

原子力發電所 電氣設備의 信賴性향상

1. 머리말

加壓水型(PWR)原子力發電所에서 사용되고 있는 전기설비의 구성은 그림 1과 같으며 同社가 원자력발전소에 납입하고 있는 주요 전기설비로는 표 1에 표시하는 각종 機器가 있다.

여기서는 이들 원자력발전소 전기설비의 신뢰성 향상으로 機器고유의 신뢰성향상과 電源시스템으로서의 신뢰성향상에 대한 사고방식을 개관함과 동시에 특히 屋內開閉裝置의 설비개선, 高壓電動機의 절연진단, 發電機負荷開閉器를 사용한 시스템改善을, 신뢰성향상을 위한 한예로서 소개한다.

2. 개요

2.1 機器固有의 信賴性向上

표 1에 표시하는 전기설비가 원자력발전소에서 그 基本機能을 다하기 위하여 공통적으로 요구되는 특성은 “절연”, “구조” 및 “내환경성”이다.

2.1.1 絶緣의 健全性

절연이 건전하다는 것은 모든 전기설비가 기본적인 機能을 다함에 있어서 가장 중요한 점이며 온도, 습도, 진동 및 회전에 수반하는 기계력 등의 외

的·內的要因에 대하여 絶緣性能保持能力이 높은 양질의 절연을 제공할 수 있도록 재료 및 제조방법에 대한 개선에 힘써 왔다. 예를 들면 고압전동기에 있어서는 순환수펌프와 같은 대형 전동기를 포함하여 다이어폭시絶緣全舍浸方式으로 모든 것을 제공할 수 있게 되었다.

또 양질의 절연이라 하더라도 재료로 有機物을 사용하는 이상, 사용년수의 경과에 따른 材質劣化에 의하여 성능이 저하되는 것은 피할 수 없고, 원자력발전소에서 사용중인 전기설비의 절연의 건전성을 진단하여 교체를 포함한 적절한 豫防保全處理를 제안하는 것도 신뢰성 유지향상을 위한 메이커의 중요사명의 하나로 생각하여 既設플랜트를 위한 改善提案活動인 MELRAP(MELCO Reliability & Availability Upgrading Program)의 實이나 個別提案活動을 하고 있다.

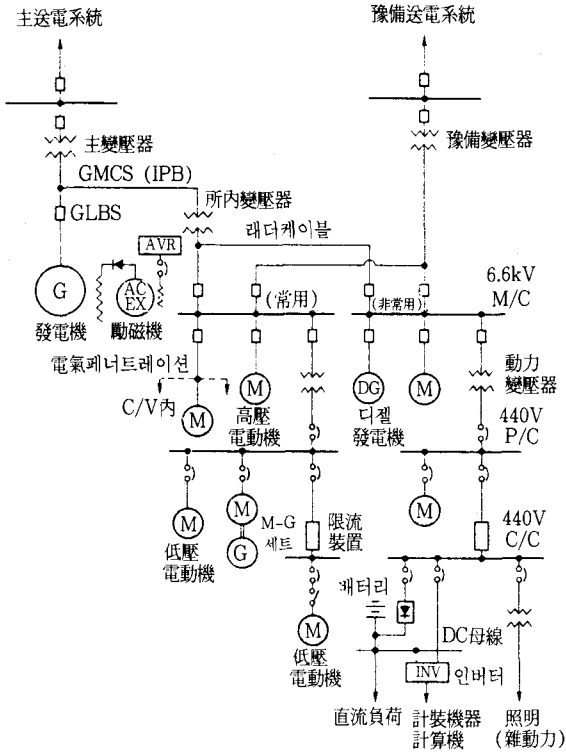
2.1.2 構造의 適正化

전기설비의 구조면에서는 靜的 및 動的인 구조의 적정화를 생각할 필요가 있다.

重力이나 電磁力에 의한 靜的荷重, 電界集中, 누설磁束에의 대응 및 유지보수·점검의 용이성을 고려한 구조도 신뢰성을 고려함에 있어서 중요한 요소이다.

< 표 1 > 原子力發電所의 電氣設備

基本機能	同社納入 電氣設備
電氣에너지의 生成	터빈發電機, 勵磁機, 非常用디젤發電機
電氣에너지의 變換	主變壓器, 所內變壓器, 豫備變壓器, 動力變壓器, 인버터, M-G 세트
電氣에너지의 移送	相分離母線, 버스타트, 電氣Penetration, 래더케이블
電氣에너지의 制御	屋外開閉裝置, 屋內開閉裝置, 發電機負荷開閉器
電氣에너지의 消費	補機電動機, 加壓器히터



< 그림 1 > 電氣設備의 構成概念

動的인 구조로서는 전동기 등 회전체의 진동, 차단기투입·트립메커니즘, 地震荷重에 대한 검토 등이 필요하며 회전기기에 관한 진동해석, 550kV 一點切遮斷器의 개발에 중요한 역할을 한 熱가스流動解析 등의 해석기술로 뒷받침된 設計의 改善을 실시하고 있다.

2.1.3 耐環境性

고려하여야 할 환경조건 가운데 원자력발전소特有的 조건 때문에 부과되는 것으로서 格納容器內的 기기를 들 수 있다. 특히 電氣페너트레이션은 사고시의 放射能放出을 막기 위한 壓力마운더리로서 溫度·壓力의 엄격한 환경조건에 견딜 수 있도록 설계되며 환경시험장치를 사용하여 실증도 하고 있다. 그밖에 내진성, 방화·분리성 등도 원자력발전소特有的 조건으로 설계에 반영하여야 할 것이며 해당하는 電氣設備에 대한 設計手法을 확립하고 필요한 실증을 해오고 있다.

이들 원자력발전소 특유의 요구사항은 일본국내외의 指針·基準·規制의 동향에 따라 재검토될 가능성도 있어 금후에도 이들 요구사항을 고려한 대응을 계속해갈 것이다.

2.2 電源시스템의 信賴性向上

위에 電氣設備 機器固有의 신뢰성향상에 대하여 기술하였지만 특히 원자력발전소의 電源系統을 구성하는 시스템으로서의 신뢰성향상에도 몰두하고 있다.

電源시스템으로서의 신뢰성향상의 포인트는 “회로의 간소화”와 “백업시스템의 충실”로 본다. 전자는 시스템을 구성하는 기기의 종류·수를 적정화함으로써 고장모드의 저감과 함께 操作을 단순화하여 휴먼에러防止를 기하고, 후자는 예를 들면 無瞬斷 백업방식의 도입으로 機器고유의 신뢰도에의 의존도를 완화하여 시스템으로서의 신뢰성을 확보할 것을 겨냥하고 있다.

이들은 機器·設備의 능력과 성능 향상, 새로운 機能을 附加한 하드웨어의 개발 등 技術의 진보에 의존하는 면도 있어 앞으로도 최신기술동향을 기초로 개선방법을 검토하여 갈 것이다.

2.3 新設計管理

이와 같이 機器고유의 신뢰성향상, 電源시스템으로서의 신뢰성향상을 목적으로 하여 개선해 오고 있으나 실적이 없는 새로운 설계를 채용할 때에는

기존의 設計와의 상위점을 모두 들추어내 妥當性檢證을 계획적으로 행하는 “新設備管理시스템”의 운용에 세심한 주의를 쏟고 있다.

이상 원자력발전소 전기설비의 신뢰성향상에 대한 개요를 기술하였고 다음에 개별기기 및 시스템에 대한 신뢰성향상을 위한 구체적인 대처예를 소개한다.

3. 屋內開閉裝置의 設備改善

屋內開閉裝置는 메탈클래드開閉裝置(이하 “M/C”라 한다), 파워센터(이하 “P/C”라 한다), 컨트롤센터(이하 “C/C”라 한다)가 그 대표적인 것이다.

육내개폐장치는 1970년 일본 최초의 PWR 플랜트인 關西電力(株) 美浜 1호기의 운전개시로부터 이미 25년에 걸친 역사를 갖고 있으며 그동안 적용규격·기준 및 지침의 改訂, 부적합한 水平展開나 豫防保全的要素도 加味한 技術變遷에 따라 여러가지로 設備를 改善 한 바 여기에 그 내용을 소개한다.

3.1 屋內開閉裝置技術의 變遷

원자력발전소에 納入한 M/C, P/C, C/C의 主要技術變遷을 그림 2에 표시한다.

3.1.1 M/C

원자력발전소에는 WN形, MX-M形, MX-G形, NH形의 4종류의 M/C를 납품하고 있다. 이들機種의 변천과 함께 내장되는 차단기도 磁氣遮斷器(MBB)로부터 SF₆가스遮斷器(GCB)로 바뀌고 있다. GCB의 遮斷部는 완전절폐의 데드탱크方式을 채용하여 고압배전반으로서의 거의 充電露出部가 없는 절연방식으로 함으로써 안전성과 사고방지 면에서 개선을 도모하고 있다. 이러한 설계방침에 의하여 GCB本體의 페이스플레이트를 前面隔壁으로 하여 盤의 문을 생략할 수 있게 되어 高度의 몰드技術로 뒷받침된 에폭시몰드部品の 사용과 맞물려 안깊이치수를 대폭적으로 축소할 수가 있었다(NH

形 M/C).

또 母線絶緣材도 紙基材페놀로부터 流動浸漬塗裝法(FBC)에 의한 에폭시樹脂絶緣으로 하여 신뢰성을 향상시키고 지지방식도 絶緣板지지로부터 애자지지로 바꾸어 相間의 대부분을 완전한 공기절연으로 함으로써 트래킹 등의 절연열화에 기인하는 절연파괴의 가능성을 극히 적게 할 수가 있었다. 또한 MX形 이후의 M/C에서는 필요한 개소에 제어회로의 드레인分離構造를 설치하여 火災防護上的 신뢰성강화도 기하고 있다.

3.1.2 P/C

P/C는 ED形과 MZ形의 2종류를 納入하고 있으며 각각 DB形氣中遮斷器, DS形氣中遮斷器를 多段쌓기로 收納하고 있다. DB形은 電磁操作式, 라이브프론트이기 때문에 문을 열면 主回路充電部가 있으나 DS形은 電動수수절蓄勢方式, 데드프론트로 하고 있기 때문에 문은 차단기의 ON/OFF상태에 불구하고 자유로이 開閉할 수 있고 또한 主回路充電部에 접촉되지 않도록 안전성을 높이고 있다.

또 제어기기도 盤後部에 主回路와 混在설치되어 있던 것을 MZ形에서는 遮斷器前部에 제어회로실을 설치하여 主回路와의 分離를 강화하고 있다. 또한 母線絶緣도 MZ形에서는 에폭시化(FBC)함으로써 신뢰성향상을 도모하고 있다.

3.1.3 C/C

C/C는 NC形, E形, G形, V形の 4종류를 납품하고 있으며 內藏主要컴포넌트도 자기 다른 시리즈를 채용하고 있다. NC形은 일본 최초의 C/C라고도 하는 획기적인 것이었으나 그후機種變遷에 따라 여러가지로 개선되어 왔다. G形의 수직모션에는 종래의 平形으로 바꾸어 Z形母線을 채용하여 단락강도증강을 기함과 동시에 3次元플로팅그리프를 사용하여 자동연결부에서의 3次元方向接觸信賴度の 향상도 도모하고 있다. 또한 V形에서는 수직모션의 절연모선화, 수평모션의 배치변경에 의한 短絡電磁력에의 기계적강도향상 및 投入인터록機能추가 등의 설비개선을 기하고 있다.

年		'70	'75	'80	'85	'90	
M / C	刑名	WN(MBB內藏) 6-DHE-50(40), 同50M(40M)		MX-M(MBB內藏) 同左	MX-G(GCB內藏) 6-SFG-405	NH(GCB內藏) 6-SFG-63NU	
	技術的變遷	1. 耐震性	固有振動數20Hz 이하		固有振動數20Hz 이상(剛構造)		
		2. 收納C/B	磁氣遮斷器(MBB)		가스遮斷器(GCB)		
		3. 絶緣方式	絶緣支持板으로 支持, 母線絶緣體 紙基材 페놀에폭시樹脂		碍子로 支持, 母線絶緣體는 에폭시樹脂코팅		
		4. 分離基準	드레인마다 非分離		드레인分離, 回路別分離		
		5. M/C의 사이즈	從來사이즈		縮小사이즈		
P / C	刑名	ED(DB形ACB內藏) DB-50, 同75		MZ(DS形ACB內藏) DS416, 同630, 同840			
	技術的變遷	1. 耐震性	固有振動數20Hz 이하		固有振動數20Hz 이상(剛構造)		
		2. 收納C/B	氣中遮斷器(DB形ACB): 라이프프론트		氣中遮斷器(DS形ACB): 데드프론트		
		3. 導體絶緣	테이핑		에폭시樹脂코팅		
		4. 分離基準	드레인마다 非分離		드레인分離, 回路別分離		
		5. 盤構造	主回路와 制御回路는 非分離		主回路와 制御回路는 分離		
C / C	刑名	NC	E	G	V		
	技術的變遷	1. 耐震性	固有振動數20Hz 이하		GZ(固有振動數20Hz 이상(剛構造))		GZ-V(同左)
		2. 限流裝置	限流리액터		CLN限流裝置		
		3. 인터록	"1" 인터록		"2" 인터록		
		4. NFB	B시리즈	E시리즈	S시리즈	SS시리즈	
		5. 컨덕터	EMO시리즈	MS시리즈	MS-A 시리즈	MS-K 시리즈	

* "1" 인터록: NFB "ON" 狀態에서 門의 開放不可

"2" 인터록: NFB "ON" 狀態에서 門의 開放不可, 門을 開放한 狀態에서 NFB "ON" 不可

<그림 2> 屋內開閉裝置技術的變遷

3.2 既納設備의 改善

원자력발전소에 납입하여 이미 사용되고 있는 전기설비 개선의 주요 예로서 M/C 및 버스덕트(이하 "B/D"라 한다) 절연방식의 개선(碍子化)과 C/C의 유닛리플레이스를 다음에 소개한다.

3.2.1 母線支持의 碍子化

母線支持의 碍子化는 지지판에 의한 모선지지방식을 채용한 WN形 M/C나 당시의 B/D를 대상으로 추진하고 있다. 모선지지방법을 무기질의 磁器

碍子 및 碍子스페이서를 사용한 지지방식으로 개선함으로써 部分放電 등에 의한 절연열화를 예방하여 절연신뢰성 향상을 기할 수가 있다.

한편 碍子化에 의하여 점검주기를 2년에서 4년으로 할 수 있어 유지보수의 省力化에로 이어진다.

3.2.2 C/C유닛리플레이스

既納品한 NC形, E形의 샘플링조사결과에 기초한 收納品(배선용차단기 등)의 추정수명으로 推獎更新時期를 15년으로 설정하여 유닛마다 리플레이스를 추진하고 있다. NC形, E形에서는 현재 이미 약 2,700대 정도의 更新實績이 있는데 E形에 이어 G

形에 대해서도 推奨更新時期에 따른 更新을 순차적으로 제안해갈 계획이다.

4. 高壓電動機絶緣의 信賴性向上

다음에 고압전동기의 신뢰성향상에 대하여 특히 원자력발전소에서 가동중인 고압전동기의 건전성을 유지하기 위한 대처방안을 소개한다.

高壓電動機의 경년열화부위로서는 固定子·回轉子·軸受·冷却器 등이 고려될 수 있는데 電氣學會의 電動機故障에 관한 앙케이트調査分析결과 운전년수가 길어짐에 따라 절연열화에 의한 고장률이 커지는 경향을 볼 수 있다. 따라서 원자력발전소에서 가동중인 전동기의 신뢰성확보에 있어서는 권선의 절연열화상태를 정확하게 파악하여 적절한 시기에 필요한 처치를 하는 것이 중요하다.

여기서는 고압전동기로 많이 사용되고 있는 에폭시절연방식에서 권선의 豫防保全으로서, 어떤 방법으로 절연열화를 진단하고 豫防保全管理하고 있는가에 대하여 기술한다.

4.1 絶緣劣化의 形態

절연의 열화형태는 多種多樣하며 몇가지 劣化要因을 들 수가 있는데 이 劣化要因이 되는 스트레스를 대별하면 다음과 같이 나눌 수 있다.

- 열적
- 전기적
- 기계적
- 환경적

이들 요인은 단독으로 작용하는 것이 아니라 많은 경우 복합적으로 작용하여 절연열화가 진전된다. 장기간에 걸친 豫防保全經驗과 절연에 관한 연구로 장기간 운전한 고압전동기의 절연열화메커니즘을 파악할 수 있게 되었다.

절연열화는 外層部와 內層部에서 열화요인 및 열화 그 자체의 진전방식이 다를 수 있고 외층부의 열화는 打傷 등의 異常劣化나 吸濕·汚損 등의 환경요인에 의한 열화가 주가 되고 내층부의 열

화는 보이드·박리의 진전이 주가 된다.

이들 절연의 열화상태는 유효한 비파괴시험방법을 적용함으로써 정확하게 파악할 수 있게 되었다. 다음에 이 방법을 설명한다.

4.2 最新의 絶緣診斷法

원자력발전소에서 실제로 가동하고 있는 고압전동기를 포함한 64대를 供試機로 하여 비파괴절연시험·절연파괴시험을 실시하여 수명해석과 열화진단에 유효한 절연특성항목을 파악하였다.

4.2.1 有効한 絶緣診斷項目

여러 종류의 비파괴시험결과와 절연파괴치에 대하여 분석하고 이것들의 相關性을 조사한 결과 열화상태를 파악하는데 다음의 특성이 유효함을 알았다.

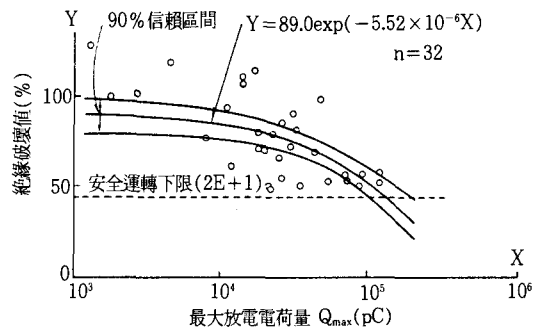
- (a) 절연저항(통상 1分値)
- (b) PI : 직류시험의 成極指數
- (c) $\tan\delta_0$: 베이스의 誘電正接
- (d) Q_{max} : 부분방전시험의 最大放電電荷量

(a)~(c)는 絶緣外層部の 흡습·오손·변질·이상열화 등을 파악하는데 유효하고 (d)는 절연내층부의 보이드·박리상태 등을 파악하는데 유효하다.

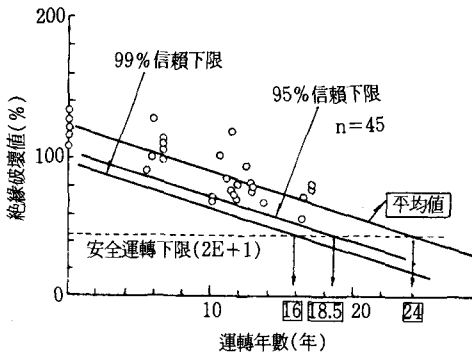
그림 3에 표시하는 것과 같이 Q_{max} (최대방전전하량)은 절연파괴전압과 어느 정도의 상관성이 있고 殘存絶緣파괴전압의 추정에 사용할 수가 있다.

4.2.2 絶緣수명의 추정

供試전동기의 절연파괴치와 운전시간으로부터 절



<그림 3> 最大放電電荷量과 絶緣破壞値의 關係



<그림 4> 絶縁破壊値의 經年特性

연과괴치의 경년적인 열화경향을 구하였다. 그 결과를 그림 4에 표시한다.

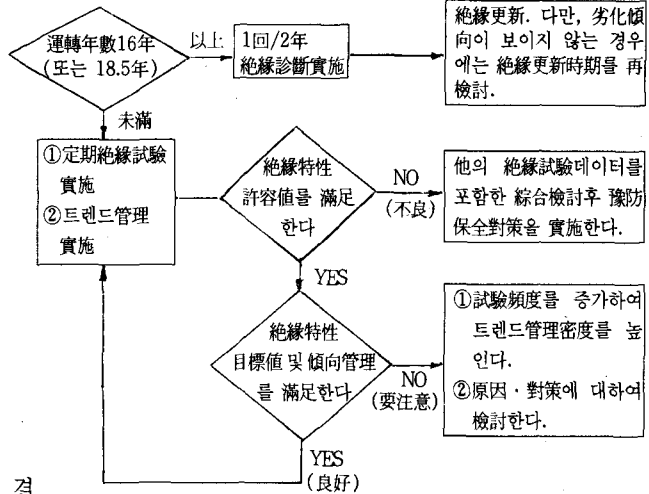
세로축은 절연과괴치(신품의 보증치를 100%)를 표시하고 가로축은 운전년수(=실운전시간+휴지시간/3)을 표시하고 있다.

그림에서 운전년수와 잔존절연과괴치와는 밀접한 상관관계가 인정되며, 절연과괴치가 안전운전하한치(2E+1kV : E=정격전압)에 달하는 점을 수명으로 하면 95% 信頼下限에서는 18.5년, 99% 信頼下限에서는 16년이 된다. 수명으로 설정한 안전운전하한치는 전동기의 전원계통에 발생하는 이상전압(開閉서지電壓 또는 전원계통의 1선지락시의 이상전압 등) 때문에 전동기에 인가될 가능성이 있는 電壓레벨로 결정하였다. 또 信頼下限을 95%로 할 것인가 99%로 할 것인가에 대하여는 전동기의 기능상실에 의한 플랜트에의 영향정도를 고려하여 판단하는 것으로 하였다.

4.3 절연관리와 예방보전대책

절연관리는 운전년수에 따른 수명추정을 베이스로 하고 전동기의 사용조건·환경조건 등에 의한 영향을 비과괴절연특성 및 그 변화경향(트렌드)에 의하여 보정한 것을 가미하여 종합적으로 판단한다. 그 절연관리플로를 그림 5에 표시한다.

4.3.1 運転年數에 따른 管理



<그림 5> 絶縁管理플로

플랜트에서의 電動機의 중요도에 따라 絶縁更新時期를 결정한다. 管理 실시예를 표 2에 표시한다.

4.3.2 비과괴절연특성에 따른 관리

비과괴절연특성의 관리에 있어서는 特性値의 經年變化를 관리(트렌드관리)하는 것이 이상징후를 조기파악하는데 유효하다.

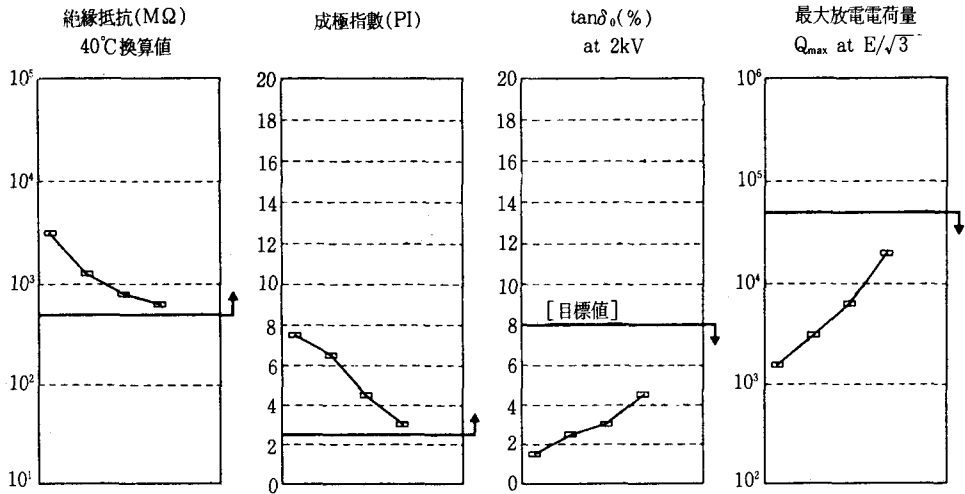
비과괴절연특성의 판정기준에는 “許容値” “目標値” 및 “特性値의 傾向管理”를 설정하고 있다.

- (a) 허용치: 운전에 필요한 최저레벨로 조속한 豫防保全對策이 필요
- (b) 목표치: 열화가 진전하고 있음을 파악할 수 있는 레벨로 豫防保全對策 계획이 필요
- (c) 경향관리: 이상 특성변화로부터 이상열화를 조기에 검출한다.

절연시험빈도는 전동기의 분해점검주기에 맞추어 외관점검과 절연시험을 동시에 실시한다. 다만 운전년수가 絶縁更新時期를 넘은 경우와 비과괴절연 특성치가 목표치 및 경향관리를 만족하지 않는 경

<표 2> 絶縁更新時期

電動機의 重要度	絶縁更新時期의 基準베이스
1臺의 故障에 의하여 플랜트 停止에 이르는 모터	99% 信頼下限(16年)
上記 以外の 모터	95% 信頼下限(18.5年)



<그림 6> 絶縁트렌드管理例

우에는 시험빈도를 늘려서 트렌드管理密度를 높이는 것이 필요하다.

트렌드管理의 예를 그림 6에 표시한다.

4.3.3 예방보전대책

절연열화에 대한 예방보전대책으로는 다음의 2항목을 적용한다.

- (a) 絶縁更新: 권선의 捲替 또는 固定子新製
- (b) 絶縁補強: 洗淨乾燥, 와니스處理

絶縁内層部の 보이드·박리가 진행되었을 경우에는 絶縁更新을 실시한다. 구체적으로는 정기점검일정에 따라 捲替 또는 固定子新製를 선택한다. 絶縁外層部の 흡습·오손의 개선으로는 絶縁補強을 선택하고 洗淨乾燥, 와니스처리를 실시한다.

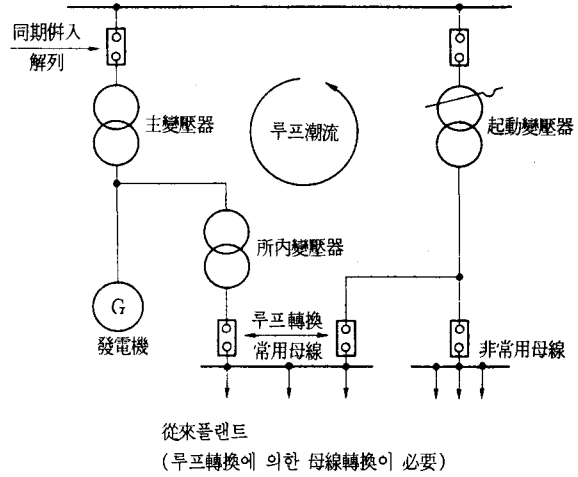
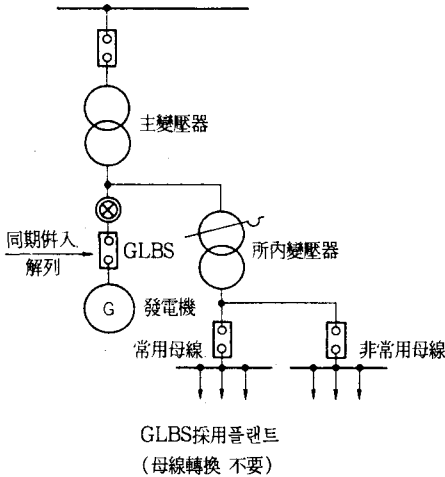
4.4 기타의 예방보전

여기서는 전동기권선의 절연진단에 대하여 기술하였으나 전동기는 회전기계이기도 하여 진동·소음, 機械疲勞 등의 진단도 하고 있다. 원자력발전소에서 가동하고 있는 전동기의 健全性を 유지해가기 위하여 이들 진단을 정기적으로 계속 실시하여 개개의 전동기의 상태에 맞춘 적절한 豫知保全을 해 나간다.

5. 發電機負荷開閉器를 사용한 시스템개선

발전기부하개폐기(이하 "GLBS"라 한다)는 발

● 겨울철 실내적정 난방온도 기준은 18~20°C
 - 난방온도 1°C를 낮추면 약 1,200억원의 에너지 절약



<그림 7> 起動·停止時の 母線轉換操作比較

전기의 출력측에 설치하는 차단기를 말하는데 사고 전류가 아닌 부하전류만을 개폐하는 용도에 사용하기 때문에 “負荷開閉器”라 부르고 있다. GLBS(또는 발전기차단기: GMCB)는 1975년대부터 경제성, 신뢰성 향상을 목적으로 水力·火力發電所에 순차적으로 도입되어 왔지만 당초에는 용량에 제한이 있어 원자력발전소에의 적용은 곤란하였다. 그 후 원자력발전소에의 적용을 실현하기 위하여 최대 정격전류 42kA의 SFWB形 GLBS를 개발하여 關西電力 大飯 3호기 이후의 국내 PWR 플랜트에 적용해오고 있다.

이 GLBS의 채용으로 발전기의 운전·정지에 불구하고 소내동력을 소내변압기에서 수전할 수 있게 되어, 그 결과 起動變壓器 및 관련설비를 삭제할 수가 있게 되었다. 또한 발전기의 併入 및 解列을 GLBS의 개폐로 함으로써 그림 7에 표시하는 것과 같이, 종래의 플랜트에서는 기동·정지시에 필요하였던 루프潮流를 수반하는 所內母線轉換操作이 불필요하게 되어 조작을 간소화할 수 있고, 또 원자로 또는 터빈에 기인하는 플랜트트립시에 기동변압기에의 순시자동전환이라는 과도적인 변동을 수반하는 일 없이 연속하여 常用母線의 전원을 확보함으로써 전원시스템으로서의 신뢰성을 높일 수 있다.

이와 같이 대용량 GLBS를 개발하여 이것을 원

자력발전소에 적용함으로써 起動變壓器 및 관련설비의 삭제에 의한 경제성향상과 운용면에서 所內電源轉換機會를 적게 함으로써 신뢰성향상을 도모하고 있다.

6. 맺음말

이상 “屋內開閉設備”에 대하여는 원자력발전소에의 적용기술의 變遷을 살펴보고 신뢰성향상을 위한 설비개선내용을, “고압전동기”에 대하여는 절연열화 상황을 파악하여 적절한 예방보전을 하기 위한 절연진단과 관리방법을 설명하였다.

옥내개폐설비 및 고압전동기는 원자력발전소에서 사용되는 전기설비의 일부이지만 이들을 포함한 원자력발전소의 안전과 가동성에 중요한 역할을 하는 전기설비에 대하여 금후에도 신뢰성 높은 제품의 공급과 가동으로 수명을 소비해가는 기기에 대한 신뢰성의 유지·향상이라고 하는 두가지 관점에서 기술의 향상과 개선에 힘쓰고 동시에 GLBS의 채용을 예로 소개한 바와 같이 시스템면에서의 信頼性향상에도 노력해가고자 한다.

이 원고는 日本 三菱電機技報를 번역, 전재한 것입니다. 本稿의 著作權은 三菱電機(株)에 있고 翻譯責任은 大韓電氣協會에 있습니다.