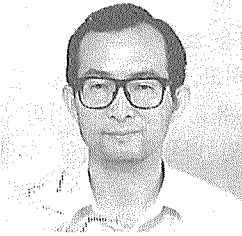


변전설비의 감시진단 기술동향에 관하여



韓國電氣研究所
절연진단연구팀
팀장金光和

1. 변전기술의 동향과 우리의 현실

가. 변전기술의 동향

우리나라는 산업 발전에 따라 전력수요가 1970년대의 중화학공업의 발전과 아울러 급속히 신장하였고, 최근에는 공장 자동화와 맞물려 전력수요의 증대와 전력공급의 고신뢰성 및 전력품질 계고를 요구하고 있다. 그리고 전력설비의 증대에 따른 용지를 확보하기 어려워 전력설비의 신 증설이 쉽지가 않으며, 증설에 비용이 많이 소요되는 현상이 나타나고 있다. 또한 많은 변전소의 보수 유지의 관리에 있어서도 소요되는 비용이 점차 증가하고 있어 효율적 관리가 필요하고, 고신뢰성을 유지할 필요가 있다. 오늘날 우리사회에서 문제가 되고 있는 3D현상과 같이 힘들고 어려운 일을 기피하고 있어 전문인력의 양성도 어려운 실정이다.

이상과 같은 문제점의 타개방안으로 크게 변전기기의 질적 성능향상과 설비의 감시진단에 의한 운전 보수의 합리화를 들 수 있다. 변전기기의 질적 성능향상과 설비의 감시진단에 의한 운전 보수의 합리화를 들 수 있다. 변전기기의 질적 향상에서는 경제성,

신뢰성이 높고, 무보수화 할 수 있는 변전기기의 개발이 대두되고 있으며, 변전기기의 감시진단에 의한 운전보수의 합리화를 위해서는 변전소의 보수와 운전경비를 절감화하는 방안으로 컴퓨터 등을 이용한 전문가 시스템이 등장하여 운전 및 보수업무의 효율을 높이고, 사고 미연 방지를 위한 기기의 진단과 사고시 사고조치와 복구의 효율성 증대에 이용되고 있다.

그러므로 변전소의 감시진단을 통하여 효율적이고 합리적인 운전 및 보수유지를 하기 위해서는 기기의 감시진단기술이 중요한 것으로 사료된다.

나. 우리의 현실

우리의 현실은 사회적인 면에서 선진국에 진입하는 단계로 전력수요는 고품질 고신뢰성을 요구하고 있으나, 전력공급 측면에서는 전력기들이 신설한 지 20년이 지난 것이 많이 있어 신뢰성 면에서 열악한 편이며, 초기 설치시 경제성과 기술적인 문제와 함께 설비의 단가 저하로 전력기기의 신뢰성이 떨어지는 형편에 있으며, 유지 및 보수에 관한 것도 체계적인 연구가 이루어지지 않아 우리의 현실과는 거리가 있는 실정이다.

국내의 전력기기 생산업체의 실태에서도 중소기업이 대부분이고 이들 업체는 기기의 설계능력도 거의 전무한 실정이라 고품질 전력기기의 개발을 바랄 수 없으며, 대기업에서도 조차 현재 생산하고 있는 전력기기는 이미 외국에서 기술을 도입하여 생산되고 있으나, 이 기술도 실질적인 설계 기술이 아닌 생산 기술에 불과하여 설계를 위한 실질적인 기술은 부재 상태이고, 기술개발에 대한 개념보다는 생산 비용의 저감에만 집중되어 오히려 초기의 제품보다 신뢰성을 떨어지게 할 수 있는 요인으로 작용하고 있는 것으로 사료된다. 그리고 대부분의 기업이 새로운 기기의 개발 등에 관심은 거의 없고 사용자의 방침에만 의존하고 있는 실정이다.

2. 변전기기의 감시진단 기술

가. 개요

변전기기의 보수 유지의 흐름은 종래의 시간기준

정비(Time Base Maintenance)에서 상태기준정비(Condition Base Maintenance)개념으로 바뀌고 있으며 시간기준정비에서도 사용기기의 변천과 전력수요의 특성변화로 인하여 종래의 기준을 적용하는 것은 경제적 신뢰성 측면에서 바람직하지 못하다. 따라서 새로운 기기에 알맞는 보수유지 기법과 상태진단 기술발전에 의한 기기의 보수유지에 효율적 합리적으로 대처하고, 신뢰성을 높이는 데 역할을 할 수 있도록 연구 개발하고 있는 상태이다.

현재의 변전설비의 보수유지는 외관 구조점검을 주체로 한 시간기준 정비에 의한 정기적인 부품교환이나 정비에 의한 예방 정비가 주 이지만, 실제로는 고장 발생후 그 부위를 정비하는 고장후 정비가 많은 비중을 차지하고 있다. 따라서 기기의 상태를 진단하여 사전에 미리 정비하는 자동 감시진단 시스템, 운전 정비시스템의 구축이 필요로 한다. 자동 감시진단시스템의 도입에 따라 기대 가능한 기능 및 효과는 다음과 같다.

이의 도입에 따라 사고 예지 및 조기 복구가 가능하여 설비의 사용 효율을 높일 수 있고, 고품질의 전력공급이 가능하고, 신뢰성 향상을 할 수 있으며, 이 결과로 설비의 유효 사용기간에서의 운전 및 보수에 있어서 전체적인 비용을 저감할 수 있어 경제성도 도모할 수 있다. 그리고 종래에는 변전설비의 유지 시간 기준형으로 예방 유지를 하였으므로 기기의 남은 수명이 파악되지 않기 때문에 불필요한 손실이 발생하고, 수명이 남아 있는 부품도 교환하게 되는 경우도 많다. 이와 같이 자동감시 시스템과 운전업무 및 보수업무 지원 시스템을 구축하면 변전설비의 고성능 고기능화 할 수 있는 인텔리전트(Intelligent)시스템이 가능하게 될 것이고, 설비의 원방집중감시 및 제어가 가능하므로 무인화 추진이 가능하게 된다. 따라서 변전설비의 전반에 걸쳐서 전체적인 유지 비용의 절감과 전력공급의 고신뢰성화 및 고품질화를 추구할 수 있는 잇점이 있으며, 전문인력의 부족을 메꿀 수 있는 방안이 된다.

그러나 이상과 같은 감시진단 기술은 아직 연구단계이며, 실용화는 일부 되어 있는 상태이고 신뢰성 면에서 아직은 문제가 남아 있다. 이 기술을 적용할 때 단순히 감각적으로 범위를 선정하면 실제로 얻은 결과와 차이가 크게 나타나므로 적용전에 치밀한 검토를 한 후에 전력사용자의 여건에 따라 적용범위를

적절히 선택해야만이 경제적 실질적 이득이 있을 것으로 사료된다. 그리고 단순히 기존 전력기기 비용과 감시진단기술 적용의 비용을 대비한다면 경제성이 없는 것이 일반적이지만, 불시적인 고장으로 인한 손실면에서 충분히 경제성이 있는 것으로 나타나고 있는 경우가 많다.

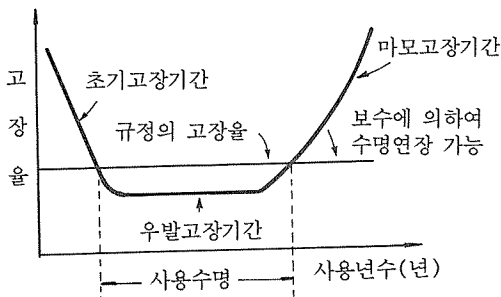
나. 기기의 수명 및 신뢰성 특성

일반적으로 전력기기에서 수명을 좌우하는 것은 여러가지가 있겠지만, 특히 절연의 수명점을 기기의 수명점으로 고려할 수 있다. 왜냐하면 일반적으로 전력기기중 구동부가 있는 기기는 구동부의 마모나 파괴시 그 부분만을 보수하여 사용하는 것이 가능하나, 절연물은 전반적으로 충만되어 있어 일부의 열화시에는 절연물을 전부 교체하던가 새로운 기기로 대체하여야 하므로 일반적으로 절연물의 수명점이 전력기기의 수명점이 된다.

IEC-216에서 절연물의 일반적인 수명점은 “절연 파괴전압 초기치의 50%인 점”으로 정의하고 있다.

일반적으로 전력기기에서 신뢰성 곡선은 <그림 1>과 같이 나타나고, 초기치의 50% 이하에서는 수명기에 들어가며 이 단계에서 열화의 진행도는 급속히 이루어지고 있다. 예를 들면 회전기의 절연설계는 정격전압의 4~5배에서 설계되며, 수명점은 X-3σ값(X: 평균절연파괴전압, σ: 표준편차)인 점으로 하며 이 값은 초기치의 40%에 해당하고 이 시점에서 교체는 하는 것이 타당하다고 보고되고 있다.

<그림 1>과 같이 마모기에 들어서면 사고날 확률이 급속히 증가하므로 여기서 감시진단기술을 활용



<그림 1> 신뢰성 Bathtub 곡선

하여 예방정비를 하면 어느정도 낮은 고장률로 장시간 사용이 가능하므로 경제적인 전력설비를 관리하는 것이 가능하다.

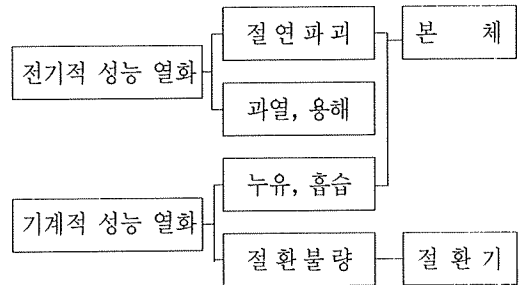
다. 변압기의 진단방법

현재 변전기기에 이용되는 고압 변압기는 유입변압기이며, 유입변압기의 수명은 절연재료가 뇌서지 및 개폐서지 등의 이상전압 또는 외부단락 등의 전기적, 기계적 스트레스에 의한 열화로 결정되고, 파괴할 위험도가 증대할 시점에 대한 열화문제를 고려하는 것이 예방보수 차원에서 매우 중요하다. 유입변압기는 각종의 재료가 이용되고 있지만 전기적 성능면에서 절연유, 절연지, 프레스보드 등의 절연재료 열화가 주요한 문제가 되므로 이들 절연재료의 열화형태와 최근 진단기술에 대하여 기술한다.

1) 열화요인과 형태

절연유를 이용한 변전기에서 발생하는 열화요인으로는 고온 운전에 따른 열적열화, 외부단락에 기계적 손상 및 부분방전열화가 대표적이며, 이로 인하여 전기적 성능과 기계적 성능이 저하되게 된다. 이러한 열화에 의하여 이들 변전기에서는 기계적 강도 저하, 진동 증가, 가연성 가스 발생 등이 나타나고 절연파괴로 진전된다.

이러한 열화요인 외에 산화, 흡습, 기계적 응력 및 환경적 요인에 의하여 복합적으로 열화가 진행되어 이상이 발생하고 사용수명에 도달하게 된다. <그림 2>는 열화에 따른 주요 장애 관계를 나타낸 것이다.



<그림 2> 유입변압기의 열화와 장애의 관계

<표 1>은 유입변압기 부위별 이상현상 및 이상원인을 나타내었으며, <표 2>에서는 유입변압기의 각 구성부위 및 사용재료에 있어서 열화현상중 탱크 내부에서의 열화현상을 나타내었다. 이러한 내용중 절

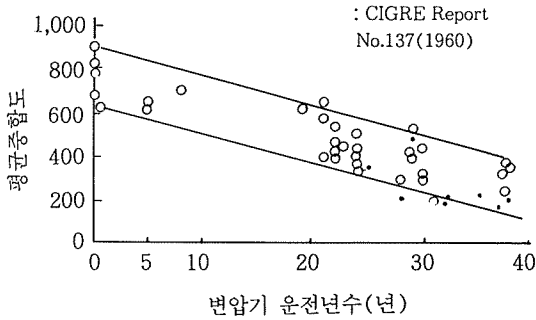
〈표 1〉 유입변압기의 이상현상 및 이상원인

부	위	이 상 현 상	이 상 원 인
내 부	철 심	과 열	냉각불량, 누설지속, 조임의 느슨함
		진동증가	조임의 느슨함
	코 일	과 열	냉각불량
		방 전 변 형	절연불량, 이상전압 단락 기계력
	리 드 선	과 열	냉각불량, 접속부 조임 불량
		방 전	절연불량
절 연 물	방 전	경년열화, 이물혼입	
	파 손	경년열화	
절 연 유	방 전	경년열화, 수분혼입	
	누 유	용접불량, 외부상처	
외 부	배 관	파 손	지진 등의 외력
	가 스 키 트	누 유	경년열화, 조임 불량
	애 관	파 손	지진 등의 외력
부 속 기 기	냉 각 장 치	누 유	용접불량, 외부상처, 부식
		냉각능력 저하	팬 고장, 펌프 모터 고장
	보 호 장 치	오동작, 불동작, 지시불량	흡습에 의한 절연저하, 단락, 피로에 의한 파손, 기계적 불량 등
부하시텡절환장치	오동작, 불동작, 이상차단	조작기구의 전기적 불량 조작기구의 기계적 불량	

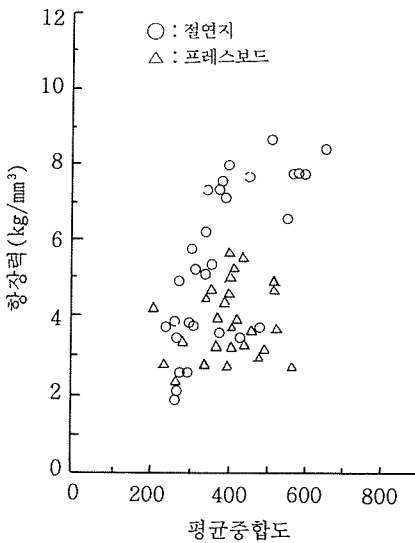
〈표 2〉 유입변압기의 내부 열화 현상

구	성	부	위	열	화	현	상				
구	성	부	품	재	료	종	류	영	향	지	표
내	권	선	철 심	철 심	절 연	마닐라지, 프레스보드	열열화	기계적강도저하 진동증가	절연물 열분해 1. 기계적 강도저하 [절연파괴 진동증가 2. 가연성 가스발생	1. 유증용존가스의 변화 2. 절연지의 중합도 저하 3. 절연지의 기계적 강도 저하	
			도 체	절 연	크라프트지						
	권 선	절 연	크라프트지 프레스보드								
	코 일	지 지 물	목재, 프레스보드								
리 드 선	도 체	절 연	크라프트지	부분방전 열화	목재, 프레스보드						
	리 드	지 지 물	목재, 프레스보드								
부	절 연 유		전기절연유		열열화 부분방전열화 흡습	절연내력저하 부분방전발생 →가연성가스발생 →절연파괴	1. 절연파괴전압 2. 유증가스변화 3. 유증수분증가				
	부하시 텡 절환기	절 연 유	전기절연유					1. 절연파괴전압 2. 산가변화			
		접 촉 자	동, 동합금		마모, 부식(유화동)	접촉면 손상 접촉저항증가 파열 및 용손	1. 절환회수 2. 접촉저항 3. 접촉상태 4. 동작 토오크				

연재료 열화의 지표로는 유중 용존가스의 변화, 절연유의 특성변화, 중합도의 저하, 진동 및 소음의 증가, 부분방전량의 증가가 있다.



〈그림 3〉 운전년수와 평균중합도의 관계

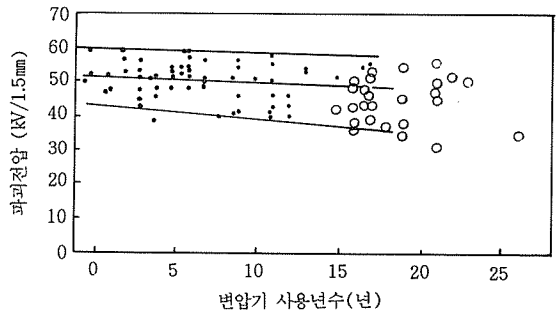


〈그림 4〉 평균중합도와 향장력의 관계

절연재료중 절연지의 열화도는 셀룰로오스 분자를 만들고 있는 글루코스의 수(평균중합도)로 나타낼 수 있다. 열화가 진행되면 셀룰로오스 분자는 저분자량화로 되며, 이것은 평균중합도 저하로 나타나고 인장력 세기(향장력)의 저하를 가져온다. 예를 들면 약 30년 운전한 유입변압기 권선에 사용된 절연지의 평균중합도는 일반적으로 초기치의 40~60%로 저

하되어 간다. 〈그림 3〉에 운전년수와 평균중합도와 의 관계를 나타내었다. 〈그림 4〉는 장기간 운전한 유입변압기에서 채집한 절연지 및 프레스보드의 평균중합도와 향장력의 관계를 표시한 것이다. 이러한 시험결과에서 절연지는 경년 열화에 의해서 평균중합도 및 향장력은 저하하지만 절연파괴전압은 거의 저하하지 않는다는 것으로 밝혀졌다.

절연재료중 절연유는 운전중에 열 및 유중에 잔존하고 있는 수분과 산소 그의 불순물에 의해서 열화가 진행되며, 전산가의 증가, 체적저항율의 저하 및 절연 파괴전압의 저하를 나타낸다. 그러나 현재 사용되는 변압기는 무압 밀봉형과 질소 봉입형과 콘세베이터를 채용하고 있어 열화 진행정도는 상당히 느리다. 변압기 사용 년수와 절연파괴전압의 관계를 〈그림 5〉에 나타내었다.



〈그림 5〉 변압기 사용년수와 절연파괴 전압의 관계

변압기 탱크 외부의 열화부위와 열화현상으로는 첫째, 탱크강판, 방열판, 콘세베이트 본체 등이 열적 및 환경적 요인에 의하여 발청 또는 부식되는 경우. 둘째, 탱크 및 붓싱의 가스킷, 콘세베이트의 격리막, 방압장치의 방압판 등의 재질인 나트륨 고무와 박동판이 열적 및 환경적 요인에 의하여 압축력과 곡률피로를 받아 균열 또는 변형되는 경우, 셋째, 고압붓싱 애관이 전기적 및 환경적 오손영향을 받아 절연내력이 저하하는 경우이다. 이러한 변압기 외부 부품은 열화가 거의 진행되지 않지만, 열화가 진행된 지점은 외부에서 판정이 가능한 경우가 많다.

2) 진단기술
 변압기에 사용되는 진단기술은 다음 <표 3>과 같이 대표적으로 나타나며, 이 표에서는 적용분야, 현

재의 상태 및 효과에 관하여 나타냈다. 이 중 대표적인 진단기술에 대하여 다음에서 설명하고자 한다.

<표 3> 변압기에서 적용되는 진단기술

원 인	진 단 기 술	기기의 운전조건	진단기술의 상태	진단기술의 유효성
기계적	1. 여자전류	OFF-S	A	M
	2. Low Voltage Impulse	OFF-S	A	L
	3. Frequency Response Analysis	OFF-S	B	L
	4. Leakage Inductance Measurement	OFF-S	A	M/H
	5. Fourior Analysis	ON	C	?
열적	유증가스분석 6. Gas Chromatography	ON	A	H
	7. Equivalent Hydrogen Method	ON	A	M
	절연지 열화 8. Liquid Chromatography-DP Method	ON	B	L/H
	HOT SPOT DETECTION 9. Invasive Sensor	ON	B	L
유전적	절연유분석 10. Moisture, Electric Strength, Resistivity, etc.	ON	A	M
	11. Turn Ratio	OFF-S	A	L
	부분방전 측정 12. Ultra Sonic Method	ON	B	M/H
	13. Electric Method	ON	B	M/H
	14. Loss Angle Measurement	OFF-S	A	M

* OFF-S : 현장에서 운전중지중
 OFF-L : 실험실에서 운전중지중
 ON : 운전중

A : 일반화된 것
 B : 개발중 상태
 C : 연구단계
 H : 유효성 높음
 M : 유효성 중간
 L : 유효성 낮음
 ? : 유효성 의문

가) 유증가스 분석에 의한 진단

변압기 내부에 국부적인 가열 및 부분방전이 발생하면 절연유 및 절연지가 분해되어 여러종류의 가스가 발생한다. 이 분해 가스는 절연유에 용해되므로 유증 용존 가스를 Gas Chromatography로 분석하여 가스성분, 발생량, 경시변화를 파악하여 변압기의 열화진전 상태를 판단 할 수 있다.

일본의 전기협동연구 36-1에서는 변압기의 이상종류와 발생가스의 관계, 가스분석 결과의 판정방법을 3종류 (① 각 성분 가스에 의한 판정, ② 가연성

가스 총량 및 각 가스량에 의한 판정, ③가연성 가스 총량의 증가경향에 의한 판정)로 나타내었다. 가스분석결과를 이용한 진단방법으로는 (① 가스 패턴에 의한 진단방법, ② 조성에 의한 진단방법, ③ 특정가스에 의한 진단방법에서 유효성이 높은 것으로 되어 있다) 변압기 이상에 따른 발생가스 성분을 <표 4>에 나타내었다. 유증가스 분석 진단장치에는 Gas Chromatography 외에도 수소가스 상시감시장치와 다종류가스 자동분석장치 등이 있다.

〈표 4〉 유입변압기 이상에 따른 발생가스 성분

이상의 종류	주요 발생가스
절연유의 과열	H ₂ , *CH ₄ , *C ₂ H ₄ , *C ₂ H ₆ , *C ₃ H ₆ , *C ₃ H ₈
유침 고체절연물의 과열	*CO, *CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , *C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , *C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈
절연유 중의 방전	*H ₂ , CH ₄ , *C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆
유침 고체절연물의 방전	*CO, *CO ₂ , *H ₂ , CH ₄ , *C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆

주) * 표시는 특정발생 가스 임.

나) 부분방전 측정에 의한 진단

부분방전에 의하여 절연물이 열화하면 절연이 파괴될 위험성이 높은 시점의 수명을 고려해야 한다. 부분방전에서 절연물 수명의 관계는 그 크기와 절연 구조 및 전계 값에 의한 영향을 받기 때문에 이를 고려해야 한다.

부분방전 검출법은 변압기 외함벽에 부착한 초음파 마이크를 이용한 음향법, 부분방전에서 발생된 전류펄스를 중성점 접지선에 취부한 Rogoski coil 및 Bushing tap으로 부터 검출한 전류법을 병행한 자동감시 진단장치가 개발되어 있다. 이것은 운전중의 변압기에 있어서는 외부잡음이 많아서 음향법이나 전류법 단독으로는 변압기의 부분방전검출이 곤란하기 때문에 두가지 방법을 조합하여 내부방전을 판단하는 기능을 갖도록 한 진단장치이다.

다) % Z변화 측정에 의한 진단

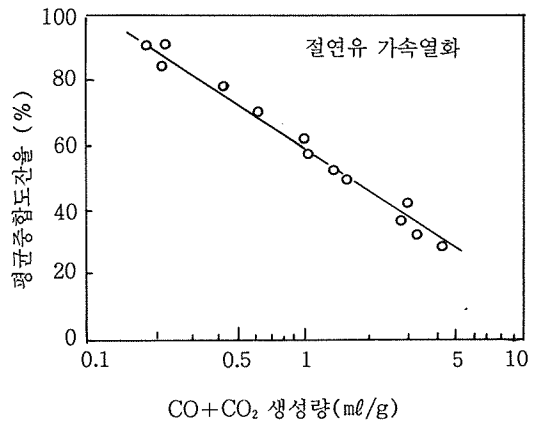
변압기에 2차 단락이 일어날 경우에는 단락전류에 의해 코일에 변형되어 코일간 gap의 증가현상에 의해 리액턴스가 증가하게 된다. 그러므로 변압기의 %Z를 측정하여 그 변화량을 관측하면 코일의 상태가 추정되므로 변압기의 이상을 진단할 수 있다.

라) 진단결과에 의한 변압기의 평가

앞에서 기술된 진단방법에 의해 얻어진 결과를 정리하면 절연지의 중합도와 열화의 관계로부터 다음과 같이 정리된다.

(i) 평균중합도 및 항장력은 40년 동안에 50% 저하한다.

- (ii) 약 30년 동안 운전된 초고압 유입변압기에 있어서 프레스보드의 평균중합도는 조사결과 200~600정도이다.
- (iii) 일반적으로 평균중합도(평균중합도의 초기치에 대한 값)가 40~50%된 경우를 수명으로 판단한다.
- (iv) 1g당의 (CO₂+CO)가스 생성량이 0.42-1.7ml/g으로 되면 절연지의 사용 수명한계에 이른 것으로 고려한다 (그림 6).



〈그림 6〉 (CO₂+CO)가스 생성량과 평균중합도 잔율의 관계

〈표 5〉 전산기에 의한 판정

신유	0.02미만
초고압 변압기유	02미만이면 양호
33kV이하의 변압기유	0.3미만이면 양호
얼마 후 재생 또는 교환을 요하는 유	0.3~0.5
긴급히 재생 또는 교환을 요하는 유	0.5초과

〈표 6〉 절연 파괴 전압

66kV이상 변압기로 유와 공기가 직접 접촉하지 않는 것	35kV초과
그 이외의 것	30kV초과

라. 차단기의 감시진단방법

전기계통에는 각종의 전기설비 및 기기가 접속되어 있고, 이것을 제어하여 각 방면에 널리 이용하고 있다. 차단기는 전력계통에 있어서 전기설비와 직접 접속되어 차단작용·개폐작용, 통전작용으로 사용되므로 차단기의 고장은 전기설비의 제어불능 및 정지를 의미하며, 또한 전기설비의 고장시에는 고장범위를 차단하여 전력계통에 악영향을 막아주는 중요한 기기이다.

차단기는 구조 및 동작원리에 따라 많은 종류가 있지만, 사용되는 소호방식 및 소호매체에 따라 대별하고 있다. 현재 사용되고 있는 차단기에는 SF₆ 가스차단기(GCB), 공기차단기(ABB), 유입차단기(OCB), 진공차단기(VCB), 자기차단기(MBB) 등이 있지만, 154kV급 이상에는 GCB, OCB 및 ABB가 주류를 이루고 있으며, 그중 GCB의 사용이 증가되고 있고 22kV급 이하에는 진공차단기가 많이 이용되고 있다.

1) 열화요인과 열화기구

차단기의 고장상태 조사결과(전기협동연구, 제42권, 제3호, “가스차단기의 부위별 고장건수”)에 의하면, 차단기 고장의 약 60%가 조작기구에 집중되어 투입불량, 개방불량, 개폐 부조합 등의 동작불량이 그 주원인으로 나타났고, 그 다음으로 애관, 외부, 차단부, 기타의 순으로 나타났다.

차단기의 열화요인은 차단기 혹은 그 구성품 등이 다른 전기기기들과 같이 전기적, 열적, 기계적 스트레스 및 환경적 요인의 영향을 복합적으로 받아 그 화학적 혹은 물리적 성질의 변화를 가져오므로 차단기의 특성 및 성능이 저하하는 것으로, 그 중 전기적 요인에 의한 고장피해가 가장 많다. 차단기 접점에서 열화요인을 살펴보면, 접촉불량에 의하여 접촉저항의 증대로 인한 발열현상, 발열량이 증대되어 접촉부의 아아크 발호현상 및 접촉자의 용착현상, 용착된 접촉자가 기기의 진동에 의해 접촉저항 발생으로 재아아크 발호현상, 반복된 아아크 발호에 따른 접촉불량부의 용융 확대 및 연속발호 발생으로 진행되어 지락이 발생된다.

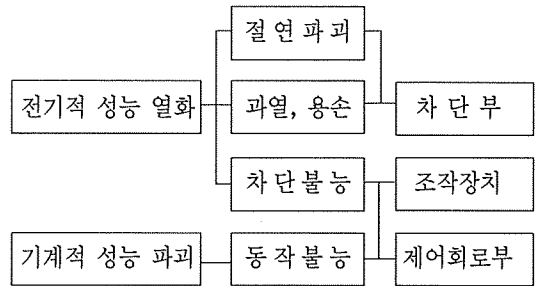
열열화는 물질에 열에너지가 가해진 결과 물질내 부분자레벨의 구조가 불가역적인 화학적 또는 물리적 변화를 일으켜 특성이 저하하는 현상으로 아크열

에 의한 차단기 접점부의 소모와 고무제 팩킹부위의 열화가 여기에 속한다.

전기적 열화는 전계 및 전계의 집중으로부터 재료가 열화하는 현상으로 일반적으로 절연물의 과전현상(V-t)특성으로 표시한다.

기계적 열화는 기계적 스트레스(응력)으로 부터 재료가 경시적으로 변형하거나, 응력집중으로 부터 국부적 결합이 진전되는 현상으로 재료적 측면에서 보면 크리프와 피로가 있고 부품의 상호작용 측면에서 보면 마모와 이완 등이 여기에 속한다.

환경적 열화는 어떤 환경하에 놓여 있는 부품이 높은 에너지선, 화학반응, 응해 및 팽창 등으로 부터 성질이 저하하는 것이며, 고온하에 있는 절연물이 크리프 가속과 산화반응의 가속과 같이 열열화와 기계적 열화의 복합 혹은 열열화의 환경적 열화의 복합형태와 같이 나타난다.



(그림 7) 차단기의 열화와 장애의 관계

이러한 열화형태를 지닌 차단기의 열화는 크게 절연성능 및 통전성능 등의 전기적 성능 열화와 동작 특성 등의 기계적 성능 열화로 대별되며, 이들 열화에 의해 차단기에서는 절연파괴, 과열, 차단불능, 동작불능 등의 사고가 발생된다. (그림 7)은 열화에 따른 장애 관계를 나타낸 것이며, (표 7)은 현재 많이 사용되고 있는 차단기의 열화특성을 비교하여 나타낸 것이다.

가) 접촉자의 소모열화

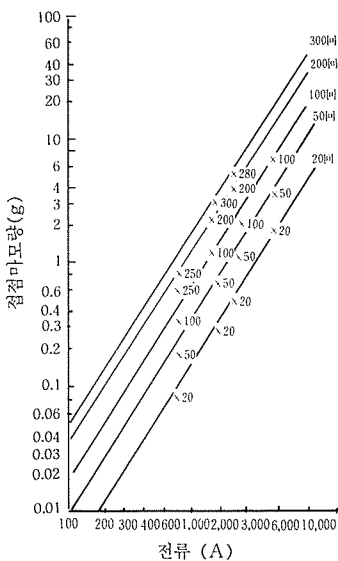
차단기의 열화특성중 접촉자의 소모특성에 대해 보고된 연구결과에 따르면 공기차단기에 있어서 접촉자의 소모량특성은 다음과 같다. 접촉자의 소모량은 차단전류, 차단회수 및 전극재료 등에 의하여 결정된다. 차단전류와 접촉자의 소모량 관계는 다음식(1)로 나타낼 수 있다. 또한 차단회수와 소모량의

관계는 꼭 비례하지 않고 회수가 많아지면 완만한 변화 경향을 나타내는 시험결과도 나와 있으므로 비례에 대한 고려시에는 안전한 결과를 이용한다.

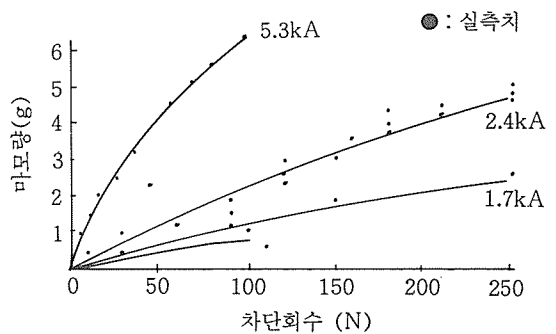
(그림 8)과 (그림 9)에는 차단전류 및 차단회수와 소모량의 관계 예를 나타내었다.

〈표 7〉 주요 차단기의 열화 특성 비교

종 류	접 촉 자		절 연 물		가스킷, 팩킹		조작 기구 부분			
	재료	정격전류 차단회수	정격차단 전류의 차단회수	재료	수명이되는 년수	재료	수명이되는 인장강도 혹은 압축 변형을수명	부 품	수명이 되는년수	수명이 되는 조작회수
G C B	내 소 호 메탈	4kA이상 정격 전류 : 500회 그외 : 2,000회	10회		부분방전, 수분, 보이드가 없으면 문제없음	고 무	사용온도 50°C 및 압축변형을 80%에서 20년 수명	절연조작봉 피스톤, 밸브, 실린더, 기계적연결부, 스프링	조작회수에 의해 결정	10,000회 이상
								윤활재	3~6년	1,000회
A B B	내 소 호 메탈	수백회 - 2,000회 정도	3~10회 정도	애자, 압축 공기, 절연 조작봉	부분방전, 수분, 보이드가 없으면 문제없음	고 무	교체년수 12년	피스톤, 밸브, 실린더, 기계적연결부, 스프링 압축공기	마모품은 6~12년	10,000회
								윤활재	1~6년	1,000회
O C B	내 소 호 메탈	500 ~ 1,000 회 정도	4회	절연유 애자	절연유의 산화가 0.2~0.5 : 요주의 0.5이상 : 불량	고 무	교체년수 6년	절연조작봉, 피스톤, 밸브, 실린더, 기계적연결부, 스프링	마모품은 6년	
								윤활재	3~6년	



〈그림 8〉 차단전류와 접점 소모량의 관계



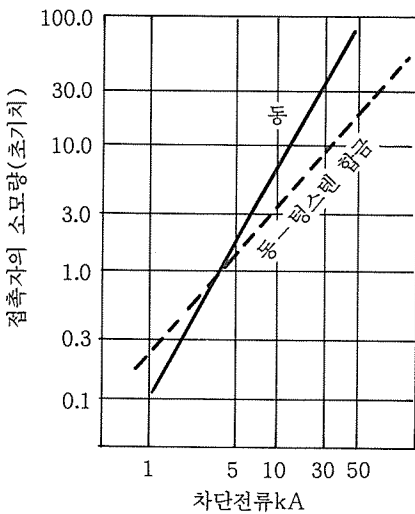
〈그림 9〉 차단회수와 접점 소모량의 관계

$$V = \alpha \cdot I^\beta \cdot t \dots\dots\dots (1)$$

여기서 V : 소모량, I : 차단전류, t : 아크시간,
 α, β : 접촉자 재료에 의하여 결정되는 정수

접촉자의 수명은 차단전류 회수 혹은 조작 회수에 따라 결정되고, 차단능력 등은 종류에 따라 다르다. 정격전류 차단에는 수백~2,000회 정도이고, 정격차단 전류에는 3~10회 정도가 일반적이다.

가스차단기에서 접촉자는 개폐시의 아크에 의해 주위의 절연물인 노즐과 같이 소모된다. 이 소모량에 대하여는 차단전류에 대응한 차단회수로 표시되고 있다. 가스중 접촉자의 소모량은 차단전류, 아크 시간 및 재료특성에 따라 결정되는 공기차단기에서의 식(1)과 같다. 접촉자의 소모량과 차단전류의 관계를 나타낸 예가 <그림 10>이며, 동-텅스텐 합금을 이용한 경우 $\beta=1.01$ 이 얻어진다. 동-텅스텐 합금의 전류와 소모의 관계는, SF₆가스중 접촉자의 소모량은 공기중보다 적지만, 다른 차단기와 동일하게 전류에 대하여 1.2~2승에 비례하여 소모한다는 결과도 있다. 또한 텅스텐 입도가 미세하면 소모량이 작고 경도도 높지만 크랙이 발생하기 쉽다.



50kA Cu전극의 소모량을 100으로 둔 경우
 <그림 10> 차단전류와 소모량의 관계

유입차단기에서 접촉자의 유증 소모량의 관계는 공기차단기 및 가스차단기와 동일한 형태로 차단전류, 차단회수 및 전극재료 등에 의하여 결정되며, 차

단전류와 접촉자의 소모량 관계는 공기차단기에 나타낸 식(1)과 같다.

접촉자의 수명은 차단전류 회수 혹은 조작 회수에 따라 결정되고, 차단능력 등은 종류에 따라 다르다. 일반적으로 정격전류 차단에는 500~1,000회 정도이고, 정격차단 전류에는 4회 정도이다.

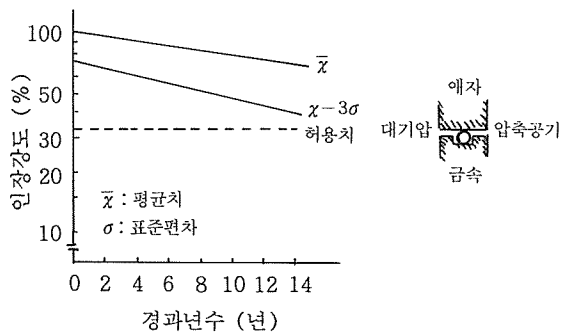
나) 패키징의 열화

차단기류에 사용되는 패키징의 열화특성은 일반적으로 운전온도와 시간적 관계인 것으로 알려져 있다. 공기차단기는 5~30kg/cm² 정도의 고압 압축공기가 사용되고 있으므로, 지지 애자부의 Seal은 <그림 11>과 같이 애자단면과 금속 플랜지가 접촉되지 않는 구조로 되어 있다. 따라서 Seal로 사용되는 패키징의 고압기밀 효과는 내압에 의해 압착되어 넓혀지는 것에 대하여는 패키징의 인장강도에 의해 유지되는 것으로 볼 수 있다. 패키징의 인장강도와 시간과의 관계는 온도가 일정한 경우 일반적으로 다음 식(2)로 나타난다.

$$S = S_0 \cdot e^{-kt} \dots\dots\dots (2)$$

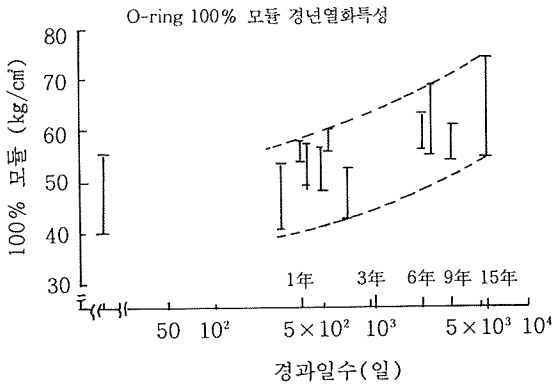
여기서 S : t년 후의 인장강도,
 S₀ : 초기의 인장강도,
 t : 정년년수, k : 정수

인장강도와 수명의 관계 예가 <그림 11>에 나타나 있다.



<그림 11> 패키징의 인장강도와 수명 특성

가스차단기에서의 SF₆가스 중에서는 산소에 의한 열화가 없기 때문에 고무재료가 되어 있는 팩킹 및 가스킷의 열화는 공기중에서보다 적다. 15년간 사용된 가스 차단기의 O-ring을 포함한 다수의 시료에 대하여 기밀성의 지표가 되는 압축영구 변형율 등을 측정된 결과 예를 <그림 12>에 나타내었다.



<그림 12> O-ring의 경년열화 특성

15년간 사용된 O-ring의 압축영구 변형율은 40% 정도로 아직 기밀성을 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 압축영구 변형율의 변화경향은 실험실 Data와도 잘 일치하고 있다. 그리고 경도 및 100% 모델계수에 있어서도 열화가 진행되고 있는 것이 명확하므로 고온 사용의 경우에는 특히 주의가 필요하다.

유입차단기의 조작장치는 압축공기 조작방식이 많고 고무제 밸브 및 O-ring 등의 기밀용 부품이 사용되고 있다. 이것은 경년열화에 따른 강도 저하, 영구 변형의 증가, 경도의 상승 때문에 기밀성이 열화되고 개폐동작 불량 등의 원인이 된다. 일반적으로 정밀 점검시에 신품으로 교체하는 것이 좋다.

이상과 같이 차단기의 공통으로 나타나는 특성에 대하여 여기서 논하였지만, 개개의 차단기 특성에 따른 개별적인 부분의 열화에 대하여서는 여기서 생략하기로 한다.

2) 차단기의 진단기술

차단기는 회전기와 달리 상시운전 사용상태에서도 일반적으로 정지되어 있어, 자동감시 진단을 위해 센서를 취부하는 경우에 통상 고전압이 인가되어 있는 상태이며 공간이 협소하기 때문에 취부에 제한을 받는 경우가 많다. 열화를 진단하는 수법으로는 일상순시 및 운전감시 등의 일반적인 일상점검 외에 정기점검시에는 육안검사 외에 세부의 분해점검 및 각종 계측기기를 사용한 이상진단이 행하여 진다. 최근에는 자동진단 기능을 갖춘 장치를 차단기에 첨가하고 있다.

차단기의 진단기술중 Off-line에서 행하는 정기점검시의 진단은 종래부터 하고 있는 일반적인 기술이며, 최근에는 On-line 상태에서 기기의 상황을 연속적으로 감시하는 진단기술이 주목받고 있으며, 그 일례로서 차단기의 개폐특성을 연속감시하는 진단기술로 차단기의 투입시간과 개극시간을 측정하여 기구부의 상황을 판단하는 것이다. 현재 적용하고 있는 차단기에 대한 일반적인 진단방법은 다음의 표 8과 같다.

<표 9>는 SF₆ 가스차단기 및 공기차단기의 외부진단기술의 기초가 되는 차단기의 징후와 검출기술을 나타낸 것이지만 아직 실용화 수준은 아니다. 진공차단기는 진공밸브의 장기수명 및 maintenance free가 특징인 것으로 진공밸브 기밀의 고신뢰성 유지를 위한 진공도의 상시감시 실용화는 이룩되지 못한 실정이다.

<표 8> 차단기의 진단기술

원 인	진 단 기 술	기기의 운전조건	진단기술의 상태	진단기술의 유효성
절 연 물 결 합	측 정			
	1. 가스밀도	ON	A	H
	2. 커플링 커패시터법 부분방전	ON	B	M/H
	3. HF Current Probe	ON	B	M
	4. HF Capacitive Probe	ON	B	M
	5. 초음파법	ON	B	M/H

논단 II

원 인	진 단 기 술	기기의 운전조건	진단기술의 상태	진단기술의 유효성
유 전 가 스 의 질	SF ₆ Gas Control			
	6. Dielectric Check	ON	B	L
	7. 가스분석			
	- Gas Chromatography	ON	C	L
	- Infra Red Spectroscopy	ON	C	L
	- Air Contents	ON	A	L
- Moisture Contents	ON	A	L	
- Color Detector	ON	B	L	
차 단 기 의 마 모	측 정	OFF-S		
	8. 축 위치	ON	B	L
	9. 접촉자 마모	ON	A	M
비 정 상 적 기 계 적 작 동	10. Dust & Powder Contents		B	L
	측 정			
	11. At Potentiometer on moving Contact	OFF-S	A	H
	12. Optical Markers on Moving Part	OFF-S	A	H
13. Friction of Driving Elements	OFF-S	A	H	
14. Tripping Time	ON	A	H	
과 열	측 정			
	15. 적외선 카메라법	On	B	L/M
	16. 접촉저항	Off-S	A	M

〈표 9〉 SF₆ 가스차단기 및 공기차단기의 징후와 검출기술

고 장 항 목	징 후	검 출 기 술
절연성능에 관계되는 것	코로나 방전	코로나 검출기
	이상음	초음파 검출기
	가스압력저하	압력 센서
	가스중 수분 증가	Bicycle meter
	가스 분해	자동가스 분석장치, 가스검지관
	절연저항 저하	절연저항계
통전성능에 관계되는 것	온도상승 증대	온도센서, 적외선 센서
	주회로 저항 증대	주회로 저항계
	가스압력 증대	압력센서
	전극마모 증대	X선 진단법
기계적성능에 관계되는 것	개폐시간 증대	저속구동법, 개폐특성 센서
	전극마모 증대	저속구동법
	동작회수 초과	동작회수
	구동계의 마찰력 증대	저속구동법, 개폐특성 센서
구조변형	X선 진단법	

가) 전극소모의 진단

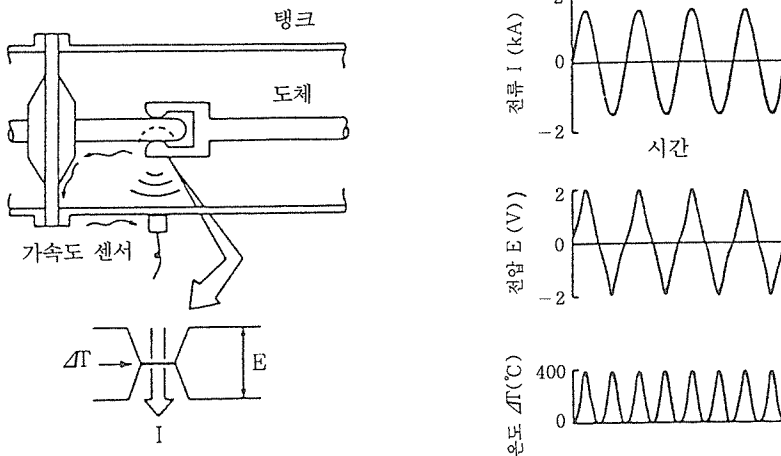
각종 전극재료에 있어서 차단전류와 전극소모량의 관계는 앞서 검토되었으며, 그 결과 소모량은 식(1)과 같이 주어지므로 가스차단기의 경우 통상 접촉자 교환을 목적으로 한 누적차단전류 즉 정격차단전류에 대한 차단회수의 한도는 100% 정격차단전류 : 10회, 50% 정격차단전류 : 30회, 20% 정격차단전류 : 100회 정도이다.

이러한 접점소모 상태는 외부에서 X선을 이용한 직접 진단방법이 개발되어 있다. 이 경우에는 차단기를 해체할 때 진단하는 것은 가능하지만, 외관 형상에서 판단 불가능한 접촉불량 등의 진단은 곤란하다.

나) 전극 및 주회로 도체의 국부과열 진단

국부과열에 관한 진단은 종래 온도측정에 의해 행

하고 있지만, 이는 이상의 초기단계 검출에 문제가 있다. 최근에는 국부과열에 의하여 진동이 발생하는 것을 이용한 진단이 유효하다. <그림 13>은 국부과열에 의한 진동발생 기구를 나타낸 것으로 이 진동은 통전에 의한 미세한 접점부의 온도변화로 부터 생긴다고 볼 수 있다. 통전전류 I가 흐르면 접촉부의 저항에 의해 접점부에는 전압 E의 변화가 생긴다. 이것은 상용주파 전압의 기본주파수와 동일하게 된다. 이 전압 및 전류에 의해 접점부에는 Joule 열이 발생하고 상용주파의 2배 기본주파를 지닌 온도변화 ΔT 가 나타난다. 온도변화 ΔT 에 의해 접점부는 팽창 및 수축을 되풀이하는 진동원이 된다. 탱크에 전달된 진동원 음파를 가속도 센서로 받아들인 후 주파수 성분을 분석하여 이상발생시에 나타나는 고조파 성분을 감시하면 경미한 단계의 이상도 진단할 수 있다.



<그림 13> 통전이상 검출 원리

다) 접촉저항 측정에 의한 유전특성 진단

종래부터 접촉저항값의 관리에 의해 접촉부 이상진단을 행하고 있지만, 과열로 부터 발호(發弧)에 이르는 열화상태 진단까지는 이르지 못한 실정이다. 그렇지만 최근 통전이상을 모의한 모델을 이용하여 접촉저항과 열화상태의 관계가 검토되었다. <그림 14>는 이 검토결과와 한 예로서, 접촉저항과 통전전류 및 이상발생의 관계를 표시한 것

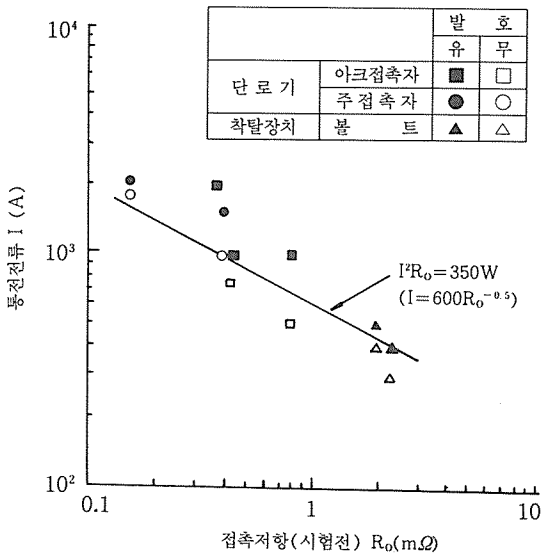
이다.

발호에 이르는 전류와 접촉저항의 관계는 다음 식(3)으로 나타내진다.

$$I = 600 \cdot R_0^{-0.5} \dots \dots \dots (3)$$

여기서, I : 발호에 이르는 전류(A)

R_0 : 접촉저항 값(m Ω)



(그림 14) 접촉저항과 전류의 관계

3. 장래의 변전기기의 감시진단기술

장래 새로운 변전기기의 개발은 경량축소화, 무 보수화 그리고 인공지능을 이용한 감시진단 시스템이 구축된 것으로 개발되고 있다. 따라서 이와 같은 특성을 갖는 변전기기의 개발에 주력을 하고 있어 변전기기는 다음과 같은 특성이 있다.

가. 전 가스절연화 및 축소화

변전소는 도시 중심부, 특히 건물의 지하에 설치되는 것이 많게 되어 소요면적의 축소와 방재상에서 불연화가 요구된다.

변전소 부지의 주요 면적을 점하는 1차 개폐기군은 소형화의 구체적인 수단으로서 SF₆ 가스 절연개폐장치(GIS)가 전면적으로 채용되고 있어 기술적인 축적은 이미 20년이상 된다. 큐비클형 GIS를 포함하여 현재는 기기배치의 연구로 더욱 축소화를 도모하고 있다. 그리고 변성기의 점유 면적을 축소할 목적과 신호 전송로에 광이 사용되

는 것에서 광 PCT개발이 행하여지고 있지만 축소화에 대해서는 아직 충분하지 않다. 다른 구성기기와 복합화된 형으로 보다 가일층 축소화가 요망된다. 변압기는 가스절연변압기가 채용되고 있다. 변압기 본체의 크기는 유입변압기와 거의 같지만, 방화벽이 필요하지 않는 것과 GIS와 직결하는 것으로서 변전소 전체로서는 축소화된다.

또한 2차측 개폐기는 또한 공기절연방식의 Metal Clad반이 주류를 이루고 있다. 이것은 장시간 사용된 실적이 있는 기술이지만, 특히 습도의 영향을 받기 쉽고 일상의 보수점검에 일하는 시간이 걸리는 것으로 되어 있다. 이의 해결을 위해서 절연열화가 거의 없고 점검주기 연장을 도모할 수 있는 6kV 가스절연 큐비클이 개발되고 있다.

나. 고신뢰도 제어장치

감시제어장치의 디지털화가 진행되고 있으므로 개폐장치, 변압기가 SF₆ 가스절연으로 되어서 장수명화 되어 가면 보조기기 조작기 주변의 보수점검의 시간이 크게 된다. 기기의 조작 제어회로에 사용되고 있는 보조계전기 보조개폐기의 접점은 발청등 때문에 문제를 일으키기 쉽고, 점검노력을 절감하는 것이 가능하게 된다. 이의 문제를 해결하기 위해 파워 디바이스를 사용한 무접점 제어장치를 개발하고 있으며, 이것은 전동기나 전자코일을 구동 가능한 전자스위치 회로가 완성되어 유압조작 방식의 가스차단기(GCB), 전자용수철 조작식 진공차단기(VCB), 변압기 부하시 탭절환기(OLTC)등의 조작회로에 적용도 가능하다. 현재 GIS용 GCB, 가스 절연 VCB, 가스절연변압기 OLTC에 채용하여 실용화를 하고 있다.

다. 고신뢰도 조작기구

기계적 조작기구는 윤회제 보급, 발청 조사 등 점검을 필요로 한다. 고압차단기의 조작기를 이미 오래전에 유압조작화 하는 것으로 공압조작기와 같이 기계적 마모의 가능성이 있는 부품을 줄이므로써 점검주기의 연장이 가능한 것으로 나타나고

있다.

소요 부하 토오크가 작은 기기에 적용되는 전동 조작기, 전자 용수철 조작기에 대해서는 최근에 점검주기 연장의 연구에 착수할 정도이지만, 축수부 재료의 개질에 의해 무주유 무점검화하고 있다. 그의 성과를 VCB, OLTC, 큐비클용 단로기나 접지장치의 조작기에 적용도 하고 있다.

라. 보수지원, 고장점 표정용 센서

전기설비의 보수업무를 합리화하면 종래순시점검, 정기점검으로 얻어지는 설비자료를 자동적으로 채취하고 판단하는 것이 필요하다. 이를 위해 각 기기에 각종센서를 취부하여 기기상태를 감시하는 것으로 한다.

마. 전송 Network의 표준화

기기에 취부되고 있는 각종센서에서 정보는 광전송로를 통해 보수지원 운전지원 등의 자료처리 장치에 전달된다. 이 이후 센서 샘플링 자료는 한층 정밀 대량으로 되는 것이 예상되므로 고속 대량전송이 가능한 Network가 필요된다고 고려된다. 또한 전송망은 보호, 제어, 표시감시 등의 기능이 다른 각종 제어장치가 접속되어가고, 다른 기업의 장치도 접속되어지므로 인터페이스 및 전송 프로토콜의 표준화 통일이 필요하게 된다. 따라서 관계업계에서는 표준화를 요망하고 있다.

바. 변전소 시스템의 인공지능화(AI)

현재 보수지원, 운전지원에 있어서 논리판단은 각 센서 정보를 경험에 근거한 추론에 의존하여 시퀀스적인 처리가 행하여지지만, 최종적으로는 인간에 위임하고 있다. 시스템 감시 제어계의 복잡으로 나타나는 조작실수 및 전문가의 필요에 대처하기 위해 지원 레벨의 기능에서 계통 시스템의 자동복구 기능이 필요하게 된다고 고려된다. 여기서 Expert 시스템과 신경망 네트워크 등의 AI기술이 도입되는 가능성이 나타나고 있다.

전력수요와 사회정세에서 보면 이 이후의 변전기술을 전력공급의 품질향상을 담당하는 변전기기의 고신뢰도화와 보수합리화 정도를 나타내는 절감화 효과 확대의 2개의 방향으로 진보하고 있다고 고려된다. 전 가스절연화 및 축소화, 제어장치 조작기구의 고신뢰도화, 보수지원, 고장점 표정에 관해서는 실용화가 시작되고 있고, 전송 Network의 표준화, 변전소 시스템의 인공지능화도 멀지 않은 장래에 실용화 될 것으로 사료되지만 아직은 많은 문제점을 포함하고 있다.

그러므로 장래에 변전기기들이 현재와는 크게 달라지므로 이 분야에 종사하는 사람들은 미리 이러한 변화에 대응할 수 있도록 준비가 되어야 할 것으로 사료됩니다.

**산업경쟁력의 강화는 영업비밀의
보호에서 시작됩니다.**