

부분방전 신호의 누적검출과 뉴럴-퍼지 알고리즘을 이용한 컴퓨터 진단에 관한 연구

황 경 준* · 염 경 태* · 김 용 갑** · 김 진 수***
원 광 대 학 교 · 케 이 디 파 위

A study on the computer diagnosis that apply Neural-Fuzzy algorithm accumulation detection of Partial Discharge signal

Kyoung-Jun Hwang* · Keoung-Tae Yeoum* · Yong-Kab Kim** · Jin-Su Kim***
WONKWANG UNIVERSITY · KD POWER

Abstract - In this paper, we have studied for analysis of the partial discharge(PD) signal in power transmission line. The PD signal has estimated as detected signal accumulation of a PRPDA method by using Labview, and analyzed with neural-fuzzy algorithm. With practical PD logic implementation of theoretical detected system and hardware implementation, the device for Hipotronics Company's 22.9kV or 154kV setup have generated and then have applied with 18kV,20kV with 1:1 time probe. It's also used the LDPE 0.27mmt (scratch error 0.05mmt) to sample for making PD. Our new class of PD detected algorithm have also compared with previous PRPDA or Neural Fuzzy algorithm, which has diagnose more conveniently by adding numerical values.

1. 서 론

지중송전 시스템은 초고압화가 되어 선로에 대한 안전성에 대한 관심이 높아지고 있다. 주로 적용되었던 내전압시험, 절연저항법, 누설전류측정법, tanδ등 여러 가지 진단방법이 시도되고, 계속 연구하고 있다. 그러나 진단의 정확도 면에서 많이 부족하다는 결과가 보고되고 있다.[1] XLPE케이블 시스템의 경우 주로 절연체에 돌기나 금속이물 등으로 형성된 고전계로 인해 절연과파가 일어나는 과정에서 부분방전(Partial Discharge: PD) 신호가 필연적으로 발생하게 되는데, 이 부분에 착안점을 두고 XLPE 케이블을 진단할 수 있는 가장 효과적인 방법으로서 부분방전검출을 이용한 진단법을 제시하였다.[2] 그러나 부분방전은 시간적 측면에서 매우 비주기적인 신호일 뿐만 아니라 현장 실측 데이터의 경우 주변의 여러 가지 노이즈의 영향으로 부분방전 유무의 판별이 어려운 실정이다. 때문에 부분방전을 주변의 노이즈들과 구분해내는 일은 매우 어려운 일일뿐 아니라 부분방전 진단이라는 커다란 숙제라고 할 수 있다. 인간 두뇌의 근사 모델인 신경회로망과 애매성을 해결하려는 퍼지이론이 컴퓨터를 이용한 계측 기술이 비약적으로 발전함에 따라 국내외에서 인공지능 알고리즘을 이용하여 부분방전을 진단하려는 연구들이 활발히 진행되고 있다.[3] 선진 기술을 가지고 있는 해외에서 뿐만 아니라 국내에서 신경망 알고리즘을 이용한 부분방전 유무 진단에 대한 연구결과가 발표되고 있어 컴퓨터 진단에 대한 가능성을 보여주고 있다.[4] 하지만 현재의 컴퓨터 계측 기술이나 장비의 성능으로 볼 때에 가장 큰 문제로 Noise에 대한 판단을 내리기 어렵기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 부분방전신호를 계측기로 측정하는 방법보다 정확성을 높이기 위하여 이산적인 사고를 할 수 있는 알고리즘을 통하여 부분방전 신호에 대한 좀 더 많은 정보를 획득할 수 있는 분석 알고리즘을 개발하여 컴퓨터로 진단하는데 중점을 두었으며, 이러한 알고리즘을 이용하여 모호함을 수치로 표현 가능한 방법으로 뉴럴-퍼지 기법을 사용하였다.[5,6,7,8] 현재 공학계열에서 많이 사용되고 있는 Labview를 이용하여 부분방전 신호를 PRPDA법으로 누적 검출하고 검출된 신호를 뉴로-퍼지 알고리즘으로 해석함으로써 부분방전 신호의 누적 패턴과 해석된 수치를 같이 비교 분석하여 부분방전 진단을 하고자 한다.[8]

2. 본 론

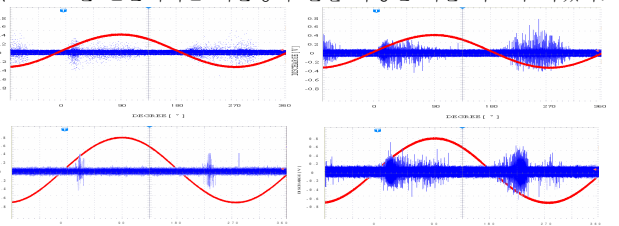
2.1.1 부분방전 발생 형태

부분방전은 높은 에너지를 가진 전자 혹은 가속이온들의 에너지 변환에 의하여 재료에 여러 가지 형태의 화학적/물리적 변형을 일으키며 재료를 열화 시킨다. 부분방전의 검출은 방전 중에 발생하는 에너지의 변환에 근거를 두고 있다. 이러한 변환은 전기적 임펄스 전류, 전자파 방사, 소리, 기체 압력의 증가, 화학적 반응 등으로 나타나므로 관측하고자하는 측정치 물리량에 따라 부분방전 측정방법이 결정된다.

부분방전은 한주기를 360°로 보았을 때 주로 0°~90° 부근과 180°~270° 부근에서 발생하며 절연과파가 심화될수록, 전압이 높을수록 방전량과 방전횟수는 증가하는 경향을 보인다. 또한 그 원인과 상황에 따라 여러 가지 형태를 가지는 특징을 보인다.[7] 여러 개의 다양한 크기의 공극이 절연체 내부에 존재할 때와 인접해 있는 두 개의 절연 도체 사이의 외부절연 표면에서 방전이 발생할 때 주로 나타난다. 그리고 한쪽 주기에 방전량이 크고 방전횟수가 적고, 다른쪽 반주기에는 방전량이 적고 횟수가 많은 방전의 형태를 보여주고 있는데 이런 형태는 주로 케이블의 카본(Carbon)층과 유전체 사이에 있는 공동(Void)에서 발생하는 내부 방전의 형태이며, 유전체 표면의 도전율이 일정하지 않을 때 발생하므로 확실하게 구분이 어려운 방전 형태이다. 부극성 반주기에 나타나면 고압부위에서 방전이 발생하며, 정극성 반주기에서 나타나면 접지 측에서 방전이 발생하는 특징이 있다.[6]

2.1.2 PRPDA 부분방전 패턴인식 및 분석

PRPDA기법은 부분방전 패턴 인식법 중에서 노이즈와 부분방전 신호를 구분하기 위한 것으로 이를 이용하여 PD신호 검출 시스템을 구성하였으며 PRPDA 기법을 좀 더 자세히 기술하면 다음과 같다.PRPDA 분석방법은 크게 기본량, 집적량, 통계량의 세 개의 그룹으로 분류된다. 하지만 본 연구에서는 기본량만을 이용하여 PD검출 시스템을 구축 하였으므로 본 논문에서는 기본량에 관한 사항만 기술 하도록 하겠다.



<그림 1> 오실로스코프로 측정된 부분방전 신호

본 실험에 적용된 분석법인 기본량은 시험전압의 한 주기 동안 측정된 순시적인 방전신호를 기록하기 위한 정량화 된 값으로, 방전크기, 방전이 발생한 시간과 한 주기의 방전발생수로 표현된다. 방전크기(q_i)는 시간에 따른 방전전류 $i_q(t)$ 에 의한 변위전하의 양은 걸보기 전하량 q_0 로 정의되며 이 양은

$$q_i = C_0 \delta V_c \quad [pC] \quad (1)$$

로 표현된다.. 여기서, C_0 는 내부결함과 직렬 연결된 커패시턴스이며 δV_c 는 결함으로부터 발생하는 전압강하 값이다. 방전 발생시간은 방전이 발생했을 때, 시험전압의 주기 중 시간의 함수로서 발생위치에 대한 정보이고, 따라서 시험전압의 위상 ϕ_i 와 발생전압 U_i 로 표현된다. 방전 발생 수(N_q)는 방전의 발생 빈도수로 한 주기 또는 반주기 동안의 방전발생 수를 의미한다.[9,10]

2.2.1 뉴로-퍼지이론 부분방전 분석시스템

PD신호를 진단하기 위한 뉴로-퍼지 알고리즘 개발을 위해 MATLAB이 사용되었다. 개발 언어로는 C언어를 이용하여 프로그래밍(Programming)을 하였다. 퍼지 이론에서 취급하는 애매함(Fuzziness)은 여러 가지 애매함의 형태 가운데서 특히, 인간의 언어 및 사고에 관련된 애매함이다. 확률론과 같은 곳에서 취급하는 애매함과는 그 형태가 다르다.[11] 여기에 뉴럴 기법을 적용하여 설명하면 사람에게 두뇌에서 판단하는 모호성과 학습능력을 만들어 기존에 학습된 지식을 바탕으로 새로이 받아들이는 지식의 해답을 컴퓨터상에서 분석하고자 뉴럴-네트워드를 접목하여 시스템을 구성하였다. 임의의 입력을 가지고 각 노드를 지나면서 멤버쉽 함수를 만든다. 그리고 노드간 추론을 거쳐 결론을 도출하게 된다. 레이어별 분류로 변환하는 방식을 설명하였다.

$$R_i : \text{If } X_i \text{ is } A'_{1i}(\alpha_1) \text{ and...} \quad (2)$$

$$\text{and } X_m \text{ is } A'_{mi}(\alpha_m) \text{ THEN } Y \text{ is } B_i \cdot (\beta_i)$$

* 원광대학교 전자재료공학과 석사과정
** 원광대학교 전기전자 및 정보공학부
*** (주) 케이디 파워

Layer1 : 뉴런에 상응 임의의 데이터가 입력이 될 때.

$$f_n(x_n) = x_n, \quad a_m(f_m) = f_m, \quad (3)$$

Layer2 : L1과 L2사이에 멤버십 함수를 적용 파라미터를 퍼지 세트 하여 계산식을 추론

$$f_m(x_m) = \mu_{Am}(x_m), \quad a_m(f_m) = f_m, \quad (4)$$

Layer3 : L2의 법칙을 적용 입력 값을 뉴런 규칙에 적용 시스템에서 분석하고 비교 패턴을 가지고 다음 뉴런에 적용 L2에서 최소 연산과 중 사용된 출력 값을 가지고 L3에 적용.

$$f_l(x_1, x_2, \dots, x_p) = \begin{cases} \min(x_1, x_2, \dots, x_p) \\ \prod_j x_j \end{cases} \quad a_l(f_l) = f_l \quad (5)$$

-> 최소한으로 사용된 수 -> 총 사용된 수

Layer4 : L3에서 나온 데이터를 각각의 계산된 값을 정의된 값으로 학습을 하여 체계적인 법칙에 의해 계산

$$f_k(x_1, x_2, \dots, x_q) = \max(x_1, x_2, \dots, x_q) = \alpha_k$$

$$a^{1k}(\alpha_k) = C^u(B_k^{\alpha k}) \quad (6)$$

$$a^{2k}(\alpha_k) = Area(B_k^{\alpha k})$$

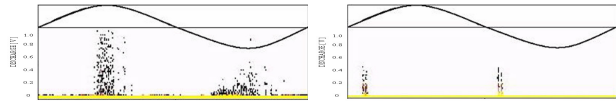
Layer5 : L4에서 만들어진 값을 가지고 뉴런에서 출력된 값을 법칙에 맞게 연산하여 실행한다.

$$f_j = \frac{\sum_k C^u(B_k^{\alpha k}) Area(B_k^{\alpha k})}{\sum_k Area(B_k^{\alpha k})} = \frac{\sum_k a^{1k}(\alpha_k) a^{2k}(\alpha_k)}{\sum_k a^{2k}(\alpha_k)} \quad (7)$$

$$a_j(f_j) = f_j \quad [11,12]$$

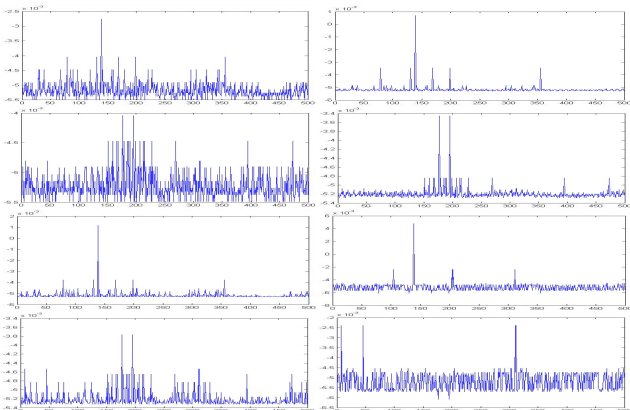
2.2.2 Labview PD검출 시스템 구축 실험

기본량분석법을 이용한 것으로 Labview로 개발한 프로그램을 사용하여 부분방전 누적 검출 시스템을 구축하였다. 구축된 부분방전진단시스템은 일차원배열을 삼차원배열로 변형하여 화면에 표현되게 구성되었다. 구축된 부분방전진단 시스템을 이용하여 한주기의 누적된 부분방전 신호를 검출하고 위상특성과 방전량, 방전횟수의 기본량 값에 따라 부분방전의 누적 패턴을 형성하고자 하였다. 오실로스코프로부터 전송된 값들이 정확한 위상에 모여 매우 정석적인 부분방전 신호의 패턴을 형성한 것을 볼 수 있다. 결과로 보아서 구축된 검출시스템이 제대로 구동한다는 사실을 그림 1의 나타내었다.



〈그림 2〉 Matlab 프로그램으로 부분방전 누적 검출

0.27mm LDPE sheet(Scratch 오차 0.05mm)를 구 전극으로 압착 고정시켜 내전압기로 18kV까지 천천히 전압을 올려 인가한 뒤 발생하는 신호를 Labview 프로그램으로 누적시켜 결과를 얻을 수 있었다. 주로 90° 위상과 180° 위상에 신호가 몰려서 발생하였고 특히 왼쪽 신호의 경우 균일한 형태를 보이며 발생한 것으로 보아 외부 코로나에 의한 노이즈로 추정하였으나 부분방전 신호가 위상 적으로 약간 밀려서 나타나 노이즈에 묻혔을 가능성을 간과할 수 없어서 같은 조건에서 구 전극이 달린 기름통에 기름을 채워 코로나 방전을 방지한 후 같은 조건에서 전압을 18kV에서 20kV로 올려 실험을 한 결과를 얻을 수 있었다. 위상에 따라 규칙적인 패턴을 형성한 것을 볼 수 있는데, 패턴은 전동기나 발전기의 계면 부분에서 많이 나타나는 부분방전 패턴형태와 매우 유사한 형태이므로 부분방전 신호의 패턴을 형성한 것으로 판단하였다. 검출된 부분방전 신호를 가지고 데이터베이스를 구축하였으며 여기에 뉴로-퍼지 알고리즘을 적용하여 부분방전 신호를 분석하였다. 뉴로-퍼지 모델에 어떤 신호를 적용시켜 학습시키고 테스트해보았을 때 그래프의 비교결과 성능 지수가 낮을수록 좋은 성능을 확인할 수 있었다. 그림3에서 검출된 데이터의 경우 적용된 모든 뉴로-퍼지 규칙에서 학습지수, 테스트지수 모두 0을 출력하여 매우 정확한 부분방전 신호임을 확인할 수 있었다.



〈그림 3〉 18kV와 20kV를 뉴로-퍼지로 연산

그림3에서 x축은 데이터의 개수를, y축은 신호의 크기를 나타낸다. 학습지수는 Labview 프로그램으로 검출된 신호를 입력 값으로 넣었을 때

부분방전 발생기로 발생시킨 정성적인 부분방전 신호를 출력 값으로 한다. 뉴럴-퍼지 모델이 형성되도록 학습시켰을 때의 성능을 나타내며, 학습 데이터를 나타낸 그래프는 앞의 결과를 그래프로 표현한 것이다. 테스트지수는 학습과정을 거치면서 형성된다. 검출시스템에 적용시켰을 때의 성능을 나타내며, 테스트 데이터를 나타낸 그래프와 실측 결과를 그래프로 표현한 것이다.

〈표 1〉 뉴로-퍼지 모델의 성능지수표

	후반부 구조	멤버쉽 함수	PI	EPI
18kV	간략	2	0.004237	0.004768
		3	0.004157	0.004664
		4	0.004200	0.004704
		5	0.004138	0.004642
		2	0.004146	0.004683
20kV	간략	3	0.004147	0.004661
		4	0.004017	0.004526
		5	0.004074	0.004609
		2	0.004150	0.004677
		3	0.004085	0.004600
20kV	선형	4	0.004051	0.004559
		5	0.004082	0.004599
		2	0.004070	0.004578
		3	0.004076	0.004585
		4	0.004056	0.004583
		5	0.004003	0.004521

표1에서 선형 뉴럴-퍼지 추론과 멤버쉽 함수 4개를 적용시켰을 때 가장 좋은 성능을 얻을 수 있었다. 학습지수는 0.004017, 테스트지수는 0.004526의 수치가 출력되었다.

3. 결 론

본 연구에서는 부분방전을 누적 검출하는 시스템을 구현하였으며, 부분방전 누적 검출시스템에서 검출된 신호에 뉴로-퍼지 알고리즘을 적용하여 평가해 보았다. 부분방전 발생기로 정확한 PD 신호를 발생 시켜본 결과 부분방전 검출 시스템과 뉴로-퍼지 알고리즘이 정확하게 구동한다는 사실을 확인하였다. 또한 뉴로-퍼지 알고리즘을 부분방전 신호의 분석에 적용 하였을 때 방전량과 방전횟수가 적을수록 좋은 학습지수와 테스트 지수를 나타내었으며, 규칙적이지 않고 반복적이지 않은 비주기적인 신호일수록 테스트 결과가 좋지 않지만 뉴럴-퍼지이론을 이용한 시스템에서보다 정확성을 얻을 수 있었다. 시스템에서 멤버십 함수를 많이 쓰지 않고 적당한 4개를 사용한 실험이 최적이었음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 통하여 뉴로-퍼지 알고리즘이 부분방전 신호의 분석 알고리즘으로써 적합한 알고리즘임을 확인하였고, 부분방전 누적검출 시스템을 통해 검출된 누적 패턴 모양과, 뉴로-퍼지 알고리즘을 통해 해석된 결과를 같이 비교 분석함으로써 부분방전 신호를 좀 더 편리하게 진단 할 수 있음을 확인하였다. 전력케이블에서 발생하는 부분방전 검출시스템을 이용하여 실시간으로 진단하여 사고를 조기 예방에 도움을 줄 것으로 예상된다.

[감사의 글]

산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업(I-2004-0-074-0-00)에 의해 작성되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국 전력 연구원 연구보고서, "송전케이블의 절연열화 진단기법 정립 및 수명예측 연구", 99년력연-단762, 1999.
- [2] WG 21.05 on behalf of study committee 21, "Diagnostic methods for high voltage cable systems", CIGRE session 15/21/33-05, 1996.
- [3] Y. S. Lim and J. Y. Koo, "Comparative Analysis of Partial Discharge Patterns Form Different Artificial Defects by Means of Conventional Phase-Resolved Partial Discharge Analysis and a Novel Chaotic Analysis of Partial Discharge", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 42, No. 6, p. 755, 2003.
- [4] 김진수, 박재완, 박건준, 오성권, 김용갑, "퍼지 알고리즘을 이용한 부분방전 신호의 진단에 관한 연구", 2005년도 한국 퍼지 및 지능시스템 학회 추계학술대회 논문집, Vol. 15, No. 2, p. 440, 2005
- [5] 김진수, 김용갑, "지중전선로 PD신호 분석을 위한 퍼지 알고리즘 적용 및 평가에 관한 연구", 원광대학교 석사 학위 논문, 2005
- [6] 황경준, 이현룡, 최유순, 김용갑, "뉴로-퍼지 알고리즘을 이용한 전력설비의 열화 상태 분석연구" 2006년도 대한 전기 학회 전기물성응용분회 추계학술 대회 논문집, pp.224-226, October 27-28, 2006
- [7] F.H.Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment". Butterworth, p.1.1989.
- [8] 김진수, 박건준, 오성권, 김용갑, "부분방전 신호의 PRPDA누적 검출과 퍼지 알고리즘을 이용한 컴퓨터 진단에 관한 연구", 2005년도 대한전자공학회 추계종합학술대회 논문집, Vol. 28, No. 2, p. 1015, 2005
- [9] E.Gulski and F.H.Kreuger, "Computer-aided recognition of Discharge Sources", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27 No. 1, p. 82, 1992.
- [10] E.Gulski, "Computer-Aided Recognition of Partial Discharges Using Statistical Tools", Delft University Press, p. 1, 1991.
- [11] 오성권, "C프로그래밍에 의한 퍼지모델 및 제어시스템", 내하출판사, p. 3, 2002.
- [12] A.S. Basu, S.K. Majumdar, K.L., "Robust classification of multispectral data using multiple neural networks and fuzzy integral", Kumar, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on On page(s): 787-790, Volume: 35, Issue: 3, May 1997