

마이크로그리드와 연계된 전기자동차 충전인프라에 관한 연구

심헌*

한국폴리텍대학 인천캠퍼스 전기에너지시스템과 교수

The Study for EV Charging Infrastructure connected with Microgrid

Hun Shim*

Professor, Department of Electric Energy System, Incheon Campus of Korea Polytechnics

요약 본 전기자동차(EV)의 사용을 늘리고 계통 부담을 최소화하기 위해 재생에너지를 사용하는 마이크로그리드가 중요한 역할을 담당해야 한다. 마이크로그리드는 소형 디젤발전과 같은 화석연료를 사용할 수도 있지만, 많은 경우에 친환경 에너지인 재생에너지로부터 에너지를 공급받을 수 있다. 그러나 태양광과 풍력과 같은 재생에너지는 가변적인 출력 특성을 갖는다. 따라서 전기자동차의 충전 에너지 수요를 충족하는 동시에 안정적으로 부하 전력을 공급하기 위해서 마이크로그리드에 디젤발전 또는 전기차-그리드(V2G)를 병행 에너지원으로 활용하는 전기자동차 충전인프라 구성에 대한 검토가 필요하다. 이와 같은 배경으로 본 연구에서는 태양광발전, 풍력발전, 디젤발전과 V2G를 활용하여 부하에 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 마이크로그리드의 모델을 구성하였다. 제안된 마이크로그리드는 태양광발전과 풍력발전을 1차 공급에너지원으로 전력 수요에 대응토록 하고, 부하의 전기자동차의 운영 유형과 부하 동기기의 회전속도를 판단하여 부족 전력에 대해 디젤발전으로부터 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 모델이다. 이렇게 제안된 모델의 시스템 성능을 검증하기 위해 MATLAB/Simulink로 시뮬레이션함으로써 마이크로그리드의 안정적 운영 방안을 고찰하였다.

주제어 : 마이크로그리드, 전기자동차, 전기차-그리드, 충전인프라, 태양광발전, 풍력발전, 재생에너지

Abstract In order to increase the use of electric vehicles (EVs) and minimize grid strain, microgrid using renewable energy must take an important role. Microgrid may use fossil fuels such as small diesel power, but in many cases, they can be supplied with energy from renewable energy, which is an eco-friendly energy source. However, renewable energy such as solar and wind power have variable output characteristics. Therefore, in order to meet the charging and discharging energy demands of electric vehicles and at the same time supply load power stably, it is necessary to review the configuration of electric vehicle charging infrastructure that utilizes diesel power or electric vehicle-to-grid (V2G) as a parallel energy source in the microgrid. Against this background, this study modeled a microgrid that can stably supply power to loads using solar power, wind power, diesel power, and V2G. The proposed microgrid uses solar power and wind power generation as the primary supply energy source to respond to power demand, and determines the operation type of the load's electric vehicles and the rotation speed of the load synchronous machine to provide stable power from diesel power for insufficient generations. In order to verify the system performance of the proposed model, we studied the stable operation plan of the microgrid by simulating it with MATLAB /Simulink.

Key Words : Microgrid, EV, V2G, Charging Infrastructure, PV System, Wind Power, Renewable Energy

*교신저자 : 심헌(hshim@kopo.ac.kr)

접수일 2023년 11월 15일 수정일 2024년 01월 25일 심사완료일 2024년 02월 02일

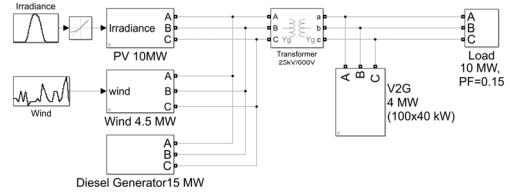
1. 서론

세계적인 탄소중립의 실현을 위한 내연기관 차량의 판매 금지 계획과 에너지 저장 기술의 발달로 전기자동차(이하, 전기차)에 대한 수요가 기하급수적으로 증가하고 있다. 이러한 전기자동차의 급격한 증가는 전력계통에 부담이 된다. 친환경 운송 수단으로 간주하는 전기자동차의 1차 에너지원의 대부분은 역설적으로 화석 연료가 분담하고 있다. 화석 연료의 전기차 충전 전력 수요 분담을 감소시키기 위해서 태양광과 같은 재생에너지에 기반한 마이크로그리드(Microgrid)와 전력계통이 연계된 전기차 충전 인프라(EV Charging Infrastructure)로 전환이 필요하다. 재생에너지에 기반하는 마이크로그리드 전기차 충전 인프라는 전력수요에 따른 전력계통의 분담을 감소시키고 안정적인 충전 전력의 제공을 위해 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System)를 갖추어야 하는데, 전기차-그리드(Vehicle-to-Grid, 이하, V2G)를 활용할 경우, 이에 대한 대체가 가능하다. 이렇게 구성된 마이크로그리드는 전기차 충전을 위한 에너지원으로 기상 조건에 따른 가변적 출력 특성을 보완하여 최적의 충전상태를 유지할 수 있어 효율적이고 친환경적인 전기차 충전 시스템을 제공할 수 있다. 만약, 재생에너지로부터 안정적인 전력 공급이 불가능할 경우, 디젤발전과 연계되어 전력을 공급받아 부하 및 충전 전력 수요에 대응하게 된다.

이 연구에서는 마이크로그리드와 연계된 전기차 충전 인프라를 구현하고 전기자동차의 충전 인프라의 유형을 만들어 이에 따라 안정적으로 요구 전력을 재생에너지를 통해 공급할 수 있는 마이크로그리드 모델링을 진행하였다. 제한된 모델링은 Matlab/Simulink를 활용한 시뮬레이션으로 적합성을 평가하였다.

2. 마이크로그리드 충전 인프라의 구성

마이크로그리드를 활용한 전기차 충전 인프라는 일반적으로 전력계통과 연계하여 응급 시 전력공급을 목적으로 하는 소형 디젤발전기를 사용하여 운영된다. 이 연구에서는 이와 더불어 마이크로그리드에서 태양광발전, 풍력발전, 디젤발전기를 발전원과 V2G의 전기차 충전인프라를 Fig. 1과 같이 구성하여 마이크로그리드의 확장 모델을 구성하였다[1].



[Fig. 1] Microgrid Configuration for EV Infrastructure

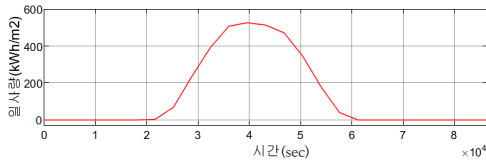
여기서, V2G는 충전식 전기차를 전력계통과 연결하여 주차 중에 남은 전력을 이용하는 개념으로, 전력망을 통해 전기차를 충전하고 주행 후 남은 전력을 전력계통을 통해 다시 송전(방전)하는 것으로 전기차를 움직이는 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System)로 활용할 수 있는 기술적 대안이다.

이 연구에서 제안된 마이크로그리드 용량은 대략 1,000가구의 전력 부하에 해당한다. 이것은 서울시 월평균 가구 전력 소비량(23.1~23.6) 219.19[kWh/월]에 따른 일평균 전력 소비량 7.3(219.19kWh/30일) 해당하는 1,000세대의 전력 수요 7.31[MWh/일]에 대응하기 위해 다음과 같이 에너지원의 일 이용률에 따라 예상 발전량을 산정하여 각 전원의 용량을 가정하였다[2]. 여기에서, 태양광발전과 풍력발전의 가변적 출력 특성을 감안하여 일 이용률을 각각 10%, 15%로 가정하였으며, 전기차 1대의 배터리 용량을 40[kWh]로 하고 전기차 100대는 전기차와 가구의 비율을 1:10으로 가정하였다.

- ① 태양광발전 : 8[MW] × 일 이용률 10% = 0.8[MWh/일]
 - ② 풍력발전: 4.5[MW] × 일 이용률 15% = 0.675[MWh/일]
 - ③ 디젤발전기: 15[MW] × 일 이용률 35% = 5.25[MWh/일]
 - ④ V2G: 40[kW] × 100대 × 일 이용률 30% = 0.6[MWh/일]
- ⇒ 합계: 7.33[MWh/일]

2.1 태양광발전

이 연구의 마이크로그리드에는 두 가지 재생에너지가 있다. 우선, 태양광발전은 태양전지 모듈의 설치 용량과 효율, 일사량 등에 비례하여 전력을 생산한다. 1일(86,400초) 동안의 일사량[kWh/m²]은 Fig. 2와 같이 가정하였는데, 최댓값은 정오에 526[kWh/m²]이다[3],[4].



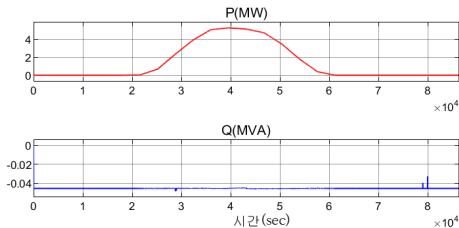
[Fig. 2] Irradiance Assumption for PV Plant

태양광발전의 출력은 Matlab/Simulink의 Power(3ph, Phasor)블록을 사용하였다. 이 블록은 태양전지 모듈의 직류전압(V_{solar})과 직류전류(I_{solar})를 받아 3상의 전압(V_a, V_b, V_c) 및 전류(I_a, I_b, I_c) 페이저를 사용하여 3상의 유효(P) 및 무효(Q)전력을 다음과 같이 계산할 수 있다[5],[6].

$$P+jQ = \frac{1}{P2} (V_a \times I_a^* + V_b \times I_b^* + V_c \times I_c^*) \quad (1)$$

여기에서, I_a^*, I_b^*, I_c^* 는 I_a, I_b, I_c 의 공액 복소수 (complex conjugate)이다.

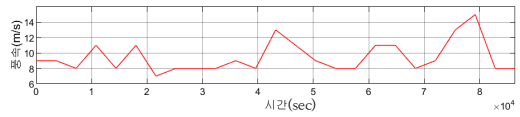
Fig. 2의 일사량 대비 태양광발전 이용률을 10%로 가정했을 때, 10MW 태양광발전의 1일(86,400초) 동안 발전량은 Fig. 3과 같다. 일사량이 최대일 때, 태양광발전은 5.26[MWh]를 출력한다.



[Fig. 3] Output Power of PV Plant

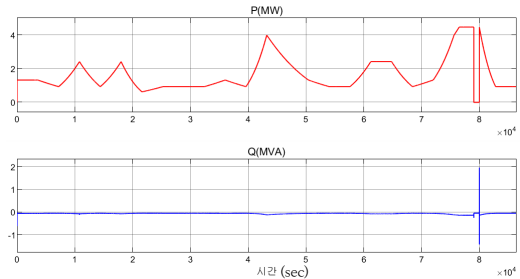
2.2 풍력발전

두 번째 재생에너지인 풍력발전은 풍속과의 선형 관계에 따라 전력을 생산하게 되는데, 풍속이 공칭 값에 도달하면 풍력발전은 공칭 전력을 생산하지만, 풍속이 최대 풍속 값을 초과하면 풍속이 공칭 값으로 돌아올 때까지 계통과 분리된다. 여기에서는 최대 15[m/s] 및 최소 7[m/s]로 1일(86,400초) 동안 풍속을 Fig. 4와 같이 가정하였다. 공칭 값은 13.5[m/s]이다[7],[8].



[Fig. 4] Wind Speed Assumption for Wind Plant

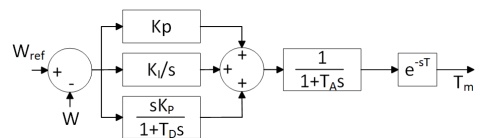
Fig. 5는 Fig. 4의 풍속에 따른 정격용량 4.5[MW] 풍력발전의 출력을 나타냈었는데, 공칭 값을 초과하는 79,200초 인근에 풍속이 공칭 값을 초과하여 풍력발전의 출력이 차단되어 계통과 분리되었음을 알 수 있다.



[Fig. 5] Output Power of wind Plant

2.3 디젤발전

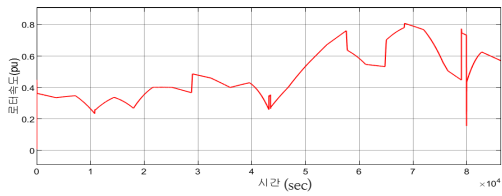
디젤발전은 태양광발전, 풍력발전로부터 발전량과 부하의 전력 수요의 균형을 맞추기 위해서 사용된다. 부하 동기의 회전자 속도(W)로 발전량에 대한 부하량의 주파수 편차를 확인하여 디젤발전을 활용해 전력을 공급하게 된다. 디젤발전의 조속기는 Fig. 6과 같은 PID제어를 사용하여 기준속도(W_{ref})를 유지하기 위한 출력 토크(T_m)를 발생하고, 공급과 수요의 전력 균형을 맞추기 위해 부하 주파수 제어(LFC, Load Frequency Control)로 디젤발전이 운전된다[9],[10].



[Fig. 6] Load Frequency Control for Diesel Generator

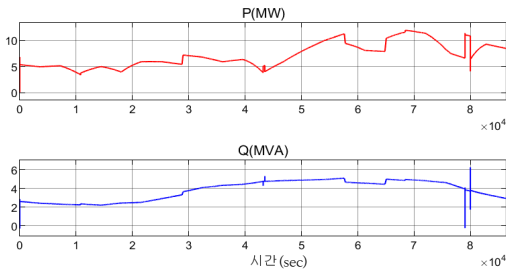
여기에서, K_p 비례이득, K_i 적분이득, K_d 미분이득, T_D, T_A, T 는 PID 제어 시정수를 의미한다[11].

Fig. 7은 디젤발전의 출력을 제어하기 위한 부하 동기의 회전자 속도이다.



[Fig. 7] Output Power of Diesel Generator

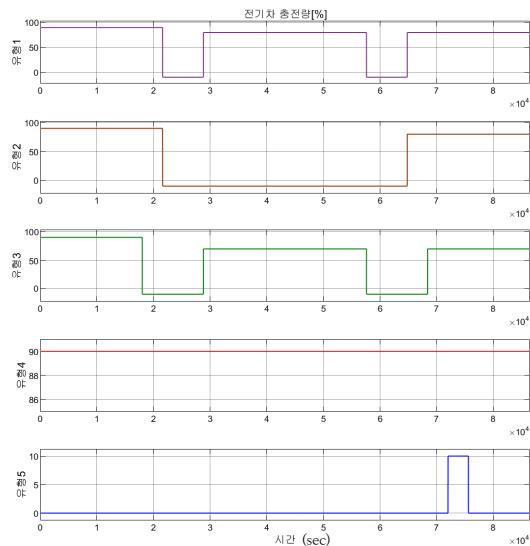
Fig. 8은 이에 따라 Fig. 6의 PID 제어에 의한 디젤발전의 출력이다. 여기에서 공칭 값을 초과하는 79,200초 인근에 풍력발전의 출력이 차단되어 계통과 분리될 때, 디젤발전기의 출력이 증가함을 알 수 있다.



[Fig. 8] Output Power of Diesel Generator

2.4 차량-계통(V2G)

V2G에는 두 가지 기능이 있다. 연결된 배터리의 충전을 제어하고, 낮에 이벤트가 발생할 때 사용 가능한 전력을 사용하여 계통에 전력 공급을 조절한다. V2G는 1일 동안 다음과 같은 전기차에 대한 5가지 유형을 가정하였다.



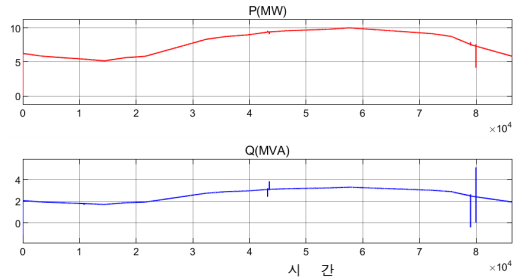
[Fig. 9] Cases of Vehicle-to-Grid(V2G)

- (유형1) 직장과 가정에서 충전할 수 있는 전기차
- (유형2) 가정에서만 충전할 수 있는 전기차
- (유형3) 이동거리가 먼 직장과 가정에 충전할 수 있는 전기차
- (유형4) 가정에 주차되어 있는 전기차
- (유형5) 직장과 가정에서 충전이 불가능한 전기차

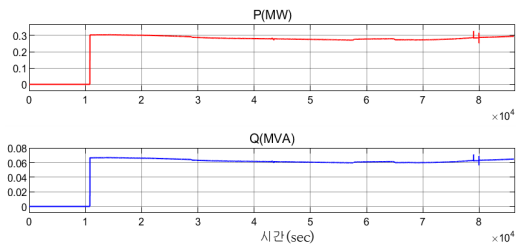
Fig. 9는 5가지 유형의 가정에 따른 V2G의 전기차 충·방전율(%)을 나타내었다.

2.5 부하

부하는 마이크로그리드와 전기차 충전인프라의 안정적인 운영에 대해 검토하기 위하여 주거용 부하와 산업용 유도부하를 가정하였다. 우선 주거용 부하는 Fig. 10과 같이 역률에 따라 전력을 소비하는 유효(P) 및 무효(Q) 전력 부하이다. 산업용 유도 부하는 Fig. 11과 같이 출력 특성을 나타내는 마이크로그리드에 미치는 영향을 분석하기 위하여 사용되는 비동기식 기계로 구성하였다.



[Fig. 10] Assumption of Residential Load



[Fig. 11] Assumption of Industrial Load

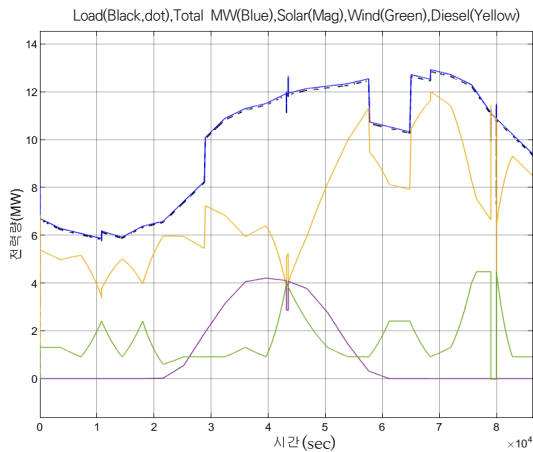
3. 시뮬레이션

시뮬레이션은 1일 24시간(86,400초) 동안 진행하였다. 마이크로그리드를 구성하는 태양광발전을 위한 일사

량은 정오에 가장 높은 강도에 도달하는 정규 분포를 나타낸다. 풍력발전을 위한 풍속은 낮 동안 다양한 변화를 가져 최고점과 최저점을 여러 번 변화한다.

주거 부하는 일반적인 가구 소비와 유사한 전형적인 패턴에 따르도록 가정하였다. 낮에는 소비량이 적다가 저녁에 최고치에 이르고 밤에는 서서히 감소한다. 세 가지 이벤트가 하루 동안 마이크로그리드와 전력계통의 운영에 영향을 주게 된다.

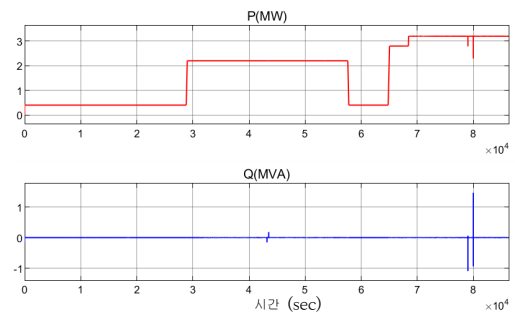
본 연구에서 제안된 마이크로그리드의 충전 인프라 모델의 시뮬레이션을 실행하여 1일 동안의 태양광발전, 풍력발전, V2G의 전력 수요에 대응하는 발전량을 분석하면 Fig. 12와 같다[12],[13].



[Fig. 12] Total Power flow for Microgrid

여기에서는 마이크로그리드를 구성하는 각 발전원의 기여도를 확인할 수 있는데, 부하량에 따라 태양광발전과 풍력발전으로 전기차 충전수요에 따른 전력공급 중에 풍력발전이 풍속에 의해 출력이 변화하는 시간대에 주파수제어에 의한 디젤발전의 투입으로 마이크로그리드가 사고없이 운영되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 Fig.9의 V2G의 유형에 따른 충전량의 합산량으로 Fig. 12와 Fig. 13을 비교했을 때, 28,900초~57,900초의 낮 시간에 (유형1)과 (유형 3)의 충전량 증가로 충전수요가 증가하고 67,800초 이후의 전기차가 가정에 주로 주차된 저녁 시간 이후에는 충전량이 최대치에 도달함을 알 수 있다. 57,900초~64,700초는 전기차의 이동량이 많은 시간대로 전력 부하의 가중을 감소시켜 Fig. 12의 동 시간대에 수요와 공급의 전력량이 모두 감소하고 있음을 확인할 수 있다.



[Fig. 13] Charging for V2G

부하(Load)와 총 공급전력(Total Power)은 같은 출력 특성을 나타내고 있어, 전기차의 충전 특성 고려하여 1일의 부하 특성에 따라 안정적으로 전력을 공급할 수 있음을 알 수 있다. 정오에 최대 출력이 도달하는 태양광발전과 1일 동안 가변적인 발전 특성을 갖는 풍력발전의 부족한 전력량 디젤발전의 의해서 공급하여 전체적인 마이크로그리드의 운영에 안정적으로 전력을 공급하고 있음을 확인할 수 있다.

제안된 마이크로그리드가 연계된 전기차 인프라를 활용하여 어떤 상황에서도 전기차에 안정적으로 전력을 충전할 수 있으며 재생 가능 에너지원의 활용도를 최대로 높여 안정적으로 전력계통을 운영할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 태양광발전과 풍력발전의 신재생에너지를 활용한 마이크로그리드를 구성하여, 전기차 충전인프라를 전기차 5가지 유형에 따라 안정적으로 전력을 충전하고, 계통에 연계된 부하 전력에 전력을 공급할 수 있는 운영 방안을 제안하였다. 마이크로그리드의 안정적인 운영을 위해, 주파수 제어를 통해 디젤발전 운영함으로써 재생에너지의 출력특성에 따라 전기차 충전과 부하량에 따라 전력을 공급할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이는 계통 또는 화석연료를 사용하는 디젤발전의 부담을 최소화하고 태양광발전 또는 풍력발전을 사용하여 재생에너지의 간헐적인 출력 특성에도 불구하고 전기차에 안정적으로 전력을 공급할 수 있을 뿐만 아니라 필요에 따라서 계통에 연계된 전기차가 전력계통의 전력량을 조절할 수 있는 역할로 활용 방안을 고려할 수 있어 전력계통에의 전기차를 능동적 역할의 담당과 재생에너지의 활용 계획을 강구할 수 있는데 의미가 있다고 할 수 있다. 이

연구에서 어떤 상황에서도 마이크로그리는 안정적으로 운영될 수 있도록 부하의 동기기의 회전속도에 의해 디젤발전의 투입 여부를 결정함으로써 마이크로그리드를 운영하는 데 계통 주파수를 안정적으로 관리할 수 있는 기술적 방법과 연결된다.

마이크로그리드가 연계된 전기자동차의 인프라를 활용하여 무공해의 에너지를 사용한 지속가능한 전력계통을 구성할 수 있을 뿐만 아니라 전력계통에의 부담을 감소시켜 전기차 보급 확대와 전기차 충전 인프라의 합리적인 구성에 대한 대안을 제공할 수 있을 것이다. 다만, 본 연구에서 제안된 유형별 전기자동차의 충전 유형을 시간대별로 보다 세부적으로 분석하여 V2G의 마이크로그리드의 역할에 대한 확장이 좀 더 검토되어야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] Hun Shim, "Analysis of Grid connected 1MWp PV system using Matlab/Simulink", Journal of Industrial Technology Research, Vol.23, No.2, pp.21-27, 2018.
- [2] Energy Market Place, "Average household Electric Power Consumption", KEPCO, pp1-4, 2023.
- [3] Habbati Bellia, "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB", NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, Vol.3, pp.53-61, 2014.
- [4] S. S. Raghuwanshi and K. Gupta, "Modeling of a single-phase grid-connected photovoltaic system using MATLAB/Simulink", 2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4), pp.1-5, 2015.
- [5] Kofi Afrifa Agyeman, "An Ensemble Stochastic Forecasting Framework for Variable Distributed Demand Loads", Energies, pp.11-17, 2020.
- [6] Rob Shipman, "Where Will You Park? Predicting Vehicle Locations for Vehicle-to-Grid", pp22-24, Energies, 2020.
- [7] Lie Xia, "An MPC Scheme with Enhanced Active Voltage Vector Region for V2G Inverter", Energies, pp.33-40, 2020.
- [8] Gabriel Antonio Salvatti, "Electric Vehicles Energy Management with V2G/G2V Multifactor Optimization of Smart Grids", Energies, pp.51-55, 2020.
- [9] Seyfettin Vadi, "A Review on Communication Standards and Charging Topologies of V2G and V2H Operation Strategies", Energies, pp.73-80, 2019.
- [10] Eng. Abdulrahman M Alghurayed, "MATLAB Simulation of an Electric Vehicle Charging Station Supplied by Photovoltaic Energy", International Journal of Applied Engineering Research, Vol.17, No.3, pp.283-289, 2022.

- [11] Rion Takahashi and Atsushi Umemura "Stability Enhancement of Small-Scale Power Grid with Renewable Power Sources by Variable Speed Diesel Power Plant", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.58, No.10, pp.4583-4592. 2011.
- [12] Frederic Colas, Di Lu, "Energy management and power planning of a micro-grid with a PV-based active generator for smart grid applications", French National Agency, pp.1-9, 2012.
- [13] Andrew Mark Bollman, "An experimental study of frequency droop control in a low-inertia micro-grid", University of Illinois, pp.21-31, 2009.
- [14] Ota, Y.; Taniguchi, "Implementation of autonomous distributed V2G to electric vehicle and DC charging system.", . Electr. Power Syst. pp.177-183. 2015.
- [15] M. Liserre, T. Sauter, "Future Energy Systems, integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics", IEEE Industrial Electronics magazine, Vol.4, No.1, pp.18-37, 2010.

심 헌(Hun Shim)

[중신회원]



- 2012년 2월 : 한양대학교 전기공학(공학박사)
- 2015년 12월 ~ : 한국폴리텍대학 청주캠퍼스 전기에너지과 교수
- 2021년 1월 ~ 2023년 8월 : 학교법인 한국폴리텍 기획부/반도체학과 설립추진단
- 2023년 8월 ~ : 학교법인 한국폴리텍 인천캠퍼스 전기에너지시스템과 교수

<관심분야>

전력계통, 신재생에너지, 스마트그리드, 마이크로그리드