

결선방향에 따른 자속구속형 전류제한기의 퀸치 회복 의존도 해석

(Analysis on Quench Recovery Dependence of A Flux-Lock Type SFCL According to the Winding Directions)

정수복 · 조용선 · 최효상* · 최명호

(Su-Bok Jung · Yong-Sun Cho · Hyo-Sang Choi · Myoung-Ho Choi)

요 약

본 논문에서는 결선방향에 따른 자속구속형 전류제한기의 전류제한 및 회복 특성에 대해 분석하였다. 자속구속형 초전도 한류기는 초전도 소자와 직렬로 연결된 2차 권선과 병렬로 연결된 1·2차 권선으로 구성되어 있다. 1·2차 권선의 결선방향에 따른 감극 결선과 가극 결선을 갖는 자속구속형 전류제한기를 저항형 전류제한기와 비교하여 분석하였다. 전류제한 및 회복특성은 1·2차 권선의 결선방향에 의존한다. 가극 결선을 갖는 자속구속형 전류제한기의 퀸치시간은 감극 결선이나 저항형 전류제한기보다 더 빠르다는 것을 확인하였다. 초전도 소자에서 소비되는 에너지는 $W = VI t = I^2 R t$ 로 표현할 수 있다. 결선 방향에 따라 초전도 소자에서 소비되는 에너지의 차이는 초전도 소자에서 부담하는 전압의 차이 때문이라는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

We investigated the current limiting and the recovery characteristics of a flux-lock type superconducting fault current limiter(SFCL) according to the winding directions. The flux-lock type SFCL consists of two coils. The primary coil was wound in parallel to the secondary coil through an iron core, and the secondary coil was connected with the superconducting element in series. We have changed the winding direction of coils to compare the resistive type SFCL with the flux-lock type SFCL. The current limiting and the recovery characteristics were dependent on the winding direction. The quenching time in the additive polarity winding was faster than that of the subtractive polarity winding or the resistivity type. A consumed energy in a superconducting element was represented as $W = VI t = I^2 R t$. We found that there was a difference in the consumed energies in accordance with winding types because of differences in voltages imposed on a superconducting element in accordance with a winding direction.

Key Words : Flux-lock type SFCL, Current limiting, Recovery, Consumed energy, Winding direction

* 교신저자 : 조선대학교 전기공학과 교수
Tel : 062-230-7025, Fax : 062-230-7020
E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

접수일자 : 2007년 9월 13일
1차심사 : 2007년 9월 18일
심사완료 : 2007년 10월 2일

1. 서 론

국내의 전력계통은 지속적인 설비 증설로 선로 임피던스가 감소하여 사고 시 고장전류가 증대됨으로써 전력계통의 안정도 문제에 심각한 영향을 주게 되었다. 이의 대책으로 차단기의 교체나 모선분리 등 여러 가지 방법이 시도되고 있지만 기술적인 면과 경제적인 문제점들을 가지고 있다. 이러한 문제점을 효과적으로 해결할 수 있는 신개념 보호기기로 초전도 현상을 이용하는 전류제한기가 제안되고 있다. 초전도 전류제한기는 전기저항이 제로이며, 사고발생 시 고장전류에 대한 신속한 반응과 사고 후에 초전도 소자가 정상 상태로 빠르게 회복되는 특징이 있다[1-2].

초전도 전류제한기는 무켄치형과 켄치형으로 나뉘어진다. 무켄치형에는 포화리액터형과 다이오드 브리지형, 하이브리드 브리지형이 있다. 켄치형에는 마이스너효과를 이용하는 차폐유도형과 영저항 특성을 이용하는 저항형, 매트릭스형, 자속구속형 등이 있다. 저항형 전류제한기는 구조와 원리가 간단하여 소형화 할 수 있어 국·내외에서 활발히 연구되고 있다. 저항형 전류제한기에 변압기를 이용한 자속구속형 전류제한기는 사고전류가 코일과 소자에 양분되기 때문에 소자 파손의 우려가 적고 두 코일의 권선수 비율에 따른 인덕턴스의 변화로 전류제한 범위를 조절할 수 있는 특징을 가지고 있다[3-5].

이러한 초전도 전류제한기를 전력시스템에 적용하기 위해서는 사고시 고장전류의 신속한 제한과 사고 후 정상상태로의 빠른 회복이 필수적이라 할 수 있다. 본 논문에서는 자속구속형 전류제한기의 결선방양에 따른 감극·가극형과 저항형 전류제한기를 구성하여 실험을 통해 전류제한 및 회복 특성을 비교·분석하였다[6].

2. 본 론

2.1 실험 방법

자속구속형 전류제한기의 실험 회로도도 그림 1과 같다. 전원전압은 160[V_{rms}]로 인가하였고, 전류의 변화를 측정하기 위해 기준저항(R_{in})으로 1[Ω]과 부

하저항(R_L)을 50[Ω]으로 설정하였다. 초전도 소자는 직경 2[inch]의 합성 사파이어(Al_2O_3) 기판 위에 성장된 두께 0.3[μm]의 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 박막을 이용하여 제작하였다. YBCO 박막의 임계온도와 임계전류 밀도는 각각 87~88[K]와 2~3[MA/cm²]이내로 박막 전면에서 ±0.5[%]이내로 균일하였다.

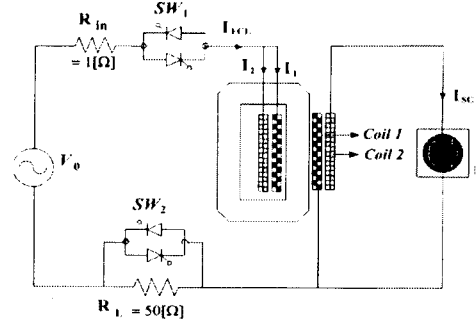


그림 1. 자속구속형 전류제한기의 실험 회로도

Fig. 1. Experimental circuit of a flux-lock type SFCL

전류제한특성 실험은 변압기의 결선방양에 따라 감극형과 가극형으로 결선한 후 스위치 SW₁을 닫아 회로에 전압을 인가하였다. 단락사고를 모의하기 위해 스위치 SW₂를 닫으면 선로전류가 급격하게 증가되며, 초전도 소자로 흐르는 통전전류가 임계전류를 초과하게 되어 켄치가 발생하게 된다. 이때 회로에 흐르는 선로전류(I_{FC}), 코일 1과 2에 흐르는 전류와 초전도 소자에 흐르는 전류(I_{SC})를 측정하였다. 코일 1과 2의 양단전압(V_1 , V_2)과 초전도 소자의 전압(V_{SC})을 측정하였다. 초기제한전류(I_{lim})는 사고전류 발생 후 초전도 소자에 흐르는 전류가 임계전류(I_c)에 도달되어 소자에 저항이 발생하였을 때의 전류 값으로 하였다. 응답시간(T_q)은 사고가 시작된 시점에서부터 초전도 소자에 저항이 발생하는 순간까지의 시간으로 하였다. 회복실험은 사고가 끝나고 초전도 소자의 저항이 제로로 회복될 때까지의 시간을 측정하였다. 실험방법은 전원전압이 차단한 상태에서 회복실험을 측정하기 위해 SCR 스위치를 이용하였다. SCR 스위치는 off 상태에서 미소한 전류가 통전되는 특성이 있으므로 이 전류를 이용하여 초전도 소자의 양단전압을 검출하였고, 초전도 소자가 정상상태로 회복되는 시점까지의 회복시간을 측정하였다.

2.2 실험 결과 및 고찰

그림 2는 저항형 전류제한기와 자속구속형 전류제한기의 결선변화에 따른 전압·전류 특성을 나타내고 있다. 그림 2 (a)에서 사고발생 직후 저항형 전류제한기의 선로전류(I_{FCL})는 $37.7[A_{peak}]$ 까지 상승하고 있으며, 1주기 후 $7.4[A_{peak}]$ 까지 전류제한이 이루어지고 있다. 소자 전압(V_{SC})은 초전도 소자가 임계전류 값을 넘어 상전도 상태로 변할 때 저항이 발생하여 전압이 나타나고 있고, 이때의 초기제한전류(I_{ini})는 $22.6[A]$ 였다. 사고 시작 시점부터 소자전압이 발생할 때까지의 응답시간(T_q)은 $0.76[ms]$ 였다. 그림 2 (b)는 감극결선된 자속구속형 전류제한기의 전압·전류특성을 나타내었다. 감극결선에서의 선로전류(I_{FCL})는 $56.9[A_{peak}]$ 까지 전류가 상승하고 있고, 1주기 후에 $16.3[A_{peak}]$ 까지 전류가 제한되고 있다. 이는 1차측 전류와 2차측 전류의 합으로 사고전류가 나타나기 때문이다. 저항형 전류제한기에 비하여 감극형 전류제한기의 초기제한전류(I_{ini})는 $36.4[A]$ 에서 전류제한이 시작되었고, 응답시간도 $1.32[ms]$ 를 나타내고 있다. 그림 2 (c)는 가극 결선된 자속구속형 전류제한기의 전압·전류특성을 나타내었다. 선로전류(I_{FCL})는 소자전류(I_{SC}) 파형보다 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 1차측 전류와 2차측 전류의 180° 위상차로 인하여 선로전류($I_{FCL} = -I_1 + I_{SC}$)가 작게 나타나고 있기 때문이다. 따라서 선로전류(I_{FCL})는 저항형 전류제한기보다 작은 $11.5[A_{peak}]$ 를 나타내고 있고 1주기 후 전류는 $6.5[A_{peak}]$ 로 감소하여 효과적으로 전류제한이 이루어지고 있다. 초기제한전류(I_{ini})는 $5.6[A]$ 에서 전류제한이 이루어지고 있고, 응답속도는 가장 빠른 $0.59[ms]$ 를 나타내었다.

그림 3은 자속구속형 전류제한기의 감극과 가극의 경우 초기사고전류와 초전도 소자의 임계전류비(I_q/I_{ini})에 따른 인덕턴스 비(L_2/L_1)의 변화를 나타낸 것이다. 가극결선의 경우 1차측 코일에 비해 2차측 코일의 권선수가 감소할수록 초기제한 전류는 감소하기 때문에 사고전류제한 특성이 우수해 지고 초전도 한류기의 동작시간이 빨라진다는 것을 알 수 있다. 감극결선에서는 가극결선과 반대로 동작되고 있다. 즉 2차측 코일의 권선수가 감소할수록 초기제한

전류는 증가하기 때문에 사고전류제한 특성이 떨어지고 초전도 한류기의 동작시간이 느려진다. 이것은 1차측 코일과 2차 코일의 결선방향에 따라 사고시 철심코어에서 발생하는 쇄교자속의 증감 때문에 발생함을 알 수 있고, 인덕턴스 비의 변화는 자속구속형 전류제한기의 동작특성에 영향을 줄 것으로 예상할 수 있다.

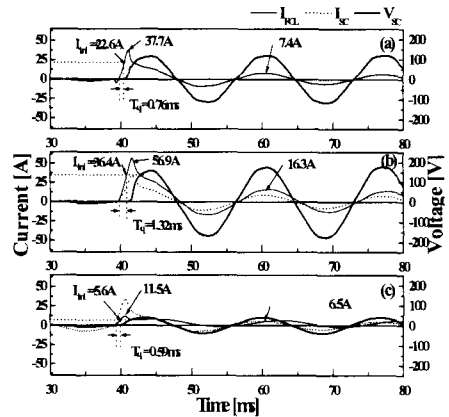


그림 2. 저항형과 자속구속형 SFCL의 전압·전류 곡선 ($N_1:N_2=63:42$)

(a) 저항형 (b) 감극결선 (c) 가극결선

Fig. 2. V-I curves of the resistive type and the flux-lock type SFCLs ($N_1:N_2=63:42$) (a) resistive type (b) subtractive winding (c) additive winding

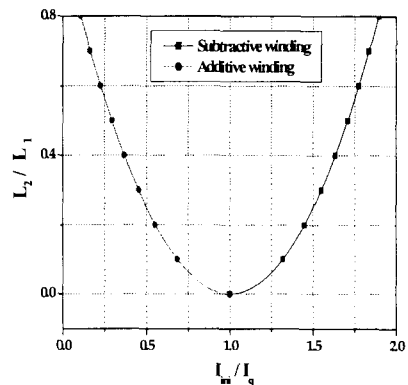


그림 3. 자속구속형 감극 결선과 가극결선의 L_2/L_1 에 대한 I_{ini}/I_q 의 특성

Fig. 3. Characteristics between L_2/L_1 and I_{ini}/I_q on the flux-lock type SFCL with the subtractive and additive polarity windings

결선방향에 따른 자속구속형 전류제한기의 켄시 회복 의존도 해석

그림 4는 저항형과 자속구속형 전류제한기의 결선에 따른 소비전력을 비교하여 보여주고 있다. 사고 발생 후 소자가 부담하는 소비전력은 첫 주기에서 가장 높게 나타나고 있으며, 두 번째 주기부터 점점 감소하고 있다. 자속구속형 감극 결선의 경우 소비전력이 높게 나타나고 있고, 가극 결선의 경우 소비전력은 작은 값을 나타내고 있다. 이는 자속구속형의 결선형태에 따라 사고 시 초전도 소자가 갖는 부담을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

그림 5는 저항형과 자속구속형 전류제한기의 소비에너지와 회복시간과의 관계를 보여주고 있다. 회복

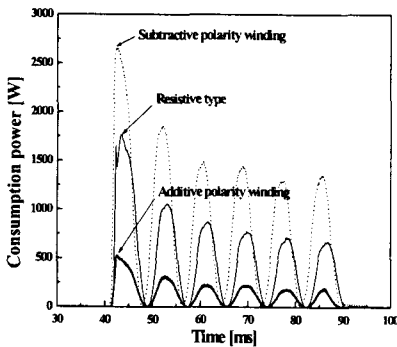


그림 4. 저항형과 결선방향에 따른 자속구속형 SFCL의 소비전력 파형($N_1:N_2=63:42$)

Fig. 4. Consumption power curves of a resistive type and a flux-lock type SFCL according to the winding direction($N_1:N_2=63:42$)

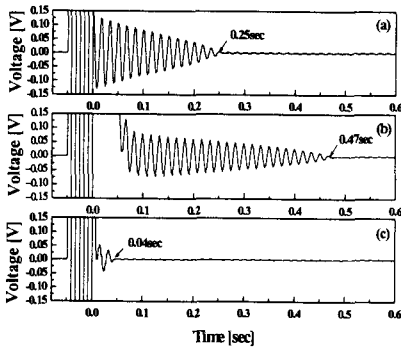


그림 5. 저항형과 결선방향에 따른 자속구속형 SFCL의 회복 특성($N_1:N_2=63:42$)

Fig. 5. Recovery characteristic of a resistive type and a flux-lock type SFCL according to the winding direction($N_1:N_2=63:42$)

시간은 열에너지로 표시할 수 있으며, 열에너지가 소비되는 시간으로 나타낼 수 있다. 열에너지는 $H=0.24I^2Rt[cal]$ 이므로 초전도 소자의 소비에너지인 $w=V_{sc} \cdot I_{sc} \cdot t$ 와 유사함을 알 수 있고, 회복시간은 저항형은 0.25[sec], 감극 결선에서 0.47[sec], 가극결선은 0.04[sec]으로 나타나고 있다. 이로부터 사고 제거 후 초전도 소자의 소비에너지가 클수록 열에너지가 커져 초전도 전류제한기의 회복시간이 길어진다는 것을 알 수 있다.

그림 6은 저항형과 자속구속형 전류제한기의 사고주기에 따른 초전도 소자의 소비에너지와 회복시간의 관계를 그래프로 나타내고 있다. 소비에너지는 감극결선에서 가장 높은 값을 나타내고 있고, 가극결선에서 작은 값을 나타내고 있다. 초전도 소자의 소비에너지는 $w=VIt=I^2Rt$ 으로 나타내며, 초전도 소자에서 발생하는 전압과 깊은 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 초전도 소자에서 발생하는 전압은 감극 결선인 경우 $V_{sc}=V_1+V_2$ 이고, 가극결선인 경우 $V_{sc}=V_1-V_2$ 이기 때문에 가극결선된 전류제한기의 소자 전압이 더 낮다. 그러므로 가극 결선된 자속구속형 전류제한기의 초전도 소자 소비에너지가 더 낮다. 또한 소비에너지는 사고후 정상상태에서 초전도 소자의 회복시간과 비슷한 특성을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 이는 초전도 소자에서 소비되는 에너

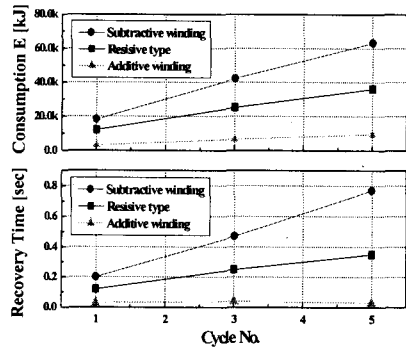


그림 6. 저항형과 결선방향에 따른 자속구속형 SFCL의 사고주기에 따른 소비에너지와 회복시간의 특성 곡선($N_1:N_2=63:42$)

Fig. 6. Consumption power and recovery characteristic of a resistive type and a flux-lock type SFCL according to the winding direction($N_1:N_2=63:42$)

지가 열에너지로서 소비되기 때문이며, 소비에너지가 클수록 회복되는 시간이 크다는 것을 알 수 있다.

발생되는 사고주기가 클수록 초전도 전류제한기의 동작시간은 길어진다. 이는 초전도 소자의 소비 에너지가 증가되며, 회복시간 또한 증가된다는 것을 그림 6을 통해 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 저항형 전류제한기와 자속구속형 전류제한기의 결선방향에 따른 감극 및 가극결선의 전류제한 및 회복특성을 비교·분석하기 위해 전압·전류의 변화를 측정하였다. 초기제한전류(I_{lim})는 자속구속형의 가극결선에서 가장 낮은 값을 나타냈고, 저항형과 자속구속형 감극결선 순으로 나타났다. 또한 초전도 소자의 켄치시간(T_q)은 초기제한전류와 같은 경향을 보이고 있다. 자속구속형 전류제한기의 초기제한전류(I_{lim})와 켄치시간(T_q)이 차이가 있는 것은 선로전류(I_{FCL})와 코일 1의 전류(I_1) 및 초전도 소자전류(I_{sc})가 180° 의 위상차를 가지고 있기 때문이다. 회복특성은 초전도 소자가 갖는 소비에너지에 밀접한 관계가 있다. 초전도 소자의 소비에너지는 결선 형태에 따른 코일의 인덕턴스 비에 의해 결정된다. 자속구속형 전류제한기의 가극결선이 저항형에 비해 초기제한전류, 켄치특성, 회복시간에서 우수한 특성을 나타내었다. 이는 송배전 선로에서 재폐로 시간이 최대 0.8[sec]임을 감안할 때 가극형 자속구속형 전류제한기가 매우 유리할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] S. H. Lim, H. S. Shoi, S. C. Ko and B. S. Han, "DC dual reactor type superconducting fault current limiter using switching operation of YBCO thin films", phys. stat. sol. (c) 2, No. pp1749-1754, 2005.
- [2] H. S. Choi, H. R. Kim, O. B. Hyun, "Operating properties of superconducting fault current limiters based on YBCO thin films", Cryogenics, 41, pp163-167, 2001.

- [3] T. Matsumura, H. Shimizu, Y. Yokomizu, "Design Guideline of Flux-Lock Type HTS Fault Current Limiter for Power System Application", IEEE Trans. Appl. Superconduct., VOL. 11, NO. 1, pp1956-1959, March 2001.
- [4] L. salasoo, A. F. Imece, R. W. Delmerico, and R. D. Wyatt, "Comparison of superconducting fault limiter concepts in electric utility applications", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, No. 2, p. 1079, 1995.
- [5] S. H. Lim, H. G. Kang, H. S. Choi, S. R. Lee, B. S. Han, "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, p. 2056, 2003.
- [6] 오금곤, 한태희, 조용선, 최효상, 최명호, 한영희, 성태현, "전압증가에 따른 자속구속형 초전도 한류기의 전류제한 및 회복특성 분석", 조명 전기설비학회 논문지, 2007년도 9월호 게재예정.

◇ 저자소개 ◇

정수복 (鄭壽福)

1945년 1월 23일생. 1969년 조선대학교 전기공학과 졸업. 1980년 건국대학교 전기공학과 대학원 졸업. 2001년 대한전기학회 광주전남지회 회장. 현재 조선대학교 전기공학과 교수.

Tel : (062)230-7027

Fax : (062)230-7020

E-mail : sbjung@mail.chosun.ac.kr

조용선 (趙鎔善)

1980년 1월 15일생. 2005년 조선대학교 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년~현재 동 대학원 박사과정.

Tel : (062)230-7054

Fax : (062)230-7020

E-mail : cys5144@hanmail.net

최효상 (崔孝祥)

1967년 2월 21일생. 1985년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(석사). 2000년 전북대학교 전기공학과 졸업(박사). 2003년 한전전력연구원 선임연구원. 현재 조선대학교 전기공학과 교수.

Tel : (062)230-7025

Fax : (062)230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

최명호 (崔明鎬)

1965년 6월 8일생. 1992년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001년 3월~현재 광주보건대학교 의료공학과 교수.

Tel : (062)958-7772

Fax : (062)958-7526

E-mail : mhchoi@mail.ghc.ac.kr