

Functional Properties of Stand-alone Microgrid EMS Application

에너지 자립섬 EMS 어플리케이션의 기능적 특성

Ha-Lim Lee*†, Yeong-Han Chun*††, Wookyu Chae**, Jungsung Park**
이하림*†, 전영환*††, 채우규**, 박중성**

* Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

** KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-Ro Yusung-Gu, Daejeon 34056, Korea

† yarim11@naver.com †† yschun@hongik.ac.kr

Abstract

For many past years, research in the operation of stand-alone Microgrid, which provides electric power generated from renewable energy sources and energy storage system instead of diesel generators, has been a major issue in order to prepare the exhaustion of fossil fuel and to protect environment, in island grids. Samsø Island, known as the world's first stand-alone Microgrid in Denmark, is connected to the mainland grid through AC system, which has different technical conditions with Korea's isolated power system. Korea's first stand-alone Microgrid has been built in Ga-sa island, Chun-la-nam-do, based on Energy Management System (EMS) operation, and other islands are under construction to follow the next step. These stand-alone Microgrid's has large capacity of Battery Energy Storage System (BESS) and the proportion of the renewable energy sources are large, which makes it necessary to use a Microgrid-Energy Management System (MG-EMS) to operate the grid effectively and economically. However, since the main subject of MG-EMS is different from EMS, specific characteristics and functions must be different as well. In this paper, the necessary characteristics and functions are explained for a general MG-EMS compared to a large power system EMS.

Keywords : Stand-alone Microgrid, Microgrid EMS, renewable energy, Battery Energy Storage System

1. 서론

도서지역과 같은 독립계통 마이크로그리드에 대규모의 신재생 전원을 계획하는 경우, 계통의 안정성을 유지하기 위해서는 에너지 저장장치와 함께 전체 시스템을 제어하기 위한 EMS의 활용이 필요하다 [1]. 이러한 독립형 마이크로그리드 EMS (MG-EMS)에서는 바람의 속도, 태양광 조도 등을 예측하여 디젤 발전기, 에너지 저장장치의 충방전 계획을 합리적으로 세워서 경제성을 확보하는 동시에, 수급의 안정성을 유지하여 주파수 안정도를 확보하는 기능이 중요하다. 따라서 MG-EMS의 가장 중요한 기능은 수요예측뿐 아니라, 신재생에너지원의 출력 예측을 포함한 기동정지계획이라 할 수 있다. 대형 전력계통에서 기동정지계획을 실시간으로 활용하기에는 계산시간이 너무 오래 걸리기 때문에, 상대적으로 계산 시간이 짧은 경제급전을 활용한다. 반면에 마이크로그리드는 기동정지계획에서 계산 시간에 가장 큰 영향을 미치는 설비 수가 적기 때문에 실시간 기동정지계획을 활용할 수 있다는 점이 큰 차이점 중 하나다.

에너지 자립섬의 경우, 신재생에너지원의 비율을 높이기 위해서 신재생 설비의 비중을 일반적인 대규모 계통에 비하여 크게 설계하기 때문에 다양한 문제가 발생할 가능성이 높다 [2]. 풍력 발전기와 태양광 발전기로 대표되는 신재생 전원의 특성상 출력에 대한 예측이 어려워 출력의 변동성 또한 비교적 큰 편이다 [3]. 또한

원하는 시간대에 필요한 만큼의 전력을 발전한다는 보장이 없기 때문에 이러한 문제들을 보완해줄 설비가 필요하다.

Battery Energy Storage System (BESS)는 전력의 입출력이 매우 빠르며 잉여로 생산되는 전력을 저장하였다가 필요한 시점에 원하는 양의 전력을 계통에 공급할 수 있기 때문에 독립형 마이크로그리드에서 사용하기에 적합한 전력 설비이다. BESS의 크기에 따라, 배터리의 PCS를 전류제어모드 (P/Q 모드)로 운전하는 방식과 전압제어모드 (CVCF 모드)로 운영하는 방식으로 나눌 수 있다. 가사도와 같이 BESS의 크기를 대용량으로 설치하는 경우에는 BESS를 Constant Voltage Constant Frequency (CVCF) 모드로 설정하여 main source로 활용하고 디젤 발전기는 백업으로 운영하는 것이 바람직하다 [4]. 이 때, MG-EMS를 통한 에너지 자립섬의 효율적이고 경제적인 운영을 위해서는 백업으로 설치된 디젤 발전기의 운전 발전량을 최소화시켜야 한다. 디젤 발전기가 비교적 많은 울릉도의 경우에는 디젤 발전기를 main source로 활용하고 BESS는 P/Q 모드로 운영하는 것이 바람직하다. 최적 운영 방안은 MG의 설비 구성 및 운영 목적에 맞게 선택해야 한다.

본 논문의 II장 본문에서는 대규모 전력계통의 EMS와 BESS, 신재생 전원이 연계된 독립형 마이크로그리드인 에너지 자립섬의 MG-EMS의 비교를 통하여 MG-EMS의 특성과 필요한 기능들에 대하여 분석하였다. 또

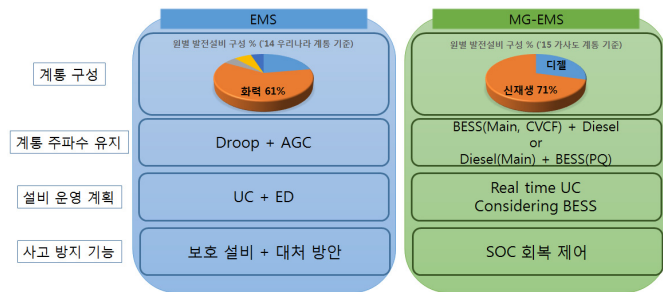


Fig. 1. EMS와 MG-EMS의 주요 특성 비교



Fig. 2. 원별 설비 구성 (%)

한 III장에서는 에너지 자립섬에 MG-EMS를 적용한 결과를 시뮬레이션 분석을 통하여 설명하였다.

II. 본론

전력 계통은 최초 설계 목적에 따라 설비 구성, 운영 방안 등이 달라진다. 본 논문에서 비교하고자하는 대규모 전력 계통과 독립형 마이크로그리드인 에너지 자립섬의 경우도 마찬가지로 서로 다른 특성들이 나타난다. 이에 따라 해당 계통을 관리하는 운영 체제 역시 기능들에 있어 차이가 존재해야 한다. Fig. 1은 대규모 전력계통과 독립형 마이크로그리드 각각의 운영을 담당하는 EMS와 MG-EMS에 대한 특성 비교를 나타낸 것이다. Fig. 1에 나온 각 항목들에 대하여 자세히 살펴보도록 하겠다.

A. 계통 설비 구성 특성 비교

대규모 전력 계통의 경우 전체 부하 수요 보다 발전 설비의 용량을 크게 책정하여 운영한다. 예상하지 못한 수요의 증가 혹은 계통 사고가 발생하더라도 계통의 안정성을 유지할 수 있어야하고 발전 설비의 예방 정비도 필요하기 때문이다. 또한 대규모 계통에 연계된 발전 설비들은 on/off 및 출력 제어가 가능한 것들이 많은 비중을 차지하기 때문에 충분한 예비유량 확보하면 여러 가지 계통 상황 변화에 유연한 대처가 가능하다.

2014년 우리나라 전력계통을 살펴보면 화력 발전 설비의 비중이 가장 크고 이어서 원자력, 집단에너지, 신재생 설비, 양수 발전기 등 다양한 종류의 설비들이 연계되어 운영 중이다.

하지만 에너지 자립섬의 경우 계통의 규모가 작고 전기적으로 독립되어 있으며 전체 발전 설비 중 신재생 전원이 차지하는 비중이 높다. 계통의 규모가 작으면 수요의 변화에 비교적 민감하고 신재생 전원의 비중이 높으면 출력의 변동 역시 비교적 심하다. 또한 정전이 발생할 확률도 비교적 높기 때문에 에너지 자립섬의 계통 안정성을 높이기 위해서는 대용량 배터리와 같은 에너지 저장 장치,

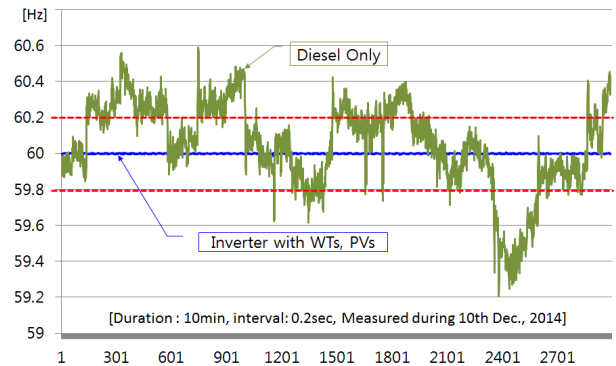


Fig. 3. 실측 가사도 계통 주파수 (2014.12.10)

즉 BESS가 필수적이다.

BESS를 통하여 신재생 전원에서 발전되는 잉여 전력을 저장하였다가 신재생 전원을 통한 발전량이 감소하거나 수요가 증가하는 상황이 발생하면 이를 방전하여 계통에 공급함으로써 에너지 자립섬의 전력 수요 공급 및 안정적인 계통 주파수 유지가 가능하다.

국내 최초 에너지 자립섬이 구성된 전라남도 가사도 계통의 경우 전체 발전 설비 중 신재생 전원의 비중이 약 71%를 차지하며 전력 수요 공급 및 안정적인 계통 주파수 유지를 위하여 3 MWh 용량의 BESS가 설치되어있다.

B. AGC 기능

대규모 계통에서는 부하가 순간적으로 증가하면 1차 응답을 담당하는 조속기 제어에 의해 주파수의 지속적인 하락을 방지하지만, 제어기의 속도조정률 특성에 의해 60 Hz로 회복되지는 않는다. 이러한 주파수 편차를 제어하는 역할을 EMS에서 담당하며, 이를 AGC (혹은 LFC)에 의한 2차 응답 특성이다 한다.

마이크로그리드에서 대용량 BESS가 CVCF 모드로 운영되는 경우에는 순간적인 수요의 변화를 출력 응답 특성이 매우 빠른 BESS가 모두 담당하기 때문에 주파수가 일정하게 유지된다. 또한 백업용으로 설치된 디젤 발전기는 신재생 전원에 고장이 발생하거나 출력이 예측에 비하여 낮은 비상 상황에 동작하는 백업용이며 이 경우 정출력 운전한다. 그렇기 때문에 에너지 자립섬에서 BESS가 CVCF모드로 운전하는 경우에는 AGC 기능이 필요하지 않다.

디젤 발전기가 main source로 운전되고 BESS가 PQ 모드인 마이크로그리드의 경우에도 AGC 기능이 필수가 아니다. 영국 전력계통의 경우에도 AGC 기능 없이 운영되고 있다.

가사도의 경우 2014년 12월 10일 10분간 측정된 계통 주파수를 살펴보면 AGC 기능 없이도 주파수가 일정하게 유지되는 것을 살펴 볼 수 있다 (Fig. 3).

C. Unit Commitment의 필요성

에너지 자립섬에 설치된 대용량 BESS는 용량 당 단가가 비교적 비싸며 가사도에 설치된 3 MWh의 Li-ion의 경우 약 30억 원에 달하는 고가의 설비이다. 또한 충방전 횟수가 약 3-4000회로 제한되어 있는 등 수명이 짧기 때

문에 효율적인 운영을 통하여 최대한 장기간 활용해야 한다. 이를 위하여 MG-EMS에서는 BESS의 SOC를 제어 및 관리하는 기능이 필수적이다.

수요, 풍속 그리고 일사량에 대한 실시간 예측 정보를 통해 BESS의 SOC를 미리 예측하여 계통을 운영한다면 BESS에 대한 효율적인 관리가 가능하다. 이는 EMS에서 사용하는 발전기 기동정지계획 (Unit Commitment, UC)의 계산 기법의 활용을 통하여 이루어 질 수 있다. 계통의 규모가 비교적 작기 때문에 경제급전 (Economic Dispatch, ED) 계산 기법 보다는 설비의 On/Off 기능까지 계산이 가능한 UC를 활용하는 것이 적절하다. 계통의 규모가 작고 예측 정보를 실시간 갱신할 수 있기 때문에 MG-EMS에서의 UC 역시 실시간으로 계산하여 상황에 맞는 최적의 계통 운영을 할 수 있다. 다만, EMS에서 사용하는 것과는 다르게 MG-EMS에서의 UC에는 BESS의 동작 특성이 반영된 목적함수 및 제약조건이 고려되어야 하며 이는 앞서 언급하였듯이 에너지자립섬의 설비 구성 및 계통 운영 목적에 맞게 적용시켜야 한다.

D. 예측 시스템의 필요성

대규모 계통에 연계된 신재생 전원은 비중이 비교적 작기 때문에 전체 계통에 연계된 발전 설비들을 통하여 예측 오차 및 출력 변동성에 대한 영향이 크게 나타나지 않는다. 하지만 신재생 전원의 비중이 높은 에너지 자립섬에서는 이러한 영향이 크게 나타나기 때문에 이를 최소화 시키는 것이 좋다.

MG-EMS에서 사용되는 UC 계산 기법을 활용하기 위해서는 해당 계통에 대한 부하 수요, 풍속 그리고 일사량에 대한 실시간 예측 정보가 필요하다. 예측 값의 정확성을 높이기 위하여 부하량 예측의 경우 지점단위 온도 예보 값 및 실측값, 최근 부하에 대한 가중치, 최근 온도에 대한 가중치 그리고 예측 시 온도 데이터 활용 여부를 종합적으로 고려하여 계산한다. 또한 신재생 전원의 경우 출력에 대한 예측 정보를 계산하기 위하여 기상청에서 발표하는 지점 단위 운량 및 풍속 예보 값을 사용한다. 이러한 예측 정보들은 실시간으로 업데이트 되는 예보 값을 이용한다. 그렇기 때문에 기상 변화에 대응이 가능하고 계산의 정확성 또한 높일 수 있다.

E. SOC 유지 방안의 필요성

대규모 전력계통에는 전압 및 주파수 안정도를 유지하기 위한 다양한 설비들이 구축 되어 있고 송전선 고장 시 우회 선로 활용등과 같은 계통 상황에 따른 대처 방안이 마련되어 있어 계통에 대규모 정전과 같은 큰 사고가 발생할 확률이 낮다.

그러나 에너지 자립섬은 사고를 막을 수 있는 설비들이 부족하고 독립형 마이크로그리드의 특성상 계통에 사고가 발생하면 계통에 미치는 영향이 크기 때문에 사고가 발생하지 않도록 사전에 방지하는 것이 매우 중요하다.

에너지 자립섬에 연계된 대용량 BESS가 main source로 운영되고 있고 CVCF 모드인 경우에는 SOC가 계통의 안정성을 결정하는 중요한 기준이 된다. 만약 BESS의 SOC가 0% 혹은 100%가 되면 사고 발생 확률이 증가하

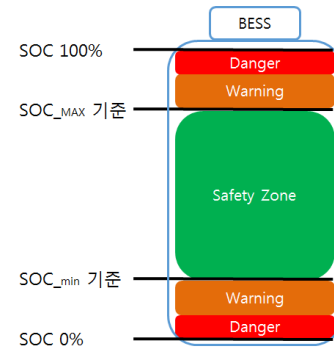


Fig. 4. BESS의 SOC에 따른 계통 운영 기준

고 계통 운영의 효율성이 감소한다. 그러므로 실시간 측정되는 BESS의 SOC를 기준으로 일정 범위를 벗어나게 되면 이를 다시 회복하는 과정이 필요하다.

SOC가 일정 값 이하로 내려가면 제어 가능한 부하 설비들을 off 시키고 발전 설비들은 on 시키거나 출력을 증가시켜야 한다. 반대로 SOC가 일정 값 보다 높아지면 제어 가능한 부하 설비들을 on 시키거나 출력을 증가시키고 발전 설비들은 off 시켜서 SOC를 낮추어야 한다. Fig. 4와 같이 BESS의 SOC가 상한 기준과 하한 기준 범위 이내에 있으면 사고 발생 확률이 낮고 안정적인 계통 운영이 가능하다고 판단한다. 하지만 기준 범위를 벗어나는 경우 사고 발생 확률이 증가한다고 판단하여 사고를 방지하는 운영이 필요하다. 특히 SOC가 100% 혹은 0%에 가까운 값이 측정될수록 계통 사고의 위험 발생확률은 증가하기 때문에 SOC 회복에 대한 단계별 자동 운영 방안이 필요하다. 아울러 SOC를 Fig. 4의 Safety Zone으로 회복한 이후 곧바로 다시 Warning 운영 모드가 동작하는 현상이 발생하지 않도록 SOC의 회복 기준을 설정하여 운영하는 것이 효율적이다.

III. 에너지 자립섬 가사도에서의 MG-EMS 운영 사례

전라남도 가사도에 구성된 에너지 자립섬은 전체 발전 설비 중 71%가 신재생 전원으로 구성되어있고 3 MWh의 대용량 BESS가 CVCF 모드로 연계되어 main source로 운영 중이다. 이러한 설비들을 제어 및 관리하는 MG-EMS에는 본 논문의 II장에 설명한 특성 및 기능들이 들어가 있다. 운전원이 수동으로 계통을 운영한 경우와 MG-EMS를 통하여 자동으로 계통을 운영한 경우를 비교하여 MG-EMS의 효과를 살펴보도록 하겠다. 두 가지의 case는 48시간 동안 아래의 계통 상황을 가정하여 진행되었다.

A. Case 1: 수동운전

MG-EMS를 실행하지 않고 계통 운영자가 수동으로 운영한 결과는 Fig. 6과 같다.

약 17시부터 지속적으로 SOC가 감소함에 따라 운영자의 판단으로 약 20시부터 32시까지 12시간 동안 디젤발전기를 운전하였다. 하지만 약 25시부터 부하에 비하여 신재생 전원의 발전량이 커짐에 따라 SOC가 증가함에 불

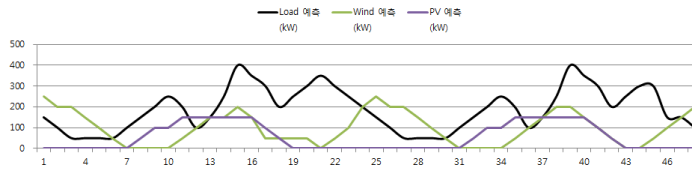


Fig. 5. Case study 시험조건

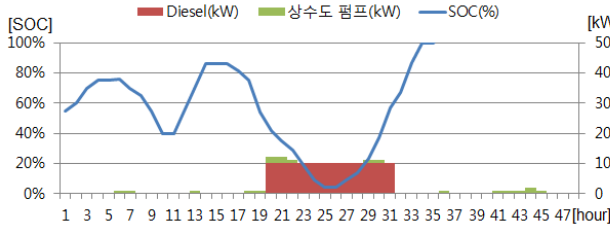


Fig. 6. Case 1에 대한 계통 운영 결과

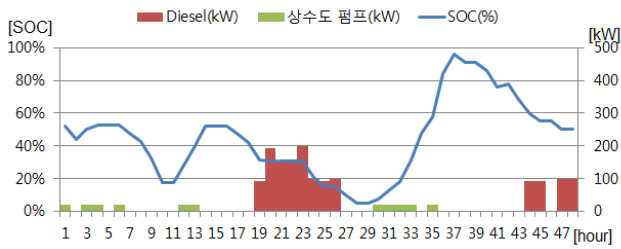


Fig. 7. Case 2에 대한 계통 운영 결과

Table 1. Case study 결과 종합
(가사도 기준 디젤 연료비: 180 원/kWh)

구분	디젤발전량 (kWh)	총방전량 (kWh)	신재생 출력 (kWh)	발전비용 (원)
Case 1	750	1,885	3,940	165,900
Case 2	732	1,611	4,158	127,234
증감량	↓18	↓274	↑218	↓38,666(5%)

구하고 디젤 발전기를 장시간 동작시킴에 따라 약 33시 SOC가 100%에 도달하였다. 이 시간 이후로 신재생 전원 에서 발전 되는 전력은 모두 버리는 에너지가 되어 효율 적인 운전이 이루어지지 않았다. 총 발전비용은 165,900원 이 나왔다.

수동운전의 결과 약 34시에는 BESS의 SOC가 100% 에 도달한 것을 확인 할 수 있다. 이는 부하 대비 신재생 발전량의 예측 없이 과도하게 디젤 발전기를 동작 시킨 결과이다. 만약 MG-EMS에서 시행하는 부하, 신재생 출력 예측 및 실시간 UC 계산을 통한 설비 운영 계획이 있었 더라면 SOC가 100%가 되어 이후에 생산되는 신재생 전 력을 낭비하지 않고 효율적으로 활용했을 것이다.

B. Case 2: EMS를 통한 자동운전

MG-EMS를 적용하여 자동으로 에너지 자립섬에 연 계된 설비들을 제어 및 관리한 결과는 Fig. 7과 같다.

초반 계통 운영 시 상수도 펌프를 동작시키더라도 전 체 계통 부하와 신재생 발전량의 균형을 유지 할 수 있다 고 판단하여 Case 1에 비하여 상수도 펌프 동작 횟수가 많다. 19시부터는 SOC가 하락하는 것을 대비하여 디젤 발 전기를 동작하지만 약 27시 이후부터는 부하량에 비하여

신재생 전원에서 발전되는 전력량이 많은 것을 예측을 통 하여 알 기 때문에 Case 1의 12시간 보다 짧은 7시간 동 안 디젤 발전기를 운전하였다. 또한 29시 이후 SOC가 상 승할 것을 미리 예측하여 상수도 펌프 동작을 통해 SOC 가 100%에 도달하는 것을 방지하였다. 총 발전비용은 127,234원이 나왔다.

Case 1과 반대로 27시부터 30시까지 SOC가 매우 낮 더라도 이후에 예측된 부하 대비 신재생 출력이 많기 때 문에 과도한 디젤 발전기 운전을 하지 않았다. 이로 인하 여 30시부터 38시까지 SOC가 올라갔으며 약 38시에도 100%에 도달하지 않아 모든 신재생 발전량을 활용하였다.

C. Case Study 결과

Case 1과 Case 2의 결과를 비교하여 정리하면 Table 1 과 같다. MG-EMS를 활용한 결과 디젤 발전량 및 BESS의 충방전량이 모두 감소하였으며 신재생 전원의 이용량이 증가하여 전체적으로 에너지 자립섬의 설비들을 효과적으 로 활용한 것을 확인 할 수 있다. 또한 발전비용 역시 MG-EMS를 사용한 결과 약 5% 감소하였다. 이는 연간 약 1300만원의 발전 비용 감소 효과를 발생시킨다. 또한 Case 1에서와 같이 SOC가 100%에 도달한 이후부터 생산 되는 신재생 발전량을 버리지 않고 모두 활용함으로써 단 순한 1일 디젤 발전기 발전비용 비교 보다 큰 경제적 효 과가 나타났다.

IV. 결론

에너지 자립섬은 화석 연료 고갈, 발전 연료비용 절 감, 환경 보호 등의 이유로 인하여 전 세계적인 관심사이다. 이러한 에너지 자립섬에는 마이크로그리드용 EMS인 MG-EMS가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 대규모 계통 의 EMS와의 비교를 통해 MG-EMS에 필요한 특성 및 기 능들에 대하여 설명하였다.

에너지 자립섬은 독립형 마이크로그리드의 특성상 BESS가 연계되어 있고 신재생 전원의 비중이 높다. 이로 인하여 MG-EMS에는 AGC 기능을 BESS가 대체하여 수 행한다. 또한 고가의 설비인 BESS의 효율적인 운영을 위 하여 정확한 예측 기법을 이용하여 UC 계산 기법을 통한 실시간 SOC 운영 계획을 계산하여 활용한다. 또한 사고 를 방지하기 위하여 실시간 측정 SOC를 기준으로 마이크 로그리드 운영 대처 방안도 필요하다.

마지막으로 전라남도 가사도에 구성된 에너지 자립섬 에 앞서 설명한 MG-EMS를 적용한 경우에 대한 case study를 시행하였다. MG-EMS를 활용하는 경우 에너지 자 립섬의 효율적이고 경제적인 운영이 가능하다는 것을 확 인하였다.

REFERENCES

[1] F. P. Sioshansi, "Smart Grid - Integrating Renewable, Distributed, & Efficient Energy", Academic Press, 2011.
 [2] M. G. Simoes, and F. A. Farret, "Renewable Energy Systems – Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2004.

- [3] M. R. Patel, "Wind and Solar Power Systems – Design, Analysis, and Operation – Second Edition", Taylor & Francis, 2005.
- [4] A. Yazdani, and R. Iravani, "Voltage-Sourced Converters in Power Systems – Modeling, Control, and Applications", WILEY/IEEE Press, 2009.
- [5] "신재생에너지 기반 융복합 에너지시스템 및 계통연계 기술개발 최종 보고서", 한전전력연구원, 2015.