

EMTP-RV를 이용한 765kV 변압기의 여자 돌입 현상 모의 및 분석

강용철*, 이미선*, 이병은*, 장성일*, 김용균**, 주행로***, 유영식***

*전북대학교, **한국 IED, ***한국전력거래소

Simulation and analysis of the magnetic inrush for the 765kV transformer using EMTP-RV

Yong-Cheol Kang*, Mi-Sun Lee*, Byung-Eun Lee*, Sung-Il Jang*, Yong-Gyun Kim**

*Chonbuk National University, **Hankook IED, ***Korea power exchange

Abstract - This paper describes modeling and analysis of magnetic inrush for a 765kV transformer using EMTP-RV. EMTP-RV generates the core flux and thus helps show the behavior of the core, i.e. hysteresis characteristics. The results of three kinds of the magnetic inrush such as initial inrush, sympathetic inrush, and recovery inrush are included. This modelling can help the design of a protection relay for a transformer.

1. 서 론

변압기 회로에 개폐기를 투입했을 때 순간적으로 증가하고 즉시 정상 상태로 복귀되는 과도 전류를 변압기 여자 돌입전류라 한다[1]. 여자 돌입전류는 순간적으로 정격전류의 수배 내지는 수십 배만큼 발생한다. 이러한 변압기 돌입전류의 크기는 철심의 재료, 회로 임피던스 등 제작시에 정해지는 요소 이외에 변압기가 투입되는 시점의 1차측 인가전압의 위상과 철심의 잔류 자속 크기 및 방향 등의 사용조건에 따라 큰 영향을 받는다[2].

이러한 변압기 돌입전류 문제는 변압기 권선에서 생기는 최대 기계적 스트레스로써 변압기 보호계통 설계에 중요한 요소가 되고 있다[2]. 또한 돌입전류는 변압기 보호용 전류 차동계전기의 오동작을 유발시키는 원인이 될 수 있다. 따라서 여자 돌입현상과 같은 변압기 과도 현상 분석은 보호계통 설계시에 반드시 필요하다. 본 논문은 EMTP-RV를 이용해 765kV 계통에서의 변압기 돌입전류를 모의 및 분석한다. EMTP-RV는 EMTP96의 현대화 작업을 통해 성능이 향상된 과도해석 프로그램이며, EMTPworks는 새로운 그래픽 인터페이스 환경을 제공한다[3]. EMTP-RV의 가장 큰 특징은 시간에 따른 자속의 변화를 직접 확인할 수 있다는 것이다. 기존 EMTP96에서는 수치해석 프로그램에 계통 데이터를 입력하여 별도의 연산을 수행해야만 자속을 구할 수 있었다. 따라서 EMTP-RV를 이용하면 변압기 철심에 발생하는 자속을 쉽게 모니터링 함으로써 과도시에 계통 현상을 보다 정확하게 진단할 수 있다.

본 논문에서는 EMTP-RV를 이용한 765kV 변압기 모델링 기법을 소개하고, 변압기 투입 위상각과 잔류자속 양에 따른 Initial inrush, Sympathetic inrush, Recovery inrush 현상을 알아보았다.

2. 변압기의 여자 돌입 현상

2.1 Initial inrush

Initial inrush는 변압기 최초 투입시 정격전류의 수배에 이르는 전류가 수초간 지속되는 현상이다. 변압기에 가해지는 전압은 식 (1)과 같다. 만약 변압기 권선저항과 누설 인덕턴스를 무시한다면, 쇄교 자속은 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$e(t) = E_{max} \cos(\omega t - \phi) \tag{1}$$

$$\lambda(t) = \int_0^t e(t) dt + \lambda(0) = \lambda_{max} \sin(\omega t - \phi) + \lambda_{max} \sin \phi + \lambda(0) \tag{2}$$

변압기의 자화 인덕턴스는 비선형이기 때문에 자속이 포화점을 넘게 되면 더 큰 여자 돌입전류가 발생한다. 따라서 여자 돌입전류의 크기는 변압기의 쇄교 자속에 의해 결정되며, 전압 위상각 ϕ 와 잔류자속 $\lambda(0)$ 의 영향을 받는다.

2.2 Sympathetic inrush

변압기 병렬운전시 한 변압기의 추가 투입은 운전 중 이던 다른 변압기에 inrush 현상을 야기 시킨다. 이 때 추가 투입된 변압기에는 Initial inrush 현상이 나타나고, 운전 중이던 변압기에는 Sympathetic inrush 현상이 발생한다.

2.3 Recovery inrush

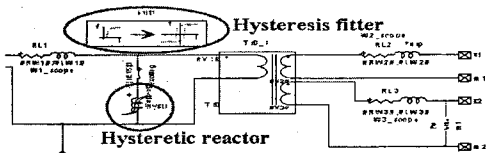
Recovery inrush는 지락사고로 인해 전압이 강하되고, 사고 제거 후 전압이 다시 정격전압으로 상승함에 따라 변압기 최초 투입과 같은 현상을 나타낸다.

3. 사례 연구

변압기의 정확한 과도현상 해석을 위해서는 변압기 포화특성을 모델링을 해야만 한다. 본 논문에서는 EMTP-RV에서 제공하는 Hysteretic reactor와 Hysteresis fitter를 이용하여 변압기의 비선형 특성을 모델링하였다. Hysteresis reactor는 변압기의 철 코어에서 포화와 히스테리시스 특성을 모의하도록 설계된 비선형 소자이다. Hysteresis fitter는 변압기의 자화곡선으로부터 Hysteresis reactor에 입력되는 포화 함수와 히스테리시스 함수를 만들어 준다. 변압기 포화특성은 식(3)의 쌍곡선 함수로 정의된다. 우변의 첫 번째 대괄호는 기울기가 S_{sv} , X절편 X_{sv} 를 가진 쌍곡선 함수의 수직접근선을 나타낸다. 두 번째 대괄호는 기울기가 S_{sh} , 이고 Y절편 Y_{sh} 를 가진 쌍곡선 함수의 수평접근선이다. C_{sat} 는 곡선의 곡면 변화율을 의미하며, 곡선의 점근선에 가까운 작은 값이 C_{sat} 이다. S_{sh} 는 포화 곡선의 기울기이고, 이는 투자율 μ_0 와 관련된다. 같은 방법으로 히스테리시스 특성은 전류와 포화되지 않았을 때의 자속 λ_{unsat} 의 2차 방정식으로 모델링된다. 변압기 히스테리시스 특성은 식 (4)로 정의된다. 히스테리시스 특성을 나타내는 쌍곡선 함수는 기울기가 S_{hv} , X절편 X_{hv} 를 가진 수직접근선과, 기울기가 S_{hb} , Y절편 Y_{hb} 를 가진 수평접근선을 갖는다[4]. 그림 1은 EMTP-RV에서 제공하는 Hysteresis reactor와 Hysteresis fitter를 보여준다.

$$C_{sat} = \left[\lambda_{unsat} - \frac{\lambda_{unsat}}{S_{sv}} - X_{sv} \right] \left[S_{sh} \lambda_{unsat} - \lambda_{sat} + Y_{sh} \right] \tag{3}$$

$$C_{hys} = \left[i - \frac{\lambda_{unsat}}{S_{hv}} - X_{hv} \right] \left[S_{hh}i - \lambda_{unsat} - Y_{hh} \right] \quad (4)$$



〈그림 1〉 Hysteresis reactor와 Hysteresis fitter

3.1 Initial inrush

본 논문에서는 Initial inrush를 모의하기 위해 그림 2와 같은 모델 계통을 구성하였다. Hysteresis reactor와 Hysteresis fitter를 이용하여 62.6A, 1823.7Vs의 포화점을 가지는 두 대의 3상 3권선 Y-Y-Δ변압기(765/345/23kV, 1GVA)를 모델링 하였다. 샘플링 주파수는 주기당 64샘플이며, 변압기 3차측 델타 결선 내부에 한류 리액터(38.2mH)를 포함한다.

■ 사례 1: Initial inrush, 50ms B탱크 최초 투입, 투입 위상각 0도, 잔류자속 80%

그림 2의 계통에서 B탱크가 약 50ms에 무부하 단독 투입되었다. 사례 1은 투입 위상각은 0도, 잔류자속이 80%인 경우이다. 그로 인해 그림 3과 같이 B탱크 쇄교 자속에 DC offset이 발생하였으며, 최대값은 2987Wb이다. 철심에 발생하는 자속은 별도의 연산 과정없이 EMTP-RV 내에서 직접 확인할 수 있다. 그림 4는 사례 1의 경우 B탱크에 발생하는 차전류를 1차측으로 환산하여 나타낸 파형이다. 투입되는 순간 B탱크에 최대 2609.523A, 정격전류의 245%에 해당하는 여자 돌입전류가 발생하였다.

■ 사례 2: Initial inrush, 54.9ms B탱크 최초 투입, 투입 위상각 90도, 잔류자속 80%

사례 2는 B탱크가 54.9ms에 투입되었으며 투입 위상각은 90도, 잔류자속은 80%인 경우이다. 그림 5는 B탱크 a상의 쇄교 자속으로, 최대값은 1910Wb이다. 그림 6은 사례 2의 경우 B탱크에 발생하는 차전류이다. 차전류의 최소값은 -418.182A로 정격전류의 39%에 해당하는 여자 돌입전류가 발생하였다. 이는 사례 1과 비교하여 변압기 최초 투입 위상각이 0도인 경우가 90도의 경우보다 여자 돌입현상이 보다 심각하게 나타남을 알 수 있다.

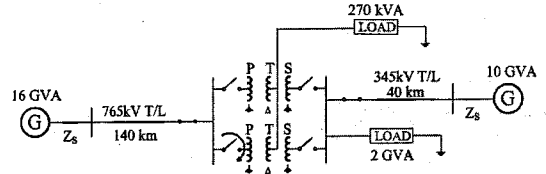
3.2 Sympathetic inrush

본 논문에서는 Sympathetic inrush를 모의하기 위해 Initial inrush와 같은 모델 계통인 그림 2를 구성 하되, A탱크가 운전 중, B탱크가 추가 투입되는 형태로 모의하였다.

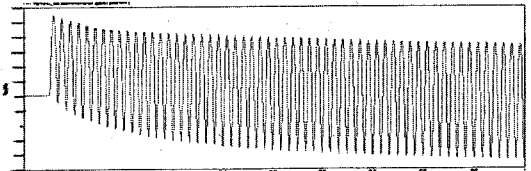
■ 사례 3: Sympathetic inrush, 50ms B탱크 최초 투입, 투입 위상각 0도, 잔류자속 80%

사례 3은 A탱크 운전 중 B탱크가 50ms에 투입된 경우이며, 투입 위상각은 0도, 잔류자속은 80%이다. 그림 7(a)는 A탱크의 1차측 전압을 나타낸다. 606.729kV로 운전중이던 A탱크는 B탱크가 투입 되는 순간에 563.129kV로 전압 강하되었다가 615.743kV로 정상상태를 회복한다. 그림 7(b)는 B탱크의 1차 전압을 나타낸다. 변압기가 투입되는 순간 포화되어 전압 파형이 왜곡됨을 확인할 수 있다. 그림 8은 A, B탱크 a상 쇄교 자속을 보여준다. A탱크는 B탱크 투입 후 평균 -984.377Wb의 자속 DC offset이 발생한 후 정상 상태를 회복한다. 그로 인해 A탱크 3차측 권선에 음의 방향으로 여자 돌입전류가 발생한다. B탱크 쇄교 자속은 변압기가 투입되는 순간 최대 2989Wb가 발생한다. 그림 9에서는 A, B탱크의 1차측 환산 차전류를 보여준

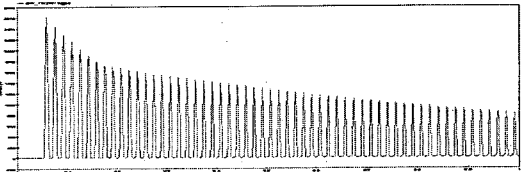
다. A탱크 운전 중 B탱크를 투입하게 되면, 운전 중이던 A탱크에는 Sympathetic inrush 현상이 발생하고, 추가 투입된 B탱크에는 Initial inrush 현상이 발생한다. A탱크 차전류는 음의 최대값 1096.213A가 발생하고, 이는 정격 전류의 103%에 해당한다. B탱크 최대 차전류는 2614.818A이고 정격전류의 245%이다.



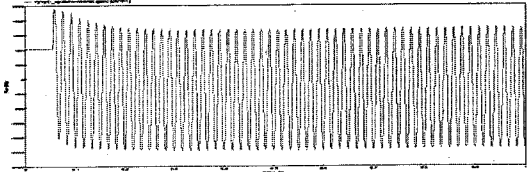
〈그림 2〉 Initial inrush와 Sympathetic inrush 모델 계통



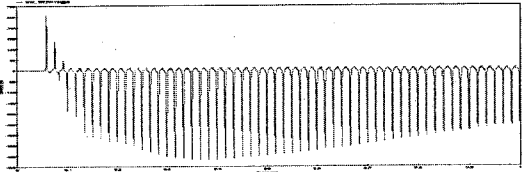
〈그림 3〉 사례 1의 B탱크 a상 쇄교 자속



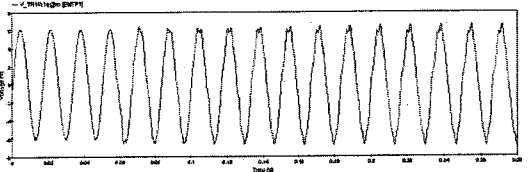
〈그림 4〉 사례 1의 1차측 환산 B탱크 차전류



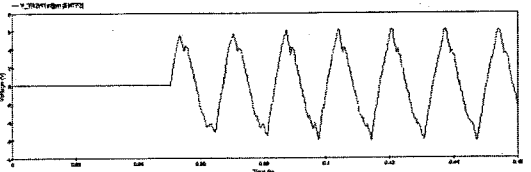
〈그림 5〉 사례 2의 B탱크 a상 쇄교 자속



〈그림 6〉 사례 2의 1차측 환산 B탱크 차전류

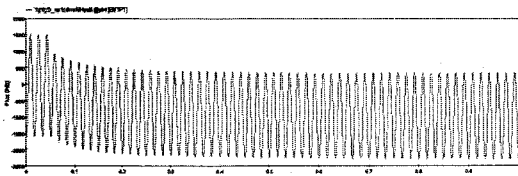


(a) A탱크 1차측 전압

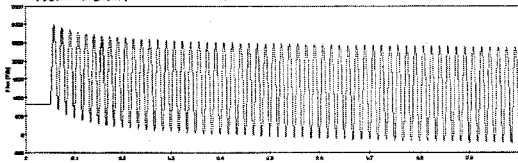


(b) B탱크 1차측 전압

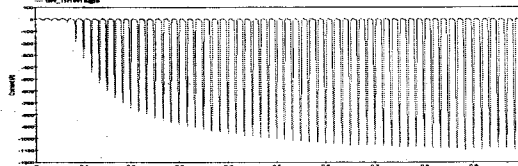
〈그림 7〉 사례 3의 A, B탱크 1차측 전압



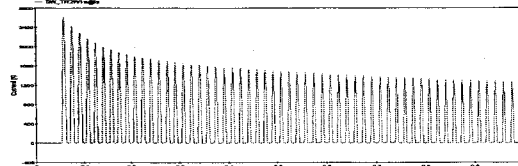
(a) 사례 3의 A 탱크 a상 쇄고 지속



(b) 사례 2의 B 탱크 a상 쇄고 지속
〈그림 8〉 사례 3의 A, B 탱크 a상 쇄고 지속



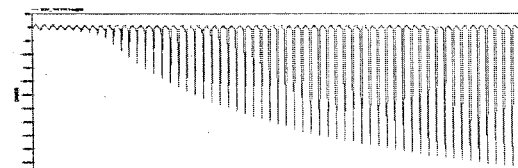
(a) 사례 3의 1차측 환산 A 탱크 차전류



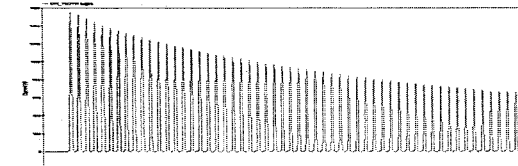
(b) 사례 3의 1차측 환산 B 탱크 차전류
〈그림 9〉 사례 3의 A, B 탱크 1차측 환산 차전류

■ 사례 4: Sympathetic inrush, 50ms B 탱크 최초 투입, 투입 위상각 0도, 잔류자속 0%

사례 4는 A 탱크 운전 중 B 탱크가 50ms에 투입된 경우이며, 투입 위상각은 0도, 잔류자속은 0%이다. 그림 10은 A, B 탱크의 1차측 차전류를 나타낸다. A 탱크는 Sympathetic inrush가 발생하며 이 때 차전류는 음의 최대값 517.941A, 정격전류의 49%이다. B 탱크는 최초 투입과 같은 Initial inrush 현상이 발생하고 1740A, 정격전류의 163%의 차전류가 발생한다. 사례 3, 즉 잔류자속 80%인 경우와 비교하면, 여자 돌입 현상은 잔류자속이 많을수록 더 심각하게 발생하는 것을 알 수 있다.



(a) 사례 4의 1차측 환산 A 탱크 차전류



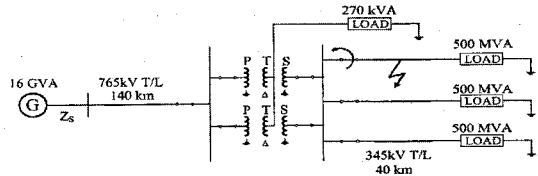
(b) 사례 4의 1차측 환산 B 탱크 차전류
〈그림 10〉 사례 4의 A, B 탱크 1차측 환산 차전류

3.3 Recovery inrush

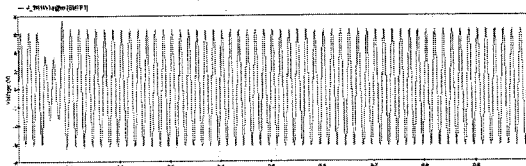
본 논문에서는 Recovery inrush를 모의하기 위해 그림 11과 같은 모델 계통을 구성하였다. 두 대의 Y-Y-Δ 변압기는 Initial inrush 모의와 같은 변압기를 사용하였다. Recovery inrush는 변전소로부터 20km, 3상 지락사고의 경우에 대해 모의하였다.

■ 사례 5: Recovery inrush, 50.8ms 3상 지락사고 사고위상각 0도, 차단 위상각 0도.

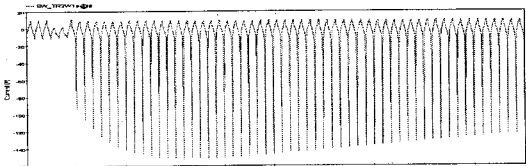
사례 5는 50.8ms에 3상 지락사고가 발생하고 2주기 후인 84.2ms에 사고가 제거된 경우에 대해 연구하였다. 그림 12는 A 탱크 1차측 전압을 나타낸다. 사고전 정상상태 전압 최대값은 615.788kV였으나, 지락사고 발생으로 인해 340.651kV로 강하되었고, 사고 제거 후 전압이 다시 637.707kV로 상승하는 것을 확인할 수 있다. 사고 제거와 동시에 변압기에 큰 전압이 가해지는 현상으로 인해 변압기 최초 투입시와 같은 여자 돌입 현상이 발생한다. 그림 13은 A 탱크의 차전류를 나타낸다. 사고가 제거되고 최대 152.003A의 차전류가 발생한 후 정상상태로 복귀한다. 완전히 같은 두 대의 변압기를 모델링하였으므로 B 탱크의 1차측 전압, 차전류는 A 탱크와 같다.



〈그림 11〉 Recovery inrush 모델 계통



〈그림 12〉 사례 5의 A 탱크 1차측 전압



〈그림 13〉 사례 5의 1차측 환산 A 탱크 차전류

4. 결 론

본 논문은 EMTP-RV를 이용하여 765kV 변압기에 서의 Initial inrush, Sympathetic inrush, Recovery inrush 현상을 모의하였다. 변압기 비선형특성은 Hysteretic reactor와 Hysteresis fitter를 이용하여 모델링하였으며, 포화모델링과 히스테리시스 모델링 기법을 소개하였다. EMTP-RV를 이용한 보다 정확한 변압기 여자 돌입현상 분석은 보호 계통 설계 시 도움을 줄 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국 중부발전(주), '발전용어해설집', p.82, 2007.
- [2] 이두형, '변압기 돌입전류 크기와 보호계전기의 협조관계에 관한 연구', 석사학위 논문, p.5.
- [3] DCG-EMTP(Development coordination group of EMTP), Version EMTP-RV, Available : <http://www.emtp.com>
- [4] EMTP-RV manual (Devices-nonlinear-hyst)