

A Study on Combination Technology of a Transformer and a Superconducting Fault Current Limiter

최 효 상[†]
(Hyo-Sang Choi)

Abstract - We tried to combine a transformer with a superconducting element and investigated the current limiting characteristics. When a superconducting element was connected to third winding of the transformer, the fault current was limited to about 90 % effectively. The fault current and consumption power were able to be controlled by the turn's ratio of secondary and third windings. It gives flexibility of the rating of a transformer in the power grid. As a result, power burden of a superconducting element was reduced by the decrease of turn's ratio in third winding of a transformer. It was because the voltage behavior of a superconducting element was dependent on turn's ratio of a transformer while the current characteristic was independent.

Key Words : Superconducting Fault Current Limiter, Combination Technology, Quench, Transformer, Operating Mechanism

1. 서 론

전기에너지는 인류가 발견한 에너지 가운데 가장 깨끗하고 다양한 용도로 손쉽게 사용할 수 있는 에너지원이다. 따라서 인류문명의 발달과 함께 전기에너지의 사용은 점점 증대하고 있으며, 우리나라도 예외가 아니어서 전력수요는 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 전력을 안정적으로 공급하기 위하여 국내 송전선로의 경우 환상망으로 구성되어 있다. 전력계통을 환상망으로 구성하면 안정도는 증가하는 반면 1선 지락고장과 같은 계통사고가 발생하면 고장전류가 급격히 증가하는 단점을 가지고 있다. 실제로 서울의 경우 상당한 변전소에서 고장전류가 차단기의 차단내력을 초과하고 있으며 이에 대책으로 모선분리 운전을 하고 있지만, 전력계통 안정도상의 문제를 드러내고 있는 실정이다.

이에 대한 해결책으로 가장 선호되는 것이 초전도한류기이다[1-3]. 초전도 한류기는 정상상태에서는 임피던스가 없기 때문에 손실이 발생하지 않아 송전선로에 부담을 주지 않을 뿐만 아니라, 사고시에는 사고를 자동적으로 감지함과 동시에 스스로 임피던스를 발생하기 때문에 초전도한류기에 대한 연구는 전세계적으로 활발히 수행되고 있다. 대체로 최근의 연구경향은 초전도 소자의 수를 가능한 한 줄이면서 기존의 설비를 활용한 결합기술이 주목을 받고 있다[4-6]. 이러한 추세에 맞추어 본 연구에서는 기존의 상용변압기에 3차 권선을 추가하고 여기에 초전도 소자를 연결함으로써, 설비가 차지하는 공간을 최소화하고 기존 기술과 초전도기술을 결합하는 새로운 시도를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 실험 방법 및 동작 메커니즘

그림 1은 상용변압기와 초전도 한류기의 융합을 위하여 설계한 회로도이다. 1차전압(V_p)과 2차전압(V_s)은 1·2차 코일의 권수비 $a = N_p/N_s = V_p/V_s$ 에 의하여 변환된다. 그리고 2차측 회로에 전류를 감지하는 CT와 감지된 전류의 크기를 SCR Switching Control System에서 판단하여 SCR 스위치를 동작시킨다. 한편, 그림에서 초전도 한류소자는 정상상태에서 초전도성을 유지하기 위하여 액체질소 용기에 놓였고, 고장전류가 흐를 때 퀘칭됨으로써 가변 임피던스를 갖기 때문에 R_{SC} 로 표현하였다[7-8].

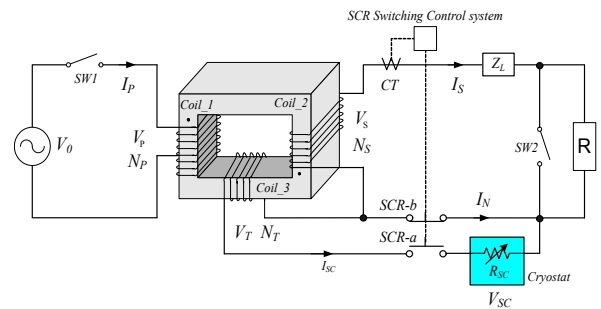


그림 1 단상변압기와 초전도 한류기의 실험 회로도
Fig. 1 An experimental circuit with the combination between a transformer and a SFCL

그림에서 인가전압 V_0 는 SW1 스위치를 통해 1차와 2차 권선비에 의하여 상용 변압기의 동작을 수행한다. 상용변압기의 정상동작시 전압과 전류의 식은 식 (1)과 (2)와 같이 표현할 수 있다.

[†] 교신저자, 중신회원 : 조선대학교 전기공학과 교수·공박
E-mail: hyosang@chosun.ac.kr
접수일자 : 2010년 5월 22일
최종완료 : 2010년 6월 3일

$$V_S = \frac{N_S}{N_P} \cdot V_P \quad (1)$$

$$I_S = \frac{V_S}{R + Z_L} \quad (0 < Z_L < 1) \quad (2)$$

여기서 Z_L 은 변압기 2차측 권선과 부하 R 까지의 선로 임피던스이다. 이때 부하 R 이 단락되는 사고가 SW2에 의하여 발생하면 식 (2)에서 $R=0$ 으로 되어 2차측 회로에 흐르는 전류 I_S 는 Z_L 이 매우 작기 때문에 급격히 증가한다. 이와 같이 사고가 발생하면 변압기의 2차측에 흐르는 사고전류를 CT(current transformer)로 감지하여 SCR 스위치가 인터록 동작을 수행한다. 이때의 사고전류는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_S = \frac{V_S + V_{SC} + V_T}{R_{SC} + Z_L} \quad (3)$$

즉, 사고가 발생하면 SCR 스위치가 동작되고 2차권선과 3차권선이 직렬로 연결되기 때문에 사고전류가 초전도 한류소자의 임계값 이상으로 높아진다. 따라서 변압기 2차 회로에 초전도 소자가 투입된다. 그 후 사고전류는 초전도 소자를 켜치시켜 R_{SC} 의 저항을 발생시키고, 이 저항으로 인해 사고전류는 저감된다.

2.2 실험 분석 및 결과

그림 1의 설계도를 바탕으로 120V의 전원(V_o)을 인가하여 실험하였다. 변압기의 각 권선의 권수는 $N_P : N_S : N_T = 4 : 2 : 1$ 로 하였다.

그림 2는 3차권선을 이용한 초전도 한류기가 없는 경우 사고가 발생하였을 때 부하 R 의 단락으로 인해 발생하는 사고전류의 곡선이다. 120V의 전압이 인가된 경우 사고로 인해 1·2차측 권선에 흐르는 사고전류는 57A와 115A이었다. 사고전과 후의 전류는 권수비에 비례하여 증가하였으며 변압기의 손실은 거의 없는 것으로 판단되었다.

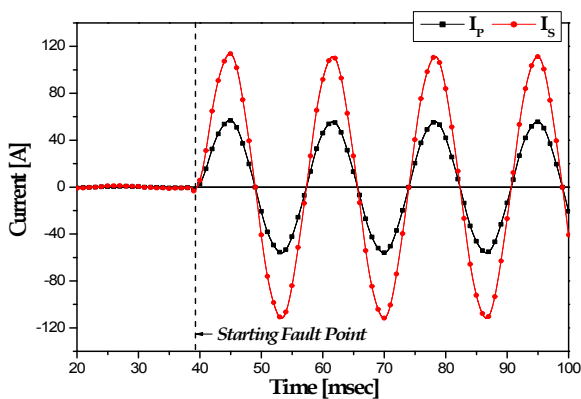
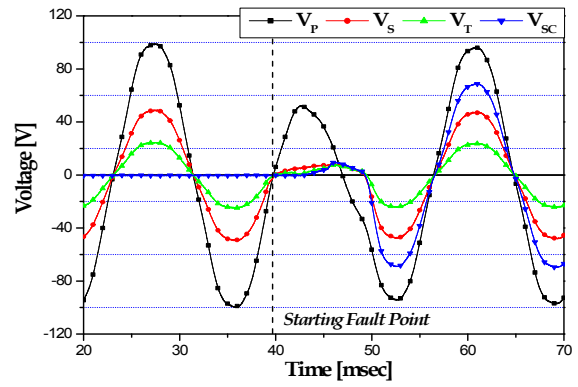


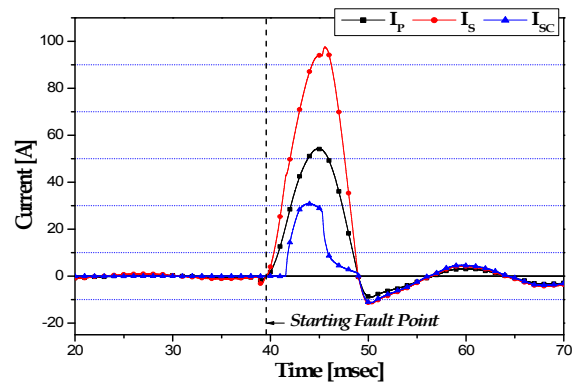
그림 2 $N_P : N_S = 4 : 2$ 인 변압기에서 초전도 한류기가 없는 경우 사고전류 특성 곡선

Fig. 2 Current waveforms of a transformer without a SFCL ($N_P : N_S = 4 : 2$)

그림 3은 사고 전·후의 전압·전류 특성곡선을 나타낸 것이다. 사고전 각 코일의 전압은 권수비($N_P : N_S : N_T = 4$



(a) 전압곡선



(b) 전류곡선

그림 3 권수비가 $N_P : N_S : N_T = 4 : 2 : 1$ 인 경우 전압·전류 특성곡선

Fig. 3 Voltage and current waveforms of a transformer with a SFCL ($N_P : N_S : N_T = 4 : 2 : 1$)

: 2 : 1)에 의해 98, 49, 24.5V의 전압으로 변압되었다. 부하 R 을 단락시켜 사고를 발생시키면 2차회로의 전류가 증가한다. 그 전류를 CT가 감지하여 SCR을 동작시키면 3차권선이 2차측 회로에 투입된다. 이로 인해 3차권선에 연결된 초전도 소자는 사고전류가 임계전류를 초과하면서부터 켜치된다. 사고발생 1주기 이후 1·2차측 권선에 흐르는 사고전류 (I_p, I_s)는 3.1A와 4.2A로 제한되었다.

그림 1의 SCR-b접점과 SCR-a접점의 인터록 동작시 사고발생으로부터 반주기동안 불안정한 특성을 보인다. 그림 4는 SCR의 동작특성을 나타낸 파형이다. 사고발생(A지점) 후 B지점에서 반주기인 D지점까지 SCR의 a와 b접점이 모두 on 상태로 되어 있다. 이것은 SCR-b접점으로 흐르는 전류 I_N 과 SCR-a접점으로 흐르는 전류 I_{SC} 의 파형으로부터 확인할 수 있다. 즉, 2차측 회로와 3차측 회로가 병렬로 연결된 상태라는 것을 의미한다. 이것은 SCR-b에 흐르는 전류 I_N 이 0으로 되어야만 off되는 특성 때문이다. 사고전류는 SCR-a접점의 on동작(B지점)으로 인해 초전도 소자에 흐르고 이 값이 임계전류를 넘게 되면 초전도 소자는 켜치된다(C지점). 그러나 2차측 회로와 3차측 회로의 병렬연결로 인해 사고전류의 대부분은 2차측 회로로 흐르게 된다. SCR-b 접점이 완전히 off되는 D지점 이후부터 사고전류는 초전도 소자로 흘러 비로소 한류동작이 수행된다.

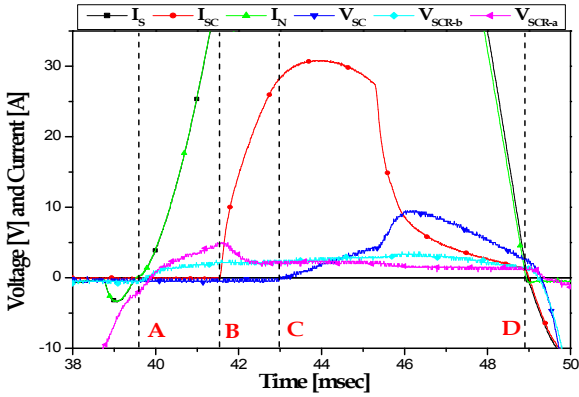
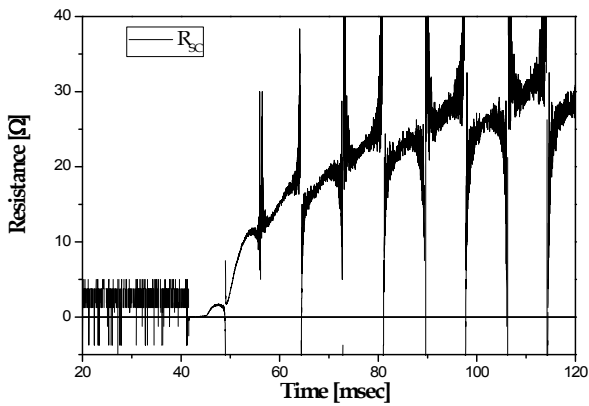
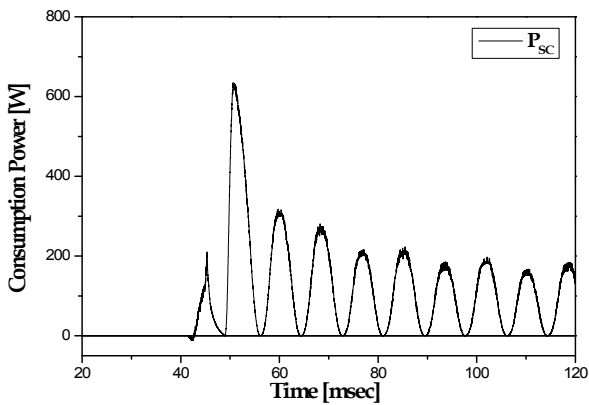


그림 4 SCR의 인터록 동작특성 곡선
Fig. 4 Voltage and current waveforms of a SCR

그림 5는 초전도 소자의 저항 및 소비전력 곡선을 나타낸 것이다. 초전도 소자에서 발생하는 저항은 사고 발생 초기에는 사고전류의 분담으로 인해 크게 발생하지 않았지만, 사고발생으로부터 반주기 이후에는 급격히 증가하였고 3주기 이후 거의 일정한 값으로 포화 된다는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 사고발생 시점은 그림 5(a)에서 40 [msec] 지점이며, 따라서 3주기 이후라 함은 90 [msec]이후의 지점을



(a) 저항곡선

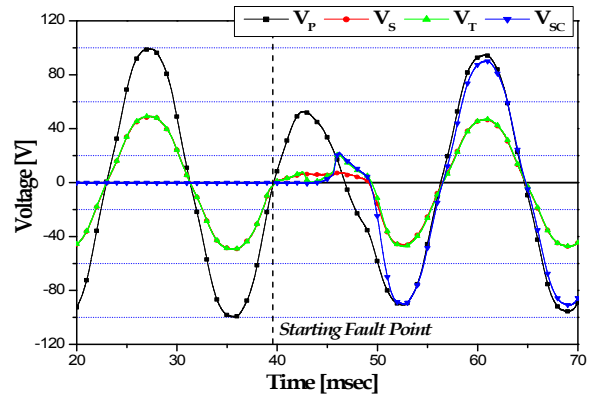


(b) 소비전력 곡선

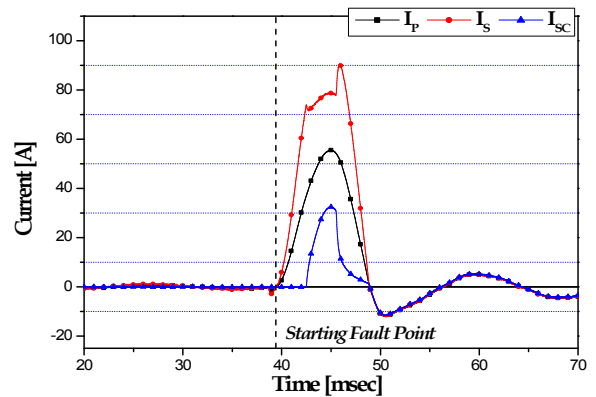
그림 5 초전도 소자의 저항과 소비전력 곡선
Fig. 5 Resistance and consumption power curves of a superconducting element

의미 한다. 그림 5(a)에서 그 지점의 저항값은 약 25Ω을 나타내고 있다. 한편, 그림 5(a)의 곡선에서 spike가 보이는 이유는 실측된 전압값과 전류값으로 저항값을 계산하는 과정에서 전압과 전류의 정현파형으로부터 필연적으로 동반되는 “0”값 때문이며 이는 계산상의 명목값으로써 실제적인 값은 아니다. 그림 5(b)의 초전도 소자의 소비전력 곡선에서 확인할 수 있는 바와 같이 사고 발생 후 반주기 동안에는 200W, 반주기 이후에는 627W까지 전력이 소비되었다. 시간이 흐름에 따라 소비전력은 점점 증대되고 있음을 확인할 수 있다.

3차권선이 있는 변압기의 권수 증가에 따른 초전도 한류기의 동작특성을 분석하였다. 3차권선의 권수는 $N_p : N_s : N_T = 4 : 2 : 2$ 로 설정하였다. 그림 6은 $N_p : N_s : N_T = 4 : 2 : 2$ 의 권수에서 3차권선이 있는 초전도 한류기의 전압·전류곡선을 나타낸 것이다. 2차권선과 3차권선의 권수가 동일하므로 유도되는 전압도 47V로 같다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 이 권선에 의해 켜치된 초전도 소자에서 발생하는 전압은 선로의 저항에 의한 전압강하를 제외하고 89V가 발생한다. 즉, 사고가 발생하면 2차권선과 3차권선, 초전도 소자가 모두 직렬로 연결되므로 3차권선의 증가는 초전도 소자에서 발생하는 전압이 증가함을 의미한다. 사고발생으로부터 반주기 이내에는 SCR의 인터록 동작이 불안정하게 발생



(a) 전압곡선



(b) 전류곡선

그림 6 권수비가 $N_p : N_s : N_T = 4 : 2 : 2$ 인 경우 전압·전류 특성곡선

Fig. 6 Voltage and current waveforms of a transformer with a SFCL ($N_p : N_s : N_T = 4 : 2 : 2$)

하였다. 그러므로 사고전류의 제한특성은 사고발생 1주기 이후의 전류로 비교해야 한다.

그림 7에 초전도 한류기가 없는 경우의 사고전류의 거동을 나타내었다. 초전도 한류기의 한류동작은 전체적인 전류제한 동작이 중요한데 이는 1차권선에 흐르는 전류를 의미하며 그 값은 그림에서 57A이었다. 또한, 1, 2차 권선의 권수비에 따라 2차권선에 흐르는 전류 I_s 는 57A ~ 115A까지 분포하였으나 초전도 한류기를 적용하였을 때 1차 및 2차 권선에 흐르는 전류는 모두 3.1A 이었다. 따라서, 한류동작에 직접적으로 연관되는 1차권선에 초전도 한류기를 적용하기 전과 후의 전류제한율을 계산하여 보면 $[(57-3.1/57) \times 100\% = 94.6\%$ 이다. 즉, 사고발생 1주기 이후 사고전류는 90% 이상 제한된다는 것을 확인할 수 있다. 실제로 상용 변압기와 초전도 한류소자를 결합할 경우 그림에서와 같이 변압기를 통하여 2차측에 흐르는 전류를 자유롭게 변화할 수 있다. 이는 초전도 한류소자에 흐르는 전류를 조종할 수 있음을 의미하고 이를 통하여 다양한 전류계급의 설비에 초전도 한류기를 적용할 수 있는 자유도가 증가하게 되며 변압기와 결합된 실용화급 초전도한류기를 개발할 때 중요한 요소로 작용할 수 있다.

그림 8은 $N_p : N_s : N_T = 4 : 2 : 2$ 를 갖는 경우 초전도 소자의 저항과 소비전력의 곡선을 나타낸 것이다. 초전도 소자에서 발생하는 저항과 소비전력은 28Ω과 910W로 3차권선이 적은 경우보다 더 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 이것은

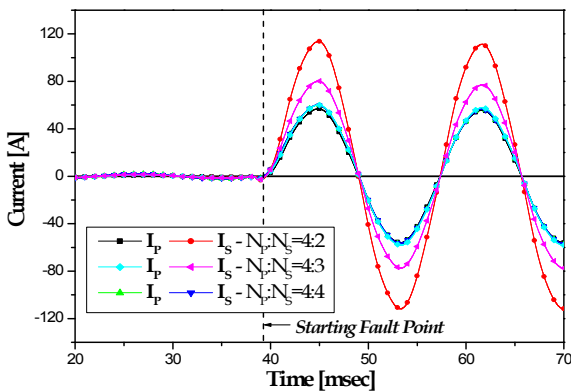
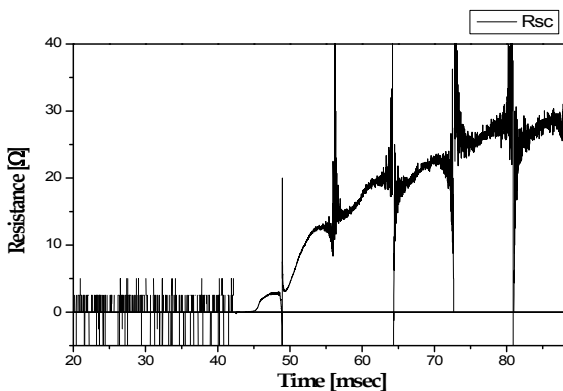
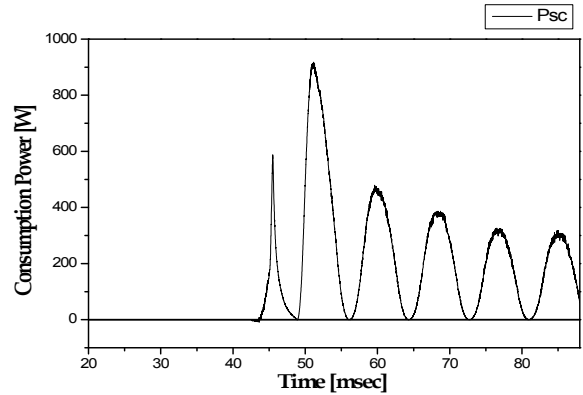


그림 7 초전도 한류기가 없는 경우 권수 증가에 따른 사고 전류 특성곡선

Fig. 7 Current waveforms of a transformer without a SFCL according to turn's ratio



(a) 저항곡선



(b) 소비전력 곡선

그림 8 $N_p : N_s : N_T = 4 : 2 : 2$ 인 경우 초전도 소자의 저항과 소비전력 곡선

Fig. 8 Resistance and consumption power curves of a superconducting element ($N_p : N_s : N_T = 4 : 2 : 2$)

3차권선의 증가로 인해 초전도 소자에서 발생하는 전압이 증가하고 반면 사고전류의 제한 특성은 거의 비슷하기 때문이다. 이것으로 초전도 소자의 전력부담을 감소시키기 위해서 3차권선의 권수를 줄이는 것이 유리함을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

전력계통에서 고장은 필연적으로 발생하는 현상이다. 중요한 것은 고장전류의 크기인데, 이는 전력수요의 증가와 함께 지속적으로 증가하는 추세이다. 최근에는 이러한 고장전류가 송전선로의 경우 차단기의 차단내력을 초과하고 있어 실용화에 필요한 초전도 한류기의 개발이 시급한 실정이다. 본 논문에서는 상용 변압기에 3차 권선을 결합하여 고장전류를 제한할 수 있음을 보여 주었고 주요결과는 다음과 같다. 1) 3차권선을 가진 변압기와 한류소자의 결합에서 초전도 한류기를 적용하기 전의 고장전류는 57A까지 상승하였고, 초전도한류기를 적용한 이후의 고장전류는 3.1A까지 감소하였다, 따라서, 고장전류 제한율은 $[(57-3.1/57) \times 100\% = 94.6\%$ 이었으며 고장전류를 90% 이상까지 효과적으로 제한하였다. 2) 2, 3차 권선의 권수를 조절함으로써 초전도 한류소자에 흐르는 전류 및 소비전력을 탄력적으로 조정할 수 있었다. 이는 다양한 용량의 변압기에 적용하는데 유리한 조건이다. 3) 가능한 한 3차권선의 권수를 줄임으로써 초전도소자의 전력부담을 줄일 수 있었다. 이는 초전도소자에서 발생하는 전압은 권수의 증가에 비례하는 반면, 사고전류의 제한특성은 권수에 크게 영향을 받지 않았기 때문이다. 한편, 실용화를 위하여 CT의 응답특성을 좀더 빠르게 하기 위한 대책과 스위칭소자의 특성개선이 필요함을 확인하였다. 향후 이를 개선하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 LG연암문화재단의 해외연구교수 지원사업에 의하여 이루어진 연구로서, LG연암문화재단에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] X. Yuan, K. Tekletsadik, L. Kovalsky, J. Bock, F. Breuer, and S. Elschner, "Proof-of-Concept Prototype Test Results of a Superconducting Fault Current Limiter for Transmission-Level Applications," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 15, no. 2, pp. 1982-1985, June 2005.
- [2] D. C. Chung, H. S. Choi, N. Y. Lee, G. Y. Nam, Y. S. Cho, T. H. Sung, Y. H. Han, B. S. Kim, and S. H. Lim, "Optimum design of matrix fault current limiters using the series resistance connected with shunt coil," Physica C, vol. 463-465, pp.1193-1197, 2007.
- [3] S. H. Lim, "Fault current limiting characteristics of separated and integrated three-phase flux-lock type SFCLs," Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 2, no. 3, pp. 289 - 293, 2007.
- [4] O. B. Hyun, J. W. Sim, H. R. Kim, K. B. Park, S. W. Yim, and I. S. Oh, "Reliability enhancement of the fast switch in a hybrid superconducting fault current limiter by using power electronic switches", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no. 3, pp. 1843-1846, June 2009.
- [5] G. H. Lee, K. B. Park, J. W. Sim, Y. G. Kim, I. S. Oh, O. B. Hyun, and B. W. Lee, "Hybrid superconducting fault current limiter of the first half cycle non-limiting type", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no. 3, pp. 1888-1891, June 2009.
- [6] O. B. Hyun, K. B. Park, J. W. Sim, H. R. Kim, S. W. Yim, and I. S. Oh, "Introduction of a hybrid SFCL in KEPCO grid and local points at Issue", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no. 3, pp. 1946-1949, June 2009.
- [7] 이주형, 최효상, "3개의 초전도 소자를 갖는 자속구속형 SFCL과 변압기형 SFCL의 특성 비교", 대한전기학회 논문지, Vol. 58P, NO. 1, MAR., pp. 79-83, 2009.
- [8] 정병익, 최효상, "2×3구조의 매트릭스형 초전도한류기의 트리거코일 및 선티저항에 따른 특성", 대한전기학회 논문지, Vol. 58P, NO. 1, MAR., pp. 85-89, 2009.

저 자 소 개



최 효 상 (崔 孝 祥)

1966년 2월 21일생. 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년 한전 전력연구원 선임연구원. 2009년 University of Tennessee 교환교수. 2003년 ~ 현재 조선대학교 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr