유입변압기 고장검출을 위한 감시기반 모델링 기법

최광범*, 어수영*, 김석일*
(주)와이피피*

Model based monitoring for the failure detection of oil immersed transformer

Kwang-Bum Choi*, Soo-Young Eo*, SokIL Kim*
YPP*

Abstract - 유중가스 감시 방식은 직관적이며 높은 정확도를 가져 변압기 건전성 감시를 위한 최적의 솔루션으로 공인받고 있다. 그러나 변압기는 본체외에도 OLTC, 냉각기, 붓싱등 절연유 감시만으로 완벽하게 건전성을 감시할 수 없는 부속장치들이 있으며 이러한 부속장치들의 고장은 변압기 고장의 시발점이 될 수 있다. 또한 절연유에서 이상 징후가 나타났을 때 변압기의 부속장치들의 건전성을 분석하면 고장부위를 예측하여 유지보수를 효율적으로 할 수 있다. 본 논문에서는 변압기의 유중가스 센서 이외에도 별도 외부 센서들을 추가로 이용하여 어떻게 변압기 운영에 유용한 정보를 만들 수 있는지에 대한 방법으로서의 모델링을 논하고자 한다.

1. 서 론

종래의 전력용 유입변압기 건전성 감시는 절연유의 가스분석을 통해 하는 것이 일반적이다. 가스분석법은 추출되는 각 가스량의 비율적 조합을 통해 고장의 종류가 과열에 의한 것인지 방전에 의한 것인지 고장을 유발하는 에너지의 양에 비례하여 분석이 가능하다는 큰 장점이 있다.[1][2] 분석의 방식은 국제 표준에 여러 가지 방법이 제시되어 있으며 가스 분석시 한가지 방법에 의거할 경우보다는 여러 가지 방법을 조합하여 고장 원인을 유추하는 것이 더욱 정확도 높은 분석을 할 수 있게 하여준다.

본 논문에서는 좀 더 면밀한 변압기 건전성 감시를 위해 절연유 감시분석 이외에 여러가지 추가적인 센서들을 사용하여 변압기를 감시할 수 있는 방법에 대하여 제시한다. 추가적인 감시는 단순히 변압기 본체의 건전성을 감시하는 수준에서 벗어나 냉각기의 최적제어, OLTC의 이상 감시등을 가능하게 하며 Hot-spot 계산을 통해 고체절연물의 열화율을 예측하는 기능까지 가능하게 만든다. 또한 정격부하 이상의 부하를 걸어야 하는 유사시에 어느정도 부하수준에서 어느정도 시간까지 운전할 수 있는지에 대한 Dynamic Loading 가이드까지 제시하여 줄 수 있다.

2. 본 론

2.1 종합 감시 모델 구성을 위한 감시 센서 구성

변압기를 종합적으로 감시하기 위하여 사용하는 센서는 유중가스 센서 외에도 변압기 내부와 외부의 온도를 감시하는 온도 센서 종류와 냉각기의 on-off 상태를 감시하기 위한 접점 센서 및 부하량을 감시하기 위한 CT 센서 등이 있다. 이러한 외부 센서들이 결합하여 어떤 감시 모델을 구성할 수 있는지 센서의 조합에 대하여 표1에 나타내었다.

2.2 온라인 변압기 감시 모델

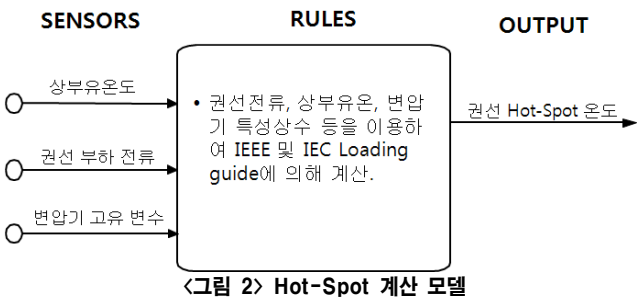
〈그림 1〉 온라인 변압기 모델 개념도

변압기 감시 모델은 여러 가지의 기반 정보를 수학적으로 풀어내어 변압기 운영에 유용한 구체적인 정보로 만들어 내기 위한 방법론이라고 기술할 수 있다. 모델이 수립되기 위해서는 수많은 연구 데이터 및 현장 데이터의 분석이 뒤따라야 하며 데이터가 표준화 되면 특정 함수식으로 수식화 될 수 있다. 그러한 수학모델은 IEEE 혹은 IEC에서 규정한 가이드라인에 따라 수립이 가능하며 이에 따라 가공된 데이터는 변압기의 운영에 도움을 줄 수 있는 직접적인 정보로서 가공이 된다. 그림1에 이러한 모델 수립에 대한 개념도를 나타내었다.

〈표 1〉 감시모델에 요구되는 입력센서 목록

	Analog											Digital		
	Relative Humidity (%RH)	Sensor Temperature (°C)	Top Oil Temperature (°C)	Load Current Winding H (A)	Load Current Winding X (A)	Load Current Winding Y (A)	OLTC Tap Position	OLTC Tank Temperature (°C)	Ambient Temperature (°C)	Bottom Oil Temperature (°C)	Currant Bank Feedback #1	Currant Bank Feedback #2	Status of Cooling Bank #1	Status of Cooling Bank #2	Transformer Energized
Transformer Insulation Models:															
Winding H Apparent Power				R											
Winding X Apparent Power					R										
Winding Y Apparent Power						R									
Winding H Hot-Spot Temperature			R	R											
Winding X Hot-Spot Temperature			R		R										
Winding Y Hot-Spot Temperature			R			R									
Insulation Aging	R	R	R	R											
Moisture and Bubbling	R	R	R	R											
Moisture Content in Insulating Barrier	R	R	R	R						R			O	O	
Dynamic Loading			R	R	O	O			R						
Cooling System Models:															
Cooling System Control			R	R	O	O					O	O	R	R	O
Cumulative Operation Time											O	O	R	R	
Cooling Efficiency			R	R					R				R	R	O
Tap Changer Models:															
OLTC Position Tracking							R								
OLTC Temperature Differential			R					R							

2.2.1 Hot-Spot 온도 계산 모델



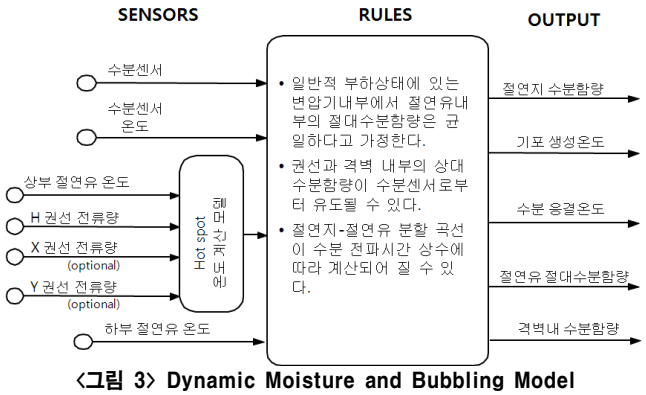
〈그림 2〉 Hot-Spot 계산 모델

절연열화 정도와 bubbling 온도는 변압기의 정격 및 권선온도와 밀접한 관계가 있으며 권선 온도는 대기온도의 상승분보다 더 빨리 상승하면 안된다. 일반적으로 냉각 시스템은 전부하에서 평균 권선 온도가 65℃를 초과하지 않게 설계된다. 그러나 평균 권선온도보다 중요한 것은

Hot-spot 온도이다. Hot-spot 온도는 절연강도에 영향을 주지 않는 광센서를 통해 얻을 수 있으나 제작이 복잡하고 비싸서 특수한 용도 외에는 쓰지 않으므로 권선에 센서를 직접 취부하는 방식으로는 얻을 수 없다. 따라서 IEEE나 IEC Loading Guide에 제시된 방법[3][4]을 사용하여 간접적으로 구해야 한다. 따라서 Hot-Spot 온도 계산 모델이 필요하다. 계산 모델에서 사용하는 변압기 특성정보에는 변압기의 형태, 정격 등에 관한 일반적 정보와 계산에 필요한 winding exponent, winding time constant, 상부유온을 상회하는 hot-spot 온도상승 등급 등이며 이 정보는 변압기 제작사에서 제공하는것이 가장 좋으나 상황이 그렇지 못할 경우 표준에서 제공하는 default 값을 쓸 수도 있다.

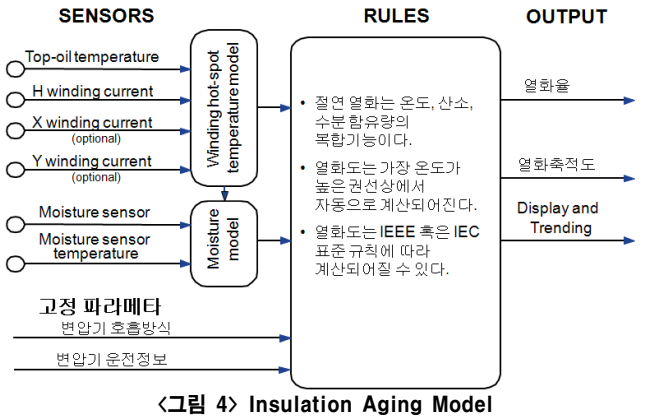
2.2.2 수분과 기포생성 모델

절연유의 수분함량과 변압기내부 고체 절연물은 매우 밀접한 관계가 있으며 특히 오래 사용한 변압기일수록 그렇다. 운영자의 다양한 수분제거 노력에도 불구하고 변압기 내부에 수분의 침투 경로는 매우 다양하며 고체절연물의 열화는 약간의 수분을 만들어내므로 내부적인 수분생성 경로가 있기도 하다. 대부분의 수분은 절연유보다는 절연지에 상존하고 있으며 이 비율은 온도에 따라 달라진다. 수분은 주로 절연 열화를 가속시키고 권선 절연물에서 수증기 기포를 생성하며 절연 장벽의 절연강도를 감소시키기도 한다. 절연지의 수분함량은 직접적으로 측정할 수 있는 방법이 없으며 절연유 수분함량을 통해 간접적으로 계산이 가능하다. 본 모델은 이러한 간접적인 계산 알고리즘이 내장되어 사용되고 있으며 아울러 기포생성 개시 온도까지 추출할 수 있는 계산 모델을 내장하고 있다. 모델은 전술한 Hot-spot 계산 모델의 결과물과 절연유 수분량을 입력으로 이용하며 그림 3에 모델의 요약 그림을 나타내었다.



〈그림 3〉 Dynamic Moisture and Bubbling Model

2.2.2 절연지 열화 모델

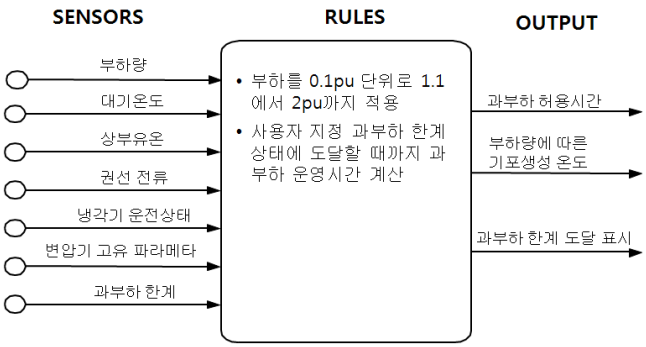


〈그림 4〉 Insulation Aging Model

변압기의 권선절연은 절연유가 함침된 셀룰로오즈 재료성분으로 이루어져 있다. 절연지는 절연의 기능을 만족하면서도 적당한 기계적 강도와 유연성이 요구된다. 절연물이 이런 기능을 수행하기 위해서는 절연지와 프레스보드의 셀룰로오즈 고분자 체인의 길이가 일정 길이 이상이어야 하며 신품 절연물은 보통 1000 - 1200개의 체인길이를 가지고 있다. 시간 또는 높은 온도의 영향으로 인하여 절연물이 노화되고 열화되면서 이러한 체인이 분해되면 요구되는 기계적 강도를 만족시킬 수 없을만큼 약해지며 특정 부분이 분해되더라 하더라도 절연이 약해져 틴간의 단락을 유발하고 사고가 겉잡을 수 없이 커질 수 있는 계기가 된다. 그러나 중요한 사실은 이런 고체 절연물은 열화되었다고 교체하거나 할 수 있는 부속물이 아니며 이는 곧 고체절연물의 수명은 변압기의 수명과 직결될 수 있다고 말할 수 있는 근거가 된다.

이 모델에서 입력은 전술한 Hot-spot 온도계산 모델과 절연지내 수분함량 계산 모델이 사용되며 그 외에 변압기의 호흡 방식이나 운전년수와 같은 몇가지 운전 정보가 같이 사용된다. 그에 대한 출력으로서 고체절연물의 현재 열화도 및 열화 축적 정도를 보여주어 결과적으로 절연물의 잔존수명도 예측할 수 있다. 본 모델을 통하여 제시하는 잔존수명은 IEEE 및 IEC에서 제시하는 일반적인 잔존수명치이므로 참고용으로 사용될 수 있으나 특정 변압기에 적용한다고 해서 절대적으로 신뢰할 만한 수치는 아니다.

2.2.3 Dynamic Loading 모델



〈그림 5〉 Dynamic Loading Model

이 모델은 유사시 변압기의 과부하 운전을 하게 되거나 과부하 운전이 필요한 변압기일 경우에 안전하게 과부하 운전을 할 수 있는 변압의 용량을 계산해 주는 모델이다. 단 이 모델은 단기간의 과부하 운전을 목적으로 하며 어떠한 과부하 운전이라도 높은 Hot-spot을 유기하여 변압기 절연물의 열화도에 크게 영향을 미침을 인지하여야 한다. 모델의 계산은 냉각기의 성능을 최대로 발휘하는 상태에서 이루어지는 것이며 상부 유온과 권선온도의 계산은 IEEE 규격에 따라 이루어진다. IEC 60076-7에도 유사한 계산법이 제시되어 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 변압기 종합진단을 위해 여러 가지 외부센서들을 통해 변압기 운영에 직접적인 도움을 줄 수 있는 데이터를 가공하기 위한 모델링 종류에 대하여 논하였다. 또한 외부센서의 적용 종류에 따라 적용할 수 있는 모델링이 어떤 것인지 제시되었다. 이러한 모델링 기법은 모두 IEEE와 IEC에서 제시한 가이드를 토대로 작성한 것이며 실제 변압기 상태 감시 진단 제품으로 적용되어 있다.

변압기 종합진단 시스템은 경제적인 여러 가지 이유로 인하여 모든 외부 센서를 적용할 수 없을 경우에 현장 상황에 맞추어 선택적으로 구성할 수 있으며 대규모 전력회사에서 이러한 시스템을 적용하고자 할때는 변압기의 중요도에 따라서 서열화를 한 뒤에 서열에 맞는 센서의 수량을 정하여 적용하는 것이 바람직하다.

[참 고 문 헌]

[1] IEEE C57.104 - 2008
[2] IEC 60599 Ed 2.1
[3] IEC 60076-7 Ed 1.0
[4] IEEE C57.91 - 1995
[5] GE - Kelman Transfix plus 매뉴얼