

부하통계에 의한 배전용 변압기의 수명손실 산정

정종만, 이병성, 송일근
 한전 전력연구원 배전연구소

Life Loss Calculation of Distribution Transformers with Load Profile statistics

Jong-man Joung, Byung-sung Lee, Il-keun Song
 Power Distribution Research Laboratory of KEPRI, KEPCO

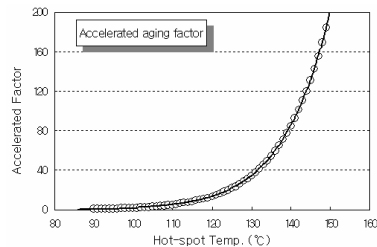
Abstract - 각 계약종별 부하곡선 통계로부터 과부하율에 따른 수명손실을 계산하였다. 75 [kVA] 변압기를 대상으로 하였으며, 변압기 온도 특성은 온도계가 설치된 변압기를 과부하 운전하여 취득된 과부하율에 따른 온도상승 경향을 적용하였으며, 대기온도는 지난 3년 간의 서울 경기지역의 최고온도를 적용하였다. 계산결과에 의하면 현재 적용중인 과부하율 130%로 운전하면 각 계약종별 연간 수명손실값은 산업, 일반, 교육, 주택용 순으로 각각 0.8, 0.89, 0.61, 0.36년 정도의 값을 가지는 것으로 나타났다.

낸 그림이다.

변압기 수명은 변압기 자체 설계수명 뿐만 아니라 사용환경, 부하조건에 많은 영향을 받으므로 정확한 산출은 사실상 어렵다고 할 수 있다. 국외의 경우 변압기 고장 시점까지 단순 운전을 하는 경우가 많아 다양한 통계에 의한 수명자료를 확보하고 있다. 수명을 30년 이상으로 추정하고 있다. 하지만 국내의 경우는 주기적 운전을 하고 있으며, 고장통계 확보가 불충분하여 운영주기 개정이 어려운 실정이다. 하지만 국내변압기의 경우는 수명손실 식을 이용하여 구매사양에서 요구하는 최소한의 성능과 부하통계에 따른 수명을 산정할 수 있을 것이다.

1. 서 론

에너지 소비밀도가 증가하여 배전용 변압기의 사고 과급 범위가 확대되고 있으며, 이로 인한 경제적 손실도 매우 커지고 있다. 더욱이 제조물 책임법(PL: Product Liability) 및 교도의정서의 발효, 윤리경영 부각 등으로 사고과급의 영향은 경제적 손실 이상으로 커지고 있는 추세이다. 특히 주상변압기의 경우 고객에게 직접 전력을 공급하는 설비로서 대부분 인구밀집 지역에서 운영되고 있다. 설비고장이 안전사고로 이어질 가능성이 높으며, 정전피해뿐만 아니라 환경오염 등의 피해가 예상된다. 따라서 운전 시간에 따라 증가하는 사고율에 의한 위험도 증가, 누유에 의한 환경오염도, 고장비용 증가 등을 검토하고, 충분한 성능을 가지는 설계수명 내에서 운영될 수 있도록 하여야 한다.



<그림 1> 온도에 따른 가속열화 계수

지금까지 변압기 점검은 주기적인 육안 점검에 의존하고 있다. 하지만 효율적인 관리와 전기품질 향상 그리고 사고율 감소를 위한 노력이 점점 필요해지고 있다. 산업전반에서도 주기적인(time-based) 유지·보수에서 상태기반(condition-base) 유지·보수 더 나아가 예방적(predictive) 유지·보수로 변화하고 있는 추세이므로 수명손실 산정, 수명평가 등의 기술마련과 실증이 필요하다.

2.2 배전용 변압기 온도상승 특성

절연지 수명곡선을 변압기 수명평가에 적용하기 위해서는 부하운전이력과 그에 따른 최고점온도 특성을 확보하여야 한다. 기성 변압기의 경우 최고점 온도 측정이 불가능하므로 측정이 용이한 절연유 상부온도와의 관계를 확보하는 것이 타당하다.

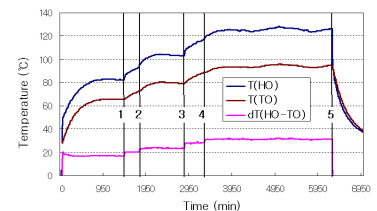
국내 배전계통에서 운영되고 있는 변압기는 약 179만대(2006.12 기준)에 이르고 있으며, 그 중 주상변압기가 약 95%를 차지하고 있다. 그리고 17만대 이상의 주상변압기가 신규로 설치되고 있어, 품질 및 운영의 작은 개선으로도 운영효율의 높은 향상 및 상당한 경제성 확보가 기대된다.

권선내부에 온도센서를 설치한 배전용변압기를 제작하고 온도특성시험을 실시하였다. 취득된 최고점온도 데이터는 정확한 수명손실 계산에 활용될 수 있을 것이다.

2. 본 론

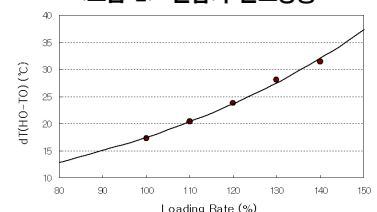
2.1 셀룰로오스 절연지의 수명곡선

변압기 절연지인 셀룰로오스의 절연내력은 열화가 되더라도 크게 저하되지 않는다. 절연지가 열화되어 기계적 특성이 나빠져 진동, 단락사고 등에 의해 손상되어 절연파괴가 발생한다는 것이 변압기의 고장 메카니즘이다.



<그림 2> 변압기 온도상승

변압기의 수명곡선은 절연지의 열 열화에 의한 인장강도의 변화로 나타내고 있다. 열에 의한 물질의 반응은 아레니우스(Arrhenius)의 반응율 이론을 따르고 있어 절연지 수명은 식 1)로 표현된다.



<그림 3> 부하율에 따른 온도

$$Life = A \cdot e^{\frac{B}{T_H + 273}} \quad (1)$$

A, B : 실험 정수
 T_H : 권선내부 최고점(hottest-spot) 온도(K)

식 1)로부터 각 절연지의 수명곡선이 실험적으로 정해진다. 절연지의 수명은 인장강도가 초기의 50%까지 감소하는데 걸리는 시간으로 나타내고 있다. 수명곡선에 의하면 표준대기에서 권선내부 최고점온도가 95°C일 경우 수명이 약20년(180,000시간)이 된다. 이는 설계온도가 지속적으로 유지될 경우에 대한 수명이므로 부하운전에 따라 온도가 변화하면 실제 수명은 운전시간과 다른 값을 가지게 된다.

그림 2는 변압기 권선내부의 온도특성을 나타낸다. 부하율에 따른 변압기 내부의 온도 차이를 측정된 결과로서 HO는 Hot-spot, TO는 Top-oil, dT는 온도차를 각각 나타낸다. 시점 1, 2, 3, 4는 110%에서 140%까지 10%씩 부하율을 증가시킨 것을 나타내며, 시점 5는 전원을 off한 시점이다. dT(HO-TO)의 경향은 일정하였으며, 100% 부하율에서 과열점과 절연유 상부 간의 온도차는 약 17°C 정도의 값을 나타내었다. 그리고 부하율이 증가할수록 지속적으로 증가하고 있어 가속열화에 따

변압기 권선내부 최고점온도가 95°C 이상이 되면 변압기의 수명손실이 수적으로 증가하게 된다. 열화가 가속되어 짧은 시간에 수명이 감소하므로 과부하운전을 제한하고 있다. 그림 1은 온도에 따른 가속계수를 나타

른 수명손실 산정에 활용할 수 있다.

2.3 수명손실 관련 식

정격부하 이하일 경우는 권선의 온도는 동손의 0.8승에 비례하고, 절연유의 온도는 전손실비의 0.8승에 비례하는 것이 일반적이다. 수명손실 계산을 위한 변압기 특성 식을 정리하면 다음과 같다.

$$dTcu = dTcur \times \left(\frac{LR^2 \times Wcu}{Wcu} \right)^{0.8}$$

$$dToil = dToilr \times \left(\frac{LR^2 \times Wcu + Wcon}{Wloss} \right)^{0.8}$$

$$Ths = Tamb + dToil + dTcu + dThs \text{ [K]}$$

$dTcu$: 도체 온도상승, $dTcur$: 정격시 도체 온도상승
 LR : 부하율, Wcu : 동손
 $dToil$: 절연유 상부 온도상승, $dToilr$: 정격시 절연유상부 온도상승
 $Wcon$: 무부하손실, $Wloss$: 전손실
 Ths : 과열점 온도, $Tamb$: 대기온도
 $dThs$: 도체에 대한 과열점 온도상승

과열점 온도가 구해지면 부하운전지속시간을 가속계수를 곱하여 수명손실을 구하게 되는데, 수명손실은 부하운전 전체 주기에 대하여 누적하면 된다.

$$LL_i = \exp \left\{ 15,000 \times \left(\frac{1}{Thsr} - \frac{1}{Ths} \right) \right\} \times dt_i$$

$$LL_{total} = \sum_{i=0}^n LL_i$$

LL_i : 해당 주기에서의 수명손실, $Thsr$: 정격 시 과열점 온도
 dt_i : 해당 과열점 온도에 대한 부하운전시간, LL_{total} : 전 수명손실

2.4 배전용 변압기 특성

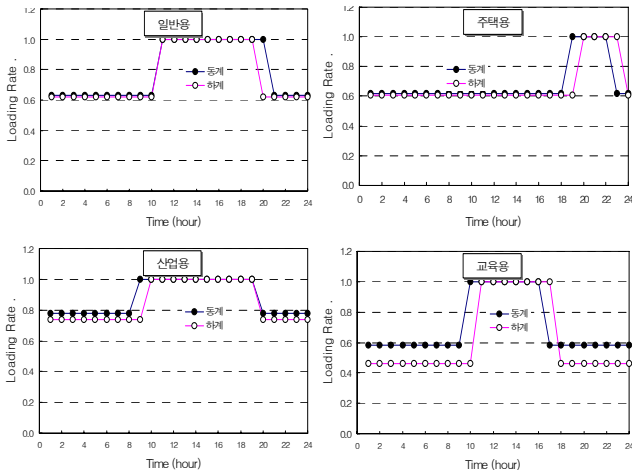
한전에서 구매하는 국내 주상변압기의 특성제한치는 표 1과 같다. 변압기 용량 10~100 [kVA]에 대하여 정하고 있는데 75 [kVA]일 경우 효율이 98.1% 이상으로 부하손 1425 [W] 이하이다. 그리고 무부하손은 206 [W] 이하가 되어야 한다. 수명손실 계산을 위해 75 [kVA] 변압기를 적용하였다.

<표 1> 주상변압기 용량별 효율

| 용량(kVA) | 효율(%) | 무부하전류(%) | 무부하손(W) |
|---------|-------|----------|---------|
| 75 | 98.1 | 1.7 | 206 |
| 100 | 98.2 | 1.7 | 245 |

2.5 부하특성

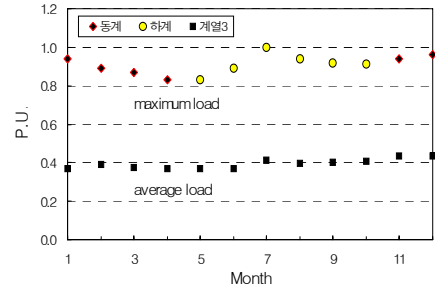
통계분석된 계약종별 부하곡선의 대표적인 형태를 살펴보면 그림 4와 같다. 이때 변압기 수명손실의 계산과정을 단순화 하기 위해서는 2계단 등가 부하곡선으로 표현하는 것이 편리하다. 정격부하 이하에서는 수명손실이 적게 발생하고 과부하 운전시에는 수명손실이 지수적으로 증가하여 수명손실 값을 지배하기 때문이다.



<그림 4> 계약종별 부하특성

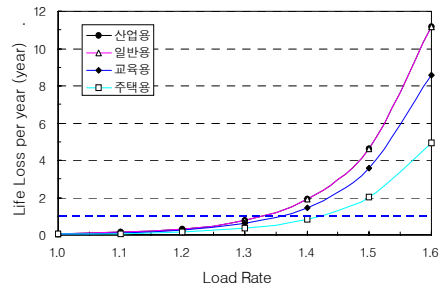
부하곡선은 일부하곡선으로 한 해를 대표할 수 없으며 특히 우리나라는 계절별 기후변화가 뚜렷하여 계절별 부하변화 또한 뚜렷하게 나타난다. 따라서 월별 부하량의 상대적인 차이를 고려하기 위해 월별 최대부하 추이를 감안하였다. 월별 최대 부하량의 상대적인 변화는 그림 5와 같다. 그림은 최대부하 산정을 변화가 지역의 보정계수를 적용하였다.

지난 3년간 서울경기지역의 7~8월 중 기상최대 온도는 약 25°C이며 겨울철 평균 기온은 약 2°C 정도가 되었다. 수명손실에 적용된 조건은 최대부하가 적용되는 한달동안 같은 비율을 적용하였으며 하계의 경우 기상최대온도를 적용하여 수명손실 최대치 조건으로 산정하였다.



<그림 5> 월별최대 부하량

그림 6은 변압기 과부하율에 따른 연간수명손실을 계산한 결과를 나타낸다. 과부하율 1.3인 경우 각 계약종별 연간 수명손실값은 산업, 일반, 교육, 주택용 순으로 각각 0.8, 0.89, 0.61, 0.36년 정도의 값을 가지는 것으로 나타났다.



<그림 6> 과부하율에 따른 연간 수명손실

3. 결 론

변압기의 경제성평가, 수명평가 등을 위해서는 수명손실 계산이 필수적이다. 계약종별 변압기의 부하곡선을 적용하여 과부하율에 따른 변압기의 수명손실을 계산하였다.

75 [kVA] 주상변압기에 대한 계약종별 부하곡선 통계로 운전하였을 경우 과부하율에 따른 수명손실을 산정하였다. 이때 변압기 온도특성은 실측된 결과를 활용하였으며, 대기온도는 지난 3년 간의 서울 경기지역의 최고대기온도를 적용하였다. 계산결과에 의하면 현재 적용중인 과부하율 130%로 운전하면 계약종별 연간 수명손실값은 산업, 일반, 교육, 주택용 순으로 각각 0.8, 0.89, 0.61, 0.36년 정도의 값을 가지는 것으로 나타났다.

수명손실 계산결과가 적용된 조건이 약한조건임에도 불구하고 변압기의 연간 수명손실이 1년 미만으로 나타나 현재 과부하운전 기준, 변압기 주기운전 기준 등이 보완되어 운영비용을 절감할 수 있다는 것을 나타낸다. 배전용 변압기의 수명을 1년만 연장하더라도 계통에 운전 중인 변압기가 180만대에 이르러 수백억원의 경제적 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

[참고 문헌]

- [1] "배전용 변압기 최적 부하관리 방안 연구(최종보고서)", 한국전력공사 전력연구원, 2003.4
- [2] 김병숙, 정종만, 이병성, 송일근, 한병성, "배전용변압기의 부하운전에 의한 온도 및 유전특성 분석", 한국조명전기설비학회 논문지, 제21권 제1호, 2007.1
- [3] IEEE Std. C57.91 "IEEE Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformers", IEEE, Inc. 1995
- [4] 한전등록구매규격, "RS-5950-0016 표준형 주상변압기", 2007.4