

# 수용가 전력 소비 패턴을 고려한 배전용 변압기 과부하 판정기준

論 文

53A-9-6

## Overload Criteria of Distribution Transformers Considering the Electric Consumption Patterns of Customers

尹 尙 潤\* · 金 載 哲†  
(Sang-Yun Yun · Jae-Chul Kim)

**Abstract** - In the paper, we summarize the result of the experimental research for the overload criteria of domestic distribution transformers considering the electric consumption patterns of customers. For the basic characteristic data of distribution transformer overload, the actual experiments are accomplished. The field data of loads are surveyed from sample transformers for analyzing the consumption pattern of customer load. The load data acquisition devices are equipped, and the algorithm of load pattern classification is applied. In addition to this efforts, various load pattern data in past are gathered. Then the representative load pattern of each customer type in domestic is extracted. The final results of overload criterions are presented as tabular form through the results of experiments and survey are combined. The field test of the experiment results is performed using the special manufactured transformers, which can measure both the load and top-oil temperature of transformer. Through this, we verify that the results of field test are similar to the laboratory one and the proposed overload criteria can be effectively applied to the real system.

**Key Words** : Distribution Transformer, Overload Criterions, Load Pattern Classification, Load Data Acquisition

### 1. 서 론

배전시스템의 말단 설비인 배전용 변압기는 수용가에 직접 전력을 공급하는 매개체이며 배전용 변압기에 의한 전력공급의 중단은 수용가의 전력품질과 전력회사의 신뢰도에 심각한 저하를 초래한다. 배전용 변압기의 사고 양상은 매우 다양하나 부하관리 측면에서 사고를 방지할 수 있는 요소는 과부하 소손 사고가 유일하다 할 수 있으며 과부하 소손을 방지하는 가장 확실한 방법은 개별 변압기를 상시 감시하는 것이라 할 수 있다. 그러나 전국에 산재된 약 150만 여대의 변압기에 대해 개별 감시하는 것은 현재로는 경제적 이유 때문에 어려운 것이 사실이다. 따라서 변압기 상태 추정 및 관리를 위한 일반적인 시스템이 필요하며 이러한 시스템에서 일차적으로 점검하고 문제점이 예상되는 변압기들을 집중 관리하는 것이 국내외 전력회사들의 일반적인 배전용 변압기 부하관리 방안이다. 동경전력을 비롯한 대부분의 일본 전력회사들과 미국 남부 캘리포니아 전력의 경우 변압기 용량을 두 가지로 구분하고 각 용량대역에 대한 과부하 기준을 설정하고 있으며 특히 동경전력의 경우 주위 온도에 따른 차등적인 과부하 기준을 설정하였다 [1]. 브라질 상파울로(Sao-Poulo) 전력의 경우 정격용량에 대한 과부하율의 기준 값을 설정하여 운용하고 있다. 이들 모두 과부하 율의

계산은 상관함수 형태의 계산식을 이용한 부하예측 시스템에 의존하고 있다 [2,3].

배전용 변압기는 전력용 변압기와 달리 정격용량의 100%가 넘는 단시간 과부하를 허용하고 있다. 일반적으로 배전용 유압변압기는 명판에 표시된 정격 용량으로 24시간 연속 운전하였을 때 변압기가 절연물의 허용온도를 넘지 않으면 된다. 단시간 과부하에서는 과부하 크기와 그 지속시간에 따라 허용온도를 넘느냐가 결정된다. 그러나 현재 국내에서는 단순히 과부하 크기만을 고려하여 결선방식에 따라 100%에서 130%까지의 단시간 과부하를 허용하고 있으며 이 기준에 의하여 배전용 변압기 설비투자 및 유지보수 계획을 수립하고 있다. 또한 이 기준은 이미 20년 전의 국외 규격에 근거한 것이며 동계와 하계에 대해 동일한 기준을 적용하고 있다. 본 논문의 목적은 국내 실정에 적합하도록 개선된 배전용 변압기 과부하 판정기준을 제시하고자 하는 것이다. 현재 사용하고 있는 국내 배전용 변압기 과부하 운전기준에 다양성을 주고자 장기간의 배전용 변압기 부하곡선 실측 및 부하패턴 추출과 변압기 과부하 시험 및 현장적용 시험을 통하여 새로운 과부하 판정기준안을 제시하고자 한다. 이를 위해 배전용 변압기 부하패턴을 추출하여 평균 과부하 지속시간을 파악하여 적용하고 동·하계가 구분된 과부하 판정기준을 제시함으로써 기준 자체의 합리성을 피하고자 하였다.

본 논문의 2장에서는 현재 과부하 기준의 문제점과 개선점에 대해 고찰하였다. 3장에서는 변압기 내부온도를 결정하는 요소인 수용가 전력소비 패턴을 추출하였다. 또한 국내 배전용 변압기 시료에 대한 과부하 실증 시험 결과를 요약하였다. 4장에서는 수용가 전력소비패턴 분류 결과와 실

\* 교신저자, 正會員 : 崇實大 工大 電氣制御시스템工學部 教授 · 工博

E-mail : jckim@ee.ssu.ac.kr

\* 正會員 : LG産電 電力研究所 前任研究員 · 工博

接受日字 : 2004年 5月 11日

最終完了 : 2004年 7月 29日

증 시험결과를 종합하여 최종적인 배전용 변압기 과부하 판정기준을 도출하였다. 마지막으로 5장에서는 현장 실측을 통한 사례연구 결과를 요약하였다.

**2. 배전용 변압기 과부하 판정기준의 현황 및 개선점**

**2.1 배전용 변압기 과부하 관리**

국내 배전용 변압기는 주상 변압기(pole transformer)와 지상 설치형 변압기(pad-mounted transformer)로 구분할 수 있으며 동일한 부하관리 시스템에 의해 관리되고 있다.

배전용 변압기 부하관리의 목적은 각 변압기의 관심 월의 최대부하(kW)를 예측하여 해당변압기의 용량과 과부하 기준을 초과하면 부하 이설, 용량 증설 및 기타 유지보수 계획을 수립하고 시행하는데 그 목적이 있다. 가장 확실하게 과부하 상태를 알 수 있는 방법은 개별 변압기 상태를 상시 감시하는 것이나 국내의 경우 수량이 많아 직접 관리하는 것은 경제적 측면에서 부담이 크다. 그렇다고 배전용 변압기의 과부하 관리를 전혀 하지 않는다는 것은 전력신뢰도와 품질에 막대한 저하를 가져올 수 있다. 국내의 대부분의 전력회사들은 전체 변압기에 적용될 수 있는 일반적인 과부하 기준 및 관리 시스템을 사용하며 이에 의해 과부하가 예측되는 변압기나 특수한 부하에 전력을 공급하는 변압기들에 대한 개별적인 집중 관리를 수행하는 것이 일반적이다.

**2.2 현행 배전용 변압기 과부하 판정 메커니즘**

현재 국내 배전용 변압기의 과부하 판정은 다음과 같은 단계로 수행된다.

**단계 1) 변압기 이용률(과부하율%)의 추정:** 국내 과부하 판정기준의 유일한 판정요소는 변압기 이용률이다. 변압기 이용률이란 바꿔 말해 변압기의 관심 월의 과부하 율(과부하 정도%)를 의미하며 국내의 경우 전산시스템에 의해 계산된다 [1].

**단계 2) 변압기 과부하 여부 판정:** 단계 1에서 계산된 이용률을 표 1의 기준에 적용하여 해당 변압기의 과부하 여부를 판정한다[4]. 표 1의 과부하 기준은 130%를 중심으로 결선방식 및 전압별로 100~130%를 차등적용하고 있다. 이러한 기준 설정은 ANSI/IEEE C57.91-1981 규격의 시험 결과를 근거로 해외의 규격을 참조하여 작성된 것이다 [5]. 국내 과부하 판정기준이 전압 및 결선별 차이가 나는 이유는 단상 부하에 의한 불 평형을 고려한 여유도 때문이다.

표 1 국내 배전용 변압기 결선별 과부하 판정기준

Table 1 Overload criteria of domestic distribution Tr. for each connection type

결선 방식	과부하 기준%
1Φ 2W 220V	130
1Φ 3W 220/110V	110
3Φ 3W 200V(Δ)	130
3Φ 4W 220/110V	공용: 110, 전용: 130
3Φ 4W 220/380V	공용: 130(이용량), 전용: 100
3Φ 4W 220/380V	110(동일용량)

현재 국내 과부하 판정기준에는 다음과 같은 몇 가지 문

제점들이 존재하며 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하는 과부하 판정기준을 제시하려 한다.

**문제점 1) 과부하 판정 요소 문제:** 현재는 유일한 판정 요소로 이용률만을 사용한다. 그러나 이용률(과부하 크기)이 동일하다 할지라도 그 지속시간이나 직전 부하의 크기 등에 의해 실제 변압기의 영향은 많은 차이를 보일 수 있다.

**문제점 2) 과부하 기준의 근거 미약:** IEEE C57.91(1981) 규격의 시험결과를 인용한 것으로 현재 국내에서 사용되는 변압기의 과부하 특성과 많은 차이를 보일 수 있다.

**문제점 3) 동·하계 동일한 과부하 기준의 적용:** 국내의 경우 하계와 동계의 극단적인 주변온도 차이가 고려된 과부하 기준이 제시되어야만 한다.

**2.3 본 논문에서 제안하는 배전용 변압기 과부하 판정 메커니즘**

변압기가 정격용량 이하로 운전될 경우 정상적인 수명손실을 꾸준히 일으키며 정격을 초과하는 상태로 운전하면 비정상적인 수명손실을 일으킨다. 본 논문에서는 변압기의 비정상적인 수명손실 발생의 기준을 변압기 절연물의 허용온도를 초과하는 상태로 보았다 [6].

일반적으로 변압기 내부 온도는 권선의 최고온점 온도(hottest spot temperature), 평균 권선 온도(average winding temperature) 및 최상부 유온(top oil temperature) 등으로 구분할 수 있으며 현실적으로 사용가능한 요소는 최상부 유온이 일반적이다 [7]. 변압기 과부하 소손의 직접적인 원인이 되는 것은 변압기 내부의 온도이며 변압기 내부 온도의 상승을 반영할 수 있는 것은 절연물의 온도이다. 또한 일반적으로 현실적인 계측 요소는 이중 최상부 유온이므로 이상의 설명을 종합하면 변압기 과부하 상태에 대한 정의를 다음과 같이 내릴 수 있으며 이것은 본 논문에서의 과부하 판정기준 설정의 기본 방향이라 할 수 있다.

- 변압기 내부의 최상부 유온이 어떤 기준 온도를 초과한 경우를 해당 변압기가 과부하 되었다고 정의한다.

최상부 유온의 기준 온도상승 값은 KS 규격에 의해 50℃로 설정되어 있으며 이것은 A종 절연물의 온도상승 제한치인 105℃에 최악의 주위온도를 약 40℃로 가정한 것이다. 따라서 최종적인 변압기 과부하 상태의 판별 조건을 다음과 같이 정의하였다.

- 주위온도를 40℃로 가정할 때 변압기 최상부 유온 상승 값이 50℃를 초과하는 부하 상태를 해당 변압기의 과부하 상태라고 판정한다.

본 논문에서 제안하는 배전용 변압기 과부하 판정기준은 다음과 같은 단계로 수행된다.

**단계 1) 변압기 이용률 및 부하패턴의 결정:** 변압기의 온도는 일 부하 곡선에 의해 변화하며 일 부하에 의한 변압기 최상부 유온의 온도상승 특성을 반영할 수 있도록 2-step 부하 곡선을 이용하였다 [8, 9]. 2-step 부하 곡선에서 변압

기 온도상승을 결정짓는 요소는 변압기에 가해질 최대부하의 크기, 최대부하의 지속시간 및 기저부하의 크기 3가지이다. 최대부하 크기는 이용률 산정을 통해 계산하며 또한 최대부하의 지속시간 및 기저부하 크기는 수용가 부하 소비 패턴에 관련된 것으로 본 논문에서는 패턴분류를 통해 대표적인 값들을 도출하였다.

**단계 2) 이용률 및 부하패턴에 의해 변압기 최상부 유온 상승값 추정:** 단계 1에서 구해진 변압기 이용률과 부하 소비 패턴은 앞서 언급한 변압기 과부하 판정 요소인 최상부 유온 상승 값을 추정하기 위해 사용된다. 본 논문에서는 배전용 변압기에 대한 과부하 시험을 통해 이용률 및 부하 패턴과 최상부 유온 상승 간의 상관관계를 도출하였다.

**단계 3) 변압기 과부하 여부 판정:** 단계 2에서 구해진 최상부 유온 상승 추정 값을 기준 온도 상승 값과 비교하여 최종적으로 과부하 여부를 판정한다.

본 논문에서 제안하는 과부하 판정 알고리즘을 그림 1에 도시하였다.

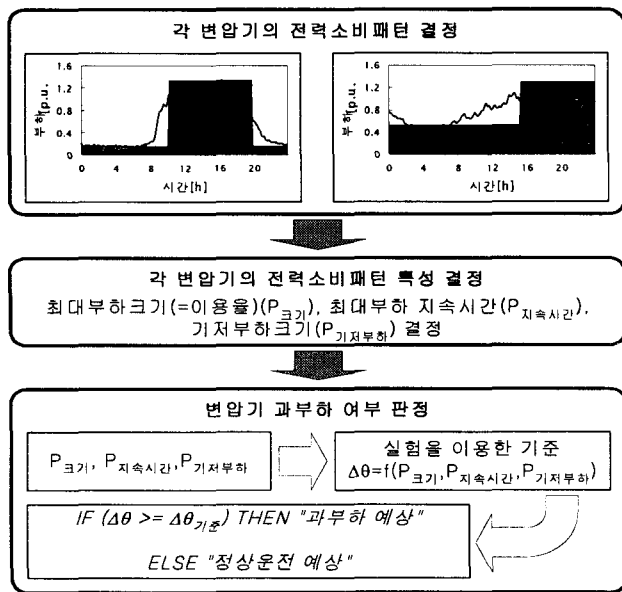


그림 1 본 논문에서 제안하는 과부하 판정 알고리즘  
Fig. 1 Concept of proposed overload decision algorithm

3. 과부하 판정기준 개선을 위한 기초연구

과부하 판정기준을 개선하기 위해 본 논문에서는 다음의 두 가지 기초연구를 수행하였다.

3.1 저압 수용가의 전력소비패턴 결정

본 논문에서는 직접 부하취득을 통해 전형적인 저압 수용가의 전력소비패턴을 결정하였다. 또한 최종적인 패턴의 결정은 다음의 두 가지 방식을 적용하였다.

- 1) 취득된 데이터를 패턴분류 알고리즘을 이용하여 수용

가 전력소비패턴을 추정하는 방법

- 2) 취득된 데이터 및 다른 연구에서 취득된 데이터의 평균값을 취하여 수용가 전력소비패턴을 추정하는 방법

직접 부하취득을 위해 서울 지역에 1997년에서 1998년까지 부하데이터 취득 장치를 설치하여 운용하였다. 취득된 데이터를 이용하여 배전용 변압기 부하 관리를 위한 데이터 베이스 시스템이 구축되었다 [10]. 본 논문에서 전력소비패턴의 구분기준으로 삼은 것은 일부하 곡선을 기준으로 하였다. 각 일부하 곡선은 1일 24개의 시간당 부하 값이 존재하며 이를 이용하여 부하 곡선의 형태별 군집을 형성하고자 했다. 이를 위해 본 논문에서는 패턴 분류 기법 중 가장 기본적이며 널리 사용되는 K-평균 알고리즘을 이용하였다 [11]. 패턴 분류 알고리즘을 이용한 구분은 실측한 데이터가 주택용, 농사용, 일반용, 교육용, 가로등, 산업용 및 심야전력 등의 모든 부하 종별 데이터를 대표할 정도로 크지 못했으므로 이를 보완하기 위해 한전 및 에너지 관리공단 등의 데이터를 참고하였다 [12-16]. 분명한 패턴분류를 보이는 주택, 일반 및 심야부하(부산지역의 실측데이터 사용) 등은 직접 부하 실측에 의한 데이터를 이용하였으며 나머지 패턴은 참고문헌을 인용하였다. 최종적으로 산출된 동·하계 수용가 종류별 전력소비패턴을 그림 2에 도시하였으며 표 2에 2-step 형태의 부하 특성데이터를 나타내었다.

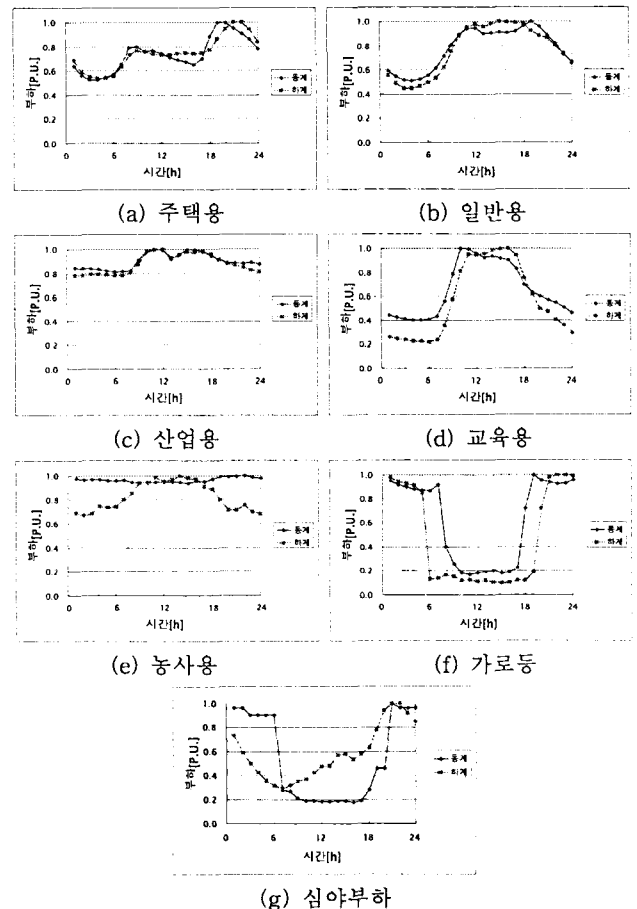


그림 2 수용가 종류 별 전력소비패턴  
Fig. 2 Electric consumption patterns of each customer type

표 2 계약종별 2-step 특성

Table 2 2-step characteristics of each customer contract type

시간	계약종별 구분							
	주택용		일반용		산업용		교육용	
	하계	동계	하계	동계	하계	동계	하계	동계
기저부하크기	0.61	0.62	0.62	0.63	0.74	0.78	0.46	0.58
최대부하 지속시간	4	4	9	10	10	11	7	7

시간	계약종별 구분					
	농사용		가로등		심야	
	하계	동계	하계	동계	하계	동계
기저부하크기	0.67	1.0	0.14	0.25	0.1	0.1
최대부하 지속시간	9	24	10	14	10	10

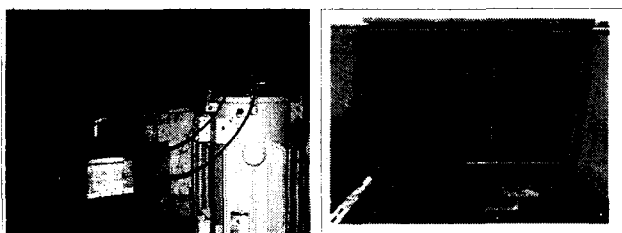
3.2 배전용 변압기 온도상승 특성 결정

시험 결과의 현장 적용성을 높이기 위해 시료로 실제 사용 중인 변압기를 추출하여 사용하였다. 변압기 과부하 시험의 목적은 변압기에 대한 주변온도를 일정하게 유지한 상태에서 변압기의 유온상승 특성 요소인 최대부하 크기, 최대부하 지속시간 및 기저부하 크기를 가변하면서 변압기 최상부 유온의 시간별 온도상승 특성을 확인하는 것으로 표 3에 시험개요를 요약하였으며 그림 3에 사진을 나타내었다.

표 3 과부하 시험 요약

Table 3 Summary of overload tests

항목	내용		비고
기간	주상	2000년 12월-2001년 5월	
	지상	2002년 6월-2002년 8월	
장소	한국전기연구원 전력시험소		
대상	주상 20대, 지상 3대		
용량	주상	30, 50, 75, 100 kVA 각 5대씩	사용중인 변압기
	지상	100 kVA 3대	
방법	단락 시험법		
횟수	주상	각 용량별 25 케이스	100 case
	지상	각 변압기별 14케이스	
시간	시험 케이스 당 평균 1일 소요		
시험 조건	①100%에서 160%까지 10%씩 가변		
	②기저부하 25, 50 75% 포화 후 가압		
	③100% 부하의 온도 포화곡선 확보		
	④주변온도 고정(10~20℃): 약 13℃		
중단 조건	①시험 시간도달(과부하 8시간):		
	②최상부 유온의 온도 제한치(110℃)		
	③방압벽 유분출 발생 및 우려 시		



(a) 주상 변압기 (b) 지상 변압기

그림 3 과부하 시험 사진

Fig. 3 Photos of overload test

주상 변압기의 시험결과 중 기저부하 50%의 경우의 과부하크기-온도상승 특성을 그림 4에 정리하였다. 그림 내부의 오른쪽 박스안의 숫자는 과부하율(%)을 나타낸다. 시험결과 상대적으로 대 용량(75, 100kVA)인 변압기에서 상대적으로 과부하에 의한 온도상승이 가파른 것으로 나타났다. 또한 온도 상승의 형태는 시간이 지남에 따라 상승폭이 둔화되는 포화곡선 형태로 나타났다.

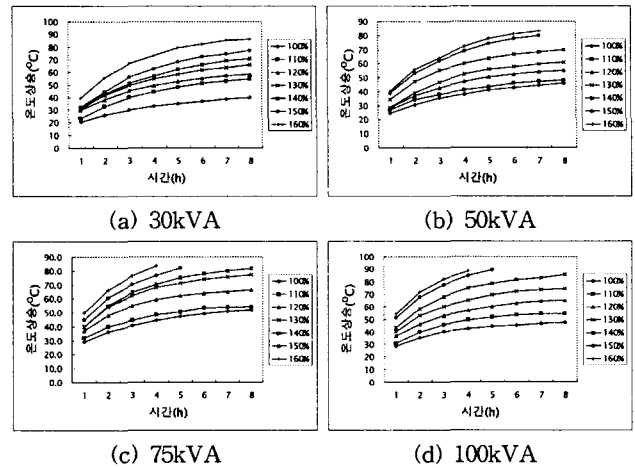


그림 4 주상 설치형 변압기 시험 결과(기저부하 50%)

Fig. 4 Test results of pole Tr.(base load 50%)

지상 설치형 변압기의 시험 결과를 그림 5(a) 및 5(b)에 도시하였으며 그림 6에는 주상 변압기와 비교하였다.

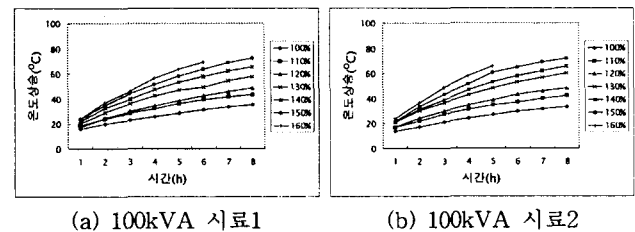
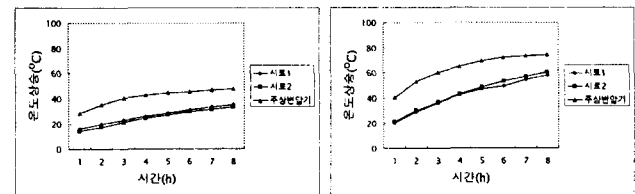
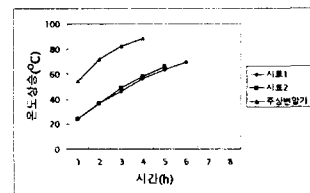


그림 5 지상 설치형 변압기의 시험 결과

Fig. 5 Test results of pad Tr.



(a) 기저50-과부하100% 부하 (b) 기저50-과부하130% 부하



(c) 기저50-과부하160% 부하

그림 6 주상 및 지상 설치형 변압기의 시험결과 비교

Fig. 6 Comparison of test results for pole and pad Tr.

그림 6의 비교를 통해 주상변압기에 비해 지상 설치형 변압기는 동일한 과부하에 대해 온도상승의 여유가 큼을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 상대적으로 여유도가 적은 주상 변압기의 시험결과를 기준하여 과부하 판정기준안을 작성하였다.

시험 시 주변온도는 시험이 경과함에 따라 전체 시험의 경우들에 대해 10~20℃ 사이로 주변온도가 변화하는 문제점이 발생하였다. 또한 시험이 동계에 실시됨에 따라 하계의 예상되는 주변온도 상승을 고려하면 하계에도 시험의 결과를 그대로 적용할 수 있는지 여부를 검증할 필요성이 제기되었다. 참고문헌 [6]에서는 이러한 주변온도 문제점을 IEEE Std. C57.92(1981) 규격의 시험결과를 토대로 해결하였다. 주변온도의 변화만큼 유온에는 영향을 주지만 유온상승에는 큰 영향을 주지 못하며 주변온도에 관계없이 일정한 유온상승을 가짐을 입증하였다.

**4. 본 논문에서 제안한 과부하 판정 기준**

본 논문에서 제안하는 과부하 판정기준의 특징은 기존의 과부하 판정 변수인 이용률에 수용가 종류에 따른 부하 패턴과 변압기 온도상승 특성을 더하여 판단하는 방식이다.

**4.1 동·하계 기준 온도 상승값의 설정**

국내 주요도시의 지난 20년간의 하계 및 동계의 최고 온도를 분석해 보면 하계의 경우 1994년 대구의 39.4℃이며, 동계의 경우 1993년 역시 대구의 22.2℃이다 [17]. 따라서 하계의 경우 현행 과부하 기준과 같이 40℃가 적정하며 동계의 경우는 약 20℃가 적정한 것으로 나타났다. 즉 하계의 경우 최상부 유온의 상승 기준치는 현행과 같은 50℃로하고, 동계의 경우는 여기에 20℃를 부가한 70℃로 하는 것이 적정할 것으로 판단하였다. 본 논문에서 제시하는 과부하 판정기준은 30년 기준수명일 경우와 15년 기준수명일 경우로 나누어 제시되었다. 15년 기준수명을 고려하는 이유는 현재 국내 배전용 변압기들의 경우 13년마다 전면적인 수리를 하며 수리 후에는 신품으로 간주하기 때문이다.

- 1) 30년 기준수명일 경우 변압기 온도상승 기준 값
  - 하계: 주변온도 기준 40℃, 유온상승 기준 50K
  - 동계: 주변온도 기준 20℃, 유온상승 기준 70K

- 2) 15년 기준수명일 경우 변압기 온도상승 기준 값

변압기의 수명은 절연 재료의 열적 열화에 의한 절연도의 저하에 좌우되며 절연재료의 수명은 아레니우스(Arrhenius)의 수식이나 몬스팅어(Monstinger)의 법칙에 의해서 식 (1)과 같이 표현한다.

$$\text{절연재료의 수명} = e^{-b\theta} \tag{1}$$

여기서  $b$ 는 절연 재료의 고유 상수이고  $\theta$ 는 절연물에 가열된 온도이다. 기준 온도 98℃에 대한 상대적인 수명 손실비  $V$ 는 식 (2)와 같이 나타낸다 [9].

$$V = \frac{\text{ageing rate at } \theta_h}{\text{ageing rate at } 98^\circ\text{C}} = 2^{(\theta_h - 98)/6} \tag{2}$$

여기서  $\theta_h$ 는 최고 온점 온도이고 정격 운전에서의 최고 온점 온도 98℃를 기준으로 설정되었다. 최고 온점 온도는 최상부 유온으로부터 추정될 수 있으며 배전용 변압기의 경우 다음 식 (3)과 같이 예측되어 질 수 있다.

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_T + Hg, K^{1.6} \tag{3}$$

여기서  $\theta_a$ 와  $\Delta\theta_T$ 는 주변온도 및 주변온도에 대한 최상부 유온상승을 나타내며  $Hg$ 은 최고 온점에서 최상부 유온으로 열이 전달되는 동안에 발생하는 열 발산(hot spot to top oil gradient)이다. 또한  $K$ 는 정격부하에 대한 실제 부하의 비( $I/I_{rated}$ )이다.

식 (2)의  $\theta_h$ 에 식 (3)을 대입한 새로운 수명 손실비  $V$ 를 식 (4)에 나타내었다.

$$V = 2^{[\theta_a + \Delta\theta_T + Hg, K^{1.6} - 98]/6} \tag{4}$$

식 (4)는 최고 온점 온도를 이용한 상대적 수명 손실비를 최상부 유온을 이용하여 다시 표현한 식이며  $\Delta\theta_T$ 는 최상부 유온상승 값이 된다. 즉 변압기의 일정 주기 동안의 수명 손실의 기준을 최상부 유온을 이용하여 설정한 것으로 정격 운전시 연 평균 주변온도를 기준으로 최상부 유온이 6℃ 상승할 때마다 수명이 반감됨을 나타낸다. 따라서 30년 기준에 비해 반감된 15년 기준 수명에서는 온도상승 규정상 6℃ 정도의 여유를 줄 수 있다고 판단하였으며 최종적으로 다음과 같은 온도상승 기준을 설정하였다.

- 하계: 주변온도 기준 40℃, 유온상승 기준 56K
- 동계: 주변온도 기준 20℃, 유온상승 기준 76K

**4.2 과부하 판정 기준 제안**

기존의 과부하 판정기준안과 본 논문에서의 제안 기준사이의 차이점을 표 4에 요약하였다. 표 4에서 보는 바와 같이 본 논문의 2장에서 언급한 문제점들을 개선하는 방향으로 수행되었다.

표 4 기존 기준과 제안한 기준의 비교

Table 4 Comparison of conventional and proposed criteria

비교 항목	기존 기준	제안 기준
판정요소	이용률	이용률, 부하패턴, 온도상승 특성
제정근거	국외 기준	실증시험 결과 및 부하패턴 적용
동 하계 기준	동일	차등 적용
세부요소 비교		
이용률 산정	기존 동일	기존 동일
결선방식에 의한 여유도	고려	고려
부하사용 패턴	비 고려	고려
변압기 온도 상승 특성	비 고려	고려

표 5 배전용 변압기가 과부하 기준 도달 시간

Table 5 Reaching time of overload criteria for distribution transformer

(단위: 시간, -: 24시간내에 과부하 위험 없음)

용량	과부하 기저부하		110%		120%		130%		140%		150%		160%	
			30년	15년	30년	15년	30년	15년	30년	15년	30년	15년	30년	15년
30 kVA	≤30%	하계	10.0	20.5	5.5	10.5	4.0	6.0	3.0	4.5	2.5	3.5	2.0	3.0
		동계	22.0	-	15.5	-	8.5	17.5	5.5	11.0	3.5	8.0	3.0	5.5
	31-69%	하계	5.5	18.0	4.0	8.5	3.5	5.5	3.0	3.5	2.5	3.0	1.5	2.5
		동계	21.5	-	13.5	-	6.5	15.0	4.0	10.5	3.0	7.0	2.5	5.0
	≥70%	하계	5.0	17.5	2.5	5.5	2.0	3.5	1.5	2.5	1.0	2.0	1.0	2.0
		동계	19.5	-	12.0	-	4.0	13.5	3.0	8.0	2.0	5.5	2.0	4.0
50 kVA	≤30%	하계	10.0	20.5	6.0	12.0	4.5	8.0	3.5	5.0	3.0	4.0	2.5	3.5
		동계	-	-	21.5	-	13.0	21.5	8.0	12.5	5.5	8.0	4.0	6.0
	31-69%	하계	9.5	20.0	5.0	9.0	3.5	5.0	3.0	3.0	2.5	2.0	1.5	2.0
		동계	-	-	15.0	-	9.0	20.0	6.0	12.0	5.0	5.5	2.5	3.5
	≥70%	하계	9.0	20.0	4.0	9.0	2.5	5.0	1.5	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0
		동계	-	-	14.0	-	7.0	20.0	5.5	12.0	3.5	5.5	2.5	3.5
75 kVA	≤30%	하계	5.5	12.0	3.5	6.0	2.5	4.0	2.0	3.0	1.5	2.5	1.5	2.0
		동계	21.0	-	12.0	22.0	7.0	14.5	4.5	6.5	3.5	4.5	2.5	3.5
	31-69%	하계	4.5	12.0	2.5	4.5	2.0	3.0	1.5	3.0	1.0	1.5	1.5	1.0
		동계	19.5	-	11.5	19.0	4.5	12.5	4.0	6.5	2.5	3.5	2.0	2.5
	≥70%	하계	2.5	9.0	1.5	3.5	1.0	2.5	0.5	1.5	0.5	1.0	0.5	0.5
		동계	18.5	-	9.5	14.0	4.5	11.5	3.0	5.0	2.0	3.0	1.5	2.5
100 kVA	≤30%	하계	4.5	12.0	3.0	5.0	2.5	3.5	2.0	3.0	1.5	2.5	1.5	2.0
		동계	21.0	-	11.0	21.5	5.5	12.0	4.0	6.0	3.5	4.5	3.0	4.0
	31-69%	하계	4.5	11.5	2.5	5.0	2.0	3.0	1.5	2.5	1.0	1.5	1.0	1.5
		동계	19.0	-	10.5	21.5	5.0	10.0	3.5	5.5	2.5	3.5	2.0	3.0
	≥70%	하계	3.0	8.5	2.0	4.0	1.0	2.5	0.5	1.5	0.5	1.0	0.5	0.5
		동계	18.0	-	9.5	21.0	5.0	9.5	3.0	5.0	2.0	3.0	1.5	2.5

표 6 수용가 종류에 따른 배전용 변압기 과부하 판정기준

Table 6 Overload criteria of distribution transformers according to the customer type

(표 내부의 숫자는 이용률%임, 표 내부의 이용률 시점부터 과부하로 판정함)

용량 kVA	대표종별 판정시기	주택용		일반용		산업용		교육용		농사용		가로등		심야	
		30년	15년	30년	15년	30년	15년	30년	15년	30년	15년	30년	15년	30년	15년
30	동계	140	160	130	150	130	140	130	150	110	130	130	140	130	150
	하계	120	150	110	130	110	130	110	140	110	130	110	140	120	150
50	동계	160	160	130	150	130	150	140	150	120	130	130	140	140	150
	하계	130	150	120	130	110	130	120	140	120	130	110	140	130	150
75	동계	140	150	130	140	130	140	130	140	110	120	120	140	130	140
	하계	120	140	110	130	110	120	110	130	110	130	110	130	120	130
100	동계	140	150	130	130	120	130	130	140	110	120	120	130	130	140
	하계	120	140	110	130	110	120	110	130	110	130	110	130	120	140

※ 30kVA 미만 변압기는 30kVA 기준, 100kVA 초과 변압기는 100kVA 기준함

※ 1φ 3W 110/220V, 3φ 4W 110/220V(V 결선) 공용 변압기, 3φ 4W 220/380V(Y 결선)(이용량) 전용 변압기, 3φ 4W 220/380V(Y 결선)(동일용량)의 경우는 위의 기준 과 부하율에 불 평형 율을 고려하여 10%를 낮춰 적용함

실증 시험결과에 본 논문의 4.1절에서 정리한 각 수명별 동계 및 하계 유온상승 기준을 적용하여 기준 유온상승에 도달하는 시간(hour)을 표 5에 정리하였다. 예를 들어 50kVA 변압기의 경우 하계에 기저부하 50%, 과부하 120% 정도가 발생하였다면 이 변압기를 30년 수명 기준으로 볼때 약 5시간 정도가 흐르면 기준 온도 상승치(50K)에 도달한다는 의미이며 이 시간부터 이 변압기는 과부하 상태라고 판

정할 수 있다.

본 논문에서 최종적으로 제시하는 과부하 판정기준안은 변압기를 구성하는 수용가의 종류에 따라 표 6에 제시되었다. 이 결과는 표 5의 과부하 도달 시간에 표 2에서 언급한 수용가 전력소비패턴별 2-step특성(최대부하 크기, 기저부하 크기, 최대부하 지속시간 특성)을 고려하여 동계와 하계에 대해 과부하 기준 값을 설정한 것이다.

### 5. 제안 기준의 현장 검증

제안한 과부하 판정기준의 직접 검증을 위해서는 장기간의 현장 운전을 통하여 과부하 소손 사고의 발생을 점검하는 수밖에 없으나 이것은 현실적으로 어려운 부분이 많다. 본 논문에서는 대신 제안한 과부하 판정기준의 핵심인 과부하에 의한 온도상승 특성의 현장 실측으로 간접적인 검증을 수행하였다. 현장검증의 목적을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 과부하에 의한 온도 상승의 정확성 검증을 위해, 변압기 2차측 전류(부하)와 변압기 유중온도를 계측하여 시험시의 조건과 유사한가를 판정한다.
- 2) 실제 부하 곡선에 의해 2-step 부하곡선을 도출하고 2-step 곡선상의 특성들을 이용한 온도 상승 추정 값들과 실측값 들을 비교한다.

현장검증을 위해 변압기 내부의 온도를 계측할 수 있는 센서 설치용 홀(hole)을 가진 특수한 변압기를 제작하였으며 그림 7에 설치된 모습을 나타내었다.

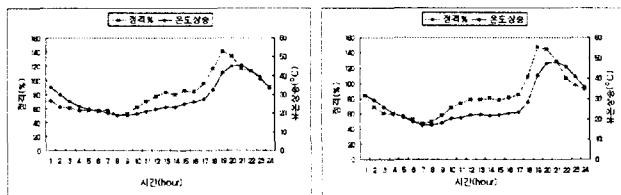


(a) 센서 설치용 홀(hole) (b) 설치된 계측기 모습

그림 7 현장 시험용 변압기 및 계측기 사진

Fig. 7 Photo of Tr. and data acquisition device for field test

특수 제작된 변압기는 총 4대로 30, 50, 75, 100kVA 1대씩으로 구성되었다. 온도의 계측은 변압기 유온, 방열판 상하부 및 주변온도 등 총 14개소를 측정하였으며 변압기의 전압, 전류 및 역률 등을 아울러 계측하였다.



(a) 2004년 3월 20일 파형 (b) 2004년 3월 25일 파형

그림 8 검증용 변압기에서 취득된 파형

Fig. 8 Acquired data from the field test transformer

데이터 수집용 계측기는 기본적으로 PCS 망을 통한 데이터 전송구조를 하고 있다. 50kVA 변압기에서 2004년 3월에 취득된 2일간의 데이터를 그림 8에 도시하였다. 그림에서 보는바와 같이 온도 상승 곡선이 이용률의 상승 및 하강 곡선에 비해 약간 이동(shift)된 형태의 일정한 상관관계를 가짐을 볼 수 있다.

실측 계절이 3월과 4월로 일반적으로 최대 부하를 소비하

지는 않는 계절이므로 자연적으로 과부하가 발생하기를 기대하기가 매우 어려웠으며 따라서 현장 검증을 위해 강제적으로 부하를 이설하여 과부하가 인가되도록 유도하였다. 50kVA 변압기의 2004년 3월 20일에서 4월 10일까지 현장 실측결과와 시험시의 온도상승 특성을 표 7에 비교하였다. 그림의 오차율 계산은 다음 식 (5)를 이용하였다.

$$\text{오차율}(\epsilon)\% = \left| \frac{\text{현장 실측결과} - \text{실험결과}}{\text{실험결과}} \right| \times 100 \quad (5)$$

표 7에서 보는 바와 같이 현장 실증 결과 대부분의 변압기가 시험 결과와 유사한 결과를 얻었으며 전반적으로 동일한 과부하에 대해 시험 결과에 비해 현장의 온도상승 값이 약간 작게 나오는 것으로 나타났다. 이러한 특성은 밀폐된 실험실의 조건에 비해 현장의 경우 비나 바람 등의 온도 발산을 촉진하는 요인이 있기 때문인 것으로 판단된다.

표 7 현장 실증 결과

Table 7 Results of field test

날짜 (2004년)	기저 부하 (%)	최대 부하 (%)	최대부하 지속시간 (hour)	온도 상승 실측	온도 상승 시험	오차 (%)
3월 20일	78	138	2	46	52	12
3월 21일	66	113	2	32	34	6
3월 22일	68	123	2	34	37	8
3월 23일	72	141	2	46	54	15
3월 24일	72	138	2	41	48	15
3월 25일	77	146	2	48	57	16
3월 26일	70	127	3	44	50	12
3월 27일	72	135	2	46	51	10
3월 28일	67	102	2	27	31	13
3월 29일	69	132	2	35	40	13
3월 30일	70	134	2	36	50	28
3월 31일	76	142	2	47	55	15
4월 1일	76	143	2	45	56	20
4월 2일	76	136	2	43	52	17
4월 3일	71	132	2	44	49	10
4월 4일	64	101	2	25	31	19
4월 5일	69	135	2	38	43	12
4월 6일	78	148	2	50	58	14
4월 7일	68	121	3	37	43	14
4월 8일	69	134	3	43	51	15
4월 9일	65	128	3	40	44	9
4월 10일	67	119	3	38	43	11
평균오차율						13.8%

### 6. 결 론

본 논문에서는 배전용 변압기 과부하 판정기준안의 개선에 대한 실증적 연구를 다루었다. 기존 과부하 판정 기준안의 문제점을 개선하기 위해 부하 패턴 분류 및 과부하 실증 시험 등을 수행하였다. 최종적인 과부하 판정기준안은 변압기를 어떤 특정 수용가 종류로 할당하는 것을 전제로 하여 표 형태로 제시되었으며 동·하계 주변온도 차이를 고려한 최종안을 제시하였다. 제안한 과부하 판정기준의 검증을 위

해 유온이 직접 계측되도록 특수하게 제작된 변압기를 통해 부하 대 온도의 현장실측을 수행하였다. 실증 결과 현장 부하에 대해서도 실험실에서와 유사한 온도상승 특성을 보이며 실험실의 결과에 비해 약간의 여유가 있음을 볼 수 있었다. 따라서 현장 적용에 무리가 없음을 입증하였다.

본 논문에서 제안한 방식은 배전용 변압기 전체에 일괄적으로 적용될 과부하 기준으로 부정확한 부하조사 등으로 인한 이용률 오차로 인해 전체적인 판정 과정상에 약간의 오차가 존재할 가능성이 있다. 그러나 이것은 현재 기준에서도 동일하게 예측되는 문제이다. 반면 본 논문에서 제안한 기준은 기존 방식에 비해 많은 판정요소를 첨가하여 세분화하였다. 무엇보다도 변압기 과부하 판정을 위해 필히 고려되어야 할 수용가의 전력소비패턴과 현재 사용 중인 변압기의 과부하 특성을 반영하였으며 현장 검증을 통해 그 타당성을 어느 정도 입증하였다. 또한 향후 제안한 과부하 기준을 활용함에 있어서도 현재 국내 배전 계통 관리 시스템의 데이터만으로 판정이 가능하도록 현실화 하였다. 따라서 제안한 과부하 판정기준은 배전용 변압기 관리 시스템에 직접 적용이 가능하며 기존의 과부하 판정기준이 가지는 판정 오차를 상당부분 해소할 수 있을 것으로 생각한다.

**감사의 글**

이 논문은 숭실대학교에서 지원한 논문임.

**참 고 문 헌**

[1] 한국전력공사 전력연구원, 주상변압기 부하 관리의 향상에 관한 연구(최종보고서), 한국전력공사, 1999년.  
 [2] J. A. Jardini, H. P. Schmidt, C. M. V. Tahan, C. C. B. De Oliveira, and S. U. Ahn, "Distribution transformer loss of life evaluation: a novel approach based on daily load profiles," IEEE Trans. on PWRD, vol. 15, no. 1, pp. 361-366, Jan. 2000.  
 [3] J. A. Jardini, C.M.V. Tahan, S. U. Ahn, and E. L. Ferrari, "Distribution transformer loading evaluation based on load profiles measurements," IEEE Trans. on PWRD, vol. 12, no. 4, pp. 1766-1770, Oct. 1997.  
 [4] 한국전력공사 배전처, 저압부하관리 업무편람, 한국전력공사, 1999년 5월.  
 [5] 한국전력공사 전력연구원, 배전용 변압기 최적 부하관리 방안 연구(최종보고서), 한국전력공사, 2003년.  
 [6] 윤상윤, 김재철, 박창호, "최상부 유온 상승 특성을 이용한 100 kVA 이하 유입식 배전용 변압기의 과부하 판정 기준," 대한전기학회 논문지, 제 51A권, 제 11호, pp. 559-567, 2002년 11월.  
 [7] 한국전기연구소 전력시험부, '99 변압기 실무기술, 한국전기연구소, 1999년 6월.  
 [8] IEEE Std. C57.91-1981, IEEE guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers rated 500 kVA and less with 65°C or 55°C average winding rise.

[9] IEC Std. 354(1971), Loading guide for oil-immersed power transformers.  
 [10] 박창호, 김두봉, 김기현, 배주천, 윤상윤, 김재철, "주상 변압기 부하 상관식 조정에 관한 실증적 연구," 한국조명·전기설비학회 논문지, 제 14권, 제 1호, pp. 102-108, 2000년 1월.  
 [11] 이성환 편저, 패턴인식의 원리 I, II권, 흥통과학출판사, 1997년.  
 [12] 한국전력공사 전력경제처, 계약종별·산업별 부하곡선자료집, 한국전력공사, 1997년 10월.  
 [13] 한전력공사 전원계획처, 계약종별·산업별 부하곡선자료집 II, 한국전력공사, 1998년.  
 [14] 한국전력공사 전원계획처, 계약종별·산업별 부하곡선자료집 III, 한국전력공사, 1999년 12월.  
 [15] 에너지 관리공단, 부하곡선을 이용한 전력사용행태 분석(I), 2000년 8월.  
 [16] 에너지 관리공단, 부하곡선을 이용한 전력사용행태 분석(II), 2000년 8월.  
 [17] 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr>.

**저 자 소 개**



**윤 상 윤 (尹 尙 潤)**

1970년 8월 28일생. 1996년 숭실대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 LG산전 전력연구소 선임연구원.  
 E-mail : syyun@lgis.com



**김 재 철 (金 載 哲)**

1955년 7월 12일 생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1987년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 숭실대 전기제어시스템공학부 교수.  
 E-mail : jckim@ee.ssu.ac.kr