

AiTES 를 사용한 태양광 발전이 포함된 자가 적응적 스마트 그리드

¹박성식, ^{*2}박용범

¹ 단국대학교 IT 법학협동과정 정보보안, 72170113@dankook.ac.kr

^{*2} 단국대학교 소프트웨어학과, ybpark@dankook.ac.kr

Self-Adaptive Smart Grid with Photovoltaics using AiTES

¹Sung-sik Park, ^{*2}Young-beom. Park

¹Dankook University, 72170113@dankook.ac.kr

^{*2} Dankook University, ybpark@dankook.ac.kr

요약

스마트 그리드는 전력 생산자와 소비자 간의 양방향 통신을 통해 효율적으로 전력을 생산 및 소비하기 위한 지능형 전력망이다. 신재생 에너지가 발전하면서 신재생 에너지가 스마트 그리드에서 차지하는 비율이 점점 높아지고 있다. 신재생 에너지는 발전량이 실시간으로 변하기 때문에 발전량의 예측 및 조절이 가능한 기존의 발전 방식과는 다른 문제점이 있다. 스마트 그리드에 자가 적응 프레임워크를 적용하는 것은 실시간으로 변하는 신재생 에너지의 발전량에 적응함으로써 스마트 그리드의 효율적인 운영을 가능케 할 것이다. 본 논문에서는 태양광 발전 시설이 설치된 스마트 마을을 가정하고 이에 자가 적응 프레임워크인 AiTES 를 적용 하여 자가 적응 프레임워크를 통해 스마트 그리드의 효율적인 운영이 가능함을 보였다.

Abstract

Smart Grid is an intelligent power grid for efficiently producing and consuming electricity through bi-directional communication between power producers and consumers. As renewable energy develops, the share of renewable energy in the smart grid is increasing. Renewable energy has a problem that it differs from existing power generation methods that can predict and control power generation because the power generation changes in real time. Applying a self-adaptative framework to the Smart Grid will enable efficient operation of the Smart Grid by adapting to the amount of renewable energy power generated in real time. In this paper, we assume that smart villages equipped with photovoltaic power generation facilities are installed, and apply the self-adaptative framework, AiTES, to show that smart grid can be efficiently operated through self adaptation framework.

Keywords: Smart Grid, Virtual Power Plant, Photovoltaics, Self-Adaptive System, AiTES

1. 서론

신재생 에너지의 등장 및 전자 제품의 증가로 인해 전력망은 더 복잡해지고 있다. 기존의 전력망은 중앙에서 소비자로 일방적으로 전력을 보냈다. 기존의 방식은 신재생 에너지와

* Corresponding Author

Received: Aug. 28, 2018, Revised: Sept. 27, 2018, Accepted: Sept. 28, 2018

† 이 논문은 한국아이씨티플랫폼학회 2018 년 하계학술대회에서 추천되었음

같은 분산된 발전 시스템을 통합하기에는 비효율적이다. 따라서 소비자와 생산자 간의 양방향 통신을 통해 효율적으로 전력을 사용하는 스마트 그리드가 탄생하였다.

다음의 연구들은 스마트 그리드 내에 작은 전력 집합인 **microgrid**가 상호간의 전력 거래를 하게함으로써 전력이 중앙을 거치지 않고 재분배 되어 전력 손실의 감소와 이를 통해 효율적인 전력 사용이 가능함을 제시하고 있다[1][2][3].

스마트 그리드에 포함된 신재생 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 다음날 태양광 발전량을 예측해 발전량과 전력 소비량에 따라 기존 발전기의 발전량을 조절하거나[4], 예측된 발전량과 부하 수요에 따른 최적화 된 전력 분배 스케줄을 작성하거나[5], 예측된 발전량과 예상된 전력 사용량을 비교하여 조절 가능한 부하를 조정함으로써 전력을 효율적으로 사용하고자 하였다[6].

그러나 **microgrid** 간 전력 거래에 대한 기존의 연구들은 **microgrid**가 사전에 미리 구성되어 있어야 하며, 각각의 **microgrid**가 단순히 전력을 주고 받을 뿐이라 스마트 그리드의 전체적인 문제에 통합하여 대응하기는 어려운 문제가 있다. 그리고 스마트 그리드에 포함된 신재생 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 연구들은 신재생 에너지 발전량 및 전력 소비량을 예측하여 사전에 전력 소비 계획을 작성하는 만큼 실제 환경에서의 발전량 및 소비량의 변화에 대응하는 것에는 한계점이 있다.

스마트 그리드에 더 많은 신재생 에너지가 포함되고, 전력을 소비하는 주체가 늘어갈수록 변동이 심한 신재생 에너지의 발전량과 불규칙한 전력 소비에 대응하기 위해 스마트 그리드는 더 복잡해질 것이다. 이에 따라 사전에 전력 소비 스케줄을 계획하는 것 보다 스마트 그리드의 상황에 따라 실시간으로 전력 분배 및 사용량을 조절할 필요성이 있다.

변화하는 주변 환경에 대응하기 위해 자가 적응 시스템이 탄생하였고[7], 자가 적응 시스템 중 **Adaptive Internet things ecosystem(AiTES)**는 많은 IoT 장비로 이루어진 환경에서 피드백 루프를 통해 환경 변화에 따라 각각의 IoT 장비들의 목표를 조율하고 IoT 장비의 소프트웨어를 동적으로 교체함으로써 각각의 IoT 장비와 IoT Ecosystem 이 환경 변화에 적응할 수 있도록 고안된 프레임워크이다[8].

본 논문에서는 신재생 에너지 중 태양광 발전이 포함된 스마트 그리드에 **AiTES**를 적용하여 스마트 그리드에 자가 적응성을 부여하였다. 스마트 그리드에 속한 각각의 장비는 피드백 루프를 반복하면서 환경 변화에 맞춰 장비의 작동을 변경함으로써 자신의 목표를 달성한다. 스마트 그리드 전체를 관장하는 피드백 루프는 스마트 그리드 전체의 상황에 따라 각 장비들의 행동을 변화시킨다. 이를 통해 실시간으로 변하는 신재생 에너지 발전량과 전력 소비량을 파악하고 상황에 맞는 전력 재분배를 통해 효율적인 전력 사용을 도모하였다.

자가 적응 프레임워크의 유효성을 확인하기 위해 스마트 하우스가 있는 스마트 마을을 가정하였다. 각각의 하우스에 적용된 **AiTES**는 자신의 전력 소비량 및 발전량을 토대로 발전 상태를 개선하거나 전력 소비량을 조율하고, 스마트 마을에 적용된 **AiTES**는 수집된 전력 사용 정보를 토대로 여유 전력이 있는 하우스가 전력이 부족한 하우스에 전력을 지원한다. 이를 통해 마을 전체의 전력을 효율적으로 사용하고자 하였다.

논문의 나머지 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 스마트 그리드에서의 태양광 발전과 **virtual power plant**에 관련된 연구들을 소개한다. 3 장에서는 스마트 그리드에서의 **AiTES**에 대해 설명한다. 4 장에서는 스마트 마을 시나리오에 **AiTES**를 적용한 시나리오에 대해 설명한다. 5 장에서는 **AiTES** 적용 결과에 대해 설명한다. 마지막으로 6 장에서는 결론 및 향후 연구에 대한 이슈를 다룬다.

2. 관련 연구

이 장에서는 발전량의 변동이 심한 태양광 발전을 스마트 그리드에 통합하는 연구와 스마트 그리드에서 다양한 발전 시설 및 부하 시설을 하나로 통합하는 **Virtual Power Plant(VPP)**에 대한 연구에 대해 소개한다.

2.1. 태양광 발전

신재생 에너지의 에너지원에서 풍력과 태양광 발전의 비율이 높는데, 풍력 발전은 바람, 태양광 발전은 일사량 등 날씨에 의해 발전량이 변하는 특징을 가지고 있다[9]. 이는 스마트 그리드에 신재생 에너지를 통합할 경우 불규칙한 발전량으로 인해 안정적인 발전량 유지가 어렵고, 증가하는 수요에 맞춰 발전량을 증가시킬 수도 없다는 문제를 야기한다.

태양광 발전을 사용하는 경우, 태양광 발전이 주간에만 가능하고, 기상 상태에 따라 발전량이 달라지는 점 때문에 일반적으로 Energy Storage System(ESS)을 같이 사용한다. Z. A. Vale 의 연구[10]는 다음날의 발전량과 전력 소비량을 예측하여 ESS 의 충/방전 스케줄을 작성하고 예측된 스케줄과 실제 상태를 비교하여 계획을 수정함으로써 불규칙한 태양광 발전량에 대응하여 에너지 비용을 감소시킬 수 있음을 보여주고 있다.

태양광 발전은 빛 에너지를 전기 에너지로 변경하기 때문에, 일사량에 따라 발전량이 결정된다. 이는 더 많은 전력이 필요한 경우에도 추가적인 발전을 할 수 없다는 의미이기도 하다. Baochao 의 연구[11]는 태양광 발전량에 따라서 전력 사용량이 피크에 도달한 경우 조절 가능한 부하의 전력 소비를 줄임으로써 안정적인 스마트 그리드 운용이 가능함을 보여주고 있다.

2.2. Virtual Power Plant

VPP 는 스마트 그리드 전력망에 존재하는 다양한 전력 소비 대상과 전력 생산 시설을 하나의 단위로 합쳐서 관리할 수 있도록 고안되었다[12]. VPP 는 기존의 microgrid 가 일정 지역에 있는 전력 시설을 물리적인 장치로 연결한 것과는 달리 더 넓은 지역의 장치들을 소프트웨어 적으로 통합할 수 있는 특징을 가진다[13]. VPP 는 VPP 간의 양방향 통신과 상호간 발전기 및 부하 로딩을 통해 microgrid 에 비해 동적으로 전력 관리를 가능하게 한다[14].

VPP 는 여러 발전 시설을 하나로 통합하는 만큼, 포함되는 발전 시설에는 신재생 에너지도 있다. 환경에 따라 발전량이 달라지는 신재생 에너지를 VPP 에 포함하기 위해 Liwei 의 연구[15]는 신재생 에너지의 불안정한 발전량을 ESS 로 보정하여 안정적으로 전력 생산이 가능함을 보여주고 있다.

신재생 에너지가 포함된 VPP 는 신재생 에너지 발전량에 따라 전체 VPP 의 발전량이 달라지게 된다. 이런 경우에도 VPP 를 안정적으로 운영하기 위해서는 전력 수요를 조절할 필요가 있다. Marco 의 연구[16]는 VPP 의 전력 여유가 낮을 경우 조절 가능한 부하의 전력 소비를 줄임으로써 안정적인 VPP 운영이 가능함을 보여주고 있다.

3. 스마트 그리드에서의 자가 적응 시스템

이 장에서는 스마트 그리드와 자가 적응 시스템의 유사성 및 AiTES 의 구조에 대해 설명하고, AiTES 구조를 스마트 그리드에 도입하였을 경우 스마트 그리드의 각 부분이 AiTES 의 어떤 부분에 대응되는지, 그리고 그 역할에 대해 설명한다.

스마트 그리드는 다양한 발전 시설과 소비 시설로 이루어진 시스템으로써, 발전량에 따라 소비량을 조절하거나, 소비량에 맞춰 발전량을 늘리는 등 시스템 내부의 상황이 변함에 따라 상황에 맞춰 발전량 및 소비량을 조절하는 등 시스템 내부의 조건을 변경시키므로 자가 적응 시스템과 유사하다.

스마트 그리드에 포함된 발전 시설과 소비 시설은 많은 전자 제품으로 구성되어 있고, 각각의 시설은 네트워크로 서로 연결되어 정보를 주고 받는다. 따라서 스마트 그리드는 하나의 거대한 IoT 장비들의 모임으로 볼 수 있다. 따라서 스마트 그리드 환경에 AiTES 를 적용함으로써 자가 적응성을 부여하고자 한다. 다음 그림은 AiTES 의 전반적인 구조를 보여주는 그림이다.

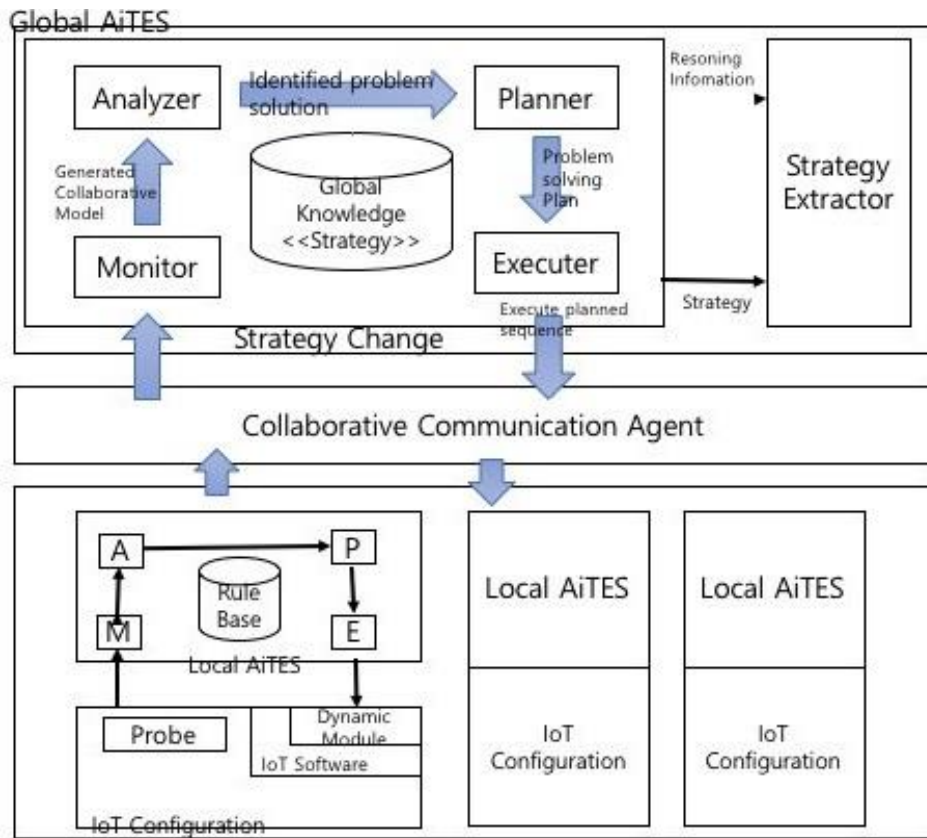


Figure 1. Structure of AiTES[17]

그림 1은 AiTES의 전반적인 구조 및 Local AiTES와 Global AiTES의 구성을 보여주고 있다. AiTES는 각각의 IoT 장비에 대응하는 Local 부분과 시스템 전체의 정보를 취합하는 Global AiTES, Local AiTES와 Global AiTES 간의 통신을 담당하는 Collaborative Communication Agent, IoT 장비와 Local AiTES 간의 통신을 담당하는 IoT Configuration으로 이루어져 있다. Local AiTES는 환경 변화에 따라 IoT 장비의 목표를 달성하는 방향으로 작동하며, Global AiTES는 Local AiTES의 상황 및 환경 변화에 따라 시스템 전체의 목표를 달성하기 위해 각 Local AiTES의 목표를 변경하는 방식으로 작동한다[18].

스마트 그리드 환경에 AiTES를 적용하는 경우, Local AiTES는 발전 시설에서의 각각의 발전기, 소비 시설에서의 각각의 가전 제품에 대응한다. Local AiTES는 피드백 루프를 반복하며 자신이 담당하는 장비가 원활하게 작동하도록 작동한다. Global AiTES는 스마트 그리드 전체에 해당하며 Local AiTES에서 발생한 정보를 토대로 스마트 그리드의 상태를 파악한다. 스마트 그리드의 상태가 변경되어 전력 소비 및 생산량을 조절해야 하는 경우가 발생하면, Global AiTES는 각 발전기 혹은 가전 제품에 적용된 Local AiTES의 목표를 변경함으로써 발전량을 조절하거나 전력 소비량을 조절함으로써 전체 시스템이 상황에 적응할 수 있도록 작동한다.

4. 태양광 발전이 포함된 자가 적응적 스마트 그리드

이 장에서는 스마트 그리드에 AiTES를 적용함으로써 자가 적응성을 부여하는 것이 유용한지 검증하기 위해 가상의 스마트 그리드 환경을 세우고 시나리오 상에서 Local AiTES와 Global AiTES의 작동 구조에 대해 설명한다.

신재생 에너지, 그 중에서도 태양광 발전이 포함된 스마트 그리드 환경에서 자가 적응성 부여로 인한 효율적 에너지 사용이 가능한지 검증하기 위해 각 주택이 태양광 발전 시설을 가지고 있는 마을을 가정하였다. 다음 그림은 Global AiTES 가 적용된 마을을 나타내는 그림이다.

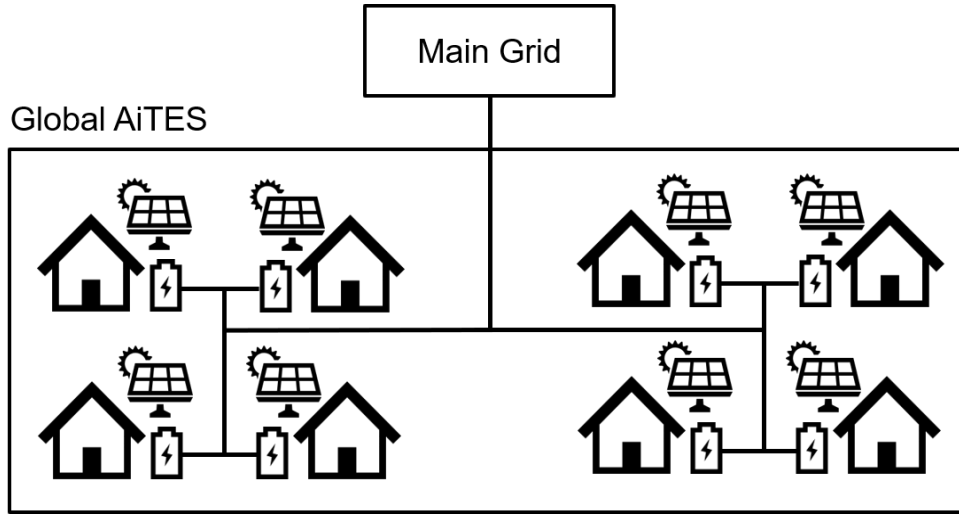


Figure 2. Smart Village with Global AiTES

그림 2는 주택 8 채가 있는 마을에 Global AiTES 를 적용한 그림이다. 각각의 주택은 마을 밖의 Main Grid 와 연결되어 있고, Global AiTES 는 마을의 전체 전력 흐름을 관리한다. 그리고 주택은 4 채씩 그룹을 이루고 있다고 가정한다. 각 주택에는 5kW 급 태양광 발전 시설, 30kW 급 ESS 가 설치되어 있고, 주택의 전력 소비와 태양광 발전 시설, ESS 를 관리하는 Local AiTES 가 적용되어 있다. 각 가정에 있는 많은 가전 제품과 태양광 발전 시설, ESS 에도 각각 Local AiTES 를 적용할 수 있지만, 본 시나리오에서는 이를 하나로 묶어 가정 내 전력 소비를 조율하고, ESS 의 전력 흐름을 조절하는 Local AiTES 가 존재하는 것으로 가정한다. 다음 표는 ESS 잔여 전력 상태의 판단 기준을 나타내는 표이다.

Table 1. ESS Residual power status criterion

<i>ESS Power State</i>	<i>Residual power</i>
Very Low	Less than 7.5kW
Low	7.5kW or more and less than 15kW
Normal	15kW or more and less than 22.5kW
High	22.5kW or more

표 1은 ESS의 잔여 전력량에 따라 ESS의 잔여 전력 상태를 판단하는 기준을 나타낸 표이다. 이 기준은 Local AiTES 및 Global AiTES에서 ESS의 잔여 전력 상태를 판단하는 기준으로 사용된다. Local AiTES는 발전량, ESS의 잔여 전력, 전력 소비량 등의 정보를 입력 받고 피드백 루프를 반복하면서 정해진 기준에 따라 Local AiTES 내 장치들의 행동을 변경시킨다. 다음 표는 Local AiTES의 판단 기준에 따른 행동 변경 내용이다.

Table 2. Change behavior according to Local AiTES internal state

<i>Local AiTES internal state</i>	<i>Change behavior in Local AiTES</i>
The residual power of the ESS is low.	Reduce power consumption.
The residual power of the ESS is high.	Increase power consumption.
The temperature of the solar panel is high.	Use a cooler to lower the temperature of the solar panel.
The solar panel and the sun are out of alignment.	Rotate the solar panel in the direction of the sun.

표 2는 Local AiTES가 행동을 변경하게 되는 판단 기준과 그에 따라 변경하는 행동을 나타낸 표이다. Local AiTES의 목표는 ESS의 전력이 부족하여 외부로부터 전력을 구매하는 경우 또는 ESS의 전력이 넘쳐 전력을 낭비하는 경우를 줄여 에너지 비용을 절감하는 것이다. 이를 위해 Local AiTES는 피드백 루프 중 속해 있는 장비의 환경 변화가 일어난 경우, 이를 수집하여 상황을 분석하고, 분석된 상황에 따라 환경에 적응하여 시스템이 목표를 달성할 수 있게끔 Local AiTES 내부의 행동을 변경하게 된다.

Global AiTES의 목적 또한 Local AiTES와 같이 각 주택이 전력이 부족해 외부로부터 전력을 구매하는 경우를 줄여 마을 전체의 에너지 비용을 절감하는 것이다. 이를 위해 Global AiTES는 Local AiTES들의 ESS 잔여 전력 등의 정보를 수집하고, 피드백 루프 중 특정 주택의 전력이 부족해지면 전력의 여유가 있는 주택의 Local AiTES의 행동을 수정하여 전력 지원을 하게 된다. 다음 표는 Global AiTES의 전력 지원 대상 선정 기준을 나타낸 표이다.

Table 3. Selection criterion for power support in Global AiTES

<i>Elapsed time</i>	<i>Supported selection criteria</i>
15 minutes	Select where the ESS residual power is more than normal within the same area.
30 minutes	Select where the ESS residual power is more than normal within the all area.
45 minutes	It supports additional power generated by reducing power consumption in the same area.
60 minutes	It supports additional power generated by reducing power consumption in the all area.

표 3은 전력이 부족한 경우 Global AiTES가 전력 지원 대상 선정 기준을 나타낸다. Global AiTES는 Local AiTES의 전력이 부족해지는 경우를 방지하기 위해 작동한다. Monitor 단계에서는 Local AiTES에서 발생한 정보를 모니터링 한다. 모니터링 도중 특정 ESS의 전력이 부족 상태가 되면 Analyzer가 호출되며, Analyzer는 ESS의 전력 부족 상태가 얼마나 지속되었는지, 다른 ESS의 전력 상태에 대해 분석한다. Planner는 Analyzer의 분석 결과 및 전력 지원 대상 선정 기준을 토대로 어떤 Local AiTES가 전력을 지원해줄지 결정하고 전력 지원 계획을 수립한다. 마지막으로 Executor는 Planner에서 수립된 계획을 토대로 지원 대상으로 선발된 Local AiTES에 전력 지원 요청을 보내게 된다.

5. 실험 결과

이 장에서는 스마트 그리드 환경에 AiTES를 적용하여 자가 적응성을 부여한 결과, 발전 상태 및 전력 소비 상태에 따라 전력을 서로 나누어 사용한 것이 AiTES를 적용하지 않은 환경에 비해 전력을 효율적으로 사용하였는지 확인함으로써 AiTES의 유용성을 입증한다. 다음 그림은 AiTES 적용 유무에 따른 시나리오 전체의 추가 전력 소비량을 나타내는 그림이다.

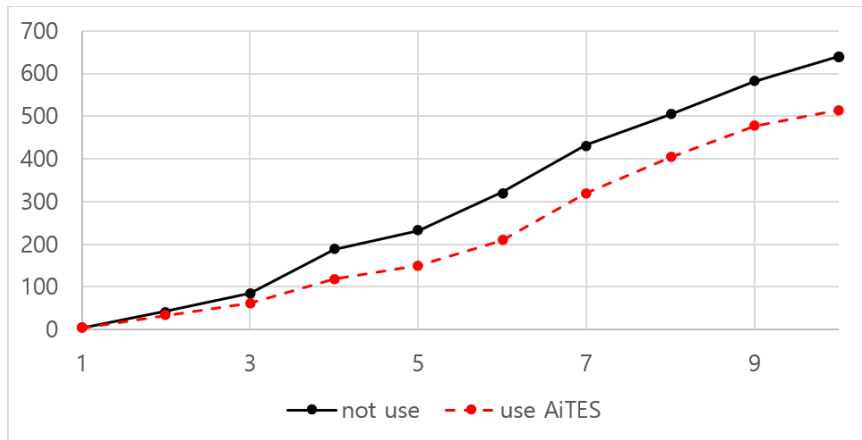


Figure 3. Additional power consumption depending on whether AiTES is applied

그림 3은 AiTES 적용 여부에 따른 10 일간의 시나리오 전체의 추가 전력 소비량을 그래프로 나타낸 것이다. AiTES 를 적용함으로써 전력이 부족한 주택이 마을 내부에서 전력을 지원받음으로써 전력 구매량이 감소함을 확인할 수 있었다. Global AiTES 의 전력 지원 요청으로 지원해주는 전력은 전력 소비량 이상으로 발전한 경우의 추가 발전량을 지원해 준다. 일반적으로 주간에 전력 소비가 큰 쪽이 전력을 지원받고, 주간에 전력 소비가 작은 쪽이 전력을 지원해주게 된다. 따라서 전력 소비를 감소 시켜 추가 전력을 지원해 주어도 추가 지원량이 많지 않으므로 요일이 지남에 따라 급격한 차이는 나타나지 않았지만, 10 일간 총 추가 전력 소비량은 AiTES 적용 시 약 20% 정도 감소함을 확인할 수 있었다. 다음 그림은 AiTES 적용 유무에 따른 일자별 추가 전력 소비량을 그래프로 나타낸 그림이다.

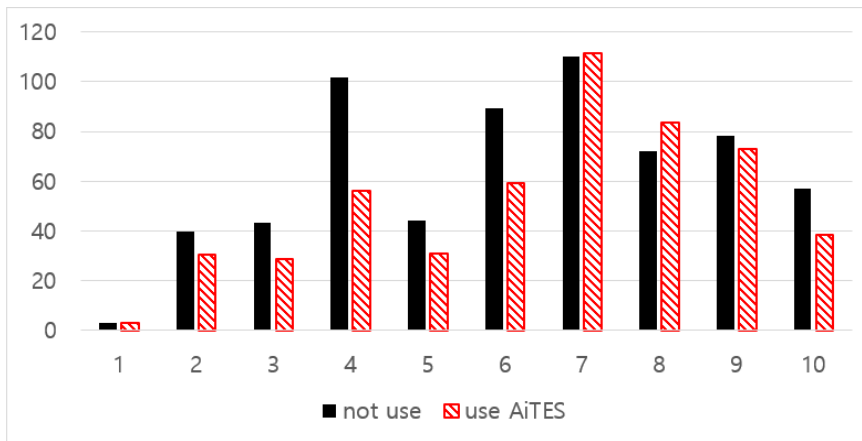


Figure 4. Additional power consumption per day depending on whether AiTES is applied

그림 4는 AiTES 적용 여부에 따른 일자별 시나리오 전체의 추가 전력 소비량을 그래프로 나타낸 것이다. 전반적으로 AiTES 를 사용한 것이 사용하지 않는 경우보다 추가 전력을 적게 소비하였음을 확인할 수 있었다. 그러나 7, 8 일차는 추가 전력 소비량이 상승하였는데, 그 이유는 4 일차와 6 일차에 많은 양의 전력을 지원해주었기 때문으로 추정된다. 그럼에도 불구하고 Local AiTES 적용으로 발전량에 따라 전력 사용을 조절하고 Global AiTES 의 전력 지원 요청으로 인해 추가 전력 소비량을 줄일 수 있음을 확인할 수 있었고, 이는 태양광 발전이 포함된 스마트 그리드 상황에서 태양광 발전의 발전량에 따른 전력 소비의 변동성을 줄여 스마트 그리드의 안정적인 운영도 가능함을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 신재생 에너지와 같이 스마트 그리드를 복잡하게 만드는 요인이 증가로 인해 스마트 그리드의 운영을 더 복잡하게 만들고 있으므로 스마트 그리드 환경에 자가 적응성을 부여하는 것의 필요성을 살펴보았다. 스마트 그리드와 자가 적응 시스템 간의 유사성을 분석하였고, 특히 스마트 그리드는 많은 발전 및 소비 시설이 모여 있는 만큼 다양한 전자 기기가 속한 점으로 인해 자가 적응 프레임워크 중 하나인 AiTES 를 적용시키기에 적절하여 스마트 그리드에 이를 적용시켜 자가 적응성을 부여하였다.

스마트 그리드에 자가 적응 프레임워크를 적용하는 것의 유용성을 확인하기 위해 태양광 발전 시설이 설치된 스마트 마을의 시나리오를 작성하였다. 이 시나리오에 AiTES 를 적용하여 각각의 태양광 발전 상태 및 전력 소비량을 분석하였다. 분석 결과에 따라 각 시설의 전력 사용량 조절 및 전력 분배를 하였다. 발전량 및 소비량에 따라 전력을 제어하는 것을 통해 스마트 그리드 시스템을 효율적으로 운영할 수 있음을 보여주었다.

향후 연구에서는 태양광 발전만이 아닌 다른 신재생 에너지를 추가된 더 복잡한 환경 및 기존의 화력 발전과 같은 발전 시설 및 전력 비용을 고려한 실제 스마트 그리드에 자가 적응성을 부여하는 것과 AiTES 에서 판단하는 기준을 사용자가 직접 정의한 것에서 머신러닝을 기반으로 한 상황 판단 기준 정의에 대하여 연구할 것이다.

7. 감사의 글

이 논문은 2018 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업 성과임(No.NRF-2016H1D5A1909989).

위 논문은 한국연구재단에서 지원하는 BK21 플러스 특화 전문인재양성사업으로 지원받은 논문임.

8. 참고문헌

- [1] Saad, W., Han, Z., Poor, H. V., Basar, T., "Game-theoretic methods for the smart grid: An overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 29, No. 5, pp. 86-105, 2012.
- [2] Nunna, H. K., Doolla, S., "Demand response in smart distribution system with multiple microgrids," *IEEE transactions on smart grid*, Vol. 3, No. 4, pp. 1641-1649, 2012.
- [3] Wu, J., Guan, X., "Coordinated multi-microgrids optimal control algorithm for smart distribution management system," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 4, pp. 2174-2181, 2013.
- [4] Kanchev, H., Lu, D., Colas, F., Lazarov, V., Francois, B., "Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications," *IEEE transactions on industrial electronics*, Vol. 58, No. 10, pp. 4583-4592, 2011.
- [5] Ziadi, Z., Taira, S., Oshiro, M., Funabashi, T., "Optimal power scheduling for smart grids considering controllable loads and high penetration of photovoltaic generation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 5, pp. 2350-2359, 2014.
- [6] Tanaka, K., Yoza, A., Ogimi, K., Yona, A., Senjyu, T., Funabashi, T., Kim, C. H., "Optimal operation of DC smart house system by controllable loads based on smart grid topology," *Renewable Energy*, Vol. 39, No. 1, pp. 132-139, 2012.
- [7] Oreizy, P., Gorlick, M. M., Taylor, R. N., Heimhigner, D., Johnson, G., Medvidovic, N., Wolf, A. L., "An architecture-based approach to self-adaptive software," *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, Vol. 14, No. 3, pp. 54-62, 1999.
- [8] Ahn, J., Park, Y. B., "AiTES: The Self-Adaptive framework for environment change of IoT," In *Computer Applications and Information Processing Technology (CAIPT)*, pp. 1-4, 2017.

- [9] Tascikaraoglu, A., Erdinc, O., Uzunoglu, M., Karakas, A., "An adaptive load dispatching and forecasting strategy for a virtual power plant including renewable energy conversion units." *Applied Energy*, Vol. 119, pp. 445-453, 2014.
- [10] Vale, Z. A., Morais, H., Khodr, H., "Intelligent multi-player smart grid management considering distributed energy resources and demand response," In Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-7, 2010.
- [11] Wang, B., Sechilariu, M., Locment, F., "Intelligent DC microgrid with smart grid communications: Control strategy consideration and design," *IEEE transactions on smart grid*, Vol. 3, No. 4, pp. 2148-2156, 2012.
- [12] Lombardi, P., Powalko, M., Rudion, K., "Optimal operation of a virtual power plant," In Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-6, 2009.
- [13] Nosratabadi, S. M., Hooshmand, R. A., Gholipour, E., "A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, pp. 341-363, 2017.
- [14] Hernández, L., Baladron, C., Aguiar, J. M., Carro, B., Sanchez-Esguevillas, A., Lloret, J., Cook, D., "A multi-agent system architecture for smart grid management and forecasting of energy demand in virtual power plants," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 51, No. 1, pp. 106-113, 2013.
- [15] Ju, L., Tan, Z., Yuan, J., Tan, Q., Li, H., Dong, F., "A bi-level stochastic scheduling optimization model for a virtual power plant connected to a wind–photovoltaic–energy storage system considering the uncertainty and demand response," *Applied energy*, Vol. 171, pp. 184-199, 2016.
- [16] Giuntoli, M., Poli, D., "Optimized thermal and electrical scheduling of a large scale virtual power plant in the presence of energy storages," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 2, pp. 942-955, 2013
- [17] Ahn, J., Park, Y. B., "An Implementation of a Dynamic Module Changing Framework of a Self-adaptive System for Smart Home with Changing Environment," *International Information Institute (Tokyo). Information*, Vol. 21, No. 3, pp. 987-995, 2018
- [18] An, J., Park, Y. B., "Methodology for Automatic Ontology Generation Using Database Schema Information," *Mobile Information Systems*, 2018.