

고온초전도체를 이용한 차폐유도형 전류제한기의 설계 및 동작 특성해석

The design and analysis of Operational characteristic of Shielded Inductive Fault Current Limiter using high-T_c Superconducting

송재주^{*,}, 이재[,], 임성훈[,], 강형곤[,], 한병성^{*}

Jae-Joo Song^{*,}, Jae Lee[,], Sung-Hun Lim[,], Hyeong-Gon Kang[,], , Byoung-Sung Han^{*}

Abstract

In this paper, the characteristics of the shielded inductive superconducting fault current limiter(FCL) were simulated and analyzed to search for the parameter to determine FCL operation, Fault current limiting operation can be executed as resistive or inductive type, which is determined by iron-core radius and the number of the primary coil turns. It was considered through this paper that the operation of each was compared and examined about the merit of each mode.

Key Words : shielded inductive superconducting fault current limiter, fault current limiting operationin, inductive type, resistive type

1. 서 론

현재 고온초전도 전류제한기는 전력 계통의 용량 증가와 보호를 위한 필수적인 전력 기기로 인식되면서 선진 각국에서 가장 경쟁적으로 개발하고 있다. 또한 초전도 전력 기기중 변압기, 케이블 등과 더불어 가장 활발히 연구되고 있는 분야 중 하나로써 지금까지 연구 보고된 많은 잇점들을 초전도체만이 갖는 특성을 이용한 여러 종류의 고온 초전도 전류제한장치가 개발 되어왔다.

본 연구에서는 개발된 고온초전도 제한기중에서 철심코어 와 고온초전도 벌크링을 이용하여 자기적 결합을 통해 초전도체 내에서 급격히 발생하는 저항을 이용하여 전류를 제한하는 방식인 자기결합형을 기본 모델로 하였으며 자기결합형은 직접 사고 전류가 흐르지 않아 회복시간이 저항형보다 빠르고 또한

용량이 커지는 장점이 있어서 전력 계통에 응용이 가능하기 때문에 동작 특성에 대한 해석과 연구가 계속적으로 이루어지고 있다. 본 논문에서는 실험을 통하여 사고시에는 초전도에 자기차폐가 일어나지 않아 코어에 자속의 쇄교가 일어남으로서 임피던스가 증가하여 전류를 제한하는 방식인 차폐유도형 (shielded inductive) SFCL 등가 모델을 도출하고 정상상태에서는 강반자성체 특성인 차폐현상을 보여 비교적 낮은 임피던스를 나타내고 차폐유도형의 동작 특성을 결정하는 파라미터를 찾아 설계시 유도형과 저항형으로 전류 제한을 할 수 있는 파라미터 설정 값의 범위를 분석하여 시뮬레이션을 통해 고찰한다.

2. 본 론

본 논문에서 설계한 차폐유도형 전류제한기의 구조는 EI변압기용 철심코어에 튜브형태의 고온초전도체와 동선코일을 그림 1과 같이 철심 가운데 코어를

** 순천청암대학 컴퓨터정보과학부

(E-mail : JJsong@scjc.ac.kr)

* 전북대학교 전자·정보공학부 전기공학과

공심으로 설치한 구조를 갖는다.

1차측 권선에 흐르는 전류에 의해 변압기용 강자성체코어의 중심부에 발생된 자속은 동선코일과 공심으로 구성된 튜브형태 고온초전도체의 차폐전류에 의해 상쇄되어 한류기의 임피던스는 매우 낮아진다. 그러나 사고시는 고온초전도 튜브내에 유기된 차폐전류가 빠른 시간 안에 임계전류 값을 초과하여 튜브내부로 자속 통과와 동시에 온도증가로 인한 퀘칭 현상으로 인해 고임피던스가 발생된다. 이와 같이 발생한 상전도 저항은 제한기 임피던스증가로 작용함으로써 사고전류를 제한할 수 있게 된다.

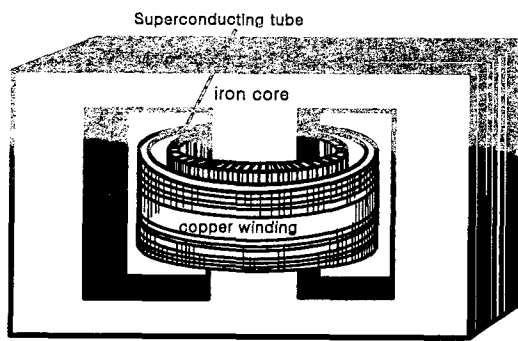


그림 1. 차폐유도형전류제한기의 구조
Fig. 1. Structure of the shielded inductive SCFCL

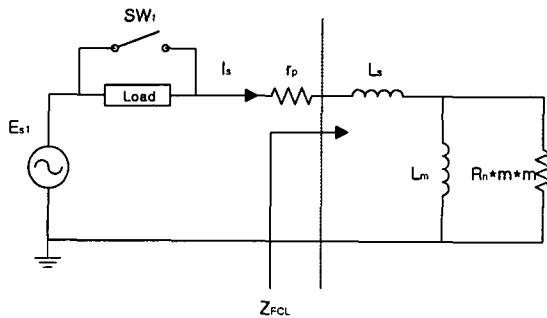


그림 2. 차폐유도형전류제한기의 사고시 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the shielded inductive SCFCL in occurrence of accident

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

$$0 = R_2 I_2 + L_m \frac{dI_1}{dt} + L_{22} \frac{dI_2}{dt} \quad (2)$$

그림 1의 차폐유도형 한류기의 모델로부터 얻을 수 있는 등가회로는 그림 2와 같고 등가회로에 대한 제한기의 지배방정식은 아래식과 같이 유도할 수 있다. 여기서 계산을 단순화시키기 위해 철심코어의

포화는 발생하지 않는다고 가정하였다. 위의 지배방정식에서 사용한 각각의 인덕턴스는 철심코어, 동선코일 및 튜브형 고온초전도체로 구성된 한류기의 설계모델로부터 구할수 있으며 지배방정식은 FDM을 사용하여 아래와 같이 전개된다.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{12} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$V = R \cdot I + L \cdot \dot{I}$$

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

$$\Delta t V(n+1) = \Delta t R(n) \cdot I(n+1) + L(n) \cdot I(n+1) - L(n) \cdot I(n)$$

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

그림 2의 사고시 등가회로와 설계모델로부터 유도할 수 있는 각각의 인덕턴스식에서 사고시 전류제한방식을 좌우하는 파라미터는 누설인덕턴스는 무시한다고 할 때 1차권선에 의한 인덕턴스 L_{11} 과 1차측 권선의 턴수, m 에 의해 지배되는 것을 알수 있다.

표 1. 시뮬레이션에 사용한 설계파라미터값
Table 1. The values of design parameters for simulation

Design parameter	Unit
R_{pr}	24 [mm]
R_{sco}	23 [mm]
R_{sci}	16 [mm]
h	80 [mm]

그림 4, 5는 표 1에 주어진 고온초전도튜브의 사양이 결정되었을 때 철심코어의 크기와 1차권선의 턴수에 따른 리액턴스성분과 저항성분의 변화를 보여준다. 상대적인 이 두가지 성분의 크기에 따라 사고시 전류제한기의 동작형태가 결정된다. 그림 6은 1차권선비가 12일때의 리액턴스성분과 저항성분의 크기변화를 보여준다. 그림에서 볼수 있듯이 철심코어의 반지름이 7.5mm 이하에서는 저항성분이 커지고 즉 전류제한방식이 유도형으로 이루어지게 된다. 반대로 7.5mm이상의 영역에서는 한류기의 임피던스의 리액턴스성분이 커지게 되어 전류제한이 저항형 방식으로 동작된다. 따라서 철심코어설계시 주어진 사고용량에서 포화가 일어나지 않는 범위에서 동작할 수 있는 철심코어의 크기를 결정한 후 턴수비를 고려하여 전류제한방식을 결정해야 할 것이다.

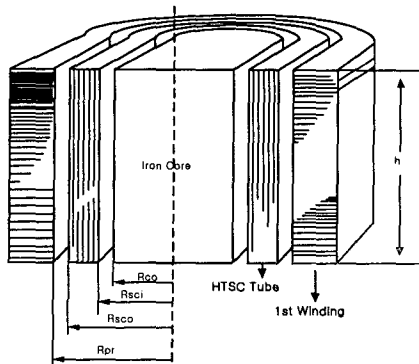


그림 3. 초전도류브 및 1차권선이 설치된 철심코어의 단면도 및 설계파라미터

Fig. 3. The cross section and design parameters of iron core installed with HTSC tube and 1st winding

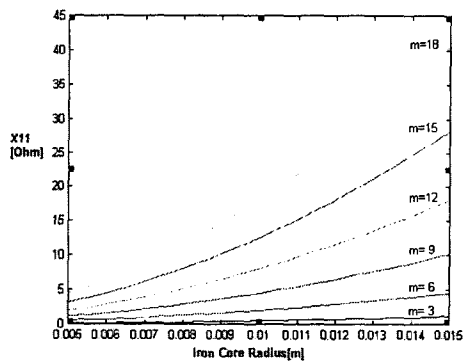


그림 4. 권선수와 철심코어반경에 따른 리액턴스 성분(X_{11})의 크기

Fig. 4. The amplitude of reactance(X_{11}) dependent on the number of turn and the radius of iron core

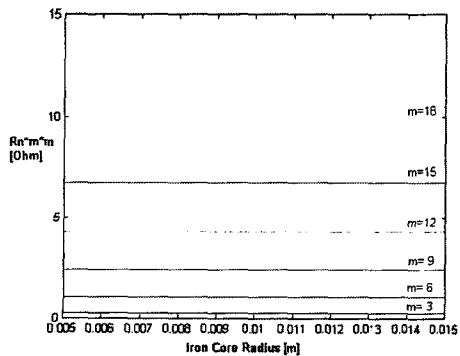


그림 5. 권선수와 철심코어반경에 따른 저항성분 (R_{m*m})의 크기

Fig. 5. The amplitude of resistance(R_{m*m}) dependent on the number of turn and the radius of iron core

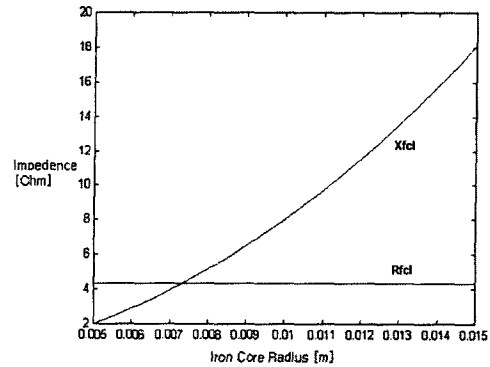


그림 6. $m=12$ 일때 철심코어반경에 따른 리액턴스 성분 (X_{11})과 저항성분(R_{m*m})의 크기비교

Fig. 6. The comparison of X_{11} and R_{m*m} dependent on the radius of iron core in the case the number of turn is 12

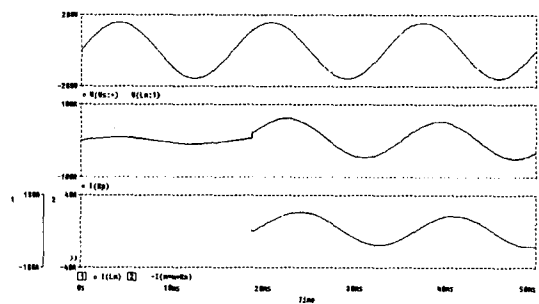


그림 7. 저항형으로 설계시 동작파형

Fig. 7. The waveforms in the case of resistive type design

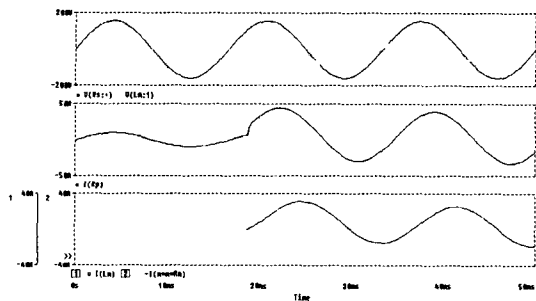


그림 8. 유도형으로 설계시 동작파형

Fig. 8. The waveforms in the case of inductive type design

전류제한이 유도형 과 저항형 으로 이루어질 경우의 동작파형의 비교를 위해 철심코어의 반지름이 6mm일 경우와 16mm일 경우의 차단동작파형을 그림 7, 8에 나타내었다. 유도형으로 설계할 경우, 전체시스템에 흐르는 사고전류크기가 저항형에 비해 감소된 결과를 나타내었다. 이로 볼 때 사고시 사고전류의 크기를 효과적으로 감소시키기 위해서는 유도형으로 동작되도록 설계하는 것이 유리하며 저항형으로 설계시 동작파형을 보면 전체선로에 흐르는 사고전류가 유도형으로 설계시보다 더욱 크게 흐르는 것을 관찰할 수 있다. 이는 1차권선의 부담이 커지게 되는 것을 알 수 있다. 반면에 사고시 전체시스템에 흐르는 제한된 전류와 전원과의 역률저하문제가 발생됨을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 차폐유도형(shielded inductive)SFCL에 대한 개념설계와 함께 실제 전력 계통에 연결한 자기차폐형 전류제한기의 동작특성을 예측하기 위해 모의회로를 전류제한기와 연결하여 컴퓨터시뮬레이션을 통해 제한기의 설계파라미터에 따른 제한기의 동작특성을 비교분석하였다. 자기차폐형 전류제한기의 모델과 등가회로부터 추출한 파라미터를 입력 상수로 하여 제한기의 제한특성을 1차권선수와 철심코어의 크기에 따라 분석하였으며 철심코어크기와 1차권선수에 따라 전류제한이 유도형이나 저항형으로 동작할 수 있도록 설계할 수 있음을 확인하였다. 또한 차폐유도형의 전류제한기설계시 유도형과 저항형으로 전류제한이 이루어질 수 있는 파라미터설정값의 범위를 조사하여 시뮬레이션을 통해 검증하고 각각의 전류제한시 장단점에 대해 비교분석하였다.

감사의 글

※ 본 연구는 1999년도기초전력공학공동연구소(과제번호 : 98-중기-04)연구비의 지원하에 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] R. K. Smith, P. G. Slade, M. Sarkozi, E. J. Stacey, "SOLID STATE DISTRIBUTION CURRENT LIMITER AND CIRCUIT BREAKER : APPLICATION REQUIREMENTS AND CONTROL STRATEGIES", IEEE Trans. on Power Del., Vol. 8, pp.1155-1164, Jul., 1993.
- [2] C. A. Falcone, J. E. Beehler, W. E. Mekolites and J. Grazen, "Current Limiting Device - A Utility's Need", IEEE Trans. on PAS, Vol. 93, pp.1768-1775, Nov., 1974.

- [3] E. Thuries, et al., "TOWARDS THE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER", IEEE Trans. on Power Del., Vol. 6, pp. 801-808, April, 1991.
- [4] W. Paul, J. Rhyner, Th. Baumann and F. Platter, "Fault Current Limiters Based on High Temperature Superconductors", Inst. Phys. Conf. Ser. No 148, pp.73-78, (1995)
- [5] E. M. Leung, et al., "High Temperature Superconducting Fault Current Limiter Development", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, pp.985-988, Jun., 1997.
- [6] Lembit Salasoo, "Comparison of superconducting fault limiter concepts in electric utility applications", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, pp.1079-1082, Jun., 1995.