

DC Series 아크 고장 검출 및 소호를 위한 전력 수준 변조 설계 방법

김완*, 박화평*

*금오공과대학교 전자공학과

*한국에너지공과대학교 차세대 그리드

e-mail: a103203@kumoh.ac.kr

Design methodology of power level modulation for DC series arc fault detection and extinguishing

Wan Kim*, Hwa-Pyeong Park*

*electronic engineering, Kumoh National Institute of Technology

*Grid Modernization, Korea Institute of Energy Technology

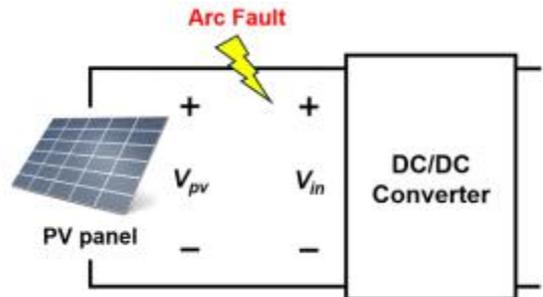
요약

최근 태양광 시스템의 사용 증가로 인해 DC 직렬아크 고장의 빈도가 크게 증가했다. 본 연구에서는 PV 패널과 DC 직렬 아크 고장의 특성에 대한 비교 분석을 수행하고, 이를 바탕으로 PV 발전 성능 저하를 최소화하면서 DC 직렬 아크 고장을 효과적으로 탐지할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하고자 한다. 본 연구는 PV 패널과 DC/DC 컨버터 사이에서 발생하는 DC 직렬 아크에 초점을 맞추고 있다. DC/DC 컨버터를 사용하여 DC 직렬 아크 고장을 검출하고 소호할 뿐만 아니라 아크고장이 아닌 일사량 변화와 같은 정상 상태에서 PV 발전량 감소를 최소화 하는 알고리즘을 구현하였다.

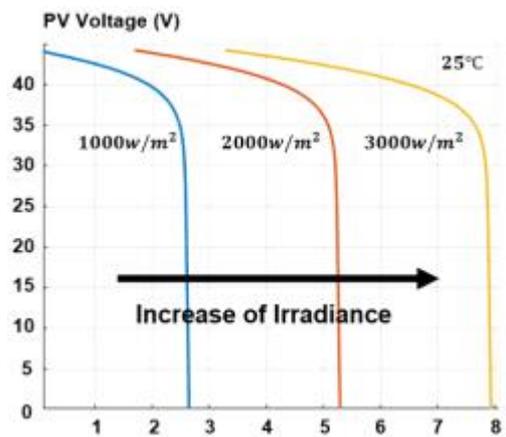
1. 서론

전 세계적으로 산업 및 기술 발전과 급속한 인구 증가로 인해 전기 에너지에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다^[1]. 전통적으로는 재생 불가능한 에너지원은 고갈과 환경 오염 문제로 인해 지속 가능성이 낮다. 반면, 재생 가능 에너지는 이러한 문제를 해결할 수 있다. 특히 태양광 에너지는 무소음 운영, 낮은 유지비, 그리고 높은 환경 친화성으로 인해 점점 중요성이 증가하고 있다^[2]. 그러나 이러한 태양광 시스템에서는 DC 아크가 발생할 수 있다. DC 아크란 DC 시스템 내 연결 부위의 작은 틈을 통해 발생하는 전기적 결합을 뜻한다^[3]. DC 아크는 전류의 경로에 따라서 직렬 아크와 병렬 아크 고장으로 분류한다^[4]. 병렬 아크고장은 아크가 발생할 때 전류 변화가 크기 때문에 검출하기 비교적 쉬우나, 직렬의 경우 아크가 발생할 때 전류 변화가 작아 검출이 어렵다^[5]. 따라서 직렬 아크고장을 검출하고 소호하는 것은 태양광 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있다.

전통적으로는 AFDD(아크 고장 검출 장치)가 직렬 아크고장을 검출하는 데 사용되어 왔다. 그러나 태양광 시스템이 더 복잡해짐에 따라 더 많은 AFDD가 필요하게 되어 설치 비용이 증가한다. 따라서 이 연구는 기존의 방법의 문제점을 해결하기 위해 AFDD에 의존하지 않고 태양광 시스템의 기존 DC/DC 컨버터를 사용하여 DC 직렬 아크고장의 검출 및 소호 과정을 진행하며, 동



[그림 1] PV와 DC/DC 컨버터 사이 아크 고장 발생



[그림 2] PV V-I곡선

시에 태양광 시스템의 발전 성능 저하되지 않도록 하는 접근 방식을 제안한다.

2. 본론

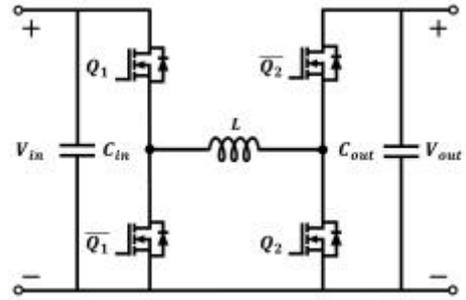
그림 1와 같이 태양광(PV) 패널과 DC/DC 컨버터 사이에서 직렬 아크고장이 발생하면, DC/DC 컨버터의 입력 전압이 떨어진다. 그러나 입력전압 감소는 아크고장 뿐만 아니라 일사량 변화와 같은 정상상태에서도 발생한다. 따라서 입력전압 감소가 일사량 변화 때문인지 아니면 직렬 아크고장 때문인지 구분하기 위해 논문에서 제안하는 방법은 입력 전압이 떨어질 때 입력 전류를 줄이는 것이다. 그림 1를 수식적으로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$V_m = V_{pv} - V_{arc} \quad (1)$$

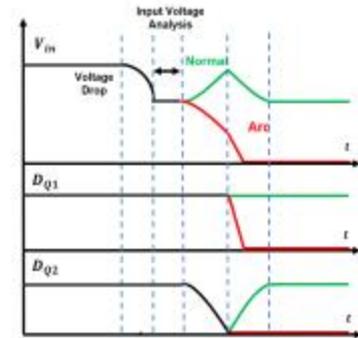
직렬아크고장의 경우, 입력 전류를 줄이면 아크 저항이 크게 증가하고, 그 결과 아크 전압 (V_{arc})도 증가한다. V_{arc} 가 증가하면 수식 (1)에 따라 DC/DC 컨버터의 입력 전압(V_m)이 감소한다. 만약 입력 전류를 완전히 0A로 줄이면 회로는 개방 회로 상태로 전환된다. 이때 아크가 소호된다.

일사량 변화로 인해 DC/DC 컨버터의 입력전압이 감소한 경우, 입력 전류를 줄이면 그림 2와 같이 PV 전압(V_{pv})이 PV V-I 곡선에 따라 증가한다. V_{pv} 가 증가하면 (1)에 따라 V_m 도 증가한다. 따라서 직렬 아크고장의 경우와는 달리, 입력 전류의 감소는 V_m 의 증가로 이어진다. 입력 전류는 DC/DC 컨버터의 Duty를 이용하여 줄일 수 있다.

본 논문에서 제안하는 방법은 그림 3과 같은 Non-Inverting Buck Boost 컨버터를 사용한다. 이 종류의 DC/DC컨버터는 Buck과 Boost 과정을 동시에 수행할 수 있다. 아크고장이 발생할 경우, D_{Q2} (Boost Duty)는 DC 아크고장을 검출하기 위해 낮춰지고, D_{Q1} (Buck Duty)는 입력 전류를 완전히 0A로 떨어뜨리기 위해 사용된다. 이를 통해 직렬 아크고장을 완벽하게 소호할 수 있다. 그림 4는 본 논문에서 제안한 아크고장 검출 및 소호 과정을 보여준다. 입력 전압이 t_0 와 t_1 사이에 감소될 때, t_1 과 t_2 사이에 입력 전압이 분석되어 전압 강하가 발생했는지 결정된다. 전압 강하를 인식한 후, D_{Q2} 는 사인과 형태로 0으로 줄어든다. 이 시간 동안 입력 전압이 상승하면 정상으로 간주되고, D_{Q2} 는 다시 원래의 Duty로 사인과 형태로 증가한다. 만약 D_{Q2} 를 사인과 형태로 0으로 줄인 후 입력 전압이 감소하면, 아크고장으로 판단되며, 이후 D_{Q1} 은 선형으로 1에서 0으로 줄어든다. D_{Q1} 이 0에 도달하면 입력 전류는 0A가 되어 아크고장이 완전히 소호된다. 이 방법을 제안하는 이유는 Duty를 사인과 형태로 줄여 발전 효율을 극대화할 수 있기 때문이다. 발전효율에 대한 계산식은 아래와 같이 나타낼 수 있다. 수식 (2)와 (3)을 통해 일사량과 같은 정상상태일 때 발전효율을 Matlab으로 분석한 결과, 사인과와 선형으로 감소 및 상승하는 2가지 경우에 대해서 각각 효율이 82.88%와 76.34%로 나타났다. 기존 시간 도메인 아크고장 검출 과정에서는 바로 0A까지 전류를 낮추어 아크를 소호했으므로



[그림 3] Non-Inverting Buck Boost 컨버터



[그림 4] 논문에서 제안하는 아크 고장 검출 및 소호과정
본 연구에서 제안하는 과정이 정상상태에서의 PV 발전량 감소에 대한 효율이 좋음을 알수있다. 또한, D_{Q2} 로 아크고장을 검출하고 D_{Q1} 으로 소호함으로써, 아크고장이 없을 때 불필요하게 전류를 0A로 줄이지 않아 PV 시스템의 전력을 크게 저하시키지 않고 작동한다는 장점이 있다.

$$E = \int_0^t V(t) \cdot I(t) dt \quad (2)$$

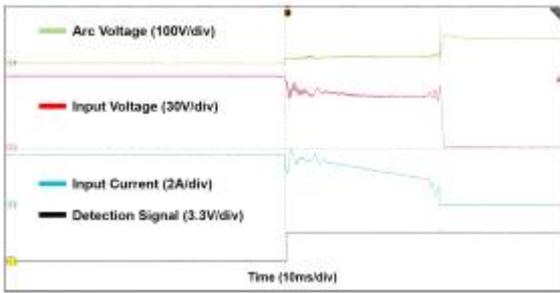
$$\eta = \frac{E}{E_{normal}} \cdot 100\% \quad (3)$$

그림 5는 표1의 조건에서 그림 1과 같이 PV와 DC/DC 컨버터 사이 아크고장이 발생하는 실제 실험에서 아크가 발생했을 때, 제안한 알고리즘을 사용하여 아크 결함 검출 및 소호 과정을 보여주고 있다. 아크 결함이 발생하면 입력 전압이 떨어지고, 이때 D_{Q2} 는 0.5에서 0으로 줄어들어 전류를 감소시킨다. D_{Q2} 가 줄어들면서 입력 전압이 계속 감소하면 아크 결함으로 판단된다. D_{Q1} 은 0.9에서 0으로 낮춰져 전류를 0A까지 낮춰 아크 고장을 완전히 소호할 수 있다.

3. 결론

본 논문은 검출 다양한 일사량 조건 하에서도 태양광 발전 시스템의 DC 직렬 아크고장을 효과적으로 검출할 수 있게 해주며, 일사량 변화와 같은 상황에서 큰 전력 손실 없이 정상상태로 판정하여 태양광 시스템의 안정성을 증진시킬 수 있다. 제안된 방법은 DC/DC 컨버터 내의 NIBB 컨버터를 사용하여 아크고장의 검출 및 소호 과정을 분리하고, Duty를 줄

이는 과정에서 사인과 패턴을 구현하는 것으로 실험을 통해 검증하였다. 실험 결과 아



[그림 5] 제안된 알고리즘을 적용한 직렬 아크고장 검출 및 소호

ctions on Power Electronics, vol. 21, no. 3, pp. 633–639, May 2006

[5] S. Dhar, R. K. Patnaik and P. K. Dash, "Fault Detection and Location of Photovoltaic Based DC Microgrid Using Differential Protection Strategy," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 5, pp. 4303–4312, Sept. 2018

[표 1] 실험 set up 및 NIBB 사양

Parameter	Value
V_{in}	90–47V
Controller	PYNQ-Z2
Q_1-Q_2	TP65H070LDG
Line inductance	3mH
I_{in} Range	1.85A

크 진단 시 개방회로 상태를 만들어 아크를 소호하였다. 이를 통해 제안한 아크고장 검출 방법의 타당성을 입증하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2024-00509127 및 No. RS-2024-00420752)

참고문헌

[1] M. Hammoud, B. Shokr, A. Assi, J. Hallal, and P. Khoury, "Effect of dust cleaning on the enhancement of the power generation of a coastal PV-power plant at Zahrani Lebanon," Sol. Energy, vol. 184, p. 195–201, May 2019

[2] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu and Y. Kang, "A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 7, pp. 2622–2628, July 2008

[3] S. Lu, B. T. Phung and D. Zhang, "Study on DC series arc fault in photovoltaic systems for condition monitoring purpose," 2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Melbourne, VIC, Australia, 2017

[4] M. Naidu, T. J. Schoepf and S. Gopalakrishnan, "Arc fault detection scheme for 42-V automotive DC networks using current shunt," in IEEE Transa