

# 스마트 그리드 기반 에너지 시스템 운영을 위한 배전계통 조류계산 시물레이션 모델 개발

배희선 · 신승재 · 문일철 · 배장원<sup>†</sup>

## Current Calculation Simulation Model for Smartgrid-based Energy Distribution System Operation

HeeSun Bae · Seungjae Shin · Il-Chul Moon · Jang Won Bae<sup>†</sup>

### ABSTRACT

The future energy consumption pattern will show a very different pattern from the present due to the increase of distributed power sources such as renewable energy and the birth of the concept of prosumers, etc. Accordingly, it can be predicted that the direction of establishment of an appropriate production and supply plan considering the stability and consumption efficiency of the entire power grid will also be different from now. This paper proposes a simulation model that can test a new operational strategy when faced with a number of possible future environments. Through the proposed model, it is possible to simulate and analyze power consumed and supplied in a future Smart Grid environment, in which a large amount of new concepts including energy storage service (ESS) and distributed energy resources (DER) will be added. In particular, it is possible to model complex systems structurally by using DEVS formalism among the ABM (Agent-Based Model) methodologies that can model decision-making for each agent existing in the grid, and several factors can be easily added to the grid. The simulation model was verified using given dataset in the current situation, and scenario analysis was performed by simply adding an ESS, one of the main elements of the smart grid, to the model.

**Key words** : EnergyGrid, Smart Grid, Simulation, ESS

### 요 약

미래 에너지 소비 패턴은 신재생 에너지 등의 분산 전원의 증가와 프로슈머의 탄생 등으로 현재와는 크게 다른 양상을 보일 것이다. 이에 따라서 전력망 전체의 안정성 및 소비 효율을 고려한 적절한 생산 및 공급 계획 수립의 방향성 역시 지금과는 상이할 것으로 예측할 수 있다. 본 논문은 앞으로 발생할 수 있는 여러 환경에 직면하였을 때 새로운 운영 전략을 시험할 수 있는 시물레이션 모델을 제안한다. 제안된 모델을 통해서 에너지 저장 장치, 에너지 분산자원과 같은 새로운 개념이 다량 추가될 미래 스마트 그리드(Smart Grid) 환경에서 소비되고 공급되는 전력을 모의하고 분석하는 기능을 수행할 수 있다. 특히, 그리드에 존재하는 각 요인(Agent)별 의사결정을 모델링할 수 있는 ABM(Agent-Based Model) 방법론 중 DEVS 형식론을 이용하여 복잡한 시스템을 구조적으로 모델링하고, 여러 요인들을 그리드에 쉽게 추가할 수 있도록 하였다. 본 시물레이션 모델은 현 상황에서 주어진 데이터셋을 이용하여 검증하였고, 추가로 스마트 그리드의 주요 요소 중 하나인 에너지 저장 장치(ESS)를 본 모델에 간단하게 추가함으로써 시나리오 분석을 시행하였다.

**주요어** : EnergyGrid, Smart Grid, Simulation, ESS

\* 이 논문은 2020년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음

Received: 26 December 2020, Revised: 18 February 2021,  
Accepted: 25 February 2021

<sup>†</sup> **Corresponding Author:** Jang Won Bae  
E-mail: jangwon\_bae@koreatech.ac.kr  
School of Industrial Management,  
Korea University of Technology and Education

## 1. 서론

현재까지의 단일화 된 에너지 공급원과 달리, 신재생 에너지 공급원의 발생(Tuballa 등, 2016; Jørgensen 등, 2011; Kim 등, 2018), 소비자 수준의 에너지 저장 장치(ESS) 사용의 확대(Tuballa 등, 2016; Sasikala 등, 2019),

전력 거래소 등의 새로운 기관의 활성화(Park 등, 2005), 에너지 생산과 소비 역할을 둘 다 할 수 있는 프로슈머(Prosumer) (Choi 등, 2018) 개념의 보편화 등과 같은 이유로 미래의 에너지 공급원이 다원화될 것은 자명하다. 그뿐만 아니라 전기차 등과 같은 신기술의 지속적인 개발 및 보급으로 인해 사용자의 전력 사용 패턴 역시 큰 유동성을 가지게 될 것인데(Monteiro 등, 2011), 에너지의 공급 및 활용이 다양해지고 분산화됨에 따라 중앙 집중적 에너지 관리 방식은 효율적이고 안정적인 공급을 보장하지 못할 가능성이 크다(Park 등, 2005).

즉, 앞으로의 에너지 생산 및 공급 의사결정에서는 지금까지 고려하지 않았던 새로운 요소를 포함해야 하며, 목적함수 또한 지금과 다른 형태일 수 있다(Tuballa 등, 2016). 이것은 지금까지 사회에 존재하지 않던 새로운 종류의 의사결정이 시행되어야 함을 의미하는데, 따라서 결정에 앞서 그것이 얼마나 당위성이 있을지, 그리드 전체에 어떤 영향을 얼마나 줄지 알기가 어렵다. 이때, 현실 세계를 잘 반영하는 시뮬레이션 모델이 있다면 의사결정 및 영향 파악에 큰 도움이 될 것이다(Rohjans 등, 2014).

분산자원에 집중하여 미래 에너지 기반 수요 및 공급 의사결정을 언급하는 현존하는 연구들은 경제적 효율성을 목표로 하는 경우가 많다(Cardenas 등, 2014). 해당 연구들은 시장 논리를 잘 반영하며(Ketter 등, 2013) 어떤 의사결정이 그리드 전체에 어떻게 영향을 주는지 쉽게 파악할 수 있는 방법을 제공한다고 볼 수 있으나, 일반적으로 특정 소비 패턴 및 공급 패턴을 가정하여 모델링하고 외부 전원 활용을 최소화하는 것을 목표로 하므로 현실과는 거리감이 생길 수밖에 없다는 점, 목적함수를 그리드 전체로 생각하기 때문에 개별적인 소비원 및 분산 전원의 측면에서의 의사결정을 반영하기가 어렵다는 점, 생산, 공급 및 소비의 패턴이 다양하고 유동적일 경우 분석력이 떨어지는 점 등의 한계가 있다.

기존 연구들의 한계에 대하여, 본 연구는 시뮬레이션 범위를 저압 배전계통으로 제한하고, DEVS 형식론을 이용한 요인(Agent) 기반 모델링을 채택함으로써 해결하였다. 구체적으로 그리드에 참가하고 있는 요인 각각이 의사결정을 하도록 모델링하여 다양화된 소비 및 공급 패턴을 반영할 수 있게 할뿐만 아니라, 복잡한 시스템을 단순한 하위 시스템으로 분해하기 쉬우며 신규 요인을 참여시키기가 용이한 DEVS 형식론(Concepcion 등, 1988; Zeigler 등, 2000)을 사용하여 새로운 형태의 요인을 그리드에 반영하기 쉽도록 디자인하였다. 뿐만 아니라, 마을 단위의 그리드를 모델링하여 가구 개개인을 자세히

분석할 수 있게 하였다.

이에 본 연구는 아래와 같은 성과를 이루었다.

- 조류 계산 알고리즘을 반영한 배전계통 시뮬레이션 모델을 제작하여, 본 모델에 검증용 Dataset을 넣었을 때 결과 계산을 잘 수행함을 확인하였다.
- 결과 지표를 바탕으로 한 시나리오 분석을 통해, 언제 상불평형이 크게 발생하는지, 소비원별 전압 강하에 따른 불안정적인 전압을 공급받는 소비자는 없는지, 어떤 시간대에 얼마만큼의 에너지 손실이 있는지 등을 확인하였다.
- 간단한 에너지 저장장치(ESS) 모델을 추가하였을 때, 결과 값에 어떤 차이가 얼마나 생기는지를 비교함으로써, ESS 모델 반영에 따른 각 가구(Household) 및 계통 전체에 대한 영향을 분석할 수 있었으며, 차후 추가 가능성이 있는 다양한 요인에 대해서도 본 모델이 같은 종류의 영향을 분석할 수 있다는 가능성을 제시하였다.

본 논문은 2. 현존하는 스마트 그리드 관련 연구, 3. 저압 배전계통과 조류계산 알고리즘 설명 및 해당 계산을 수행하기 위해 구성한 시뮬레이션 모델 설명, 4. 저압 배전계통 모델링을 위해 활용한 데이터와 변수 및 결과 지표 설명, 5. 시뮬레이션 결과 검증 및 분석, ESS 추가 시나리오 결과 및 지표 변화 분석, 6. 결론으로 구성되어 있다.

## 2. 관련 연구

본 절에서는 1. 본 연구의 관련 연구로써 스마트 그리드 기반의 전력 수요 및 공급에 관한 시뮬레이션 연구 소개 및 2. 현존하는 DEVS 방법론을 이용한 스마트 그리드 시뮬레이션 연구들과 본 연구의 비교분석을 언급하고자 한다.

### 2.1 스마트 그리드 연구

스마트 그리드가 새로이 만들어진 설비 및 개념으로 인해 현존하는 에너지 그리드와의 차별성을 갖게 되므로, 스마트 그리드 시뮬레이션에 있어서 다양한 설비 및 요소를 모델링하는 것은 중요하다. 다양한 요소를 모델링한 연구로(Karnouskos 등, 2009)를 참고할 수 있었는데, 스마트 그리드의 기본 단위가 되는 가구(Household)별 전력 소비 및 생산 패턴을 냉장고, 에어컨 등의 생활 가전 설비 수준까지 고려하여 모델링하고, 설비와 가구 요소, 가구 요소와 도시 요소의 관계는 계층적으로(Hierarchically)

정의하여 스마트 시티 기반의 Dynamic한 에너지 행동 패턴 설계를 가능하게 하는 시뮬레이터를 설계하였다. 설비 및 요소의 다양성 및 계층적 모델링은 참고할 만하나, 각 설비 및 각 요소의 행동 패턴을 다양하게 모델링하지 않았다는 한계가 있었다. 그에 비해(Ramchurn 등, 2011)의 경우, 소비자 기반 분산형 수요관리(Decentralized demand management) 및 행동 모델링을 통해 소비자의 수요를 명확하게 파악하고 분석하는 것을 시도하였다. 이것을 통해 전력 활용 효율성을 최적화하고자 하였으며, 이것을 실제로 시뮬레이션 프레임워크에 적용한 결과, 유의미한 수준으로 실제 전력 손실을 줄일 수 있었다. 그러나 소비자의 행동 패턴을 현실적으로 모델링해야 한다는 한계가 존재하며, 해당 연구 역시 그리드 전체 관점에서의 소비자의 수요에 대한 관리 및 통제를 전제하였으므로 스마트 그리드 상황에 적용하기에는 한계가 있다고 할 수 있다.

(Oliveira 등, 2012)의 경우 에너지의 수요자와 공급자의 양방향성 행동 모델링을 통해 이러한 한계를 해결하고 전력 시장 내 메커니즘에 대해 분석하였다. 실질적으로 양방향성 모델링에 용이하기 때문에 에너지 수요 및 공급을 고려하는 시뮬레이션 모델은(Oliveira 등, 2012)와 마찬가지로 시장을 기반으로 하는 경우가 대다수인데, 가격 및 요인(Agent)에게 제공하게 될 보상의 값을 현실적으로 정하기 어렵다는 한계가 있다. 또한 분산 전원을 고려하지 않았다는 한계가 있는데, 이것은 스마트 그리드 연구의 필요성에 신재생 에너지원의 발생이 주요한 이유임을 고려할 때 스마트 그리드 연구에 있어 큰 한계로 여겨진다.

현재 신재생 에너지원 중 발전을 가장 높은 종류는 태양광 발전과 풍력 발전으로 알려져 있으며(신재생에너지 정책실, 2020), 이에 일반적으로 스마트 그리드를 구성하는 신재생 에너지 및 분산 전원으로 태양광 발전기와 풍력 발전기를 모델링한다. 특히 태양광 발전기는 신재생 에너지원 중 가정용 발전에 가장 적합하여 스마트 그리드의 주요 신개념 중 하나인 프로슈머를 구성하는 실질적인 에너지원이다. 따라서 스마트 그리드에 태양광 및 풍력 발전기의 현실적인 반영 방법에 관한 연구가 진행되어 왔는데(Kumar 등, 2018), 태양광 발전기가 발전한 전류는 직류전류인 데에 비해 현 그리드는 교류 전류를 이용한다는 점 등이 모델에 잘 반영되지 않는 점, 분산 전원과 ESS의 동시 반영 모델링이 충분치 않다는 점 등의 한계가 있다.

일부 연구는 그리드 전체의 손실을 최소화하는 최적화 문제로 스마트 그리드의 운영 및 계획을 해결하려 하였다. (Moehle 등, 2019)이 대표적인데, 해당 연구에서는 특정 모선(Bus)에서 조류 및 전력을 계산한다는 것을 유입되는 전류는 (+)로, 유출되는 전류는 (-)로 표시하여 모두 더해주면 되고, 모선을 기준으로 유입/유출되는 전류의 총합은 항상 0이어야 한다는 것을 제한 조건으로 하였다. 그러나 최적화를 위해서는 직류 회로를 가정하므로 교류 회로를 사용하는 현재 그리드를 반영하기에는 오차가 발생하는 한계가 있다.

## 2.2 스마트 그리드의 DEVS Formalism 활용 연구

(Jarrah 등, 2016)는 전세계적인 원자력 발전의 감소와 신재생 에너지 발전에 대한 국가적 투자를 고려할 때 신재생에너지를 고려한 스마트 그리드 발전 시스템을 연구해야 할 필요성을 주장하고 있으며, 태양광발전, 풍력발전, 에너지 저장장치와 부하(load)를 요인으로 하는 DEVS 환경을 이용한 시뮬레이션으로 스마트 그리드를 표현하고자 하였다. 신재생 에너지원을 모델링하기 위하여 실제 풍속 및 태양광 정보를 분 단위로 받아 하루를 모델링하고 있으므로 시간 단위는 우리 모델과도 비교할 만하나, 해당 모델이 발전기와 저장장치 간의 상호관계를 모델링하는 것에 초점을 맞추었기에 가상의 부하 정보를 사용한 것에 비하여 우리 모델은 각 부하의 전력 사용량에 대한 분단위의 하루치 데이터를 사용했다는 점, 부하와 부하 간의 임피던스 등을 직접적으로 고려한 교류 회로를 모델링했다는 점 등을 생각할 때 부하 요인 각각의 의사결정을 더 자세하게 고려하였다고 할 수 있다.

기존 연구들과 비교하여 본 연구는 범위를 저압 배전계통으로 제한하고, DEVS 형식론을 이용한 요인(Agent) 기반 모델링을 채택하여 소비자의 행동 패턴을 다양화하였고, 시장 기반의 시뮬레이션을 채택하지 않음으로써 소비자의 행동에 경제적 가치를 임의로 부여하는 한계를 해결하였다. 또한 교류 회로 기반 조류계산 알고리즘을 시뮬레이션에 적용하여 회로 수준에서부터의 현실성이 반영된 시뮬레이션을 개발하였다.

## 3. 저압 배전계통 시뮬레이션 모델

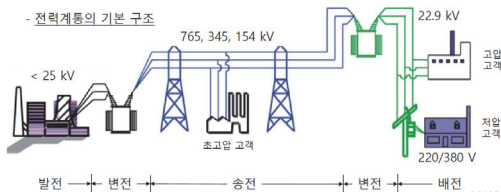
### 3.1 저압 배전계통 모델

본 논문에서 사용한 배전계통 용어들은 표와 같이 정의한다.

**Table 1.** Terminology and definitions

| Terms   | Definition                                   |
|---------|----------------------------------------------|
| 배전계통    | 배전용 변전소에서 전기수용설비에 분산 배분되는 전선로 및 관련 설비        |
| 모선      | 부하가 연결되는 부분                                  |
| 선로      | 모선과 모선을 연결하는 선                               |
| 선로 임피던스 | 해당 선로의 전선 사이의 임피던스                           |
| 부하      | 전력을 소비하는 부분.                                 |
| 유효전력    | 실제로 부하에서 소비되는 전력                             |
| 무효전력    | 실제로 일을 하지 않는 전력                              |
| 피상전력    | $\sqrt{(\text{유효 전력})^2 + (\text{무효 전력})^2}$ |

본 논문에서는 저압 배전계통(Low voltage distribution system) 시뮬레이션 모델을 설명한다. 배전계통이란, 배전용 변전소에서 전기수용설비에 분산 배분되는 전선로 및 관련 설비를 의미한다. Fig. 1은 저압 배전계통에 대한 기본 모식도를 보여준다.

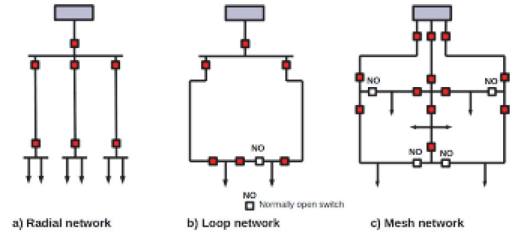
**Fig. 1.** Basic diagram of low voltage distribution system

배전 단위의 시스템에서 본 연구는 아래와 같은 전력 운용을 가정한다.

- 부하(Load), 배전 변압기(Distribution Transformer), 분산 전원(Distributed Energy Resource) 및 ESS (Energy Storage System, 전력 저장 장치)는 모두 단상 연결되어 있다.
- 각 선로의 상호 임피던스(Impedance, 온저항)에 대해서는 무시한다. 단, 선로 내의 임피던스는 고려한다.
- 특고압 배전계통 전압은 일정하다. 즉, 변압기를 넘어서 저전압 배전 단계로 넘어오는 전압은 항상 일정하다.

배전 변압기의 경우 이상 전압원과 변압기의 등가 임피던스를 통해 모델링하며, 시스템을 이루는 선로(Distribution line)는 직렬 임피던스로 모델링하였다.

본 연구에서는 저압 배전계통을 위한 다양한 조류계산 기법 중 내부 연산의 네트워크 구조로 Radial Network를 활용하였다. Fig. 2는 배전계통 내부 연산을 위한 네트워크 구조의 종류를 설명한다.

**Fig. 2.** Type of distribution system network structure

### 3.2 DEVS 시뮬레이션 모델

본 절에서는, 배전계통 시뮬레이션 모델을 개발하기 위해서 적용한 DEVS 형식론의 소개와 모델링에 대해서 상세히 다루겠다.

#### 3.2.1 DEVS 형식론(DEVS Formalism)

DEVS(Discrete Event System Specification) 형식론은 이산 사건 시스템을 모델링하고 시뮬레이션할 수 있는 도구이다. 특히, DEVS 형식론은 모듈러한 컴포넌트를 개발하고, 이를 이용한 계층적 모델 구조를 지원하여, 복잡한 시스템을 구조적으로 모델링(structured modeling)할 수 있게 한다. 또한, DEVS 형식론의 모듈러한 특성은 시뮬레이션 모델의 수정 및 확장을 용이하게 하여, 미래형 시스템에 대한 다양한 구조적 실험을 가능하게 한다는 장점이 있다. 따라서 본 논문의 시뮬레이션 모델은 DEVS 형식론을 따라서 개발하였다.

DEVS 형식론은 시스템 컴포넌트의 세부적인 행동을 모델링하는 원자 모델(atomic model)과 시스템 동특성을 표현하기 위해 컴포넌트를 구조화하는 결합 모델(coupled model)로 구성되어 있다.

원자 모델(AM)은 입력(X), 출력(Y), 상태(S)의 집합과 모델 내부 상태 변경을 위한 내부 천이( $\delta_{int}$ ), 외부 천이 함수( $\delta_{ext}$ ); 모델의 출력을 결정하는 출력 함수( $\lambda$ ); 외부의 입력이 없을 때, 특정 상태에 머무르는 시간을 정의하는 시간 전진 함수( $ta$ )로 이루어져 있다.

$$AM = \langle X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta \rangle$$

X is a set of input events



$Y$  is a set of output events

$S$  is a set of model states

$\delta_{int}: S \rightarrow S$ , internal transition function

$\delta_{ext}: Q \times X \rightarrow S$ , external transition function,

where  $Q = \{(s, e) | s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$

$\lambda: S \rightarrow Y$ , output function

$ta: S \rightarrow R^+$ , time advance function

결합 모델(CM)은 입력( $X$ ), 출력( $Y$ ), 내부 컴포넌트( $M$ )의 집합과 결합모델과 내부 컴포넌트들 간의 연결 관계(coupling relations)와 동시 실행 처리를 위한 Select 함수로 표현한다.

$CM = \langle X, Y, M, EIC, EOC, IC, SELECT \rangle$

$X, Y$  is a set of input/output events,

$M$  is a set of components

$EIC, EOC, IC$ : a set of relations about external input, external output, and internal coupling

Select:  $2^M - \emptyset \rightarrow m \in M$ , Select function

### 3.2.2 저압 배전계통 모델 DEVS 모델 개발

제안하는 모델은 전력의 발생 및 이용이 이루어지는 다양한 시스템 중 마을 단위의 저압 배전계통 시스템에 대한 연산 모의를 위해 개발되었다.

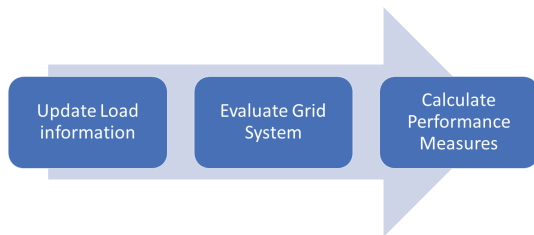


Fig. 3. Simulation process of low-voltage energy distribution system (based on 1 tick)

Fig. 3은 배전계통 시뮬레이션 모델의 1 tick동안 실행하는 시뮬레이션 과정을 보여준다. 각 시뮬레이션 tick마다 시점별 부하(Household, ESS 등)가 변경되면, 1) 마을의 전력 그리드에 연결된 해당 부하 및 ESS 등의 정보를 갱신한다. 2) 모든 부하 정보가 업데이트되면, 현재 갱신된 계통의 전력 조류(power flow)를 계산하여 각 모선에 할당되는 전류, 전압, 전력을 계산한다. 3) 마지막으로 계산된 결과를 이용하여 계통 전체의 성능 및 안정성에 대한 지표를 계산한다.

Fig. 4는 위의 시뮬레이션 과정을 실행하기 위한 DEVS 모델의 계층 구조 및 연결 관계를 보여준다.

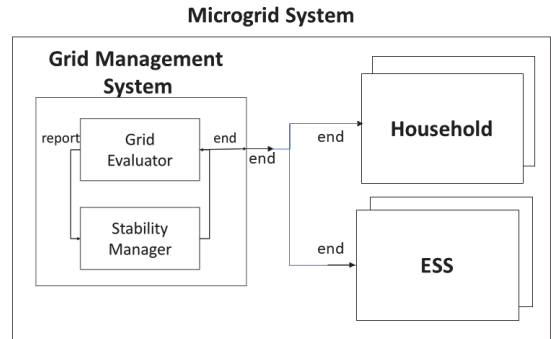


Fig. 4. Coupling Structure of the proposed simulation model

가장 상위에는 MicroGrid System이라는 마을 단위의 전력 시스템을 나타내는 결합 모델이 있고, 이 모델은 다수의 Household 모델, ESS(Energy Storage System) 모델, 그리고 한 개의 Grid Management System 모델로 구성된다. Household 모델은 일반적으로 전력을 사용하는 가구으로써, 전력 시스템의 부하를 대표한다. ESS 모델은 신재생 에너지의 도입을 고려하여 가정 및 공용으로 운영되는 에너지 저장 시스템을 표현한다. 구체적으로 일정 시간 동안에는 ESS 내부에 에너지를 저장하면서 부하처럼 그리드의 전력을 소비하다가, 이후 저장한 에너지를 전력 계통에 공급함으로써 그리드에서 분산 전원(Distributed Resource, DR)과 유사한 역할을 담당한다. 사용자는 시나리오에 따라 시뮬레이션에 참여하는 Household, ESS 모델 개체의 숫자를 변경할 수 있다.

Grid Management System은 전력망 그리드의 성능 및 안전성을 확인하고 관리하는 역할을 한다. Grid Management 모델은 Grid Evaluator와 Stability Manager 모델로 구성된다. Grid Evaluator 모델은 계통의 전력 조류를 계산하여, 각 모선의 전력, 전압, 전류 변화를 측정한다. Stability Manager는 측정된 전력 조류를 바탕으로 전체 그리드의 성능 및 안정성을 계속한다. 성능 지표로는 전력 손실을 계속하고, 안정성의 지표로는 3상 불평형률 및 각 Household에 정격전압 인가 여부를 측정한다.

MicroGrid System의 세부 모델은 시뮬레이션 시나리오 상 서로 깊게 연관 지어져서 동작한다. 예를 들어, Household와 ESS 같은 모델의 부하 업데이트는 Grid Evaluator의 조류 계산 보다 선행되어야 하고, 업데이트된 정보는 공유되어야 한다. 이런 관계를 시뮬레이션 모

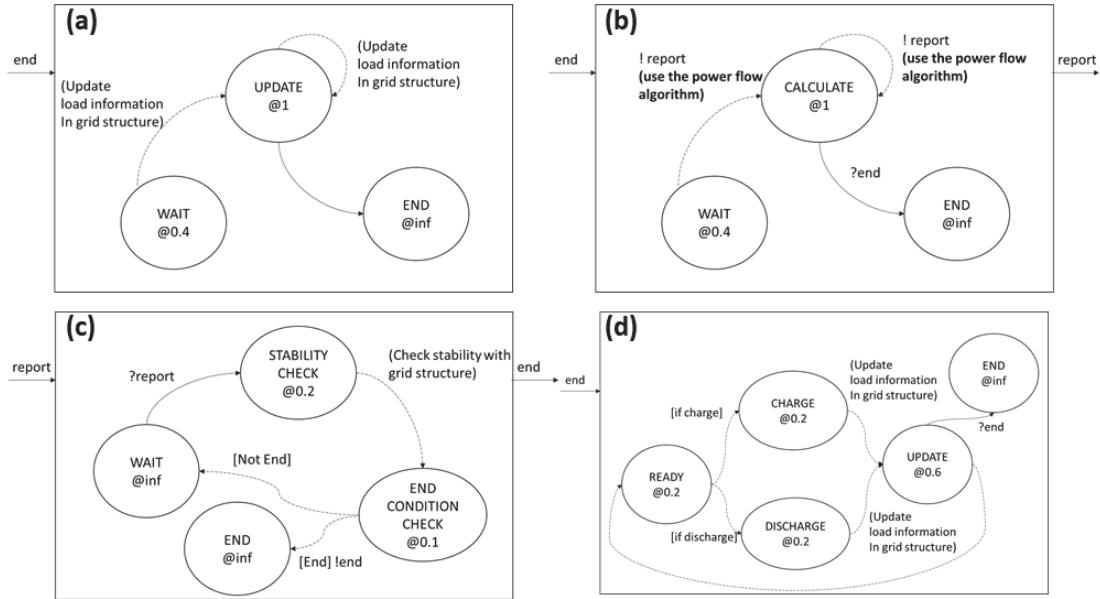


Fig. 5. Diagrams of DEVS atomic models: (a) Household, (b) Grid Evaluator, (c) Stability Manager, (d) Energy Storage System (ESS)

델에서 관리할 수 있지만, 그럴 경우 모델의 복잡도가 증가하고 이후 결과적으로 모델의 수정 및 재사용에 한계를 초래한다.

위에서 제시한 시뮬레이션의 인과성과 모델의 재사용성을 높이기 위해서, 제안한 모델은 다음과 같은 방법을 적용하였다. 제안하는 모델에서는 시뮬레이션 시나리오상의 페이즈(phase)를 구분하고, 구분된 페이즈를 DEVS 형식론의 time advance를 이용하여 표현하였다. 예를 들어, 시나리오는 1 tick을 기준으로 반복되는 구조로 설정하고, 위 그림의 3개의 페이지는 매 0.3, 0.6, 0.8 tick에 실행되게 time advance를 조정하여 시뮬레이션의 인과성(causality)을 확보하였다.

세부 모델의 업데이트 정보는 모델 내부에 존재하는 것이 아닌, 공유 데이터(shared data)로 구현되었다. 이는 엄밀히 말해서 DEVS 형식론의 모듈러한 특성을 어기는 행위이지만, 이런 부분적인 개방을 통해 모델의 복잡도와 시뮬레이션 실행 속도는 향상될 수 있다. 제안한 모델에서는 전력 그리드를 공유 데이터로 설계하여 적용하였다. 또한, 제안한 모델은 협동 모델링(Sung 등, 2012)의 방법을 이용하여 모델의 상태와 내부 연산을 분리하여 개발하였다. 다시 말해서, DEVS 원자 모델로 내부 상태 천이 과정을 정의하고, 상태 천이 과정에서 필요한 결과를 생성하는 알고리즘을 독립적으로 개발하였다. 예를 들어,

Grid Evaluator 모델의 경우 내부 상태를 정의하고 조류 계산에 필요한 알고리즘과 데이터는 모델 외부에서 활용하고 있다(Fig. 5. (a) 참고). 이렇게 공유 데이터와 협동 모델링의 방법은 추후 다양한 알고리즘을 기존 모델의 최소한의 변경으로 적용하는 방법으로 활용될 수 있다.

다음 세부 절에서는 Grid Evaluator에서 사용하는 조류 계산 알고리즘에 대해서 보다 상세하게 설명한다.

### 3.3 저압 배전계통 기반 조류계산 알고리즘

Table 2에는 조류계산 수식을 설명하기 위한 Notation을 정리해 놓았다.

Table 2. Notation for power current calculation

| Variable/Notation | Content            |
|-------------------|--------------------|
| $P_{\in j}$       | 모선 유효 전력           |
| $Q_{\in j}$       | 모선 무효 전력           |
| $V$               | 모선 전압              |
| $I_{\in j}$       | 모선 유입전류            |
| $V_d$             | 하위 모선 전압           |
| $V_u$             | 상위 모선 전압 (페이지)     |
| $Z_l$             | 상/하위 모선 연결 선로 임피던스 |
| $I_l$             | 상/하위 모선 연결 선로 전류   |

본 절에서는 조류계산 알고리즘의 각 과정을 자세히 설명하도록 하겠다. Fig. 6은 Radial 구조 Forward/Back Sweep 기반 조류계산 알고리즘 과정을 보여준다. 아래와 같은 과정을 각 Time step마다 반복하여 계산함으로써, 시점별 수렴 전압, 전류 및 피상전력을 구할 수 있다.

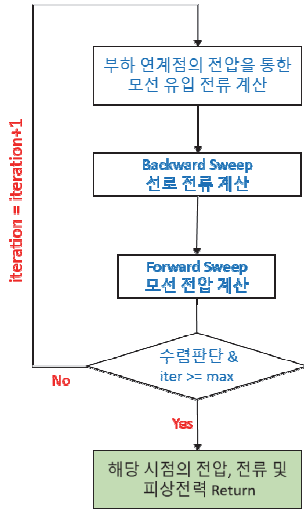


Fig. 6. Radial network current calculation algorithm

### 3.3.1 부하 연계점의 전압을 통한 모선 유입 전류 계산

조류계산을 위해 주어진 그리드에 모선이 어떻게 연결되어 있는지를 Fig. 7과 같이 파악한다. 그림에서 숫자는 모선을, 숫자와 숫자 사이의 선은 선로를 뜻한다. 1번의 위치는 주상변압기이며, Layer 번호는 주상변압기로부터 해당 선로가 얼마나 멀리 연결되어 있는가에 따라 설정한다. 예를 들어, Layer 3에 위치한 모선은 주상변압기와 해당 모선 사이에 한 개의 모선이 더 위치해 있을 것이다. 이런 방식으로 그리드 전체에서의 각 선로의 하위 선로 연결 정보를 설정해줄 수 있으며, 이를 통해 각 선로는 순차적이고, 계층적인 구조(Hierarchical Structure)를 가진다.

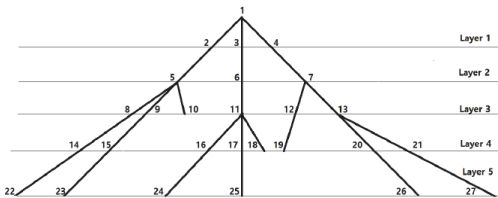


Fig. 7. Hierarchical connection example of distribution system structure data

계통 연결 구조를 생성 이후, 노드로 표현되는 각 모선의 전압을 변압기 2차측 전압으로 초기화한다. 이 경우, 3상 통합 해석에서는 위상각 설정이 개별적으로 필요하나, 개별 상에 대한 해석만을 가정하는 본 연구에서는 위상각을 고려하지 않는다.

모든 모선의 전압은 수렴 판단을 위해 사용하는 기준이 되므로 갱신 전에 저장한다.

다음으로, 모선 유입 전력과 모선 전압(V)을 이용하여 모선 유입전류를 계산한다. 모선 유입전류는 복소전력 정의에 따라 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\text{모선 유입 전류 } I_{\in j} = \left( \frac{P_{\in j} + jQ_{\in j}}{V} \right)^*$$

$$\text{모선 유입 전력} = P_{\in j} + jQ_{\in j}$$

(전압 및 전류는 복소수)

### 3.3.2 Backward Sweep

위에서 정의된 연결 구조를 이용하여 하위 선로부터 상위 선으로 이동하며 각 선로의 전류를 계산한다.

단, layer가 큰 선로부터 순차적으로 연산을 수행하며, 여기서 선로의 전류는 하위 선로들의 전류 합과 선로 하단에 연결된 모선의 모선 유입 전류의 차를 구함으로써 계산할 수 있다.

### 3.3.3 Forward Sweep

Backward Sweep 이후, 마찬가지로 위에서 정의된 연결 구조를 통해 상위 선로에서 하위 선로로 이동하며 모선별 전압을 계산한다.

단, Layer 번호가 작은 선로부터 연산을 수행하게 되며, 하위 모선 전압( $V_d$ )에 대한 계산식은 아래와 같다.

$$V_d = V_u - Z_l I_l$$

### 3.3.4 수렴 판단

위에서 저장한 모선 전압과 새로 갱신한 전압의 차이(전압 변동량) 크기를 일정 값과 비교하여 수렴 여부를 판단한다. 만약 최대 전압 변동량의 크기가 설정값 이하이면 수렴으로 판단하며, 그렇지 않을 경우 모선 전압 저장 과정으로 돌아가서 반복 연산한다.

일반적으로 최대 전압 변동량의 크기에 대한 수렴 비교 값은 0.001V로 책정해주는 경우가 많다.

## 4. 저압 배전계통 데이터 활용

본 챗터에서는 시뮬레이터 개발을 위해서 어떤 Dataset을 사용하였는지, 입력 데이터는 무엇이며 어떤 데이터를 출력하는지, 출력된 데이터를 이용하여 어떤 결과 지표를 사용하는지 설명한다.

### 4.1 Dataset

**Table 3.** Input Variable and Parameter Definition

| Input/Parameter | Definition and Explanation |
|-----------------|----------------------------|
| <i>Phase</i>    | 교류 회로의 상. 3상이다.            |
| BS              | 모선                         |
| BR              | 선로                         |
| $BR_Z$          | 전선 사이의 임피던스( $\Omega$ )    |
| LD              | 부하 데이터                     |
| $LD_P$          | 부하 유효전력(W)                 |
| $LD_Q$          | 부하 무효전력(VAr)               |
| $V_{Stack}$     | 변압기 전압(V). 252.1866으로 제공.  |

시뮬레이터 개발을 위해 가구별 전력 생산 및 소비 시 계열 데이터가 필요하였고, 또한 가구별 미래 수요에 따른 유동성을 쉽게 반영할 수 있는 데이터가 필요하였다.

IEEE European Low Voltage Test feeder라는 dataset을 사용하였다. 위 Dataset은 저압 배전을 통해 전력을 공급받는 55개 가상 세대의 데이터로, 변압기에 제공되는 전압( $V_{Stack}$ ), 가구(부하) 데이터(LD), 가구별 모선(BS) 및 선로(BR) 정보, 전선 사이의 임피던스( $BR_Z$ ), 1분 단위로 가구별 사용하는 부하의 유효 전력( $LD_P$ ) 및 무효 전력( $LD_Q$ )을 표시하였으며, 총 하루(24시간) 치 데이터를 제공한다.

구체적으로 해당 Dataset에서 Table 3과 같은 변수 및 파라미터를 정의하여 모델 입력 데이터로 사용하였다.

본 알고리즘의 계산을 완료한 후, Table 4와 같은 결과를 출력한다.

**Table 4.** Output Variable Definition

| Output     | Definition    |
|------------|---------------|
| $LD_V$     | 모선의 상전압 (V)   |
| $TR_I$     | 변압기 출력 전류(A)  |
| $TR_S$     | 변압기 출력 전력(VA) |
| $P_{loss}$ | 유효전력 손실(W)    |

## 4.2 결과 지표

본 시뮬레이션 모델의 기능을 검증하기 위하여 크게 세 가지의 결과 지표를 사용한다. 이 지표들을 이용 및 분석하여 신재생 에너지의 생산 및 에너지의 급격한 소비와 같은 미래 전력계통 구조 변화에 따른 계통의 안정성 및 성능을 확인할 것이다.

### 4.2.1 가구별 정격전압 인가율

그리드에 연결된 부하들이 시간별로 다른 양의 전류를 사용하면, 각 부하가 연결된 모선의 상전압 역시 시간에 따라 다른 값을 기록하는데, 이 값은 변압기에서 측정된 전압보다 높거나 낮다. 그러나 그리드 전체에 있는 가구(Household)에게 안정적인 전압을 공급하기 위해서는 해당 모선에서 측정된 상전압이 정격전압으로부터의 10% 범위 이내에 있어야 한다. 이를 판단하기 위해 결과 지표의 하나로써 가구별 시간에 따른 정격전압 인가율을 사용한다. 구체적으로 부하별로는 상전압 변화를, 그리드 전체로는 기준 범위보다 낮은 전압을 공급받고 있는 부하의 비율을 측정하였다.

### 4.2.2 3상 불평형율

현재 보편적으로 사용되고 있는 3상 교류 회로에서 각 상에 흐르는 전력이 어느 한쪽으로 치우침 없이 평형하게 흐르는 것은 전력 손실을 줄이기 위한 전제 조건으로서 매우 중요하며, 미래 전력 그리드의 전력 손실 발생 가능성 역시 어느 한 상에서 전기차 충전 등으로 인한 과도한 전력 소비로 인해 상간 불평형이 생길 가능성에서 기반한다. 따라서 상불평형율을 지표로 삼고 이를 최소화하는 것이 전력 손실 및 안정적인 계통 운영을 위해 필수적인 것임을 알 수 있다. 상불평형율은 다음과 같이 계산한다.

$$(\text{상불평형율}) = \frac{\max_{\text{phase}} TR_S - \min_{\text{phase}} TR_S}{\frac{1}{3} \sum_{\text{phase}} TR_S} \times 100\%$$

### 4.2.3 전력 손실

상간 불평형이 발생하면 상간 임피던스에 의해 전력 손실이 발생하고, 효율적인 계통 운영을 위해서는 전력 손실을 최소화하여야 한다. 손실 전력은 공급받은 총 전력에서 사용한 전력의 합의 차이로 구하며, 아래 식과 같다. 이후 이 지표를 그리드 전체의 안정화 및 손실 최소화를 목표로 하는 공용 요인(Agent)을 Scheduling 하는



목적함수로써 사용할 수 있을 것으로 기대한다.

$$\text{전력 손실}(P_{loss}) = LD_{V_{TR}} \times TR_I - \sum LD_P$$

## 5. 시뮬레이션 결과 분석

### 5.1 시뮬레이터 결과 검증

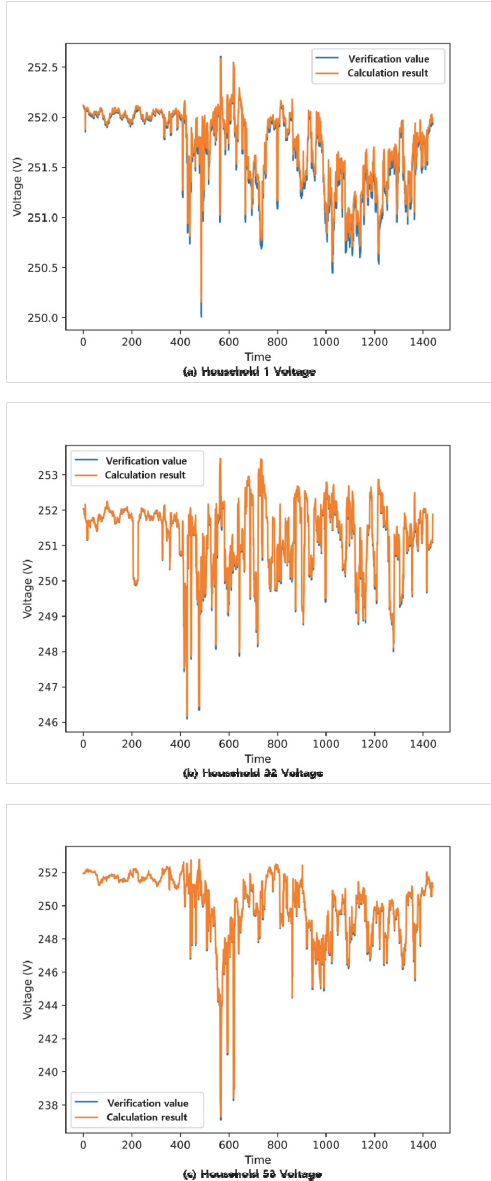


Fig. 8. Comparison of simulation results and verification values-voltage by household

본 절에서는 주어진 데이터를 이용하여 본 시뮬레이터가 현실과 가까운 결과값을 출력하는지 시뮬레이터의 현실 반영성을 증명함과 동시에, 계통 안정성 확보 및 계통 전력 손실 최소화를 위해 주어진 시나리오에 대한 결과 지표를 분석할 것이다. 이는 신재생 에너지의 생산 가능으로 인한 에너지 생산원의 다원화 및 에너지의 급격한 소비 가능성 발생, 미래 전력계통 구조 변화에 따른 계통의 안정성 분석을 위함이다.

본 시뮬레이터가 주어진 Dataset 을 입력받았을 때 알려진 결과와 같은 값을 출력하는지 검증해 보았다. 임의로 몇 가구를 골라 시뮬레이션 결과로 출력된 상전압과 참값으로 주어진 상전압 Data와 비교해 보았을 때, 시뮬레이터가 참값에 유사한 결과를 출력하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 8은 전체 55 Household 중, 1번, 32번, 53번 Household의 전압을 출력한 그래프이다. 파란색 선이 검증을 위해 실제 각 가정에서 측정한 전압 데이터, 주황색 선이 시뮬레이션을 통해 계산된 전압 데이터를 뜻하며, Table 5는 세 가구의 검증값과 시뮬레이션 결과의 RMSE (Residual Mean Square Error)를 표시하였다. 그림에서 실제 측정된 전압 데이터와 시뮬레이터를 통해 계산된 전압 데이터가 매우 유사한 개형을 그리고 있음을 볼 수 있으며, 표에서도 알 수 있다시피 두 값 사이의 차이가 거의 나지 않는다. 이를 통해 본 시뮬레이터가 현실을 잘 모사하여 작동하고 있음을 알 수 있다.

Table 5. RMSE between simulation and verification value

| Household | 1      | 32     | 53     |
|-----------|--------|--------|--------|
| RMSE      | 0.0503 | 0.0488 | 0.0661 |

### 5.2 성능 분석

주어진 시나리오 Dataset을 이용하여 Fig. 9와 같은 시간에 대한 전압 변화, Fig. 10과 같은 (a) 3상 불평형률 및 (b) 그리드 전체의 상별 전력을 출력할 수 있었다. 그래프에서 x축은 자정에서 시작하는 하루 24시간 동안의 분 단위 timestep을 뜻한다.

Fig. 9의 위 그림은 가구 1의 시간에 따른 전압 변화를 그래프로 출력한 것이며, 아래 그림은 같은 값을 안정적 전압범위 내에서 출력한 것이다. 안정적 전압 범위의 기준은 해당 전압의 10%의 값을 더하고 뺀 범위를 뜻한다. 가구 1의 시간에 따른 전압 변동성을 보았을 때, 다른 가구에서 전력을 사용함에 따라 가구 1에 제공되는 전압에 변동은 있으나 기준 범위 내에서 변동하므로 가구 1은 안정적인 전압을 제공받고 있음을 알 수 있다.

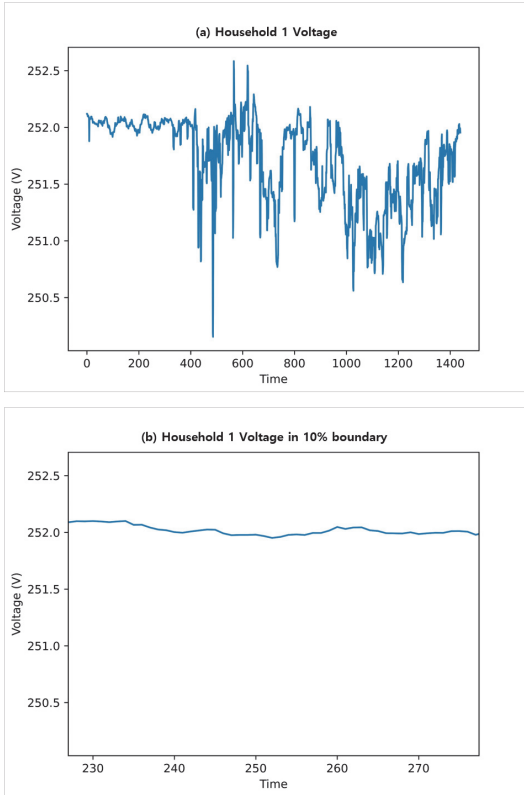


Fig. 9. Voltage change over time for Household 1

Fig. 10에서 그림 a)는 시간에 대한 그리드 전체의 상 불평형률을 뜻한다. 그리드의 상불평형률은 30% 이하일 경우를 적합하다고 판정한다. 주어진 시나리오에서는 대부분의 시간 동안 해당 시나리오 그리드의 각 상에 흐르는 전력의 불평형율이 기준보다 높음을 보여주고, 특히  $x = 960$  부근 ~ 1100 부근 즉, 오후 4시에서 6시 사이에 상간 불평형이 극도로 심해지는 것을 확인할 수 있다.

그림 b)는 시간에 대한 그리드 전체의 상별 전력 변화가 어떻게 되는지, 모든 가구의 전력 사용 이후 변압기 측에서 측정된 전력을 뜻한다. 전반적으로  $x = 400$  부근, 즉, 오전 6시 반 즈음에서 부하의 전력 사용량이 서서히 증가하며 증가한 전력 사용량은  $x=600$  즉, 오전 10시 부근까지 유지되다가 그 이후 시간에 비슷하거나 감소하는 듯 보인다. 이후  $x=1000$  즉, 오후 4시 반 이후에 전력 사용량이 또다시 증가하며 밤 12시로 갈수록 전력 사용량이 감소한다. 이러한 전력 사용량의 변화는 하루 동안 사람의 생활을 생각해볼 때 일어나고 활동하고 잠에 드는 일련의 행동과 유사한 경향성을 보인다.

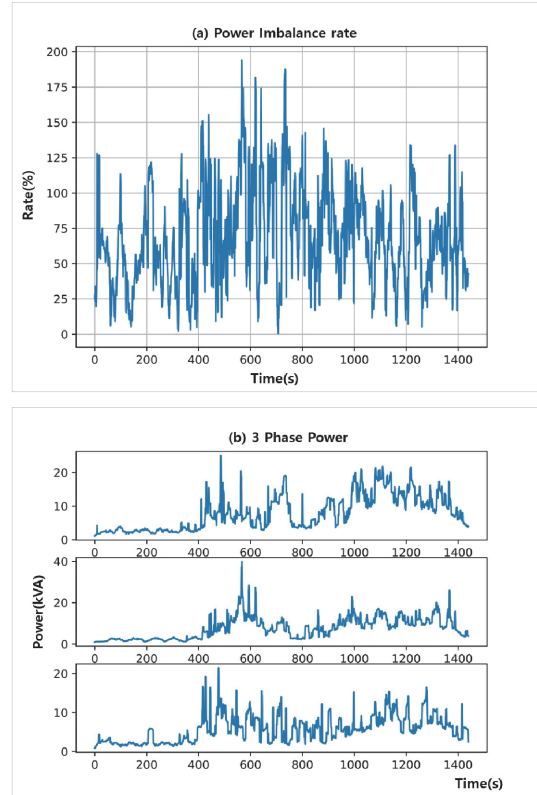


Fig. 10. Phase imbalance across the whole grid

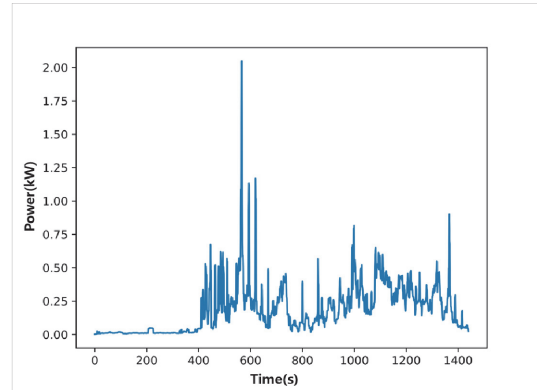


Fig. 11. Power loss because of phase imbalance

상불평형 등의 원인에 따른 전력 손실을 시뮬레이션한 결과는 Fig. 11과 같다. 전력 손실은 아침 6시 반 ~ 7시를 시작으로 점차 발생하다가 아침 10시 부근에서 크게 발생하며, 낮 동안 감소하였다가 이후에 점차 증가하고, 오후 시간대 이후부터는 하루가 끝날 때까지 감소하였다. 이런 경향성은 전압 강하의 경향성 및 그리드 상별 전력

사용의 경향성, 하루 동안 가구 구성원의 행동 양상과도 일치한다. 전압, 전력, 전력 손실 경향성의 유사성은 본 시뮬레이터가 그리드에서 짧은 시간 동안 전력을 다량 사용할 경우 전력 손실이 증가한다는 현실을 잘 반영하여 작동하고 있음을 보여준다.

### 5.2.1 Case Study: ESS 추가 시나리오

위의 결과에서 보고하였듯이, 급격한 전력 수요가 발생할 경우 전력 손실 역시 증가한다. 스마트 그리드에서 이를 보완하여 그리드 전체의 안정성을 추구하는 역할을 할 수 있는 요인으로 에너지 저장장치(Energy Storage Service, ESS)를 고려한다.

ESS란 에너지가 충분할 때 에너지를 충전(Charge)하고 부족할 때 방전(Discharge)하는 의사결정을 할 수 있는 요인(Agent)으로, 시간에 따른 편중된 수요에 의해 발생할 수 있는 그리드의 불안정 및 전력 손실을 완화하는 역할을 할 수 있다. ESS는 크게 네 부분으로 구성되는데, 아래와 같다.

- 배터리(Battery): 에너지를 저장했다가 필요할 때 전기를 방전하는 역할을 하는 부품이다.
- BMS(Battery Management System): 배터리의 전압, 전류, 온도 등을 측정하여 배터리의 안전 상태와 고장 유무를 진단한다. 배터리의 온도 등을 관리하고 제어한다.
- PCS(Power Conditioning System): 그리드의 교류 전류를 배터리에 저장할 수 있도록 직류로 변환하거나 배터리에 저장되어있는 직류 전류를 그리드에 방출할 수 있도록 교류로 변환한다.
- EMS(Energy Management System): 모든 전력 활동의 정보를 최종적으로 관리하고 PCS에 전력 충전 및 방전 등을 명령한다.

Table 5. ESS Parameter Summary

| 항목   | Meaning                  |
|------|--------------------------|
| 전력   | ESS의 충전, 방전 시 에너지의 이동 속도 |
| 전력량  | ESS의 최대저장용량              |
| 충전시간 | ESS를 충전할 수 있는 기간         |

실험 인자는 Table 5와 같으며, 실제 사용한 ESS의 자세한 사양은 아래 Table 6과 같다. 시장에서 판매되고 있는 가정용 ESS 제품의 사양을 바탕으로 하였다. 전력(W)은 ESS의 충전 및 방전 시 얼마만큼의 힘으로 충전 및 방전하는지를 뜻하고, 효율(RTE, Round Trip Efficiency)은

ESS가 전력을 충전하였다가 다시 그리드에 방출할 때, 충전하는 데에 사용했던 전력 대비 얼마만큼의 전력을 출력하는지의 효율을 의미한다. 정격전압은 ESS를 잘 운영하기 위해 기준이 되는 전압을 뜻하며 전력량(Wh)은 ESS의 최대저장용량을 표시한다. ESS의 저장용량이 다 차면 에너지를 저장할 수 없고, 마찬가지로 ESS에 저장된 에너지가 없는 경우 전력을 그리드로 방출할 수 없다. 마지막으로 충전시간은 현재 운영되고 있는 태양광 발전기 연계형 ESS 정책을 반영하였는데, 그리드의 안정성 등을 이유로 오전 10시부터 오후 4시까지 동안만 충전할 수 있도록 모델링하였다.

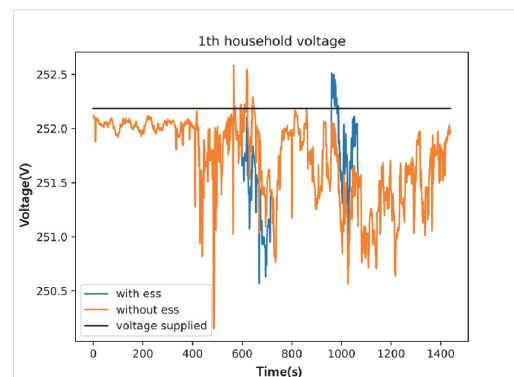
Table 6. ESS Battery Specification

| 항목      | 단위  | Specification |
|---------|-----|---------------|
| 전력      | W   | 2,000         |
| 효율(RTE) | %   | 95            |
| 정격전압    | V   | 230           |
| 전력량     | Wh  | 3,600         |
| 충전시간    | min | 600 ~ 960     |

본 시뮬레이터에서는 임의의 가정 ESS를 소유하고 있는 형태로 ESS를 그리드의 요인으로 모델링하였다.

### 5.2.2 ESS 추가에 따른 결과 지표 변화

Fig. 12는 임의의 가정에 대해서 그리드 내에 ESS가 추가되지 않았을 때와 되었을 때 시간에 따른 전압 변화가 어떠한지를 출력한다. 파란색과 주황색 선은 각각 ESS 반영 전후의 각 가정의 전압을 뜻한다. 그림에서도 확인할 수 있듯이 ESS를 반영했을 때 전압 강하율에 변화가 있었다. ESS가 저장된 전력을 방출할 때, 그리드에서 요구하는 전력 수요를 어느 정도 보완해 줄 수 있어, 전압 강하를 완화할 수 있었다.



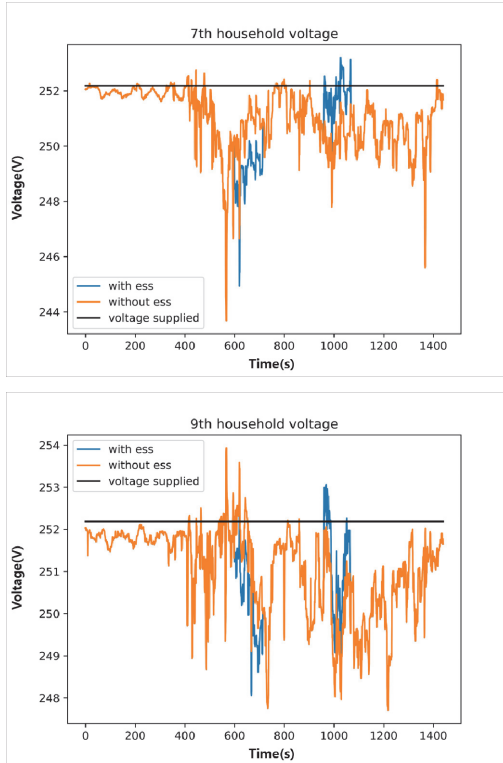


Fig. 12. Voltage change of Households with or without ESS

## 6. 결론

본 연구는 미래 신재생 에너지 및 분산 전원의 증가로 그리드에서 에너지 공급원의 다원화 및 소비원의 다양화로 인한 여러 예측 불가능한 상황에 직면하였을 때 그리드 전체의 안정성 및 효율성을 고려하는 정책 결정자의 입장에서 의사결정을 돕기 위한 시뮬레이터를 개발하는 것을 목표로 하였다. 특히, 미래에 나타날 여러 요인들을 추가할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

구체적으로 배전계통 단계 수준의 변압기 통과 이후 상황을 모델링하였으며, 이로 인해 선로간의 임피던스나 각각의 가구들이 시간별로 사용하는 전력의 데이터를 모두 반영한 현실적인 조류계산이 가능하였다. 즉, 본 연구는 모든 가구의 의사결정을 그리드에 용이하게 반영할 수 있는 방향의 Agent 기반 모델 중 DEVS 형식론을 채택하였는데, 이것은 프로슈머의 존재와 전력 소비자의 의사결정이 그리드 전체에 크게 영향을 줄 상황을 고려한 것이다.

다음으로, 세 가지 지표를 사용하여 시뮬레이터의 기능성을 평가하였다. 우선, 본 시뮬레이터가 목표하는 결

과값을 잘 출력하는지 확인하였고, 이것으로 본 시뮬레이터가 현실을 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다. 그 다음 시나리오를 넣어주어 시뮬레이션을 시행한 뒤, 어떤 값을 출력하는지 지표를 사용하여 검증하였다. 지표들은 그리드의 안정성 및 전체 전력 손실을 고려할 때 중요하게 여겨질 것으로 채택하였다. 추후 위 시뮬레이터 모델을 정책 결정에 사용한다면, 중앙관리자의 입장에서 해당 지표들을 고려하는 의사결정을 할 수 있을 것이다. 마지막으로 에너지 저장 장치가 그리드 전체에 어떤 영향을 발휘하게 되는지 시뮬레이션을 시행하여 알아보았다. 현재 시나리오에 간단한 ESS 요인을 추가한 것에 불과하므로 실제 상황의 ESS 반영 시 어떤 일이 발생할 것이라고 단정 말하기는 어려우나, 단지 가정용 ESS를 일부 가정에 추가한 것임에도 그것이 그리드에 영향력을 행사하고 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 전통적인 그리드에는 존재하지 않았던 새로운 개념의 요인들이 그리드의 안정적 운영에 얼마나 큰 영향을 미칠지 어렵지 않게 추정할 수 있다.

차후에는 ESS뿐만 아니라 태양광 발전기 등의 분산 전원(Distributed Energy Resource, DER), 전기차(Electric Vehicle, EV) 등의 미래에 나타날 다양한 요소들 역시 추가하여 본 시뮬레이션 모델의 범용성 및 유연성을 증대시킬 계획이다.

궁극적으로는 앞으로 발생할 수 있는 여러 환경에 직면하였을 때 새로운 운영 전략을 시험할 수 있도록 가상에 현실 세계를 근사하는 디지털 트윈을 달성하는 것을 목표로, 에너지 분산자원이 다량 추가될 미래 스마트 그리드 환경에서 소비되고 공급되는 전력을 모의하는 기능을 수행할 것이다.

## References

- Tuballa, M. L., & Abundo, M. L. (2016), "A review of the development of Smart Grid technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, pp. 710-725.
- Jørgensen, J. M., Sørensen, S. H., Behnke, K., & Eriksen, P. B. (2011, July), "Ecogrid EU – A prototype for european smart grids", *In 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-7, IEEE.
- Kim, S., Lee, H., Kim, H., Jang, D. H., Kim, H. J., Hur, J., ... & Hur, K. (2018), "Improvement in

- policy and proactive interconnection procedure for renewable energy expansion in South Korea”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 150-162.
- Sasikala, S. P., Jeong, G. H., Yun, T., & Kim, S. O. (2019), “A perspective on R&D status of energy storage systems in South Korea”, *Energy Storage Materials*, 23, pp.154-158.
- Park, J. K., & Kim, Y. J. (2005, June), “Status and perspective of electric power industry in Korea”, *In IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 2896-2899, IEEE.
- Choi, S., & Min, S. W. (2018), “Optimal scheduling and operation of the ESS for prosumer market environment in grid-connected industrial complex”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(3), pp.1949-1957.
- Monteiro, V., Gonçalves, H., & Afonso, J. L. (2011, October), “Impact of Electric Vehicles on power quality in a Smart Grid context”, *In 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, pp. 1-6, IEEE.
- Rohjans, S., Lehnhoff, S., Schütte, S., Andrén, F., & Strasser, T. (2014, June), “Requirements for smart grid simulation tools”, *In 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 1730-1736, IEEE.
- Cardenas, J. A., Gemoets, L., Rosas, J. H. A., & Sarfi, R. (2014). A literature survey on Smart Grid distribution: an analytical approach. *Journal of Cleaner Production*, 65, 202-216.
- Ketter, W., Collins, J., & Reddy, P. (2013), “Power TAC: A competitive economic simulation of the smart grid”, *Energy Economics*, 39, pp.262-270.
- Concepcion, A. I., & Zeigler, B. P. (1988), “DEVS formalism: A framework for hierarchical model development”, *IEEE Transactions on Software Engineering*, 14(2), pp. 228-241.
- Zeigler, Bernard P., Tag Gon Kim, and Herbert Praehofer, (2000), *Theory of Modeling and Simulation*.
- Karnouskos, Stamatis, and Thiago Nass De Holanda (2009), “Simulation of a smart grid city with software agents”, *2009 Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation*.
- Ramchurn, Sarvapali D., et al., (2011), “Agent-based control for decentralised demand side management in the smart grid”, *The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 1*.
- Oliveira, P., Pinto, T., Morais, H., & Vale, Z. (2012), “MASGriP – a multi-agent smart grid simulation platform”, *In 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-8.
- 한국에너지공단 신재생에너지센터 신재생에너지정책실 (2020), *2019년 신·재생에너지 보급통계 잠정치 (2020년 공표) 결과 요약*
- Kumar, A., Tiwari, L., & Somwanshi, D. (2018), “Design architecture and optimization of multi agent based smart grid”, *In 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT)*, pp. 1-4.
- Moehle, Nicholas, et al. (2019), “Dynamic energy management”, *Large Scale Optimization in Supply Chains and Smart Manufacturing*. Springer, Cham, 2019. pp.69-126.
- Jarrah, M. (2016), “Modeling and simulation of renewable energy sources in smart grid using DEVS formalism”, *Procedia Computer Science*, 83, pp.642-647.
- Changho Sung and Tag Gon Kim (2012), "Collaborative Modeling Process for Development of Domain-Specific Discrete Event Simulation Systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, Vol. 42, No. 4, pp. 532-546.





**배 희 선** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-9986-0945> / [cat2507@kaist.ac.kr](mailto:cat2507@kaist.ac.kr))

2020 한국과학기술원 산업 및 시스템공학과 학사

2020~ 한국과학기술원 산업 및 시스템공학과 석사과정 재학

관심분야 : 인공지능, 기계학습, 시뮬레이션



**신 승 재** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-3864-5907> / [tmdwo0910@kaist.ac.kr](mailto:tmdwo0910@kaist.ac.kr))

2018 한국과학기술원 산업 및 시스템공학과 학사

2020 한국과학기술원 산업 및 시스템공학과 석사

2020~ 한국과학기술원 산업 및 시스템공학과 박사과정 재학

관심분야 : 인공지능, 기계학습



**문 일 철** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-1798-1306> / [icmoon@kaist.ac.kr](mailto:icmoon@kaist.ac.kr))

2004 서울대학교 컴퓨터공학부 학사

2005 카네기멜론대학교, Information Systems Management, Heinz Public Policy School, 석사

2008 카네기멜론대학교 전산학 박사

2008~ 2011 한국과학기술원 SMSLab 박사후연구원

2011~ 한국과학기술원 산업 및 시스템공학과 교수

관심분야 : 모델링, 시뮬레이션, 인공지능



**배 장 원** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4681-5059> / [jangwon\\_bae@koreatech.ac.kr](mailto:jangwon_bae@koreatech.ac.kr))

2007 고려대학교 전기전자전파공학부 학사

2009 한국과학기술원 전자공학과 석사

2015 한국과학기술원 산업및시스템공학과 박사

2015~ 2020 한국전자통신연구원 인공지능연구소 선임연구원

2020~ 한국기술교육대학교 산업경영학부 조교수

관심분야 : 모델링, 시뮬레이션, 인공지능