

자속구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교

Comparison of Operating Characteristics between Flux-lock Type and Resistive Type Superconducting Fault Current Limiters

박형민¹, 임성훈², 박충렬³, 최효상^{1,a}, 한병성³

(Hyoung-Min Park¹, Sung-Hun Lim², Chung-Ryul Park³, Hyo-Sang Choi^{1,a}, and Byoung-Sung Han³)

Abstract

we compared the operating characteristics between flux-lock type and resistive type superconducting fault current limiters(SFCLs). Flux-lock type SFCL consists of two coils, which are wound in parallel each other through an iron core, and a high-T_c superconducting(HTSC) element is connected with coil 2 in series. The the flux-lock type SFCL can be divided into the subtractive polarity winding and the additive polarity winding operations according to the winding directions between the coil 1 and coil 2. It was confirmed from experiments that flux-lock type SFCL could improve both the quench characteristics and the transport capacity compared to the resistive type SFCL, which means, the independent operation of HTSC element.

Key Words : Fault current limiting characteristics, Flux-lock type superconducting fault current limiter, Initial limiting current level, Quench characteristics, The independent operation of HTSC element

1. 서론

지속적인 경제성장과 산업발전은 전력수요의 증가를 가져왔으며 이에 따른 전력설비 증설은 계통의 임피던스 감소를 야기시키고 단락사고에 의한 고장전류의 크기를 점점 증가시키고 있다. 국내 전력계통에서 전원밀집지역에서는 임피던스가 낮아 고장전류가 차단기의 차단내력을 초과하고 있으며 그 수는 더욱더 증가할 것으로 예상된다[1]. 고장전류 대책으로는 차단기를 교체하는 방법이 있으나 대용량 차단기 교체에 따른 막대한 비용과 기

술적인 한계에 부딪히고 있고 모선분리를 통한 고장전류의 저감대책은 과부하 및 계통안정도 저하 등의 문제점이 있다. 또 다른 대책으로는 직렬리액터 설치나 고 임피던스의 전력설비를 설치하는 방법이 있으나 정상 운전시 전압강하를 발생하고 비효율적이라는 문제점이 있다[2-4]. 이러한 문제점을 효과적으로 해결할 수 있는 초전도 전류제한기는 신 개념의 보호기기이며 사고 전류에 대한 빠른 동작 및 회복시간과 환경친화적이며 수명이 반영구적인 장점 때문에 이에 대한 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다[5-8].

전력계통에서 초전도 전류제한기의 목적은 기존 차단기 앞에 초전도 전류제한기를 설치하여 사고가 발생하였을시 고장전류를 억제하여 차단기의 용량증대 효과를 가져온다. 초전도 전류제한기는 퀀치특성에 따라 크게 퀀치형과 무퀀치형으로 분류할수 있는데 퀀치형은 다시 영저항 특성을 이용한 저항형과 마이즈너 효과를 이용한 유도형으로

1. 조선대학교 전기공학과
(광주시 동구 서석동 375)
2. 전북대학교 공업기술연구소
3. 전북대학교 전기공학과
a. Corresponding Author : hyosang@chosun.ac.kr
접수일자 : 2004. 11. 26
1차 심사 : 2005. 1. 11
심사완료 : 2005. 2. 4

분류 할 수 있다. 저항형 전류제한기는 구조 및 원리가 간단하고 소형화할 수 있는 장점이 있으나 한류 용량 증대를 위해서는 직·병렬 연결이 필수적이며 동시퀀치 유도라는 큰 문제점이 있다. 유도형 전류제한기는 저항형과 다르게 초전도체에 직접 고장 전류가 흐르지 않아 초전도체의 손실위험이 적고 회복시간이 빠른 장점이 있으나 용량증대시 철심 포화문제와 부피증가의 문제점이 있다 [9,10]. 본 논문에서 분석한 자속구속형 전류제한기는 저항형 전류제한기와 유도형 전류제한기의 구조와 특성을 이용한 제한기로 볼 수 있으며 자속구속형 전류제한기의 특성은 정상 운전 시 철심에 교류자속이 발생되지 않지만 사고가 발생하여 고장전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 넘어가면 퀀치가 발생하고 소자의 저항으로 인해 쇄교자속에 시간 변화가 생겨 각 코일의 전압이 유기됨으로써 사고전류를 제한할 수 있다.

본 논문에서는 자속구속형 전류제한기의 구조와 동작원리를 이해하고 결선방향에 따른 감극결선시와 가극결선시 전압과 전류 관계식을 얻을 수 있었으며 실험을 통해 전류제한특성을 분석할 수 있었다. 분석한 결과를 바탕으로 저항형 전류제한기와 비교·분석하였다.

2. 실험

2.1 자속구속형 전류제한기의 구조 및 동작원리

그림 1은 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조를 나타낸 것이다. 철심 코어를 매개로 코일 1, 2를 병렬로 연결하였고 고온초전도 소자는 코일 2에 직렬로 연결하였다. 초전도의 특성상 소자의 초전도상태를 유지하기 위하여 액체질소가 담긴 저온 냉각장치 속에 소자를 담근 채 실험하였다. 자속구속형 전류제한기의 동작방법은 N_1 , N_2 를 각 코일 1, 2의 턴 수라 하면 결선방향에 따라 감극성과 가극성으로 나눌 수 있고 각 코일에 유기되는 전압의 식은 (1), (2)와 같이 표현된다.

$$V_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

$$V_2 = \pm N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

사고가 발생하기 전의 고온초전도 소자의 양단 전압은 0이 되므로 코일 1과 2의 양단전압은 같게 되어 다음식이 성립된다.

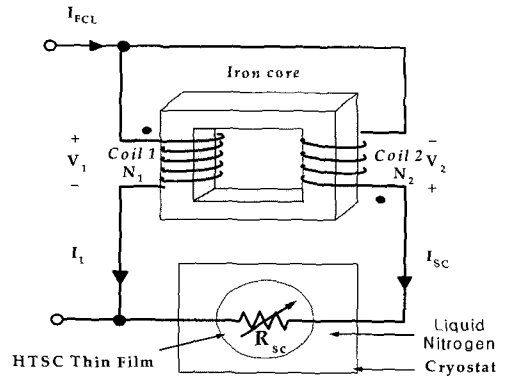


그림 1. 자속구속형 전류제한기의 구조.

Fig. 1. Scheme of flux-lock type superconducting fault current limiter.

$$(N_1 \pm N_2) \frac{d\phi}{dt} = 0 \quad (3)$$

식 (3)에서 $N_1 \pm N_2 \neq 0$ 때문에 $\frac{d\phi}{dt} = 0$ 이라고 볼 수 있다 그러므로 각 코일에 쇄교하는 자속은 시간적으로 변하지 않게 되므로 각 코일에 유기되는 전압은 식 (4)와 같이 0이 된다.

$$V_1 + V_2 = 0 \quad (4)$$

그러나 사고가 발생하여 고장전류가 초전도 소자에 흐르게 되면 임계전류를 넘기 때문에 퀀치가 발생하여 초전도 소자는 초전도 특성을 유지하지 못하고 상전도 상태로 변하기 때문에 높은 저항이 생긴다. 발생한 저항으로 인해 초전도 소자에 전압이 유기되고 이로 인해 쇄교하는 자속의 시간적 변화가 생겨 각 코일에 전압이 유기되고 코일 2에 흐르는 전류가 감소하게 되면 코일 1의 전류도 감소하게 되어 선로전류를 제한하게 된다.

2.2 결선방향에 따른 등가회로도

그림 1의 구조로부터 그림 2와 그림 3의 감극결선시와 가극결선시 등가회로도를 유도할 수 있다. 자속구속형 전류제한기의 동작은 사고시 코일 1, 2의 결선방향에 따라 철심코어에서 발생하는 쇄교자속이 증가하거나 감소하게 되는데 증감여부에 의해 감극결선시 및 가극결선시로 나누어 동작할 수 있다. 코일 1의 전압을 V_1 , 코일 2의 전압을 V_2 소자전압을 V_{SC} 라 하고 선로전류를 I_{FCL} , 코일 1의

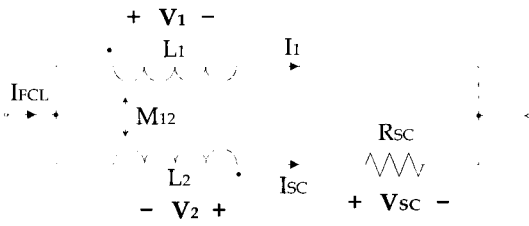


그림 2. 감각결선시 등가회로.
Fig. 2. Equivalent circuit of subtractive polarity winding.

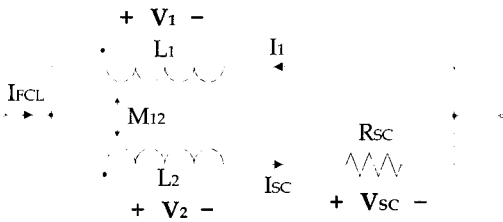


그림 3. 가각결선시 등가회로.
Fig. 3. Equivalent circuit of additive polarity winding.

전류를 I_1 , 코일 2의 전류를 I_{SC} 라 하면 감각결선일 경우 식 (5), (6)과 같이 전압·전류 관계식을 얻을 수 있다.

$$I_{FCL} = I_1 + I_{SC} \quad (5)$$

$$V_{SC} = V_1 + V_2 \quad (6)$$

가각결선일 경우 식(7), (8)과 같이 전압·전류 관계식을 얻을 수 있다.

$$I_{FCL} = -I_1 + I_{SC} \quad (7)$$

$$V_{SC} = V_1 - V_2 \quad (8)$$

2.3 실험장치 및 방법

자속구속형 전류제한기의 실험 회로도들 그림 4에 나타내었다. V_s 는 전원전압이고 SW_1 은 전원을 공급하고 차단하는 스위치이며 R_{in} 은 전류변화를 측정하기 위한 표준저항이며 R_L 은 부하저항이고 SW_2 는 단락사고를 발생하기 위한 스위치이다. L_1

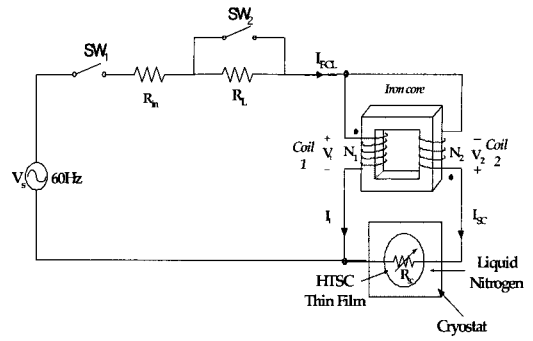


그림 4. 자속구속형 전류제한기의 실험회로도.
Fig. 4. Circuit diagram for experiment of flux-lock FCL.

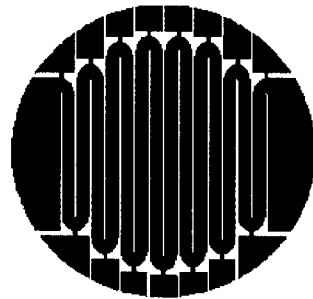


그림 5. 초전도 한류소자의 패턴모양.
Fig. 5. The pattern shape of a superconducting current limiting element.

과 L_2 는 코일 1과 2인데 서로 병렬로 연결하였고, HTSC는 초전도 소자를 나타내며 코일 2와 직렬로 연결하였다.

그림 5는 이번 실험에 사용한 초전도 소자인 YBCO 박막의 패턴형태를 보여주고 있다. 독일 THEVA사에서 제작하였고 직경 2 inch, 전체길이 420 mm, 임계온도와 임계전류는 각각 87 K, 18 A의 제원을 가지고 있고 그림처럼 meander 형태로 이루어져 있다.

실험조건은 V_s 은 60 V_{rms}, R_{in} 은 1 Ω, R_L 은 50 Ω, N_1 은 63턴, N_2 는 21턴으로 하여 사고를 발생시켰다. 현 전력계통의 차단기가 5주기 안에 작동하는 점을 고려해 5주기 동안만 전압을 인가함으로써 초전도 소자에 무리하게 전류가 흐르지 않도록 보호하였다.

결선 방향에 따라 코일 1과 2를 감각, 가각 결

선한 후 SW₁을 닫아 교류전압을 인가하고, SW₂를 닫아 단락사고를 발생시켰다. 선로전류(I_{FCL})와 코일 1 및 코일 2의 전류를 CT를 통해 측정하였고, 코일 1과 2의 양단전압과 초전도소자의 전압은 PT를 통해 측정하였다. 측정된 결과값으로부터 전류제한특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

자속구속형 전류제한기와 저항형 전류제한기의 비교분석을 위하여 동일한 조건으로 저항형 전류제한기를 실험하여 사고전류 제한특성을 분석하였다.

그림 6은 저항형 전류제한기의 사고전류제한특성을 전류파형과 전압파형으로 보여주고 있다. 그림 6(a)의 선로전류(I_{FCL})를 보면 사고발생 직후 최고 31 A_{peak}까지 상승하였으나 반주기만에 7 A까지 감소하는 것을 알 수 있고 5주기 동안 서서히 감소하여 5주기 때에는 5 A까지 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 전류가 빠른 시간 내에 제한되어 안정적인 파형으로 변하는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)의 소자전압을 보면 전압은 사고 직후 발생하는 것이 아니라 초전도 소자가 임계전류 값을 넘어 상전도 상태로 될 때 소자의 전압이 생겨 전류가 제한되는 것을 알 수 있었고, 첫 주기에서는 68 V 이지만 두 번째 주기부터 74 V로 상승하여 5주기 동안 일정한 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 자속구속형 전류제한기를 감극 결선시 사고발생 후 5주기 동안의 전류 및 전압 파형을 보여주고 있다. 그림 7(a)의 전류 파형을 보면 선로전류(I_{FCL})는 사고 직후 39 A_{peak}까지 전류가 상승하지만 반주기 만에 11 A까지 감소하고 5주기 동안 서서히 감소하여 8.5 A까지 감소하는 것을 확인할 수 있다. 선로전류(I_{FCL})는 코일 1의 전류와 코일 2의 전류의 합과 같음을 알 수 있으며 전류가 사고발생 직후 제한되는 것이 아니라 임계 전류 값을 넘어 초전도 소자에 켄치가 발생하여 상전도 저항에 의해 코일 2에 흐르는 전류가 제한되어 감소되는 순간 코일 1의 전류를 포함한 선로전류도 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 선로전류와 코일 1의 전류 및 소자전류가 동상이 아니라 인덕턴스에 의해 위상이 약간 앞서고 뒤지는 것을 볼 수 있다. 그림 (b)의 전압파형을 보면 초전도 소자 전압 V_{SC}는 코일 1과 코일 2의 전압 V₁과 V₂의 합과 같음을 볼 수 있고, 초전도 소자의 첫 번째 주기

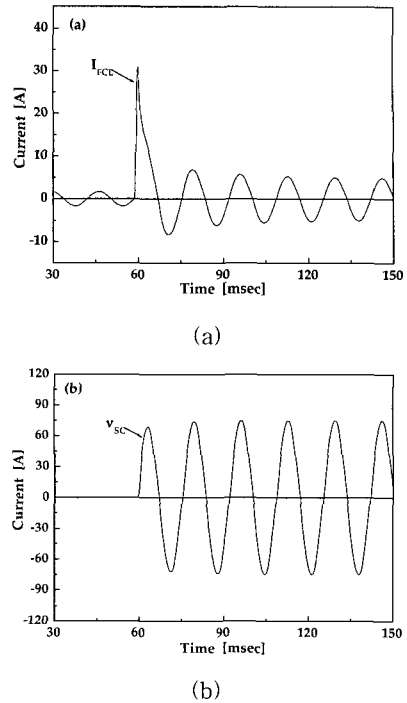
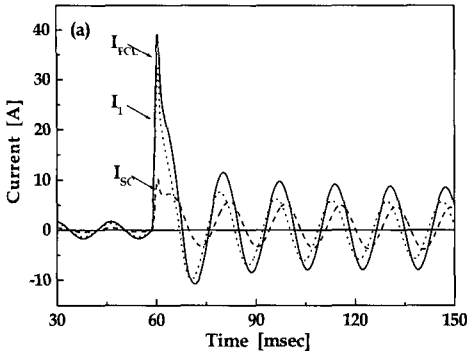


그림 6. 저항형 전류제한기 사고전류제한특성.
(a) 전류 파형 (b) 전압 파형.

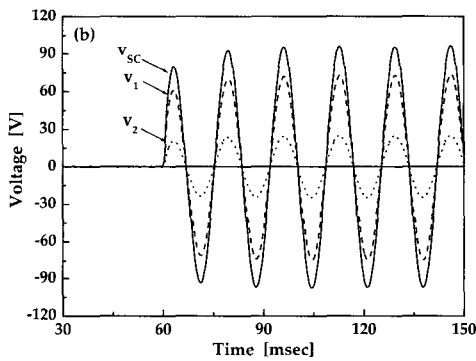
Fig. 6. Fault current limiting characteristics of a resistive type SFCL.
(a) Current curve (b) Voltage curve.

의 전압 값은 80 V이고 두 번째 주기는 92 V로 상승하여 안정된 파형을 나타냄을 알 수 있다. 감극 결선시 등가회로도에서 유도한 식 (5)와 (6)의 결과와 그림의 파형이 그림에서 본 것과 같이 비교적 일치함을 확인할 수 있었다.

그림 8은 자속구속형 전류제한기를 가극결선시 사고발생 후 5주기 동안의 전류 및 전압파형을 보여주고 있다. 그림 8(a)를 보면 선로전류(I_{FCL})는 사고 직후 최고 20.5 A_{peak}까지 증가하지만 반주기 만에 7.5 A로 감소하고 5주기 동안에 서서히 감소하여 5.5 A까지 감소하는 것을 알 수 있다. 식 (7)에서 알 수 있듯이 사고전의 코일 1의 전류와 코일 2의 전류가 180의 위상차가 나타나고 있으며 실험결과와 비교적 일치함을 알 수 있다. 단락사고를 발생 하였을 시 코일 1의 전류는 음의 방향으로 증가하고 코일 2의 전류는 양의 방향으로 증가함을 확인할 수 있다. 임계전류 값을 넘으면 초전도 소자에 켄치가 발생하고 상전도 저항에 의해



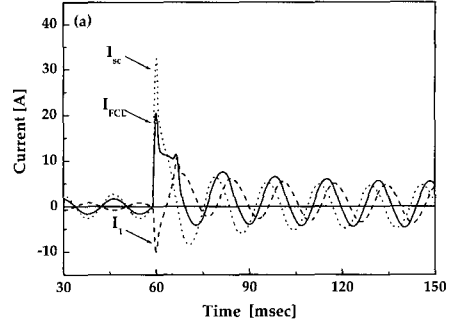
(a)



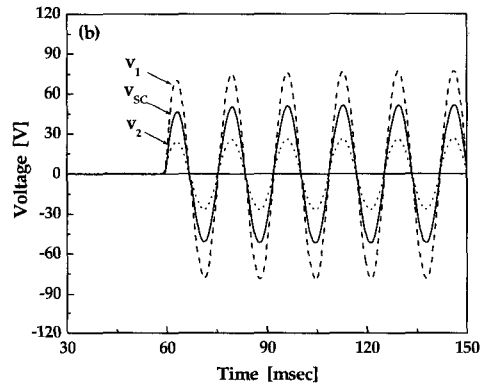
(b)

그림 7. 감극결선시 사고전류제한특성.
(a) 전류 파형 (b) 전압 파형 ($N_1=63$, $N_2=21$).
Fig. 7. Fault current limiting characteristics of subtractive polarity winding.
(a) Current curve (b) Voltage curve ($N_1=63$, $N_2=21$).

코일 2의 전류가 감소하고 코일 1의 전류는 음의 값에서 영점을 향하게 되는데 영점을 지나면 전류가 크게 증가하다가 선로전류(I_{FCT})와 코일 2의 전류와 함께 제한되는 것을 볼 수 있다. 그림 8(b)의 전압파형을 보면 식 (8)과 비교적 일치함을 알 수 있고 초전도 소자의 첫 번째 주기의 전압 값이 46.5 V 이고 두 번째 주기는 49 V로 상승하여 안정된 파형을 나타낼 수 있다. 초전도 소자의 전압은 가극결선시 저항형과 감극결선시보다 낮은 값이 나왔는데 이는 초전도 소자에 무리한 영향을 주지 않아 저항형이 가지고 있는 초전도체의 파손 우려의 단점을 보완할 수 있음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 8. 가극결선시 사고전류제한특성.
(a) 전류 파형 (b) 전압 파형 ($N_1=63$, $N_2=21$).
Fig. 8. Fault current limiting characteristics of additive polarity winding.
(a) Current curve (b) Voltage curve ($N_1=63$, $N_2=21$).

동일한 입력 조건하에서 분석한 저항형, 감극결선과 가극결선시 자속구속형 전류제한기의 실험결과를 바탕으로 소자저항과 선로전류, 소자 소비전력 값을 각각 비교·분석하였다.

그림 9는 소자저항을 비교하여 보여주고 있다. 5주기일때에 각 저항값은 감극결선시 17 Ω , 저항형 15 Ω , 가극결선시 11 Ω 값을 보였다. 감극결선시는 동일조건에서 저항값이 높기 때문에 초전도 소자의 부담이 상대적으로 높다. 또한 가극결선의 경우 저항값이 낮은 것으로 보아 인가전압을 감극결선보다 더 높일 수 있는 특징이 있음을 알 수 있다.

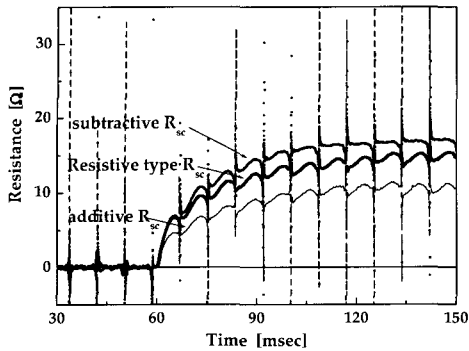


그림 9. 소자저항 비교(저항형, 감극결선, 가극결선).
 Fig. 9. Comparison of the resistance of each element(resistive, subtractive, additive).

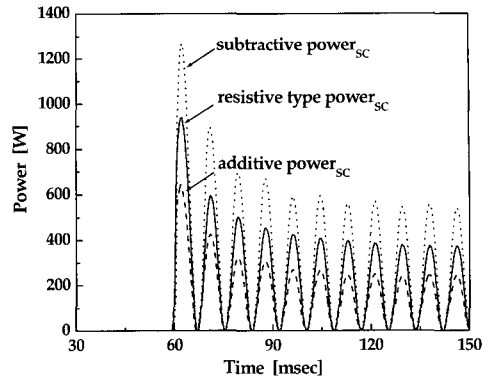


그림 11. 각 소자의 소비전력 비교(저항형, 감극결선, 가극결선).
 Fig. 11. Comparison of the consumption power of each element(resistive, subtractive, additive).

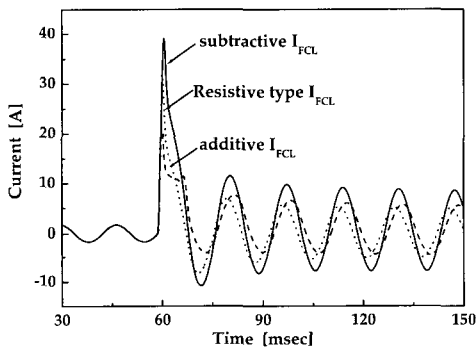


그림 10. 사고전류 비교(저항형, 감극결선, 가극결선).
 Fig. 10. Comparison of each fault current (resistive, subtractive, additive).

그림 10은 선로전류(I_{FCL})를 비교하여 보여주고 있다. 사고가 발생하여 선로전류(I_{FCL})가 최고로 상승하는 전류피크 값은 저항형이 31 A_{peak}, 감극결선시 39 A_{peak}, 가극결선시 20.5 A_{peak} 값이 나왔다. 그리고 5주기 동안 서서히 감소하면서 전류가 제한되었는데 그 값은 저항형이 5 A, 감극결선시 8.5 A, 가극결선시 5.5 A였다. 가극결선시 선로전류(I_{FCL}) 피크 값이 가장 적게 나왔는데 이는 용량 측면에서 유리할 것으로 사료되며, 5주기 후의 선로전류값은 저항형이 적게 나왔으나 가극결선시와 큰 차이는 없었다. 또한, 감극결선시 전류 피크값은 가장 높게 나왔지만 선로전류(I_{FCL}) 피크 값에서 5주기 동안 31 A를 감소시켜 사고전류의 감소폭이 가장 크게 나타남을 확인할 수 있다.

그림 11은 소자가 부담하는 소비전력을 비교하여 보여주고 있다. 사고발생 후 소비전력이 급격히 증가하지만 두 번째 주기부터 크게 감소하여 점점 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 감극결선시 소비전력이 가장 높게 나왔는데 이는 초전도소자의 부담이 증가할 것으로 예상되며 가극결선시 가장 적은 값이 나오는 것으로 보아 초전도 소자의 부담을 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

본 논문에서는 자속구속형 전류제한기의 동작원리 및 구조를 이해하여 감극결선시와 가극결선시 등가회로를 유도하였다. 실험을 통해 전류제한특성을 분석하였는데 등가회로를 유도한 식과 비교적 일치함을 알 수 있었다. 사고시 고온초전도 소자에 사고전류가 흐르게 되어 임계전류를 초과할 경우 전류제한기에 임피던스가 발생되어 전류가 제한될 수 있다는 것을 확인하였다. 이는 자속구속형 전류제한기가 고장전류를 L_1 , L_2 에 의해 전류값을 분산시킬 수 있기 때문에 단락용량이 저항형에 비해 증가될 수 있는 특징이 있음을 알 수 있었다.

자속구속형 전류제한기의 감극결선과 가극결선시, 소자단독 동작시(저항형) 동일한 입력조건하에서 저항, 사고전류, 소비전력을 비교·분석하였다. 첫 번째 저항값의 비교는 감극결선시 가장 높은값

이 나온 것으로 보아 초전도소자의 부담이 가장 큰 것으로 나타났다. 두 번째 사고전류의 비교는 사고 발생 직후 사고전류 피크값이 가락결선시 가장 낮게 나온 것으로 보아 용량측면에서 유리할 것으로 사료되며 5주기후의 선로전류 값은 저항형이 약간 좋은 특성을 보였다. 마지막으로 소자가 부담하는 소비전력을 비교하였는데 가락결선시 소자의 부담이 가장 적은 것으로 나타났다. 자속구속형 전류제한기가 저항형에 비해 사고전류제한 특성과 용량측면에서 우수함을 확인할 수 있었고, 실계통에 적용하는데 유리 할 것으로 보인다. 본 논문은 바탕으로 향후 코일 1과 2의 턴 수 변화에 대한 전류제한특성을 분석하고자 한다.

참고 문헌

[1] 김준환, 이강완, “전력계통, 고장전류 증대와 대응방안”, 전기저널, Vol. 1, No. 1, p. 19, 1998.
 [2] R. K. Smith, P. G. Slade, M. Sarkozi, E. J. Stacey, J. J. Bonk, and M. Mehta, “Solid state distribution current limiter and circuit breaker: application requirements and control strategies”, IEEE Trans. Power Deli., Vol. 8, No. 3, p. 1155, 1993.
 [3] Willi Paul and Makan Chen, “Superconducting control for surge currents”, IEEE Spectrum, Vol. 35, No. 5, p. 49, 1998.
 [4] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, “차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시뮬레

이션”, 전기학회논문지, 48권, 3호 p. 173, 1999.
 [5] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, “15 kVA급 박막형 초전도 전류제한기의 한류특성”, 전기전자재료학회논문지, 13권, 12호, p. 1058, 2000.
 [6] 김태중, 강형구, 고태국, “유도형 고온초전도 한류기용 prototype 직류 리액터의 설계와 제작”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 12S호, p. 1292, 2003.
 [7] 최효상, 황시돌, 현옥배, “1선 지락사고에 대한 배전급 저항형 초전도 한류기의 전류제한 특성”, 전기전자재료학회논문지, 14권, 6호, p. 505, 2001.
 [8] T. Matsumura, T. Uchii, and Y. Yokomizu, “Development of flux-lock-type fault current limiter with high T_c superconducting element”, IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 7, No. 2, p. 1001, 1996.
 [9] Yu Jiang, Shi Dongyuan, Duan Xianzhong, Tang Yuejin, and Cheng Shijie, “Comparison of superconducting fault current limiter in power system”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, No. 1, p. 43, 2001.
 [10] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, and W. Lanz, “Fault current limiter based on high temperature superconductors-different concepts, test results, simulations, applications”, Physica C, Vol. 354, No. 1-4, p. 27, 2001.