

Analysis of the Harmonic Resonance during Restoration of Primary Restorative Transmission System

李興載* · 李炯燮*
(Heung-Jae Lee · Kyeong-Seob Lee)

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 analyses of the harmonic resonance occurred in domestic power system. Various analyses and results of the harmonic over-voltage is presented based on the PSCAD/EMTDC simulations.

Key Words : Harmonic Resonance, Over-voltage, Power System Restoration, PSCAD/EMTDC

1. 서 론

광역정전 또는 전정전의 초기 복구 과정에서 시송전계통의 가압은 가장 중요한 단계라 할 수 있다. 시송전계통의 가압에는 다수의 고압 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 있다. 또한, 복구 과정에서는 변압기의 자화 돌입전류나 계통 설비의 구성 형태도 고조파 공진에 의한 과전압 발생을 초래할 수 있다. 그러나 초기 복구과정에서의 계통 구성 형태는 각 국가 또는 전력사의 복구 정책, 전압 레벨 및 운용 가능한 설비 등에 따라 매우 다양하게 나타나므로 고조파 공진에 의한 과전압의 발생을 미리 예측한다는 것은 매우 어려운 문제이다.

초기 복구 과정에서의 고조파 공진은 765[kV] 선로의 캐나다[4]와 500[kV] 선로 대상의 EPRI[5] 사례에서와 같이 극초고압 선로에서만 발생하는 것으로 알려져 있었으나, 해외에 비해 상대적으로 저압인 154[kV] 선로를 중심으로 일부 345[kV] 선로를 사용하는 국내의 시송전계통에서도 고조파 공진의 발생 가능성이 확인되었다[7]. 또한, 비선형성에 기인하는 특성으로 인해 고조파 공진 현상에 대한 수학적 모델링 도출이 매우 어려워 무수한 시뮬레이션을 통한 귀납적 방법으로 해결 방안을 도출하고 있는 상황이다.

본 논문에서는 정특성 해석[6], 주파수 분석 및 변압기의

델타 결선 모의를 통해 국내 시송전계통에서도 고조파 공진에 의한 과전압의 발생을 확인한 기존의 연구 결과[7]를 기반으로 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시송전계통에서의 고조파 공진 현상에 대한 분석을 수행하였다.

부하 투입에 대한 모의를 통해 고조파 공진을 억제할 수 있음을 확인하였고, 선로길이의 가변에 대한 모의를 통해 고조파 공진이 발생하는 선로의 범위가 존재함을 확인하였다. 또한, 대표적인 비선형 특성을 가지는 발전기 동특성 및 변압기 포화특성에 대한 모의를 통해 발전기의 동특성보다는 변압기의 포화특성이 고조파 공진 발생과 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

2. 시송전계통에서의 고조파 공진 분석

그림 1은 시송전계통의 안정도 유지를 위해 덕소변전소에서 부하투입을 수행하고자 무부하 상태의 변압기를 가압한 이후 발생한 고조파 공진 결과이다. 부하투입, 선로길이의 변화, 발전기와 변압기의 비선형 특성에 대한 다양한 모의를 통해 고조파 공진과의 관계를 분석하였다.

2.1 부하투입과 고조파 공진

EPRI의 Power System Restoration Working Group 보고서에 따르면 고조파 공진의 억제 방안으로 500[kV] 선로의 경우 마일당 약 3[MW]의 부하가 미리 투입된 변압기를 가압하는 것을 제시하고 있다[5]. EPRI의 권고안에 따라 모의를 수행하기 위해서는 청평#1 선로길이가 약 15마일(24.282[km])에 해당되므로 덕소변전소 변압기에 45[MW] 정도의 부하를 투입해야 한다. 그러나 청평수력 발전기의 용량이 적어 0.5[MVA], 1[MVA], 2[MVA], 3[MVA]의 부하

† 교신저자, 正會員 : 光云大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : hjlee@mail.kw.ac.kr

* 正會員 : 光云大 工大 電氣工學科 博士課程
接受日字 : 2006年 3月 16日
最終完了 : 2006年 4月 20日

를 투입하여 모의를 수행하였다. 표 1의 시나리오에 따라 모의를 수행하였으며, 그림 2~5는 모의 결과이다.

모의 결과를 살펴보면, 부하가 투입된 변압기를 가압하여도 고조파 공진이 발생하지 않았으며, 이를 통해 부하가 투입된 변압기를 가압함으로써 고조파 공진의 발생을 억제할 수 있음을 알 수 있다.

EMTDC에서 발전기의 동기 투입 기능에 대한 모의가 불가능하여 그림 2~5에서 #2 및 #3 발전기의 계통 병입 이후 안정화될 때까지 상당한 시간이 소요됨을 보이지만 이는 실제 상황과는 다르다.

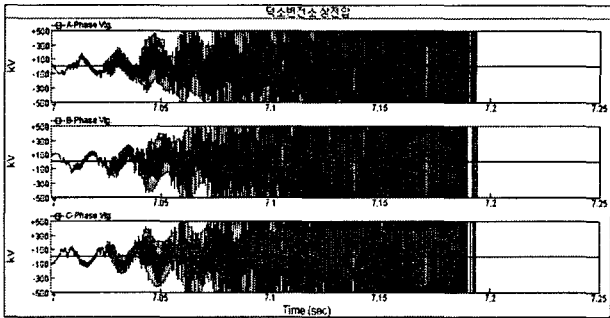


그림 1. 덕소변전소 전압(무부하시)
Fig. 1. Voltage of Deokso S/S(without load)

표 2. 모의 시나리오

Table 2. Simulation scenario

시간 (sec)	내용	비고
0.0	발전기 3기 동시기동 #1발전기 스텝업변압기 가압 자체부하 전력공급	자체부하 : 발전기 정격의5%, pf=0.98
0.0	덕소변전소 변압기 무가압 상태에서 부하 투입	0.5~3MVA (pf=0.98)
5.0	#1발전기 선로 가압	
7.0	덕소변전소 변압기 가압	
10.0	덕소변전소 부하투입	5MVA(pf=0.98)
12.5	#3발전기 계통 병입	
15.5	#2발전기 계통 병입	
20.0	덕소변전소 부하투입	5MVA(pf=0.98)
25.0	덕소변전소 부하투입	9.5~7MVA (pf=0.98)
30.0	선로 가압	
35.0	동특성 모의 종료	

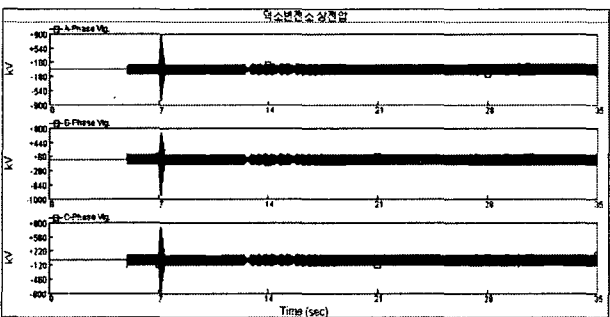


그림 2. 덕소변전소 전압(0.5[MVA] 부하 인가시)
Fig. 2. Voltage of Deokso S/S(with 0.5[MVA] load)

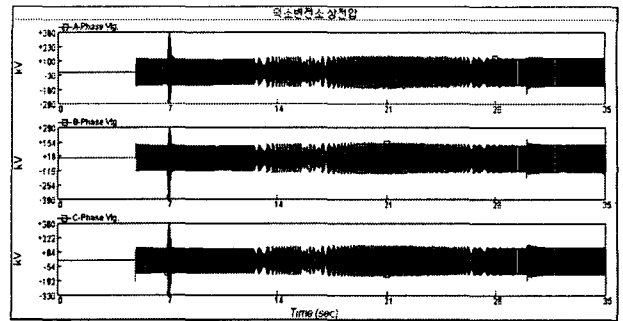


그림 3. 덕소변전소 전압(1.0[MVA] 부하 인가시)
Fig. 3. Voltage of Deokso S/S(with 1.0[MVA] load)

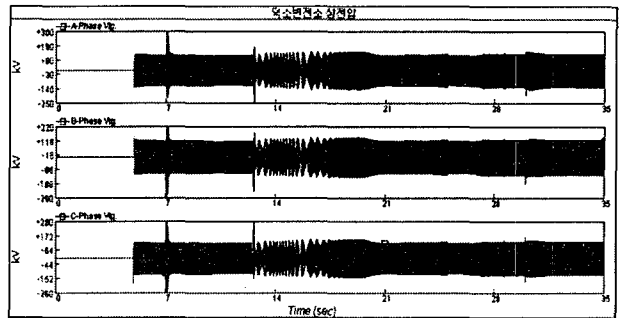


그림 4. 덕소변전소 전압(2.0[MVA] 부하 인가시)
Fig. 4. Voltage of Deokso S/S(with 2.0[MVA] load)

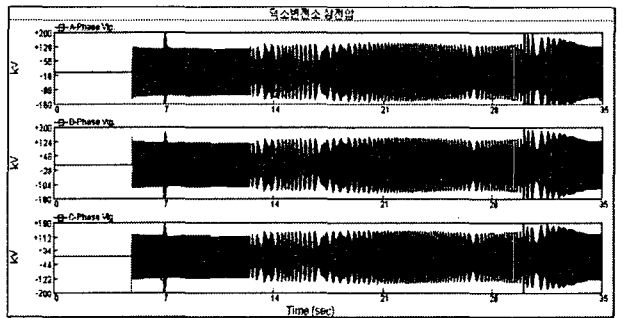


그림 5. 덕소변전소 전압(3.0[MVA] 부하 인가시)
Fig. 5. Voltage of Deokso S/S(with 3.0[MVA] load)

2.2. 선로길이의 가변

전술한 바와 같이 부하가 미리 투입된 변압기 가압을 통해 고조파 공진을 억제할 수 있음을 확인하였다. EPRI에서 제시한 결과와 본 논문의 대상 계통의 전압 레벨의 차이로 인하여 투입할 부하량에 대한 직접적인 비교는 의미가 없지만 EPRI에서 제시한 결과와 상당한 차이가 있음을 확인하였다. 선로길이의 변화와 고조파 공진과의 관계를 확인하기 위해 고조파 공진이 확인된 청평#1 선로를 대상으로 선로길이 변화에 대한 모의를 수행하였으며, 그림 6에 선로 길이가 약 26.7[km](청평#1 선로의 길이는 24.282[km]임)일 때의 모의 결과를 나타내었다.

모의 결과를 살펴보면, 선로의 길이가 약 2.4[km](10%에 해당) 증가된 상황에서 무부하 상태의 변압기를 가압하여도 고조파 공진은 발생하지 않았다. 또한, 길이를 더 증가시켜도 변압기 가압 순간의 일시적인 과전압만 감소하는 것

을 제외하고는 그림 6의 결과와 유사하였다. 국내 시송전계통 중 고조파 공진이 발생한 영동 지역에 대해서도 선로의 길이 변화와 고조파 공진과의 관계에 대한 모의를 수행하였으며, 그 결과를 표 2에 경인북부 지역과 같이 나타내었다. 표 2의 결과로부터 선로길이가 변하게 되면 무부하 상태에서 변압기를 가압하여도 고조파 공진이 발생하지 않음을 확인하였다. 이를 통해 선로길이가 증가하더라도 고조파 공진 발생을 방지하기 위해 미리 투입해야 할 부하량이 선로길이에 비례하여 증가되는 것이 아님을 확인하였으며, 이는 EPRI 보고서 결과와 상당한 차이를 나타내고 있다. 또한, 선로길이에 따라 고조파 공진 발생 가능성이 달라질 뿐 아니라 계통 구성 조건에 따라 고조파 공진이 발생하는 선로길이의 범위도 달라짐을 확인하였다.

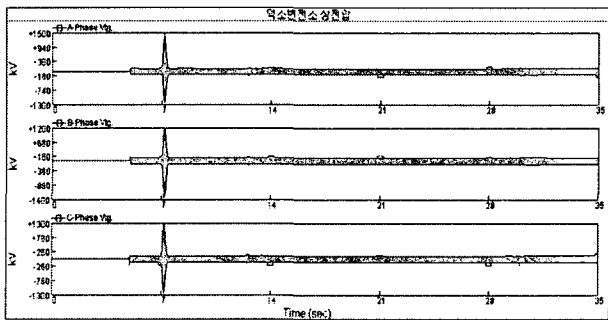


그림 6. 덕소변전소 전압(청평 #1 선로길이의 110%)
Fig. 6. Voltage of Deokso S/S(110% line length of Cheongpyeong#1 T/L)

표 2. 선로길이 변화에 따른 고조파 공진 발생결과
Table 2. Occurrence of harmonic resonance for line length variation

지역	결과			
경인북부	선로길이[km]	0~0.2	0.2~24.49	24.49~
	고조파 공진	발생하지 않음	발생	발생하지 않음
영동	선로길이[km]	0~6.35	6.35~48.42	48.42~
	고조파 공진	발생하지 않음	발생	발생하지 않음

2.3. 발전기와 고조파 공진과의 관계

발전기의 동특성이 고조파 공진에 미치는 영향을 확인하기 위해 동특성이 포함되지 않는 이상적인 전원 모델을 사용하여 모의를 수행하였으며, 그림 7에 모의 결과를 나타내었다.

모의 결과를 살펴보면, 무부하 상태의 변압기 가압 이후의 전압 파형은 그림 1의 동특성이 포함된 발전기 모델의 결과와 유사한 형태로 고조파 공진이 발생하였다. 이는 발전기의 동특성이 고조파 공진 미치는 영향은 극히 미미하다는 것을 알 수 있다.

2.4. 변압기와 고조파 공진과의 관계

변압기의 포화특성이 고조파 공진에 미치는 영향을 확인하기 위해 변압기의 포화특성을 고려하지 않은 모델을 사용하여 모의를 수행하였으며, 그림 8에 모의 결과를 나타내었다.

모의 결과를 살펴보면, 무부하 상태의 변압기 가압시 고조파 공진이 발생하지 않았으며, 스위칭 과도 전압도 부하 투입이나 선로길이의 가변의 결과에 비해 상당히 감소하였음을 알 수 있다. 이로부터 변압기의 포화특성이 고조파 공진과 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

기존 연구[7]에서 살펴본 바와 같이 선형 변압기 모델을 사용한 모의에서도 고조파 공진이 발생하지 않았으며, 순환 전류에 의한 상쇄 효과를 가지는 델타 결선의 변압기를 사용한 모의에서도 고조파 공진이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 변압기의 비선형적 특성이 고조파 공진에 의한 과전압의 주된 원인임을 알 수 있다.

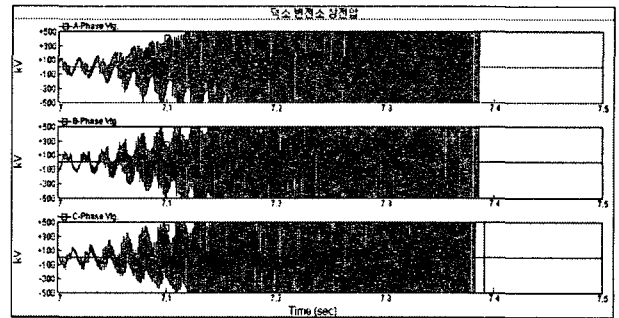


그림 7. 덕소변전소 전압(이상 전원)
Fig. 7. Voltage of Deokso S/S(with ideal source)

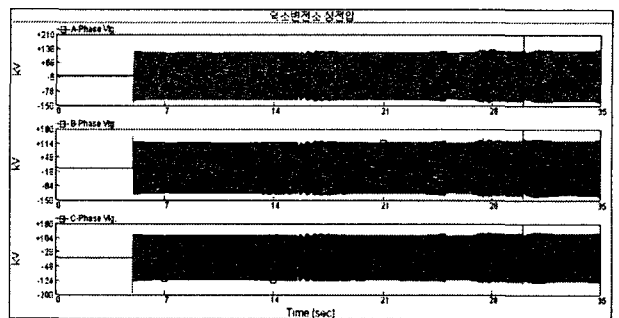


그림 8. 덕소변전소 전압 (포화특성이 없는 변압기)
Fig. 8. Voltage of Deokso S/S (without transformer saturation)

3. 결 론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 국내 시송전계통의 복구과정에서 발생한 고조파 공진에 대한 분석을 수행하였다.

부하가 미리 투입된 변압기의 가압 및 선로길이 변화에 대한 모의를 통해 선로의 길이가 증가되더라도 고조파 공진을 억제하기 위해 미리 투입할 부하량이 반드시 선로길이에 비례하여 증가되는 것이 아님을 확인하였으며, 이는 복구과

정에서 고조파 공진 억제를 위해 투입해야 할 부하량에 대해 EPRI에서 제시한 결과와 상당한 차이를 나타내고 있다.

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.

감사의 글

이 논문은 2004년도 광운대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

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, Feb. 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, et al., "Overvoltage Control During Restoration(Power System Restoration Working Group Report)", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 7, No. 4, pp. 1464-1470, Nov. 1992.

[6] 이흥재 외, "시송전 계통에서 자기여자 현상의 새로운 알고리즘 개발", 대한전기학회 논문지 54A권 3호, pp. 117-121, 2005

[7] 이흥재 외, "EMTDC를 이용한 시송전계통의 고조파공진 분석", 대한전기학회 논문지 54A권 4호, pp. 172-176, 2005

저 자 소 개

이 흥 재(李興載)



1958년 1월 28일 생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기 공학과 졸업(공학박사). 1995년~1996년 미국 워싱턴 주립대 방문교수. 현재 광운대 공대 전기공학과 교수
 Tel : 02-940-5147
 E-mail : hjlee@mail.kw.ac.kr

이 경 섭(李垆燮)



1974년 7월 5일 생. 1998년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기 공학과 박사과정
 Tel : 02-940-5147
 E-mail : kyeong@kw.ac.kr