

# 견인전동기용 고정자 코일의 off-line 부분방전 진단을 위한 NN의 적용

전용식, 박성희, 장동욱, 박현준, 강성화, 임기조

충북대학교, 한국철도기술연구원, 충청대학

## An application of NN on off-line PD diagnosis to stator coil of Traction Motor.

Yong-Sik Jeon, Seong-Hee Park, Dong-Uk Jang, Hyun-June Park, Seong-Hwa Kang, Kee-Joe Lim  
Chungbuk National University, KRRI, Chungcheong Univ

### Abstract

In this study, PD(partial discharge) signals which occur at stator coil of traction Motor are acquired. these data are used for classifying the PD sources. NN(Neural Network) has recently applied to classify the PD pattern. The PD data are used for the learning process to classify PD sources. The PD data come from normal specimen and defective specimens such as internal void discharges, slot discharges and surface discharges. PD distribution parameters are calculated from a set of the data, which is used to realize diagnostic algorithm. NN which applies distribution parameters is useful to classify the PD patterns of defective sources generating in stator coil of traction motor.

Key Words : Stator coil, Traction Motor, PD, NN,  $\delta$ -q-n

## 1. 서론

전동차의 핵심 전장품인 견인전동기는 체적에 비해 큰 토크를 발생시키고 넓은 범위의 속도 제어가 가능하며 기계적 충격에 강한 장점을 가지고 있지만, 반복적인 동작에 의한 급변하는 전압에 의한 가속한 운전조건이나 과부하 조건을 지니고 있기 때문에 절연파괴가 전동기 고장의 가장 큰 원인을 차지한다[1]. 또한 고정자 코일의 절연 성능에 따라 서도 견인전동기의 수명 등에 큰 영향을 끼치게 된다[2]. 일반적으로 견인전동기의 고정자 코일의 제작 시에는 VPI(vacuum pressure impregnation - 진공가압함침) 처리를 하게 되는데, 함침은 내열성 및 안전한 절연성을 갖도록 구성되어 있으나 가속한 운전조건으로 인하여 절연물이 열화한다. 이 열화된 절연물에 전압이 인가되면 부분방전이 발생한다. 견인전동기 고정자 코일의 부분방전 발생 모델로는 내부방전, slot방전, 표면방전의 세 가지 모델을 선정하여 시편을 제작하였다[3,4].

본 논문에서는 건전시편과 결함시편의 부분방전원의 분포특성을 통계적인 기법을 이용해 파악하였으며, 신경망을 이용해 부분방전 발생 모델에 대한 패턴 분류를 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 시편의 제작

견인 전동기 고정자 코일의 절연구성은 표1과 같이 구성이 되어있다. 부분방전 시험용 시편은 견인 전동기에 사용되는 고정자 코일 시편을 사용하였으며, VPI처리를 하여 제작한 시료이다. 시편은 건전 시편과 3종의 결함시편을 제작하여 사용하였다. 모의 결함은 견인전동기 코일에 일반적으로 발생할 수 있는 열화의 형태, 즉 내부방전, slot방전, 표면방전을 발생시키기 위한 결함이다. 각 결함시편의 제작은 내부방전의 경우, 도체와 절연체 사이에 void가 있는 상태, slot방전은 건전시편에 slot를 끼워서 측정하는 형태, 표면방전은 건전시편의 표면에서 방전이 일어나게한 구조이다. 본 연구에서 사용한 시편의 형상은 그림 1 (a), (b), (c), (d)와 같다.



(a) 건전시편

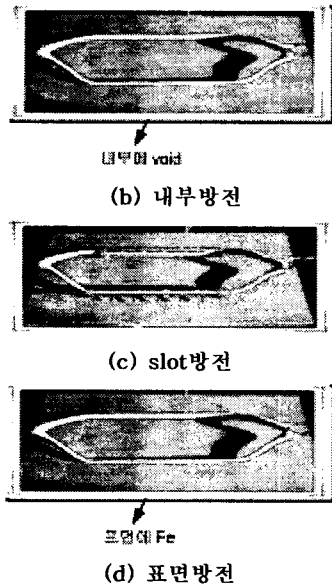


그림 1. 견인전동기 고정자 코일 시편

표 1. 고정자 코일의 절연구성

품 명	사양 및 규격	
200 class 절연자재	소선절연물	Kapton코팅처리
	대지절연물	Kapton Film Nomex-aramid paper
	주절연물	Silicone resin
	슬롯왁시	Epoxy-glass tape 적층판
	모의철심용 동판	두께: 1.5 mm
절연처리및고정자 코일 샘플제작	턴절연 시험용 인출선 처리	소선별 인출선 절연보강 처리
	모의철심을 가진 샘플코일 제작	동판슬롯구조의 모의철심 및 고정자 코일 샘플제작
VPI 함침처리	Silicone Resin 진공함침	함침 60℃-3hr 건조 200℃-16hr

## 2.2 실험장치

그림 2는 모의시편을 사용하여 부분방전을 측정하기 위한 실험장치 구성도를 나타내고 있다. 부분방전의 측정은 아래의 구성도와 같이 PD free 변압기로 고정자 코일에 전압을 인가해 부분방전을 측

정하였다.

전압인가 후 PDASDA(Partial Discharge Acquisition, Storage and Display System)를 사용하였다. 부분방전 펄스의 검출은 부분방전 검출기(Biddle Instrument사 제작, AVTM 6627000Ja)로 검출한다. 검출된 방전펄스에서 최대방전량, 평균방전전류, 발생빈도수 등을 연산하고  $\Phi-q-n$ (위상-방전전하량-방전회수) 분포를 도출하게 된다.

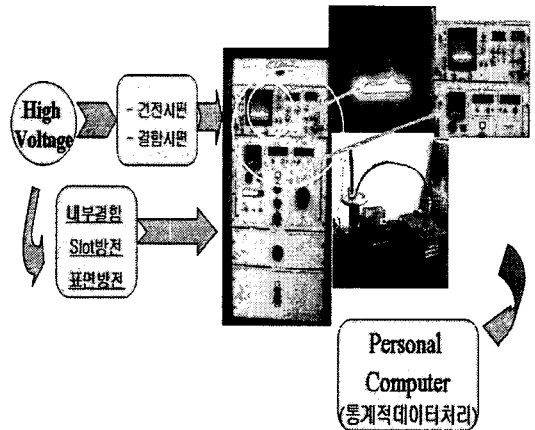


그림 2. Block diagram of PD measuring system

## 2.3 부분방전데이터 처리과정

일련의 데이터 처리로 획득된 방전데이터는 컴퓨터 프로그래밍을 거쳐 통계적분포로 도출이 되며, 데이터를 DB화하여 BP학습알고리즘에 적용, 부분방전원을 분류하게 된다.

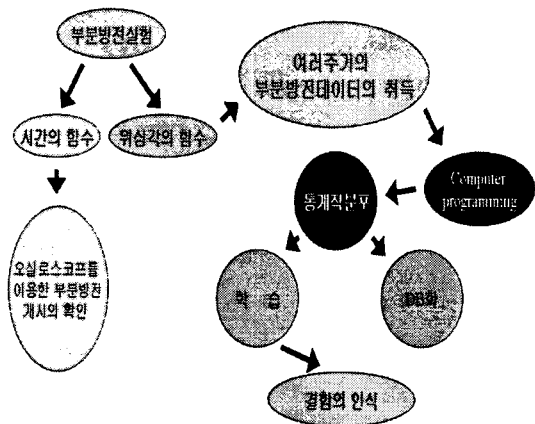


그림 3. PD데이터 처리과정

### 3. 부분방전의 특성량

본 논문에서는 부분방전 데이터로부터 얻어질 수 있는 다음의 네 가지 경우의 특성량을 이용하여 통계적 분포를 도출하여 이를 신경망의 입력으로 사용하여 패턴을 분류하였다

**q-n 분포( $H_n(q)$ ):** 방전량과 방전의 회수의 관계를 표현

**Q-n 분포( $H_n(\theta)$ ):** 방전 발생빈도수의 위상각에 따른 분포로서 위상각 구간에 따른 부분방전의 발생빈도수를 계수하여 도출한 특성분포

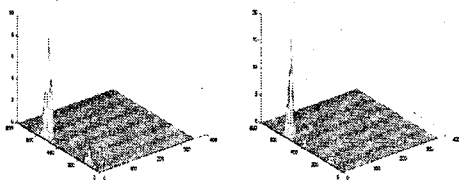
**Q-qn 분포( $H_{qn}(\theta)$ ):** 펄스평균방전전하량의 위상각에 따른 분포로서 각각의 위상각구간에서 발생한 부분방전의 평균 방전 전하량을 도출한 특성분포

**Q-q 분포( $H_q(\theta)$ ):** 최대방전전하량의 위상각에 따른 분포로서 위상각 구간에서 발생한 최대 방전 전하량의 크기를 나타낸 특성분포

### 4. 실험결과

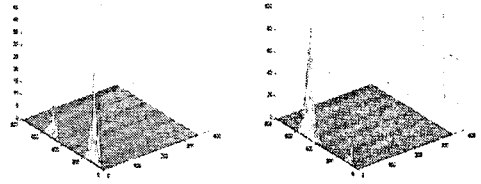
그림 4는 건전시편과 결함시편중에 내부방전, slot방전, 표면방전 대한 방전특성을 위상각-방전량-방전회수의 3차원으로 나타낸 것이다. 그림에서 살펴보면 방전의 회수가 건전시편에 비해 결함시편인 내부방전, slot방전, 표면방전에서 부분방전이 상당히 높게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 5는 3차원분포로부터 얻어지는 2차원적인 분포의 형상으로서 방전의 특징을  $H_n(q)$ ,  $H_n(\theta)$ ,  $H_{qn}(\theta)$ ,  $H_q(\theta)$  상관적인 관계를 2차원적으로 나타내고 있는 것이다. 이것은 방전 특성을 파악하는데, 시각적인 효과와 방전 특성값 등에 대한 경향을 파악하는데 중요한 데이터가 된다.

#### 4.1 통계적 분포



(a) 건전시편

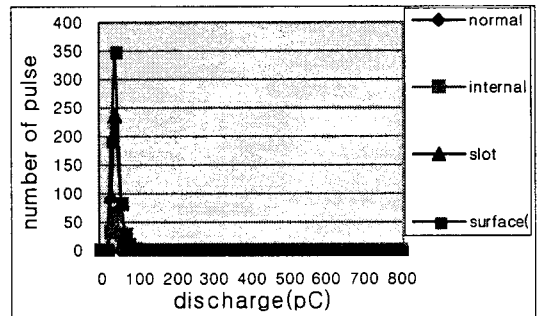
(b) 내부방전



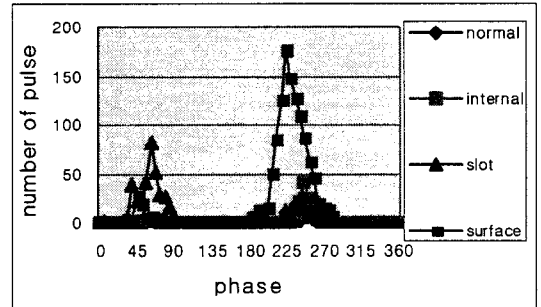
(c) slot방전

(d) 표면방전

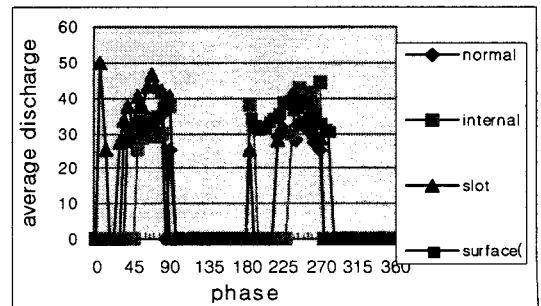
그림 4.  $\Phi$ -q-n분포



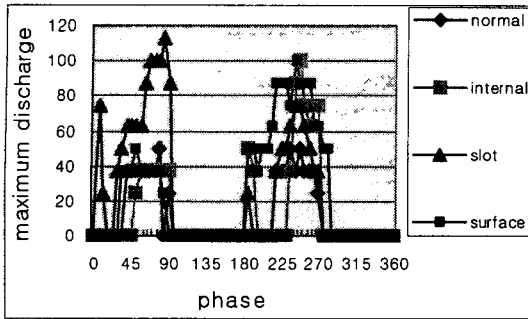
(a) q - n 분포( $H_n(q)$ )



(b) Q - n 분포( $H_n(\theta)$ )



(c) Q - qn분포( $H_{qn}(\theta)$ )



(d) Q - q분포(Hq(θ))

그림 5. 통계적 분포

그림 5의 (a)~(d)는 각 시편들의 통계적 분포를 도식한 것으로서, 각 분포를 건전시편에 대하여 비교 분석하면, 내부방전의 경우, 방전의 횟수는 적게 나타나지만 방전의 크기는 음의 주기에서 비교적 높게 나타나고 있으며 방전 위상각도 양의 주기 25°~85°부근, 음의 주기 195°~280°나타나고 있다.

slot방전은 방전횟수도 크고, 방전의 크기도 양의 주기에서 보다 크게 나타나고 있다. 또한 방전의 위상각도 양의 주기 35°~80°, 음의 주기 180°~270°부근에서 나타난다. 표면방전에 경우는 방전의 횟수가 음의 주기에서 보다 크게 나타나고 있고, 방전크기도 음의 주기에서 높게 나타나고 있다. 방전 위상각은 양의 주기 35°~80°, 음의 주기 180°~285°부근에서 나타난다.

#### 4.2 NN을 이용한 분류결과

견인전동기 고정자 코일의 부분방전에 대한 통계적 분포는 서로 다른 방전 패턴의 특징을 보여주었다. 따라서 서로 다른 방전 패턴의 통계적분포를 신경회로망의 입력으로 사용하여 방전패턴을 학습시킨 후 패턴을 분류하였으며, 분류한 결과를 각각의 방전 패턴에 대한 인식률로 나타내었다. 신경회로망 학습 알고리즘으로는 BP (back-propagation-역전파 학습알고리즘)을 사용하였다. 또한 학습은 rmse(root mean square error)값이 '0'으로 수렴이 될 경우가 완전한 학습이 이루어진 것이므로 rmse 값을 '0'으로 수렴되게 되도록 PE(process elements)를 선택하였다. 그림 6은 본 논문에서 사용한 BP알고리즘의 학습이 정확하게 이루어졌다는 것을 나타낼 수 있는 rmse값의 변화를 보여주고 있다.

표 2. PE(process elements)의 선정

Learning rate	Momentum	Epoch	Node of Hidden layer	In put parameter
0.10	0.75	20,000	20	40

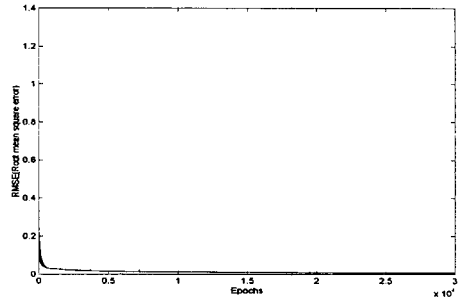


그림 6. RMSE

표 3은 패턴분류 시의 인식율을 나타낸 것이다. 표에서 나타난 것처럼 학습은 완전하게 이루어져 RMSE 값이 '0'으로 수렴하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 학습의 결과도 100%분류가 되었다. 패턴 분류 결과도 모든 데이터가 100%의 분류를 보이고 있음을 알 수 있다.

표 3. 패턴에 대한 인식률

trained classification	Pattern for classification				total recognition rate
	normal	internal	slot	surface	
	recognition rate(%)				
normal	100%	-	-	-	100%
internal	-	100%	-	-	
slot	-	-	100%	-	
surface	-	-	-	100%	

## 5. 결론

본 논문은 견인전동기 고정자 코일에서 발생하는 부분방전의 검출을 위해 모의시편을 제작하여 그 부분방전 모델에 대한 데이터를 취득한 후 신경망을 적용하여 부분방전원을 분류하였다. 분류 시 사용된 특성값을 부분방전의 통계적 분포로 사용하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 통계적 분포로부터 얻어지는 특성량 및 그 분포의 특징을 확인할 수 있었으며, 이와 같은 특징을 바탕으로 하여 시편들에 결함이 존재할 경우에도 이와 유사한 과정을 통해 부분방전의 추론 특성량을 도출해 낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 통계적 분포를 신경회로망에 입력으로 사용하여 100%의 좋은 분류 결과를 얻었다.

따라서 이러한 점을 감안하여 건인전동기 고정자 코일에서 발생할 수 있는 결함을 검출(진단)하여 고장 등의 유지보수에 적용 가능하며, 다른 종류의 회전기 및 전력기기 등에도 응용할 수 있을 것이다.

### 참고 문헌

- [1] L. E. Lundgaard, et al "Acoustic Diagnosis of Gas Insulated Substation; A Theoretical and Experimental Basis" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November
- [2] H. Suzuki and T. Endoh, "Pattern Recognition of Partial Discharges in XLPE Cables Using a Neural Networks", IEEE Trans. on EI, Vol. 27, No. 3, p. 543 - 545, 1992.03
- [3] B. Fruth and L. Niemer, "The Importance of Statistical Characteristics of Partial Discharge Data", IEEE Trans. on EI, Vol. 27, No. 1, p. 60 - 65, 1992.
- [4] F. H. Kreuger, E. Gulski, and A. Krivda, "Classification of Partial Discharge", IEEE Trans. on EI, Vol. 28, No. 6, p. 917 - 922, 1993.
- [5] E. Gulski, and A. Krivda, "Nural Network as a Tool for Recognition of Partial discharges," IEEE Trans, On Electrical Insulation. Vol.28 No.6, pp.984-1001 Dec. 1993