

변압기 용량 지수를 이용한 수용률 산정 시뮬레이터 개발에 관한 연구

김영일*
대림대학*

Study on Simulator for computing Demand Rate using Index of Transformer's Demand Rate

Young-il Kim*,
Dae-Lim College*

Abstract - There are regulations on each building for its classification and It is corresponding determined contract demand. For transformer's capability calculation algorithm, cumulated power information of each customer is used to analysis the correlation between power usage and Demand Rate. By modeling this using Least Square Method, it can be targeted to recognize the pattern of transformer use in the past and make a prediction on it in the future.

1. 서 론

변압기 용량 산출 algorithm은 고객별로 축적된 전력 정보를 사용하여 변압기의 사용량과 업종별로 규정되어 있는 수용률의 상관관계를 파악하고 이를 최소사승법을 이용하여 Modeling 함으로써 과거의 변압기 사용의 Trend를 파악하고 미래의 변압기 사용량을 예측하는데 그 목적이 있다. 건물의 건축시에는 그 업종별로 정해진 내선 수용률이 존재하며 이에 적합한 수/배전설비를 사용하나, 실제적으로 이 수용률에 따른 변압기의 실제 사용량의 관계를 분석한 연구는 수행되지 않은 상태이다. 이러한 점에 착안하여, 본 연구에서는 케이디파워의 500여 부하에 설치되어있는 각종 IED (Intelligent Electronic Device)로부터 수집되어 Web Server에 저장된 근 5년간의 데이터를 각 부하별로 분석하여 수용률과 변압기 사용량의 상관관계를 파악하고 이를 이용하여 부하별로 수용률에 따른 변압기 예측을 가능하게 하는 알고리즘을 개발하였다.

2. 본 론

2.1 수용률과 변압기 용량 지수

본 알고리즘은 각 업종별로 규정된 종합 수용률 대비 실제 변압기 사용량의 상관관계를 파악하여 수용률에 대한 변압기의 사용량 정도가 적절한지를 판단하기 위한 것이다. 먼저, 이 알고리즘의 서술을 위한 각 용어 설명은 다음과 같다.

2.1.1 종합수용률(Demand Rate)

$$DR = \frac{\text{기간내 최대전력}}{\text{총설비용량}} \quad (1)$$

기간은 일중, 월중, 연중 등 다양한 기간을 고려할 수 있으나 본 연구에서는 실제 데이터의 알고리즘 적용시 그 신뢰성을 높이기 위하여 그 기간을 1일(24시간)로 정하여 각 일별 최대전력을 종합수용률에 반영하였다.

2.1.2 변압기 용량지수(ITDR)

수용률 대비 변압기 사용량의 상관관계 분석을 위해 제시된 지수이며, 그 수식은 다음과 같다.

$$iTDR = \frac{1}{n} \times \frac{\sum_{k=1}^n \text{최대전력}}{\text{변압기용량}} \quad (2)$$

여기서 n은 기간에 따른 Data의 개수를 의미하며, 고려하는 기간에 Data의 개수가 달라진다. 즉, 시간별 Data를 2년 동안 축적한 Data를 사용한다면, n은 $24 \times 365 \times 2 = 17520$ 의 Data가 될 것이다.

수집되는 Data는 신뢰성 확보를 위한 최소한의 Data 수집기간은 1년으로 하며 예측할 수 있는 예측 기간의 한계는 데이터 수집기간을 넘지 않는 것을 전제로 한다.

2.1.3 변압기 출력 감쇄율(Transformer Derating Factor)

변압기 사용시 대부분 비선형 부하가 존재하며 비선형 부하에 의해 전류의 고조파가 발생하게 된다. 전류의 고조파는 변압기의 열손실을 발생시키며, 이는 변압기의 출력 감쇄 또는 변압기 용량의 감소와 같은 효과가 있다.(ANSI/IEEE C57.110) 이를 고려하기 위하여 k-Factor를 도입, 알고리즘에 적용하기로 한다.

$$k\text{-factor} = \sum_{i=1}^n \frac{(h \times I_h)^2}{I_1^2} \quad (3)$$

여기서 h는 고조파의 차수를 의미한다. 즉, 고조파가 없을 때 k-factor는 1의 값을 가지게 되며 고조파가 증가할수록 k-factor는 증가하게 된다.

이 고조파를 반영할 수 있는 k-factor (K)를 이용한 변압기 출력 감쇄율(TDF)의 수식은 다음과 같다.

$$TDF = \sqrt{\frac{1.15}{1 + 0.15K}} \quad (4)$$

최대부하 발생시 측정된 전류의 기본과 및 고조파를 반영하여 식(3)을 이용, k-factor를 계산하고 이로서 변압기 출력 감쇄율(TDF)을 계산하여 알고리즘에 반영한다. 이렇게 계산된 일반적인 변압기 출력 감쇄율은 5~10%이며, 본 알고리즘에서는 변압기의 가혹한 조건을 고려하여 10%로 적용하기로 한다.

2.2 회귀분석모형

수집된 Data Table과 규정된 건물의 내선 수용률, 변압기용량을 사용하여 건물의 종합수용률(DR)과 변압기 용량 지수 (iTDR)를 식 (1)~(4)를 이용하여 구한다. 단, 변압기용량은 가혹한 변압기 출력 감쇄율을 고려하여 5%의 용량을 감하여 계산한다. 계산되는 DR과 iTDR은 일 단위로 그 값을 달리하게 되며, 최소 1년의 Data를 가정하므로 DR과 iTDR의 값은 각각 최소 365개가 된다. 이 계산된 DR과 iTDR은 실제의 수용률과 실제 변압기의 시간대 최대전력을 의미하는 값으로, 그 상관관계를 분석하여야 할 필요가 있으며, 상관관계 분석 이전에 부하의 연별 성장을 반영하기 위하여 예측해야 시점의 DR에 가중치를 둔다. 한국건설기술연구원의 수용률 설정기준안에 의하면 수요전력의 증가 여유를 5년의 경우 14%, 10년의 경우 35%로 정의 하고 있으므로 이를 감안하여 약 1년에 3%의 가중치를 두기로 한다.

여러 부하별 수용률과 변압기용량지수는 수배전반의 여러 가지 parameter를 반영하고 있으므로 그 추이를 파악하는 것이 쉽지 않으나, 실제적으로 30여개의 DR과 iTDR의 특성을 Graph로 나타내 본 결과 그 특성은 어느 정도 정비례의 관계를 가지고 있는 것을 발견할 수 있었다. 따라서, 이 두 변수의 상관관계를 더욱 더 자세히 파악하기 위하여 많은 Data의 특성을 가장 잘 반영할 수 있는 회귀 분석법(Regression Analysis)중 최소자승법(Least Square Method)을 알고리즘에 적용하였다. 이는 많은 데이터를 하나의 직선 또는 곡선으로 Modeling하는 기법으로 모든 데이터와의 거리차를 최소로 하는 함수를 찾아내는 방법이며 어느 정도 정비례의 관계가 있을 경우에는 주로 1차 또는 2차 다항식을 사용한다.

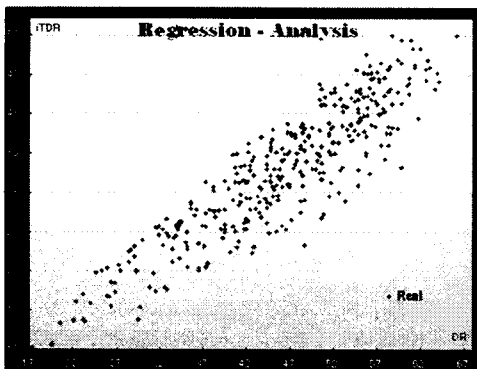


그림 1. Sample 계측 데이터

알고리즘의 간략한 설명을 위해, 그림 1의 Sample 계측 데이터를 들여보자. 그림에서 X축은 DR을, Y축은 iTDR을 의미하며, 각각의 계측값을 아래첨자 i 로 표기한다. 그림 1에서 보여 지고 있는 각각의 계측값에 대한 오차를 최소화시키는 함수를 $f(x)$ 라 하면 그 각각의 계측값 $iTDR_i$ 에 대한 오차 e_i 는

$$e_i = iTDR_i - f(DR_i) \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 최소자승법의 정의에 의해 e_i 의 합은 최소가 되어야 하므로, 이를 목적함수 S_r 로 정의하면 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$S_r = \text{MIN} \left\{ \sum_i^n (iTDR_i - f(DR_i))^2 \right\} \quad (6)$$

위 방정식은 최소점에서의 목적함수 S_r 의 a, b의 변화에 대한 기울기는 0이 되어야 한다는 조건을 이용하여 해를 구할 수 있다. 그 해를 구하면, 1, 2차식의 해는

$$a = \frac{n \sum DR_i \cdot iTDR_i - \sum DR_i \cdot \sum iTDR_i}{n \sum DR_i^2 - (\sum DR_i)^2}, b = \frac{\sum iTDR_i - a \cdot \sum DR_i}{n} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum DR_i^2 & \sum DR_i \cdot \sum DR_i \\ \sum DR_i & \sum 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum DR_i^2 \cdot iTDR_i \\ \sum DR_i \cdot iTDR_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 때 함수와 각 계측값의 오차 e_i 의 평균을 최소자승오차(Least Square Error: LSE)라고 한다. 즉,

$$LSE = \frac{1}{n} \sum_i^n (iTDR_i - f(DR_i))^2 \quad (9)$$

오차를 최소화하는 함수를 구하고 나면, 함수와 계측값 사이 상관관계의 정도를 파악해야만 함수의 오차범위를 결정할 수 있다. 이는 상관계수(correlation Coefficient: C)를 구함으로써 가능하며, 그 수식은 다음과 같다.

$$C = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (10)$$

여기서,

$$S_r = \sum (iTDR_i - f(DR_i))^2$$

$$S_t = \sum (\overline{iTDR_i} - f(DR_i))^2, \quad \overline{iTDR_i} = \frac{\sum iTDR_i}{n}$$

이렇게 구해진 상관계수의 값이 1에 가까워질수록 모델링 함수는 데이터의 특성을 완벽하게 반영하고 있으며, 반대로 상관계수의 값이 0에 가까워질수록 모델링 함수는 데이터의 특성을 제대로 반영하지 못하는 것으로 판단할 수 있다. 일반적으로, C의 값이 0.95 이상이면 완벽한 모델링을, 0.90 이상이면 데이터 특성을 잘 반영하고 있는 함수로서 사용이 가능하며 0.5 이하의 경우 함수는 Bad Fitting으로 간주되어 사용이 불가능하다.

최소자승법을 이용한 회귀분석의 결과 예가 아래에 도식화되어 있다. 그림에서 1차식의 상관계수는 0.8166, 2차식의 상관계수는 0.8168로 1차식보다 2차식의 모델링 결과가 근소한 차이로 더 높지만 두 모델링 함수는 데이터

의 특성을 완벽히 반영하고 있다고 할 수는 없다.

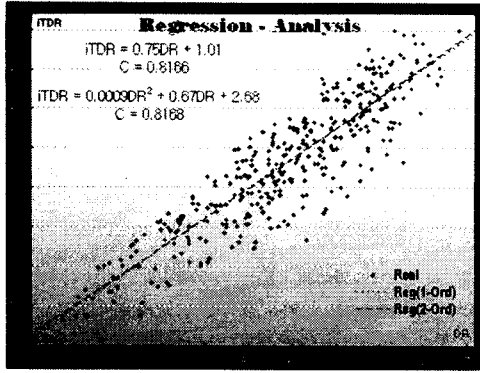


그림 2. Sample 계측 데이터의 회귀분석 결과

2.3 변압기 수용률 산정 Algorithm

전체 알고리즘의 Flow-Chart는 다음과 같다.

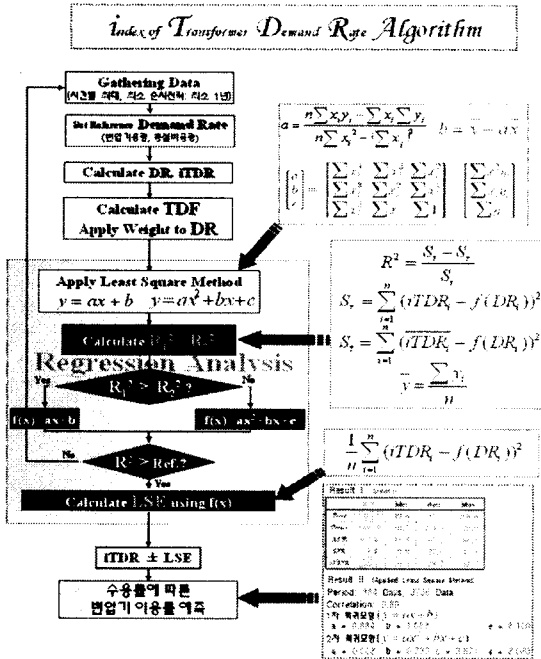


그림 3. 전체 Algorithm의 Flow Chart

설명한 바와 같이, DR과 iTDR의 관계를 각각 1, 2차로 모델링한 후, 그 상관관계가 높은 쪽을 택하여 iTDR의 예측에 적용을 시도한다. 만약, 1, 2차식 모두 그 상관관계가 0.5이하일 경우, 축적된 데이터는 그 추이를 파악할 수 없는 것으로 간주하고 알고리즘 수행을 중단하게 된다. 이러한 경우, 알고리즘은 차후 더 많은 데이터가 축적되고 난 후 다시 수행되어야 할 것이다.

상관관계가 높은 모델링 함수가 선택되면, 이를 이용하여 원하는 수용률에서의 iTDR 예측을 수행한다. 선택된 함수를 이용한 예측의 수행 시, 함수가 데이터들의 오차를 최소화하고 있다고는 하나 완벽한 특성을 반영하고 있다고는 할 수 없으므로 식 (9)에 의해 구해진 최소자승 오차(LSE)를 함수의 오차범위에 포함시키도록 한

다. 즉, 임의의 함수입력을 DR'이라고 가정하였을 경우, 함수의 출력은 f(DR')이 되며, 이를 iTDR'이라고 하면 iTDR'의 상하한치는

$$iTDR' - LSE < iTDR < iTDR' + LSE \quad (11)$$

이 된다.

최종적으로, 이렇게 산출된 오차범위를 고려하여 수용률에 변압기 용량지수를 예측한다. 변압기 용량지수의 예측은 데이터의 수집기간동안 수용률의 평균 증가율을 백분율로 구하여 함수에 대입시킴으로서 가능하다.

대상 부하의 수집된 데이터의 수용률 기준 시점을 α , 평균 수용률 증가율을 X(%), 증가율이 적용될 기간을 t라 하면, 예측 시점에서의 수용률 DR'은 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$DR' = \alpha + Xt \quad (12)$$

따라서 이때의 변압기 용량지수 iTDR'은

$$iTDR' = f(DR') \quad (13)$$

이 된다. 이로서 원하는 시점의 수용률에 대한 변압기의 실제 예측할 수 있으며 계산된 iTDR'은 상관계수 C에 의해 그 상관정도가 검증되었으므로 예측하고자 하는 시점에서의 DR'과 iTDR'을 Matching시켜 예측시점에서의 수용률을 계산하는 것이 가능하다.

2.4 사례연구



그림 4. 변압기 용량 시뮬레이터 - 변압기의 상태 표시

그림 4.는 개발된 시뮬레이터의 메인 화면으로, 부하중별 DR과 iTDR의 관계를 파악하기 위하여 부하 중 대학교 750kVA 1년간의 부하 데이터를 분석한 결과이다. 변압기용량과 총 설비용량은 750kVA로 동일하며, 평균 수용률과 최대 수용률은 32.7%, 53.1%, 변압기 용량지수의 평균값과 최대값은 각각 22.25%, 43.76%를 각각 나타내고 있다. 이에 대하여 위의 알고리즘을 적용, 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

표 1. 최소자승법 적용결과

모델링함수	상관계수	계수			LSE
		a	b	c	
1차식	0.804	0.837	-0.435	-	1.222
2차식	0.826	0.082	0.051	1.035	1.105

결과에 대한 그래프 및 DR , $iTDR$ 의 분석결과가 그림 5에 나타나 있다.

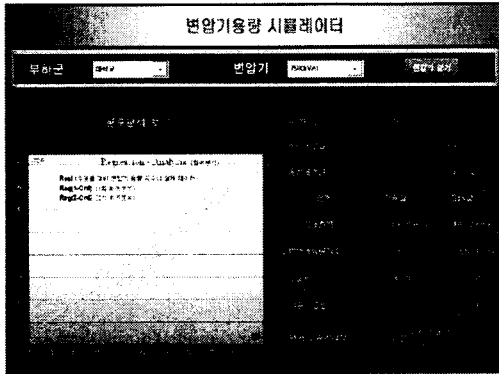


그림 5. 회귀분석을 통한 수용률 대비 변압기 용량지수 분석 결과

표 1.에서 보여진 바와 같이, 2차식의 상관계수가 더 높으므로 2차식을 적용하며, 이 경우 예측 $iTDR$ 의 범위는 ± 1.105 이다. 이러한 경우 부하의 증가 기준을 평균 5%로 적용하였을 경우, $iTDR$ 의 범위는 70.30~72.57로, 기준 수용률인 70%보다 낮으므로 예측시기에서 수용률의 기준 70%를 초과하고 있으므로, 변압기 용량을 증설할 필요가 있다는 판단을 내릴 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 축적되어 있는 고객별 Data를 이용하여 업종별로 규정되어 있는 수용률과 변압기 용량지수와의 상관관계를 파악하고, 미래의 수용률에 대한 변압기의 용량 증설여부를 판단하는 알고리즘을 제시하였다. 대부분의 고객 데이터는 높은 값의 상관계수를 가지고 있어 예측값의 신뢰성을 기대할 수 있었으며, 차후 더 광범위한 데이터의 수집을 통한 분석으로 그 정확도를 높여야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 전력산업연구개발의 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- (1) IEEE Std. C57.12.90, IEEE Std Test Code for Liquid Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers, 1993.
- (2) IEEE Std. C57.12.100, IEEE Std Test Procedure for Thermal Evaluation of Oil-Immersed Distribution Transformers, 1999.

- (3) IEEE Std. C57.91, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Overhead and Pad-Mounted Distribution Transformers Rated 500kVA and Less with 65°C or 55°C Average Winding Rise, 1981.
- (4) IEC 60076-2, Power Transformers-Part 2 : Temperature Rise, 2001.