

초전도(신)전력계통 고장전류 분석 및 병렬한류시스템

A fault current analysis and parallel FCL scheme on superconducting new power system

윤재영*, 이승렬**, 김종율***

Yoon, Jae-Young*, Kim, Jong Yul**, Lee, Seung RYul***

Abstract: This paper specifies the new power supply paradigm converting 154kV voltage level into 22.9kV class with equivalent capacity using superconducting power facilities and analyze the fault current characteristics with and without HTS-FCL(High Temperature Superconducting-Fault Current Limiter). Superconducting new power system is the power system to which applies the 22.9kV HTS cable in parallel to HTS transformer and HTS-FCL with low-voltage and mass-capacity characteristics replacing 154kV conventional cable and transformer. The fault current of superconducting new power system will increase greatly because of the mass capacity and low impedance of HTS transformer and cable. This means that the HTS-FCL is necessary to reduce the fault current below the breaking current of circuit breaker. This paper analyze the fault current and suggests the parallel HTS-FCL scheme complementing the inherent problem of HTS-FCL, that is recovery after quenching is impossible within shorter than a few seconds.

Key Words: superconducting new power system, fault current, parallel HTS-FCL scheme.

1. 서 론

초전도(신)전력계통은 대도시지역의 전력공급을 담당하는 기존의 154kV 송전망을 대용량의 초전도 22.9kV 배전망으로 변환하는 것을 의미한다[1-3]. 초전도 응용기술을 전력산업에 가장 효과적으로 적용하기 위하여, 초전도케이블/변압기/한류기를 병행 적용하는 초전도(신)전력계통에 대한 개념설계와 관련된 연구가 진행되어 왔다[1-3]. 이는 도심내부에서 지중선로와 변전소 건설에 따른 도심교통난, 과도한 건설비용 및

하기 위한 최선의 방안으로 판단된다. 하지만, 초전도 NIMBY 현상으로 인한 환경/민원 측면의 제약을 극복 (신)전력계통은 저압, 대용량화를 기본개념으로 하는 것이므로 필연적으로 고장전류 측면의 문제를 야기시킨다. 대용량 변압기는 상대적으로 임피던스를 감소시키므로 고장전류를 대폭 증가시키고, 차단용량을 초과할 가능성도 내포하고 있다. 초전도한류기는 초전도(신)전력계통을 구성하는 요소로서, 고장전류 저감을 위하여 적용되는데, 초전도한류기의 한류저항에 따라서 고장전류의 크기가 달라진다.

본 논문에서는 초전도(신)전력계통의 구성 대안과 고장전류를 분석하였다. 현재 개발 중인 초전도한류기의 특성을 고려하여 설치위치를 선정하고 배전계통의 특성을 감안한 한류저항 값을 제시하였다. 본 논문의 검토결과는 초전도한류기 개발자에게 계통관점에서 요구되는 유용한 정보를 제공하며, 초전도(신)전력계통을 구성하는 기본 자료를 제공할 것으로 기대된다.

2. 초전도(신)전력계통 고장계산

Fig. 1은 초전도(신)전력계통의 4가지 구성 대안을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 22.9kV 배전계통의 고장전류를 감소시키기 위한 한류기의 적용위치는 154kV와 22.9kV 측에 배치하는 방안을 모두 고려할 수 있다. 154kV 모선에 초전도한류기를 설치하는 방안은 154kV와 22.9kV 양측을 모두 만족시키는 한류저항 값을 선정하기 곤란한 문제가 있지만, 고장전류의 유입통로를 원천적으로 봉쇄하는 효과가 있다. 반면에 22.9kV 선로에 설치하는 것은 한류저항 값은 적절하게 선정할 수 있지만, 개별 선로에 모두 설치해야 하는 단점이 있다. 또한, 22.9kV 모선사이에 Bus-Tie 방식으로 적용하는 것은 공급신뢰도 측면에서는 장점이 있으나 고장전류가 지나치게 증가하므로 곤란한 점이 있다.[4] 전체적으로는 한류기 적정 저항 값 선정과 관련되지만, 변압기 2차 측에 적용하는 방안이 고장전류 저감과 계통신뢰도를 고려할 때 가장 합리적인 것으로 판단되며, 본 논문에서는 이를 전제로 하여 검토하였다. Fig. 2는 초전도(신)전력계통의 고장계산 다이어그램을 나타낸 것인데, 구성방식별로 (1안)~(4안)의 특성을 표현할 수 있다. Fig. 2의 등가계통을 대상으로 하여 변압기 Bank수, %Z, 선로길이 등을 고려한 고장전류를 분석하였으며, 그 결과 초전도한류기의 합리적인 한류저항 값(Ω)을 선정하였다.

* 정 회 원 : 한국전기연구원 전력연구단 책임연구원
 ** 정 회 원 : 한국전기연구원 전력연구단 선임연구원
 *** 정 회 원 : 한국전기연구원 전력연구단 연구원
 원고접수 : 2006년 1월 31일
 심사완료 : 2006년 3월 20일

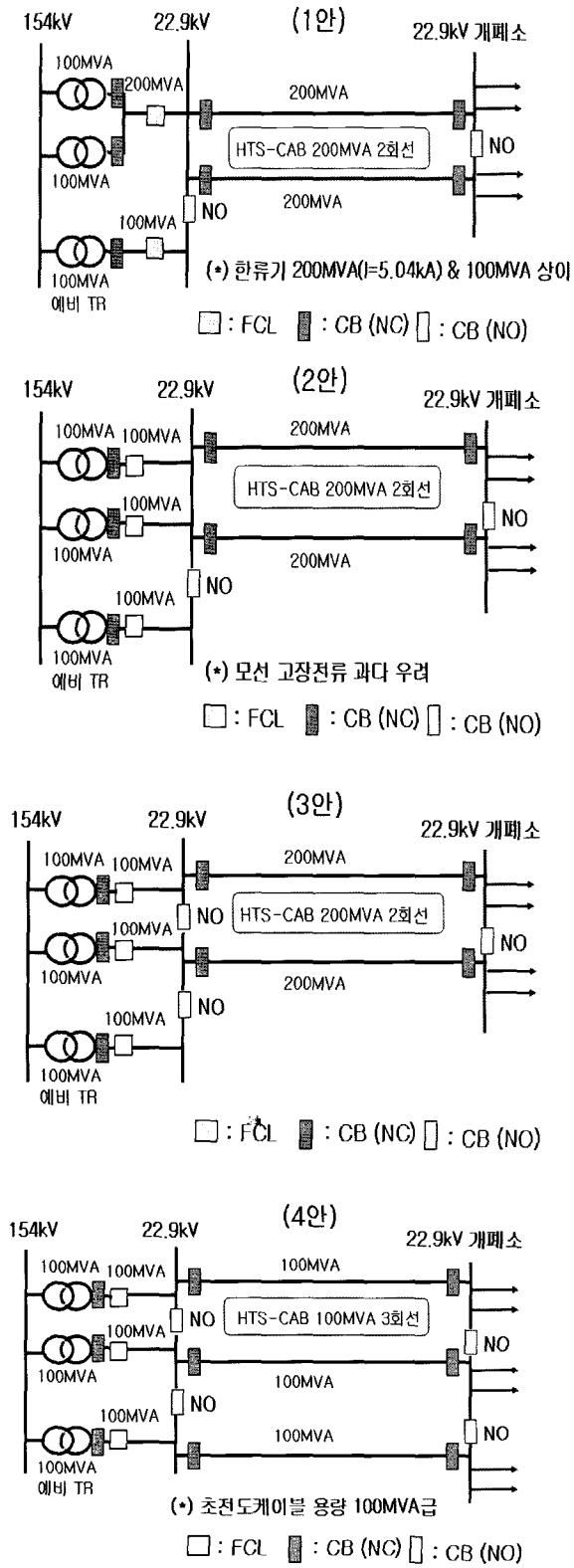


Fig. 1. Alternatives of Superconducting Power System.

2.1 고장전류 분석내용

□ 기본데이터 : 154kV 실 계통 상황을 반영하여 기본데이터를 상정하였다.

- 1) 154kV 모선측 전원임피던스 : $I_{FS} = 50(kA), Z_S = 1.778(\Omega)$

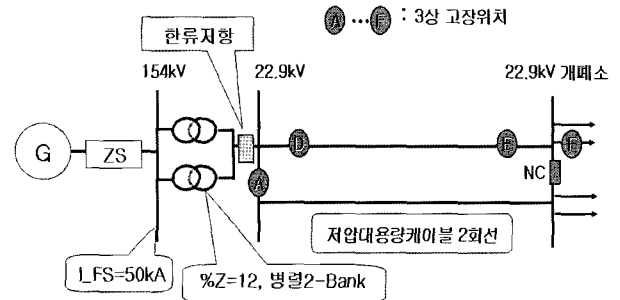


Fig. 2. Sample system diagram for fault current calculation.

- 2) 상전도/초전도 90/120MVA 변압기 누설임피던스 : $\%Z = 12(\%)$ (100MVA BASE)
- 3) 변압기 병렬대수 : $NTR = 2$ (Normal Open된 병렬 변압기는 제외)
- 4) 고장지점에서 바라 본 Thevenin 임피던스 위상각 : $\theta = 80^\circ$
- 5) 저압대용량 초전도케이블 단위 길이당 한류저항 : $R_{QLkm} = 0.05(\Omega/km)$
- 6) 저압대용량 초전도케이블 단위 길이당 리액턴스 : $X_{QLkm} = 0.20(\Omega/km)$
- 7) 저압대용량 초전도케이블 길이 : $LENGTH = 0 \sim 10(km)$
- *) 0(km)는 변압기 2차측 22.9kV 모선에서 고장이 발생하는 것을 의미함.
- 8) 초전도한류기 한류저항 : $R_Q = 1 \sim 5(\Omega)$

□ 고장전류 분석내용 :

초전도(신)전력계통에서 고장전류에 큰 영향을 미칠 수 있는 파라미터와 계통구성 방식에 따라서 변화 추이를 고찰하였다.

- 1) (변경 파라미터) $\%Z, NTR, R_Q, LENGTH$
- 2) $\%Z = 12\% \text{ or } 15\%$
- 3) $NTR = 1 \text{ or } 2$ 인 경우에 대하여 비교
- 4) 한류기는 변압기 2차 측에 연결하며, 한류저항 R_Q 를 $1 \sim 5(\Omega)$ 으로 변화시키면서 모선고장과 선로고장시의 고장전류 추이를 분석

2.2 고장전류 분석결과

누설임피던스가 적고, 병렬 Bank수가 많을수록, 그리고 한류저항이 적을수록 고장전류는 증가한다. 지역 배전용 모선고장으로 상정할 수 있는 $\%Z = 12\%$, $NTR = 1, R_Q = 0(\Omega)$ 인 경우 모선 3상고장전류(개념적인 고장위치 A점, 변압기는 1-Bank)는 17.9kA이지만, R_Q 값이 커지면서 고장전류는 감소한다. <Fig. 3>에서 R_Q 값이 2(Ω)이상인 경우 계통조건에 관계없이 고장전류 크기가 포화됨을 알 수 있다. 또한, 154kV 송전계통을 22.9kV 초전도(신)전력계통으로 대체하는 경우로 상정할 수 있는 $\%Z = 12\%$, $NTR = 2, R_Q = 0(\Omega)$ 에서는 모선 3상고장전류(고장위치 A점)가 34kA에 달하지만, R_Q 값이 커지면서 고장전류는 급격히 감소된다.

$\%Z = 12\%$, $NTR = 2, R_Q = 0(\Omega)$ 일 때 (신)전력계통의 송전선로에서 고장이 발생하면, 모선고장(0km)인 경우에 34(kA)이던 고장전류가 5km 지점에서는 고장전류가 27.7(kA) 수준으로 감소하였다. 또한, $R_Q = 1(\Omega)$ 인 경우에는 모선고장(0km)이 발생할 때 11.7(kA)이던 고장전류가 5km 지점에서 고장이 발생하여도 고장전류가 11.2(kA) 정도가 거의 변화가 없었다. 그 이유는 초전도케이블의 임피던스가 22.9kV 상전도 케이블 임피던

스에 비해서 아주 적어서 그 영향이 미미하기 때문이다. Fig. 5는 양 경우에 대한 고장전류 순시치를 EMTDC로 해석한 것이다.

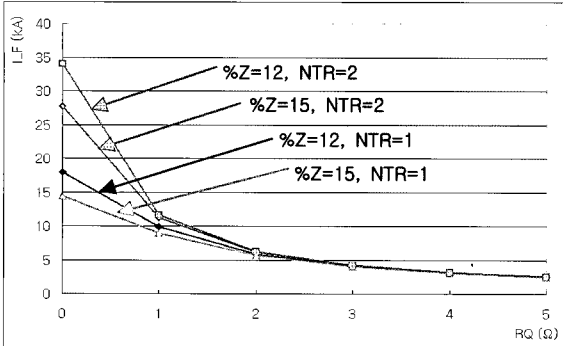


Fig. 3. Fault current for %Z variation.

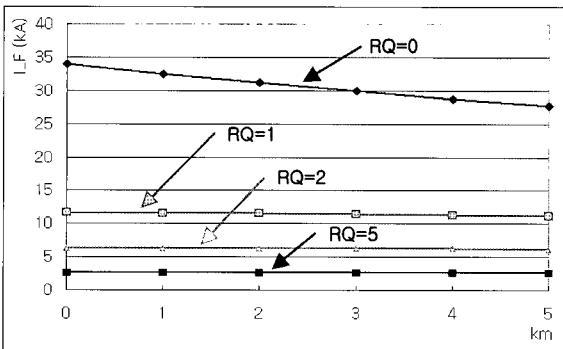


Fig. 4. Fault current for RQ variation.

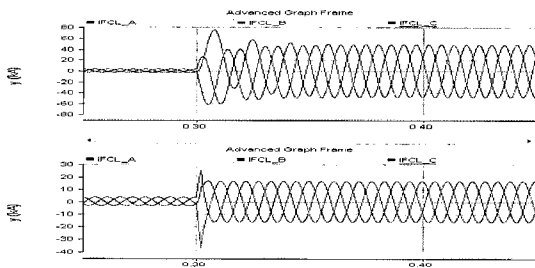


Fig. 5. Fault current difference with/without FCL. (RQ = 1(Ω), %Z=12, NTR=2)

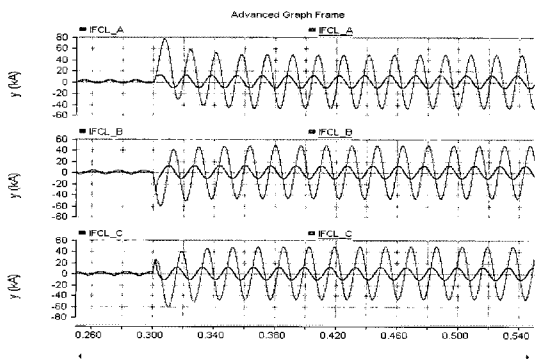


Fig. 6. Fault current with FCL. (RQ=1.5(Ω), %Z=12, NTR=2)

Fig. 7은 모선의 최대 지락고장전류가 5~30kA 인 경우에 한류/지락저항의 변화에 따른 1선 지락고장전류의 변화추이를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 합계저항 값이 1~2(Ω) 이상인 경우 고장전류 값은 10kA 수준이하로 대폭 저감됨을 알 수 있다.

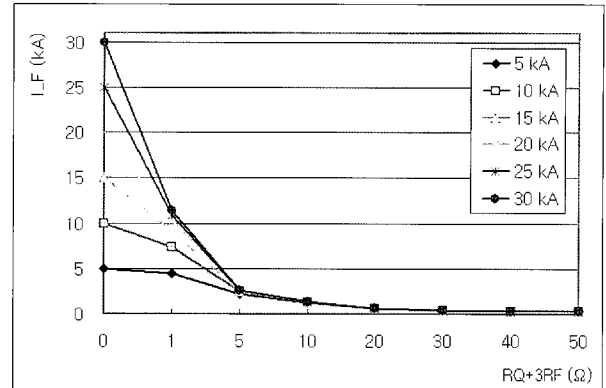


Fig. 7. Fault current for RQ/RF variation

2.3 고장전류 분석결론

초전도(신)전력계통의 구성 대안을 표현하는 등가계통에 대하여 고장전류를 분석하였다. 분석결과, 초전도(신)전력계통에 적용하는 초전도한류기의 한류저항은 1~2(Ω) 범위에서 적용하고자 하는 지점의 계통여건에 따라서 적절하게 선정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 하지만, 미래에 초전도(신)전력계통이 일반화되어 22.9kV 루프계통이 구축되는 경우, 적용방식에 따라서 한류저항을 증가시켜야 할 가능성도 있으므로, 이에 대해서는 차후 CASE별로 별도 검토하여야 한다. 통상적으로 변압기 1-Bank에 연결되어 있는 경우 초전도한류저항은 1(Ω) 내외가 적합하다. 반면에, 구성 대안(1안)과 같이 변압기 2-Bank가 병렬로 공급하면 한류저항은 2(Ω) 정도가 합리적이다. 그 이유는 2(Ω) 정도의 한류저항만 적용되더라도 발생할 수 있는 최대 고장전류가 6kA 내외 수준으로 저감되기 때문이며, 대체로 모든 경우에 있어서 한류저항이 2(Ω) 이상이 되면 고장전류 저감효과가 포화되므로, 2(Ω) 이상의 한류저항을 적용하는 것은 큰 의미가 없다. 만약, 5(Ω) 정도의 한류저항을 적용하면 모든 경우에 최대 고장전류가 2.6kA 내외 수준으로 대폭 저감된다. 이는 지나치게 고장전류가 저감되는 경우로 판단된다. 즉, 200MVA, 22.9kV 계통의 부하전류 보다 낮은 전류 값이 되므로, 보호계전기가 고장으로 인식하지 못하는 심각한 문제점을 지니고 있다.

3. 병렬 초전도한류시스템 적용

현재 국내에서 Bi-2212 벌크형 및 CC-Bifilar 저항형 초전도한류기를 개발하고 있다. 초전도한류기를 적용함에 있어서 가장 큰 문제점은 Recovery 시간이 수 초이상 필요하므로, 단일 한류시스템인 경우 재투입이 불가능하다는 점이다. 병렬한류시스템은 이 문제점을 극복할 수 있는 방안으로 제안되었다.

저항형 초전도한류기의 최대 단점은 Quenching 상태 이후 고장이 제거되어도 초전도 복귀시간(Recovery Time)이 길다는 점이다. 현재 25.8kV급 이상 차단기의 표준동작 책무는 O-0.3초-CO-3분-CO이며, Recloser의 순시 재투입시간은 2초로 되어있다. 하지만, 향후

기술발전을 감안하더라도 저항형 초전도한류기의 복귀 시간을 수초 이내로 하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서, 저항형 초전도한류기를 재투입이 필요한 구간에 적용하기 위해서는 Fig. 8과 같은 병렬 한류시스템을 적용해야 하며, 고장발생이후 시간대별 동작 시퀀스를 나타내면 다음과 같다.

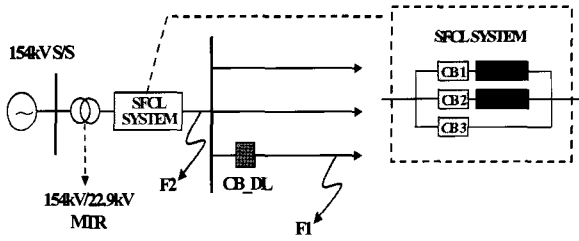


Fig. 8. Parallel SFCL system.

병렬한류시스템은 초전도한류기와 직렬 연결된 차단기 SET 2대 및 차단기 1대를 병렬로 구성한 초전도한류시스템으로서, 각각의 초전도한류기에 연결되어 있는 차단기 중 하나는 상시투입, 나머지 하나는 상시개방 운전한다. 실 전력계통에서 본 초전도한류시스템이 송배전선로에 연결되어 있을 경우, 고장이 발생하면 상시투입 되어있는 초전도한류기1(SFCL1)이 동작(Quench)하여 고장전류가 차단용량 이하로 감소되고 차단기1(CB1)은 성공적으로 개방됨으로써 초전도한류기1은 복귀과정을 거치게 된다. 이후 상시개방 되어있는 차단기가 투입되고 재투입시간이 경과한 이후 고장 지속여부에 따라서 초전도한류기2(SFCL 2)의 상태가 초전도상태 지속되어 정상운전하거나 고장전류에 의해 다시 동작하게 된다. 이는 실 전력계통의 송배전선로에 초전도한류기를 적용하기 위해서 반드시 해결해야 하는 초전도한류기의 복귀시간 지연에 따른 문제점을 해결한 초전도한류시스템으로서, 실 전력계통의 고장상태와 재투입상태를 고려한 현실적인 적용방안이다. 본 초전도한류시스템의 동작시퀀스는 아래와 같다.

□ 동작시퀀스 1 (고장위치 : F1, 고장선로 재투입시 고장지속상태인 경우) Fig. 8의 한류시스템에서 시간대별로 동작시퀀스는 다음과 같다.

- t = t0 정상상태
: CB 1 Close, CB 2 및 3 Open
- t = t1 고장발생 : SFCL 1 동작(Quench)
- t = t2 : CB 1 Open → SFCL 1 복귀,
CB 2 Close, CB_DL Open
- t = t3 고장선로 재투입 (고장 지속시)
: CB_DL Close, SFCL 2 동작(Quench)
- t = t4 (고장 지속시)
: CB_DL Open(고장선로 영구고장) → SFCL 2 복귀, CB 3 Close
- t = t5 이후 (SFCL 1 완전복귀 후)
: CB 3 Open, CB 1 Close → 정상운전

□ 동작시퀀스 2 (고장위치 : F1, 고장선로 재투입시 고장제거상태인 경우)

- t = t0 정상상태
: CB 1 Close, CB 2 및 3 Open
- t = t1 고장발생 : SFCL 1 동작(Quench)

- t = t2 : CB 1 Open → SFCL 1 복귀,
CB 2 Close, CB_DL Open
- t = t3 고장선로 재투입 (고장제거 상태시)
: CB_DL Close, SFCL 2 정상운전(초전도상태)

또한, 초전도한류기가 안정적으로 동작하기 위해서는 동시 Quenching이 되어야 한다. 저항형 초전도한류기는 다수 개의 Section 소자들로 연결되어 있으며, 실제 고장전류가 흐르면 동시에 Quenching이 발생하는 것이 바람직하다. 이 문제는 현재 기술발전추세와 기타 여건을 감안할 때 충분히 극복할 수 있으며, 실 계통 적용에 있어서 문제가 되지 않을 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 154kV 상전도케이블을 22.9kV 초전도케이블로 대체하는 초전도(신)전력계통의 고장전류를 분석하고 보호방안에 대하여 검토하였다. 본 연구의 중요 분석결과를 열거하면 다음과 같다.

- (신)전력계통에 적용하는 초전도한류기의 한류 저항은 1~2(Ω) 범위에서 적용하고자 하는 지점의 계통여건에 따라서 적절하게 선정하는 것이 타당하다. (신)전력계통에서는 고저항 지락이 발생하거나 한류저항이 클 경우 정격전류보다 낮은 고장전류가 발생하여 보호계전기가 고장으로 인식하지 못할 가능성을 고려하여 적절한 한류저항을 설정해야 한다.
- 저항형 초전도한류기의 최대 단점은 Quenching 상태이후 고장이 제거되어도 초전도 복귀시간(Recovery Time)이 길다는 점이다. 저항형 초전도한류기를 재투입이 필요한 구간에 적용하기 위해서는 별도의 병렬 한류시스템을 적용해야 하며, 시간대별 동작 시퀀스를 고려한 보호방안을 강구해야 한다.
- 초전도(신)전력계통의 보호협조 방안은 기존 배전계통의 과전류계전방식으로는 보호가 불가능하다. 이에 대해서는 별도의 상세분석이 필요하다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사, "2002년 장기 송변전 설비계획", 2002.
- [2] 윤재영, 김종율, 이승렬, "저항형초전도한류기의 미래 배전계통 적용방안", 대한전기학회논문지, 2005. 4.
- [3] J. YOON, Transmission and Distribution World, "The Future of Cable in Korea". 2005. 6.

- [4] 윤재영, 김종율, 이승렬, "초전도기기를 적용한 미래 저압대용량 신 배전계통", 저온초전도공학회 논문지, 2005. 6.
- [5] 특허청, "변전소모선배치용 병렬 초전도한류시스템 및 회로고안", 특허출원 10-2005-0020704.
- [6] J. YOON, "R-Type HTS-FCL Model Considering Transient Characteristics", 저온초전도공학회 영문논문지, 2005.
- [7] Ladie Pierluigi, Mansoldo Andrea, "HTS Cable application studies and technical/ economical comparisons with conventional technologies", PES-WM 2002.
- [8] Richard Silbergliitt, Emile Ettedgui, Anders Hove "Strengthening the Grid : Effect of High Temperature Superconducting Power Technologies on Reliability, Power Transfer Capacity and Energy" RAND, 2002.
- [9] M. Noe, B. R. Oswald, "Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems" IEEE Transactions on applied superconductivity, June 1999.
- [10] 윤재영, "22.9kV 초전도케이블 적용 가능성 분석" 초전도케이블 기획자료, 2003.

저 자 소 개



윤재영(尹在映)

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



이승렬(李昇烈)

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



김종율(金鍾律)

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