J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 36, No. 5, pp. 520-524 September 2023
doi: https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.5.13
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

Early Stage Report : Graduate Research

# 고역통과 필터 및 FFT를 이용하여 아크감지 알고리즘 검증

**윤민호, 조유정, 김경탁, 임성훈**
숭실대학교 전기공학과

# Verification of Algorithm for Arc Detection Using High Pass Filter and FFT

Min-Ho Yoon, You-Jung Cho, Kyoung-Tak Kim, and Sung-Hun Lim
Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

(Received July 3, 2023; Revised August 7, 2023; Accepted August 7, 2023)

**Abstract:** An algorithm was developed to detect and block serial arc currents using HPF. The AC series arc problem is that the load current is greater than the fault current and no leakage current occurs. As a solution, an arc detection method utilizing differences in high- frequency amplitudes was developed. HPT was applied to the load current and FFT was applied to eliminate low frequencies. An algorithm has been developed to detect arc waveforms when they exceed a certain value compared to the average of normal waveforms. Using one cycle of data, arc detection is faster and arc accidents are prevented.

**Keywords:** HPF (high pass filter), FFT (fast fourier transform), AC arc, Frequency domain, Current waveform

2017년부터 2021년까지 감전사고 발생 현황은 총 2,375여 건이다. 2021년에는 412건이 발생한 것으로 나타났으며 감전사고의 발생 형태를 살펴보면 아크로 인한 감전사고는 38.3% (158명)를 차지하고 있으며 충전부 직접 접촉에 의한 감전사고(42.7%) 다음으로 비중이 높다 [1]. 아크는 전기가 흐르는 도전체 및 절연 개체 등의 접촉 불량으로 인하여 접촉부에서 스파크의 형태로 순간적으로 방출하는 에너지로 정의되고 있으며 전기화재로 이어질 가능성이 매우 높다. 국내에서는 누전 차단기와 과전류 차단기만 설치해 운용하므로 아크 발화는 막을 수 없어 전기화재 문제가 계속 발생하고 있다.

미국에서는 99년 2월에 UL1699 AFCI (Arc Fault Circuit Interrupters)를 제정하고 02년 1월 1일부터 아크 차단기를 주택에 적용하였다. 13년 7월에는 국제표준인 IEC62606 AFDD (arc fault detection devices)가 제정되어 세계적으로 아크 검출장치의 보급을 확대하였다. 그 결과 미국에서 연도별 주택의 전체 화재 중 전기화재가 10% 이내로 줄어 아크 차단기 설치의 실효성이 증명되었다. 따라서 국내에서도 국제표준을 기반으로 아크 차단기 설치나 아크 영향에 대한 보호 대책을 세우게 하는 설비를 규정에 명시함으로써 아크로 발생할 화재를 방지하는 예방대책으로 삼고 있다 [2].

저압배선선로의 아크는 3가지 유형으로 구분할 수 있다. 선로 내의 특정 지점에서 발생하는 직렬 아크, 전원에 연결된 두 도선 사이에서 발생하는 병렬 아크, 그리고 한 도선과 접지 또는 중성선 사이에서 나타나는 접지 아크가 있다. 이 중 병렬 아크와 접지 아크는 사고전류의 크기가 크기 때문에 기존의 과전류 차단기 또는 누설 차단기를 이용하여 아크 사고 예방이 가능하다. 하지만 직렬 아크에 경우에는 부하전류가 사고전류보다 크고, 누설전류 또한 발생시키지 않기 때문에 기존의 차단기로는 아크 사고를 예방할 수 없다. 따라서 직렬 아크를 검출하는 것이 아크 사고예방에 가장 중요한 부분이다. 또한 신뢰성 향상을 위한 직렬 아크

✉ **Sung-Hun Lim; superlsh73@ssu.ac.kr**

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

검출 방법에 관한 연구들이 진행되고 있다 [3]

3가지 유형 중 직렬 아크를 검출하는 신호처리 알고리즘에 필요한 다양한 특성들이 연구되었다. 이는 크게 영점 교차 구간(zero crossing period, ZCP) [4,5], 비간섭 전력부하 감시(non-intrusive load monitering, NILM) [6]와 파고율(crest factor, CF) [7] 등 시간 영역의 전류/전압 데이터를 이용하는 방법과 고속푸리에변환(fast fourier transform, FFT) [8], 단시간푸리에변환(short time fourier transform, STFT) [9] 등 주파수 영역의 전류/전압 데이터를 이용하는 방법 등 이와 같이 시간 영역과 주파수영역으로 전류/전압 데이터를 분류할 수 있다.

주파수 영역에서 알고리즘의 대표적인 장단점은 다음과 같다. FFT나 DWT 등 주파수 영역의 데이터를 이용하는 경우 아크 사고 발생 전과 후의 차이나 부하별 차이 등을 주파수 성분으로 구분하는 데 유용하지만 실시간 연산에 필요한 높은 컴퓨팅 자원을 요구하는 등 단점이 존재한다. 이에 따라 데이터를 모두 적절히 이용하는 연구가 활발히 수행되어 왔다.

본 논문에서는 AC 아크 사고 발생 전과 후의 가전제품 부하에 따른 전류 파형을 시간 영역 알고리즘에서는 숄더(shoulder)현상이 발생하는지 판단하고 주파수 영역 알고리즘에서는 한 주기 파형을 추출하고 FFT 변환을 하고 진폭의 크기를 비교하여 아크파형인지 정상파형인지 판단한다. 정상파형이라면 FFT변환한 데이터의 진폭은 평균 진폭보다 크지 않아 아크 차단기는 동작하지 않고 아크파형이라면 FFT 변환한 데이터의 진폭은 평균 진폭보다 커서 차단기가 동작하는 알고리즘을 제안하였다. 주파수 필터에는 고역통과 필터, 저역통과 필터, 밴드통과 필터가 있다. 이 중 논문에서 사용한 고역통과 필터의 장점으로는 약한신호를 증폭기능, 손실을 최소로 하여 효율적인 신호전송, 다단계 필터에서 사용시 가장 효율적인 성능을 보여주기에 고역통과 필터를 사용하여 아크 차단기 동작 알고리즘을 제안하였다.

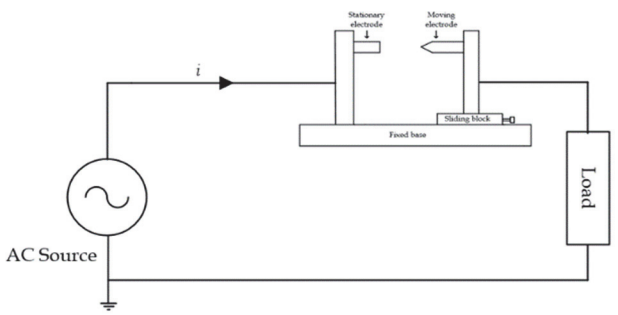


**Fig. 1.** Experimental circuit for series arc.

그림 1은 아크 모의장치와 직렬 아크 실험 구성도이다. 아크 발생장치는 IEC62606에 기반했으며 같이 고정 전극(stationary electrode)과 정밀하게 위치를 조절할 수 있는 이동 전극(moving electrode)으로 구성되어 있으며 모두 탄소재질로 이루어졌다. 두 전극이 접촉하고 있다가 이동전극을 이동시켜 아크를 발생시킨다.

그림 1의 아크실험회로는 AC 220 V, 60 Hz 전원에서 정상 상태와 아크가 발생했을 때 2가지 경우를 비교하였다. 오실로스코프(DL750 ScopeCorer, Yokogawa)에 프로브(701932, Yokogawa, 30 A, 20 kHz)를 연결하여 선로전류 *i*를 측정하였다. 정상 상태에서는 두 전극을 접촉한 상태로 두고 전원을 인가한다. 아크 선로전류 파형은 전원을 인가한 채 이동 전극을 수동으로 분리시켜 측정하였다. 전류는 사인파를 유지하다가 아크 발생 시 파형이 왜곡되어 흐르다 소멸되었다. 본 논문에서는 저항용 부하의 대표적인 예로 헤어 드라이기, 유도성부하의 대표적인 예로 진공청소기를 부하로 사용하였다. 헤어 드라이라에는 온풍과 냉풍이 있으며, 온풍은 열을 내는 부하로 저항성을 띠고 냉풍은 모터를 사용하여 찬바람을 내는 부하로 유도성의 형태를 갖고 있다.

표 1은 전압과 각각 부하들의 용량을 나타내고 있다.

직렬회로에서 아크가 발생할 때 정상파형과 아크가 발생할 때의 파형이 어떠한 차이점이 있는지 알아보기 위해 그림 2와 같이 정상 상태와 아크 상태의 전류파형을 비교하였다. 정상 상태 전류파형은 (파란색) 상단에 위치하고 있고 아크 상태 전류파형 (주황색)하단에 위치하고 있다. 그림 2(a)는 헤어 드라이기 온풍, 그림 2(b)는 헤어 드라이기 냉풍, 그림 2(c)는 진공청소기 전류파형이다. 세 가지 파형 모두 부하와는 관계없이 정상 상태에서 사인파형을 유지하고 있다 (파란색). 하지만 아크 상태에 들어가게 되면 부하종류와 용량에 따라 전류파형이 왜곡이 일어난다 (주황색). 온풍 헤어 드라이기의 경우 열을 내는 저항형 부하이기 때문에 전류가 0에 도달하는 동시에 짧은 기간 동안 0을 유지하는 숄더(shoulder) 현상이 반복적으로 발생하였다. 냉풍 헤어 드라이기의 같은 경우에는 저항형 부하가 아닌 찬바람을 내는 유도성 부하이기 때문에 고주파가 발생하였다. 그림 2(c)의 진공청소기에도 유도 성분이 포함된 경우이기 때문에 고주파가 발생하였다. 시간 영역에

**Table 1.** Parameters of series arc experimental load.

| Parameters | Value |
|---|---|
| Source voltage | AC 220 V |
| Hairdryer | AC 220 V / 60 Hz / 1,200 W |
| Vacuum cleaner | AC 220 V / 60 Hz / 1,500 W |

서는 유량을 알 수 없기 때문에 FFT를 이용하여 부하별 주파수 스펙트럼을 분석하는 것이 필요하다.

주파수 영역에서 이용한 FFT (fast fourier transform)는 DFT (discrete fourier transform)에 비하여 계산량을 줄여 연산을 빠른 시간 내에 효과적으로 감소시킨 기법이다. 이때 샘플링 개수에 따른 계산량(N)은 DFT에선 $N^2$이지만 FFT에선 $(N/2)\log_2 N$로 감소한다. 시간 영역에서 전류파형 x(n)의 DFT한 결과 X(m)은 식 (1)과 같다.

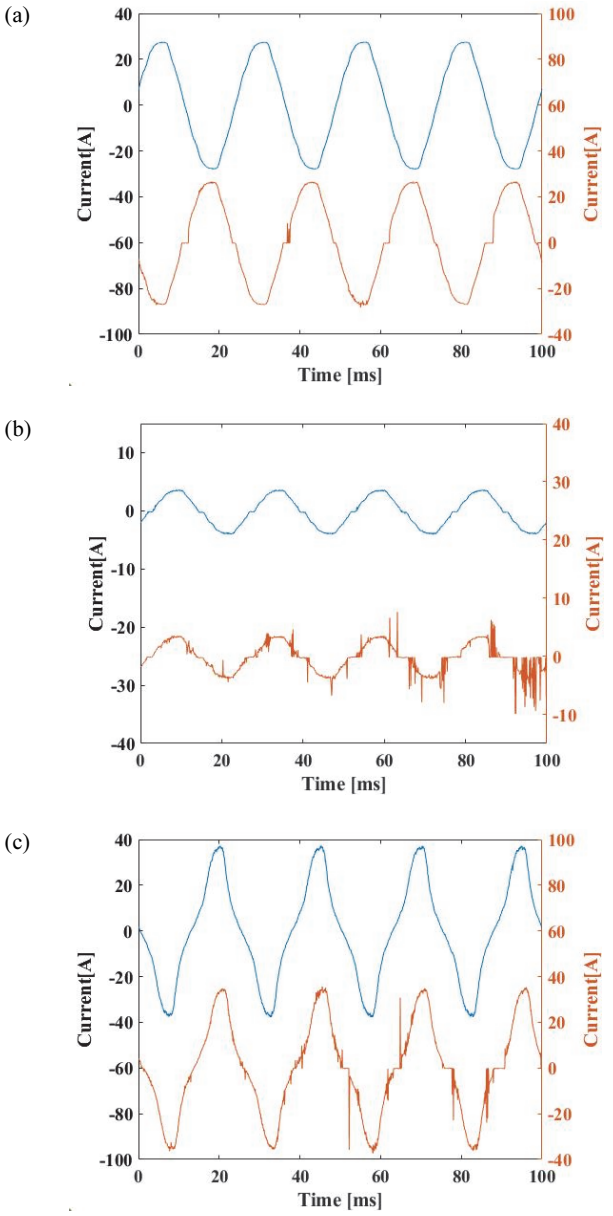


**Fig. 2.** Current waveform of each load in normal state (up) and arc state (down). (a) Warm hairdryer, (b) cool hairdryer, and (c) vacuum cleaner.

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{j2\pi nm}{N}} \qquad n = m = 1,2,\dots,N-1 \tag{1}$$

FFT 알고리즘은 홀수수열 x(2n+1), 짝수수열 x(2n)로 분할하여 FFT를 적용하여 계산하는 방식으로 DFT의 계산량을 줄인다. 이 과정은 식 (2)부터 식 (3)까지 서술되어 있다.

$$X(m) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x(2n) e^{-j2\pi(2n)m/N} +$$
$$X(m) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x(2n) e^{-j2\pi(2n)m/N} + \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x(2n+1) e^{-j2\pi(2n+1)m/N} \tag{2}$$

회전인자는 $W_N = e^{-J2\pi/N}$이며 $W_N^2$는 $W_{N/2}$로 표현하였다.

$$X(m) = \sum_{n=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} x(2n) W_N^{2nm} + W_n^m + \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x(2n+1) W_N^{2nm} \tag{3}$$

그림 3~5는 high pass filter (HPF)를 사용한 정상 상태(a) 및 아크 상태(b) 부하별 FFT 결과를 보여주고 있다. 샘플링 주파수는 20 kHz이고 데이터 개수 n은 334개이며 한 주기의 전류 파형을 의미한다. 진폭이 음수로 갔다는 것은 진폭이 매우 작다는 것을 의미한다. 2 kHz를 기준으로 저주파수는 HPF를 통과하지 못하여 진폭의 크기가 매우 작다. 하지만 2 kHz 넘는 고주파에 경우에는 진폭의 크기가 큰 것을 알 수 있다. 또한 아크 상태(b)가 정상 상태(a)보다 진폭의 크기가 큰 것을 확인할 수 있는데, 이를 이용하여 아크 알고리즘을 구성한다.

그림 6은 AC 직렬 아크 차단기 동작 알고리즘이다. 먼저 그림 1에서 오실로스코프에 프로브를 연결하여 아크 차단기에 들어오는 선로전류 *i*를 측정하였다. 그 후 오실로스코프를 통해 측정된 전류 중 무작위 1주기 데이터를 추출

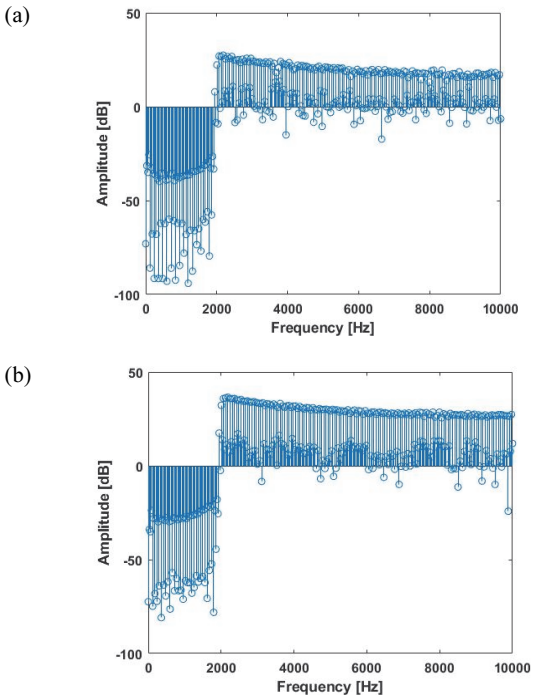


**Fig. 3.** Result of HPF warm hairdryer current waveform. (a) Normal state and (b) arc state.

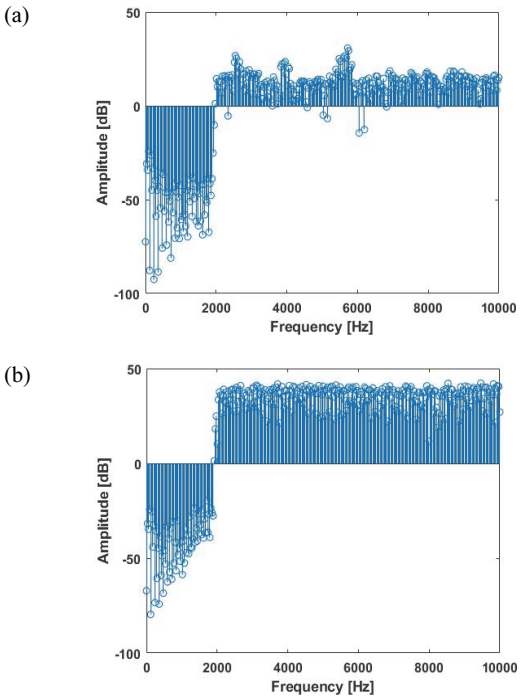


**Fig. 5.** Result of HPF vacuum cleaner current waveform. (a) Normal state and (b) arc state.

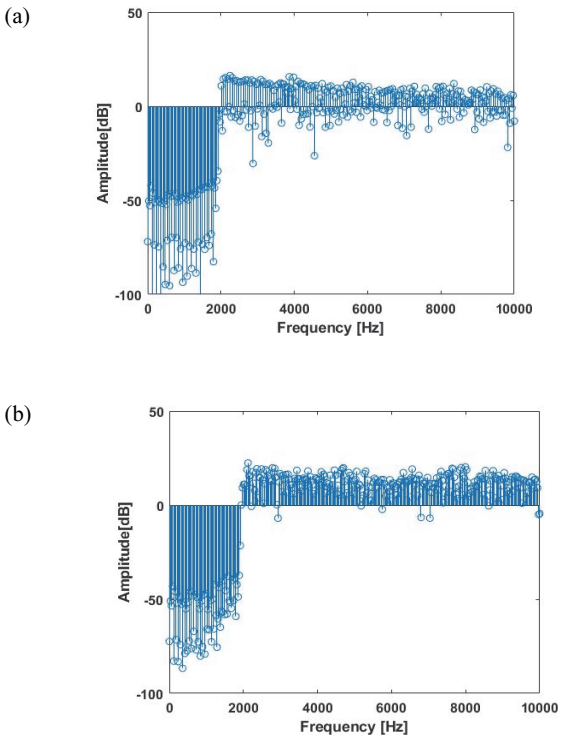


**Fig. 4.** Result of HPF cool hairdryer current waveform. (a) Normal state and (b) arc state.

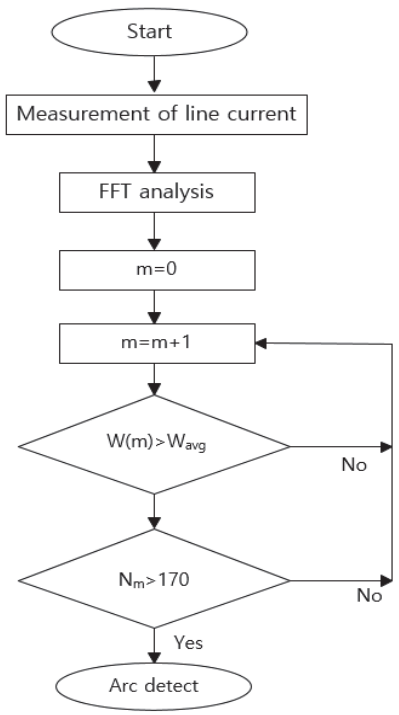


**Fig. 6.** AC series arc detection algorithm in frequency domain.

하여 FFT 분석하였다. FFT 변환한 데이터를 이용하여 주파수 영역에서 한 주기의 입력 데이터 m에서 진폭 $W_m$을 구했다. 이를 정상 상태 $W_{avg}$과 비교하여 정상 상태의 진폭보다 큰 데이터 m의 개수($N_m$)를 계산하였다. 한 주기에 $W_m>W_{avg}$의 개수가 170개를 넘어선 주기는 아크파형으로 판단하고 아크 차단기를 동작시킨다. 한 주기에 정상 상태보다 큰 진폭의 수가 170개 미만이라면 아크 차단기는 동작하지 않는다. 모든 m에서 진폭의 평균값 $W_{avg}$은 식 (4)에 정리하였다.

$$W_{avg} = \frac{W(1)+W(2)+\ldots+W(m)}{m} \quad (4)$$

표 2는 부하별 $W_{avg}$ 및 아크 감지 여부를 나타내었다. 측정 결과 헤어 드라이기, 진공청소기 모두 정상 상태에서 온풍 헤어 드라이기는 $N_m$=133, 냉풍 헤어 드라이기는 $N_m$=144, 진공청소기는 $N_m$=158회 측정되었다. 아크파형에서 온풍 헤어 드라이기 $N_m$=208, 냉풍 헤어 드라이기 $N_m$=253, 진공청소기 $N_m$=279회로 모두 170회를 넘어 아크 차단기가 동작하고, 정상 상태에서는 모두 170회를 넘지 않아 아크 차단기가 작동하지 않는 아크 차단기 알고리즘을 제안하였다.

본 연구에서는 저항성, 유도성 부하에서 측정한 전류에 HPF를 이용하여 주파수 영역에서 직렬 아크 검출 알고리즘을 제안하였다. 아크가 발생하게 되면 아크 전압에 의하여 전류 값은 상승한다. 이를 이용하여 정상 상태 전류의 평균을 구하여, 아크 발생 시 전류의 평균값과 비교하여 일정 횟수 초과하는 경우 아크를 감지하여 아크 차단기가 동작할 수 있도록 하였다. 알고리즘에 사용한 데이터는 한 주기만을 이용하여 아크를 판단하였기에 빠른 시간 내에 아크를 감지할 수 있고, 또한 HPF 필터를 사용하여 약한 신호를 증폭, 신호 전송에서 손실을 최소로 할 수 있으며, 다단계 필터에서 HPF는 가장 효율적인 성능을 가진다. 향후 다른 필터를 이용하여 다양한 부하에서 실험 진행 후 아크 차단기 알고리즘을 적용할 예정이다.

**Table 2.** AC series arc detecting results in frequency domain.

| Load | State | $W_{avg}$ | $N_m$ | Arc detetion |
|---|---|---|---|---|
| Warm hair dryer | Normal | 14.00 | 133 | × |
| | Arc | 20.71 | 208 | o |
| Cool hair dryer | Normal | 5.14 | 144 | × |
| | Arc | 11.61 | 253 | o |
| Vacuum cleaner | Normal | 15.17 | 158 | × |
| | Arc | 34.85 | 279 | o |

**ORCID**

Sung-Hun Lim https://orcid.org/0000-0002-9733-3754

## 감사의 글

This work was supported by the Energy R & D program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No.20215910100020).

## REFERENCES

[1] Electrical Disaster Statistics Report, Korea Electrical Safety Corporation, 2021, https://kes.go.kr/web/lay1/bbs/S1T110C291/F/101/view.do?article_seq=962&cpage=1&rows=6&condition=&keyword (2023).

[2] Underwriters Laboratories, Standard 1699-Standard for Arc-Fault Circuit-Interrupters, 2006, https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=UL%201699&item_s_key=00308197 (2023).

[3] G. D. Gregory, K. Wong, and R. F. Dvorak, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **40**, 1006 (2004). doi: https://doi.org/10.1109/TIA.2004.831287

[4] W. Luan, J. Lin, B. Liu, and B. Zhao, *Electr. Power Syst. Res.*, **210**, 108113 (2022). doi: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108113

[5] H. Zhao, J. Liu, and J. Lou, *Electr. Power Syst. Res.*, **202**, 107626 (2021). doi: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107626

[6] K. Dowalla, P. Bilski, R. Łukaszewski, A. Wójcik, and R. Kowalik, *Energies*, **16**, 171 (2023). doi: https://doi.org/10.3390/en16010171

[7] J. Lezama, P. Schweitzer, S. Weber, E. Tisserand, and P. Joyeux, *Proc. 2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)* (IEEE, New Orleans, USA, 2014) p. 1. doi: https://doi.org/10.1109/HOLM.2014.7031017

[8] M. K. Khafidli, E. Prasetyono, D. O. Anggriawan, A. Tjahjono, M.H.R.A. Syafii, *Proc. 2018 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA)* (IEEE, Bali, Indonesia, 2018) p. 31. doi: https://doi.org/10.1109/ELECSYM.2018.8615529

[9] H. Cheng, X. Chen, F. Liu, and C. Wang, *Proc. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* (IEEE, Chengdu, China, 2010) p. 1. doi: https://doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5448958