

## 전력용변압기에서 UHF 부분방전 신호의 전파 특성

윤진열<sup>1,a</sup>, 한기선<sup>1</sup>, 주형준<sup>1</sup>, 구선근<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소

### Propagation Characteristics of Ultra High Frequency Partial Discharge Signals in Power Transformer

Jin-Yul Yoon<sup>1,a</sup>, Ki-son Han<sup>1</sup>, Hyung-Jun Ju<sup>1</sup>, and Sun-Geun Goo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Transmission and Distribution Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, Daejeon 305-380, Korea

(Received August 4, 2010; Revised September 8, 2010; Accepted September 16, 2010)

**Abstract:** This paper describes the characteristics of electromagnetic wave propagation in power transformer. A transformer which is similar to 154 kV single phase on-site transformer unit was provided for the purpose of the experiment. The 12 dielectric windows on the transformer enclosure to install UHF (ultra high frequency) sensors and the full scale mock ups of winding and the core were also equipped in the transformer. Every sensors to be installed to the transformer was tested and verified whether they show same characteristics or not before the experiment. A discharge gap which was used as a PD (partial discharge) source moved to several necessary locations in the transformer to simulate dielectric defects. Propagation times of electromagnetic wave signal from PD source to sensors decided by the routes of both reflection phenomenon and diffraction phenomenon were compared each other. The experimental results showed propagation route of the PD signal makes an effect on the frequency spectrum of front part of the signal and the magnitude of the signal and propagation time of the signal when the signal is captured on the sensor.

**Keywords:** Power transformer diagnosis, Partial discharge, Electromagnetic wave, Diffraction, Reflection

#### 1. 서 론

가스절연개폐장치에 적용한 UHF (ultra high frequency) 부분방전 (partial discharge, PD) 검출기술을 전력용 변압기에 적용하기 위한 연구가 수년 전부터 영국, 독일, 중국 등에서 진행되어 왔으며 상업용 수준까지는 아직 미흡하기는 하지만 가까운 시일 내에 상당한 수준까지 진전이 이루어 질 것으로 예측된다 [1-4]. 전력용압기 내부에서 부분방전이 발생할 때 방사되는 전자기파 신호의 주파수 분포가 UHF 대역에 걸쳐 발생하는 현상에 대해서는 연구자들 간에는 큰 이견이 없는 것으로 보고되고 있으나 GIS

(가스절연개폐장치, gas insulated switchgear)에 적용한 기술을 전력용 변압기에 적용하는 데에는 학자들마다 다양한 의견이 제시되고 있다 [5,6]. UHF 부분방전 기술을 전력용 변압기에 적용하기 위해서는 GIS의 경우와 마찬가지로 여러 분야의 기술이 함께 개발되어야 한다. 이들 요소기술은 센서설계 및 제작, 센서 배치, 결합위치 추정, 결합종류 식별, 잡음처리 기술을 포함하여 신호취득 및 처리와 같은 감시시스템의 설계 및 제조기술 등으로 구성된다. 변압기는 주요 절연 매질이 절연유이고 기기 외함구조가 육면체 형태인 3차원 구조인데다, 센서 장착 가능위치가 제한적이라든가 결합 존재위치가 매우 복잡한 형태를 갖는 코일이라는 점 등에서 GIS와 비교할 때 기술난이도가 상대적으로 매우 높다. 센서기술의 경우 변압

a. Corresponding author: jyoon@kepri.re.kr

기 외함에 센서 장착용 창 (window)을 이용하거나 변압기 보수용 밸브, 맨홀 등을 이용하여 센서를 장착하는 방법을 주로 사용하며, 센서의 장착위치 제한 때문에 센서 감도를 높이는 데에는 한계가 있으나 변압기의 구조가 갖는 밀폐특성 때문에 상당 수준 만족스런 감도를 얻을 수 있다 [7,8]. 결함 종류를 식별하는 기술의 경우 지금까지 여러 학자들이 절연물 표면 방전, 절연부 공극결함, 돌출전극에 의한 코로나 방전 결함, 부유전극 (floating electrode)결함, 도체간 접촉 불량을 주로 PRPD (phase resolved partial discharge)와 같은 인가전압 위상을 기준으로 분석해 온 것이 주류를 이루고 있다 [9-14].

결함의 위치를 추정하는 기술은 이 분야에서 가장 복잡한 부분으로서 많은 학자들이 TOA (time of arrival)방법을 제시하고 있으나 위치추정 정확도 측면에서 아직까지 부족한 편이며, 많은 학자들에 의해 다양한 시도들이 경쟁적으로 이루어지고 있다 [15-18].

본 논문에서는 UHF 전자기파 신호가 전력용변압기 내에서 전파하는 특성을 실험을 통하여 규명함으로써 결함위치 추정분야 기술진전에 기여하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험용변압기의 설계 제작

변압기 내부에서 전자기파 부분방전 신호의 전파특성을 파악하기 위하여 실험용 변압기를 설계제작하였다. 설계한 변압기는 국내에 가장 많이 사용하고 있는 154 kV, 15/20 MVA 표준 단상변압기와 동일한 규격으로 하였으며 실제 변압기에 있는 방열기, 콘서베이터, OLTC (on load tap changer) 등은 제외하였고 그 외 권선과 철심 같은 변압기 주요 부품은 최대한 실제 변압기와 동일하게 제작하였다. 실험용 변압기 외함은 절연유의 압력을 견딜 수 있도록 실제사용 변압기와 유사한 강도를 갖도록 하였다. 전자기파 방전신호 검출용 UHF PD 센서의 설치를 위해 그림 1과 같이 외함의 전면에 3개, 후면에 4개, 상판에 3개, 측면에 각 1개를 설치하여 총 12개의 감시창을 설치하였다. 그림 2와 같이 변압기 전면에는 부분방전원의 교체와 권선 교체가 용이하도록 사람이 출입할 수 있는 출입문을 설치하였고, 측면 하부에는 고전압을 인가하고 센서의 신호를 취득할 수 있도록 연결부 (feed through)를 배치하였다. 상판에는 부싱이 설치

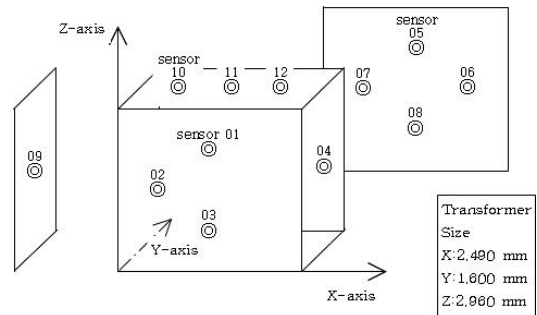


Fig. 1. Sensor locations on transformer tank.



Fig. 2. Transformer for experiment.

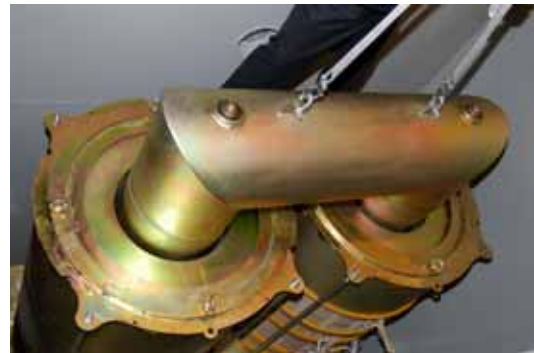


Fig. 3. Mock-ups of windings and core in the transformer.

되는 구조이며 변압기 내부에 장착되는 철심은 중량을 줄이고 조립과 분해가 용이하도록 적층철심의 설계키와 같은 외형을 갖도록 금속원통 구조로 하였다.

권선부분은 그림 3과 같이 좌, 우 양측에 모형권선을 배치하였으며, 우측 (출입문측) 권선은 실제권선과 동일한 권선을 중간높이에 배치하고, 좌측권선은 금속제 원통형으로 권선을 모사하였다.

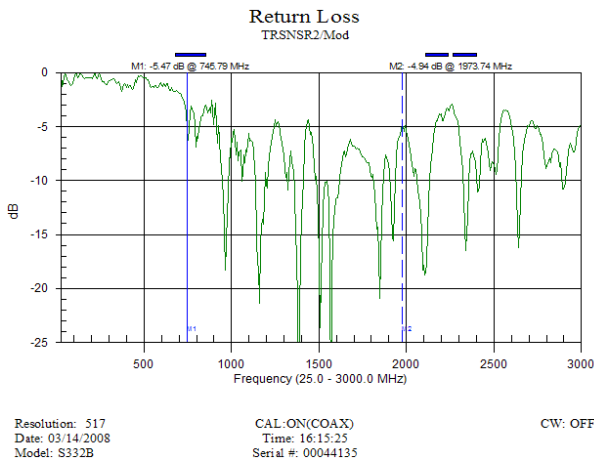


Fig. 4. S11 characteristics of the sensor.

**2.2 UHF 부분방전 센서**

실험용 변압기에 적용된 감시창은 지름이 150 mm이며 여기에 적합하도록 등각 스파이럴 형태의 센서를 다수 제작하였다. 센서를 감시창에 설치한 후 제작상의 결함 또는 오차를 확인하기 위하여 Network analyzer (일본 Anritsu사 S331)을 이용하여 그림 4와 같이 반사손실을 측정하였다. 제작된 모든 센서의 반사손실 측정결과로부터 가장 유사한 12종을 선택하여 실험용 변압기의 센서창에 설치하였다.

**2.3 실험장치의 구성과 실험방법**

방전원으로는 수직 및 수평편파를 동시에 발생시키는 방전 갭 (BBS75, 미국 Citel사)을 절연유를 채우지 않은 상태에서 실험의 용도에 알맞게 위치를 옮겨가며 사용하였다. 방전 전원으로는 임펄스 발생기 (Impulse noise generator, INS-410, 일본 Noise Laboratory사)를 이용하여 300~400 V의 임펄스를 인가하여 방전을 발생시켰다. 또한 발생된 전자기파 방전신호는 센서로부터 초고속 오실로스코프 (DPO71254, 미국 Tektronix, sampling=50 GS/s, bandwidth=12.5 GHz)를 사용하여 측정하였다.

전자기파의 전파특성 중 직선전파와 회절전파에 의한 소요시간을 비교측정하기 위하여 방전 갭을 그림 5와 같이 변압기의 정 중앙에 위치시켜 센서 1과 5에서는 직선전파 시간을, 센서 4와 9에서는 회절전파 시간을 측정하였다. 또한, 회절전파에 의한 신호의 파두부분 주파수 영향을 측정하기 위하여 방전 갭을 그림 6과 같이 센서 8의 전면에 위치시켜놓고 직선전파

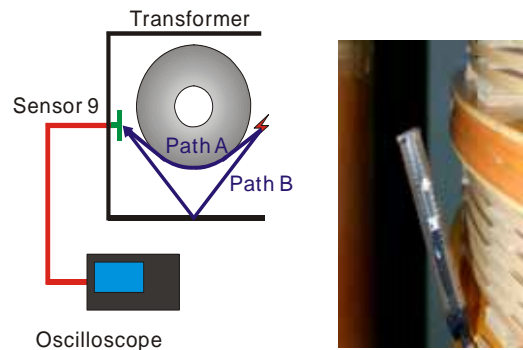


Fig. 5. Propagation paths of the PD signal and discharge gap as a discharge source.



Fig. 6. Discharge source in front of sensor 8 seen between mock windings.

경로에 있는 센서 3과, 비슷한 전과거리에서 회절전파 경로를 갖는 센서 9에서 신호를 취득하여 파두부분 주파수 분포를 측정하여 비교하였다. 또한 회절전파 과정에서 신호크기 감쇠효과를 측정하기 위하여 센서 8의 전면에 방전갭을 위치시켜 둔 상태에서 서로 비슷한 거리에 있으면서 권선표면을 따라 회절전파 경로를 갖는 센서 4와 금속원통 표면을 따라 회절전파 경로를 갖는 센서 9에서 신호를 취득하여 서로 비교하였다.

**3. 결과 및 고찰**

방전갭을 변압기 정 중앙에 배치시킨 상태에서 센서 1, 4, 5, 9에서 신호를 취득하였다.

각 센서에서 측정된 전자기파 방전신호의 파형을 그림 7과 같이 FFT (fast fourier transform) 하면 각

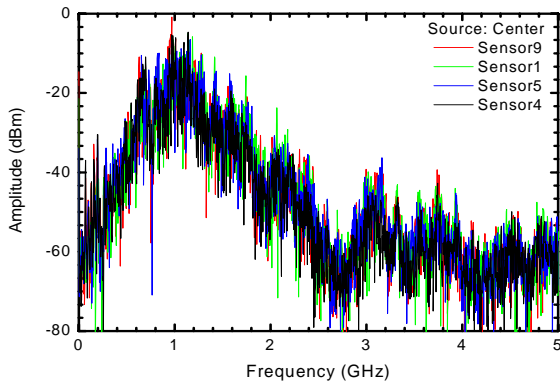


Fig. 7. Frequency spectrum of electromagnetic wave signals caused by PD source located at center of the transformer.

센서에서 취득한 신호들은 2.5 GHz 까지 충분한 크기의 주파수 분포를 보여주고 있으며 방전궤은 절연 유 중에서의 부분방전 주파수 분포를 잘 나타내주고 있음을 알 수 있다 [19].

취득한 신호는 그림 8과 같으며 각 센서에 도착한 신호의 시간은 표 1과 같다. 방전신호가 센서에 도착한 시간은 센서 1과 5, 센서 4와 9는 전파거리가 비슷하므로 미세한 오차범위 (각각 0.14 ns 및 0.05 ns) 에서 서로 일치한다. 센서 1 (또는 5)과 센서 4 (또는 9)에 신호가 도착한 시간의 차이는 1.71 ns (혹은 센서 5,9의 차이는 1.56)이다. 방전원과 센서 1 (또는 5) 사이에는 장애물이 없어 방전원으로 부터 직선경로 108.5 cm를 신호가 전파하여 센서에서 감지된다. 방전원과 센서 4 (또는 9) 사이에는 권선 (또는 원통모형)이 존재하여 회절전파 경로 (그림 6의 path A) 거리는 151.4 cm 이고 변압기 외함에 의한 반사경로 (그림 6의 path B) 거리는 202.7 cm이다. 따라서 직선경로 (108.5 cm)를 기준할 때 회절경로 (151.4 cm)와 반사경로 (202.7 cm)의 차이는 각각 42.9 cm와 94.2 cm이며, 이는 전자기파가 각각 1.43 ns 및 3.14 ns 동안 전파하는 시간이다. 그런데 표 1에서 센서 1과 센서 4의 측정 시간차는 1.71ns (또는 센서 5, 9의 측정 시간차는 1.56ns)이다. 회절경로에 의한 시간오차는 1.71-1.43=0.28 ns, 반사경로에 의한 시간오차는 1.71-3.14=-1.43 ns 이므로 변압기 정 중앙에 배치된 방전원으로 부터 센서 4까지 전파한 전자기파가 전파한 경로는 반사가 아닌 회절에 의한 것임을 알 수 있다.

직선경로와 회절경로에 의해 전파되는 신호의 파두부에 대한 주파수 특성을 비교하기 위해 방전원을 센서

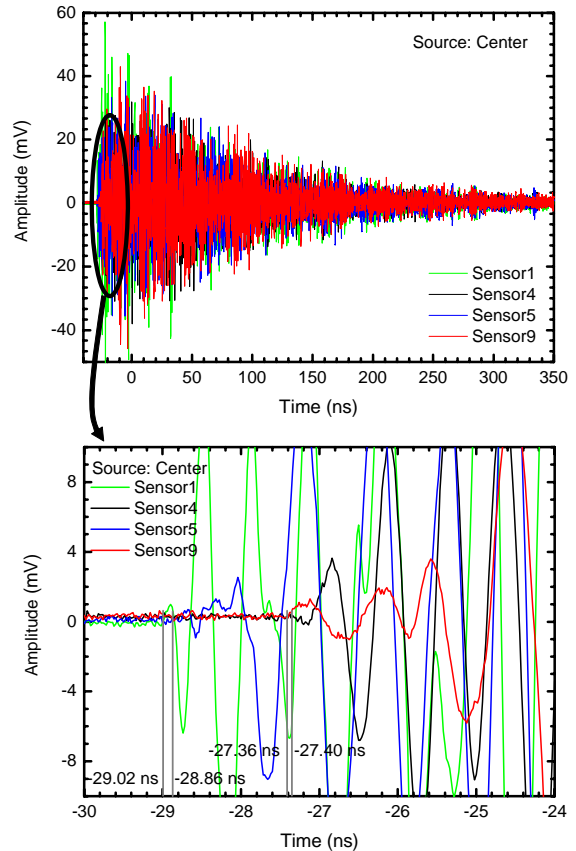


Fig. 8. Electromagnetic wave signals captured on the sensors (1,5,4,9) caused by PD source located at the center of the transformer.

Table 1. Arrival times of the signals captured by the sensors when PD source was located at the center of the transformer.

No. of sensors	Sensor 1 (Sensor 5)	Sensor 4 (Sensor 9)
Measured arrival time (ns)	-29.02 (-28.86)	-27.40 (-27.36)
Measured arrival time when length of coaxial cables considered. (ns)	-29.11 (-28.93)	-27.40 (-27.37)

8의 전면에 배치해 둔 상태에서 센서 3과, 방전원으로 부터 유사한 회절경로를 갖는 센서 9 에서 측정 한 두 신호의 파두부분 주파수 분포를 그림 9와 같이 분석하였다. 그림에서 센서 9의 파두부 고주파 성분이

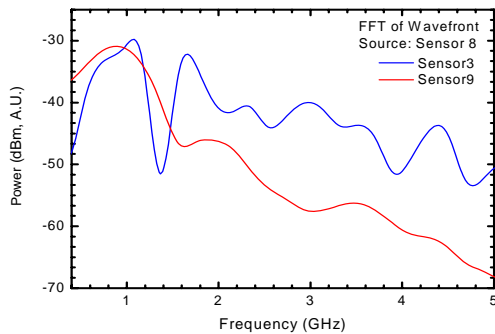


Fig. 9. Frequency spectrum of wave fronts of sensor 3 and sensor 9 when PD is located in front of sensor 8.

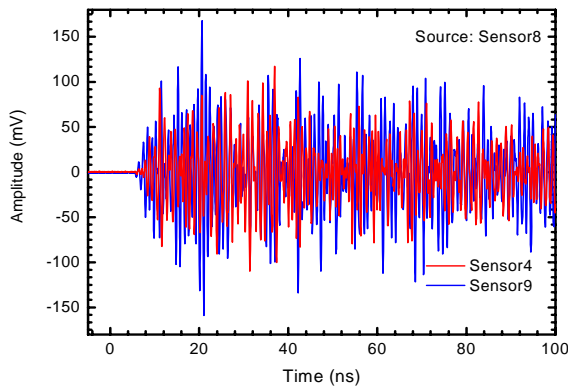


Fig. 10. Waveforms of sensor 4 and sensor 9 when PD source is located in front of sensor 8.

센서 3보다 작음을 알 수 있으며 이는 회절에 의해 파두부의 고주파수 성분이 낮아졌음을 의미한다.

방전위치 정확도를 높이기 위해서는 신호의 시작점을 정확히 알아낼 필요가 있으며 이는 곧 신호의 파두부 고주파 성분이 클수록 정확도가 높아짐을 감안할 때 신호전파 경로 상에서 회절경로가 클수록 위치 추정 정확도는 낮아짐을 의미한다.

방전신호가 전파과정에서 권선표면을 회절할 때의 신호크기 영향을 알아보기 위해 방전원을 센서 8의 전면에 배치한 상태에서 비슷한 전파거리에 있는 센서 4와 센서 9에서 신호를 측정하여 그림 10에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 권선표면을 회절경로로 갖는 센서 4의 신호가 금속표면을 회절경로로 갖는 센서 9의 신호보다 약 30% 작게 나타났다. 이는 권선표면을 따라 신호가 진행되는 과정에서 신호의 일부가 권선 내부로 침투함에 따라 센서 4에 도달한 신호크기는 상대적으로 작아진 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

154 kV, 15/20 MVA 표준 단상변압기와 동일한 규격으로 실험용 변압기를 제작하여 부분방전에 의한 전자기파의 전파특성에 대해 실험을 하였다.

부분방전에 의한 전자기파 신호가 변압기 내부를 전파하는 경로는 다양하나 센서에서 측정되는 신호의 파두부를 결정하는 전파경로는 직선경로에 의하며, 직선경로 상에 지장물이 있을 경우에는 탱크면에 의한 반사에 의해서가 아니라 지장물의 표면을 따라 회절하는 경로를 따라 전파함을 알 수 있었다.

전자기파 신호가 변압기 내부를 전파할 때 직선경로와 회절경로에 의해 신호 파두부에 대한 주파수 분포에 미치는 영향을 비교한 결과 회절과정에서 신호 파두부의 고주파수 성분이 직선경로에 비해 상대적으로 더 작아짐을 알 수 있었다. 방전위치 정확도를 높이기 위해서는 즉, 신호 시작점을 정확히 파악하기 위해서는 신호 파두부의 고주파 성분이 클 필요가 있음을 감안할 때 신호전파 경로 상에서 회절경로가 길수록 위치추정 정확도는 낮아질 것으로 예측된다.

방전신호가 전파과정에서 권선표면을 회절경로로 갖는 경우 신호 크기가 금속표면의 경우에 비해 크게 감쇠함을 확인할 수 있었다.

본 실험결과에서 얻은 전자기파 전파특성은 변압기 내 결함위치 추정 정확도를 높이는 데에 필요한 기본 기술로서 뿐만 아니라 센서의 배치기술 확보에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### REFERENCE

- [1] P. Werle, H. Borsi and E. Gockenbach, *IEEE International Symposium on Electrical Insulation* (IEEE, MA, USA, 2002). p. 166.
- [2] E. Gockenbach, *2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP '04)* (IEEE, 2004) p. 466.
- [3] Z. B. Shen and E. F. El-Saadany, *IEEE Power Engineering Society General Meeting 2006* (IEEE, Montreal, Canada, 2006) p. 6.
- [4] J. Fuhr, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **12**, 1005 (2005).
- [5] H. Xiaoyun, L. Yifeng, and L. Yi, *Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials* (IEEE, Xi'an, China,

- 2000) p. 753.
- [6] M. Homaei and A. Mazhab Jafari, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2008 (CMD 2008)* (CMD, Beijing, China, 2008) p. 923.
- [7] A. M. Jafari and A. Akbari, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **15**, 1174 (2008).
- [8] P. Agoris, S. Meijer, J. J. Smit, and Lopez-Roldan, *8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials* (Bali, 2006) p. 230.
- [9] P. Agoris, P. Cichecki, S. Meijer, and J. J. Smit, *IEEE Lausanne Power Tech* (IEEE, Lausanne, Swiss, 2007) p. 2070.
- [10] F. Massingue, S. Meijer, P. D. Agoris, J. J. Smit, J. Lopez-Roldan, *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2006* (IEEE, Toronto, Canada, 2006) p. 542.
- [11] G. P. Cleary and M. D. Judd, *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.* **153**, 47 (2006).
- [12] D. Aschenbrenner, H.-G. Kranz, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **12**, 216 (2005).
- [13] J.-Y. Yoon, H.-J. Ju, S.-G. Goo, and K. Park, *J. KIEEME* **22**, 879 (2009).
- [14] R. A. Jongen, P. Morshuis, S. Meijer, and J. J. Smit, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 2005 (CEIDP '05)* (IEEE, TN, USA, 2005) p. 565.
- [15] Z. Tang, C. Li, X. Huang, Z. Li, and S. Fu, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 2004 (CEIDP '04)* (IEEE, 2004) p. 477.
- [16] L. X. Zhou and W. G. Li, *1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* **1**, 615 (2006).
- [17] Z. B. Shen and E. F. Ei-Saadany, *2006 Power Engineering Society General Meeting* **1**, 2660 (2006).
- [18] J. G. Yang, D. J. Li, J. Li, P. Yuan, and Y. M. Li, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2008 (CMD 2008)* (CMD, Beijing, China, 2008) p. 1088.
- [19] H. J. Ju, S. G. Goo, K. J. Park, K. S. Han, and J. Y. Yoon, *Trans. KIEE* **57P**, 56 (2008).