

1×3행렬구조를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기의 자장유무에 따른 켄치특성 분석

論 文
57P-3-24

Analysis on the Quench Characteristics According to Magnetic Field of the Matrix-Type SFCL with 1×3 Matrix Structure

吳金坤* · 趙鎔善** · 崔孝祥†
(Kum-Gom Oh · Yong-Sun Cho · Hyo-Sang Choi)

Abstract - We investigated the quench characteristics accordance with increase of turns and applied voltage of matrix-type superconducting fault current limiter (SFCL) with 1×3 matrixes. The matrix-type SFCL consists of the trigger part to apply magnetic field and the current-limiting part to limit fault current. The fault current limiting characteristics according to the increase of magnetic field and applied voltage were nearly same. This is because the application of magnetic field has not an affect on total impedance of SFCL. When number of turns of reactor increased, the voltage difference between two superconducting units in the current-limiting part according was decreased. The resistance difference generated in two superconducting units also was decreased. Therefore, we confirmed that the differences of critical behaviors between superconducting units by application of magnetic field were decreased. By this results, we could be decided the optimum number of turns of reactor to apply magnetic field.

Key Words : Matrix Type SFCL, Magnetic Field, Trigger Part, Current-Limiting Part

1. 서 론

초전도 한류기는 전력계통의 고장시 발생하는 고장전류를 저감시킴으로써 각종 전력기기 및 보호계전기를 보호할 수 있는 기기이다. 전 세계적으로 저항형, 유도형, 자속구속형, 변압기형 등 많은 형태의 초전도 한류기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-6]. 저항형 초전도 한류기는 가장 간단한 초전도 한류기로서 많은 연구가 진행되었으나, 용량증대 및 초전도 소자의 불균형 켄치 등의 문제점을 지니고 있다[6]. 유도형, 자속구속형, 변압기형 등은 초전도 소자를 코일형태로 제작하거나 변압기를 사용하여야 함으로 초전도 한류기의 규모가 커지거나 용량증대 시 유연성있게 제작하기 힘들다. 본 논문에서 제시하고 있는 매트릭스형 초전도 한류기는 크게 초전도 소자로 자장을 인가하기 위한 trigger part와 사고전류를 제한하기 위한 current-limiting part로 분리할 수 있다. 매트릭스형 초전도 한류기는 초전도 소자의 임계특성 중 임계전류와 임계자장을 조절하여 초전도 소자의 켄치특성을 개선할 수 있다[7].

본 논문에서는 매트릭스형 초전도 한류기의 자장인가를 위한 리액터의 턴수와 인가전압을 조정하여 trigger part와 current-limiting part에 있는 초전도 소자의 켄치특성을 분석하였다[8].

2. 본 론

2.1 매트릭스형 초전도 한류기의 동작원리

그림 1은 1×3구조를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기의 등가회로도를 나타낸 것이다. (a)에 나타난 L_{TC} 는 자장을 초전도 소자에 인가하기 위한 리액터이다. 이 리액터는 그림 1(c)와 같이 trigger 및 current-limiting part에 있는 초전도 소자를 감싸고 있어 리액터에서 발생하는 자장을 인가할 수 있는 구조를 갖고 있다. 인가된 자장은 초전도 소자의 임계특성의 차이를 줄여줌으로서 켄치시 균일한 특성을 보여줄 수 있다.

Trigger part에서 발생하는 전압·전류를 V_{TC} , I_T 라 하고, 두 개의 current-limiting part가 직렬로 연결된 부분에서 발생하는 전압·전류를 각각 V_{C1} , V_{C2} , I_{C1} , I_{C2} 라고 할 때 전체 임피던스(Z_{total})와 제한되는 전류(I_{total})를 다음과 같은 방정식으로 표현할 수 있다. 전류제한을 위한 선트코일 $L_{CLC-A} \sim L_{CLC-B}$ 값과 저항 $R_{CLC-A} \sim R_{CLC-B}$, R_{SC-B} , R_{SC-C} 값은 거의 동일하기 때문에 등가회로도를 분석하기 위해 다음과 같은 가정을 만들었다[8].

1. 전류제한을 위한 선트코일 $L_{CLC-A} \sim L_{CLC-B} = L_{CLC}$ 로 동일
2. 전류제한을 위한 선트저항 $R_{CLC-A} \sim R_{CLC-B} = R_{CLC}$ 로 동일
3. Trigger part의 초전도 소자에서 발생하는 저항 $R_{SC-A} = R_{SCT}$ 로 표기
4. Current-limiting part의 초전도 소자에서 발생하는 저항 R_{SC-B} , $R_{SC-C} = R_{SCC}$ 로 동일
5. Current-limiting part 1과 2의 회로에서 발생하는 전압 $V_{C1} = V_{C2} = V_C$

* 正 會 員 : 朝鮮大學校 電氣工學科 教授 · 工博

** 正 會 員 : 朝鮮大學校 電氣工學科 博士課程

† 교신저자, 正會員 : 朝鮮大學校 電氣工學科 副教授 · 工博

E-mail: hyosang@chosun.ac.kr

接受日字 : 2008年 7月 29日

最終完了 : 2008年 8月 12日

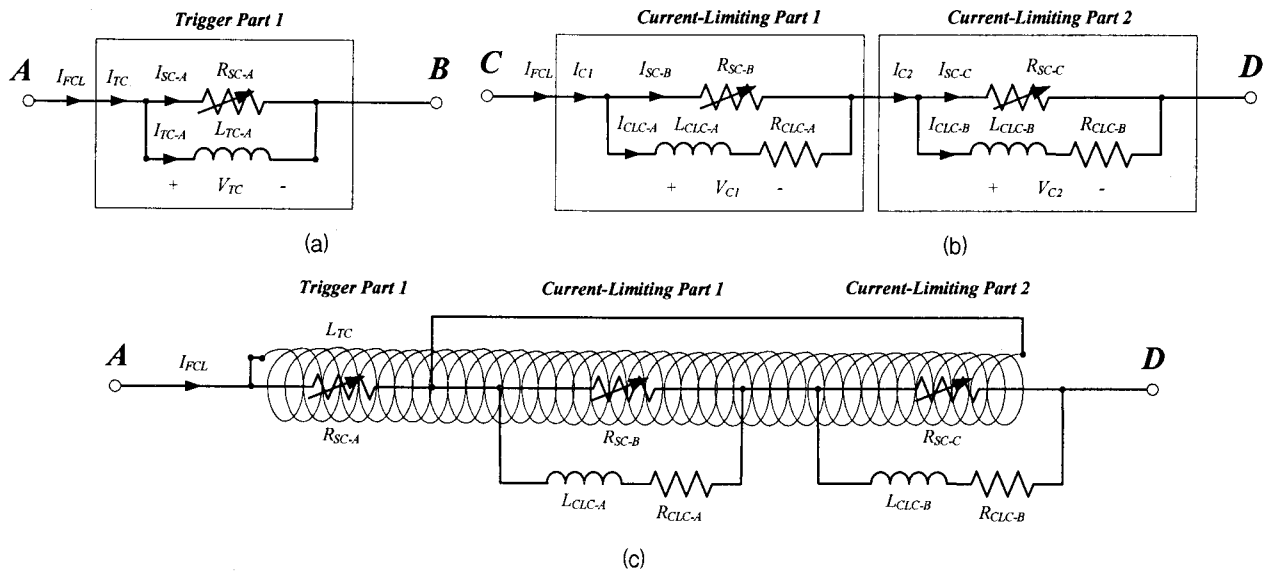


그림 1 1×3구조를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기의 trigger part와 current-limiting part의 등가회로도
 (a) trigger part (b) current-limiting part (c) 개념도

Fig. 1 Equivalent circuits of trigger and current-limiting parts of the matrix-type SFCL with 1×3 matrix
 (a) trigger part (b) current-limiting part (c) conception diagram

$$Z_{total} = \frac{R_{SCT} \cdot j\omega L_{TC}}{R_{SCT} + j\omega L_{TC}} + 2 \left[\frac{R_{SCC}(R_{CLC} + j\omega L_{CLC})}{R_{SCC} + R_{CLC} + j\omega L_{CLC}} \right] \quad (1)$$

$$I_{total} = I_{FCL} = I_{TC} = I_{C1} = I_{C2} = \frac{(R_{SCT} + j\omega L_{TC}) \cdot V_{TC}}{j\omega L_{TC} \cdot R_{SCT}} \cdot V_{TC} = \left(\frac{1}{R_{SCC}} + \frac{1}{R_{CLC} + j\omega L_{CLC}} \right) \cdot V_C \quad (2)$$

식 (1)은 초전도 한류기의 전체임피던스(Z_{total})로서 우변의 첫째항은 trigger part의 임피던스이고, 둘째항은 current-limiting part의 임피던스이다. 사고 전에는 초전도 소자의 영저항 특성을 이용하여 아무런 손실 없이 전류가 흐른다. 사고 후에는 초전도 소자의 켄치로 발생하는 저항으로 인해 사고전류(I_{total})를 식 (2)와 같이 제한하게 된다[7]. 이때 trigger part에 연결되어 있는 리액터와 초전도 소자 저항의 합성 임피던스가 적기 때문에 사고전류제한의 역할을 거의 하지 못한다. 그러나 리액터가 current-limiting part의 소자를 감싸고 있기 때문에 자장을 인가하게 된다. 이것은 초전도 소자의 켄치차이를 줄여 동시켄치를 유도하는 역할을 한다. 또한, trigger part에서 자장 인가의 유무와는 상관없이 초전도 한류기의 전체 임피던스는 동일하다. 그러므로 사고 발생시 초기에 제한되는 사고전류의 크기 또한 같다고 예상할 수 있다.

2.2 실험방법

그림 2는 매트릭스형 초전도 한류기의 실험회로도를 나타낸 것이다. 인가전압은 $400/\sqrt{3}$, $440/\sqrt{3}$, $480/\sqrt{3}$ [V_{rms}]으로 변화를 주었고, R_0 와 R_L 은 전류를 측정하기 위한 표준저항

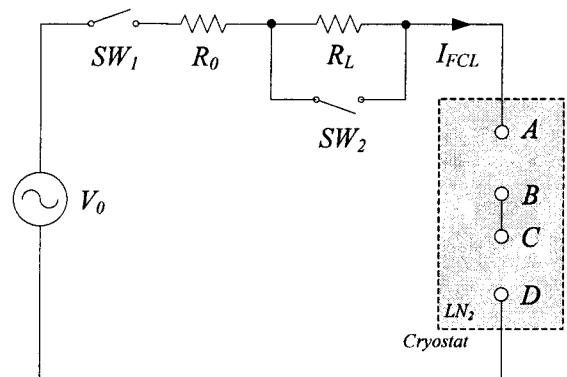


그림 2 초전도 한류기 실험을 위한 사고발생장치의 회로도
 Fig. 2 A circuit diagram for the SFCL experiment

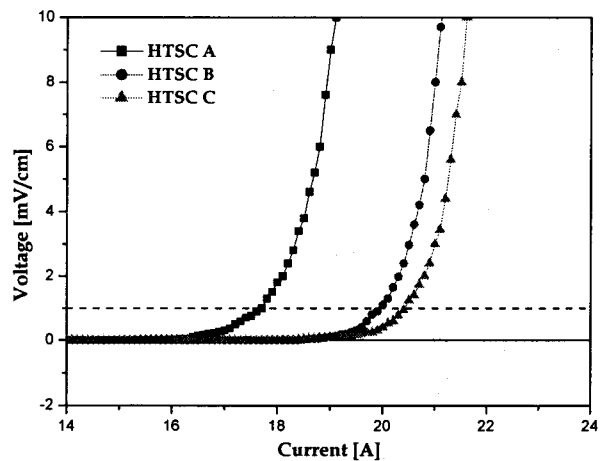


그림 3 초전도 소자 3개의 V-I 특성 곡선
 Fig. 3 V-I characteristic curves of three superconducting units

표 1 리액터와 저항의 제원

Table 1 Design parameters of reactors and resistors

Parameter	The Number of Turns	Inductance [mH]	Resistance [Ω]
L_{TC}	170	4.5	1.17
	340	7.54	2.36
	510	12.57	3.58
L_{CLC-A}	100	1.09	0.23
L_{CLC-B}	100	1.10	0.24
$R_{CLC-A} \sim R_{CLC-B}$	-	-	20

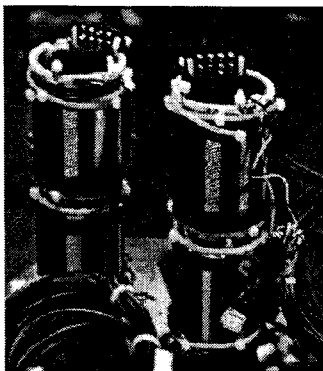


그림 4 자장인가를 위해 제작된 리액터의 사진

Fig. 4 A photograph of the produced reactors to apply the magnetic field

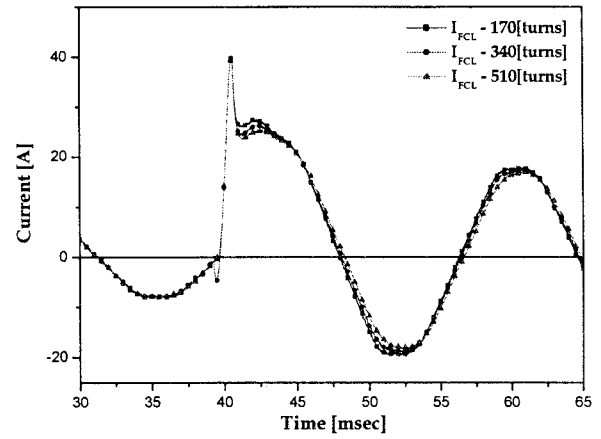
과 부하저항으로서 $1[\Omega]$ 과 $50[\Omega]$ 이다. 그림에서 A~B는 trigger part와 연결되고, C~D는 current-limiting part와 연결된다. 실험에 사용된 초전도 소자는 2inch의 박막형 YBCO로서 이들의 V-I특성을 그림 3에 나타내었다. 그림에서 $1[mV/cm]$ 를 기준으로 하였을 때 HTSC A~C 초전도 소자가 켄치되는 임계전류는 각각 19.4, 20.0, 20.4[A]이었다.

표 1은 자장인가를 위한 trigger part의 리액터와 current-limiting part에 병렬로 연결된 셉트 저항 및 리액터의 제원을 나타낸 것이다. 그림 4는 자장인가를 위해 제작된 리액터의 사진을 보여준다[8].

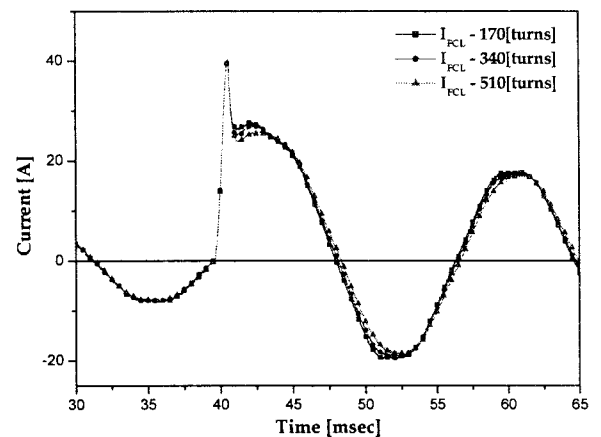
2.3 실험 결과 및 고찰

그림 5는 1×3 구조를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기의 자장유무 및 턴수 증가에 따른 사고전류의 제한특성을 보여준다. 인가된 전압은 $480/\sqrt{3}[V_{rms}]$ 이다. 그림에서 턴수의 증가에 따라 제한된 사고전류는 $40[A]$ 로 거의 동일하였다. 또한 자장유무에 따라서도 $40[A]$ 로 거의 같다. 식 (1)에서와 같이 자장유무에 따라 초전도 한류기의 전체 임피던스에는 거의 변화가 없다. 또한 리액터가 갖는 임피던스는 초전도 소자에서 발생하는 저항의 크기에 비해 상당히 작은 값이므로 리액터의 턴수 증가도 초전도 한류기의 전체 임피던스에는 큰 변화를 주지 않아 제한되는 전류가 거의 같게 된다.

그림 6은 trigger part에 있는 자장인가를 위한 리액터에 흐르는 전류의 곡선을 나타낸 것이다. 매트릭스형 초전도



(a)



(b)

그림 5 1×3 행렬구조를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기에서 리액터의 턴수증가와 자장유무에 따른 사고전류제한 특성 곡선 ($V_0=480/\sqrt{3}[V_{rms}]$)

(a) 자장을 인가한 SFCL (b) 자장을 인가하지 않은 SFCL

Fig. 5 Fault current limiting characteristic curves according to the increase of turns of reactor and magnetic field of reactor in the matrix-type SFCL with 1×3 matrix structure ($V_0=480/\sqrt{3}[V_{rms}]$)

(a) An SFCL with external magnetic field (b) An SFCL without external magnetic field

한류기는 trigger part에 있는 초전도 소자가 켄치되는 시점에서부터 리액터로 전류가 분배되어 자장이 발생하게 된다. 그림 6에서 170턴의 경우 리액터로 흐르는 전류의 크기가 작다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 trigger part에 있는 초전도 소자가 켄치되지 않아 전류분배가 이루어지지 않았기 때문이다. 정확히 말하자면 trigger part에 있는 초전도 소자에 미세한 저항이 발생되었지만 그 크기와 지속시간이 적어 완전히 켄치되었다고 볼 수 없다. 리액터에 $4.5[A]$ 정도의 전류가 흘렀을 때 초전도 소자가 혼상상태로 되어 미세한 저항발생 때문에 전류분배가 이루어졌으며, current-limiting part에 있는 초전도 소자의 켄치로 인해 사고전류가 제한됨으로써 그 이상의 전류가 증가되지 않았기 때문이다.

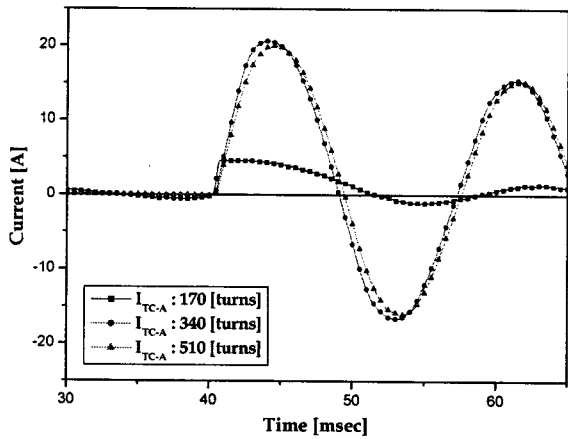


그림 6 턴수의 증가에 따라 자장인가를 위한 리액터에 흐르는 전류 곡선 ($V_0=480/\sqrt{3}$ [V_{rms}])

Fig. 6 Current curves flowing into the reactor to apply the magnetic field according to increase of turns ($V_0=480/\sqrt{3}$ [V_{rms}])

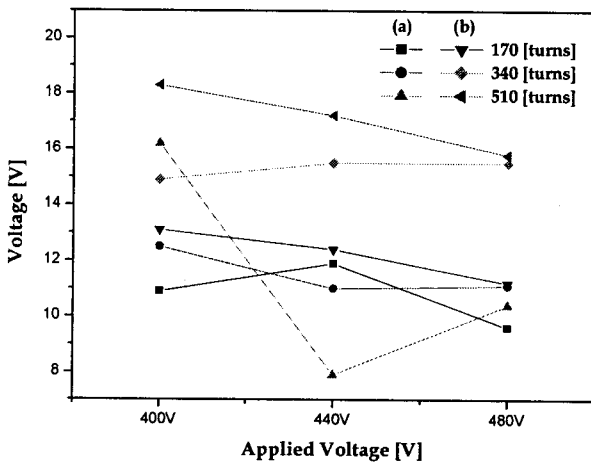


그림 7 자장유무와 전압증가에 따라 current-limiting part에 있는 2개 초전도 소자에서 초기에 발생하는 전압 차이 곡선

(a) 자장이 인가된 SFCL (b) 자장이 인가되지 않은 SFCL

Fig. 7 Difference curves of initial voltages generated in the two superconducting units of current-limiting part according to external magnetic field and voltage increase

(a) A SFCL with external magnetic field (b) A SFCL without external magnetic field

그림 7은 자장유무와 리액터의 턴수에 따라 current-limiting part에 있는 2개의 초전도 소자에서 발생하는 전압의 차이를 나타낸 곡선이다. 턴수가 증가하면서 초전도 소자사이의 전압차이가 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 또한 리액터에서 발생하는 자장이 초전도 소자에 인가될 때 전압의 차이가 더 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 외부자장의 인가는 초전도 소자의 3가지 임계특성 중 임계자장을 저하시킴으로써 임계전류밀도를 줄여준다. 그러므로 초전도

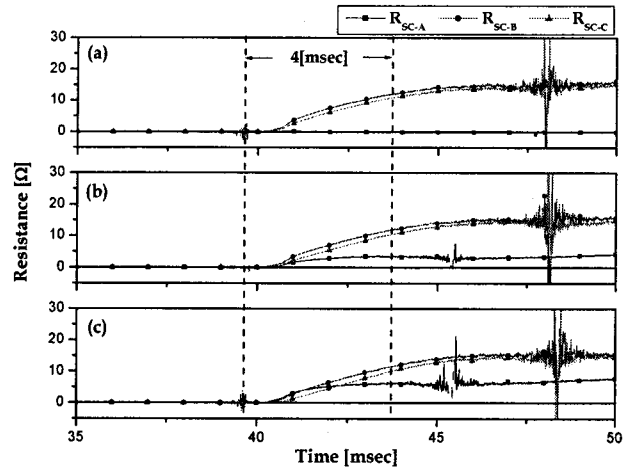


그림 8 자장이 인가된 초전도 소자의 저항곡선 ($V_0=480/\sqrt{3}$ [V_{rms}])

(a) 170 [turns] (b) 340 [turns] (c) 510 [turns]

Fig. 8 Resistance curves of three superconducting units in the SFCL with external magnetic field ($V_0=480/\sqrt{3}$ [V_{rms}])

(a) 170 [turns] (b) 340 [turns] (c) 510 [turns]

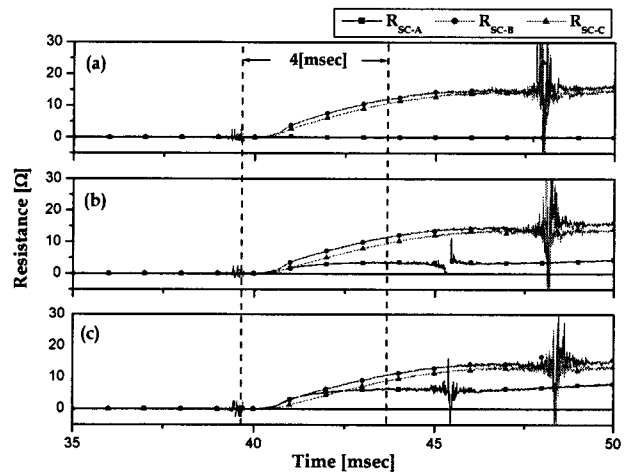


그림 9 자장이 인가되지 않은 초전도 소자의 저항곡선 ($V_0=480/\sqrt{3}$ [V_{rms}])

(a) 170 [turns] (b) 340 [turns] (c) 510 [turns]

Fig. 9 Resistance curves of three superconducting units in the SFCL without external magnetic field ($V_0=480/\sqrt{3}$ [V_{rms}])

(a) 170 [turns] (b) 340 [turns] (c) 510 [turns]

소자의 임계특성이 균일해져 전력계통의 사고시 켄치특성을 개선시켜 준다.

그림 8과 9는 자장유무와 턴수에 따라 초전도 소자에서 발생하는 저항의 곡선을 나타낸 것이다. 170턴에서 trigger part에 있는 초전도 소자들 중 한개가 켄치되지 않았다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 리액터의 임피던스가 작아 초전도 소자가 켄치되기 전에 리액터쪽으로 전류분배가 이루어져 초전도 소자를 켄치시킬 수 있을 만큼의 전류가 흐르

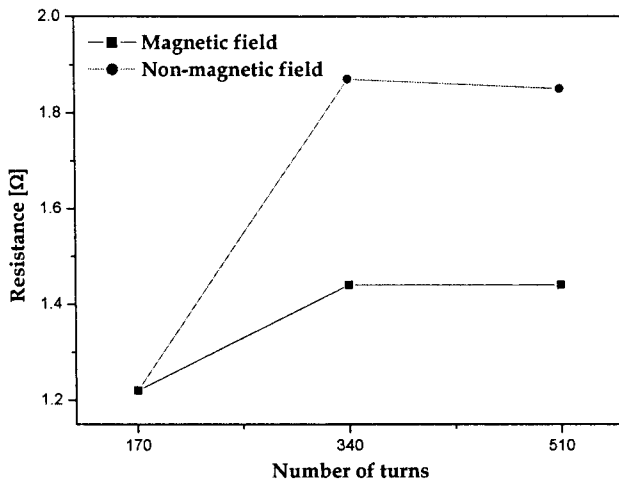


그림 10 자장유무와 턴수증가에 따른 current-limiting part에 있는 2개의 초전도 소자에서 발생하는 저항의 차이 곡선 ($V_0=480/\sqrt{3}$ [V_{rms}])

Fig. 10 Resistance difference curves generated in two superconducting units of the current-limiting part according to external magnetic field and increase of turns ($V_0=480/\sqrt{3}$ [V_{rms}])

지 못하기 때문이다. 매트릭스형 초전도 한류기의 잇점은 trigger part가 동작하여 current-limiting part에 있는 초전도 소자로 자장을 인가시키는 것이다. 그러므로 자장인가를 위한 턴수 결정은 매트릭스형 초전도 한류기의 최적설계에 있어 중요한 요인이라 할 수 있다.

그림 10은 current-limiting part에 있는 2개의 초전도 소자에서 발생하는 저항의 차이를 자장유무에 따라 나타낸 곡선이다. 여기서 기준은 사고발생 후 초기라 할 수 있는 4[msec]가 지난 지점으로 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 자장을 인가할 때 초전도 소자에서 발생하는 저항의 차이가 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 이것으로 자장을 인가함으로써 초전도 소자의 임계특성이 개선되었다는 것을 알 수 있다. 또한 170턴에서 자장유무와 관계없이 같은 값이라는 것을 확인할 수 있다. 이것은 trigger part에 있는 초전도 소자가 켜치되지 않아 자장유무와 상관없이 초전도 한류기의 전체 임피던스가 같기 때문이다.

3. 결 론

본 논문에서는 1×3구조를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기를 제작하여 trigger 및 current-limiting part에 있는 초전도 소자의 사고전류제한 특성 및 켜치특성을 리액터의 턴수 및 인가되는 전압의 크기에 따라 분석하였다. Trigger part는 초전도 소자에 자장을 인가하기 위한 리액터와 자장인가시점을 결정짓는 1개의 초전도 소자로 구성되어 있으며, 초전도 소자의 임계특성의 차이를 줄여 켜치특성을 개선하는 역할을 담당한다. Current-limiting part는 사고전류를 직접적으로 제한하는 2개의 초전도 소자와 병렬로 연결된 셉트 리액터 및 저항으로 구성되어 있다. 초전도 소자로 인가되

는 자장의 유무에 따라 제한되는 사고전류는 거의 같다는 것을 수식과 실험결과를 통해 확인하였다. 한편 리액터의 턴수를 증가시키면서 current-limiting part에 있는 2개의 초전도 소자 사이에서 발생하는 전압의 차이는 감소하였다. 또한, 초전도 소자에서 발생하는 저항의 크기도 감소하였으며, 자장을 인가하지 않은 경우보다 더 감소했다는 것으로 확인할 수 있었다. 이것으로부터 초전도 소자에 자장을 인가함으로써 초전도 소자의 3가지 임계특성 중 임계자장을 저하시켜 임계전류밀도를 줄여주어 임계특성이 개선됨을 확인할 수 있었으며, 또한 YBCO 초전도 소자의 임계특성을 개선할 수 있는 최적의 리액터 턴수를 도출할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 조선대학교 학술 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] H.-S. Choi, Y.-S. Cho, S.-H. Lim, "Operational characteristics of hybrid-type SFCL by the number of secondary windings with YBCO films," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 16, No. 2, pp. 719-722, June 2006.
- [2] S. Kozak, T. Janowski, "Physical and numerical models of superconducting fault current limiters," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, No. 2, pp. 2068-2071, June 2003.
- [3] C.A. Baldan, C.Y. Shigue, D.S.S. Figueira, E.R. Filho, R.C. Freitas, "Test results of a superconducting FCL using bifilar coil of BSCCO-2212," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 16, No. 2, pp. 695-698, June 2006.
- [4] H.-S. Choi, Y.-S. Cho, "Critical Current Equalization via Neutral Lines in a Transformer-Type SFCL," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, No. 2, pp. 733-736, June 2008.
- [5] H.-S. Choi, S.-H. Lim, "Operating Performance of the Flux-Lock and the Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter Using the YBCO Thin Films," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, No. 2, pp. 1823-1826, June 2007.
- [6] O.-B. Hyun, S.-D. Cha, H.-R. Kim, H.-S. Choi, S.-D. Hwang, "Shunt-assisted simultaneous quenches in series-connected resistive SFCL components," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, No. 2, pp. 2060-2063, June 2003.
- [7] D.-C. Chung, H.-S. Choi, N.-Y. Lee, G.-Y. Nam, Y.-S. Cho, T.-H. Sung, Y.-H. Han, B.-S. Kim, S.-H. Lim, "Optimum design of matrix fault current limiters using the series resistance connected with shunt coil," *Physica C*, vol. 463, pp. 1193-1197, Oct. 2007.
- [8] 산업자원부, "10kVA급 매트릭스형 초전도 한류기 개발 (연구보고서)", 2007.

저 자 소 개



오금곤 (吳金坤)

1946년 1월 17일생. 1968년 조선대 전기공학과 졸업. 1994년 동신대학교 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기전자공학부 졸업(박사). 현재 조선대 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7033

Fax : 062-230-7020

E-mail : ggoh@chosun.ac.kr



최효상 (崔孝祥)

1966년 2월 21일생, 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2003년~한전 전력연구원 선임연구원, 현재 조선대 전기공학과 부교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@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