Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 21, No.10, pp. 29~34 December 2007 논문 21-10-4

자속구속형 초전도 사고전류제한기의 사고각에 따른 철심의 포화특성

(Saturation Characteristic of Iron Core Dependent on Fault Angle in a Flux-Lock Type SFCL)

임성훈 · 김재철*
(Sung-Hun Lim · Jae-Chul Kim)

요 약

본 논문에서는 사고각에 따른 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 분석하였다. 이를 위해 자화가지를 포함한 등가회로로부터 사고각에 따른 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 철심내부자속을 유도하였으며 사고전류에 미치는 영향을 분석하였다. 사고전류제한 실험을 통해, 철심의 포화와 관련한 여자전류를 유도하였으며 사고각에 따른 변화를 분석하였다. 사고전에는 발생되지 않았지만 사고가 발생함과 동시에 여자전류크기가 증가하였으며 특히, 자속구속형 초전도 사고전류제한기를 가극결선한 경우가 감극결선한 경우보다 보다 크게 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 등가회로로부터 분석한 결과와 실험결과는 일치되는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

The fault current limiting characteristics of a flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL) according to fault angles were investigated. From the electrical equivalent circuit with the magnetization branch, the inner magnetic flux of this SFCL due to fault angles was induced and its effect on the limited fault current was analyzed. From the fault current limiting experiments, the exciting current, which described the saturation of the iron core, was calculated and its dependence on the fault angle was analyzed. Before the fault happened, the exciting current did not happen, that it, kept zero value. However, after the fault happened, the exciting current flowed and, the exciting current in case of the additive polarity winding showed higher value than for the case of the subtractive polarity winding. The analysis results were compared with the experimental ones, and experimental results agreed with the analysis ones.

Key Words : Flux-lock type superconducting fault current limiter(SFCL), Fault angles, Exciting current

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-7961
E-mail : jckim@ssu.ac.kr
접수일자 : 2007년 5월 30일
1차심사 : 2007년 6월 5일
심사완료 : 2007년 6월 26일

1. 서 론

초전도체를 이용한 사고전류제한기는 신속한 사고전류제한 동작과 함께 자체 사고전류 감지 및 자

동복귀와 같은 특성들을 가지고 있어 계통의 사고전류를 보다 효과적으로 감소시키기 위한 방안으로 주목을 받고 있다[1-2].

지금까지 개발된 초전도 사고전류 제한기는 크게 퀜치형과 비퀜치형으로 분류할 수 있으며, 퀜치형은 다시 저항형과 유도형으로 분류할 수 있다. 저항형 초전도 사고전류제한기는 구조 및 원리가 간단하고 소형화에 유리한 반면, 용량증대를 위해서는 단위소자들의 직병렬 연결이 필요한데 소자들간의 상이한 임계전류로 인해 발생되는 전력불균형을 해결할 수 있는 방안이 필요하다. 유도형은 링 또는 튜브형태로 제작한 초전도체를 사용하며 사고전류가 직접적으로 흐르지 않기 때문에 소손의 우려가 적다는 장점이 있으나, 철심사용에 따른 부피 및 무게증가를 비롯한 튜브 또는 링형태의 초전도체 제작의 어려움이 있다.

철심을 매개로 병렬로 연결된 두 코일과 두 코일 중 하나와 직렬로 연결되는 초전도 소자로 구성된 자속구속형 초전도 사고전류 제한기는 저항형과 유도형의 장점을 가지고 있으며, 두 코일의 인덕턴스 비와 결선방향에 따라 제한기 사고초기 동작전류와 제한기 임피던스를 조절할 수 있는 특징을 가지고 있다[3].

그러나 철심를 매개로 두 개의 코일이 병렬로 결선되어 있기 때문에 사고발생시 철심의 포화가 발생할 수 있으며 지속적으로 유지시 자속구속형 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 저하시킬 수 있게 된다. 따라서 자속구속형 초전도 사고전류제한기를 구성하는 철심내부의 자속과 사고전류의 변화를 사고각과 같은 다양한 사고조건에 따라 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 사고각에 따른 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 분석하였다. 사고각에 따른 철심내부의 여자전류와 철심의 내부자속을 자화가지를 포함한 등가회로로부터 유도하여 분석하였으며 이를 실험을 통해 확인하였다.

2. 본 론

2.1 등가회로 분석

자속구속형 초전도 사고전류제한기는 초전도 소자와 병렬로 연결된 두 개의 코일로 구성된다. 이때 코일 2는 소자와 직렬로 연결되며 코일 1과 감극방향 또는 가극방향으로 병렬 결선된다. 사고시 철심 내부자속과 제한되는 사고전류는 누설인덕턴스와 철손저항을 무시할 경우 두 코일의 결선방향을 고려하여 전원단을 포함한 그림 1의 회로로부터 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$\phi(t) = \frac{X \cdot V_{m1}}{N_1} \frac{1}{\sqrt{(R_{l1}/L_m)^2 + w^2}} \left[\sin(\beta - \varphi) e^{-(R_{l1}/L_m)t} + \sin(wt + \varphi - \beta)\right] \quad (1)$$

$$i_{FCL} = v_1 \cdot \frac{\frac{i_e}{i_2} + \frac{N_1 \pm N_2}{N_1}}{\frac{N_1}{N_1 \pm N_2} R_{SC}} \quad (2)$$

$$\beta = \tan^{-1}(wL_m / R_{l1}), \qquad X = 1 - \left(\pm \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{R_{l1}}{R_{l2} + R_{SC}} \right)$$

여기서 '+'와 '-'는 두 코일의 결선방향이 각각 감극결선과 가극결선인 경우에 해당되며, φ는 사고각을 나타낸다. 식 (1)로부터 사고시 철심의 내부자속은 가극결선한 경우가 감극결선한 경우보다 크게 되는 것을 분석할 수 있으며, 두 코일의 동선저항이 작아서 무시할 수 있다면 철심내부의 자속은 0도 사고각에서 가장 크게 나타남을 분석할 수 있다. 또한 사고시 사고전류 또한 철심의 포화로 인해 여자전류가 증가할 경우 더욱 크게 증가하게 됨을 식 (2)로부터 확인할 수 있다.

그림 2는 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 실험회로도를 보여준다. 스위치 SW_1을 온시킨 후 SW_2을 일정주기동안 온시켜 단락사고를 모의하였다.

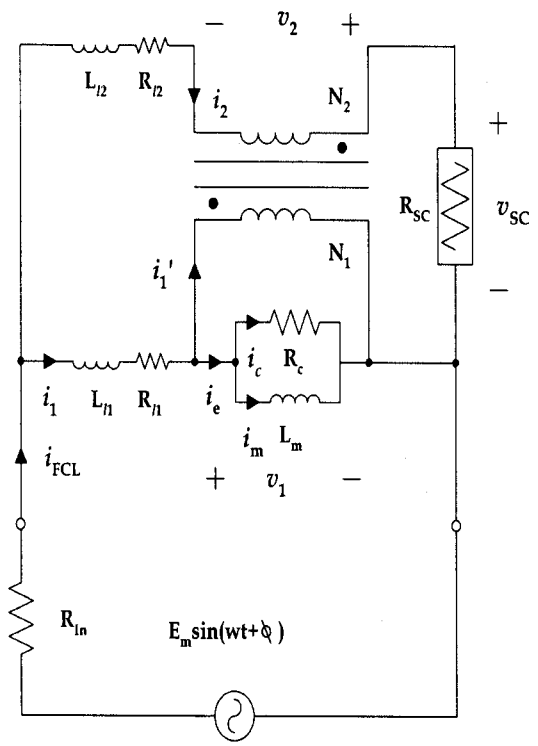

그림 1. 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 사고시 전원전압을 포함한 등가회로도

Fig. 1. Equivalent circuit of a flux-lock type SFCL in case that a fault occurs in an arbitrary ault angle

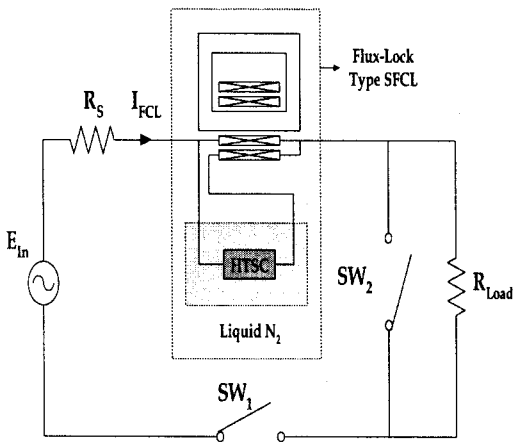

그림 2. 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 사고 류제한 실험 회로도

Fig. 2. Experimental circuit for fault current limiting test of a flux-lock type SFCL

2.2 결과 및 고찰

그림 3은 감극결선한 경우 0도 사고시, 사고전류제한 특성을 보여준다. 사고초기에 코일 1에 흐르는 전류가 다소 왜곡된 것을 볼 수 있으나 사고시간이 지남에 따라 왜곡이 점차 사라지는 것을 볼 수 있다. 또한 등가회로에서 본 바와 같이 두 코일에 흐르는 전류의 합이 선로전류와 같으며, 각 코일에 유기되는 전압의 합이 초전도 소자에 발생되는 전압과 같은 값으로 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

사고시 사고전류제한 특성을 측정한 전압, 전류로부터 자속구속형 초전도 사고전류제한기를 구성하는 철심내부의 자속을 비롯한 철심의 여자전류를 계산할 수 있으며, 그림 4는 감극결선한 경우 0도 및 90도 사고시 계산한 철심내부 자속를 보여준다. 앞의 등가회로로부터 유도한 식 (1)과 같이 0도 사고시가 90도 사고시보다 철심내부자속의 피크가 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며 사고주기가 증가함에 따라 피크값이 점차 감소되는 것을 확인할 수 있다.

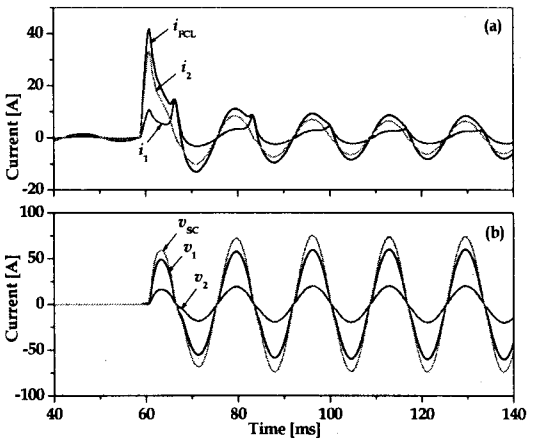

그림 3. 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 감극 선한 경우 0도 사고시 사고전류제한 특성
(a) 선로 및 각 코일 전류
(b) 초전도 소자 및 각 코일 전압

Fig. 3. Fault current limiting characteristics of a Flux-lock type SFCL with the subtractive polarity winding in case that the fault angle is 0 degree
(a) Currents of line and each coil
(b) Voltages of HTSC element and each coil

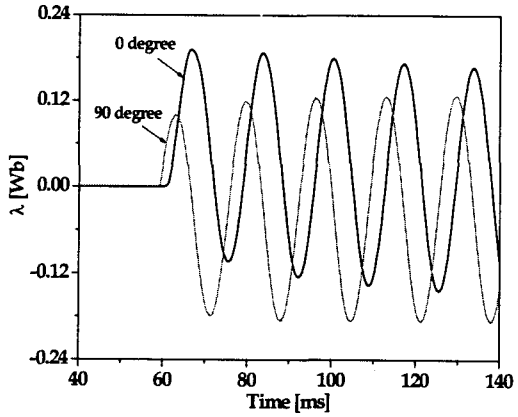

그림 4. 감극결선시 자속구속형 초전도 사고전류 한기의 철심 내부자속

Fig. 4. Inner magnetic flux of a flux-lock type FCL In case of subtractive polarity winding

그림 5는 감극결선한 경우 0도 및 90도 사고시 유도한 히스테리시스 전압, 전류 궤적을 보여준다. 0도 사고시에는 사고초기 최대값으로 상승한 여자전류가 사고주기가 증가함에 따라 점차 감소되는 궤적을 나타낸 반면에 90도 사고시에는 사고주기에 관계없이 여자전류의 크기가 일정한 작은 궤적을 나타내는 것을 비교할 수 있다. 이로부터 90도 사고시보다 0도 사고시에 사고초기에 철심의 포화가 발생될 수 있음을 확인할 수 있다.

가극결선한 자속구속형 초전도 사고전류 제한기의 사고전류제한 특성은 그림 6에서 보는 바와 같이 초전도 소자에는 두 코일의 전압차만큼 전압이 유기되는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 1의 등가회로에서 분석한 바와 같이 가극결선한 경우에는 감극결선한 경우보다 철심내부의 자속이 보다 크게 나타나게 되어 사고초기에 여자가지에 흐르는 전류가 보다 증가함에 따라 자화인덕턴스 크기가 작아져 전류코일 1에 흐르는 전류는 더욱 증가되어 나타나는 것을 그림 6에서 확인할 수 있다.

그림 7은 가극결선한 경우, 0도 및 90도 사고시 계산한 철심내부의 자속을 보여준다. 감극결선한 경우와 마찬가지로 0도 사고시 철심내부자속의 크기가 90도 사고시보다 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 감극결선한 경우의 0도 사고시의 철심내부자속이 사고초기부터 크게 상승하여 사고주기가 감소함에 따라 점차 피크가 감소하게 되는 것을 볼 수 있다.

앞의 가극결선시 철심내부의 자속을 분석한 것으로부터 예상할 수 있듯이 가극결선한 경우, 특히 0도 사고시에 사고초기의 여자전류가 갑자기 상승되어 나타나게 되며 이후에는 급격히 감소되어 나타나는 것을 그림 8의 히스테리시스 전압, 전류궤적으로부터 비교할 수 있다.

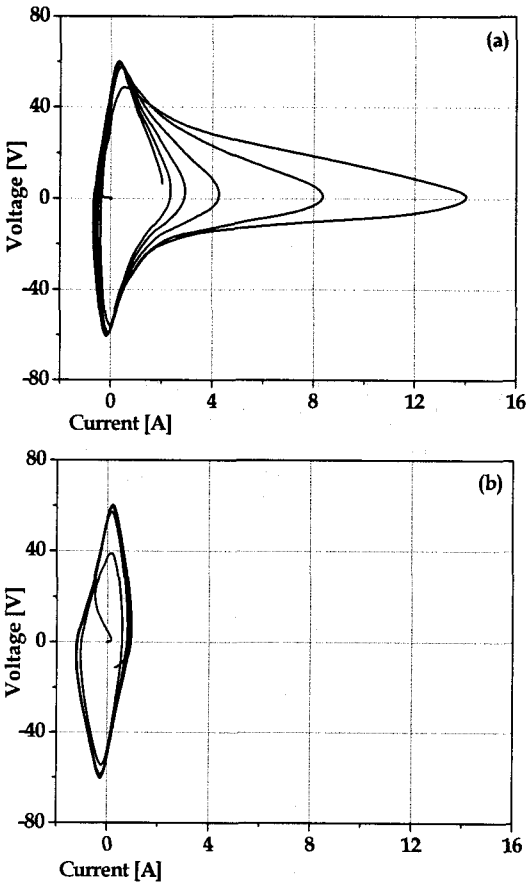

그림 5. 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 감극 결선시 히스테리시스 전압, 전류 궤적
(a) 0도 사고시
(b) 90도 사고시

Fig. 5. Hysteresis voltage and current track of a Flux-lock type SFCL in case of the ubtractive polarity winding
(a) In case of 0° fault
(b) In case of 90° fault

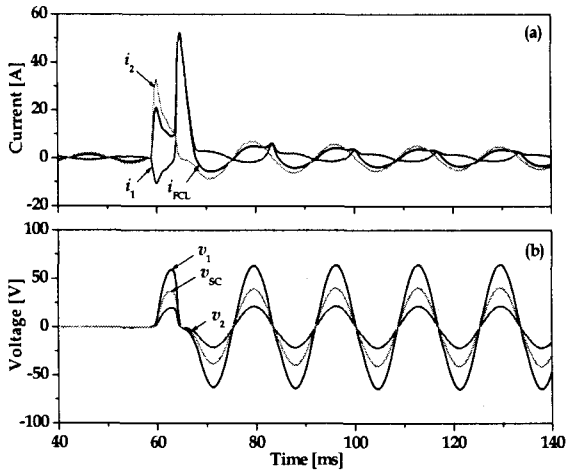

그림 6. 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 가극 선한 경우 0도 사고시 사고전류제한 특성
(a) 선로 및 각 코일 전류
(b) 초전도 소자 및 각 코일 전압

Fig. 6. Fault current limiting characteristics of a Flux-lock type SFCL with the additive polarity inding in case that the fault angle is 0 degree
(a) Currents of line and each coil
(b) Voltages of HTSC element and each coil

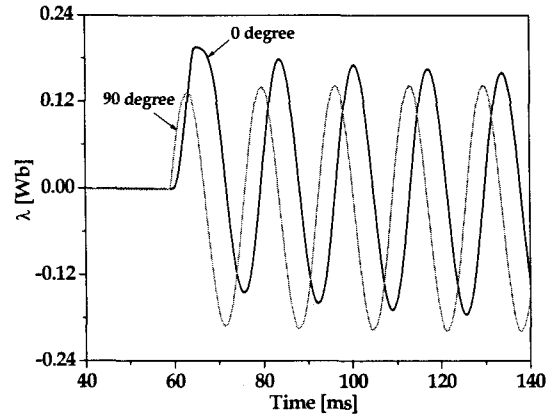

그림 7. 가극결선시 자속구속형 초전도 사고전류 한기의 철심 내부자속

Fig. 7. Inner magnetic flux of a flux-lock type SFCL In case of additive polarity winding

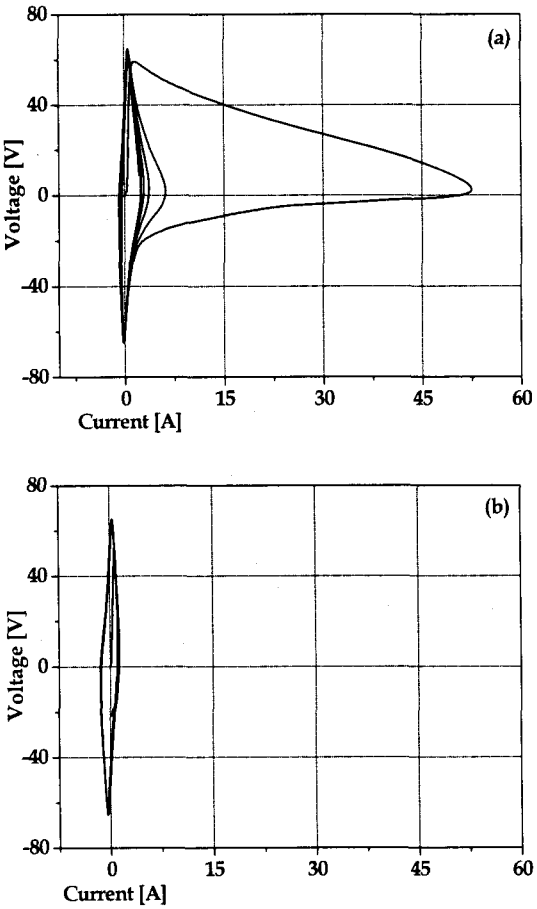

그림 8. 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 가극시 히스테리시스 전압, 전류 궤적
(a) 0도 사고시
(b) 90도 사고시

Fig. 8. Hysteresis voltage and current track of a Flux-lock type SFCL in case of the dditive polarity winding
(a) In case of 0° ault
(b) In case of 90° fault

3. 결 론

본 논문에서는 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 분석하였으며 철심내부의 자속과 사고전류의 변화를 사고각과 같은 사고조건에 따라 분석하였다.

사고각에 따른 제한되는 사고전류와 철심의 내부 자속을 자화가지를 포함한 등가회로로부터 유도하여 분석하였으며, 사고각 0도 및 90도 사고시 실험을 통해 0도 사고시 철심내부의 자속이 90도 사고시보

다 더욱 크게 나타남을 확인할 수 있었으며, 가극결선한 경우가 감극결선한 경우보다 크게 나타나게 되어 제한되는 사고전류에 보다 크게 영향을 주게 되는 것을 확인하였다.

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

References

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

[2] Lin Ye, LiangZhen Lin, Klaus-Peter Juengst, "Application Studies of superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Systems", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 12, No. 1, pp.900-903, Mar., 2002.

[3] Sung-Hun Lim et al., "Current limiting characteristics of flux-lock type High-Tc superconducting fault current limiter with control circuit for magnetic field", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 13, No. 2, pp.2056-2059, June, 2003.

◇ 저자소개 ◇

임성훈 (林成勳)
1973년 11월 1일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 전임강사.
E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr

김재철 (金載哲)
1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 공대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 교수.
E-mail : jckim@ssu.ac.kr