

초전도기기 주요 파라미터 선정에 관한 연구

A study on determination of HTS power devices' parameters

이승렬*, 김종율**, 윤재영***

Seung Ryul Lee*, Jong yul Kim**, Jae Young Yoon***

Abstract: There are many parameters that should be considered from the viewpoint of real power system operation and planning in designing HTS power devices. Especially, in the power system with HTS-FCL(fault current limiter) and TR(transformer), there is close correlation between parameters of the HTS power devices. This paper describes some considerations in determining parameters of HTS power devices, which are related to technical and economical aspects. The main parameters in this study are the quench resistance of HTS-FCL and the % impedance of HTS-TR. The results may give basic information for developing the devices.

Key Words: superconductor, power system, parameter.

1. 서 론

최근 국내외에서 고온초전도체의 고효율, 친환경성 등의 장점으로 인하여 초전도 전력기기의 개발이 가속화되고 있다. 이에 따라 국내외에서 초전도 전력기기 개발 및 계통적용에 대한 다양한 연구가 진행중에 있다[1-9]. 기기개발연구와 함께 초전도기기의 파라미터 선정 역시 매우 중요한 사항 중에 하나이다. 특히, 초전도 전력기기의 개발시 계통관점에서 요구되는 파라미터가 일부 존재하지만, 현재 이에 대한 심도깊은 연구는 미미한 실정이다. 본 연구에서는 계통관점에서 초전도기기의 주요 파라미터를 결정을 위해서 고려해야 하는 사항을 논의하고, 이에 따라 잠정적인 결론을 도출하여 기기개발시 활용할 수 있는 참고자료를 제시하는 것을 목적으로 한다. 주요 대상기기는 최근 대두되고 있는 대용량 초전도(신)전력계통[10]에 적용 가능한 22.9kV급 초전도한류기/케이블 및 154kV/22.9kV 초전도변압기이며, 계통관점에서 가장 중요한 파라미터인 초전도한류기의 한류임피던스와 초전도변압기의 %임피던스를 중점적으로 검토하였다.

2. 대용량 초전도 신전력계통

초전도 전력기기의 주요 파라미터 선정에 관한 문제

* 정 회 원 : 한국전기연구원 연구원
 ** 정 회 원 : 한국전기연구원 선임연구원
 *** 정 회 원 : 한국전기연구원 책임연구원
 원고접수 : 2005년 9월 16일
 심사완료 : 2006년 1월 16일

를 논의하기에 앞서, 본 연구 대상기기의 주 적용대상 계통인 대용량 초전도 신 전력계통에 대해서 간단히 알아보기로 한다. 초전도기기를 적용한 신 전력계통은 Fig. 1과 같이 기존 154kV계통을 점차적으로 22.9 kV 계통으로 대체하는 것을 기본 개념으로 하고 있다. 즉, 초전도기기의 저압대용량 송전 특성을 이용한 것으로써, 도심 변전소 생략, 토목공사비 감소, 설비 최소화를 통한 효율적 토지사용 등의 장점을 갖는다. 특히, 부하 밀도가 높은 대도심은 NIMBY현상 등에 의한 민원으로 인하여 전력기기의 입지문제가 심각한데, 제안된 대용량 초전도 신 전력계통의 경우, 이러한 문제를 해소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 현재 개념설계중인 기본 계통구성도는 Fig. 2와 같으며, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 초전도한류기, 초전도변압기, 초전도케이블을 병행 적용한다는 특성을 갖고 있다.

3. 초전도기기 주요 파라미터

초전도기기의 개발시 우선적으로 고려해야할 파라미터 중 계통측면에서 요구되는 주요 파라미터는 Table 1과 같다. 표에서 초전도기기의 통전가능 최대 고장전류는 차단기 정격차단률, 최대 통전시간은 계전기 동작시간을 고려해야 하며, 각 기기간 퀀치협조 역시 필

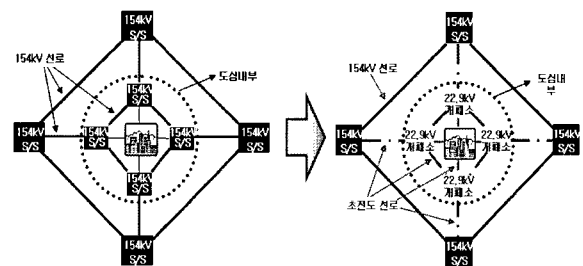


Fig. 1. Concept of superconductive power system.

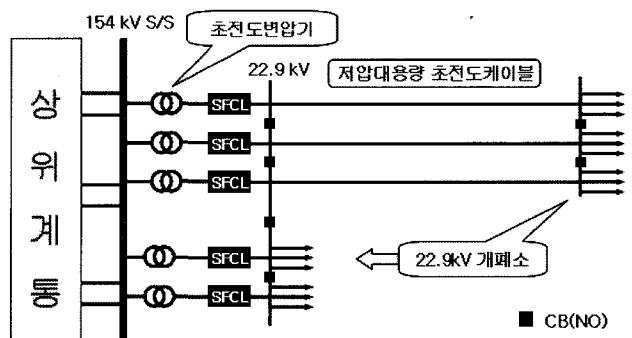


Fig. 2. Structure of superconductive power system.

Table 1. Key parameters and consideration for power system operation.

기기	파라미터	계통측면 고려사항
초전도 한류기	고장전류 통전능력	통전가능 최대 고장전류는 차단 기 정격차단전류를, 고장전류 통 전시간은 과전류계전기 한시동작 시간을 고려
	열방산능력	
	퀀치전류	정격전류의 1.5 ~ 2 배
	한류저항	계통 고장전류, 초전도한류기 적 용위치 및 퀀치 메커니즘, 초전 도변압기 % 임피던스 고려
초전도 변압기	고장전류 통전능력	통전가능 최대 고장전류는 차단 기 정격차단전류를, 고장전류 통 전시간은 상전도변압기 시험기준 을 고려, 0.25/0.5초
	열방산 능력	
	퀀치전류	타 초전도기기와 퀀치협조
	퀀치저항	계통측면에서는 가능한 작은 값 이 바람직함
	%임피던스	계통영향, 한류기 병행적용 고려
초전도 케이블	고장전류 통전능력	통전가능 최대 고장전류는 차단 기 정격차단전류를, 고장전류 통 전시간은 과전류계전기 한시동작 시간을 고려
	열방산 능력	
	퀀치전류	타 초전도기기와 퀀치협조
	퀀치저항	계통측면에서는 가능한 작은 값 이 바람직함

요할 것으로 판단된다. 특히, 초전도한류기의 한류저항과 초전도변압기의 %임피던스 값은 상호 밀접한 관계를 가지므로 이에 대한 상세검토를 통한 파라미터 선정이 필수적이다.

4. 퀀치 메커니즘에 따른 초전도한류기 한류저항 고려사항

4.1. 고장전류와 초전도한류기 한류저항

대용량의 154kV/22.9kV 초전도변압기를 적용하는 경우, 현재 10kA 미만인 배전계통에서의 고장전류가 20kA 수준(%임피던스 12% 기준)으로 증대될 것으로 예상된다. 따라서 고장전류 저감방안 도입이 필요하며, 초전도변압기 자체의 한류효과는 없으므로 초전도한류기와 병행적용이 하나의 대안이 될 수 있다. 본 연구에서는 상기 제안된 대용량 초전도(신)전력계통의 초전도변압기와 초전도한류기의 병행적용을 기준으로 검토하였다. 100MVA, 12%의 초전도변압기를 계통에 적용하는 경우, 초전도한류기의 한류저항 크기에 따른 고장전류의 추이를 살펴보면 Fig. 3 및 Table 2와 같다. 여기서 초전도한류기 적용위치는 초전도변압기 2차측이며, 그림에서 알 수 있듯이 초전도한류기의 한류저항이 약 1.5Ω정도인 경우, 고장전류의 크기가 현재의 배전계통과 비슷한 수준으로 떨어진다.

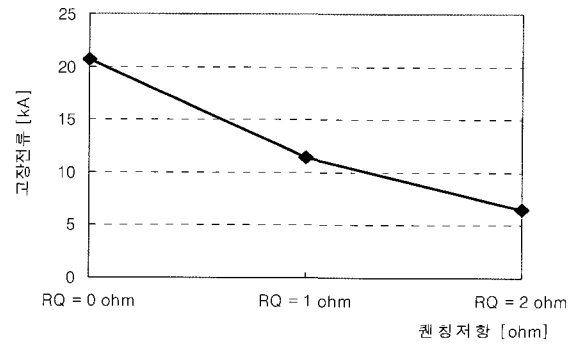


Fig. 3. Fault current by quenching resistance.

Table 2. Result of fault current analysis. (Based on HTS-cable 5km)

항목	계통구분	RQ [Ω]	고장위치		
			초전도변압기 2차측	22.9kV 개폐소	말단 부하
고장 전류 IF [kA]	154kV 상전도계통	-	-	9.52	7.63
	초전도 대용량 신전력계통	0	20.65	17.25	15.74
		1	11.37	10.67	10.26
		2	6.51	6.36	6.26

4.2. 초전도한류기 퀀치 메커니즘에 따른 설계치

본 연구에서 도출된 1~2Ω 수준의 한류저항은, 계통사고 직후 차단기가 동작하는 3cycle 이내 즉, 0.05초 이내에 도달하는 저항값을 의미한다. 국내에서 기 발표된 논문[11]의 한 실험결과인 Fig. 4를 보면, 고장발생 후 3cycle의 시점에서 초전도한류기의 한류저항이 최종 값의 약 70~80% 수준이 됨을 알 수 있다. 이러한 메커니즘의 경우, 계통측면에서 요구되는 한류저항값인 1.5Ω을 갖는 한류기의 최종저항 설계치는 보다 큰 값인 2Ω정도로 결정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 결국, 한류기 파라미터 설계시 결정문제는 계통의 고장전류뿐만 아니라 제작된 기기의 퀀치 메커니즘에 크게 좌우된다고 말할 수 있다.

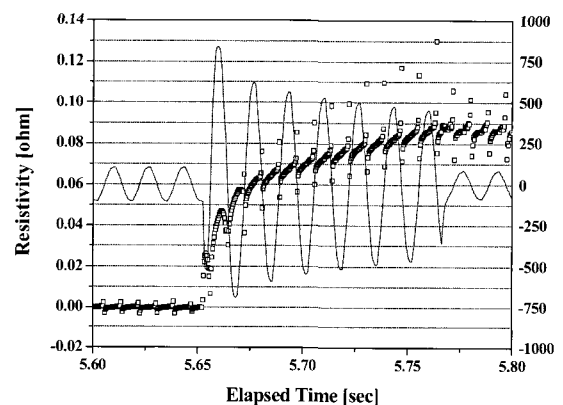


Fig. 4. Quench resistance of SFCL.

5. 한류기 한류저항과 변압기 %임피던스

5.1. SFCL 한류저항과 초전도변압기 %임피던스

4장의 검토전제는 초전도변압기와 초전도한류기의 병행적용이며, 초전도변압기의 %임피던스를 12%로 가정한 경우이다. 각 기기의 파라미터 상호 연관성을 고려한다면, 결국, 초전도기기 개발시 계통관점에서 초전도한류기와 초전도변압기의 병행적용을 고려하여 주요 파라미터를 결정할 필요성이 있다. 이와 관련하여 초전도한류기의 한류저항과 초전도변압기의 %임피던스 크기에 따른 장단점을 고찰하면 Table 3 및 Table 4와 같다. 표에서 AC loss(냉동기용량), 경제성(생산단가), 기기개발측면 용이성에 대한 고찰사항은 기기개발자와의 데이터교환 및 상호질의응답 등에 근거하여 확인된 내용이다.

기기개발 및 경제적 측면에서 초전도한류기는 켄치 저항을 크게 설계하는 것이, 초전도변압기는 %임피던스를 작게 설계하는 것이 용이하거나 경제적이다.

상기 기본검토에서 알 수 있는 바와 같이 초전도한류기의 한류저항은 약 1 ~ 2 Ω의 값이 적합한 것으로

나타났다. 이러한 기준 하에 한류저항 크기에 따른 고찰을 하면 다음과 같다. 초전도한류기의 한류저항을 크게 설계하는 경우, 정상상태에서는 한류기가 계통에 미치는 영향은 전혀 없다. 고장상태에서는 고저항지락과 함께 다소 문제발생소지가 있으나, 이는 작게 설계하는 경우도 마찬가지이며 단지 그 문제발생 가능성이 다소 높아질 뿐이다. 현재 국내에서 도입하고 있는 고저항지락시 OCGR(지락과전류계전기)의 정정지침은 1 선지락시 (부하전류×0.3)이며, 이 때 고려하고 있는 최대 지락저항은 30Ω이다. 현재 구상중인 대용량 초전도 신전력계통과 같이 대용량의 초전도 전력기기를 병행 적용하는 경우, 부하전류가 커지게 됨에 따라 기존의 OCGR 최소동작전류가 매우 커지게 된다. 또한, 초전도한류기에 의해서 고장전류가 감소하는데, 최악의 경우 중부하계통에서 고저항 지락고장시 고장전류가 OCGR의 최소동작전류보다 작아질 수 있다. 결국 고저항지락고장시 계전기의 최소동작전류보다 작은 고장전류의 통보로 인하여 지락과전류계전기 부동작에 의한 계통보호 불가능의 가능성이 존재하게 된다. 그러나, 이러한 문제는 초전도한류기의 한류저항과 같은 파라미터의 조정만으로는 해결할 수 없는 사항이다. 즉, 계통측면에서 22.9kV 초전도한류기의 한류저항의 적정 값이라 생각되는 1~2Ω은 최대 지락저항 30Ω에 비해서 상대적으로 작은 수치이므로, 초전도한류기 한류저항에 의한 고저항지락고장 문제유발에 기여도는 매우 미미하다. 따라서 고저항지락고장에 의한 문제는 기존의 배전계통 보호방식이 아닌 송전계통의 보호방식(예, PCM 전류차동방식 등)과 같은 새로운 보호방식의 도입 등의 타 대안이 필요하므로 한류저항 크기 결정에서는 배재하는 것이 타당한 것으로 사료된다.

초전도변압기의 % 임피던스를 낮게 설계하는 경우 정상상태에서 변압기에 의한 무효전력 소비량이 작아지며, 전압강하 측면에서도 장점이 있다. 고장전류 및 고장파급영향 측면에서는 % 임피던스를 크게 설계하는 것이 유리하지만, 현재 사용 중인 154kV/22.9kV 상전도변압기의 최대 임피던스인 15%를 적용한다고 해도 고장전류 문제는 완전히 해소되지 않는다. 고장전류 문제를 해소하기 위해서는 초전도한류기의 병행 적용이 필요하며, 이를 고려한다면, % 임피던스를 작게 설계해도 문제발생 소지는 작을 것으로 판단된다.

결국, 초전도변압기와 초전도한류기 병행적용을 가정할 때, 기기 개발측면에서의 용이성과 경제성, 계통관점에서의 파급영향, 계통특성 등을 고려하여 초전도한류기의 한류저항은 크게, 초전도변압기의 %임피던스는 작게 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3. Advantage and disadvantage by the quench resistance of SFCL.

항 목	최종 한류저항		비 고
	小	大	
정상상태시 계통영향	영향 없음		
AC loss (냉각기용량)	동일		동일 system 임계전류 기준
고저항지락시 문제발생 가능성	비교적 작음	비교적 큼	고저항지락문제는 켄치 저항 크기에 관계없이 타 대안을 도입해야함
기기개발측면 용이성	불리	유리	
경제성 (생산단가)	동일		동일 system 임계전류 기준
잠정결론	최종켄치저항을 크게 하는 경우 단점보다는 장점이 다소 큼		

Table 4. Advantage and disadvantage by % impedance of HTS-TR.

항 목	% 임피던스		비 고
	小	大	
전압강하	小 (유리)	大 (불리)	
무효전력 손실	小 (유리)	大 (불리)	
고장전류	大 (불리)	小 (유리)	초전도한류기 병행적용 필요
고장파급영향	大 (불리)	小 (유리)	
AC loss (냉동기용량)	小 (유리)	大 (불리)	
경제성 (생산단가)	小 (유리)	大 (불리)	
잠정결론	% 임피던스를 작게 하는 경우가 유리하며, 일부 불리한 면은 초전도한류기를 병행 적용함으로써 일부 해결 가능할 것으로 판단됨		

5.2. 고장해석 결과

초전도변압기의 %임피던스 및 초전도한류기의 한류저항 크기에 따른 고장전류를 살펴보면 Table 5 및 Fig. 5와 같다. 결과에서, 한류저항이 2 Ω 이상이 되는 경우, 정상상태에서의 부하전류와 비교했을 때 큰 차이가 없기 때문에 고장이 아님에도 불구하고 초전도한류기가 동작을 할 가능성이 존재한다. 결국, 초전도변압기의 %임피던스는 10% 또는 12%, 초전도한류기의 한류저항은 약 1.5 Ω 정도가 적절한 값이 될 것으로 판단된다. 본 결과는 잠정 검토결과로서, 계통구성에 따라서 결과는 다소 다르게 나타날 수 있다. 그러므로, 실제 적용시 상세 검토와 함께 초전도한류기 및 초전도변압기의 파라미터 결정이 필요하다.

Table 5. Fault result by % impedance of HTS-TR and quench resistance of SFCL.

	초전도한류기 한류저항[Ω]	초전도변압기 % 임피던스		
		10 %	12 %	15 %
고장 전류 [kA]	0	24.5	20.65	15.71
	1	11.9	11.37	10.56
	1.5	8.55	8.34	8
	2	6.6	6.51	6.34

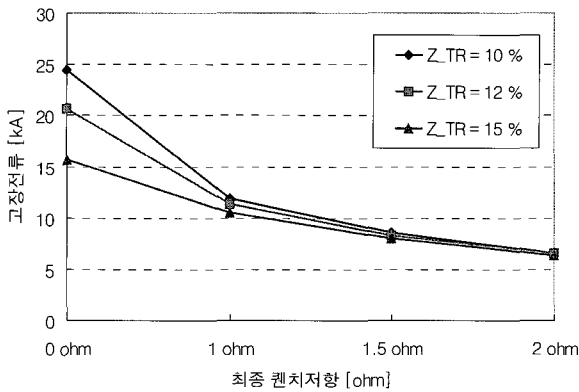


Fig. 5. Fault result by % impedance of HTS-TR and quench resistance of SFCL.

Table 6. Results by quench mechanism.

	초전도한류기 한류저항[Ω]	초전도변압기 % 임피던스		
		10 %	12 %	15 %
고장 전류 [kA]	0	24.5	20.65	15.71
	1	13.94	13.11	11.9
	1.5	10.31	9.96	9.4
	2	8.08	7.9	7.61

5.3. 초전도한류기 켄치 메카니즘에 따른 영향

4.2절에서 기술한 초전도한류기의 켄치 메카니즘과 계전기 동작시간 3cycle 후 차단기가 동작하는 것을 고려한다면, 최종저항의 약 70~80%값을 가질 때 차단기가 동작할 것으로 예상되므로 초전도한류기의 상기 5.2절에서 도출된 최종 저항값을 보다 높게 설계할 필요가 있다. 최종저항의 80% 수준에서 차단기가 동작한다는 가정 하에 고장해석 결과를 Table 6 및 Fig. 6에 나타내었다. 결국, 상기 5.2절의 결과와 비교할 때, 비슷한 수준의 고장전류 감소효과를 나타내기 위해서는 최종 저항값을 보다 크게 할 필요성이 있음을 알 수 있다.

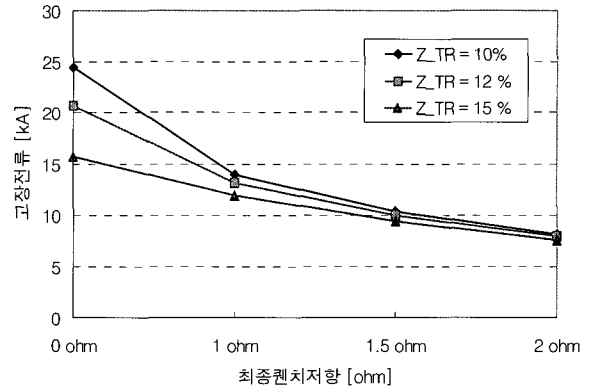


Fig. 6. Results by quench mechanism of SFCL.

6. 기타 초전도한류기 켄치문제

상기 언급한 고려사항 외에 계통측면에서 초전도한류기의 켄치 가능성으로 인한 파라미터 영향요소는 다음 Table 7과 같다. 표에서 알 수 있듯이 계통관점에서 초전도한류기에 영향을 줄 수 있는 사항을 고려해서 켄치 개시전류(임계전류) IQ 등의 주요 파라미터 설계치를 결정하거나, 별도의 대안을 모색할 필요성이 있으며, 이에 대한 상세연구 역시 중요한 사항이다.

Table 7. Quench problem of SFCL in real power system.

영향요소	문제발생 가능성	대안	비고
변압기돌입전류 영향	小	돌입전류를 고려한 IQ 설계	켄치 저항 고려
자동재폐로에 의한 투입전류 영향	小	투입전류를 고려한 IQ 설계	
병렬 초전도한류기의 Switching 동작으로 인한 서지(Surge) 영향	小	Surge영향을 고려한 IQ 설계	
자동재폐로시 고장 전류 재통전 영향	中		
1개 변압기 Bank에 연결된 다수의 피더에서 연속적인 고장발생으로 인한 초전도한류기 동작 영향	小	병렬구성 초전도한류시스템 적용	
지락저항에 의한 고장전류 저감 영향	大	- 너무 큰 한류저항은 피해야함. - 새로운 보호방식 채택 등의 별도의 대안필요	상세 검토 망

7. 결 론

본 연구에서는 초전도기기의 계통적용 관점의 기술성 및 경제성을 고려한 파라미터 선정시 고려사항을 제시하였다. 특히, 초전도한류기와 초전도변압기의 병행적용을 고려한 파라미터 설계에 대한 중요성과 정성적/정량적인 검토결과를 보였다. 본 연구는 초전도기

기의 개발자가 기기개발 및 파라미터 설계시 기본 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 잠정결론을 요약하면 다음과 같다.

- 초전도 전력기기의 주요 파라미터 중 계통측면에서 고려해야 할 사항은 고장전류 통전능력, 퀘치임계 전류, 초전도한류기 한류저항, 초전도변압기 %임피던스 등이다.
- 고장전류 통전능력 중 통전가능한 최대고장전류의 크기는 차단기 정격차단전류를, 최대 통전시간은 계전기 동작시간을 고려해야 한다.
- 또한, 초전도한류기/변압기의 병행적용을 고려할 때, 초전도한류기의 한류저항과 초전도변압기의 %임피던스는 매우 밀접한 관계가 있다. 초전도기기 병행적용의 전제하에 기기개발, 계통관점, 경제적 관점에서 종합적으로 판단할 때, 초전도한류기의 한류저항은 1.5 ~ 2 Ω, 초전도변압기의 %임피던스는 12%정도로 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- 초전도한류기의 한류저항 설계치는 계통고장전류뿐만 아니라 초전도한류기의 퀘치 메카니즘에 따라서 가변적이므로 보다 정확한 퀘치 메카니즘에 대한 심도 깊은 연구가 필요하다.
- 변압기 돌입전류, 차단기 투입전류, Surge 등에 의한 초전도기기의 파라미터 선정 역시 중요하며, 향후 이를 고려한 상세 과도해석을 통하여 잠정결론을 도출할 예정이다.
- 본 연구에서 도출된 잠정결론에서 계통구성 등에 각 파라미터의 수치는 다소 상이하게 나타날 수 있으나, 전체적인 방향성은 유사할 것으로 판단되며, 향후, 상세연구를 통하여 보다 합리적인 초전도기기 주요 파라미터를 제시할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 과학기술부, 한국전력공사 전력연구원, "저항형 고온초전도한류기 개발", 2004. 7.
- [2] 과학기술부, 연세대학교, "유도형 고온초전도한류기 개발", 2004. 7.
- [3] 최효상, 현옥배, 고태국, "초전도 한류기를 포함한 계통의 지락사고에 대한 EMTDC 해석", 전기학회 논문지, 48B권 4호, pp161-166, 1999. 4.
- [4] 이승재, 이찬주, 고태국, "고온 초전도 한류기가 설치된 전력 시스템의 안정도 해석", 전기학회논문지, 48B권 5호, pp227-232, 1999. 5.

- [5] Hak-Man Kim, Jong-Yul Kim, "Feasibility Study of Superconducting Fault Current Limiter Application to Korean Power System", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 5, No. 1, 2003.
- [6] 이승렬, 김종율, 윤재영, "국내 수용가계통에서의 초전도한류기 적용가능성 검토", 한국초전도·저온공학회는문지, 6권 3호, 2004. 9.
- [7] 이승렬, 김종율, 윤재영, "실계통적용을 위한 초전도한류시스템에 대한 연구", 한국초전도·저온공학회, 7권, 1호 2005년 3월.
- [8] M. Noe, B. R. Oswald, "Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems," IEEE Transactions on applied superconductivity, 1999.6.
- [9] M. Sjoström, D. Politano, "Technical and Economical Impacts on a Power System by Introducing an HTS FCL", IEEE Trans on Applied Superconductivity Conference, Sept. 2000.
- [10] 윤재영, 김종율, 이승렬, "초전도기기를 적용한 미래 저압대용량 신 배전계통", 한국초전도·저온공학회, 7권, 1호 2005년 3월.
- [11] Seong Eun Yang, Min Cheol Ahn, Dong Keun Park, Dae Hee Jang, Tae Kuk Ko, "Manufacture and Test of Small-scale Superconducting Fault Current Limiter by Using the Bifilar Winding of Coated Conductor", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 7, No. 4, 2005.

저 자 소 개



이승렬(李昇烈)

1975년 9월 13일생. 1999년 고려대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동대학원 전기공학과 박사수료. 현재 한국전기연구원 신전력시스템그룹, 연구원.



김종율(金鍾律)

1974년 7월 6일생. 1997년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 신전력시스템그룹, 선임연구원.



윤재영(尹在暎)

1962년 7월 30일생. 1985년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 기술사(발송배전). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구원 신전력시스템그룹장, 책임연구원.