

진공함침에 따른 견인전동기 고정자 코일의 부분방전 분포 해석 및 분류

박성희, 강성화\*, 임기조, 장동욱\*\*, 박현준\*\*  
 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부, 충청대학 산업안전과\*, 한국철도기술연구원\*\*

Analysis and Classification of PD Distribution for VPI Stator coil of Traction motor

Seong-Hee Park, Seong-Hwa Kang\*, Kee-Joe Lim, Dong-uk Jang\*\*, Hyun-June Park\*\*  
 Chungbuk National University, Chungcheong University\*, KRRI\*\*

**Abstract** - Stator coil of rotating machinery has shown different characteristics according to impregnated with coil or not. And this is major determinant of equipment's life. In this paper, PD characteristics is studied as a classification scheme between two specimens. Processing of the coil impregnation is very important thing because that influences on thermal and electrical characteristics of the coil. And then PD is occurring at the coil and causing insulation degradation. For processing statistical processing, PD data acquired from PD detector using PDASDA(partial discharge acquisition, storage and display system). And also these statistical distribution and parameter are applied to classify PD sources by neural networks. As a result of, Neural Networks have a good discrimination rate for classification PD sources.

많은 시료를 사용하였다. 이것에 대한 절연구성은 표1과 같이 구성이 되어 있으며 시편의 형상은 그림 1과 같다.

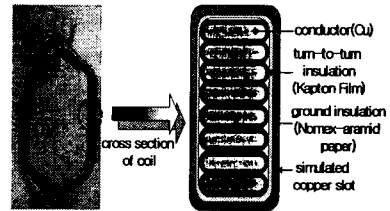


그림 1. 견인전동기 고정자 코일과 단면도

표 1. 고정자 코일의 절연구성

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

1. 서 론

견인전동기는 체적에 비해 큰 토크를 발생시키고 넓은 범위의 속도제어가 가능하며 기계적 충격에 강한 장점을 가지고 있지만, 반복적인 동작에 의한 과부하나 급변하는 전압에 의한 절연파괴가 전동기 고장의 가장 큰 원인을 차지한다. 또한 고정자 코일의 절연적인 성능에 따라라도 견인전동기의 수명등에 엄청난 영향을 끼치게 된다. 일반적으로 견인전동기의 고정자 코일의 제작시에는 VPI(vacuum pressure impregnation - 진공가압함침)처리를 하게 되는데, 코일의 함침은 전기적인 절연성능을 향상시켜주므로 매우 중요한 과정이라고 할 수 있겠다. 따라서 VPI처리코일과 VPI처리가 되지 않은 코일의 전기적인 특성을 비교 분석하는 것은 의미가 있다고 할 수 있겠다. 현재 이러한 특성을 비교 하는데에는 여러 가지 방법이 있지만, 전기적으로 여러 가지 정보를 유연하게 활용할 수 있는 방법인 부분방전측정에 의한 기법을 이용하여 분석하였다. 널리 알려진대로 부분방전 펄스 신호에는 기기의 절연상태와 관련된 수많은 정보들을 포함하고 있어, 이로부터 수많은 data를 얻어낼 수 있는 장점을 지니고 있다. 본 논문에서는 VPI처리를 한 코일과 처리하지 않은 코일사이의 부분방전특성을 통계적 분포를 이용해 파악하고자 하였으며, 신경망을 이용해 분류하였다.

2. 실험

2.1 실험시편의 제작

시편은 견인전동기에 사용되는 고정자 코일 시편을 사용하였으며, 폴리이미드 및 실리콘 수지를 주재료한 C종 절연구성과 VPI처리를 하여 제작한 시료와 그렇지

2.2 실험장치

그림 2는 모의실험을 통한 절합의 부분방전 측정을 위한 실험장치의 구성을 나타내고 있다. 부분방전 발생시의 측정은 아래의 구성도와 같이 PD free 변압기로 전압인가 후 PDASDA(Partial Discharge Acquisition, Storage and Display System)에서 계측을 한다. 부분방전 펄스의 검출은 부분방전 검출기(Biddle Instrument사 제작, AVTM 6627000Ja)로 검출한다. 검출된 방전펄스는 컴퓨터를 통해 최대방전량, 평균방전전류, 발생빈도수 등을 연산하고  $Q-q-n$ (위상-방전전하량-방전회수)분포를 도출하게 된다.

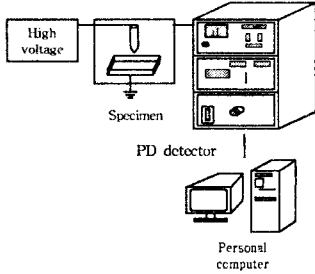


그림 2. Block diagram of PD measuring system

### 2.3 PD데이터 처리과정

실험으로부터 획득된 방전데이터는 일련의 컴퓨터 프로그램에 거쳐 통계적분포로 도출이 되며, 이들은 각각의 특징을 나타내주는 것으로서 DB화 되어 BP학습 알고리즘의 적용시에 사용하게 된다. 그림 3은 이러한 일련의 과정을 도시화한 것이다.

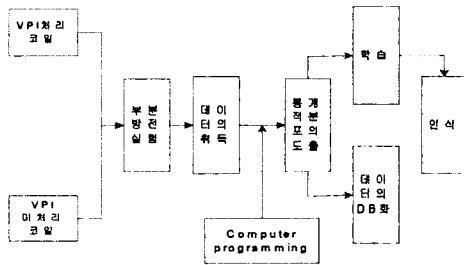


그림 3. PD 데이터 처리과정

## 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.

### 3.1 방전전하량

절연물 진단에 가장 널리 이용되고 있는 방전량으로 부분방전 크기의 최대치가 절연파괴 직전에 급격히 변화한다는 많은 실험결과에 그 근거를 두고 있다. 고체절연 시스템에 시험전압을 인가한 후 초기현상으로 부분방전의 크기가 감소하는 것은 일반적으로 미소 공기층의 표면 전기전도도가 증가하여 생기는 현상으로 알려져 있다. 부분방전의 크기는 전위 주파수 및 인가전압의 크기에 비례하며 미소 공기층이 전극에 가까이 위치하고 있으면 전원의 극성에 따라 부분방전의 크기가 달라지게 된다. 또한 부분방전의 최대치가 열화시간이 경과함에 따라 뚜렷한 전이현상을 나타내므로 절연시스템의 수명을 예측할 수 있다. 그러나 부분방전의 크기는 부하의 변동에 의한 전력기의 온도의 영향이 크며, 결합의 위치에 따라 시험전압의 스트레스가 다르기 때문에 똑같은 정도로 열화된 결합이라도 발생하는 부분방전의 크기가 열화의 정도보다는 결합의 종류에 따라 크게 변화한다는 단점이 있다. 따라서 단편적인 방전전하량으로 열화의 종류나 열화정도를 추정한다는 것은 불가능하고 신뢰성이 없으나, 결합의 존재여부 등의 판단기준으로 적당하다.

### 3.2 발생빈도수

부분방전의 단위 시간당 발생빈도수도 방전전하량과 마찬가지로 고체절연 시스템의 절연열화진단의 중요한 요소로서 연구의 대상이 되어 왔다. 절연특성이 양호하

게 제작된 절연물은 초기에는 발생빈도수는 사용시간에 따라 감소하는 추세를 보이다가 절연파괴전에 갑자기 회수가 증가한다. 또한 절연특성이 불량하게 제작된 절연물의 열화과정은 초기부터 절연파괴까지 급속히 그 회수가 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 부분방전의 발생빈도수는 부분방전이 발생하는 부위의 수와 면적에 비례하므로 신뢰성 있는 결과를 예측하는데 어려움이 있으므로 단편적인 발생빈도수만으로 열화원인의 추정이나 열화정도를 추정하는 것은 어려운 과제이다.

### 3.3 위상분포

인가전원 전압파형에서 부분방전의 위상분포를 측정하여 절연물의 열화특성을 판별하는 방법은 많은 실험을 통하여 시도되어왔다. 일반적으로 크기가 큰 부분방전의 열화과정의 초기에는 인가전압 파형의 부극성 최대치에서 발생하여 점차로 정극성의 최대치로 진전하며 열화가 더욱 진전됨에 따라 부분방전이 일어나는 위상각은 인가전압 파형의 최대치에서 영점으로 확산된다. 또한 부분방전의 위상 분포는 절연물 두께와 미소 공기층의 체적과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다. 그러나 단편적인 부분방전의 위상분포만으로 고체절연 시스템내에 존재하는 열화원의 식별과 열화정도진단은 어렵기 때문에 컴퓨터를 이용하여 통계적으로 처리하여  $\Phi$ -q-n 분포를 도출하여 부분방전을 해석하려는 연구가 진행되고 있다.

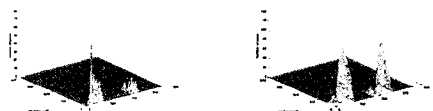
### 3.4 특성분포

$\Phi$ -q-n 분포는 부분방전의 방전전하량, 발생빈도수 뿐만 아니라 부분방전의 발생위상각을 동시에 검토하는 것이 가능하기 때문에 부분방전의 형태분류 등에 유용하다. A. Krivda와 E. Gulski 등은 부분방전의  $\Phi$ -q-n 분포의 형상파라미터인 fractal dimension과 lacunarity의 2차원 분포로부터 열화원을 식별 하였으나,  $\Phi$ -q-n 분포는 각각의 열화원에 대한 부분방전 특성을 육안으로 용이하게 검토할 수는 있으나 통계적으로 처리하기에는 데이터량이 너무 많고, 데이터량에 비하여 각각의 열화원인에 대한 특성을 일반화하는데 정보가 부족하므로  $\Phi$ -q-n 분포에서 도출한 통계적 분포인 발생회수와 방전전하량 크기를 나타내는  $Hn(q)$ , 발생회수와 발생위상의 관계를 나타내는  $Hn(\Phi)$ , 위상에 따른 평균방전 전하량을 나타내는  $Hqn(\Phi)$ , 위상에 따른 최대방전전하량을 나타내는  $Hq(\Phi)$  분포를 이용하여 방전원별 부분방전 특성을 통계적으로 처리하여 정량화 한 후 열화진단을 행하는 것이 바람직하다.

## 4. 실험결과

### 4.1 통계적분포

그림 4는 VPI처리를 한 시료와 그렇지 않은 시료에 대한 방전특성을 위상각-방전량-방전회수의 3차원으로 나타낸 것이다. 그림에서 살펴보면 방전의 회수가 VPI 처리되지 않은 시료가 상당히 높게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 5는 3차원분포로부터 얻어지는 2차원적인 분포의 형상으로서 방전의 특징을 위상각과 방전량, 방전의 회수등의 상관적인 관계를 2차원적으로 나타내고 있는 것이다.



(a) VPI 처리 시료 (b) VPI 미처리 시료

그림 4.  $\Phi$ -q-n분포

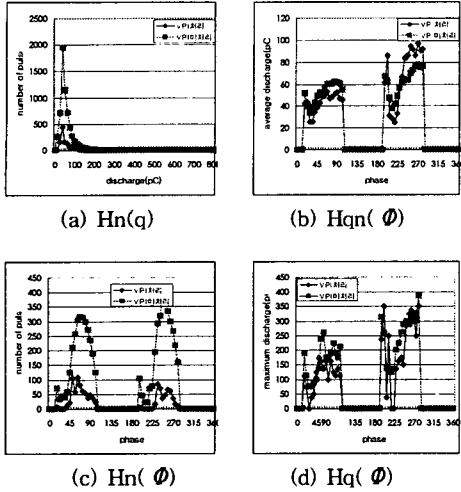


그림 5. 통계적 분포

그림에서 살펴보면 두 시료간의 부분방전의 특성을 보다 명확하게 파악할 수 있는데, 방전의 양은 양의주기에서는 VPI처리를 하지 않은 시료가 보다 높게 나타났지만, 음의 주기에서는 큰 차이를 보이지 않았으며, 방전의 회수에서는 VPI처리를 하지 않은 시료가 월등하게 큰 값을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 방전의 특성량으로서 살펴보았을 때 VPI처리를 하는 것이 시료의 특성을 개선시키는데 많은 도움이 되고 있다는 것을 증명하는 결과라고 할 수 있겠다.

#### 4.2 신경망을 이용한 분류결과

부분방전의 통계적 분포는 서로 다른 방전 패턴의 특징을 보여주었다. 따라서, 본 논문에서는 부분방전의 통계적분포를 신경회로망의 입력으로 사용하여 방전패턴을 학습시킨 후 패턴을 분류하였으며, 그것의 결과로서 각각의 방전패턴에 대한 인식을 나타내었다. 신경회로망 학습알고리즘으로는 BP (back-propagation-역전파 학습알고리즘)를 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.

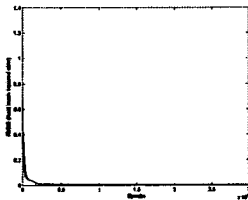
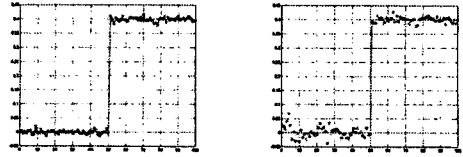


그림 6. RMSE

또한 그림 7은 시료 각각에 대해 100개의 데이터를 이용하여 학습시킨 결과와 학습을 토대로 분류된 데이터에 대한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 살펴보면 VPI 처리를 한 데이터의 한 개의 데이터가 범위를 벗어나 미분류데이터가 발생한 것을 확인할 수 있다. 하지만 전체적으로는 거의 100%에 가까운 높은 인식을 보이고

있다.



(a) 학습결과 (b) 분류결과  
그림 7. 분류결과

표2. 패턴에 대한 인식률

learned pattern	pattern for classification		total recognition rate
	normal coil	aged coil	
normal coil	99	-	99%
aged coil	-	100	

#### 5. 결론

건인전동기의 고정자 코일의 VPI(진공가압함침)처리를 하는 것은 부분방전의 특성을 좋게 하여 그 기기의 성능을 향상시켜 준다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 통계적 분포로부터 얻어지는 특성량 및 그 분포의 특징으로부터 확인할 수 있었으며, 이와 같은 특징을 바탕으로 하여 함침시에 결함이 존재할 경우에도 이와 유사한 과정을 통해 부분방전의 추론특성량으로부터 신경망을 이용한 분류를 할 수 있다는 가능성을 보여주는 결과라고 할 수 있겠다.

#### [참고 문헌]

- [1] F. H. Kreuger, E. Gulski, and A. Krivda, "Classification of Partial Discharge", IEEE Trans. on EI, Vol. 28, No. 6, p. 917 - 922, 1993.
- [2] E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer-aided recognition of Discharge Sources", IEEE Trans. on EI, Vol. 27, No. 1, p. 82 - 97, 1992.
- [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] 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.