년도 광운대학교 교내학술연구비의 일부 지원에 의해 연구되었습니다.

References

- [1] Heung-Jae Lee, Won-Kun Yu, "A Study on the Damping Loads Prediction to prevent Harmonic Resonance during the Power System Restoration", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 62, Issue 7, pp. 913-917, 2013.
- [2] "Use of Large Scale Energy Storage for Transmission System Support", EPRI Report, 2013.
- [3] Thien, Tjark, et al. "Planning of grid-scale battery energy storage systems: Lessons learned from a 5 MW hybrid battery storage project in germany", *Proc. BATTCON Int. Battery Conf. 2015*.
- [4] PSCAD_User_Guide_v4_3_1
- [5] Weijia Liu, Lei Sun, Zhenzhi Lin, Fushuan Wen and Yusheng Xue. "Multi-objective restoration optimisation of power systems with battery energy storage systems", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol 10, Issue 7, pp. 1749-1757, 2016
- [6] Dan Wu, Fen Tang, Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez, Guoliang Chen and Libing Sun, "Autonomous active and reactive power distribution strategy in islanded

microgrids", *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE*, pp. 2126-2131, 2014.

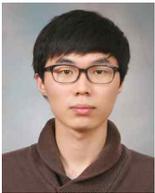
- [7] Bahrman, Michael, and Per-Erik Bjorklund. "The new black start: system restoration with help from voltage-sourced converters", *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 12, Issue 1, pp. 44-53, 2014
- [8] Kannan, A., and R. Kayalvizhi. "Modeling and implementation of dq control system for a unified power flow controller", *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 2, Issue 6, pp. 450- 457, 2010.



이 흥 재 (Heung-Jae Lee)

1958년 1월 28일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~1996년 미국 워싱턴 주립대 방문교수. 현재 광운대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 회장.

저 자 소 개



김 차 년 (Cha-Nyeon Kim)

1988년 9월 14일생. 2014년 광운대 전기공학과 졸업. 2017년 동 대학원 전기공학과 석박통합과정 수료. 현재 동 대학원 박사과정 재학중.



유 원 근 (Won-Kun Yu)

1976년 3월 15일생. 2003년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 서일대학교 전기공학과 교수.



김 현 태 (Heon-Tae Kim)

1965년 6월 29일생, 1992년 원광대학교 전기공학과 졸업, 현재 산업부 근무(한국에너지기술평가원 파견(2016.12~))