



# 건전도 평가기반의 차별화된 변전설비 관리 체계 도입



이 강 수  
한국전력공사 송변전전략실 차장

## 1. 개 황

전력수요가 증가함에 따라 변압기와 같은 변전설비의 사용이 증가되고 있다. 전력 품질확보 측면에서 노후화된 기자재의 성능 안전 및 신뢰도 확보는 중요한 관리요소로

부각되고 있으며, 재정적 투자 증가와 함께 기술의 고품질 성능 요구는 대부분의 전력회사(Utility)들에게 변전설비에 대한 사실적인 상태 평가를 진행하도록 요구하고 있다.

지금까지 한전에서는 변전설비의 점검 및 교체에

있어서 주로 TBM(Time Based Maintenance)방식을 적용하여 주기가 도래한 시점에 일괄적으로 점검 및 교체를 시행해 왔다.

가령 개폐장치의 정밀점검 주기는 7·16·22년, 변압기의 경우 3~5년에 1회 보통 점검을 시행하고, 교체 주기는 개폐장치 20년, 변압기 30년으로 일정기간 사용 후 일괄교체를 시행하는 방식이다.

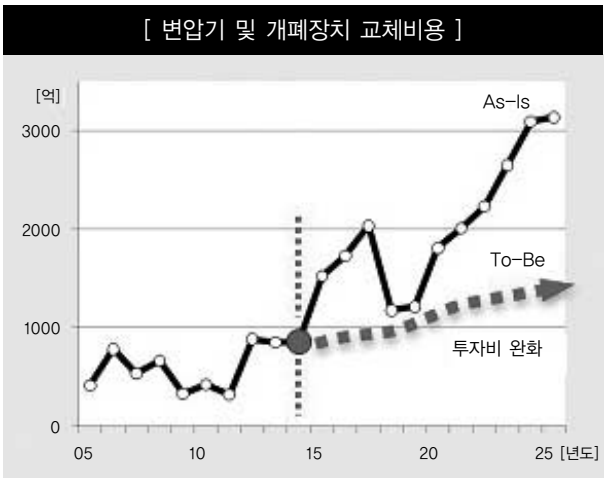
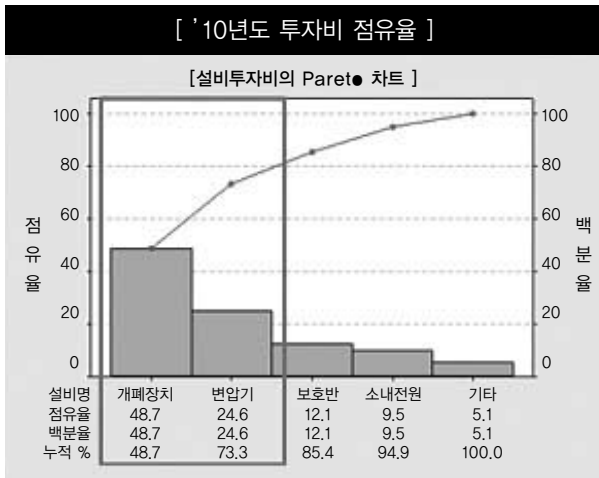
하지만 이러한 TBM 방식은 각 설비의 운전 상태·환경 등에 따라 설비의 상태가 서로 상이하다는 점을 고려하지 않는 것으로 설비의 효율적인 관리 및 과다한 투자재원 마련에 대한 어려움을 야기시키고 있다.

한전의 경우 TBM방식으로 설비교체를 계속 시행할 경우 그림 1에서와 같이 2015년 이후부터는 변압기 및

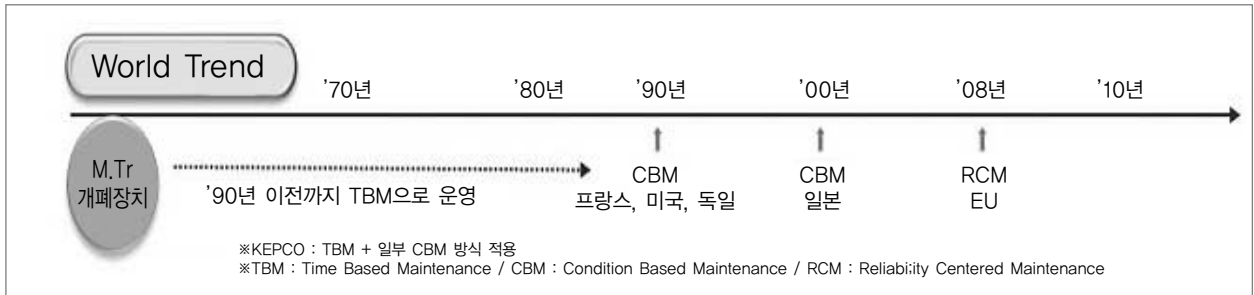
개폐장치의 교체 주기가 도래하는 설비가 급격히 증가하여 설비교체를 위한 투자비가 매우 큰 폭으로 증가할 것으로 전망되어 투자방식의 획기적인 개선이 필요한 실정이었다.

구체적으로 변전설비 투자비의 73%를 점유하고 있는 변압기와 개폐장치의 경우 변압기는 현재의 12.3배, 개폐장치는 2.6배 정도 투자비가 증가될 것으로 예상된다.

이와 같은 문제점 해결을 위하여 이미 해외 전력사에서는 CBM 또는 RCM에 의한 설비 관리기법을 도입하고, 상태진단 결과에 따라 선별적인 설비관리를 시행하여 장기운전설비에 대한 신뢰도 향상을 시도하고 있다.



[그림 1] 변전설비 보강예산 투자전망 분석



※ RCM : 설비관리기법의 하나로 설비의 각 부품 단위별로 고장 해석 및 성향분석을 통해 부품의 교체시기를 사전에 판명, 교체함으로써 설비수명을 연장한다.

[그림 2] 설비관리기법의 세계적인 Trend

특히 장기 노후설비를 다량 운영하고 있는 유럽지역의 전력회사에서는 예방정비 및 설비 유지보수 기술 개발과 더불어 CBM, RCM과 같은 과학적인 설비 관리기법을 90년대부터 도입하여 각 설비의 상태에 따라 차별적으로 관리하고 성능이 저하된 설비를 개선하는 기술을 지속적으로 연구해 오고 있었다.

이에 지난해 한전에서라도 변전설비 건전도 평가 TDR 수행을 통해 변압기 및 개폐장치의 건전도에 영향을 주는 핵심인자를 도출하고, 이를 조합하여 수치로 정량화시켜 해당 설비의 상태를 판정한 다음 그에 따른 Action Plan을 제시할 수 있도록 건전도 평가 시스템(변압기, 개폐장치 대상)을 구축, 올해부터 적용하고 있다.

이로써 CBM 기반의 설비유지 보수 및 CBM & RCM 기반의 수명판정 기반을 마련 할 수 있게 되었다.

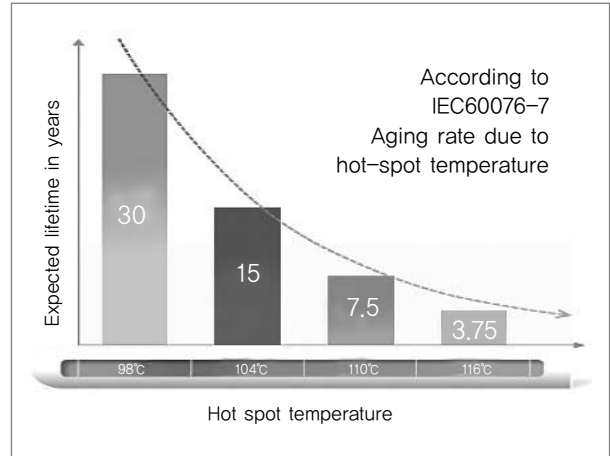
## 2. 현 황

### 가. 변압기 수명 한계에 관한 이론적 배경

전력용 변압기의 수명은 일반적으로 ‘권선 절연지의 기계적 강도가 저하하고 잠재적인 파손 확률이 높아진 상태’ 또는 ‘운전 시 허용할 수 있는 고장발생 위험을 초과하는 시점’으로 정의한다. 이러한 수명을 판정하기 위해서는 절연지의 한계수명 평가와 변압기의 상태평가를 필요로 한다.

최근 변압기 절연수명에 관한 활발한 연구와 시험을 통하여 절연지 수명의 손실을 판정하는 기법이 크게 발전되었다. 절연물의 열화는 온도, 수분함유량, 산소 함유량의 시간의 함수이다. 이에 따라 최근 개발된 변압기는 절연물 열화에 대하여 수분과 산소함유량의 영향이 최소화 되도록 개발되어 왔다.

그러나 대부분의 변압기에서 온도 분포는 균일하지 않고 보통 핫스팟 지점이 가장 심하게 열화 되기 때문에



[그림 3] 핫스팟에 의한 변압기 기대수명 변화

열화 평가에서 핫스팟에 의해 발생하는 열화를 고려하는 것이 일반적이다.

변압기의 절연열화는 시간에 대한 온도의 누적 효과에 영향을 크게 미치기 때문에 일정하게 변압기 부하를 제어하여 운전하고 있는 상태에서도 변압기 절연물의 잔여수명을 아주 정확하게 예측하는 것은 불가능하다.

따라서 여기에서의 ‘수명’은 실제 변압기 수명이 아니라 계산에 의해 얻어진 절연지의 수명을 의미한다.

#### (1) 절연지 잔여수명 예측

절연지의 잔여수명 계산을 위한 직접적인 방법으로 평균 중합도 분석 방법이 있으며, 간접적 방법으로는 핫스팟 계산 알고리즘에 의한 절연지 잔여수명 예측 방법이 있다.

평균 중합도(DP) 시험은 변압기에서 사용되는 절연지의 절연열화를 정밀하게 측정하는 방법으로 이용되며, 절연지의 열화 정도는 셀룰로오스(Cellulose) 중합체의 차수에 의해 설명되어진다.

셀룰로오스 절연 열화 및 이에 따른 기계적 강도의 감소는 변압기의 기계적 수명을 제한하는 중요한 요소 중 하나이다.

평균 중합도(DP) 시험을 위해 적절한 위치에서의

[표 1] 절연지 평균중합도(DP) 분석

변압기	사용기간	중합도	중합잔율	상태판정	비고
양평S/S #4	22년	672	63%	양호	결선조정

[표 2] 30년 이상 장기운전 변압기 핫스팟 분석

구 분 (154kV)	서대전 #2M.Tr	강동 #1M.T	여의 #3M.Tr	순천 #4M.Tr	동수원 #2M.Tr	광장 #1M.Tr	광장 #2M.Tr	남해 #1M.Tr
잔여수명	71%	61%	66%	88%	82%	91%	88%	92%

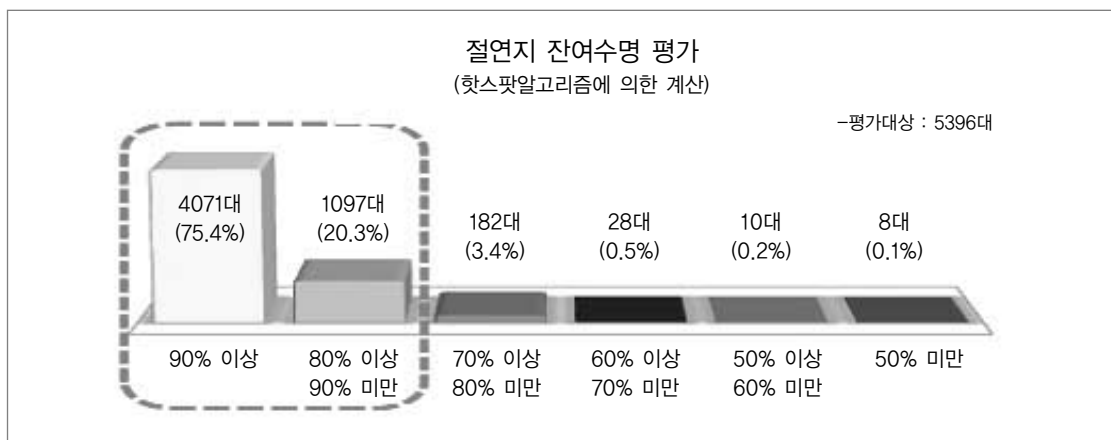
구 분 (345kV)	영서 #1M.Tr	영서 #3M.T	동서울 #1M.Tr	동서울 #2M.Tr	동서울 #4M.Tr	북부산 #1M.Tr	북부산 #2M.Tr	신포항 #2M.Tr
잔여수명	92%	90%	91%	92%	90%	93%	94%	84%

절연지 샘플 수집이 필요하며 평균 중합도(DP) 값은 변압기 제작사에 따라 다를 수 있다. 신품 절연지일 때 약 1,200 정도의 평균값을 가지며, 상당부분 열화가 진행된 절연지일 경우 100 이하의 낮은 값까지 내려간다.

일반적으로 평균 중합도(DP) 값이 200일 경우, 셀룰로오스 절연수명은 한계에 도달하여 절연지는 부서지기 쉬운 상태가 되고, 변압기는 인장강도의 손실에 의해 유용한 수명의 한계에 도달한 것으로 해석하고 있다.

절연지 평균중합도(DP) 분석기법을 활용하여 20년 이상 장기 사용한 양평변전소의 철거 변압기를 대상으로 절연지 수명을 진단한 결과 중합잔율이 63%로 나타나 수명연장 가능성이 높은 것으로 분석되었다.

또한 직접적인 방법인 평균중합도 분석의 현실적 어려움을 극복하고 절연지 잔여수명을 예측할 수 있는 대안으로 핫스팟 알고리즘을 활용한 절연지의 잔존수명 예측 기법을 적용할 수 있다.



[그림 4] 핫스팟 분석기법에 의한 변압기 절연지 수명분석

이를 위해서는 신뢰성 높은 시스템 구현을 위해 현장 외기온, 실시간 부하, 설비 특성에 맞는 시험 값 등의 정확한 데이터 수집 환경 구축이 필요하다.

한전에서 30년 이상 운전한 변압기를 154kV 및 345kV 전압별로 각각 8대를 발췌하여 핫스팟 알고리즘 계산식으로 절연지의 잔여수명을 분석한 결과 표 2와 같이 절연지의 잔여수명이 154kV 변압기는 약 80%, 345kV 변압기는 약 90% 수준으로 사용연수에 비하여 매우 양호한 상태로 분석되었다.

또한 한전에서 보유하고 있는 전체 변압기를 대상으로 핫스팟 알고리즘에 의해 절연지 잔여수명을 평가한 결과 그림 4와 같이 95% 이상이 절연지 상태가 대체로

양호한 것으로 나타나 성능개선을 통한 수명연장이 가능할 것으로 분석되었다.

(2) 변압기 상태평가 기술

변압기 상태평가 기술은 명판정보 및 시험결과를 이용하여 각각의 고장 메커니즘을 분석하고 상대적인 위험도를 기준으로 운전 중인 변압기들의 고장 위험도 순위를 설정하는 것이다. 고장의 위험도를 기반으로 변압기 상태를 숫자로 표시하면 사용자가 인식하기 용이하다는 장점이 있다.

절연열화 측정, 절연유 가스분석, 열화생성물(퓨란분석), 절연유 품질분석, 권선변형진단(SFRA), 부분방전(PD) 측정 등과 같은 변압기 상태 측정 기술의 발달과 더불어

[표 3] 변압기 건전성 평가를 위한 핵심인자

구 분		핵심인자(Key Factor)
열화 요인	열적 Stress	과열개소
		부하전류
		HotSpot 분석(절연지 잔여수명 예측)
		평균중합도(DP), 퓨란분석
		유중가스 분석
	기계적 Stress	OLTC 동작횟수
		고장전류 차단횟수
	유전체 Stress	PD(부분방전)
	환경적 Stress	절연유 품질분석
		환경조건
복합적 Stress	유보존방식	
설비 이력	고장 이력	사용 년 수
		고장건수
	점검 실적	TM실적
		절연열화(DOUBLE)
		권선변형진단(SFRA)
		절연저항
		전압비
		여자전류
		단락전류
OLTC 변형진단		

변압기 상태를 기초로 하여 위험도를 평가함으로써 변압기의 수명 한계를 판정하는 기법이 활발히 연구되고 있다. 전력용 변압기 수명 평가를 위한 핵심 인자를 도출하여 변전설비 건전성 평가 시스템 알고리즘을 완성하는데 이러한 방법들을 적용하였다.

#### 나. 변압기 건전성에 영향을 미치는 핵심인자 선정

전력용 변압기의 상태관리를 위해 많은 측정 기술들이 개발되고 있으며, 이러한 측정 기술들을 활용한 변압기의 위험도 또는 상태를 평가하는 기술 개발이 활발해지고 있다. 그러나 특정한 일련의 하나의 시험이 전력용 변압기의 전체적인 신뢰도를 보장할 수 없기 때문에 하나의 문제점을 진단하기 위해서는 여러 가지 평가 기법들이 동원되어 함께 해석되어야 한다.

건전도 평가 시스템에서는 절연지 잔여수명 평가 기법과 여러 상태진단 측정 기법들을 고려하여 변압기의 위험도 또는 상태를 평가하기 위해 열화요인 그룹 4가지 항목, 설비이력 그룹 2가지 항목으로 나누고 각각의 핵심인자를 표 3에서와 같이 선정하여 변압기 설비 관리의 핵심지표로 삼고, 건전도 평가 알고리즘의 입력 Data로서 개별 변압기 기본 자료로 활용했다.

#### 다. 개폐장치의 열화특성

개폐장치는 여러 기기들로 구성된 기기본체와 이를 구동시키는 조작부 등으로 구성되며, 조작부의 사고·장해는 입력계통의 혼기·혼유 등의 원인에 의해 사고 발생률이 높고, 기기본체의 결함은 도전성 파티클의 혼입발생, 도체의 접촉 불량, 스페이서의 불량 등이 있다. 사용 년 수 및 주변 환경, 사용부하 조건 등에 의한 기기 절연 재료의 열화로 절연과파 등 사고의 위험이 증가하게 된다.

개폐장치 설비의 열화 종류는 크게 4가지로 구분할

수 있으며, 이들은 열적열화, 전기적 열화, 기계적 열화, 환경적 열화로 구분할 수 있다.

#### ■ 열적 열화

기기를 구성하고 있는 소재에서 온도가 상승하게 되면 화학반응을 촉진하여 소재 고유의 성능을 잃는 현상이다.

열적 열화는 패킹 또는 스페이서 재료의 연화, 절연물의 열화, 접촉자의 소모량에 의한 열화 등을 지칭한다.

#### ■ 전기적 열화

개폐장치 도전부 전체에 걸쳐 이상적인 평등자계를 유지한다는 것은 불가능하다.

이러한 불평등 전계 상태에서 일정조건에 도달하게 되면 부분방전이 발생하게 된다. 부분방전에 의한 절연 열화 메카니즘으로는 하전입자에 의한 절연물 표면에 충격을 주게 되어 분자구조를 흐트러지게 하거나 산화 반응을 일으키고 이들 충돌에 의해 생성되는  $O_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  등이 산화작용을 일으켜 절연재료를 열화시킨다.

#### ■ 기계적 열화

기계적 응력이나 진동, 열팽창 계수 차에 의한 기계적 응력, 대전류에 의한 전자력 발생 등에 의해 정상적 분자구조 상실을 가져오며, 이들은 재료의 기계적 특성을 저하시킨다.

#### ■ 환경적 열화

전류 아크에 의해  $SF_6$  가스는 분해되며 아크 소멸 후 온도가 낮아지면 분해 가스는 다시 재결합되어  $SF_6$  가스로 되돌아간 이 과정에서 일부 분해가스는 미량 수분과 반응하여 금속재료나 절연재료에 부착하여 열화를 촉진시킨다.

또한 개폐장치 설치 장소에 따라 강우, 산업공해, 염분, 직사광선 등에 의해 기기표면이 부식된다.

뿐만 아니라 이들 환경적 요인에 의해 제어회로 접점에서  
의 부식이나 기기표면의 도료를 열화시켜 기기의 고장  
을 유발하는 경우가 있다.

**라. 개폐장치 건전성에 영향을 미치는 핵심인자 선정**

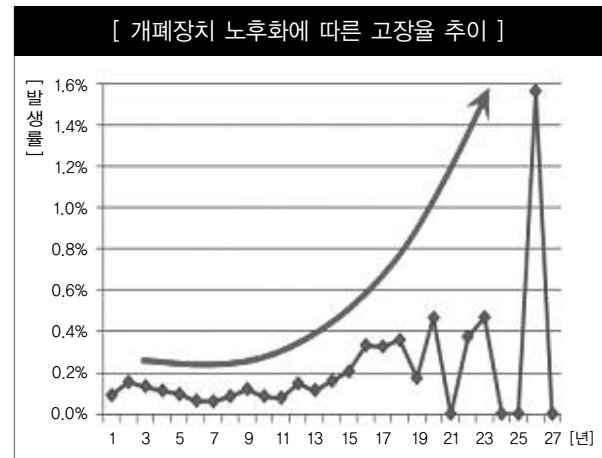
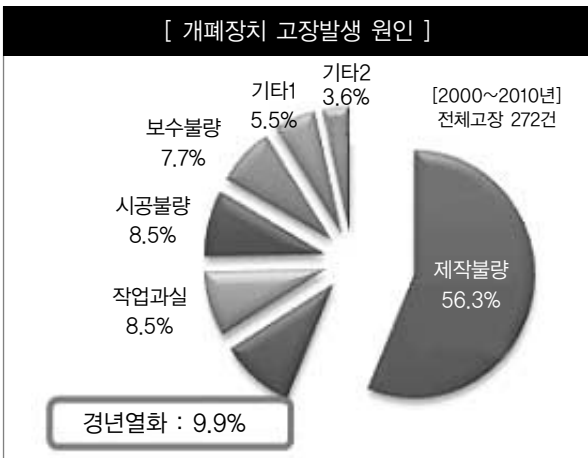
개폐장치의 정확한 상태 판정에 필요한 핵심 인자를  
도출하기 위해 최근 10년간의 고장패턴을 분석한 결과  
그림 5와 같이 경년열화에 의한 고장이 약 10%로 높은  
비율을 차지하였으며, 장기운전 노후화에 따른 고장률이  
급격히 증가하는 추이를 확인할 수 있었다.

또한 경년열화에 의한 고장부위가 그림 6에서와

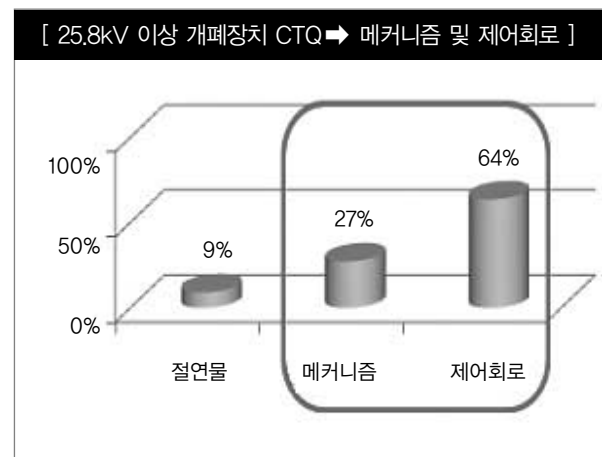
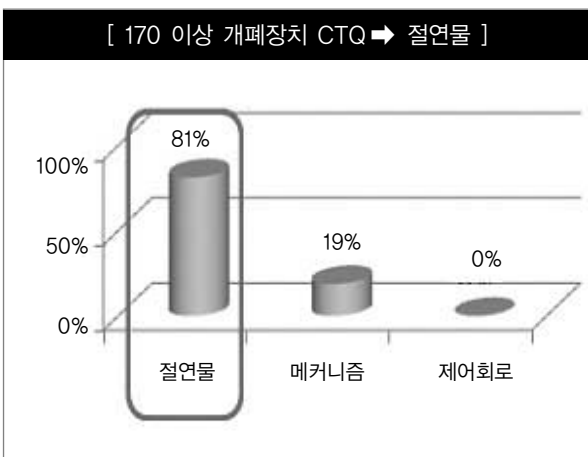
같이 전압별로 상이하게 나타났다.

170kV급 이상 개폐장치는 절연물에 의한 고장이 약  
81%이었고, 25.8kV급 개폐장치는 메커니즘과 제어회로에  
의한 고장이 약 91%를 차지하는 것으로 나타났다.

이외에 개폐장치의 핵심인자 도출을 위하여 20년 이상  
장기 운전한 절연물을 발취하여 절연성능에 대한 신뢰성  
분석과 전문가 기술자문, 각종 해외논문 분석 등을  
통하여 표 4와 같이 개폐장치의 건전도에 영향을 미치는  
핵심인자를 도출하였다.



[그림 5] 개폐장치의 최근 10년간 고장발생 원인 분석



[그림 6] 경년열화에 의한 전압별 고장부위

[표 4] 개폐장치 건전성 평가를 위한 핵심요소

구 분		핵심인자(Key Factor)
열화 요인	열적 Stress	과열개소
		부하전류
		차단전류
	기계적 Stress	투입/개방 동작횟수
		고장전류 차단횟수
	전기적 Stress	PD(부분방전)
		SF <sub>6</sub> 가스 순도
		SF <sub>6</sub> 수분량
		SF <sub>6</sub> 순도
	환경적 Stress	환경조건(옥내, 옥외)
중요도(스위치야드, 중요고객 등)		
복합적 Stress	사용 년 수	
설비 이력	고장 이력	고장건수
		TM실적
	점검 실적	절연저항
		접촉저항
		Trip시간
		Close시간
		개 리 차
		동작특성

마. 핵심인자별 가중치 결정

핵심인자의 가중치 산정은 고장 자료의 신뢰성 및 자료 부족으로 정상적인 평가의 한계를 극복하고 최적의 가중치 결정을 위하여 핵심인자별 위험도를 평가하였다.

핵심인자별로 고장 영향의 크기, 고장 방지의 취약성, 불량발생 빈도, 계통에 미치는 영향, 복구의 지연성 등 5개의 구분에 대해 등급을 5단계(Very High, High, Normal, Low, Very Low)로 나누고 이를 개별 핵심인자에 대해 등급별 점수  $M_{ij}$ 를 각 구분별 Output Ranking  $N_{ij}$ 에 곱하여  $i$ 번째 해당 핵심요소의 가중치를 계산한다.

Output Ranking은 각 구분별 건전도와의 연관성을 점수화 한 수치이며, 식은 다음과 같다.

$$W_i = \frac{\sum_j (M_{ij} \times N_{ij})}{\sum_j (M_{ij} \times N_{ij})} \times 100$$

예를 들어 전산가가 고장에 미치는 영향의 크기가 High(8점)이고, 고장방지의 취약성은 Low(4점)이며, 불량발생의 빈도가 Low(4점), 계통에 미치는 영향이 High(8점), 복구지연성이 Normal(6점)이라면 핵심인자의 가중치 종합점수는 각 구분별 등급점수와 Output Ranking을 곱한 180점(=(8×10)+(4×8)+(4×6)+(8×4)+(6×2))이  $\sum_j (M_{ij} \times N_{ij})$ 가 된다.

이를 각 핵심인자별 합계점수로 나누어 주면 가중치가 계산된다.



[표 5] 위험도 항목에 대한 계수

구 분	Very High	High	Normal	Low	Very Low	Output Ranking
고장 영향의 크기	10	8	6	4	2	10
고장 방지의 취약성	10	8	6	4	2	8
불량발생 빈도	10	8	6	4	2	6
계통에 미치는 영향	10	8	6	4	2	4
복구 지연성	10	8	6	4	2	2

[표 6] 우선 순위에 따른 가중치 설정

가중치		우선 순위		비 고
W <sub>1</sub>	위험도 평가	$\alpha_1$	1	—
W <sub>2</sub>	제작사 의견	$\alpha_2$	1	가장 높은 전문가 집단
W <sub>3</sub>	사업소 의견	$\alpha_3$	0.9	중간 수준의 전문가 집단으로 많은 표본수
W <sub>4</sub>	전력연구원 의견	$\alpha_4$	0.8	높은 수준의 전문가 집단이나 적은 표본수

평가군은 변전소 현장실무자, 변압기 제작사, 변압기 관련 연구기관 등으로 구성하였다.

각 군별로 계산한 가중치를  $W_{ij}$ 라 할 때, 각 군별로 전문성을 평가하여 우선순위를 표 6과 같이 설정하고 이를 이용하여 핵심인자의 최종 가중치  $W_i$ 를 다음 식과 같이 구하였다.

$$W_i = \frac{(\alpha_1 \times W_{1i}) + (\alpha_2 \times W_{2i}) + (\alpha_3 \times W_{3i}) + (\alpha_4 \times W_{4i})}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}$$

### 바. 건전도 평가 알고리즘 구현

설비 건전도 평가 모듈에서는 운전현황, 설치형태, 점검/분석 데이터 및 진단요소별 상태판정 모듈의 결과를 바탕으로 개별 설비의 건전도를 계산한다.

건전도 점수의 산식은 아래와 같다.

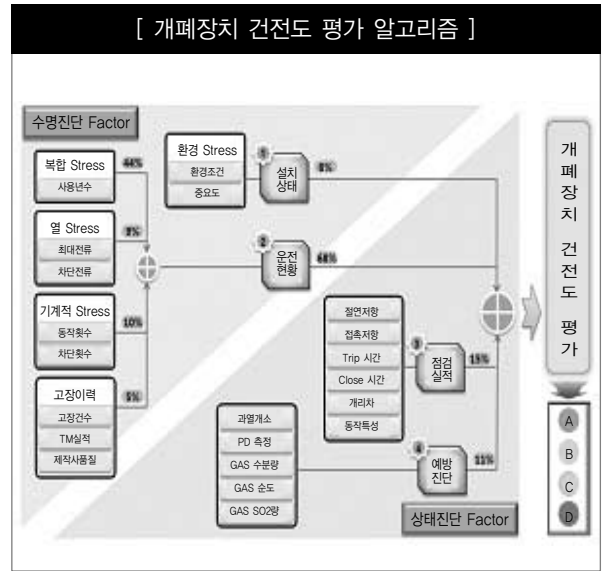
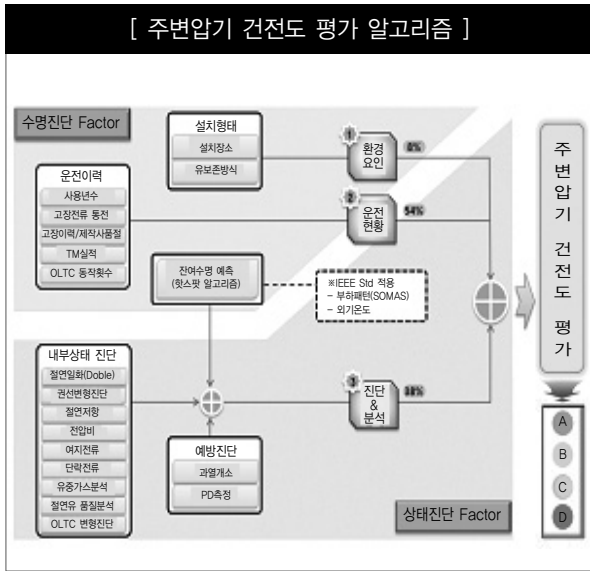
$$\text{건전도 점수} = \sum_i \beta_i W_i$$

$W_i$ 는 각 핵심인자별 변압기 건전도에 미치는 가중치이며, 가중치의 합은 100이 되도록 하고 핵심인자가 건전도에 미치는 영향이 클수록 100에 접근하며, 영향이 작을수록 0에 접근하도록 설정한다.

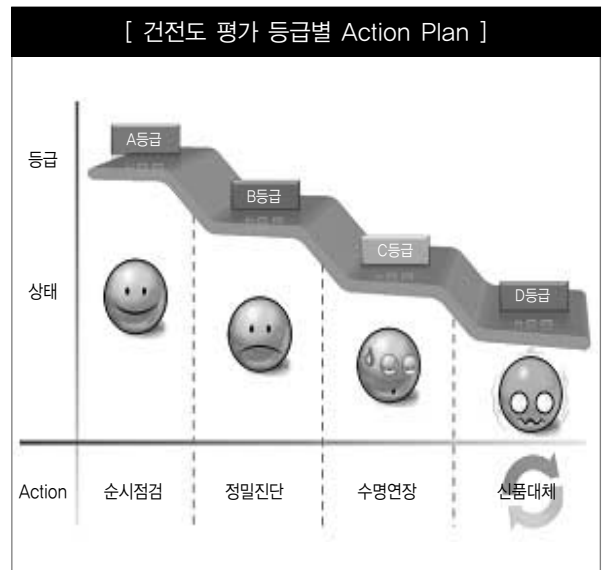
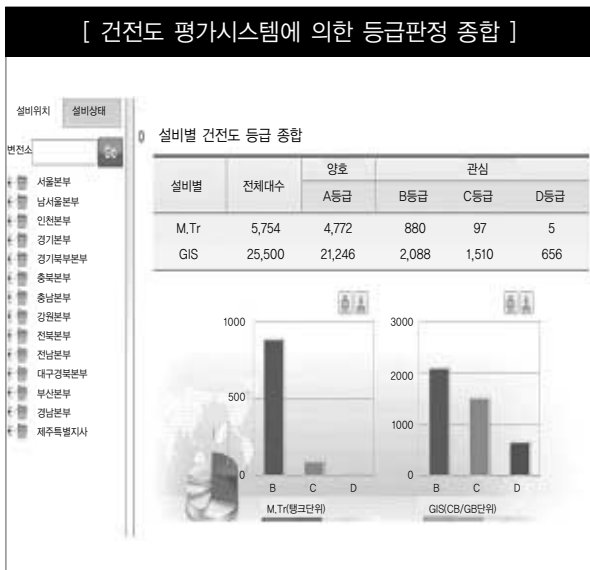
$\beta_i$ 는 각 핵심인자별 상태점수로서 0~1점 사이의 점수를 부여한다.

핵심인자의 수치가 건전도에 긍정적일수록 1에 가깝고, 부정적일수록 0에 가깝게 건전도 평가 모듈에서 설정한다.

예를 들어, 환경요인 중 설치장소의 경우, 옥내일 때 눈, 비, 바람 등의 환경에 의한 악영향이 옥외의 경우보다



[그림 7] 변전설비 건전도 평가 알고리즘



[그림 8] 건전도 등급별 Action Plan

낮으므로 옥내는 1, 옥외는 0으로 설정할 수 있다. 또한 사용 년 수의 경우 오래될수록 열화가 진행하므로 신제품일 경우를 1로, 15년 사용했을 경우 0.5, 30년 이상 사용했을 경우 0점으로 설정한다. 그리고 점검/분석 데이터의 전산가가 0.1 이하이면 1로, 0.1~0.3이면 0.5로 0.3

이상이면 0으로 설정한다.

또한 설비의 기초 Data로 알고리즘을 시뮬레이션한 결과를 통계적으로 분석하여 평가점수별 건전도 등급을 부여하고 그에 따른 점검-진단-수명연장-신품 교체의 4가지 Action Plan을 그림 8과 같이 결정하였다.

### 3. 전 망

변전설비 건전도 평가시스템 분석결과에 따른 변압기 및 개폐장치 전체 상태를 계수화하여 정량적으로 평가함으로써 성능저하 및 노후화 정도에 따라 차등화된 교체 또는 성능개선을 시행함으로써 변전설비 투자비를 절감 가능케 하는 Condition-Based Management로의 변전설비 관리기법에 대한 전환의 기틀을 마련하였다.

현재 한전에서는 기존의 설비 투자 방안과 올해부터 건전도 평가 시스템의 설비별 등급 부여를 통한 결과를 바탕으로 설비투자 계획을 수립하여 적용하고 있다.

건전도 평가 기반의 차별화된 설비관리를 통해 집중된 투자시점 완화는 물론 효율적인 설비투자를 통하여 장기운전 설비의 신뢰도 향상과 대폭적인 고장예방이 가능할 것으로 판단된다.

향후 신뢰도 있는 고장데이터 추가 확보와 상태판정 핵심인자에 대한 체계적인 데이터 관리 및 점진적인 알고리즘 최적화를 통하여 현재의 'TBM+CBM'에서 완전한 'CBM'으로 전환할 수 있는 설비관리 환경을 마련할 계획이다.

이는 시스템의 신뢰성 확보와 더불어 전력진단 기술에 있어서 선진화된 기틀을 만드는데 중요한 요소가 될 것이며, 향후에는 최적화된 건전도 평가 핵심기술을 활용하여 해외 컨설팅 등 해외사업 수익창출에도 크게 기여할 것으로 기대된다. KEA