

고조파를 포함하는 부하의 변압기 용량 산정에 관한 연구

(A Study on the Transformer Capability containing Harmonic Load Currents)

김경철 · 박상영* · 이일무 · 백승현

(Kyung-Chul Kim · Sang-Young Park · Il-Moo Lee · Seung-Hyun Paik)

홍익대학교 전기설비연구 센터

Abstract

The increasing use of nonlinear loads has resulted in an increase in the harmonic content of the load current for power transformers. Transformers subject to harmonic currents have higher losses and need to be derated. This paper presents a simple method for determining the capability of transformers to supply harmonic load currents and shows that the application of capacitor banks with a series connected reactor and harmonic filters will greatly increase the capability of transformers. The EDSA program was used as a simulation tool for the case study.

1. 서 론

최근 전력전자 기술의 발달에 따라 개인용 컴퓨터, 레이저 프린터, 형광등, 반도체 소자의 스위칭을 이용하는 전자장비등 비선형 부하가 많이 쓰이고 있다. 이들 비선형 부하는 고조파 전류를 발생시켜 많은 고조파 장해를 일으킬 수 있다[1].

변압기의 용량 산정은 설비부하의 사실 용량에 수용률을 곱한 수용부하에 따라 결정하고 있다. 그러나 변압기에 고조파 전류가 유입되면 변압기 손실이 증가되고 변압기가 부담할 수 있는 용량이 현저히 감소하게 된다. 따라서 고조파를 고려한 변압기 용량 산정을 할 필요가 있다[1-4].

본 논문에서는 고조파를 고려한 부하의 변압기 용량 산정법을 제시하고, 사례연구 시스템에 적용하고자 한다. 또한 커패시터 뱅크와 고조파 필터를 적용하여 고조파를 저감시키고 활용 변압기 용량을 증대 하고자 하였다. 사례연구의 시뮬레이션은 상용화된 EDSA 프로그램[5]을 사용하였다.

2. 사 례 연 구

2.1 사례연구 계통도

그림 1은 사례연구 배전 시스템의 계통도이다. 배전 변전소는 공급전압이 22.9[kV], 단락용량이 300[MVA], 단락임피던스는 100[MVA] 기준으로 $0.114 + j11.396$ [%]이다.

배전선로는 CNCV 325[mm] 전력케이블이고, 100[MVA] 기준으로 선로 임피던스는 $6.876 + j11.396$ [%], 선로 어드미턴스는 $j0.686 \times 10^{-3}$ [U] 이다.

수용가에는 9대의 변압기가 있다. 사례연구로서 변압기 용량 산정에 활용한 1,500[kVA] 변압기(TR1)와 나머지 8대의 변압기를 편의상 한대로 등가한 7,00[kVA] 변압기(TR2)로 한다. 두 대의 변압기는 22.9[kV]/380-220[V], 임피던스 $Z_k = 6$ [%], $X/R = 12$ 이라 한다.

TR1 변압기에는 수용률을 감안한 부하 1,431[kVA], 역률 90[%]가 연결되어 있다. 고조파를 고려한 변압기 용량 산정에는 TR1 변압기 부하와 유사한 변압기 부하에서 실측한 데이터로 1,431[kVA], 역률 90[%], 전류 왜형을 33.5[%]를 사용하였다. 커패시터 뱅크와 고조파 필터는 변압기 용량을 증가 시키는 수단으로 사용 하였다.

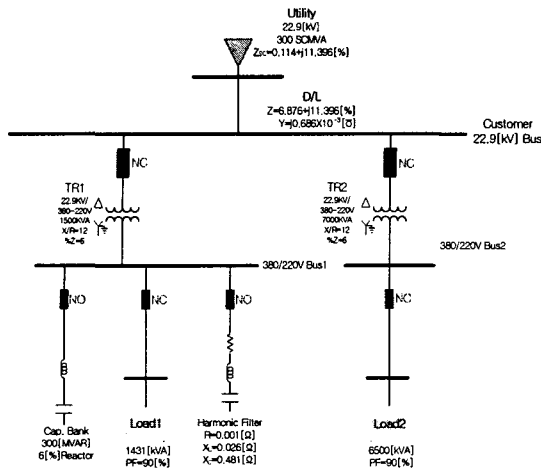


그림 1. 사례연구 배전시스템
Fig. 1. Single-line diagram of the distribution system under study

TR2 변압기에는 수용물을 감안한 부하 6,500[kVA], 역률 90[%]가 연결되어 있다.

2.2 고조파를 고려하지 않는 변압기용량 선정

변압기 TR1에는 시설용량 2,385[kVA]의 부하가 있고, 수용률 60[%]를 적용하면 수용부하는 1,431[kVA]로 선정할 수 있다. 이때, 변압기 여유율은

$$\frac{1500 - 1431}{1500} \times 100 = 4.6 [\%]$$

이다.

변압기 손실 및 간선 선로 손실을 고려한 변압기 용량 산정을 하려면 조류계산이 필요하다. EDSA 프로그램을 사용한 조류계산 결과는 그림 2와 같다.

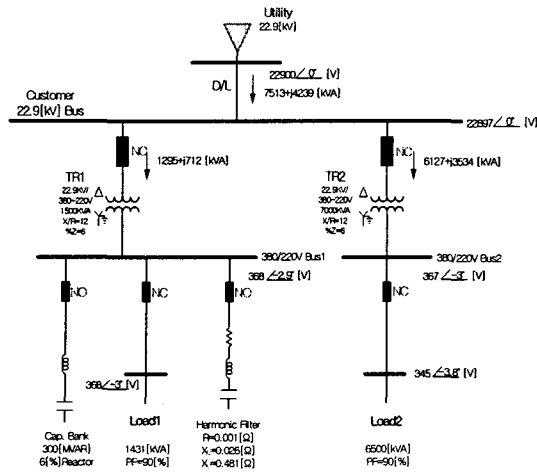


그림 2. 조류계산 결과
Fig. 2. Results of the power flow

손실을 고려한 TR1 변압기에 걸리는 부하는

$$S = 1,295 + j712 = 1,477.8 [kVA]$$

이므로 이때, 변압기 여유율은

$$\frac{1500 - 1477.8}{1500} \times 100 = 1.5 [\%]$$

이다.

2.3 고조파를 고려한 변압기 용량 선정

비선형 부하의 증가로 변압기에는 많은 고조파 전류가 흐르고 있다. IEEE Std C57.12.00-2000[7]에서는 전류 왜형율이 5[%]가 초과하는 경우에 고조파를 고려한 변압기 용량 산정을 하도록 규제하고 있다.

고조파를 포함하는 변압기 TR1의 부하는 정보화 건축물인 종로타워 내의 용량이 같고 유사한 부하 종류로 판단되는 실측한 데이터[8]로 1,431[kVA], 역률 90[%], 전류 왜형율 33.5[%]를 사용한다.

그림 3은 고조파 발생원의 전류파형을 나타낸다. 주로 제3(9.6[%]), 제5(26.0[%]), 제7(17.0[%])고조파로 이루어져 있다.

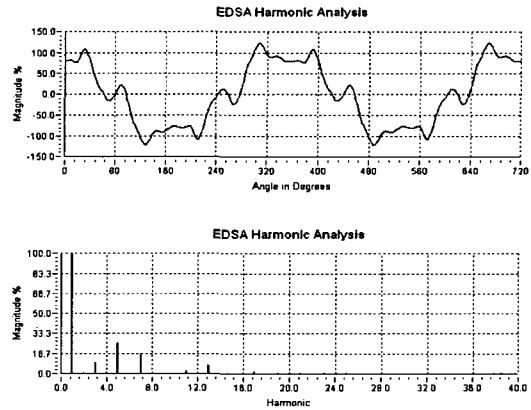


그림 3. 고조파 발생 전류 파형
Fig. 3. Load current waveform

EDSA 고조파 분석 프로그램[5]을 사용하여 모선 전압과 선로 전류를 계산한다. 그림 4는 수용가의 22.9[kV]모선 전압 파형이다. 실효치는 22,898[V]이고, 전압 왜형율은 0.83[%]이다.

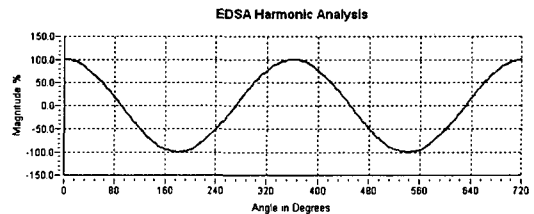


그림 4. 22.9(kV) 모선 전압파형
Fig. 4. 22.9(kV) Bus voltage waveform

그림 5는 변압기 TR1 고압측의 전류파형이다. 실효치는 38[A], 전류 왜형율은 33.5[%]이고, K-factor는 4.76 이다. K-factor는 다음과 같이 정의 되고, 변압기의 고조파 내력을 나타낸다.

$$KF = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 I_h^2}{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (1)$$

여기서 h는 고조파 차수이고, I_h 는 제h 고조파의 전류를 나타낸다.

따라서 손실을 고려한 부하는 다음과 같이 계산할 수 있다.

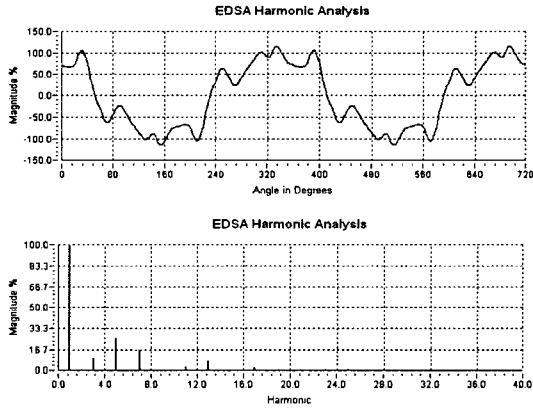


그림 5. 선로 전류파형
Fig. 5. Branch current waveform

손실을 고려한 부하

$$\sqrt{3} \times 22,898 \times 38 \times 10^{-3} = 1,507.1 [kVA]$$

고조파로 인한 변압기의 출력감소는 IEEE Std C57.110-1998[2]에 따르면 변압기 고조파 출력 감소계수 (THDF, Transformer Harmonic Derating Factor)로 나타낼 수 있다.

$$THDF = \sqrt{\frac{1 + P_{EC}[PU]}{1 + KF \times P_{EC}[PU]}} \times 100[\%] \quad (2)$$

여기서 $P_{EC}[PU]$ 는 변압기의 와류손으로 변압기의 전 부하 손실로 나눈 값이다. 와류손은 주파수의 제곱승에 비례하므로 변압기 출력 감소에 크게 영향을 끼친다.

변압기의 와류손은 실험결과로 구할 수 있으나[2], 편의상 여기서는 참고문헌[4]에서 제시한 변압기 정격과 와류손의 관계 그래프로 구한다.

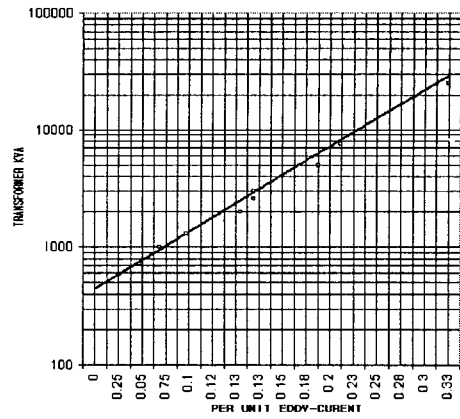


그림 6. 변압기 정격과 와류손의 관계
Fig. 6. Relationship between Transformer rating and Eddy-current

변압기 TR1은 정격용량이 1,500[kVA]이므로 그림 6에서 와류손은 0.15[PU]로 추정한다. 공식(2)의 변압기 고조파 출력 감소계수를 구하면,

$$THDF = \sqrt{\frac{1 + 0.15}{1 + 4.76 \times 0.15}} \times 100 = 82[\%]$$

가 된다.

그러므로 고조파를 고려한 변압기 용량은

$$1,500 \times 0.82 = 1,229 [kVA] \text{ 이다.}$$

고조파를 고려했을 때의 변압기 여유율은

$$\frac{1,229 - 1,507.1}{1500} \times 100 = -18.5[\%]$$

임을 알 수 있다.

단순히 수용부하 1,431[kVA], 역율 90[%]을 고려하여 변압기 정격을 1,500[kVA]으로 하면 변압기 여유율 4.6[%]이고, 손실을 포함하면 변압기 여유율이 1.5[%]로 낮아지며, 만일 부하의 고조파를 고려하면 변압기 여유율이 -18.5[%]가 되어 변압기 용량 산정이 잘못 되었음을 사례연구에서 알 수 있다.

2.4 커패시터 뱅크를 적용한 변압기 용량 증가

커패시터 뱅크는 역율(수용가)이나 전압(전력회사)을 조절하기 위해 널리 쓰이고 있다[9]. 커패시터 뱅크에 직렬로 리액터를 설치하면, 돌입전류의 크기도 줄이지만 고조파의 필터 역할도 감당한다.

변압기 TR1의 부하는 1,431[kVA], 역율 90[%]이므로

$$S_1 = 1,288 = j624 [kVA]$$

이다.

유도성 무효전력 624[kVAR]에서 커패시터 뱅크 300[kVAR]을 설치하는 것으로 한다. 6[%]리액터를 설

정하면, 공진 주파수(h_r)는

$$h_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0.06 \times 1}} = 4.1$$

으로 되어 부하의 제3, 제5, 제7 고조파를 줄일 수 있음이 예측된다.

EDSA 프로그램으로 모션전압과 선로 전류를 계산한다. 그림7은 수용가의 22.9[kV] 모션 전압 파형이다. 실효치는 22,914[V]이고, 전압 왜형율은 0.13[%]으로 커패시터뱅크 설치전보다 좋아 짐을 알 수 있다.

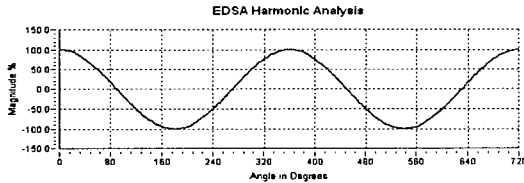


그림 7. 22.9(kV) 모션 전압파형
Fig. 7. 22.9(kV) bus voltage waveform

그림 8은 변압기 TR1 고압측의 전류파형이다. 실효치는 33.59[A], 전류 왜형율은 24.32[%], K-factor 는 2.55 으로 커패시터뱅크 설치로 많이 개선되었다.

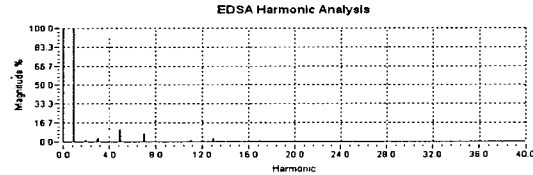
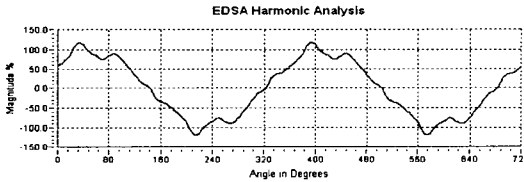


그림 8. 선로 전류파형
Fig. 8. Branch current waveform

따라서 커패시터뱅크 적용시 변압기 여유율은 다음과 같이 계산된다.
손실을 고려한 부하

$$\sqrt{3} \times 22,914 \times 33.59 = 1,333.1 [kVA]$$

$$THDF = \sqrt{\frac{1+0.15}{1+2.55 \times 0.15}} \times 100 = 91 [%]$$

고조파 고려한 변압기 용량

$$1,500 \times 0.91 = 1,368.1 [kVA]$$

변압기 여유율

$$\frac{1,368.1 - 1,333.1}{1500} \times 100 = 2.3 [%]$$

위의 결과에서 알 수 있듯이, 고조파를 고려한 변압기 여유율 -18.5[%]가 커패시터뱅크를 적용하면 변압기 여유율이 2.3[%]으로 되어 변압기 용량을 1,500[kVA]으로 선정해도 무방하다.

2.5 고조파 필터를 적용한 변압기 용량 증가

고조파 필터는 가격이 저렴하고 설치하기 쉬우므로 널리 사용되고 있다. 그림 9와 같은 간단한 수동 동조필터를 적용하여 고조파를 저감시켜 변압기 용량을 증가시키는 효과를 알아보기로 하자.

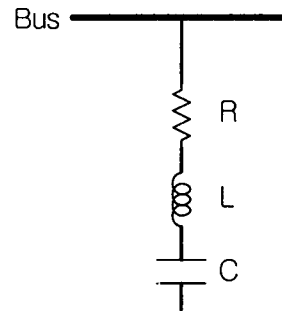


그림 9. 수동 동조 필터
Fig. 9. Passive resonant filter

부하의 고조파 성분은 주로 제 3, 5, 7 고조파 이므로 공진 주파수 (h_r)를 4.3으로 한다. 수동 동조필터의 제원은, 먼저 저항 $R = 0.001 [\Omega]$ 으로 정한다. 커패시터뱅크 적용시 커패시터 용량을 300 [kVAR]으로 하여 고조파 저감 효과를 크게 하였으므로, 용량성 리액턴스 X_C 는

$$X_C = \frac{V^2}{h_r^2} = \frac{380^2}{300,000} = 0.481 [\Omega]$$

으로 하고, 유도성 리액턴스를 구한다.

$$X_L = \frac{X_C}{h_r^2} = \frac{0.481}{4.3^2} = 0.026 [\Omega]$$

수동 동조필터의 임피던스 응답곡선을 그리면 그림 10과 같다. 예측한 대로 제4.3 고조파(258[Hz])에서 최고 고조파 저감 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

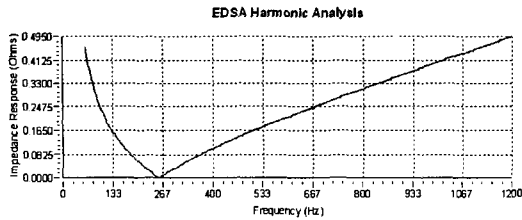


그림 10. 임피던스 응답특성
Fig. 10. Impedance response characteristic

EDSA 프로그램으로 모선 전압과 선로 전류를 계산한다. 그림 11은 수용가의 22.9[kV] 모선 전압 파형이다. 실효치는 22,914[V]이고, 전압 왜형율은 0.13[%]으로 커패시터 뱅크의 경우와 같았다.

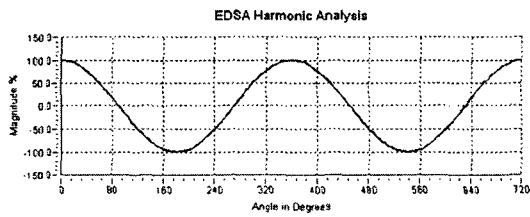


그림 11. 22.9(kV) 모선 전압파형
Fig. 11. 22.9(kV) bus voltage waveform

그림 12는 변압기 TR1 고압측의 전류 파형이다. 실효치는 33.58[A], 전류 왜형율은 24.35[%], K-factor는 2.55로 고조파 필터 설치로 많이 개선되었다.

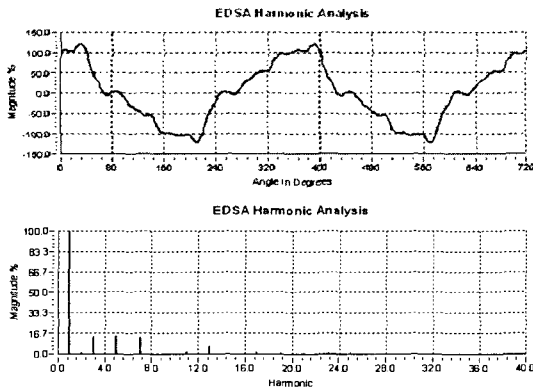


그림 12. 선로 전류 파형
Fig. 12. Branch current waveform

고조파 필터 적용시 변압기 여유율은 다음과 같이 계산된다.

손실을 고려한 부하

$$\sqrt{3} \times 22,914 \times 33.58 = 1,332.7 [kVA]$$

$$THDF = \sqrt{\frac{1+0.15}{1+2.55 \times 0.15}} \times 100 = 91 [%]$$

고조파 고려한 변압기 용량

$$1,500 \times 0.91 = 1,368.1 [kVA]$$

변압기 여유율

$$\frac{1,368.1 - 1,332.7}{1500} \times 100 = 2.2 [%]$$

커패시터 뱅크 적용과 마찬가지로 고조파 필터를 적용하면 변압기 여유율을 -18.5[%]에서 2.2[%]로 대폭 증가시킬 수 있었다.

2.6 변압기 용량 산정 요약

표 1은 변압기 용량 산정을 요약해 놓았다. 변압기 TR1은 수용부하 1,431[kVA]에서 정격 용량으로 1,500[kVA]을 선정 하였다. 이때 변압기 여유율은 4.6[%]이다. 손실을 고려하면 1.5[%]의 변압기 여유율을 가진다.

고조파를 고려하면 변압기 여유율은 -18.5[%]가 되어 부하 용량이 정격 용량보다 커서 변압기 용량 산정이 잘 못 되었음을 알 수 있다.

변압기 정격 용량 1,500[kVA]을 유지하기 위해서는 고조파 저감 장치를 사용하여 손실을 고려한 부하 용량을 줄이고, 고조파를 고려한 변압기 사용 용량을 증대시켜야 한다. 사례로서 커패시터 뱅크와 고조파 필터를 적용하여 부족한 변압기 여유율을 -1.85[%]에서 2.3[%], 2.2[%]로 각각 높였다.

표 1. 변압기 용량 산정 비교

Table 1. Transformer capability comparisons

Case	A. Load1	B. Load1 with Harmonics	C. CaseB and Cap.Bank	D. CaseB and Harmonic Filter
변압기 정격 용량 [kVA]	1500	1500	1500	1500
적용 부하	용량 [kVA]	1431	1431	1431
	역율 [%]	90	90	90
손실 고려한 부하 [kVA]	1477.8	1507.1	1333.1	1332.7
K-factor	1.0	4.76	2.55	2.55
THDF [%]	100	82	91	91
고조파 고려한 변압기 용량[kVA]	1500	1229	1368	1365
변압기 여유율[%]	1.5	-18.5	2.3	2.2

3. 결 론

비선형 부하는 고조파를 발생 시키고, 변압기의 손실을 증가시켜 변압기 용량을 감소시키는 결과를 초래하게 된다. 본 논문에서는 고조파를 포함하는 부하의 변압기 용량 산정법을 제시하고 사례 연구 시스템에 적용하였다. 시설 용량 2,385[kVA]의 부하에 수용율 60[%]를 적용하면 수용부하는 1,431[kVA]가 된다. 역율을 90[%]으로 정하고 변압기 정격 용량을 1,500[kVA]으로 산정하였다. 손실전력을 고려한 변압기 여유율은 1.5[%]가 되어 문제가 없었다. 부하에 고조파가 포함되면 IEEE Std C57.110-1998에 의거하여 변압기 고조파 출력 감소 계수를 고려해야 한다. 부하 전류 왜형율이 33.5[%]인 경우 감소계수가 82[%]나 되어 변압기의 최대 부하 용량이 1,229[kVA]으로 대폭 감소되었다. 이때의 변압기 여유율은 -18.5[%]가 되어 고조파를 고려한 변압기 용량 산정이 적절하지 못함을 알 수 있었다.

변압기 2차측에 고조파를 저감시키기 위해 직렬 리액터가 연결된 커패시터 뱅크나 수동 동조 필터를 설치하면 부하 전류 왜형율을 24.3[%]으로 저감시킬 수 있고, 변압기의 최대 부하 용량을 1,368[kVA]으로 증가 시키고, 이 때의 변압기 여유율은 2.3[%]가 되는 효과를 알 수 있었다.

본 논문은 고조파를 고려한 변압기 용량 산정에 활용될 수 있을 것으로 사료 된다.

References

- [1] R.C. Dugan and et.al. , "Electrical Power System Quality", Mc Graw-Hill Co., 1996
- [2] IEEE Std C57. 110-1998, "IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents".
- [3] D.W. Egoft and A.J. Flehsig, "Harmonics Transformer Derating", IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1-5 May 1994.
- [4] S.P. Kennedy and C.L.Ivey, "Application, Design and Rating of Transformers Containing Harmonic Currents", IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference, 18-22 June 1990.
- [5] EDSA User's Guide, "Electrical Power System Harmonic Analysis Program", EDSA Micro Co. 2004.
- [6] EDSA user's Guide, "Power Flow Analysis of the Electric Power System ", EDSA Micro Co. 2004.
- [7] IEEE Std C57.12.00-2000, "IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers".
- [8] 김경철, 이일무, 백승현, "상업용 설비부하의 중성선 영상전류 저감장치 분석 및 적용에 관한 연구", 한국 조명 전기설비 학회, 9월호, 2004.
- [9] IEEE Std 1036-1992, "IEEE Guide for Application of shunt Power Capacitors".