

마이크로그리드를 기반으로 한 중소 산업용수용가의 최대수요전력 저감방안

The Maximum Demand Power Reduction of Small Industrial Factory based on Microgrid

장 홍 순* · 김 철 진* · 박 상 원†

(Hong-Soon Chang · Cherl-Jin Kim · Sang-Won Park)

Abstract - Recently, the power consumption of industrial consumer has increased rapidly, causing problems such as lack of power reserve margin in summer and winter, and therefore there is a growing need for maximum demand power management to consumers. In this paper, we studied small microgrid system consisting of battery ESS and photovoltaic power system, applied to small and medium sized factories to reduce the maximum demand power of daily industrial power load. To verify the validity of the study, we simulated a small microgrid system using Matlab/Simulink software. As a result of applying the simulation to small and medium sized plants that consume a lot of power, it is confirmed that there is a 13% reduction in demand compared to the existing maximum demand power. This result is expected to contribute to the improvement of the power reserve margin.

Key Words : Microgrid, Maximum demand power, Power reduction, Simulation, Demand data

1. 서 론

최근 유엔기후변화협약 당사국총회(COP21)에서 채택된 파리협정의 발효가 가시화됨에 따라 국제사회의 온실가스 감축이 본격화될 전망이다. 이에 반해 국내의 경우는 산업부문의 전력소비 비중이 주요선진국에 비해 높고 전력소비도 지속적으로 증가하고 있는 경향을 보이고 있다. 이러한 변화하는 대내외적 여건을 반영하여 전력부문에서도 수요관리 중심으로의 정책전환과 함께 산업부문의 전력소비의 증가를 완화하기 위한 전력수요 관리 대책이 강하게 요구되고 있다.

한편, 산업용 수용가의 전력설비의 대형화 등에 따른 전력소비의 증가로 인해 산업용 수용가의 전력수요는 국가 전체수요의 55 % 이상에 이르고 있으며, 특히 동계 및 하계에 집중되는 전력수요로 인해 전력예비율의 부족 등의 문제가 발생되고 있다. 이에 대한 대책으로 산업용 수용가에서는 부하차단을 통해 전력량을 제어하는 기존의 최대수요전력제어기(Demand Controller)를 이용하는 방법을 적용하여 왔으나 이 경우 생산 공정에 차질을 일으킬 우려가 상존하고 있다.

따라서 부하 차단 없이 전력예비율을 확보하고 최대수요전력을 저감할 수 있는 방안으로 신재생에너지(RES, Renewable Energy Source), 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System) 및 부하 등을 기존 계통과 연계한 소규모

마이크로그리드 시스템을 적용한 대책 등이 요구되고 있다 [1-4].

그러나 실제 에너지 다소비형 중소 산업용 수용가를 대상으로 소규모 마이크로그리드 시스템을 적용하기 위해서는, 수용가의 실제 전력 수요 이력 및 사용 조건을 고려한 마이크로그리드 시스템의 구성과 그 운용효과를 사전에 검증할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 중소 산업용 수용가의 실제 전력수요 데이터를 수집하고 이를 기반으로 수용가 내에 태양광발전 및 배터리스истем을 포함하는 소규모 마이크로그리드 시스템을 구성하여 최대수요전력 및 전력량을 저감하기 위한 방안을 제시한다. 에너지저장장치를 단독으로 사용할 경우 최대수요 시점에서의 배터리 방전을 통해 최대수요전력을 저감할 수 있으나, 해당 시스템에서는 충전에 사용되는 전력과 전체적인 사용 전력량 저감을 위해 태양광발전설비와 에너지 저장장치를 조합한 시스템을 적용하였다. 또한 구축한 마이크로그리드 모델을 대상으로 Matlab/Simulink를 활용한 시뮬레이션을 통해, 대상 산업용 수용가의 전력 이용효율 향상 효과를 확인하고 제안한 방안의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 분산전원 및 부하 특성

2.1 부하의 수요특성

수요전력의 저감효과를 고려하여, 국가 산업단지 내에 소재한 대표적인 에너지 다소비 업종인 열처리를 전문으로 하는 전력 다소비 중소형 공장을 산업용 전력 부하의 모델로 선정하였다. 또한 수용가에 적합한 마이크로그리드 구성요소의 적정규모를 판단하기 위해서는, 우선 수용가의 과거 수전 이력으로부터 수용가의 전력 수요패턴과 최대수요가 발생

† Corresponding Author : Dept. of Energy & Electrical Engineering Korea Polytechnic University, Korea

E-mail : psw3692@naver.com

* Dept. of Energy & Electrical Engineering Korea Polytechnic University, Korea

접수일자 : 2016년 12월 6일

수정일자 : 2017년 1월 6일

최종완료 : 2017년 2월 6일

상황을 파악할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 해당 부하의 수요 특성을 확인하기 위해 수용가의 최근 2년 동안의 전력수요 데이터로부터, 최대수요가 발생한 2일의 전력수요 데이터를 수집하고, 매 수요시한(15분)마다 계측한 당일의 수요 패턴을 그림 1에 제시한다.

그림 1은 과거 2년 중 최대수요가 발생한 날의 실제 계측한 15분 단위의 전력수요 이력 데이터로, 태양광 발전 및 배터리스스템의 충·방전 형태에 따라 차별화되는 2가지의 서로 다른 수요패턴(case-1, case-2) 특성을 나타내고 있다. 그림 1의 case-1은 2015년 중 최대수요가 발생한 날(2015.04.21)의 1일 수요데이터로 수용가의 일시적 생산증가에 따른 설비가동에 따라 오전(09-11시)에 최대수요가 발생한 경우이며, case-2는 2016년 1월부터 11월 중 최대수요가 발생한 날(2016.01.06)의 1일 수요 데이터로 태양광 발전출력을 활용하여 배터리스스템의 충·방전을 통한 수요대응이 가능한 오후 시간대(17-19시)에 최대수요가 발생한 경우이다.

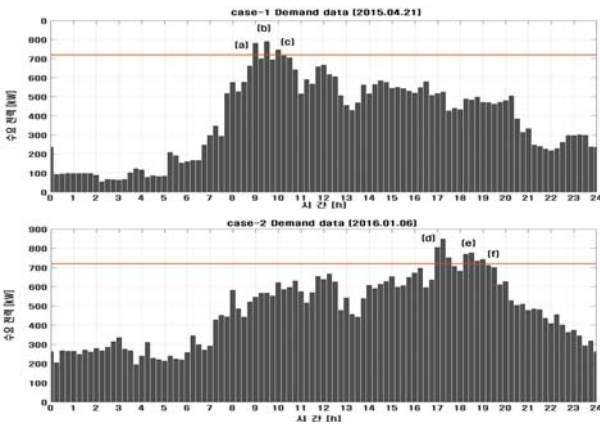


그림 1 수용가의 최대수요전력 이력데이터
(a)~(f) : 목표 초과전력)

Fig. 1 Maximum demand power history data

그림 1의 데이터로부터 case-1의 순간최대수요는 773 [kW], case-2의 경우 830.1 [kW]를 기록하였으므로, 본 연구에서는 해당 수용가의 직전년도 월별 수전이력 데이터와 최대수요를 기록한 날의 당일 수요시한(15분)에서의 최대 수전전력 773 [kW] 및 금속가공 부하(열처리)의 특성을 고려하여 case-2를 기준으로 최대수요의 약 10 [%] 정도에 최대 수요 저감을 계획하고 목표치를 720 [kW]로 설정하였다[5].

또한, 배터리스스템의 설비용량을 결정하기 위해 설정 목표치를 초과하는 전력량을 계산하였다. 그림 2의 데이터는 그림 1의 이력 데이터 중 목표치를 초과한 수요전력을 가지적으로 나타낸 것으로, 그래프에서 x축은 초과시간을 분 당 데이터로 변환한 데이터이며, y축은 초과전력을 의미한다. case-1과 case-2 각각 3 회의 수요 초과가 발생하였으며, case-1에서 (a)-(c)는 08:54-10:05의 시점에서, case-2의 경우 (d)-(e)는 16:54-19:03의 시점에서 수요 초과가 발생하였다.

목표치 초과 수요데이터를 바탕으로 초과 전력량을 계산하기 위해 비선형 형태로 표현되는 부분을 선형근사화하여 데이터의 면적을 구할 수 있는 다음의 식 (1)을 적용하여 초과 전력량을 산정하였다.

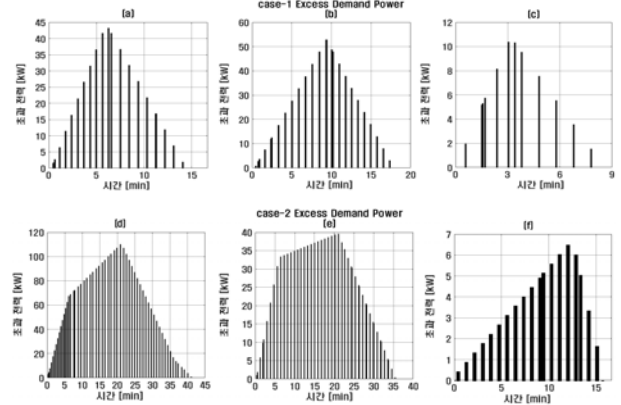


그림 2 목표치 초과 수요데이터

Fig. 2 Excess demand power

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (x_{n+1} - x_n) [(f(x_n) + f(x_{n+1}))] \quad (1)$$

식 (1)은 초과 전력량에 해당하는 비선형 데이터의 면적을 구하기 위해 사용한 구분구적법의 사다리꼴응용 공식으로, 여기서 N은 선형근사화를 위해 구분한 데이터들의 총 숫자를 의미한다. 또한, f(x)는 그림 2에서 비선형 형태의 목표치 초과전력에 대해 오차를 최소화 하도록 선형근사화하기 위하여 사다리꼴로 분할한 면적에 해당하므로, 이를 합산한 총 면적이 초과 수요전력량에 해당한다[6]. 해당 수식을 활용하여 목표치를 초과된 전력량을 계산한 결과, case-1의 경우 13.8 [kWh], case-2의 경우 58.7 [kWh]이며, 이를 정리하면 표 1과 같다.

표 1 목표치 초과 전력량

Table 1 Exceeding power to target value

| Section \ Case | case-1 | case-2 |
|----------------|--------|--------|
| Section1 [kWh] | 5.26 | 42.23 |
| Section2 [kWh] | 7.78 | 15.56 |
| Section3 [kWh] | 0.76 | 0.91 |
| Total [kWh] | 13.8 | 58.7 |

2.2 태양광발전 출력

본 연구에서는 최대수요전력 저감 뿐 아니라 분산전원을 통한 사용전력량 저감의 효과를 고려하여 태양광발전 설비를 시뮬레이션에 추가하여 구성하였다. 일사량 측정 시 case-1과 case-2가 적용된 시기(봄, 겨울)에 동일한 평균 발전량을 적용하기 위해 계절별 평균 일사량과 일사 시간을 나타내는 추분(2016.09.22.)의 일사량을 실측하고, 이를 기준으로 태양광 발전량을 적용하였다. 측정을 위해 일사량을 측정할 수 있는 Vernier Software and Technology 사의 Labquest2 장비를 이용하여 해당 수용가의 옥상에서 남향 27°의 각도로 일사량 계측이 가능한 시간(09:00-18:00) 동안 측정하였다.

일사량 데이터를 적용할 태양광 모듈은 L사의 260 [W]급 (피크전압 31.95 [V], 피크전류 8.61 [A]) 태양광 모듈을 적용하였다. 측정된 일사량 데이터와 태양광 모듈의 사양을 다음의 식 (2)에 적용하여 태양광 어레이의 출력 데이터를 계산하였다.

$$P_{PV} = \frac{P_{topo} \times D \times P_o}{I_L} \times (1 - L_{temp}) \times (1 - L_{inv}) \times (1 - L_{dex}) \quad (2)$$

여기서, P_{topo} 는 경사면 일사량 [kWh/m²], D 는 일 수 [day], P_o 는 태양광 모듈의 정격출력, I_L 은 표준 일사강도 [kW/m²], L_{temp} 는 태양광 패널의 온도상승으로 인한 손실률, L_{inv} 는 PCS의 손실률, L_{dex} 는 먼지 등의 기타 손실률을 의미한다[7].

그림 3은 최종 출력된 태양광 어레이의 발전량으로 일사량 측정 시간동안의 데이터를 나타낸다. 태양광 어레이에서 최대 일사 시 발전 전력은 약 9 [kW]이며, 발전 전력량은 식 (1)을 적용하여 산정하였을 때 53.9 [kWh]로 예상된다. 태양광 어레이의 용량은 수용가에 설치할 수 있는 가용면적과 초기 설비투자비를 고려하여 총 40개의 모듈을 사용해 정격용량을 10.4 [kW]로 설정하였다.

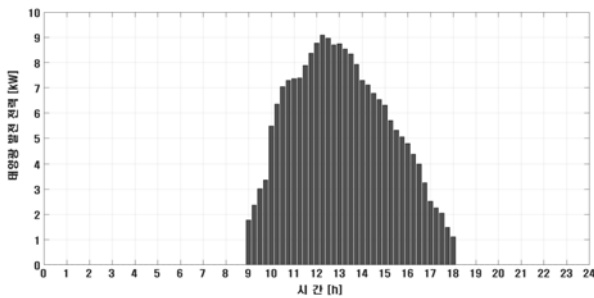


그림 3 태양광 어레이 출력 데이터
Fig. 3 Photovoltaic array output data

2.3 에너지저장장치

마이크로그리드 시스템의 핵심요소인 배터리 에너지저장장치(ESS)는 전력을 저장하여 필요 시 공급함으로써 전력 이용효율을 향상시킬 수 있는 시스템으로 태양광 등 신재생 에너지에 의한 발전 출력의 안정과 에너지 활용의 효율성을 도모할 수 있는 장점을 갖고 있다.

본 연구에서는 고 에너지 밀도와 높은 효율 특성을 갖는 리튬이온전지(LiB)를 대상으로 마이크로그리드를 구성하고 있다.

산업용 수용가의 최대수요 전력을 저장하기 위한 배터리의 용량은 저장 대상 부하가 지속되는 시간 동안에 필요한 전력량 이상을 공급할 수 있어야 한다.

배터리의 정격은 과거의 전력 수요 이력 중 최대수요를 기록한 case-2의 데이터를 기준으로, 다음 식 (3)을 적용하여 산정한다. 여기서, P_{MBase} 는 기준최대부하 [kW], P_{Max} 는 일간 최대부하 [kW], α 는 여유분, P_b 는 배터리의 정격용량 [kW], γ 는 피크 저감율 [%]을 의미한다. 이 때, 여유분

(α)은 당해연도를 포함한 3년의 과거 수전이력 데이터로부터 최대수요전력의 평균값 대비 증감율을 고려하여 2-3 [%]로 설정하였다.

$$P_{MBase} = P_{Max} + \alpha$$

$$P_b = P_{MBase} \times \gamma \quad (3)$$

배터리의 적정용량은 총 초과 전력량, 피크 저감율, 배터리의 잔존용량(SOC, State of Charge) 등을 고려하여 필요한 최소의 용량을 기준용량으로 설정한다. 그림 4는 본 연구에 적용한 배터리의 기준용량 산정을 위한 절차를 나타낸 흐름도이다[8].

해당 산업용 수용가의 최대 수요전력 이력 데이터를 나타낸 그림 1로부터 최대수요는 각각 773 [kW], 830.1 [kW]이므로, 최대수요를 나타낸 case-2를 기준으로 여유분 α 를 고려하여 피크 저감율을 적용하면 배터리의 정격용량은 85 [kW]이다. 또한 전력수요 데이터로부터 총 전력 초과량은 각각 13.8 [kWh] (case-1), 58.7 [kWh] (case-2)이므로 SOC 동작범위 80 [%]를 고려할 때, 기준용량은 각각 18 [kWh], 70 [kWh] 정도로 설정할 수 있다. 이를 정리하면 다음의 표 2와 같다.

이상의 검토 결과로부터, 시뮬레이션 모델에서는 T사의 48 [V], 70 [Ah] 급 리튬이온 배터리모듈을 8 직렬, 3 병렬로 구성하여 380 [V], 210 [Ah]의 총량을 갖는 배터리 팩의 형태로 구성한다.

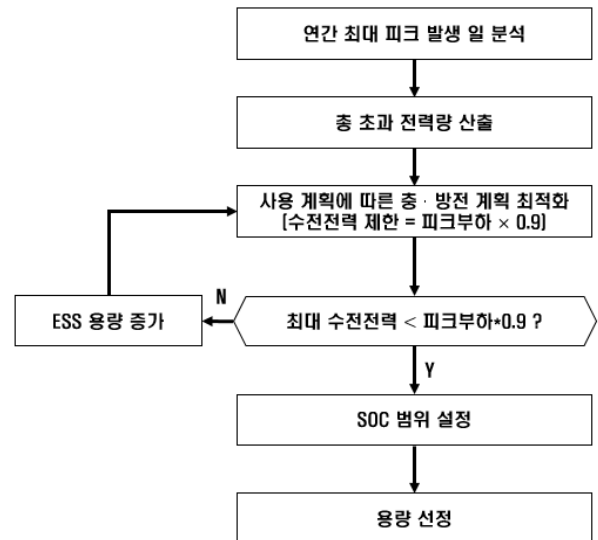


그림 4 배터리의 기준용량 산정 흐름도
Fig. 4 Estimation of proper battery capacity

표 2 배터리의 정격 및 적정용량
Table 2 Battery rating and proper capacity

| 구분[용량] 연도 [년] | 최대수요 [kW] | 정격 [kW] | 기준용량 [kWh] |
|------------------|-----------|---------|------------|
| 2015 | 773 | 78 | 18 |
| 2016 | 830.1 | 85 | 70 |

3. 구성요소의 모델링

3.1 시뮬레이션 환경

본 연구의 시뮬레이션에는 과학기술 분야에 폭넓게 활용되는 Matlab/Simulink를 사용하여 모델을 구성한다. 전체적인 시뮬레이션 모델은 멀티도메인 시뮬레이션과 블록 기반 설계 구현을 위한 모델링 환경을 제공하는 Simulink와 3상 계통 및 전력 네트워크 구현을 위해 물리적 시스템 블록을 제공하는 Simscape 및 하위 툴을 이용하여 전체 시스템 블록을 구축한다.

또한 배터리의 충·방전 및 태양광 발전량 제어를 위해 관리 및 작업 스케줄링 등의 로직을 시뮬레이션에서 직관적으로 표현하고 출력할 수 있는 Stateflow의 Chart 블록을 추가하여 모델을 구성한다.

일반적인 전력 네트워크 시뮬레이션 모델을 구현하기 위해서는 컨버터 및 인버터와 같은 전력변환장치(PCS, Power Conditioning System)가 필수적으로 필요하다. 그러나 대규모 전력 네트워크 모델에 PWM(Pulse Width Modulated)제어를 적용할 시 스위칭이 시뮬레이션 속도에 영향을 주기 때문에 실질적인 시뮬레이션 시간 안에 적절한 결과를 기대하기 어렵다. 따라서 본 모델에서는 전력네트워크를 구성하는 각각의 블록 출력을 Magnitude-Angle to Complex를 활용하여 복소치로 출력하는 방법을 사용하였다. 이러한 방법은 진폭과 위상 외의 정보는 시뮬레이션에서 제외되기 때문에 시뮬레이션 속도를 대폭 개선할 수 있다. 또한 복소치로 표현된 데이터 자체를 전력네트워크 시스템에 바로 적용할 수 없으므로 Simscape 블록 중 Controlled Current Source를 통해 시뮬레이션에 적용된 분산전원 요소들과 부하 데이터의 값을 전류치로 사용한다. 시뮬레이션은 효율성을 고려하여 이상적인 모델을 가정하고, 전력네트워크 및 외부조건에 의해 발생하는 에너지손실 및 위상차는 고려하지 않는다.

3.2 시스템 구성

에너지 다소비 중소기업을 대상으로 한 해당 모델의 시스템 구성을 그림 5에 나타내었다. 시스템은 크게 제어부, 계통, 태양광 설비, 배터리 시스템 부분으로 구성된다. 각각의 시뮬레이션 구성 요소들은 Simulink의 기능 중 다수의 블록을 하나의 블록으로 구성할 수 있는 Create a Subsystem 기능을 사용하여 표현한다. 제어부는 태양광발전과 부하(수용가)의 수요 데이터패턴 결정을 위한 Scenario 블록과 배

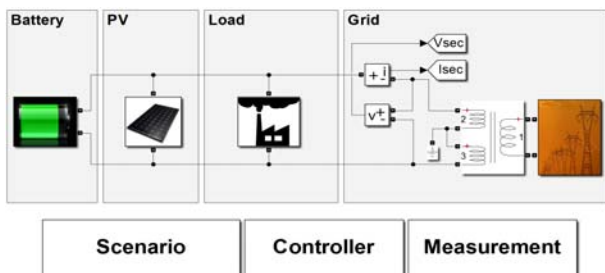


그림 5 시스템 구성
Fig. 5 System configuration

터리 및 태양광의 충·방전 등의 제어기능을 수행할 Controller 블록, 그리고 각 분산전원 및 부하의 출력, 배터리 SOC 등의 데이터를 그래프로 확인하기 위한 Measurement 블록으로 구성된다.

3.2.1 배전계통

그림 6은 Grid 블록의 구성을 나타낸다. 계통전력은 일반적인 배전설비를 모델로 하여 3상 전압원에서 출력되는 22.9 [kV]를 변압기에 연결하고 6.6 [kV]로 변압 후 π 형 전송선로를 통해 주상변압기에서 최종적으로 380 [V]를 출력한다. 계통 측 출력값은 부하, 태양광 및 배터리 시스템 블록과 연결되며 계측기 블록을 통해 2차 측 전압과 전류를 측정한다. 블록 구성 중 powergui 블록은 시뮬레이션 유형을 결정하는 블록으로 본 모델에서는 복소치로 데이터를 표현하기 때문에 Phasors type으로 설정하였다.

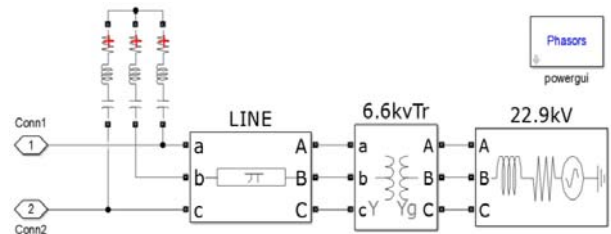


그림 6 Grid 블록 구성
Fig. 6 Grid block configuration

3.2.2 부하 및 태양광 설비 모델링

모델링에 사용된 소프트웨어 기능 중 Simscape의 태양광 등의 신재생에너지 구현 블록들은 복소값의 데이터로 표현된 전력네트워크 환경에 적합하지 않다. 따라서 측정된 데이터들을 시뮬레이션에 직접 적용하기 위해 Simulink의 블록들을 사용하여 자체 제작하였다.

그림 7은 산업용 전력부하와 태양광 발전량을 시뮬레이션에 적용하기 위한 Scenario 블록의 구성을 나타낸다.

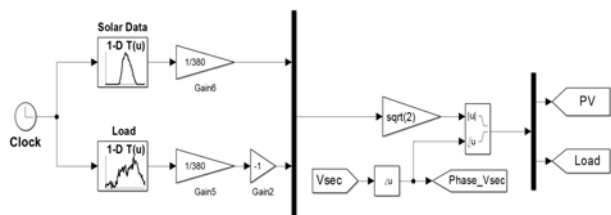


그림 7 Scenario 블록 구성
Fig. 7 Scenario block configuration

실측한 태양광발전 출력과 부하의 수요데이터는, 데이터를 시뮬레이션 시간에 맞추어 출력할 수 있는 Lookup-Table(n-D) 블록을 통해 입력되며, 전류값으로 표현하기 위해 계통에 적용된 전압(380 [V])을 나눈 후 최대치의 형태로 입력되고 2차 측 전압의 위상차 데이터와 함께 Magnitude-Angle to Complex 블록으로 입력되어 출력된다.

출력된 복소 데이터들은 각각 PV 블록과 Load 블록으로 입력되고 최종적으로 Controlled Current Source를 통해 전류의 값으로 계통과 연결된다.

3.2.3 에너지저장장치(ESS) 모델링

Simscape의 배터리 구현 블록들은 복소 데이터로 표현된 전력네트워크 환경에 적합하지 않다. 따라서 배터리의 SOC와 방전용량 [Ah], 충·방전 스케줄링 등의 모델을 Simulink 및 Stateflow를 사용하여 직접 구현하였다. 그림 8은 배터리 복소전력 출력 구현과 충·방전량 제어를 위해 사용된 Controlled 블록의 내부 구성을 나타낸다.

배터리의 충·방전 전력량 데이터는 계측기 블록을 통해 복소치로 측정된 2차 측 전압 및 전류의 데이터를 입력받아 복소전력으로 계산하고 Complex to Real-Imag 블록을 통해 전력 데이터를 유효 및 무효분으로 변환하여 출력한다. 그 후 배터리 출력 전력량을 제한시켜 배터리 용량에 적합한 출력이 나올 수 있도록 설계하였다.

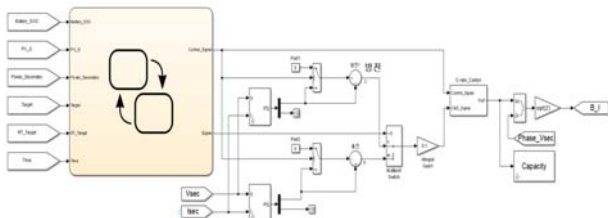


그림 8 Controlled 블록 구성
Fig. 8 Controlled block Configuration

또한, 본 모델에서는 배터리에 충·방전 제어 신호 출력과 태양광 발전량 제어를 위해 스케줄 로직 구성이 가능한 Stateflow의 Chart 블록을 사용하여 모델을 구성하였다. 해당 블록은 수전 전력량, 배터리의 SOC, 태양광 발전량, 시물레이션 시간, 목표전력 등의 데이터를 입력 신호로 하여 적용된 제어식에 따라 적절한 동작여부 및 충·방전 신호를 출력한다.

배터리의 충전은 입력된 15분 전력 수요데이터에서 피크 시간대를 판별하고 태양광 발전량을 이용하여 충전 가능여부를 판단한 후 태양광 또는 계통으로의 충전 방식을 결정한다. 태양광 발전량에 의해 충전 가능하다고 판단되면, 발전전력이 5 [kW]를 넘는 시점부터 충전을 시작하고 부하 사용 전력량이 목표치 부근까지 증가하거나 배터리의 SOC가 90 [%]까지 충전되면 충전을 중단한다.

배터리의 방전은 부하 사용 전력량을 충당하는 태양광 발전량을 제외한 후, 설정한 목표치를 초과하는 전력량만큼을 방전하고 방전 종료시점 이하로 부하의 사용량이 감소하거나 SOC가 10 [%] 이하로 감소하면 방전을 종료한다.

배터리의 충·방전 신호가 결정되면 출력되는 배터리 전력의 효율적인 사용을 위해 방전 시 C-rate를 목표 전력 초과량에 따라 자동으로 조정할 수 있도록 설계하였다. C-rate 블록은 계산된 전력량과 동작신호를 입력받아 충전 또는 방전될 전력량을 integrator 블록을 사용해 5 [kW] 기준으로 제한하여 출력되도록 구성하였다. 그 후 Multi-Port Switch

블록과 Chart 블록을 통해 수전 전력량, 태양광 발전량, 목표전력량을 입력받아 그림 9의 제어로직에 따라 출력 전력량을 제어하게 된다.

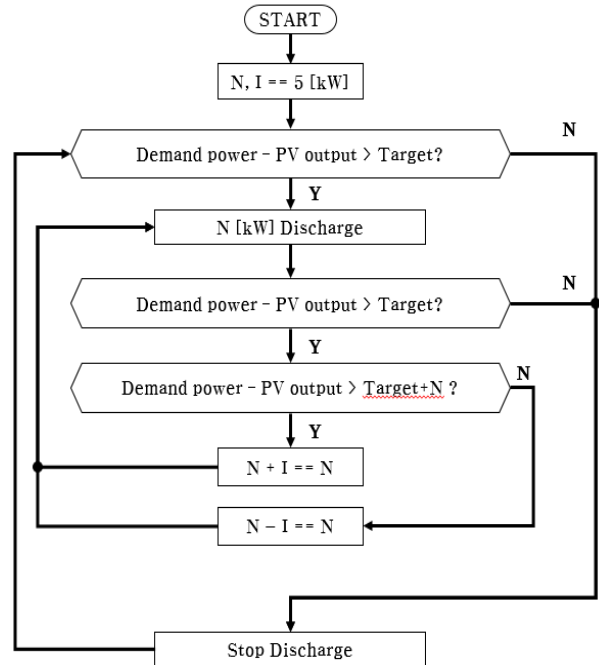


그림 9 C-rate 제어 로직
Fig. 9 C-rate control logic

배터리의 최종 출력량이 정해지면 해당 데이터는 출력과 별도로 축전지의 충전상태를 나타내는 SOC와 방전용량을 다음의 식 (4), (5)를 통해 블록형태로 구성한 Capacity 블록으로 연결되어 각 요소의 값을 출력한다.

$$Ah[Ah] = \frac{\int_0^t i(t) dt}{3600[s]} \quad (4)$$

$$SOC[\%] = 100 \left(\frac{\int_0^t i(t) dt + q(0)}{Q \times 3600[s]} \right) \quad (5)$$

방전용량은 배터리 출력 전력량을 입력받아 적분하여 충전하량을 계산한 후, 3,600(1시간)으로 나눠 시간 당 데이터로 표현하였고, SOC는 총 전하량과 초기값을 더한 후 배터리 정격용량을 나누는 형태로 블록을 구성하였다. 배터리의 SOC는 과충전 및 과방전을 방지하기 위해 최소 10-90 [%] 범위에서 제어되도록 Controlled 블록의 Chart 블록에서 제어한다.

4. 시물레이션 결과 및 고찰

시물레이션은 수용가의 다양한 수요패턴에 대비하여 과거 수요전력 이력데이터로부터 최대수요전력이 발생한 날의 데이터를 적용한 2가지 case에 대해 시물레이션을 진행한다.

4.1 case-1의 경우

case-1은 일시적 생산증가에 따라 최대수요가 발생한 경우로, 생산 공장의 생산량 증가에 따라 일시적으로 생산설비의 가동이 집중되는 경우에 발생할 수 있다. 또한 오전 시와 같이 기상 상황이 불순하거나 태양광발전의 출력이 미약한 오전 시간에 생산 설비의 집중가동이 요구되는 경우로서, 오전 시간대에 전력의 수요가 급증하여 최대수요가 발생할 수 있다. 이 경우에는 배터리 시스템이 최대의 SOC로 충전 상태를 유지하고 있어야 수요의 증가에 대응할 수 있다. 이러한 상황을 고려하여 과거의 실제 최대 수요전력에 대한 이력 데이터를 바탕으로 최대수요전력저감 대책을 강구해야 한다.

그림 10은 생산량의 증가에 따라 과거(2015년)의 수요전력 이력 중 당해 연도 수용가의 최대수요 전력이 발생한 해당일(2015.04.21)의 수요시한 15분마다 계측한 실제 전력 수요데이터를 근거로, 분산전원을 적용하여 최대 수요전력 및 전력량 저감을 실현하기 위해 시뮬레이션을 실시한 결과를 나타낸 그림이다.

그림의 전력 수요데이터 곡선으로부터 최대수요 발생 시간은 9시 30분으로 태양광발전의 출력으로 충전할 수 없으므로, 생산계획에 따라 전력수요가 가장 적은 경부하 시간(00-06시)에 미리 배터리의 충전을 진행한다. 이 경우와 같이 충전에 시간적 여유가 있을 때는 충전 시 배터리의 수명을 고려하여 C-rate는 약 0.2 [C] 이하의 정전류 충전 방식으로 충전하고 이에 따라 SOC는 사전 설정된 범위로 10-90 [%]까지 증가한다.

배터리의 방전은 태양광 발전의 출력을 제외한 수전 전력량이 목표 수전전력 720 [kW]를 초과하는 시간부터 700 [kW]이하로 감소될 때 까지(08:54-10:09) 약 1시간 15분 동안 목표량을 초과하는 구간에서 방전을 진행한다. 여기서, 방전 시작과 방전 종료 전력량 사이의 간격(히스테리시스 폭)은 수전전력 저감 이후 갑작스러운 사용량의 증가로 배터리가 급 가동되는 것을 방지하기 위해 20 [kW]로 설정하였다. 방전 시 C-rate는 초과 전력량에 따라 최대 1.75 [C] 까지 방전된다. 배터리의 방전을 통해 수전전력은 설정 목표치인 720 [kW] 이하로 제어되며 이에 따라 배터리의 SOC는 71.3 [%]까지 감소된다.

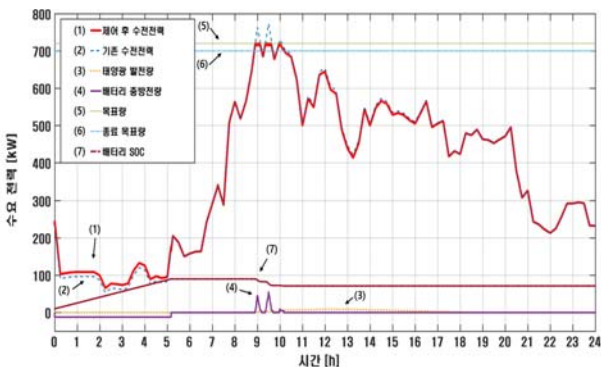


그림 10 시뮬레이션 결과(case-1)
Fig. 10 Simulation result(case-1)

4.2 case-2의 경우

case-2의 경우는 case-1과는 달리 태양광발전을 활용한 수요대응이 가능한 경우로, 기상상황이 양호하고 생산설비의 가동이 집중되는 오후 시간에 태양광발전을 통해 배터리 시스템을 충전하여 활용할 수 있다.

그림 11은 수용가의 최대수요 전력이 발생한 해당일(2016.01.06)의 15분마다 계측한 실제 전력 수요데이터 기반의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림의 전력 수요데이터 곡선으로부터 최대수요 발생 시간은 17시 15분이다. 이 경우는 태양광발전을 통해 충전이 가능한 경우이므로, 태양광 발전 전력이 5 [kW]를 초과하는 시간(10:00-16:00)에 태양광발전 출력으로 충전을 진행하며, 기상 상황에 따라 배터리 용량이 수요에 비해 부족한 것으로 판단되는 경우에는 계통을 통해 전력을 공급 받아 배터리의 충전을 진행한다.

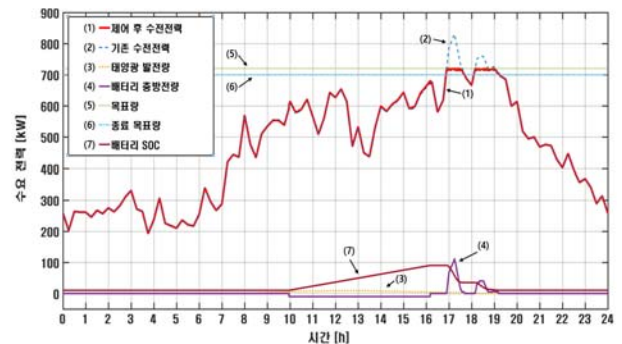


그림 11 시뮬레이션 결과(case-2)
Fig. 11 Simulation result(case-2)

충전 시에는 충전이 가능한 시간을 고려하여 C-rate를 증가할 수 있으나, 충전시간에 여유가 있는 경우는 배터리의 수명을 고려하여 약 0.2 [C] 이하의 정전류 충전 방식으로 충전한다. 충전시간 동안 태양광 설비에서 발전된 전력은 배터리의 C-rate를 적용할 때 설정된 10,400 [W]의 전력을 배터리로 전송하고 부족한 전력은 계통을 통해 공급받아 SOC는 10-90 [%]까지 증가한다.

배터리의 방전은 태양광 발전량을 제외한 수전전력이 720 [kW]를 초과하는 시간부터 700 [kW]이하로 감소될 때 까지(16:50-19:10) 약 2시간 20분 동안 목표량을 초과하는 구간에서 방전을 진행한다. 방전 시 C-rate는 부하증가에 대응한 초과 전력량에 따라 최대 1.75 [C] 까지 방전된다. 배터리의 방전을 통해 수전전력은 설정 목표치인 720 [kW] 이하로 제어되며 이에 따라 배터리의 SOC는 10.3 [%]까지 감소된다.

4.3 시뮬레이션 결과

이상과 같이 두 가지 (case-1, case-2) 상황에 대해 시뮬레이션을 적용한 결과 두 경우 모두 목표치 이하의 수전전력으로 제어에 성공하였고 배터리의 용량 역시 최대수요를 나타낸 case-2를 기준으로 목표치를 선정하였을 때 적정한

용량이 선정되었음을 확인할 수 있다. 과거 수요전력 이력 중 최대 수요전력을 기록한 이상의 두 경우에 대한 최대수요 및 수요 전력량의 저감 결과를 다음의 표 3에 요약하여 제시한다.

표 7 시뮬레이션 결과
Table 3 Simulation results

| Case | | case-1 (2015) | case-2 (2016) |
|-----------------------------|------|------------------|------------------|
| PV output [kWh] | | 53.9 | |
| Battery capacity [kWh] | | 70 | |
| SOC range [%] | | 10 - 90 | |
| Battery Charging [kWh] | PV | 0 | 45.26 |
| | Grid | 56 | 10.74 |
| Power reduction by PV [kWh] | | 53.9 | 8.64 |
| Peak power reduction [%] | | 6.9 | 13 |

제시한 표 3의 결과로부터, 태양광 발전량의 경우 case-1, case-2 모두 동일한 53.9 [kWh]의 발전량을 실측한 데이터를 근거로 적용하였다. 배터리 용량은 case-2의 기준용량으로 70 [kWh]를 적용 하였으며, 배터리의 가용범위를 과방전 및 과충전 방지를 위해 10-90 [%]로 설정하였다. 이 때, 계통으로부터 충전전력을 공급받는 case-1의 경우, 최대수요 발생 시 태양광 발전출력 53.9 [kWh]를 부하에 직접 공급함으로써 사용 전력량을 저감할 수 있으며, 태양광발전에 의해 충전이 이루어진 case-2의 경우는 배터리 충전에 태양광발전 출력 45.26 [kWh]와 계통전력 10.74 [kWh]를 수전하였고, 8.64 [kWh]를 부하에 공급하여 전력량 저감 효과를 얻을 수 있다. 이상의 결과로부터 시스템 적용 전 최대수요전력 대비 적용 후의 저감율을 산출하면, case-1의 경우 6.9 [%], case-2의 경우 13 [%]의 저감 효과를 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Matlab/Simulink를 사용하여 전력 시스템 및 배터리를 모델링하고, 모델을 통해 소규모 마이크로그리드를 적용한 전력 다소비형 산업용 수용가의 최대수요 전력 저감 특성과 그 효과의 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 시뮬레이션에서는 태양광 발전량을 이용해 배터리시스템을 충전하고 최대수요전력이 요구되는 중부하시간대에 방전하여 공장의 중요 부하를 차단하지 않고 최대수요전력을 약 13 [%] 정도 저감할 수 있음을 확인하였다. 이상의 연구 결과로부터 전력 다소비 중소형 수용가의 최대수요전력 및 사용 전력량 저감과 이를 통한 온실가스 배출 감축을 기대할 수 있을 뿐만 아니라, 향후 산업단지 내에 널리 확산이 이루어지는 경우 국가 전력 예비율 향상에도 크게 기여할 것으로 예상된다.

References

- [1] Lasseter, Robert H, "Microgrids," *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE*, vol. 1, pp. 305-308, 2002.
- [2] SALAM, A. A., MOHAMED, A., HANNAN, M. A. "Technical challenges on microgrids.", *ARPN Journal of engineering and applied sciences*, vol. 3, no. 6, pp. 64-69, December 2008
- [3] CHE, Yanbo, Jian CHEN, "Research on Design and Control of Microgrid System.", *Electrical Review ISSN*, vol. 33 no. 2097 pp. 83-86, 2012
- [4] Choudhury, Subhashree, Leesa Mohapatra, and Pravat Kumar Rout, "A comprehensive review on modeling, control, protection and future prospects of Microgrid," *Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO), 2015 International Conference on. IEEE*, pp. 1-6, 2015.
- [5] Wataru Tezuka, et al, "Construction and Operation of 50kW Electric Power Storage System" FB Technical News No.63, 2007.11
- [6] Mathworks, 'trapz', <https://kr.mathworks.com/help/matlab/ref/trapz.html?searchHighlight=trapz>
- [7] Explanation of calculation formula of solar power generation in detail, <https://www.solar-partners.jp/pv-eco-informations-34281.html>, 2014.11
- [8] Cho, Kyeong-hee, Seul-Ki Kim and Eung-sang Kim, "Optimal capacity determination method of battery energy storage system for demand management of electricity customer," *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 62, no. 1, pp. 21-28, 2013.

저 자 소 개



장 흥 순 (Hong-Soon Chang)

1978년 한양대 전기공학과 졸업(학사).
1986년 동 대학원 전기 및 전자공학 졸업(석사). 1991년 미국 Univ. of IOWA MIS 졸업(석사). 2001년 동국대 전기공학과 졸업(박사). 2017년 현재 한국산업기술평가관리위원회 에너지·전기공학과 교수 재직.

E-mail : hschang@kpu.ac.kr



김 철 진 (Cherl-Jin Kim)

1980년 한양대 전기공학과 졸업(학사).
1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
2017년 현재 한국산업기술대학교 교수.
E-mail : kimong@kpu.ac.kr



박 상 원 (Sang-Won Park)

2014년 한국산업기술대학교 에너지·전기
공학과 졸업(학사).
2017년 현재 한국산업기술대학교 에너
지·전기공학과 석사과정
E-mail : psw3692@naver.com