

배터리 에너지 저장장치를 이용한 독립형 마이크로그리드의 전압 및 주파수 제어

Voltage and Frequency Control Method Using Battery Energy Storage System for a Stand-alone Microgrid

김 상 혁* · 정 일 엽† · 이 학 주** · 채 우 규**
(Sang-Hyuk Kim · Il-Yop Chung · Hak-Joo Lee · Woo-Kyu Chae)

Abstract - This paper presents voltage and frequency control methods for a stand-alone Gasa Island Microgrid in South Korea that can be fully energized by renewable energy resources such as photovoltaic systems and wind turbines. To mitigate the variations of the output of renewable energy resources and supply more reliable electricity to customers, battery energy storage systems (BESSs) are employed in the stand-alone microgrid. The coordination between BESSs and pre-existing diesel generators is an important issue to manage the microgrid more securely. This paper presents voltage and frequency control schemes considering the coordination of BESSs and DGs. The effectiveness for the operating method is validated via simulation studies.

Key Words : Stand-alone microgrid, Autonomous mode, Battery energy storage, Diesel generator, Voltage and frequency control

1. 서 론

마이크로그리드는 소규모의 모뎀화 된 분산에너지 자원을 배전계통의 일부 또는 고립된 지역에 설치하고 상황에 따라 배전계통과 연계 또는 독립적으로 전기에너지를 공급/관리하는 전력네트워크 기술로 정의할 수 있다. 특히 최근 풍력, 태양광 등 신재생에너지 전원의 이용이 증가함에 따라 신재생에너지 기반의 분산전원과 최신 IT기술이 융합된 마이크로그리드에 관심이 증가하고 있으며 관련연구가 활발히 진행되고 있다[1].

마이크로그리드는 대상 계통의 특성에 따라 다양한 형태를 갖는데 최근에는 도서지역의 전력공급을 위한 마이크로그리드에 대한 실증연구가 활발하다. 도서지역의 경우, 일반적으로 디젤발전기를 사용하여 발전하기 때문에 높은 연료비와 연료의 저장 및 관리가 어려우며 소규모 발전으로 인해 육지계통에 비해 발전효율이 낮다는 문제가 있다. 참고문헌 [2]에 따르면 2008년 도서계통의 발전단가는 994원/kWh로 육지계통의 10배에 달하는 것으로 나타난 반면, 신재생에너지 전원의 발전단가는 풍력이 140원/kWh, 태양광이 500원/kWh으로 기존의 디젤발전기를 대체했을 때 친환경적인 측면 뿐 아니라 가격 경쟁력이 있다. 이에 한전에

서는 전남 진도군 가사도를 포함한 몇 개의 섬에 독립형 마이크로그리드를 건설하는 프로젝트를 진행 중에 있다.

가사도의 독립형 마이크로그리드는 그림 1과 같이 풍력과 태양광을 이용하여 발전하여 부하에 전기를 공급하고 BESS(Battery Energy Storage System)를 이용하여 여분의 전력을 저장하거나 부족한 전력을 보충하도록 설계하였다. 특히 신재생에너지 출력에 100% 의존하는 무탄소 전력시스템을 추구하는 것이 특징으로 기존에 주 전원으로 사용되던 디젤발전기는 신재생에너지 출력과 BESS에 저장된 에너지가 부족할 때만 한시적으로 운전하여 부족한 발전량을 보충하는 보조발전기로서의 역할을 수행하도록 한다 [3]. 본 논문에서는 BESS의 PCS(Power Conditioning System)를 이용한 가사도 독립형 마이크로그리드의 전압 및 주파수 제어 방법을 설명하며 디젤발전기와 협조적으로 운영할 수 있는 효과적인 제어방법에 대해서 논의하고자 한다.

실시간 부하수급에서 전력계통의 도움을 받을 수 있는 계통연계형 마이크로그리드와 달리 독립형 마이크로그리드는 부하의 변동을 마이크로그리드 내에 있는 전원의 제어로 보상해야 하므로 실시간 전력수급 및 전압/주파수의 제어가 까다롭다. 기존의 선행연구에서는 일반적으로 디젤발전기의 유효전력 공급을 통해 부하 소비전력의 많은 부분을 공급하고 동시에 여자와와 조속기를 이용하여 전압 및 주파수를 제어하는 방식을 사용한다. 즉 디젤발전기를 주 전원(Main Source)으로 사용하였고 여기에 소규모의 신재생 에너지를 혼합하여 사용한다. BESS는 디젤발전기에 비해 규모가 작게 설치되는데 신재생에너지 전원의 출력변동을 보상하는 보조적인 역할을 수행토록 하며 부하변동이 클 때 주파수 보상에 참여한다[4, 5]. 이는 BESS의 용량을 줄여 설치비용을

* School of Electrical Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

** KEPCO Research Institute, Korea.

† Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

E-mail : chung@kookmin.ac.kr

Received : November 26, 2014; Accepted : July 29, 2015

저감하고자 하는 계통설계에 기인한다. 특히 참고문헌 [5]에서는 독립형 마이크로그리드에서 디젤발전기, 풍력발전기와 BESS를 사용하는데 디젤 발전기가 주전원으로 동작하여 전압과 주파수를 제어하는 역할을 맡으며 BESS는 풍력발전기의 급격한 출력변동을 보상하는 역할을 맡는다. 풍력발전기의 출력이 부하에 비해 작은 경우에는 디젤엔진의 동력을 이용하여 디젤발전기의 유효전력 출력을 생성하며 풍력발전량이 부하에 비해 큰 경우에는 디젤발전기를 동기조상기로 동작시켜 계통의 전압과 주파수를 제어한다. 즉, 풍력발전기의 출력과 관계없이 디젤발전기의 동기기가 마이크로그리드의 전압과 주파수를 제어하는 역할을 수행한다.

참고문헌 [6]에서는 태양광 전원을 이용하는 독립형 마이크로그리드에서 BESS와 2대의 디젤발전기를 이용하여 전압 및 주파수 제어를 수행한다. 신재생에너지 전원이 부하전력을 충분히 충당할 수 있는 경우, 일시적으로 디젤발전기를 정지하고 BESS의 PCS로 전압 및 주파수를 제어한다. 하지만 디젤발전기가 투입되면 디젤발전기가 주 전원으로 전압 및 주파수 제어를 수행하며 BESS는 전류제어모드로 동작한다. 이 경우 신재생에너지의 용량이 크고 출력변동이 심한 경우에는 디젤발전기와 BESS 사이에 제어권 이양이 잦게 되어 전압의 주파수 동기화 등이 까다로우며 계통에 과도상태 외란이 발생할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 가사도 마이크로그리드에서는 디젤발전기의 사용을 줄여 궁극적으로 신재생에너지 전원의 사용을 100%로 운영하는 것을 목표로 하므로 BESS를 주 전원으로 동작시켜 전압 및 주파수를 일정하게 제어하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해서 디젤발전기는 보조전원으로 동작하여 BESS의 SOC를 유지하는 역할을 수행하도록 설계한다. 본 논문은 일반적인 상용 여자기와 조속기를 갖는 디젤발전기와 BESS PCS의 협조제어를 통해 위의 기능을 구현하도록 설계하고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증하는 것을 목표로 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 가사도 독립형 마이크로그리드의 구성 및 제어원리에 대해 설명하며 3장에서는 마이크로그리드를 구성하는 요소기와 제어원리에 대해 설명한다. 4장에서는 MATLAB/Simulink를 이용한 동적해석모델을 바탕으로 사례연구를 통해 제안하는 제어원리의 성능을 검증한다.

2. 독립형 마이크로그리드의 구성 및 운영원리

2.1 가사도 독립형 마이크로그리드의 구성

기존의 가사도 전력계통은 380V 정격의 100kW급 디젤발전기가 3대가 설치되어 주 전원으로 활용되고 있었다. 가사도 마이크로그리드 프로젝트를 통해 가사도 독립형 마이크로그리드에는 최대출력 100kW급 풍력발전기 4대와 300kW급 태양광전원을 연결하였고 제어가능 부하를 250kW 설치할 예정이다. 가사도의 부하는 최대 170kW, 최소 40kW이며 평균적으로 96kW를 소비하는 것으로 관측되며 향후 추가적인 부하의 설치가 예정되어 있다.

그림 1은 가사도 독립형 마이크로그리드의 구성을 나타내며 표 1은 가사도 전력계통의 배전선로, 주 변압기 및 부하소비전력 정보를 나타낸다. 신재생에너지 전원에서 발전한 전력은 3MWh

의 배터리에 저장하여 신재생에너지의 발전출력이 없어도 평균부하에 24시간 이상 전력을 공급할 수 있도록 설계하였다. BESS는 340V의 출력전압을 가지며 승압변압기를 통해 디젤발전기와 같은 주 변압기 1차측에 연결된다. 디젤발전기와 BESS가 연결된 발전단 전압은 주 변압기를 통해 승압하여 배전계통 전압이 6.6kV가 되도록 운영된다. 표 2는 마이크로그리드 각 구성요소의 용량과 특징을 나타낸다. 배터리는 직류단(DC-link)을 공유하는 2대의 500kW급 PCS를 통해 마이크로그리드 계통에 연계되는데

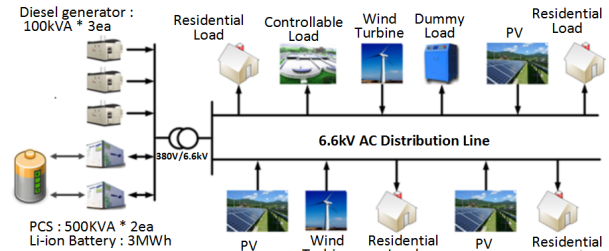


그림 1 가사도 독립형 마이크로그리드의 구조

Fig. 1 Structure of Gasa Island Microgrid

표 1 마이크로그리드 전력계통 파라미터

Table 1 Power system parameters in Gasa Island Microgrid

구성요소	종류	파라미터
배전선로	ACSR 58mm ²	선로 저항: $R=0.497 [\Omega/km]$ 리액턴스: $X=0.438 [\Omega/km]$ (1,800mm 완철)
주 변압기	300kVA 380V/6,900V (3상)	결선방식: $Y-\Delta$ (380V/6900V) %임피던스: 4.75%
일반 부하	일반 수용가 (2014년 기준)	평균부하: 96kW 최대/최소부하: 170kW (max), 40kW (min)

표 2 마이크로그리드 구성요소의 용량 및 특징

Table 2 Features of elements in Gasa Island Microgrid

구성요소	용량	특징
제어가능부하	250kW	에어컨, 상하수도 설비 및 실험용 부하 등
풍력발전	400kW	평균풍속: 5.1 m/s
태양광 발전	300kW	평균일사량 : 4.1 kWh/m ²
배터리	3MWh	Li-ion Battery
BESS PCS	500kW × 2대	1대 (주전원), 1대 (보조전원)
디젤 발전기	100kW × 3대	여자기 및 조속기 제어

평소에는 PCS 한 대로 운전이 가능하지만 풍력과 태양광의 출력이 동시에 정격에 가깝게 발전되는 경우 PCS 두 대로 잉여전력을 배터리에 저장할 수 있다. 또한 PCS 한 대가 고장이 난 경우에 다른 한 대로 가사도 전체의 전력공급에 지장이 없도록 운영할 수 있도록 한다.

2.2 마이크로그리드의 운영원리

그림 2는 가사도 독립형 마이크로그리드의 에너지관리시스템(EMS: Energy Management System) 및 제어개념도를 나타낸다. 독립형 마이크로그리드를 위한 EMS는 그림 2에 도시한 바와 같이 자동제어모드(Automatic Control Mode)와 수동제어모드(Manual Control Mode)로 나누어 운전된다. 자동제어모드에서는 EMS 기반으로 발전원들이 자동으로 제어되며 BESS의 SOC(State-of-Charge) 값이 정해진 최대 및 최소 범위 사이에 안정적으로 제어되는 상황을 가정한다. 이 범위는 BESS가 충분히 충전 또는 방전을 할 수 있는 상태를 나타내며, BESS가 부하 또는 신재생에너지 전원의 출력변동을 충분히 보상할 수 있음을 의미한다. 자동제어모드 시에는 BESS PCS 중 1대가 계통 전압/주파수를 일정하게 제어하는 주 제어기로 동작하는데, PCS 내부에서 계통의 주파수를 생성하고 전압의 크기를 일정하게 제어하는 CVCF(Constant-Voltage Constant-Frequency) 제어모드로 동작한다. 신재생에너지 전원의 전력공급이 부하 소비전력을 초과하는 경우 BESS는 CVCF 동작을 통해 자동적으로 충전을 하게 되며 반대로 부하가 공급을 초과하는 경우에는 BESS가 초과하는 양만큼 방전을 하게 된다. BESS PCS의 제어속도는 회전관성을 갖는 디젤발전기의 반응보다 빠르므로 부하나 신재생 전원의 변동에 따른 수급변동은 BESS가 담당하게 되며 디젤발전기는 수급변동에 영향을 받지 않고 제어세팅값 또는 EMS의 명령에 따라 일정한 유효전력 출력을 내게 된다. BESS PCS 중 나머지 한 대는 CVCF 동작을 수행하는 PCS의 고장을 백업하는 목적으로 설치되는데 필요할 경우 BESS의 SOC를 제어하기 위한 유/무효전력 제어(PQ 제어모드)로 동작할 수 있다.

만약 신재생에너지 전원의 출력과 부하 사이에 차이가 지속적으로 발생하게 되면 BESS의 SOC는 감소하거나 증가하여 정상범위를 벗어날 것이다. 예를 들어, 부하예측량과 신재생 출력량의 차이가 양수(+)이면 배터리는 일정시간 후에 결과적으로 방전할 것이고 음수(-)이면 배터리는 궁극적으로 과충전(overcharge)될 것이라 예상할 수 있다. 이를 막기 위해 EMS에서는 부하예측(Load Forecast)과 신재생에너지 발전예측(Renewable Energy Forecast)을 수행하여 지속적인 수급불균형이 예상되는 경우 디젤발전기에 유효전력 제어명령을 보내거나 신재생에너지 전원의 출력을 제한할 수 있다. EMS의 부하예측과 신재생에너지 출력예측은 15분 주기로 수행되며 예측시점에서 24시간동안의 값을 예측하도록 설계하므로 특정시간대의 배터리의 충/방전량의 예측이 가능하다. 즉, 어느 시점에서 배터리의 SOC가 정상범위를 벗어나게 되는지를 예측할 수 있으므로 신재생에너지 출력을 제한하거나 디젤발전기를 기동시켜 배터리의 SOC를 정상범위로 유지할 수 있다.

EMS의 예측이 심하게 벗어나거나 마이크로그리드의 주요 구성요소로 고장이 발생한 경우, EMS가 원하는 대로 배터리 SOC 제어가 불가능한 경우가 발생할 수 있는데 결과적으로 BESS의 SOC가 정상적인 범위를 벗어나면 비정상모드(Abnormal Mode)로 동작한다. 또한 BESS의 고장으로 인하여 앞서 설명한 PCS 2대 모두 CVCF 제어가 불가능한 경우에도 비정상모드로 동작하게 된다. 비정상모드 시, BESS는 CVCF 제어모드에서 PQ 제어모드로 변환하여 SOC를 직접 제어하게 되며 디젤발전기가 계통 전압과 주파수 제어를 맡는 주 전원으로 동작하게 된다. BESS가 정상적으로 동작함이 확인되고 SOC가 정상범위가 되면 비정상모드 동작을 해제하고 정상모드로 복귀한다.

주목할 점은 정상 또는 비정상 모드와 관계없이 디젤발전기는 여자기와 조속기를 이용한 동일한 제어를 수행하게 된다는 것이다. 디젤발전기는 회전관성을 갖기 때문에 BESS PCS의 유효전력 제어속도에 비해 느리게 반응한다. 따라서 정상모드에서는 BESS PCS가 계통 전압 및 주파수를 빠르게 제어하므로 디젤발전기가 조속기의 제어명령에 반응하기 전에 계통 내 수급불균형은 해소된다. 결국 디젤 발전기는 일정한 제어명령 값이나 EMS의 발전량 분배에 따른 AGC(Automatic Generation Control)의 명령에 따라 유효전력 출력을 제어한다. 비정상모드에서는 BESS PCS가 전압 및 주파수 제어를 하지 않으므로 디젤발전기의 조속기 특성에 따라 주파수 드롭제어를 수행하게 된다.

풍력 및 태양광 전원은 기본적으로 최대출력을 내는 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어를 사용하지만 EMS의 명령에 따라 출력을 제한하거나 운전을 정지할 수 있다. 제어가능부하는 에어컨, 축열조 등의 냉/난방부하 또는 상수도 설비를 활용할 수 있으며 EMS의 제어우선순위에 따라 해당부하의 제어순서가 결정된다.

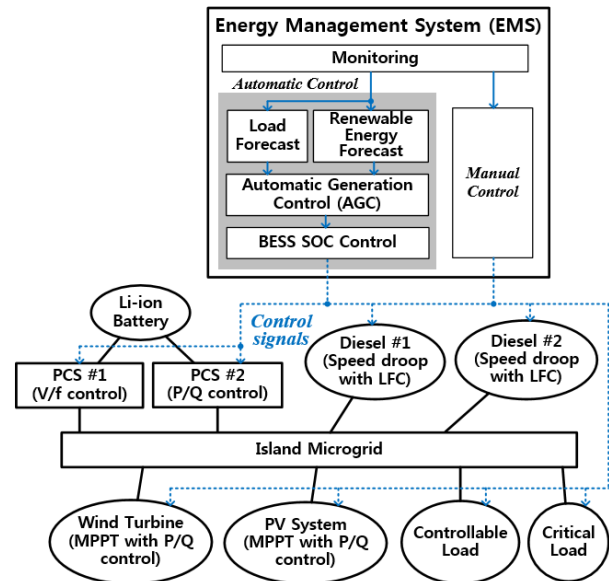


그림 2 독립형 마이크로그리드의 제어개념도
Fig. 2 Control concept of stand-alone microgrid

3. 독립형 마이크로그리드의 요소기 모델 및 제어원리

가사도에는 기존에 주 전원으로 이용하던 100kW급 디젤발전기가 3대가 설치되어 있다. 디젤발전기는 여자기와 조속기를 통해 터미널 전압 및 출력전력을 제어하며 복수의 디젤발전기가 동시에 투입되는 경우 동기발전기의 동기화력에 의해 계통 주파수를 일정하게 유지한다. 앞에서 언급한 바와 같이, 본 논문에서는 풍력과 태양광 전원 등 신재생에너지 전원의 출력을 통해 부하 소비전력의 대부분을 공급하는 것을 목적으로 하며 디젤발전기는 보조전원으로 동작하도록 하고자 한다. 이를 위해 본 논문의 주제는 BESS의 PCS가 기존의 디젤발전기와 협조하여 마이크로그리드의 전압 및 주파수 제어를 효과적으로 수행하도록 설계하며 이를 사례연구를 통해 검증하는 데에 있다. 본 절에서는 독립형 마이크로그리드를 구성하는 주요 요소인 디젤발전기, BESS 및 신재생에너지 전원의 모델에 대한 설명 및 전체 마이크로그리드의 제어원리에 대해 설명한다.

3.1 디젤 발전기

디젤발전기는 동기와 원동기(엔진)로 구성되며 조속기(Governor)와 여자기(Exciter)를 통해 제어한다. 그림 3은 본 논문에서 사용한 디젤발전기 해석모델의 제어블록선도를 나타내며 MATLAB/Simulink를 이용하여 해석모델을 개발하였다. 표 3은 본 논문에서 사용한 디젤발전기의 모델링 및 제어 파라미터를 나타낸다.

일반적으로 전력계통에서는 발전량이 부하량에 비해 부족할 때 주파수가 떨어지는 특성이 있어 조속기의 주파수 제어를 통해 유효전력을 제어한다. 조속기 운전은 출력 주파수를 일정하게 제

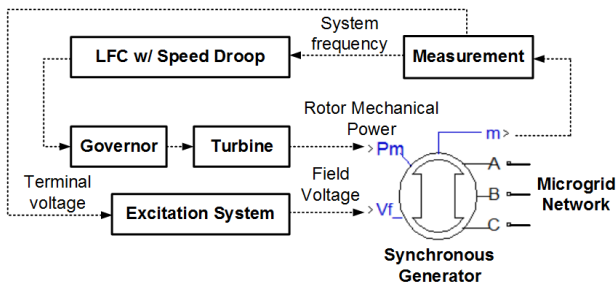


그림 3 디젤 발전기 해석모델의 블록선도
Fig. 3 Control block diagram of a diesel generator model

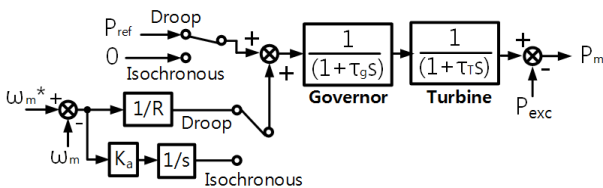


그림 4 조속기 모델의 블록선도
Fig. 4 Block diagram of a governor model

표 3 디젤발전기 모델링 및 제어 파라미터

Table 3 Parameters for diesel generators

Parameter	Values
정격 (용량, 선간전압, 주파수, 계자전류)	100kW, 380V, 60Hz, 10A
고정자 권선 임피던스	$R_s = 0.055\Omega, L_l = 0.39mH$
계자 권선 임피던스 (고정자측 등가)	$R_f = 0.03386, L_{fd} = 1.174mH$
맴퍼 권선 임피던스 (고정자측 등가)	$R_{kd} = 0.4332\Omega, L_{tkd} = 3.662mH, R_{kq} = 0.091\Omega, L_{tkq1} = 0.359mH$
회전자 관성	$J = 0.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
조속기 Droop Gain 및 모델링 상수	$R = 0.05, \tau_g = 0.01, \tau_T = 0.005$
여자기 제어변수	$K_p = 200, K_I = 500$

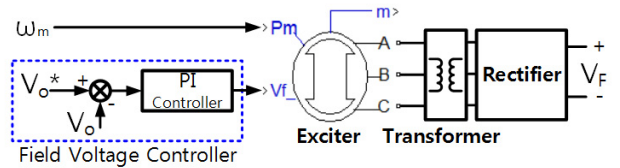


그림 5 여자기 모델의 블록선도
Fig. 5 Block diagram of a exciter model

어하는 모드(Isochronous mode)와 발전기의 병렬운전이 가능한 드롭(Droop) 제어모드로 나뉜다. 그림 4는 디젤 발전기 제어를 위해 사용한 조속기 모델과 제어도를 나타낸다. 조속기와 터빈모델은 해석의 편의를 위해 1차 전달함수로 모델링하였다. τ_g 와 τ_T 는 조속기와 터빈의 시정수를 의미한다. 조속기 모델의 출력(P_m)은 동기의 회전자의 기계적 전력이며 이는 터빈 출력에서 여자기에서 소모된 전력(P_{exc})과의 차로 구한다. 가사도의 디젤발전기는 EMS의 출력명령(P_{ref})을 받아야 하므로 LFC(Load Frequency Control) 기반의 드롭제어를 이용한다. 드롭계수 R은 일반적으로 5% 내외에서 결정한다.

디젤발전기의 출력전압과 무효전력 출력은 여자기를 통해서 제어한다. 최근 제작되는 소형 디젤발전기는 브러쉬가 없는 교류기기 타입을 주로 사용하며 회전자와 함께 회전하는 정류기를 통해 계자권선에 직류를 공급한다. 그림 5는 여자기 모델의 블록선도를 보여준다. 발전기의 터미널 전압(V_o)를 일정하게 제어하기 위하여 발전기의 계자전압을 제어하는 기능을 한다. 디젤발전기를 병렬운전할 경우 여자가 서로 간섭을 일으켜 발전기 사이에 순환전류가 흐를 수 있는데 이를 막기 위해서 여자기에 무효전력-전압(Q-V) 드롭 기능을 포함시킨다[10].

3.2 BESS 및 PCS 제어원리

BESS PCS는 2가지 제어모드로 동작한다. 먼저 마이크로그리

드가 정상모드일 때, PCS 중 1대는 마스터 전원으로서 역할을 수행하며 마이크로그리드 계통의 전압과 주파수를 일정하게 제어하는 CVCF 모드로 동작한다. PCS 제어기 내부의 VCO(Voltage-Controlled Oscillator)를 이용하여 일정한 주파수와 위상(phase)을 갖는 파형을 생성하여 PCS 출력전압 제어에 사용하며 Grid-Forming 모드라고 부르기도 한다[8]. 이러한 제어기법을 통해 마이크로그리드 계통의 전력수급에 관계없이 계통전압의 주파수와 크기를 일정하게 유지시킬 수 있다[9]. 그림 6에 CVCF 모드의 BESS PCS의 제어블록선도를 나타내었다. 계통전압 제어를 위해 회로적으로 계통연계 인덕터에 병렬로 커패시터를 설치하였으며 전류제어기와 더불어 전압제어기를 구성하여 계통전압 (V_{gabc})을 일정하게 제어한다.

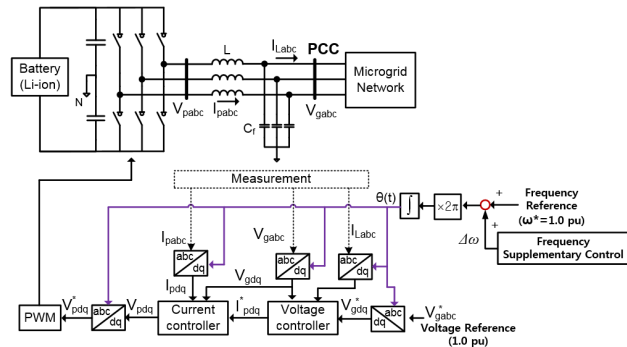


그림 6 BESS PCS의 CVCF 모드 제어블록선도
Fig. 6 Control block diagram of BESS PCS in CVCF mode

마이크로그리드 계통의 전력수급이 안정하게 유지되고 BESS의 SOC가 안정적으로 유지되는 경우 그림 6에서 주파수 지령을 정격(1.0 pu)에 맞춰 BESS의 출력전압의 주파수를 제어하여 마이크로그리드의 주파수를 60Hz로 일정하게 제어할 수 있다. 만약 마이크로그리드 내의 전력수급이 지속적으로 불균형한 경우 BESS의 SOC가 지속적으로 감소 또는 증가하여 과충전 또는 과방전의 문제가 발생할 수 있다. 이 경우 마이크로그리드는 비상 제어를 수행하게 되고 보다 안정적인 영역에서 주파수 제어를 수행하기 위해 주파수 보상제어(Frequency Supplementary Control)를 수행한다.

BESS PCS가 PQ 제어모드로 동작하는 경우의 제어블록선도를 그림 7에 나타내었다. PLL(Phase-Locked Loop)을 이용하여 PCS의 출력전압을 계통전압의 주파수와 위상에 동기시킨다. PQ 제어모드는 Grid-Feeding 모드라고 부르기도 하며, 계통으로 공급하는 전류를 제어하여 원하는 계통접속점에서의 유/무효전력 또는 DC링크의 전압을 제어하는 데에 적합하다[8]. 일반적인 계통연계 전력변환기에서 가장 많이 사용하는 제어방식으로 dq-회전좌표축 변환과 PI 제어기를 이용하여 정상상태오차와 위상지연을 줄일 수 있는 우수한 성능을 가진다[9].

가사도 마이크로그리드의 BESS에는 2대의 PCS가 설치되어 있으며 정상모드 시에는 1대의 PCS가 CVCF 제어모드로 동작하여 계통의 전압과 주파수를 일정하게 제어하며 다른 한 대는 PQ 모

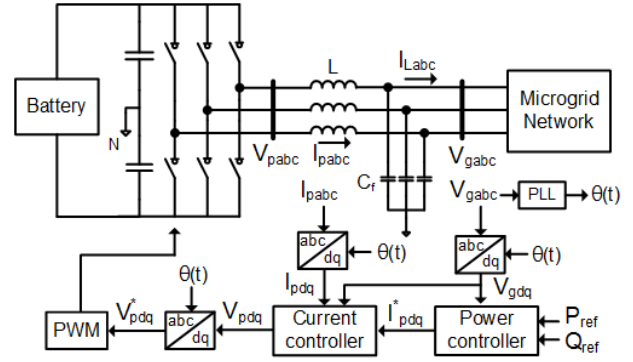


그림 7 BESS PCS의 PQ 모드 제어블록선도
Fig. 7 Control block diagram of BESS PCS in PQ mode

드로 동작한다. 마이크로그리드 내의 전력관리에 문제가 생겨 BESS의 SOC가 정상적인 범위를 벗어나는 경우, 즉 비정상모드에서는 PCS 1대가 동작하며 PQ 모드로 운전되어 BESS의 SOC를 관리하는 기능을 수행한다. 표 4는 본 논문에서 사용한 BESS PCS의 파라미터를 보여준다.

표 4 BESS PCS 파라미터

Table 4 Parameters for BESS PCS

Parameter	Values
배터리 모델	3MWh, 리튬이온 배터리 모델(Simulink 제공), 정격전압 650V, 초기 SOC=50%
PCS용 LC 필터	$L=0.1mH$, $C=57.4\mu F$
PCS 모델	3-level NPC 타입 인버터, 3상 정격출력전압 340V(선간), 정격직류전압 700V, PWM 스위칭 주파수 10kHz,
PCS 출력 승압변압기	550kVA, Δ -Y(340/380V), %임피던스 = 4.4%

그림 8은 BESS PCS가 CVCF 모드로 운전될 때 주파수 보상 제어 기능을 나타낸다. 마이크로그리드의 EMS에서 신재생 에너지 전원의 출력과 부하의 전력소비를 15분 간격으로 예측하여 디젤발전기의 출력을 스케줄링하기 때문에 예측의 평균오차가 크지 않다고 가정하면 BESS의 평균적인 충/방전량은 크지 않을 것임을 예상할 수 있고 일반적으로 그림 8에 도시한 정상범위(Normal Region)에서 SOC가 유지된다. SOC가 정상인 범위는 일반적으로 SOC가 20~80% 사이에서 유지되는 상황이며 이 경우에는 주파수 제어명령을 1.0 pu로 설정한다.

EMS의 예측오차가 지속적으로 발생하여 BESS의 SOC가 정상범위($[SOC_{normal}^{min}, SOC_{normal}^{max}]$)를 벗어나는 상황이 발생하지 않도록 하기 위하여 본 논문에서는 SOC에 따라 BESS의 출력 주파수를 비례적으로 조정하는 주파수 조정(Frequency Modification) 제어를 제안한다. 주파수 조정 제어 시에는 디젤 발전기가 함께

운전되어야 하므로 디젤발전기가 꺼져 있다면 EMS에서 턴-온 신호를 보낸다. 예를 들어 BESS의 SOC가 감소하여 정상범위 (SOC_{normal}^{min})보다 작아진다면 주파수 조정제어를 통해 드립제어를 사용하는 디젤발전기의 출력을 증가하도록 유도한다. 일반적으로 디젤발전기의 드립계수가 5%이므로 주파수를 2.5% 낮추면 마이크로그리드에는 디젤발전기의 정격의 절반(가사도 계통의 경우, 디젤 발전기 1대 운전 시에는 50kW, 2대 운전 시에는 100kW)에 해당하는 전력을 추가적으로 공급할 수 있다. 따라서 BESS PCS의 주파수 조정을 통해 마이크로그리드의 전력수급오차를 충분히 보상할 수 있다.

그림 8에 도시한 바와 같이, 주파수 보상신호를 생성할 때 히스테리시스(hysteresis) 특성을 갖게 하여 정상 제어와 주파수 보상제어 사이에 잦은 모드 변경이 발생되는 것을 막을 수 있다. 히스테리시스 밴드 폭은 마이크로그리드의 특성과 제어전략에 따라 달라질 수 있는데 본 논문에서는 10%로 두기로 한다. 그림 8의 주파수 보상제어를 포함한 BESS의 제어와 디젤발전기 등 마이크로그리드의 구성요소의 제어를 통한 전체 마이크로그리드의 전압 및 주파수 제어원리를 3.4장에 설명하기로 한다.

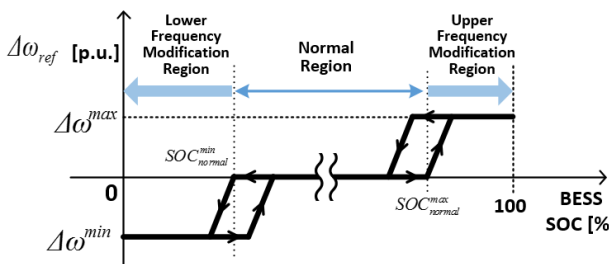


그림 8 BESS의 SOC에 따른 주파수 보상제어 기능
 Fig. 8 Frequency modification of frequency supplementary controller according to BESS SOC

3.3 풍력발전기 및 태양광 전원

본 논문에서 사용한 태양광 전원(PV: Photovoltaic Generator)과 풍력발전기(WT: Wind Turbine) 모델의 회로모델을 그림 9의 (a)와 (b)에 간략화 해서 나타내었다. 그림 8의 (a)에 나타난 태양광 전원은 pn접합된 반도체에 광 에너지를 가하면 전기가 발생하는 광전효과를 이용하며 태양광 어레이 모델의 회로적인 모델 및 전압-전류 및 전압-전력 특성은 참고문헌 [11]를 참고한다. 태양광 어레이는 전압이 증가함에 따라 출력전력이 상승했다가 감소하는 형태로 나타나며 계통연계 인버터를 이용한 직류단 전압제어로 태양광 어레이의 출력을 제어할 수 있다. 일사량 및 온도 등의 환경적인 조건에 따라 태양광 어레이의 최대 출력점이 변동하는데 계통연계 인버터가 항상 최대출력을 얻어지도록 하는 것을 최대전력 추종제어(MPPT: Maximum Power Point Tracking)이라고 하며 본 논문에서는 P&O (Perturbation-and-observation) 이라는 방법을 이용하여 MPPT 제어가 가능하도록 모델링하였다.

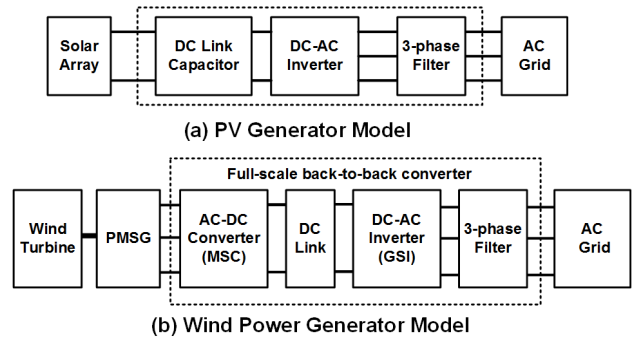


그림 9 태양광 전원과 풍력발전기 모델
 Fig. 9 Structure of Photovoltaic and Wind Power System

그림 8의 (b)에 나타난 풍력발전기는 영구자석 동기기(PMSG: Permanent Magnet Synchronous Generator)와 백투백(back-to-back) 형태의 2대의 3-레벨 인버터를 이용하여 구현하였다. 두 대의 인버터 중 한 대는 영구자석 동기기의 토크 및 회전속도를 제어하는 기능을 하며 이를 MSC(Machine-Side Converter)라고 부른다. 또 하나의 인버터는 전력계통과의 연계를 담당하며 직류링크의 전압을 제어하며 계통에서 요구하는 연계기준(Grid-code)을 만족하도록 설계하였다. 본 논문에서는 기본적으로 영구자석 동기기의 회전속도 제어를 통하여 MPPT 기능을 갖도록 설계하였으며 자세한 풍력발전기의 회로구성과 제어원리는 참고문헌 [12]를 참고한다.

3.4 마이크로그리드의 전압 및 주파수 제어원리

본 논문에서 제안하는 독립형 마이크로그리드의 전압 및 주파수 제어원리를 그림 10과 같이 순서도로 나타내었다. 기본적으로 BESS가 CVCF 제어를 통해 마이크로그리드의 전압과 주파수를 일정하게 제어한다. 재생에너지 전원의 출력과 부하의 전력소비의 불균형 시에도 마이크로그리드의 전력공급이 안정되게 유지하기 위해서 EMS에서 디젤발전기를 포함한 모든 발전원의 출력을 15분 간격으로 스케줄링을 수행한다. 발전원 스케줄링을 위해 부하예측과 신재생 에너지 전원의 출력예측 기능이 필요하며 이를 위해 기상청 데이터 등을 이용한다. EMS의 발전원 스케줄링에 따라 디젤발전기에 출력제어명령이 전송되며 디젤발전기는 여자기와 조속기를 이용하여 터미널 전압의 크기와 주파수 제어에 참여한다. BESS의 계통연계 PCS는 마이크로그리드 내의 전력불균형을 배터리의 충방전을 통해 빠르게 보상한다. 배터리의 용량은 마이크로그리드 내의 발전이 0인 상황에서 가사도 마이크로그리드 부하를 24시간동안 공급할 수 있도록 설계되었기 때문에 EMS의 발전기 스케줄링 오차는 배터리의 저장용량으로 충분히 보상이 가능하다. 따라서 정상동작 시에는 BESS는 주파수 정상제어(Normal Operation)를 수행하게 되며 SOC가 50%를 중심으로 안정된 범위에서 유지된다.

만약 BESS의 SOC가 지속적으로 변하게 되는 상황이 발생한다면 이는 마이크로그리드의 전력수급에 지속적인 오차가 발생한다는 것을 의미한다. BESS의 SOC가 정상제어 영역을 벗어나면

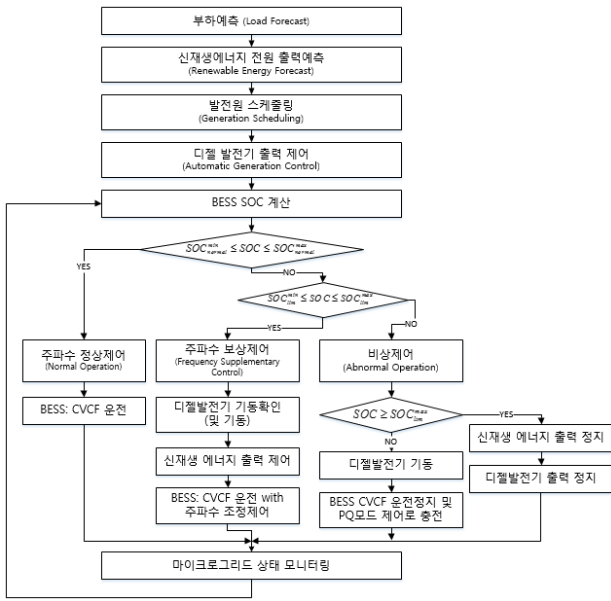


그림 10 마이크로그리드의 전압 및 주파수 제어원리 순서도
 Fig. 10 Microgrid operation strategies for secure voltage and frequency control

($SOC < SOC_{normal}^{min}$ 또는 $SOC > SOC_{normal}^{max}$ 인 경우), BESS는 주파수 보상제어(Frequency Supplementary Control) 동작을 수행하게 되어 기본적으로 CVCF 제어를 유지하되 그림 8에서 설명한 주파수 조정신호를 추가하고 디젤발전기의 드롭제어 특성을 이용하여 마이크로그리드 내의 잉여 또는 부족전력을 보상하며 SOC를 복구하도록 제어한다. 주파수 보상제어의 기준이 되는 SOC값은 계통의 특성과 운전자의 운전전략에 따라 정할 수 있으며 본 논문에서는 하위 30%, 상위 70%로 정한다.

만약 마이크로그리드 내의 고장 등의 원인으로 주파수 보상제어를 수행하여도 BESS의 SOC의 변동이 지속된다면 배터리가 과방전 또는 과충전 상태로 가는 것을 막기 위해 비상제어

(Abnormal Operation)을 수행한다. 비상제어 모드에서는 BESS는 CVCF 동작을 포기하고 PQ 제어모드로 바뀌어 SOC 제어를 수행하며 여자기 및 조속기 제어를 통해 디젤발전기가 주 전원으로서 마이크로그리드의 전압 및 주파수 제어를 수행하게 된다. 비상제어 모드를 수행하기 위한 과방전, 과충전 기준(SOC_{lim}^{min} , SOC_{lim}^{max})은 배터리의 특성에 따라 정할 수 있는데 본 논문에서는 하위 10%, 상위 90%로 정하도록 한다. 그 외에도 고장 등의 원인으로 비상제어로 가는 상황을 막기 위해 마이크로그리드의 신뢰성과 안정성을 위한 설계가 필요하다. BESS의 PCS, 디젤발전기와 주 변압기 등은 N-1 상정고장으로 고려한 설계로 2대씩 설치되며 BESS에 고장이 발생할 경우를 대비하여 BESS PCS는 CVCF 제어모드와 PQ 제어모드를 가져 주 전원 또는 보조전원으로 동작이 가능하도록 설계한다.

4. 시뮬레이션 해석

제한된 독립형 마이크로그리드의 제어기법의 성능을 검증하기 위하여 두 가지 시나리오에 대하여 시뮬레이션을 통해 동작을 분석하고 제어기법의 성능에 대해 검증하고자 한다. 첫 번째 시뮬레이션 케이스는 부하변동 시 BESS와 디젤발전기의 협조운전을 통해 전체 독립형 마이크로그리드의 전압과 주파수가 일정범위에서 안정하게 운전되는지 검증한다. 두 번째 시뮬레이션 케이스는 신재생 에너지 발전량이 증가하는 일출 시간대에 대한 BESS와 신재생 에너지 전원사이의 협조제어 케이스이다. 시뮬레이션 모델은 그림 11과 같이 MATLAB/Simulink를 이용하여 개발하였으며 각각의 모델은 앞 장에서 기술한 모델을 바탕으로 전체 시스템을 구성하였다.

4.1 Case 1: BESS와 디젤발전기의 병렬운전

가사도 독립형 마이크로그리드는 신재생에너지 전원의 발전을 우선시 하므로 디젤발전기는 신재생에너지 전원의 출력과 부하 전력소비를 예측하여 BESS의 SOC가 기준이하로 떨어지지 않도록

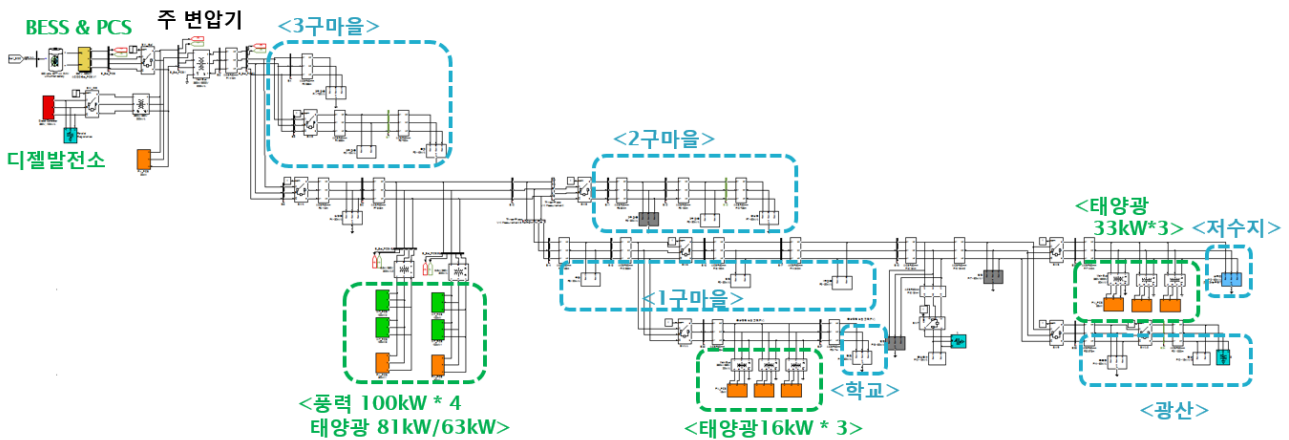


그림 11 MATLAB/Simulink로 구현한 가사도 독립형 마이크로그리드 시뮬레이션 모델
 Fig. 11 Simulation model of Gasa Island Microgrid using MATLAB/Simulink

록 제어한다. Case 1에서는 마이크로그리드가 정상모드로 동작 시에 BESS와 디젤발전기 전원의 협조적인 제어가 잘 수행되는지 검증하고자 한다. 특별히 부하의 급격한 계단식 변동 및 디젤발전기에 급격한 출력명령이 전달되었을 때, BESS PCS가 디젤발전기와 잘 협조하면서 계통의 전압과 주파수를 안정하게 제어할 수 있는가에 대한 검증을 목표로 한다. 마이크로그리드가 정상모드이므로 BESS PCS는 CVCF 제어를 수행하며 디젤발전기는 조속기와 여자기를 통해 출력제어를 수행한다. Case 1의 시뮬레이션 수행결과는 그림 12에서 그림 14와 같으며 시뮬레이션 시퀀스는 다음과 같다. BESS의 충/방전 동작에 따른 SOC 변동을 모의하기 위해 BESS의 저장용량을 실제용량의 1/3600로 줄여 모의하였다.

- t = 0.0 ~ 4.0초: BESS PCS는 CVCF 제어,
디젤발전기 출력명령은 0kW,
부하 전력소비는 유효전력100kW,
무효전력 0kVar
- t = 4.0초 : 디젤발전기 유효전력 출력증가 (0kW→50kW)
- t = 6.0초 : 부하 변동(유효전력 100kW→50kW,
무효전력 0kVar→20kVar)
- t = 8.0초 : 디젤발전기 유효전력 출력증가(50kW→100kW)

그림 12는 마이크로그리드 전체 부하가 시뮬레이션 시퀀스대로 변하고 있음을 보여준다. 0.0초에서 6.0초까지는 부하가 유효전력 100kW를 소비한다. 이때 발전기 부호규정(Generator Sign Convention)을 적용하여 소비하는 전력을 음수(-)로 표기하였다.

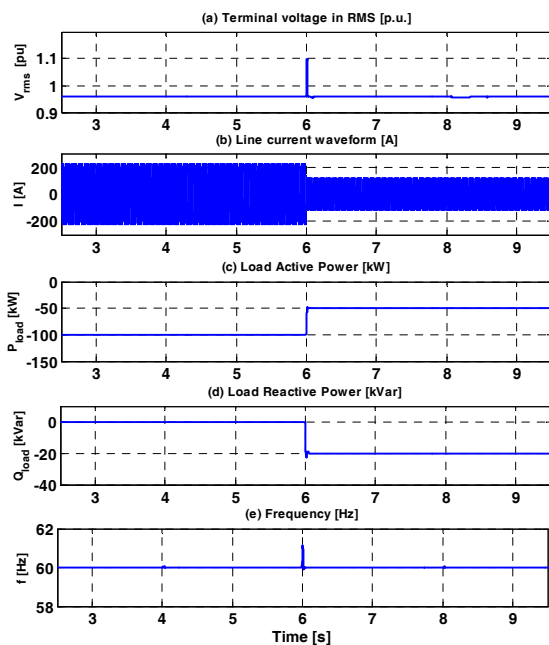


그림 12 부하 시뮬레이션 결과파형 (Case 1): 터미널 전압, 출력 상전류, 유효전력, 무효전력, 주파수

Fig. 12 Results of Load (Case 1): terminal voltage, load current, active and reactive power, and frequency

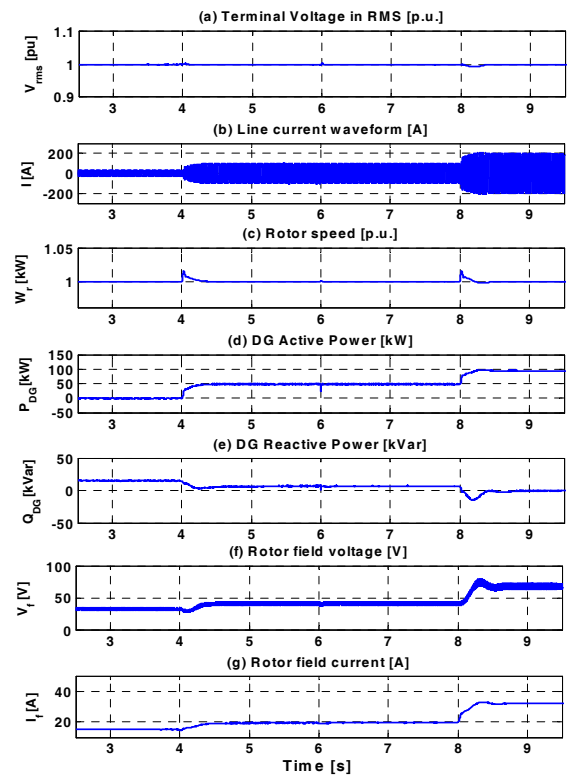


그림 13 디젤발전기 시뮬레이션 결과파형 (Case 1): 단자전압, 상전류, 회전자속도, 유효전력, 무효전력, 여자전압(V_f), 여자전류(I_f)

Fig. 13 Results of Diesel Generator (Case 1): terminal voltage, load current, rotor speed, active power, reactive power, and field voltage and current

6.0초에서 부하가 변동하는 것을 확인할 수 있다. 유효전력은 100kW에서 50kW로 감소했으며 반대로 무효전력은 0kVar에서 20kVar로 증가하였다.

그림 13는 시뮬레이션 시퀀스에 따라 디젤발전기의 출력이 0kW에서 50kW로, 50kW에서 100kW로 변함을 보여준다. 디젤발전기 출력 증가 시 조속기는 회전자 각도가 증가하도록 제어하는데 이로 인하여 그림 13(c)와 같이 발전기 회전주파수가 순간적으로 증가하였다가 정격으로 회복됨을 확인할 수 있다. 디젤발전기의 단자전압은 여자기의 동작으로 거의 일정하게 유지되고 있음을 볼 수 있으며 단자전압제어를 위해 일정량의 무효전력이 출력됨을 확인할 수 있다. 무효전력의 출력은 그림 13(b)의 전류파형에서도 확인할 수 있는데 4.0초 이전까지 디젤발전기의 유효전력 출력이 0kW임에도 불구하고 무효전류성분의 존재로 인하여 발전기 출력전류는 0이 아닌 일정한 값을 가지게 된다.

그림 14는 BESS의 시뮬레이션 결과를 보여준다. BESS PCS는 CVCF 동작을 수행하여 PCC 지점의 전압과 주파수를 일정하게 유지한다. 이를 위해 BESS PCS는 마이크로그리드의 발전과 소비의 차이에 해당하는 전력을 배터리에 충/방전하도록 제어한다. 이로 인하여 BESS의 동작상태가 방전에서 충전 제어로 변화하여도

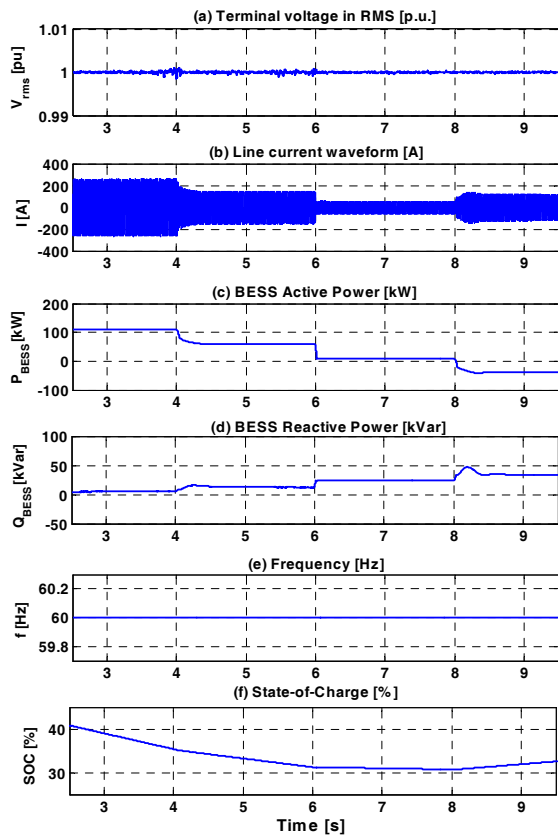


그림 14 BESS 시뮬레이션 결과파형 (Case 1): PCC 전압, 상전류, 유효전력, 무효전력, 주파수, 배터리 SOC

Fig. 14 Simulation results of BESS (Case 1): PCC voltage, load current, active and reactive power, frequency, and battery SOC

그림 14의 (a)와 (e)에서 볼 수 있듯이 전압 및 주파수를 일정하게 유지하며 전체적인 마이크로그리드가 안정적으로 운전됨을 확인할 수 있다.

4.2 Case 2: BESS와 신재생에너지전원의 연계

Case 2에서는 가사도의 부하 및 날씨 데이터를 바탕으로 오전 시간 동안의 가사도 마이크로그리드 환경에 대한 시뮬레이션을 통해 마이크로그리드의 전압/주파수 제어성능을 검증하였다. Case 2의 마이크로그리드 시뮬레이션 결과는 그림 15에서 그림 18과 같다. 부하는 최대, 최소 부하 사이에서 임의로 변한다고 가정하였고 태양광과 풍력 발전은 오전 5시부터 오전 11시까지의 통계적인 출력패턴을 기본 형태로 하여 임의적으로 변한다고 가정하였다. Case 1과 마찬가지로 BESS의 충/방전 동작에 의한 SOC의 변동을 확인하기 위해 BESS의 저장용량을 실제용량보다 1/3600배로 줄인 모델을 사용하였다.

그림 16은 태양광 발전기(PV)의 시뮬레이션 결과파형이다. 일사량이 서서히 증가함에 따라 PV의 MPPT 동작에 따라 유효전

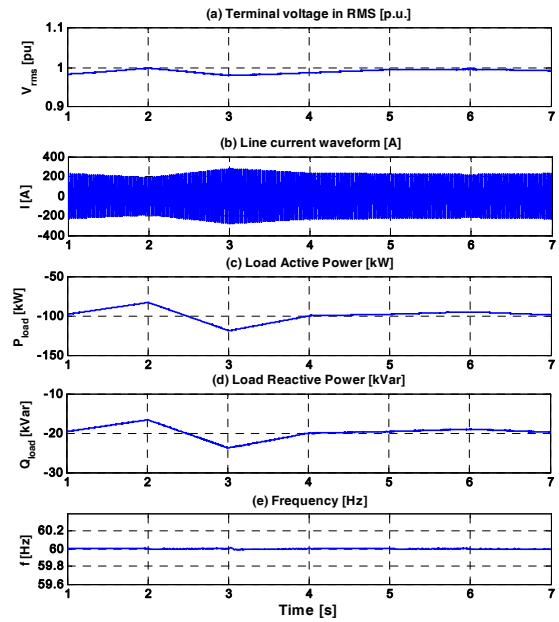


그림 15 부하 시뮬레이션 결과파형 (Case 2): 연계점 전압, 상전류, 유효전력, 무효전력, 주파수

Fig. 15 Simulation results of Load (Case 2): Terminal voltage, load current, active and reactive power, and frequency

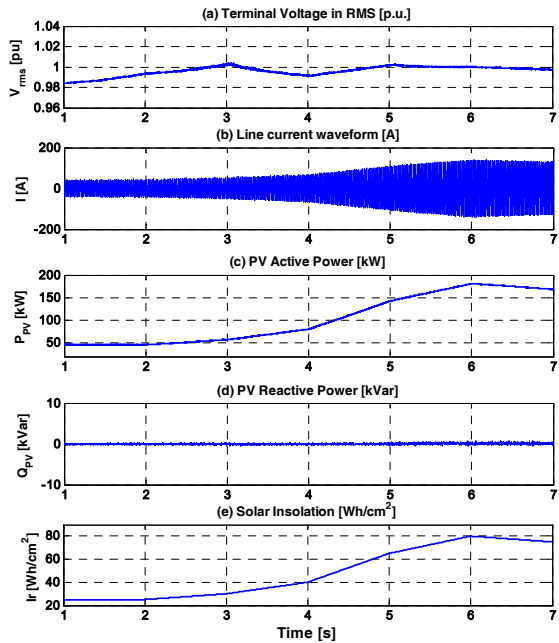


그림 16 태양광 발전 시뮬레이션 결과파형 (Case 2): PCC 전압, 상전류, 유효전력, 무효전력, 일사량

Fig. 16 Simulation results of PV (Case 2): PCC voltage, line current, active and reactive power, and insolation

력출력도 증가함을 확인할 수 있다. PV는 일반적으로 역률을 1.0으로 제어하므로 (Unity Power Factor), 무효전력출력은 거의 0임을 확인할 수 있다.

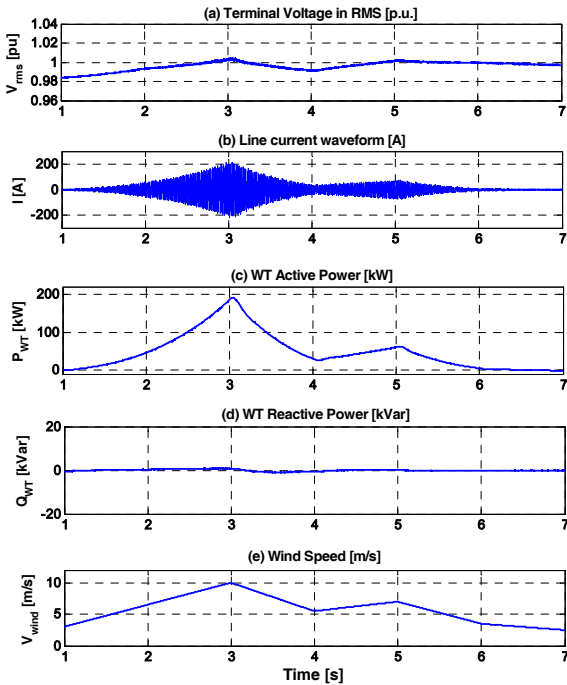


그림 17 풍력 발전 시뮬레이션 결과파형 (Case 2): PCC 전압, 상전류, 유효전력, 무효전력, 풍속

Fig. 17 Simulation results of WT (Case 2): PCC voltage, line current, active and reactive power, and wind speed

그림 17은 풍력발전기(WT)의 시뮬레이션 결과파형이다. 풍속이 3.5m/s 이상에서 유효전력을 발생시키며 정격풍속은 14m/s로 모의하였다. 풍속이 증가함에 따라 발전량이 증가함을 확인할 수 있다.

그림 18에서 시뮬레이션 시작시간인 1초일 때, 부하의 유효전력 소비가 신재생 발전기의 발전량보다 크기 때문에 BESS는 방전 제어를 수행한다. 이후 신재생 발전기의 발전량이 증가하면서 2초부터는 그림 17(c)에서 나타난 바와 같이 신재생 에너지 발전 총량이 부하보다 커지게 되고 BESS는 충전 제어를 수행하게 된다. 부하의 전압 및 주파수특성은 그림 18의 (a)와 (e)에서 확인할 수 있듯이 BESS의 충·방전 제어모드 변경 및 신재생 발전량의 변화에도 일정한 범위 내에서 안정하게 유지됨을 확인할 수 있다.

4.3 Case 3: BESS의 주파수 조정제어

Case 3에서는 어떤 원인에 의해 BESS의 SOC가 30%보다 낮아질 때 주파수 조정제어를 통해 BESS의 SOC를 보상하는 방법의 효과를 모의하였다. 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

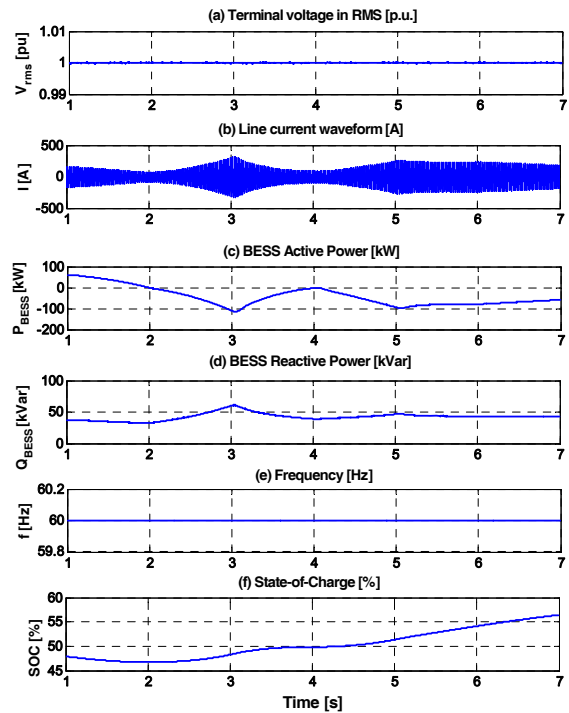


그림 18 BESS 시뮬레이션 결과파형 (Case 2): PCC 전압, 상전류, 유효전력, 무효전력, 주파수, SOC

Fig. 18 Simulation results of BESS (Case 2): PCC voltage, line current, active and reactive power, frequency, and SOC

t = 0.0 ~ 2.0초: BESS PCS는 CVCF 제어, 초기 SOC는 35%, 디젤발전기 출력명령은 0kW, 부하 전력소비는 유효전력55kW, 무효전력 10kVar
t = 2.0초 : 디젤발전기 유효전력 출력증가 (0kW→50kW)

그림 19과 20은 각각 BESS와 디젤발전기의 시뮬레이션 결과이다. 마이크로그리드에는 부하의 소비전력이 디젤발전기 발전전력보다 크기 때문에 그림 19(f)에서 확인할 수 있듯이 BESS의 SOC는 지속적으로 감소한다. BESS의 SOC가 30%보다 낮아지면 BESS는 주파수 조정제어 신호를 발생하여 그림 19(e)에서 확인할 수 있듯이 마이크로그리드의 주파수를 1% 감소시킨다. 전체 계통의 주파수가 감소하였으므로 디젤발전기는 조속기의 드롭제어에 의해 출력을 늘리게 된다. 그림 20(d)에서 확인할 수 있듯이 대략 50kW의 출력에서 70kW로 출력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 디젤발전기의 드롭 계인이 5%이므로 이론적으로 주파수가 1% 변할 때 발전량은 20% 변하게 되므로 정격이 100kW인 디젤발전기의 출력이 20kW 늘어난 것이다. 디젤발전기의 출력증가로 인해 마이크로그리드에는 잉여전력이 발생하고 이를 BESS의 배터리로 저장하여 SOC를 보상하게 된다.

Case 3은 EMS의 예측과 스케줄링에 지속적인 오차가 발생하는 상황을 가정한 것으로 실제 가사도 마이크로그리드의 EMS는

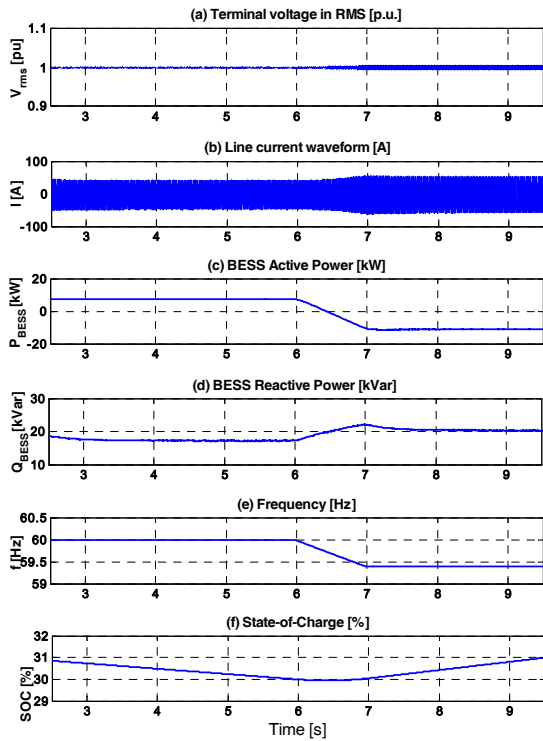


그림 19 BESS 시뮬레이션 결과파형 (Case 3): PCC 전압, 상전류, 유효전력, 무효전력, 주파수, SOC
 Fig. 19 Simulation results of BESS (Case 3): PCC voltage, line current, active and reactive power, frequency, and SOC

매 15분 간격으로 1일치의 예측을 수행하여 예측오차를 보정하기 때문에 현실적으로 발생할 가능성이 매우 낮은 케이스이다. 이러한 극단적인 상황 속에서도 마이크로그리드의 주파수를 전력 품질/신뢰도 기준을 만족하는 작은 범위에서 조정함으로써 BESS SOC를 안정적으로 유지할 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전라남도 가사도에서 수행 중인 독립형 마이크로그리드의 안정적인 전압 및 주파수 제어기법을 제안하고 성능을 검증하였다. 가사도 독립형 마이크로그리드는 태양광 및 풍력 발전, 배터리 에너지 저장장치와 기존에 주 발전기로 운영되고 있던 디젤발전기로 구성된다. 마이크로그리드의 운영목적은 디젤발전기의 사용을 최소로 줄이고 태양광, 풍력전원에서 발전한 전기를 효율적으로 사용하여 무탄소 친환경 에너지 섬을 만드는 것이다. 이를 위하여 본 논문에서는 여러 전원 사이의 제어동작의 충돌을 방지하고 전압 및 주파수가 안정적으로 유지될 수 있는 제어기법을 제안하였다. 제안된 제어기법의 검증을 위하여 MATLAB/Simulink 기반의 상세 시뮬레이션 모델을 개발하고 다양한 시나리오를 통해 성능을 확인하였다.

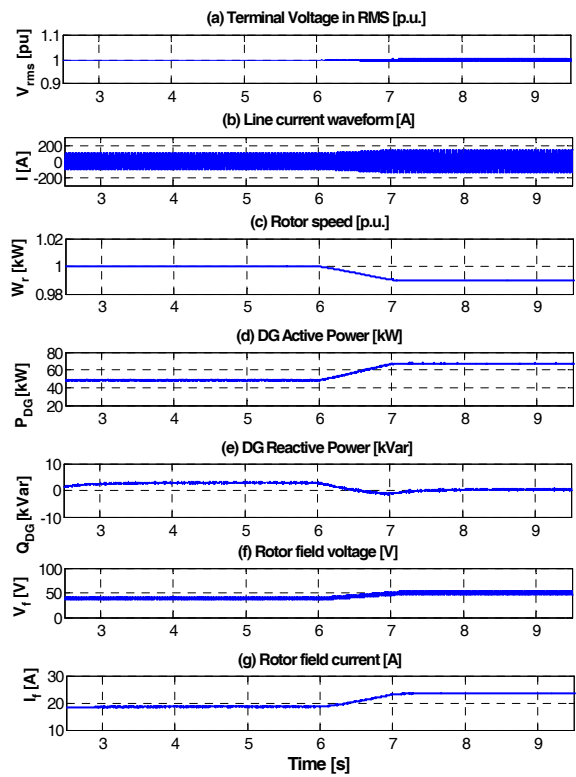


그림 20 디젤발전기 시뮬레이션 결과파형 (Case 3): 단자전압, 상전류, 회전자속도, 유효전력, 무효전력, 여자전압(V_f), 여자전류(I_f)
 Fig. 20 Simulation results of Diesel Generator (Case 3): terminal voltage, load current, rotor speed, active power, reactive power, and field voltage and current

감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원 (No. 20123010020080)의 연구 결과로 수행되었음.

References

[1] N. Hatzigiorgyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," IEEE power & energy magazine, pp.78-94, Jul./Aug. 2007.
 [2] "Technical improvement and business plan for microgrids," Proceedings of microgrid special session, 2013 KIPE General Meeting, July 2013.
 [3] W. Chae, H. Lee, S. Hwang, J. Kim, and J. won, "Overview of KEPCO's Island Microgrid Project," The International Conference on Electrical Engineering 2014, Jeju-Island, Korea, Jun. 2014.

- [4] T. Tsuji, T. Yamashita, T. Oyama, T. Hashiguchi, and T. Goda, "A Study on adaptive frequency control method by multiple DGs in island-type microgrid," 17th Power Systems Computation Conference, vol. 1, pp.190-195, August, 2011
- [5] R. Sebastian, and R. Pena Alzola, "Simulation of an isolated Wind Diesel System with battery energy storage," Electric Power Systems Research, vol. 81, pp.677-686, Feb. 2011
- [6] G. Li, F. Xiaopeng, L. Xialin, and W. Chengshan, "Coordinated Control of Battery Storage System and Diesel Generators in AC Island Microgrid," Power Electronic and Motion Control Conference, vol. 1, pp.112-117, June 2012
- [7] M. Shao, R. Liu, and D. Lu, "Control Strategy of Voltage and Frequency for Islanded Microgrid," Power Electronic and Motion Control Conference, vol.3, pp.2085-2089, June 2012
- [8] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 27, no. 11, pp.4734-4749, Nov. 2012.
- [9] A. Yazdani and R. Iravani, "Voltage-Sourced Converters in Power Systems," IEEE Press, 2010.
- [10] S. Krishnamurthy, T. Jahns ,and R. Lasseter, "The Operation of Diesel Gensets in a CERTS Microgrid," Power and Energy Society General Meeting, pp.1-8, July. 2008.
- [11] C. Yoo, I. Chung, S. Hong, W. Chae, and J. Kim, "A Feasibility Study on DC Microgrids Considering Energy Efficiency," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 60, No. 9, pp.1674-1683, Sep. 2011
- [12] Ch. Yoo, I. Chung, H. Yoo, and S. Hong, "A Grid Voltage Measurement Method for Wind Power Systems during Grid Fault Conditions," Energies, vol. 7, no. 11, pp.7732-7745, Nov. 20, 2014.

저 자 소 개



김 상 혁 (Sang-Hyuk Kim)

1987년 12월 12일생. 2013년 국민대학교 전자공학부 졸업. 현재 동 대학원 전자공학부 석사

Tel : 02-910-5581

E-mail : dungate@naver.com



정 일 엽 (Il-Yop Chung)

1976년 3월 16일생. 1999년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 졸업. 2001년, 2005년 동 대학원 전기·컴퓨터공학부 석사, 박사 취득. 2005년-2007년 미국 버지니아텍 연구원, 2007년-2010년 FSU-CAPS 연구원, 2010년 9월-현재 국민대학교 전자공학부 조교수

Tel : 02-910-4702

E-mail : chung@kookmin.ac.kr



이 학 주 (Hak-Joo Lee)

1966년 12월 5일생. 2004년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1991년, 2004년 동 대학원 전기공학 석사, 박사 취득. 1995년 한국전력 입사, 현재 한전 전력연구원 마이크로그리드 연구사업단 책임연구원

Tel : 042-865-5982

E-mail : juree@kepco.co.kr



채 우 규 (Woo-Kyu Chae)

1977년 4월 22일생. 2004년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 2007년 충북대학교 전기공학과 석사학위 취득, 2014년 충북대학교 전기공학과 박사과정 수료. 2004년~현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5986

E-mail : wkchae@kepco.co.kr