

직·병렬연결시 리액터를 이용한 초전도 소자의 켄치 특성

Quench Characteristics of Superconducting Elements using Reactors at Series and Parallel Connections

최효상¹, 임성훈^{2a}, 조용선¹, 남금현¹, 이나영¹, 박형민¹

(Hyo-Sang Choi¹, Sung-Hun Lim^{2a}, Yong-Sun Cho¹, Gueng-Hyun Nam¹, Na-Young Lee¹, and Hyung-Min Park¹)

Abstract

We investigated quench characteristics of superconducting elements connected in series and parallel each other. The serial and parallel connections of superconducting elements causes a difficulty in simultaneous quench due to slight difference between their critical current densities. In other to induce simultaneous quench, we fabricated four type circuits; serially connected circuit before parallel connection, the circuit connected in parallel before serial connection, serially connected circuit before parallel connection with reactors, the circuit connected in parallel before serial connection with reactors. We confirmed that the simultaneous quenches occurred in serial and parallel connections of superconducting elements using reactors. In addition, the power burden of superconducting elements was smaller than those of serial and parallel connections of superconducting elements without reactors.

Key Words : Superconducting element, Simultaneous quench, Power burden, Series and parallel connections, Reactor

1. 서론

부하용량의 급격한 증가로 전력계통 사고시 발생하는 사고전류는 급격히 증가하고 있는 실정이다. 그에 대한 대응책으로 대용량 차단기 사용, 고임피던스기기 사용, 모선분리, 대용량 퓨즈 사용 등 여러 대응책이 모색되고 있지만, 전력 계통의 안정성·경제성 등의 문제점 때문에 다른 대응책이 필요한 실정이다. 이러한 상황에서 초전도 한류기의 등장은 이러한 문제점을 해결할 수 있는 또 다른 해결책으로 모색되고 있다[1].

전 세계적으로 여러 형태의 초전도 한류기가 연구·개발 중이다. 국내에서는 저항형을 중점으로

자속구속형, 유도형 등이 연구 중에 있다[2-4]. 그러나, 이렇게 개발 중인 한류기를 대용량의 전력계통에 적용시키기 위해서는 초전도 한류기의 용량을 증대시켜야하는 문제점이 있다. 한류기의 용량을 증대시키기 위한 방법으로써 현재 여러 개의 한류소자를 직·병렬로 연결하는 방법을 모색하고 있으나, 이러한 방법은 초전도 소자의 전력분담 불균형과 동시켄치가 발생되지 않는 문제점을 가지고 있다. 전력분담의 불균형은 초전도 소자의 임계전류밀도의 미소한 차이로 인해 발생되며, 이로 인해 특정 초전도 소자가 파손될 우려가 있다. 초전도 한류기의 실제통적용을 위해서는 이러한 초전도 단위소자간의 불균일한 전력분담을 감소시키고 동시켄치를 유도할 수 있는 방안이 필요한 실정이다[5-8].

본 연구는 초전도 소자를 직·병렬로 연결한 회로와 그 회로의 초전도 소자에 병렬로 리액터를 연결한 회로를 실험하여 비교·분석하였다. 직·병렬연결시 미소한 임계전류밀도의 차이로 인해 발

1. 조선대학교 전기공학과

(광주시 동구 서석동 375)

2. 전북대학교 공업기술연구소

a. Corresponding Author : lsh73@hanmail.net

접수일자 : 2005. 6. 18

1차 심사 : 2005. 7. 14

심사완료 : 2005. 7. 20

생하는 초전도 소자들간의 전력분담이 불균형적으로 발생한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 초전도 소자에 병렬로 리액터를 연결할 때 사고전류가 리액터에 의해 분담되기 때문에 초전도 소자의 전력분담 불균형 및 동시켄치에 어떠한 영향을 주는지를 분석하였다.

2. 실험

2.1 직·병렬 연결 회로의 구조 및 원리

그림 1은 단위 초전도소자의 직·병렬연결 회로와 리액터를 단위초전도 소자에 병렬로 연결한 직·병렬연결회로의 구조를 나타낸다.

한류소자의 직·병렬연결 실험을 위해 그림 1(a), (b)와 같이 직렬우선 병렬연결 구조와 병렬우선 직렬연결 구조를 구성하였다. 식 (1)과 (2)는 그림 (a)에 분배되어 소자에 흐르는 전류값을 계산한 것이다.

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{R_3+R_4}{R_1+R_2+R_3+R_4} \quad (1)$$

$$\frac{I_3}{I_{FCL}} = \frac{R_1+R_2}{R_1+R_2+R_3+R_4} \quad (2)$$

여기서 R_1, R_2, R_3, R_4 는 초전도소자에서 발생하는 저항을 나타낸다. 식 (1)과 (2)에서 알 수 있는 바와 같이 사고전류는 초전도 소자에서 발생하는 저항의 크기에 따라 그 제한되는 정도가 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 병렬로 분배되어 흐르는 사고전류가 직렬회로에서 1, 2번 초전도소자와 3, 4번 초전도소자 중 임계전류밀도가 낮은 소자가 먼저 켄치가 발생한 후 급격히 증가한 저항에 의해 각 직렬회로에 흐르는 전류가 제한되고 그 제한된 전류가 임계전류밀도가 높은 소자의 임계전류 값을 넘게 될 경우 켄치가 발생하지만 제한된 사고전류가 임계전류 값에 못 미친다면 켄치가 발생하지 않을 것이다. 이러한 문제에 의해 초전도 소자들 간의 켄치가 동시적으로 발생되지 않으므로 특정의 초전도 소자에 부담이 가중될 것이다.

그림 1(b)의 병렬우선 직렬연결 구조는 각각의 병렬회로에 흐르는 전류가 선로에 흐르는 사고전류와 같은 값이라는 것을 식 (3)-(6)을 통해 알 수 있다. 직렬우선 병렬연결 구조와 마찬가지로 앞의 1, 3번 초전도 소자의 병렬회로에서 사고전류가 초

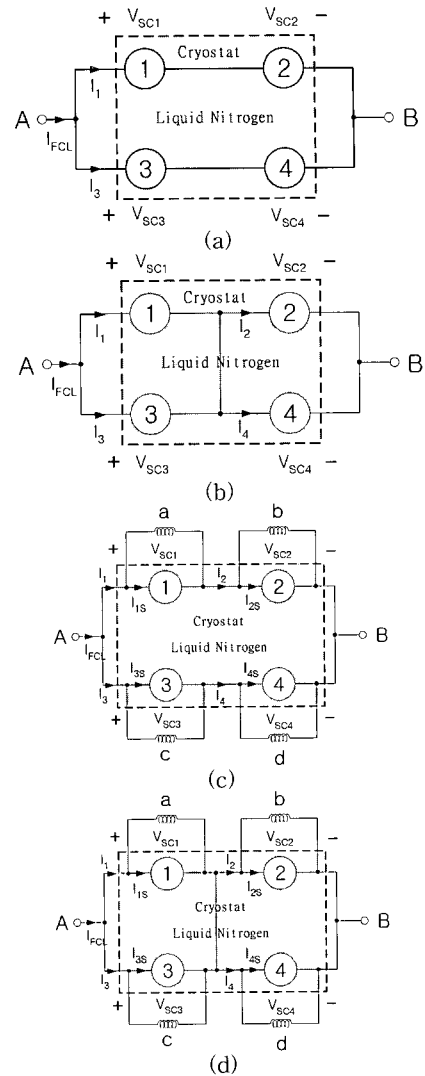


그림 1. 단위 초전도소자의 직·병렬연결 회로 구성도.

(a) 직렬우선 병렬연결 회로, (b) 병렬우선 직렬연결 회로, (c) 리액터가 연결된 직렬우선 병렬연결 회로, (d) 리액터가 연결된 병렬우선 직렬연결 회로.

Fig. 1. Scheme of test circuits for series and parallel connections.

(a) serially connected circuit before parallel connection, (b) the circuit connected in parallel before serial connections, (c) serially connected circuit before parallel connection with reactors, (d) the circuit connected in parallel before serial connection with reactors.

전도 소자에서 발생한 저항에 의해서 제한이 되고, 2, 4번 초전도 소자의 병렬회로에서는 제한된 전류가 다시 분배되어 흐르게 된다. 이렇게 제한된 사고전류는 분배되어 흐르므로, 2, 4번 초전도 소자의 병렬회로는 켄치가 일어나지 않을 수 있다. 반대로 2, 4번 초전도 소자가 먼저 켄치되는 경우에도 1, 3번에 같은 현상이 일어날 것이다.

$$\frac{I_1}{I_{RL}} = \frac{R_3}{R_1+R_3} \quad (3)$$

$$\frac{I_2}{I_{RL}} = \frac{R_4}{R_2+R_4} \quad (4)$$

$$\frac{I_3}{I_{RL}} = \frac{R_1}{R_1+R_3} \quad (5)$$

$$\frac{I_4}{I_{RL}} = \frac{R_2}{R_2+R_4} \quad (6)$$

이러한 초전도 소자의 켄치 시작시점 불균형문제는 소자간의 전력 불균형을 유발하여 한쪽 회로에 부담을 가중시키게 된다. 전력 불균형을 해소하기 위해서는 초전도 소자가 사고시 동시적으로 켄치될 수 있도록 유도를 해야 한다. 이에 대한 방안으로 그림 2(c), (d)와 같이 초전도 소자에 병렬로 리액터를 연결하여 동시적인 켄치를 유도하였다. 그림 2(c), (d)의 I_1, I_2, I_3, I_4 는 식 (1), (2) 및 (3)-(6)의 저항(R_i)대신에 다음의 임피던스(Z_i)를 대입함으로써 얻을 수 있다.

$$Z_1 = \frac{R_1 \cdot (R_a + j\omega L_a)}{R_1 + (R_a + j\omega L_a)} \quad (7)$$

$$Z_2 = \frac{R_2 \cdot (R_b + j\omega L_b)}{R_2 + (R_b + j\omega L_b)} \quad (8)$$

$$Z_3 = \frac{R_3 \cdot (R_c + j\omega L_c)}{R_3 + (R_c + j\omega L_c)} \quad (9)$$

$$Z_4 = \frac{R_4 \cdot (R_d + j\omega L_d)}{R_4 + (R_d + j\omega L_d)} \quad (10)$$

또한, 최종적인 $I_{1s}, I_{2s}, I_{3s}, I_{4s}$ 는 다음 식 (11)-(14)와 같이 구할 수 있다.

$$I_{1s} = \left\{ \frac{R_a + j\omega L_a}{R_1 + (R_a + j\omega L_a)} \right\} \cdot I_1 \quad (11)$$

$$I_{2s} = \left\{ \frac{R_b + j\omega L_b}{R_2 + (R_b + j\omega L_b)} \right\} \cdot I_2 \quad (12)$$

$$I_{3s} = \left\{ \frac{R_c + j\omega L_c}{R_3 + (R_c + j\omega L_c)} \right\} \cdot I_3 \quad (13)$$

$$I_{4s} = \left\{ \frac{R_d + j\omega L_d}{R_4 + (R_d + j\omega L_d)} \right\} \cdot I_4 \quad (14)$$

그림 1(c)는 직렬우선 병렬연결 회로의 각 초전도 소자에 병렬로 리액터를 연결한 회로이다. 두개의 직렬회로로 분배된 사고전류는 초전도 소자에서 발생하는 저항과 리액터의 임피던스의 비에 따라 다시 분배가 된다. 이때 리액터의 임피던스는 초전도 소자에서 발생하는 저항보다 상당히 작은 값이기 때문에 사고전류는 리액터 쪽으로 많이 흐르게 된다. 이렇게 1번 리액터를 흐른 사고전류는 2번 초전도 소자를 켄치시키게 된다. 이러한 원리에 의해 4개의 초전도 소자는 모두 거의 동시에 켄치가 된다. 그림 1의 (d)는 병렬우선 직렬연결 회로의 각 초전도 소자에 병렬로 리액터를 연결한 회로이다. (c)의 회로와는 반대로 1번과 3번 초전도 소자의 병렬회로로 분배되어 흐르던 사고전류가 다시 합쳐져서 2번과 4번의 초전도 소자의 병렬회로에서 발생하는 임피던스의 비에 따라 다시 분배가 된다. 그러므로 1번과 3번 초전도 소자에서 발생하는 전압이 같고, 2번과 4번 초전도 소자에서 발생하는 전압이 같게 된다. 이로 인해 그림 1(c)의 경우보다 초전도 소자의 전압분배가 균일화되어 결과적으로 각 초전도 소자의 켄치가 상대적으로 동시에 발생되도록 유도하게 된다. 초전도 소자에서 제한되는 사고전류의 크기는 임계전류밀도의 크기가 비슷하고, 그에 맞는 리액터를 선정하여 회로를 구성한다면 4개의 초전도 소자가 모두 동시에 켄치가 발생되어 전력의 분담도 균형을 이룰 것이다.

리액터의 임피던스 값은 다음 표 1과 같이 자체 제작하였다.

표 1. 리액터의 임피던스.

Table 1. Impedance of reactors.

	인덕턴스(L)	저항(R)
리액터 a	$L_a=1.09$ mH	$R_a=0.23$ Ω
리액터 b	$L_b=1.10$ mH	$R_b=0.24$ Ω
리액터 c	$L_c=1.08$ mH	$R_c=0.24$ Ω
리액터 d	$L_d=1.07$ mH	$R_d=0.24$ Ω

2.2 실험 방법 및 실험 회로도

그림 2는 위의 4개 회로를 실험하기 위해 구성한 실험 회로도이다.

그림 2에서 V_S 는 인가전압으로서 $160/\sqrt{3} V_{rms}$ 의 60 Hz를 인가하였다. R_0 는 표준저항으로서 선로전류를 측정하기 위한 저항이고, R_L 은 50 Ω 의 부하저항이다. SW_1 과 SW_2 는 각각 선로에 전압을 인가하기 위한 스위치와 단락사고를 모의하기 위한 스위치이다. A와 B는 그림 1의 4가지 회로를

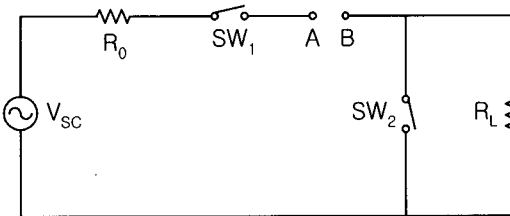


그림 2. 단락실험을 위한 회로도.

Fig. 2. The circuit diagram for the short-circuit experiment.

표 2. 초전도 소자의 임계전류밀도.

Table 2. Critical current densities of superconducting elements.

	임계전류
초전도 소자 1	5.6 A
초전도 소자 2	25.0 A
초전도 소자 3	26.1 A
초전도 소자 4	25.7 A

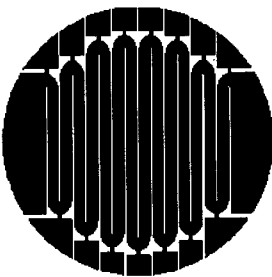


그림 3. 초전도 전류제한 소자의 패턴 모양.

Fig. 3. The pattern shape of the superconducting current limiting elements.

연결하기 위한 단자부분이다. 사고주기는 현재 전력계통에 설치되어 있는 차단기가 5~7주기에 내에 동작하는 점을 고려하여 초전도 소자를 사고전류로부터 보호하기 위해 5주기로 설정하여 사고를 발생시켰다.

초전도 소자는 500 nm 두께의 Al_2O_3 (사파이어) 박막위에 초전도체인 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO)을 300 nm의 두께로 증착하고 다시 두께 200 nm의 금을 증착한 2 inch의 초전도 소자를 사용하였다. 수분과 공기에 약한 YBCO박막은 금박막을 증착함으로써 초전도 소자의 켄치시 발생하는 열을 외부로 빨리 전도시켜 YBCO박막을 보호하며, 큰 사고전류를 통전시켜 YBCO박막의 부담을 줄이기 위한 역할을 한다. 한류소자는 특성상 77 K의 저온인 액체질소 내에 존재해야 하므로 cryostat 내에 위치시켰다.

실험에 사용된 4개의 YBCO 박막은 meander-line type으로 식각되었으며, 각각의 임계전류는 표 2와 같은 값을 갖는다. 초전도 소자 1의 임계전류 값이 다른 소자의 값보다 약 4.5배 정도 낮은 값을 갖는데, 이것은 제조공정이 다르기 때문에 나타난다. 실험에서 임계전류의 차이가 많이 나는 경우와 차이가 적게 나는 경우 소자들의 켄치 특성을 비교하기 위해 4개의 초전도 소자 중 1개를 낮은 임계전류 값을 가진 소자로 선택하였다. 그림 3은 제작한 초전도 소자의 패턴을 보여준다.

3. 결과 및 고찰

그림 4와 5는 그림 1의 각각 회로에 있는 초전도 소자에 흐르는 전류와 전압의 파형을 나타낸 것이다. 그림 4와 그림 5의 (a)에서 알 수 있는 바와 같이 2번 초전도 소자가 켄치가 일어나지 않은 것을 알 수 있다. 1번과 2번 초전도 소자의 임계전류 값의 차이가 약 4.5배 정도 나기 때문에 사고전류가 흐를 때 1번의 초전도 소자가 먼저 켄치되면서 사고전류를 제한하므로 2번의 초전도 소자는 제한된 사고전류로 인해 흐르는 전류값이 너무 작아 켄치가 일어나지 않게 된다. 3번과 4번 초전도 소자의 경우, 임계전류 값이 비슷하므로 거의 동시에 켄치가 발생하지만 초전도 소자에서 발생하는 전압의 크기가 다르므로 전력 부담이 다르다는 것을 알 수 있다. 그림 4와 5의 (b) 또한 1번과 3번의 초전도 소자만이 켄치되고 2번과 4번 소자는 켄치가 발생하지 않았다. 초전도 소자가 병렬로 연결되어 있으므로 사고전류가 분배되어 1번과 3번의 초전도 소자에 의해 우선적으로 제한이 된다.

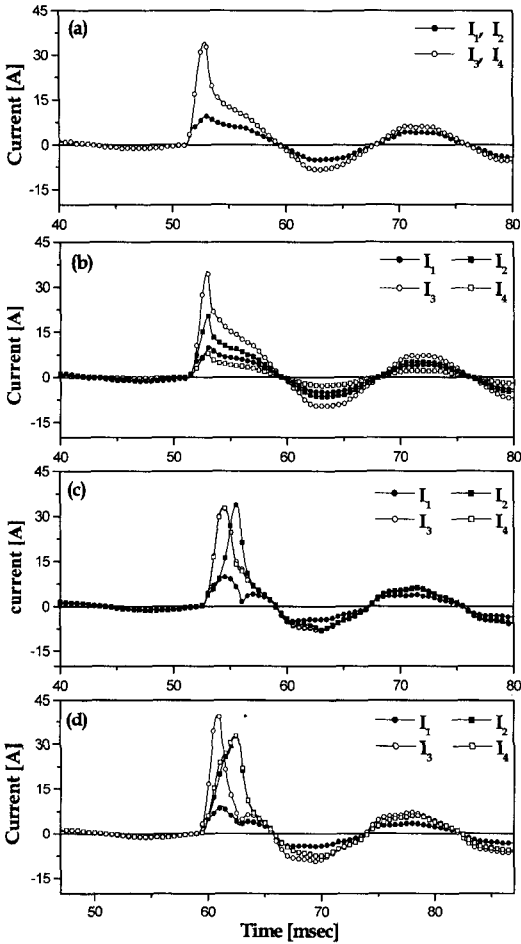


그림 4. 초전도 소자에 흐르는 전류.
 (a) a회로의 초전도 소자에 흐르는 전류,
 (b) b회로의 초전도 소자에 흐르는 전류,
 (c) c회로의 초전도 소자에 흐르는 전류,
 (d) d회로의 초전도 소자에 흐르는 전류.

Fig. 4. Currents flowing in the superconducting elements.
 (a) Current of superconducting elements at "a" circuit, (b) Current of superconducting elements at "b" circuit, (c) Current of superconducting elements at "c" circuit, (d) Current of superconducting elements at "d" circuit.

이렇게 제한된 전류는 다음 병렬회로의 2번과 4번 초전도 소자를 켜치시킬 만큼 크지 않기 때문에 2번과 4번 초전도 소자는 켜치지 않아 양단

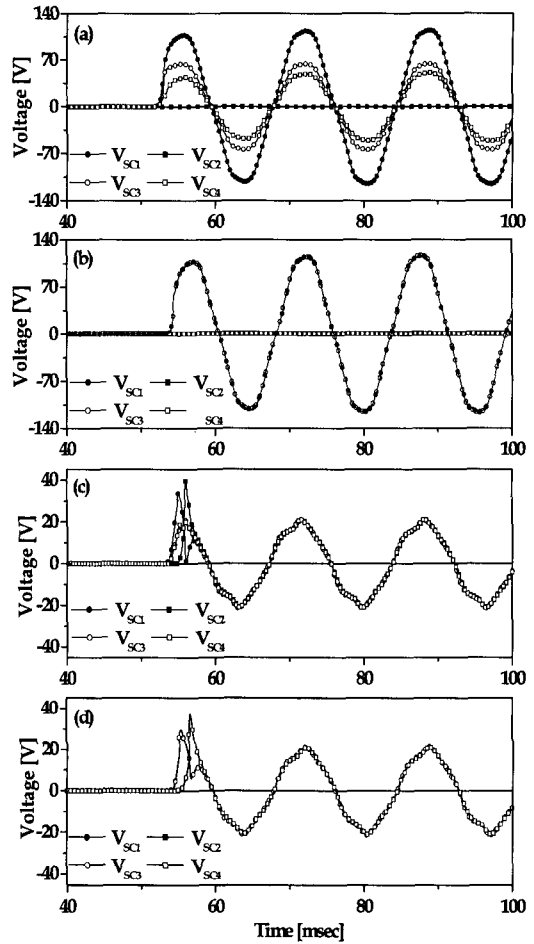


그림 5. 초전도 소자에 발생하는 전압.
 (a) a회로의 초전도소자에 발생하는 전압,
 (b) b회로의 초전도소자에 발생하는 전압,
 (c) c회로의 초전도소자에 발생하는 전압,
 (d) d회로의 초전도소자에 발생하는 전압.

Fig. 5. Voltage generated in the superconducting elements.
 (a) Voltage generated in the superconducting elements at "a" circuit, (b) Voltage generated in the superconducting elements at "b" circuit, (c) Voltage generated in the superconducting elements at "c" circuit, (d) Voltage generated in the superconducting elements at "d" circuit.

전압이 0이 된다. 이렇게 초전도 소자가 동시에 켜치가 발생되지 않는다면 전력의 불균형이 생겨

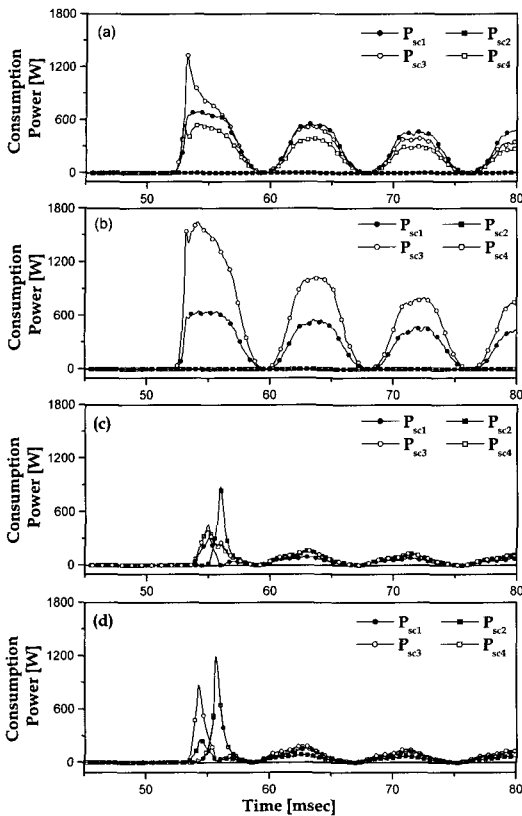


그림 6. 초전도 소자에 인가되는 소비전력.
 (a) a회로의 초전도소자에 인가되는 소비전력, (b) b회로의 초전도소자에 인가되는 소비전력, (c) c회로의 초전도소자에 인가되는 소비전력, (d) d회로의 초전도소자에 인가되는 소비전력.

Fig. 6. The consumption power applied in the superconducting elements.
 (a) The consumption power applied in the superconducting elements at "a" circuit, (b) The consumption power applied in the superconducting elements at "b" circuit, (c) The consumption power applied in the superconducting elements at "c" circuit, (d) The consumption power applied in the superconducting elements at "d" circuit.

한쪽의 초전도 소자에만 부담이 가중되어 파손될 수 있을 것이다.

그림 4와 5의 (c)는 직렬우선 병렬연결회로의

초전도 소자에 병렬로 리액터를 연결한 회로의 전류와 전압의 파형이다. 그림에서 알 수 있듯이 초전도 소자 4개 모두 퀀치가 일어난 것을 확인할 수 있다. 3번과 4번의 소자에서 초기에 제한되는 사고전류의 피크값은 32.8 A로 같고, 1번과 2번 소자의 제한된 사고전류의 피크값은 각각 9.8 A, 33.7 A로 1번 소자에서 발생하는 저항이 크므로 더 많이 제한된다는 것을 확인할 수 있다. 그림 4와 5의 (d)는 병렬우선 직렬연결회로의 초전도 소자에 병렬로 리액터를 연결한 회로로써 초전도 소자 4개가 모두 퀀치가 발생하는 것을 확인할 수 있다. (c)의 전류, 전압 파형과는 달리 2번과 4번의 제한된 소자의 전류가 32.8 A로 같고, 1번과 3번은 소자에서 발생된 저항의 크기에 따라 제한된 전류의 크기가 다르다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 1번과 3번 초전도 소자의 임계전류 값이 약 4.5배 정도의 차이가 발생하면서 초전도 소자의 퀀치시 발생하는 저항의 크기가 많은 차이를 보임으로써 제한되는 전류의 크기가 달라진다고 볼 수 있다. (c)와 (d)의 전압파형을 비교해 보면 (c)회로에서 직렬로 연결된 3번과 4번의 전압만이 같은 값을 갖고, (d)회로에서는 병렬로 연결된 1번과 3번, 2번과 4번 소자의 전압이 같은 값을 갖는다. 이것은 초전도 소자에 병렬로 연결된 리액터가 그림 1(c) 회로보다 (d)회로에서 초전도 소자의 전압을 균일하게 분배시켜 주고, 동시에 퀀치가 발생되도록 유도해 준다는 것을 알 수 있다.

그림 6은 4개회로에 있는 4개의 초전도 소자에서 발생하는 소비전력의 파형을 나타낸 것이다. 직·병렬연결 시에는 퀀치가 일어나지 않는 초전도 소자가 있기 때문에 퀀치가 일어나는 초전도 소자의 부담이 크게 작용을 한다. 그러나 리액터를 병렬로 연결한 직·병렬연결 시에는 초전도 소자가 모두 퀀치되므로 전력의 부담이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 병렬우선 직렬연결 회로의 초전도 소자에 리액터를 연결하는 경우 2번과 4번의 초전도 소자의 소비전력이 같다. 이것은 리액터를 병렬로 연결함으로써 초전도 소자에서 발생하는 전류와 전압을 같도록 유도함으로써 두 초전도 소자에서 소비되는 전력이 같게 되는 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 직·병렬연결에 대한 퀀치 특성을 알아보았다. 실험을 위해 4개의 초전도 소자를 이용하여 직렬우선 병렬회로, 병렬우선 직렬회로,

리액터를 이용한 직렬우선 병렬회로, 병렬우선 직렬회로를 결선하여 실험하였다. 실험을 통하여 직렬우선 병렬회로와 병렬우선 직렬회로는 초전도 소자들의 켄치가 동시적으로 발생하지 않기 때문에 한쪽으로 전력의 부담이 가중되는 것을 확인하였다. 이에 대한 대책으로 초전도 소자에 병렬로 리액터를 연결하여 실험한 결과, 리액터에 흐르는 사고전류에 의해 초전도 소자가 모두 켄치되는 것을 확인하였다. 그리고 임계전류 값이 4.5배 차이나는 소자들과 비슷한 임계전류 값을 가진 소자들을 조합하여 실험하였다. 그 결과, 직렬우선 병렬 연결 회로에서는 임계전류 값이 비슷한 것과의 조합에서 제한되는 사고전류의 크기가 같았으며, 차이가 많이 나는 것과의 조합에서는 제한되는 사고전류의 차이가 많이 나고 낮은 임계전류 값을 가진 소자가 전력의 부담을 더 많이 받는다는 것을 확인하였다. 그리고 병렬우선 직렬연결 회로에서는 약 4.5배의 차이가 나는 소자들의 조합에서 제한되는 사고전류의 값에 차이가 있었지만, 리액터에 의한 균일한 전압분배화로 인해 1번과 2번, 3번과 4번의 초전도 소자에서 발생하는 전압이 같아진다는 것을 확인하였다.

각각의 회로에 연결된 초전도 소자의 소비전력 또한 리액터가 병렬로 연결된 회로가 직·병렬로만 연결된 회로보다 작게 발생한다는 것을 확인하였다. 그리고 병렬우선 직렬연결 회로에서 2번과 4번의 초전도 소자에서 발생하는 소비전력이 같다는 것을 확인하였다. 이것으로부터 사고시 초전도 소자들의 전력분담이 완화되어 개별소자의 부담이 감소되었음을 확인할 수 있었다.

본 연구진은 앞으로 초전도 소자의 임계전류밀도가 비슷한 소자들을 조합하여 초전도체의 부담을 줄이면서 용량을 증대시키기 위한 실험을 계속 수행할 것이다.

참고 문헌

- [1] 김준환, 이강완, "전력계통, 고장전류 증대와 대응방안", 전기저널, 1권, 2호, p. 19, 1998.
- [2] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, "15 kVA급 박막형 초전도 전류제한기의 한류특성", 전기전자재료학회논문지, 13권, 12호, p. 1058, 2000.
- [3] 김혜림, 현옥배, 최효상, 황시돌, 김상준, "저항형 초전도 한류기의 켄치 전파", 전기전자재료학회논문지, 13권, 4호, p. 337, 2000.
- [4] 김태중, 강형구, 고태국, "유도형 고온초전도 한류기용 prototype 직류 리액터의 설계 및 제작", 전기전자재료학회논문지, 16권, 12호, p. 1292, 2003.
- [5] S.-H. Lim, H.-S. Choi, and B.-S. Han, "The fault current limiting characteristics of a flux-lock type high-T_c superconducting fault current limiter using series resonance", Cryogenics, Vol. 44, p. 249, 2004.
- [6] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, and W. Lanz, "Fault current limiter based in high temperature superconductors - different concept, test results, simulations, applications", Physica C, Vol. 354, p. 27, 2001.
- [7] 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.
- [8] H.-S. Choi, H.-R. Kim, and O.-B. Hyun, "Operating properties of superconducting fault current limiters based on YBCO thin films", Cryogenics, Vol. 41, No. 3, p. 163, 2001.