

송전선로용 고전압 절연체의 최적 형상에 대한 유한요소 해석

김태용¹, 산얌 심피¹, 라벨로 마데우스², 이준신^{1,2,3} 

¹ 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

² 성균관대학교 태양광협동시스템협동과정

³ 성균관대학교 정보통신대학

Finite Element Analysis for the Optimal Shape of the High Voltage Insulator for Power Transmission Lines

Taeyong Kim¹, Simpy Sanyal¹, Matheus Rabelo², and Junsin Yi^{1,2,3}

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

² Interdisciplinary Program in Photovoltaic System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

³ College of Information and Communication Engineering Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received October 11, 2021; Revised October 18, 2021; Accepted October 18, 2021)

Abstract: The insulator used for the transmission line is a device that is bonded with a cap, pin, ceramic, and cement to withstand insulation capacity and mechanical load. The insulator design can help to reduce the dispersion of the electric field; thus, the optimization of today's design, especially as demanded power grows, is critical. The designs of four manufacturers were used to perform a comparative analysis. Under dry circumstances of the new product, an electric field distribution study was done with no pollutants attached. Manufacturer D's design has the best voltage uniformity of 24.33% and the arc length of 500 mm or more. Manufacturer C's design has an equalizing voltage of more than 2% higher than that of other manufacturers. The importance of the design of the insulator and the number of connections according to the installation conditions is very efficient for transmission lines that will increase in the future.

Keywords: Finite element analysis, High voltage insulator, Power transmission lines, Electric field distribution

1. 서론

유리 및 폴리머 애자와 달리 자기 애자는 환경 스트레스에 대한 전압에서 장기간 노출되어 있어도 열화에 대한 큰 변함이 없다. 절연체의 스트레스의 가장 큰 요소는 기계적

하중 부담과 전기적 스트레스가 있다 [1,2]. 다양한 환경 문제에 의해서도 스트레스가 가해지게 되며 많은 장소에서 30년 이상 사용이 이어지고 있으며 국내에도 120만 개 이상의 자기절 절연체가 사용되고 있다 [3]. 일부는 잘못된 공정으로 인해 10년이 채 되지 않아 중도 고장이 발생하기도 한다. 절연체가 사용되는 환경에서 받게 되는 스트레스를 감소시키는 것이 매우 중요하다 [4,5]. 물리적 스트레스는 구조적 문제에 의해 크게 기인하며 세라믹 절연체는 열 안정성이 높은 편이지만 파손이 쉬운 무기물질이다. 파손이 쉬운 물리적 특성을 가지고 있기 때문에 구조 수정을 통하

✉ Junsin Yi; junsin@skku.edu

Copyright ©2022 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.

여 스트레스를 완화시켜 주는 작업은 매우 중요하다 [6-8].

구조 최적화가 되면 절연체가 장기적으로 사용되었을 때는 피로 데미지를 입게 된다. 전력을 송전하는 과정에서 절연체의 사용은 필수적이라는 것이 이미 입증되었다. 현재 실생활의 전력 사용량이 나날이 증가하여 송전전압이 765 kV까지 상승하고 애자련의 길이도 점차 길어지고 있다 [9-11]. 철탑의 높이도 도심에서 멀어지기 위해 높아지고 있으며 애자장치류의 설치 및 유지보수 비용이 꾸준히 증가하고 있다. 애자련의 길이를 줄이기 위해서는 다양한 구조의 절연체를 적용하여 전계 분포도를 낮추는 방법이 최선의 방법으로 거론되기 때문에 고전압 절연체에 대한 전계 해석도 중요한 일이 되었다 [12-14].

하나의 절연체에 인가되는 전압 분포를 줄여서 다수의 절연체로 연결이 되었을 때 전체 분담 전압을 줄이는 것은 매우 중요하다. 절연체의 디자인을 변경하면 아크 길이, 최대 임계 전압이 감소될 수 있으며 애자련의 전압의 균등도 또한 증가시킬 수 있다. 절연체의 절연을 담당하는 세라믹의 볼륨과 표면적에 대해서도 효율적인 디자인은 절연체의 균형을 증가시키는 데 많은 도움이 된다 [15-17]. 표면적이 넓으면 아크 길이가 길어져서 누설전류에 대한 내력이 좋고 볼륨이 크게 되면 관통전압에 아주 강할 수 있으나 하중의 문제 때문에 무작정 표면적을 넓히고 볼륨을 크게 할 수 없다는 것이 현재의 문제점이기 때문에 디자인에 대한 최적화는 아주 필수적이다 [18-20]. 본 연구에서는 절연체의 디자인에 대해서 부피와 표면적을 비교하여 유한요소 해석법을 이용한 전압 분포에 대한 분석을 하여 오염물이 부착되지 않았을 때 건조한 상태에서 절연체의 디자인에 대한 중요성과 고려해야 할 사항에 대해서 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 절연체의 디자인 발체 과정

절연체의 디자인을 명확하게 채취하기는 아주 어렵다. 제조사마다 핵심 기술이기 때문에 공개를 하지 않은 것이 일차적인 문제이며 절연체를 채취하는 과정도 매우 위험하고 복잡하기 때문에 많은 노력이 필요하다.

그림 1과 같이 발체된 절연체를 제조사별로 분류한 후 열손상 변화가 없이 절삭하기 위해 water-jet을 이용하여 절삭을 한 후 단면도에 대한 사이즈를 확보한다. 각 제조사에 대한 실측을 진행하여 상세 디자인에 대한 도면을 그리게 된다. 본 연구에서는 제조사 4개 제품에 대해 상세 사이즈를 실측한 후 유한요소 해석법에 사용하였다.



Fig. 1. Excerpt from the insulator, the insulator cut with a water jet, and the cross section of the insulator.

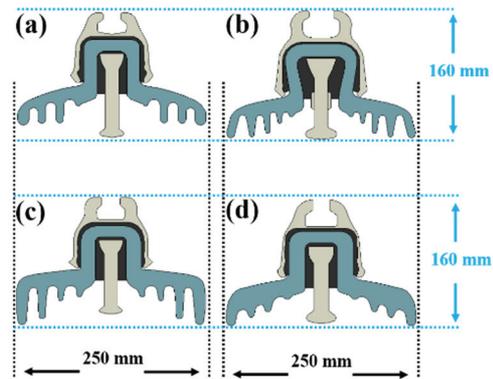


Fig. 2. Manufacturers of 4 insulators drawn based on measurement (a) manufacturer A, (b) manufacturer B, (c) manufacturer C, and (d) manufacturer D.

유한요소 해석법을 위해 사용된 디자인은 그림 2와 같다. 제조사별로 캡의 형태, 자기부의 형태가 다른 것을 볼 수 있으며 모형 형태만 봐도 자기부의 굴곡이 심한 경우는 누설전류 발생에 대해서 내성이 좋으며 자기부가 두꺼운 경우는 낙뢰와 같은 과전류에 의해 팽창 혹은 파손 발생이 자기부가 얇은 경우보다 상대적으로 내성이 좋다.

2.2 절연체의 유한요소 해석법

실측 사이즈에 대해서 유한요소 해석법을 진행하였으며 유전율에 대해서 애자의 구성요소인 캡, 핀, 자기부에 대해서 표 1과 같이 정의하였다.

Table 1. The parameter information elements used for finite element analysis, such as air, cement, porcelain and iron cap and pin.

No.	Permittivity	Value (unit)
1	Air	1
2	Cement	6.5
3	Porcelain	6
4	Pin, cap	1

유전율에 대해서는 절연체를 측정한 결과 평균적인 범주에 있는 값을 사용하였으며 실제 제조사의 재료는 Al_2O_3 함량에 대해서 차이가 있기 때문에 실제 환경에서 운용될 때는 본 연구 결과와 상이할 수 있다. 본 연구 결과에서는 같은 재료 특성을 가졌을 때 절연체에 발생하는 분담 전압, 최대 인가 전압, 누설전류에 대한 분석을 진행하여 디자인에 의한 차이를 주로 분석하였다. 유한요소 해석법에 대해 사용된 소프트웨어는 ALTSSOFT사의 COMSOL Multiphysics를 이용하였으며 mesh는 실물 기반으로 CAD 작업을 하여 진행하였다. 최외각 경계조건은 자연경계조건(neumann)을 사용하였다. 전극 핀은 외부 회로와 결합되어 있으므로 터미널 전압 경계 조건을 사용하였으며 constraint 값으로 3상 전압의 RMS 값으로 $154/\sqrt{3}$ V를 인가하였다. Terminal 경계조건을 사용하였으며, 전극 캡은 0 V의 고정경계조건(dirichlet)을 입력하여 해석하였다.

2.3 절연체의 제조사 A, B, C, and D의 부피와 표면적

차이를 주로 제조사 4곳에 대해서 시뮬레이션 결과와 실제 결과들에 대해서 매칭하기 위해 각 구성요소에 대해서 실제 사이즈 측정을 통해 표면적, 부피 등에 대한 계산을 하여 표 2에 정리하였다. 시멘트(P)의 경우 핀에 가까운 시멘트, 시멘트(C)의 경우 cap에 가까운 시멘트를 표기하였다.

전체 부피에 대해서는 A, B, C, D 순서로 큰 것으로 나타났으며 표면적에 대해서는 C, A, B, D 순으로 넓었다. 부피가 큰 경우는 낙뢰로 인한 열팽창에 대해서 내성이 좋으며 표면적이 넓으면 누설전류가 발생했을 때 전류경로가 길어지기 때문에 누설전류 완화에 대한 효과가 있다. 절연에 중요한 자기부의 부피와 표면적을 봤을 때 제조사 A의 절연체가 $30 \times 10^5 \text{ mm}^3$, $36 \times 10^4 \text{ mm}^2$ 으로 다른 제조사에 비해 압도적으로 절연 내력, 누설전류에 대해 우수하다. 평범한 절연체의 절연 내력의 경우 15~18 kV/mm이며 누설

전류는 수 μA 수준이다.

3. 결과 및 고찰

앞서 발췌한 절연체에 1개에 대해서 유한요소 해석법을 이용하여 전계분포 분석을 하여 그림 3에 나타냈다. 인가된 전압은 15 kV이며, 0.3~8.59 kV/mm 정도의 범주에서 전계가 형성되었다.

전계가 걸리는 양상은 유사하게 처음 전압이 인가되는 핀부를 중심으로 전계가 인가되었으며 자기부까지 퍼져 나가는 것을 볼 수 있었다. 등전위 분포에 대해서 전자상 수치 해석으로 표면 전압을 계산하고 전압의 균등도를 아래 식 (1)을 이용하여 평가하였다.

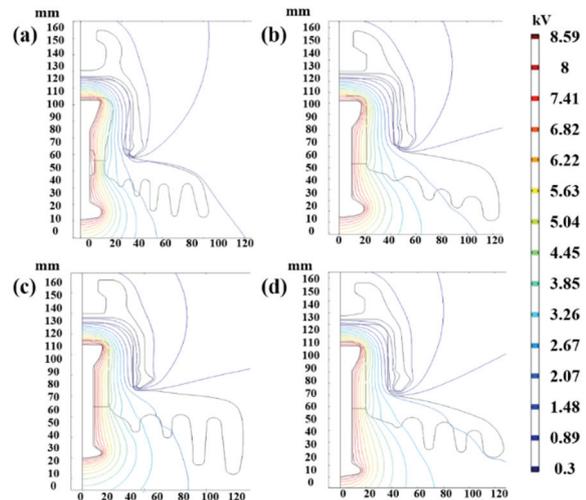


Fig. 3. Electric field distribution using finite element analysis (a) manufacture A, (b) manufacture B, (c) manufacture C, and (d) manufacture D.

Table 2. Volume and surface area of components of four different manufacturers high voltage insulators.

Company / Size	Porcelain	Cement (P)	Cement (C)	Pin	Cap	Total sum	
A	Volume(mm^3)	30×10^5	23×10^4	23×10^4	10×10^4	65×10^4	41×10^5
	Surface area(mm^2)	36×10^4	32×10^3	85×10^3	17×10^3	12×10^4	61×10^4
B	Volume(mm^3)	19×10^5	62×10^3	13×10^4	54×10^3	19×10^4	23×10^5
	Surface area(mm^2)	18×10^4	16×10^3	48×10^4	10×10^3	69×10^3	75×10^4
C	Volume(mm^3)	24×10^5	69×10^3	11×10^4	41×10^3	22×10^4	28×10^5
	Surface area(mm^2)	28×10^4	16×10^3	43×10^3	91×10^2	64×10^3	41×10^4
D	Volume(mm^3)	13×10^5	47×10^3	99×10^3	39×10^3	19×10^4	17×10^5
	Surface area(mm^2)	19×10^4	13×10^3	38×10^3	88×10^2	54×10^3	30×10^4

$$\rho = \frac{V_{Average}}{V_{Max}} \times 100\% \quad (1)$$

제조사 A의 경우 19.59%, B의 경우 22.88%, C의 경우 21.52%, D의 경우 24.33%으로 나타났다. 4개 제조사에 대해서 균등도 차이는 크지 않지만 D구조가 A 구조 대비 4.73% 균일하였다. 자기부가 두꺼운 그림 4(a)와 (c)에서 전계 분포가 pin에 더 많이 집중되어 있으며 다른 제조사와

다르게 희생전극으로 사용된 아연 슬리브가 있어서 전계가 더 완화되는 것이 보인다. 그림 4(b)와 (d)의 경우 자기부에도 2.07 kV/mm 이상의 상당한 전계가 인가되는 것으로 보이며 이는 높은 전계가 인가되었을 때 상당한 피로도가 증가됨을 알 수 있다. 각각의 제조사의 최대 인가 전압 지점은 제조사 A는 1.37 kV/mm, 제조사 B는 1.11 kV/mm, 제조사 C는 1.39 kV/mm, 제조사 D는 1.50 kV/mm이다. 제조사 B가 가장 최대 인가 전압이 낮은 것에 대한 이유를 분석한 결과 전계가 집중되는 모서리 부분의 곡률이 가장 완만하여 1.11 kV/mm으로 나타났다. 부피와 표면적도 중요하지만 구성요소에 대해서 모서리 부분의 곡률도 중요한 요소이다. 그림 4는 기존의 1단 전계 해석에 이어서 송전선로에서 다단으로 연결하여 사용하는 점을 고려해서 흔히 사용되는 154 kV 기준으로 10단 연결되었을 때에 대해서 전계 분포도 해석을 하였다.

표면에 대한 전계 분포는 평균 전압의 균등도, 최소 평균 전압 균등도, 자기부 갓 길이에 의한 분담 전압에 대해서 분석하였다. 제조사 4곳이 고전압이 인가되는 전극에 해당되는 핀부에 가까운 첫 번째 절연체 표면에서 전압 균등도가 최소가 되었으며 제조사별로 평균 전압 균등도는 1~2% 이내로 큰 차이가 없었다. 같은 재료를 사용하였을 때를 가정하면 최소 평균 전압 균등도는 C 제조사가 2% 정도로 높았다.

10단 절연체의 각 연결된 단계별 분담전압을 그림 5와 같이 나타냈다. 첫 번째 인가되는 절연체에는 90 kV/mm 가 인가되고 두 번째 절연체는 70 kV/mm, 세 번째부터는

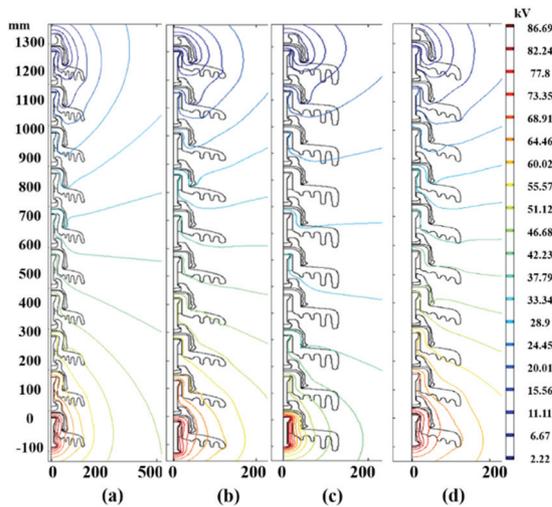


Fig. 4. The electric field distribution of 10-string of insulation (a) manufacture A, (b) manufacture B, (c) manufacture C, and (d) manufacture D.

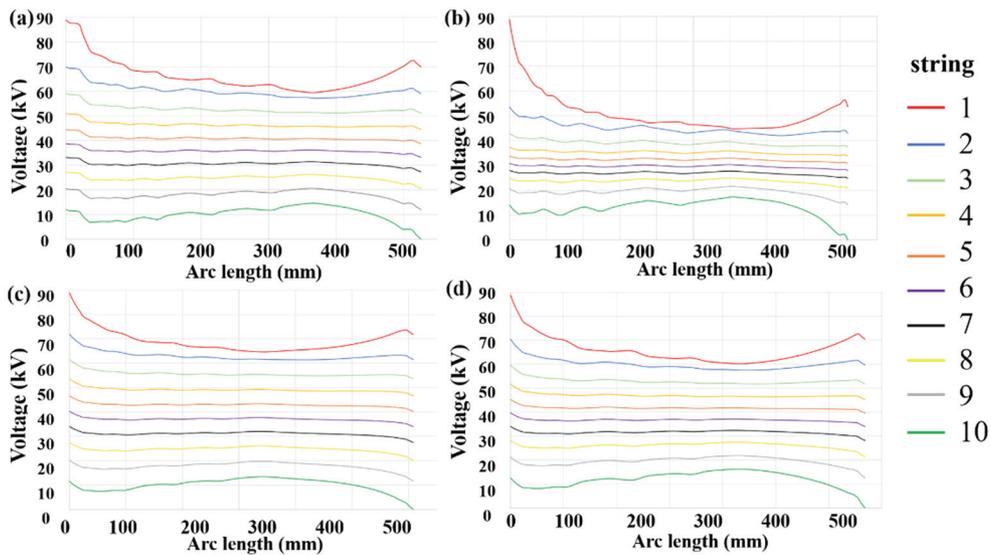


Fig. 5. The electric field division of the 10-string insulator from 1-10 (a) manufacture A, (b) manufacture B, (c) manufacture C, and (d) manufacture D.

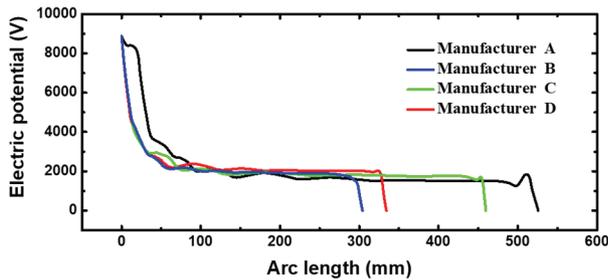


Fig. 6. Electric potential based on the length of the arc length for four manufacturers.

10 kV/mm씩 감소되는 경향을 보였다. 본 연구 결과를 통해서 봤을 때 송전선로에 사용할 때 첫 번째 단에 사용되는 절연체는 높은 전압이 인가되어도 고장 나지 않을 수 있는 절연 내력이 우수한 절연체를 이용하여야 하는 것이 필수적이다. 그림 6은 제조사의 자기부 갓 길이에 의존되는 전위에 대해서 아크 길이에 대해 변화량을 보았다. 전위가 0까지 감소되면 누설전류가 발생되어도 해당 지점에서 누설전류가 감소되는 것을 의미한다. 해당 감소되는 아크 길이는 자기부에 갓 길이에 비례하는 경향이 있다.

표면의 면적이 넓고 길수록 아크 길이는 늘어날 수 있으나 무게가 늘어나는 취약점이 있기 때문에 사용하는 전압과 환경에 따라서 해당 아크 길이를 늘려야 할 필요가 있다. 제조사 A, B, C, and D의 경우 36×10^4 , 18×10^4 , 28×10^4 , 19×10^4 mm²이며 자기부 갓 표면적에 대해서 비례하는 것을 확인하였다. 이런 특성을 이용하여 사용환경에 맞추어서 첫 번째 단 절연체의 선택을 심사숙고하여야 한다 [21,22].

4. 결론

송전선로에 사용되는 절연체는 자기부의 표면적, 부피, 곡률 등이 아주 중요한 요소이며 여러 개의 절연체를 연결하였을 때 첫 번째 절연체에 분담전압이 매우 크기 때문에 설치환경 및 전압에 대해서 유의하여야 한다. 전압에 대한 균등도는 매우 중요하며 절연체의 디자인을 변경하면 분담전압, 누설전류 길이가 변경되기 때문에 설치되는 조건에 가장 최적화된 디자인을 사용할 필요가 있다. 본 연구에서는 4개 제조사에 대해서 디자인을 발췌하여 유한요소 해석법으로 비교 분석을 진행하였으며 같은 재료로 가정하였을 때 제조사 A의 디자인이 누설전류에 대해서는 자기부 표면적이 36×10^4 mm², 아크 길이는 500 mm 이상으로 가장 우수하였다. 그 이유는 절연을 담당하는 표면적의 넓

이가 가장 컸다. 전압의 균등은 24.33%으로 제조사 D의 디자인이 가장 우수하였다. 이런 비교되는 점들을 보았을 때 곡률이 완만하고, 자기부 갓의 표면면적이 넓은 디자인이 실용적이라는 것을 알 수 있다.

ORCID

Junsin Yi

<https://orcid.org/0000-0002-6196-0035>

REFERENCES

- [1] T. Kim, S. Jeon, Y. J. Lee, J. Yi, I. H. Choi, J. A. Son, and C. W. Choi, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **26**, 115 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007553>]
- [2] E. A. Cherney, A. C. Baker, J. Kuffel, Z. Lodi, A. Phillips, D. G. Powell, and G. A. Stewart, *IEEE Trans. Power Del.*, **29**, 275 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2288776>]
- [3] I. H. Choi, T. K. Kim, Y. B. Yoon, T. Kim, H.T.T. Nguyen, and J. Yi, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **19**, 188 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s42341-018-0027-7>]
- [4] K. Kim, B. Moon, D. Kim, K. Park, C. S. Seok, T. Kim, J. Yi, and I. H. Choi, *J. Mater. Res. Technol.*, **9**, 9777 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2288776>]
- [5] A. Al-Gheilani, W. Rowe, Y. Li, and K. L. Wong, *Energy Procedia*, **110**, 95 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.112>]
- [6] E. M. Savadkoobi, M. Mirzaie, S. M. Seyyedbarzegar, M. Mohammadi, M. Khodsuz, M. G. Pashakolae, and M. B. Ghadikolaei, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, **121**, 106142 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106142>]
- [7] A. R. Verma and B. S. Reddy, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **25**, 38 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.006671>]
- [8] M. Sarajlic, P. Kitak, and P. Pihler, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **24**, 1162 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.005947>]
- [9] M. R. Nayak, G. Radhika, B. Devulal, P. D. Reddy, and G. Suresh, *Sustainable Energy Technol. Assess.*, **47**, 101529 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101529>]
- [10] Y. Liao, L. Hou, L. Wang, Z. Guan, Y. Zhang, and P. Zhu, *IEEE Trans. Power Del.*, **26**, 385 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2068567>]
- [11] B. S. Reddy and A. R. Verma, *Appl. Energy*, **185**, 1724 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.078>]
- [12] N. S. Mehta, A. Sahu, N. Pandey, R. Pyare, and M. R. Majhi, *J. Aust. Ceram. Soc.*, **55**, 987 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s41779-019-00311-z>]
- [13] Z. Pu, Y. Xiong, H. Wang, B. Yan, T. Wu, L. Zheng, and P. Yin, *Electr. Power Syst. Res.*, **173**, 48 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.03.025>]
- [14] Y. Liu, S. Pei, W. Fu, K. Zhang, X. Ji, and Z. Yin, *IEEE Trans.*

- Dielectr. Electr. Insul.*, **24**, 3559 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006840>]
- [15] H. Rosli, N. A. Othman, N.A.M. Jamail, and M. N. Ismail, *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, **7**, 3114 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v7i6.pp3114-3123>]
- [16] Y. Lin, Z. Zhang, J. Liu, Y. Li, S. Pei, and Y. Liu, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1314**, 012043 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1314/1/012043>]
- [17] M.S.S. Nia, M. Altmania, P. Shamsi, and M. Ferdowsi, *Proc. 2020 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)* (IEEE, Manhattan, USA, 2020). [DOI: <https://doi.org/10.1109/kpec47870.2020.9167586>]
- [18] M. Taghvaei, M. Sedighzadeh, N. Nayeypashae, and A. S. Fini, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, **20**, 100696 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100696>]
- [19] L. Lan, G. Zhang, Y. Wang, X. Wen, W. Wang, and H. Pei, *IEEE Access*, **7**, 121395 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936868>]
- [20] J. E. Contreras and E. A. Rodríguez, *Ceram. Int.*, **43**, 8545 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.105>]
- [21] M. Othman, M. Isa, Z.C.M. Kasa, M. N. Mazlee, and M.A.M. Piah, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **767**, 012023 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/767/1/012023>]
- [22] M. Bouhaouche, A. Mekhaldi, and M. Tegar, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **24**, 3549 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006011>]