

## PSCAD/EMTDC를 이용한 초전도 변압기 모델링

임채형\*, 박민원\*\*, 유인근\*

\*창원대학교, \*\*차세대초전도용융기술개발사업단

### Modeling of Superconducting Transformer using PSCAD/EMTDC

Chae-Hyung Lim\*, Min-won Park\*\*, In-Keun Yu\*

\*Changwon National University, \*\*Center for Applied Superconductivity Technology

**Abstract** - This paper presents an effective modeling scheme of high temperature superconducting transformer. So far, there were numerical modeling and designs for conventional transformers for various applications. Recently, the interest and the R&D in superconducting technology and devices such as superconducting generator, motor, cable, fault current limiter and transformer, have been increased gradually. With those interests, this paper proposes a simulation model of high temperature superconducting transformer using PSCAD/EMTDC, which can be applied to the utility network simulation readily under various system conditions.

### 1. 서 론

1911년 Heike Kamerlingh Onnes에 의해 초전도 현상이 발견된 이후, 다양한 방면에 많은 연구가 이루어져 왔으나, 높은 투자비용과 기술 개발의 어려움 등으로 인해 아직까지 완전한 상용화에는 아직 미치지 못하였다. 그러나, 전력 수요의 증가와 에너지자원의 보전 및 환경 피해를 억제할 수 있는 새로운 전력 기기로써, 초전도 전력 기기는 미래의 전력 기기로써 기대되고 있다. 특히, 1986년대에 25K 이상에서 임계온도를 갖는 세라믹 고온 초전도체가 출현함에 따라, 초전도체를 퀸션으로 사용하는 발전기와 모터, 변압기 등에 대한 관심이 더욱 증가하게 되었다. 초전도체는 임계온도에 따라 저온초전도체와 고온초전도체로 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 저온 초전도체에 비해 상대적으로 임계온도가 높고, 자기적으로 안정성이 높은 고온 초전도 변압기를 중점으로 변압기 시뮬레이션을 연구하였다.

고온 초전도 변압기는 초전도 상태로 유지하기 위해서는 별도의 냉각 시스템을 필요로 하게 된다. 변압기 전체를 초전도 상태로 유지 할 경우, 철심에서 발생하는 열에 의해 냉매인 액체 질소가 기화되는 것을 고려하여 야 하므로, 철심은 상온 상태로 두고 기존 변압기의 퀸션의 일부 또는 전부를 고온 초전도 선재로 대체함으로써 전력 효율의 향상 및 부수적인 효율 향상을 얻도록 설계되어 진다.

초전도체를 사용함으로써 초전도변압기가 갖는 장점은 다음과 같다. 고온초전도변압기는 이론상으로 저항이 0인 도체를 사용함으로써, 통전 전류에 의해 발생하는 동반이 없으므로, 일반 변압기에 비해 0.1~0.2%정도의

효율을 상승시킬 수 있다. 또한 동일한 용량의 상전도 변압기와 비교하여 10~20 배의 전류를 훌릴 수 있으므로, 사용되는 선재의 양과 절연 공간을 줄일 수 있어, 상전도 변압기에 비해 무게와 부피를 절반 이하로 낮출 수 있는 장점이 있다. 환경적인 장점으로는 액체 질소를 이용하여 냉각과 절연을 하는 고온 초전도 변압기는 절연유를 사용하는 상전도 변압기에 비해 고장 발생시 고장 전류에 의한 화재나 폭발의 위험이 없다. 또한 30MVA급 변압기에 들어가는 약 23,000리터의 절연유를 사용하지 않기 때문에 환경 친화적인 전력기기이다. 이와 같이 상전도 변압기와 비교하여 고온 초전도 변압기는 다양한 장점을 갖기 때문에 고온 초전도 변압기에 대한 관심이 점차 증가되어지고 있다.

그러나, 고온 초전도 변압기를 개발하여 실제 운전을 통한 변압기의 성능 및 특성을 연구하게 되면, 막대한 양의 시간과 개발 비용이 필요하게 되며, 많은 제약 조건이 따르게 될 것이다. 이를 보완하기 위해서는 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 고온 초전도 변압기의 자체 특성을 분석하고 다양한 고장과 운전 조건을 통하여 시뮬레이션하게 되면, 변압기 특성에 대한 보다 효과적인 연구가 이를 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 전기적 과정 현상 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 고온 초전도 변압기의 특성을 분석하기 위한, 컴포넌트 모델링 방법을 제안하고자 한다. [1,2]

### 2. 고온 초전도 변압기

고온 초전도 변압기는 상전도 변압기에서 퀸션 부분을 초전도체로 대체하고, 초전도 상태를 유지하기 위하여 액체 질소로 냉각시킨 구조이므로, 고온 초전도 변압기의 동작 원리 및 기본 구조는 상전도 변압기와 비슷하다. 상전도 변압기와의 비교하여 고온 초전도 변압기는 낮은 %임피던스와 손실(무부하손, 부하손)을 가짐으로써 높은 전류 밀도를 가질 수 있으나, 상전도 변압기에서는 크게 고려할 필요가 없는 교류손실(AC loss)과 초전도 상태가 파괴되는 웨치 현상에 대한 추가적인 내부파라미터를 첨가하여야 한다.

그림 1은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링한 고온 초전도 변압기 컴포넌트 개념이다. 이 논문에서는 단상 변압기를 모델링하였으며, 그 내부적으로는 AC loss 와 웨치 현상을 고려한 파라미터를 추가하였으며, 그림 2는 고온 초전도 변압기 컴포넌트의 웨치 현상과 교류손실 입력 파라미터이다.

그림 3의 입력 파라미터는 고온 초전도 변압기와 상전도 변압기를 결정하는 파라미터이다. 이 파라미터를

이용하여 변압기 컴포넌트는 고온 초전도 변압기 또는 상전도 변압기 컴포넌트로써 동작을 결정할 수가 있다. PSCAD/EMTDC 내부 컴파일 프로그램인 Fortran 언어를 이용하여 %임피던스와 변압기 손실(무부하손, 부하손)의 값을 변압기 형태에 따라 결정할 수가 있다. 이를 이용하면, 동일한 변압기 컴포넌트를 이용하여 다양한 연구를 수행할 수 있는 장점을 갖는다.

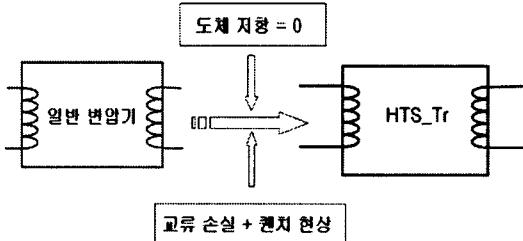


그림 1 고온 초전도 변압기 개념

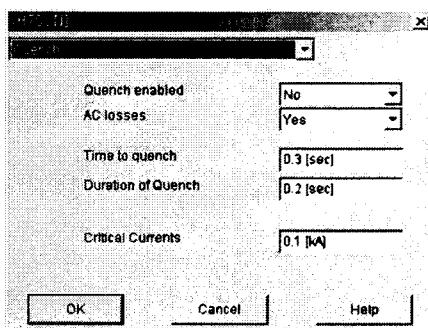


그림 2 Quench 현상과 AC loss 파라미터

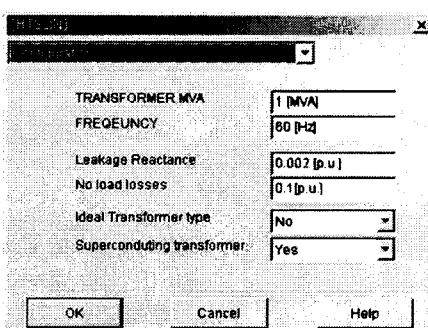


그림 3 초전도 변압기 설정 파라미터

### 3. 고온 초전도 변압기 시뮬레이션

표 1은 용량 1[MVA]급 변압기의 사양을 비교한 것으로, 고온 초전도 변압기는 상전도 변압기에 비하여 낮은 손실을 갖지만, 냉각 시스템을 필요하게 된다. 냉각에 문제를 주는 것은 교류 손실(AC losses)이다. 교류 손실은 초전도체에 교류 전류와 교류 자장이 인가되기

때문에 발생되는 자기 자계 손실과 자화 손실, 결합 손실 등으로 나눌 수 있다.(3)

표 1. 고온 초전도 변압기 및 일반 변압기 사양

	고온 초전도 변압기	상전도 변압기	[unit]
변압기 용량	1	1	[MVA]
전압	22.9/6.6	22.9/6.6	[kV]
No load losses	0.9	7.5	[kW]
%Impedance	5.0	15	(%)
동작 온도	77	298	[K]
임계 전류	0.1		[kA]

그림 4는 고온 초전도 변압기의 입·출력 전류 파형을 나타내고 있는 것이며, 그림 5는 교류 손실을 적용한 고온 초전도 변압기의 전류 파형이다. 초전도 변압기의 교류 손실은 사용되는 초전도체의 임계전류 값과 통전전류에 따라 그 크기가 바뀌고, 물론 초전도체에 가해지는 수직·수평 자장의 크기에 의해서도 결정되어진다. 교류 손실은 통전 전류에 의한 자기 자계 손실과 외부자장에 의한 자화 손실 및 결합 손실로 이루어져 있다. 자화 손실은 외부 자장이 인가되는 방향에 따라 그 값이 달라지며, 수직 방향이 수평 방향의 약 3 배가 된다. 교류 손실의 방정식은 다음과 같다.

(1), (3)은 완전침투가 발생하지 않는 경우의 수직·수평 자화 손실이고, (2),(4)은 완전침투가 발생할 경우의 수직·수평 자화 손실이다. (5)는 자기 자계 손실을 나타내는 Norris 식이다.

$$Q_x = \frac{2B_x^2}{\mu_0} \times \frac{\beta_x}{3} \quad [\text{J/m}^3/\text{cycle}], \beta < 1 \quad (1)$$

$$Q_x = \frac{2B_x^2}{\mu_0} \left( \frac{1}{\beta_x} - \frac{2}{3\beta_x^3} \right) \quad [\text{J/m}^3/\text{cycle}], \beta > 1 \quad (2)$$

$$Q_y = \frac{2B_y^2}{\mu_0} \times \frac{\beta_y}{3} \quad [\text{J/m}^3/\text{cycle}], \beta < 1 \quad (3)$$

$$Q_y = \frac{2B_y^2}{\mu_0} \left( \frac{1}{\beta_y} - \frac{2}{3\beta_y^3} \right) \quad [\text{J/m}^3/\text{cycle}], \beta > 1 \quad (4)$$

$$Q = \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} \left[ \left( 1 - \frac{i_p}{I_c} \right) \ln \left( 1 - \frac{i_p}{I_c} \right) + \left( 2 - \frac{i_p}{I_c} \right) \frac{i_p}{2I_c} \right] \quad [\text{J/m}^3/\text{cycle}] \quad (5)$$

$B_x, B_y$  : 인가된 수직·수평 자속 밀도

$\beta_x, \beta_y$  : 수직·수평 방향의 인가된 자속 밀도와 완전 침투 자속 밀도의 비

$\mu_0$  : 진공 투자율,  $4 \times \pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$

$I_c$  : 임계 전류

$i_p$  : 통전 전류

고온 초전도 변압기는 고장 발생시 펜치 특성이 발생하게 되면, 초전도 상태가 상전도 상태로 천이 되어 초전도 기기의 성질을 상실하게 되지만, 부수적으로 펜치에 의해 증가되는 저항에 의해 고장 전류를 제한하는 한류기능을 가지기도 한다. 그림 6과 그림 7은 펜치에 의한 고장 전류가 어떻게 계산되는지를 보여 주는 파형이다. 고장 발생시간은 0.3 [sec]로 설정하였으며, 고장 지속 시간은 0.2 [sec]로 설정하였다.(4,5)

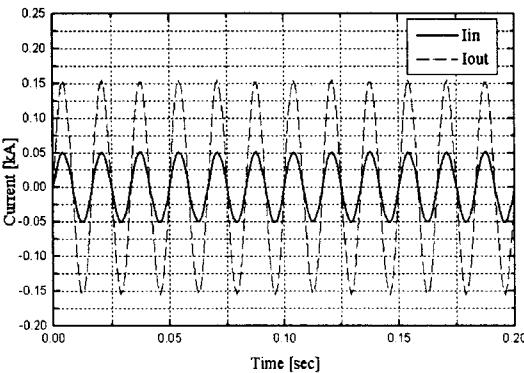


그림 4 고온 초전도 변압기의 입·출력 전류 파형

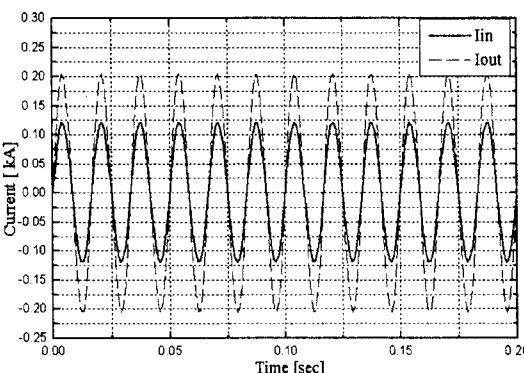


그림 5 고온 초전도 변압기의 전류 파형(교류 손실작용)

그림 6과 그림 7은 고장 발생시 상전도 변압기와 고온 초전도 변압기의 고장 특성을 나타내는 파형이다. 그림 7에서 보이듯이, 고온 초전도 변압기는 사고 발생시 고장 전류에 의한 웨치 현상이 발생하여 초전도 상태가 상전도 상태로 전이됨으로써, 순간적으로 저항이 증가하여 고장 전류를 제한하는 한류 기능을 하게 된다.

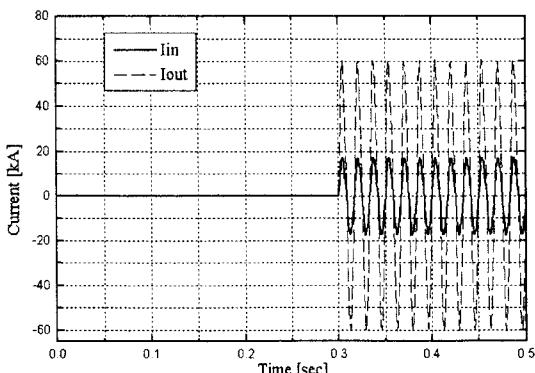


그림 6 일반 변압기의 고장 특성

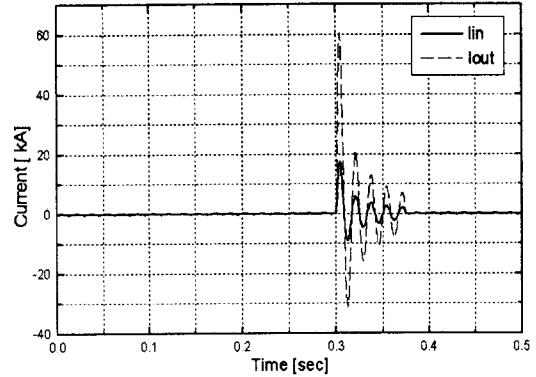


그림 7 고온 초전도 변압기의 고장 전류 특성

시뮬레이션을 통해 알 수 있듯이, 고온 초전도 변압기는 고장에 의한 발생하는 고장 전류를 3~5 [cycle] 이내에 제한하는 한류 기능이 갖추고 있음을 알 수가 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 과도현상 분석용 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 고온 초전도 변압기를 모델링하여, 교류 손실과 고장 발생시 웨치 현상에 의한 고온 초전도 변압기의 동작 특성을 확인 할 수 있었다. 고온 초전도 변압기는 고장 발생시 웨치 현상에 의하여 3~5 [cycle] 이내에 고장 전류를 제한하였다. 본 논문에서는 간단한 시스템의 분석을 통해 개발된 고온 초전도 변압기 커포넌트의 전력 시스템의 적용의 가능성을 확인을 하였다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 차세대초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원과, 과학기술부·한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 일부지원에 의해 수행되었음.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Sam P. Mehta, Nicola Aversa, and Michael S. Walker, "Transforming transformers", IEEE Spectrum, Vol.34, No.7, pp. 43-49, July 1997
- [2] Chandra T. Reis, Sam P. Mehta, Benjamin W. McConnell, Robert H. Jones, "Development of High Temperature Superconducting Power Transformers", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting - Volume 2, 432-437, 2001
- [3] T.ISE, Y.MARUTANI, Y.MURAKUMI, "Characteristics of a 40kVA Three Phase Superconducting Transformer and its parallel operation with a conventional transformer", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.5, No.2, June 1995
- [4] Sven Hornfeldt, Ove Albertsson, Dietrich Bonmann, Friedrich Konig, "Power Transformer with superconducting winding", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, No. 6, November, 1993
- [5] 이희준, 차귀수, 이지팡, 한송엽, 류경우, 최경달, "더블 팬케이크 권선형 10kVA 고온 초전도 변압기", 전기학회논문지 50B권, 2호, 2월, 2001