

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 인덕턴스 변화에 따른 전류제한 특성 분석

Analysis of Fault Current Limiting Characteristics due to Ratio of Inductances between Coil 1 and coil 2 in a Flux-lock Type SFCL

박충렬¹, 임성훈^{2,a}, 박형민³, 최효상³, 한병성¹

(Chung-Ryul Park¹, Sung-Hun Lim^{2,a}, Hyoung-Min Park³, Hyo-Sang Choi³, and Byoung-Sung Han¹)

Abstract

A flux-lock type SFCL consists of two coils, which are wound in parallel each other through an iron core, and a HTSC thin film connected in series with coil 2. If the current of the HTSC thin film exceeds its critical current by the fault accident, the resistance generated of the HTSC thin film, and thereby the fault current can be limited by the impedance of the flux-lock type SFCL. The amplitude of fault current can be set by the impedance of the flux-lock type SFCL. In this paper, we investigated the variance of the limiting current due to the ratio of inductances between coil 1 and coil 2 in the flux-lock type SFCL through the computer simulations and short circuit tests. In addition, both the simulation results and experimental ones were compared each other. From the comparison of both the results, the simulation results agreed well with the experimental ones.

Key Words : The flux-lock type SFCL, HTSC thin film, Critical current, Fault current

1. 서론

지속적인 전력 수요의 증가에 따라 발전설비의 증설과 전력계통의 송전 용량이 증대되면서 계통의 고장전류가 증가하게 되었다. 이러한 고장전류를 극복하기 위한 방안으로 전력계통에 차단기를 설치하여 사용하여 왔지만, 현재 전력계통에 설치된 대다수의 차단기가 차단내력을 상회하게 되어 사고발생시 사고전류에 의한 차단기의 소손은 물론 인접 전력설비의 안정도와 신뢰성을 저하시키게 되었다. 따라서 전력계통의 고장전류가 차단기의 차단내력을 상회하게 되면 차단내력이 보다 큰

차단기로 교체하거나, 고장전류가 차단기의 차단내력 이하가 되도록 직렬리액터를 설치 또는 고 임피던스 기기를 채용하여 고장전류 억제하는 방안이 검토되고 있다. 전자의 경우, 교체비용, 차단기 구성요소 및 기술적인 제약의 문제를 안고 있다. 후자의 경우에는 전력손실 및 전압강하, 넓은 설치공간이 요구되는 문제를 안고 있다. 증가되고 있는 고장전류를 극복하기 위한 그 이외의 방법으로는 파워퓨즈 사용과 모션분리 및 선로분리 방안이 있다. 파워퓨즈의 경우에는 수동교체의 비효율성, 모션분리 및 선로분리 방안의 경우에는 인접 전력계통의 과부하, 전력계통의 안정도 저하 및 송전의 유연성 결여 등의 문제점을 안고 있다[1].

최근 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 고온초전도체를 이용한 전류제한기가 제안되었고, 여러 형태의 고온초전도 전류제한기에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[2-9]. 그 중에서 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 사고전류가 코일과 소자에 양분되어 흐르기 때문에 고온초전도 소자 파손의 우려가 적고, 각 코일의 인덕턴스 비를 달리하

1. 전북대학교 전기공학과
(전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14)
2. 전북대학교 공업기술연구소
3. 조선대학교 전기공학과
a. Corresponding Author : superlsh73@hanmail.net
접수일자 : 2005. 5. 17
1차 심사 : 2005. 6. 27
심사완료 : 2005. 8. 2

여 제한되는 전류의 크기 조절이 가능하며, 단위소자의 동전전류 및 한류저항이 증가되는 구조로 되어 있어 단위소자의 수를 줄일 수 있기 때문에 저항형 고온초전도 전류제한기의 단점을 보완할 수 있다. 또한, 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 링이나 튜브형태의 고온초전도 소자대신 벌크나 YBCO 박막형태로 제작된 저항형 한류소자를 사용하기 때문에 유도형 고온초전도 전류제한기에 비해 고온초전도체의 제작이 용이한 장점을 갖는다.

본 논문에서는 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로로부터 제한기 임피던스 및 각 코일의 전류를 유도한 다음, 설계파라미터에 따른 제한 임피던스 및 전류제한 특성을 분석하였다. 또한, 실험을 통해 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 인덕턴스 변화에 따른 사고전류제한 특성을 분석하였다. 마지막으로, 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 설계파라미터에 따른 모델링 결과와 실험으로부터 얻어진 전류제한 특성을 비교·분석하였다.

2. 구조 및 동작원리

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조는 그림 1과 같이 강자성체 철심에 코일 1과 코일 2가 각각 병렬 연결되어 있고, 고온초전도 소자(YBCO 박막)는 코일 2에 직렬 연결되어 있다.

정상 동작시 고온초전도 소자 양단전압은 0이므로 코일 1과 코일 2의 양단 전압은 같게 되며 이때, 각 코일에서 유기되는 자속은 서로 상쇄된다. 결국, 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 임피던스는 나타나지 않으며 계통상 단락선로처럼 동작한다.

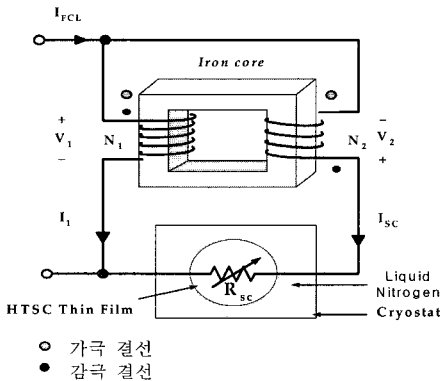


그림 1. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조.
Fig. 1. Scheme of flux-lock type SFCL.

사고시 사고전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 초과하면 소자의 퀀치 발생으로 저항(Rsc)이 발생하고 이로 인해 전압(Vsc)이 유기된다. 따라서 코일의 쇄고 자속은 시간에 따른 변화가 생기게 되고 각 코일에 전압이 유기되어 발생된 제한기의 임피던스에 의해 사고전류가 제한된다.

3. 등가회로 분석

그림 1의 구조로부터 그림 2의 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로를 유도할 수 있다. 그림 2의 등가회로로부터 식 (1)에서 식 (3)과 같이 각 코일의 전류와 제한기 임피던스에 관한 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{I_{SC}}{I_{FCL}} = \frac{j\omega L_1 \pm j\omega M_{12}}{R_{SC} + j\omega L_1 + j\omega L_2 \pm 2j\omega M_{12}} \quad (1)$$

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{j\omega L_2 \pm j\omega M_{12} + R_{SC}}{R_{SC} + j\omega L_1 + j\omega L_2 \pm 2j\omega M_{12}} \quad (2)$$

$$Z_{FCL} = \frac{\omega^2 M_{12}^2 - \omega^2 L_1 L_2 + j\omega L_1 R_{SC}}{R_{SC} + j\omega L_1 + j\omega L_2 \pm 2j\omega M_{12}} \quad (3)$$

여기서 $M = K\sqrt{L_1 L_2}$ 이고, (+), (-) 부호는 1, 2차 코일에 의한 자속의 증감에 따라 결정된다. 식 (1), (2), (3)에서 $R_{sc} = 0 \sim 20 \Omega$, $L_1 = 0 \sim 0.1$ H 범위까지 각각 변화시키고 결합계수 $K=1$, L_2 는 0.01 H로 설정하여 각각 설계 파라미터에 따른 각 코일의 전류와 제한기 임피던스의 관계를 도식화하여 그림 3, 4, 5에 나타내었다.

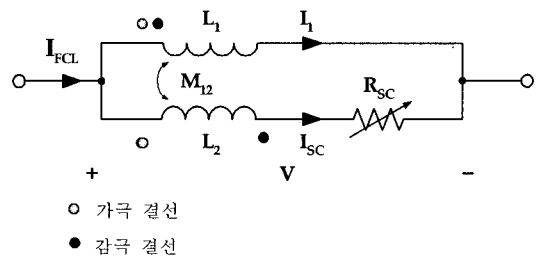
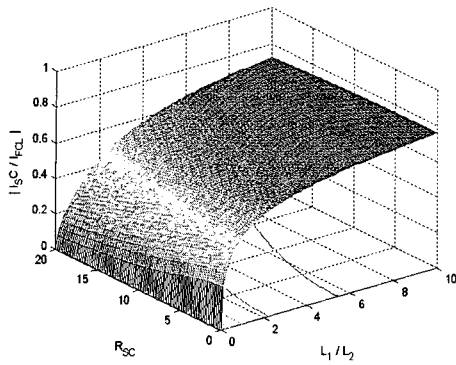
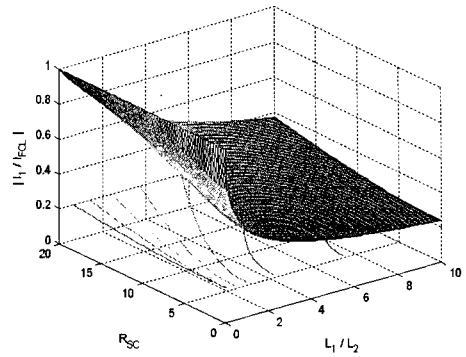


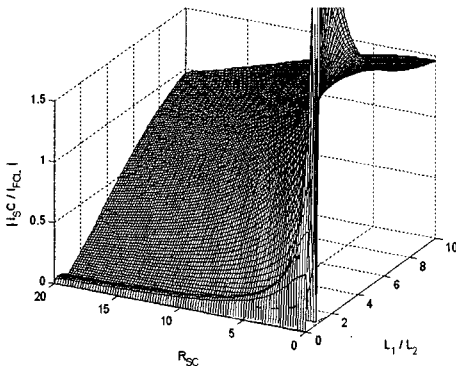
그림 2. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로.
Fig. 2. Equivalent circuit of flux-lock type SFCL.



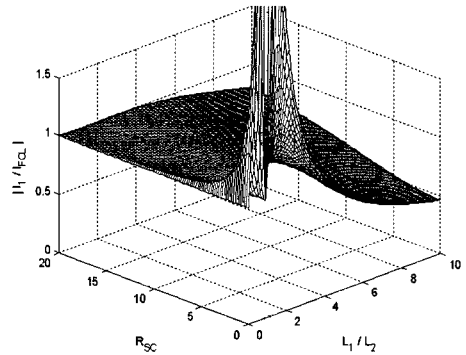
(a) 감극 결선



(a) 감극 결선



(b) 가극 결선



(b) 가극 결선

그림 3. R_{sc} , L_1 , L_2 와 $|I_{sc}/I_{FCL}|$ 의 관계.

Fig. 3. Dependence of $|I_{sc}/I_{FCL}|$ on R_{sc} , L_1 , L_2 (a) subtractive polarity winding and (b) additive polarity winding.

그림 3은 고온초전도소자의 저항(R_{sc})과 코일의 인덕턴스 비(L_1/L_2)에 따른 고온초전도소자에 흐르는 전류와 선로전류의 비(I_{sc}/I_{FCL})를 나타낸 것이다. 고온초전도 소자에 발생된 저항(R_{sc})이 증가하면 결선방향에 관계없이 고온초전도소자에 흐르는 전류와 선로전류의 비(I_{sc}/I_{FCL})는 감소하고, 코일 1의 인덕턴스와 코일 2의 인덕턴스 비(L_1/L_2)가 증가할수록 고온초전도소자에 흐르는 전류와 선로전류의 비(I_{sc}/I_{FCL})는 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 고온초전도소자의 저항(R_{sc})과 코일의 인덕턴스 비(L_1/L_2)에 따른 코일 1에 흐르는 전류와 선로전류의 비(I_1/I_{FCL})를 나타낸 것이다. 그림 3의 결과와는 반대로 고온초전도 소자저항(R_{sc})이

그림 4. R_{sc} , L_1 , L_2 와 $|I_1/I_{FCL}|$ 의 관계.

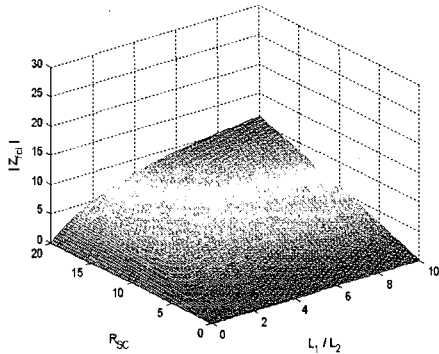
Fig. 4. Dependence of $|I_1/I_{FCL}|$ on R_{sc} , L_1 , L_2 (a) subtractive polarity winding and (b) additive polarity winding.

증가할수록 코일 1에 흐르는 전류와 선로전류의 비(I_1/I_{FCL})는 증가하고, 코일 1의 인덕턴스와 코일 2의 인덕턴스의 비(L_1/L_2)가 증가할수록 고온초전도소자에 흐르는 전류와 선로전류의 비(I_{sc}/I_{FCL})는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)와 그림 4(b)에서 고온초전도소자의 저항(R_{sc})이 0이고, 코일 1과 코일 2의 인덕턴스의 비(L_1/L_2)가 거의 1에 가까울 때, 고온초전도소자에 흐르는 전류와 선로전류의 비(I_{sc}/I_{FCL}), 코일 1에 흐르는 전류와 선로전류의 비(I_1/I_{FCL})가 매우 큰 값을 나타내는데 이는 식 (1), (2)의 분모 항이 0이 되기 때문이다. 이러한 결과로부터 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 설계시 코일 1과 코일 2의 인덕턴스 비가 1이 되지 않도록 설계해야 할 것이다.

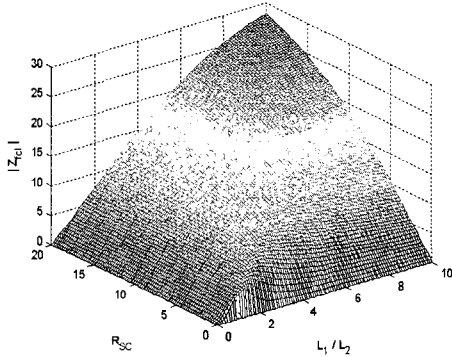
4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험장치 구성 및 실험방법

자속구속형 전류제한기의 사고전류제한을 위한 실험회로도에는 그림 6과 같이 나타난다. V_s 는 60 V_{rms}로 인가된 전원 전압이고 R_{in} 은 전류변화를 측정하기 위한 1 Ω의 기준저항을 나타내며 부하저항 R_L 은 50 Ω으로 설정하였다. 실험에서 전류제한소자로 사용된 고온초전도 YBa₂Cu₃O₇박막의 제원을 표 1에 나타내었다. 코일 1과 코일 2를 감·가극으로 결선한 후 스위치 SW₁을 닫아 회로에 전압을 인가했다. 회로에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하지 않았기 때문에 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 단락선로처럼 동작했다. 스위치 SW₂를 닫아 단락사고를 발생시키면 고온초전도 소자에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하게 되고 켄치가 발생했다. 이때 회로에 흐르는 선로전류(I_{FCL}), 코일 1에 흐르는 전류(I_1), 초전도소자에 흐르는 전류(I_{sc}), 코일 1, 2의 양단전압(V_1, V_2)과 초전도소자 양단전압(V_{sc})을 측정하였다. 또 코일 1과 2의 턴수를 변화시켜 위와 동일한 실험을 수행하였다.



(a) 감극 결선



(b) 가극 결선

그림 5. R_{sc} , L_1 , L_2 와 $|Z_{FCL}|$ 의 관계.

Fig. 5. Dependence of $|Z_{FCL}|$ on R_{sc} , L_1 , L_2 .
(a) Subtractive polarity winding and (b) Additive polarity winding.

그림 5는 고온초전도소자의 저항(R_{sc})과 코일의 인덕턴스 비(L_1/L_2)에 따른 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 제한임피던스($|Z_{FCL}|$)를 나타낸 것이다. 제한기의 임피던스($|Z_{FCL}|$)는 결선방향에 관계없이 고온초전도소자의 저항(R_{sc})과 코일의 인덕턴스 비(L_1/L_2)에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 제한임피던스($|Z_{FCL}|$)의 크기는 감극결선의 경우보다 가극결선의 경우가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 가극결선의 경우가 감극결선의 경우보다 전류제한 측면에서 보다 이점이 있을 것으로 사료된다.

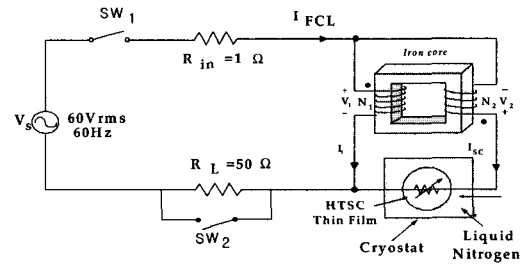


그림 6. 실험 회로 구성도.

Fig. 6. Diagram of the circuit for experiment.

표 1. YBCO박막의 제원.

Table 1. Specification of YBCO thin film.

Parameter	Value	Unit
소자 직경	2	inch
스트립폭	2	mm
전체길이	420	mm
YBCO층 두께	0.3	um
금층 두께	0.1-0.2	um
임계전류	17	A
임계 온도	87	K

4.2 실험 결과 및 고찰

그림 7과 8은 자속구속형 고온초전도 전류제한기를 감극결선시 사고발생 후 5주기 동안 전류, 전압 파형을 나타낸 그림이다. 그림 7(a)와 그림 8(a)에서 코일 1에 흐르는 전류(I_1)와 고온초전도소자에 흐르는 전류(I_{SC})의 합으로 나타나는 선로전류(I_{FCL})는 사고 직후 고온초전도소자에 흐르는 전류(I_{SC})가 17 A를 넘어는 순간($Q_T=59.65, 59.82$ ms) 제한되기 시작한다. 이때의 선로전류(I_{FCL})를 제한기 초기 동작전류($I_{lim1} = 21.72, 29.65$ A)라 하며, 이 전류는 각각 최대 41.42 A, 51.17 A까지 상승하다 3

주기 이후 9 A, 11 A이하로 감소하게 되었다. 그림 7(b)와 그림 8(b)에서 고온초전도 소자 양단전압(V_{SC})은 고온초전도소자의 켄치발생 후 코일 1의 전압(V_1)과 코일 2의 전압(V_2)의 합으로 나타나며 3주기 이후 안정된 파형을 나타내고 있다.

그림 9는 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 감극결선시 사고발생 이후 코일 2의 턴 수 변화에 따른 고온초전도소자에 발생된 저항(R_{SC})을 나타내고 있다. 코일 2의 턴수가 증가함에 따라 고온초전도 소자에 발생된 저항의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

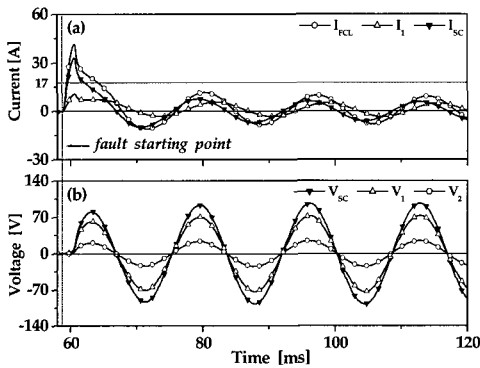


그림 7. 감극 결선시 전류전압 곡선($N_1=63, N_2=21$).
Fig. 7. Voltage and current waveforms after a fault happens in subtractive polarity winding (a) Current (b) Voltage ($N_1=63, N_2=21$).

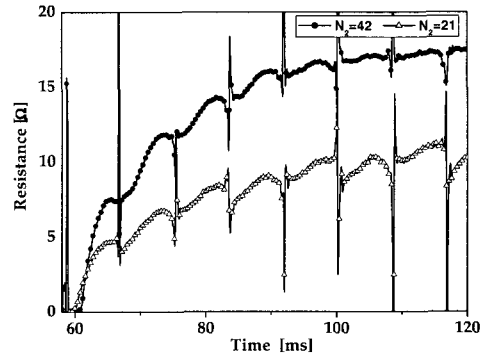


그림 9. 감극 결선시 저항 발생곡선.
Fig. 9. Resistivity curve generated after a fault happens in case of subtractive polarity winding.

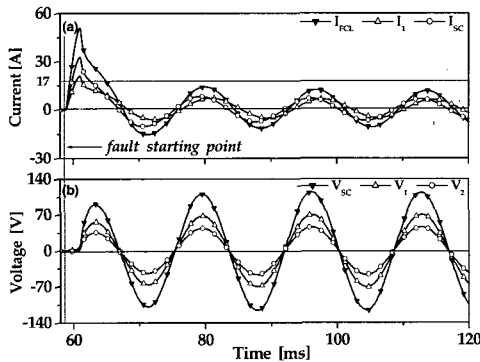


그림 8. 감극 결선시 전류전압 파형($N_1=63, N_2=42$).
Fig. 8. Voltage and current waveforms after a fault happens in case of subtractive polarity winding (a) Current (b) Voltage ($N_1=63, N_2=42$).

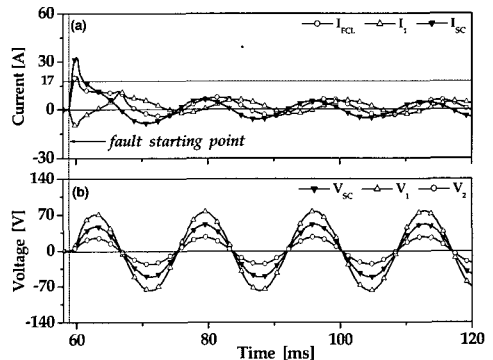


그림 10. 가극 결선시 전류전압 파형($N_1=63, N_2=21$).
Fig. 10. Voltage and current waveforms after a fault happens in case of additive polarity winding. (a) Current (b) Voltage ($N_1=63, N_2=21$).

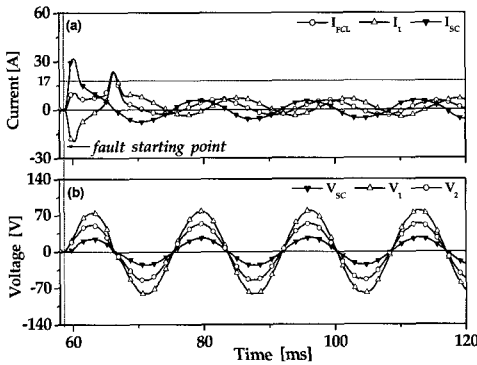


그림 11. 가극 결선시 전류전압 파형($N_1=63, N_2=42$).
 Fig. 11. Voltage and current waveforms after a fault happens in additive polarity winding. (a) Current (b) Voltage ($N_1=63, N_2=21$).

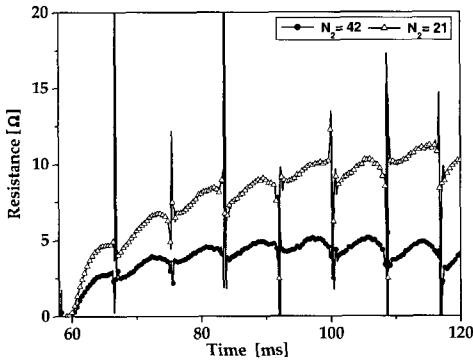


그림 12. 감극 결선시 저항 발생곡선.
 Fig. 12. Resistivity curve generated after a fault happens in case of additive polarity winding.

그림 10과 그림 11은 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 가극결선시 사고발생 후 5주기 동안의 전류 및 전압파형을 보여주고 있다. 그림 10(a)와 11(a)에서 선로전류(I_{fcl})는 고온초전도소자에 흐르는 전류(I_{sc})와 코일 1에 흐르는 전류(I_1)의 차로 나타나며, 제한기 초기 동작전류(I_{lim})는 각각 11.69 A, 5.52 A이다. 사고발생 후 선로전류(I_{fcl})의 최대 피크의 크기는 각각 20.75 A, 10.41 A로 나타나다 3 주기 이후 5 A, 3 A이하로 감소한다. 그림 10(b)와

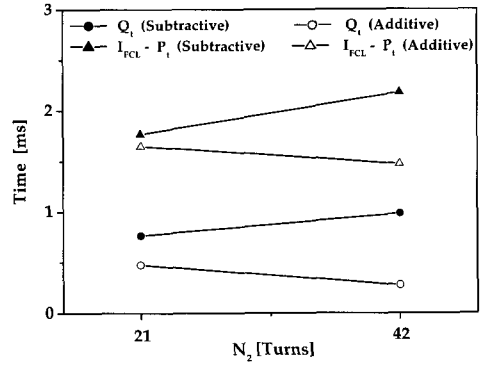


그림 13. 사고전류의 초기제한시점 및 최대 피크 도달 시간.
 Fig. 13. The arrival time of the initial limiting point and the 1st peak value of fault current after a fault happens.

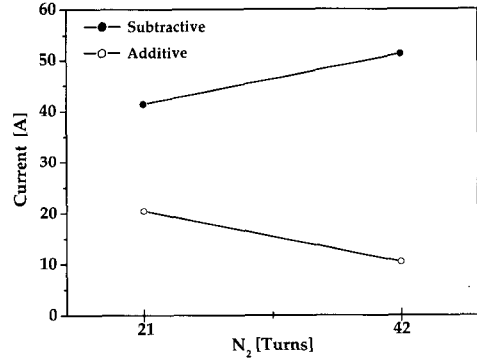


그림 14. 선로전류의 첫 번째 피크 크기.
 Fig. 14. The 1st peak value of line current.

그림 11(b)에서 고온초전도소자 양단전압(V_{sc})은 고온초전도소자의 켄치발생 후 코일 1의 전압(V_1)과 코일 2의 전압(V_2)의 차로 나타나며 3주기 이후 안정된 파형을 나타내고 있다.

그림 12는 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 가극결선시 사고발생 이후 코일 2의 턴 수 변화에 따른 고온초전도소자에 발생된 저항(R_{sc})을 나타내고 있다. 고온초전도소자에 발생된 저항은 감극결선의 경우와는 반대로 코일 2의 턴수가 증가함에 따라 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

그림 13은 감 가극 결선시 인덕턴스 변화에 따

른 사고발생 후 임피던스 발생으로 초기 선로전류 (I_{FCL})가 제한되기까지 시간(Q_T)과 선로전류의 첫 번째 피크까지 도달하는데 걸린 시간($I_{FCL}-P_T$)을 나타낸 것이다. 감극결선시 코일 2의 인덕턴스가 증가하면 선로전류가 제한되는 시간과 첫 번째 피크값까지 걸린 시간은 증가된다. 그러나 가극결선시 코일 2의 인덕턴스가 증가하면 선로전류가 제한되는 시간과 첫 번째 피크값까지 걸린 시간은 감소한다. 또한 동일 조건에서 감극결선시보다 가극결선시가 작은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

그림 14는 감 가극 결선시 선로전류의 첫 번째 피크의 크기를 나타낸다. 코일 2의 인덕턴스가 증가할수록 감극결선시에는 선로전류의 첫 번째 피크의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있고, 이와는 반대로 가극결선시에는 감소되는 것을 확인할 수 있다. 결국, 그림 13과 그림 14의 결과들로부터 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 코일 1과 코일 2를 가극으로 결선할 경우 전류제한 특성이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 동작특성과 등가회로를 분석하고, 등가회로에서 얻은 결과를 바탕으로 각 설계파라미터에 따른 각 코일의 전류와 제한기 임피던스의 변화를 살펴 보았다. 이를 바탕으로, 실제 자속구속형 고온초전도 전류제한기를 설계, 제작하여 실험을 통해 동일한 결과를 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 김준환, 이강완, “전력계통, 고장전류 증대와 대응방안”, 전기저널, 1권, 2호, p. 19, 1998.
- [2] 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.
- [3] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, “차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시뮬레이션”, 전기학회논문지, 48C권, 3호, p. 173, 1999.
- [4] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시들, “15 kVA 급 박막형 초전도 전류제한기의 한류특성”, 전기전자재료학회논문지, 13권, 12호, p. 1058, 2000.
- [5] 조동원, 박경국, 김동원, 정길도, 한병성, “고온초전도 전류제한기용 후막의 특성 연구”, 전기전자재료학회논문지, 11권, 12호, p. 1139, 1998.
- [6] 김태중, 강형구, 고태국, “유도형 고온초전도 한류기용 prototype 직류 리액터의 설계 및 제작”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 12S호, p. 1292, 2003.
- [7] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidit, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies, H.-W. Newmuller, E. Baltzer, and S. Fischer, “Resistive fault current limiters with YBCO films-100 kVA functional model”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, p. 656, 1999.
- [8] M. Yamaguchi, S. Fukui, T. Satoh, Y. Kaburaki, T. Horikawa, and T. Honjo, “Performance of DC reactor type fault current limiter using high temperature superconducting coil”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, p. 940, 1999.
- [9] 박충렬, 임성훈, 박형민, 최효상, 한병성, “자속구속형 전류제한기의 초기 사고전류 제한시점 변화”, 전기전자재료학회논문지, 18권, 3호, p. 269, 2005.