

## 부하투입이 고조파 공진에 미치는 영향에 대한 고찰

이흥재 · 이경섭 · 박성민 · 유원근  
 광운대학교 전기공학과

### A Study on the Harmonic Resonance during Restoration of Primary Restorative Transmission System

H. J. Lee · K. S. Lee · S. M. Park  
 Dept. of Electrical Engineering KwangWoon University

**Abstract** - Harmonic resonant overvoltage during restoration of primary restorative transmission system originates in switching operations and nonlinear characteristics of equipments. Actually it is difficult to predict the occurrence of harmonic overvoltage, since they result from nonlinear characteristics of transformers and other equipments. This paper describes the analysis of domestic primary restorative transmission system using PSCAD/EMTDC. The harmonic resonance is verified and showed the relation with equipments which have nonlinear characteristics such as generator and transformer in this paper. And the solution to prevent harmonic resonance is proposed too. As a result, the PSCAD/EMTDC simulation showed slightly conflictive results that had been presented by IEEE Power System Restoration Working Group report.

위해 덕소 변전소에서 부하 투입(20MVA)을 모의할 수 있도록 구성한 모의 계통도이다. 표 1은 광역정전 또는 전정전 발생시 수립된 복구 절차를 기반으로 작성된 경인 북부지역 주선로에 대한 EMTDC 모의 시나리오이다.

#### 2.1 고조파 공진에 의한 과전압 발생

그림 3과 그림 4는 표 1의 시나리오에 대한 동특성 모의 결과로 덕소 변전소에서 부하투입을 수행하기 위해 무부하 상태의 변압기 가압 이후의 결과를 나타낸 그림이다.

모의 결과를 살펴보면, 덕소 변전소에서 부하투입을 위해 무부하 상태에서 변압기를 가압하였을 때, 변압기 1차측 상전압이 불과 수 cycle 이내에 500[kV]를 초과하는 과전압이 검출되었다.

## 1. 서 론

시송전계통의 가압은 광역정전 또는 전정전의 복구 과정에서 가장 중요한 단계 중 하나이다. 이 단계에서 고압의 송전선로 및 변압기와 같은 설비의 가압이 수반되며 또한, 페란티 효과에 의한 과전압, 과도상태 과전압 및 고조파 공진에 의한 과전압 등의 문제가 나타날 수 있으며, 이외에도 고려해야 할 많은 요소들이 존재한다[1-3]. 시송전계통에서 발생 가능한 과전압 중 고조파 공진에 의한 과전압은 변압기와 같은 계통 설비의 비선형적 특성이 그 근본적인 원인으로 알려져 있다. 특히 복구 과정에서는 계통 설비의 구성 형태에 의한 공진, 변압기의 자화 돌입 전류 등에 의해서도 고조파 공진에 의한 과전압을 야기할 수 있다. 고조파 공진에 의한 과전압의 발생은 시송전 선로, 변압기, 발전기 등 여러 계통 설비의 구성 형태에 종속적이다. 그러나, 계통의 구성 형태는 각 전력회사별로 매우 다양한 상황이므로 고조파 공진에 의한 과전압의 발생을 미리 예측한다는 것은 매우 어려운 문제이다.

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 국내 시송전계통의 모의 및 분석을 통해 고조파 공진에 의한 과전압의 발생을 확인하였으며, 포화특성을 고려하지 않은 변압기 모델 및 이상적인 발전기 모델과 고조파 공진과의 상관 관계에 대해 기술하였다. 또한, 이에 대한 해결 방안도 제시하였으며, 본 논문의 연구 결과와 IEEE Power System Restoration Working Group에서 제시한 연구 결과와 상충되는 부분에 대해 기술하였다.

### 2. 복구과정에서의 고조파 공진에 의한 과전압

그림 1은 국내 시송전계통 중 경인북부 지역 시송전계통으로, 청평 수력발전소와 부천 복합발전소가 자체기동 발전소이며, 서인천 복합발전소가 우선공급 발전소로 지정된 주선로와 예비선로를 나타내었다.

그림 2는 자체기동 발전소, 시송전선로 및 계통 안정을

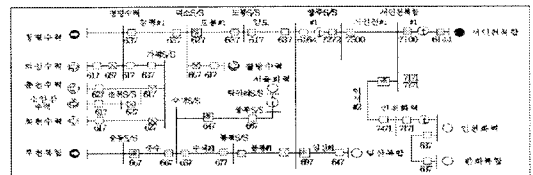


그림 1. 경인북부 지역 시송전 계통도



그림 2. 경인북부 지역 주선로 모의 계통도

표 1. 모의 시나리오

시간 (sec)	내용	비고
0.0	발전기 3기 동시기동, #1 발전기 스텝업변압기 가압 및 자체부하 전력공급	자체부하 : 발전기 정격의 5%, pf=0.98
5.0	#1발전기 선로 가압	
7.0	덕소 변전소 변압기 가압	
10.0	덕소 변전소 부하 투입	2MVA(pf=0.98)
12.5	#3발전기 계통병입	
15.5	#2발전기 계통병입	
20.0	덕소 변전소 부하투입	8MVA(pf=0.98)
25.0	덕소 변전소 부하투입	10MVA(pf=0.98)
30.0	선로 가압	
35.0	동특성 모의 종료	

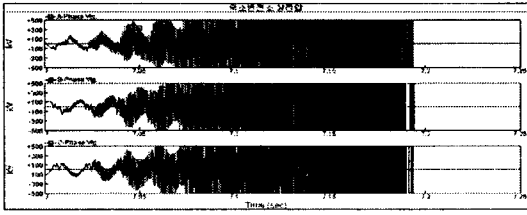


그림 3. 덕소 변전소 상전압

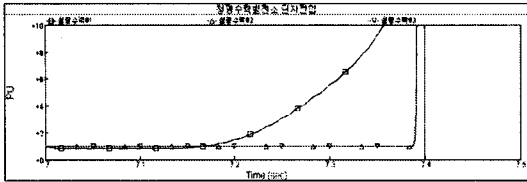


그림 4. 청평수력발전소 단자전압

복구 과정에서 발생한 과전압이 자기여차 현상에 기인한 것인지 여부를 확인하기 위해 정태해석을 수행하였고[6], 그 결과를 표 2에 나타내었다. 정태해석 결과 자기여차에 의한 과전압이 아님을 확인하였다.

그림 3의 덕소 변전소 상전압을 살펴보면, 고조파 성분이 강한 파형을 알 수 있다. 이는 캐나다와 EPRI의 연구 결과가 보고된 바 있으며[5], 이러한 과전압은 고조파 공진현상이 원인으로 알려져 있다.

시송전계통에서 발생한 과전압이 고조파 공진에 의한 것임을 확인하기 위해 덕소 변전소 변압기의 1차측 결선을  $\Delta$ 방식으로 변경하여 모의를 수행하였다. 모의 시나리오는 표 1과 동일하며, 그림 4는 이에 대한 모의 결과이다.

모의 결과를 살펴보면, 덕소 변전소의 변압기를  $\Delta$ 결선으로 변경함으로써 고조파 공진에 의한 과전압이 발생하지 않았다. 이러한 결과로 통해 변압기 가압시의 과전압은 고조파 공진현상에 의한 것임을 확인할 수 있었다.

국내의 경우 전정전 사고 발생 확률은 매우 미약한 상황이며, 계통 설비의 추가 또는 변경으로 인해 시송전계통의 변경이 불가피한 상황에서 계통복구를 위해 특정 변전소의 변압기를  $\Delta$ 결선으로 변경하는 것은 현실적으로는 적절하지 않다

표 2. 정특성 해석 결과

시송전선로	검토 결과					발전기 전압
	발전기 No	한계 Q [MVAR]	공급 Q [MVAR]	Q 여유 [MVAR]	델타각 [°]	
주선로	1	14.0	8.525	5.475	3.79	9.792 [kV] 89.02 [%]
	2	13.7	6.257	7.443	2.47	
	3	27.9	15.907	11.993	3.78	
	총계	55.6	30.689	24.911		

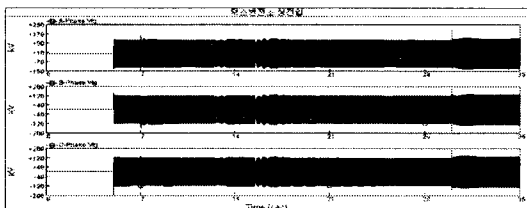


그림 5. 덕소 변전소 상전압(변압기 고압측  $\Delta$ 결선)

## 2.2 발전기 및 변압기와 고조파 공진과의 관계

계통설비의 비선형성이 고조파 공진의 주된 원인으로 알려져 있다. 따라서, 본 논문에서는 비선형성을 가지는 설비인 발전기 및 변압기와 고조파 공진과의 관계를 확인하기 위한 모의를 수행하였다.

발전기와 고조파 공진과의 관계를 확인하기 위해 자체 기동 발전기를 이상적인 전원 특성을 가지는 발전기 모델로 대체하여 사용하였으며, 변압기와 고조파 공진과의 관계를 확인하기 위해 포화특성을 고려하지 않은 변압기 모델을 사용하여 모의를 수행하였다. 각 사례에서 발전기와 변압기를 제외한 다른 설비는 그림 2의 구성과 동일하게 사용하였다.

각 사례에 대한 모의 시나리오는 표 1과 동일하며, 그림 6과 그림 7은 각각의 모의 결과이다.

모의 결과를 살펴보면, 이상적인 발전기 모델을 사용하였을 때에는 고조파 공진 현상이 발생함을 확인할 수 있었으며, 이는 그림 3의 결과와 유사하다. 그러나, 포화특성을 고려하지 않은 변압기 모델을 사용하였을 때에는 무부하 상태에서 변압기를 가압하여도 과전압이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 이를 통해, 발전기의 특성보다는 변압기의 포화특성이 고조파 공진의 발생과 상당히 밀접한 관계를 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

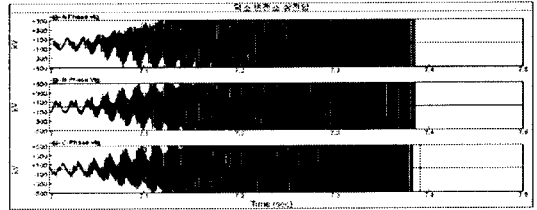


그림 6. 덕소 변전소 상전압(이상적인 발전기 모델)

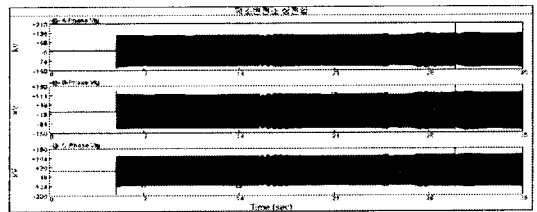


그림 7. 덕소 변전소 상전압 (포화특성을 고려하지 않은 변압기 모델)

## 2.3 부하가 미리 투입된 변압기의 가압

고조파 공진을 억제하기 위한 방법으로는 부하가 미리 투입된 변압기를 가압하는 것이다. 이 경우, 미리 투입할 부하의 양을 결정하는 것이 중요하다. IEEE Power System Restoration Working Group의 보고서에 의하면 500[kV] 선로의 경우 마일당 약 3[MW]의 부하가 미리 투입된 변압기를 가압함으로써 고조파 공진의 발생을 억제할 수 있다.

IEEE Working Group의 결과는 500[kV] 선로에 대한 연구 결과로써 154[kV] 선로를 중심으로 일부 345[kV] 선로를 사용하고 있는 국내의 시송전계통에 동일하게 적용하기에는 무리가 있다고 사료된다. 따라서, 본 논문에서는 청평 수력발전기의 용량 등을 고려하여 0.5[MVA], 1[MVA], 2[MVA], 3[MVA]까지 투입할 부하량을 가변하여 모의를 수행하였다.

표 3은 부하가 미리 투입된 변압기의 가압에 대한 모의 시나리오이며, 그림 5~8은 각 부하량에 대한 모의 결과이다.

표 3. 모의 시나리오

시간 (sec)	내용	비고
0.0	발전기 3기 동시가동, #1 발전기 스텝업변압기 가압 및 자체부하 전력공급	자체부하 : 발전기 정격의 5%, pf=0.98
0.0	덕소 변전소 부가상상태에서 부하투입	0.5~3MVA (pf=0.98)
5.0	#1발전기 선로 가압	
7.0	덕소 변전소 변압기 가압	
10.0	덕소 변전소 부하 투입	5MVA(pf=0.98)
12.5	#3발전기 계통병입	
15.5	#2발전기 계통병입	
20.0	덕소 변전소 부하투입	5MVA(pf=0.98)
25.0	덕소 변전소 부하투입	9.5~7MVA (pf=0.98)
30.0	선로 가압	
35.0	동특성 모의 종료	

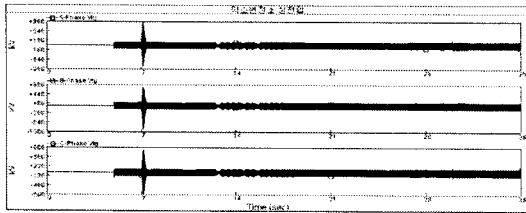


그림 5. 덕소 변전소 상전압 (부하 투입량 0.5[MVA])

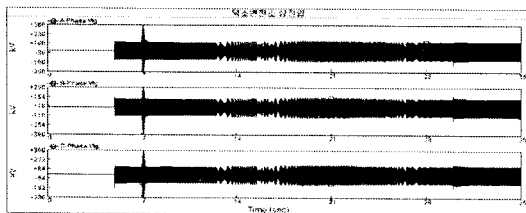


그림 6. 덕소 변전소 상전압 (부하 투입량 1[MVA])

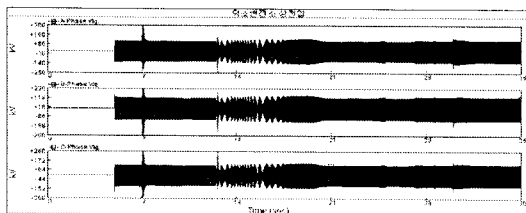


그림 7. 덕소 변전소 상전압 (부하 투입량 2[MVA])

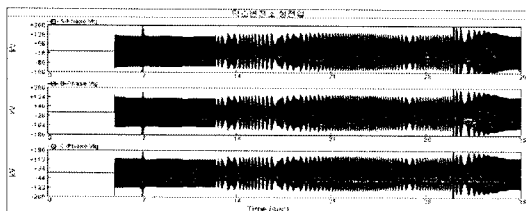


그림 8. 덕소 변전소 상전압 (부하 투입량 3[MVA])

모의 결과를 살펴보면, 변압기에 0.5[MVA]의 부하를 미리 투입한 후 변압기를 가압하면, 변압기 가압 순간에 덕소 변전소에 약 900[kV] 정도의 일시적인 과전압이 발생하였고, 1[MVA]의 부하 투입 결과에서는 A상과 C 상에서 약 360[kV] 정도의 과전압이 발생함을 확인 할 수 있었다.

2[MVA]와 3[MVA]의 부하를 투입하였을 때에는 변압기 가압 순간에 발생하는 일시적인 과전압이 2[p.u] 이하임을 확인할 수 있었다. 즉, 2[MVA]의 부하만 미리 투입하여도 고조파 공진을 억제할 수 있다.

고조파 공진을 억제하기 위해 변압기 가압 이전에 부하 투입에 대해 IEEE Working Group에서는 500[kV] 선로의 경우 마일당 3[MW]의 부하를 투입하는 것을 제시하고 있다. 그러나, 본 논문의 모의 결과로부터 미리 투입할 부하의 양은 선로길이에 비례하는 것이 아님을 확인할 수 있었다(청평#1 선로의 공장은 24.282[km]로 약 15마일임).

### 3. 결 론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 국내의 시송전 계통에 대한 모의를 통해 무부하 상태의 변압기 가압 시 고조파 공진에 의한 과전압의 발생을 증명하였다.

이상적인 발전기 모델의 사용과 포화특성을 고려하지 않은 변압기 모델 사용에 대한 모의 결과를 통해 고조파 공진은 발전기보다는 변압기의 포화특성에 많은 영향을 받음을 확인할 수 있었다.

고조파 공진을 억제 방안으로 알려진 변압기 가압 이전에 부하를 미리 투입하는 경우 투입할 부하의 양은 선로의 공장에 비례하여 결정되는 것이 아니며, 계통의 구성 조건에 따라 다르다는 것을 확인하였다. 이는 IEEE Working Group 결과와 약간의 상이함을 보여주는 부분이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] M. M. Adibi et al., "Power System Restoration - A Task Force Report" IEEE Trans. on PWRs, Vol. 2, No. 2, pp. 271-277, May 1987.
- [2] M. M. Adibi et al., "Power System Restoration Issues", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 4, No. 2, pp. 19-24, April 1991.
- [3] M. M. Adibi et al., "Special Consideration in Power System Restoration The Second Working Group Report", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 9, No. 1, pp. 15-21, February 1994.
- [4] G. Morin, "Service Restoration Following a Major Failure on the Hydro-Quebec Power System", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 2, No. 2, pp. 454-462, April 1987
- [5] M. M. Adibi, R. W. Alexander, "Overvoltage Control During Restoration (Power System Restoration Working Group Report)", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 7, No. 4, pp. 1464-1470, November 1992.
- [6] H. J. Lee et al., "Analysis Of The Primary Restorative Transmission System", Proc of the International Conference on Electrical Engineering (ICEE2002), Vol. 1, pp.483-486, July 7-11, 2002
- [7] 이홍재, 조병관, 이경섭, 박성민, 배주전, 황봉환, "PSCAD/EMTDC를 이용한 시송전계통의 고조파 공진현상 분석", 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp 31-33, 2003
- [8] 이홍재, 유원근, 이경섭, 박성민, "PSCAD/EMTDC를 이용한 시송전계통의 고조파 공진현상 분석 II", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 A권, pp 48-51, 2004