

초전도 한류소자의 병렬연결에 따른 자속구속형 초전도 한류기의 특성 분석

論 文
57P-2-23

Characteristics of a Flux-Lock Type Superconducting Fault Current Limiter According to the Parallel Connection of the Superconducting Elements.

吳 金 坤* · 鄭 柄 益** · 崔 孝 祥†
(Kum-Gom Oh · Byung-Ik Jung · Hyo-Sang Choi)

Abstract - We investigated the operating characteristics of the flux-lock type superconducting fault current limiter(SFCL) with the parallel connection between the primary and secondary windings which are connected with two superconducting units in series. The parallel connection for current level increase of the flux-lock type SFCL is necessary to apply the SFCL into the power system.[1-7] The resistance generated in superconducting units was dependent upon the winding direction of the primary and the secondary coils, which can reduce the power burden. The resistance of the superconducting elements in the subtractive polarity winding is higher than that of the additive polarity winding. The fault current limiting effect of the subtractive polarity winding is better than that of the additive polarity winding. From this results, we confirmed that the power capacity of the flux-lock type SFCL could be increased by the parallel connection of the superconducting units.

Key Words : The Flux-Lock Type SFCL, Superconducting Element, Subtractive Polarity Winding, Additive Polarity Winding

1. 서 론

현대 사회는 과거에 비하여 전력 사용량이 현저하게 증가 되었다. 대형발전기 등 여러 가지 전력소비 물품들의 증가와 공장의 증설로 인해 전력 계통의 용량 또한 증가되었다. 계통의 용량이 증대됨에 따라 보호기기의 용량도 필연적으로 증가하게 되었다. 하지만 보호기기의 전면적인 교체는 경제적, 기술적 한계가 있기 때문에 기존의 틀을 유지하면서 증대된 용량을 보완해 줄 수 있는 것을 찾게 되었다. 이러한 요구에 부응한 것이 초전도 소자를 이용한 한류기이다[1]-[7]. 이것은 기존의 보호기기와 병행하여 설치하여 줌으로써 대용량의 계통에서도 안정적으로 사고전류를 제한 할 수 있게 한다. 본 논문에서는 초전도 소자 2개를 병렬로 연결한 상태에서 감·가극 결선에 따른 전류제한특성들을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 구조 및 동작 원리

그림 1은 자속구속형 초전도한류기의 소자 2개를 병렬 연결했을 때 등가회로도를 나타내고 있다. L_1 , L_2 는 1, 2차측 권선의 인덕턴스를 나타낸다. I_{FCL} 과 I_1 은 선로전류와 1차측 코일의 전류이며, I_{SCA} 와 I_{SCB} 는 초전도 소자의 전류를 나타낸다. R_{sc} 는 초전도 소자의 저항을 나타낸다. 변압기의 1차측과

2차측이 서로 자기 누설자속이 없고 상호자속만 존재하는 것으로 가정하였다.

상호유도자속이 $M=k\sqrt{L_1L_2}$ 일 때 결합계수 $k=1$ 이고, $R_{SCA} = R_{SCB} = R_{sc}$, $L_{2-1} = L_{2-2} = L_2$, $L = \sqrt{L_1 \pm \sqrt{L_1L_2}}$, $L^2 = L_1 \pm 2\sqrt{L_1L_2} + L_2$ 라고 가정하였다. (+)는 가극결선, (-)는 감극결선을 나타낸다. 선로전류의 크기와 전체임피던스의 회로방정식을 식 (1), (2), (4), (5) 과 같이 나타낼 수 있다.

1. 소자 1개만 연결한 자속구속형 SFCL

$$I_{FCL} = \frac{j\omega L^2 + R_{sc}}{j\omega(L_1 \pm \sqrt{L_1L_2})} \cdot I_{sc} \quad (1)$$

$$Z_{FCL} = \frac{V}{I_{FCL}} = \frac{j\omega L_1 R_{sc}}{j\omega L^2 + R_{sc}} \quad (2)$$

$$I_{ni} = \left(\sqrt{\frac{L^2}{L_1}}\right) I_q \quad (3)$$

2. 소자2개를 병렬연결한 자속구속형 SFCL

$$I_{FCL} = \frac{j\omega L^2 + R_{sc}}{2j\omega(L_1 \pm \sqrt{L_1L_2})} \cdot I_{sc} \quad (4)$$

$$Z_{FCL} = \frac{V}{I_{FCL}} = \frac{j\omega L_1 R_{sc}}{2j\omega L^2 + R_{sc}} \quad (5)$$

$$I_{ni} = 2\left(\sqrt{\frac{L^2}{L_1}}\right) I_q \quad (6)$$

식에서 알 수 있듯이 단독소자보다 소자 2개를 병렬연결한 경우 초전도 소자에 흐르는 전류는 2배로 증가함을 알 수 있었고, 전체 임피던스는 2배로 감소함을 알 수 있었다. 또한 각 초전도 소자전체에 흐르는 전류와 임피던스는 같은 값인

* 正 會 員 : 朝 鮮 大 學 校 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博
 ** 學 生 會 員 : 朝 鮮 大 學 校 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程
 † 교 신 저 자, 正 會 員 : 朝 鮮 大 學 校 電 氣 工 學 科 助 教 授 · 工 博
 E-mail: hyosang@chosun.ac.kr
 接 受 日 字 : 2008 年 4 月 29 日
 最 終 完 了 : 2008 年 5 月 16 日

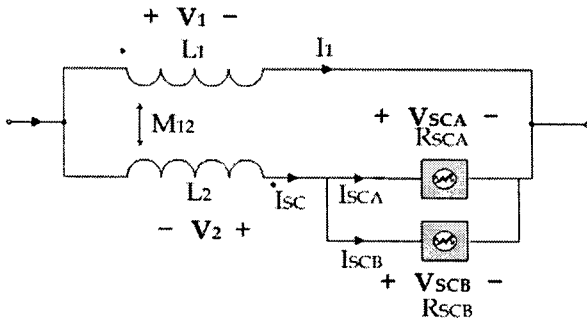


그림 1 초전도소자를 병렬연결한 자속구속형 한류기의 등가회로도

Fig. 1 Equivalent circuit of the flux-lock type SFCL with the superconducting units connected in parallel

것을 알 수 있다.

사고 발생 직후 초전도 소자에서 발생하는 전류가 임계전류 값에 도달하였을 때 초기에 제한되는 전류를 I_{ini} 라고 정의하였을 때, 식 (1), (4)에 $R_{sc}=0$, $I_{sc}=I_q$, $I_{FCL}=I_{ini}$ 를 대입함으로써 식 (3), (6) 을 유도 할 수 있다. 식에서 알 수 있듯이 단독소자보다 소자 2개를 병렬연결한 경우의 초기제한전류가 2배로 증가함을 알 수 있다.

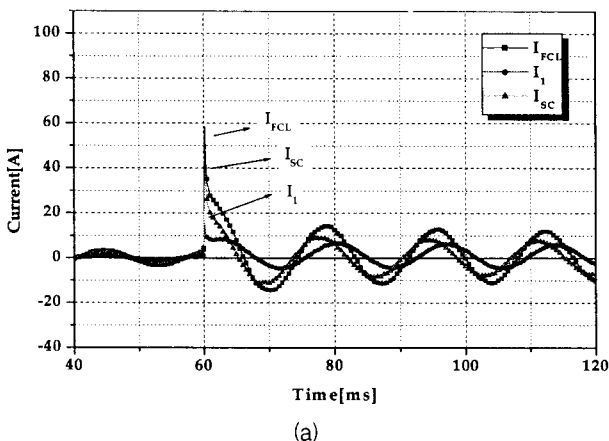
2.2 결선방향에 따른 특성

2.2.1 감극결선시 병렬연결에 따른 전류제한 특성

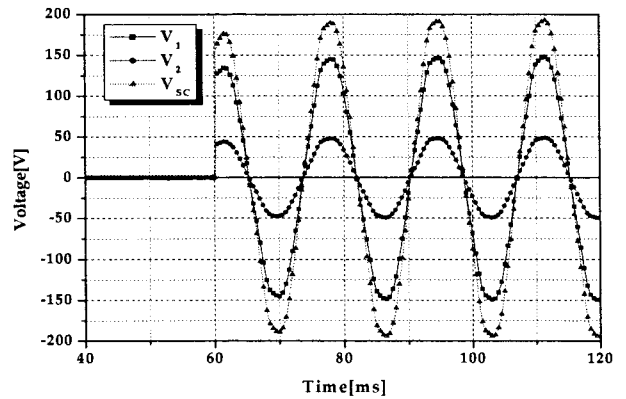
그림 2는 자속구속형 한류기의 단독 소자와 소자 2개를 단순병렬연결 하였을 때 전류파형을 나타내고 있다. 그림 2-(a)의 단독 소자시 선로전류는 사고가 발생 하였을 때 58A_{peak}까지 증가하지만 반주기 이후에는 15.13A로 제한되는 것을 알 수 있다. 그림 2-(c)를 보면 소자 2개를 병렬연결 하였을 시 선로전류는 105.76A_{peak}까지 증가하지만 반주기 이후에는 25.28A로 제한되는 것을 알 수 있다. 이는 소자 2개를 병렬연결하여 임피던스가 거의 절반으로 줄어들었기 때문에 선로전류값이 단독 소자시 보다 증가하는 것을 알 수 있다.

또한 단순병렬 연결하는 것만으로도 제한효과가 우수하다는 것을 알 수 있다.

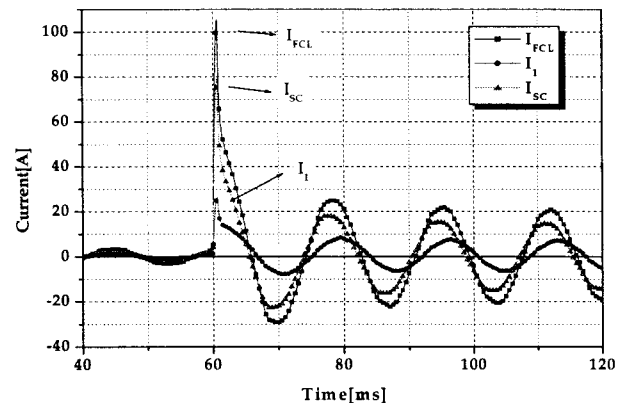
그림 2-(b)의 단독 소자시 사고 발생 후 첫 주기의 초전도 소자 피크값은 178.12V_{peak} 였고 반주기이후에 190.78V_{peak} 까지 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 2-(d)에서 소자 2개를 단



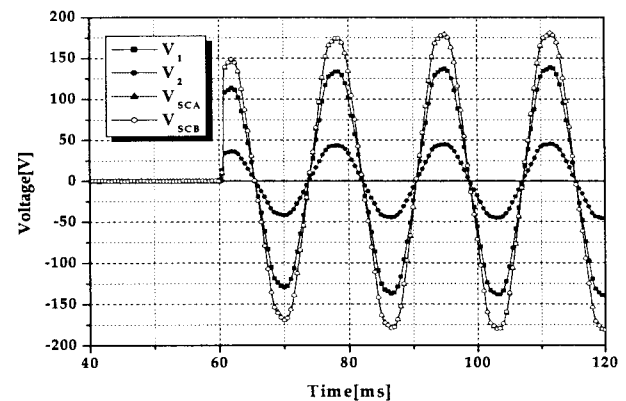
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2 감극결선시 병렬연결에 따른 전류제한 특성

(a) 전류파형, (b) 전압파형 : 단독 소자시
(c) 전류파형, (d) 전압파형 : 병렬 연결시

Fig. 2 Current and voltage waveforms in case of the subtractive polarity winding

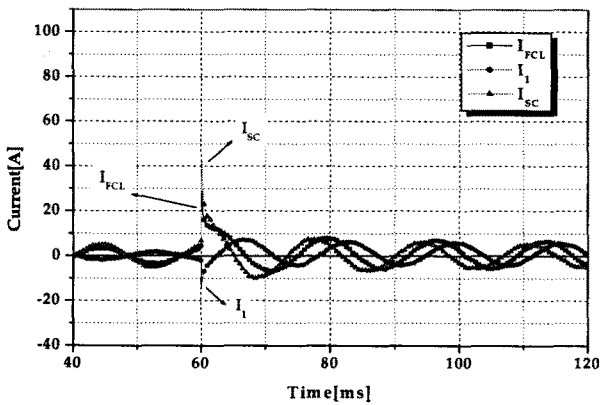
(a) Current waveform, (b) Voltage waveform : with a superconducting element
(c) Current waveform, (d) Voltage waveform : with two superconducting elements connected in parallel

순병렬 연결하였을 시 소자 2개가 동시퀀치가 발생하는 것을 알 수 있다. 첫 주기의 초전도 소자 A, B의 피크값은 148.77V_{peak} 였고 반주기 이후에 173.97V_{peak}로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 단순병렬 연결하는 것만으로도 동시퀀치가

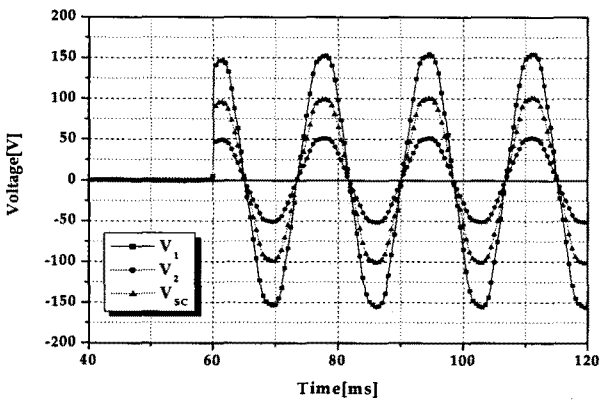
발생하였음을 의미한다. 초전도 소자의 피크값이 단독 소자 시 보다 적은 것으로 보아 소자 보호 측면에서도 유리함을 알 수 있다.

2.2.2 가극결선시 병렬연결에 따른 전류제한 특성

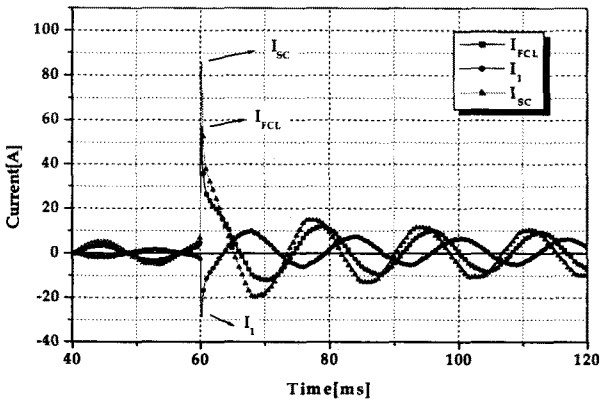
그림 3은 가극결선시 병렬연결에 따른 전류제한특성을 보여주고 있다. 그림 3-(a) 을 보면 단독소자시 선로전류(I_{FCL})는 $28.87A_{peak}$ 까지 상승하여 반주기 만에 전류가 제한되는 것을 알 수 있다. 3-(c)를 보면 병렬연결시 선로전류는, $57.33A_{peak}$ 까지 상승하여 반주기 만에 $12.08A_{peak}$ 까지 제한되는 것을 알 수 있다. 이는 식 (6)에서 확인되는 바와 같이 병렬연결시 초기 제한되는 전류값이 2배로 되어 단독소자시보다 병렬연결시 선로전류(I_{FCL})가 2배까지 상승하는 것을 확인할 수



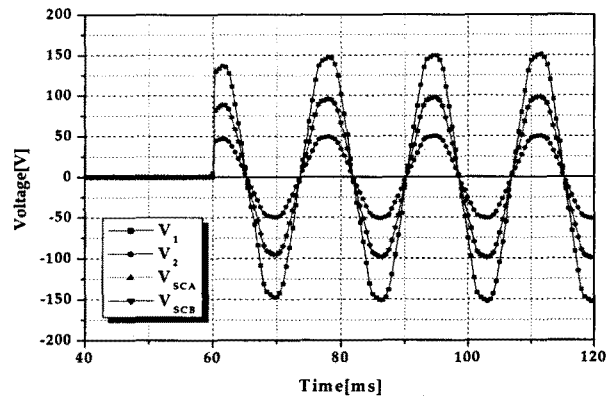
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3 가극결선시 병렬연결에 따른 전류제한 특성

- (a) 전류파형, (b) 전압파형 : 단독 소자시
- (c) 전류파형, (d) 전압파형 : 병렬 연결시

Fig. 3 Current and voltage waveforms in case of the additive polarity winding

- (a) Current waveform (b) Voltage waveform : with a superconducting element
- (c) Current waveform (d) Voltage waveform : with two superconducting elements connected in parallel

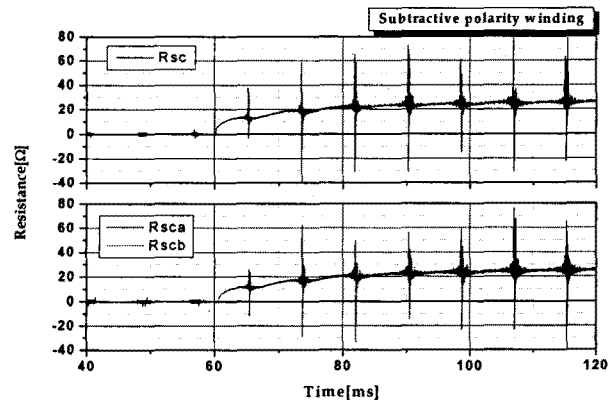


그림 4 감극결선시 병렬연결에 따른 소자 저항

Fig. 4 Resistance waveforms in case of the subtractive polarity winding

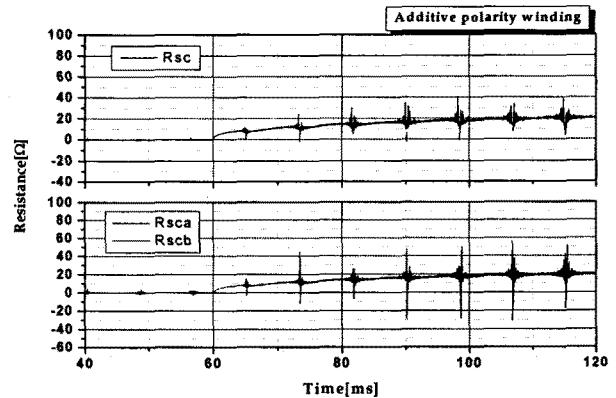


그림 5 가극결선시 병렬연결에 따른 소자 저항

Fig. 5 Resistance waveforms in case of the additive polarity winding

있다. 그림 3-(b)의 단독소자시 초전도소자의 피크값은 $95.38V_{peak}$ 이었고, 그림 3-(d)의 병렬연결시 초전도 소자 $A(V_{SC-A})$, $B(V_{SC-B})$ 의 피크값은 $88.77V_{peak}$ 이었다. 가극결선시도 감극결선시와 마찬가지로 단순 병렬연결시 동시켄치가 되었고 초전도 소자의 피크값이 적은 것을 알 수 있다. 감극, 가극결선시 초전도소자를 병렬 연결하는 것만으로 적용 전류증대효과를 가져올 수 있다.

2.2.3 감·가극 결선에 따른 저항 특성

그림 4와 5는 감극결선과 가극 결선에 따른 소자의 저항값을 나타낸 그래프이다. 초전도 소자의 병렬 연결시에는 감·가극 결선 모두 소자 저항이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 식 (2)와 (5)을 통해서도 확인할 수 있다. 또한, 가극결선에 비해 감극 결선이 더 큰 저항 값을 갖는다는 걸 확인할 수 있는데 이것은 감극 결선이 가극결선에 비해 초전도 소자에 더 큰 부담을 가할 수 있다는 사실을 보여준다. 초전도 소자는 전압에 의해 파괴되는데 큰 저항 값은 큰 전압을 유기하여 초전도 소자를 열화 시킬 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 자속구속형 초전도 한류기의 초전도 한류소자를 병렬연결 하였을 때 감·가극결선 방향에 따른 동작 특성을 분석하였다. 위의 실험 결과들로 볼 때 자속구속형 초전도 한류기는 단순 병렬 연결만으로도 그 특성을 개선시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다. 감극 결선을 통한 소자 병렬연결은 동시 켄치에 유리한 점이 있었고, 초전도 소자의 전압 피크 값이 단독소자 시 보다 적게 되기 때문에 소자의 부담이 그만큼 적어져서 소자 보호 측면에서 유리하게 작용할 것이다. 가극 결선을 통한 소자의 병렬연결도 단순병렬 연결만으로 동시 켄치가 되었고 초전도 소자의 피크전압 값이 단순 연결시보다 적은 것을 알 수 있었다.

또한, 감·가극 결선 모두 단독소자에 비해 특성이 개선되기는 했으나 감극결선의 경우는 가극 결선보다 소자에 가해지는 부담이 더욱 큰 단점을 가지고 있었고, 가극 결선은 감극결선에 비해 전류 제한률이 더 낮다는 단점을 가졌다. 계통적용에 있어서 계통상황에 따라 두 결선방법에서 도출된 장점을 적절히 적용하면 고장전류 저감에 상당히 기여할 수 있을 것으로 전망된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 조선대학교 학술 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] 조용선, 최효상, 박형민, "2차회로 수에 따른 하이브리드형 초전도 한류기의 동작 특성", Trans, KIEE, vol. 55A, No.2, pp. 62, 2006.
- [2] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, "차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시뮬레이션", 전기학회논문지, 48권, 3호, pp. 173, 1999.
- [3] 최효상, 현옥배, 김해림, 황시돌, "15KVA급 박막형 초전도전류제한기의 한류특성", 전기전자재료학회논문지, 13권, 12호, pp. 1058, 2000.
- [4] 최효상, 황시돌, 현옥배, "1선 지락사고에 대한 배전급 저항형 초전도 한류기의 전류제한특성", 전기전자재료학회 논문지, 14권, 6호, pp. 505, 2001.
- [5] 박형민, 임성훈, 박충렬, 최효상, 한병성 "자속구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교", 전기전자재료학회 논문지, 4권, 18호, pp. 365-369, 2005.
- [6] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, and W. Lanz, "Fault current limiter based on high temperature superconductors-different concepts, test results, simulations, applications", Physica C, vol. 354, no. 1-4, pp.27, 2001.
- [7] B. Gromoll, B. Ries, W. Schmidt, H. p. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Mies and H. W. Neumueller, E. Baltzer, S. Fischer, "Resistive fault current limiters with YBCO films 100kVA functional model", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 9, no. 2, pp. 656, Jun, 1999.

저 자 소 개



오 금 곤 (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, 한국조명전기설비학회 부회장.

Tel : (062)230-7033

Fax : (062)230-7020

E-mail : ggoh@chosun.ac.kr



정 병 익 (鄭 柄 益)

1978년 4월 12일생, 2003년 조선대 전기공학과 졸업, 2004~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 062-230-7054

Fax : 062-230-7020

E-mail : kakanova@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