

# Applying Vertical Photovoltaic System for Increasing Hosting Capacity in the Distribution System

수직형 양면 모듈 태양광발전을 활용한 배전계통 수용 용량 향상에 관한 연구

Seong-Jun Park · Jun-Hyuk Nam · Ki-Hwan Ryu · Byung-Ki Kim · Won-Sik Moon

박성준\* · 남준혁\* · 류기환\*\* · 김병기\*\*\* · 문원식†

## Abstract

South Korea plans to achieve a 20% renewable energy share by 2030, entailing significant expansion of wind and photovoltaic system capacity. Rapid integration of distributed renewable sources into the distribution network leads to challenges intensified by high-output bifacial photovoltaic systems: overvoltage, line capacity limitations, and increased reverse power flow during peak photovoltaic system generation. Existing solutions focus on voltage constraints but have drawbacks like reduced equipment lifespan, higher costs, and do not address thermal capacity limitations. To overcome these challenges, this paper proposes an algorithm that recalculates the photovoltaic system hosting capacity by considering both voltage and thermal constraints through power flow analysis. Additionally, we suggest integrating vertical photovoltaic system installations to mitigate the reduced hosting capacity caused by bifacial modules.

## Key Words

Hosting Capacity, Distribution System, Bifacial Photovoltaic System, Vertical Photovoltaic System

## 1. 서론

재생에너지 3020 이행계획에 따라 '30년까지 재생에너지 발전 비중 20[%] 및 설비 용량 63.8[GW]를 보급할 계획이다[1]. 제11차 전력수급기본계획 실무안에서는 '30년까지 태양광발전 53.8[GW]와 풍력 18.3[GW], 그리고 '38년 까지 태양광발전 74.89[GW]와 풍력 40.7[GW]를 보급할 계획이다. 이에 따라 재생에너지의 발전 비중은 '30년 21.6[%], '38년 32.9[%]로 증가할 전망이다[2].

그러나 배전계통에 연계된 재생에너지 기반 분산형전원의 비율이 증가함에 따라 과전압 및 선로의 용량한계 등으로 인한 재생에너지 배전계통 접속 대기도 동시에 증가하고 있다. 특히 낮 시간대에 발전 피크가 발생하는 태양광발전의 특성으로 인해 특정 시간에 역조류가 발생하여 전압이 증가하게 되어 태양광발전 수용에 한계가 발생하고 있다[3]. 더욱이 기존 단면 모듈 태양광발전에 비해 출력이 향상되는 양면 모듈 태양광발전이 도입이 되면 역조류가 증가하며 이는 태양광발전 수용 용량 제한에 더 큰 영향을 미칠 것이다.

이를 해결하고 태양광발전의 수용성을 향상시키기 위한 연구로는 주변압기의 부하 탭 변환기(OLTC)의 기준점 설정[4], 선로전압조정장치(Step Voltage Regulator) 설치[5], 스마트 인버터 설치[6] 등이 있다. 그러나 OLTC의 경우 탭 제어 기준점 설정으로 인해 탭 제어 횟수가 증가하면 변압기 수명이 감소하는 문제가 있다. 선로전압조정장치 설치 및 스마트 인버터로의 교체는 경제적으로 투자 금액이 증가하는 부담이 있다. 그러나 이는 수용 용량을 열적용량을 제외한 전압 관점에서만 다뤘으며 실질적인 수용 용량을 증가하기 위해서는 선로 증설 및 ESS를 통한 발전 피크 시간을 이동시키거나 분산하여 선로의 운전용량을 분산시켜야 한다. 하지만 이는 막대한 건설 비용과 오랜 건설 기간이 소요되어, 이에 대응할 수 있는 연구의 필요성이 요구되고 있다[7].

본 연구에서는 이러한 별도의 제어장치 없이 수직형 태양광발전의 도입이 배전계통의 수용 용량에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 수직형 태양광발전은 설치 면적 대비 효율을 높일 뿐만 아니라, 특정 시간대에 집중된 발전량을 분산시켜 배전계통의 부담을 줄일 수 있는 대안으로 주목받고 있다[8]. 이를

† Corresponding Author: Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Republic of Korea.

E-mail : [chrismoon@ssu.ac.kr](mailto:chrismoon@ssu.ac.kr) <https://orcid.org/0000-0003-3408-8250>

\* Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Republic of Korea.

<https://orcid.org/0000-0003-1280-4009> <https://orcid.org/0009-0008-2775-9857>

\*\* Korea Electric Association, Republic of Korea.

<https://orcid.org/0000-0002-5035-9818>

\*\*\* Electric Power System Research Team, Korea Institute of Energy Research, Republic of Korea.

<https://orcid.org/0000-0002-6668-8835>

Received : Sep. 25, 2024 Revised : Nov. 11, 2024 Accepted : Nov. 28, 2024

위해 조류계산을 기반으로 전압과 운전용량을 함께 고려한 태양광발전 수용 용량 알고리즘을 제안한다. 이를 통해 양면 모듈 태양광발전 도입에 따른 수용 용량을 재평가하고, 감소된 수용 용량을 해결하기 위해 발전 피크 시간이 오전과 오후에 나타나는 수직형 태양광발전 도입을 제안한다. 수직형 태양광발전 도입 비율에서 수용 용량과 발전량을 비교하여 적정 비율을 도출하였다.

## 2. 배전계통 태양광발전 수용 용량

### 2.1 배전계통 전압유지범위

특고압 배전선로는 한국전력공사에서 규정한 표 1의 전압유지범위를 만족해야 한다. 전압유지범위의 상한치는 공칭전압의 +3.9[%]로 설정되어 있고, 하한치는 -9.1[%]로 설정되어 있다[9]. 그러나 태양광발전 연계 증가로 역조류가 발생함에 따라 배전선로의 전압변동이 전압유지범위를 초과할 가능성이 있다. 전압유지범위를 초과하는 전압변동은 태양광발전의 배전계통 연계를 제한하는 주요한 요인이며, 이러한 전압유지범위를 초과하는 과전압 현상은 주로 배전선로의 말단에서 나타난다[10].

표 1 특고압 배전선로 전압유지범위

Table 1 Voltage Maintenance Range of High Voltage Distribution Line

표준전압 [V]	전압유지범위 [V]
13,200/22,900 (상전압/선간전압)	12,000~13,800/20,800~23,800 (상전압/선간전압) 0.909~1.039 [p.u.]

### 2.2 기존 태양광발전 수용 용량 산정 방식

한국의 배전계통은 열적용량을 고려하여 선로의 운전용량을 정의하고 있으며 이를 통해 선로의 분산형전원 수용 용량을 산정하고 있다. 이때 고려한 선종은 ACSR-160[mm<sup>2</sup>]이며, 기상 조건을 고려하여 연속 허용용량을 15.7[MVA]로 산정하고 있다. 배전계통 운영자는 태양광발전 수용 용량을 실제 운영 과정에서 발생할 수 있는 경년 열화와 불평형 전류의 영향을 고려한 최대 상시운전용량인 10[MVA]를 고려하여 산정하였으며, 이는 표 2와 같다[11].

표 2 배전선로 연속허용용량 및 최대 상시운전용량

Table 2 The Thermal Capacity of Distribution Line

사용전선	연속허용용량	최대 상시운전용량
ACSR-160[mm <sup>2</sup> ]	398[A] 15.7[MVA] (100[%])	253[A] 10[MVA] (63.7[%])

현재 태양광발전 수용 용량 기준은 12[MW]이며 이는 최소

부하 1[MW], 태양광발전의 최대 출력이 정격용량 대비 90[%]인 점을 고려하여 산정하였다[11]. 그러나 수용 용량을 산정할 때 배전계통에서의 전압을 고려하지 않았다. 또한, 태양광발전의 효율 향상으로 계통에서의 태양광발전 최대 출력이 정격용량 대비 90[%]를 초과할 수 있으며 이로 인해 선로의 최대 상시운전용량을 초과할 수 있다. 따라서 태양광발전 수용 용량을 산정 방식을 재확립할 필요가 있다.

### 2.3 태양광발전 수용 용량 산정 알고리즘

배전계통에 연계된 태양광발전은 연계위치와 용량에 따라 전압유지범위를 벗어날 가능성이 있으며, 이로 인해 수용 용량이 감소할 수 있다. 따라서 본 논문은 전압유지범위 및 최대 상시운전용량을 고려한 배전계통 태양광발전 수용 용량 산정 알고리즘을 그림 1과 같이 제안한다. 알고리즘의 절차는 다음과 같다.

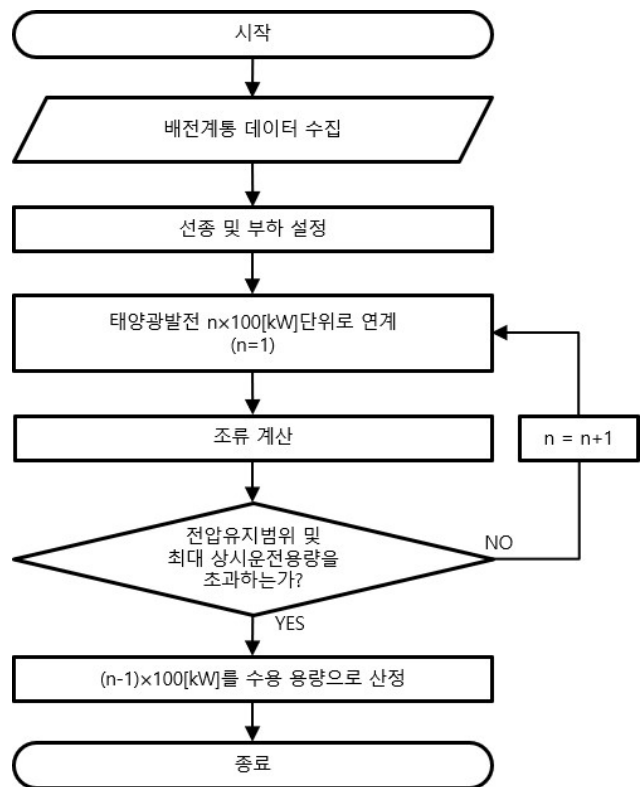


그림 1 태양광발전 수용 용량 산정 알고리즘

Fig. 1 Photovoltaic Hosting Capacity Estimation Algorithm

[Step 1] 변압기의 용량, 선로 공장, 부하 위치 등의 데이터를 수집하여 배전계통을 모델링한다.

[Step 2] 선종은 구간 별로 상이하며 부하는 주거용, 산업용, 그리고 상업용등 서로 상이한 부하 특성을 가짐으로 부하 특징을 분석 후 선종 및 부하 패턴을 설정한다[12].

[Step 3] 태양광발전의 연계 위치 및 용량 비율을 적용하여 태양광발전 혼합 비율에 따라 n×100[kW]를 연계한다.

[Step 4] 조류 계산을 통해 전압 및 운전용량을 계산한다.

[Step 5] 계산된 전압 및 운전용량이 전압유지범위 및 최대 상시운전용량을 초과하는지 확인한다. 초과하지 않는다면 [Step 3]으로 돌아가 태양광발전 연계 용량을 증가시킨다. 초과한다면 [Step 6]으로 넘어간다.

[Step 6] 전압유지범위 및 최대 상시운전용량을 초과하지 않는 최대 연계 용량을 배전계통 태양광발전 수용 용량으로 산정한다.

### 3. 태양광발전 모듈에 따른 출력 특성

양면 모듈 태양광발전은 전면과 후면 모두 발전이 가능하기 때문에 단면 모듈 태양광발전에 비해 출력이 5~20[%] 향상된다는 특징이 있다[13]. 출력 특성 분석을 위해 그림 2와 같이 남향 단면 및 양면, 그리고 수직형 태양광발전을 설치하여 실증 단지를 구축하였으며, 23년 1월부터 23년 11월까지 데이터를 취득하였다.



그림 2 태양광발전 실증 단지  
Fig. 2 Photovoltaic Demonstration Site

#### 3.1 양면 모듈 적용에 따른 태양광발전 출력 특성

남향 단면 모듈 태양광발전(South-oriented Monofacial Photovoltaic, SMPV) 및 남향 양면 모듈 태양광발전

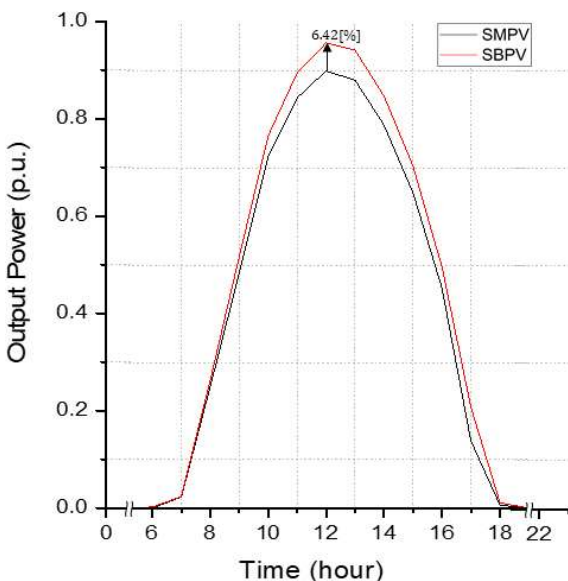


그림 3 남향 단면 및 양면 모듈 태양광발전 출력 특성  
Fig. 3 Output Characteristics of SMPV and SBPV

(South-oriented Bifacial Photovoltaic, SBPV)의 최대 출력이 발생하는 날은 23년 2월 25일이었다. 해당 출력 특성 곡선은 그림 3과 같다. SMPV의 최대 출력은 정격용량 대비 90.0[%]로 12시에 발생하였다. SBPV의 최대 출력은 정격용량 대비 95.8[%]이고, 마찬가지로 12시에 발생하였다[13]. 해당 결과로 SBPV의 최대 출력이 SMPV의 최대 출력에 비해 6.42[%] 향상되었음을 확인하였다. 이와 같이 향상된 출력으로 인해 배전계통에서 전압유지범위 및 최대 상시운전용량이 초과될 가능성이 있다.

#### 3.2 VBPV(Vertical Bifacial Photovoltaic) 출력 특성

본 논문에서는 태양광발전 수용성 향상 연구를 진행하기 위해 수직형 양면 모듈 태양광발전(Vertical Bifacial Photovoltaic, VBPV)의 출력 특성을 분석하였다. VBPV의 주향은 각각 동쪽과 서쪽이므로 기존 남향 태양광발전과 달리 정오에 최대 출력이 발생하지 않으며 오전 및 오후에 최대 출력이 발생하는 특징이 있다. 오전과 오후로 분산된 피크는 정오에 출력 집중됨에 따라 발생하는 전압 및 최대 상시운전용량 문제를 완화시킬 수 있다.

태양광발전 수용 용량 분석을 위해 VBPV가 최대 출력이 발생한 23년 1월 25일 데이터를 활용하였다. 그림 4는 이에 따른 VBPV의 출력 특성 곡선이다. 최대 출력은 오전 10시에 정격용량 대비 68.2[%], 오후 15시에 정격용량 대비 69.2[%]로 각각 발생하였다. 그리고 12시 출력은 정격용량 대비 45.5[%] 발생하였다. 이는 12시 출력이 52.5[%] 감소한 것으로, 기존 SBPV에 비해 12시의 출력이 현저하게 감소하였다. 이를 통해 SBPV와 VBPV를 혼합하여 배전계통에 도입하면 12시 피크를 감소시키고 발전량을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

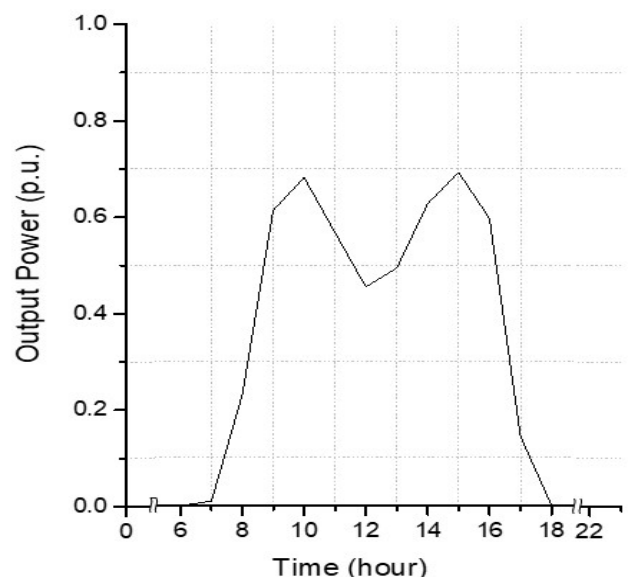


그림 4 수직형 양면 모듈 태양광발전(VBPV) 출력 특성  
Fig. 4 Output Characteristics of VBPV

### 3.3 SBPV 및 VBPV 비율에 따른 출력 특성

VBPV 도입에 따른 피크 출력 특성을 분석하기 위해 남향 양면 모듈과 수직형 양면 모듈의 비율에 따른 태양광발전 출력 특성을 분석하였다. 비율별 태양광발전 출력 특성은 그림 5와 같다.

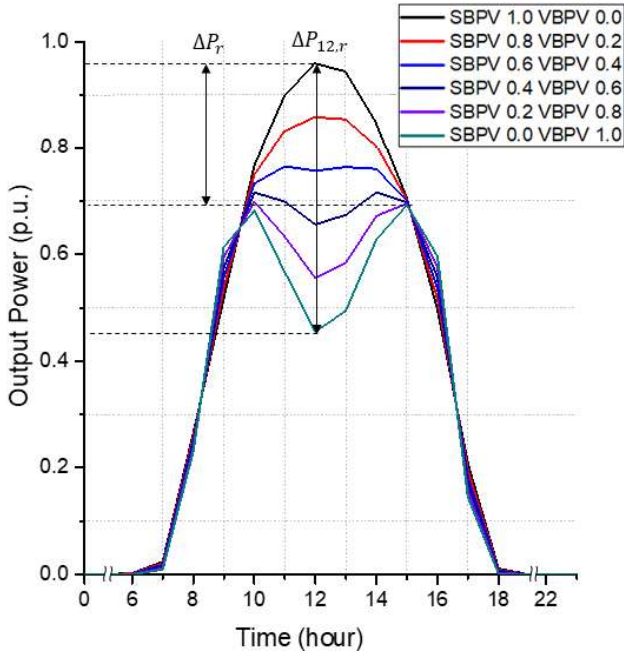


그림 5 남향 양면 모듈 및 수직형 양면 모듈 비율에 따른 태양광발전 출력 특성

Fig. 5 Output Characteristics Based on the Ratio of SBPV and VBPV

이에 따른 비율별 최대 출력, 피크 감소율 및 12시 출력 감소율을 표 3에 나타냈다. 피크 감소율이란 가장 출력이 높은 비율인 SBPV 1.0 VBPV 0.0 기준에서 각 비율의 최대 출력의 출력 감소율이다. 피크 감소율은 식 (1)과 같다.

$$\Delta P_r = \left( \frac{P_{peak} - P_{peak,r}}{P_{peak}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$\Delta P_r$ 는 태양광발전 혼합 비율  $r$ 의 피크 감소율이며,  $P_{peak}$ 는 SBPV 1.0 VBPV 0.0의 최대 출력인 0.958[p.u.]를 적용한다.  $P_{peak,r}$ 은 태양광발전 혼합 비율  $r$ 에서의 최대 출력이다. 12시 출력 감소율은 태양광발전 출력이 가장 높은 SBPV 1.0 VBPV 0.0을 기준으로 각 비율별 12시에서의 출력 감소율을 의미한다. 12시 출력 감소율은 식 (2)와 같다.

$$\Delta P_{12,r} = \left( \frac{P_{peak} - P_{12,r}}{P_{peak}} \right) \times 100 \quad (2)$$

$\Delta P_{12,r}$ 는 12시 출력 감소율이며,  $P_{12,r}$ 은 태양광발전 혼합 비율  $r$ 에서의 12시 최대 출력이다.

표 3 비율별 최대 출력 및 피크 감소율 (전체 및 12시)

Table 3 Maximum Output and Peak Reduction Rates(Overall and at 12 O'clock) by Photovoltaic System Ratios

비율별 태양광발전	최대 출력 [%]	$\Delta P_r$ [%]	$\Delta P_{12,r}$ [%]
SBPV 1.0 VBPV 0.0	95.8	0.0	0
SBPV 0.9 VBPV 0.1	90.7	5.25	5.25
SBPV 0.8 VBPV 0.2	85.7	10.5	10.5
SBPV 0.7 VBPV 0.3	80.8	15.6	15.8
SBPV 0.6 VBPV 0.4	76.5	20.2	21.0
SBPV 0.5 VBPV 0.5	73.8	23.0	26.3
SBPV 0.4 VBPV 0.6	71.6	25.3	31.5
SBPV 0.3 VBPV 0.7	70.7	26.2	36.8
SBPV 0.2 VBPV 0.8	69.9	27.1	42.0
SBPV 0.1 VBPV 0.9	69.3	27.6	47.3
SBPV 0.0 VBPV 1.0	69.2	27.7	52.5

표 3의 결과를 통해 수직형 태양광발전의 비율이 증가할수록 피크 감소율과 12시 출력 감소율도 증가하는 경향이 나타난다는 것을 확인하였다. 또한, 피크 감소율이 가장 높은 비율은 SBPV 0.0, VBPV 1.0일 때 27.7[%]로 나타났으며, 12시 피크 감소율은 SBPV 0.0 VBPV 1.0일 때 52.5[%]로 나타났다는 것을 확인하였다.

## 4. VBPV를 통한 태양광발전 수용성 향상

### 4.1 배전계통 모델링

양면 모듈 태양광발전 도입 시 전압 및 운전용량을 분석하기 위해 배전계통 모델링을 진행하였다. 그림 6은 본 연구에 활용한 전남 지역 실제 배전선로이며, 연계된 태양광발전의 용량은 11.3[MW]로서 한계 수용용량에 도달한 배전선로를 대표한다고 볼 수 있다[14]. 조류 계산 시 전압 및 운전용량 분석을 간소화하기 위해 그림 6의 실 배전계통을 그림 7과 같이 10개 노드로 구성된 배전선로로 축약하였다. 축약된 배전선로의 노드 설정 기준은 배전간선(feeder)으로부터 분기한 분기선(lateral)에 연계된 모든 태양광발전을 하나의 노드로 축약하였다. 또한 노드별 태양광발전의 연계 비율을 그림 7에서 붉은

색 [%]로 표기하였는데, 이는 배전선로에 연계되는 태양광발전 용량이 다르더라도 분포 위치 및 용량 비율을 실제 배전계통과 유사한 경향을 보일 것이라 가정하였다. 본 연구에서 태양광발전 수용 용량을 산정할 때, 태양광발전 연계 용량에 대한 비율은 그림 7의 비율과 동일하게 유지하였다. 또한, 각 노드의 태양광발전 연계 위치 및 용량 비율은 표 4에 명시하였다.

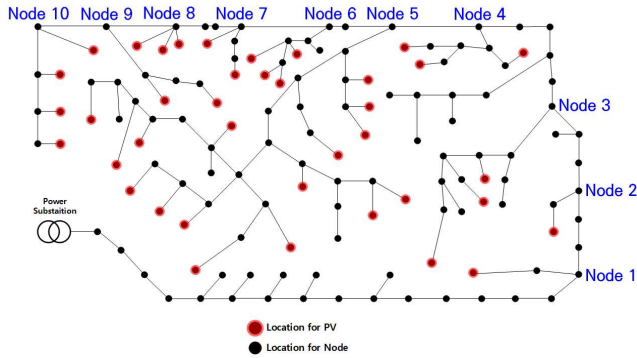


그림 6 전남 지역 실제 배전선로  
Fig. 6 Jeon-Nam Region Distribution System

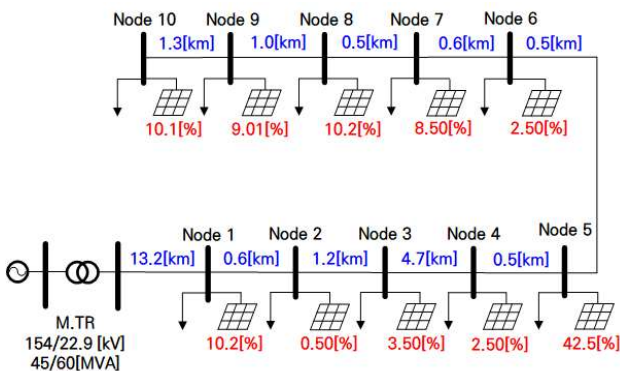


그림 7 축약된 배전계통 단선도  
Fig. 7 Abbreviated Distribution System Diagram

표 4 노드별 태양광발전 연계 위치 및 용량 비율  
Table 4 Photovoltaic Integration Capacity Ratio by Node

노드	태양광발전 연계 위치 [km]	태양광발전 연계 용량 비율 [%]
Node 1	13.2	10.2
Node 2	13.8	0.90
Node 3	15.0	3.50
Node 4	19.7	2.50
Node 5	20.2	42.5
Node 6	20.7	2.50
Node 7	21.3	8.50
Node 8	21.8	10.2
Node 9	22.8	9.10
Node 10	24.1	10.1

표 5는 그림 7에서 제시된 배전계통 구성 설비에 대한 파라미터이다. 구성 설비는 주변압기, 부하 그리고 선로로 구성되어 있다. 배전계통에서 주변압기의 정격전압은 154/22.9[kV], 정격용량은 45/60[MVA], 부하의 역률은 0.95로 적용하였다. 배전선로의 공장은 총 24.1[km]이다. 태양광발전 수용 용량 산정을 위해 부하는 최소 부하 1[MW]로 설정하였으며 선종은 ACSR-160[mm<sup>2</sup>]로 단일화하였다. 전압 및 운전용량 분석과 그에 따른 비율별 태양광발전 수용 용량을 분석하기 위해 OpenDSS를 활용하여 연구를 진행하였다[15].

표 5 배전계통 설비 파라미터  
Table 5 Distribution System Components

설비	구분	파라미터
주변압기	정격전압	154/22.9[kV]
	정격용량	45.0/60.0[MVA]
부하	부하용량	1.00[MW]
	역률	0.950
선로	선종	ACSR-160[mm <sup>2</sup> ]
	공장	24.1[km]

#### 4.2 SMPV 및 SBPV 도입에 따른 전압 및 운전용량 분석

단면 및 양면 모듈 적용에 따른 남향 태양광발전 12[MW] 연계 시 배전선로에 있어서 적정 전압유지범위 및 최대 상시 운전용량 초과 여부를 분석하였다.

선로 전압유지 여부는 태양광발전 연계로 인해 발생하는 최대 전압상승률을 기준으로 판단하였다. 최대 전압상승률은 태양광발전으로 인해 계통 전압이 얼마나 상승하는지를 나타내는 지표로 활용하였으며, 최대 전압상승률의 전압유지범위 초과 여부는 태양광발전의 배전계통 연계를 제한하는 주요한 요인이 된다. 최대 전압상승률은 식 (3)과 같다.

$$V_{Rise\ Rate} = \left( \frac{V_{peak} - V_{ref}}{V_{ref}} \right) \times 100 \quad (3)$$

여기서  $V_{Rise\ Rate}$  은 최대 전압상승률이며,  $V_{peak}$  는 조류 계산 시 발생한 최대 전압이고,  $V_{ref}$  는 배전선로 공칭전압이다.

배전선로의 최대 상시운전용량 초과 여부는 2.3 태양광발전 수용 용량 산정 알고리즘에서 제시한 최대 운전용량을 기준으로 판단하였다.

SMPV 12[MW] 연계에 따른 조류계산 진행 시 배전선로에서 최대 전압상승률이 1.51[%] 발생하였으며 최대 운전용량은 9.97[MVA]로 나타났다. 그 결과 전압유지범위 및 배전선로 최대 상시운전용량 기준인 10[MVA]를 초과하지 않았다. 그러나 SBPV의 경우 12[MW] 연계 시 최대 전압상승률이 1.81[%] 발생하였으며 최대 운전용량은 10.6[MVA]로 나타났다. 이는 배전선로의 최대 상시운전용량을 초과한 것으로, 계통의 안전

표 6 SMPV 및 SBPV 연계에 따른 배전계통 최대 전압상승률 및 운전용량  
Table 6 Maximum Voltage Rise Rate and Operating Capacity of the Distribution System According to SMPV and SBPV

	최대 전압상승률 [%]	최대 운전용량 [MVA]
SMPV	1.51	9.97
SBPV	1.81	10.6

성과 신뢰성을 저해할 수 있다. 태양광발전 수용 용량 산정 알고리즘 Step 6에서 언급한 바와 같이, 전압유지범위와 함께 배전선로의 최대 상시운전용량을 초과하지 않는 최대 연계 용량을 배전계통의 태양광발전 수용 용량으로 산정해야 함을 의미한다. 따라서 SBPV 도입 시 수용 용량을 재산정하여야 한다.

### 4.3 SBPV 및 VBPV 비율에 따른 수용 용량 산정

SBPV 도입 시 감소되는 수용 용량을 보완하기 위해 VBPV 도입에 따른 비율별 수용 용량을 분석하였다. 이를 위해 전압 유지범위와 배전선로 최대 상시운전용량을 초과하지 않는 범위에서 태양광발전의 수용 용량 산정하였으며, 배전계통의 최대 전압상승률 및 운전용량을 표 7에 나타냈다. 최대 전압상승률에 대한 계산은 식 (3)과 같다. 분석 결과, SBPV만을 연계했을 경우 수용 용량은 11.3[MW]이었으나 VBPV의 연계 비율을 증가시킬수록 수용 용량이 증가하였다.

표 7 비율별 태양광발전 수용 용량에 따른 최대 전압상승률 및 운전용량  
Table 7 Maximum Voltage Rise Rate and Operating Capacity According to the Photovoltaic Hosting Capacity by Ratio

태양광발전 비율	최대 전압상승률 [%]	최대 운전용량 [MVA]	수용 용량 [MW]
SBPV 1.0 VBPV 0.0	1.52	10.0	11.3
SBPV 0.9 VBPV 0.1	1.51	9.97	11.9
SBPV 0.8 VBPV 0.2	1.51	9.97	12.6
SBPV 0.7 VBPV 0.3	1.52	10.0	13.4
SBPV 0.6 VBPV 0.4	1.51	9.96	14.1
SBPV 0.5 VBPV 0.5	1.50	9.95	14.6
SBPV 0.4 VBPV 0.6	1.52	9.98	15.1
SBPV 0.3 VBPV 0.7	1.52	9.99	15.3
SBPV 0.2 VBPV 0.8	1.50	9.94	15.4
SBPV 0.1 VBPV 0.9	1.52	9.98	15.6
SBPV 0.0 VBPV 1.0	1.51	9.97	15.6

### 4.4 발전량 비교를 통한 적정 비율 제시

SBPV 및 VBPV의 비율에 따른 6개월 간의 평균 발전 시간을 도출한 후 평균 발전량을 산출하여 전력 생산성을 비교 분

석하였다. 최소 발전량이 발생한 비율은 SBPV 0.0 VBPV 1.0으로, 평균 발전량은 42.5[MWh]이었다. 반면에 최대 발전량이 발생한 혼합 비율은 SBPV 0.6 VBPV 0.4로, 발전량은 50.5[MWh]이었다. 비율에 따른 평균 발전량 및 평균 발전 시간은 표 8에 제시하였다.

표 8 비율별 태양광발전 수용 용량에 따른 평균 발전량 및 평균 발전 시간  
Table 8 Average Generation and Average Generation Hours Based on PV Hosting Capacity by Ratio

태양광발전 비율	평균 발전량 [MWh]	평균 발전 시간 [Hour]
SBPV 1.0 VBPV 0.0	46.9	4.15
SBPV 0.9 VBPV 0.1	47.7	4.01
SBPV 0.8 VBPV 0.2	48.7	3.87
SBPV 0.7 VBPV 0.3	49.9	3.72
SBPV 0.6 VBPV 0.4	50.5	3.58
SBPV 0.5 VBPV 0.5	50.2	3.44
SBPV 0.4 VBPV 0.6	49.7	3.29
SBPV 0.3 VBPV 0.7	46.0	3.15
SBPV 0.2 VBPV 0.8	46.3	3.01
SBPV 0.1 VBPV 0.9	44.7	2.86
SBPV 0.0 VBPV 1.0	42.5	2.72

## 5. 결론

본 연구에서는 양면 모듈 태양광발전 도입 시 향상되는 출력으로 인해 기존 태양광발전 수용 용량 기준 도입 시 배전계통에서 전압 상승 및 최대 상시운전용량 초과와 같은 문제가 발생할 가능성이 있음을 확인하였다. 그에 따라 감소하는 태양광발전 수용 용량에 대한 해결책으로 VBPV 도입을 제안하였다. VBPV 도입을 통해 배전계통의 수용 용량이 기존보다 상당히 증가하였으며 최대 수용 용량이 SBPV 0.0 VBPV 1.0 일 때 15.6[MW]까지 증가함을 확인하였다. 또한, 도입 비율에 따른 평균 발전량을 비교한 결과 SBPV 0.6 VBPV 0.4에서 가장 높은 평균 발전량인 50.5[MWh]가 기록되었음을 확인하였다.

실제 배전계통에서는 다양한 선종으로 구성되어 있으며 각 배전선로의 공장이 다르며 부하 출력이 일정하지 않다. 이로 인해 배전계통에서의 전압 및 운전용량의 값이 상이할 수 있으며 수용 용량을 결정할 때는 이러한 변동되는 요소들을 고려하여야 한다.

향후에는 VBPV 도입 시 ESS 및 선로 증설 억제와 같은 다양한 효과를 포함하여 장기적인 경제성 평가를 진행할 예정이다. 또한, 경제성 평가뿐만 아니라 환경 영향 평가, 사회적 수용성 등에 대한 후속 연구를 진행한다면 VBPV의 실질적인 도입을 촉진할 수 있을 것이다.

### Acknowledgements

This research was conducted with the support of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy in 2024 (No. 2022550000120)

### References

- [1] Ministry of Trade Industry, and Energy (MOTIE), "Renewable Energy 3020 Implement Plan," Ministry of Trade Industry and Energy (MOTIE), 2017. 12.
- [2] Ministry of Trade, Industry, and Energy, "The 11th demand supply program," 2024.05.
- [3] S. J. Park, T. Y. Nam, D. I. Cho, J. W. Lee, S. M. Lee, B. K. Kim, J. C. Kim, W. S. Moon, "Application of ESS Aggressive Volt-Var Control in the Distribution System for Hosting Capacity Enhancement," Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 72, no. 45, pp. 1782~1788, 2023.
- [4] Kwang-Hoon Yoon, Joong-Woo Shin, Tea-Yang Nam, Jae-Chul Kim, and Won-Sik Moon, "Operation Method of On-Load Tap Changer on Main Transformer Considering Reverse Power Flow in Distribution System Connected with High Penetration on Photovoltaic System," Energies, vol. 15, no. 17, 2022.
- [5] H. O. Lee, "A Study on Optimal Placement and Voltage Control Method of SVR in Smart Grid," Ph.D Dissertation, Dept. Elec. Eng., Soongsil Univ., Seoul, Korea, 2014.
- [6] H. J. Lee, K. H Yoon, J. W. Shin, J. C. kim, S. Y. Yun, "A Study on Volt-Var Curve of Smart Inverter to Improve Hosting Capacity," Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 69, no. 9, pp. 1312-1317, 2020.
- [7] S. M. Choi, J. M. Kim, Y. H. Kim, H. S. You, K. S. Ryu, D. S. Rho, "Estimation method of Optimal Capacity for VPL to improve Power curtailment of Renewable energy sources," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 24, no. 11, pp. 451-451, 2023.11.
- [8] S. M. Lee, E. C. Lee, J. H. Lee, S. H. Yu, J. S. Heo, W. Y. Lee, "Analysis of the Output Characteristics of a Vertical Photovoltaic System Based on Operational Data: A Case Study in Republic of Korea," Energies, vol. 16, no. 19, 2023.10.
- [9] Distribution Planning Department KEPCO, Technical Connection Standard for Distributed Power in Distribution System, 2023.
- [10] Kwang-Hoon Yoon, "Operation Method of Voltage Control Equipment considering Reverse Power Flow in Distribution System," Ph.D Dissertation, Dept. Elec. Eng., Soongsil University, 2023.
- [11] H. O. Lim, H. J. Kim, J. B. Sim, and S. S. Cho, "An Analysis Study on the Proposal for Increasing Hosting Capacity in Distribution Feeders," Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 69, no. 3, pp. 516-522, 2020.
- [12] H. T. Lee, and J. C. Lee, "A Comparative Study for Reliability of Single and Radial Power Distribution System considering Momentary interruption," Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 58, no. 7, pp. 1270-1275, 2009.
- [13] Appelbaum, J. J. R. E. "Bifacial photovoltaic panels field," Renewable Energy, vol. 85, pp 338-343, 2016.
- [14] S. M. Lee, E. C. Lee, J. H. Lee, S. J. Park, and W. S. Moon, "Strategy for Enhancing Hosting Capacity of Distribution Lines Using a Vertical Photovoltaic System," Energies, vol. 17, no. 6, 2024.03.
- [15] Gangwar, Tripti, Narayana Prasad Padhy and Premalata Jena, "Management of Energy Storage Dispatch in Unbalanced Distribution Networks using OpenDSS," 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE). IEEE, 2022.

### 저자소개

#### 박성준(Seong-Jun Park)



He received his B.S. degree from Soongsil University, Seoul, Korea, in 2023, Currently he is a student of Soongsil University graduate school masters course.

#### 남준혁(Jun-Hyuk Nam)



He received his B.S. degree from Seongkyunkwan University, Seoul, Korea, in 2014, Currently he is a student of Soongsil University graduate school masters course.

#### 류기환(Ki-Hwan Ryu)



He received the M.S. degree in Electrical Engineering from Soongsil University, Seoul, Korea, in 2012, where he is currently pursuing the Ph.D. degree with Hanyang University, Seoul, Korea. Since 2013, he has been with Korea Electric Association, where he is currently an Deputy General Manager with the Technical Regulation Department.

#### 김병기(Byung-Ki Kim)



He received the B.S. degree, M.S. and Ph.D degree in KOREATECH, Cheon-An, South Korea, in 2008, 2012 and 2015, respectively. Currently, he joined Korea Institute of Energy Research as Principal researcher since 2016. His research interests include operation of power distribution system, dispersed storage, generation systems and power quality.



**문원식(Won-Sik Moon)**

---

He received the B.S., M.S, and Ph.D. degrees in electrical engineering from Soongsil University, Seoul, Korea, in 2009, 2011, and 2016, respectively. He worked at LG Electronics from 2016 to 2019 in the field of Microgrid. He is currently an Associate Professor with Soonsil University since 2019. His research interests include application of Renewable Energy and Microgrid Technologies to Power Systems.

---