

자속구속개념을 이용한 Rod 타입 고온초전도 전류제한기의 동작실험을 위한 특성시뮬레이션

임성훈*, 이재*, 고석철*, 송재주**, 이성룡***, 한병성*
 *전북대학교, **순천청암대학, ***군산대학교.

Characteristic Simulation for Operational Experiment of Rod Type HTSC-FCL using Flux-Lock Concepts

Sung-Hun Lim, Jae Lee, Seok-Cheol Ko, Jae-Joo Song, Seong-Ryong Lee, Byoung-Sung Han
 *Chonbuk National University, **Korea Electric Power Research Institute, ***Kunsan National University

Abstract - 본 논문에서는 고온초전도체를 이용하여 한류기에 적용시 고온초전도체 제작에 따른 재료적인 제약으로 인한 문제점을 해결할 수 있는 자속구속개념을 이용한 고온초전도 한류기의 동작원리에 대해 고찰하고 로드(Rod)형태로 제작이 용이한 소형의 고온초전도벌크를 이용하여 대용량에 적용이 유리함을 한류임피던스와 한류비를 퀸치용량과 1차인덕턴스의 크기에 따라 조사하여 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서 론

고온초전도체를 이용한 전류제한기는 매년 증가되고 있는 전력요구와 전력공급으로 인한 전력계통의 용량증가로 기존의 차단기의 용량증가와 성능향상을 위해 발생하는 추가비용을 줄일 수 있는 장점으로 인해 상용화를 위한 연구가 지속되고 있다.

지금까지 개발된 고온초전도체를 이용한 전류제한기는 크게 고온초전도체의 대표적인 현상인 영저항(Zero Resistance)특성을 이용한 저항형 타입(Resistive Type)과 마이스너효과(Meissner Effect)를 이용한 유도형 타입(Inductive Type)으로 나눌 수 있는데 각 형태에 따라 다른 특성과 장단점이 있다.

위의 두 형태는 사고시 고온초전도체의 퀸치를 발생시키는 퀸치형(Quench Type)으로 정상상태에서는 제로 임피던스를 보이나 사고가 발생되면 초전도체의 상전이를 통해 발생하는 임피던스를 이용하여 사고전류를 제한하는 형태로서 상전도상태에서의 큰 저항값이 요구된다. 그러나 최근에 개발된 DC리액터형태는 초전도체의 상전이를 발생시키지 않는 무퀸치형(Non-Quench Type)으로 초전도코일의 인덕턴스를 이용하여 사고전류를 제한할 수 있어 반복동작에 따른 초전도체의 성능저하를 방지할 수 있고 사고제거에 따른 초전도상태로의 복구특성이 필요치 않은 장점으로 고온초전도선재를 이용한 응용분야에 큰 관심의 대상이 되고 있다.

그러나 지금까지 개발된 고온초전도체를 이용한 전류제한치를 대용량의 한류기에 적용하기 위해서는 고임계 특성을 갖는 고온초전도체의 제조기술이 먼저 선행되어야 하는데, 저항형의 대표적인 박막형의 경우, 대용량에 적용하기 위해서는 고임계특성을 갖는 대면적의 박막제작기술이 먼저 확보되어야 하고 유도형의 경우, 튜브형태나 링 형태의 초전도체를 필요로 하기 때문에 별도의 제조기술과 이에 대한 연구가 선행되어야 한다. 또한 퀸치를 발생시키지 않는 무퀸치형의 DC 리액터타입의 경우에도 대전류수용을 위한 큰 값의 인덕턴스를 갖는 고온초전도선재제작이 선행되어야 하는데 이를 위해서는 고전압 및 대전류에 대한 대책과 이에 따른 높은 경비상승문제 등이 해결해야 할 문제점으로 남아 있다.

따라서 본 논문에서는 고온초전도체를 이용하여 한류기에 적용시 고온초전도체 제작에 따른 재료적인 제약으로 인한 문제점을 해결할 수 있는 자속구속개념을 이용한

고온초전도 한류기의 동작원리에 대해 고찰하고 로드(Rod)형태로 제작이 용이한 소형의 고온초전도 벌크를 이용하여 대용량에 적용가능함을 시뮬레이션을 통해 검증하고 적절한 설계파라미터를 조사하여 실제동작실험을 위한 설계자료로 이용하고자 한다.

2. 자속구속개념을 이용한 고온초전도전류제한기의 설계파라미터 및 특성해석

2.1 구성 및 동작원리

자속구속개념을 도입한 한류기의 구성은 철심코어를 매개로 코일 1, 2는 병렬로 연결되고 코일 2에 고온초전도 Rod가 부착된다. 또한 제 3권선을 통해 자계인가를 위한 자계인가코일, 위상조정용 커패시터 및 직렬저항이 RLC 직렬회로를 구성한다.

n_1, n_2, n_3 을 각 코일 1, 2, 3의 턴수라 하고 각 코일에 유가되는 전압을 V_1, V_2, V_3 라 하면 각 코일의 전압은 다음식과 같이 표현된다.

$$V_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt}, V_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}, V_3 = n_3 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

사고전의 코일 1과 2의 양단전압은 Rod타입의 고온초전도체의 양단전압은 0이 되므로 같게 되어 다음식이 성립되고 $\frac{d\Phi}{dt} = 0$ 이기 때문에 자속은 시간적으로 변하지 않고 구속되어 있다.

$$(n_1 + n_2) \frac{d\Phi}{dt} = 0 \quad (2)$$

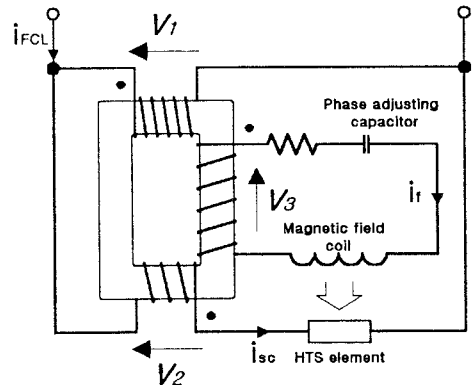


그림 1. 자속구속개념을 이용한 고온초전도 전류제한기

따라서 각 코일의 전압은 모두 0이기 때문에 코일 3에 는 전류가 흐르지 않게 되고 고온초전도체로 자계인가는

이루어지지 않게 되므로 이로 인한 임계전류저하는 발생되지 않게 된다.

사고가 발생되면 임계전류를 넘는 전류가 Rod타입의 소자에 흐르게 되면 쇠교자속에 시간변화가 생겨 각각의 코일에 전압이 유기되고 이와 동시에 코일 3에 전류가 흐르게 되어 Rod타입의 고온초전도소자에 교류자계가 인가된다. 이때 인가된 교류자계로 인해 Rod타입의 고온초전도체의 상전도저항은 증가하게 된다.

자속구속개념을 이용한 전류제한기의 특징은 기존의 유도형과는 달리 정상시에는 철심에 교류자속이 발생되지 않으므로 철심이 발생되지 않는 점과 Rod 타입단독으로 동작시보다 한류비가 증가되므로 대용량으로 적용에 유리한 점이 특징이다.

2.2 특성해석을 위한 모델 및 파라미터

자속구속개념을 이용한 고온초전도한류기의 특성해석을 위한 등가회로부터 Rod타입의 고온초전도체에 흐르는 전류(I_{SC})와 한류기전체에 해당되는 등가한류 임피던스(Z_{FCL}) 및 자체인가회로에 흐르는 전류(I_F)는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega L_1 R_{SC}}{R_{SC} + j\left\{\omega L^2 + \frac{\omega L_3}{R_3} R_{SC}\right\}} \quad (3)$$

$$I_{SC} = \frac{j\omega \sqrt{L_1 L_3} \cdot I_{FCL}}{R_{SC} + j\left\{\omega L^2 + \frac{\omega L_3}{R_3} R_{SC}\right\}} \quad (4)$$

$$I_F = \frac{j \frac{\omega \sqrt{L_1 L_3}}{R_3} R_{SC} I_{FCL}}{R_{SC} + j\left\{\omega L^2 + \frac{\omega L_3}{R_3} R_{SC}\right\}} \quad (5)$$

여기서 L_1, L_2, L_3 은 각 코일의 인덕턴스이며 R_3 는 자체인가회로의 저항성분, I_{FCL} 은 선로에서 한류기쪽으로 유입되는 전류를 나타낸다. 위 식에서 L 은 $L = \sqrt{L_1} \pm \sqrt{L_2}$ 으로 \pm 의 부호는 1,2차권선에 의한 자속의 증감방향에 따라 결정된다.

등가회로의 지배방정식을 가지고 자속구속개념을 이용한 고온초전도한류기의 차단동작특성에 대한 해석을 수행하였으며 동작특성을 나타내는 지표로서 한류임피던스 [Z_{lim}]와 한류비 [P_{lim}]를 파라미터로 해서 켄치용량 [$R_{SC} I_C^2$]과 1차측 인덕턴스에 따라 Rod 타입단독으로 동작시와 비교분석하였다.

등가회로로부터 구한 방정식의 해를 구하기 위해 수치해석법으로 FDM을 이용하였으며 단락사고시의 동작특성을 구현하기 위해 사용한 Rod 타입의 고온초전도벌크소자와 1,2,3차코일의 사양을 표 1에 나타내었으며 수치해석에 적용한 인가자계에 따른 상전도저항과 임계전류와의 관계를 그림 2에 나타내었다.

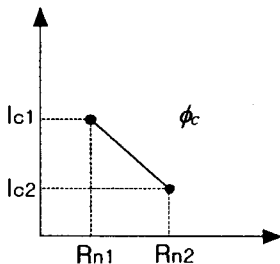


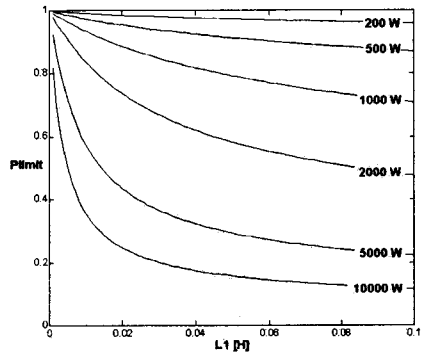
그림 2 인가자계에 따른 임계전류와 상전도저항

표 1 시뮬레이션에서 설정한 전원 및 부하를 포함한 코일 인덕턴스 및 Rod 초전도사양

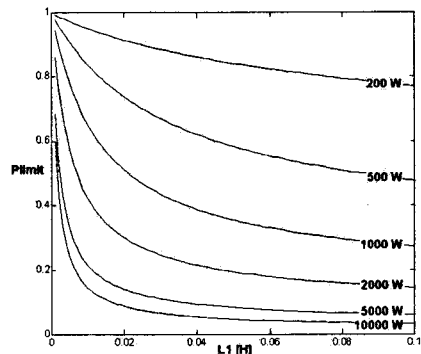
Parameter	Unit
Main & Load	
Main Voltage	400 [V]
Line Impedence	
Rp	0.08 [Ohm]
Lp	1.2 [mH]
Load Impedence	25 [Ohm]
Coil Inductance & Series Resistance	
L1 1st Coil Inductance	1~100 [mH]
L2 2nd Coil Inductance	50 [mH]
L3 3rd Coil Inductance	10 [mH]
R3 Series Resistance connected in 3rd Coil	1~200 [Ohm]
Superconducting Rod	
Ic Critical Current	30 [A]
Rn Normal conduction Resistance	10 [Ohm]

3. 시뮬레이션 및 특성해석

그림 3에서 확인할 수 있듯이 자속구속개념을 이용한 고온초전도한류기는 켄치용량과 1차측 인덕턴스가 증가함에 따라 한류기임피던스가 증가함으로서 한류비가 향상되는 것을 확인할 수 있다. 또한 자체인가코일인 제3권선이 설치된 경우의 한류비가 설치되지 않은 경우보다 향상되는 것을 확인할 수 있으며 이는 자속구속개념을 이용한 한류기가 대용량에 적용가능함을 보여주는 결과이기도 한다.



(a) 자체인가코일을 설치하지 않은 경우



(b) 자체인가코일을 설치한 경우

그림 3. 1차인덕턴스와 켄치전력에 따른 전류제한률비교

이에 대한 고찰을 검증하기 위해 수치해석을 적용하여 시뮬레이션한 결과를 그림 4, 5에 제시하였고 Rod타입 단독으로 동작시와 자속구속개념을 이용한 경우의 자계인가코일의 존재여부에 따라 제한되는 선로전류의 크기 및 각각에 설치된 Rod타입에 도통되는 전류를 비교하였다.

자계인가코일이 설치된 경우의 선로전류가 Rod타입 단독으로 동작시보다 비교적 작게 제한되는 것을 볼 수 있는 반면 설치되지 않은 경우엔 단독 동작시보다 별다른 제한이 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있는데 이는 앞의 그림 3에서 확인할 수 있듯이 자계인가코일이 설치된 경우의 한류기임피던스가 설치되지 않은 경우보다 전체적으로 크게 나타나는 것과 일치한 결과이다.

사고시 각각의 Rod타입자체에 도통되는 전류는 자계인가코일이 설치된 한류기에서 작게 도통되고 있는 것을 볼 수 있고 이는 자계인가코일을 갖는 자속구속개념을 이용할 경우, 소용량의 고온초전도체를 이용하여 단독으로 동작시보다 큰 사고전류를 제한할 수 있음을 보여 주는 결과이다.

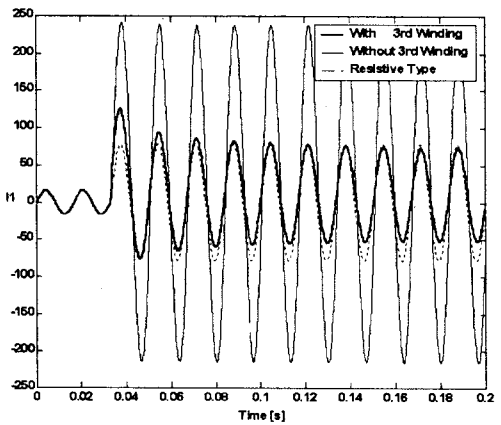


그림 4. 사고시 각각의 FCL에 의해 제한되는 선로전류파형

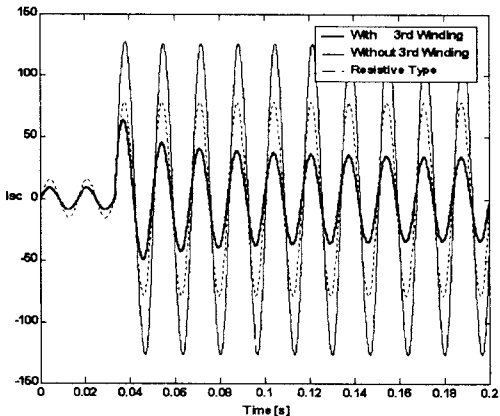


그림 5. 사고시 각각의 FCL의 구성요소인 초전도에 도통되는 전류파형

마지막으로 코일 3의 직렬저항에 따른 한류비의 변화에서 볼 수 있듯이(그림 6) 자속구속개념을 이용하여 자계인가코일이 설치된 고온초전도한류기 설계시 적절한 한류기임피던스를 얻을 수 있도록 직렬저항을 고려해서 삽입해야 되는 것을 확인할 수 있다.

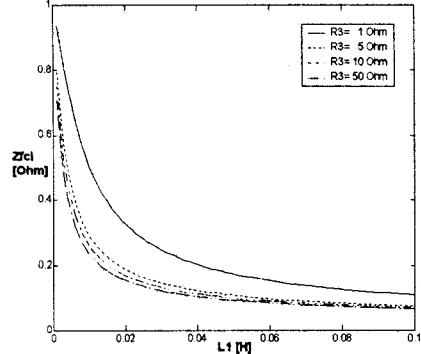


그림 6. 3권선의 직렬저항크기에 따른 전류제한률

4. 결 론

본 연구에서는 고온초전도체를 이용하여 한류기에 적용시 고온초전도체 제작에 따른 재료적인 제약으로 인한 문제점을 해결할 수 있는 자속구속개념을 이용한 고온초전도 한류기의 동작원리에 대해 고찰하고 Rod 형태로 제작이 용이한 소형의 고온초전도 벌크를 이용하여 대용량에 적용가능함을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 본 논문을 통하여 적절한 설계파라미터를 조사함으로써 실제 동작실험을 위한 설계자료로 이용하고자 한다

(참고 문헌)

- [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] 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 Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 6, pp. 62-67, June, 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, pp. 656-659, June, 1999.
- [5] H. Kado and M. Ichikawa, "Performance of A High-Tc Superconducting Fault Current Limiter -Design of A 6.6kV Magnetic Shielding Type Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, pp.993-996, June, 1997.
- [6] 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.
- [7] T. Matsumura, T. Uchii, Y. Yokomizu, Development of Flux-Lock-Type Current Limiter with High-Tc Superconducting Element, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, pp.1001-1004, Jun., 1997.