

EMTP를 이용한 제주계통의 여자돌입전류 모델링

서 훈철\*, 여 상 민\*\*, 김 철 환\*\*, 유 명 식\*\*\*, 조 범 섭\*\*\*  
 기초전력연구원\*, 성균관대학교\*\*, 한국전력거래소\*\*\*

Modeling of Transformer Inrush Current on Jeju Power System using EMTP

\*H. C. Seo, \*\*S. M. Yeo, \*\*C. H. Kim, \*\*\*Y. S. Lyu, \*\*\*B. S. Cho  
 \* KESRI, \*\*Sungkyunkwan University, \*\*\*KPX

**Abstract** - Transformer inrush current can cause the voltage drop by source impedance. The accurate modeling and analysis for inrush current is first step to limit the inrush current and improve the power quality. This paper presents the modeling of transformer inrush current by EMTP-RV using Jeju power system, Korea. The method to model the hysteresis curve of transformer in EMTP-RV is discussed. Simulations demonstrate the verification of modeling of inrush current by comparing the data recorded in field with simulation values and analyzing the harmonics of inrush current.

1. 서 론

변압기 여자돌입전류는 변압기 가압 시 철심이 포화되는 것으로 인하여 발생하는 현상으로 크기가 크고, 많은 양의 고조파를 포함하고 있다. 이러한 과도전류는 변압기의 손상 및 수명단축, 보호계전기 오동작, 전력품질 저하 등의 악영향을 미치게 되어, 변압기 여자돌입에 대한 정확한 분석 및 대책개발이 필요하다[1].

따라서, 본 논문에서는 분석을 위한 첫 단계로 변압기 여자돌입전류의 모델링을 수행하였다. 대상계통으로 제주계통을 선정하였으며, 남제주 T/P의 주 변압기 시험 데이터를 이용하여 히스테리시스 특성을 모델링하여 여자돌입전류를 발생시켰다. 이 모든 과정은 과도현상 해석 도구인 EMTP-RV를 이용하였으며, 모델링의 타당성을 증명하기 위하여 실측 데이터와 비교 및 고조파 분석을 수행하였다.

2. 변압기의 히스테리시스 특성 모델링

2.1 남제주 T/P 주 변압기 시험 데이터

여자 돌입전류 발생 대상인 남제주 T/P 주 변압기의 시험데이터는 다음 표 1과 같다. 시험 주파수는 60Hz이며, 저압측의 정격전압은 13.1kV, 기준용량은 124MVA이다. 시험 데이터 중 히스테리시스 특성의 모델링을 위해서 필요한 데이터는 각 공급전압 및 이에 해당하는 여자전류의 값이다.

표 1. 남제주 T/P 주 변압기 시험 데이터

Supply voltage/ $\sqrt{3}$ (Phase to ground) (%)	Current(A)								No load losses (W)	
	Phase			Average						
	mean	rms		Ia	Ib	Ic	Io	%	Pm	Pc
90	6809	6785	4.650	3.430	3.560	3.880	0.071	49118	49291	
100	7565	7520	7.370	5.690	5.830	6.297	0.115	62108	62479	
105	7941	7874	9.940	7.830	7.910	8.560	0.157	70742	71341	
110	8318	8221	14.160	11.350	11.400	12.303	0.225	81510	82466	

2.2 시험 데이터를 이용한 변압기 히스테리시스 특성 모델링

EMTP-RV를 이용하여 히스테리시스 특성을 모델링하기 위하여 우선, 상기의 공급전압 및 여자전류 데이터를 이용하여 전류-자속 데이터를 구하여야 한다. 이를 위하여 EMTP-RV에서 'L nonlinear data function' 소자를 이용할 수 있다. 다음 그림 1은 L nonlinear data function 소자의 데이터 입력 화면이다. 그림에서  $V_{base}$ 에서는 13.1kV를 상전압으로 바꾸어 입력하며,  $P_{base}$ 에서는 124MVA에 대한 값을 단상에 대한 값으로 바꾸어 입력한다. 또한,  $I_{RMS}(pu) - V_{RMS}(pu)$ 에 대해선 표 1의 % 값을 pu 값으로 바꾸어 입력한다.

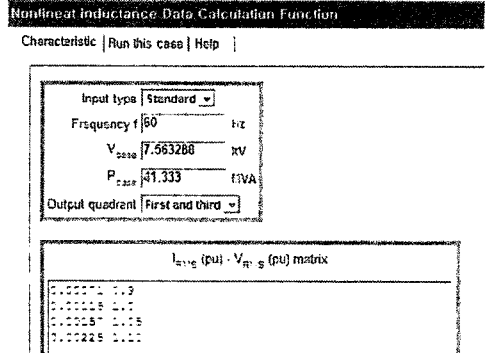


그림 1. L nonlinear data function 소자의 데이터 입력 화면

이를 실행하면, punch 파일에서 전류-자속 데이터가 생성된다. 이 값을 이용하여 Hysteresis fitter의 비선형 특성 값을 입력한 후 실행하면, Hysteretic reactor 소자에 필요한 각 계수값을 구할 수 있다[2].

이러한 과정을 거쳐서 생성된 히스테리시스 곡선은 다음 그림 2와 같다. 포화점은 (12.31, 31.2095)이며 (0, 8.83496)을 지나므로, 최대 잔류자속은 28.3%이다.

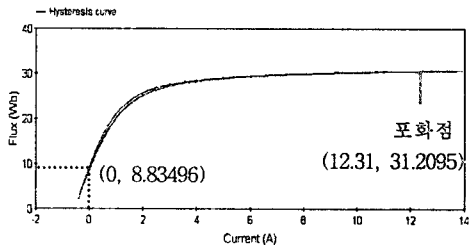


그림 2. EMTP-RV를 이용하여 구한 히스테리시스 곡선

### 3. 제주계통에서의 여자들입전류 시뮬레이션

#### 3.1 제주계통 모델링

EMTP-RV를 이용하여 전체 제주계통을 모델링하면 다음 그림 3과 같다. 모델링에 필요한 각 모선의 부하량 및 선로 데이터는 다음 표 2-3과 같다. 각 모선의 부하량에 해당하는 임피던스 값을 계산하여 입력하였으며, 선로 모델은 비교적 거리가 짧으므로 집중정수 선로 모델을 이용하여 해당 임피던스 값을 입력하였다.

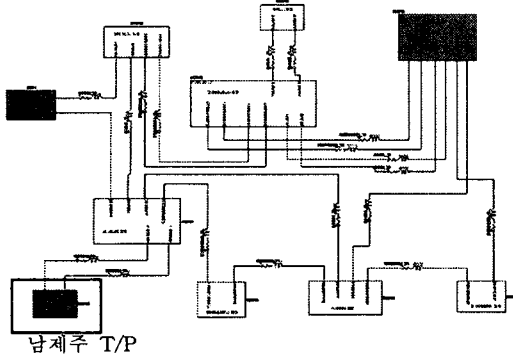


그림 3. EMTP-RV를 이용한 제주계통의 모델링

표 2. 각 모선의 부하량

모선명	부하량(MW)	모선명	부하량(MW)
신제주	72.33	안덕	30.803
산지	26.304	성산	24.148
동제주	76.126	한라	36.19
신서귀	27.581	한림	29.394
합계 : 322.876MW			

표 3. 각 선로의 임피던스

선로명	길이(km)	정상분(%)	영상분(%)
한주 T/L	31.159	1.3351+j5.9124	3.9582+j15.393
동신 #1, #2 T/L	16.646	0.7067+j3.3294	1.9785+j8.3107
산지 #1, #2 T/L	5.1000	0.0406+j0.5256	0.1126+j0.1820
신안 T/L	26.600	1.1007+j4.7543	3.2840+j12.835
제주 #1, #2 T/L	6.9300	0.0419+j0.6299	0.1183+j0.2153
북동 #1, #2 T/L	13.000	0.5688+j2.6864	1.5943+j6.6819
한림 T/L	19.529	0.8288+j3.8401	2.3672+j9.6651
안덕 T/L	34.437	1.4618+j6.6670	4.2734+j16.746
한라 T/L	30.895	1.3114+j6.1305	3.8514+j14.361
남제 #1, #2 T/L	7.0000	0.0547+j0.6978	0.1486+j0.2642
신서귀 T/L	22.714	0.9642+j4.4350	2.7883+j11.120
한성 T/L	46.684	1.9816+j9.2446	5.8197+j21.741
북성 T/L	31.357	1.3310+j6.2209	3.8841+j14.679
남원 T/L	20.875	0.8861+j4.0814	2.5433+j10.313

각 발전소 및 변전소는 EMTP-RV의 Subcircuit 기능을 이용하여 블록화하였으며, 남제주 T/P 부분의 세부 모델은 다음 그림 4와 같다. 이 중 주 관심 대상은 그림에서 표시한 부분인 남제주 T/P에서 변압기 용량이 100MW인 변압기로서 EMTP-RV로 모델링한 세부 등가 회로 모델은 다음 그림 5와 같다. 변압기의 %임피던스는 R=0.3169, X=10.9854 이므로, 이에 해당하는 임피던스 값을 계산하여 1, 2차측 임피던스 값에 대입하였다. 히스테리시스 특성을 표현하기 위한 Hysteretic reactor가 별도로 연결되어야 하기 때문에 1차측 임피던스는 별도로 연결된 것을 확인할 수 있다. 2차측 임피던스는 변압기 모델 내부에 입력하였다.

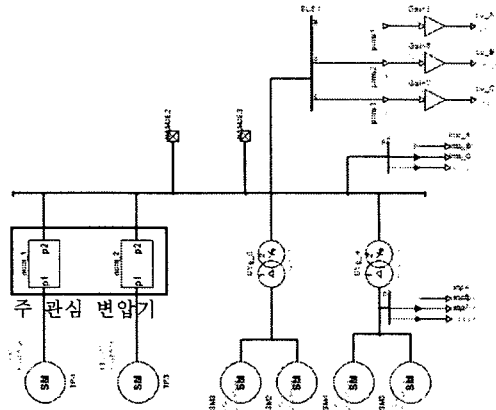


그림 4. 남제주 T/P의 세부 모델링 회로도

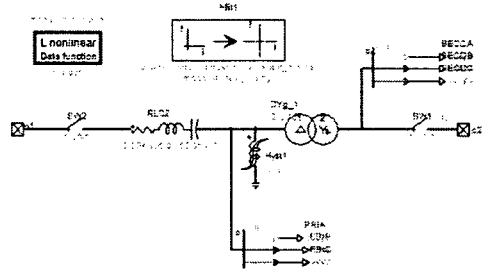


그림 5. 남제주 T/P 주 관심 변압기의 등가회로 모델

#### 3.2 여자들입전류 시뮬레이션

##### 3.2.1 실측치와의 비교

다음 그림 6 및 표 4는 남제주 T/P의 여자들입 시계통측 전류와 전압의 실측치 파형 및 이에 해당하는 값을 나타내고 있다. 그림 6에서 하단의 전류 파형을 통하여 여자들입전류의 크기는 시간이 지날수록 감소하는 것을 알 수 있으며, 표 4의 각 값을 통하여 3상의 전류 및 전압의 크기는 다른 것을 알 수 있다. 이러한 조건으로 이루어 실측치 파형을 이용하여 여자들입전류 발생 조건 및 불평형 등의 계통의 운전 상황은 정확히 알 수 없다. 따라서, Case study를 통하여 여자들입전류의 크기가 비슷한 경우를 찾아, 이때의 계통 전압과 비교하였다.

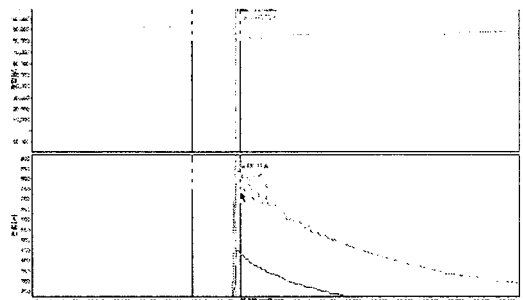


그림 6. 여자들입전류의 실측치 파형

표 4. 남제주 T/P의 여자들입에 대한 실측치

전류	전압
$I_A=431.11A$	$V_A=85113.59V$
$I_B=874.95A$	$V_B=80101.39V$
$I_C=902.98A$	$V_C=80604.26V$

시뮬레이션 결과, A상을 기준으로 전압의 투입위상각이 70도, 잔류자속이 0%인 경우 여자돌입전류의 실효치 크기는 다음 그림 7과 같이 A상 428.66A로서 실측치와 2.45A의 차이만 발생한 것을 알 수 있다. 또한, 실측치와 마찬가지로 시간에 따라서 그 값이 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 이때의 계통전압은 85523V로서 실측치와의 차이는 409.41V, 즉 0.5%의 정도의 오차만 발생하게 되어, 실측치와 상당히 유사한 값을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

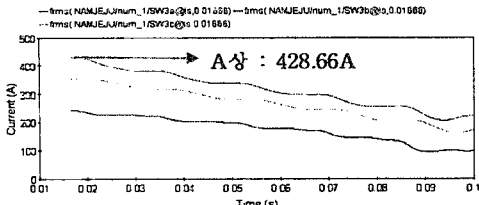
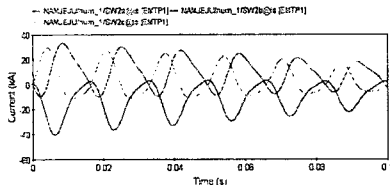


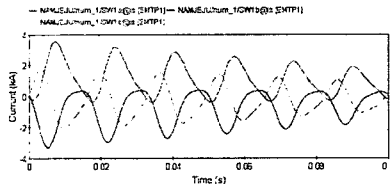
그림 7. 투입위상각이 70도, 잔류자속이 0%인 경우의 여자돌입전류의 크기(실효치)

### 3.2.2 여자돌입전류의 고조파 분석

여자돌입전류가 가장 큰, 즉, 전압의 투입위상각이 0도이고 잔류자속이 28.3%인 경우에 대하여 모의하였다. 다음 그림 8은 이러한 조건에서 계통의 1, 2차 측 전류의 순시치 파형이며, 표 5는 이 때 각 상의 실효치 값이다. 순시치 파형을 통하여, 많은 양의 고조파 및 dc-offset 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 또한, 3상 모두에서 0초부터 여자돌입이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 투입시간을 0초 이후로 할 경우, 변압기의 1차측에 연결된 발전기에서 공급된 전력을 소비하지 못하여 시뮬레이션 상 에러가 발생하기 때문이다. 표 5를 통하여, 여자돌입전류의 크기가 가장 큰 경우 계통에 흐르는 전류가 2000A이하임을 알 수 있다.



(a) 1차측 순시치



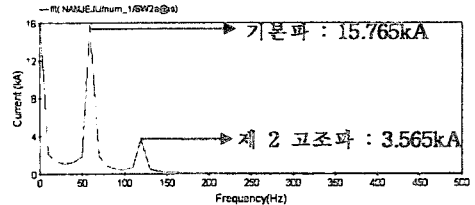
(b) 2차측 순시치

그림 8. Worst Case에 대한 여자돌입전류의 순시치 파형

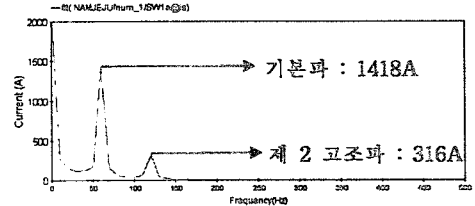
표 5. Worst Case에 대한 여자돌입전류의 실효치

측정위치	상	실효치
변압기 1차측	A	18.584kA
	B	21.889kA
	C	15.175kA
변압기 2차측	A	1947A
	B	1701A
	C	1333A

여자돌입전류 파형의 타당성을 증명하기 위하여, 고조파 분석을 수행하였다. 다음 그림 9는 1, 2차측 순시치 파형의 고조파 분석결과이다. 1차측의 경우, 기본파의 크기는 15.765kA, 제 2고조파의 크기는 3.565kA이다. 2차측의 경우, 기본파의 크기는 1.418kA, 제 2고조파의 크기는 316A임을 알 수 있다. 이를 통하여 다른 고조파에 비하여 제 2고조파가 많이 포함되어 있으므로, 전형적인 여자돌입전류 파형임을 알 수 있다.



(a) 1차측 고조파 분석결과



(b) 2차측 고조파 분석결과

그림 9. 변압기 1, 2차측 순시치 파형의 고조파 분석결과

### 3.2.3 시뮬레이션 결과 요약

여자돌입전류 모델링의 유효성을 증명하기 위하여, 실측치와의 비교 및 고조파 분석을 수행하였다. 이러한 결과를 요약하면 다음과 같다. 이것을 통하여 제주계통에서 남제주 T/P의 여자돌입전류 모델링은 적절하게 수행되었음을 알 수 있다.

- A상 전압의 투입위상각 70도, 잔류자속 0%인 경우 : 실측치와 전류 및 전압의 크기 유사함
- 여자돌입전류가 가장 큰 경우 고조파 분석결과 제 2고조파 성분이 많이 포함되어 있음

## 4. 결 론

본 논문에서는 EMTP-RV를 이용하여 제주계통에서 여자돌입전류를 모델링하였다. 우선, 남제주 T/P의 시험 데이터를 이용하여 히스테리시스 특성을 모델링 하였으며, 이를 제주계통에 적용하였다. 모델링의 타당성을 증명하기 위하여, 여자돌입전류의 실측치 및 이때의 전압 크기와 비교하였고, 고조파 분석 또한 수행하였다. 이러한 비교분석 결과 제주계통의 여자돌입전류 모델링이 적절하게 수행되었음을 확인할 수 있었다.

향후, 제주계통의 여자돌입 시 전력품질 저하에 대한 분석을 위하여 본 논문에서 모델링 된 제주계통 및 변압기 히스테리시스 모델을 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Mukesh Nagpal, Terrence G. Marinich, Ali Moshref, Kip Morison, and P. Kundur, "Assessing and Limiting Impact of Transformer Inrush Current on Power Quality", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 2, pp. 890-896, April 2006.
- [2] DCG-EMTP(Development coordination group of EMTP) Version EMTP-RV, Electromagnetic Transients Program. [Online]. Available : <http://www.emtp.com>