

2×3구조의 매트릭스형 초전도 한류기의 트리거 코일 및 션트 저항에 따른 특성

논 문
58P-1-15

Characteristics of Matrix Type SFCL with 2×3 Array According to the Trigger Coil and Shunt Resistance

정 병 익* · 최 효 상†
(Byung-Ik Jung · Hyo-Sang Choi)

Abstract - We investigated the quench characteristics in accordance with increase of turns number of trigger coil and shunt resistance of matrix-type superconducting fault current limiter (SFCL) with 2×3 array. 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 hasn't an affect on total impedance of the SFCL. When turns number of a 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 was also decreased. Therefore, we confirmed that the differences of the critical behaviors between superconducting units were reduced by application of magnetic field. By this results, we could decide the optimum turns number of reactor to apply magnetic field.

Key Words :The Matrix-Type SFCL, Trigger Part, Current-Limiting Part, Trigger Coil, Shunt Resistance

1. 서 론

오늘날 전력설비의 대용량화와 수용전력의 급증으로 인하여 보다 안정적이고 경제적인 전력공급은 점점 더 중요시 되어 왔다. 한편 망상식의 전력공급이 증가함에 따라 계통 사고시 큰 전력손실과 기존 보호기기의 절연 내력을 초과하는 경우가 생겨나게 되었다. 기존 보호기기의 전면적인 교체나 보수는 경제적인 부담을 가져온다. 이러한 이유에서 기존의 보호기기와 병행하여 사용할 수 있는 초전도 한류기가 연구되었다[1-3]. 현재 여러 나라에서 저항형, 유도형, 자속구속형, 하이브리드형 등의 여러 형태의 초전도 한류기를 연구 중에 있다[4-8]. 본 논문에서는 매트릭스형 한류기에서 trigger part의 션트코일의 턴수와 current-limiting part의 션트 저항값의 변화가 전류제한 특성에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 매트릭스형 초전도 한류기는 초전도 소자에 자장을 인가하여 각 초전도 소자간 불균일 켄치 특성을 개선하고, 초전도 소자의 직·병렬 구조(매트릭스 구조)를 통하여 용량증대를 용이하게 하기위해 고안된 형태이다. 이러한 형태의 한류기는 실계통 적용에 있어 매우 유리하게 작용할 것이다.

2. 본 론

2.1 구성 및 동작 원리

매트릭스형 초전도 한류기는 trigger part와 current-

limiting part로 나누어진다. trigger part는 초전도 소자에 자장을 인가하여 초전도 소자의 빠른 켄치를 유도하기위한 리액터로써 초전도 소자와 함께 저온 용기(액체질소) 내부에 존재하게 된다. current-limiting part는 사고전류를 제한하기 위한 션트 코일과 저항이 직렬로 연결된 부분이 초전도 소자와 병렬로 연결된 구조를 갖는다. 그림 1은 매트릭스형 초전도 한류기의 실험을 위한 회로도이다. 여기서 A-B 구간은 trigger part 및 current-limiting part가 연결되는 구간을 나타낸다. V_0 는 회로에 인가되는 전원전압이며, R_0 와 R_L 은 선로의 전류를 측정하기 위한 표준저항과 부하저항을 나타내며 각각 $1[\Omega]$ 과 $50[\Omega]$ 의 저항을 사용하였다. SW_1 과 SW_2 는 초전도 한류기에 전원을 인가하고 사고를 발생시키기 위한 스위치로써 전력용 SCR을 사용하였다. 그림 2는 2×3의 행렬 구조를 갖는 매트릭스형 한류기를 구성하였다. 1개의 외부자장인가 리액터를 갖는 trigger part와 2개의 current-limiting part를 갖는 일체형 모형을 하나의 모듈로 했고 이것을 병렬로 연결하였다. 그림 2에서 I_{FCL} 은 사고전류를 나타내고 I_{SC} 는 각 초전도소자에 흐르는 전류, I_{TC} 와 I_{CLC} 는 trigger part 리액터에 흐르는 전류와 current-limiting part의 리액터에 흐르는 전류를 각각 나타낸다. L_{CLC} 와 R_{CLC} 는 전류제한을 위한 션트 코일과 션트저항이다.

2개의 part가 병렬로 연결된 trigger part에서 발생하는 전압·전류를 V_T , I_T 라 하고, 두 개의 current-limiting part가 병렬로 연결된 부분에서 발생하는 전압·전류를 각각 V_{C1} , V_{C2} , I_{C1} , I_{C2} 라고 할 때 각각의 전압·전류와 전체 전압·전류는 다음과 같은 방정식으로 표현할 수 있다. 등가회로도를 분석하기 위해 다음과 같은 가정을 만들었다.

- 1) 자장인가를 위한 션트코일 $L_{TC-A} \sim L_{TC-F} = L_{TC}$ 로 크기동일
- 2) 전류제한을 위한 션트코일 $L_{CLC-A} \sim L_{CLC-B} = L_{CLC}$ 로 크기동일

* 준 회원 : 조선대학교 전기공학과 석사과정
† 교신저자 정회원 : 조선대학교 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : Hyosang@chosun.ac.kr
접수일자 : 2008년 11월 11일
최종완료 : 2008년 11월 21일

- 3) 전류제한을 위한 선트저항 $R_{CLC-A} \sim R_{CLC-D} = R_{CLC}$ 로 크기동일
- 4) Trigger part의 초전도 소자에서 발생하는 저항 R_{SC-A} , $R_{SC-D} = R_{SCT}$ 로 크기동일
- 5) Current-limiting part의 초전도 소자에서 발생하는 저항 R_{SC-B} , R_{SC-C} , R_{SC-E} , $R_{SC-F} = R_{SCC}$ 로 크기동일
- 6) Trigger part의 초전도 소자에서 발생하는 저항 R_{SC-A} , $R_{SC-D} = R_{SCT}$ 로 크기동일

위의 가정을 통해 다음과 같은 방정식을 구할 수 있다.

$$Z_{total} = \frac{R_{SCT} \cdot j\omega L_{TC}}{2(R_{SCT} + j\omega L_{TC})} \quad (1)$$

$$+ \left[\frac{R_{SCC}(R_{CLC} + j\omega L_{CLC})}{2R_{SCC} + (R_{CLC} + j\omega L_{CLC})} \right]$$

$$I_{total} = I_{FCL} = I_T = I_{C1} = I_{C2} \quad (2)$$

$$= \frac{(2R_{SCT} + 2j\omega L_{TC})}{j\omega L_{TC} \cdot R_{SCT}} \cdot V_T$$

$$= 2 \left[\frac{1}{R_{CLC} + j\omega L_{CLC}} + \frac{1}{R_{SCC}} \right] \cdot V_C$$

식 (1)은 초전도 한류기의 전체임피던스로서 우변의 첫째 항은 trigger part의 임피던스이고, 둘째항은 current-limiting part의 임피던스이다. 사고 전에는 초전도 소자의 0저항 특성을 이용하여 아무런 손실 없이 전류가 흐른다. 식 (2)는 사고 후 사고전류를 나타낸다. 사고 후에는 초전도 소자의 켄치로 인하여 저항이 발생되고 이로 인하여 사고 전류를 제한하게 된다. 이때 사고 전류가 bypass 되면서 trigger part에 연결되어 있는 선트리액터로 전류가 흐르게 된다. 이 전류로 인하여 선트리액터가 current-limiting part의 소자에 자장을 인가하게 된다. 이렇듯 자장을 인가하여 초전도 소자의 켄치특성을 개선하는 것이 trigger part의 역할이다.

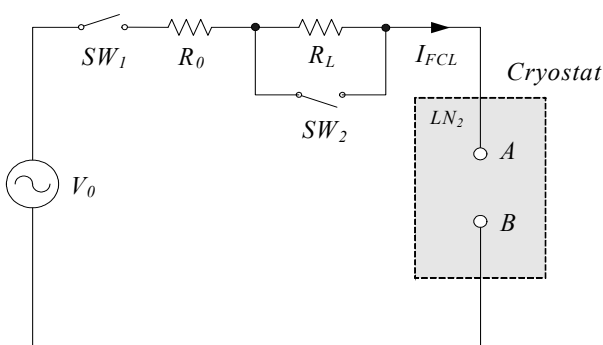


그림 1 매트릭스형 초전도 한류기의 실험회로도
Fig. 1 A circuit diagram for the SFCL experiment of the matrix type SFCL

2.2 실험 방법

그림 2는 2×3 일체형 매트릭형 초전도 한류기의 등가 회로도를 나타낸 것이다. 한 개의 자장 인가 리액터가 초전도 소자 3개에 동시에 감싸고 있는 구조를 보여주고 있다. 인가

전압은 $480/\sqrt{3} [V_{rms}]$ 을 가해주었고, current-limiting part 부분의 선트 저항 $[R_{CLC}]$ 의 크기는 10[Ω]과 20[Ω]으로 변화를 주었다. 그림 3은 실험에 사용된 초전도 소자 6개의 V-I 특성을 나타낸 것이다. 그림 3에서 1[mV/cm]를 기준으로 하였을 때 HTSC A~F 초전도 소자가 켄치되는 임계전류는 각각 17.7, 19.3, 19.9, 19.4, 20, 20.4[A]였다. 표 1은 제작된 trigger part의 자장인가 리액터의 제원을 보여주고 있다.

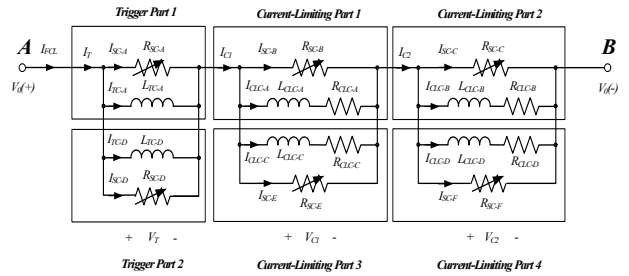


그림 2 2×3 구조를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기의 등가 회로도

Fig. 2 Equivalent circuit of the matrix-type SFCL with 2×3 array

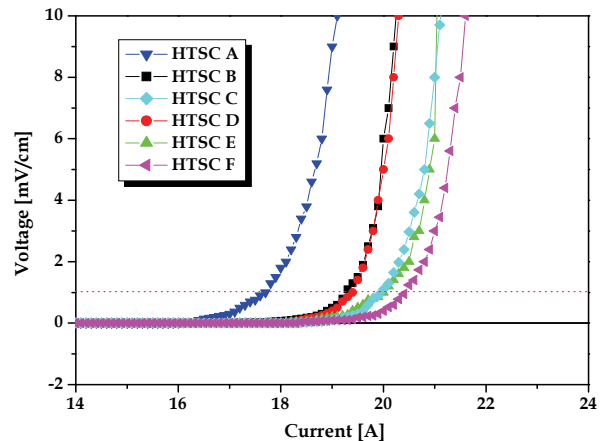


그림 3 초전도 소자 6개의 V-I 특성 곡선
Fig. 3 V-I characteristic curves of six superconducting units

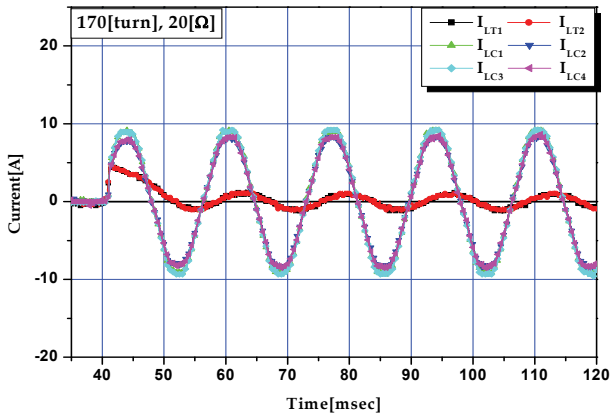
표 1 외부자장 인가리액터의 임피던스 제원

Table 1 Design parameter of reactors

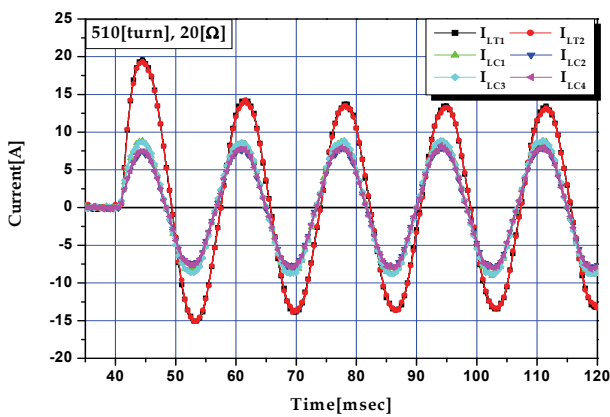
	Turn's Number	Inductance [mH]	Resistance [Ω]
A-Module (L _{T1})	170	4.55	1.18
	340	7.6	2.36
	510	12.54	3.58
B-Module (L _{T2})	170	4.5	1.17
	340	7.54	2.36
	510	12.57	3.58

2.3 실험 결과 및 고찰

그림 4는 trigger part의 shunt coil과 current-limiting part의 shunt coil에 흐르는 사고 전류의 크기를 비교한 것



(a) 170 turns



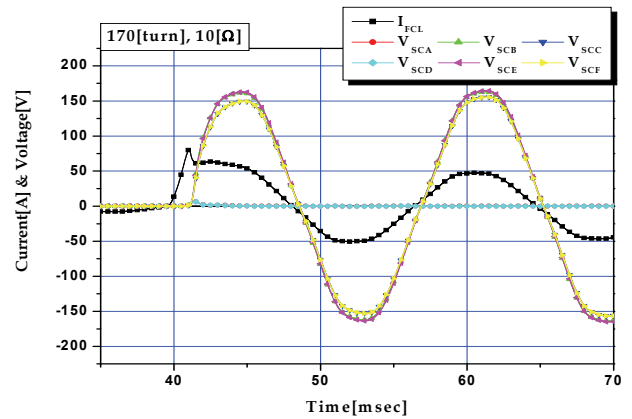
(b) 510 turns

그림 4 자장인가 리액터와 션트 리액터에 흐르는 전류
Fig. 4 currents flowing into the reactor for external field and shunt reactor

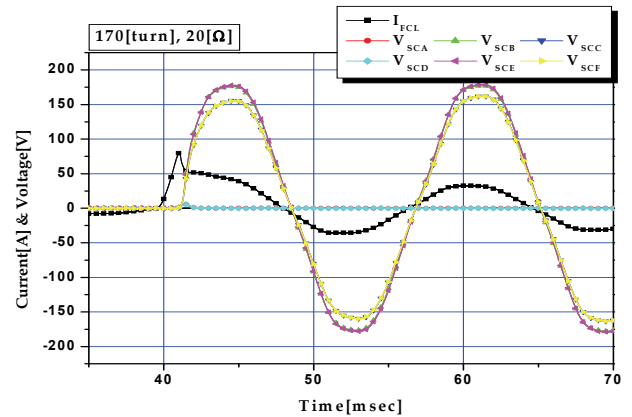
이다. (a)는 170턴, (b)는 510턴을 나타낸다. (a)170턴에서는 trigger part의 소자가 켄치되지 않았다. 이에 따라 trigger part의 shunt coil에는 이론적으로 전류가 흐르지 않아야 한다. 하지만 접촉부의 미세한 저항에 의해 초전도 소자 뿐만 아니라 shunt coil에도 전류가 분배되어 1.07[A] 정도의 전류가 흘렀다. 이 때 current-limiting part의 shunt coil에 흐른 사고 전류의 크기는 9.09[A]와 7.8[A]였다. (b)510턴에서는 trigger part 소자에서도 켄치가 발생하였고, 이때 trigger part의 shunt coil에 흐르는 전류는 19.52[A]로 켄치 되기 전의 19배정도까지 증가하였다. 반면 current-limiting part의 shunt coil에 흐른 전류는 8.77[A]와 7.44[A]로 켄치 되기 전과 크게 달라지진 않았다. 인가된 자장의 크기가 증가할수록 trigger part 부분까지 켄치를 발생하게 하여 4개가 분담해야할 부담을 6개의 소자가 분담하게 되어 부담을 줄일 수 있었다.

그림 5, 6은 사고전류의 크기와 각 소자의 전압을 비교한 것이다. (a)170턴에서는 trigger part 부분에 켄치가 일어나지 않았고, 이때의 current-limiting part의 초전도 소자의 전압 값은 163, 155[V]와 164, 155[V]였다. 반면 (b)510턴에서는 trigger part에서 켄치가 발생하였고 이로 인하여 전압이 분배 되면서 current-limiting part 부분의 전압값이 150, 144[V]와 1501, 144[V]로 10~15[V] 정도 감소하였다. 초전도 소자는 전압에 의해 열화 되거나 파괴되는 특성이 있으므로

전압을 감소시킨다는 점은 한류기 적용에 있어서 장점으로 작용한다. 그림 5와 6에서 current-limiting part의 shunt coil의 임피던스 값에 따른 특성도 볼 수 있는데 임피던스 값이 증가함에 따라 current-limiting part의 소자전압은 증가하고 trigger part의 소자 전압은 감소하는 경향을 나타냈다. 이것은 사고전류의 크기에는 변화가 없는데 current-limiting part의 전체 임피던스는 증가하였기 때문에 trigger part 부분의 전압은 감소한 것이다.

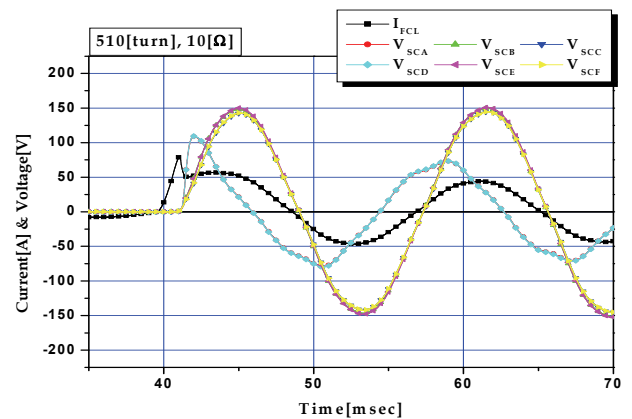


(a) 션트저항 : 10[Ω]

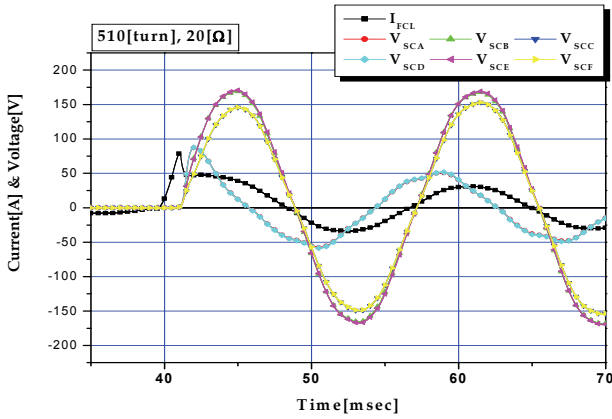


(b) 션트저항 : 20[Ω]

그림 5 션트저항에 따른 발생전압 및 전류(L_{TC} = 170 turns)
Fig. 5 Voltages and current of superconducting units according to shunt resistance (L_{TC} = 170 turns)



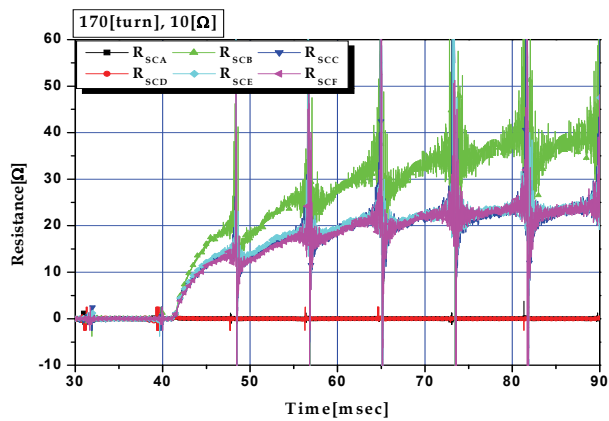
(a) 션트저항 : 10[Ω]



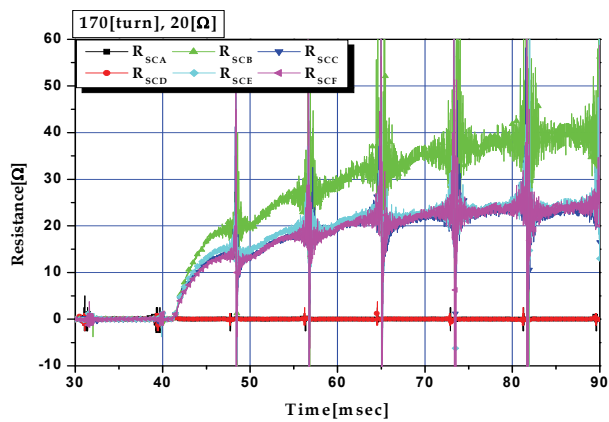
(b) 셉트저항 : 20[Ω]

그림 6 셉트저항에 따른 발생전압 및 전류($L_{TC} = 510$ turns)
Fig. 6 Voltages and current of superconducting units according to shunt resistance ($L_{TC} = 510$ turns)

그림 7, 8은 초전도 소자의 저항값을 나타낸 것이다. 코일 턴수가 증가함에 따라서 초전도 소자의 저항이 감소하는 것을 확인 할 수 있었고, 셉트 저항이 증가함에 따라서는 초전도 소자의 저항이 증가한다는 것을 확인 할 수 있었다.

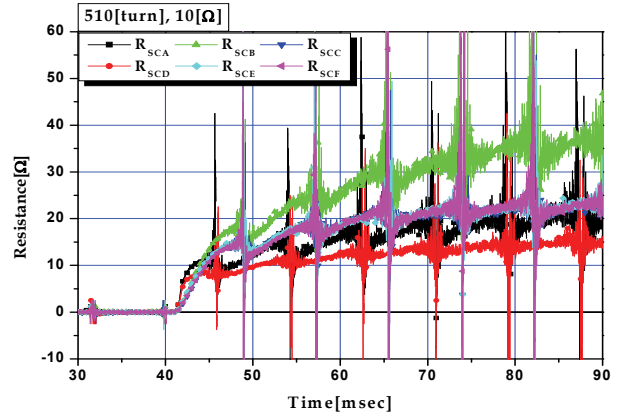


(a) 셉트저항 : 10[Ω]

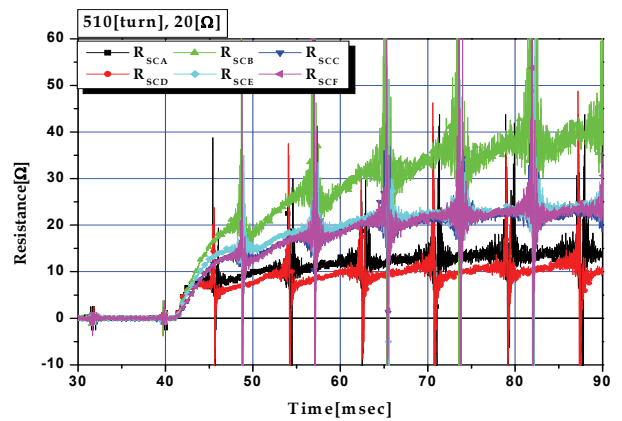


(b) 셉트저항 : 20[Ω]

그림 7 초전도 소자의 저항 곡선($L_{TC} = 170$ turns)
Fig. 7 Resistance curves of superconducting units($L_{TC} = 170$ turns)



(a) 셉트저항 : 10[Ω]



(b) 셉트저항 : 20[Ω]

그림 8 초전도 소자의 저항 곡선($L_{TC} = 510$ turns)
Fig. 8 Resistance curves of superconducting unit($L_{TC} = 510$ turns)

trigger part의 초전도 소자는 170턴에서 켄치가 발생하는 듯 하였으나 병렬로 연결된 리액터의 임피던스 값이 초전도 소자 저항에 비해 매우 작아서 대부분의 사고 전류가 리액터로 흐르게 되었다. 이 전류에 의해 current-limiting part의 초전도 소자에 자장을 인가하게 되는 것이다. 510턴의 경우엔 trigger part의 초전도 소자에서도 켄치가 발생했는데 이것은 리액터의 턴수가 증가하면서 초전도 소자와 큰 차이를 갖지 않는 임피던스를 갖게 되어 전류 분배가 이뤄졌기 때문이다. 이때는 초전도 소자 6개가 사고 전류를 제한하게 되어 각 소자가 받는 부담이 줄어들게 되는 것이다. 이러한 하나의 모듈을 2×3 뿐만 아니라 더 많은 모듈을 연결하면 각 사용처가 원하는 용량에 맞추어 사용할 수 있게 될 것이다.

3. 결 론

본 실험에서는 2×3 구조의 매트릭스형 초전도 한류기의 trigger part의 셉트 코일 턴수 및 current-limiting part의 셉트 저항값 변화에 따른 특성들을 살펴보았다. 기존의 매트릭스형 초전도 한류기는 초전도 소자에 자장을 인가하기 위해서 trigger part 부분과 current-limiting part 부분 모두에 리액터를 감아주어야만 했다. 하지만 일체형 매트릭스형 한류

기는 리액터 하나로써 두 part 모두에 자장을 인가할 수 있다는 장점을 갖는다. 이로써 단일 모듈의 크기를 줄일 수 있게 되었고 실제통 적용을 위한 용량 증대시 전체적인 규모를 획기적으로 줄일 수 있게 될 것이다.

실험 결과 같은 저항값 하에서 trigger part의 코일 턴수를 증가시켰을 때 초전도 소자의 전압은 감소하는 경향을 보였고, 퀘치가 발생하지 않았던 trigger 소자에도 퀘치가 발생하였다. 코일의 턴수 증가는 초전도 소자에 더 많은 자장을 인가하여 퀘치 특성을 개선하는 것뿐만 아니라 4개의 초전도 소자로 분담하던 부담을 6개의 초전도 소자가 분담하게 함으로써 초전도 소자의 열화나 파괴를 막는데 유리하게 작용한다는 것도 확인할 수 있었다. 셉트 저항값의 변화에 따른 특성을 보면, current-limiting part의 초전도 소자는 전압이 증가하는 경향을 보였고, trigger part의 초전도 소자 전압은 감소하였다. 이 결과에서 알 수 있듯이 셉트 저항을 적절히 조절함으로써 초전도 소자의 부담을 균일하게 할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2005-7-066)주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] Hyo-Sang Choi, Yong-Sun Cho, and Sung-Hun 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, and 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, and 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] Hyo-Sang Choi, Yong-Sun 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] Hyo-Sang Choi, Sung-Hun 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] Ok-Bae Hyun, Sang-Do Cha, Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi, Si-Dol 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, Octo. 2007.

[8] 산업자원부, "10kVA급 매트릭스형 초전도 한류기 개발(연구 보고서)", 2007.

저 자 소 개



정 병 익 (鄭柄益)

1981년 8월 25일생, 2007년 조선대 전기공학과 졸업, 2007~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 062-230-7054

Fax : 062-230-7020

E-mail : chuzang3@naver.com



최 효 상 (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 교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr