

전력계통의 전자과도현상에 관한 연구

(A Study on the Electromagnetic Transients in A Power System)

김경철 · 강창원 · 이일무*

(Kyung-Chul Kim · Chang-Won Kang · Il-Moo Lee)

Abstract

Transient in an electrical system are generated by lightning and switching. This paper presents analysis of switching and lightning surge, and means of limiting the voltage magnification transient for high voltage power systems by using EDSA's EMTAP software package.

One means of limiting the voltage magnification transient is to convert the end-user power factor correction banks to harmonic filters. An inductance in series with the power factor correction bank was used to decrease the transient voltage at the customer bus to acceptable levels.

The interception of the impulse from the phase wire is fairly straight forward by properly installed surge arresters. The simulation shows that the addition of the surge arrester at the customer location can achieve a substantial reduction of the transient magnitude.

1. 서론

전력계통해석 분야에서 전력계통의 전자 과도 현상의 분석은 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 주로 전력계통에서 낙뢰와 스위칭시 일어나는 과도 현상을 분석하기 위해서이다. 낙뢰는 땅에 있는 물체에 크기가 매우 큰 전류를 흐르게 한다. 낙뢰가 떨어지는 지점에는 낙뢰가 가지고 있는 전류와 그 지점에서의 등가 임피던스를 곱한 전압이 생기게 된다. 이 이상전압으로 인하여 예전에는 인명피해 위주의 해석을 해왔으나 요즘에는 전자 장비와 통신시설의 발달로 인하여 이에 미치는 피해가 심각하다 할 수 있다. 스위칭은 전력시스템에서 전압이나 전류를 공급하거나 제어하는 작용이다. 전기 회로에는 인덕턴스가 존재하기 때문에 전류가 흐르면 자속이 생기고 역기전력이 발생한다. 스위칭의 속도가 빠를수록 더 큰 역기전력이 생기게 된다. 인덕턴스에 저장된 에너지는 캐패시턴스에 전달되고, 에너지는 인덕턴스와 캐패시턴스 사이를 오가게 된다. 이 때 전원측과 부하측에 고조파 동조가 일어나게 되고 그 수치는 기본전압 파고치를 몇배나 상회하는 큰값이 된다. 이러한 이상전압은 저항소자에 무리를 주게 되고 결국 여러 가지 이상 장애를 나타나게 한다.

이 논문에서는 전력계통 해석분야의 간단한 사례연구를 통해서 전력계통의 전자과도현상을 분석했다. 전력계통 해석분야에서 상용화된 EDSA's ElectroMagnetic Transient Analysis Program (EMTAP)을 사용하여 전력계통의 모델링과 전력계통의 전자과도 현상을 분석했다.

2. System Modeling

전력계통의 전자과도현상을 분석하기 위해서는 전력계통을 적절한 모델로 변환하여야 한다. 실제 전력시스템은 여러 계급의 전압으로 이루어져 있고, 선로 정수 또한 불평형으로 3상으로 해석해야 하나 편의상 평형 3상으로 취급하여 단상으로 등가회로화 시킨다. 모든 단위는 백분율로 환산한 값을 쓴다.

부하에 전력을 공급하는 전력회사나 변전소를 전압원으로 나타낸다. 전압원은 크기(Volts), 위상(Degrees), 주파수(Hertz)로 표현할 수 있다.

낙뢰는 매우 큰 전류를 포함하고 있으므로 전류원으로 나타낸다. 낙뢰는 최대크기(Amperes), Rise time(msec), Peak time(msec), Half-peak time(msec)으로 표현한다.

이상전압과 기기의 절연과피를 방지하기 위한 파괴기는 비선형 전압-전류특성을 가진 소자로 나타낸다. 전류-전압 특성은 아날로그 파괴기의 경우는

$$V = K_1 I^{K_2} \quad (1)$$

으로 표시된다. 여기서 V=전압(Volts), I=전류(Amps), K_1, K_2 =constant 이다.

디지털 파괴기의 경우는 전류-전압의 값을 입력하여 비선형 특성을 표현한다. 충격방전 전압(Volts)과 회복전압(Volts) 값이 입력으로 요구된다.

인덕턴스(Henry)는 초기 조건으로 초기전류 크기(Ampere), 초기전류 위상(Degrees) 값이 필요하다.

스위치는 투입하거나 개방할 때 필요한 소자로 쓰인다. 스위치 소자의 상태가 개방인지, 투입인지를 파악하고, 투입이나 개방시간(msec)이 입력으로 쓰인다.

부하는 저항과 리액턴스가 병렬로 연결된 임피던스로 등가화 시킨다. 부하전압 V(KV), 부하전력 S(MVA), 부하역율 $\cos \theta$ 가 주어지면, 부하 임피던스는 다음과 같이 계산된다.

$$Z = \frac{V^2}{S} \quad (\text{Ohms}) \quad (2)$$

$$R = Z \cdot \cos \theta \quad (\text{Ohms}) \quad (3)$$

$$X_L = z \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \theta} \quad (\text{Ohms}) \quad (4)$$

$$L = \frac{X}{2\pi f} \quad (\text{Ohms}) \quad (5)$$

여기서 f=주파수(Hz), Z=임피던스(Ohms), R=저항(Ohms), X_L =유도성리액턴스(Ohms), L=인덕턴스(Henry)이다.

캐패시터 뱅크는 전압 V(KV), 용량 Q(MVAR)가 주어지면, 캐패시턴스는 다음과 같이 구한다.

$$X_C = \frac{V^2}{Q} \quad (6)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (7)$$

여기서 X_C = 용량성 리액턴스(Ohms), C=캐패시턴스(Farad) 이다.

변압기 모델은 간소화 된 것으로 저항과 리액턴스가 직렬로 연결된 임피던스로 나타낸다.

Simulation을 하기위한 계통 모델은 그림 1.와 같다.

전력회사에서 캐패시터를 투입시 일어날 수 있

는 스위칭 과도현상으로는 고조파가 발생하고, 부하측에서의 임피던스 특성으로 동조가 일어나면 고조파가 증폭되어 피해를 주게 된다.

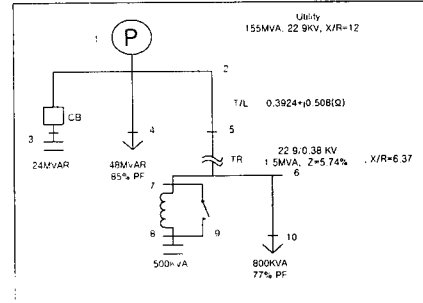


그림 1. 사례연구를 위한 계통도
Fig 1. Single-Line Diagram of the System Under Study

캐패시터가 투입되면, 초기에는 과도전류에 의해 전압이 낮아지게 된다. 전압이 정상치로 돌아가면서 최대값보다도 더 올라가게 되는데 200%까지 올라 갈 수 있다. 몇주기의 동요가 일어난후 전압은 안정을 찾게 될 것이다.

과도전압의 주파수는 비교적 작은 200Hz에서 1.5kHz 사이이다. 과도 전압의 크기, 지속시간, 주파수는 부하뎀핑, 시스템 인덕턴스, 시스템과 동조를 일으키는 조건등 여러 가지 요소에 따라 다르다. 전력회사측과 부하측의 임피던스가 동요주파수에 동조가 되면 부하측에 과도 전압이 증폭되어 더욱 커진다.

상용화된 EDSA Program에 적용하기 위해서 그림 1.의 3상 계통도를 단상으로 등가 변환시켜 적용한다. 그림 2.는 단상으로 등가변환시킨 회로도이다. 이 변환된 회로도에 각 단계별 Simulation 시 필요한 인덕터나 피뢰기 등을 똑같이 등가변환하여 설치하고 반복하여 실험을 진행하도록 한다.

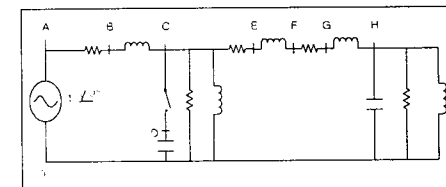


그림 2. 단상 등가 변환
fig 2. System Equivalent

모든 계통은 앞장에서 언급했던 단위법에 의거

하여 모두 환산하여 준다. 기준을 잡고 그에 따라서 전력회사, 부하, 송전선로, 변압기 등 모든 데이터를 pu법에 따라 고치고, 그 데이터를 가지고 Simulation한다.

다음은 그림 1.의 데이터를 그림 2.처럼 단상변환했을 때 모두 pu법으로 고치는 과정을 보이고 있다.

백분율로 하기 위하여 기준을 잡는다.

$$S_b = 10 \text{ MVA}$$

$$V_{bs} = 22.9 \text{ kV}$$

$$V_{bl} = 380 \text{ V} = 0.38 \text{ kV}$$

$$Z_{bs} = \frac{(V_{bs})^2}{S_b} = 52.441 \text{ Ohms}$$

$$Z_{bl} = \frac{(V_{bl})^2}{S_b} = 0.0144 \text{ Ohms}$$

전력회사측의 데이터를 구한다.

$$V_{a0} = 22.9 \text{ kV} = 1.0 \angle 0^\circ \text{ Pu}$$

$$Z_a = \frac{22.9^2}{1555} = 0.3383 \text{ Ohms}$$

$$Z_a(\text{Pu}) = \frac{Z_a}{Z_{bs}} = 0.00645 \text{ Pu}$$

$$R_{ab} = 0.00053 \text{ Pu}$$

$$X_{bc} = 0.00643 \text{ Pu}$$

$$L_{bc} = \frac{X_{bc}}{377} = 0.000017 \text{ Pu}$$

전력회사의 캐패시터 데이터를 구한다.

$$X_{do} = \frac{22.9^2}{24} = 28.85 \text{ Ohms}$$

$$X_{do}(\text{Pu}) = \frac{X_{do}}{Z_{bs}} = 0.41667 \text{ Pu}$$

$$C_{do} = \frac{1}{377 \times X_{do}(\text{Pu})} = 0.00637 \text{ Pu}$$

전력회사의 부하 임피던스를 구한다.

$$Z_c = \frac{22.9^2}{48} = 10.93 \text{ Ohms}$$

$$R_{co} = Z_c \times 0.85 = 12.85 \text{ Ohms}$$

$$X_{co} = Z_c \times \sqrt{1 - 0.85^2} = 20.74 \text{ Ohms}$$

$$R_{co}(\text{Pu}) = \frac{R_{co}}{Z_{bs}} = 0.245 \text{ Pu}$$

$$X_{co}(\text{Pu}) = \frac{X_{co}}{Z_{bs}} = 0.395 \text{ Pu}$$

$$L_{co} = \frac{X_{co}(\text{Pu})}{377} = 0.00104 \text{ Pu}$$

전력회사와 부하사이의 선로 임피던스를 구한다

$$R_{ce} = 0.3924 \text{ Ohms}$$

$$X_{ef} = 0.508 \text{ Ohms}$$

$$R_{ce}(\text{Pu}) = \frac{R_{ce}}{Z_{bs}} = 0.007480 \text{ Pu}$$

$$X_{ef}(\text{Pu}) = \frac{X_{ef}}{Z_{bs}} = 0.009687 \text{ Pu}$$

$$L_{ef} = \frac{X_{ef}(\text{Pu})}{377} = 0.000025 \text{ Pu}$$

변압기의 임피던스를 구한다.

$$Z_{old} = 0.0574 \text{ Pu}$$

$$Z_{new} = Z_{old} \times \frac{10}{1.5} = 0.3826 \text{ Pu}$$

$$R_{fg} = 0.0593 \text{ Pu}$$

$$X_{gh} = 0.378 \text{ Pu}$$

$$L_{gh} = \frac{X_{gh}}{377} = 0.001 \text{ Pu}$$

부하의 캐패시터 데이터를 구한다.

$$X_{ho} = \frac{0.38^2}{0.5} = 0.2888 \text{ Ohms}$$

$$X_{ho}(Pu) = \frac{X_{ho}}{Z_{bl}} = 20.05 \text{ Pu}$$

$$C_{ho} = \frac{1}{377 \times X_{ho}(Pu)} = 0.000132 \text{ Pu}$$

부하의 임피던스를 구한다.

$$Z_h = \frac{0.38^2}{0.8} = 0.1805 \text{ Ohms}$$

$$R_{ho} = Z_h \times 0.77 = 0.2344 \text{ Ohms}$$

$$X_{ho} = Z_h \times \sqrt{1 - 0.77^2} = 0.2829 \text{ Ohms}$$

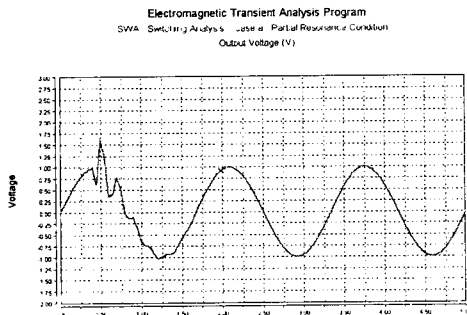
$$R_{ho}(Pu) = \frac{R_{ho}}{Z_{bl}} = 16.278 \text{ Pu}$$

$$X_{ho}(Pu) = \frac{X_{ho}}{Z_{bl}} = 19.60778 \text{ Pu}$$

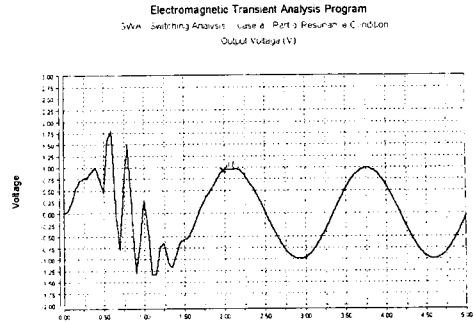
$$L_{ho} = \frac{X_{ho}(Pu)}{377} = 0.0521 \text{ Pu}$$

3. 사례 연구

60Hz 정현파 전압이 전력회사의 전원으로 공급된다고 가정하고, 캐패시터 스위치(<그림 6>의 C와 D 사이에 위치)를 최대값에 도달하는 시간 ($\frac{4}{60} = 0.0042\text{sec}$)에 투입하여 가장 나쁜 조건으로 하여 전력회사와 부하측의 전압 파형을 관찰한다.



(a) Utility voltage

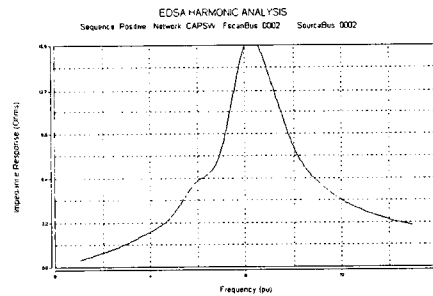


(b) Customer voltage

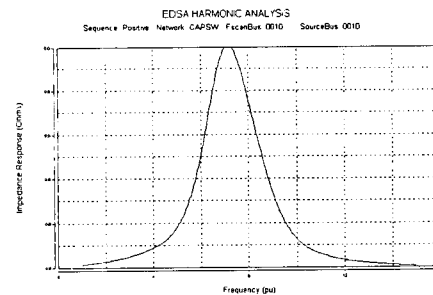
그림 3. 사인함수 입력 응답

fig 3. Sine Function Input Responses

그림 3에서 보면 전력회사의 전압은 최대치가 약 1.6Pu 인데 비하여 부하측의 전압은 최대치가 거의 1.8Pu에 달하고, 동요주기도 더 길게 일어나는 것을 보여주고 있다. 여기서 보여지는 것처럼 스위칭시 전력회사와 부하측의 차이가 이렇게 심한 것은 바로 고조파 때문인데 이것은 다음의 그림을 보면 알 수 있다.



(a) Utility



(b) Customer

그림 4. 임피던스 응답곡선

fig 4. Impedance Responses

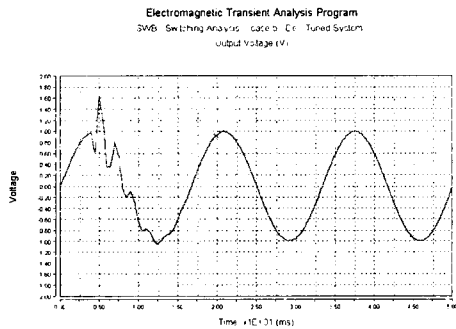
위의 그림에서 보이듯이 전력회사의 동요주파수

는 약 8고조파이고, 부하측의 고유 주파수는 약 6.8고조파이다. 이 두 지점의 고유동요 주파수가 비슷하기 때문에 동조가 일어나 부하측에 더 큰 과도 전압이 발생하게 되는 것이다. 그렇다면 이러한 부하측의 고유동요주파수를 전력회사 측과 다르게 한다면 부하측에 걸리는 과도 전압이 줄어들 수 있을 것이다. 이에 따라 부하측에 리액터를 설치하여 변경하고 그 결과를 살펴 보기로 한다. 일반적으로 제 5고조파보다 작게 부하측의 고유동요 주파수를 이동시키고 있기에 여기서는 4.3고조파로 정하여 리액터 값을 구하도록 한다.

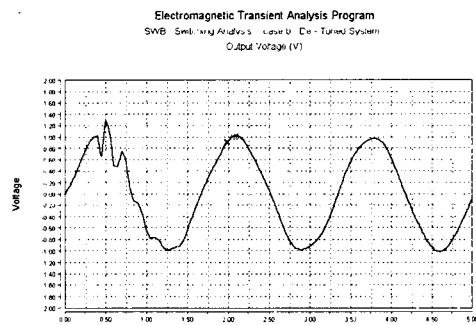
$$4.3 = \sqrt{\frac{1}{\omega^2 L_h C_{ho}}} \quad (8)$$

$$L_h = \frac{1}{4.3^2 \times 377^2 \times C_{ho}} = 0.00288 \text{ Pu}$$

그림 5.는 리액터를 설치한 후의 전압파형을 비교 한 것이다.



(a) Utility voltage



(b) Customer voltage

그림 5. 리액터를 설치한 후의 사인 입력 응답
fig 5. Sine Function Input Responses after the Addition of de-tuning Reactor

그림 5.에서 보면 전력측의 전압은 처음과 마찬가지로 약 1.6pu를 유지하고 있는 반면에 부하측의 최대 전압이 약 1.5pu정도로 줄어든 것을 볼 수 있다. 이는 부하의 고유 동요 주파수를 조정함으로써 부하를 안전하게 보호할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

다음은 낙뢰가 어떻게 전력시스템에 영향을 끼치는지를 알아보도록 하자. 캐패시터는 동요주기를 길게 하기 때문에 낙뢰의 실험시 부적당하므로 제외시키고 결과를 분석한다.

송전선로에 낙뢰(전류크기 300 Amps, rise time = 5msec, peak time = 5.007msec, half peak time = 5.014msec)가 급습했다고 가정한다.

이때의 파형을 보면 다음과 같다.

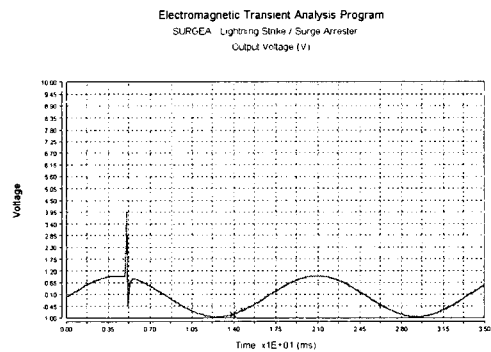


그림 6. 낙뢰로 인한 부하측의 전압

fig 6. Customer voltage in Lightning Strike

낙뢰로 인하여 부하측에 순간전압이 약 4 pu가 걸린다. 이 정도의 전압(4x0.38[KV])은 계통상에 많은 무리를 주게되어 여러 가지 피해를 파생시킬 것이다.

여기에 피뢰기를 설치하여 순간전압을 줄이도록 하겠다. 피뢰기는 가능한한 보호하려는 부하에 가까이 설치하여야 한다. 여기서 변압기를 등가변환한 부분이 F-H이므로 F부분에 피뢰기를 설치하도록 하겠다.

피뢰기 형태 : 아날로그

Breakdown voltage : 1.6 Pu

Recovery voltage : 0.75 Pu

전압 - 전류 특성 : $V = 0.5I^{0.5}$

피뢰기 설치후의 전압파형은 그림 7.에서 알 수

있다. 피뢰기 설치전은 최대치가 약 4Pu인데 비하여 설치후의 전압의 최대치는 약 1.4Pu로 65%가 감소한 것을 보여준다.

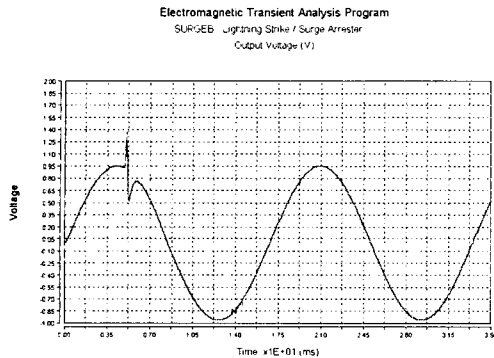


그림 7. 피뢰기를 설치한 후의 부하측 전압
fig 7. Customer Voltage after the Addition of de-tuning Arrester

3. 결 론

전력계통에서 전자 과도 현상은 주로 캐패시터 스위칭과 낙뢰로 인한 것이다. 캐패시터는 전력회사에서 전압의 조정과 무효 전력을 공급하기 위해서 필요한 장비이므로, 캐패시터 스위칭은 필연적이다. 현재 대부분의 공장설비나 건축물 설비를 보면 대부분이 역률을 높이기 위해 관례적으로 캐패시터를 뱅크식으로 뭉쳐서 달고 있는 형편이다. 이것은 사례연구에서 밝혔듯이 고조파 동조를 가져오고 스위칭시 동요주기가 길어져 변압기등 각종 기기에 무리를 주게 되어있다. 이를 개선하기 위해서는 역률을 높이기 위해 무리하게 캐패시터를 뭉쳐서 달지말고 각 부하별로 캐패시터를 달아야 할 것이다. 스위칭도 각 부하별로 할 수 있도록 개별화 시키는 것도 설계시 고려해야 할 사항이다. 전력회사 측에서 캐패시터 스위칭으로 인한 과도 전압을 줄이기 위한 방법으로는 저항을 직렬로 연결하여 사용하거나 스위칭 시간을 조절하면 약간의 과도 전압을 줄일 수 있다. 부하측에서는 동조 고조파를 줄이기 위한 필터가 가장 유용하게 쓰인다. 간단한 사례 시스템을 구성하여 필터 설치 전후의 과도 전압을 분석하여 효과를 검증하였다.

낙뢰는 전력시스템에 과도 전압을 가져오는 또 하나의 원인이다. 방지 대책으로 가장 유용한 방법은 보호하고자 하는 설비에 가능한 한 가까이

피뢰기를 설치해야 한다. 간단한 사례 시스템을 구성하여 피뢰기 설치 전후의 과도 전압을 상용화된 EMTAP을 사용하여 분석하고 효과를 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] EDSA User's Guide, "Electromagnetic Transient Analysis Program", EDSA Micro Co., pp.6~56, 1998.
- [2] R. C. Dugan, M. F. Mc Granaghan, H. W. Beaty, "Electrical Power System Quality", Mc Graw-Hill Co., pp.83~122, 1996
- [3] P. Chowdhuri, "Electromagnetic Transients in Power Systems", John Wiley & Sons Inc., pp.64~99/209~224, 1996
- [4] 곽희로 · 정용기, "피뢰설비 가이드북", 의제, pp.12~25, 1996. 8.
- [5] 유상봉 · 김세동, "전기설비의 고조파 장애 및 대책기술", 한국전력기술인 협회, pp.23~29, 1996.5