

Schaden spiegel 연재물 : 노화된 기반시설

노화 변압기 (Ageing transformers)

글쓴이 : William H. Bartley¹⁾

전력망의 핵심 요소인 변압기에 특별한 관심이 요구되고 있다. Hartford Stream Boiler사는 지난 20년간의 경향 분석을 통하여 전력 공급에 사용되는 많은 전력 변압기가 노후화 되었고, 가까운 시일 내에 큰 손실을 야기할 수 있다는 경각심을 불러일으킬 만한 결과를 발표하였다.



노화된 기반시설

전기는 공급되는 상품 이상의 가치를 가진다. 그것은 경제의 젖줄이며, 삶의 질에 있어 핵심 기둥이다. 세계가 스마트 기기에 의한 디지털 시대로 나

1) P.E(미국 소방기술사), Munich Re 부속 기관 부사장, 수석 전기 공학자.
The Hartford Steam Boiler 보험사, william_bartley@hsb.com

아가면서 전기에 대한 의존도는 증가하고 있다. 전력 공급 시스템과 전략의 기반 시설 그리고 공익사업 정책은 세계적으로 증가하는 수요와 보조를 맞춰 나아가야 한다. 불행히도, 입법자들과 규제 기관들이 추진하는 소매 경쟁에 있어 공익사업의 최우선 순위는 신뢰성보다는 - 비용 절감과 관련된 것이 - 경쟁력이 되었다.

수 십 년간, 변압기는 Hartford Steam Boiler(이하, HSB)에서 불만 처리가 많이 이루어지는 상위 다섯 가지 제품 중 하나였다. 1991년과 2010년 사이에, HSB는 보상금 지불, 보험이 적용되지 않는 사례를 포함한 수 백 가지의 변압기 고장을 조사하여, 수백만 달러에 이르는 금액을 지불하였다.

이 시기에 보고된 변압기 고장의 주된 요인은 “전선장애”였다. 이 카테고리는 스위칭 서지, 전압 스파이크, 전선 결함/ 섬락 그리고 다른 시설 이상을 포함한다. <표1>은 각 요인별 고장 비율을 드러낸다. 변압기가 전기, 기계 혹은 온도 요인으로 인하여 작동을 멈출 수 있다는 사실을 미리 아는 것을 중대한 손실을 미연에 방지할 수 있게 해준다. 그러나 매우 엄격한 관리 프로그램조차도 변압기 고장으로 인해 발생하는 엄청난 비용을 모두 막을 수는 없다.

<표 1> 변압기 고장의 원인 - 원인별 고장비율



또한, 변압기의 복합적 기술은 빈도 높은 결함 시나리오를 만드는 것을 어렵게 만든다. 그럼에도 불구하고, 흔히, 고장 원인이 되는 것은 변압기의 절연 처리이고, 그것은 날씨, 제품의 품질 또는 품질관리, 그리고 조작 요인에 따른 전기 시스템의 고장이라는 결과를 낳는다.

변압기 고장의 종류

전선 교란

전선서지(또는 전선장애)는 변압기 고장의 첫 번째 원인이다. 그것은 스위칭 서지, 전압 스파이크, 전선결함/섬락 그리고 다른 T&D 이상을 포함한다. 이 카테고리로 분류되는 변압기 고장의 빈도는 서지 보호, 코일 클램핑, 단락 내구성에 더 많은 주의를 기울여야 한다는 점을 암시한다.

절연 결함

지난 20년간 절연열화는 두 번째로 변압기의 빈번한 고장 요인이었다. 이 카테고리는 전선 장애 증거가 없는 고장만을 포함한다. 절연 약화의 원인에는 열분해(열), 산화, 산성도 그리고 수분(절연유에서 수분 제외) 4가지가 있다.

낙뢰

이전의 연구들과 비교할 때, 낙뢰서지는 현저히 줄어들었다. 이것은 카테고리 변화로 인한 것으로, 낙뢰 스트라이크가 확인되지 않는다면, HSB는 서지 관련 고장을 전선장애 카테고리에 포함한다.

전기적 연결

볼트 연결의 부적절한 조임(회전)과 함께 전기적인 연결 기술, 관리상의 결함으로 인한 고장이 이 카테고리에 속한다.

과부하

오직 과부하로 인한 고장만 과부하로 간주된다. 이것은 변압기가 그 명판용량을 초과하는 지속적인 부하를 경험할 때, 생길 수 있다.

이물체로 인한 결함

이 고장은 설치류, 나무 가지, 차량 사고 등의 외부 영향력에 의해 발생한다.

습기

홍수, 파이프 누수, 지붕 누수, 부싱누수로 부품을 통해 탱크로 들어간 물로 인한 고장, 그리고 절연유에 있는 물기.

일반적인 고장 원인 분류만으로도 불만처리를 하는 데 충분하다. 그러나 정확한 고장 시나리오를 준비하고, 그러한 시나리오가 발생하는 것을 방지하기

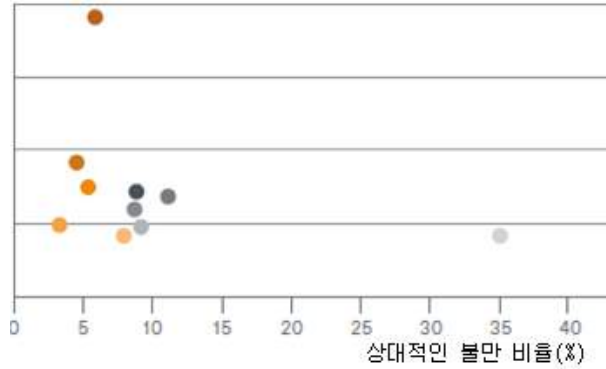
위한 효과적인 방법을 개발하기 위해서는 고장 원인에 대한 더 깊은 분석이 필요하다.

표 1은 상대적인 고장 수치를 보여준다. 변압기 고장의 위험은 고장의 빈도뿐만 아니라 고장의 심각성으로 구성된다.

표 2는 추가 요인을 더 보여준다. 전선장애 카테고리 가장 높은 비율을 차지하고 있지만, 상대적으로 덜 심각한 사고이다. 반면에, 절연액과 절연열화와 같은 요인들이 더 심각한 사건을 발생시키지만 발생 빈도는 더 낮다.

<표 2> 변압기 고장의 빈도/ 심각성

평균 불만 청구 빈도



- 절연액 오염, 약화
- 습기
- 이물체로 인한 결함
- 잠재적 낙뢰
- 과부하
- 연결 미완
- 절연 결함
- 절연 약화
- 낙뢰
- 전선장애-낙뢰아님

전선장애가 가장 빈번한 고장 원인

늙은 변압기는 고장에 더 취약하다.

HSB에서 노화 자체는 1차 요인의 카테고리로 간주되지 않는다. 그럼에도 불구하고, 변압기의 기계적강도와 유전체가 늙을수록 저항 내구성은 줄어든다. 늙은 변압기와 새 변압기는 시스템의 성장으로 인한 스트레스를 양산하고, 부하의 증가를 낳게 된다. 그러나 늙은 변압기는 높은 방사력과 압축력을 견디는 물리적 내구성을 지니고 있지 못하기 때문에 고장이 더 잦다.

노화와 관련된 변압기 고장에서 전도체의 종이 절연체는 단락을 더 이상 견딜 수 없을 정도로 약화되고, 중간 절연 고장이라는 결과를 낳는다. 즉, 전기적 연결에서의 결함은 대개 절연 코팅에 의해서 분리되는 코일 권선 사이에서 생긴다.

또 다른 경우에 반복되는 전기적 장애는 권선 크래핑 압력을 이완시키고, 이것은 단선 발생 가능성을 방지하는 변압기의 능력을 감소시킨다. 크래핑 압

력의 감소와 함께, 코일은 움직이게 되고, 이는 절연지의 마모와 층간 절연 고장이라는 결과를 낳는다.

전기 설비 변압기의 노화는 전 세계가 관심을 가져야 하는 분야이다. 약 100년 전, 최초의 교류 전력 시스템과 변압기가 사용되기 시작하였다. 2차 대전 후, 세계가 체험한 어마어마한 경제 성장과 함께 기본적인 기반 산업 중 특히 전기시설 투자가 확대되었는데, 예를 들어, 미국의 에너지 소비는 1950년 5000억 킬로와트시에서 2000년 3.5조 킬로와트시로 증가하였다. 사용되고 있는 대부분의 변압기는 그들의 현재 생애 주기에서 노화기를 겪고 있다.



1980년 화재로 파괴된 변압기

1973년에서 1974년 무렵, 미국 공익 산업에서의 새로운 변전소 및 변압기 설치가 최고조에 달하였다. 이 기간 동안, 새로운 전력 변압기 용량은 약 185,000 MVA(mega volt amperes)가 추가 되었다. 이들 변압기 크기는 5 MVA에서 1,000 MVA까지의 범위이다. 현재, 그 변압기들은 약 37년이 되었다. 새로운 변압기 설치와 변압기 교체를 위한 예산이 수십 년 간 가장 낮은 수준에 머물러 있다는 사실은 미국 전체 변압기 수의 평균 나이가 계속 증가할 것을 의미한다.

변압기 평균 경과년수가 세계적으로 증가하고 있다. 2020년까지 고장 건수가 현저하게 증가할 것이다.

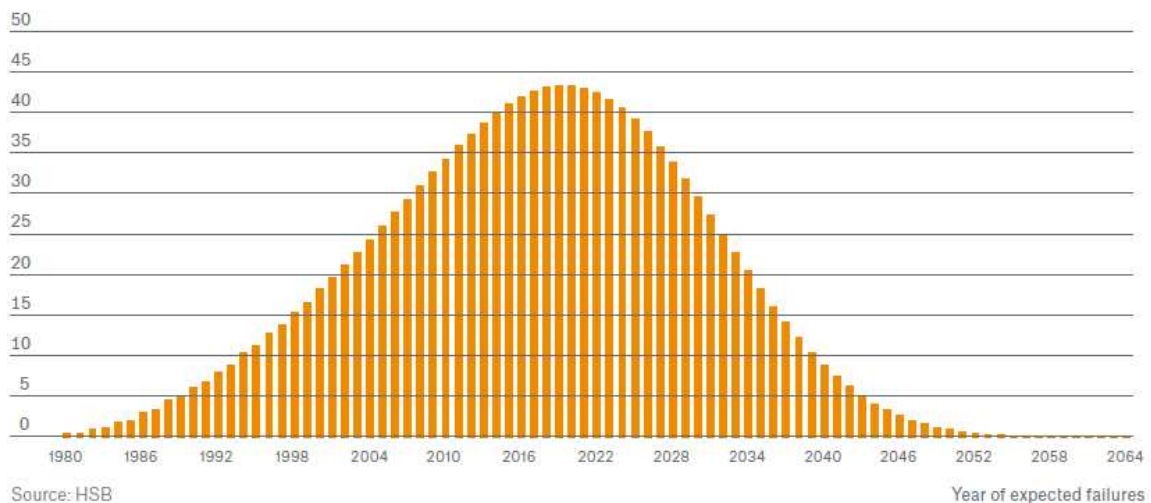
이와 비슷하게, 영국에서는 에너지 활용을 위한 국가 설비(energy utility National Grid)의 설치가 시작되었고, 1952년 전력 변압기는 400 KV 그리고 275 KV를 기록하기 시작하였다. 1966년 변압기 용량이 최고치에 달하였을 때, 총 23,000 MVA의 용량이 영국에 설치되었다. 그러나 그 수치는 1966년 이후, 1989년 공익 산업 사유화시기까지 급격히 떨어졌다. 사유화 이후, 시장 활동의 증가는 또 다시 더 높은 투자를 요구하게 되었다. 오늘날, 영국에서 대다수의 변압기는 36년이 되었다.

고장 빈도 예상의 복잡성

변압기 고장 분포의 적절한 모델을 발견하는 첫 번째 단계는 변압기의 고장 비율을 살펴, 이와 일치한 위험한 기능을 찾아내는 것이다. 변압기 생애는 대개 “육조형 곡선 형태”를 보인다. 따라서 세 번째 단계의 증가 이전에는, 초기에 낮은 위험도와 매우 낮은 위험도의 장기간의 단계가 앞선다. 그러나 실제 불만 신고 데이터는 이 모델이 현실을 정확히 반영하지 못하였고, 변압기 생애의 첫 번째 단계에서는 불만 신고가 거의 없다는 점을 드러낸다. 그래프는 미국에서 작동되는 변압기의 고장 비율이 “t”라는 시기까지의 1964년과 1992년 사이에 구축되었다는 것을 보여준다.

<표 3> 생산품 별 고장 분포

1,000 MVA에서 고장 빈도



변압기 수는 계속 증가할 것이다. 40,000 MVA를 초과하는 고장은 2020년 유럽 최고조에 이를 것으로 예상되었다. 40,000 MVA의 전력이면 4억 이상의

가정에 공급되기에 충분하다.

Perks 위험 공식(Perks' Hazard Formula)과 아이오와 생존 곡선(Iowa Survivor Curves)은 오늘날 수명 모델을 위한 산업에서 널리 사용된다. Hartford Steam Boiler는 Perks Hazard Function을 사용한다. 변압기 고장분야에서 HSB의 오랜 경험과 객관적 공학적 판단은 이들 매개 변수의 근거이다.

위험 함수(단순화된 Perk의 공식에 의해서)

$$H_{(t)} = \frac{\alpha e^{\mu\beta t}}{1 + \alpha e^{\mu\beta t}}$$

: 여기서, α , μ , β 는 정수이고, t 는 시간이다.

달력상의 나이와 절연 열화 사이의 상호 관계는 불확실할 수밖에 없다. 모든 변압기가 똑같이 만들어지는 것이 아니기 때문이다. 간단한 통계 모델 또한 잠재적인 제조상의 차이점을 받아들이지 못하고, 긴 역사를 고려하지도 못한다. 실제로, 그것은 변압기의 달력상의 나이에 근거해 있고, 재료나 디자인 결함을 다루지 않는다. 그러나 이 모델과 변압기 사용은 총 변압기 수에 대한 고장 가능성을 비교적 잘 예측할 수 있게 한다. 이는 생산품 수와 고장 비율의 곱으로 계산할 수 있다.

“ t ” 해에서 (기가볼트 암페어) 고장 수치는 = (고장률) × (남아 있는 생산품 수) 이다.

미국 기반시설 산업 변압기의 고장 사례 중 상당한 수치가 1964년에서 1992년 사이에 이루어졌고, 이것은 공익 산업과 보험 산업이 직면한 문제의 심각성을 시사한다.

고장 비율이 가장 높은 것으로 예상되는 변압기는 1974년 제조된 제품들이다. 여기에 1964년에서 1992년으로 소급하는 변압기의 고장을 추가해 보면 그 문제의 심각함을 알 수 있다. 2020년에는 상당한 비율의 고장이 발생할 것으로 예상된다.

결론

시설담당 기술자에게 가장 어려운 과제는 변압기의 신뢰성을 예측하여, 시기

적절한 방식으로 그것을 교체하는 것이다. 노화되고 있는 시설의 시스템 신뢰도를 유지하는 것과 동시에 시설망의 증가하는 수요를 충족하는 것은 에너지 설비가 변압기를 운영하고 유지 보수하는 방식에 상당한 변화를 요구할 것이다.

출처 : Topics Schaden spiegel. ISSUE 2/ 2011

번역 : 대구경북지부 황효준 주임