

변압기 돌입전류에 의한 실계통 영향 분석

신정훈*, 장길수, 윤용범
*한국전력공사 전력연구원

The Effect on Real Power System by the Inrush Current of a Transformer

Jeong Hoon Shin*, Gil Soo Jang, Yong Beum Yoon
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

Abstract - This paper describes the study of the effect on real power system due to the inclusion of the MTR at Buk Che-ju TP #2. The test system in which the transformers are represented in detail and rest Che-ju systems are represented as an equivalent system on the bus is simulated by the EMTDC. Simulation results include magnitude of inrush current and voltage drop on the bus at various CB closing time, and they show the effect on Che-ju system by the inrush current of the Buk Che-ju TP #2's MTR is not considerable.

1. 서 론

본 논문은 북제주 기력 2호기 주변압기 및 보조변압기 가압시, 변압기 돌입전류에 의해 발생한 계통영향 등을 EMTDC로 모의, 분석한 결과이다. 1999년 5월 13일 북제주 기력 2호기 주변압기의 투입에 의해 제주 계통에서 계통전압 강하와 주파수 상승 및 연계선과 발전기의 출력량 변화 등의 영향이 있었으며, 지난 1989년 11월 23일 45 MVA 급 변압기의 가압시에 모선보호용 비유 차동계전기의 동작과 이의 파급에 의해 제주 전지역 정전이 발생했던 사례가 있어 북제주 기력 2호기 주변압기와 보조변압기가 가압시 발생하는 변압기 돌입전류에 대한 상세 분석과 그로 인한 제주 계통의 영향을 분석할 필요가 있다. 본 논문에서는 전자기 과도현상의 시뮬레이션에 사용되는 상용 프로그램 EMTDC를 이용하여 북제주 기력 2호기 주변압기와 보조변압기 투입에 따른 돌입전류의 발생을 모의하고, 변압기가 연결된 모선에서 등가로 표현된 제주계통을 이용하여 변압기 돌입전류에 의한 제주계통의 영향을 분석하고자 한다.

2. 변압기 돌입전류의 발생원인

변압기가 정상적으로 운용될 경우 변압기의 여자전류는 극히 작으며, 보통 정격 전류의 5%보다 작다. 그러나 변압기가 전력계통에 투입되는 순간에는 과도적으로 정격 전류의 10배 또는 20배 정도의 큰 값을 가지는 돌입전류가 발생하며, 이러한 돌입전류는 변압기 권선에서 생기는 최대 기계적 스트레스와 변압기 보호계통 설계의 중요 요소가 되고 있다. 변압기 돌입전류의 크기는 변압기가 투입되는 시점의 전압 위상에 크게 좌우된다. 변압기의 철심이 자화되지 않은 상태의 단상 변압기가 전력계통에 투입되었다고 가정할 경우 변압기의 일차 권선에서의 전압 v 는 식 (2.1)에 표현된 연결될 계통의 전압과 같게 된다.

$$v = \sqrt{2} V \sin \omega t \quad (2.1)$$

여기서, V 는 계통의 RMS 전압값
철심에서의 손실과 일차권선에서의 저항을 무시할 경우 전압 v 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$v = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

따라서, 자속쇄교수는 식 (2.3)을 통해 구할 수 있다.

$$\phi = \frac{1}{N} \int v dt = \frac{\sqrt{2} V}{N} \int \sin \omega t dt \quad (2.3)$$

이때 변압기 투입 시점에 따라 즉 투입될 시점에서의 계통 전압의 위상에 따라 돌입전류는 다르게 표현되며, 다음의 극단적인 두 경우를 통해 그 차이를 알아보고자 한다.

· 변압기가 전압이 최대일 때 투입되는 경우: $t > 90/\omega$
이 경우에 해당하는 자속쇄교수는 식 (2.3)을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\phi = \frac{\sqrt{2} V}{\omega N} \sin(\omega t - 90^\circ) = \phi_{\max} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

자속 쇄교수는 최대값으로 ϕ_{\max} 를 가지는 정현파로 표현되어 돌입전류는 발생하지 않으며 그림 2.1에 전압, 자속쇄교수 그리고 돌입전류의 모양을 나타내었다.

· 변압기가 전압이 '0' 일 때 투입되는 경우: $t > 0$

$$\phi = \frac{\sqrt{2} V}{\omega N} (1 - \cos \omega t) = \phi_{\max} - \phi_{\max} \cos \omega t$$

위의 자속쇄교수 표현식에서 알수 있듯이 자속쇄교수는 시간에 따라 최대값으로 $2\phi_{\max}$ 를 가지고 최소값으로는 0을 가지며, 그림 2.2에 나타난 대로 철심의 자화로 인해 돌입전류는 이보다 더 큰 값을 가지게 된다.

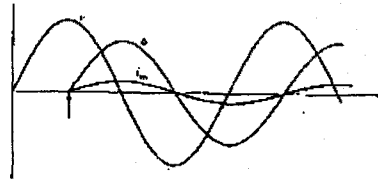


그림 2.1 최대전압에서 투입된 변압기의 돌입전류

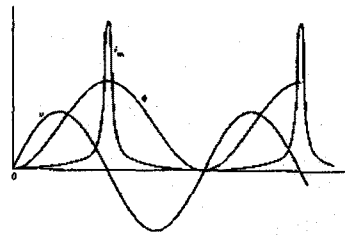


그림 2.2 전압이 '0'인 시점에 투입된 변압기의 돌입전류

또한 변압기 돌입전류의 발생원인으로는 2차 권선에서 부하 조건 즉, 변압기의 2차 권선에서의 부하에 따라 변압기 여자 돌입전류는 변화하며 이는 부하 형태 (저항 부하, 유도성 부하, 용량성 부하)에 따라 차이를 보이게 된다. 저항성 부하의 경우 돌입전류의 첫 번째 주기 최대값은 부하 저항값의 증가와 함께 커지게 되며, 이는 부하의 증가로

(부하 저항의 감소) 변압기 2차 권선에서의 전류가 증가하게 되면서 주 자속이 역 자속과 쇄교하기 때문이다. 따라서, 2차 권선쪽의 부하가 경부하이거나 무부하일 경우 여자 돌입전류에 의한 피해가 더 클 수 있음을 알 수 있다. 부하가 유도성일 경우 돌입전류의 크기는 더욱 커지게 되는데, 이는 돌입전류의 최대치가 부하의 역률에 민감하다는 것을 의미한다. 부하의 역률이 커질수록 즉 부하가 순수 저항 부하에 가까워질수록 주 자속의 역 자속과의 쇄교가 강해지면서 돌입전류의 최대치는 작아지고, 부하의 역률이 작아질수록 돌입전류에 의한 영향이 더 크게 된다. 용량성 부하의 경우 역시 부하의 역률과 돌입전류의 최대치는 밀접한 관계를 보이고 있으며 부하의 역률이 1에 가까워질수록 돌입전류 최대치는 작아진다. 철심에 남아있는 잔류자속의 크기와 극성에 따라 돌입전류의 최대값 또한 영향을 받으며, 특히 첫 번째 주기에 대하여 잔류자속은 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 잔류자속의 크기가 클수록 돌입전류 최대치가 커지게 되며 잔류자속의 극성 또한 돌입전류에 미치는 영향은 아주 크다.

3. EMTDC를 이용한 변압기 돌입전류 영향분석

3.1 분석대상 계통 개요

제주지역의 일일 계통부하는 최소 130 MW에서 최대 240 MW 정도이며, 하계 최대 부하로 300.3 MW를 예상하고 있다. 현재 제주지역의 발전기에 의한 가능 출력은 209.5 MW이며, HVDC 연계선에 의한 최대 가능 출력은 150 MW이다. 북제주 기력 2호기에 연결되는 모선 201에서 제주계통은 태브란등가로 표현되었으며, 본 검토에서 고려된 계통 조건에 의해 PSS/E를 통해 구해진 정상/영상 임피던스 값은 다음 표1과 같다.

표 1. 제주계통의 등가 표현

시퀀스 임피던스	P.U 값		실저값	
	R(Ω)	X(Ω)	R(Ω)	L(H)
정상임피던스	0.00097	0.00089	0.230067375	0.033976957
영상임피던스	0.05401	0.03249	0.211072396	0.020439018

돌입전류를 검토하는 북제주 기력 2호기 주변압기 및 보조 변압기의 용량 및 주요 데이터는 다음과 같다.

- 주변압기
 - 정격용량: 69.0/92.0 MVA (OA/FA)
 - 정격전압: 13.1Δ/15.4Y kV
 - 누설임피던스: 9%
 - 무부하손: 66 kW (@ 정격전압)
 - 여자전류의 정격전류에 대한 비: 0.4 % (FA 기준)
 - 철심구조: 내철형
- 보조변압기
 - 정격용량: 10.5/14.0 MVA (OA/FA)
 - 정격전압: 13.1Δ/6.9Y kV
 - 누설임피던스: 6%
 - 무부하손: 14 kW (@ 정격전압)
 - 여자전류의 정격전류에 대한 비: 0.6 % (FA 기준)
 - 철심구조: 내철형

돌입전류 계산을 위한 EMTDC 시뮬레이션을 위해서는 변압기의 포화특성에 대한 입력데이터의 정확도가 시뮬레이션 시 가장 중요한 변수가 된다. 본 시뮬레이션에서는 제주계통을 태브란 등가회로로 모의하고 주변압기 및 보조변압기에 대한 세부 데이터를 입력하여 변압기 투입시의 돌입전류 특성과 이에 대한 계통의 영향을 모의하기 때문에 변압기 포화데이터의 중요성은 두말할 필요가 없다. 그러나, 변압기 포화특성은 변압기 철심이 가지는 비선형적인 자화 특성에 기인한 것으로 이를 선형화하여 근사적으로 해석하게 되며 시뮬레이션 프로그램에 따라 선형화하는 방법이 상이하기 때문에 요구하는 입력변수에 차이가 있게 된다. 따라서, 제작사가 제시하는 사양 등을 기초로 프로그램에서 요구하는 입력변수를 계산하여 입력하게 된다. 본 논문에서는

는 제시된 자료에 기초하여 EMTDC 프로그램이 요구하는 변압기 포화특성 입력데이터를 산출하였다. EMTDC에서의 변압기 포화특성 모의를 위해서는 기본적으로 변압기를 Ideal Transformer Model로 설정하여야 하며, 주변압기는 내철형(철심이 권선 내부에 위치)이므로 이의 정확한 포화특성을 모의하기 위해서 삼권선 변압기로 모의한다. (한 변압기 권선은 Dummy로 사용) EMTDC에서 요구하는 공심 리액턴스(Xair) 값이나 Knee Voltage(Xknee) 값들과 같은 변압기 특성데이터의 입력변수는 제작사가 제시하는 I-0곡선을 토대로 근사적으로 계산하거나, 제작사 변압기 철심 및 권선이 가지는 전기, 기계적 위치(철심직경, 높이, 전기고등)에 따라 계산된 값을 이용하였다.

3.2 변압기 투입 위상각에 따른 돌입전류의 크기 비교

시뮬레이션 대상계통은 아래 그림 3.1과 같으며, 전술한 바와 같이 변압기 돌입전류는 인가되는 전압의 위상에 따라 그 크기의 차이를 보이므로 주변압기의 계통측 차단기 투입 위상각에 따른 돌입전류의 양상을 살펴보기로 한다. 투입시점은 A상 전압 1 Cycle을 기준으로 하여 각상 전압의 교차점 즉, 위상 $\pi/4$ 씩 이동한 점에서 차단기를 투입하기로 한다. (그림 3.2)

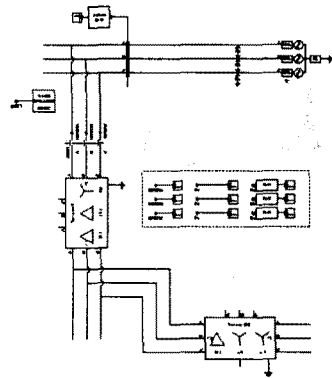


그림 3.1 시뮬레이션 대상계통

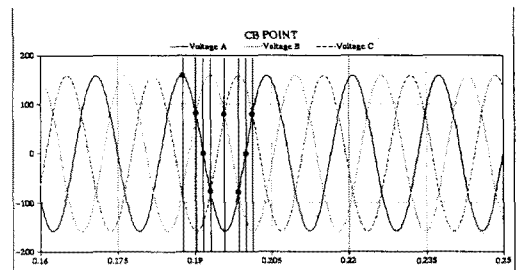


그림 3.2 차단기 투입 위상각

A상 전압 최대치(A상-90°, B상-315°, C상-225°) 시점에서 차단기 계통투입시의 돌입전류 양상은 그림 3.3과 같다. 각각의 투입 위상에 대한 돌입전류 시뮬레이션 결과는 표2와 같으며, 표2에서 돌입전류 감쇄시간(Cycle/sec)은 약간의 차이를 보이나, EMTDC내에서 미리 설정할 수 있는 값이므로 고려하지 않기로 한다. 돌입전류 최대치는 위상각 180°(A상 전압기준)에서 가장 큰 값을 가지며 대부분 그림 3.3과 같은 파형을 보였다. (표에서 최대치 우측은 최대치를 나타낸 상(phase)을 표시한다) 그림 3.4는 돌입전류의 주파수 분석(Fast Fourier Transform) 결과를 나타내며 기본파의 크기를 100으로

했을 때 직류성분을 포함한 각 고조파의 크기를 표시하였다. 돌입전류는 제 3 고조파를 포함하므로 최대치 근방이 첨예하게 된다.

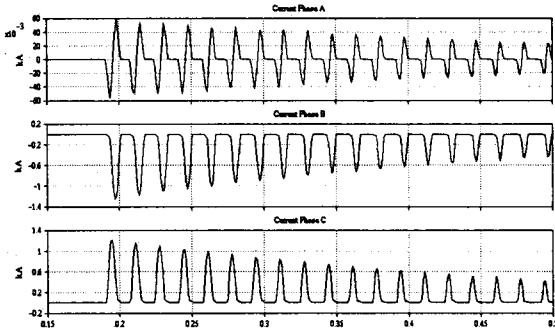


그림 3.3 돌입전류 파형(A상 전압기준 90°시 투입)

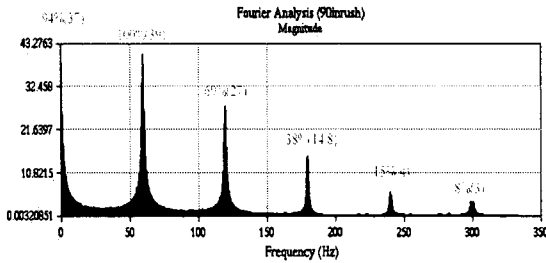


그림 3.4 돌입전류 파형의 주파수 분석 결과 (투입 위상각 90°시)

표 2. CB 투입 시점에 따른 돌입전류 크기의 최대치

CB 투입시점		154kV 돌입전류 최대치(A)-(상)	돌입전류 크기 1/2 감쇄시간(C/S)
A상 전압 기준 위상각(°)	투입시간(sec) (시뮬레이션)		
90	0.187500	1245(B)	12
135	0.189583	1381(B)	13
180	0.191666	1454(A)	14
225	0.193750	1400(C)	13
270	0.195830	1234(B)	14
315	0.197916	1373(B)	15
360	0.200000	1438(A)	11
45	0.202083	1407(C)	14

3.3 돌입전류에 의한 복제주 등가모선에서의 전압/주파수 변화

본 절에서는 변압기 투입시 복제주 등가 모선에서의 전압 및 주파수 변동에 대해 살펴보기로 하자. 변압기 투입전 계통의 전압은 158.4kV로 상향운전 되고 있었으므로 등가 전원의 전압 실효치를 158.4kV로 설정하고 시뮬레이션 하였다. 또한, 투입 위상각에 따른 전압강하치는 각 상의 상 전압 실효치를 기준으로 표기하였다. 그림 3.5는 투입 위상각 180°시의 각 상의 전압강하를 나타내며 그림 3.6은 3상 실효치를 p.u.로 나타내었다. 차단기 투입시점(약 0.2초)에서 약간의 전압변동이 있음을 보여준다.

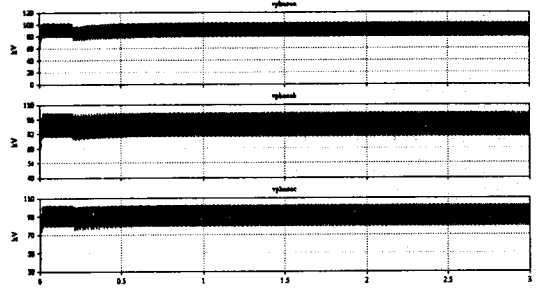


그림 3.5 투입 위상각 180°시 각 상의 전압 강하

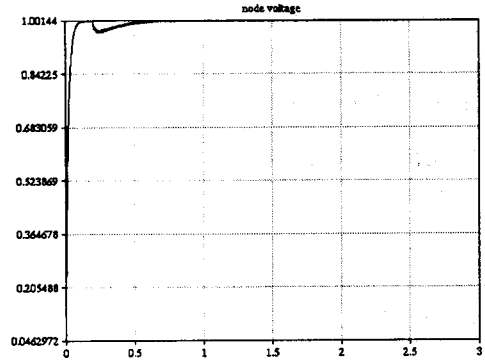


그림 3.6 투입 위상각 180°시의 전압강하 (3상 실효치)

그림 3.7은 이때의 주파수 변동을 나타내었다. 투입시점에서 주파수가 약간 증가한 것을 볼 수 있다.(60.08Hz)

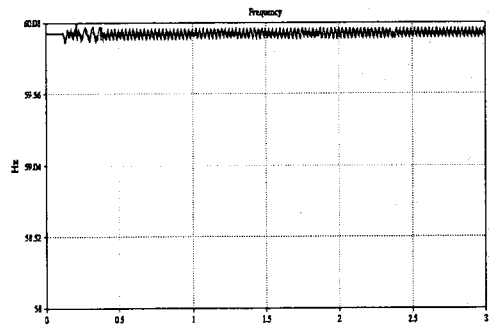


그림 3.7 투입시의 주파수 변동 (180°-60.08Hz)

아래 표 3에 각각의 투입 위상에 따른 각 상의 전압 강하치와 이 때의 주파수 변화를 나타내었다. 위상각 360°에서 최대의 전압강하가 발생한 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

변압기 돌입전류의 크기와 이에 따른 계통영향에 대한 시뮬레이션 결과를 종합하면, 실지 발생시의 전압 강하치와는 정확하게 일치하지는 않지만 거의 유사한 결과로 시뮬레이션 되었으며 3상 변압기의 돌입전류치는 전압 위상각에 따라 약간의 차이를 보였다. 계통주파수 역시 실지 발생

표 3. 투입 위상각에 따른 계통전압 및 주파수 변화

CB 투입시점		인가 전압 (kV)	154kV측 전압강하 (V _{phase, rms})		계통 주파수 (Hz)
A상 전압 기준 위상각(°)	투입시간(sec) (시뮬레이션)		A상	B상	
90	0.187500	158.4	A상	2400 V	60.11
			B상	4600 V	
			C상	5800 V	
135	0.189583		A상	3200 V	60.19
			B상	6200 V	
			C상	2500 V	
180	0.191666		A상	6000 V	60.15
			B상	3000 V	
			C상	2100 V	
225	0.193750		A상	4100 V	60.18
			B상	2000 V	
			C상	5700 V	
270	0.195830	A상	2400 V	60.13	
		B상	4700 V		
		C상	5700 V		
315	0.197916	A상	3670 V	60.12	
		B상	6120 V		
		C상	2400 V		
360	0.200000	A상	6600 V	60.08	
		B상	3700 V		
		C상	2400 V		
45	0.202083	A상	4400 V	60.13	
		B상	2300 V		
		C상	5100 V		

한 60.15Hz와 근접한 결과를 나타낸다. 본 시뮬레이션에서는 돌입전류로 인한 계통영향만을 고려하였으므로 변압기 보호 계전기를 포함한 보호시스템은 고려되지 않았다. 최대 돌입전류 크기를 나타내던 투입 위상각 180° 시점이 아닌 360° 시점에서 최대 전압강하가 발생한 것은 최대 돌입전류 발생은 각 상에 국한한 반면, 전압강하는 전체 삼상 전류에 의해 영향을 받기 때문이다. 시뮬레이션 결과에서 최대 전압강하치가 6.6kV(상전압 기준)로 규정전압 기준(±4kV : 선간전압 기준)보다는 약간 더 떨어지는 경향이 있으나 전압강하 현상이 0.5초 이내에 해소되어 그 영향은 크지 않을 것으로 판단되며, 주파수 변동 역시 적정 주파수 유지 범위내의 값(60±0.2Hz)이므로 문제가 되지 않는 것으로 나타났다. 본 시뮬레이션은 EMTDC급 계통 데이터의 부족과 제작사 측에서 제공한 변압기 데이터의 불충분으로 해석시 다소 어려움을 겪었으나 주어진 데이터와 확보된 자료를 바탕으로 최대한 실지 현상에 근접하도록 시험계통을 구성하여 해석하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 전명렬외, "북제주 T/P #2호기 수전설비 준공시험 보고서", 전력연구원 TM.C97ES01. S1999.153, 1999.7
- [2] PSCAD/EMTDC Manual Set, 1994
- [3] 김일동, 김정부의, "제주 154/66kV 가압에 따른 계통 검토", 전력연구원 검토보고서, 1990
- [4] "제주지역 전력계통 안정도 향상을 위한 검토 결과 보고서", 한전 전력연구원 Technical Memo TM.N02.S1999.413, 1999.8