ISSN 1975-8359 [Print] / ISSN 2287-4364 [Online]
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 73, no. 2, pp. 312~319, 2024
https://doi.org/10.5370/KIEE.2024.73.2.312

AC Arc Detection Method based on Periodicity of High-Frequency Current Components

고주파 전류 성분의 주기성을 이용한 교류 아크 감지 기법

Yong-Heon Kim · Sang-Shin Kwak

김용헌* · 곽상신†

Abstract

This paper presents an algorithm for detecting arcs by analyzing high-frequency signals of current. Series AC arcs were induced through experiments, capturing the current waveform during arc occurrences. In an AC system, arcs function akin to a switch, intermittently interrupting the circuit. The ignition and extinguishing phases of the arc generate periodic high-frequency component in the current, resulting from abrupt changes in its flow. Leveraging these distinctive features, this paper suggests an arc detection algorithm by scrutinizing the duration and occurrence intervals of high-frequency components. To enhance detection accuracy, loads were categorized as resistive or non-resistive, and specific algorithms were applied accordingly. A notch filter was employed to analyze specific frequency ranges in the time domain. To validate the algorithm, detection times were measured using arc current data for each type of load.

Key Words

AC Arc Detection, Series Arc, Shouldering, Time Domain, High-frequency component

1. 서 론

전기 화재의 주요한 원인 중 하나는 전력 시스템 선로의 노화 및 접촉 불량에 의한 아크이다. 선로 사이에 갭(gap)이 발생했을 때 갭 양단의 전압이 충분히 높다면 공기의 절연이 파괴되고 아크가 발생하여 전류가 흐르게 된다. 이때 아크의 온도는 최고 6,000℃까지 상승하여 화재로 이어질 수 있기에 조속히 차단기를 작동시킬 수 있어야 한다. 이러한 아크는 지락 및 선간 단락 사고에 비해 검출이 까다로워 아크 검출 알고리즘은 다양한 방면으로 연구가 진행 중이다.

전력 시스템에서 발생하는 아크를 감지하기 위한 아크 감지 알고리즘은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로는 한 주기 내에서의 신호 변화를 관측하는 방법이 있고, 두 번째로는 주기적으로 변하는 신호의 변화를 관측하는 방법이 있다. 한 주기 안에서의 변화를 관측하는 경우 주로 시간 영역에서의 영점 교차 구간(ZCP)를 감지하는 방법[1-2],

EDM(Empirical mode decomposition)을 통해 IMF 성분을 분석하는 방법[3], wavelet transform을 이용하는 방법[4]등이 있다. 주기별로 변하는 신호를 감지하는 방법으로는 주로 FFT를 사용하여 주파수 대역의 변화를 감지하는 방법[4], 고조파 성분을 분석하는 방법[5]등이 있다. 이러한 신호를 분석하는 방법으로는 통계학적인 분석 기법[6], Neural Network의 적용[7-8]등이 제안되었다.

본 논문에서는 시간 영역에서 아크의 발생에 따라 주기적으로 발생하는 전류의 고주파 성분을 분석한다. 교류 전원 시스템에서 아크가 발생하면 전류의 고주파 성분이 주기적으로 증가한다, 이때 아크 후단의 부하 종류에 따라 고주파 성분의 발생 패턴이 달라진다. 이러한 특성을 활용하여 아크를 감지할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 아크가 발생하기 전 정상 구간과 비교하여 증가한 전류의 고주파 성분의 크기 및 지속 기간을 분석하여 아크 후단의 부하를 예측하고, 부하의 종류에 맞는 감지 알고리즘을 적용하여 아크를 감지하였다. 알고리즘을 검증하기 위해 부하의 종류별 아크 전류 데이터를 이용하여 감지 시간을 측정하였다.

† Corresponding Author : School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, Seoul, Korea
E-mail:sskwak@cau.ac.kr
https://orcid.org/0000-0002-2890-906X
* School of Electrical and Electronic Engineering, Chung-Ang University, Korea.
https://orcid.org/0009-0000-1232-4692
Received: Dec. 14, 2023 **Revised:** Jan. 16, 2024 **Accepted**: Jan. 17, 2024

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 아크 발생 시험

2.1 아크 발생 시험 구성

아크 발생 시험은 IEC 62606 기준에 따라 진행하였다. 교류 전력 시스템에서 아크를 발생시키고 전원 측 전류 Is와 아크 양단 전압 Varc를 취득하기 위해 다음과 같이 회로를 구성하였다.

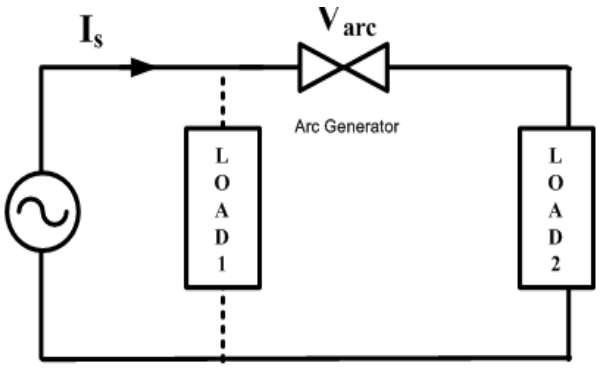


그림 1 아크 발생 시험 회로
Fig. 1 Experimental circuit for arc generation

그림 1에서 Load 1은 아크 전단의 부하, Load 2는 아크 후단의 부하이다. 아크 발생시 Load 2의 종류에 따른 부하전류 Is의 고주파수 성분 Ih를 분석하였다. Load 1과 Load 2에 각각 저항성 부하와 비저항성 부하를 바꿔달며 아크 발생 시험을 진행하였다.

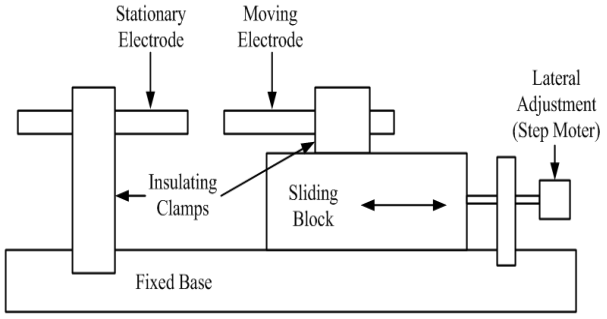


그림 2 아크 발생기 개요도
Fig. 2 Schematic diagram of the arc generator

시험 회로에 아크를 발생시키기 위해 아크 발생기를 사용하였다. 아크 발생기는 스텝 모터를 이용하여 전극을 이동시켜 시스템의 선로에 갭을 만드는 장치이다. 시험 데이터의 취득을 위한 오실로스코프는 Tektronix 사의 MSO305, 전류 프로브와 전압 프로브는 각각 동사의 TCPA300와 P5200A를 사용하였다. 취득한 데이터는 Matlab Software를 통해 분석하고, 아크 감지를 위한 알고리즘을 제작하였다.

2.2 전류 고주파 분석대역

아크의 고주파수 성분을 분석하기 위해 Matlab의 Band Pass Filter을 사용하였다. 아크 감지를 위한 분석 대역은 10kHz - 20kHz이며, 분석에 사용된 필터의 주파수 응답 그래프는 다음과 같다.

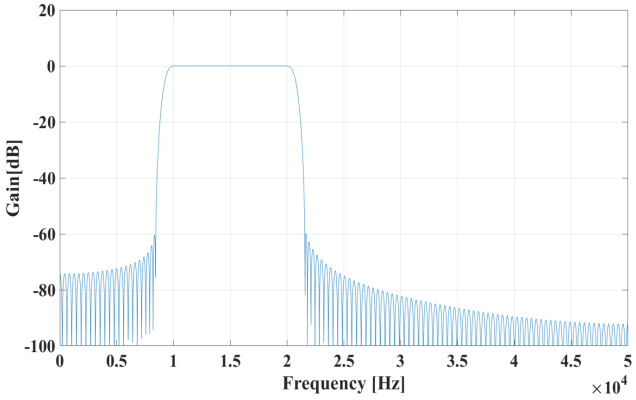


그림 3 Digital Filter의 주파수 응답 그래프
Fig. 3 Frequency Response of Digital Filter

3. 전류 고주파수 성분의 크기와 발생 간격

3.1 전압 파형

교류 전력 시스템에서 아크가 발생하면, 갭 양단의 전원에 의한 전압의 크기가 주기적으로 커졌다 작아지므로 아크 역시 주기적으로 점화되고 소호되기를 반복한다. 이러한 특성을 자세히 살펴보면 다음과 같다.

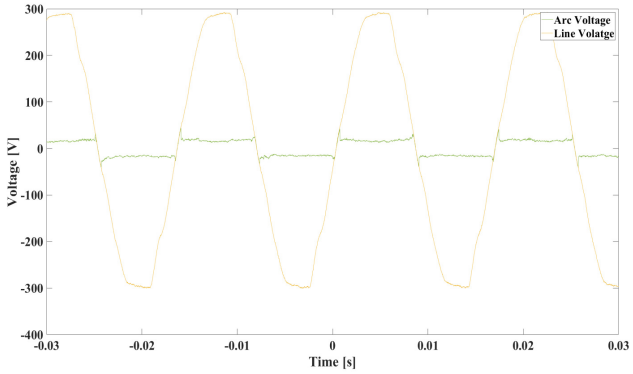


그림 4 아크 발생장치 양단의 전압과 전원 전압
Fig. 4 Voltage of arc generator and voltage source

그림 4는 그림 1의 시험 회로에서 아크 발생장치 양단의 전압(초록색)과 전원의 전압(노란색)을 도시한 것이다. 아크 발생장치 양단의 전압이 아크 점화 전압 이상이 되면 아크가 발생하게 된다. 아크가 발생하면 갭 양단의 전압은 20V 정도로 유지되며, 이 구간 동안은 공기의 절연이 파괴되어 전류가 흐르게 된다. 아크가 점화되는 시점은 전압의 영점을 기준으로 +5도에서 +70도 부근으로 다양하다. 갭 양단의 전압이 20V 아래로 내려가게 되면 아크가 소호되며 공기는 절연 능력을 회복하여 회로는 개방된 상태가 된다. 이때 갭 양단의 전압은 전원의

전압과 동일하다. 아크가 소호되는 시점은 전압의 영점을 기준으로 약 -5도이며, 이는 아크의 점화 시점에 비하면 비교적 일정하고 주기적이다. 따라서 AC 전력 시스템에서 아크가 발생하면 반주기(180도)마다 아크가 소호되고 점화되며. 이때 아크는 아크 후단의 회로를 절체하는 스위치와 유사한 특성을 보인다.

3.2 저항성 부하에 의한 아크 특성

이러한 아크의 스위치와 유사한 특성 때문에 아크가 점화되고 소호될 때 선로의 전류에는 급격한 변화가 생기게 된다. 따라서 아크가 점화되고 소호되는 시점에서, 전류의 고주파 성분이 증가한다. 저항성 부하에서 아크에 의한 전류 고주파 성분의 특성은 다음과 같다.

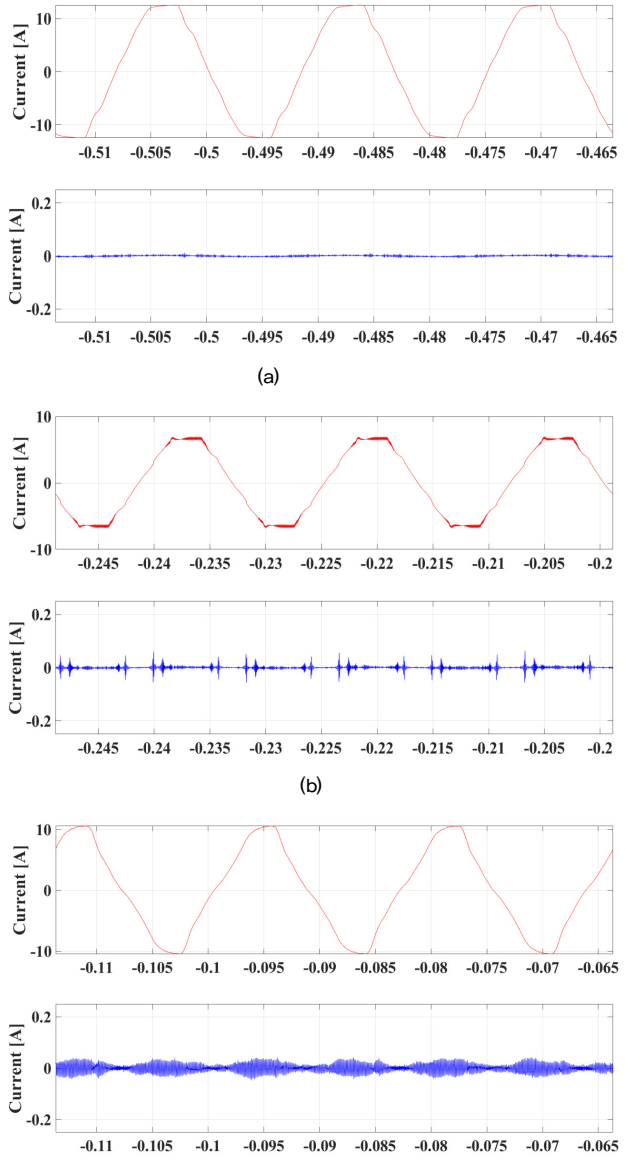


그림 5 아크 발생전 전류(상)와 전류의 고주파 성분(하)의 파형 (a) 저항 부하 (b) 형광등 (c) 아크 전단에 드릴을 추가한 저항 부하

Fig. 5 High frequency components of current before arc (a) resistance load (b) fluorescent lamp (c) resistance load with drill added to arc front end

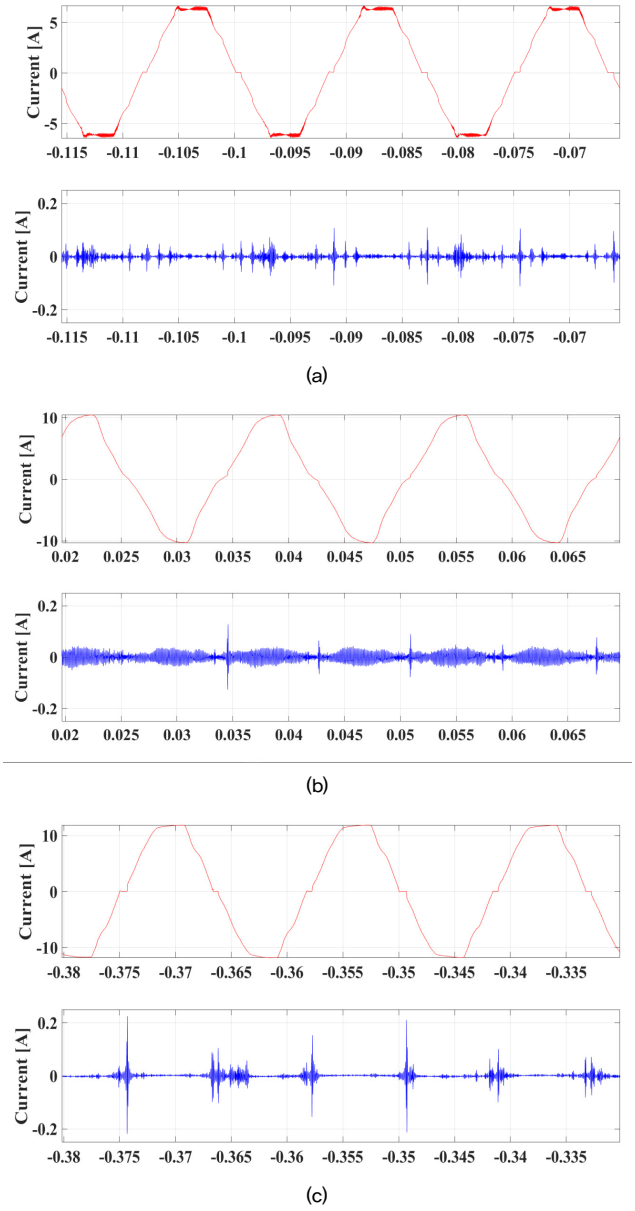


그림 6 아크 발생전 전류(상)와 전류의 고주파 성분(하)의 파형 (a) 저항 부하 (b) 형광등 (c) 아크 전단에 드릴을 추가한 저항 부하

Fig. 6 High frequency components of current after arc (a) resistance load (b) fluorescent lamp (c) resistance load with drill added to arc front end

그림 5와 그림 6은 그림 1의 회로에서 Load 2가 저항성 부하일 때 각각 아크 전/후의 전류 및 전류 고주파 파형이다. 아크가 점화되는 순간과 소호되는 순간 각각 100μ s - 1000μ s 정도의 짧은 시간에 고주파 성분이 발생한다. 아크가 소호될 때 발생하는 고주파 성분은 아크가 점화 될 때 발생하는 고주파 성분에 비해 작다는 특징이 있다. 그림 5의 (b)형광등 부하와 같이 반주기 내에 규칙적으로 노이즈가 존재하는 부하에서도 마찬가지로, 그림 6의 (b)와 같이 아크가 점화되고 소호되는 시점에 고주파 성분이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 아크 발생지점 전단에 드릴과 같은 비저항성 부하가 있을 때도 마찬가지이다. 그림 5와 6의 (c)는 그림 1의 회로 Load 1에 드릴 부하를 추가한 파형이다. 역시 아크가 점화되고 소호

되는 시점에 지속기간이 짧은 고주파 성분이 발생하였다. 저항 부하에서 아크가 발생하면 아크가 소화되는 -5도에서 고주파 성분이 비교적 작게 발생하고, 아크가 점화되는 +5도에서 70도 사이에서 비교적 큰 고주파 성분이 발생한다. 이러한 특성은 반주기(180도)마다 반복되어 발생한다. 아크가 소호된 후에는 아크 후단의 회로가 개방되므로 아크 후단 부하에 의한 부하전류가 흐르지 않는 ZCP가 발생한다. 아크가 다시 점화될 때까지 부하 전류는 감소하며, 이에 따라 고주파 성분 역시 감소할 수 있다. 인접한 반주기에서 이러한 아크에 의한 고주파 성분이 발생하는 지점 간의 간격은 약 162도에서 198도 사이로 일정하다. 이때 발생하는 전류의 고주파 성분 Ih의 첨두치의 진폭 Ipp 값과 영점을 기준으로 발생하는 각도 θ 는 선형적인 관계를 가진다.

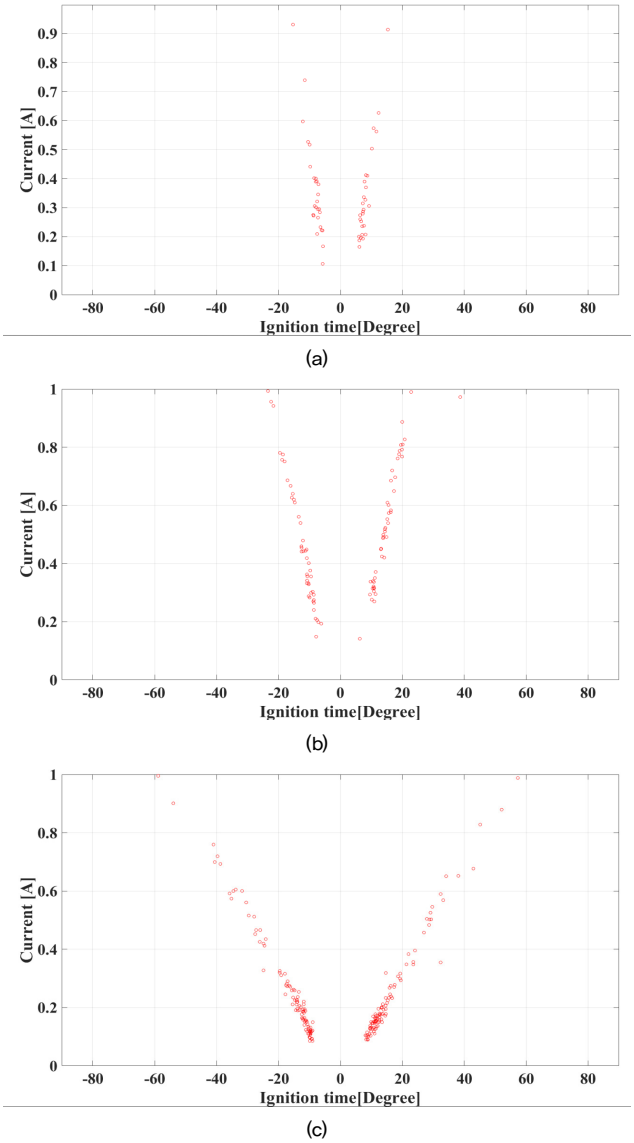


그림 7 아크 점화 시점과 전류 고주파 성분 크기 (a) 저항 부하 (b)형광등 (c) 아크 전단에 드릴을 추가한 저항 부하

Fig. 7 Arc ignition degree and amplitude of high frequency component of current (a) resistance load (b) fluorescent lamp (c) resistance load with drill added to arc front end

그림 7은 영점을 기준으로 반주기마다 아크가 점화되는 각도 θ 와, 점화시 발생하는 전류 고주파 성분의 첨두치의 진폭인 Ipp를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프의 x축은 점화 되는 각도, y축은 발생하는 전류 고주파 성분의 크기이다. 아크가 늦게 점화될수록, 점화 되는 전압은 커지며 이에 따라 전류의 변화 역시 커져 고주파 성분이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 아크 점화에 의한 전류 고주파 성분의 에 대하여 이를 수식으로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{pp} = k\theta \tag{1}$$

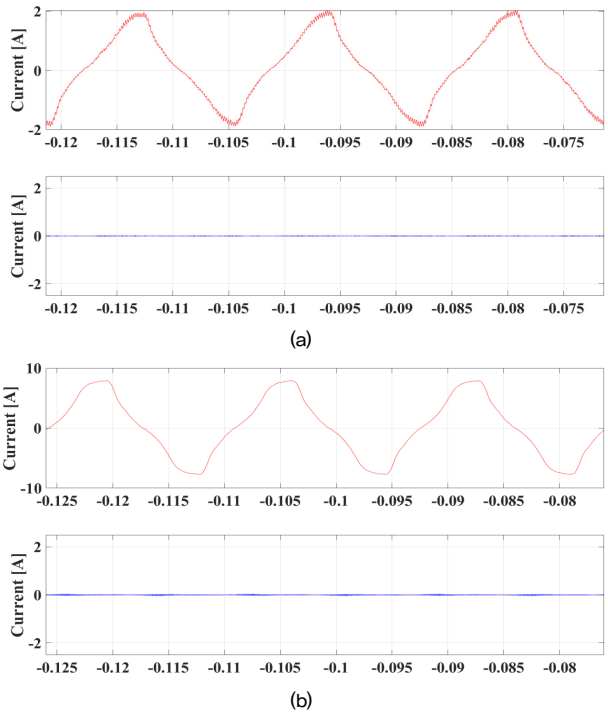
k는 그림 7의 그래프의 기울기이며, 아크 전/후단의 부하에 따라 결정되는 회로의 고유한 특성으로 볼 수 있다. n 번째 반주기의 전류 고주파수 성분의 크기 $I_{pp.n}$와 n-1 번째 반주기의 전류 고주파수 성분의 크기 $I_{pp.n-1}$에 대해 아크가 점화되는 간격을 식으로 표현하면 다음과 같다

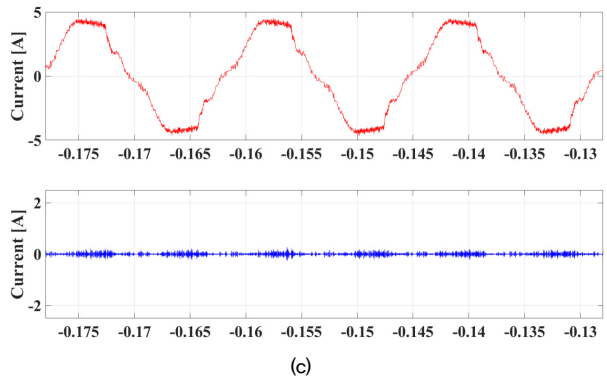
$$(I_{pp.n} - I_{pp.n-1}) = k(\theta_n - \theta_{n-1}) \tag{2}$$

저항성 부하에서 아크가 발생하면 k 값이 일정하게 유지된다는 특성이 있다.

3.3 비저항성 부하에서의 아크 특성

그림 1의 회로의 Load 2가 유도성 부하 및 스위칭 소자가 포함된 부하와 같은 비저항성 부하일 때, 아크 전/후의 전류 신호 및 고주파 성분의 파형은 다음과 같다.





(c)

그림 8 아크 발생전 전류(상)와 전류의 고주파 성분(하)의 파형 (a) 드릴(b) 진공청소기 (c) SMPS

Fig. 8 High frequency components of current before arc
(a) drill (b) vacuum (c) SMPS

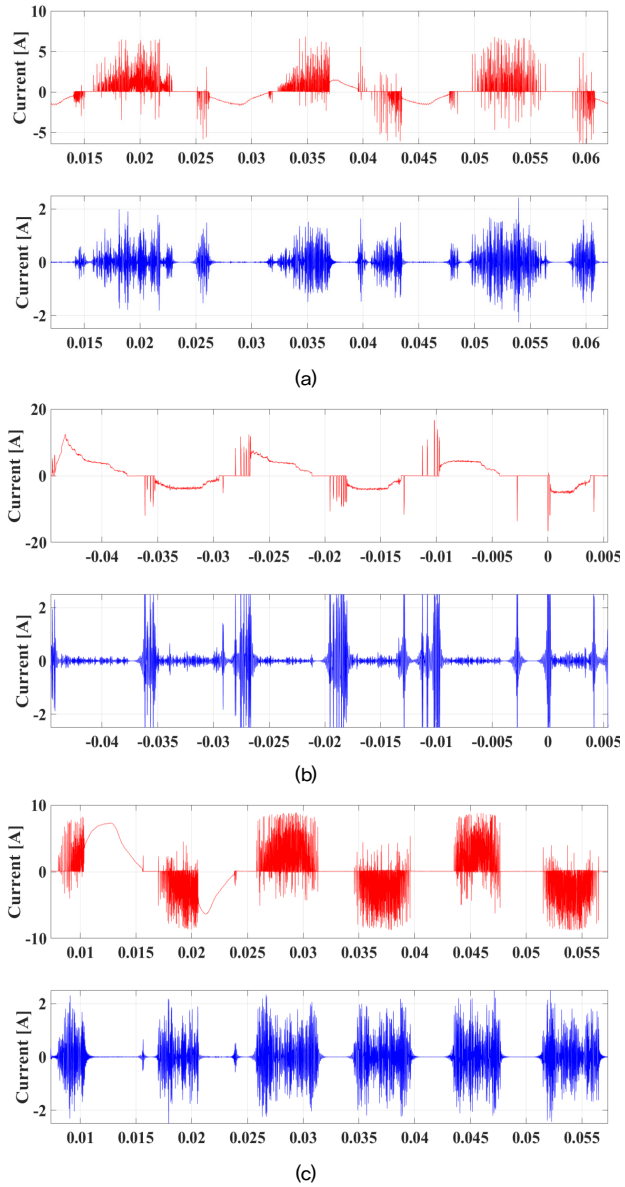


그림 9 아크 발생 후 전류(상)와 전류의 고주파 성분(하)의 파형 (a) 드릴 (b) 진공청소기 (c) SMPS

Fig. 9 High frequency components of current after arc
(a) drill (b) vacuum (c) SMPS

그림 8과 그림 9는 각각 드릴, 진공청소기, SMPS 부하의 아크 전/후의 전류 및 전류 고주파 파형을 나타낸 것이다. 그림 9에서 비저항성 부하에서 아크 발생시 전류가 요동치는 것을 확인할 수 있다. 이때 요동치는 전류의 진폭은 수 A 수준이다. 이것은 저항성 부하에서의 아크에 의해 발생하는 고주파 성분에 비해 수십배 이상으로 큰 값이다. 이러한 성분은 1ms 이상 지속되며 1/4주기(4.165ms) 이상 지속되기도 한다. 그림 9의 (b) 진공 청소기 부하에서는 고주파 성분이 1/4주기 이상 지속되어 아크가 점화되어있는 구간 내내 고주파 성분이 유지되었다. 인접한 반주기간 아크에 의한 고주파 성분의 발생이 시작되는 지점간의 간격은 저항성 부하와 마찬가지로 약 162도에서 198도 사이로 일정하다.

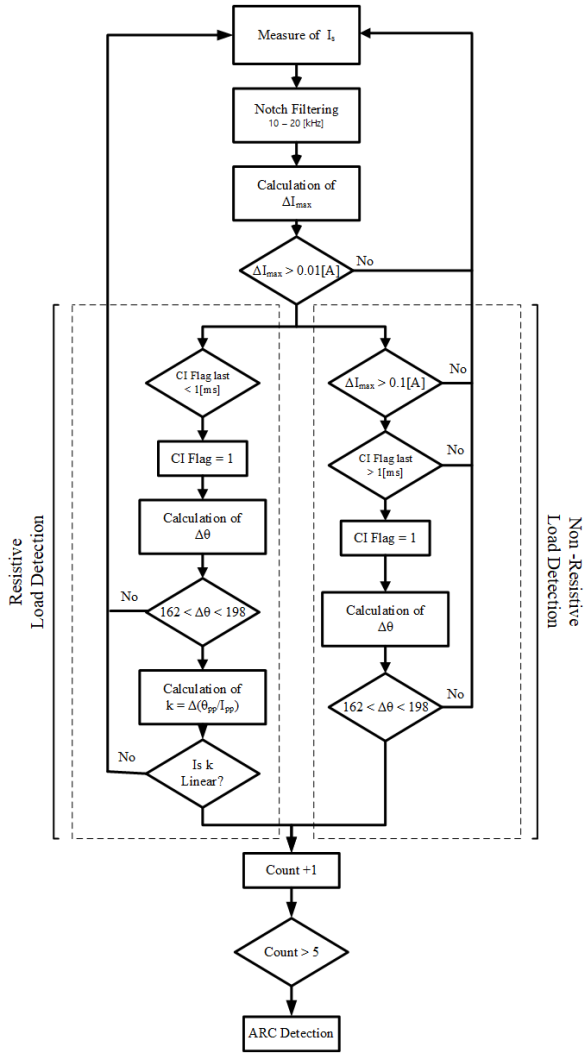


그림 10 아크 검출 알고리즘의 Flowchart

Fig. 10 Flowchart of arc detection algorithm

4. 아크 검출 알고리즘

4.1 알고리즘 개요

앞서 3절에서는 아크 발생에 의해 전류 고주파 성분이 주기

적으로 증가하는 것을 확인하였다. 본 연구가 제안하는 아크 감지 알고리즘에서는 증가하는 전류의 고주파 성분의 크기와 발생 시간, 그리고 발생 간격을 분석하여 아크를 감지한다. 전류 고주파 성분의 증가를 확인하기 위해 아크 발생 전 정상 구간의 고주파 성분의 최댓값과 현재의 고주파 성분을 비교하여 $\triangle I_{\max}(t)$ 를 계산한다. 정상 구간에 비해 고주파 성분이 증가했다면, $\triangle I_{\max}(t)$ 의 크기와 지속 시간을 분석하여 부하를 저항성 부하와 비저항성 부하로 구분한다. 전류의 고주파 성분이 반주기마다 일정한 간격으로 증가한다면, 아크로 판단할 수 있다. 단발적인 외부 노이즈에 의한 오동작을 방지하기 위해 연속되는 5개의 반주기동안 이러한 특성이 지속되는지 판단한다. 알고리즘에 대한 플로우 차트는 그림 10과 같다.

정상 구간과 비교하여 증가한 전류의 고주파 성분 $\triangle I_{\max}(t)$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다. 우선 전류의 고주파 성분 Ih를 평활화(smoothing)하기 위해 현재 시점 t에서 t-20까지 20샘플의 기간 동안의 Ih의 최댓값을 계산하여 $I_{\max}(t)$ 를 구한다. 이때 샘플링 주파수는 100kHz 이므로 1샘플은 10ms 에 해당한다.

$$I_{\max}(t) = \max(I_h(t-19), I_h(t-18), \ldots, I_h(t))) \quad (3)$$

현재의 고주파 성분과 정상 구간에서의 고주파 성분의 크기의 최댓값을 비교하기 위해 정상 구간의 80샘플간의 최댓값을 찾는다. $\hat{I}_n(t)$ 는 현재 시점 t로부터 1초전 n번째 주기의 t-40번째 값부터 t+40번째 값까지 80샘플만큼 길이의 값 중 최댓값을 의미한다.

$$\hat{I}(t) = \max(I_{\max}(t-40), I_{\max}(t-39), \ldots, I_{\max}(t+39), I_{\max}(t+40))) \quad (4)$$

현재 시점 t에서 평활화된 신호 $I_{\max}(t)$ 와 아크 발생 전의 신호의 최댓값 $\hat{I}_n(t)$ 을 비교하여 $\triangle I_{\max}(t)$ 를 구한다.

$\triangle I_{\max}(t)$ 는 현재 시점의 $I_{\max}(t)$ 에서 정상 구간의 7주기 동안의 $\overline{I_n}(k)$ 값 중 최댓값을 빼 계산한다.

$$\triangle I_{\max}(t) = I_{\max}(k) - \max(\hat{I}(t_1), \hat{I}(t_2), \ldots, \hat{I}_6(t), \hat{I}_7(t)) \quad (5)$$

7주기 동안의 $\overline{I_1}(k), \overline{I_2}(k), ,, \overline{I_7}(k)$ 중 최댓값이 $I_{\max}(t)$ 보다 크다면 전류의 고주파 성분이 증가하지 않았음으로 회로는 정상 구간임으로 판단할 수 있다. 이때의 $\triangle I_{\max}(t) = 0$ 으로 계산한다.

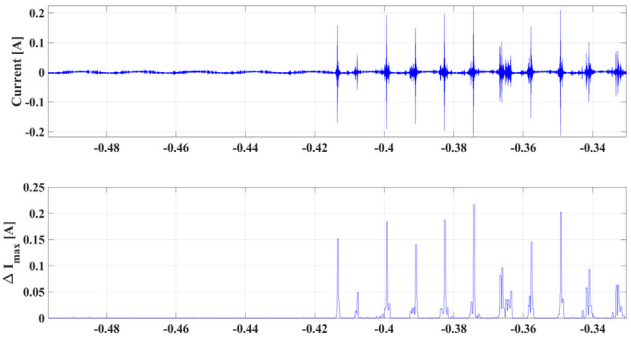


그림 11 아크 발생 전후의 전류 고주파 성분과 $\triangle I_{\max}(t)$
Fig. 11 High-frequency components of current and $\triangle I_{\max}(t)$ before and after arc

그림 11은 아크 발생 전후의 전류 고주파 성분 Ih와 전류 고주파 성분의 증가량 $\triangle I_{\max}(t)$ 의 파형을 각각 나타낸 것이다. 정상 구간에서는 고주파 성분이 증가하지 않았음으로 $\triangle I_{\max}(t)$ 는 0이고, 아크가 발생하면 전류 고주파 성분이 증가하므로 $\triangle I_{\max}(t)$ 는 0이 아닌 값을 가진다. $\triangle I_{\max}(t)$ 가 0보다 크다면, 고주파 성분의 증가가 아크에 의한 것인지 확인하기 위해 $\triangle I_{\max}(t)$ 의 크기와 지속 기간에 따라 부하를 분류하고 아크를 감지한다.

4.2 저항성 부하의 아크 감지 알고리즘

저항성 부하에서 아크를 감지하기 위해 짧게 지속되는 전류의 고주파 성분의 크기와 발생 간격간의 관계를 분석한다. 그림 12는 저항 부하의 아크 발생 전후로 전류의 고주파 성분 Ih, Ipp.n과 $\triangle\theta_n$ 의 관계를 나타내는 매개변수 k, 전류의 고주파 성분이 증가했음을 의미하는 CI Flag, 인접한 반주기간 아크 발생 간격$\triangle\theta$, 그리고 아크 감지 결과를 각각 도시한 것이다.

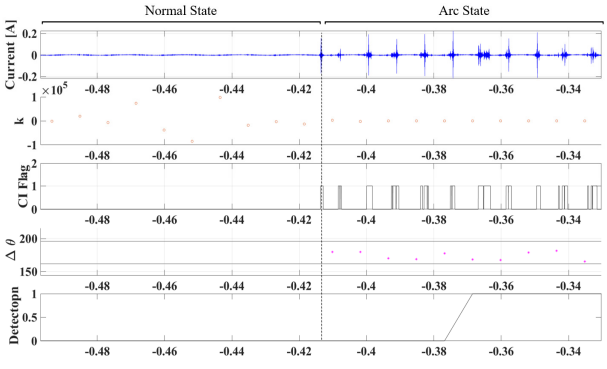


그림 12 저항 부하의 아크 감지 결과
Fig. 12 Result of arc detection in non-resistive loads

그림 12와 같이 저항성 부하에서 아크가 발생하면 주기적으로 전류의 고주파 성분이 증가한다. 이전 주기와 비교하여 전류 고주파 성분의 증가량 $\triangle I_{\max}(t)$ 가 0.01A보다 크고 0.1A

보다 작다면, 저항성 부하의 아크감지 알고리즘을 사용한다. $\triangle I_{\max}(t)$ 의 지속 시간이 1ms 이내로 짧다면, 전류가 증가했음을 알리는 CI(Current Increased) 플래그를 1로 셋(set) 한다. 인접한 반주기에서, CI Flag가 1로 셋 된 지점간의 거리가 162도에서 198도 사이에 존재한다면, 고주파 성분이 주기적으로 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 크기가 작고 지속 기간이 짧은 외부의 노이즈에 의한 오동작을 방지하기 위해 전류의 첨두치 Ipp와 인접한 반주기간의 발생 간격 $\triangle\theta_n$ 의 선형적인 관계를 이용한다. 앞서 3절에서 살펴보았듯. 저항성 부하에서 아크 발생시, 전류 고주파 최댓값 Ipp.n와 발생 간격 $\triangle\theta_n$ 는 선형적이다. 이때 Ipp.n과 $\triangle\theta_n$ 의 관계를 나타내는 매개변수 k는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$k = \frac{\triangle\theta_n}{(I_{pp.n+1} - I_{pp.n})} \tag{6}$$

아크가 발생하면 k는 일정한 값을 가지게 된다. 전류의 고주파 발생 지점이 연속된 5개의 반주기(2.5주기, 약 41.67ms) 동안 연속해서 발생하고, 이때의 k 값이 일정하게 유지된다면 아크로 판단할 수 있다.

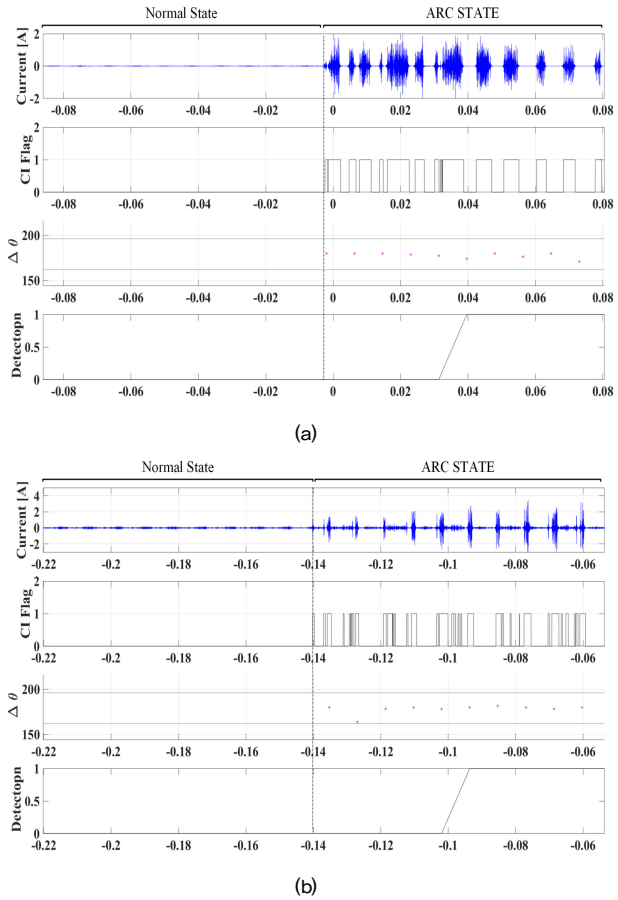


그림 13 비저항성 부하의 아크 감지 결과 (a) 드릴 (b) SMPS
Fig. 13 Result of arc detection in non-resistive loads (a) drill (b) SMPS

4.3 비저항성 부하의 아크 검출

비저항성 부하를 감지하기 위해서는 길게 지속되는 고주파 성분의 발생 간격을 분석한다. 그림 13의 (a)와 (b)는 각각 드릴 부하와 SMPS 부하의 아크 발생 전후의 전류의 고주파 성분 Ih, 전류의 고주파 성분이 증가했음을 의미하는 CI 플래그, 인접한 반주기간 아크 발생 간격△θ, 그리고 아크 감지 결과를 각각 도시한 것이다.

그림 13과 같이 드릴과 SMPS 부하 모두 아크가 발생하게 되면 0.1A 이상 증가한 전류의 고주파수 성분이 1ms 이상 지속된다. 따라서 이전 주기와 비교하여 전류 고주파 성분의 증가량 $\triangle I_{\max}(t)$ 가 0.1A보다 크고, 1ms 이상 지속되는 경우 CI 플래그를 1로 셋 한다. 이러한 고주파 성분의 증가가 일정 간격을 가지고 주기적으로 증가했는지 확인하기 위해 임의의 반주기에서, CI Flag가 1로 셋 된 지점간의 간격들을 계산한다. 연속된 5주기 동안 발생 간격이 162도에서 198도 사이로 일정하게 유지된다면 비저항성 부하의 아크로 판단한다.

4.4 감지 결과

표 1은 부하에 따른 알고리즘의 아크 감지 결과이다. 실험 1은 아크 전단에 부하가 없고 아크 후단의 부하가 저항성인 경우, 시험 2는 아크 전단에 부하가 비저항성, 그리고 아크 후단에 부하가 저항성인 경우, 실험 3은 아크 전단에 부하가 없고 아크 후단의 부하가 비저항성인 경우, 실험 4는 아크 전단의 부하가 저항성이고 아크 후단의 부하가 비저항성인 경우이다. 아크를 판단하기 위해 2.5주기 동안 연속해서 발생하는 고주파 성분의 주기성을 분석하였다. 실험 결과 아크 발생으로부터 2.5주기에서 4주기 이내로, 즉 41.7ms에서 66.64ms 사이에 아크가 감지되는 것을 확인하였다.

표 1 아크 감지 결과
Table 1 Result of Arc detection

	Load 1	Load 2	감지 시간[ms]
실험 1	-	Resister	44.99
	-	Fluorescent lamp	44.68
	-	Hallgen Ramp	44.53
실험 2	Drill	Resister	50.34
	Vacuum	Resister	43.76
	SMPS	Resister	45.24
실험 3	-	Vaccum	48.26
	-	Drill	52.67
	-	SMPS	43.25
실험 4	Resister	Vaccum	50.34
	Resister	Drill	59.31
	Resister	SMPS	45.55

4. 결 론

본 논문에서는 교류 전원 시스템에서 아크 발생시 주기적으로 반복되는 전류의 고주파 성분에 대해 분석하였다. 교류 전원 시스템에서 아크는 회로를 절체하는 스위치와 같은 역할을 하며, 반주기마다 전류의 고주파 성분이 증가하는 특성을 가진다. 저항성 부하에서는 아크에 의한 전류의 고주파 성분이 비교적 작고 짧게 발생하며, 반주기 내에서 아크가 늦게 발생할수록 고주파 성분의 크기가 커지는 특성이 있다. 비저항성 부하에서는 비교적 길고 크게 발생하는 것을 실험을 통해 확인하였다. 이때 두 부하 모두 인접한 반주기에서 고주파 성분이 증가하는 간격은 일정하다. 본 논문에서는 이러한 특성을 기반으로 아크가 발생하면 부하의 종류를 판단하고, 아크를 감지할 수 있는 알고리즘을 선보였다. 알고리즘의 검증 실험 결과 아크 전/후단의 부하 종류와 상관없이 모두 4주기 이내로 아크를 감지하였다. 본 알고리즘은 cpu의 높은 연산량을 요구하는 주파수 영역으로의 변환 없이, 시간 영역에서 신호를 분석하여 아크를 판단한다. 이러한 전류 고주파 성분의 주기성을 활용한 아크 감지 기법을 활용하여 보다 범용적인 아크 감지기를 개발할 수 있을 것으로 기대한다.

Acknowledgements

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 (No. 2020R1A2C1013413) 및 한국전력공사의 2021년 착수 기초연구개발 과제 연구비(과제번호 : R21XO01-3)에 의해 지원되었으며, 관계부처에 감사드립니다.

References

[1] C. Zhang, S. Liu, S. Li, Y. Ma, W. Lu, J. Huang, W. Sun, Z. Yang, Y. Zhu, and L. Ni, “Investigation on the Degradation Mechanism for GaN Cascode Device Under Repetitive Hard-Switching Stress,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 37, no. 5, pp. 6009-6017, May 2022.

[2] Chang-Ju Park, Jae-chang Kim, Jae-Yoon Jeong, and Sangshin Kwak, “Study of Series and Parallel AC Arc Detection Techniques on AC Power Lines Based on Time-Domain and Frequency-Domain Approaches,” The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 70, no. 9, pp. 1295-1303, 2021, doi:10.5370/KIEE.2021.70.9.1295

[3] W. Liu, X. Zhang, Y. Dong, and X. Huang, “Arc fault detection for AC SSPC based on Hilbert-Huang transform,” IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, China, pp. 4104-4109, 2017, doi: 10.1109/IECON.2017.8216704.

[3] Suzanne Lesecq, “Alain Barraud, Arcing fault detection using wavelet transform, IFAC Proceedings Volumes, Volume 36, Issue 5, Pages 345-350, ISSN 1474-6670, 2003.

[4] Muhammad Khanif Khafidli, et al., “Implementation AC series arc fault recognition sing mikrokontroller based on fast fourier transform,” International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA), pp. 31-36, 2018.

[5] S. A. Saleh, M. E. Valdes, C. S. Mardegan, and B. Alsayid, “The State-of-the-Art Methods for Digital Detection and Identification of Arcing Current Faults,” in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 5, pp. 4536-4550, Sept.-Oct. 2019.

[6] J. Lezama, P. Schweitzer, S. Weber, E. Tisserand, and P. Joycux, “Arc fault detection based on temporal analysis,” 2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), New Orleans, LA, USA, pp. 1-5, 2014. doi: 10.1109/HOLM.2014.7031017.

[7] Wang, Yao, Hou, Linming, Paul, Kamal Chandra, Ban, Yunsheng, Chen, Chen and Zhao, “Tiefu, ArcNet: Series AC Arc Fault Detection Based on Raw Current and Convolutional Neural Network,” IEEE Transactions on Industrial Informatics. PP. 1-1, 2021, doi:10.1109/TII.2021.3069849.

[8] K. C. Paul, T. Zhao, C. Chen, Y. Ban, and Y. Wang, “Efficient-ArcNet: Series AC Arc Fault Detection using Lightweight Convolutional Neural Network,” 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Vancouver, BC, Canada, pp. 1327-1333, 2021. doi: 10.1109/ECCE47101.2021.9596043.eries AC Arc Fault Detection Method Based on Hybrid Time and Frequency Analysis and Fully Connected Neural Network.

저자소개

김용헌 (Yong-Heon Kim)

Yong-Heon Kim received the B.S. degree in electrical and electronics engineering from Myeongji University, Gyeonggi, Korea, in 2023. He is currently pursuing the combined M.S and Ph.D. degrees in electrical and electronics engineering in Chung-Ang University, Seoul, South Korea,. His research interests include Arc detection method

곽상신 (Sang-Shin Kwak)

Sang-Shin Kwak received his Ph.D. degree in Electrical Engineering from Texas A&M University, College Station, TX, USA, in 2005. From 2007 to 2010, he was an Assistant Professor at Daegu University, Gyeongsan, Korea. Since 2010, he has been working at Chung-Ang University, Seoul, Korea, where he is presently a Professor. His current research interests include the design, modeling, control, and analysis of power converters for electric vehicles and renewable energy systems as well as the prognosis and fault tolerant control of power electronics systems.