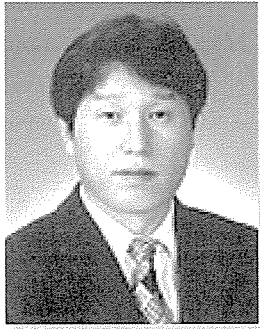


# 열병합발전소 고압전동기 정밀절연진단

Insulation Diagnostic Test of High Voltage Motor for Cogeneration Power Plant



한국전력공사 전력연구원  
책임연구원 주영호  
T : (042) 865-5260

## 1. 서 언

산업현장의 동력 에너지원으로 사용되고 있는 고압전동기는 사용년수가 증가함에 따라 열적, 기계적, 전기적, 환경적 열화요인들이 복합적으로 작용하여 열화를 진전시키게 되므로 절연내력의 감소는 피할 수 없다. 특히 열병합 발전소 운전시스템에서 각종 펌프 또는 송풍기를 구동하는 고압전동기는 운전특성상 단위용량이 커서 높은 기동전류와 기동토크가 필요하고, 주말기동정지(WSS) 및 일일기동정지(DSS) 등 가혹한 운전여건으로 인하여 열화피로(aging fatigue) 누적이 심하여 절연과괴 가능성이 타 산업설비에 비해 높다고 할 수 있다.

일본전기학회에서 조사한 자료에 의하면 고압전동기는 운전개시후 6년이 경과하면 절연열화에 의한 사고가 증가하기 시작하고 10년 이후부터 가장많은 사고 원인이 되고 있으며, 20년 이후에는 기기의 수명점에 들어가는 것으로 보고되고 있다. 고압전동기는 대형화, 자동화되고 있는 산업설비의 핵심기로서 이의 돌발적인 운전정지는 제품생산에 막대한 지장을 초래하거나 생산중인 제품의 품질을 심각하게 저하시킬 수 있다. 따라서 이러한 절연과괴에 의한 고장을 사전에 예방하기 위해서는 철저한 예방정비와 과학적인 진단을 통해 전동기의 잔존수명을 예측하고, 각 전동기의 절

연열화 상태를 정량적으로 관리하는 등 적극적인 고장예방 노력이 필요하다고 할 수 있다.

절연진단 시험방법으로는 새로이 제작된 고압전동기 권선의 품질보증시험 수단으로 또는 권선의 정비 후 복구여부를 확인하기 위한 방법으로 정격전압의 1.25~1.7배의 DC 또는 AC 고전압을 인가하는 절연내력시험(IEEE Std. 95-1977)이 사용되고 있으나 공장시험, 검수시험 등 특별한 경우에 사용되는 방법이며, 실제 산업현장에서 설치되어 운전중인 기기에는 절연물에 상당한 손상을 주거나 절연상태를 악화시킬 우려가 있기 때문에 극히 제한적으로 사용되고 있다. 일반적으로 국내의 산업현장에서 사용중에 있는 고압전동기에 대하여는 절연저항시험(megger test), 직류전류시험(polarization index test), 교류전류시험(AC current test), 유전정접시험( $\tan\delta$  test), 부분방전시험(partial discharge test) 등을 시행하는 비과괴 진단시험이 사용되고 있다.

본고에서는 고압전동기에 대한 비과괴 절연진단 시험방법에 대하여 자세히 소개하고 전력연구원 발전연구실에서 수행한 부천, 안양 열병합발전소 고압전동기에 대한 전기적 정밀절연진단 시험결과에 대하여 살펴보고자 한다.

## 2. 절연진단 시험방법

### 가. 시험장비

전력연구원 발전연구실에서 보유하고 있는 절연진단 시험장비 현황은 표 1과 같다.

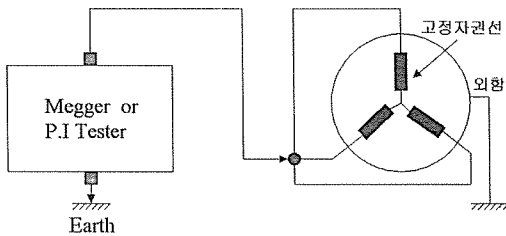
<표 1> 시험장비 현황

장비명	제작사	용도
Insulation Tester	Yokogawa (일본)	절연저항시험
Automatic Tester Insulation	AVO International (영국)	성극지수시험
Schering	Tettex(스위스)	교류전류, 유전정접, 부분방전시험
PD Detector	Haefely Trench (스위스)	부분방전시험

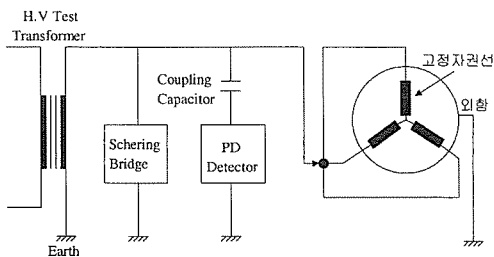
### 나. 시험 회로도

고압전동기 절연진단 시험을 위한 회로도는 그림 1과 2와 같으며, 고압전동기에 대한 절연진단 시험시 전압인가는 고정자 권선의 전원 입력단자를 3상 일괄로 묶어 대지간에 시험전압을 인가한다.

<그림 1> 절연저항, 직류전류시험 회로도



<그림 2> 유전정접, 교류전류, 부분방전 시험 회로도



### 다. 시험항목

#### (1) 절연저항시험

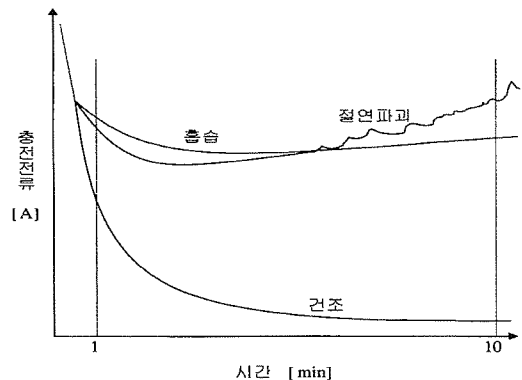
절연저항시험은 절연물의 흡습이나 오손상태를 파악할 수 있으며, 운전 개시전이나 운전중에 필요한 절연저항을 가지고 있는가의 여부, 운전에 따른 절연저항 저하의 정도를 점검하고 절연열화 시험시 사용되는 고전압을 인가해도 충분한가를 점검하기 위해서 실시하는 시험이다. 절연저항시험에서는 고정자 권선을 3상 일괄로하여 대지간에 1,000V

megger로 전압을 인가하여 1분 후의 절연저항값을 측정하며, 양호 기준치는 측정된 절연저항값이  $2E+1[M\Omega]$  이상이면 흡습이나 오손상태가 없는 것으로 판단한다.

#### (2) 직류전류시험

직류전류시험은 절연물에 직류전압을 인가했을 때의 전류-시간 특성으로부터 절연물의 흡습, 도전성 불순물의 흡입, 생성, 오손과 절연물의 결합 등 절연물의 상태를 판정하는 시험이며, 전류의 크기는 시료의 형태와 크기에 따라 변하기 때문에 전류의 크기만으로 판단할 수는 없다. 절연물이 열화되거나 흡습되면 누설전류가 증가하고, 따라서 전류-시간 특성 곡선에서는 누설전류의 상승으로 전류의 감쇄율이 낮아지게 된다. 이러한 특성을 이용하여 전류의 시간변화를 나타내는 지표로서 다음 식과 같은 성극지수(PI)를 이용하여 절연물의 흡습과 오손을 판정한다. 성극지수의 양호 기준치는 계산된 값이 1.5 이상이면 양호하다고 판단한다. 그림 3은 직류전류시험의 분석 패턴을 나타내었다.

<그림 3> 직류전류 분석 패턴



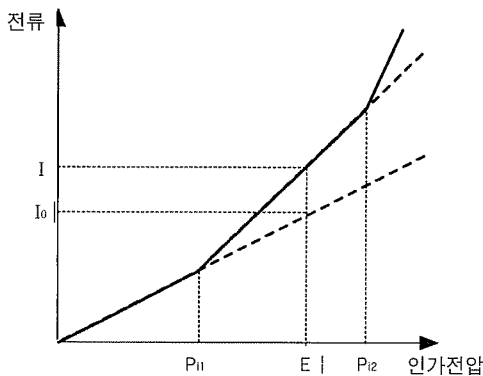
$$\begin{aligned} \text{성극지수 (PI)} &= \frac{\text{전압인가 1분 후의 전류}}{\text{전압인가 10분 후의 전류}} \\ &= \frac{\text{전압인가 10분 후의 절연저항}}{\text{전압인가 1분 후의 절연저항}} \end{aligned}$$

### (3) 교류전류시험

교류전류시험은 절연물에 교류전압을 인가했을 때 흐르는 전류와 전압과의 관계, 즉 I-V 특성으로부터 절연상태를 평가하기 위한 시험이다. 교류전압을 절연물에 인가하면 전압상승에 비례하여 충전전류가 증가하며, 이때 절연층내에 결함이 존재하여 부분방전 현상이 발생하게 되면 미소공극을 단락시켜 충전전류가 급격히 증가한다. 이러한 전류 급증전압 및 전류 급증률로부터 절연물의 흡습 및 열화의 정도를 알 수 있다.

비교적 열화가 진전된 절연물에 교류전압을 인가하였을 경우, 인가전압이 높아져 부분방전이 발생하면 전류는 전압에 비례하지 않고 그림 4와 같이 급증하게 된다. 이와같이 전류가 급증하는 점의 전압을 전류급증 전압이라 부르며, 2개의 전류급증점이 존재할 경우 낮은 전압점은 제 1 전류 급증점(P1), 높은점을 제 2 전류 급증점(P2)이라 함. P1은 미소공극내 방전에 기인하는 것으로서 부분방전 개시전압이나  $\tan\delta$  증가전압과 비교적 일치하는 경향이 있고, P2는 미소공극간의 섬락에 기인하는 것으로서 파괴전압과 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다.

<그림 4> 교류 전류-전압(I-V) 특성



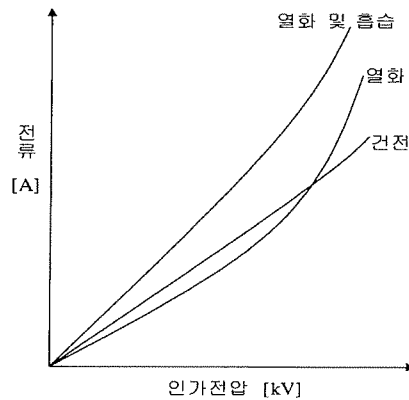
교류전류시험에서의 전류-전압 특성에 있어서 절연

진단 시험에 사용되는 파라메타는 다음 식에 따라 정의되는 전류증가율( $\Delta I$ )을 사용한다.

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100[\%]$$

교류전류시험은 일반적으로 고정자 권선의 각 상별 로 고압전동기 단자와 대지간에 선간전압까지의 교류전압을 인가하여 교류전류의 변화상태( $\Delta I$ )를 측정하고, 그림 5는 교류전류 시험의 I-V 특성곡선을 분석한 패턴을 나타낸 것이다.

<그림 5> 교류전류시험 분석패턴

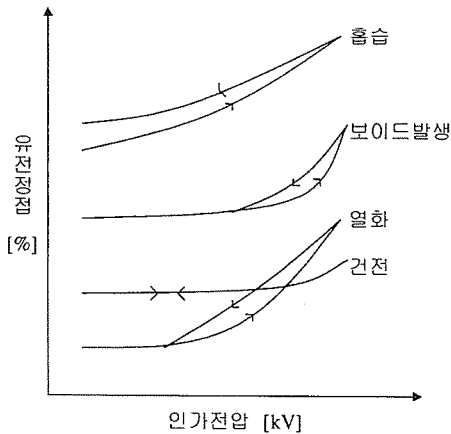


### (4) 유전정접시험

절연물에 교류전압을 인가하면 일반적으로 전압에 대하여 90° 위상이 뒤진 충전전류( $I_c = j\omega CV$ ) 및 전압과 동상으로 누설전류( $I_l = GV$ )가 흐르며, 유전정접은 충전전류를 누설전류로 나눈값을 나타낸다. 절연물에 교류전압을 인가하여 측정되는  $\tan\delta$ 로부터 흡습, 건조, 오손, 미소공극 유무 등의 절연상태 및 열화정도를 추정할 수 있다. 따라서  $\tan\delta$ 는 절연물의 특성치로서 전기적 손실 정도를 나타내며, 절연재료가 매우 양호할 경우 인가전압이 증가하여도  $\tan\delta$ 는 증가하지 않는다. 그러나 고정자 권선의 주절연 혹은 주절연과 철심 사이에 공극이 존재할 때 고전압이 인가되면 이들 공극에서 부분방전이 발생한다. 부분방전은 열과 빛을 생성하기 때문에 에너지를 소비하며 이로 인하여 권선내 전기적 손실이 증가함. 그 결과 전압이 증가함에 따라  $\tan\delta$ 도 증가한다.  $\Delta \tan\delta$ 가 증

가하게 되면 부분방전도 증가하게 됨으로  $\tan\delta$  시험은 부분방전의 발생상태를 간접적으로 나타내는 척도가 된다. 그림 6은 유전정접의 패턴을 분석한 것을 나타낸 것이다.

<그림 6> 유전정접 분석패턴



### (5) 부분방전시험

대형 고압회전기 고정자 권선의 경우 사용시간의 증가로 인해 권선이 열화되어 절연물에 미소공극, 균열, 박리 등이 생기면 이 결함부에서 부분방전 펄스 전류가 발생한다. 이 부분방전을 검출하여 전기적인 절연물의 열화상태 뿐만 아니라 과열이나 주기적 응력에 의한 권선 단말부에서의 표면방전, 웨지 이완, 그리고 슬롯 방전 등의 이상상태를 알 수 있음. 절연물내의 국부적인 열화를 검출하는 수단으로서는 최대 부분방전 전하량(Qm)을 사용하고, 일반적으로 절연열화가 진행되면 방전전하가 커지고 방전 발생빈도 또한 증가하여 Qm이 커지면 절연 파괴전압이 저하되는 관계를 이용해서 절연열화의 정도를 판단한다.

표면방전은 정격 상전압에서의 최대 부분방전 크기와 상전압의 1.25배인 전압에서의 부분방전 크기의 비인 Nq를 아래의 식에 의해 산출하며, 그 크기가 2 이상이면 표면방전이 발생되고 있다고 판정함.

$$Nq = 10 \times \log(Qm2/Qm1)$$

절연물내의 국부적인 열화를 검출하는 수단으로서 최대 부분방전 전하량(Qm)을 사용하고, 일반적으로

절연열화가 진행되면 방전전하가 커지고 방전 발생빈도 또한 증가하여 Qm이 커지면 절연 파괴전압이 저하되는 관계를 이용하여 절연열화의 정도를 판단한다. 부분방전 개시전압(Discharge Inception Voltage ; DIV)은 절연물내에 존재하는 미소공극 등의 결함부분중 가장 낮은 전압에서 방전하는 결함부의 방전 개시전압을 나타내며, 일반적으로 1,000 [pC] 크기의 방전량이 발생될 때의 전압을 기준으로 삼고 있으며, 슬롯방전이 발생하는 것을 감지할 수 있다. 일반적으로 부분방전 개시전압이 정격 상전압의 1/2 이하일 때에는 슬롯방전이 발생하고 있는 것으로 판단한다.

## 3. 고압전동기 절연진단 시험결과 및 분석

### 가. 부천열병합

부천열병합발전소 전기부로부터 고압전동기 16대에 대한 정밀절연진단 요청에 따라 5월 31일부터 6월 2일까지 3일간 절연진단 시험을 수행하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

표 2에서 보듯이 대부분의 전동기의 절연진단 시험 결과가 양호하였으나, 가스터빈 기동용 #2 Starting Motor는 교류전류, 유전정접, 부분방전 시험결과가 모두 불량하여 고정자 권선의 절연물이 현저히 열화된 것으로 판단되어 권선교체를 권고하였다.

또한 가스터빈 기동용 #1, #3 및 예비용 Starting Motor의 경우도 교류전류, 유전정접, 부분방전 시험결과중 일부에서 불량판정이 나타나 절연물이 열화단계에 있는 것으로 판단되어 유지관리에 주의를 요하며, 추이관리를 위해 차기 계획예방정비공사시 절연진단을 재 실시할 것을 권고하였다.

가스터빈 기동용 전동기의 불량원인은 타 기기에 비하여 기동, 정지 횟수가 빈번함에 따라 발생하는 열피로가 주된 원인으로 판단되었다.

### 나. 안양열병합

안양열병합발전소 전기부로부터 고압전동기 8대에 대한 정밀절연진단 요청에 따라 6월 7일부터 6월 9일까지 3일간 절연진단 시험을 수행하였으며, 그 결과는 표 3과 같다.

표 3에서 보듯이 대부분의 전동기의 절연진단 시험

<표 2> 절연진단 시험결과

시험항목	Megger[M $\Omega$ ]	P.I	$\Delta I$ [%]	$\Delta \tan\delta$ [%]	PD[pC]	종합판정
시험전압	DC 1[kV]	DC 5[kV]	E(선간전압)	E(선간전압)	E/ $\sqrt{3}$	
불량 판정기준	2E+1[M $\Omega$ ] 이하	1.50이하	8.50이상	6.50이상	30,000이상	
Starting Motor #1	2,000이상	5.41	8.45	8.93	7,700	요주의
Starting Motor #2	“	6.97	9.79	10.72	36,300	불량
Starting Motor #3	1,000	1.39	8.10	7.49	1,600	요주의
Starting Motor Spare	2,000이상	6.56	9.28	9.48	2,400	요주의
HP BFPM #A	“	6.92	2.54	1.58	-	양호
HP BFPM #B	“	9.72	2.47	2.31	-	“
HP BFPM #C	“	7.77	1.49	1.41	-	“
HP BFPM #D	“	6.53	1.66	1.34	1,600	“
CCWP #A	“	5.05	3.27	2.16	3,200	“
CCWP #B	“	3.58	1.95	1.91	1,700	“
CCWP Spare	“	10.3	1.94	1.69	1,800	“
ACWP #A	“	8.98	1.68	1.55	920	“
ACWP #B	“	2.58	1.68	1.84	2,000	“
DHDP #A	“	4.27	1.90	1.43	-	“
DHDP #B	“	5.10	1.96	1.66	-	“
DHDP #C	“	3.63	1.92	1.54	-	“

<표 3> 절연진단 시험결과

시험항목	Megger[M $\Omega$ ]	P.I	$\Delta I$ [%]	$\Delta \tan\delta$ [%]	PD[pC]	종합판정
시험전압	DC 1[kV]	DC 5[kV]	E(선간전압)	E(선간전압)	E/ $\sqrt{3}$	
불량 판정기준	2E+1[M $\Omega$ ] 이하	1.50이하	8.50이상	6.50이상	30,000이상	
MCWP #1	2,000이상	5.71	0.82	1.38	2,700	양호
MCWP #2	“	4.56	0.62	1.12	1,400	“
HP FWP #1	“	4.50	1.65	1.70	8,400	“
HP FWP #2	“	5.53	0.60	2.48	6,400	“
HP FWP #3	“	5.30	0.61	2.31	10,300	“
MCWP #A	“	6.19	0.64	1.75	9,900	“
MCWP #B	“	7.19	0.63	0.98	1,100	“
MCWP Spare	“	6.43	9.33	10.94	2,200	요주의

결과가 양호하였으나, MCWP Spare전동기는 교류전류와 유전정접 결과가 불량기준치보다 높게 나타났으며, 이는 흡습에 의한 영향으로 판단되어 충분히 건조시킬 것을 권고하였다.

#### 4. 결 언

발전소 고압전동기에 대한 전기적 정밀절연진단의 주 목적은 고압전동기 고정자 권선에 사용되는 절연물의 열화상태를 사전 파악하여 기기 운전 신뢰도를 확보하고, 이상상태를 조기 발견하여 계획적이고 효율적인 정비계획 수립이 가능하도록 하기 위함이다.

발전소 고압전동기의 운전중 고장발생 및 불시정지는 발전소 안정운전에 커다란 장애요인으로 작용할 수

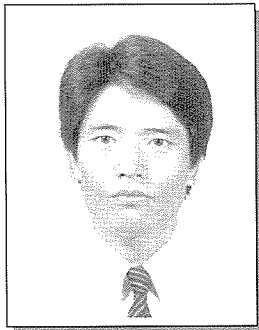
있기 때문에 주기적인 절연진단 시험을 통해 추이 (trend)를 관리하는 것이 무엇보다도 중요하다.

전력연구원 발전연구실에서는 그동안 수화력 및 원자력발전소에 설치되어 운전중인 발전기 및 고압전동기에 대하여 사업소 요청이 있을 경우 적극적이고 신뢰성 있는 진단시험을 통해 사업소 설비관리 운영에 많은 도움을 주었으며, 그동안 현장의 수많은 고압회전기에 대한 절연진단 시험을 통해 축적된 경험과 노하우를 바탕으로 향후 사업소 기술지원에 더욱 노력할 것이다.

또한 세계적인 추세에 발맞춰 고압회전기에 대한 절연진단을 정지중이 아닌 정상운전중에 시행할 수 있는 진단기법 확보 및 진단시스템 개발을 위해 현재 연구개발 과제를 수행중에 있으며, 향후 산업현장에서 널리 활용될 수 있도록 할 예정이다.

## 분산제어설비 전원공급 방법 개선 고찰

Investigation of The Implevement of D.S.C. Power Supply Mode



한국지역난방공사 수원지사 계전부  
부장 신 기 호  
전화번호 : 0331-201-0160

#### 1. 개 요

한국지역난방공사 수원 열병합 발전소('97.12.31 준공)에 설치 운영중인 분산제어 설비는 [표1]과 같이 2가지 기종이 있으며,

- Main Boiler & Turbine/Generator(열병합용) 분산제어설비와 지역 냉·난방 열공급 설비 조정용(DH & HOB 용)으로 구성되어 있다.