

## 3차 권선에 저항을 사용한 변압기형 전류제한기의 동작 특성

### Operating Characteristics of Transformer Type SFCL with Resistor in Tertiary Winding

최병환<sup>1</sup>, 한병성<sup>1,a</sup>

(Byoung-Hwan Choi<sup>1</sup> and Byoung-Sung Han<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

A transformer type superconducting fault current limiter (SFCL) is one of the fault current limiters which have been proposed to reduce the fault current in the transmission lines. This paper proposes the new circuit configuration of a transformer type SFCL and also investigates the operating characteristics of the transformer type SFCL containing the resistor in the tertiary winding. The proposed SFCL contains the resistor in the tertiary winding. The newly inserted resistor can divert the power which the High-Tc superconducting has to bear. Because the resistor in the tertiary winding relieves the power of the High-Tc superconducting, it is possible that the proposed transformer type SFCL can decrease the more larger fault current than the conventional SFCL with the same High-Tc superconducting. And the cost of the proposed transformer type SFCL can be reduced.

**Key Words** : SFCL, Transformer type, Improved current limiting capacity

#### 1. 서론

지속적인 전력수요의 증가로 인한 송전계통 용량 증대는 계통의 사고전류를 증가시켰다. 이러한 사고전류의 증가는 차단기의 차단 내력을 초과하게 되며 이문제를 가장 쉽게 해결하는 방법은 차단기를 교체하는 것이다. 그러나 차단기의 교체는 기술적, 경제적인 문제가 뒤따른다. 또 다른 대책으로는 직렬리액터나 고임피던스 설비를 설치하는 것이다. 그런데 이들 기기 설치에 계통의 정상상태 운전 시 손실이 발생한다는 문제점을 안고 있다[1,2].

위에서 언급된 모든 문제들을 해결할 수 있는 대안 중 하나로 고온초전도 전류제한기 연구가 활발히 진행되고 있다. 비록 고온초전도 전류제한기는 고온초전도체 냉각을 위한 부가적인 장치가 필

요하지만 정상상태에서 손실이 없다는 장점이 있다. 또 증가한 사고전류를 안정적으로 차단할 수 있도록 차단기 용량에 맞게 사고전류를 제한할 수 있다는 장점도 가지고 있어 차단기를 교체할 필요가 없다[3-5].

고온초전도체를 이용한 전류제한기의 기본이 되는 저항형 전류제한기는 구조가 간단하고 소자의 크기가 작기 때문에 소형화가 가능하다. 그런데 이들 제한기의 내전압과 용량은 제조 시 결정되게 되어있다. 이들 저항형 전류제한기의 용량 증대 방법으로는 주로 고온초전도 박막을 직병렬로 연결한다. 그러나 직병렬로 연결된 고온초전도 박막은 제조 공정상 발생하는 미세한 임계전류의 차이로 불균일한 켄치가 발생하여 파손을 초래하기 쉽다. 그래서 고온초전도 박막에 병렬로 션트를 달거나 변압기형 전류제한기를 사용하여 동시켄치를 유도하기도 한다[6].

변압기형 전류제한기는 저항형 전류제한기에 비해 사고 후 발생하는 임피던스 설정이 용이하고 고온초전도 박막의 내전압보다 큰 전압에서 운전이 가능하다는 장점이 있다. 단일 박막을 사용한

1. 전북대학교 전기공학과

(전북 전주 덕진구 덕진동 1가 664-14)

a. Corresponding Author : hbs@chonbuk.ac.kr

접수일자 : 2008. 10. 24

1차 심사 : 2008. 11. 17

심사완료 : 2008. 11. 24

변압기형 전류제한기는 사고 후 1차 권선에서 발생한 전력을 고온초전도 박막이 모두 감당하게 되어 있다. 만일 이때 1차 권선에서 발생한 전력이 2차 권선에 연결된 고온초전도 박막의 용량을 초과하게 되면 고온초전도 박막은 파손될 것이다. 그래서 2차 권선에 연결된 고온초전도 박막의 파손 방지와 변압기형 전류제한기의 용량 증대를 위해 고온초전도 박막에 연결된 권선의 수를 증가시키기도 한다. 이 방법은 용량 증대는 가능하나 제조공정상 발생하는 미세한 임계전류의 차이로 불안정한 동시퀀치가 발생한다. 또 권선의 수가 증가함에 따라 누설자속이 증가하고 고온초전도 박막을 많이 사용하기 때문에 제조 시 많은 비용이 소요된다.

변압기형 고온초전도 전류제한기의 용량 증대와 더불어 고온초전도 박막의 보호를 위한 한 방법은 사고 후 고온초전도 박막으로 전달되는 전력을 줄이는 것이다. 이를 위해 기본형태의 변압기형 전류제한기에 3차 권선을 추가한 후 여기에 저항을 연결하는 것이다. 이 방식은 단상 3권선 변압기 형태와 같다. 단상 3권선 변압기의 1차 권선으로 유입된 전력은 2, 3차 권선으로 분배되기 때문에 이 원리를 이용하여 고온초전도 박막으로 전달되는 전력을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 변압기형 전류제한기 3차 권선에 연결된 저항이 전류제한에 미치는 영향을 알아보기 위해 2, 3차 권선 모두 고온초전도 박막을 사용한 전류제한기와 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 구조

저항을 이용한 변압기형 고온초전도 전류제한기는 그림 1과 같은 단상 3권선 변압기 형태다. 1차 권선은 선로와 연결되고 2차 권선에는 고온초전도 박막을, 3차 권선에는 저항을 각각 연결하였다. 3개의 권선은 하나의 철심코어에 같은 자속으로 연결되어 있다. 각 권선의 턴수를  $n_1, n_2, n_3$ 라 하고 각 권선의 전압을  $V_1, V_2, V_3$ 라 하면 각 권선의 전압은 식 (1)과 같다. 또한 1차 권선으로 유입된 전력은 2, 3차 권선으로 분배되며 식 (2)처럼 전압과 전류의 관계식으로 표현할 수 있다. 식 (1)과 식 (2)로부터 단상 3권선 변압기의 전압과 전류 관계를 식 (3)처럼 얻을 수 있다[7]. 식 (1)~(3)의 전압과 전류는 모두 순시값이다.

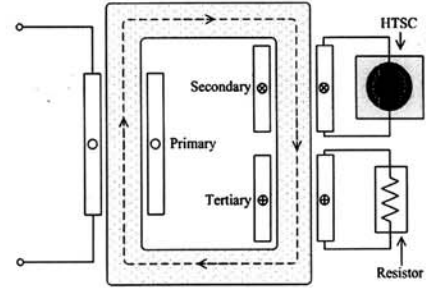


그림 1. 저항을 이용한 변압기형 고온초전도 전류제한기의 구조.

Fig. 1. Schematic of transformer type SFCL with resistor.

$$V_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad V_2 = n_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad V_3 = n_3 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 + V_3 I_3 \quad (2)$$

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2} = \frac{V_3}{n_3} \quad (3)$$

$$n_1 I_1 = n_2 I_2 + n_3 I_3$$

### 2.2 동작원리 및 등가회로

식 (3)을 이용하여 그림 2와 같은 단상 3권선 변압기의 등가회로를 얻을 수 있다[7].  $R_{sc}$ 는 고온초전도 박막을 나타내고  $R_3$ 는 3차 권선에 연결된 저항이다. 각 권선의 누설 임피던스는  $z$ 로 표기하였다. 2차 권선에 연결된 고온초전도 박막과 3차 권선에 연결된 저항은 병렬로 연결되어 있으며 이들은 1차 권선과는 직렬로 연결되어 있다.

각 권선의 누설 임피던스를 무시할 수 있을 만큼의 작은 값으로 가정하고, 등가회로를 나타내는 그림 2에서 보면 알 수 있듯이 사고 전 고온초전도 박막은 저항이 없기 때문에 2차 권선은 단락 상태가 된다. 2차 권선의 단락으로 병렬 연결된 3차 권선은 전류제한기에 아무런 영향을 미치지 않는다. 또한 2차 권선의 단락으로 1차 권선도 단락 상태와 같게 된다. 각 권선의 전압을 나타내는 식 (1)로부터 사고 전 상태를 보면, 2차 권선의 단락으로  $V_2=0$ 이 되며 이를 만족하려면  $d\Phi/dt=0$ 이 되어야 한다. 따라서  $V_3, V_1=0$ 가 됨을 알 수 있다. 전류제한기 1차 권선의 양단간 전압 차이가 없다는 것은 저항이 없음을 의미하며 이는 손실이 없다는 것을 말한다. 따라서 사고 전 전류제한기는 계통에 아무런 영향을 미치지 않는다.

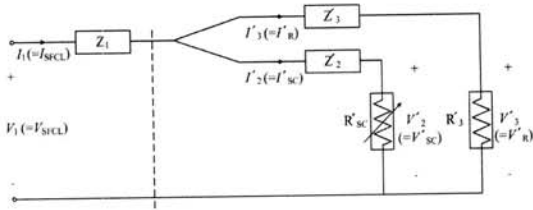


그림 2. 제안한 방식의 등가회로.  
Fig. 2. Electrical equivalent circuit of transformer type SFCL with resistor.

사고가 발생하여 2차 권선에 과전류가 흐르면 고온초전도 박막은 켄치가 발생하고 저항이 발생한다. 이 때 전류제한기 임피던스는 병렬 연결된 2차 임피던스(2차 누설 임피던스와 고온초전도 박막)와 3차 임피던스(3차 누설 임피던스와 저항)에 1차 누설 임피던스를 합한 값이 되며 식 (4)처럼 표현할 수 있다. 1차 권선과 연결된 선로의 사고전류는 전류제한기 임피던스에 의해 제한되며 이때 제한된 전류의 크기는 전류제한기 임피던스와 1차 전압에 의해 결정된다.

기존 변압기형 전류제한기 연구에서 사용되었던 임계전류, 전류제한기 임피던스, 초기 제한전류를 나타내는 식 (5)는 2, 3차 권선에 동일한 임계전류를 갖는 고온초전도 박막을 사용하고 동일한 권선수비라는 가정하에 정리된 식이다. 그러나 본 논문에서 제안한 방식은 권선수비가 다르고 3차 권선에 저항을 사용하였기 때문에 일반적으로 사용하는 단상 3권선 변압기 등가회로[7]를 사용하였다. 단상 3권선 변압기 등가회로를 사용하면 해석이 간단하고 구조와 동작원리의 이해가 쉽기 때문이다.

$$Z_{SFCL} \approx z_1 + \frac{n_1^2}{\frac{n_2^2}{z_2 + R_{SC}} + \frac{n_3^2}{z_3 + R_3}} \quad (4)$$

$$I_{SC} = \frac{j\omega M_p}{R_{SC} + j\omega(L_S + M_S)} I_p$$

$$Z_{lim} = \frac{V_p}{I_p} = \frac{\omega^2 L_p(L_S + M_S) + j\omega L_p R_{SC} - 2\omega^2 M_p^2}{R_{SC} + j\omega(L_S + M_S)} \quad (5)$$

$$I_{ini} = \frac{L_S + M_p}{M_p} I_C$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 실험장치 구성

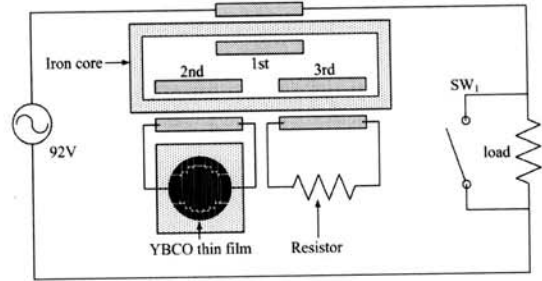


그림 3. 저항을 이용한 변압기형 고온초전도 전류 제한기의 실험 구성도.  
Fig. 3. Experimental circuit of proposed transformer type SFCL with resistor.

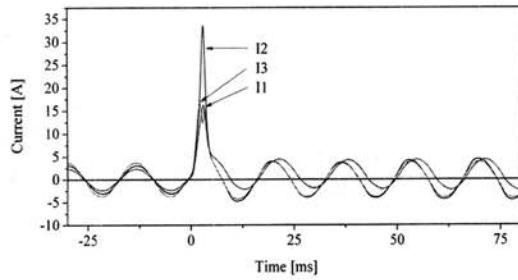
그림 3은 그림 1의 전류제한기 동작 특성을 알아보기 위한 실험 구성도이다. 전원은 92 V를 사용하였고 20 Ω의 부하저항을 1차 권선과 직렬로 연결하였다. 위상각 0도에서 SW1을 닫아 사고를 모의하였으며 우리나라 전력 계통의 차단기가 5주기 이내에 작동하는 점을 고려하여 사고 후 5주기 동안의 파형을 관찰하였다. 실험에서 3차 권선의 저항은 1 Ω을 사용하였다.

실험에 사용한 고온초전도 박막은 직경 2 inch의 사파이어 기판에 300 nm 두께로 증착된 YBCO 박막을 식각공정을 통해 폭 2 mm, 전체길이 420 mm로 제작된 것이다. 임계전류는 측정결과 약 18 A로 나타났다. 기존 실험에서는 전원과 제한기 사이에 표준(기준)저항을 연결하여 사고 전과 후 선로전류를 조사하여 변화량을 알아보았다. 그러나 본 실험에서는 표준저항의 유무에 따라 사고 후에 흐르는 선로전류의 크기가 다르기 때문에 표준저항을 사용하지 않았다.

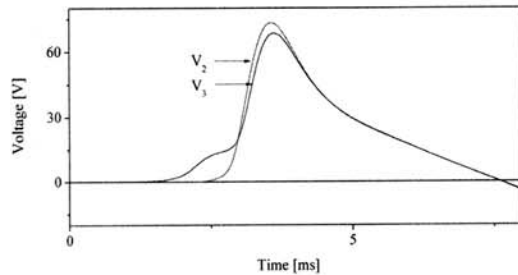
#### 3.2 결과 및 고찰

3차 권선에 고온초전도 박막을 사용한 경우를 Case 1으로 정의하고 저항을 사용한 경우를 Case 2로 정의하였다. 또한 실험 결과 그래프의 크기는 모두 최대치로 표기하였다. Case 2의 특성을 비교 분석하기 위해 권선수비  $n_1:n_2:n_3=6:2:2(126:42:42)$ 를 갖는 Case 1의 전류제한기와 함께 실험하였다.

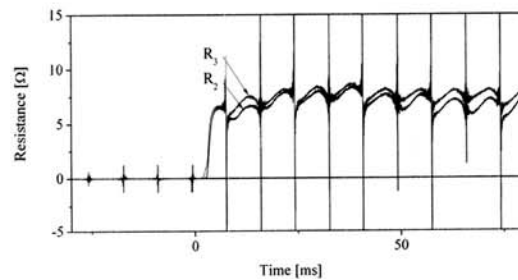
그림 4는 Case 1의 실험 결과이다. 그림 4(a)는 각 권선의 전류이며 사고 후 초기 반주기 동안 사고전류( $I_1$ )는 16.3 A, 2차 전류( $I_2$ )는 33.6 A, 3차 전류( $I_3$ )는 16.8까지 상승하였고 다음 반주기부터 감소하기 시작하여 5주기 때  $I_1$ 은 4.3 A,  $I_2$ 는 4.4 A,  $I_3$ 는 3.8 A까지 감소하였다. 초기 반주기에  $I_2$ 가 가장 크게 상승하였고  $I_1$ 과  $I_3$ 는 비슷한 크기를 보였다.



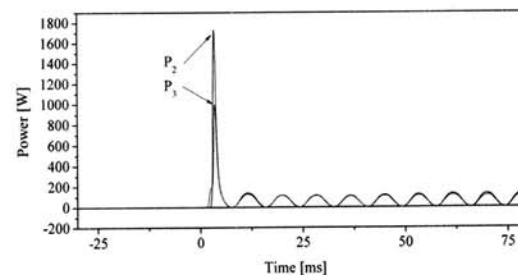
(a) current curves of each winding



(b) voltage curves



(c) resistance curves



(d) power curves of HTSCs

그림 4. Case 1의 사고전류 제한특성.

Fig. 4. Fault current limiting characteristics of transformer type SFCL with two HTSCs.

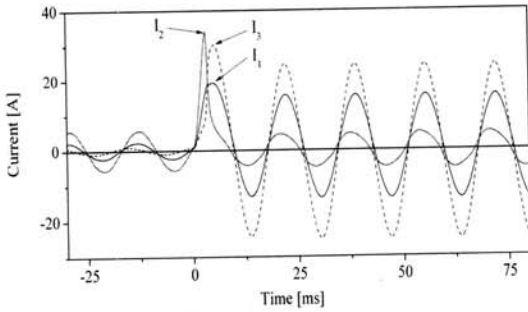
그림 4(b)는 고온초전도 박막의 전압을 나타낸 그래프다. 초기 반주기에 2차 권선의 박막은 사고 후 2.4 ms에서 켄치가 발생하여 73 V의 전압이 발생하였고, 3차 권선의 박막은 1.43 ms에 켄치가 발생하여 68 V의 전압이 발생하였다. 사고 발생 후 두 고온초전도 박막은 서로 다른 시점에서 켄치가 발생하였지만 1주기 이후에는 거의 같은 크기의 전압을 유지하였다.

그림 4(c)는 고온초전도 박막의 저항을 나타내고 있다. 초기 반주기 동안 약 6.5 Ω의 비슷한 크기의 저항이 발생하지만 시간이 지나면서 차이가 발생하였고 5주기 때 2차 권선의 고온초전도 박막은 7.3 Ω, 3차 권선의 고온초전도 박막은 8 Ω의 크기를 보여 약 0.7 Ω의 차이가 났다.

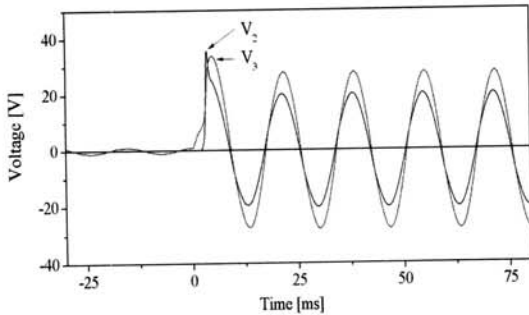
그림 4(d)는 고온초전도 박막의 전력을 나타낸 그래프다. 초기 반주기 동안 2차 권선의 고온초전도 박막( $P_2$ )은 1732 W, 3차 권선의 고온초전도 박막( $P_3$ )은 996 W의 크기를 보였으며 5주기 때  $P_2$ 는 130 W,  $P_3$ 는 114 W의 크기로 감소하였다.

2, 3차 권선에 연결된 고온초전도 박막의 전류, 전압, 저항, 전력의 차이는 제조 공정상 발생하는 미세한 임계전류 차이의 영향도 있지만 2, 3차 권선의 전압과 전류의 차이도 원인이 된다. 2, 3차 권선에 흐르는 사고 전 전류는 각 권선에 인가된 전압과 누설 임피던스에 의해 결정된다. 등가회로를 나타내는 그림 2에서 2, 3차 권선에 같은 임계전류를 갖는 고온초전도 박막이 연결되었다 하더라도 각 권선의 누설 임피던스가 다르면 2, 3차 권선에 흐르는 전류는 다르게 된다. 따라서 켄치시점, 저항, 전력에 영향을 미치는 것은 고온초전도 박막의 임계전류 뿐만 아니라 각 권선의 누설 임피던스와 2, 3차 전압도 영향을 미친다.

그림 5는 Case 2의 실험결과이다. 그림 5(a)는 사고 후 각 권선의 전류를 보여주고 있다. 사고 후 반주기 동안 사고전류( $I_1$ )는 19.5 A, 고온초전도 박막의 전류( $I_2$ )는 34 A, 저항의 전류( $I_3$ )는 30 A까지 상승하였으나 점차 감소하여 5주기 때  $I_1$ 은 15.5 A,  $I_2$ 는 5A,  $I_3$ 는 24.5 A까지 감소하였다. 일반적으로 고온초전도체를 이용한 전류제한기의 사고전류 제한특성은  $I_2$ 와 비슷한 형태를 나타낸다. 그러나 Case 2의 사고전류는 정현파에 근사한 형태로 제한되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 사고전류를 비교한 그림 6에서 다시 설명하려고 한다. 그림 5(b)는 2, 3차 권선의 전압이다. 사고 후 반주기 동안 고온초전도 박막의 전압( $V_2$ )은 35.5 V, 저항의 전압( $V_3$ )은 33.5 V까지 상승하였으나 다음 주기부터 5주기까지  $V_2$ 는 20.2 V,  $V_3$ 는 27.8 V를 유지하였다. 2, 3차 권선의 전압은 권선수 비로 결정되기 때문에 사고 후 반주기 이후 변화는 미세하였다.



(a) current curves



(b) voltage curves

그림 5. 기본 동작 특성.

Fig. 5. Basic operating characteristics of Case 2.

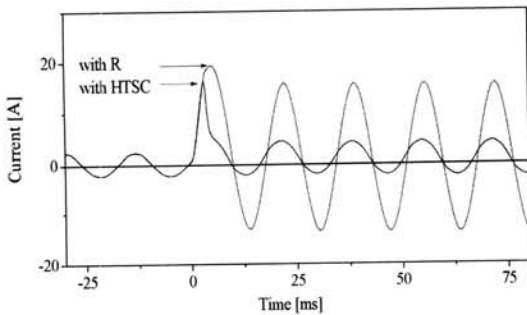


그림 6. 사고전류 비교.

Fig. 6. Comparison of fault current.

그림 6은 Case 1과 Case 2의 사고전류를 비교한 것이다. 초기 반주기 때 사고전류는 Case 1의 경우 16.8 A, Case 2의 경우 19.4 A까지 상승하다가 점차 감소하여 5주기 때 Case 1의 경우 4.4 A, Case 2의 경우 15.5 A까지 감소하였다. 일반적으로 고온초전도체를 사용한 전류제한기의 사고전류는 Case 1과 같은 형태로 나타난다. 그러나 Case

2의 경우 정현파에 가깝게 사고전류가 제한된 것을 확인할 수 있었다. 이것은 그림 5(a)에서 보는 것처럼  $I_2$ 가 급격히 증가할 때  $I_3$ 는 서서히 증가하기 때문이다. 3차 권선에 사용한 저항이 1 Ω이기 때문에 증가하는 전압과 같은 크기로 전류가 증가한다. 그래서  $I_3$ 가 급격히 증가하는 Case 1과 다르게 Case 2의  $I_3$ 는  $I_2$ 보다 급격하지 않게 증가하고  $I_1$ 은 그림처럼 정현파 형태로 제한되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 7은 고온초전도 박막의 저항을 비교한 그래프다. Case 1에서 저항이 작게 발생한 2차 권선의 그래프와 Case 2의 고온초전도 박막을 비교하였다. 사고 발생후 초기 반주기에 발생한 저항은 Case 1의 경우 6.5 Ω, Case 2의 경우 4.3 Ω으로 나타났고 점차 증가하다 감소하였다. 5주기 때 Case 1의 경우 7.3 Ω, Case 2의 경우 4.4 Ω으로 나타났으며 사고 후 비교적 완만한 크기를 보였다.

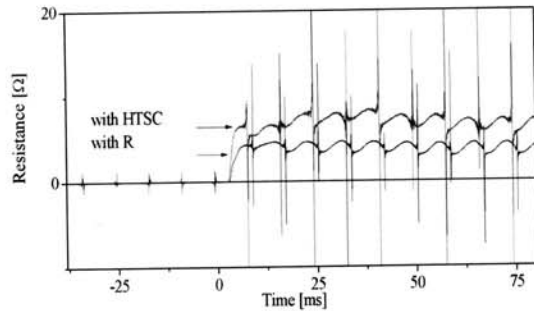


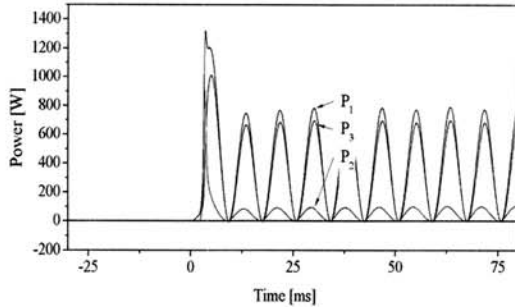
그림 7. 고온초전도 박막 저항의 비교.

Fig. 7. Comparison of HTSC resistance by quench.

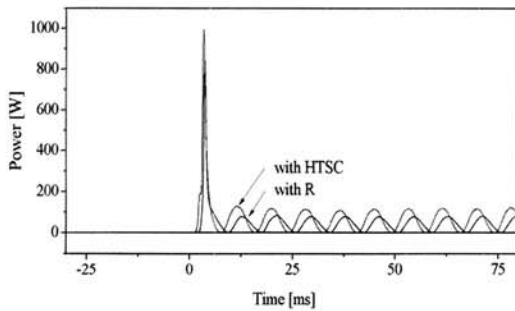
그림 8(a)는 Case 2의 각 권선에서 발생한 전력을 나타낸 그래프다. 사고 발생 후 초기 반주기 동안 전류제한기 전력( $P_1$ )은 1320 W, 고온초전도 박막의 전력( $P_2$ )은 843 W, 저항의 전력( $P_3$ )은 1011 W까지 상승하였다. 5주기 후에는  $P_1$ 은 771 W,  $P_2$ 는 97 W,  $P_3$ 는 679 W까지 감소하였다. 초기 반주기에는 크게 상승하였지만 다음 주기부터 5주기 때까지 비교적 일정한 크기를 유지함을 확인할 수 있다. 5주기 때 1차 권선에서 발생한 전력을 고온초전도 박막은 약 12 %, 3차 권선에 연결된 저항은 약 88 %를 담당하였다.

그림 8(b)는 Case 1과 Case 2에서 고온초전도

박막의 전력을 비교한 것이다. Case 1의 경우 초기 반주기 전력이 996 W, Case 2의 경우 843 W 까지 상승하였다. 다음 주기에는 비교적 큰 폭으로 감소하여 일정한 크기를 유지하였으며 5주기 때 Case 1의 경우 114 W, Case 2의 경우 97 W까지 감소한 것을 확인할 수 있었다.



(a) Power of each winding in Case 2



(b) HTSC power of Case 1 and Case 2

그림 8. 전력의 비교.

Fig. 8. Power curves of HTSC.

#### 4. 결론

고온초전도 전류제한기의 용량 증대를 위한 방법 중의 하나로 변압기형 전류제한기 3차 권선에 저항을 연결시 저항이 전류제한에 미치는 영향을 논문에서 검토하였다. 이를 위해 변압기형 전류제한기의 2, 3차 권선 모두에 고온초전도 박막을 사용한 경우(Case 1)와 3차 권선에 저항을 사용한 경우(Case 2)에 대하여 전류제한 특성을 비교 분석하였다.

사고전류 분석에서 Case 1의 경우가 Case 2의 경우보다 전류 제한율이 좋음을 확인할 수 있었다. 이것은 2, 3차 권선이 서로 병렬로 연결되어 있는 상태에서 3차 권선의 저항이 작은 Case 2의 경우 전체 임피던스가 작게 발생하기 때문이다. 이는 등가회로부터 정리한 전류제한기 임피던스를 나타내는 식 (4)에서도 보여주고 있다.

전력의 경우, Case 1은 1차 권선에서 발생한 전력이 2, 3차 권선에 1/2씩 분배된다. Case 2의 경우 실험 결과 1차 권선에서 발생한 전력을 고온초전도 박막이 약 12 % 정도만 분담하는 것을 확인하였다. 즉, 고온초전도 박막이 분담해야 할 전력을 3차 권선에 연결된 저항이 많이 분담하는 것을 확인할 수 있었다.

결과적으로, Case 2의 제한기는 Case 1의 제한기보다 제한율은 감소하지만 고온초전도 박막의 보호와 더불어 고온초전도 박막에 인가할 수 있는 전력의 양이 증가함을 알 수 있다. 따라서, 변압기형 전류제한기 3차 권선에 저항을 연결할 경우 인가할 수 있는 전력량이 증가하게 되므로 전류제한 용량이 증대한다고 결론지을 수 있다.

#### 감사의 글

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

#### 참고 문헌

- [1] 김준환, 이강완, "전력계통, 고정전류 증대와 대응방안", 전기저널, 1권, 1호, p. 19, 1998.
- [2] R. K. Smith, P. G. Slade, M. Sarkozi, E. J. Stacey, J. J. Bonk, and M. Mehta, "Solid state distribution current limiter and circuit breaker: application requirements and control strategies", IEEE Trans. Power Deli., Vol. 8, No. 3, p. 1155, 1993.
- [3] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, "차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시뮬레이션", 전기학회논문지, 48권, 3호, p. 173, 1999.
- [4] 김태중, 강형구, 고대국, "유도형 고온초전도 한류기용 prototype 직류 리액터의 설계 및 제작", 전기전자재료학회논문지, 16권, 12S호, p.

- 1292, 2003.
- [5] 박충렬, 임성훈, 박형민, 최효상, 한병성, “자속 구속형 전류제한기의 초기 사고전류 제한시점 변화”, 전기전자재료학회논문지, 18권, 3호, p. 269, 2005.
- [6] 조용선, 최효상, 박형민, “2차회로의 수에 따른 하이브리드형 초전도 한류기의 동작 특성”, 전기학회논문지, 55A, 2호, p. 62, 2006.
- [7] J. Duncan Glover, “Power system analysis and design”, PWS Pub., p. 116, 1996.