

# EV 충전장치의 아크 고장 검출을 위한 출력 필터 설계

이학송, 이다혜, 박화평  
금오공과대학교

## Arc Fault Detection with Output Filter Design for EV Charger

Hak-Song Lee, Da-hye Lee, Hwa-Pyeong Park  
Kumoh National Institute of Technology

### ABSTRACT

EV 충전장치는 커넥터를 통해 EV에 연결되고, 잦은 커넥터의 사용은 마모를 통해 아크 고장을 발생시킨다. 본 논문은 EV 충전장치의 출력 전압 및 전류를 안정적으로 제어하기 위한 출력단 필터 설계를 통해 커넥터에서 발생할 수 있는 DC 직렬 아크 고장을 검출하는 방법을 제안한다. 이를 위해 출력 필터의 구조에 따른 정상상태 및 아크고장 상태 특성을 Time-Domain 기반으로 분석하고, 아크 고장에 적합한 출력 필터를 설계한다. 설계된 출력 필터의 Time-Domain 동작을 활용한 DC 직렬 아크 고장 검출 알고리즘을 제안하고, 실험을 통해 고장 검출 성능을 검증한다.

### 1. 서 론

최근 2차전지 등 ESS 관련 기술과 산업이 성장함에 따라 EV(Electric Vehicle) 충전장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. EV 충전장치는 AC 전원을 DC 전원으로 바꾸어 배터리에 전기를 공급하는 컨버터가 내장되어 있으며 이는 커넥터를 통해 EV에 연결된다. 하지만, ESS 및 EV 충전장치에서의 잦은 커넥터 사용으로 발생하는 DC 직렬 아크는 전기적 화재를 야기할 수 있다.<sup>[1]</sup> 기존 DC 직렬 아크 고장을 검출하기 위해 주파수 성분 분석을 통한 고장 검출 기술이 개발되어 왔다. 본 논문에서는 EV 충전장치의 출력단 필터 구조에 따른 아크 발생 시 Time Domain 특성을 분석하고, 효과적으로 고장 검출을 할 수 있는 필터 구조와 그에 따른 설계법을 제안한다.

## 2. 아크 고장 검출을 위한 출력 필터 설계

### 2.1절 EV 충전장치 출력단 필터 선정

출력전류/전압 리플을 줄이기 위해 LC필터를 사용하지만, 배터리 충전장치의 사양을 만족하기 위해 LCL필터혹은 LCLC 필터를 사용하기도 한다<sup>[2]</sup>. 따라서 아크고장 발생 시 출력전류를 LC, LCL, LCLC 필터 구조에 따라 Time Domain 기반으로 분석하여 아크 고장 검출 성능을 비교분석하고자 한다.

#### 2.1.1절 벡컨버터 필터 설계

배터리 충전에서 쓰이는 벡컨버터의 사양을 표(1)에 나타내었다<sup>[2]</sup>. 필터구조에 따라 필터 파라미터를 사양에 맞도록 선택하여 표(2)에 나타내었다.

표 1 배터리 충전 벡컨버터 사양

Table 1 Battery charge buck converter specification

| $V_{in}$ (V) | $V_B$ (V) | $I_O$ (A) | $\Delta V_O$ (mV) | $\Delta I_O$ (mA) |
|--------------|-----------|-----------|-------------------|-------------------|
| 230          | 54.6      | 13        | 1% $V_B$ (=546)   | 5% $I_O$ (=650)   |

표 2 필터구조에 따른 파라미터 값

Table 2 Parameter Formula according to Filter Structure

| 필터 구조<br>파라미터 | LC  | LCL    | LCLC |
|---------------|-----|--------|------|
| $L_1$ (uH)    | 500 | 71     | 150  |
| $C_1$ (uF)    | 400 | 223.65 | 15   |
| $L_2$ (uH)    | -   | 5.57   | 20   |
| $C_2$ (uF)    | -   | -      | 150  |

### 2.1.2절 벡컨버터 평균모델

아크고장 시 출력전류의 파형을 수치적으로 해석하기 위해 벡컨버터의 평균모델을 만들고, 해당 모델이 실제 벡컨버터와 유사하게 동작하는지 확인한다. 아크고장 시 출력전류가 떨어지는 정도는 벡컨버터와 평균모델이 같음을 그림(2)를 통해 확인하였다. 따라서 출력전류의 시뮬레이션 및 수학적 해석을 벡컨버터 평균모델을 바탕으로 하고자 한다.

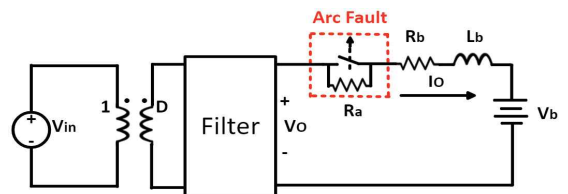


그림 1 벡컨버터 평균모델

Fig. 1 Buck converter average model

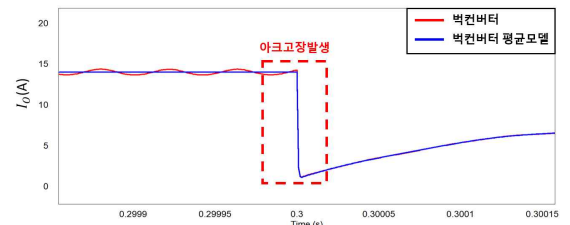


그림 2 아크고장 시 모델별 출력전류

Fig. 2 Output current by model in case of arc failure

### 2.1.3절 아크고장 시 필터구조에 따른 출력전류

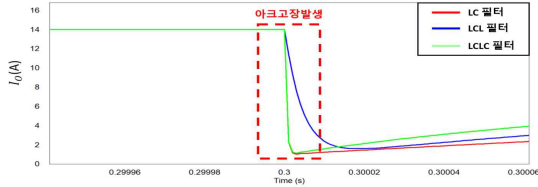


그림 3 필터구조에 따른 출력전류 차이

Fig. 3 Differences in output current according to structure

표(2)의 필터 파라미터를 그림(1) 모델로 시뮬레이션 한 결과는 그림(3)과 같다. 아크고장 시 출력전류가 급격하게 떨어질수록 아크고장검출능력이 좋다. 하지만, LCL필터의 경우 다른 필터에 비해 전류가 순간적으로 떨어지지 않아 검출능력이 좋지 않았다. 또한, 충·방전시스템에서 LC필터로도 원하는 전류/전압리플 성능을 만족할 수는 있지만, 필터의 크기가 커지고, 응답특성이 느려진다는 문제로 인해 LCLC필터가 연구되고 있다<sup>[3]</sup>. 따라서 본 논문에서는 아크를 검출하기 위한 EV충전장치의 출력단 필터로 LCLC 필터를 제안하고자 한다.

### 2.1.4절 아크고장 시 출력전류 수치적 해석

그림(4)의 시뮬레이션을 통해 아크고장 발생 시 출력전류의 하락폭은 부하쪽과 붙어 있는 수동소자( $L_2$ 와  $C_2$ )의 영향이 큼을 확인할 수 있었다. 이를 통해 LCLC필터에서 수동소자 2개( $L_1$ 와  $C_1$ )를 소거하여 출력전류의 수식을 더 간소화할 수 있다.

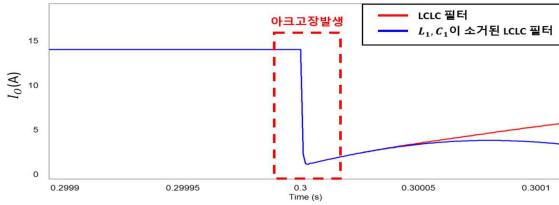


그림 4 LCLC필터와 등가모델의 차이

Fig. 4 Differences between LCLC Filters and Equivalent Models

$L_1$ 와  $C_1$ 가 소거된 등가모델에서 출력전류를 시간  $t$ 에 대하여 식을 세우면 식(1)과 같다. 전류가 최소로 떨어지는  $t$ 와  $\alpha(t)$ 의 경우 본 논문에서는 생략하였다. 그림(5)는  $L_2$  혹은  $C_2$ 를 고정하고 나머지 수동소자 변화에 따른 출력전류 변화이다. 아크고장 시 출력전류의 하락되는 정도는  $C_2$ 의 영향이 큼을 확인하였다.

$$i_{\text{arc}} = \frac{DV_{\text{in}} - V_b}{R_a + R_b} - \frac{(L_2 + L_b)L_2 L_b}{L_2 C_2 (R_a + R_b)^2} e^{-\frac{L_2 + L_b}{2L_2 C_2 (R_a + R_b)} t} \alpha(t) \quad (1)$$

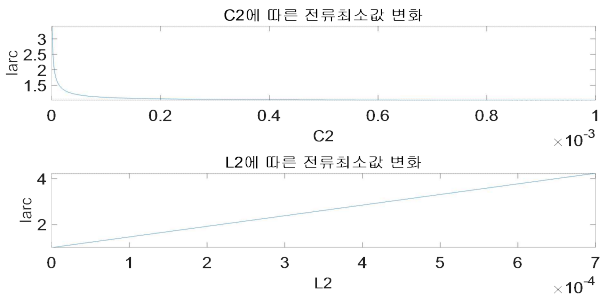


그림 5  $L_2, C_2$ 에 따른 전류하락폭

Fig. 5 current drop due to  $L_2, C_2$

### 2.2절 실험결과

필터구조에 따른 아크고장검출능력을 보기 위해 표(1)의 파라미터로 실험을 수행하였다. LCL필터의 경우 출력 인덕터로 인해 전류 하락폭이 작았다. LCLC필터의 경우 전류가 순간적으로 0까지 떨어짐을 확인하였다. 출력전압은 두 필터 모두 15V 정도 증가하였다.



그림 6 아크고장 시 LCL필터 출력파형

Fig. 6 LCL filter output waveform in case of arc failure

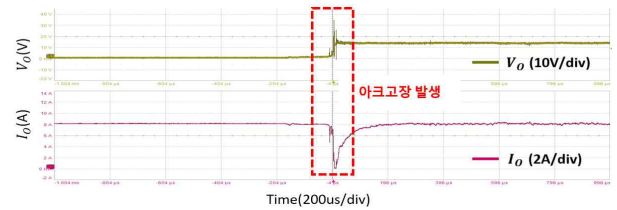


그림 7 아크고장 시 LCLC필터 출력파형

Fig. 7 LCLC filter output waveform in case of arc failure

## 3. 결론

본 논문에서 EV 충전장치에서 출력필터구조에 따른 아크고장검출능력을 PSIM을 통해 분석하였다. 실험결과 LCLC필터가 아크고장검출에 가장 효과적임을 확인하였다. 또한 필터의 수동소자 중 부하쪽 커패시터의 크기가 아크고장검출능력에 주는 영향이 큼을 Matlab을 통해 확인하였다.

이 논문은 2023년 금오공과대학교의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

## 참 고 문 헌

- [1] V. Cattin, P. Perichon, J. Dahmani, B. Schwartzmann and V. Heiries, "Detection of electric arcs in large batteries," 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), Barcelona, Spain, 2013, pp. 1-9
- [2] E. Şanal, P. Dost and C. Sourkounis, "LCL-Filter design for a battery charger based on buck converter (DCDC converter)," 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Birmingham, UK, 2016, pp. 617-621
- [3] W. -S. Lee, J. -H. Kim, J. -Y. Lee and I. -O. Lee, "Design of an Isolated DC/DC Topology With High Efficiency of Over 97% for EV Fast Chargers," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 12, pp. 11725-11737, Dec. 2019