

자속구속리액터의 철심조건에 따른 특성

이나영*, 최효상*, 박형민*, 조용선*, 남금현*, 한대희*, 임성훈**
 조선대학교*, 숭실대학교 **

Characteristics under the Iron Core Conditions of the Flux-lock Reactor

Na-Young Lee*, Hyo-Sang Choi*, Hyoung-Min Park*, Yong-Sun Cho*, Gueng-Hyun Nam*, Tae-Hee Han*, Sung-Hun Lim**
 Chosun Uni*, Soongsil Uni**

Abstract - Superconducting fault currents(SFCLs) are expected to improve not only reliability but also stability of power systems. The analysis on current limiting operations of the flux-lock type SFCL, which consists of a flux-lock reactor wound an iron core and a YBCO thin film, was compared the open-loop with the closed-loop iron core of the subtractive polarity winding. In the SFCL, operation characteristics could be controlled by adjusting the inductances and the winding directions of the coils, then magnetic field induced in the iron core. The current limiting characteristics under the same experimental conditions were generated regardless of the iron core conditions. We confirmed that capacity of the SFCL was increased effectively by the closed-loop iron core. However, the power burden of the system could be lowered by the open-loop iron core.

1. 서 론

초전도 전류제한기에 대한 국내연구는 전력손실을 최소화하기 위한 경제성과 신뢰성이 고려된 고품질전력공급을 위한 국가차원에서의 신기술정책의 일환으로써, 진행되어지고 있다. 초전도 전류제한기의 실용성이 부각되는 요소는 정상작동에서 전력전송에 영향력이 거의 없으며, 사고발생시에는 부가적인 제어장치 없이도 기존의 보호기에 비하여 신속하게 사고전류를 제한하기 때문에 신뢰성이 높다[1].

이러한 특성을 지닌 초전도 전류제한기에 대한 관련연구 중에서도 저항형 전류제한기의 전류제한특성과 리액터를 활용한 자속구속형 전류제한기는 실제통내에 적용했을 때, 설치조건의 요구사항에 따라 탄력적인 운용이 가능한 장점을 가지고 있다. 따라서, 기존의 저항형 전류제한기가 갖는 수동적인 운전특성을 탈피함에 따라 활용도측면에서 보다 효율적이다[2].

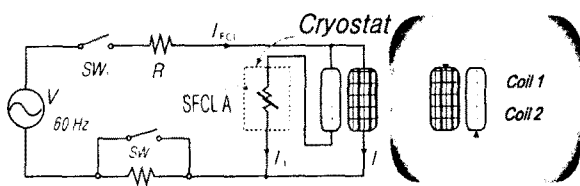
자속구속형 전류제한기는 강자성체 철심을 자속매개체로 사용하는 다른 초전도 전류제한기와 달리 설계구조화적인 요소로 인하여, 평상시에는 철심이 적으며, 선로에 영향력이 적으나, 사고시에는 빠르게 작동되어 사고전류를 제한하도록 한다. 적용계통내에서 요구하는 설계사항에 따른 활용성을 평가하기 위해서는 철심설계에 따른 특성연구는 중요하다.

특히 자속구속형 전류제한기는 사고전류를 제한시점에 있어서, 자속리액터의 인덕턴스크기 및 결선방향에 따른 극성변화 외에도 철심사항에 따라 운전특성이 달라지므로 실험파라미터 조건을 개루프와 폐루프로 철심구조를 달리하여 전류제한특성을 모의하였다. 본 논문에서는 저항스위치의 빠른 동작이 가능한 YBCO박막을 한류소자로 사용하여, 2차측 코일을 감극으로 결선한 개루프와 폐루프에 대한 철심동작특성을 분석하였다[3-4].

2. 본 론

2.1 실험장치 구성

그림 1은 전력계통내의 자속구속형 전류제한기의 특성실험을 위한 실험회로도이다. 사고모의를 위해 스위치(SW₁)을 닫힌 조건하에서 일정시간 후 스위치 (SW₂)을 열어둠으로써, 단락선로처럼 동작시켜 사고를 모의하였다. 이때 인가되는 전원전압은 160[V_{rms}/60Hz]이며, 표준저항인 R₀은 1[Ω], 선로에 연결된 부하저항은 50[Ω]으로 스위치(SW₁)와 병렬연결 하였다. 결선된 1차측 코일 턴수는 63턴로 고정하였으며, 2차측 코일을 21턴, 42턴로 인덕턴스를 변화시켜 1차측과 2차측을 감극방향으로 결선하였다.



〈그림 1〉 자속구속형 전류제한기의 실험회로도

〈표 1〉 철심조건에 따른 실험조건

리액터의 코일 1, 2	개루프	폐루프	단 위
코일 1의 자기인덕턴스(턴수)	17.3(63)	1.82(63)	mH(Turns)
코일 2의 자기인덕턴스(턴수)	1.91(21)	0.21(21)	mH(Turns)
	7.72(42)	0.81(42)	mH(Turns)

사고시 상전도체로의 빠른 저항스위치특성이 있는 한류소자인 2inch YBCO 박막을 액체질소가 담겨진 cryostat 내부에 넣어 2차측에 직렬로 연결하였다. 이러한 설계구조는 정상작동에서는 철심에 교류자속이 발생되지 않으나, 선로에 과도전류가 흐를 경우 한류소자에 저항이 발생하면서 리액터의 코일에 전압이 유기되어 사고전류를 신속하게 제한하게 된다. 이와 같은 동작은 철심에 대한 설계가 적절하지 않을 경우 사고발생시 여러 문제점이 수반됨으로 여러 설계파라미터에 의한 동작특성 분석하였다.

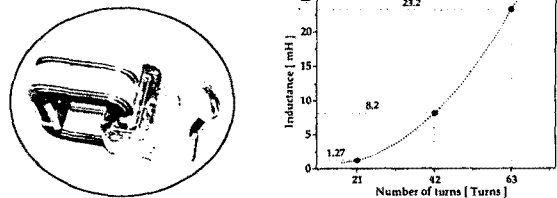
자속매개체로 강자성체 철심을 사용하였으며, 자속구속형 리액터의 구성요소인 철심의 개루프와 폐루프인 경우의 운전조건을 표1에서 제시하였다.

그림 1에서 철심의 A만을 사용하여 공심부를 많이 내포하게 되는 개루프구조이자, 철심코어 부피가 폐루프의 50%정도로 줄인 약조건에서 사고를 모의하였다. 또한 공극이 포함된 개루프철심을 사용시 공극의 자기저항 R_g와 철심의 자기저항이 R_m인 경우에는 두 개의 저항이 직렬로 연결된 구조이기 때문에 합성 자기저항은 다음과 같은 식(1)을 유도할 수 있다. ℓ은 철심구조의 내부 자속길이이며, ℓ_g는 철심부의 공심부 길이이다.

$$R = R_m + R_g = \frac{\ell}{s} \cdot \left(\frac{1}{\mu} + \frac{\ell_g/\ell}{\mu_0} \right) [A/Wb] \quad (1)$$

$$\Phi = \mu H_m \cdot S = \mu_0 H \cdot S \quad (2)$$

자성체내의 자계세기를 H_m, 공극부의 자계세기를 H_g이라 하면, 식(2)가 성립되어, 공극부의 자계세기와 자성체내 자계세기와와의 관계가 μ = μ₀ · μ_r가 되므로, 식 H_g = μ_r · H_m가 산출된다. 그러므로 공극부의 자계세기는 자성체내 자계세기의 비투자율만큼 발생되어 누설자속으로 소비된다. 그러므로 공극부의 길이가 짧을수록 누설자속은 줄어들게 된다. 개루프철심구조는 철심의 크기뿐만 아니라, 공극과 자속간의 경계조건 및 투자율에 의한 운전특성에 대한 실험은 필수적이다.



〈그림 2〉 제작된 리액터의 체적과 턴수에 따른 자기인덕턴스변화

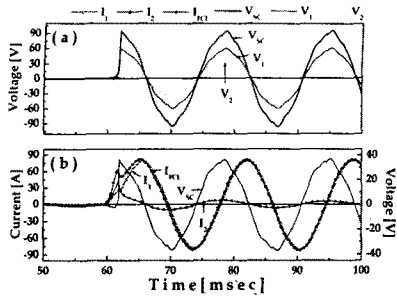
그림 2는 제작된 리액터와 전체철심부피인 폐루프 철심구조에 따른 체적에 따른 턴수를 증가시키면서 측정된 자기인덕턴스변화를 나타낸 곡형이다. 그림의 곡형에서와 같이 턴수가 증가함에 따라 코일의 자기인덕턴스는 턴수의 제곱에 어느정도 비례함을 알 수 있었다.

$$L \propto \frac{\mu S \cdot N^2}{\ell} \quad (3)$$

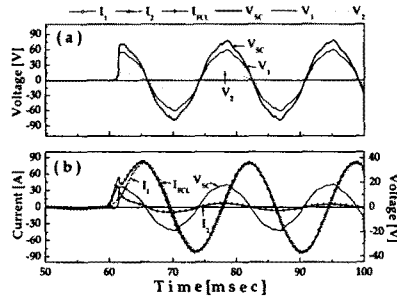
철심 체적(S)의 증가와 턴수(N) 제곱의 변화에 따라 비례하여 자기인덕턴스(L)가 변화된다는 것을 식(3)을 통해서 알 수 있었다.

2.2 개루프 감극결선시 인덕턴스비에 따른 전류제한 특성

그림 3은 160[V_{rms}, 60Hz] 전원전압 인가시 개루프철심형 자속구속형 리액터의 감극결선시 사고발생에 따른 전압-전류파형이다. 그림 3-(a), (b)의 전압파형에서 59.6ms이전(사고전)의 파형변동이 거의 나타나지



(a) 21턴



(b) 42턴

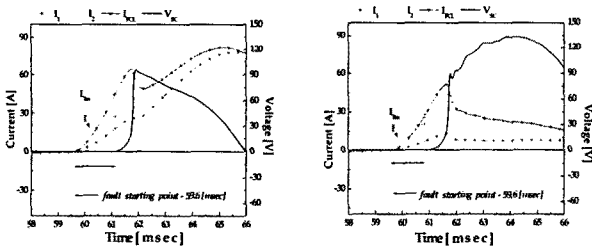
〈그림 3〉 개루프 철심구조에서의 감극결선시 전압-전류파형곡선

양음에 따라 자속을 쇠퇴시키는 운전특성이 개루프 철심구조에서도 철심구조와 관계없이 동작됨을 확인할 수 있었다. 이는 자속구속형 초전도 전류제한기의 정상동작하(사고전)에서 개방형 철심코어인 경우에도 두 코일간의 상쇄작용에 따라 철손손실에 의한 동작이 거의 없으므로 전력계통내 설치시 철심코어의 특성저하에 따른 불필요한 작동이 없을 것으로 사료된다.

그림에서와 같이 사고 직후의 2차측 코일의 권선수가 21턴과 42턴인 경우 켄치 발생시간이 각각 1.46[ms], 1.19[ms]로 턴수가 증가할수록 빨라졌으며, 초기반주기동안 발생하는 피크소자전압도 96.16[V]와 71.07[V]로 권선수에 따라 차이를 나타냄을 알 수 있었다.

하지만, 개루프철심구조에서 철심의 부피의 축소와 공극부의 기존철심에서 50%비율을 차지함에 따라 사고 발생 후, 제한되는 사고전류 I_{cl1} 이 1주기 후에도 일정한 파형으로 유지됨에 따라, 리액터에서 발생하는 철심조건에 따른 자속의 양이 자속구속형 전류제한기의 운전특성에 영향을 미침을 확인하였다.

2.2 철심구조에 따른 감극결선시 따른 전류제한 특성



(a) 개루프

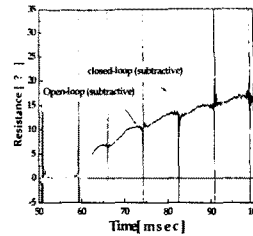
(b) 페루프

〈그림 4〉 철심구조에 따른 감극결선시 전압-전류파형곡선

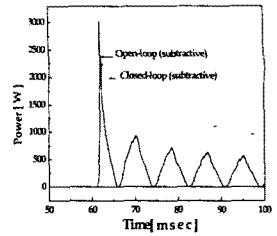
그림 4는 인덕턴스비가 63턴대 21턴인 경우의 개루프와 페루프인 자속구속형 전류제한기의 사고초기제한전류에 대한 전압-전류파형이다. 표 2는 소자에 흐르는 전류 I_1 가 임계전류를 넘어서는 순간 선로전류 I_{lim} 이 제한되기 시작하는 값들을 나타낸다. 표에서 값들의 크기가 초기시점에는 비교적 철심구조에 의한 영향력이 적었으나, 1, 2차측으로 흐르는 피크전류이상부터는 전류파형에서 개루프철심형보다 페루프철심인 경우가 전류제한 동작을 원활하게 동작됨을 확인할 수 있었다.

〈표 2〉 초기사고전류에 따른 값

사고점	감극결선(21턴)	
	개루프(a)	페루프(b)
:59.6ms		
켄치시점	61.12ms	60.97ms
I_1	18.25A	8.09A
$E(L_r)$	27.57A	24.07A
$I_{FCL}(I_{lim})$	44.84A	31.75A



(a) 소자저항비교



(b) 소비전력비교

〈그림 5〉 철심구조에 따른 감극결선시 파형

이는 동일 실험조건에서 병렬구조에 의한 전류배분이 개루프철심형인 경우 일정시간 후 대부분의 전류가 1차측 코일로 흐름에 따라 2차측에 연결된 소자의 발생전압이 상대적으로 적게 인가되었기 때문이다. 또한 초기반주기동안 소자에 인가되는 피크전압은 감극결선시 개루프가 96.16[V]이며, 페루프는 133.51[V]였다. 이는 실험조건이 개루프 철심인 경우에 철심의 부피와 양이 50%정도 감소되어 코일측에 인가되는 전압을 저하시킴에 따라, 급격히 증가되는 사고전류를 제한하기 위해서는 리액터에서 발생하는 자속이 적정수준이상을 요함을 알 수 있었다.

그림 5는 철심조건에 따른 감극결선에 대한 소자저항과 소비전력을 비교하여 나타낸 것이다. 160[V_{rms}]에서 67.31[ms]일 때, 전압과 전류 데이터로부터 산출된 소비저항곡선은 페루프 감극결선인 경우 발생된 저항은 11.66[Ω]이며, 개루프인 경우에는 7.74[Ω]였다. 소비전력곡선에서 사고 발생 후 소비전력은 개루프가 페루프에 비해 더 상승하였으나, 두 번째 주기부터는 둘다 크게 감소됨으로써 자속구속형 전류제한기가 적절히 동작되었음을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 설계학적인 구조인 각상의 리액터를 1차측과 2차측 코일의 극성방향을 달리하여, 개루프와 페루프의 철심조건에 따른 자속구속형 전류제한기를 제작하였다. 자속구속형 전류제한기는 자속매개체인 강자성체 철심을 사용하여 작동됨에 따라 철심구조에 대한 분석은 필수적이다. 따라서 개방형철심과 페루프의 철심사양에 따른 설계파라미터를 분석하였다.

자속구속형 초전도 전류제한기의 정상동작하에서 개방형 철심코어인 경우에도 두 코일간의 상쇄작용에 따라 철손손실에 의한 동작이 거의 없으므로 전력계통내 설치시 철심코어의 특성저하에 따른 불필요한 작동이 없을 것으로 사료된다. 개방형철심을 설치할 경우, 페루프철심에 비해 공간적인 제약이 줄어들어 경제적 측면에서 보다 효율적이긴 하나, 설계시 고려되어야 할 부분이 많을 것으로 본다. 하지만, 페루프철심에 비하여 소자에 인가되는 허용전압의 크기를 보다 증대할 수 있을 것이다.

철심의 부피를 줄일 경우, 초기사고전류의 상승되는 피크전류의 초기과도 응답에 따른 운전특성에서 페루프철심에 비하여 다소 불리함을 알 수 있었다. 사고 후 발생하는 누설자속의 양이 클 경우, 1차측 선로로 흐르는 전류를 커짐에 따라 소자전압에 인가되는 전압이 적어져, 켄치발생 후 선로전류를 제한하는데 있어서 악영향을 주었다. 자속구속형 초전도 전류제한기의 이러한 동작특성으로 전력계통내 요구하는 설계사양에 적절하게 응용시 활용성이 높은 보호시스템이 될 것으로 사료된다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 김준환, 이광완, "전력계통, 고장전류 증대와 대응방안", 전기저널, p. 19-31, 1998
- [2] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, 김상준, 문승현, 한병성, "YBCO박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작특성", 전기학회논문지, 48B권, 10호, p. 537-543, 1999
- [3] 박형민, 임성훈, 박충렬, 최효상, 한병성, "자속구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교", 전기전자재료학회논문지, Vol.18, No.4, p.365, 2005
- [4] T. Matsumura, T. Uchii, and Y. Yokomizu, "Development of flux-lock type fault current limiter with high-Tc superconducting element", IEEE Trans, Appl. Supercon., Vol. 7, No. 2, 1001, 1996