

# 전자파를 이용한 전동기 절연열화 진단시스템의 설계(2)

유 권중, 김 이곤  
여수대학교 전기공학과

Design of Diagnosis System for Insulation Degradation of Motor by  
using Electromagnetic Wave(2)

Kweon Jong Yoo, Yi Gon Kim  
Department of Electrical Engineering, National Yosu University

## Abstract

본 연구는 전동기의 부분방전에 의해 발생하는 전자파를 측정하여 전동기의 열화상태를 진단할 수 있는 전동기 절연열화 진단시스템을 설계하였다. 현장 전동기에서 부분방전에 의한 전자파를 on-line으로 측정하고, 측정된 데이터로부터 정량화된 특징 데이터를 추출한 후 전자파의 평균 에너지 분포를 이용하여 전동기의 절연열화 상태를 판단하는 방법을 제시하였으며, 현장에서 사용 중인 Megger시험과 비교하였다.

## 1. 서 론

전동기는 전기에너지를 기계적 에너지로 변환하는 원동기로 산업 플랜트의 대형화, 자동화가 급속히 이루어짐에 따라 활용범위와 역할이 더욱 확대되고 있다. 따라서, 생산 공정에서 전동기의 고장은 생산성의 저하를 초래 할 뿐 아니라 고장이 발생한 기기 운전자의 안전을 위협하여, 시스템의 전체적인 신뢰도를 떨어뜨리고, 복구를 위한 추가 적인 인력 및 재정, 시간의 손실을 초래한다.

전동기에서 발생할 수 있는 고장 원인별 부위를 살펴보면 베어링, 고정자 권선, 회전자 바, 샤프트, 카플링 등 외부 장치로 분류 할 수 있다[1]. 지금까지 연구된 유도전동기의 고장 원인을 분석한 결과 베어링의 마모와 고정자 권선의 절연파괴가 전동기의 신뢰도를 저하시키는 주된 요인이며, 고정자 권선의 절연파괴는 대부분 부분방전을 수반하고 있음을 많은 연구 결과에서 확인되었다[2]. 따라서 지금까지 전동기의 절연열화에 의한 고장진단에 관한 연구는 부분방전이 절연열화에 미치는 영향을분석하는 것이 대부분을 차지하고 있다. 부분방전을 이용한 진단방법으로는 전류파 펄스를 검출하는 것이 대표적인 방법이다. 이 방법은 로고스키코일, 결합콘덴서법, 접지전류검출법, 방사전자계법등을 이용하여 부분방전으로 발생하는 전류파를 측정하여 절연열화와 상관관계를 규명하여 진단하는

방법이다[3]. 다음으로 절연유의 화학적 성분을 분석하여 절연열화와의 정도를 해석하는 방법[4]이 있으나 신뢰성이 높지만 응답 속도가 느리다는 단점을 갖고 있다. 그외에 부분방전에서 발생하는 초음파를 감지하여 절연열화를 진단하는 기계적 방법들이 보고 되고 있다[5]. 이 방법은 감도와 측정위치 등의 기술적인 문제점을 갖고 있다[6]. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 전자파에 의한 진단방법에 대한 연구가 진행되고 있으며 특히 부분방전에서 절연열화의 특성을 잘 보여주는 VHF대역전자파에 대한 관심이 높다.

본 연구에서는 전자파를 이용한 전동기절연열화 진단 시스템을 설계하여 여천산단중 여천NCC제2공장에서 주로 이용되는 대소용량의 유도전동기로부터 데이터를 수집하여 절연열화와의 관계를 분석하고 열화진단모델을 설계하였다.

## 2. 전자파 측정과 진단모델

### 2.1 전자파 측정

부분방전으로부터 발생하는 전자파 방사와 안테나 계측원리를 요약하면 다음과 같다. 그림1에는 방전원을 등가적으로 근사하여, 방전원으로부터 일정거리 떨어진 곳에서의 전계와 자계를 측정할 예를 나타낸다.

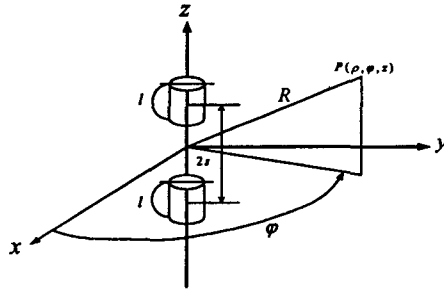


그림1. 미소 간격 방전의 다이폴 모델

그림1을 Wilson & Ma의 모델, 혹은 NIST의 모델이라는 이름으로 알려진 것으로, 미소 다이폴에 전류 \$i\$가 흐를 때 시간 \$t\$에 의존하는 방사 전자계는 원주좌표계에서 다음과 같이 구해진다.

$$E_r(\rho, z, t) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0 R^2} \left( \frac{3i(u)}{cR^2} + \frac{1}{c^2 R} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right)$$

$$E_z(\rho, z, t) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left[ \left( \frac{3z^2}{cR^4} - \frac{1}{cR^2} \right) i(u) + \left( \frac{z^2}{c^2 R^3} - \frac{1}{c^2 R} \right) \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right]$$

$$H_\phi(\rho, z, t) = \frac{l}{2\pi R} \left( \frac{i(u)}{R^2} + \frac{1}{cR} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right)$$

여기서, \$R\$은 방전원으로부터 관측점 \$(\rho, z, t)\$까지의 거리

이며, \$u = \sqrt{R^2 - z^2} - ct\$이다. \$u = t - R/c\$이며, \$c\$는 광속이며, \$\epsilon\_0\$는 진공의 유전율을 나타낸다. 이상과 같이 안테나를 이용한 절연체로부터 방사되는 전자파의 측정 가능성이 있을 수 있다[7].

2.2 퍼지-신경망모델

전자파 신호로부터 특정 정보를 추출하여 입력 변수로 하여 상태 진단 모델을 설계한다. 입력 변수가 \$x\_n\$로 (\$n=2\$인 경우), 출력 변수가 \$y^i\$인 퍼지 규칙은 다음과 같이 표현된다.

$$R^i: \text{if } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i,$$

$$\text{then } y^i = b^i \quad (i=1,2,3,\dots,c) \quad (4)$$

여기서, \$R^i\$는 \$i\$번째의 규칙, \$c\$는 규칙 수, \$A\_1, A\_2\$는 삼각형의 퍼지 집합이고, \$y^i\$는 \$i\$번째 룰의 후건부 출력이며, \$b^i\$는 \$i\$번째 룰의 싱글톤 출력값이다. 퍼지 모델의 추론법으로서 맥스-프로덕트(Max-product) 합성법을 이용하며, 무게 중심법을 이용하여 비 퍼지화한 값을 모델의 출력으로 한다. 무게 중심법을 이용한 비 퍼지화한 모델식(4)의 입력이 \$(x\_1, x\_2)\$인 경우에 식(5)과 식(6)으로 표현된다.

$$w^i = \mu_{A_1^i}(x_1) \times \mu_{A_2^i}(x_2) \quad (5)$$

$$y = \frac{\sum_{i=0}^m w^i \times y^i}{\sum_{i=0}^m w^i} \quad (6)$$

식(5)의 \$\mu\_{A\_1^i}(x\_1)\$는 퍼지 집합 \$A\_1\$에 대한 멤버십함수, \$\mu\_{A\_2^i}(x\_2)\$는 퍼지 집합 \$A\_2\$에 대한 멤버십함수, \$y^i\$는 \$i\$번째 룰의 출력, \$w^i\$를 입력 \$(x\_1, x\_2)\$의 규칙 \$R^i\$에 대한 적합도라 부른다. 입력 퍼지 집합의 멤버십 함수는 삼각형 멤버십 함수로써 얻어지고, 각 변수의 멤버십 함수를 변수의 값으로 하는 1개의 규칙이 구성된다. 모델링 수행 순서는 그림 2과 같이 수행한다.

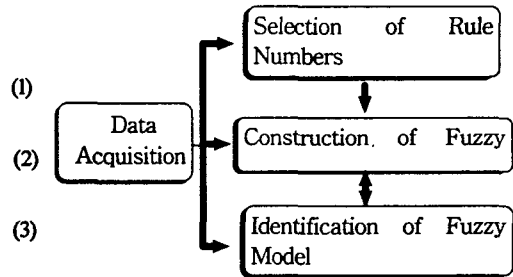


그림2 diagram of Modeling Process

그림2 고장진단모델 설계 과정은 정량화된 데이터를 이용하여 뉴로-퍼지모델을 설계하였다. 절연열화의 메카니즘은 대단히 복잡하고 여러 가지 요인의 복잡한 비선형적 특성을 갖고 있어 일반적인 수식에 의한 표현은 거의 불가능하다. 따라서 수치데이터를 이용한 퍼지-뉴로모델링방법을 이용하여 그림3과 같이 진단모델을 설계한다[8].

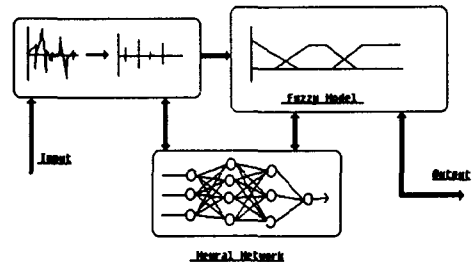


그림3. Neuro-Fuzzy Diagnosis Model

3. 실험장치 구성과 실험방법

실험장치는 다음과 같이 구성하였다. 안테나는 30MHz에서 1GHz 까지 측정 할 수 있는 HP11966P Broadband Ant를 사용하였다. 안테나에서 수신된 미약한 신호는 대역폭이 30MHz에서 26GHz인 Pre-AMP HP8447F에서 증폭된 후 동축 케이블을 통해 HP8591EMC Analyzer 입력된다. 입력된 신호로부터 전동기의 부분방전으로 발생된 전자파를 분석한다. 분석된 데이터는 GPIB Cable을 통하여 컴퓨터에 전송되었으며, 컴퓨터에서 특정데이터를 분류할 수 있도록 신호분석을 수행 할 수 있도록 구성하였다. 실험장치 구성도를 보면 그림4와 같다.

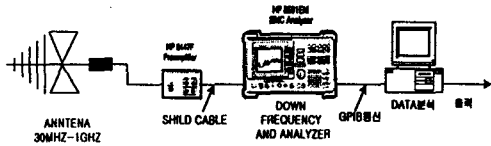


그림4. 전자파 측정장치 구성도

4. 실험결과 및 검토

본 연구에서는 화학 공정 내에 운전되고 있는 전동기를 대상으로 그림4의 측정시스템을 이용하여 전자파를 직접 실측하였다. 대상 시스템은 2종류로 970B,C,F는 공기압축기(410KW), P951B, P960B, P960C, P961A는 원수펌프(75KW)로 나누어진다. 공기압축기의 계측된 데이터는 그림13, 15, 17, 19과 같이 각각의 대표적인 전동기에서 발생하는 주파수대역별 전자파를 보여 주고 있다.

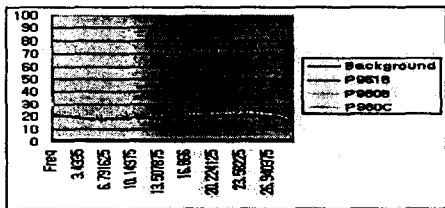


그림5. 150K-30M 원수펌프 주파수 스펙트럼

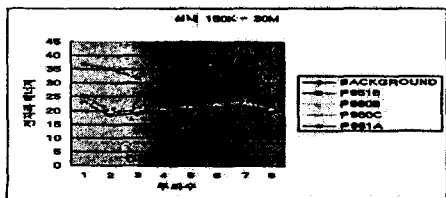


그림6. 150K-30M 원수 펌프 전자파 에너지분포

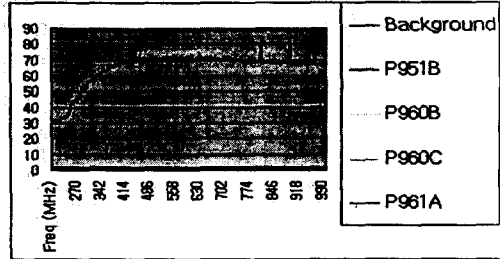


그림7. 200M-1G 원수 펌프 주파수 스펙트럼

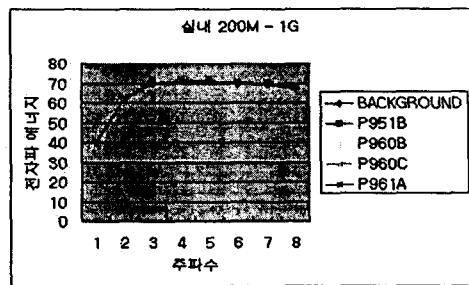


그림8. 200M-1G 원수펌프 전자파 에너지분포

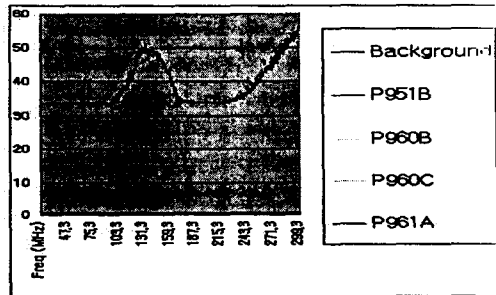


그림9. 20M-300M 원수펌프주파수 스펙트럼

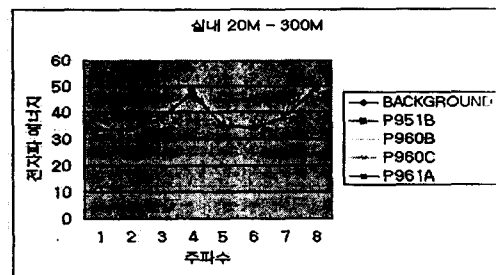


그림10. 20M-300M 원수펌프 전자파 에너지분포

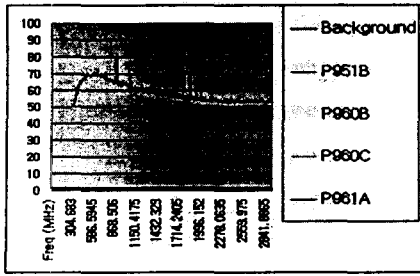


그림11. 30M-1G원수펌프 주파수 스펙트럼

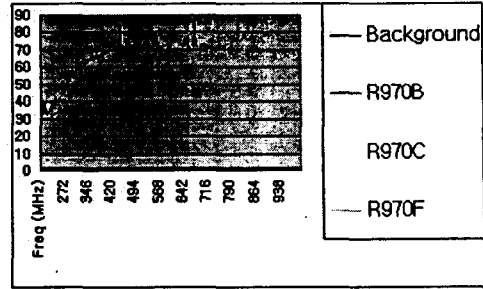


그림15. 200M-1G공기 압축기 주파수 스펙트럼

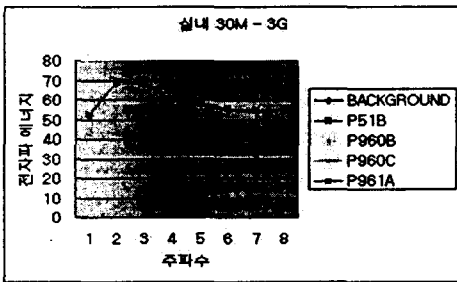


그림12. 30M-1G원수펌프 전자파에너지분포

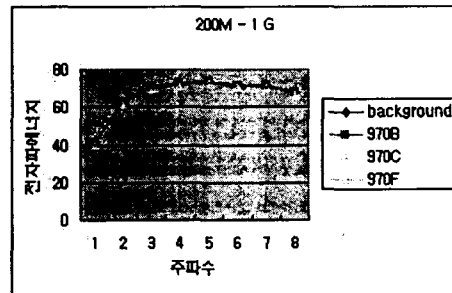


그림16. 200M-1G공기 압축기 전자파 에너지 분포

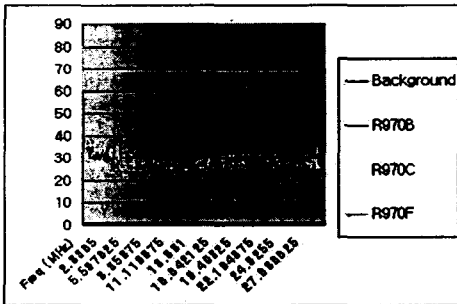


그림13. 150K-30M 공기압축기 주파수 스펙트럼

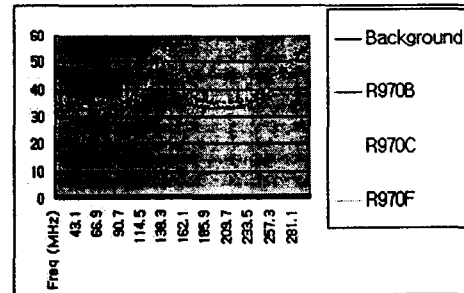


그림17. 20M-300M 공기압축기 주파수 스펙트럼

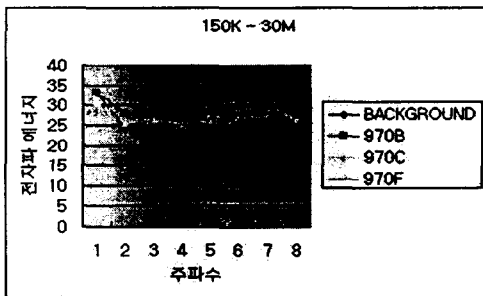


그림14. 150K-30M 공기압축기 전자파에너지분포

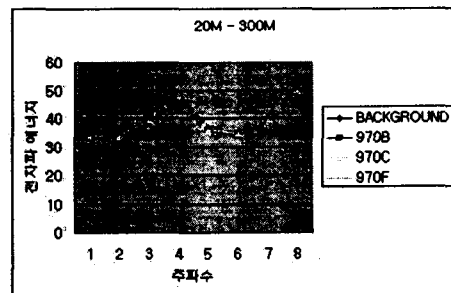


그림18. 20M-300M 공기압축기 전자파에너지분포

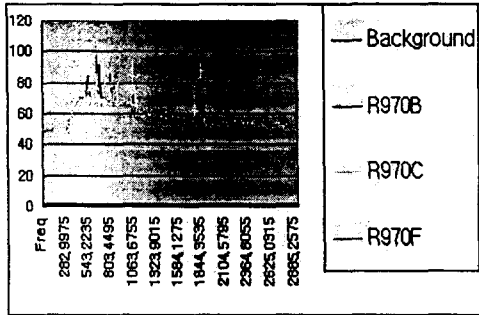


그림19. 30M-3G 공기 압축기 주파수스펙트럼

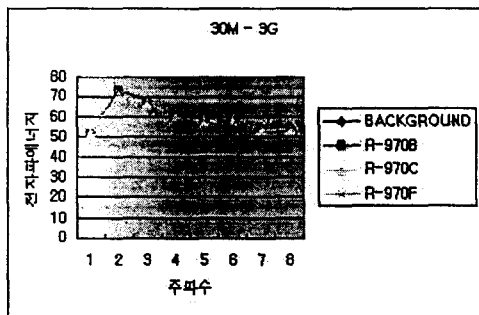


그림20. 30M-3G 공기 압축기 전자파에너지분포

표1. 공기 압축기 Megger 시험결과

공기 압축기 번호	Megger 시험결과
R-970B	2000VDC/∞ MΩ
R-970C	2000VDC/500 MΩ
R-970F	2000VDC/∞ MΩ

표2. 원수펌프 Megger 시험결과

원수 펌프 번호	Megger 시험결과
P951B	500VDC/1000MΩ
P960B	500VDC/∞MΩ
P960C	500VDC/1000MΩ
P961A	500VDC/1000MΩ

원수 펌프에서 측정된 데이터는 그림 5,7,9,11로 각 전동기에서 발생된 주파수대역별 전자파 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림5,그림13에서와 같이 전자파가 150KHz에서 30GHz대에 걸쳐 나타나지만 특히 그림9, 그림17 과 같이 20MHz대와 300MHz대에서 집중해서 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 코로나등 외부 임펄스성 잡음의 특성을 줄이고 대역별 분포 특성을 도출하기 위하여 이들 신호를 구간별 자승 적분값으로 분석하면 원수펌프의 전자파 에너지 분포는 그림6, 8, 10, 12와 같고 공기압축기의 전자파 에너지 분포는 그림 14,16,18,20 과 같다. 원수펌프 전자파 스펙트럼(20M-300M)을 나타낸 그림9에서 배경잡음 평균은 38.49 dBuV/m이고 P951B는38.92dBuV/m, P960B는 38.90 dBuV/m, P960C는 42.84dBuV/m, P961A는 38.74dBuV/m로 나타나고있다.이 에너지 평균값을 비교해 보면 P960C전동기에서는 배경잡음대비 약 3 dBuV/m 높으므로 약간의 부분방전 현상이 진행되고 있음을 알 수 있다. 이것과 비교하여 공기압축기 전자파 스펙트럼((20M-300M)을 나타낸 그림 17에서 전자파에너지 분포를 분석하여 보면 평균 배경잡음 에너지는 50.20 dBuV/m, R970B는51.08 dBuV/m, R970C 50.20 dBuV/m, R970F 50.25dBuV/m을 나타내고 있으며 이 공기 압축기를 20M-300M사이의 주파수 스펙트럼으로 분석한 결과 대체로 양호한 상태로 판단 되었다. 이들을 공장내 유지보수주기에 따른 보수 수명에 근거하여 공장내에서 권선의 상태진단법으로 Megger 시험을 한 결과를 표1 .표2에 나타냈었고, 전자파로 측정 한 결과와 비교한 결과 거의 일치함을 보여주어 전자파를 주파수 스펙트럼으로 측정하여 절연열화 진단에 적용 할 수 있는 가능성을 알 수 있었다. 이 전동기를 대상으로 분석한 데이터를 기반으로 패턴을 분류하여 상태 판단 틀을 구성하고 진단 시스템을 구성할 수 있음을 보여 주었지만 실험환경의 한계로 인해 다양한 상태의 대상시스템을 실험하지 못하였다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 절연열화진단시스템을 개발하기 위한 초기 연구 단계로 현장에서의 부분 방전에 의한 방사전자파의 측정 가능성과 절연 열화와 연계성을 확인 하였다. 전자파 분포대역과 전동기의 절연열화의 관계를 규명하기 위하여 측정된 신호를 분석하여,현장에서 사용중인 Megger시험으로 비교한 결과와 전동기 상태가 일치 함을 보여주어,전자파를 이용하여 전동기 절연열화 진단에 이용 할 수 있는 가능성을 보여 주었다. 그러나 대상기에 대한 다양한 상태에 대한 학습 데이터의 부족과 잡음, 안테나의 지향성등의 문제가 신뢰성을 저하 시키는 요인으로 확인하였다. 그러므로

본 연구 결과 이러한 문제점을 해결한다면 전자파 계측에 의한 전동기의 절연열화진단이 가능함을 확인할 수 있다. 그러나 대상 기기에 대한 여러종류의 상태를 나타내는 학습데이터의 부족과 잡음 안테나의 지향성 문제가 신뢰성을 저하시키는 요인이됨을 확인하였다. 본 연구 결과 이러한 문제점을 해결 한다면 전자파 계측에 의한 전동기의 절연열화 진단이 가능함을 확인할 수 있었다. 다음 연구과제는 이러한 제 문제해결을 위한 잡음 해석과 안테나 그리고 다양한 대상 기기에 대한 전자파 계측으로 학습데이터의 정량화에 대한 내용으로 계속 연구하고자 한다.

#### 감사의 글

이 논문은 과학기술부, 과학재단 지정 지역협력 센터인 여수대학교 설비자동차 및 정보 시스템 연구개발센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

#### [참 고 문 헌]

- [1]Thorsen,O.V.,:Dalva,M..A Survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals and Oil Refineries.IEEE Trans.on Ind.Appl. IA-31( No.5,pp.I 186-I 197,1995.
- [2]Evans D.L., "IEEE Working Group Report of Problems with Hydrogenerator Thermost Stator Windings-Part I." IEEE Transactions on Power Apparatus and System,Vol PAS-100,No.7,pp.3284-3291, July 1981.
- [3] 前川 洋, "GIS部分放電位置標定システムの開發と 實フィールドへの適用"電學論B,116卷 12号
- [4]Tavner,P.J.,Gaydon,B.G.,Ward,D.M., "Monitoring generators and large motors.IEE Proc.B-133. no.3,pp.169-180 1986
- [5]Wenzel.D, Borsi.H, Gockenbach.E,"A New Approach for Partial Discharge Recognition on Transformers on-site by Means of Genetic Algorithms"IEEE Intern.symp.on EI ,Quebec, pp.24--28, 1996
- [6]E.Howell, E.T.Norton "Detection of Partial Discharge in Transformers using Acoustic Emission Techniques"IEEE Trans.on PAS,vol. PAS-97, NO.5, pp1538-1549, 1978
- [7]이상훈,박광서,김충년,김기채,이광식,이동인,"기중방전에 대한 방사전자파 측정과 분석"대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp.2028-2030, 1999
- [8]김이곤,김창원,송길호,"Wavelet을 이용한 압연기

진단"한국퍼지및지능시스템학회추계학술대회학술발표 논문집,pp597-608,1998

[9]김이곤,배영철 "압연기 베어링 고장-진단 시스템 설계" 퍼지 및 지능 시스템학회 논문지 제8권 7호,pp36 - 43,1998