

시송전계통 복구과정에서의 고조파 공진 현상에 대한 고찰

이홍재 · 이경섭 · 박성민
광운대학교 전기공학과

Analysis of 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 - Power system restoration following a wide area or complete blackout starts with energizing primary restorative transmission systems. During this primary restoration process, unexpected over-voltage may happen due to nonlinear interaction between the unloaded transformer and the transmission system. This is known as the harmonic resonance phenomenon that may cause burning out of transformer or other devices. Since the harmonic resonance originates from the nonlinear characteristics, it is very difficult to predict the occurrence of this phenomenon. This paper reports the possible existence of the harmonic resonance in Korean power system. Analysis of the harmonic over-voltage is presented based on the various simulations using PSCAD/EMTDC.

며, 이는 전력거래소의 전계통정전시 복구 계획의 지역별 복구 절차를 기반으로 하여 복구 과정에서의 부하투입 등을 수행할 수 있도록 작성하였다.

2.1 시송전계통 복구과정중의 과전압

그림 2는 표 1의 시나리오에 대한 모의 결과로 시송전계통의 안정도 유지를 위해 덕소변전소에서 부하투입을 수행하고자 무부하 상태의 변압기를 가압한 이후의 변전소 고압측 모선에 대한 전압 파형이다.

모의 결과를 살펴보면, 덕소변전소에서 부하투입을 위해 무부하 상태의 변압기를 가압한 후, 불과 수 cycle 이내에 변압기 고압측 전압이 500[kV]를 초과되는 것이 확인되었으며, 가압이후 0.2초 이내에 EMTDC 프로그램은 더 이상의 결과를 표시하지 않았다.(부동소수점 오버플로우에 기인한 것으로 추정됨)

1. 서 론

광역정전 또는 전정전의 초기 복구 단계에서 시송전계통의 가압은 가장 중요한 과정이라 할 수 있다. 시송전계통의 가압은 고압의 송전선로 및 변압기 등의 가압이 수반되는 과정으로 과전압 문제를 포함하여 고려해야 할 많은 요소들이 존재한다[1-3]. 시송전계통에서의 과전압 문제 중 고조파 공진에 의한 과전압은 변압기와 선로 등의 비선형적 특성이 그 근본적인 원인으로 알려져 있으며, 특히 복구 과정에서는 계통 설비의 구성 형태 및 변압기의 자화 돌입전류도 고조파 공진에 의한 과전압을 초래할 수 있다. 고조파 공진에 의한 과전압의 발생은 시송전선로, 변압기, 발전기 등 여러 계통 설비의 구성 형태에 종속적이나 초기 복구과정에서 계통의 구성 형태는 각 전력사별로 상이하여 고조파 공진에 의한 과전압의 발생을 미리 예측한다는 것은 매우 어렵다. 또한, 계통의 전압과 선로 및 변압기의 비선형성에 기인하는 특성으로 인해 이러한 현상에 대한 연역적 해석은 매우 어려울 뿐 아니라 현재까지 알려진 해결 방안 역시 무수한 시뮬레이션을 통한 귀납적 방법으로 도출하고 있는 상황이다. 또한, 고조파 공진에 의한 과전압의 발생사례도 미약할 뿐 아니라 이에 대한 연구도 매우 적은 형편이다[4-5].

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 국내 시송전 계통의 모의 및 분석을 통해 고조파 공진에 의한 과전압의 발생 가능성을 확인하였다. 또한 부하 투입 및 선로 공장의 변화, 발전기 동특성 및 변압기 포화특성이 고조파 공진에 미치는 영향에 대해 분석을 수행하였다

2. 복구과정에서의 고조파 공진에 의한 과전압

그림 1은 경인북부지역 시송전계통으로 청평수력파 부천복합 발전소가 자체기동 발전소이고 서인천복합 발전소가 우선공급 발전소로 지정된 주선로와 예비선로 및 주변 계통을 나타낸다. 표 1은 주선로에 대한 모의 시나리오이

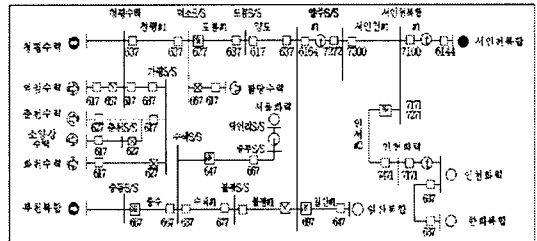


그림 1. 경인북부지역 시송전계통도

표 1. 모의 시나리오

시간 (sec)	내용	비고
0.0	발전기 3기 동시기동 #1발전기 스텝연변압기 가압 자체부하 전력공급	자체부하 : 발전기 정 격 의 5 % , pf=0.98
5.0	#1발전기 선로 가압	
7.0	덕소변전소 변압기 가압	
10.0	덕소변전소 부하투입	2MVA(pf=0.98)
12.5	#3발전기 계통 병입	
15.5	#2발전기 계통 병입	
20.0	덕소변전소 부하투입	8MVA(pf=0.98)
25.0	덕소변전소 부하투입	10MVA(pf=0.98)
30.0	선로 가압	
35.0	동특성 모의 종료	

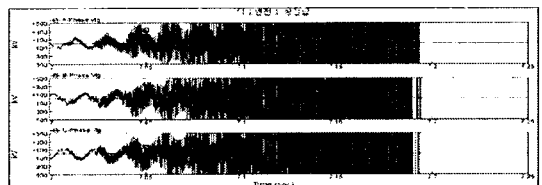


그림 2. 덕소변전소 전압

2.2 과전압의 원인 분석

시송전계통 복구 과정에서 발생할 수 있는 과전압의 종류는 다음과 같다[5].

- 무부하 송전선로 가압에 의한 지속적인 정상상태 과전압
- 계통설비 스위칭 등에 의한 서지전압
- 변압기와 선로의 비선형 특성에 기인한 고조파 공진 과전압

그림 2에 표시된 무부하 상태의 변압기 가압 후 발생한 과전압의 원인을 분석하기 위해 정특성 해석[6]을 수행하였다. 이는 과전압의 원인이 무부하 송전선로 가압과정에서 발생할 수 있는 자기여자 현상에 기인한 것인지 여부를 확인하기 위한 것이다. 정특성 해석 결과를 통해 시송전계통에서 발생한 과전압의 원인이 발전기의 자기여자 현상에 기인한 것이 아님을 확인하였으며, 또한 계통설비의 스위칭에 의한 서지전압은 지속시간이 짧은 특징을 보이지만 그림 2의 파형은 스위칭에 의한 서지전압도 아님을 알 수 있다.

과전압 원인이 캐나다와 EPRI에서 보고된 바 있는 고주파 공진현상에 의한 것임으로 추정되는 바, 해외의 연구 결과를 바탕으로 이를 확인하기 위하여 그림 2의 과전압 파형에 대한 FFT 분석을 수행하였다. FFT 분석 결과, 과전압에는 많은 고조파가 포함되어 있으며 특히 3고조파와 12고조파 성분이 차지하는 비율이 매우 크다는 것을 확인하였다.

해외 연구결과와의 비교·검토 및 과전압이 3고조파와 12고조파 성분이 크다는 FFT 분석 결과로부터 과전압의 원인이 고조파 공진현상에 기인한 것임을 확인하였다[7].

3. 부하투입과 고조파 공진

EPRI의 Power System Restoration Working Group의 보고서에 따르면 500[kV] 선로의 경우 마일당 약 3[MW]의 부하가 미리 투입된 변압기를 가압함으로써 고조파 공진의 영향을 감소시킬 수 있음을 제시하여, 본 연구에서는 덕소변전소에서 완충용 부하의 투입이 고조파 공진에 미치는 영향을 분석하기 위한 모의를 수행하였다.

부하가 투입된 변압기 가압에 대한 모의는 표 1과 동일하게 수행하되, 변압기 가압 이전에 미리 투입된 부하량을 가변하였다.

ERPI 보고서의 내용과 대상 계통과의 정격전압의 차이가 있어 EPRI 권고안에 따라 모의를 수행하기 위해서는 청평#1 선로의 공장이 약 15마일(24.282km)에 해당되므로 덕소변전소 변압기에 45[MW] 정도의 부하를 투입해야 하지만 청평수력 발전기의 용량이 적으므로 0.5[MVA], 1[MVA], 2[MVA]로 투입 부하량을 가변하여 모의를 수행하였으며, 모의 결과는 그림 3~5에 나타내었다.

모의 결과를 살펴보면, 변압기에 부하를 미리 투입한 후 덕소변전소의 변압기를 가압하게 되면 0.5[MVA]의 부하를 투입한 경우 약 900[kV]이고 1[MVA]의 부하를 투입한 경우 약 360[kV] 정도의 허용 범위를 초과하는 일시적인 과전압이 발생하였다. 2[MVA]의 부하를 투입하였을 때에도 변압기 가압 순간에 일시적인 과전압이 발생하였지만 이는 과전압 허용범위 이하임을 확인할 수 있다. 즉, 2[MVA] 정도의 부하만 미리 투입하여도 고조파 공진을 억제할 수 있음을 확인하였다.

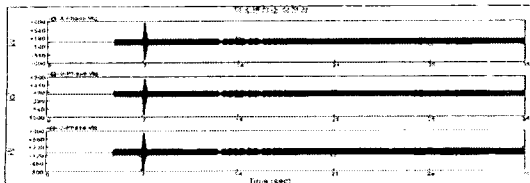


그림 3. 덕소변전소 전압(부하 투입량 0.5[MVA])

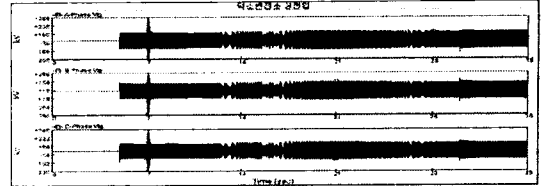


그림 4. 덕소변전소 전압(부하 투입량 1.0[MVA])

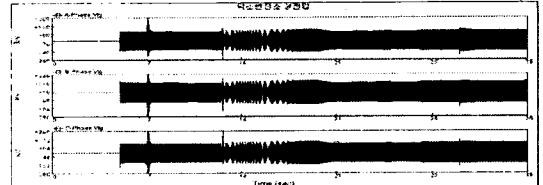


그림 5. 덕소변전소 전압(부하 투입량 2.0[MVA])

3.1 선로 공장의 가변

정전복구 방법은 전 세계적으로 거의 동일하지만 초기 복구 단계에서의 계통 구성 형태는 각 국가의 복구 정책, 보유 설비 및 사용 가능한 자원에 따라 매우 다양한 양상을 가지게 된다. 따라서 본 논문에서는 선로 공장의 가변을 통해 계통 구성 형태를 변화시킴으로써 계통 구성 형태와 고조파 공진과의 관계를 확인하기 위한 모의를 수행하였다. 모의에 사용된 선로는 그림 1의 청평수력 발전소와 덕소변전소 사이의 청평#1 선로로 정격전압이 154[kV]이며 선로 공장은 24,282[km]이다. 모의 조건은 청평#1 선로의 공장을 110~140[%]까지 10[%] 간격으로 증가시켜 모의를 수행하였다. 선로 공장 가변에 대한 모의 시나리오는 표 1과 동일하며 그림 6~9에 선로 공장 가변에 따른 모의 결과를 나타내었다.

모의 결과를 살펴보면, 선로 공장이 130[%]까지는 허용 범위를 초과하는 과전압이 발생하였으나, 140[%]에서는 허용범위 이하임을 확인하였다. 이러한 결과로부터 복구과정에서 계통 구성 형태도 고조파 공진과 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

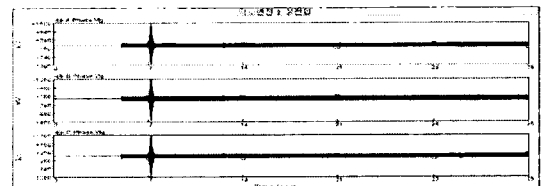


그림 6. 덕소변전소 전압(청평 #1 선로 공장의 110%)

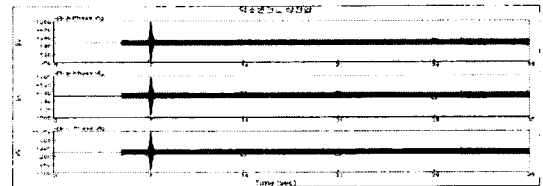


그림 7. 덕소변전소 전압(청평 #1 선로 공장의 120%)

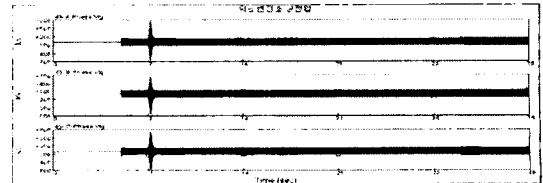


그림 8. 덕소변전소 전압(청평 #1 선로 공장의 130%)

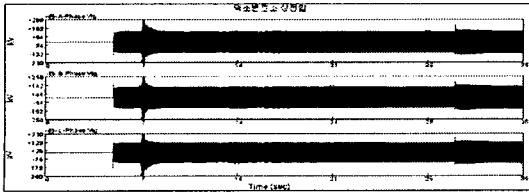


그림 9. 덕소변전소 전압(청평 #1 선로 공장의 140[%])

4. 계통 설비와 고조파 공진과의 관계

고조파 공진에 의한 과전압은 계통설비의 비선형적 특성이 기인하는 현상으로 본 논문에서는 비선형성 특성을 가지는 발전기 및 변압기와 고조파 공진과의 상관관계를 확인하기 위한 모의를 수행하였다.

4.1 발전기와 고조파 공진과의 관계

발전기의 동특성이 고조파 공진에 미치는 영향을 확인하기 위해 발전기 동특성을 고려하지 않은 이상전원 발전기 모델을 사용하였다. 이상전원 발전기 모델로 대체한 계통의 모의 시나리오는 표 1과 동일하며, 그림 10은 모의 결과이다.

모의 결과를 살펴보면, 그림 2의 파형과 유사한 형태로 고조파 공진이 발생함을 알 수 있다. 이를 통해 발전기의 동특성이 고조파 공진 미치는 영향은 극히 미미함을 확인하였다.

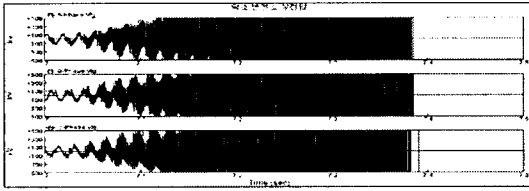


그림 10. 덕소변전소 전압(이상적인 발전기 모델 사용)

4.2 변압기의 포화특성이 고조파 공진과의 관계

변압기의 포화특성이 고조파 공진에 미치는 영향을 확인하기 위해 변압기의 포화특성을 고려하지 않은 모델을 사용한 사례와 그림 2의 과전압 파형에 대한 FFT 분석 결과에서 3고조파와 12고조파 성분이 크다는 사실을 토대로 변압기의 델타 결선이 순환 전류에 의해 고조파 성분의 상쇄 효과를 확인하기 위한 모의를 수행하였다. 변압기의 포화특성을 고려하지 않은 모델 및 결선 방식 변경에 대한 모의 시나리오는 표 1과 동일하며, 그림 11과 그림 12는 각각에 대한 모의 결과이다.

그림 11의 모의 결과를 살펴보면, 덕소변전소 변압기 가압시 고조파 공진이 발생하지 않음을 확인하였다. 이는 변압기의 포화특성이 고조파 공진과 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

그림 12의 모의 결과를 살펴보면, 변압기의 결선을 변경한로 고조파 공진이 발생하지 않음을 알 수 있으며, 이를 통해 과전압의 원인이 고조파 공진에 의한 것임을 재차 확인할 수 있었다. 그러나 변압기 결선의 변경을 통해 고조파 현상을 확인하였으나 광역정전 사고 발생 확률은 매우 미약한 상황에서 단지 계통의 시충전만을 위하여 특정 변전소의 변압기를 델타결선으로 변경하는 것은 또 다른 복잡한 문제를 유발할 수 있으므로 고조파 공진에 대한 실제적인 해결방안으로는 적합하지 않다.

5. 결 론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시충전계

통 복구 과정 모의에서 부하 투입을 위해 무부하 상태의 변압기 가압 순간에 고조파 공진에 의한 과전압의 발생 가능성을 확인하였다.

고조파 공진에 대한 완충효과를 가진 것으로 알려진 부하투입과 3고조파 성분의 상쇄 효과를 가지는 변압기의 델타결선 방식에 대한 모의를 통해 부하 투입과 고조파 공진과의 관계 및 이에 대한 해결 방안을 제시하였다.

선로 공장 가변에 대한 모의를 통해 고조파 공진 현상의 발생은 계통 설비의 비선형적 특성이 근본적인 원인이거나, 복구 단계에서의 계통 구성 상황에 따라 공진현상의 발생 가능성이 다르다는 것을 확인하였다.

발전기 동특성 및 변압기의 포화특성이 고조파 공진에 미치는 영향에 대해서 살펴본 결과 발전기 동특성 보다는 변압기의 포화 특성이 고조파 공진과 밀접한 보다 관계를 가지고 있음을 확인하였다.

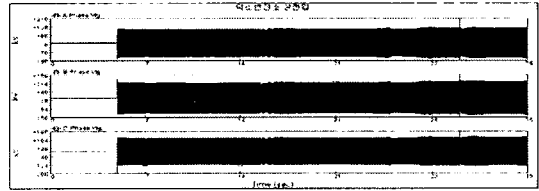


그림 11. 덕소변전소 전압 (변압기 포화특성을 고려하지 않은 모델 사용)

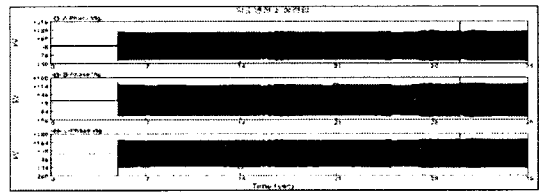


그림 12. 덕소변전소 전압 (변압기 고압측을 델타결선으로 변경)

[참 고 문 헌]

- [1] M. Adibi, P. Clelland, L. Fink, H. Hupp, R. Kafka, J. Raine, D. Scheurer, F. Trefny, "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] 이홍재, 박성민, 이경섭, 배추천, 황봉환, 송인준, 이남호, "시충전 계통에서 자기여자 현상의 새로운 알고리즘 개발", 대한전기학회 논문지 54A권 3호, pp.117-121, 2005
- [7] 이홍재, 이경섭, 박성민, 송인준, 이남호, 배추천, 황봉환, "EMTDC를 이용한 시충전계통의 고조파공진 분석", 대한전기학회 논문지 54A권 4호, pp.172-176, 2005