

광섬유 내의 유도 브릴루앙 산란광을 이용한 초고압전력케이블 열화진단에 관한 연구

황 경 준* · 영 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

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

Abstract - This study is an application field by using optical fiber. The system to measure sBs from optical fiber is designed, So it can be used as a temperature sensor. by using frequency shift, resulting from temperature changes. the frequency shift is checked by changing temperature from 25°C to 69°C with chamber in the laboratory and using 40Km optical fiber. It's also measured by varying the length of optical fiber. The program to do the real-time monitoring and analyze the measured data is created to find accurate frequency. It can be used as an optical fiber sensor, which is capable of measuring temperature and distance by using sBs.

1. 서 론

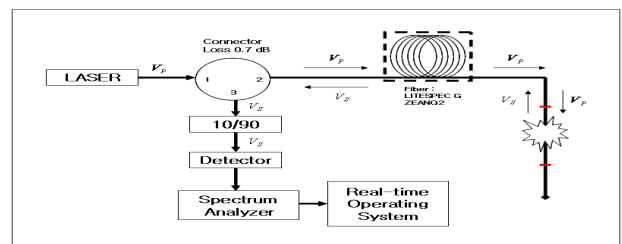
본 연구는 초고압전력케이블의 열화에 대한 조기 진단을 목적으로 광섬유센서를 응용한 감시 시스템에 대한 연구이다. 초고압전력케이블의 열화 발생 원인으로 전기적, 열적, 환경적, 기계적인 요인 등에 의해서 발생이 된다.[1] 절연열화진단을 하는데 있어서 종래의 기술은 메가 시험진단법, 직류고압시험법(직류누설시험, 직류내전압시험) 등은 현장에서 오퍼레이터가 직접 측정하고 진단을 내리기 때문에 진단 환경이 위험하고, 모호함이 내포된 데이터를 전문가가 확인하여야 하는 단점이 있다. 이러한 시험법을 획기적으로 개선한 광섬유센서를 이용하는 진단방법이 구체적으로 연구 중에 있다. 열화의 원인을 이론적으로 어느 하나의 요인에 의해서 발생 하지 않고, 복합적으로 일어나기 때문에 발생 원 인별로 분류해서 진단을 한다면, 기존의 진단방법보다 가치가 없다고 할 수 있다. 여러 가지 복합적인 열화현상을 진단하기 위해서는 새로운 진단방법에 대한 연구가 절실히 필요하게 되었다. 기존 진단 방법의 단점을 보완하고 정확성을 높이는 연구를 위해 본 논문은 초고압전력케이블 내에서 일어나는 현상을 실시간으로 확인하여 전력사고를 방지하고자 하였다. 본 연구는 광섬유센서의 광학적 특성을 사용하기 때문에 장거리를 빠르게 측정가능하고, 자기적 영향을 받지 않기 때문에 전력선에서 발생하는 노이즈에 영향을 받지 않는다. 이러한 사항을 종합하여 본 논문에서 초고압전력케이블의 절연열화에 대한 진단을 위하여 시스템을 구현하고 실험한 데이터를 Database화 하였다. 본 연구의 주된 결과는 광섬유센서 시스템을 설계하여 광파이버(Optical Fiber)를 활용한 온도 변화가 유도브릴루앙산란광(sBs : stimulated Brillouin scattering)의 주파수 천이로 인해 측정 가능함을 알고, 측정용 프로그램을 개발하여 실험 환경에 적용하였다. 본 시스템을 실험실에서 테스트하였고, 실제 전력케이블에 적용한 결과 우수한 결과를 도출 할 수 있었다.[2]

2. 본 론

2.1 광섬유센서를 이용한 측정방법

본 논문에서 연구한 내용의 구체적인 설명은 다음과 같다. 첫째 측정 분석 시스템은 레이저 중 장파장의 중거리 레이저소스(1310nm)를 광원으로 하였고, 측정용 광섬유는 single fiber LiteSpec G Zeaq2 40km를 연결, 또한 실험 중 환경변화는 항온장치에서 일정한 간격과 주기를 주어 측정 범위를 설정하였다. 온도는 25°C ~ 69°C 변화를 주고 30분 간격을 주었다. 그 이유는 온도변화에 따른 변수를 고려하여 시간의 간격을 충분히 유지 하여 실험 결과치의 오차변화 분은 무시하였다. 실측된 유도 브릴루앙산란(sBs)이 측정되어 온도 변화에 따른 결과로 표1의 실험 데이터로 각 구간별 변화율과 도표화 하였다. 표1의 제시된 data들을 DB화하여 실측된 데이터와 비교 분석 할 수 있게 시스템을 구성하였다. 실험 환경에서 발생하는 데이터는 DB로 사용하기 위하여 10회 이상의 반복 측정을 하였고 표본화를 거쳐 데이터로써 정확도를 향상시켰다. 실제 전력케이블에서 발생하는 변화에 접목하여 실험 하였다. 그림1은 연구에서 구체적으로 고안하여 사용한 시스템이다.

이러한 시스템에서 출력된 데이터를 진단용으로 활용하기 위해서 컴퓨터 연산처리가 가능하게 접목 시켰는데 고분해능을 찾는 방법으로 지능형 알고리즘인 뉴로-퍼지 법칙을 적용하여 분석함으로써 획기적인 진단용 시스템을 고안하였다.



<그림 1> 광섬유센서를 이용한 열화감지 시스템

본 실험에서 사용된 실험도와 equation을 설명하고 있다.

직선형 광섬유센서의 loss율은 다음과 같다.

$$G_B P_0^{sc} L_{eff} / A_{eff} \approx 21 \quad (1)$$

측정에 있어서 가장 중요한 것은 센서의 장점을 위한 좁은 선폭, 잡음제로, 그리고 컴퓨터 논리인 "0"와 "1" 값처럼 정확하게 실측이 가능하다. 아래의 식은 광파이버센서의 구성 장치도에 따라 측정 오차가 다음을 보여주는 수식과 실제 실험 셋업 장치이다. 실험방법에 따라 변화가 큰 것을 알 수 있는데 본 실험은 광센서 직선형센서 방식에 따라 테스트 하였다.[3,4]

브릴루앙 천이는

$$\Omega_B = 4\pi n(v_A/\lambda_p) = 2\pi v_B \quad (2)$$

이고, 여기서 V_A 는 광섬유 내에서 음파의 속도이다. SBS 과정은 다음과 같은 네 개의 비선형 방정식에 따른다.

$$\frac{\partial E_p}{\partial z} + \frac{1}{v_q} \frac{\partial E_p}{\partial t} = -q_B E_S^* Q + i\Gamma(|E_p|^2 + 2|E_s^+|^2 + 2|E_s^-|^2) E_p \quad (3)$$

$$-\frac{\partial E_s^+}{\partial z} + \frac{1}{v_q} \frac{\partial E_s^+}{\partial t} = \dots \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_s^-}{\partial z} + \frac{1}{v_q} \frac{\partial E_s^-}{\partial t} = \dots \quad (5)$$

$$i\delta E_s^+ + ik E_s^- + i\Gamma(|E_s^+|^2 + 2|E_p|^2 + 2|E_s^-|^2) E_s^+ + \tau_A \frac{\partial Q}{\partial t} + Q = E_p E_s^* + Q_0$$

$$\tau_A \frac{\partial Q}{\partial t} + Q = E_p E_s^* + Q_0$$

여기서 $V_q = c/\sqrt{n}$ 는 군속도이고, 결합계수 k , 비선형 파라미터 Γ , 그리고 detuning 파라미터 δ 는 다음과 같이 정의된다.

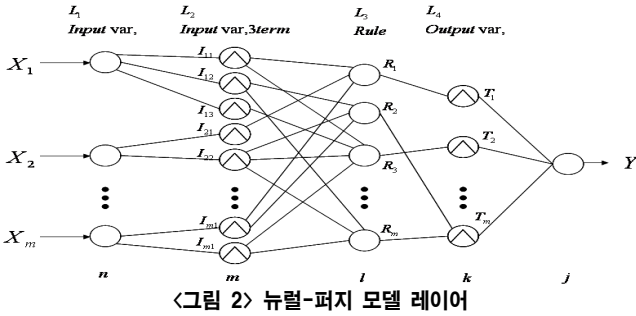
$$k(z) = \frac{\pi n_1}{\lambda}, \Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} n_2, \delta = k_s - k_B, \quad (6)$$

광자-음자(phonon)결합 $q_B = \tau_A q_1 q_2$ 계수에 의해 지배되며, 여기서 n_0 는 코어 굴절률, ρ_0 평균 밀도, $P_{12} = 0.286$ 은 실리카 광섬유의 탄성-광학계수, τ_A sms 음자 수명, $Q = \rho/(iq_1 \tau_A)$ 는 음파의 정규화 된 진폭, 그리고 $Q_0 = f(z,t)/(iq_2)$ 는 SBS를 이끄는 열 변동을 표시한다.[5,6,7]

시스템에 뉴로-퍼지 알고리즘을 적용하여 데이터의 모호함을 정밀하게 측정 할 수 있는 연산을 진행하였다. 이는 시스템 상에서 발생하는 잡음

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

을 제거하고 하나의 진단용 데이터를 얻는데 매우 중요하였다. 비선형 시스템에 대해서 언어적으로 규칙을 서술할 수 있고, 그에 따른 퍼지수가 정의된다면 그 언어적인 규칙에 근거해 비선형 시스템도 모델링이 가능한 것이다. 이렇게 구해진 퍼지관계를 통해서 어떠한 입력이라도 넣어주면 결과를 얻을 수 있다. 그리고 퍼지에 신경망을 결합하여 데이터 연상을 하면 다음과 같다.[8]



〈그림 2〉 뉴럴-퍼지 모델 레이어

1단계: 신경망에 입력 데이터를 입력 노드에 적용하고, 입력에 따른 출력을 계산한다. 입력에 따른 출력과 원하는 출력간의 오차를 계산한다.
2단계: 오차를 줄이기 위해 가중치의 증감 여부를 결정한다. 각각의 가중치를 얼마나 변화시킬 것인가를 결정한다. 결정된 값으로 가중치를 갱신(변화)한다.
3단계: 모든 학습 데이터에 대해 오차가 적정 수준으로 감소하기까지 4단계: 1단계에서 3단계를 반복한다.

뉴럴-퍼지의 신경망 가중치 갱신은 아래 식으로 구성된다. 오차 ϵ 와 학습률 μ , 그리고 입력 값에 비례하여 가중치 값을 갱신한다.

$$W(t+1)_i = W(t)_i + 2\mu\epsilon_i x_{ki} \quad (7)$$

Gradient-descent method라는 방법을 이용하여 식을 전개한 결과이다. 단지 개념적으로 설명하면,

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \delta_{pk}^2 \quad \delta_{pk} = (y_{pk} - o_{pk}) \quad (8)$$

다층, 일차함수의 출력 함수와 비슷한 논리 전개를 한다. 우선 오차들의 위의 식으로 설정하고, 오차에 대해 가중치로 편미분한다. 그러면 오차에 대한 가중치의 Gradient 값을 구할 수 있다. 다시 말하면, 오차를 가장 많이 없앨 수 있는 가중치의 변화 방향을 알 수 있다.

출력층의 가중치 변화 식은

$$W_{kj}^0(t+1) = W_{kj}^0(t) + \eta W_{kj}^0 \delta_{pj} \quad (9)$$

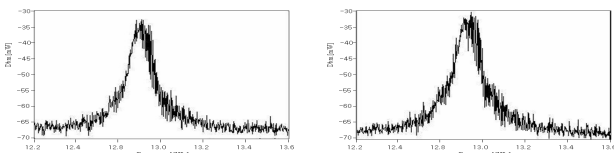
$$\delta_{pk}^0 = (y_{pk} - o_{pk}) f_k'(\neq t_{pk}^0) = \delta_{pk}^1 f_k'(\neq t_{pk}^0) \quad (10)$$

위의 (7) 식과 가중치의 갱신 량을 비교해보자. δ 가 (7)식의 ϵ 대신 포함되어 비슷한 역할을 하고 있다. 다시 말해, 다층이면서 노드 함수가 일차 함수가 아닐 경우에는 (7)식의 ϵ 역할을 δ 가 하고 있다. 다음은 은닉층의 가중치 변화식이다.

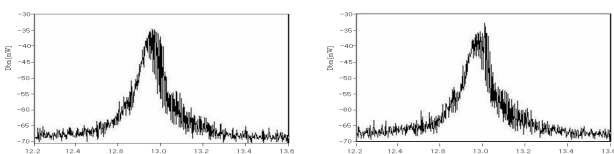
$$W_{ji}^h(t+1) = W_{ji}^h(t) + \eta \delta_{pj}^h x_i \quad (11)$$

$$\delta_{pj}^h = f_j^h(\neq t_{pj}^h) \sum_k \delta_{pk}^0 W_{kj}^h \quad (12)$$

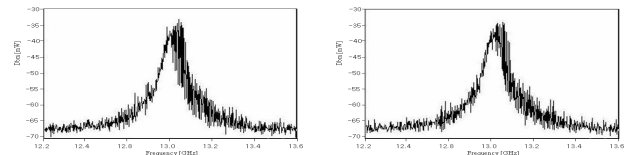
은닉층의 δ 는 조금 복잡하다. 은닉층의 δ 를 잘 살펴보면 출력층 δ 의 가중치합이 속해 있다. 즉, 신경망의 계산방향과는 반대이고, 은닉층의 오차는 출력층의 오차의 가중치 합으로 표현한다.



〈그림 3〉 측정된 sBs 데이터



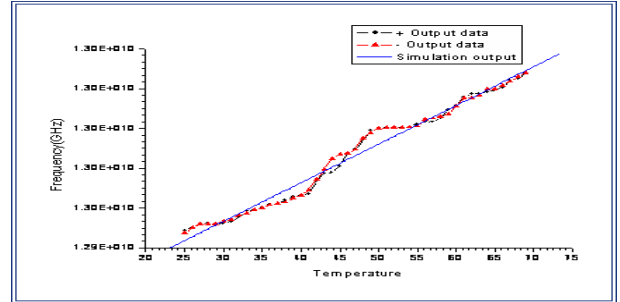
〈그림 4〉 측정된 sBs 데이터



(a) 40Km, 65°C에서 측정 (b) 40Km, 69°C에서 측정

〈그림 5〉 측정된 sBs 데이터

그림 3,4,5는 개발한 sBs 측정프로그램으로 온도변화에 대한 주파수가 천이 발생한 그래프를 출력한 것이다. 이러한 그래프에서 나타난 주파수를 정량적으로 표1에서와 같이 나타내었다. 이러한 데이터를 얻기 위하여 수차례 반복적으로 실험을 하여 데이터에 대한 정확도를 높였다.



〈그림 6〉 광섬유 40Km 온도변화

오차범위에 대한 신뢰도를 향상하는데 온도 간격을 30분으로 진행하였고, 고분해능을 얻기 위하여 똑같은 온도에서 컴퓨터 연산처리를 거쳐 범위 변화에 대한 오차를 2MHz 까지 축소 할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문의 연구결과는 광섬유센서의 강점인 비선형성과 기술 및 기존 기술대비 시스템안정성확보, 고감도, 고분해능 및 정밀분석도가 향상 되었으며 특히 절연열화진단기술 혁신을 가져다 줄 수 있다. 연구개발한 시스템을 이용한 실험에서 데이터를 분석한 결과 온도 변화에 대한 범위를 주었을 때 브릴루앙 산란 천이가 일어난다는 사실과 이러한 유도 브릴루앙 산란과를 이용하여 광섬유센서로써 활용이 가능하다는 사실을 얻을 수 있었다. 실험결과 데이터만으로도 온도당 주파수 천이 변화량으로 온도에 대한 정확한 진단이 가능함을 알 수 있었는데, 정확한 진단을 위해서 지능형 알고리즘을 적용하여 분석을 하여 보다 정확도 높고 신뢰성이 있는 진단 시스템으로 발전 시켰다. 초고압케이블에서의 절연열화진단은 초고압케이블에서 많은 스트레스로 인해 발생하는 초기 원인으로 압력과 온도에 대해 민감하게 반응하고, 기존 열화진단시스템에서 10°C변화에 대해 2배씩 열화가 증가한다는 연구데이터를 참고하여 현재 연구한 시스템에서의 온도변화에 대한 sBs 천이가 정밀하게 측정된다는 결론을 얻었다. 계속적인 실험을 위하여 기존 입력과워보다 고출력의 레이저를 사용하면 더 안정된 시스템으로 자리를 잡을 것이다.

[감사의 글]

산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업(1-2004-0-074-0-00)에 의해 작성되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] 박대희, 임기조, 김상준, 서광석 "절연재료의 열화 및 평가진단기술" Proceedings of KIEE. Vol. 45, No. 4. APR.1996
- [2] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 3rd ed.(Wiley, New York, 2002), Chap. 2.
- [3] Yong K. Kim, et.al,"Transient Control of SBS Chaotic Instability in Optical Fiber Communication Systems", SCI-2004 Pro. Vol. 6, pp.366-369, Orlando Florida USA, July 2004.
- [4] K. Ogusu, Effect of stimulated Brillouin scattering on nonlinear pulse propagation in fiber Bragg gratings , J.Opt. Soc.Am. B, vol. 17, pp. 769-774, 2000.[2] N.A Brilliant, Stimulated Brillouin scattering in a dual-clad fiber amplifier, J.Opt.Soc.Am.B, vol.19, pp.2551-2557, 2002
- [5] A. Höök and A. Bolle, Transient dynamics of stimulated Brillouin scattering in optical communication systems , J.Lightwave Technol., vol. 10, pp. 493-502, 1992.
- [6] 이호준, "샘플링 광섬유 Bragg 격자를 이용한 광섬유 내의 유도 Brillouin 산란역계" Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 16, Number 6, pp. 485-489, December 2005
- [7] SeungHo Go*, HoJwn Lee*, Kisoo Kim* "TLFE Sensor using Laser Chip and Arc-tangent Algorithm" P1.4, CLEO, Pacific Rim'99, pp. 328-329