

3차원 동적계획법에 의한 PV-ESS 연계형 시스템의 최적운용 알고리즘 개발

Development of optimal algorithm for PV-ESS integrated system by 3 Dimensional Dynamic Programming

최 유 립*, 임 태 훈, 정 재 훈, 김 용 하*

You-Rim Choi*, Tae-Hun Lim, Jea-Hoon Jung, Yong-Ha Kim*

Abstract

In this paper, we had developed an algorithm that can cope with all the economic variables that may occur in the operation of PV-ESS system by developing the algorithm for the operation method of PV-ESS connected system. Based on this, the optimal operation schedule of PV-ESS was decided to minimize the electric charges of customers. Through this, we developed a three-dimensional dynamic planning method based on case generation to determine the optimal PV-ESS operation schedule stably even when exogenous variables change.

요 약

본 논문에서는 PV-ESS 연계형 시스템의 운용방법에 대한 알고리즘의 개발로 수용가의 경제성 측면에서 PV-ESS 시스템 운용 시 발생할 수 있는 모든 경제적 변수의 변화에 대처할 수 있는 강인한 알고리즘을 구현하였다. 이를 토대로 수용가의 전기요금을 최소화 할 수 있는 PV-ESS의 최적 운용 스케줄을 결정하였다. 즉, PV-ESS 시스템의 운용에 영향을 주는 외생 변수가 바뀌어도 항상 안정적으로 최적의 PV-ESS 운용 스케줄을 결정할 수 있으며 이를 위하여 케이스 생성 기반 3차원 동적 계획법을 개발하였다.

Key words : economic variables, electric charges, optimal operation, PV-ESS system, Case based three-dimensional dynamic program methods

1. 서 론

현재, 우리나라에서는 신재생 에너지 3020, 8차 전력 수급 기본계획, 2차 국가 에너지 기본계획 등을 통해 재생 에너지 중 하나인 PV(Photovoltaic)를 적극 보급하고 있다. 특히 PV와 ESS(Energy Storage System)를 연계하여 운용해서 5.0의 신재

생 에너지 시스템(Renewable Energy System, RES) REC(Renewable Energy Certificate) 가중치를 부여하고 있다[1]. 또한, 신재생 에너지를 이용하는 계통이 분리되어 있는 곳이나, 공장, 가정용 등에 PV-ESS를 연계하여 에너지 자립도를 높이기 위해 수 많은 국가 사업들이 진행되고 있다[1, 2, 3]. 보통 작은 규모의 가상 발전소(Virtual Power Plant,

* Dept. of Electronics Engineering, Incheon University

★ Corresponding author

E-mail : fladbchl@naver.com, Tel : +82-32-835-4604

Manuscript received Sep. 4, 2019; revised Sep. 24, 2019; accepted Sep. 26, 2019.

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.

VPP) 개념을 에너지 통합 관리센터(Total Operation Center, TOC)에 적용하여 에너지 효율성을 높이고 있다. 현재 PV-ESS 연계형 시스템의 운용방법은 대부분 우리나라의 PV 지원정책에 맞추어 운용되고 있다. PV-ESS 연계형 시스템에 적용되는 운용 방식은 통상적으로 ‘SMP(System Marginal Price, 계통한계가격) + 5*REC(신재생에너지공급인증서)’를 기반으로 특정 시간에서 특정 시간까지 PV에서 생산된 전력을 모두 ESS에 충전하고, 특정 시간 이후에는 모두 한국전력공사(KEPCO)에 역송하도록 운용하고 있다[4].

즉, 전기요금방식, REC를 통한 지원정책, SMP 등과 같은 현재에 적용되고 있는 조건만을 반영하여 운용하고 있으므로 PV-ESS 시스템의 운용조건이 변화하는 경우 최적의 운용 방식을 제공하는데 한계가 있다.

즉, PV-ESS 연계형 시스템의 운용시 운용방식에 영향을 미치는 요소들, 즉 전기요금방식, REC를 통한 지원정책, SMP등의 체계가 변화하게 된다면 이러한 요소들을 운용 스케줄 결정 시 반영할 필요가 있다.

이에, 전기요금 방식, REC를 통한 지원 정책, SMP 등의 인자들이 변화되더라도 이러한 상황을 반영하여 최적으로 PV-ESS 운용 스케줄을 결정할 수 있는 알고리즘에 대한 기술개발이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 상기한 문제점을 해결하기 위하여 케이스 생성 기반 3차원 동적 계획법을 개발하여 얼마나 상황의 변화에도 최적으로 PV-ESS 연계형 시스템을 운용할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

II. PV-ESS 전력흐름 모델링

본 연구에서의 최적화를 위한 모델링은 그림 1과

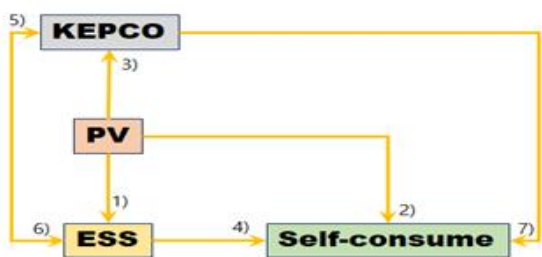


Fig. 1. PV-ESS model of proposed method.
그림 1. 제안한 방법의 PV-ESS 모델

같다. 그림 1에서 화살표는 PV-ESS 시스템에서 발생할 수 있는 모든 전력의 흐름을 나타낸 것이다.

이 모델을 통해 경제적 외생변수에 따라서 PV 및 ESS를 어떻게 운용하여야 가장 경제적인지 결정하고 수용가의 전기요금이 최소로 되는 PV-ESS 시스템의 운용방법을 결정하였다.

III. PV-ESS 연계형 시스템의 최적운용 알고리즘

본 연구에서 제안한 알고리즘은 그림 2와 같다.

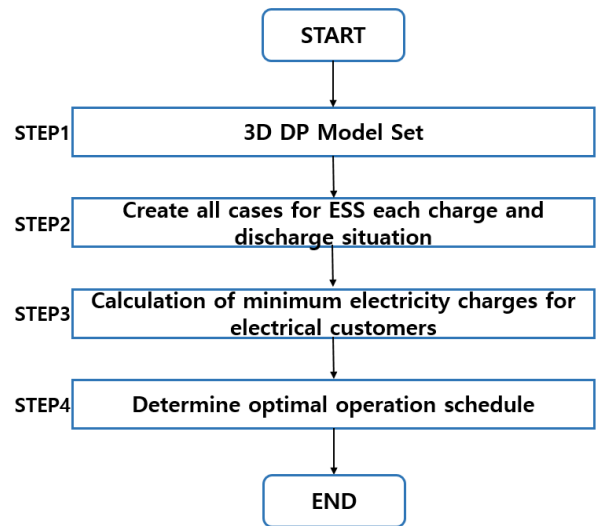


Fig. 2. Flow of PV-ESS connected system.
그림 2. PV-ESS 연계형 시스템의 흐름도

전체적인 흐름도는 3차원 DP 모델 설정, ESS 충방전 운전 상황별 모든 케이스 생성단계, 수용가 누적 전기요금 및 최소치 산출단계, 최적 운용 스케줄 결정단계로 구성되어 있다.

1. STEP1

본 연구에서의 PV-ESS 연계형 시스템의 첫 번째 단계인 3차원 DP 모델 설정 단계에서는 3차원 동적 좌표 공간(그림 10)의 X축을 설정된 기간에 해당하는 STAGE로 하고, Y축을 ESS(Energy Storage System) 충전량에 해당하는 STATE로 하고, Z축을 PV(Photovoltaic) 전력 생산량으로 하였다.

2. STEP2

PV-ESS 연계형 시스템의 ESS 충방전 운전 케

이스 생성 흐름도는 그림 3과 같다.

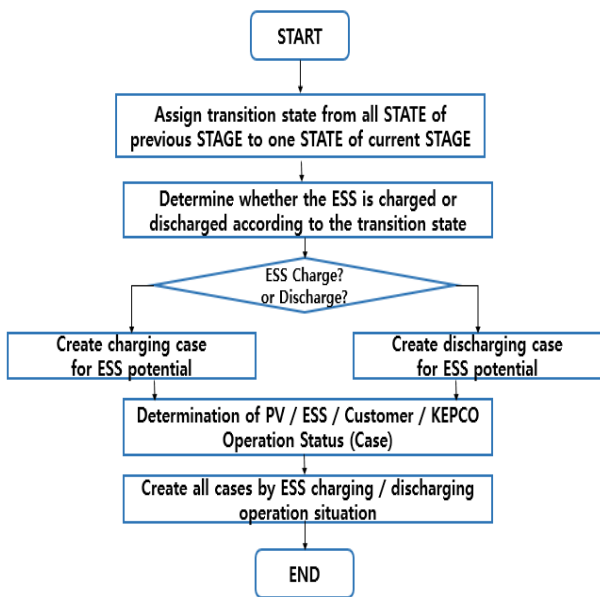


Fig. 3. Detailed flow of 2 steps of PV-ESS connected system.
그림 3. PV-ESS 연계형 시스템 2단계의 세부 흐름도

PV-ESS 연계형 시스템의 두 번째 단계인 운전 상황별로 모든 케이스를 생성하는 단계에서는 이전 STAGE의 모든 STATE로부터 현재 STAGE의 하나의 STATE로 천이할 때, 이전 STATE의 ESS 충전량이 현재 STATE의 ESS 충전량보다 낮으면 ESS는 충전상태로 판단하고, 이전 STATE의 ESS 충전량이 현재 STATE의 ESS 충전량보다 높으면 ESS는 방전상태로 판단하였다. 단, ESS는 충전과 방전이 동시에 이루어 질 수 없다는 사항을 반영하였다.

ESS 충전 및 방전에 따른 모든 CASE는 표 1과 같다.

Table 1. Case according to ESS charging and discharging.
표 1. ESS 충전 및 방전에 따른 CASE

ESS Charge	CASE1	PV does not produce power
	CASE2	Without power from PV to ESS, ESS charges from KEPCO
	CASE3	When supplying power from PV, KEPCO to ESS
ESS Discharge	CASE4	PV does not produce power
	CASE5	When ESS does not supply power from PV to ESS, but ESS supplies power to KEPCO

(1) CASE1

CASE1은 그림 4와 같이 PV가 전력을 생산하지 않고, ESS와 수용가는 KEPCO로부터 전력을 공급 받는 경우이다.

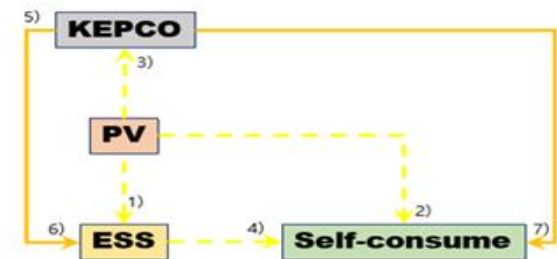


Fig. 4. ESS charging CASE1.
그림 4. ESS 충전 CASE1

그림 4에서 각 변수의 관계는 식(1) 및 식(2)와 같다.

$$\text{ESS KEPCO 수전량(6)} = \text{ESS 충전량} \quad (1)$$

$$\text{수용가 KEPCO 수전량(7)} = \text{수용가 부하} \quad (2)$$

(2) CASE2

CASE2는 그림 5와 같이 PV가 전력을 생산하여 KEPCO와 수용가에 공급하고, ESS는 KEPCO로부터 전력을 공급받는 경우이다.

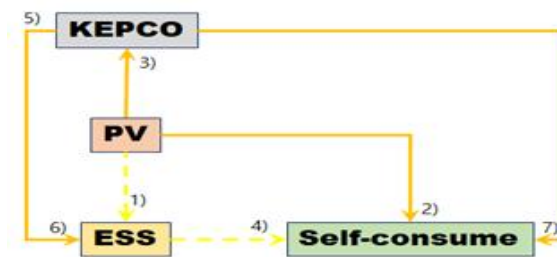


Fig. 5. ESS charging CASE2.
그림 5. ESS 충전 CASE2

그림 5에서 각 변수의 관계는 식(3)~(5)와 같다.

$$\text{PV KEPCO 역송량(3)} = \text{PV 전력 생산량} \quad (3)$$

$$\text{PV 수용가 공급량(2)} = \text{PV 전력 생산량} - \text{PV KEPCO 역송량} \quad (4)$$

$$\text{수용가 KEPCO 수전량(7)} = \text{수용가 부하} - \text{PV 수용가 공급량} \quad (5)$$

(3) CASE3

CASE3은 그림 6과 같이 PV가 전력을 생산하여

KEPCO, ESS와 수용가에 공급하고, ESS는 PV와 KEPCO로부터 전력을 공급받고, 수용가는 PV와 KEPCO로부터 전력을 공급받는 경우이다.

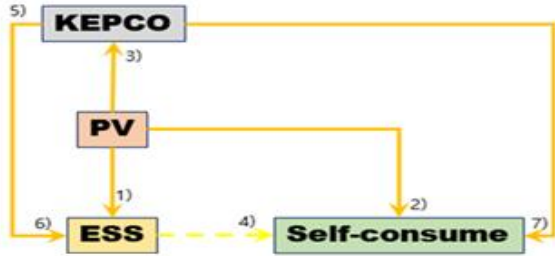


Fig. 6. ESS charging CASE3.
그림 6. ESS 충전 CASE3

그림 6에서 각 변수의 관계는 식(6)~(10)과 같다.

$$\text{PV KEPCO 역송량(3)} = \text{PV 전력 생산량} \quad (6)$$

$$\text{PV ESS 공급량(1)} = \text{PV 전력 생산량} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{PV 수용가 공급량(2)} \\ = \text{PV 전력 생산량} - \text{PV KEPCO 역송량} \\ - \text{PV ESS 공급량} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{ESS KEPCO 수전량(6)} \\ = \text{ESS 충전량} - \text{PV ESS 공급량} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{수용가 KEPCO 수전량(7)} \\ = \text{수용가 부하} - \text{PV 수용가 공급량} \end{aligned} \quad (10)$$

단, 'PV KEPCO 역송량 + PV ESS 공급량 > PV 전력 생산량'의 경우는 불가능하다.

(4) CASE4

CASE4는 그림 7과 같이 PV가 전력을 생산하지 않고, ESS는 KEPCO로 전력을 역송하고, 수용가는 KEPCO와 ESS로부터 전력을 공급받는 경우이다.

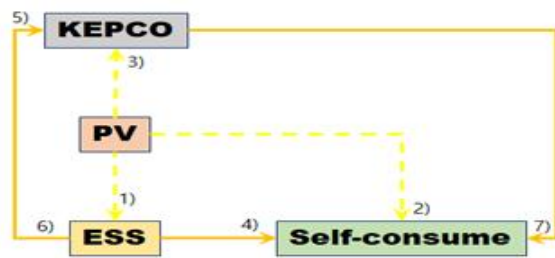


Fig. 7. ESS Discharging CASE4.
그림 7. ESS 방전 CASE4

그림 7에서 각 변수의 관계는 식(11)~(13)과 같다.

$$\text{ESS KEPCO 역송량(5)} = \text{ESS 방전량} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{ESS 수용가 공급량(4)} \\ = \text{ESS 충전량} - \text{ESS 방전량} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{수용가 KEPCO 수전량(7)} \\ = \text{수용가 부하} - \text{ESS 수용가 공급량} \end{aligned} \quad (13)$$

(5) CASE5

CASE5는 그림 8과 같이 PV가 전력을 생산하여 KEPCO와 수용가에 공급하고, ESS는 KEPCO로 전력을 공급하고, 수용가는 ESS와 KEPCO로부터 전력을 공급받는 경우이다.

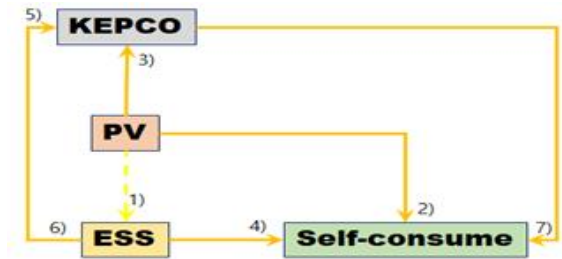


Fig. 8. ESS Discharging CASE5.
그림 8. ESS 방전 CASE5

그림 8에서 각 변수의 관계는 식(14)~(17)과 같다.

$$\text{PV KEPCO 역송량(3)} = \text{PV 전력 생산량} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{PV 수용가 공급량(2)} \\ = \text{PV 전력 생산량} - \text{PV KEPCO 역송량} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{ESS 수용가 공급량(4)} \\ = \text{ESS 충전량} - \text{ESS KEPCO 역송량} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{수용가 KEPCO 수전량(7)} \\ = \text{수용가 부하} - \text{PV 수용가 공급량} \\ - \text{ESS 수용가 공급량} \end{aligned} \quad (17)$$

3. STEP3

PV-ESS 연계형 시스템의 수용가 누적 최소 전기요금 산출 흐름도는 그림 9와 같다.

본 논문의 PV-ESS 연계형 시스템의 운용방법을 설명하기 위해 사용한 3차원 동적 계획법 모델은 그림 10과 같다.

PV-ESS 연계형 시스템의 운용방법의 세 번째 단계인 각 STAGE에 대한 모든 케이스에 대해 수용가의 전기요금 지불액을 계산하는 단계는 설정된 기간 내에서 각 STAGE의 각 STATE에 대해 ESS 충방전 시 운전 상황별 모든 케이스에 대한

수용가의 전기요금 지불액을 계산한다.

즉, STEP2에서와 같이 모든 케이스를 생성하고, 생성된 모든 케이스에 대한 수용가의 전기요금 지불액을 계산한다.

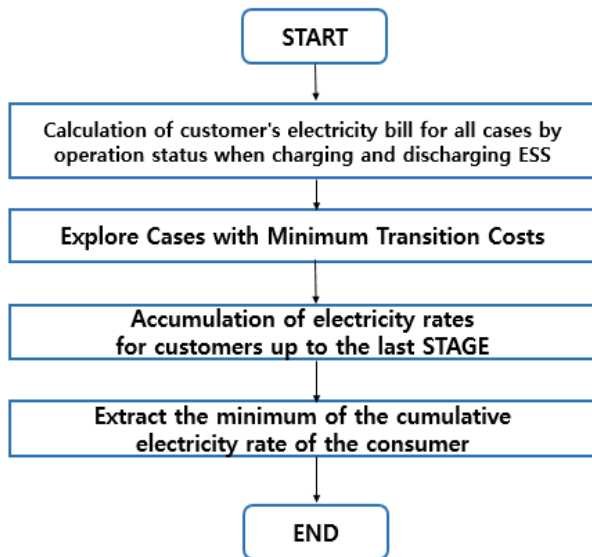


Fig. 9. Detailed flow of 3 steps of PV-ESS connected system. 그림 9. PV-ESS 연계형 시스템 3단계의 세부 흐름도

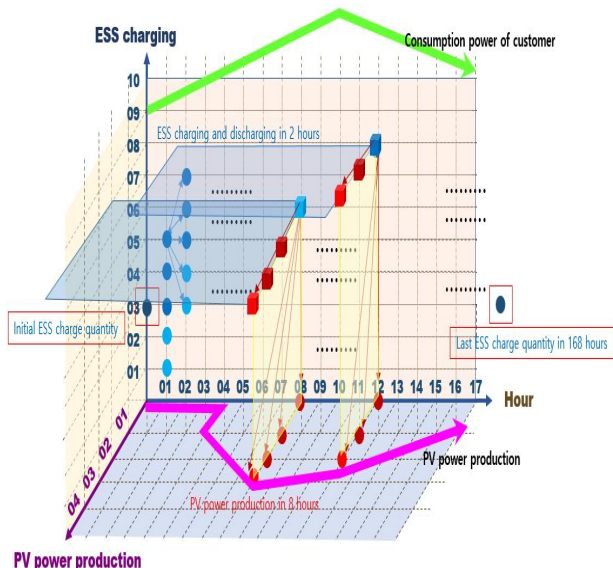


Fig. 10. PV-ESS Model for CASE GENERATION-based 3D DP.

그림 10. CASE GENERATION 기반 3차원 동적계획법 적용을 위한 PV-ESS 모델

각 STAGE에 대한 최소 천이 비용이 소요되는 케이스를 탐색하는 단계는 앞서 계산된 전기요금 지불액을 토대로 모든 케이스들 중 천이비용이 최소가 되는 케이스를 탐색한다.

최종 STAGE의 해당 STATE까지의 수용가 전기요금을 누적하는 단계는 설정된 기간 내에서 앞서 탐색된 모든 천이 비용(전기요금)을 최초 STAGE의 각 STATE를 기준으로 누적하여 저장한다.

4. STEP4

PV-ESS 연계형 시스템의 운용방법의 최종 운용 스케줄 결정 단계는 최종 STAGE의 해당 STATE까지 오는 과정에서 최소의 누적 수용가 전기요금을 갖는 경로를 Backward로 찾아 이를 PV-ESS 시스템의 최적운용 스케줄로 하였다.

IV. 결론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 본 연구에서 PV-ESS 연계형 시스템의 운용에 영향을 미치는 요소들이 변화되는 것을 운전 모의 할 수 있도록 ESS 충전 및 방전에 따른 케이스를 나누어서 최적으로 PV-ESS 연계형 운용 스케줄을 결정할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이를 위하여 일반적인 PV-ESS 연계형 운전이 아닌 3차원 동적 계획법을 적용하여 설정된 기간내에서 최소의 누적 수용가 전기요금을 지불하도록 하는 PV-ESS 연계형 운용 스케줄 탐색이 가능한 알고리즘을 개발하였다.

즉, 수용가의 전기요금에 영향을 미치는 외부 인자를 고려하고, 3차원 동적 계획법을 이용하여 운전 상황별 모든 케이스를 생성하고, 이러한 케이스를 기반으로 PV-ESS 운용 시 최적의 스케줄을 결정함으로써 PV-ESS의 운용에 영향을 미치는 외부 인자의 변화에도 안정적으로 최적의 PV-ESS 운용이 가능하도록 하였다.

추후 실 시스템에 본 연구를 적용하여 효용성을 검증할 예정이다.

References

[1] Ji-Young Eum, Yong-Ki Kim, "Economical Analysis of the PV-linked Residential ESS using HOMER in Korea," 2019. DOI: 10.5762/KAIS.2019.20.2.36
 [2] Geon-A Jeong, Junhyuk Kong, Jaesung Jung,

“Evaluation of the Impact by Adopting PV, ESS and EV on Power System,” 2018.

[3] Na-Eun Lee, Wook-Won Kim, Jin-O Kim, “Optimal Configuration Algorithm for ESS with Renewable Energy Resources Considering Peak-shaving Effects,” *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol.63, no.9, pp.1199-1205, 2014.

DOI: 10.5370/KIEE.2014.63.9.1199

[4] Yun Suk Choi, Seung You Na, “A Study on the Optimal Operation According to Appropriate PCS and Battery Capacity Estimation of PV-BESS System,” *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol.67, no.9, pp.1174-1180, 2018.

DOI: 10.5370/KIEE.2018.67.9.1174

Jea-Hoon Jung (Member)



2019 : BS degree in Electrical Engineering, Incheon National University.

Yong-Ha Kim (Member)



1987 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
1991 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.
Engineering, Incheon National University, since 1992.

BIOGRAPHY

You-Rim Choi (Member)



2019 : BS degree in Electrical Engineering, Incheon National University.

Tae-Hun Lim (Member)



2018 : BS degree in Electrical Engineering, Incheon National University.