

고압전동기 고정자권선의 부분방전 특징추출

박재준*, 김희동**, 이동윤*,
 중부대학교 전기전자공학과*, 한전전력연구원**

Feature Extraction of Partial Discharge for Stator Winding of High Voltage Motor

Jae-Jun Park*, Hee-Dong Kim**, Dong-Yoon Lee*
 *Joongbu University, **KEPRI

Abstract - On-line monitoring of fault discharge is an important approach for indicating the condition of electrical insulation of stator winding in high voltage motor. In this paper, several key aspects of on-line monitoring system are discussed, involving the characteristics of fault discharge of stator winding in high voltage motor, spectrum analysis of four simulation fault signals, feature extraction of internal fault discharge from apply voltage to breakdown. The study of the partial discharge activities allows to highlight the ageing stage in the winding fault under test. During the life of the winding insulation fault, the shape of PD signal change relating to the ageing stage.

The ageing of stator winding insulation fault of high voltage motor is investigated based on the characteristics of partial discharge pulse distribution and statistical parameters, such as maximum, skewness and kurtosis using discrete wavelet transform coefficients.

1. 서 론

대부분 고압회전에서 고정자 권선은 부분방전이 발생할 수 있는 여러 가지 잠재적인 요소를 갖고 있다. 기기 설계, 구성재료, 제작법, 운전조건 및 정비사례 등은 부분방전의 발생량, 위치, 특성 및 진전 등에 현저하게 영향을 미친다. 회전기의 비정상적인 운전, 각종 열화, 권선의 진동 및 오손 등에 의해 주 절연재료 내부에서 결함, 고정자 권선 표면에서 반도체층의 손상 및 단말권선의 상대적인 이동으로 인한 마모 등에 의해 다양하게 부분방전 패턴이 발생한다.

실제로 고압전동기 운전중(on-line)에 부분방전 패턴을 측정하여 절연재료에서 열화정도를 판정하고 있다. 고압전동기 고정자 권선 단자박스에 에폭시-마이카 커플러(epoxy-mica coupler)를 설치하고 TGA(turbine generator analyzer)를 사용하여 운전중에 부분방전을 측정한다. TGA는 고정자 권선에서 전체적인 방전활동을 파악하기 위해 NQN(normalized quantity number)과 부분방전 크기(Qm)를 주로 측정하여 경향을 분석함으로써 이상여부를 파악하고 있다.

본 논문에서는 6.6kV급 고압전동기 모델 코일을 4가지의 권선의 인공적인 결함을 갖도록 제작하였다. 운전 중 모의를 위해 모델 코일에 80pF의 에폭시-마이카 커플러

플러를 설치하였으며, TGA를 사용하여 NQN, 부분방전 크기 및 부분방전 패턴 등을 측정하였다. 웨이블릿 변환 기법을 이용한 고압전동기의 고정자권선의 결함에서 발생된 부분방전신호의 파형을 통하여 여러 가지의 통계적인 파라미터를 통하여 특징을 추출하였다.

2. 본 론

2.1 모의결함 모델

고압의 전기적인 및 기계적인 스트레스 그리고 열적 및 환경조건에 따라 절연재료는 열화되어 결함이 발생할 수 밖에 없다. 이러한 이유로 최대한 현실적으로 4가지 결함을 구현하였다.

- ① 정상상태의 고정자 권선.
- ② 내부방전을 유발시킬 수 있는 내부결함용 고정자권선. 절연재료 내 다수의 보이드를 생성시켜 방전을 일으킬 수 있도록 제작.
- ③ 1-선을 단락시킨 고정자권선의 모의결함 제작.
- ④ 코로나 테이프를 감지 않고 제작. 일반적으로 3kV급 이하의 고압전동기에서는 코로나 방지용 테이프를 사용하지 않지만, 그 이상의 고압전동기에서는 코로나 테이프를 감겨 사용된다. 그러나 본 연구에서 경우 고정자권선의 결함으로 제작.

표1. 모의 결함권선 종류에 대한 기호의 정의

Symbol	Types of Simulation fault
No1	Normal
No2	Internal Fault
No3	1-Turn Short Fault
No4	Non-Corona Tape Fault

2.2 실험방법 및 부분방전 계속시스템

인가전압은 6.6[kV]급, 1000-1500kW용량, 고압전동기의 모의 고정자권선에 열화를 가속시키기 위하여 12kV(180%)까지 단계적으로 승압(1kV/min)후, 일정전압이 인가 되도록 하였다. 부분방전 개시로부터 부분방전펄스 신호가 80[pF]인 에폭시-마이카 커플러를 통과하여 증폭 및 필터를 통하여 오실로스코프의 CH2로 입력되어진다. 인가전압의 위상각은 고전압 프루브(Agilent,1000:1)을 통하여 CH1로 입력되어진다. 트리거 된 후 컴퓨터에서 오실로스코프를 제어하여 원하는 1차원적인 부분방전 펄스파형을 원하는 시간동안의 데이터를 획득하게 된다.

그리고 TGA 측정 장치로부터 부분방전펄스진폭(최대 방전전하량: Qm)과 방전 펄스 수(NQN)의 데이터를 획득하여 2차원적으로 나타내었다. 인가전압 위상각을 포함한 방전펄스진폭 및 펄스의 관계인 ϕ -Q-N 적으로 나타낸 것이다. 부분방전 발생시 여러 경우의 측정센서를 이용하여 측정할 수 있는 계측 시스템을 그림1에서 나타내었다

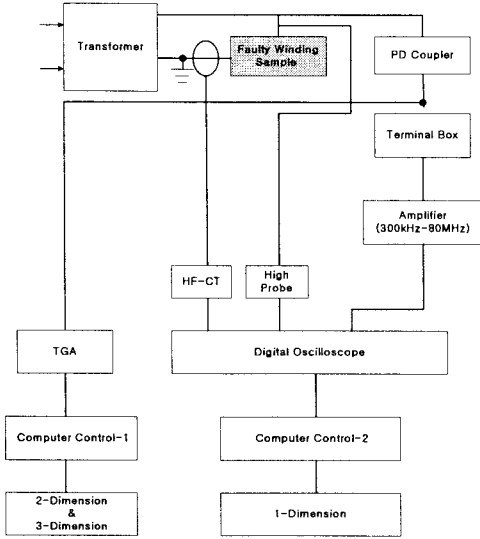


그림 1. 부분방전 계측시스템 구현

2.3 고정자권선의 운전 중 측정

2.3.1 인가전압의 영향

Greg Stone는 13.8kV 에폭시-마이카로 절연된 고정자권선의 부분방전크기 전압의 영향을 나타내고 있다. 약 8kV 전압에서 5%감소는 부분방전크기가 30% 줄어드는 원인이 되고, 10%를 감소시키면 60%가 줄어드는 결과를 가져왔다. 인가전압이 약간 감소하게 되면 부분방전펄스진폭의 크기는 크게 감소되고 있음을 보고하고 있다. 본 연구에서는 에폭시-마이카로 절연한 여러 가지 모의 고정자권선을 10kV로 일정하게 인가 후 7kV로 감소시킬 때(인가전압을 30%감소) 각각의 모의 결함된 권선에서의 부분방전펄스 크기 및 펄스 수의 감소비율을 나타내었다.

표 2. 인가전압 감소에 따른 부분방전펄스 크기 및 펄스 수 감소율의 변화

결함종류	부분방전펄스 크기		부분방전 펄스수	
	정극성	부극성	정극성	부극성
No1	18.9%	23.94%	22.27%	20.27%
No3	17.2%	15.2%	21.4%	21.4%
No4	46.5%	30.0%	42.5%	40%

표2에서 나타난 경우에서, 특징적인 현상은 여러 결함 중 No1, No3의 경우는 인가전압의 감소율에 비하여 펄스 크기 및 펄스 수가 감소율에 미치지 못하였지만, No4의 결함에서는 그 이상 감소됨을 알 수 있었다. 이 결과

로부터 No4의 결함 시 코로나 테이프의 역할이 고압전동기에서 코로나 및 부분방전 억제에 크게 기여하고 있음을 알 수 있었다.

2.3.2 부분방전 펄스 크기 및 펄스 수

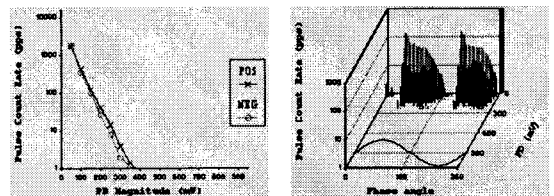
표3에서는 결함권선 No1-No4의 4가지에 11.2kV 전압을 인가 후 TGA(Turbo Generator Analyzer)을 이용하여 측정된 결과를 나타내고 있다.

표 3. 극성에 따른 PD 진폭 및 펄스수의 변화

Fault Types	Magnitude of PD		Number of PD	
	Positive	Negative	Positive	Negative
No1	All Voltage: equal		3kV: Equal 7kV: Positive Large 11.2kV: Negative Large	
No2	3kV:Negative Large 7kV:Positive Large 11.2kV:Negative Large			
No3	3kV:equal 7,11.2kV: Positive Large		3kV:equal 7,11.2kV: Positive Large	
No4	3kV:equal 7,11.2kV: Positive Large		3kV:equal 7,11.2kV: Positive Large	

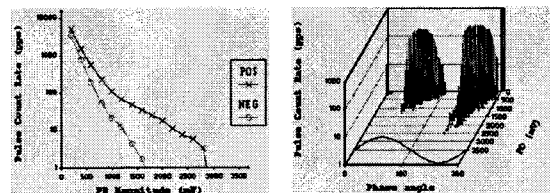
2.3.3 인가전압 위상각을 고려한 펄스분포

그림 2에서는 No3과 No4에서는 각각의 결함에 대한 PD크기와 펄스수와 2차원인 표현과 인가전압위상각을 포함한 펄스 진폭과 펄스 수와의 3차원적으로 나타낸 것이다. 그 결과에 대한 표현은 그림2에서는 12KV만을 표현한 것이고, 표3에서는 각각의 전압에 대한 결과들 모두 나타낸 것이다.



(a)Pulse Magnitude and Pulse Count Rate[pps](No3)

(b) ϕ -q-n(No3)



(c)Pulse Magnitude and Pulse Count Rate[pps](No4)

(d) ϕ -q-n(No4)

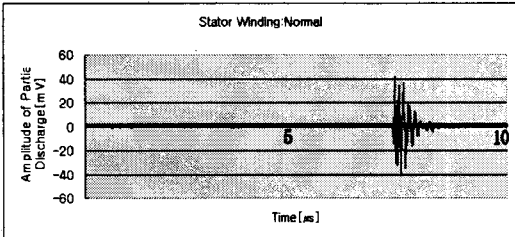
그림 2. 인가전압위상각을 고려한 부분방전특성:

인가전압 12kV, 2-Dimension/3-Dimension

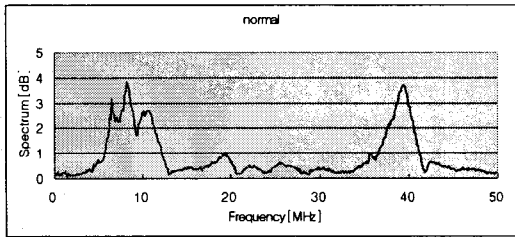
2.3.4 각 모의결합 권선에 대한 부분방전 펄스파형

2.3.4.1. 정상권선

그림 3(a)에서는 정상상태의 권선에서의 부분방전펄스를 시간영역으로 획득된 자료를 나타낸 것이고 그림3(b)의 경우는 시간영역에서 주파수영역으로의 변환된 결과를 나타낸 것이다. 상전압이 고정자권선에 12kV인가되어 나타나는 파형으로서 결함을 포함하지 않은 경우로서 전형적인 지수함수적인 파형을 나타내고 있다. FFT한 결과 주파수 영역에서 경우 두개의 dominant한 주파수 밴드가 존재하고 있다. 하나는 5.7MHz-12.3MHz와 또 다른 하나는 36.6 MHz-41.2MHz가 존재하고 있다. 중심 주파수의 경우도 전자는 9.1 MHz, 후자는 39.5MHz이다.



(a) 신호파형

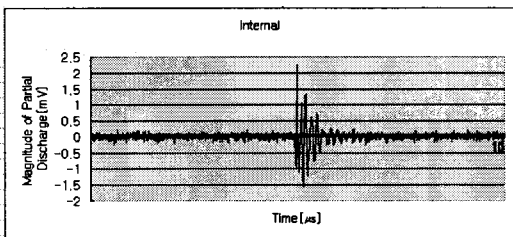


(b) 주파수 분석

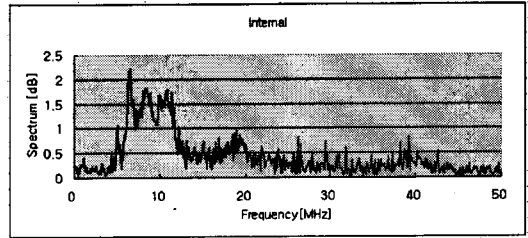
그림 3. 정상적인 권선의 시간영역과 주파수영역

2.3.4.2 내부방전 모의권선

그림4(a)에서는 내부방전을 모의한 경우 시간영역에서의 부분방전펄스 파형을 나타내고 있으며, 그림4(b)에서는 시간영역함수에서 FFT를 이용한 주파수 영역의 함수로 변환된 주파수특성을 나타내고 있다. 정상적인 권선에 비하여 상대적으로 내부방전 시 고주파성분이 적게 포함되어있음을 알 수 있었다. FFT를 통한 주파수 분석한 결과를 보면 단일펄스인 경우 주파수밴드가 5.4-12.7 MHz 범위의 주파수 영역을 갖고 있으며, 중심주파수는 9.3MHz로 나타났다.



(a) 신호파형

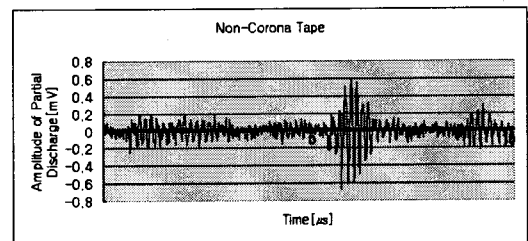


(b) 주파수 분석

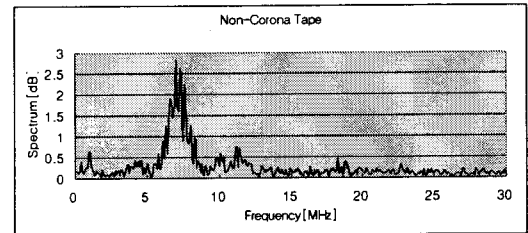
그림 4. 내부방전시 파형의 시간영역과 주파수영역

2.3.4.3. 코로나 테이프 제거 결합신호

그림5(a)코로나 테이프를 제거한 결합의 고정자권선에서 발생된 부분방전펄스 파형을 시간영역의 함수로 나타낸 경우이다. 거의 모든 파형에서 나타난 경우로서 No1, No2, No3의 결합의 경우와는 다른 파형을 나타내고 있다. 지수함수적인 파형이 아니라, 일반적으로 진동시 나타나는 형태의 파형으로서 주파수 특성의 경우 6.2MHz-8.4MHz의 밴드 폭을 갖고 있으며 중심주파수의 경우 7.3MHz를 나타내었다. 코로나 테이프의 역할은 인가전압이 낮은 경우에는 거의 나타나지 않으며, 고전압이 인가되면 코로나 성의 펄스가 나타난 경우로 사료된다. 또 다른 Hybrid형의 파형은 전형적인 파형에 정상권선에서의 파형의 복합적인 형태의 파형으로서 주파수 특성의 경우는 코로나테이프가 제거된 경우의 주파수특성과 정상권선의 주파수 특성의 복합적인 주파수 특성을 나타내고 있다. 이로서 각각의 결합에 대한 시간영역에서 특성과 주파수영역에서의 특성을 비교검토 하였다. 그 결과에 대한 주파수특성의 경우를 표4에서 나타내었다.



(a) 신호파형



(b) 주파수 분석

그림 5. 코로나 방지테이프 제거된 결합신호의 시간영역과 주파수영역

표 4. 각 모의 결합신호 파형에 대한 주파수 분석 (열화초기)

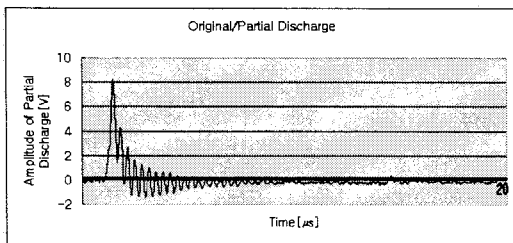
Faulty Types	Frequency Band	Center Frequency
No1	Two Dominant Frequency. 1. 5.7MHz-12.3MHz 2. 36.6 MHz-41.2MHz	1. 9.1 MHz 2. 39.5 MHz
No2	1.Single Pulse 5.4MHz-12.7MHz 2.Multiple Pulse Two Dominant Frequency (1) 5.4MHz-12.2MHz (2) 34.1MHz-42.2 MHz	2.Multiple Pulse Two Dominant Frequency (1)8.63MHz (2)39.3MHz
No3	Two Dominant Frequency. 1. 6MHz-12.2MHz 2. 36.3MHz-41.5MHz	1. 9.2MHz 2. 39.4MHz
No4	1.Typical Waveform 6.2MHz-8.4MHz 2.Hybrid Waveform (1)6.3MHz-8.4MHz (2)36.2MHz-41.4MHz	1.Typical Waveform 7.3MHz 2.Hybrid Waveform (1)7.3MHz (2)39.4MHz

2.4 이산웨이블렛 변환기법을 이용한 특징추출

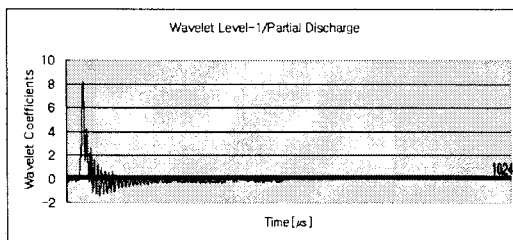
2.4.1 부분방전 커플러(에폭시-마이크)를 이용한 부분방전신호 파형(내부방전)

본 연구에서는 daubachies' 이산웨이블렛 변환기법을 적용시 신호의 포인트의 포인트수가 많으면 최적의 Level을 선정하여 즉, 에너지가 새지 않은 형상을 찾아 통계적인 파라미터에 적용한 것이다. 본 연구에서는 Level-1을 선정하여 적용하였다. 에너지가 새지 않았기 때문에 왜도와 첨쇄도의 값이 변화 없음을 볼 수 있다.

2.4.1.1 부분방전신호의 이산웨이블렛 변환기법에 적용



(a)부분방전 원형신호



(b)이산웨이블렛 변환 Level-1 (SK=2.34, KU=5.17)

그림 6. 부분방전신호에의 적용

2.4.1.3 이산웨이블렛 기법이 적용된 특징추출

여러 가지 통계적인 파라미터를 이용하여 부분방전 신호의 형상을 평가하기 위하여 사용 되어진다. 가령 Skewness :SK, Kurtosis: KU, Maximum :MA, Average:AV, Variance:VA, 웨이블렛 계수의 평균값 및 총합 등으로 그 신호에 대한 특징을 추출하기위하여 사용하게 된다. 여기서 SK나 KU의 경우는 정상분포에 관계한 분포의 비대칭 정도를 말하여, SK=0은 대칭성을 의미하며, SK>0왼쪽편이 크고, SK<0 오른쪽편이 큰 비대칭성을 의미한다.

$$SK = \frac{\sum_{i=1}^N (q_i - \mu)^3 p_i / \sigma^3}{\sum_{i=1}^N p_i} \dots \dots \dots (1)$$

KU는 정상분포에 관하여 분포의 집중되는 양 또는 날카로움이 증가되는 것을 지시한다.

KU=0은정상분포를 의미하고, KU>0 분포의 날카로움을 의미하고 KU<0 평평한 분포를 의미한다.

$$KU = \frac{\sum_{i=1}^N (q_i - \mu)^4 p_i / \sigma^4}{\sum_{i=1}^N p_i} - 3 \dots \dots \dots (2)$$

2.4.1.4 특징추출의 결과

표 5, 6, 7의 경우는 내부결함을 모의한 고정자권선을 인가전압 12kV로 일정하게 28일(672시간)간의 전압을 인가하였다. 매일 1회의 신호를 획득하였고, 획득된 자료를 웨이블렛 변환과정을 통하여 특징을 추출하였다. 획득된 특징은 표5에서는 최대값의 변화를 나타내었고, 표6에서는 왜도의 변화양상을 그리고 그림 7에서는 첨쇄도의 변화를 나타내었다.

표5의 최대값의 변화에서 20일(480시간)에 이르러 약간의 부분방전펄스 크기가 증가되었고, 그 후 파괴에 가까워 질수록 급증하고 있음을 볼 수 있었다.

전압인가 초기5일 정도에 비하여 22일에 이르렀을 때 2배 23일에 이르러서는 4.9배, 25일에 이르러서는 5.7배의 증가를 나타내었다. 15kV로 전압을 승압시 12kV 최대값에 대한2.35배의 증가를 가져왔다.

표6과 표7에서는 왜도 및 첨쇄도의 변화양상을 나타내고 있다. 왜도와 첨쇄도는 상호 밀접한 통계분포를 나타내는 값으로서 전압인가 초기인 5일에서는 왜도의 경우 6.7을 첨쇄도의 경우 72를 기록하였다. 이는 전형적인 열화초기에 나타나는 부분방전 펄스형태로서 왼쪽이 대단히 높게 증가 되고(DC성분이 고주파에 비하여 대단히 큰) 펄스 폭이 대단히 짧은 펄스의 양상을 갖다가 22일에 이르러서는 왜도값이 3.6 첨쇄도가 18로, 상당히 펄스 폭이 증가되고 왼쪽이 높은 비대칭 펄스양상으로서, 열화가 상당히 진전되었음을 알 수 있었다. 파괴에 임박했을 때 왜도는 2.7로서 그리고 첨쇄도는 9로서 전형적인 부분방전 펄스로서 펄스의 직류성분 부분은 대단히 커서 최대값은 10.7V에 이르렀고 펄스의 폭은 대단히 큰 부분방전펄스임을 알 수 있었다. 이 3가지의 특징추출만으로도 열화정도를 쉽게 일수 있음을 볼 수 있다.

표 5. 이산웨이블렛 변환계수의 최대값

인가전압	12kV	12kV	12kV	12kV	12kV	12kV	12kV	15kV
인가시간	5일	10일	15일	20일	22일	23일	25일	28일
최대값	0.79V	1.46V	0.49V	0.48V	1.61V	3.87V	4.54V	10.7V

표 6. 왜도의 변화양상

인가전압	12kV	12kV	12kV	12kV	12kV	12kV	12kV	15kV
인가시간	5일	10일	15일	20일	22일	23일	25일	28일
최대값	6.7	6.5	3.9	2.28	3.6	3.2	3.9	2.7

표 7. 첨쇄도의 변화양상

인가전압	12kV	12kV	12kV	12kV	12kV	12kV	12kV	15kV
인가시간	5일	10일	15일	20일	22일	23일	25일	28일
최대값	72	46	28	8.37	18	14	20	9

결론적으로 고정자권선의 열화가 진행됨에 따라 부분방전펄스의 크기가 점진적으로 증가하고 있으며, 파괴에 가까워 짐에 따라 급격히 증가되는 양상을 나타내고 있다. 비대칭도인 왜도와 첨쇄도의 분포양상에서도 초기 상태에서는 왼쪽이 높고 오른쪽이 낮은 분포의 형태로서 집중도가 크게 나타났고, 열화가 가속됨으로서 다른 양상으로서, 분포의 중심이 한쪽으로 집중된 경우보다 다소 집중도가 분산되어진 형태의 분포도를 가지고 있다. 이러한 결론을 통하여 열화의 정도를 판단하는데 크게 도움이 될 수 있으리라 사료된다.

3. 결 론

고압전동기 고정자권선의 여러 가지 모의 결합의 신호형상에 따른 주파수 스펙트럼이 결합의 종류에 따라 분해되어 졌다. 그 결과 열화초기상태의 결합신호에서 두개의 주파수 특성을 나타내었다. 즉, 9MHz, 39.2MHz의 중심주파수를 나타내었다.

웨이블렛 변환기법을 통한 부분방전신호의 특징추출기법을 개발하였고, 개발된 특징추출기법을 이용한 고정자권선의 내부방전 시 권선의 절연파괴를 통하여 적용한 결과 열화초기상태에서는 부분방전 분포의 집중도가 대단히 크고, 열화가 진행됨에 따라 점차로 분포의 중심이 흐트러지며, 그리고 집중도가 작아지며, 열화말기 및 파괴직전에 이르러서는 왜도 및 첨쇄도가 초기에 비하여 대단히 작아지는 결과를 가져왔다. 이로서 고압전동기 고정자권선 모의결합을 통한 장기열화의 경우 열화정도를 파악하는데 크게 도움을 줄 수 있다고 사료됩니다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(04,자유공모) 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

Characterization of PD Signals by Real-time Measurement of Pulse Parameters", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.6, No.1, pp.51-59, 1999.2

[2] I. Blokhintsev, M. Golovkov, A. Golubev, "Field Experiences with the Measurement of Partial Discharge on Rotating Equipment", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.14, No.4, 1999.12

[3] Zheng Zhong, Tan Kexiong, "Partial Discharge Recognition Based on Pulse Waveform using Time Domain Data Compression Method" Project 5963 7200 supported by NSFC and NEEPC PP484-486, 1999

[4] Song Jiancheng, Xie Hengkun, "Aging Diagnosis of Large Generator Stator Winding Insulation Based on Digital Discharge Detection" Supported by NSFC(59837260) PP 765-769, 1999

[5] X. D. Ma, C. Zhou, I. J. Kemp, "PD Pulse Propagation Studies using the Wavelet Transform", PP626-629, 2000

[6] E. Carminati, L. Cristaldi, M. Lazzaroni, A. Monti, "Partial Discharge Mechanism Detection by Neuro-Fuzzy Algorithms" Instrumentation and Measurement Technology PP744-748, 1998.5

[7] V. Warren, G. C. Stone, M. Fenger, "Advancements in Partial Discharge Analysis to Diagnose Stator Winding Problems" PP497-500, 2000

[1] T. Brosche, W. Hiller, E. Fauser, W. Pfeiffer, " Novel