

## 건전도 평가기반의 차별화된 변전설비 관리 체계 개발

이강수\*, 최영철\*, 구본우\*  
한국전력공사 송변전전락실\*

### Development of Differentiated Substation Facilities Management System Based on the Integrity Evaluation

Kang-Soo Lee\*, Young-Cheol Choi\*, Bon-Woo Koo\*  
Korea Electric Power Corporation

**Abstract** - 변전설비 고장은 대규모 정전으로 이어져 국가 산업계에 엄청난 손실을 유발할 수 있고, 컴퓨터 등 정보화 기기의 확대 보급으로 순간 정전도 허용하지 않으려는 국민들의 요구가 거세어 지고 있다. 본 논문에서는 장기사용 변전설비에 대한 고장한계점을 도출하고, CBM(Condition Based Maintenance) 관리시스템을 구축함으로써 예방진단 데이터와 고장자료를 체계화하여, 향후 설비 교체기준과 설비의 상태를 기반으로 점검을 수행하도록 도대를 마련함으로써 최소 비용으로 효과적인 고장예방과 나아가 변전설비 활용도를 높임에 그 목적이 있다.

#### 1. 서 론

전력수요가 증가함에 따라 변압기와 같은 변전설비의 사용이 증가되고 있다. 전력품질 확보 측면에서 노후화된 기자재의 성능 안전 및 신뢰도 확보는 중요한 관리요소로 부각되고 있으며, 재정적 투자증가와 함께 기술의 고품질 성능요구는 대부분의 전력회사(Utility)들에게 변전설비에 대한 사실적인 상태평가를 진행하도록 요구하고 있다.

지금까지 한전에서는 변전설비의 점검 및 교체에 있어서 주로 TBM(Time Based Maintenance)방식을 적용하여 주기가 도래한 시점에 일괄적으로 점검 및 교체를 시행하여 왔다.

이러한 TBM 방식은 각 설비의 운전상태, 운전환경 등에 따라 설비의 상태가 서로 상이하다는 점을 고려하지 않는 것으로 설비의 효율적인 관리 및 과다한 투자채원 마련에 대한 어려움을 야기시키고 있다.

이와 같은 문제점 해결을 위하여 이미 해외 전력사에서는 CBM(Condition Based Management) 또는 RCM(Reliability Centered Management)에 의한 설비 관리기법을 도입하여 상태진단 결과에 따라 선별적인 설비관리를 시행하여 장기운전설비에 대한 신뢰도 향상을 시도하고 있다.

이에 한전에서도 변전설비 건전도 평가 TDR 수행을 통하여 변압기 및 개폐장치의 건전도에 영향을 끼치는 핵심인자를 도출하고 이를 조합하여 수치로 정량화시켜 해당 설비의 상태를 관정할 수 있도록 건전도 평가 시스템을 구축하여 적용하고 있다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 변압기 수명 한계에 관한 이론적 배경

전력용 변압기의 수명은 일반적으로 “권선 절연지의 기계적 강도가 저하하고, 잠재적인 파손 확률이 높아진 상태” 또는 “운전시 허용할 수 있는 고장발생 위험을 초과하는 시점”으로 정의한다. 이러한 수명을 관정하기 위해서는 절연지의 한계수명 평가와 변압기의 상태평가를 필요로 한다.

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

그러나 대부분의 변압기에서 온도 분포는 균일하지 않고 보통 핫스팟 지점이 가장 심하게 열화되기 때문에 열화 평가에서 핫스팟에 의해 발생하는 열화를 고려하는 것이 일반적이다.

변압기의 절연열화는 시간에 대한 온도의 누적의 정도에 따라 크게 미치기 때문에, 일정하게 변압기 부하를 제어하여 운전하고 있는 상태에서도 변압기 절연물의 잔여수명을 아주 정확하게 예측하는 것은 불가능하다.

따라서 여기서 “수명”은 실제 변압기 수명이 아니라, 계산에 의해 얻어진 절연지의 수명을 의미한다.

##### 2.1.1 절연지 잔여수명 예측

절연지의 잔여수명 계산을 위해서 직접적인 방법으로 평균 중합도 분석방법이 있으며 간접적 방법으로 핫스팟 계산 알고리즘에 의한 절연지 잔여수명 예측방법이 있다.

평균 중합도(DP) 시험은 변압기에서 사용되는 절연지의 절연 열화를 정밀하게 측정하는 방법으로 이용되며 절연지의 열화정도는 셀룰로오스(Cellulose) 중합체의 차수에 의해 설명되어진다.

셀룰로오스(Cellulose) 절연열화 및 이에 따른 기계적 강도의 감소는 변압기의 기계적 수명을 제한하는 중요한 요소로 평균 중합도(DP) 값은 변압기 제작사에 따라 다를 수 있으나 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(Cellulose) 절연수명은 한계에 도달하여 절연지는 부서지기 쉬운 상태가 되고, 변압기는 인장강도의 손실에 의해 유용한 수명의 한계에 도달한 것으로 해석하고 있다.

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

##### 2.1.2 변압기 상태평가 기술

절연열화 측정, 절연유 가스분석, 열화생성물(퓨란분석), 절연유 품질분석, 권선변형진단(SFRA), 부분방전(PD) 측정 등과 같은 변압기 상태 측정기술의 발달과 더불어 변압기 상태를 기초로 하여 위험도를 평가함으로써 변압기의 수명 한계를 관정하는 기법이 활발히 연구되고 있다. 전력용 변압기 수명평가를 위한 핵심인자를 도출하여 변전설비 건전도 평가 시스템 알고리즘을 완성하는데 이러한 방법들을 적용하였다.

##### 2.2 변압기 건전성에 영향을 미치는 핵심인자 선정

건전도 평가 시스템에서는 절연지 잔여수명 평가기법과 여러 상태진단 측정기법들을 고려하여 변압기의 위험도 또는 상태를 평가하기 위해 표 1에서와 같이 핵심인자를 선정하여 건전도 평가 알고리즘의 입력 Data로 활용하였다.

<표 1> 변압기 건전성 평가를 위한 핵심인자

구 분		핵심인자(Key Factor)
열 화 요 인	열적 Stress	과열개소/부하전류/유중가스 분석
		HotSpot 분석(절연지 잔여수명 예측)
		평균중합도(DP), 퓨란분석
	기계적 Stress	OLTC 동작횟수/고장전류 차단횟수
	유전체 Stress	PD(부분방전)/절연유 품질분석
환경적 Stress	환경조건/유보존 방식	
	복합적 Stress	사용년수
설 비 이 력	고장이력	고장건수/TM실적
	점검실적	절연열화/권선변형진단(SFRA)
		절연지향/전압비/여자전류/단락전류
		OLTC 변형진단

##### 2.3 개폐장치의 열화특성

개폐장치는 여러 기기들로 구성된 기기본체와 이를 구동시키는 조작부 등으로 구성되며, 조작부의 사고·장해는 입력계통의 혼기·혼유 등의 원인에 의해 사고의 발생율이 높으며, 기기본체의 결함은 도전성 파티클에 의한 절연파괴, 도체의 접촉불량, 스페이서의

불량 등이 있다. 사용년수 및 주변환경, 사용 부하조건 등에 의한 기기 절연재료의 열화로 절연과피 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.

**2.4 개폐장치 건전도에 영향을 미치는 핵심인자 선정**

개폐장치의 정확한 상태관정에 필요한 핵심인자를 도출하기 위하여 최근 10년간(2000~2010)의 고장패턴을 분석한 결과 경년열화에 의한 고장이 약 10%로 높은 비중을 차지하였으며, 장기운전 노후화에 따른 고장률이 급격히 증가하는 추이를 확인할 수 있었다.  
 또한 경년열화에 의한 고장부위가 전압별로 상이하게 나타났다. 170kV급 이상 개폐장치는 절연물에 의한 고장이 약 81%였고, 25.8kV급 개폐장치는 메커니즘과 제어회로에 의한 고장이 약 91%를 차지하는 것으로 나타났다.  
 이외에 개폐장치의 핵심인자 도출을 위하여 20년 이상 장기운전한 절연물을 발취하여 절연성능에 대한 신뢰성 분석과 전문가 기술자문, 각종 해외논문 분석 등을 통하여 표 2와 같이 개폐장치의 건전도에 영향을 미치는 핵심인자를 도출하였다.

**<표 2> 개폐장치 건전성 평가를 위한 핵심요소**

구분	핵심인자(Key Factor)	
열화 요인	열적 Stress	과열개소/부하전류/차단전류
	기계적 Stress	투입/개방 동작횟수/고장전류 차단횟수
	전기적 Stress	PD(부분방전)/SF6 가스순도/SF6 수분량
	환경적 Stress	환경조건(옥내, 옥외) 중요도(스위치야드, 중요고객 등)
	복합적 Stress	사용년수
설비 이력	고장이력	고장건수/TM실적
	점검실적	절연저항/접촉저항/Trip시간 Close시간/개리차/동작특성

**2.5 핵심인자별 가중치 결정**

핵심인자의 가중치 산정은 고장 자료의 신뢰성 및 자료 부족 등 정성적인 평가의 한계를 극복하고 최적의 가중치 결정을 위하여 핵심인자별 위험도를 평가하였다.  
 핵심인자별로 고장영향의 크기, 고장방지의 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 점수를 각 구분별 Output Ranking에 곱하여 해당 핵심요소의 가중치를 계산하였다.

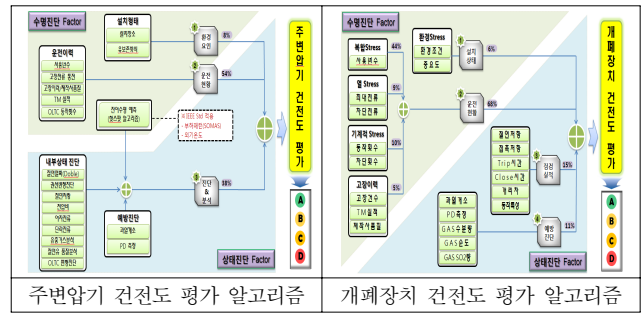
$$W_i = \frac{(\alpha_1 \times W_1) + (\alpha_2 \times W_2) + (\alpha_3 \times W_3) + (\alpha_4 \times W_4)}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}$$

**2.6 건전도 평가 알고리즘 구성**

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

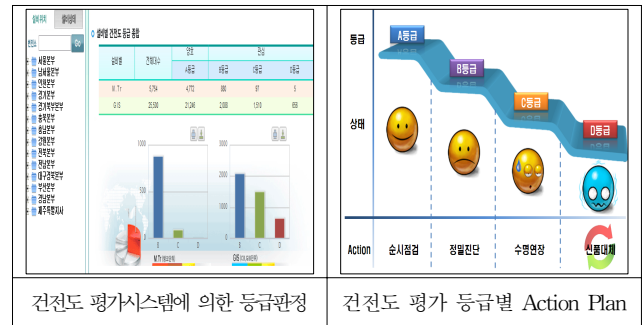
$$\text{건전도 점수} = \sum_i \beta_i W_i$$

$W_i$ 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 낮으므로 옥내는 1, 옥외는 0으로 설정할 수 있다. 또한 사용년수의 경우 오래될수록 열화가 진행하므로 신품질 경우  $\beta_i$ 를 1로, 15년 사용했을 경우 0.5, 30년 이상 사용했을 경우 0점으로 설정한다. 그리고 점검/분석 데이터의 전산가가 0.1 이하이면  $\beta_i$ 를 1로, 0.1 ~ 0.3 이면 0.5로 0.3 이상이면 0으로 설정한다.



**<그림 1> 변전설비 건전도 평가 알고리즘**

또한 설비의 기초 Data로 알고리즘을 시뮬레이션한 결과를 통계적으로 분석하여 평가점수별 건전도 등급을 부여하고 그에 따른 점검-진단-수명연장-신품 교체의 4가지 Action Plan을 그림 2과 같이 결정하였다.



**<그림 2> 건전도 등급별 Action Plan**

**3. 결 론**

변전설비 건전도 평가시스템을 활용하여 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 한전에서 기존의 설비 투자 방안과 더불어 2011년부터 건전도 평가 시스템의 설비별 등급부여를 통한 결과를 바탕으로 한 설비투자 계획을 수립하여 적용하고 있다.  
 건전도 평가 기반의 차별화된 설비관리를 통하여 집중된 투자 시점 완화는 물론 효율적인 설비투자를 통하여 장기운전설비의 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 설비 관리 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 해외 사업 수익창출에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

**[참 고 문 헌]**

[1] 송준엽외 4명, “고장모드 및 영향, 치명도 해석”, 2008  
 [2] 전력연구원, “변전설비 진단기술 연구”, 1998  
 [3] 한국전력기술, “전력설비 상태감시 소프트웨어 개발방법론 세미나”, 2008  
 [4] 기아자동차, “신뢰성 및 보전설비관리 기술”, 2004  
 [5] 기초전력연구원, “RCM 기법을 이용한 배전계통 유지보수의 최적투자 우선순위 결정”, 2008  
 [6] 한국표준과학연구원, “위험도기반 화력발전설비 진단 및 정비시스템 개발”, 2007  
 [7] 기타 : 한국표준협회 및 인터넷 자료 등