

## 그린 수소 활용을 통한 그리드 전력 절감 분석

권기현<sup>1</sup> · 안나연<sup>2</sup> · 김남용<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 전자정보통신공학과 교수

<sup>2</sup>강원대학교 전자정보통신공학과 석사과정

<sup>3\*</sup>강원대학교 전자정보통신공학과 교수

## Grid-Power Saving through Green Hydrogen Utilization

Kihyeon Kwon<sup>1</sup> · Nayeon An<sup>2</sup> · Namyong Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Electronics, Information & Communication Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea

<sup>2</sup>Master's Course, Department of Electronics, Information & Communication Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea

<sup>3\*</sup>Professor, Department of Electronics, Information & Communication Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea

### [요약]

다양한 신재생에너지의 효율적인 밸런싱은 친환경 에너지 관리의 중요한 주제이다. 태양광이나 풍력 등의 그린 에너지는 간헐성 문제로 인해 에너지를 효율적으로 활용하기 어려울 수 있다. 이러한 이유로 그린 수소를 활용한 최적화된 에너지 관리 시스템(EMS) 개발이 필요하다. 본 연구에서는 실제 태양광 발전 데이터를 기반으로 하여, 그리드 전력 변동 단가를 고려하여 부하를 조절하고, 발생한 잉여 전력은 수소로 변환하여 저장한 후 그리드 전력의 단가에 맞춰 공급될 수 있도록 설계하였다. 선형계획법을 기반으로 한 최적화 방법을 사용하여 그리드 전력 절감을 시뮬레이션하여, 그리드 전력 사용량이 줄어드는 결과를 보여준다.

### [Abstract]

Efficient balancing of various new and renewable energies is an important topic in eco-friendly energy management. It is often difficult to efficiently utilize green energy such as solar or wind power because of its intermittent nature. Therefore, the development of an optimized energy-management system (EMS) that uses green hydrogen is desirable. In this study, based on actual solar-power generation data, the load is adjusted by considering the fluctuating unit price of grid power, and the surplus power generated is converted to hydrogen, stored, and then supplied according to the unit price of grid power. Grid-power savings are simulated using an optimization method based on linear programming and the results show the reduction in grid-power usage.

**색인어** : 태양광, 수소 활용, 에너지 관리 시스템, 최적화, 선형계획법

**Keyword** : Solar Energy, Hydrogen Utilization, Energy Management System, Optimization, Linear Programming

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2023.24.10.2373>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Received** 13 September 2023; **Revised** 26 September 2023

**Accepted** 04 October 2023

**\*Corresponding Author; Namyong Kim**

**Tel:** +82-33-570-6404

**E-mail:** [namyong@kangwon.ac.kr](mailto:namyong@kangwon.ac.kr)

## I. 서론

에너지 효율 개선을 통한 그리드 전력 절감은 에너지 공급의 안정성을 높이고 전력 수급 문제를 완화할 수 있으며, 에너지 비용이 감소하고, 국가의 기업 경쟁력 향상 및 가계 소비자에게 혜택을 제공하는 경제적 이점과 아울러 탄소 감축 효과도 있다[1].

다양한 전력원을 활용한 에너지 효율 개선은 에너지 공급의 다양성을 통해 에너지 효율성을 향상시키는 중요한 전략이다. 다양한 전력원 중에서 그린 수소는 재생 가능 에너지를 사용하여 생산되는 친환경적인 에너지원으로, 전력 생산 및 저장에 활용할 수 있으며 수소 연료전지를 통해 전기를 생성하고, 수소 저장 및 분배를 통해 에너지 공급을 조절할 수 있다[1],[2]. 그린 수소는 친환경성, 저장성 및 다양한 용도 측면에서 장점이 있으나, 비용과 경제성, 수소 생산 과정의 효율 그리고 수소 저장 및 운송이라는 어려움을 가지고 있다[3].

에너지 공급에 있어 가장 중요한 측면은 다양한 전력원을 고려하여 수요와 공급 간 중단 없는 전력 밸런싱을 유지하는 것이다. 부하와 전력원의 특성 및 에너지 비용을 고려하여 그리드 전력, 태양광, 수소에너지 등의 운영과 모니터링, 그리고 에너지 관리를 지원하는 에너지 관리 시스템(EMS)의 개발이 필수적이다[4].

본 논문에서는 수소에너지를 포함한 에너지 관리 시스템(EMS)의 개발에 필수적으로 요구되는 에너지 밸런싱 최적화 [5],[6] 문제를 개선하기 위해, 태양광 발전량 취득이 용이한, 대학 내 건물을 선정하여 연중 가장 전력을 많이 사용하는 구간을 정하고, 분산 전원의 출력제어를 직관적으로 확인할 수 있는 특정일을 선정하였다. 1일 동안의 실제 태양광 발전 데이터를 바탕으로 그리드 전력 변동 단가를 고려하여 부하에 대응하고, 잉여 전력은 수소에너지로 변환 저장하여 그리드 전력의 단가가 높은 경우 연료전지를 통해 전력을 공급한다. 그리드 전력 절감을 최적화하는 시뮬레이션을 Matlab/Simulink[7]를 사용하여 전력 네트워크를 구현하고 데이터 최적화 기능(Optimization Toolbox)을 모델에 적용하여 분산 전원 적용 시 최적 운용계획을 도출한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 마이크로그리드 시스템 구성 및 에너지 밸런싱에 관해 설명하고, 3장에서는 그리드 전력 절감을 위한 최적화 방법을 제안한다. 4장에서는 실험 결과를 제시하고 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 구성 및 에너지 밸런싱

Matlab/Simulink를 사용하여 그리드 전력, PV(태양광), Hydrogen(수소) 저장, 수송으로 구성된 마이크로그리드 시스템을 구성한다. 태양광 발전 데이터는 K 대학교 삼척캠퍼스 5 공학관(위도 37° 27' 11.75", 경도 129° 9' 33.89")의 100kW 태양광 발전에서 취득하였고 부하는 5 공학관 건물

소비전력을 토대로 구성하였다. 수소 저장은 축전지에 수전해와 연료전지의 성능을 계상한 단순화한 Matlab/Simulink 모델을 사용하였다.

### 2-1 전력 단가

대상 수용가는 계약전력 1,000kW 이상의 고객으로 법령에 따른 학교 인정 교육시설로 '교육용(을) 고압 A 선택 I'의 전기요금을 적용받는다. 표 1, 2와 그림 1에서는 해당 수용가의 요금정보와 부하 데이터에 적용된 시간대별 전력량 요금을 나타낸다[8].

표 1. 전기요금, 교육용(을), KRW/kWh  
Table 1. Electricity rate for educational use

Load	Summer	Spring, Fall	Winter
Light	76.5	76.5	80.5
Medium	121.2	90.9	119.7
Heavy	187.1	111.4	158.4

표 2. 계절적 시간대별 구분  
Table 2. Classification by season and time zone

Load	Summer (June to August)	Spring and Fall (March to May, September to November)	Winter (November to February)
Light	22:00~08:00		22:00~08:00
Medium	08:00~11:00	08:00~09:00	12:00~16:00
	12:00~13:00		
Heavy	18:00~22:00	19:00~22:00	09:00~12:00
	11:00~12:00		
	13:00~18:00		16:00~19:00

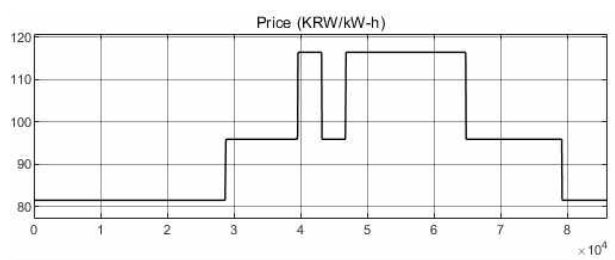


그림 1. 시간별 전력 요금  
Fig. 1. Hourly power rate

### 2-2 태양광 발전 데이터

2020년부터 2022년까지 3년 동안, 태양광 발전 데이터가 5분 간격으로 기록되어 있다. 이 데이터에 대한 수용가의 부하가 발생하는 시기에 따른 발전량을 평가하기 위해 월별로 그룹화하여 나타내었다(그림 2). 이렇게 표현된 데이터를 통해 에너지 피크 관리가 요구되는 시기를 확인하였고, 태양광 전력이 전체 전력 사용량 대비 낮은 비중을 차지하고, 수전해

및 연료전지를 통한 활용 효율이 더 낮아진다는 관계를 고려하여 피크 관리가 요구되는 시기에 태양광 전력 발전량이 가장 큰 날짜를 기준으로 한 1일간의 실제 전력 발전 데이터를 그래프로 나타내었다(그림 3).

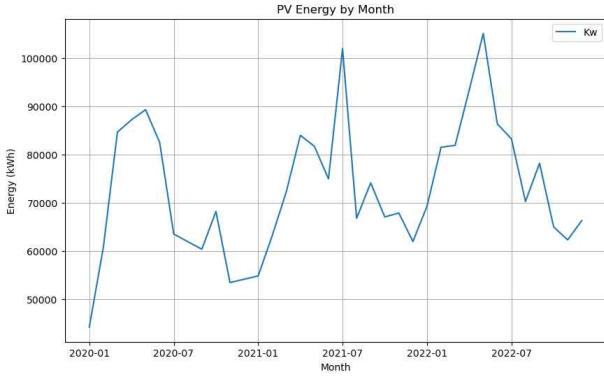


그림 2. 태양광 발전량 곡선  
Fig. 2. Solar power generation curve

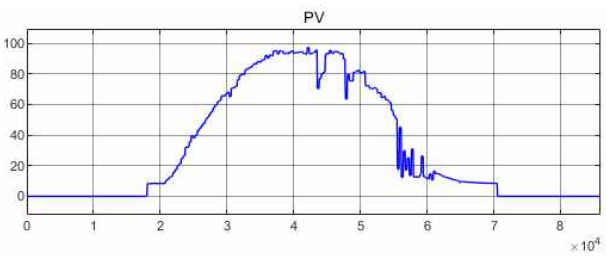


그림 3. 태양광 발전 출력 데이터  
Fig. 3. Output data of solar array

### III. 그리드 전력 질감 최적화

#### 3-1 선형계획법 목적함수

수소에너지를 포함한 에너지 밸런싱을 위한 선형계획법(LP: Linear Programming) 최적화 목적함수는 식 (1)과 같다. 그리드 전력 변동 단가( $c_t$ )와 수전해 및 연료전지를 통해 생산되는 전력을 고려하여, 그리드 전력 누적 사용량을 최소화하는 함수이다. 전해조와 연료전지의 효율을 고려하였으며, 기본적인 전기분해 반응은  $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ 이므로 각 유형의 원자가 양쪽에 동일한 수로 나타나도록 화학량론적 계수 2와 패러데이 상수( $F$ )가 사용되었고 kW로 변환을 위해 1,000으로 나누었다.

$$\min \sum_{t=1}^N \delta c_t G_t - w \left[ \left[ \frac{E_N \eta_e}{2F} \right] \times 2 \right] \times V \times \eta_f / 1000 + \sum_{t=1}^{N-1} g_t \quad (1)$$

여기서

- $E_1 = E_{\text{initial}}$
- $E_{t+1} = E_t - \delta H_t$
- $s_t + G_t + H_t = d_t$
- $G_{t+1} - G_t \leq g_t$
- $G_t - G_{t+1} \leq g_t$
- $l_H \leq H_t \leq u_H$  : Power from Hydrogen
- $l_E \leq E_t \leq u_E$  : Stored Energy
- $\delta$  : Delta Time Duration
- $N$  : Number of Decision Variables
- $G_t$  : Power from Grid
- $g_t$  : Change in Power from Grid
- $\eta_e$  : Electrolyzer Efficiency
- $\eta_f$  : Fuel Cell Efficiency
- $F$  : Faraday Constant
- $V$  : Cell Voltage

#### 3-2 휴리스틱 알고리즘

에너지 밸런싱 최적화를 적용 없이 적용한 휴리스틱 방법의 EMS 알고리즘은 그림 4와 같다. 그림 1, 표 1, 2의 시간별 그리드 전력 변동 단가에 따라 수전해 및 연료전지를 통한 전력 공급을 수행한다.

```

if SOC <= minSOC
    LoadShedding
else if (Time > 8 && Time < 11) || (Time > 12 && Time < 13) || (Time > 18 && Time < 22)
    if SOC > minSOC && SOC < maxSOC
        Pnet = 1e3 * (Load - PV)
        if Load > PV
            if Pnet < Pmin
                Charging
                Pcmd = Pnet
            else if Pnet > Pmin
                MPPTOff
                Pcmd = Pmin
            else if PV > Load
                if Pnet < Pmax
                    LoadShedding
                    Pcmd = Pmax
                else if Pcmd = Pmin
                    Discharging
                    Pcmd = Pnet
            else if (Time > 11 && Time < 12) || (Time > 13 && Time < 18)
                PeakSupply
                Pcmd = Pmax
            else if Time > 22
                NightRecharge
                Pcmd = Pmin
        else if SOC >= maxSOC
            MPPTOff
    
```

그림 4. 휴리스틱 EMS 알고리즘  
Fig. 4. Heuristic EMS algorithm

### 3-3 휴리스틱 알고리즘 적용 결과

전체 시뮬레이션 시간은 1일 기준 24시간이며 적용한 수요전력, 태양광 발전량, 전력 요금 데이터는 5분당 데이터로 각 228개의 데이터가 적용되었다.

그림 4의 알고리즘을 적용한 결과로 수소 저장량(SOC)의 변화를 그림 5에서 확인할 수 있다. 그리드 전력 단가가 낮은 시간대인 0~3구간, 22:00~08:00 시간에 수소 저장량(SOC) 수준이 높은 것을 관찰할 수 있다. 또한, 그리드 전력 단가가 중간인 시간대인 3~4구간, 08:00~11:00, 12:00~13:00 시간에는 수소 저장량(SOC)이 감소하고, 8구간, 18:00~22:00 시간에는 수소 저장량(SOC)이 다시 증가하는 경향을 보인다. 그리고 전력 단가가 높은 시간대인 4~7구간, 11:00~12:00, 13:00~18:00 시간에는 수소 저장량(SOC) 수준이 낮아짐을 확인할 수 있다.

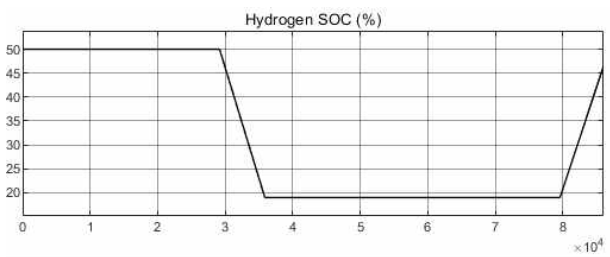


그림 5. 휴리스틱 방법 이용 수소 SOC  
Fig. 5. Hydrogen SOC using heuristic methods

그림 6은 휴리스틱 방법을 이용한 그리드 전력, 태양광, Hydrogen(수소) 저장, 수용가의 전력 사용량을 나타낸 것이다. 부하에 근접하게 그리드 전력이 사용되고 있으나, 태양광 발전하는 시간대에는 그리드 전력 사용량이 절감되고 Hydrogen(수소) 기반 발전량이 역할을 하는 것으로 볼 수 있다.

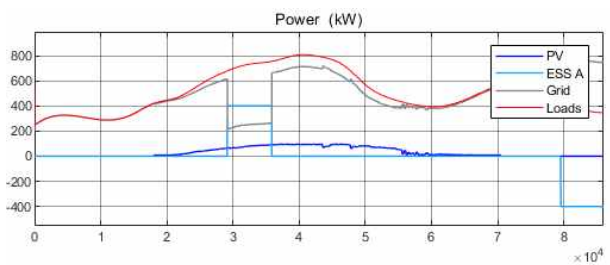


그림 6. 휴리스틱 방법의 그리드 전력 절감  
Fig. 6. Heuristic method for grid power savings

### 3-4 LP 최적화 적용 결과

제약조건과 목적함수(식 (1))를 적용한 선형계획법 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

그림 7은 선형계획법 최적화를 통한 수소 저장량(SOC)은 그리드 전력 단가가 낮은 시간과 태양광 발전량을 고려하여

수소 저장량(SOC)이 유지되고 있다는 것을 알 수 있다.

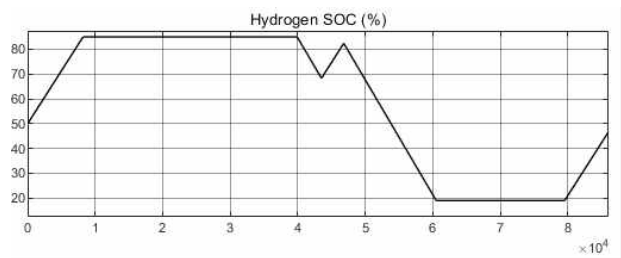


그림 7. LP 최적화 방법을 사용한 수소 SOC  
Fig. 7. Hydrogen SOC using LP optimized methods

그림 8은 선형계획법 최적화 방법을 이용한 그리드 전력, 태양광, Hydrogen(수소) 저장, 수용가의 전력 사용량을 나타낸 것이다. 부하에 근접하게 그리드 전력이 사용되고 있으나, 그리드 전력 단가가 낮은 시간대와 태양광 발전하는 시간대에는 수소 SOC 충전이 발생하고, 그리드 전력 단가가 높은 시간대는 수소 SOC 방전이 발생하고 있음을 나타내고 있다. 따라서 전력 단가를 고려한 그리드 전력 사용량이 절감되고 Hydrogen(수소) 기반 발전량이 상호보완적으로 활용되고 있는 것으로 볼 수 있다.

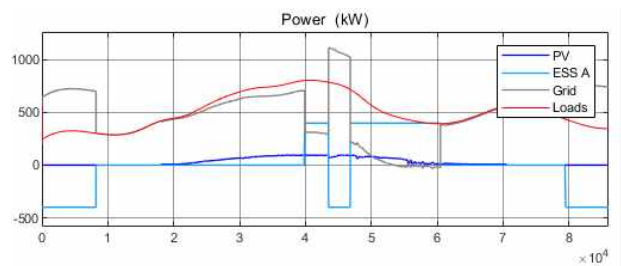


그림 8. 그리드 전력 절감을 위한 LP 최적화 방법  
Fig. 8. LP optimized method for grid power savings

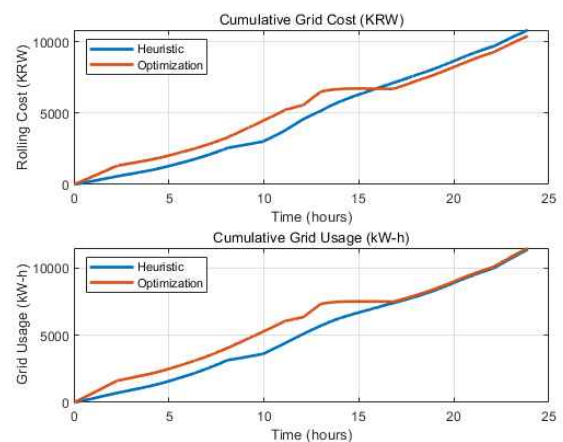


그림 9. 선형계획법 최적화 EMS 효율  
Fig. 9. Linear programming optimization efficiency

### 3-5 LP 최적화 적용 그리드 전력 절감

휴리스틱 EMS 방법과 선형계획법 최적화 EMS 방법 간의 성능 차이를 확인하기 위해 누적된 그리드 전력 변동 단가와 누적된 그리드 전력 절감량을 제시하였다(그림 9).

휴리스틱 EMS 방법의 단가는 10845.8103(KRW), 선형 계획법 최적화 EMS 방법의 단가는 10429.5398(KRW)로 선형 계획법 최적화 EMS 방법이 3.8381% 절감 효과를 보였다.

## IV. 결 론

학교 건물에서 3년간 누적된 태양광 발전 데이터를 토대로, 태양광 전력 발전량이 가장 큰 날짜를 기준으로, 1일 동안의 실제 태양광 발전 데이터를 사용하였다. 그리드 전력 변동 단가를 고려하여 부하에 대응하고, 잉여 전력은 수소에너지로 변환 저장하여 그리드 전력의 단가가 높은 경우 연료전지를 통해 전력을 공급하도록 마이크로그리드를 설계하였다.

그리드 전력 단가, 태양광 발전량, Hydrogen(수소) SOC, 수용가의 전력 사용량을 고려한 휴리스틱 EMS 방법과 선형 계획법 최적화 EMS 방법으로 Matlab/Simulink를 사용하여 시뮬레이션하고 성능 차이를 확인하기 위해 누적된 그리드 전력 변동 단가와 누적된 그리드 전력 절감량을 계산하여 계획법 최적화 EMS 방법은 휴리스틱 EMS 방법보다 단가를 고려한 그리드 전력 사용량이 3.8381% 절감되는 효과를 보였다.

이번 연구를 통해 잉여 전력의 수소 저장 및 활용에 수반되는 수전해 및 연료전지 사용 효율을 고려하더라도 배터리 ESS의 자연 방전에 비해 장기적으로 수소 저장 시스템 활용을 통해 높은 에너지 밀도와 긴 운영 시간의 장점을 살리는 것이 가능함을 제시하였다.

## 감사의 글

이 연구결과물은 교육부의 재원으로 2023년 국립대학육성 사업과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2022RIS-005).

## 참고문헌

- [1] I. Diaz, W. Lamas, and R. Lotero, "Development of an Optimization Model for the Feasibility Analysis of Hydrogen Application as Energy Storage System in Microgrids," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 43, pp. 16159-16175, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.128>
- [2] U. Meda, Y. Rajyaguru, and A. Pandey, "Generation of Green Hydrogen Using Self-Sustained Regenerative Fuel Cells: Opportunities and Challenges," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 73, pp. 28289-28314, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.430>
- [3] M. Gambini, F. Guarnaccia, M. Manno, and M. Vellini, "Thermal Design and Heat Transfer Optimisation of a Liquid Organic Hydrogen Carrier Batch Reactor for Hydrogen Storage," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.200>
- [4] S. Tajjour and S. Chandel, "A Comprehensive Review on Sustainable Energy Management Systems for Optimal Operation of Future-Generation of Solar Microgrids," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 58, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103377>
- [5] N. Kim and K. Kwon, "Performance Analysis of Minimum Error Entropy Algorithms with Kernel Width Adaptation," *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 24, No. 3, pp. 593-599, March 2023. <https://doi.org/10.9728/dcs.2023.24.3.593>
- [6] S. Park, C. Kim, E. Kim, and H. Chang, "A Study on the Microgrid Operation of Industrial Consumer Using Matlab/Simulink," *The Transactions P of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 69, No. 1, pp. 40-45, February 2020. <http://doi.org/10.5370/kieep.2020.69.1.40>
- [7] A. Shufian and N. Mohammad, "Modeling and Analysis of Cost-Effective Energy Management for Integrated Microgrids," *Cleaner Engineering and Technology*, Vol. 8, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.Clet.2022.100508>
- [8] KEPCO, "Korean Electricity Rate," <https://cyber.kepco.co.kr/rckepco/front/jsp/cy/e/e/cyeehp00104.jsp>
- [9] C. D. Dumitru and A. Gligor, (2010). "Modeling and Simulation of Renewalbe Hybrid Power System Using MATLAB/SIMULINK Environment," *Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Târgu Mureş*, Vol. 7, No. 2, pp. 1841-9267, 2010.
- [10] F. H. Aghdam, S. Ghaemi, and N. T. Kalantari, "Evaluation of Loss Minimization on the Energy Management of Multi-Microgrid Based Smart Distribution Network in the Presence of Emission Constraints and Clean Productions," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 196, pp. 185-201, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.023>
- [11] S. E. Ahmadi and N. Rezaei, "A New Isolated Renewable Based Multi Microgrid Optimal Energy Management System Considering Uncertainty and Demand Response," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 118, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105760>

- [12] N. Bansal, S.P. Jaiswal, and G. Singh, "Comparative Investigation of Performance Evaluation, Degradation Causes, Impact and Corrective Measures for Ground Mount and Rooftop Solar PV Plants – A Review," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 47, 101526, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101526>
- [13] M. H. Bellido, L. P. Rosa, A. O. Pereira, D. M. Falcao, and S. K. Ribeiro, "Barriers, Challenges and Opportunities for Microgrid Implementation: The Case of Federal University of Rio De Janeiro," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 188, pp. 203-216, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.012>



**권기현 (Kihyeon Kwon)**

1993년 : 강원대학교  
컴퓨터학과(학사)  
1995년 : 강원대학교 대학원  
컴퓨터학과(석사)  
2000년 : 강원대학교 대학원  
컴퓨터학과(박사)

1998년~2002년: 동원대학 인터넷정보과 교수  
2002년~현재: 강원대학교 정보통신공학과 교수  
※관심분야 : 패턴 인식 (Pattern Recognition), 사물 인터넷 (IoT), 기계학습



**안나연 (Nayeon An)**

2023년 : 강원대학교  
전자정보통신공학과(학사)  
2023년 : 강원대학교 대학원  
전자정보통신공학과  
(석사과정)

※관심분야 : 인공지능(AI), 사물 인터넷(IoT)



**김남용 (Namyong Kim)**

1986년 : 연세대학교 전자공학과(학사)  
1988년 : 연세대학교 대학원  
전자공학과 (석사)  
1991년 : 연세대학교 대학원  
전자공학과 (박사)

1992년~1998년: 카톨릭관동대학교 부교수  
1998년~현재: 강원대학교 교수  
※관심분야 : 통신 신호처리, 정보이론적 학습