2001년도 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집 (2001.10.26-27)

차폐 유도형 전류 제한기의 전류제한 해석 연구

이 재*, 임성훈*, 고석철*, 두호익*, 한병성*
*전북대학교

The analysis of Current limiting Characteristics of Magnetic Shielding Type Fault Current Limiter

Jae Lee*, Sung-Hun Lim*, Seok-Cheol Ko*, Ho-Ik Du*, Byoung-Sung Han*
*Chonbuk National University

Abstract - 본 논문은 차폐유도형 고온초전도 한류기의 전류제한 특성을 연구하였다. 회로해석은 유한 차분법(FDM)을 사용하였으며 회로 설계의 변수 값에 따라서 전류제한 방식은 저항형과 유도형으로 전류 제한이 이루어짐을 알 수 있었다. 사고 발생시 나타나는 고온초전도 한류기의 임피던스는 사고 전류를 제한하는 주요한 요소로써 다양한 파라미터 값의 변화를 통하여 고온 초전도한류기의 임피던스 변화와 특성을 관찰하였고, 본 논문에서 설계한 형태의 임피던스 변화에 따른 전류 제한 효과를 저항형 과 유도형 방식으로 제어 가능함을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

고온 초전도 한류기는 현재 국내 전력계통의 날로 증가하는 전력량과 증설되는 발전설비의 보호를 위한 초전도 전력 기기중의 하나로 가장 상용화가 빠를 것으로 기대된다. 이를 이용할 경우 전력량 수요증가로 인한 차단기의 용량 증가시 발생하는 추가 비용을 피할 수 있으므로 선진 각국 에서는 상용화를 목표로 새로운 모델을 개발하기 위해 연구 진행중이다. 지금까지 개발된 고온 초전도 한류기의 전류제한 방식에는 저항형과 유도형으로 크게 분류할 수 있으며 저항형은 구조가 간단하고 고속차단이 가능하지만 파손 우려가 있고, 유도형은 초전도체에 손상은 적으나 소형화 제작이 어려운 장단점이 있다[1-2].

본 논문에서는 이러한 문제점들을 개선하고자 차폐유도형 타입을 설계하여 저항형이나 유도형으로 전류 제한특성이 이루어질 수 있는 고온 초전도 한류기를 설계하였다. 실 계통에 적용하기 위한 차폐유도형 전류 제한기의 특성 변화를 예측하기 위한 모의 회로를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제한기의 설계 파라미터에 따른 차폐유도형 한류기의 동작 특성을 비교 분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 차폐 유도형 고온초전도 전류 제한기의 구조 및 동작원리

본 연구에서 제안한 차폐 유도형 전류 제한기의 구조는 일반변압기구조에 비해 자속 포화를 감소시킬 수 있어 용량을 보다 증가시킬 수 있는 EI변압기용 철심코어에 동선코일과 튜브형태의 고온 초전도체를 그림 1과 같이 가운데코어를 공심으로 설치한 구조를 갖는다.

1차측의 동선에 흐르는 전류에 의해 EI변압기용강자성체 코어의 가운데 레그에 발생된 자속은 동선코일과 공심으로 구성된 튜브형 고온초전도체의 차폐전류에 의해 상쇄되어 제한기의 임피던스는 매우 낮아진다. 그러나 사고시는 고온 초전도 튜브내에 유기된 차폐전류가 빠른 시간에 임계 전류값을 초과하여 튜브내부로 자속 통과와 동시에 온도증가와 높은 상전도 저항이 발생된다. 이와 같이 발생한 상전도 저항은 제한기 임피던스 증가로 작용함으로서 사고 시 전류를 제한할 수 있게 된다.

2.2 차폐 유도형 고온초전도 전류 제한기의 특성해석을 위한 설계 파라미터 결정

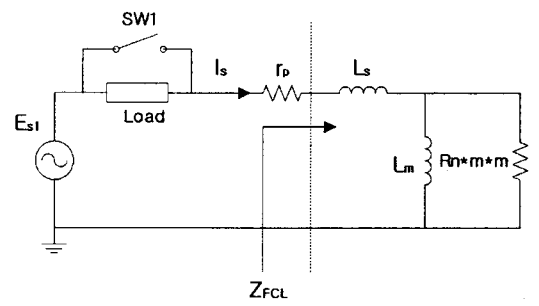

그림 1. 차폐유도형 전류 제한기 사고시 등가회로

$$E_1 = R_1 I_1 + L_{11}\frac{dI_1}{dt} + L_m\frac{dI_2}{dt} \quad (1)$$

$$0 = R_2 I_2 + L_m\frac{dI_1}{dt} + L_{12}\frac{dI_2}{dt} \quad (2)$$

차폐유도형 제한기의 모델로부터 얻게 되는 사고시 등가회로는 그림 1과 같고 등가회로에 대한 제한기의 지배방정식은 (1),(2)와 같이 유도할 수 있다. 여기서 계산을 단순화시키기 위해 철심코어의 포화는 발생하지 않는다고 가정하였다.

위의 지배방정식에서 사용한 각각의 인덕턴스는 철심코어, 동선코일 및 튜브형 고온 초전도체로 구성된 제한기의 설계모델(그림 2)로부터 아래식과 같이 구할 수 있다.

$$L_{11}(H) = \pi\mu_0\frac{m^2}{h}(r_{pr}^2 - r_{sco}^2 + r_{sci}^2 - r_{co}^2 + \mu(H) r_{co}^2) = L_{12}(H) + L_S(H) \quad (3)$$

$$L_{12}(H) = \frac{L_m}{m} = \pi\mu_0\frac{m}{h}(r_{sci}^2 - r_{co}^2 + \mu(H) r_{co}^2) \quad (4)$$

$$L_{22}(H) = \pi\frac{\mu_0}{h}(r_{sci}^2 - r_{co}^2 + \mu(H) r_{co}^2 = \frac{L_m}{m^2} = \frac{L_{12}}{m} \quad (5)$$

$$L_S(H) = \pi\mu_0\frac{m^2}{h}(r_{pr}^2 - r_{sco}^2) \quad (6)$$

$\mu(H)$	:	철심코어의 유효 투자율
r_{pr}	:	철심코어 중심에서 동선코일 까지의 거리
r_{sco}	:	초전도 튜브의 바깥쪽 반지름
r_{sci}	:	초전도 튜브의 안쪽 반지름
r_{co}	:	철심 코어의 반지름

그림 1의 사고시 등가회로와 설계모델로부터 유도할 수 있는 각각의 인덕턴스 식으로부터 사고시 전류제한 방식을 좌우하는 파라미터는 누설 인덕턴스는 무시한다고 할 때 1차 권선에 의한 인덕턴스 L_{11} 과 1차 권선의 턴수, m에 의해 지배되어짐을 알 수 있다.

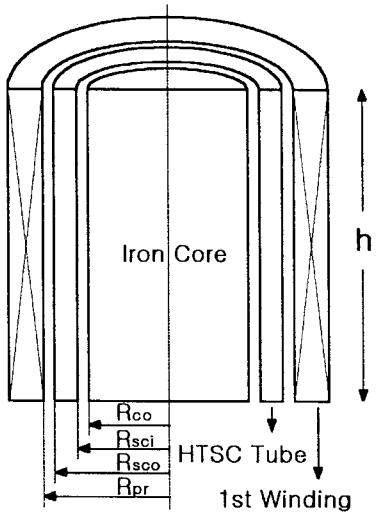

그림 2. 고온초전도 튜브와 1차 권선 철심코어의 설계 파라미터 단면도

그림 3, 4는 고온 초전도튜브의 사양(표 1)이 결정되었을 때 철심코어의 크기와 1차 권선의 턴 수에 따른 리액턴스 성분과 저항성분의 변화를 보여준다. 이 두 성분의 상대적인 크기에 따라 사고시 한류기의 동작형태가 결정된다. 즉 주어진 두 그래프를 이용하여 턴수비와 코어반경을 결정함으로서 차폐유도형 한류기의 전류제한 동작방식을 설계할 수 있다.

표 1. 메인전원, 초전도튜브 및 철심코어 사양

Parameter		Unit
Main & Load		
Main voltage	156	[V]
Line Impedence		
Rin	1	[Ohm]
Lin	1.2	[mH]
Load Impedence	20	[Ohm]
Supercnoducting Tube		
Rsci	0.016	[m]
Rsco	0.023	[m]
h	0.16	[m]
Ic	400	[A]
Rn	0.011	[Ohm]
Iron Core		
r_{co}	0.005~0.014	[m]
u_r	30000	

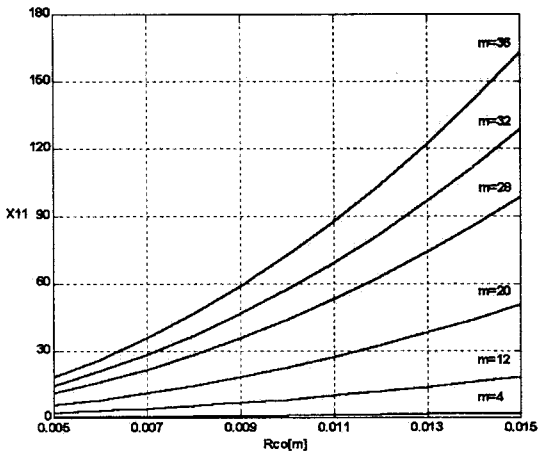

그림 3. 1차권선 턴수비와 철심코어 반지름에 대한 리액턴스 비율

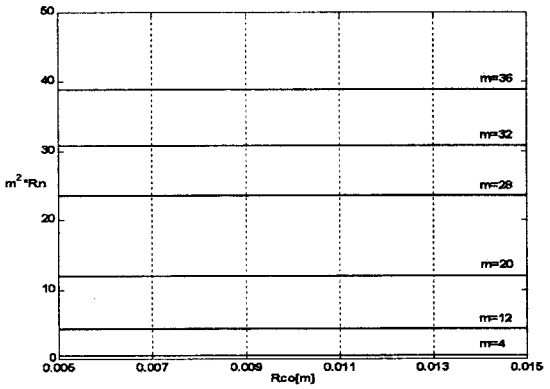

그림 4. 초전도 튜브와 철심코어 반지름에 대한 리액턴스 비율

2.3 차폐 유도형 전류제한기의 유한차분법(FDM)에 의한 특성 해석

등가회로에서 구한 방정식을 풀기 위해 수치 해석법으로 유한차분법(FDM)을 사용하였으며 FDM을 적용하여 주어진 방정식은 아래와 같이 전개된다.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{12} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I_1} \\ \overline{I_2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$V = R \cdot I + L \cdot \overline{I} \quad (8)$$

$$V(n) = R(n) \cdot I(n) + \frac{L(n)}{\Delta t}(I(n+1) - I(n)) \quad (9)$$

$$\Delta tV(n) = \Delta tR(n) + L(n) \cdot I(n+1) - L(n) \cdot I(n) \quad (10)$$

$$I(n+1) = L(n)^{-1}[L(n) - \Delta tR(n)] \cdot I(n) + L(n)^{-1} \cdot \Delta tV(n) \quad (11)$$

전류 제한기의 단락사고시의 동작특성을 구현하기 위해 시뮬레이션에서 사용한 초전도튜브의 저항변화는 기존의 벌크로 제작한 유도형 전류 제한기의 전류제한실험으로부터 얻은 곡선을 시뮬레이션에 도입하였다. 또한 동작특성 해석을 위한 시뮬레이션프로그램에는 철심코어의 반지름, 초전도튜브의 크기등과 같은 설계 파라미터에 따른 자기

차폐형 전류 제한기의 각각의 인덕턴스를 구하는 루프가 포함되어 있다.

2.4 특성 시뮬레이션 및 결과 분석

1차권선의 턴수비에 따른 선로 전류 파형을 보면(그림 5), 사고 발생시 턴수비가 증가함에 따라 전원단의 위상과 제한되는 전류의 위상차가 적어짐을 볼 수 있으며 이는 그림 3,4에서 볼 수 있듯이 턴수비가 증가함에 따라 한류기 제한 임피던스의 저항성분은 완만한 증가를 보인데 반해 리액턴스 성분은 급수적으로 증가하게 되므로 턴수비가 증가될수록 사고시 사고전류가 저항성분(R*m*m)으로 흐르게 되므로 사고 전류 파형과 전원전압의 위상차가 줄어드는 것을 볼수 있다. 즉 턴수비가 증가되면 설계한 자기 차폐형 전류 제한기는 전류제한방식이 저항형으로 이루어지며 제한되는 전류 또한 향상됨을 확인할 수 있다. 이는 고온초전도체를 직접 직렬 연결하여 전류를 제한하는 방식인 저항형의 한류기 보다 효율적으로 전류제한이 이루어짐을 보여주는 결과이다.

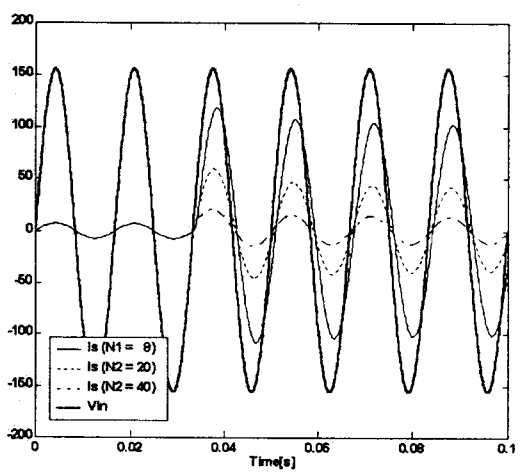

그림 5. 1차권선의 턴수비에 따른 선로전류파형
(r_{∞} =0.014m)

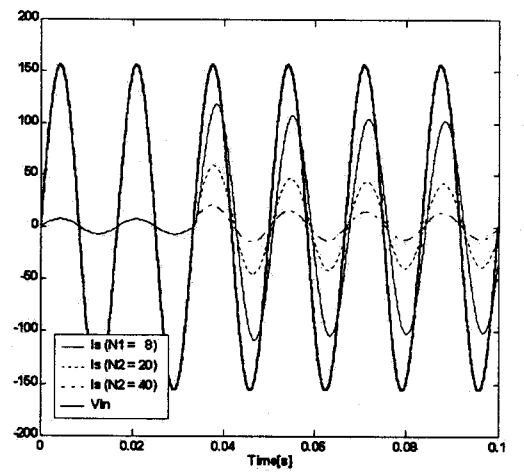

그림 6. 코어 반경에 따른 사고시 선로전류 비교파형
(m=12)

그림 6은 1차 코일의 턴수를 12[Turns]으로 설계하고 코어반경에 따른 사고시 선로 전류를 비교한 파형이다. 마찬가지로 사고시 한류기의 저항성분은 코어반경에 관계없이 일정하지만 리액턴스 성분의 경우 코어반경이 증가함에 따라 커지게 되므로 대부분의 사고전류가 등가회로의 저항성분(R*m*m)으로 흐르게 되므로 전류제한방식이 저항형으로 이루어짐을 전원전압의 위상과 사고시 전류의 위상 차로부터 확인할 수 있다.

3. 결 과

본 논문에서는 저항형의 한류기에 비해 용량증가를 기대할 수 있는 차폐 유도형 타입의 전류 제한기를 설계하여 유도형이나 저항형으로 전류제한특성이 이루어질 수 있음을 설계파라미터에 따라 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 전류제한방식이 유도형으로 동작되도록 설계한 경우보다 저항형으로의 설계는 사고시 전류제한 특성이 우수함을 확인 할 수 있었고 이는 1차측 코일의 턴수나 철심코어의 반경을 증가 시켜줌으로써 설정할 수 있고 직접사고전류를 흐르게 함으로써 전류를 제한하는 기존의 저항형의 한류기 보다 제한전류특성이 개선됨을 볼 수 있는데 이는 차폐 유도형 전류 제한기를 대용량급에 적용이 가능함을 입증해주는 결과로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] 장재원, 최경달, 권영길, 성기철, 현옥배, 성태현, 김상준, "초전도 전력응용기술 세미나", 한국 전력 공사 전력 연구원 (KEPRI), Vol. 1, pp. 001-143, 2001.

[2] V. D. Pham, Y. Laumoud, T. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, M. Bekhaled, "Towards The Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond. , Vol. 6, pp. 801-808, April 1991.

[3]. Min seok Joo and Tae Kuk Ko, "The Analysis of the Fault Currents According to Core Saturation and Fault Angles in an Inductive High-Tc Superconducting Fault Curret Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 6, pp. 62-67, Jun., 1996.

[4] B. Gronoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H.-W. Newmuller, Siemens AG, "Resistive Fault Current Limiters with YBCO films - 100kVA Functional Model" , IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, NO. 2, pp. 656-659, Jun., 1999.

[5] H. Kado and M. Ichikawa, "Performance of A High-Tc Supercond. Fault Current Limiter -Design of A 6.6kV Magnetic Shielding Type Supercond. Fault Current Limiter" , IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, NO. 2, pp. 993-996, Jun., 1997.

[6] Chanjoo Lee, Seungje Lee, Ok-Bae Hyun and Tae Kuk ko, "Design and chatacteristic Analusis of a Rod Rype High-Tc Supercond. Fault Current Limiter through Electromag. Analysis", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 11, NO. 1, pp. 2102 - 2105, Mar., 2001.

[7] Kazuhiro Kajikawa, Katsuyuki Kaiho and Noriharu Tamada, "Design and Current-Limiting Simulation of Magnetic-Shield type Supercond. Fault Current Limiter High Tc Supercond.", IEEE Trans. on Appl. Supercond., NO. 4, pp. 2667-2670, Vol. 32, Jul., 1996.