

대면적 Multi busbar 모듈 전력 손실 저감을 위한 태양전지 설계

김주희 · 이재형*

전자전기컴퓨터공학과, 성균관대학교, 수원, 16419

Solar Cell Design for Large Area Multi Busbar Module Power Loss Reduction

Juhwi Kim · Jaehyeong Lee*

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Korea

Received February 24, 2023; Revised March 15, 2023; Accepted March 16, 2023

ABSTRACT: Solar energy had become the main energy industry of renewable energy along with hydroelectric power generation. One of the technologies that contributed to the popularization of photovoltaic power and the decrease in the unit price of photovoltaic modules was the large-area solar cell. However, as the area increased, the light receiving area increased and the current value increased accordingly. Since power loss occurs when the current value was large, the number of busbar was increased to increase the current collection rate, and a technology to lower the current value through half-cutting was developed. The bus bar of the solar cell served as a passage through which the generated current was transmitted. This was because when the number of busbar decreases, the moving distance of electrons increased, so the amount of power generation decreases and when it increases, shadows occurred. An important aspect of the electrode design was the optimal balance of these busbars and number of fingers. Therefore, in this study, the characteristics of the solar cell according to the number of front bus bars of the large-area solar cell were simulated using Griddler 2,5 pro. After selecting the number of busbar with the best characteristics, the difference was compared by varying the number of fingers and a better direction for the number of cutting was presented.

Key words: Large area, Multi busbar, Short circuit current, Cutting, Simulation

Nomenclature

Area : 실제 면적, cm^2

P_m : 출력, W

I_{sc} : 단락 전류, A

V_{oc} : 개방 전압, V

V_{mp} : 최대출력전압, V

I_{mp} : 최대출력전류, A

FF : Fill Factor, %

Eff : 효율, %

Subscript

BOS : balance of system

PERC : passivated emitter and rear cell

CTM : cell to module

1. 서론

태양광 에너지는 수력 발전과 더불어 신재생 에너지의 주축 에너지 산업으로 자리 잡았다. 태양광의 가격 하락과 동시에 많은 가정용 태양광이 보급되었으며 전체 약 54% 수준인 575GW의 신규 설치가 예상된다. 이러한 태양광 산업의 발전에 기여한 기술들 중 하나는 태양전지의 대면적화이다. 기존에 사용하던 M2 ($15.675 \times 15.675 \text{ cm}^2$) 사이즈가 아닌 M6 ($16.6 \times 16.6 \text{ cm}^2$) 이상의 M10 ($18.2 \times 18.2 \text{ cm}^2$), M12 ($21.0 \times 21.0 \text{ cm}^2$) 사이즈의 태양전지들은 출력을 높임과 동시에 BOS (balance of system) 비용을 저감시켰다. 이는 경제적인 효과를 높여 2024년 이후에는 M6 이상의 태양전지 점유율이 약 97%로 예상된다¹⁻⁴⁾. 하지만 태양전지가 대면적화되면서 증가한 전류가 모듈의 전력 손실로 이어질 수 있다. 대면적 태양전지들은 전류 수집률을 높이기 위해 주로 Multi busbar 형태의 half-cut 전극 패턴으로 생산된다⁵⁾. Multi busbar 형태란 수집된 전하를 외부로 전송하는 통로인 버스바의 두께를 줄이고 개수를 늘린 것이다. Multi busbar

*Corresponding author: jaehyeong@skku.edu

태양전지의 경우 버스바의 두께가 줄어 개수가 증가하여도 기존 태양전지도바 음영 비율이 낮기 때문에 전류값이 더 높으며 버스바 사이의 간격도 좁아져 수집효율이 증가해 특성이 개선되었다. 하지만 버스바의 개수를 계속 증가시켜도 태양전지 특성이 무한히 좋아지는 것은 아니기 때문에 대면적 태양전지 설계가 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 Autocad 2022를 사용하여 M12 대면적 태양전지 전면의 버스바 개수를 가변하여 설계하였고 Griddler 2.5 pro 시뮬레이션을 통해 특성을 비교하였다. 최근 생산되는 M12의 버스바 개수가 12개인 점을 고려하여 가변 범위를 10개부터 14개로 설정하였고 가장 높은 출력을 지닌 버스바 패턴에서 핑거 수를 추가로 변경하여 값을 추출하였다⁶⁾.

2.1 시뮬레이션 검증

Griddler 2.5 Pro는 태양전지의 특성을 계산하는 시뮬레이션으로 설계한 패턴과 입력 파라미터에 따라 각 등가회로를 형성하고 해당 등가회로를 연결하여 전기적인 특성을 확인할 수 있다⁷⁾. 우선적으로 Griddler 2.5 Pro 시뮬레이션 및 Table 1의 입력 파라미터들의 검증을 위하여 제조사에서 제공한 M12 사이즈의 multi busbar 태양전지와 동일한 전극 패턴을 Autocad 2022로 설계하여 특성을 비교하였다. Table 1의 파라미터들 중 버스바와 핑거는 같은 Ag로 면저항(busbar & finger sheet resistance)은 문헌값을 참조하여 2.82 mΩ/sq, 접촉저항(finger contact resistance)은 3 mΩ/sq을 사용하였다. 에미터층의 면저항(emitter sheet resistance)은 일반적인 결정질 실리콘 태양전지 값인 85를 적용하였다⁸⁾. J01 및 J02는 재결합과 관련된 파라미터로 문헌값에서 제공한 값을 사용하였으며 JL 값은 여러 제조사의 태양전지 특성값과 비교하여 선정하였다⁹⁾.

Fig. 1은 AOLI사의 태양전지(AL-G12M210-12BB, AOLI SOLAR, China)와 DS사의 태양전지(210 mm M12 Mono PERC solar cell, DS New Energy, China) 패턴과 이를 참고하여 Autocad 2022로 설계한 도면을 나타내었다. Wafer Ingot diameter는 29.5 cm, wafer length와 width는 21 cm로 설계하였으며 전면의 버스바 개수는 12개로 설정하였다. Multi busbar 태양전지 양

Table 1. Input parameters used in simulation

Simulation Input Parameter	
Busbar sheet resistance (mΩ/sq)	2.82
Finger sheet resistance (mΩ/sq)	2.82
Finger contact resistance (mΩ/sq)	3
Emitter sheet resistance (Ω/sq)	85
Passivated area-J01 (fA/cm ²)	62
Passivated area-J02 (nA/cm ²)	3
Metal contact area-J01 (fA/cm ²)	664
Metal contact area-J02 (nA/cm ²)	3
JL, non-shaded area (mA/cm ²)	41.5

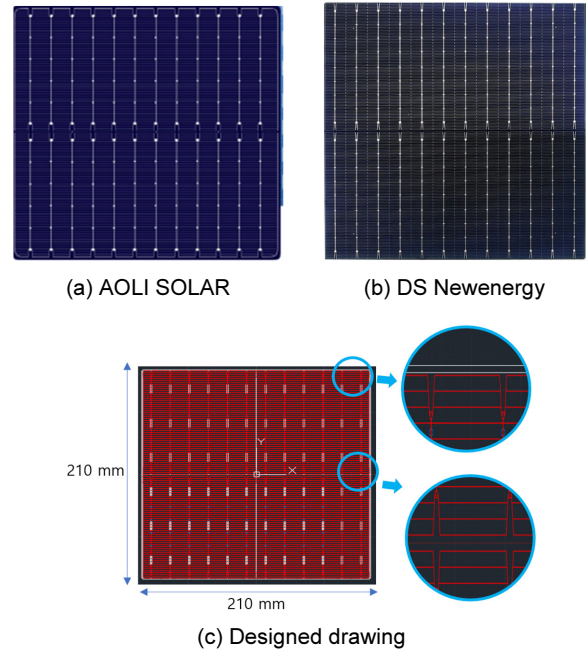


Fig. 1. Solar cell provided by the manufacturer and the designed solar cell drawing

Table 2. M12 characteristic values provided by manufacturer and values extracted by simulation

Parameter	M12		
	Simulation	AOLI solar	Ds newenergy
Voc (V)	0.69	0.69	0.68
Isc (A)	17.81	18.13	18.24
Vmp (V)	0.59	0.59	0.58
Imp (A)	16.97	17.15	17.39
Pm (W)	10.06	10.05	10.05
FF (%)	82.11	80.71	81.3
Eff (%)	22.81	22.8	22.8

edge 쪽의 패턴 및 half cut을 위한 중심부의 공간을 고려하였다.

제조사에서 제공한 태양전지 특성과 Griddler 2.5 pro를 통해 추출한 특성을 Table 2에 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 출력 오차는 거의 없었으며 최대 오차는 Imp에서 약 2.44%로 높은 정확도를 나타내었다.

2.2 대면적 multi busbar 태양전지 전극 설계

태양전지는 전면 전극에 해당되는 버스바, 핑거의 개수 등에 따라 특성이 달라지기 때문에 각 전극 구조에 따른 시뮬레이션이 필요하다. 본 연구에서는 대면적 multi busbar 태양전지의 전극 패턴 설계를 진행하기 위하여 M12 (21.0 × 21.0 cm²) 사이즈의 태양전지를 Half cut 이후 전면 버스바 개수를 가변하였다. 핑거 수는 105개로 고정하고 버스바의 가변 범위는 10개에서 14개로 현재 상용화되어있는 12개를 포함한 총 5개를 비교하였으며 Fig. 2는 버스바 개수에 따른 도면을 나타내었다. 버스바가 증가

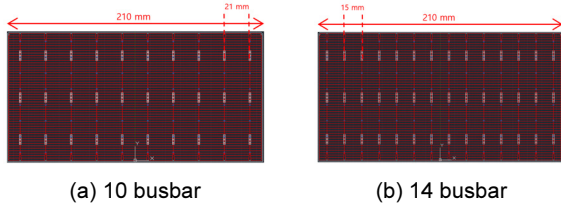


Fig. 2. Multi busbar solar cell half cut drawing

할수록 사이의 간격은 감소하며 10개일 때 21 mm에서 14개인 경우 15 mm로 6 mm 차이가 발생하였다.

전면 버스바의 두께는 0.1mm이고 후면 Ag pad의 두께는 1.5 mm, 핑거의 두께는 60 um로 설정하였다.

버스바 개수를 가변한 이후, 가장 좋은 특성을 지닌 버스바 개수에서 핑거 개수를 가변하였다. 핑거 개수의 가변 범위는 100 개에서 120개로 가변하였으며 각 특성값을 추출하여 비교하였다. 또한, 이미지 MAP 방식을 통해 전압 분포를 파악해 과전압 및 누설 등 도면에 문제가 없는지를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

M12 Half-cut 태양전지 전면 버스바를 10개부터 14개까지 가변한 특성을 Table 3에 나타내었다. 소수점 둘째자리까지 작성하였고 값의 차이를 보여야하는 곳은 셋째자리까지 표기하였습니다. 증가한 버스바의 개수만큼 태양전지 전면에는 음영면적이 증가하여 수광 면적이 줄어들기 때문에 버스바 개수가 증가할수록 Isc 값은 약 0.004A씩 감소하였다. 하지만 증가한 버스바만큼 전하의 수집 경로가 늘어나고 전류값이 낮아지면서 Fill factor가 증가하여 버스바 12개에서 효율이 22.801%로 가장 높았다.

가장 특성이 좋았던 12개의 버스바에서 전면 핑거 수를 가변한 결과를 Table 4에 나타내었다. 핑거 수도 버스바와 동일한 형태로 증가할수록 Isc는 감소, Fill factor는 증가하였다. 핑거 수 105개에서 22.801%로 가장 높은 효율을 보였으며 120개에서 22.745%로 가장 낮았다. 버스바를 가변했을 때보다 Isc의 변화 폭이 0.01A로 증가하였지만 이는 측정오차 범위에 해당되는 낮

Table 3. Half cut solar cell characteristics according to the number of busbar

Parameter	M12				
	10	11	12	13	14
Area (cm ²)	220.48	220.48	220.48	220.48	220.48
Voc (V)	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
Isc (A)	8.915	8.911	8.907	8.902	8.898
Pm (W)	5.023	5.025	5.027	5.026	5.026
FF (%)	81.94	82.01	82.09	82.13	82.17
Eff (%)	22.786	22.793	22.801	22.798	22.796

Table 4. Half-cut solar cell characteristics by changing number of fingers in 12 busbars

Parameter	M12				
	95	100	105	110	120
Area (cm ²)	220.48	220.48	220.48	220.48	220.48
Voc (V)	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
Isc (A)	8.932	8.917	8.907	8.891	8.871
Pm (W)	5.024	5.025	5.027	5.023	5.014
FF (%)	81.78	81.95	82.09	82.19	82.28
Eff (%)	22.790	22.792	22.801	22.782	22.745

은 수치이다.

전력 손실은 수식 (1)과 같이 저항에 전류 제곱을 곱한 값으로 전류값이 큰 영향을 미친다. 그러므로 대면적 태양전지의 경우 전류를 낮추기 위해서는 핑거나 버스바의 가변이 아닌 분할 수를 늘리는 것이 더 유리하다. 태양전지의 분할 수를 증가시켜도 전압은 동일하지만 전류 값이 분할 수에 비례하여 감소하기 때문에 동일 저항에서 발생하는 손실이 감소되며 Table 5에 분할 수를 늘린 태양전지 특성값을 나타내었다.

$$P = R * I^2 \tag{1}$$

Table 5. Large area solar cell characteristics according to the number of division

Parameter	M12			
	Full	Half	3-cut	4-cut
Area (cm ²)	440.96	220.48	146.98	110.23
Voc (V)	0.69	0.69	0.69	0.69
Isc (A)	17.81	8.91	5.97	4.43
Pm (W)	10.06	5.03	3.35	2.51
FF (%)	82.11	82.09	81.71	82.02
Eff (%)	22.809	22.801	22.817	22.747

분할 수를 달리하여 시뮬레이션을 진행한 결과, 4분할에서 기존 풀사이즈 태양전지 전류의 1/4 정도인 약 4.433A 값을 얻을 수 있었다. Half-cut의 경우 전류값이 1/2 줄어들기 때문에 수식 (1)에 의해 동일 저항에서 발생하는 손실이 약 75% 감소한다. 4-cut의 경우 1/4 줄어들어 약 93.75%가 감소하여 높은 출력 향상을 기대할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 M12 사이즈의 대면적 태양전지에서 전력 손실을 최소화하기 위하여 Multi busbar 형태의 전극 패턴의 태양전지의 버스바 및 핑거 개수를 가변하였을 때의 태양전지의 특성을 비교하였다. Griddler 2.5 pro를 사용하여 태양전지의 특성을 도출하였고 제조사에서 제공하는 특성과 비교하여 검증하였

다. 전면의 버스바 개수를 10개에서 14개까지 가변한 결과, 12개에서 가장 높은 특성이 나타났고 해당 버스바에서 핑거수를 가변하였다. 105개의 핑거에서 출력 5.027 W로 가장 높았지만, 버스바 및 핑거를 가변하였을 때의 전류 및 출력 차이가 크지 않았다. 전력 손실의 경우 저항과 전류의 공급의 곱으로 이루어지기 때문에 전류값을 낮춰줄 필요가 있다. 그러므로 버스바 및 핑거의 가변보다 분할 수를 증가시키는 것이 전력 손실을 최소화하는데 유리하다고 판단하였으며 분할 수에 따른 특성을 추가로 시뮬레이션하여 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 분할 수가 증가함에 따라 단락 전류가 4 cut에서 약 4.433A로 풀 사이즈 태양 전지 기준 1/4로 감소하였으며 이는 동일 저항에서 발생하는 손실을 약 93.75% 줄일 수 있다. 이후 연구에서는 각 분할 수에 따른 태양전지를 모듈로 제작하였을 때의 특성 비교 및 Cell to Module Loss (CTM loss) 비교가 필요하다.

후 기

본 연구는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.20213030010430, 양면형 모듈 경쟁력 강화를 위한 핵심 기술개발).

References

1. Lee Sang-hee, et al., Changes in the Silicon Painting Photovoltaic Industry to Large Area Wafers, Journal of the Korean Photovoltaic Society 7.2, 16-21 (2021).
2. Joshi, Arati, Afrah Khan, and S. P. Afra, "Comparison of half cut solar cells with standard solar cells," 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), IEEE, 2019.
3. Kim, Y.K., and Chang, B.M., "Estimation of LCOE for Korean PV projects: For the ones that financial investors participated in," New. Renew. Energy, 8(3), 23-39 (2012).
4. J. Müller et al., "Resistive power loss analysis of PV modules made from halved $15.6 \times 15.6 \text{ cm}^2$ silicon PERC solar cells with efficiencies up to 20.0%," IEEE J. Photovolt., 5(1), 189-194 (2015).
5. Braun, Stefan, et al., "High efficiency multi-busbar solar cells and modules," IEEE Journal of Photovoltaics 4.1, 148-153 (2013).
6. Huang, Guo-ping, et al., "Study of the twelve busbar technology and the stress-induced degradation within the solar modules," 2nd International Conference on Electrical and Electronic Engineering (EEE 2019). Atlantis Press (2019).
7. Won Je Oh, Ji Su Park and Jae Hyeong Lee, "Design of Electrode Structure for Reducing Ag Paste for Shingled PV Module Application," Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers 32.4, 267-271 (2019).
8. Saint-Cast, Pierre, et al., "Analysis of the losses of industrial-type PERC solar cells," physica status solidi (a) 214.3, 1600708 (2017).
9. Fellmeth, T., et al., "Recombination at metal-emitter interfaces of front contact technologies for highly efficient silicon solar cells," Energy Procedia 8, 115-121 (2011).