

히스테리시스 특성 모델링 및 여자돌입전류 분석

이장우, 박세호, 이상봉, 김철환
성균관대학교

Hysteresis Characteristic Modeling and Inrush Current Analysis

Jang-Woo Lee, Se-Ho Park, Sang-Bong Rhee, Chul-Hwan Kim
Sungkyunkwan University

Abstract - 여자돌입전류는 변압기 가압 시 발생하는 과도 전류의 한 형태로서 정격의 수배에 크기를 가지며 변압기에 직접적인 손상을 입히거나 보호계전기에 오동작을 유발 할 수 있다. 또한 전기 품질에 영향을 주어 기기에 충격을 입히거나 고장을 불러일으킬 수 있다. 따라서 여자돌입전류를 분석하고 파악하는 일은 전력계통의 운영에 있어서 매우 중요하다. 본 논문에서는 과도 해석 프로그램인 EMTP(Electric Magnetic Transient Program)를 이용하여 여자돌입전류를 모델링하고, 여자돌입전류모델링 검증을 통해 전형적인 여자돌입전류 파형에 대한 분석을 실시하였다.

1. 서 론

여자돌입전류란 변압기의 초기 가압이나 재 가압 시 순간적으로 흐르는 큰 충격전류를 말하며, 이것은 전원에 갑자기 연결되어 기동된 전동기에 나타나는 기동전류와 유사하나 실제로는 다른 현상에 의해 일어난다. 또한 이상적인 변압기에서 자화전류는 정상상태보다 더 높은 자속을 발생시키는데 필요한 기자력을 만들어 내기 위해 정상상태 최대치의 약 2배로 증가한다. 일반적으로 변압기를 설계할 때 정상자속 최대치와 포화를 포화한계 사이에 충분한 갭을 두지는 않기 때문에 전압을 인가한 직후 최초의 반 사이클 동안 대부분의 변압기는 철심이 포화된다. 따라서 철심이 포화된 상태에서 자속을 생성하기 위해서는 비선형적인 기자력이 필요하다. 때문에 철심에 자속을 흐르게 하는 기자력을 얻기 위해 권선전류는 비선형적으로 증가하고, 정상상태 최대전류의 2배를 쉽게 초과하게 되는 것이다. 변압기 초기 가압 시 변압기의 자기영역을 만들기 위해 유입되는 여자돌입전류는 가압 시 자속이 커졌다 작아졌다 하는 현상이 반복되어 권선 전류도 커졌다 작아졌다 한다. 하지만 이는 실제 고장상태가 아닌 일시적인 돌입전류이기 때문에 보호계전기의 오동작이 유발될 수 있다. 또한 여자돌입전류는 철심에 열 손상을 입힐 수 있고 와전류 손실의 원인이 되어 계통의 신뢰도를 떨어뜨린다[1-3]. 따라서 전력계통의 안정적인 운영을 위해 여자돌입전류 특성에 대한 분석이 필요하다. 본 논문에서는 EMTP를 이용하여 여자돌입전류를 모델링 하였다. 전형적인 여자돌입전류 특성이 포함되어 있는지 알아보기 위해 여자돌입전류 모델링 검증을 실시하였고, 발생한 여자돌입전류를 관찰하고 분석하였다.

2. 여자돌입전류

2.1 여자돌입전류 특성

여자돌입전류는 변압기 투입 시 발생하는 현상으로 그 크기는 정격의 약 7~10배의 크기에 해당하며, 변압기 용량, 계통전압, 전원과 변압기간의 계통저항 및 변압기 손실, 변압기 철심의 제질, 잔류자속, 여자 초기 전압 위상각에 의존한다. 여자돌입전류의 모양은 첫 몇 주기 동안에는 급격히 증가하다가, 시간이 지나면서 감소한다. 일반적으로 변압기의 투입위상각이 클수록 여자돌입전류는 작아지고, 잔류자속이 클수록 큰 여자돌입전류가 흐른다. 또한 고조파 분석 시 제2고조파가 DC 성분 및 다른 고조파성분에 비해 많이 포함된다[4].

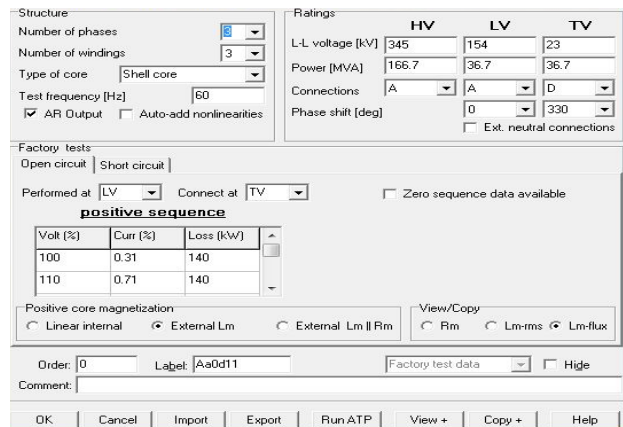
2.2 여자돌입전류 모델링

본 논문에서는 EMTP를 이용하여 여자돌입전류 모델링을 실시하였다. EMTP로 여자돌입전류 모델링을 하기 위해서는 변압기 철심의 히스테리시스 특성표현이 필요하다. 이러한 히스테리시스 특성을 표현 할 수 있는 컴포넌트는 BCTRAN이고, 변압기 파라미터 계산을 위해서는 표 1과 같은 3가지 보조 프로그램이 존재한다. XFORMER 프로그램 같은 경우 단상 모델링만 가능하고, TRELEG 같은 경우 단상 및 3상 Core-Type 모두 모델링 가능하지만 [L]¹ 행렬 계산은 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 [R]과 [L]행렬 뿐만 아니라 [L]¹행렬의 계산이 가능하고 단상과 3상 Core-Type변압기 모두 모델링 가능한 BCTRAN을 이용하여 변압기를 모델링 하였다.

〈표 1〉 EMTP에서 제공하는 보조프로그램

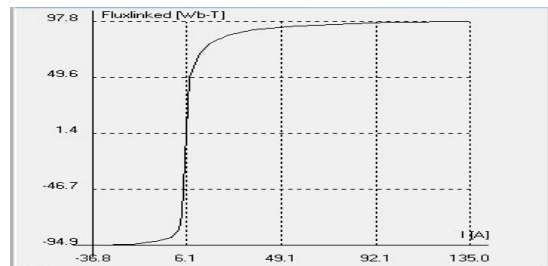
보조 프로그램 종류	특징
XFORMER	단상변압기뱅크에 관하여 [R]과 [L]행렬의 계산.
TRELEG	단상변압기뿐만 아니라 3상 Core-Type변압기의 모델링 가능.
BCTRAN	[R]과 [L]행렬 뿐만 아니라 [L] ¹ 행렬의 계산가능. 단상과 3상 Core-Type변압기 모두 모델링 가능.

그림 1은 BCTRAN 변압기의 제원을 입력하는 입력창이다. 변압기 type, 결선상태, 전압-전류 data를 입력하여 변압기의 모델을 결정하고 하단 RunATP를 클릭하여 실행시킴으로서 변압기 특성을 결정하였다.



〈그림 1〉 BCTRAN 변압기 입력창

그림 2는 Type 96소자의 히스테리시스 곡선이다. Type 96소자에 전류자속 data를 입력하여 변압기 철심의 포화특성을 표현할 수 있다. EMTP에서 제공하는 비선형소자에는 Pseudo-nonlinear 히스테리시스 리액턴스(type 96)가 있고, 보조프로그램인 BCTRAN에서 생성되는 행렬모델은 Pseudo-nonlinear 리액턴스를 대체하기 위하여 사용가능하다. Type96 브랜치에서의 선형요소는 히스테리시스 루프의 특성을 표현할 수 있다.



〈그림 2〉Type 96소자의 히스테리시스 특성

본 논문에서는 변압기 포화특성모델링 및 잔류자속모델링이 가능한 BCTRAN 컴포넌트와 Type 96 소자를 사용하여 여자돌입전류를 모델링 하였다.

3. 시뮬레이션 및 결과

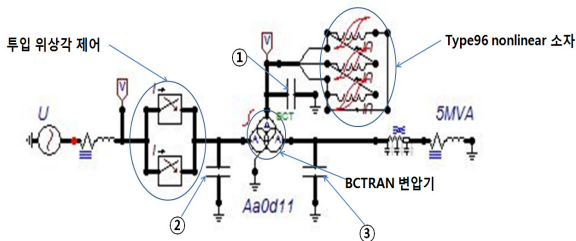
3.1 모델 계통

본 논문에서는 여자돌입전류를 분석하기 위해 표 2와 같은 모의조건을 선정하였다. 투입위상각은 0°, 45°, 90°로 설정하였으며, 최대 여자돌입전류 발생을 위하여 잔류자속은 0[%]로 설정하였다.

〈표 2〉 모의조건

투입위상각[°]	잔류자속[%]
0	0
45	0
90	0

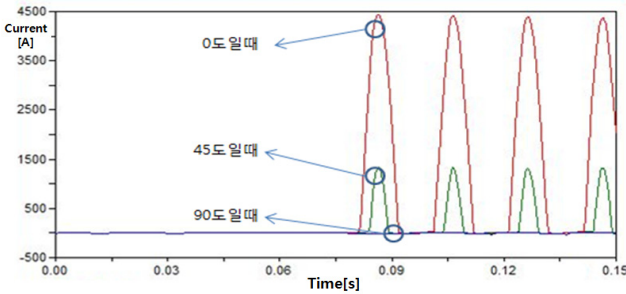
그림 3은 여자돌입전류를 분석하기 위한 모델 계통이다. 모델 계통의 구성은 변압기 가압시점을 결정하기 위해 변압기 1차 측에 차단기를 병렬로 연결하였고, BCTRAN변압기와 Type 96소자를 이용하여 구성하였다. 대상선로의 총길이는 4[km]이고, 부하는 5[MW]로 설정하였다.



〈그림 3〉 모델 계통

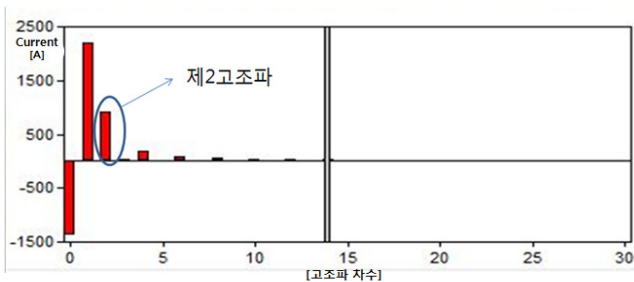
3.2 시뮬레이션 결과

그림 4는 변압기 투입위상각에 따른 여자돌입전류 파형이다. 여자돌입전류의 크기는 가압시점이 0°일 때 4382[A]_{PEAK} 이고 가압시점이 45°일 때 1332[A]_{PEAK} 이다. 여자돌입전류는 변압기 가압시점에 따라 철심의 전류-자속 특성에 의해 변화한다. 변압기가 0도에서 가압될 때 최대 여자돌입전류가 흐르고 90도에서 가압될 때 최소 여자돌입전류가 흐르는 것을 확인하였다.



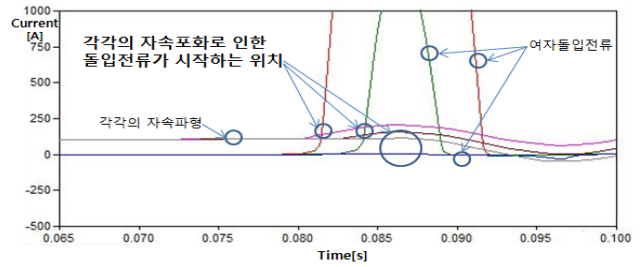
〈그림 4〉 변압기 투입위상각에 따른 여자돌입전류 파형

그림 5는 여자돌입전류의 고조파 분석 파형이다. 고조파 분석을 통하여 여자돌입전류의 DC성분, 기본파 성분 및 여러 차수의 고조파 성분의 비율을 확인하였다. 여자돌입전류의 전형적인 특징은 제2고조파성분이 다른 고조파성분에 비해 우세하다는 점이다. 그림 5에서 제2고조파가 다른 고조파 성분들에 비해 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다.



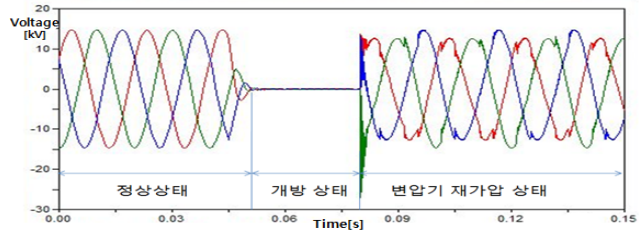
〈그림 5〉 여자돌입전류의 고조파분석

그림 6은 투입위상각이 0°, 45°, 90° 일 때 각각의 자속포화로 인해 돌입전류가 시작되는 위치를 분석한 자료이다. 자속이 포화되는 시점에 전류가 급격히 증가한 것을 확인하였으며, 포화시점에서의 자속과 전류는 Type 96 소자의 히스테리시스 곡선의 전류-자속 데이터 값과 일치하였다.



〈그림 6〉 전류-자속 특성

변압기 가압시점에 따른 여자돌입전류의 크기 분석, 고조파 분석, 여자돌입전류 모델링의 전류-자속 특성과 돌입전류 시작위치 분석을 통해 전형적인 여자돌입전류 파형을 확인하였다. 여자돌입전류 모델링은 잘 수행되었으며, 차후 여자돌입전류 저감에 대한 대책 수립 시 적용가능할 것으로 판단된다.



〈그림 7〉 커패시터에서의 전압

그림 7은 그림 3의 ①번 커패시터에서 측정된 전압 파형이다. 45[ms]에서 스위치가 개방된 후 전압이 흐르지 않다가 80[ms]에서 변압기 재투입 시 과도 전압이 발생하고, 전압파형이 왜곡되는 것을 확인 하였다. 이러한 여자돌입전류에 의한 전압왜곡은 전기 품질에 악영향을 줄 것이라 판단된다.

4. 결 론

여자돌입전류는 계통의 안정적인 운영에 영향을 미치는 과도전류로서 그 특성을 분석할 필요성이 있다. 또한 여자돌입전류의 분석을 위해서는 여자돌입전류 모델링에 대한 검증이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 여자돌입전류 현상의 이해를 위해 EMTP를 이용하여 여자돌입전류를 모델링하였고, 여자돌입전류 검증을 위해 고조파 분석 및 변압기 가압시점에 따른 모의 실험을 실시하였다. 가압시점에 따른 여자돌입파형 및 고조파 분석을 실시한 결과 전형적인 여자돌입전류 파형이 발생함을 확인하였다. 또한 변압기 커패시터 뱅크의 전압을 측정된 결과 전압강하 및 왜곡이 발생함을 확인하였다. 본 논문에서는 여자돌입전류의 특성에 대한 분석을 실시하였고, 추후 계통영향에 대한 자세한 분석 및 여자돌입전류 저감대책에 관한 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kim Sang-Tae, "A Study on the Crisp and Fuzzy Rule based-Protective Relaying Algorithm for Three-Phase Power Transformer", 명지대학교 박사학위논문, 2003
- [2] A. K. Al-Khalifah, E. F. El-Saadany, "Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-Phase Transformer," Power Engineering, 2006 Large Engineering Systems Conference on, July 2006, Page.165 - 171
- [3] Girgis, Ramsis S.; teNyenhuis, Ed G., "Characteristics of Inrush Current of Present Designs of Power Transformers," Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE 24-28 June 2007
- [4] Lin. C. E, Cheng. C.-L, Huang.C.-L, Yeh.J.-C., "Investigation of magnetizing inrush current in transformers. II. Harmonic analysis," Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 8, Issue 1, Jan. 1993, Page.255 - 263