

## Orthogonal Flux Detection Type Current Sensor Fabricated with Ferrite Core

Kyung-Won Kim and Kwang-Ho Shin\*

Department of Information and Communication Engineering, Kyungsoong University, Busan 48434, Korea

(Received 16 April 2020, Received in final form 26 April 2020, Accepted 27 April 2020)

In this paper, we propose a new type of current sensor suitable for miniaturization and high-frequency current measurement. The current sensor is fabricated using a cylindrical ferrite core and two permanent magnets attached to both ends of the ferrite core. The operation principle was explained using the FEM analysis results and the magnetization motion inside the ferrite core. To check the current measurement performance of the fabricated current sensor, the output voltage was measured while changing the amplitude of the alternating current from 0 to 10 A at 10 kHz. Although the output signal was not linear with respect to the current, it was very well matched with the regression curve showing that the proposed current sensor can be used as a current sensor in the tens of kHz band.

**Keywords** : current sensor, ferrite core, permanent magnet

### 페라이트코어를 이용하여 제작한 직교 자속 검출형 전류센서

김경원 · 신광호\*

경성대학교 정보통신공학과, 부산시 남구 대연동 110-1, 48434

(2020년 4월 16일 받음, 2020년 4월 26일 최종수정본 받음, 2020년 4월 27일 게재확정)

본 논문에서는 소형화와 고주파 전류측정에 적합한 새로운 타입의 전류센서를 제안한다. 전류센서는 원통형 페라이트 코어와 페라이트 코어 양쪽 끝에 부착된 2개의 영구자석을 이용하여서 제작하였고, FEM해석 결과와 페라이트 코어 내부의 자화운동을 이용하여 작동원리를 설명하였다. 제작한 전류센서의 전류측정 성능을 확인하기 위해서 10 kHz의 교류전류의 진폭을 0~10 A으로 변화시키면서 출력전압을 측정하였다. 출력신호는 전류에 대해서 선형적으로 나타나지는 않았지만 회귀곡선과 매우 잘 일치하였고 제안된 전류센서가 수십 kHz 대역의 전류센서로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

**주제어** : 전류센서, 페라이트 코어, 영구자석

### I. 서 론

최근, 자동차산업과 스마트그리드응용을 위한 고정밀 전류센서 개발에 대한 요구가 커지고 있다[1-5]. 특히, 자동차산업에서는 전통적인 엔진 자동차가 아직까지는 주류이지만 멀지 않은 미래에 전기차시장이 확대될 전망이 명확한 상황에서 다양한 전동기와 전력디바이스를 정밀하게 제어할 수 있도록 하는 정밀한 전류센서가 폭넓게 응용될 것이고, 스마트그리드와 관련된 산업에서도 전력의 양뿐 아니라 질을 감지하는 전류센서의 활용도는 점진적으로 늘어날 것이다. 많은 IoT (Internet of Things) 디바이스의 폭발적인 개발 또한 전력을

제어하고 효율적인 활용을 위한 전류센서의 개발을 북돋우고 있다.

전류센서는 다양한 방식으로 구현될 수 있으나, 션트저항 (Shunt resistor)을 이용하는 방식은 저가격, 소형, 단순한 원리와 동시에 높은 정밀도를 나타내므로 전력전자분야에서 집중적으로 사용되어 왔다[6-11]. 그러나, 션트저항을 이용하는 전류센서는 감도를 높이기 위해서는 저항값을 높여야 하지만, 저항값을 높이면 전력소모가 심해지는 본질적인 단점이 있다. 또, 션트저항의 저항값은 일반적으로 전력소모를 줄이기 위해서 매우 작게 설계되지만, 이 경우 출력신호가 작아서 증폭비를 높일 수 있는 회로를 사용해야 하고, 회로의 증폭비는 측정 주파수대역과 반비례하기 때문에 고주파 전류를 측정하는 데에 한계가 있다. 흔하게 사용되는 전류센서 중 CT (Current transformer)는 페러데이의 전자기유도법칙을 직접 이

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

\*Corresponding author: Tel: +82-51-663-5152,

Fax: +82-51-625-1402, e-mail: khshin@ks.ac.kr

용하는 것으로, 페라이트나 실리콘스틸 등 연자성체로 제작된 토로이드타입의 코어에 2차측 권선을 감고 측정하고자 하는 전류가 흐르는 도선을 토로이드를 관통하도록 해서 전류를 측정한다[12,13]. 전류도체로부터 발생하는 자계에 의해서 토로이드형상의 자기 코어에 자속이 흐르게 되고, 자속의 시간적인 변화와 권선수에 비례하는 전압이 2차측 권선에서 측정되는 타입이다. CT의 경우 2차측 권선수를 높임으로써 출력감도를 높일 수 있기 때문에 증폭기의 사용이 용이하고 측정회로가 매우 단순하다 그러나, 일반적인 CT의 경우, 자성체 코어가 토로이드형상을 가지며 2차측 코일을 토로이드에 감아야 하기 때문에 소형화하는 경우 권선작업이 어려워지며, 이는 소형화에 한계를 가져오기도 한다.

본 연구에서는 소형화에 적합하고 제작이 용이하며 감도가 높아서 높은 주파수의 전류신호를 측정할 때 증폭회로의 부담이 적은 전류센서의 개발을 목적으로, 원통형 자성체 코어의 원주방향으로 검출코일을 감아서 제작한 새로운 타입의 전류센서를 개발하고 있다. 본 논문은 새로운 타입의 전류센서에 대한 것으로, 개념적인 작동원리를 설명하고 기초적인 성능에 대해서 보고한다.

## II. 실험 방법 및 작동원리

Fig. 1은 본 연구에서 제작하는 전류센서의 사진(a)과 치수를 기입한 개념도(b)를 나타낸다. 코어로는 내경 4 mm, 외경 12 mm, 길이 25 mm의 실린더 형상을 가지는 Mn-Zn ferrite를 사용하였다. 페라이트 코어의 양쪽 끝에는 두께 3 mm, 내경 4 mm, 외경 11 mm의 네오디뮴자석을 부착하였으며, 두 자석은 동일하게 두께 방향으로 착자되어 있다. 자석과 페라이트 코어에 설치된 구멍을 통해서 직경 1.6 mm의 전류도체 (Current path)가 관통하도록 하며, 페라이트 코어의 외부에 두께 0.3 mm의 절연된 구리선을 160 턴 감았다.

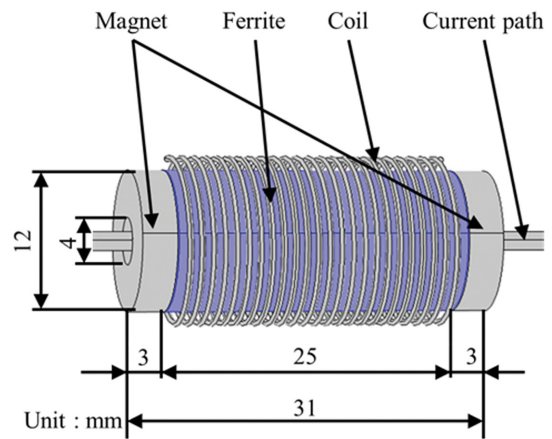
제작한 전류센서소자의 인덕턴스는 LCR미터(HIOKI 3522-50)을 이용하여서 측정하였고, 바이폴라전원(NF BP4610)을 이용하여서 전류도체에 교류의 전류를 흘리면서 검출코일 양단에서 발생하는 출력신호를 측정하였다. 인가되는 전류값을 정확도를 높이기 위해서, 전류도체와 직렬로 연결된 0.25 Ω의 세라믹저항(40 W)에 걸리는 전압을 측정하여 보정하였다. 전류도체에 흘리는 교류 전류는 10 kHz의 주파수로 인가하였고 진폭을 0~10 A로 변화시키면서 출력신호를 측정하였다.

원통좌표계( $\rho, \phi, z$ )에서 전류의 방향이  $z$ 방향이라고 하며, 페라이트코어를 관통하는 전류  $I = I_m \cos \omega t$ 에 의해서 원주방향으로 발생하는 자계  $\vec{H}_\phi$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{H}_\phi = \frac{I}{2\pi\rho} = \frac{I_m \cos \omega t}{2\pi\rho} \hat{\phi} \quad (1)$$



(a)



(b)

Fig. 1. (Color online) Photograph(a) and Schematic view(b) of the fabricated current sensor.

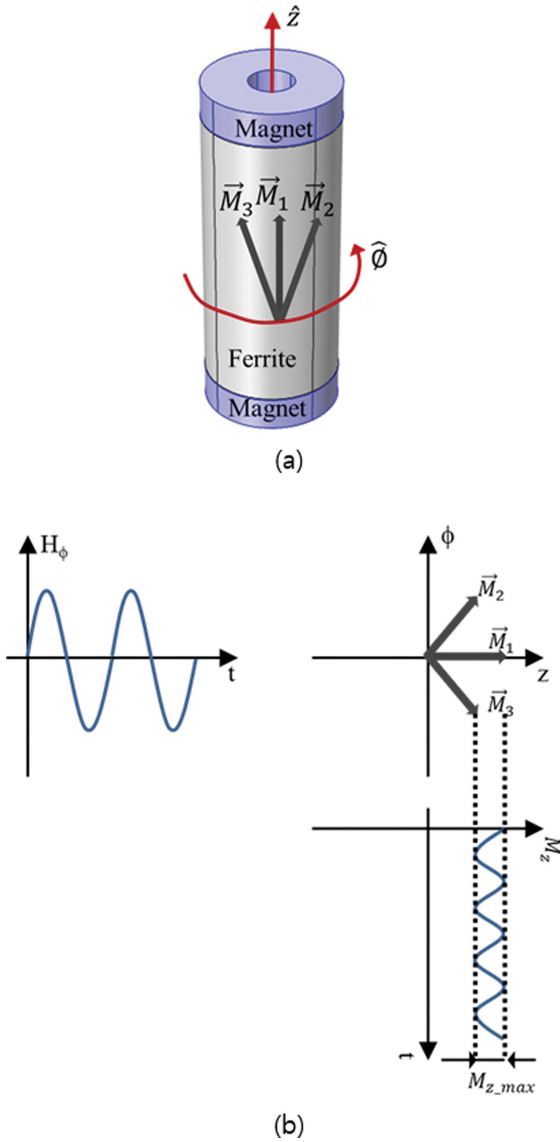
그리고 페라이트 코어 양쪽 끝에 부착한 2개의 영구자석에 의해서 페라이트 코어에 가해지는 직류 자계  $\vec{H}_z = H_z \hat{z}$ 를 함께 고려하면 페라이트코어에 인가되는 자계는  $\vec{H} = \vec{H}_\phi + \vec{H}_z$ 이다. 페라이트 코어에 가해지는 자계 중,  $\vec{H}_z$ 는 정적인 자계로서 페라이트 코어의 정적 자화 상태를 결정하고,  $\vec{H}_\phi$ 는 전류와 동일한 주파수를 가지는 교류 자계로, 페라이트 코어의 자속을 시간적으로 변화시켜서 검출코일에 전압이 발생하도록 한다. 이 때, 교류 자계에 의해서 발생하는 페라이트 코어 내부의 교류 자속은  $\vec{H}_\phi$ 의 크기, 즉 인가되는 전류의 크기에 비례하므로 검출코일에서 발생하는 전압을 측정함으로써 전류를 측정할 수 있다.

Fig. 2는 제작된 전류센서의 전류 측정 원리를 설명하기 위해서 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에서 나타낸 것처럼, 전류가 0일 때에는 원주방향의 자계  $H_\phi = 0$ 이므로 페라이트 코어의 자화는 영구자석의 자계  $H_z$ 에 의해서  $z$  방향 성분만 가진다 ( $\vec{M}_1$  상태). 그러나,  $z$  방향으로 전류가 인가되면 원주방향의 자계  $H_\phi$ 가 발생하게 되고, 전류의 크기( $\approx H_\phi$ )에 비례하여 자화가  $\phi$  방향으로 회전하게 된다( $\vec{M}_2$  상태). 또, 전류가  $-z$

방향으로 인가되면 원주방향의 자계  $-H_\phi$ 가 발생하게 되며, 전류의 크기( $\approx -H_\phi$ )에 비례하여 자화가  $-\phi$  방향으로 회전하게 된다( $\vec{M}_3$  상태). Fig. 2(b)에서 나타낸 것처럼 시간적으로 변하는 자계  $H_\phi$ 가 페라이트 코어에 주기적으로 인가되면 페라이트 코어의 자화 벡터도 자기에너지를 안정시키기 위해서 움직이게 된다. 이 때, 자화 벡터  $\vec{M}$ 의 z 성분( $M_z$ )의 시간변화도 나타나게 되며,  $M_z$ 의 주파수는 인가 전류 혹은 인가 자계  $H_\phi$ 의 2배가 된다.

페라데이법칙에 의해서 발생하는 출력 전압은,

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2)$$



**Fig. 2.** (Color online) Working principle of the fabricated current sensor. (a) Magnetization vector on the ferrite core and (b) AC magnetic field, magnetization vector on  $\phi$ - $z$  plane and z-component of magnetization vector dependent on time.

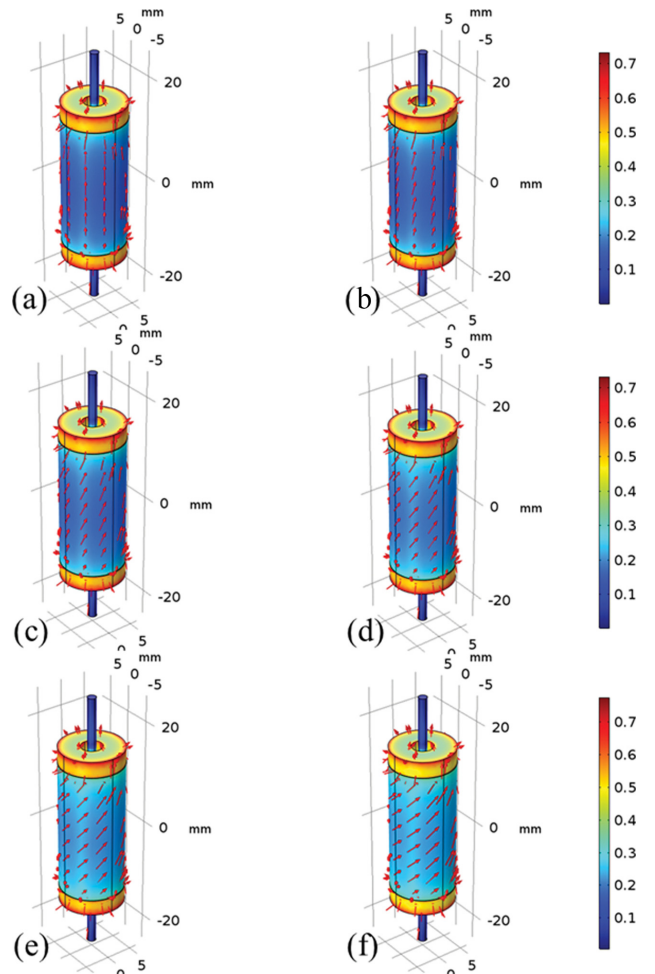
으로 나타낼 수 있다. 여기서  $N$ 은 검출코일의 권선수( $= 160$ )이다. 검출 코일의 면 방향은  $z$  방향이므로, 식(2)의 자속밀도 ( $B$ )는 자속밀도벡터의  $z$  성분( $B_z$ )이다. 자속밀도는 인가자계와 자화의 합  $B_z = \mu_0 H_z + \mu_0 M_z$ 이지만, 전류에 의해서 발생하는 자계는 오로지  $\phi$  성분만 가지므로  $H_z = 0$ 이다. 그리고, 전류 센서가 작동 중에 코일면적의 변화는 없으므로 페이저로 나타낸 출력전압  $\dot{V}$ 는,

$$\dot{V} = j\omega N \mu_0 M_{z,max} S \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서,  $M_{z,max}$ 는  $z$  방향 자화의 최대값과 최소값의 차이를 나타내며,  $S$ 는 코일의 단면적,  $\mu_0$ 는 진공 투자율을 나타낸다.

### III. 실험 결과

Fig. 3은 제작한 전류센서에 전류를 인가(0~25 A)하였을 때,



**Fig. 3.** (Color online) Magnetic flux density distribution on ferrite core according to applied current; (a)  $I = 0$  A (b)  $I = 5$  A (c)  $I = 10$  A (d)  $I = 15$  A (e)  $I = 20$  A (f)  $I = 25$  A.

자속밀도 벡터의 변화를 계산한 FEM 해석 결과를 나타낸 것이다. 이 해석을 위해서 상용 FEM 해석툴인 COMSOL Multiphysics와 AC/DC module[14]을 활용하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 전류가 인가되지 않았을 때에는 자속밀도 벡터는 z 방향을 향하고 있으나, 전류의 크기가 커짐에 따라  $\phi$  방향 성분이 전류의 크기에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터, 만약 교류 전류가 인가되면 자속밀도 벡터의 방향이 교류 전류의 크기와 방향에 따라 움직일 것이며, 이 자속밀도 벡터의 움직임에 따라서 검출코일에서 출력 전압이 발생 한다는 것을 예측할 수 있다.

식(3)을 이용하면 대략적인 출력 전압을 계산할 수 있다. 예를 들어, 10 A의 전류가 흐를 때, FEM해석을 이용하여 계산한 z 방향의 자속밀도  $B_z = \mu_0 M_{z\_max} \approx 6.8 \times 10^{-4}$  T였다. z 방향 자속이 통과하는 페라이트 코어의 단면적  $S \approx 1.01 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>으로 계산할 수 있다. 따라서, 주파수, 권선수, 자속밀도, 페라이트 코어 단면적을 이용하여서 식(3)을 계산하면 출력 전압  $V \approx 690$  mV 결과를 얻을 수 있다. 실제로 측정된 것이 아니라, FEM 해석 결과이기기는 하지만 z 방향으로 발생하는 자속밀도  $B_z$ 가 페라이트 코어의 포화 자속밀도(~1 T)에 비하여 매우 작다. 만약  $B_z$ 를 크게 할 수 있다면 센서의 출력 전압, 즉 감도를 향상시킬 수 있을 것이다. 이는 영구자석에 의해서 발생하는 자계에 비해서 전류에 의해서 발생하는 자계가 미약하기 때문이다. 측정하고자 하는 전류에 맞도록 적당한 잔류자속밀도를 가지는 영구자석을 선택할 수 있다면 센서의 감도향상에 도움이 될 것으로 예상된다.

Fig. 4는 제작한 전류센서의 전류도체에 전류를 흘리면서

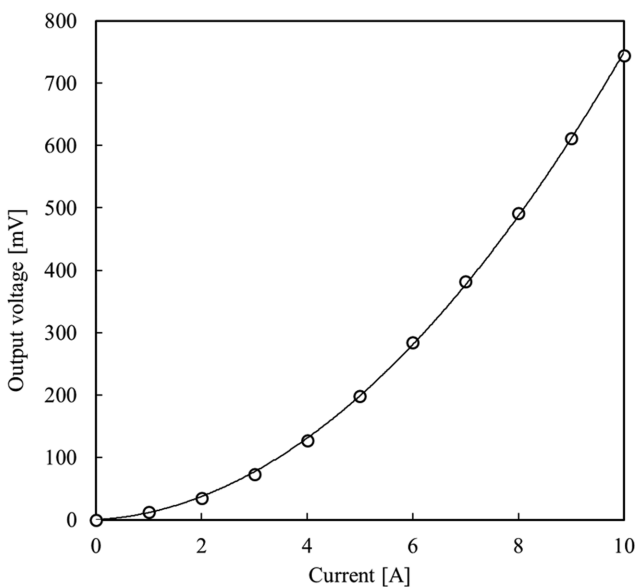


Fig. 4. Applied current dependence of output voltage of the fabricated current sensor.

측정한 출력전압을 나타낸 것이다. 전류 0~10 A의 범위에서 1 A씩 높여가면서 측정하였다. Fig. 4에는 측정된 실험 데이터(원으로 표시)와 실험데이터를 회귀분석법을 이용하여 구한 함수  $V = 7.04I^2 + 4.6I$ 를 선으로 함께 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 10 A의 전류에 의해서 대략 740 mV의 출력 전압이 얻어졌다. 이 실험결과는 앞에서 계산에 의해서 구한 출력 전압값(690 mV)와 거의 일치하는 것으로 볼 수 있다. 보다 정확한 계산을 위해서는, 전류센서 제작에 사용한 페라이트코어의 주파수특성을 엄밀히 분석할 필요가 있으며, 검출 코일의 인덕턴스뿐 아니라 권선간 캐패시턴스를 정확하게 분석할 필요가 있으며 현재 관련 연구를 진행하고 있다.

Fig. 4에서 전류가 증가함에 따르는 출력전압은 선형적으로 증가하지 않는다. 그러나, 출력전압은 전류를 독립변수로 하는 매우 단순한 2차함수로 정확하게 표현할 수 있다. 최근의 센서들은 대부분 증폭이나 필터링과 같은 아날로그회로와 함께 연산기능과 저장기능을 함께 가진 디지털회로로 처리된다. 따라서, 출력특성이 선형적이지 않더라도 단순한 함수로 출력을 정의할 수 있는 경우 신호처리에 문제가 되지 않는다. 출력 전압은, 필요에 따라, 검출코일의 권선수를 높이거나 출력단에 적당한 캐패시터를 설치함으로써 높일 수 있다. 이 때, 권선수의 증가에 의해서 인덕턴스와 함께 선간 캐패시턴스도 함께 증가하게 되므로 검출코일의 공진주파수는 권선수에 반 비례하여 낮아지는 경향이 있다. 따라서, 측정하고자 하는 주파수에 맞도록 검출코일을 최적화하여 설계할 필요가 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 소형화에 적합하고 고주파 전류측정이 용이한 전류센서의 개발에 있어서, 개발 중인 전류센서의 작동 원리와 기본적인 출력특성을 보고한다. 본 연구에서 개발하고 있는 전류센서는 가장 일반적으로 사용되고 있는 CT(Current transformer)와 같이 페리데이 법칙에 의해서 출력전압을 얻는 방식이기는 하지만 검출코일의 면이 전류에 의해서 발생하는 자계/자속과는 직교하는 방향을 가지는 차이점이 있다. 기존의 CT의 경우 토로이드 형상에 검출코일을 감아야 하므로 소형화에 한계가 있고 소형으로 제작하는 경우 권선 작업이 어려워진다. 그러나, 본 논문에서 소개하고 있는 전류센서의 경우 페라이트코어의 원통면에 검출코일을 설치하기 때문에 소형화 및 권선작업에 유리하다. 전류를 변화시키면서 측정된 출력전압은 2차함수적인 경향을 나타내었으며, 10 A의 전류에 의해서 740 mV의 출력전압이 얻어졌다. 전류에 대한 출력특성이 선형적이지 않지만 회귀분석곡선과 실험데이터는 매우 잘 일치하였기 때문에 전류센서로 사용하는 것에 문제가 없을 것으로 판단된다. 본 논문에서는 새롭게 제안된 직

교 지속 검출형 전류센서의 작동원리를 설명하고 기본적인 성능을 제시함으로써 고주파 전류센서로서 사용가능성에 대해서 보고 하고 있다. 그러나, 실제로 새로운 전류센서가 산업 현장에서 사용되기 위해서는 온도특성, 측정하고자 하는 전류의 주파수 의존성을 포함한 다양한 추가 검토가 필요하며, 기존의 전류센서들과 비교 검토함으로써 제안된 전류센서의 장점과 단점을 공정하게 파악할 필요가 있기에 현재 필요한 추가 실험과 검토를 진행하고 있다.

### References

- [1] J. D. Tuner and L. Austin, Proc. Inst. Mech. Eng., Part D J. Automob. Eng. **214**, 589 (2000).
- [2] C. W. Potte, A. Archambault, and K. Westrick, Proceedings of the 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 15 (2009).
- [3] J. Pelegría, J. B. Ejea, D. Ramírez, and P. P. Freitas, Sens. Actuators A. **105**, 132 (2003).
- [4] S. Ziegler, R. C. Woodward, H. H. Iu, and L. J. Borle, IEEE Sens. J. **9**, 354 (2009).
- [5] Y. Ouyang, J. He, J. Hu, and S. X. Wang, Sensors. **12**, 15520, (2012).
- [6] C. M. Johnson and P. R. Palmer, IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology **141**, 471 (1994).
- [7] J. A. Ferreira, W. A. Cronje, and W. A. Relihan, IEEE Trans. Power Electronics **10**, 32 (1995).
- [8] R. Malewski, Review of Scientific Instruments **39**, 90 (1968).
- [9] R. Malewski, C. T. Nguyen, K. Feser, and N. Hylten-Cavallius, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-100, 1333 (1981).
- [10] F. Castelli, IEEE Trans. Instrumentation and Measurement **48**, 894 (1999).
- [11] F. Costa, P. Poulichet, F. Mazaleyrat, and E. Labouré, EPE Journal **11**, 7 (2001).
- [12] N. McNeill, N. K. Gupta, S. G. Burrow, D. Holliday, and P. H. Mellor, IEEE Trans. Power Electronics **23**, 591 (2008).
- [13] N. McNeill, N. K. Gupta, and W. G. Armstrong, IEEE Trans. Power Electronics **19**, 908 (2004).
- [14] <https://www.comsol.com>.