

전력계통의 지락사고에 대한 매트릭스형 초전도 한류기의 동작특성

(Analysis Operating Characteristics of Matrix-Type Superconducting Fault Current Limiter in Ground Faults of Power Grid)

오금곤* · 조용선 · 최효상 · 오성보 · 김덕구

(Kum-Gon Oh · Yong-Sun Cho · Hyo-Sang Choi · Seong-Bo Oh · Deog-Goo Kim)

요 약

전력 계통 내에서 발생하는 과도한 고장전류의 억제를 위한 가장 이상적인 방안은 초전도 한류기이다. 초전도 한류기의 전력계통 적용을 위해 본 논문에서는 전력계통 내에서 발생하는 1선, 2선, 3선 지락사고를 모의하여 매트릭스형 초전도 한류기의 동작 특성 및 소비전력을 분석하였다. 모든 지락사고에 대해 매트릭스형 초전도 한류기는 사고 초기에는 85[%] 이상, 1주기 이후에는 95[%] 이상 고장전류를 제한시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 초전도 소자간의 임계특성의 차이를 줄여줌으로써 소비전력이 균등해진다는 것을 확인하였다.

Abstract

It is very important for power stability to suppress the excessive fault current happened frequently in the real power grid. The superconducting fault current limiter (SFCL) is one of the most effective ways to reduce the fault current among the facilities developed so far. In this paper, we have investigated the operating characteristics of the power grid with the SFCL according to three types such as the single, double and triple line-to-ground faults. In addition, we analyzed the consumption power of the superconducting units based on the working data of the SFCL. We confirmed that the fault current could be limited lower than its peak value to 85 percentage in initial fault condition and to 95 percentage after one cycle in the matrix-type SFCL. The consumption powers of the superconducting units were almost equal by reduction of the difference of the critical current between superconducting units element.

Key Words : Flux-Lock Type SFCL, Fault Current Limiting, Recovery, Consumed Energy

* 주저자 : 조선대학교 전기공학과 교수
Tel : 062-230-7033, Fax : 062-230-7020
E-mail : ggoh@chosun.ac.kr
접수일자 : 2009년 5월 12일
1차심사 : 2009년 5월 15일
심사완료 : 2009년 8월 10일

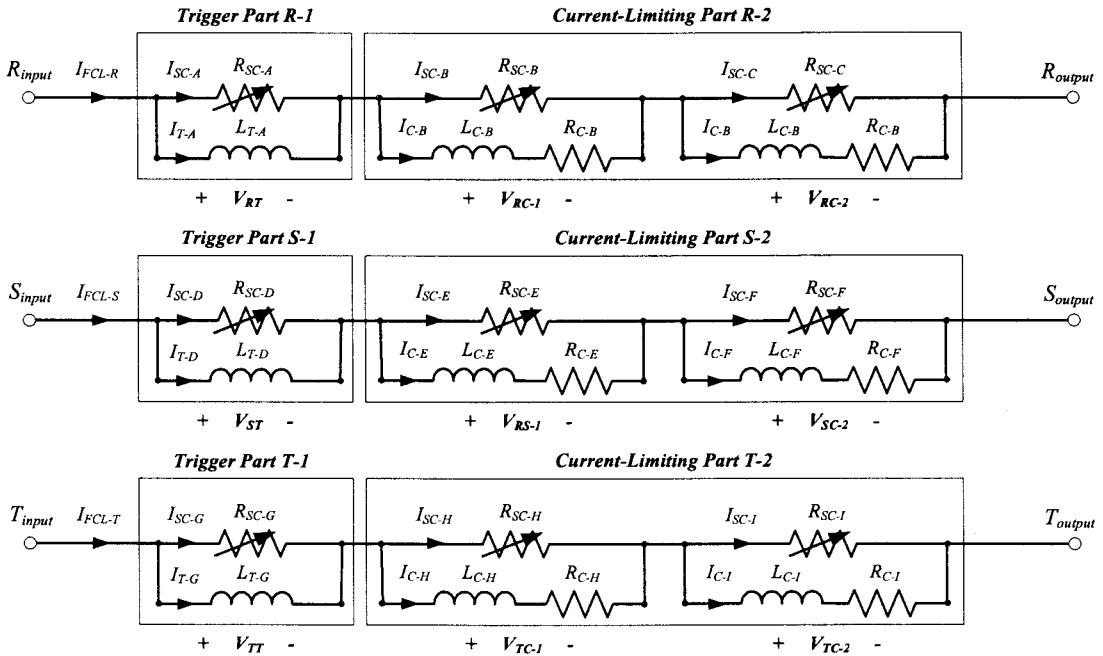


그림 1. 삼상 매트릭스형 초전도 한류기의 등가회로도
 Fig. 1. Equivalent circuit of three-phase matrix-type SFCL

1. 서 론

현재 전력시스템은 급격한 부하의 증가로 인해 과도상태 발생시 필연적으로 고장전류의 증가를 초래하는 바, 그 피해가 날로 확대되고 있다. 이러한 문제는 타 전력기에 충격을 주어 경제적 손실을 발생시키며, 전력 공급의 신뢰성 및 과도안정도를 상당히 저하시킨다. 고장전류의 저감을 위한 해결책으로써 효과적인 방안들 중의 하나가 현재 활발히 연구 중인 초전도 한류기이다. 초전도 한류기는 초전도체의 영저항 특성을 이용한 초전도 설비로서 전력계통에서 발생하는 고장전류를 부가적인 측정 장치 없이 어느 한계값 이하로 제한시킬 수 있는 설비이다 [1-5]. 본 논문에서 제시하는 초전도 한류기는 저항형 초전도 한류기의 일종으로 초전도 소자의 임계특성을 조정하여 고장전류의 제한특성을 개선할 수 있는 형태를 그 특징으로 한다. 전력계통에 적용할 초전도 한류기는 계통에서 발생하는 모든 과도상태에서 신뢰할 수 있는 동작이 이루어져야 한다. 본 논문에서는 전력계통에서 빈번하게 발생하는 1선 및 2선

지락사고뿐만 아니라, 가장 가혹한 고장이라 할 수 있는 3선 지락사고를 모의하여 매트릭스형 초전도 한류기에 적용한 후 그 동작특성을 분석하였다.

2. 매트릭스형 초전도 한류기의 동작특성

2.1 매트릭스형 초전도 한류기의 원리

그림 1은 삼상 매트릭스형 초전도 한류기의 등가회로를 나타낸 것이다. 초전도 한류기는 계통에서 발생하는 과도상태의 고장전류가 초전도 소자의 임계전류를 초과할 경우 켜치되어 상전도 상태로 전이되면서 초전도 소자에 저항을 발생시킨다. 이 저항이 고장전류를 제한하게 되며, 과도상태가 소멸되어 계통의 전류가 초전도 소자의 임계전류 이하로 되면 자동적으로 초전도 상태로 상전이 발생하여 무저항의 전력설비로 동작하게 된다.

매트릭스형 초전도 한류기는 각 상에서 고장전류를 제한할 수 있는 초전도 소자 2개를 갖는 current-

전력계통의 지락사고에 대한 매트릭스형 초전도 한류기의 동작특성

limiting part와 초전도 소자의 임계전류를 제어할 수 있는 trigger part로 구성되어 있다. Current-limiting part는 초전도 소자에 병렬로 션트저항 및 리액터가 연결되어 있기 때문에 고장전류의 제한특성을 지원하며, trigger part는 초전도 소자에 병렬로 리액터가 연결되어 있기 때문에 이로부터 발생한 자장에 의해 초전도 소자의 임계특성을 개선하게 된다. 초전도 소자는 임계전류밀도와 임계자장, 임계온도의 3가지 임계특성을 가지고 있다. 매트릭스형 초전도 한류기는 3가지의 임계특성 중 임계자장을 조정하여 임계전류밀도를 제어할 수 있다[6-7]. 그림 1의 trigger part와 같이 과도상태에서 초전도 소자의 켄치시 병렬 연결된 리액터로 고장전류는 분류되어 흐른다. 이 전류에 의해 초전도 소자를 감싸고 있는 구조를 갖는 리액터에서 자장이 발생하여 trigger 및 current-limiting part에 있는 3개의 초전도 소자에 발생한 자장이 작용하게 된다. 발생한 자장의 영향을 받은 초전도 소자는 임계전류밀도가 낮아져 초전도 소자간에 발생하는 불균형 켄치는 줄어들게 된다. 초전도 소자간 불균형 켄치의 감소는 전압의 분배를 균등하게 하여 초전도 소자의 이용율을 향상시킬 수 있다.

2.2 전력계통의 과도상태 모의 실험회로도

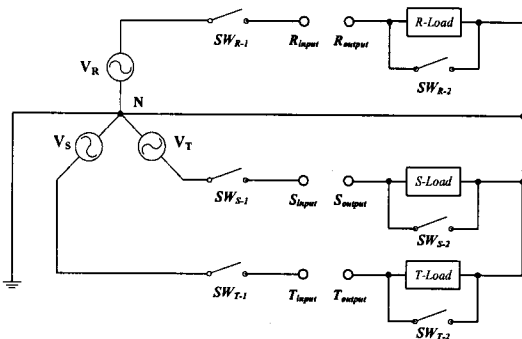


그림 2. 삼상 전력계통의 과도상태 모의 실험회로도
Fig. 2. Experimental circuit for transition condition in the three-phase power grid

그림 2는 삼상 전력계통의 과도상태를 모의하기 위한 실험회로도이다. 그림 1의 초전도 한류기는 각 상의 input과 output에 연결되며, 각 상에 있는 SW₁

을 이용하여 $480/\sqrt{3}$ [V]의 전원전압을 인가한다. 고장발생은 SW₂를 이용하여 지락사고를 모의하였다. 1선 지락사고는 SW_{R-2}만을 이용하였으며, 2선 지락사고는 SW_{R-2}와 SW_{S-2}, 3선 지락사고는 SW_{R-2}와 SW_{S-2}, SW_{T-2}를 모두 ON하여 5주기 동안 실험을 수행하였다. 수용가의 임피던스를 위해 각 상에 50[Ω]의 Load를 인가하였다.

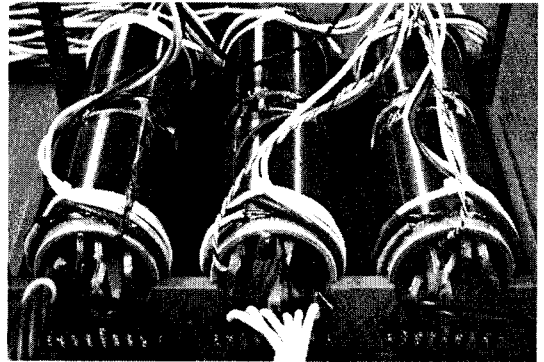


그림 3. 제작된 삼상 매트릭스형 초전도 한류기
Fig. 3. Manufactured three-phase matrix-type SFCL

표 1. 자장인가용 리액터와 션트리액터 및 션트저항의 설계값

Table 1. The designed parameters of reactors to expose the magnetic field, shunt reactors and shunt resistances

		Turns	Resistance[Ω]	Inductance[mH]	
Reactors	L _{T-A}	570	3.57	13.67	
	L _{T-D}	570	3.56	12.61	
	L _{T-G}	570	3.53	12.50	
Shunt Reactors	L _{C-B} , L _{C-C} , L _{C-E} , L _{C-F} , L _{C-H} , L _{C-I}	-	-	1	
	Shunt Resistances	R _{C-B} , R _{C-C} , R _{C-E} , R _{C-F} , R _{C-H} , R _{C-I}	-	20	-

그림 3은 제작된 삼상 매트릭스형 초전도 한류기를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 초전도 소자는 meander-line 형태로 식각되었고 2[inch]의 직경을 가진 YBCO 박막이며, 각 상의 리액터 내부에 3개의 초전도 소자가 설치되어 있다. 초전도 소자로 자장을 인가하는 리액터는 표 1과 같은 조건으로 설계되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

삼상 매트릭스형 초전도 한류기를 전력계통에 적용하기 위해 과도상태에서 주로 발생하는 1선, 2선, 3선 지락사고에 대한 동작특성을 분석하였다.

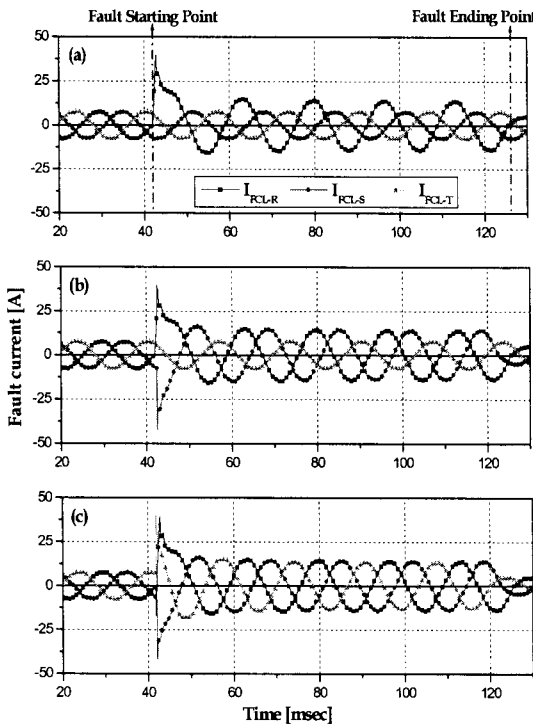


그림 4. 삼상 매트릭스형 초전도 한류기의 고장전류제한특성 곡선

- (a) 1선지락사고시 (b) 2선지락사고시
- (c) 3선지락사고시

Fig. 4. Limiting fault current curves of three-phase matrix-type SFCL

- (a) single line-to-ground fault
- (b) double line-to-ground fault
- (c) triple line-to-ground fault

그림 4는 3가지의 사고에 대한 삼상 매트릭스형 초전도 한류기의 고장전류제한 특성을 분석한 그래프이다. 1선 지락사고시 사고가 발생 후 반주기동안 R상의 고장전류는 38.4[A]로 제한되었으며, 2선 지락사고가 발생한 R상과 S상은 각각 38.8과 -42.2[A]로 제한되었다. 또한 3선 지락사고에서는 38.8, -40.4, 37.5[A]로 제한되었다. 또한, 1선, 2선, 3선 지락사고 모두에서 사고발생 후 2-3[msec]이내에 의미있는 수준까지 고장전류가 저감되었다. 이는 고장전류값을 실제적으로 줄인 결과와 더불어 전력계통의 과도안정도 향상에 중요한 의미를 갖는다. 매트릭스형 초전도 한류기가 없을 경우 선로 임피던스를 무시한다면 277[A]의 고장전류가 발생한다. 초전도 한류기의 설치로 인해 고장전류는 약 85[%] 이상으로 제한되었다는 것을 확인할 수 있다. 또한 고장 발생 후 2주기 만에 15[A]로 제한되어 정상상태의 선로전류인 7.6[A]의 2배로 제한된다. 이것은 초전도 한류기가 없는 경우 고장이 발생한 5주기 동안 277[A]의 고장전류가 선로에 흘러 전력설비에 심각한 충격을 가하게 된다. 그러나 매트릭스형 초전도 한류기의 설치로 인해 사고 초기에는 85[%] 이상, 1주기 이후에는 95[%] 이상 고장전류를 제한시킬 수 있어 차단기가 동작하기 전까지 전력설비에 미치는 충격이 거의 없다는 것을 의미하게 된다. 물론, 고장전류의 저감율은 전력계통의 상황에 따라, 초전도체 고유의 특성에 의하여 초전도한류기의 발생 저항값을 탄력적으로 조절할 수 있다.

그림 5는 3선 지락사고시 각 상의 trigger 및 current-limiting part에 있는 초전도 소자에 흐르는 전류의 곡선을 나타낸 것이다. 1선이나 2선 지락사고시 각 고장상의 초전도 소자에 흐르는 전류 곡선이 3선 지락사고의 해당 초전도 소자의 전류 곡선과 거의 비슷하여 3상 지락사고시의 전류곡선만을 나타내었다. 각 상의 trigger 및 current-limiting part에 있는 초전도 소자의 전류가 최저 38.8[A], 최고 41.2[A]로 거의 비슷한 전류가 흐른다는 것을 확인하였다. Trigger와 current-limiting part의 초전도 소자에 흐르는 전류의 차이는 병렬로 연결된 임피던스의 차이로 인해 고장전류의 분배율이 다르기 때문이다. Trigger part의 병렬 리액터는 초전도 소자에

전력계통의 지락사고에 대한 매트릭스형 초전도 한류기의 동작특성

자장을 인가하기 위한 것으로 표 1과 같이 current-limiting part의 병렬 임피던스보다 작은 값을 가지고 있어 많은 전류가 흐르게 된다[4]. 이로 인해 리액터에서 턴수에 비례한 많은 자장이 발생하여 초전도 소자간의 임계전류의 차이를 줄이게 된다. 각 초전도 소자의 불균일 켄치는 용량증대를 위한 가장 큰 걸림돌인 바, 자장인가를 통해 임계전류의 차이를 줄여주고 병렬연결된 선트저항 및 선트리액터를 통해 전류를 재분배함으로써 초전도 소자의 불균일 켄치는 상당히 해소된다. 더불어 이러한 구조를 매트릭스로 확대하면 좌우 및 상하 매트릭스간 상호 연결을 통해 불균일 켄치는 더욱더 줄어들게 될 것이다.

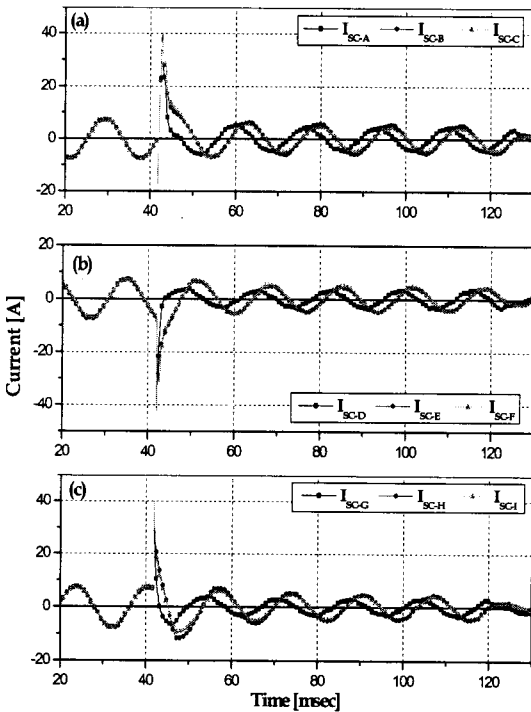


그림 5. 3선 지락사고시 각 상의 초전도 소자에 흐르는 전류특성 곡선 (a) R상 (b) S상 (c) T상
 Fig. 5. Current curves flowing into superconducting units of each phase after triple line-to-ground fault (a) R-phase (b) S-phase (c) T-phase

그림 6은 전력계통에서 3선 지락사고 발생시 각 상의 초전도 소자에서 발생하는 저항곡선을 나타낸

그래프이다. 초전도 소자를 직렬로 연결한 경우 임계특성의 불균형 때문에 불균형적인 켄치가 발생한다. 이로 인해 켄치가 발생하지 않는 소자가 생기며, 또는 켄치되더라도 발생하는 저항의 차이가 커진다 [5]. 그러나 매트릭스형 초전도 한류기는 초전도 소자로 자장을 인가할 수 있고, 소자 연결시 취하는 매트릭스구조에 의하여 소자간의 임계특성을 개선할 수 있다. 이로 인해 그림 6과 같이 모든 초전도 소자가 켄치되었으며 소자에서 발생하는 저항의 차이도 상당히 줄어든다는 것을 확인할 수 있다.

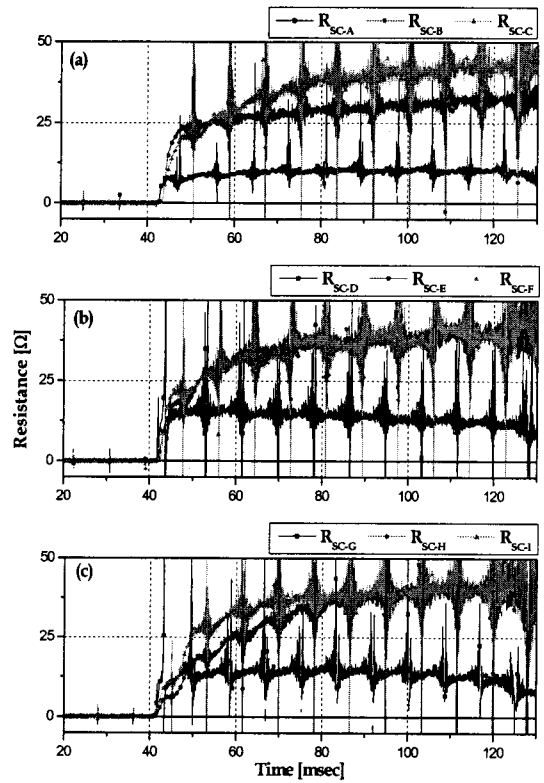


그림 6. 3선 지락사고시 각 상의 초전도 소자에서 발생하는 저항 곡선 (a) R상 (b) S상 (c) T상
 Fig. 6. Resistance curves generated in superconducting units of each phase after triple line-to-ground fault (a) R-phase (b) S-phase (c) T-phase

그림 7은 3선 지락사고시 각 상에 있는 초전도 소자에서 소비되는 전력의 특성곡선을 나타낸 것이다. 소비전력은 실험을 통해 얻은 초전도 소자에 흐르는

전류와 발생하는 전압의 곱으로 계산된 것이다. Trigger part에 있는 초전도 소자의 소비전력은 피크값 기준으로 R상의 경우 2,891[W], S상은 7,429[W], T상은 4,435[W]이었다. 이처럼 각 상에서 소비전력의 차이가 발생한 이유는 고장 발생시점을 R상 0[°]로 적용하였고 이로 인해 S상이나 T상의 고장시점이 R상보다 더 높은 전류값에서 고장이 발생하였기 때문이다. 또한 초전도 소자의 미세한 임계특성의 차이 및 병렬로 연결된 리액터의 임피던스 차이에도 영향을 받는다. 또한 current-limiting part에 있는 2개의 초전도 소자의 소비전력은 고장발생 초기에 R상의 경우 2,049와 1,874[W], S상은 3,047과 2,722[W], T상은 1,204와 1,896[W]이었다. 그러나 고장발생 1주기 이후에는 그 차이가 현저히 줄어들어 거의 같은 전력이 소비된다는 것을 그림을 통해 확인할 수 있다. 이는 초전도소자의 저항특성곡선에서 확인할 수 있는 바와 같이 시간이 지남에 따라 저항특성이 거의 동일한 값으로 수렴하는 특성을 보이기 때문이다.

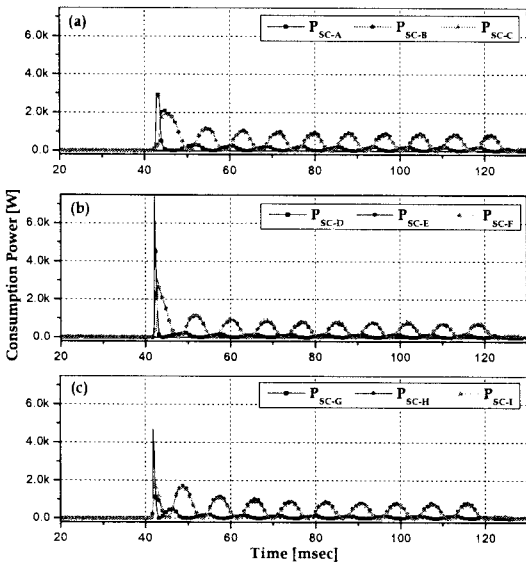


그림 7. 3선 지락사고시 각 상의 초전도 소자에서 소비되는 전력 곡선 (a) R상 (b) S상 (c) T상

Fig. 7. Power curves consumed by superconducting units of each phase after triple line-to-ground fault
(a) R-phase (b) S-phase (c) T-phase

4. 결 론

본 논문은 매트릭스형 초전도 한류기의 전력계통 적용 사례에 관한 연구로서 현재 발생하고 있는 과도 상태에 대한 초전도 한류기의 동작특성을 분석한 것이다. 전력계통에서 일어나는 지락사고에 대해 매트릭스형 초전도 한류기는 고장전류를 85[%] 이상 억제시킬 수 있어 전력설비의 보호 효과를 증대시킬 수 있었다. 저항형 한류기의 용량증대시 문제가 되는 초전도 소자의 켄치 불균형 문제도 상당히 개선되었다. 이는 trigger-part의 리액터에서 발생하는 자장에 의해 초전도소자간의 임계전류의 차이가 줄어들었고, current-limiting part에서 직병렬조합을 통한 매트릭스 구조, 션트저항 및 션트리액터에 의한 전류재분배에 의한 켄치특성이 현저하게 개선된 데 힘입은 바 크다. 즉, 초전도 소자간의 불균형 켄치특성을 개선하기 위해 초전도 소자의 임계자장을 제어하여 거의 균등한 켄치를 유도하였다. 이것은 초전도 소자의 소비전력을 비슷하게 하여 소자간 전력분담을 균등화함으로써 고가의 초전도 소자에 대한 보호효과를 증대시킬 수 있음을 확인하였다.

본 연구결과를 바탕으로 현재 초전도 한류기를 전력계통에 적용하는데 가장 큰 문제점으로 되고 있는 재제로 차단방식에 관한 적용 연구를 하고자 합니다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] H. S. Choi, N. Y. Lee, Y. H. Han, T. H. Sung, B. S. Han, "The Characteristic Analysis Between Flux-Coupling and Flux-Lock Type SFCL According to Variations of Turn Ratios", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 18, No. 2, 2008.
- [2] L. F. Li, L. H. Gong, X. D. Xu, J. Z. Lu, Z. Fang, H. X. Zhang, "Field Test and Demonstrated Operation of 10.5 kV/1.5 kA HTS Fault Current Limiter", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, 2007.
- [3] T. Janowski, S. Kozak, B. Kondratowicz-Kucewicz, G. Wojtasiewicz, and J. Kozak, "Analysis of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiters", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, 2007.

전력계통의 지락사고에 대한 매트릭스형 조전도 인류기의 동작특성

- [4] K. G. Oh, Y. Sun. Cho, H. H. Choi, "1×3 행렬구조를 갖는 매트릭스형 조전도 인류기의 자장유무에 따른 켄치 특성 분석", 대한전기학회논문지, Vol. 57P, No. 3, 2008.
- [5] H. S. Choi, Y. S. Cho, "Critical Current Equalization via Neutral Lines in a Transformer-Type SFCL", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 18, No. 2, 2008.
- [6] D.C. Chung, H.S. Choi, N.Y. Lee, G.Y. Nam, Y.S. Cho, T.H. Sung, Y.H. Han, B.S. Kim, S.H. Lim, "Optimum design of matrix fault current limiters using the series resistance connected with shunt coil", Physica C, Vol. 463, pp. 1193-1197, 2007.
- [7] Y.S. Cho, H.S. Choi, "The current limiting effects of a matrix-type SFCL according to the variations of designed parameters in the trigger and current-limiting parts", Physica C, Vol. 468, pp. 2054-2058, 2008.

조용선 (趙鎔善)

1980년 1월 15일생. 2005년 조선대학교 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 박사과정 수료.

최효상 (崔孝祥)

1967년 2월 21일생. 1985년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(석사). 2000년 전북대학교 전기공학과 졸업(박사). 1995~2003년 한국전력연구원 근무. 2003년~현재 조선대학교 전기공학과 조교수.

Te l : (062)230-7025

Fax : (062)230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

오성보 (吳性寶)

1953년 3월 26일생. 1976년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(박사). 본 학회 평의원. 현재 제주대학교 전기전자공학부 교수.

김덕구 (金德久)

1952년 11월 10일생. 2000년 제주대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년~현재 조선대학교 대학원 박사과정 재학 중.

◇ 저자소개 ◇

오금곤 (吳金坤)

1946년 1월 17일생. 1968년 조선대 전기공학과 졸업. 1994년 동신대학교 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기전자공학부 졸업(박사). 현재 조선대학교 공대 전기공학과 교수.

Te l : (062)230-7033

Fax : (062)230-7020

E-mail : ggoh@chosun.ac.kr