

전력계통 적용을 위한 결선방향에 따른 자속구속형 한류기의 특성 분석

이용미¹, 박정민^{1*}

¹한국폴리텍대학 전기과

The Characteristics analysis of a Flux-lock Type Fault Current Limiter according to the Winding Directions for Power Grid

Mi-Yong Lee¹ and Jeong-Min Park^{1*}

¹Dept. of Electricity, Korea Polytechnics

요 약 국내의 전력계통은 급격한 산업화와 급속적인 경제발전으로 산업시설 및 대도시 인구 밀집지역의 전력수요가 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 전력 사용량의 증가는 각종 전력설비들의 증설을 필요로 하고 있지만 도심지의 경우는 제한된 공간에 설비 증설의 공간확보에도 큰 어려움을 겪고 있다.

또한, 국내 154[kV]나 345[kV]의 송전계통의 구조는 송전거리가 짧고, 전력공급 신뢰성과 안정도 향상을 위해 서로 네트워킹화 되어있다. 이러한 구조는 전력계통 사고발생시 임피던스 감소를 야기시키고 단락사고에 의한 사고 전류의 크기를 점점 증가시키고 있다. 이와 같은 기존방식의 문제들을 효과적으로 해결하기 위한 방안으로 고안된 것이 초전도 한류기이다. 초전도 한류기는 사고 전류에 대한 빠른 동작 및 회복시간과 별도의 사고 감지장치를 불필요하며 신개념의 보호기기이며 환경 친화적인 장점 때문에 국·내외적으로 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다

본 논문에서는 결선방법에 따라 초기사고전류특성, 전류제한특성, 사고각, 인덕턴스 변화에 따른 전류제한 특성을 다각적인 방법으로 분석하였다.

Abstract With the rapid industrialization and economical development, the electricity demands of the industrial facilities and densely populated large cities are continuing to increase in Korea. The increase in the power consumption requires the extension of power facilities, but it is difficult to secure spaces for equipment installation in the limited space of urban areas. In addition, the 154 kV or 345 kV transmission systems in Korea has a short transmission distance, and are connected to one another in network structures that ensure the high reliability and stability of power supply. This structure reduces the impedance during the fault in power system, and increases the magnitude of in the short circuit fault current.

The superconducting fault current limiter (SFCL) was devised to effectively address these existing problems. The SFCL is a new-concept eco-friendly protective device that ensures fast operation and recovery time for the fault current and does not need additional fault detection devices. Therefore, many studies are being conducted around the world.

In this paper, based on the wiring method the initial fault current characteristics, current limiting characteristics, according to the incident angle and the change in inductance current limiting characteristics were analyzed in a multifaceted methods.

Key Words : SFCL(Superconducting Fault Current Limiter), Winding Directions

*Corresponding Author : Jeong-Min Park(Korea Polytechnics)

Tel: +82-61-450-7266 email: pvkorea@kopo.ac.kr

Received August 23, 2013 Revised (1st October 4, 2013, 2nd October 17, 2013, 3rd October 22, 2013) Accepted November 7, 2013

1. 서론

국내의 전력계통은 급격한 산업화 경제발전으로 산업시설 및 대도시 인구 밀집지역의 전력수요가 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 전력 사용량의 증가는 각종 전력설비들의 증설을 필요로 하고 있지만 도심지의 경우는 제한된 공간의 설비 증설 공간확보에도 큰 어려움을 겪고 있다.

또한, 국내 154[kV]나 345[kV]의 송전계통의 구조는 송전거리가 짧고, 전력공급의 신뢰성과 안정도 향상을 위해 서로 네트워크화 되어있다. 이러한 구조는 전력계통 사고발생시 임피던스 감소를 야기시키고 단락사고에 의한 사고 전류의 크기를 점점 증가시키고 있다[1]. 고장 전류 대책으로는 차단기를 교체하는 방법이 있으나 대용량 차단기 교체에 따른 막대한 비용과 기술적인 한계에 부딪히고 있고 모선분리를 통한 고장전류의 저감대책은 과부하 및 계통안정도 저하 등의 문제점이 있다. 또 다른 대책으로는 직렬리액터 설치나 고 임피던스의 전력설비를 설치하는 방법이 있으나 정상 운전시 전압강하를 발생하고 비효율적이라는 문제점이 있다[2-4]. 이러한 문제점을 효과적으로 해결할 수 있는 초전도 한류기는 신 개념의 보호기기이며 사고 전류에 대한 빠른 동작 및 회복 시간과 환경친화적이며 수명이 반영구적인 장점 때문에 이에 대한 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다[5,6].

전력계통에서 초전도 한류기의 목적은 기존 차단기 앞에 초전도 한류기를 설치하여 사고가 발생하였을시 고장 전류를 억제하여 차단기의 용량증대 효과를 가져온다. 초전도 한류기는 켄치특성에 따라 크게 켄치형과 무켄치형으로 분류할 수 있는데 켄치형은 다시 영저항 특성을 이용한 저항형과 마이스너 효과를 이용한 유도형으로 분류할 수 있다. 저항형 한류기는 구조 및 원리가 간단하고 소형화할 수 있는 장점이 있으나 한류 용량 증대를 위해서는 직병렬 연결이 필수적이며 동시켄치 유도라는 큰 문제점이 있다. 유도형 전류제한기는 저항형과 다르게 초전도체에 직접 고장 전류가 흐르지 않아 초전도체의 손실위험이 적고 회복시간이 빠른 장점이 있으나 용량증대시 철심 포화문제와 부피증가의 문제점이 있다[7-10]. 본 논문에서 분석한 자속구속형 한류기는 저항형 전류제한기와 유도형 전류제한기의 구조와 특성을 이용한 제한기로 볼 수 있으며 자속구속형 한류기의 특성은 정상 운전시 철심에 교류 자속이 발생되지 않지만 사고가 발생하여 고장전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 넘어가면 켄치가 발생하고 소자의 저항으로 인해 쇠교자속에 시간 변화가 생겨 각 코일의 전압이 유기됨으로써 사고전류를 제한할 수 있다.

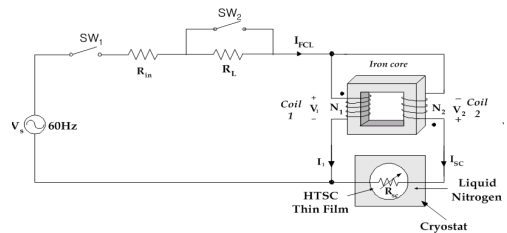
본 논문에서는 결선방법에 따라 초기사고전류특성, 전류제한특성을 다각적인 방법으로 분석하였다.

2. 본론

2.1 자속구속형 한류기의 동작특성

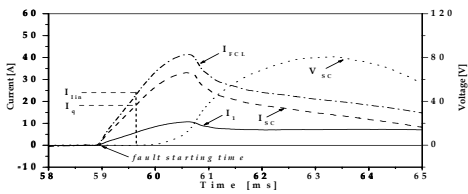
2.1.1 구조 및 초기사고전류 특성

Fig. 1은 자속구속형 전류제한기의 실험회로 구성도를 나타내고 있다. V_S 는 전원전압($60V_{rms}$)이며 R_{in} 은(1Ω)은 전류변화를 측정하기 위한 기준저항을 나타내며 R_L (50Ω)은 부하저항이다. 코일 1(63턴)과 코일 2(21턴)를 감극 결선 또는 가극 결선으로 한 후 그림에서 스위치 SW_1 을 닫아 회로에 전압을 인가하였다. 회로에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하지 않기 때문에 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 단락선로처럼 동작하였다. 스위치 SW_2 를 닫아 단락사고를 발생시키면 고온초전도소자에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하게 되고 켄치가 발생한다. 이때 회로에 흐르는 선로전류(I_{FCL}), 코일 1에 흐르는 전류(I_1), 초전도소자에 흐르는 전류(I_{sc}), 코일 1, 2의 양단전압(V_1, V_2)과 초전도소자 양단전압(V_{sc})을 측정하였다.

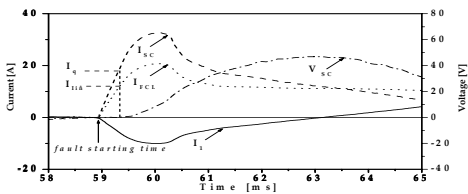


[Fig. 1] The experimental circuit of Flux-lock type SFCL

Fig. 2는 감극 결선시 사고발생 직후 반주기 동안의 전류, 전압 파형을 나타낸 것이다. Fig. 3은 가극 결선시 사고발생 직후 반주기 동안 전류전압의 파형을 나타낸 것이다. 사고 전 코일 1과 코일 2에 흐르는 전류에서 180° 의 위상차가 발생되고 있으며, 이로 인해 사고발생과 동시에 코일 2의 전류가 양의 방향으로 증가됨에 따라 코일 1의 전류는 음의 방향으로 증가함을 관찰할 수 있다. 이후 고온초전도소자의 저항이 증가됨에 따라 코일 2에 흐르는 전류는 감소되고 코일 1에 흐르는 전류는 음의 값에서 영점을 향하게 된다. Fig. 3에서 사고 발생 후 반주기 동안 제한되는 선로전류의 크기는 같은 조건의 감극 결선인 경우보다 향상되는 것을 확인 할 수 있다. 또한 가극 결선시 코일 2에 흐르는 전류가 고온초전도소자의 임계전류값을 넘게 되는 시점이 감극 결선인 경우보다 더 빨라지는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 초기에 제한되는 선로전류의 크기도 감소하는 것을 확인 할 수 있다.



[Fig. 2] The current wave of subtractive polarity winding after fault

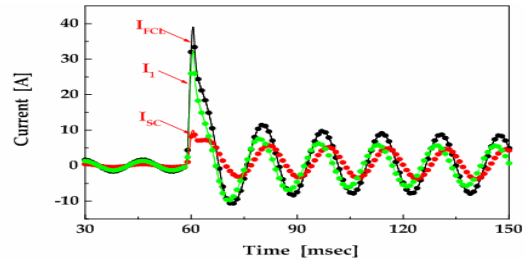


[Fig. 3] The current wave of additive polarity winding after fault

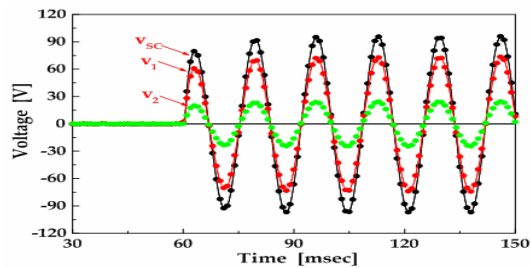
2.1.2 결선방향에 따른 전류제한 특성분석

Fig. 4와 5는 자속구속형 전류제한기를 감극 결선시 사고발생 후 5주기 동안의 전류 및 전압파형을 보여주고 있다. Fig. 4의 전류파형을 보면 선로전류(I_{FCL})은 사고 직후 39A_{peak}까지 전류가 상승하지만 반주기만에 11A까지 감소하고 5주기 동안 서서히 감소하여 8.5A까지 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 선로전류(I_{FCL})은 코일 1의 전류와 코일 2의 전류의 합과 같음을 알 수 있으며 전류가 사고 발생 직후 제한되는 것이 아니라 임계전류 값을 넘어 초전도소자에 켄치가 발생하여 상전도 저항에 의해 코일 2에 흐르는 전류가 제한되어 감소되는 순간 코일 2의 전류를 포함한 선로전류도 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 선로전류와 코일 1의 전류 및 소자전류는 동상이 아니라 인덕턴스에 의해 위상이 약간 앞서고 뒤지는 것을 알 수 있다. Fig. 5의 전압파형도 3주기부터 안정된 파형을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 6과 7은 자속구속형 전류 제한기를 가극 결선시 사고발생 후 5주기 동안의 전류 및 전압파형을 보여주고 있다. Fig. 6을 보면 선로전류(I_{FCL})은 사고 직후 최고 20.5A_{peak}까지 증가하나 반주기만에 7.5A로 감소되고 5주기 동안에 서서히 감소하여 5.5A까지 감소되는 것을 알 수 있다. 단락사고가 발생하였을 때 코일 1의 전류는 음의 방향으로 증가하고 코일 2의 전류는 반대로 양의 방향으로 증가함을 확인 할 수 있다. 임계전류 값을 넘으면 초전도소자에 켄치가 발생하고 상전도 저항에 의해 코일 2의 전류가 감소된다. 코일 1의 전류는 음의 값에서 영점을 향하게 되는데, 영점을 지나면 전류가 크게 증가하다가 선로전류와 코일 2의 전류와 같

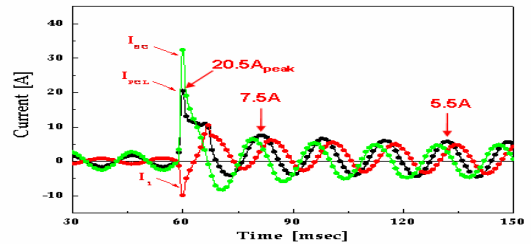
이 제한되는 것을 볼 수 있다. Fig. 7의 전압파형을 보면 초전도소자의 첫번째 주기에서 전압 값이 46.5V이고 첫번째 주기는 49V로 상승하여 안정된 파형이 나타남을 볼 수 있다. 초전도소자의 전압에서 가극 결선시 저항형이 감극 결선시보다 낮음을 보여주는데, 이는 초전도소자에 무리한 영향을 주지 않아 저항형이 가지고 있는 단점인 초전도체의 파손우려를 보완할 수 있을 것으로 사료된다.



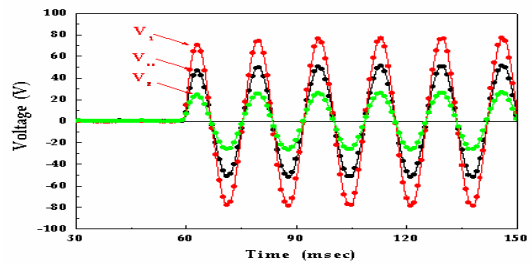
[Fig. 4] The current wave of subtractive polarity winding



[Fig. 5] The voltage wave of subtractive polarity winding



[Fig. 6] The current wave of additive polarity winding



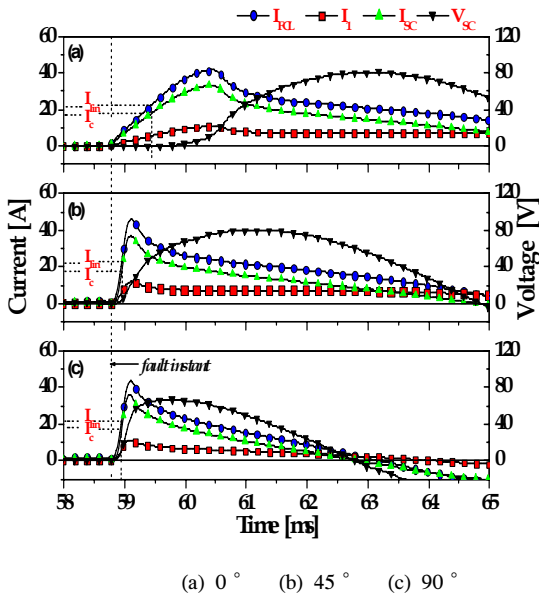
[Fig. 7] The voltage wave of additive polarity winding

2.1.3 사고각에 따른 전류제한 특성분석

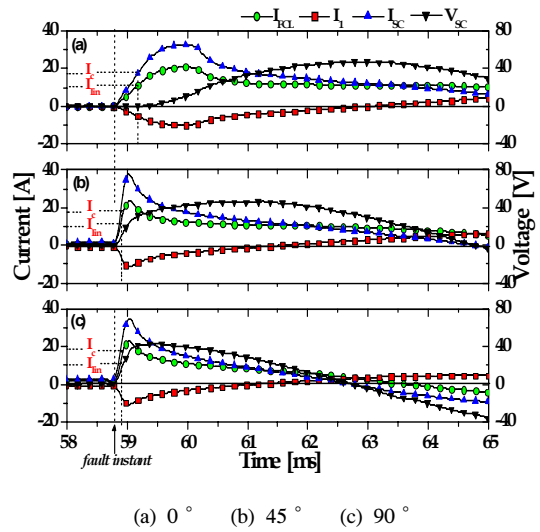
Fig. 8과 9는 각각 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 감극가극 결선시 사고각에 따른 초기 사고전류 제한 특성을 나타낸 것이다. 감극가극 결선인 경우 모든 사고각이 증가할수록 고온초전도소자의 켄치 발생속도가 빨라져서 보다 신속히 선로전류를 제한하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 사고각이 증가할수록 감극가극 결선시 모든 사고 초기 제한전류(I_{lim})나 고온 초전도소자에 흐르는 전류(I_{sc}), 선로전류(I_{FCL}), 소자전압(V_{sc}) 값들이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 결국 사고각의 증가는 신속한 전류 제한 특성을 가지고 있는 반면에 사고 초기 고온초전도소자에 순시전력의 증가로 인한 부담이 증가됨을 분석할 수 있다.

그리고 동일한 사고각에서 선로전류(I_{FCL})의 peak값은 감극 결선인 경우가 가극 결선과 비교하여 높게 나타났으며, 반대로 고온 초전도소자에 흐르는 전류(I_{sc})의 peak값은 가극 결선을 했을 경우 감극 결선 때보다 높게 나타났다. 다시 말하면 가극 결선인 경우는 신속한 전류제한 특성을 가지고 있는 반면 소자에 무리한 부담을 줄 수 있다.

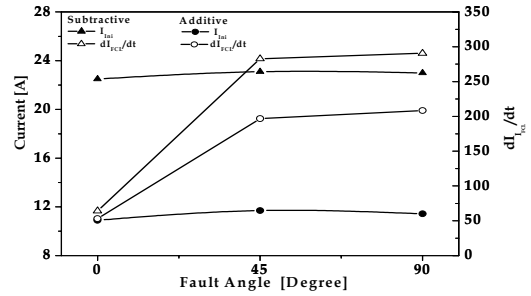
Fig. 8과 Fig. 9에서 확인했던 것들을 Fig. 10의 사고각에 따른 사고초기 제한전류(I_{lim})와 변화량, Fig. 11의 사고각에 따른 초전도소자에 흐르는 전류(I_{sc})의 변화량으로 비교하였다.



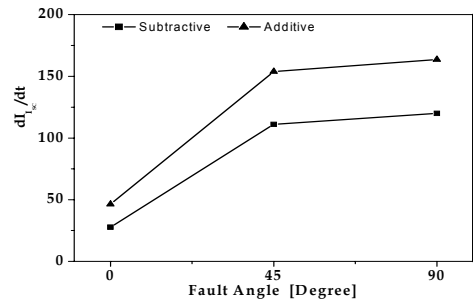
[Fig. 8] The limited fault current wave of subtractive polarity winding according to the fault angle



[Fig. 9] The limited fault current wave of additive polarity winding according to the fault angle



[Fig. 10] The values and increase ratio of the limited current (I_{lim}) according to the fault angle immediately after fault

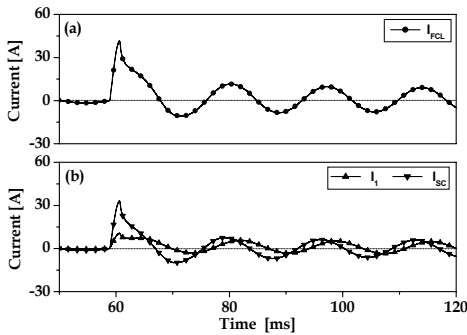


[Fig. 11] The current (I_{sc}) flowing the superconductor according to the fault angle

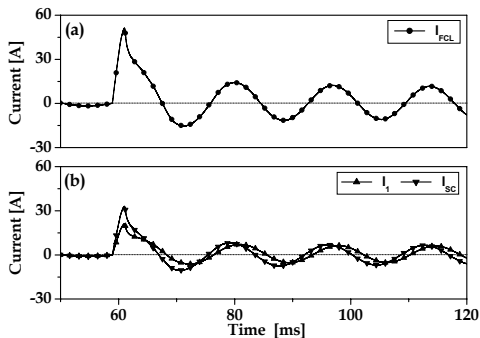
2.1.4 인덕턴스변화에 따른 전류제한 특성분석

Fig. 12-13은 감극결선시 Fig. 14-15는 가극 결선시 코

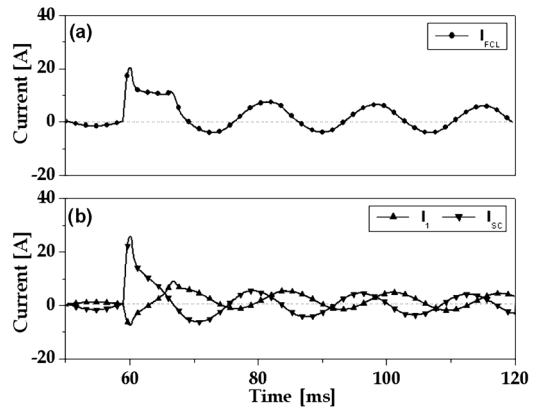
일의 권선수에 따른 전류제한 정도를 조사하기 위하여 1차측 코일의 권선수를 63회로 고정하고 2차측 코일의 권선수를 21회에서 42회로 증가시켰을 때, 사고시 전류제한 특성을 나타낸 것이다. 가극 결선시 선로전류의 제한 정도가 현저하게 향상되는 것을 확인할 수 있다. 이는 사고전에 1차측 코일과 2차측 코일에 흐르는 전류가 180°의 위상차가 발생되고 있으며, 이로 인해 사고발생과 동시에 선로전류가 반전된 두 전류의 합으로 나타난 것에 기인된다. 2차측 코일의 권선수가 42턴인 경우 1차측 코일에 흐르는 전류(I_1)는 2차측 코일의 권선수가 21턴인 경우에 비해 현저하게 커지는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 1차측 코일에 흐르는 전류(I_1)와 2차측 코일에 흐르는 전류(I_{sc})의 합으로 나타나는 선로전류(I_{FCL})는 2차측 코일의 권선수가 증가할수록 제한되는 사고전류 크기가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이는 전체적인 발생자속의 크기가 증가한것에 기인한다.



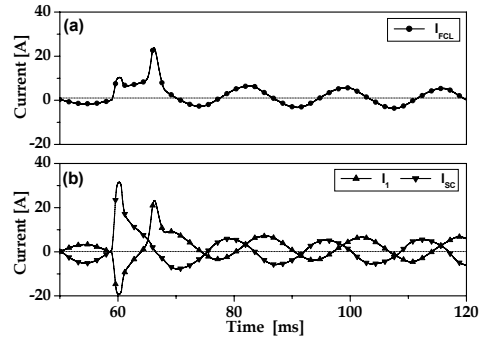
[Fig. 12] The current waveforms in case of subtractive polarity winding ($N_1=63, N_2=21$) (a) I_{FCL} (b) I_1, I_{sc}



[Fig. 13] The current waveforms in case of subtractive polarity winding ($N_1=63, N_2=42$) (a) I_{FCL} (b) I_1, I_{sc}



[Fig. 14] The current waveforms in case of additive polarity winding ($N_1=63, N_2=21$) (a) I_{FCL} (b) I_1, I_{sc}



[Fig. 15] The current waveforms in case of additive polarity winding ($N_1=63, N_2=42$) (a) I_{FCL} (b) I_1, I_{sc}

3. 결론

본 논문에서는 전력계통에 적용하기 위한 자속구속형 한류기의 전류제한 특성을 분석하였다. 초전도 소자인 고온초전도소자(YBCO 박막)를 이용하여 자속구속형 한류기를 설계 제작하였다. 자속구속형 한류기는 결선방향에 따라 전류제한 특성이 다르게 나타났으며 가극 결선시 사고 발생 후 반주기 동안 제한되는 선로전류의 크기는 같은 조건의 감극 결선인 경우보다 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 가극 결선시 코일 2에 흐르는 전류가 고온초전도소자의 임계전류 값을 넘게 되는 시점이 감극 결선인 경우보다 더 빨라지는 것을 볼 수 있었다. 이로 인해 초기에 제한되는 선로전류의 크기도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 감극결선과 가극결선시 사고각이 증가할수록 초전도 소자의 퀀치발생 속도가 빠르게 진행되기 때문에 사고전류를 더 신속하게 제한 할 수 있다는 것

을 확인 할 수 있었다. 이는 고장되는 시점에 전류가 높기 때문이라고 사료된다. 자속구속형 한류기를 감극으로 결선한 뒤 2차측 코일의 인덕턴스가 증가할수록 소자의 선로전류(I_{FCL})가 증가하는것을 확인 하였다. 또한, 가극으로 결선한 경우 감극으로 결선한 경우보다 전류제한 특성이 우수함을 확인하였고 2차측코일의 인덕턴스가 증가할수록 선로전류의 전류제한 특성이 보다 향상되는 것을 확인 하였다.

References

- [1] 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/61.252640>
- [2] Willi Paul and Makan Chen, "Superconducting control for surge currents", IEEE Spectrum, Vol. 35, No. 5, p. 49, 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/6.669977>
- [3] B. Gronoll, B. Ries, W. Schmidt, H. p. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies 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.656-659, Jun. 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/77.783381>
- [4] Tsutomu Hoshino, Khosru Mohammad Salim, Massanori Nishikawa, Itsuya Muta, Taketsune Nakamura, "Proposal of saturated DC reactor type superconducting fault current limiter(SFCL)", Cryogenics, Vol. 41, NO. 7, pp.469-474, Jul. 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-2275\(01\)00096-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-2275(01)00096-0)
- [5] H. S. Choi, O. B. Hyun, H. R. Kim, "Quench Characteristics of Resistive Superconducting Fault Current Limiters Based on YBa₂Cu₃O₇ Films", Physica C, Vol. 351, pp. 415-420, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4534\(00\)01632-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4534(00)01632-4)
- [6] M. Yamaguchi, S. Fukui, T. Satoh, Y. Kaburaki, T. Horikawa, T. Honjo, "Performance of DC reactor type fault current limiter using high temperature superconducting coil", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, pp.940-943, Jun.1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/77.783452>
- [7] H. S. Choi, H. R. Kim, O. B. Hyun, and S. J. Kim, "Quench Properties of Y-Ba-Cu-O Films After Overpowering Quenches", IEEE Trans. on Appl. Super., Vol. 11, pp. 2418-2421. 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/77.920350>
- [8] H. S. Choi, B. I. Jung, Y. S. Cho, "Transient Characteristics of a Flux-coupling type Superconducting Fault Current Limiter According to Winding Direction", IEEE Trans. on Appl. Super., Vol. 19, pp. 1827-1830, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2009.2017836>
- [9] Yu Jiang, Shi Dongyuan, Duan Xianzhong, Tang Yuejin, and Cheng Shijie, "Com- parison of superconducting fault current limiter in power system", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, No. 1, p. 43, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PSS.2001.969980>
- [10] 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, p. 27, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4534\(01\)00018-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4534(01)00018-1)

이 용 미(Mi-Yong Lee)

[정회원]



<관심분야>
전력전자

- 2000년 2월 : 한국기술교육대학교 전기과 (학사)
- 2010년 2월 : 전남대학교 산업대학원 전기과 (석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 일반대학원 전기공학과 (박사 수료)
- 2005년 5월 ~ 현재 : 한국폴리텍대학 전기과 교수

박 정 민(Jeong-Min Park)

[정회원]



<관심분야>
전력전자

- 2002년 2월 : 조선대학교 전기공학과 (학사)
- 2004년 2월 : 조선대학교 일반대학원 전기공학과 (석사)
- 2009년 2월 : 조선대학교 일반대학원 전기공학과 (박사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 한국폴리텍대학 전기과 교수