

임피던스 측정을 통한 DC 직렬 아크고장 검출기술

김완, 박화평
 금오공과대학교 전자공학부 제어및로봇학과
 hppark@kumoh.ac.kr

DC Series Arc Fault Detection Technology through Input Impedance Measuring

Wan Kim¹, Hwa-Pyeong Park¹
 control and robotics, Kumoh National Institute of Technology¹

ABSTRACT

본 연구에서는 아크 고장을 임피던스의 변화와 연관 지어 검출하고자 한다. 아크 고장에서 급격하게 임피던스가 변화하게 되는데, 이때 변화하는 임피던스를 측정하여 정상상태 대비 비이상적인 변화라면 아크 고장 검출로 판단한다. 따라서 기존의 방법보다 효율적으로 아크 고장 검출이 가능해지고자 한다.

1. 서론

탄소중립을 실현하기 위해 재생에너지의 중요도가 상승하고 있다 [1]. 그중에서 태양광(PV) 에너지 사용이 가정과 산업에 널리 사용되는 친숙한 에너지원이 되었다 [2]. 이에 따라 태양광(PV) 시스템의 안전성이 중요한 이슈로 부각되고 있다. 태양광 (PV) 시스템은 DC 전원을 사용하므로 DC 아크 고장을 유발할 수 있다. 느슨한 커넥터, 손상된 케이블 등으로 인해 아크 고장이 발생할 수 있다 [3]. DC 아크 고장은 직렬 및 병렬상태에서 모두 발생할 수 있다. 병렬 아크 고장은 전류의 급격한 변화로 인해 쉽게 탐지할 수 있지만 [4] [5], 직렬 아크 고장은 전류 변화가 미미하여 감지하기 상대적으로 더 어렵다. 기존에는 arc fault detection devices(AFDD)를 이용하여 아크 고장을 탐지하였으나, 본 논문에서는 임피던스의 변화를 측정하는 방식으로 더 효율적인 방식이게 아크 고장 탐지를 제시하고자 한다.

아크 고장이 발생하면, 고장 지점에 없었던 임피던스가 생기게 된다. 이를 알고리즘을 추가한 전류와 전압을 실시간으로 감지하여 임피던스를 측정하면, 비정상적인 임피던스 변화를 발견할 수 있다. 이를 아크 고장으로 판단할 수 있게 된다. 이를 통해 본 논문에서는 임피던스 측정을 통한 아크 고장 검출 방법에 대해서 설명하고자 한다.

그림 1은 아크 고장 발생 시에 임피던스를 측정하기 위한 본 논문의 기본 모델이다. Closed Loop와 특정 알고리즘을 통해 Boost converter를 구동시킨다. 아크 고장이 발생하면 고장 부분에 임피던스가 발생하게 되고, 이때 컨버터 입력전류 (I_{pv})와 컨버터 입력전압 (V_{pv})를 검출하여 임피던스를 측정한다. 2장에서는 알고리즘의 동작 원리에 대해서 설명하고, 3장에서는 실제 실험을 통한 검증을 한다.

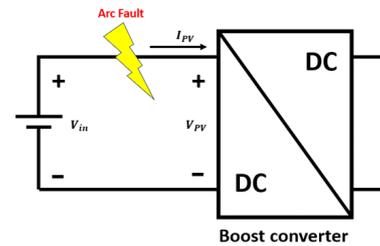


그림 1 아크 고장 검출을 위한 Boost Converter
 Fig.1 Boost Converter for Arc Fault Detection

2. 임피던스 측정 과정

2.1 임피던스 측정

임피던스를 측정하는 과정은 다음의 4가지 과정을 거친다. 1) Duty에 리플 값을 추가한다. 2) 리플 값을 통해 생긴 입력전류와 입력전압을 $\alpha-\beta$ 변환을 통해 AC 파형만 얻는다. 3) d-q 변환을 한다. 4) 얻은 d-q 값으로 계산을 통해 임피던스값을 계산한다 [6].

그림 2 (a) 는 Duty에 AC 리플을 주입하는 과정을 나타낸다. 그림 2 (a)에서 생성한 PWM인 S1과 S2가 그림 2 (b)의 각각의 Mosfet을 켜서 Boost converter를 동작시킨다. Duty에 AC 리플을 주입하고 Boost converter를 구동시키면 Boost converter의 입력에 임피던스가 있을 때, 컨버터의 입력전류와 입력전압이 AC를 포함한 값이 나오게 된다. 이후 Band pass filter를 이용하여 AC만 확인할 수 있게 된다. 그리고 All pass filter를 이용하여 Band pass filter를 통해 구한 AC에서 90도 지연시킨 AC 파형을 얻을 수 있다. 이후 얻은 $\alpha-\beta$ 파형을 통해 D-Q 변환을 진행 할 수 있다. D-Q 변환은 시간에 따라 일정한 D와 Q값으로 나타낼 수 있어서, 임피던스 계산에 유리하다. D-Q 변환으로 얻은 값과 식 (1)을 통해 임피던스값을 구할 수 있게 된다.

$$|ZT| = \frac{\sqrt{V_q^2 + V_d^2}}{\sqrt{I_q^2 + I_d^2}} \quad (1)$$

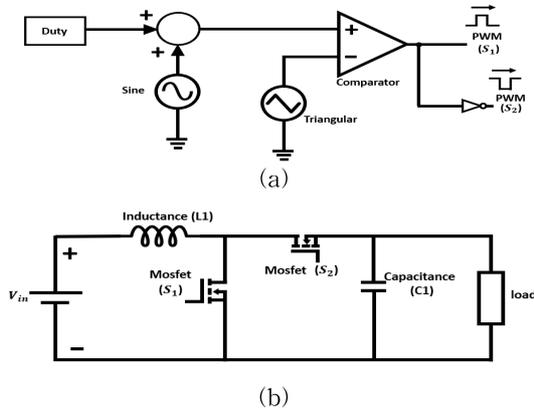


그림 2 (a) Duty에 sine파를 포함한 PWM 생성 (b) Boost converter
Fig.2 (a) PWM generation including a sine wave in the duty
(b) Boost converter

3. 실험적 결과

임피던스 측정을 통한 아크 고장 판단을 위해서 실제 실험을 통해 진행하였다. Boost converter는 TDHBG1200DC100를 사용하였고, 제어기는 FPGA인 PYNQ-Z1으로 진행하였다. 실험은 입력전압 90V에서 출력전압 190V로 올리는 과정으로 진행하였고, 출력단에 부하 전류원과 연결하여 1.4A로 진행하였다. 90V에서 190V로 부스트 컨버터로 진행할 때, 임피던스를 잘 측정하기 위해 입력단에 저항 2.2Ω을 추가하여 진행하였다. 또한 sine 파는 주파수는 1500hz이고, duty 크기의 5%를 sine 파의 크기로 주입했다.

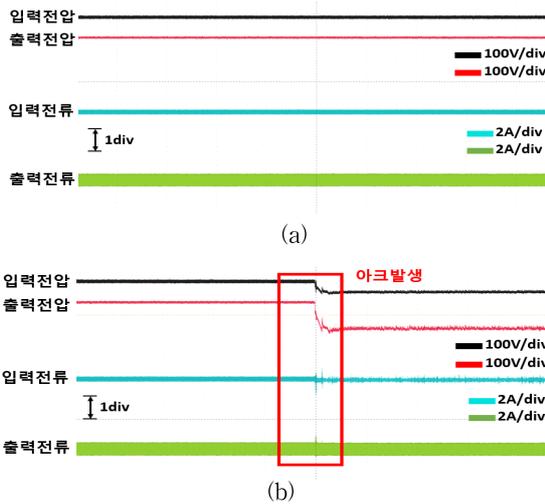


그림 3 (a) 정상상태 동작파형 (b) 아크 고장 상태 동작파형
Fig.6 (a) Steady state operating waveform
(b) Arc fault state operating waveform

저항으로 인해, 그림 3 (a)와 같이 출력전류가 1.4A일 때 입력전압이 평균 79V가 되었다. 그림 3 (b)는 아크 고장상태일 때의 동작 파형으로 아크가 발생했을 때 입력전압이 떨어짐을 알 수 있다. 입력전압과 입력전류를 FPGA의 ADC를 통해 센싱하였고, FPGA의 Jupyter notebook을 사용하여 데이터를 처리하였다.

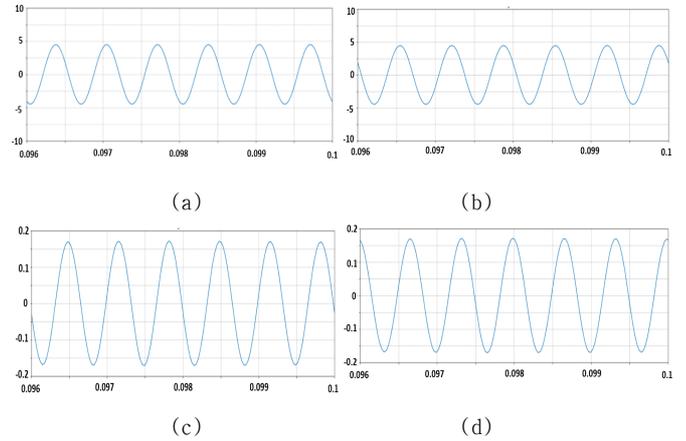


그림 4 (a) 입력전압 α 파형, (b) 입력전압 β 파형,
(c) 입력전류 α 파형, (d) 입력전류 β 파형
Fig.7 (a) Input Voltage α waveform, (b) input Voltage β waveform, (c) input current α waveform, (d) input current β waveform

Jupyter를 통해 입력전압과 입력전류를 감지하고 α-β 변환을 진행하면 그림 4와 같이 나온다. Jupyter 내의 python 코드를 이용하여 그래프로 나타내었다. 이후 입력전압의 α-β파형과 입력전류의 α-β파형을 이용하여 그림 5 (a)와 같이 D-Q 변환을 구할 수 있다. 정상상태의 D-Q 변환을 구한후 식 (1)을 진행하면 $|ZT| = 25.69$ 가 나온다. 정상상태임에도 불구하고 임피던스값이 나오는 이유는 아크 발생시 임피던스를 더 잘 보기 위해 넣은 저항과 Boost Converter 사이의 선에 의한 추가 임피던스 때문이다.

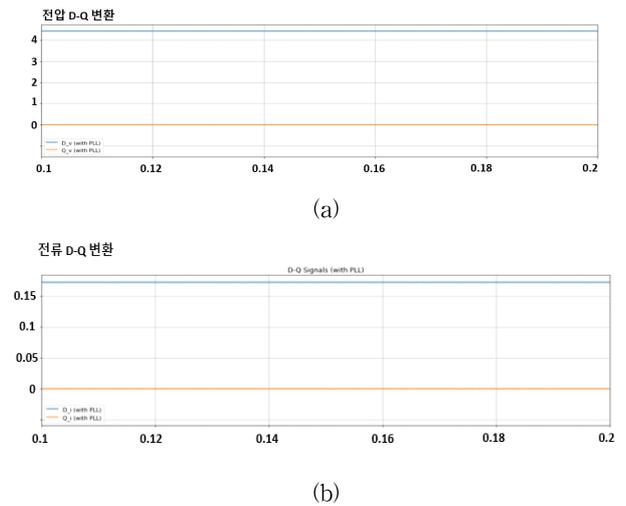
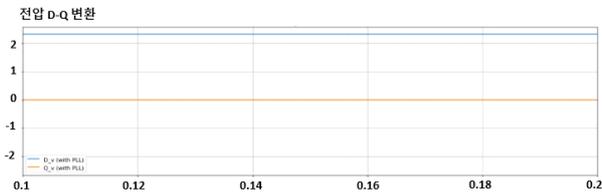
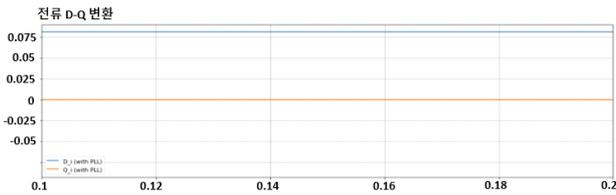


그림 5 (a) 정상상태 입력전압 D-Q변환, (b) 정상상태 입력전류 D-Q변환
Fig.5 (a) Steady state input voltage D-Q transformation, (b) Steady state input current D-Q transformation

아크 고장 상태에서도 정상상태와 같은 과정을 반복하여 그림 6의 입력전압과 입력전류의 D-Q 변환을 진행하였다. 아크 상태의 D-Q 변환을 구한후 식 (1)을 진행하면 $|ZT| = 28.75$ 가 나온다. 정상상태의 임피던스보다 커짐을 알 수 있고, 이를 통해 아크 고장 판단이 가능하게 된다.



(a)



(b)

그림 6 (a) 아크 고장 상태 입력전압 D-Q변환, (b) 아크 고장 상태 입력전류 D-Q변환

Fig.6 (a) Arc fault state input voltage D-Q transformation, (b) Arc fault state input current D-Q transformation

4. 결론

아크 고장 발생 시에 생기는 임피던스를 본 논문에서는 duty에 AC 리플을 더하고 생기는 입력전류와 입력전압의 AC 파형 분석을 통해 임피던스를 구한다. 아크 발생 시 임피던스가 커지는 방식을 이용하여 효율적으로 실시간 임피던스의 수치만으로 아크 고장 검출이 가능하게 된다.

이 논문은 금오공과대학교의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고문헌

- [1] K. Jia, Z. Yang, Y. Fang, T. Bi, and M. Sumner, "Influence of inverter-interfaced renewable energy generators on directional relay and an improved scheme," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 12, pp. 11843 - 11855, Dec. 2019.
- [2] [3] H. -P. Park, M. Kim and S. Chae, "Smart DC Optimizer for DC Series Arc Fault Detection and Extinguishing," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 9, pp. 10117-10121, Sept. 2022
- [4] M. Naidu, T. J. Schoepf, and S. Gopalakrishnan, "Arc fault detection scheme for 42-V automotive DC networks using current shunt," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 3, pp. 633 - 639, May 2006
- [5] C. He, L. Mu, and Y. Wang, "The detection of parallel arc fault in photovoltaic systems based on a mixed criterion," *IEEE J. Photovolt.*, vol. 7, no. 6, pp. 1717 - 1724, Nov. 2017.

- [6] Y. -D. Lee, S. -Y. Park and S. -B. Han, "Online Embedded Impedance Measurement Using High-Power Battery Charger," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 1, pp. 498-508, Jan.-Feb. 2015