

전력시스템 보호를 위한 공극을 이용한 유도형 고온초전도체 한류기의 디자인과 동작특성

장미혜, 이찬주, 주민석, 고태국
연세대학교 전기·컴퓨터공학과

Novel Design and Operational Characteristics of Inductive High-Tc Superconducting Fault Current Limiter to Protection the Power System

Mi-hye Jang, Chan-Joo Lee, Min-seok Joo, Tae-Kuk Ko
Dept. of Electrical and Computer Engineering, Yonsei Univ.

Abstract - A novel prototype of an inductive superconducting fault current limiter with an iron core and an air gap was fabricated and tested. If its impedance is not high enough to limit the fault current, then destructive damage occurs in the power system. We attained a magnetic saturation under the higher current by introducing an air gap in the three-legged magnetic core. The fault current was successfully limited to two times as much as the nominal current without high fault current within 1/4 cycles at a 60 Hz source having an effective voltage of 70 V.

1. 서 론

최근의 전력수요 증가에 따라 전력계통은 송전전압의 고전압화와 송전선의 다중화 관점에서 기술개발이 되어 왔다. 그 결과, 단락사고시의 과전류에 대한 대처가 중요한 문제가 되었다. 일반적으로 전력계통에서 사고전류 또는 단락전류는 보호시스템이 동작할 만큼 높아야하며 그 기준이 잘 정의되어야 한다. 전력수요 증가에 의하여 송전전압의 고전압화와 송배전 시스템의 다중화, 단락 사고 시 사고전류 증가 문제점들이 있으므로 고온 초전도 한류기 연구가 활발히 진행되고 있다. 시스템 내부 결함에 의해서 대용량 전류를 유발하는 단락 전류가 시스템에 발생하였을 때, 전류의 흐름은 대용량의 전류를 증가시킨다. 또한, 전력량의 증가와 송전전압의 고압화에 의한 외부 서지가 전기기기를 통해서 높은 전류가 흐르면서 여러 가지의 손실을 지므로 높은 사고 전류를 제한하기 위해서 다방면으로 초전도 한류기 설계가 제안되어져 왔다[1~8].

또한, 보호시스템이 사고전류를 차단하기 전까지 Bus line이나 회로소자에 사고전류가 흐르므로 전력계통에 보호차원에서 가능한 한 낮아야 한다. 전력계통에서 사고전류의 악 영향은 주로 높은 사고전류가 회로에 흐름으로써 발생하는 열적, 기계적 스트레스이다. 따라서 초전도 한류기를 전력계통에 도입한다면 사고전류를 차단기의 용량 이내로 제한해 주므로 기존의 계통의 교체없이 계통간을 연계하는 것이 가능하여지고 계통의 용량을 증가시킬 수 있어 전력수요의 증가에 손쉽게 대처가 가능하다.

이상적인 초전도 한류기(SFCL : Superconducting Fault Current Limiter)는 정상 조건에서는 전력시스템에 미치는 영향은 무시할 만하다. 초전도 특성에 의해서 제어장치 없이 스스로 작동이 가능하고 임계곡면 이탈로 인해서 초전도성이 파괴되는 순간적인 작동과 그로 인한 저항 발생에 의해서 작동한다. 그러나 자기코어의 포화로써 그들의 임피던스를 감소시키는 것과 같은 여러 가지 문제점들을 해결하기 위한 고온초전도 한류기가 여러 가지 프로토타입을 이용하여 실험되어져오고 있다.[7'8] 특히, 포화에 의한 문제를 해결하기 위해서는

SFCL 인덕터의 단면적 증가와 일차 권선 수의 증가가 필요한데[9], 이것들은 부가적인 비용을 수반한다. 그러므로, SFCL에서 한계적인 임피던스 감소를 피하기 위해서 효율적으로 할 수 있는 대용량 전류에서 효율적인 공극(Air gap) 코어의 자기적인 포화를 피할 수 있는 특성을 가진 인덕터의 새로운 구조 설계를 제안한다.

2. 본 론

2.1 공극형 고온 초전도 한류기

유도형 고온 초전도 한류기는 크게 자기결합형과 자기차폐형이 있고, 차이점은 초전도체와 상전도 권선 간의 구조적 차이이고 동작원리는 차이가 거의 없다. 이러한 모델을 6~22.9kV의 배전 계통에 적용시키려면 초전도체의 지름은 50~90cm정도이어야 한다. 그러나 이러한 전압에서 동작하는 한류기는 코어 포화로 인해 한류 효과가 감소하는 문제점이 발생하는데 이러한 문제점은 코어 단면적을 높이거나 1차 권선 수를 증가시켜서 고온초전도체 지름의 증가나 임계전류밀도 증가를 요구한다. 따라서 이러한 문제점 없는 모델 개발이 필요하게 되었다. 제안된 모델은 공극 코어 구조를 도입함으로써 과도 상태 시 한류효과 감소를 방지할 수 있고, 공극형 고온초전도 한류기는 구리 권선으로 이루어진 1차 권선, 단락된 고온초전도체인 2차 권선과 공극이 도입된 코어로 구성된다. 이 모델의 동작원리를 살펴보면, 정상상태에서는 고온초전도체의 자기차폐효과에 의해 철심에 자속은 침입할 수 없게 되므로 임피던스는 단지 누설 임피던스와 구리 권선에 의한 저항뿐이다. 사고 시는 자속이 증가하여 고온초전도체의 임계 전류를 초과하게 되면 자기차폐 효과가 없어지므로 자속이 철심을 통과하게 되어 임피던스는 크게 증가하게 된다. 만약 자속이 코어 최대 자속밀도가 되면 공극은 고온초전도한류기의 급격한 임피던스 감소를 방지한다. 전력 고압 송전선에서 전력 전송과 분전반 사이 내부 접속과 고압은 이온화를 유발하는 전도체와 그라운드 지지대 타워에 사이 고압은 빛의 산란에 의해서 유도된 전하는 그라운드에 경로를 제공한다. 시스템의 내부 결함은 대용량의 전류를 유발하는 단락 전류가 시스템에 발생하였을 때, 전류 흐름은 전력 고압 송전 망에서 전기적인 노이즈 성분에 의한 서서지로 부터 높은 사고 전류를 제한하기 위해 초전도 한류기 설계가 여러 면으로 시도되어 왔다. 공극이 없는 자기 코어(Magnetic core)를 사용하는 방법은 4배의 저장에너지가 필요할 경우 인덕터(Inductor) 크기가 4배로 증가하게 된다. 자기코어에서 공극을 이용한 방법은 SFCL 인덕턴스(Inductance)를 감소하지만, 포화전류가 발생하는 전류는 증가된다. 또한, 그림 1에서 처럼 병렬

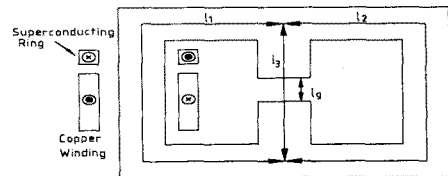


그림 1 SFCL의 자기 시스템
Fig. 1 Magnetic system of SFCL.

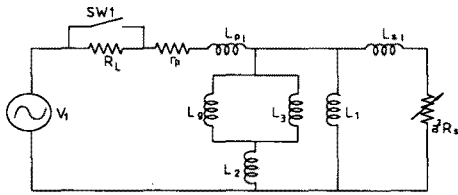


그림 2 SFCL의 등가 회로
Fig. 2 Equivalent circuit of SFCL

로 두개 자기 회로를 구성할 수 있고, 제일차구리 권선과 제이차 초전도체 링으로 구성된 장치는 마그네틱 코어(Magnetic core)를 통하여 자기적으로 커플링(Coupling)되어 있고, 래그중 하나는 결선되어 있고, 다른 래그는 공극(Air gap)을 포함하고 있다. 그리고 정상상태에서는 초전도 링에서 유도된 전류에 자기 코어에서 자속이 제거되어 고온초전도 임피던스(Impedance)는 낮고, 그 임피던스는 주로 누설 자속(Leakage flux)과 제일차 구리 결선 저항에 의해서 결정되어진다. 코어에서 돌발적으로 자속이 발생하여 사고 발생 시에는 초전도 링 전류는 임계전류를 초과하게 되어 초전도체의 자속 유동(Flux flow) 저항이 발생하게 된다. 이것은 초전도체 임피던스의 순시적인 증가에 의한다. 만약 자화 자속이 공극이 없는 자기적인 패스에서 포화 점에 도달하였다면, 자기적인 경로 감소는 다른 공극을 포함하지 않고 자속 경로는 변화시키지 않는다. 기전력 대부분은 공극에서 중심화되어 왔고, 중심 공극은 자기적인 경로와 돌발적인 임피던스 감소를 피한다.

2.2 전자기 모델

그림 1에서 왼쪽 래그는 1차 권선과 2차 권선이 있고, 중심 래그는 공극(Air gap)을 갖는다. 기본적으로 이러한 3차원 자기장 상황에서의 분석은 어렵다. 그래서 설계된 결과에 의해서 자기장은 자기회로를 분석하기 설도록 럼프 인duct(Lumped) 파라메타로 사용하였다. 그림 2에서처럼 자기회로에서 이중성 위상(Topological)원리를 이용하여 직접적으로 전기회로를 유도할 수 있다. 이러한 방법에서 우리는 누전 인덕턴스(Reluctance)와 일차 결선 저항을 무시할 수 있다. 또한 SW1은 폐회로되고, 한류기의 특성은 아래 표1과 같이 표현할 수 있다.

표 1 한류기의 특성

Table I Limiter Characteristics

Parameter	Unit
Superconducting Ring	
ϕ_o (outer diameter)	64 mm
ϕ_i (inner diameter)	51 mm
l_{sc} (mean length)	256.3 mm
S_{sc} (cross section)	32.5 mm ²
Iron Core Reactor	
l_{core} (mean length)	860 mm
l_g (air-gap)	6 mm
S_{core} (cross section)	1225 mm ²
N_1 (variable turn)	120, 130 turns
r_1 (resistance)	0.08 Ω , 0.09 Ω (at R.T)
L_m (inductance)	38.2 mH (at 5 A)

$$I_{lim} = V_1 \cdot \sqrt{(1/a^2 R_s)^2 + (1/\omega L_1)^2} \dots \dots \dots (1)$$

여기서

$$L_1 = N_1^2 \mu_0 \mu_c S_{core} / l_1, \quad L_2 = N_1^2 \mu_0 \mu_c S_{core} / l_2, \\ L_3 = N_1^2 \mu_0 \mu_c S_{air} / (l_3 - l_g), \quad L_g = N_1^2 \mu_0 \mu_c S_{air} / l_g, L_{\mu} \\ L_d \quad L_t = ((L_g / L_3) + L_2) // L_1 \text{ 는}$$

첫번째와 첫번째에서 누설 인덕턴스(Leakage inductance)이다. 그리고 두번째 누설 인덕턴스(Leakage inductance)는 다음과 같은 것에 의존한다. l_1, l_2, l_3, l_g 는 래그의 평균 행로와 에어 갭이고, 다시 표현해서, S_{core}, S_{air} 는 코어의 면적이고, 에어 갭의 면적, V_1 공급 전압, ω 는 각주파수, a 갭은 턴 수 비율, N_1 은 제일차 결선 턴의 수, μ_0 는 자유 공간에서 투자율, μ_c 상대 투자율, 그리고 R_s 는 초전도체 링의 저항이다.

3. 실험순서

MPMG 과정은(10) 그레인(Grain) 바운더리에서 약한 결합 문제 중간 문제에서의, 자속 고정(Flux pinning)을 증가할 수 있는, 그리고 샘플에서 임계전류를 크게 증가할 수 있는 과정이다. 혼합물의 초기 조성은 Y_2BaCuO_5 의 30% $YBa_2Cu_3O_7$ 의 70%이었다. YBCO링은 64mm의 외경과 51mm의 내경 5mm 높이이다. YBCO링의 수송전류는 유도형과 무접촉 방법 이용하여 측정하였다[11]. 샘플의 임계전류는 320~400 A mm이었다. 단락회로 테스트는 60Hz에서 수행되어지고 전력 공급은 효율적인 전압 30~70V과 저항 부하는 18 Ω 이었다. SFCL는 턴에서 작은 변화를 허락하기 위해서 첫 번째 결선에서 턴의 시리즈를 갖는다. 두 번째 작동 전류제어에 의해서 120, 130턴을 이용하여 첫 번째 감았다. 초전도 링은 시변 자속과 두개 픽업(Pick-up) 코일의 래그에서 자속의 변화 비율의 래그에서 자속의 변화가 시간 변화율에 의한 전압이 유도되어진 것으로 알려진 시변 자속과 두개의 픽업 코일은 래그에서 자속(Flux)의 변화의 시간 비율에 의한 유도된 전압으로 알려진 래그에서 위치되고 유도된 전류를 측정하기 위한 레고웬스키(Rogowski) 코일을 이용하는 래그의 한 면에서 배열되어진다. 사고 조건을 사고 각 제어에서 시뮬레이션하기 위해서는 트라이앵글의 구성은 부하에 병렬로 연결된다. 트라이앵의 사고 각으로써, 사고 순시의 다양한 각으로써 실행되어진다.

4. 결과 및 토의

에어 갭 코어를 이용한 SFCL의 단락 회로의 작동은 그림 7에서 보는 것과 같다. 회로 전류와 전압 하강은 SFCL의 터미널의 횡단면이다. 그림 3에서 보여진 것과 같은 SFCL, 픽업 값은 18A, 70V으로 표현되고 사고 각은 35° 이다. 회로에서 전류의 흐름은 사고동안에 어떤 값으로 제한되어진다. 사고 전류의 크기는 에어 갭(Air gap)을 갖지 않는 자기 패스에서 포화 이상의 자기 자속(Flux)의 감소에 따라 가능하게 점진적으로 감소되어진다. 그리고 초전도 링에서 저항 증가도 마찬가지로, 픽업(Pick-up) 코일에서 전압은 중심 래그(Lag)에서 위치하고 그림 4, 그림5에서 보여진 것과 같다.

오른쪽 픽업(Pick-up) 코일 증가에서는 전압의

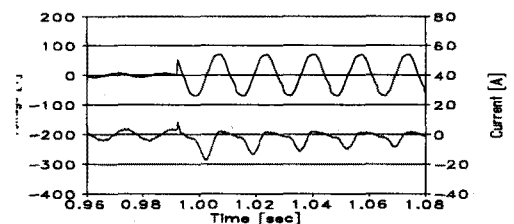


그림 3 단락 회로 파형 형태 ($V_1=70V, \phi=135^\circ$).
Fig.3. Short-circuit wave form ($V_1=70V, \phi=135^\circ$).

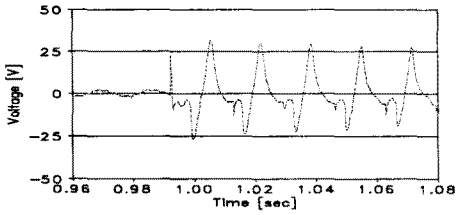


그림 4 중심 픽업 코일에서 전압 하강.
Fig. 4 Voltage drop in central pick-up coil.

점진적인 중심 픽업 코일에서 전압의 크기는 에어 갭이 없는 자기 경로에서 포화 점 감소 이상의 자속(Flux)에 따라 감소한다. 단락 회로 테스트에서 전류와 전압 두 개의 조그만 피크는 SFCL이 두 개의 병렬 자기적인 특성이다. 에어 갭(Air gap)이 없는 자기적인 경로에서 자속(Flux)가 포화 점에 도달하였을 때, 에어 갭(Air gap)이 없는 자기 경로의 리액턴스(Reluctance)는 에어 갭을 유도하는 또 다른 에어 갭 보다는 작다. 에어 갭(Air gap)을 포함하는 자기 경로를 통해서 패스하는 자속(Flux) 패스로써, 중심 픽업 코일에서의 전압은 작은 피크로써 나타난다. 피크 값 500A 초전도 링에서 퀴치 과정이 초기화되어지는 것을, 그림 6에서 나타난 것과 같다. 초전도 링 전류 순시 값 감소는 초전도 링의 임계전류가 초과되어질 때 자속 유동 (Flux Flow)의 온셋(Onset)에 따라 발생한다. 초전도 링 전류에서 감소는 자속 유동 (Flux Flow) 저항을 야기하는 저항 가열에 의해서 가능하여진다. 초전도 저항은 두 개의 상태에서 일어난다. 단락 회로 테스트에서 전류와 전압 두 개의 조그만 피크는 SFCL 이 두 개의 병렬 자기적인 특성이다. 에어 갭(air gap)이 없는 자기적인 경로에서 자속이 포화 점에 도달하였을 때, 에어 갭(Air gap)이 없는 자기경로의 리액턴스(Reluctance)는 에어 갭(Air gap)을 유도하는 또 다른 에어 갭 보다 작다. 에어 갭을 포함하는 자기 경로를 통해서 패스하는 자속(Flux) 패스로써, 중심 픽업(pick-up) 코일에서 전압의 작은 값들은 피크로써 나타난다. 피크 값 500A에서 초전도 링에서의 퀴치(Quench) 과정은 초기화되어지고, 그림 6에서 보여진다. 초전도 링 전류의 순시 값의 감소는 초전도 링의 임계전류가 초과되어질 때 자속 유동 (Flux Flow)의 Onset에 따라 발생한다. 초전도 링 전류에서 감소는 자속 유동(Flux Flow) 저항을 야기하는 저항 Onset에 따라 발생한다. 초전도 링 전류에서 감소가 나타난다.

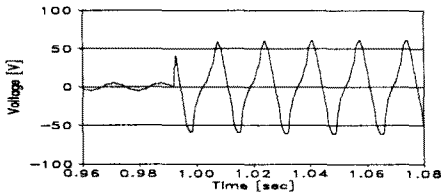


그림 5 오른쪽 픽업(pick-up) 코일에서의 전압 하강
Fig. 5 Voltage drop in right pick-up coil.

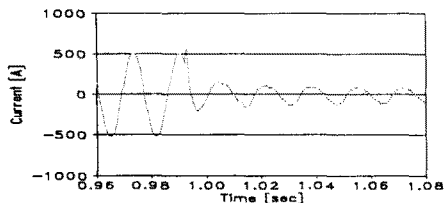


그림 6 초전도체 링에서 유도전류
Fig. 6 Induced current in superconducting ring.

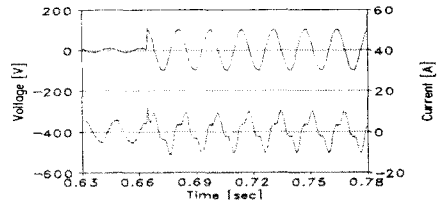


그림 7 단락회로일 때의 파형형태 ($V_1=100V$, $\varphi=90^\circ$).
Fig. 7 Short-circuit wave form ($V_1=100V$, $\varphi=90^\circ$).

5. 결 론

SFCL의 기본 개념은 코어에서 에어 갭이 발 전되어져 왔던 것의 기초한다. 새로운 SFCL의 제한 행동은 자기 코어에서 포화가 순시적으로 발생하는 것을 피하기 위해서 1/4 싸이클 이내에 성공적으로 수행할 수 있다. 초전도 링에서의 퀴치 과정은 SFCL의 한계 작동에 관한 효과를 갖는다. 그러므로, 초전도 링에서 퀴칭(Quench)을 정확하게 분석하는 것이 필요하다. 또한, SFCL 비율 이상의 크기에, 초전도 링의 임계전류 증가는 정상전류에서 보다 큰 테스트 회로에서 흘러도 좋도록 요구되어진다.

[참 고 문 헌]

- [1] Yu.A.Bashkirov, L.S. Fleishman, T. Yu. Patsa-yeva, A.N.Soboler, and A.B.Vdovin, "Current-limiting reactor based on High-Tc superconductors," IEEE Trans. on magn., Vol. 27, pp.1089-1092, Mar. 1991.
- [2] L.S.Fleishman, Y.Brissette, and J.R. Cave, "Design considerations for an inductive High Tc superconducting fault current limiter," IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 3, pp.570-573, Mar. 1993.
- [3] V.M.Vladimir, Vladimir L.Sokolovsky, M.slomin, Gennady E. Shter, and Gideon S. Grader, "Testing of an inductive current-limiting device based on High-Tc superconductors," IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 3, pp.3033-3036, Sep. 1993.
- [4] L.Salasoo, A. F. Imece, R. W. Delmerico and R. D. Wyatt, "Comparison of Superconducting Fault Current Limiter Concepts in Electric Utility Applications", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, pp.1079-1082, June 1995.
- [5] J. X. Jin, C. Grantham, H. K. Liu and S. X. Dou, "Prototype Fault Current Limiter with a High Tc Superconducting Coil", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, pp.1051-1054, June 1995.
- [6] T.Ikeami, Yukihiko Yamagata, Kenji Ebihara, "Application of High-Tc superconductor to current limiting devices," IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 3, pp.566-569, Mar. 1993.
- [7] W. Paul, T. Baumann, J. Rhyner and F. Platter, "Tests of 100kW High Tc Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, pp.1059-1062, June 1995.
- [8] D.W.A.Willen and J.R.Cave, "Short Circuit Test Performance of Inductive High Tc Superconducting Fault Current Limiters", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, pp.1047-1050, June 1995.
- [9] Minseok 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.
- [10] M. Murakami, "Processing of bulk YBaCuO," Superconduct. Sci. Technol., Vol.5, pp.411-429, 1992.
- [11] R. Spyker, G. Kozolowski, and C.E. Oberly, "Measurement of transport critical current of Y-Ba-Cu-O using an inductive method," IEEE Trans. on Magn., Vol. 27, pp.1093-1096, Mar. 1991.