

Application Scheme of Resistive HTS-FCL on Future New Distribution System

尹在映[†] · 李昇烈^{*} · 金鍾律^{**} · 金豪溶^{***}

(Jae-Young Yoon · Seung-Ryul Lee · Jong-Yul Kim · Ho-Yong Kim)

Abstract - This paper describes the application scheme of resistive HTS-FCL(High Temperature Superconducting-Fault Current Limiter) on future new distribution system. Future new distribution system means the power system to which applies the 22.9kV HTS cable with low-voltage and mass-capacity characteristics replacing the 154kV conventional cable in addition to HTS transformer and HTS-FCL. The fault current of future new distribution system will increase greatly because of the inherent characteristics of HTS transformer/cable and applications of distributed generations and spot networks and so on. This means that the HTS-FCL is necessary to reduce the fault current below the breaking capacity. This paper studies the appropriate location, parameters and the influences of HTS-FCL on future new distribution system. Finally, this paper suggests the reasonable basic parameters of resistive HTS-FCL for future KEPCO new distribution system.

Key Words : HTS-FCL(High Temperature Superconducting-Fault Current Limiter), Distribution System, EMTDC

1. 서 론

대도심 내부의 고밀도 집적부하에 대한 전력공급망은 대부분 지중 케이블과 GIS 변전소로 구성되어 있다. 한전의 장기계통계획에 따르면, 향후 2015년 최대부하는 수요관리 이후 기준으로 67,745MW에 달하며, 지중선로의 비율이 2001년 기준 6%에서 2015년 10%까지 증가할 것으로 예측되고 있다.[1] 도심내부에서 지중선로와 변전소 건설에 따른 도심교통난과 과도한 건설비용 및 NIMBY 현상으로 인한 환경과 민원 측면의 제약이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로서 고온초전도(HTS : High Temperature Superconducting) 전력기기를 적용한 신 배전계통의 도입에 대하여 현재 기본적인 검토가 진행되고 있다.[2] 초전도한류기는 신 배전계통을 구성하는 요소로서, 미래 계통에서 예상되는 대용량 초전도변압기 도입, 분산전원과 Spot Network의 증가추세에 따른 고장전류 저감을 위하여 적용될 것으로 예상되고 있다. 초전도한류기를 배전계통에 적용하기 위한 연구는 국외에서 일반적인 배전계통 전압을 대상으로 하여 기본적인 검토만이 수행되었으며[3-5], 저압대용량 초전도케이블을 적용한 신 배전계통에 대한 적용연구는 전무하다.

본 논문에서는 초전도케이블과 초전도변압기가 병행 적용되는 신 배전계통에 대한 초전도한류기의 적용방안을 제시하고자 한다. 미래 배전계통의 발전 방향과 이에 따른 초전

도한류기의 적용 필요성을 검토하고 초전도한류기의 적용에 따른 계통시스템에의 영향과 파라미터 선정에 대하여 분석하였다. 국내에서 개발하고자 하는 초전도한류기의 특성을 고려하여 설치위치를 선정하고 배전계통의 특성을 감안한 한류저항 값과 Quenching 전류와 Recovery 전류 등의 기본 파라미터를 제시하였다. 본 논문의 검토결과는 초전도한류기 개발자에게 계통관점에서 요구되는 유용한 정보를 제공하며, 경제적, 사회적, 환경적 측면에서 많은 장점을 지니고 있는 미래 신 배전계통을 구성하는 기본 자료를 제공할 것으로 기대된다.

2. 미래 신 배전계통 한류기 적용 가능성

현재 국내에서 프런티어 사업의 일환으로 22.9kV/0.63kA 저항형 초전도한류기를 개발 중이며, 장기적으로는 2010년까지 154kV/2kA의 사양을 갖는 초전도한류기를 개발할 예정이다.[6] 하지만, 기술적인 관점에서 초전도한류기를 국내 22.9kV 배전계통에 적용할 필요성이 있는가에 대해서는 다양한 견해가 있다. 부정적인 의견으로는 현재 국내 배전계통에서 차단기의 차단용량은 25kA인데 비하여, 최대 고장전류는 10kA 미만이라는 점을 들 수 있다. 또한, 미래 배전계통에서 분산전원과 Spot Network의 적용을 고려하더라도, 차단용량을 초과하는 고장전류 문제가 발생하지는 않을 것으로 예상되고 있다. 하지만, 154kV 변전소 주변압기에 차단용량보다는 적더라도 부하전류를 훨씬 상회하는 고장전류가 흐르면 2차권선의 손상과 수명단축이 발생할 수 있다. 그리고, 현재 154/22.9kV 변압기에 설치되어 있는 중성점접지리액터(NGR: Neutral Ground Reactor)로 인해 1선지락시 건전상의 상전위가 상승하고, 고장상의 경우는 오히려 전압

[†] 교신저자, 正會員 : 한국전기연구원 전력연구단 책임연구원
E-mail : Jyoon@keri.re.kr

^{*} 正會員 : 한국전기연구원 전력연구단 연구원

^{**} 正會員 : 한국전기연구원 전력연구단 선임연구원

^{***} 正會員 : 한국전기연구원 전력연구단 책임연구원

接受日字 : 2005年 1月 17日

最終完了 : 2005年 3月 31日

이 하락하여 건전피더의 UVR 오동작이 발생하여 건전피더까지 탈락할 수도 있다. 비록, 배전계통에서 고장전류 통전으로 인해 위와 같은 문제점이 있더라도 근본적으로는 차단용량이 고장전류보다 크기 때문에, 현재 시점에서 고장전류를 감소시키기 위한 한류기의 적용 타당성이 크다고는 할 수 없다.

하지만, 저압, 대용량 초전도케이블과 초전도변압기가 동시에 병행 적용되는 신 배전계통에서는 대용량의 초전도변압기와 양단 전원에 의해서 차단용량을 상회하는 고장전류 문제가 발생할 수 있다.[2] 이는 초전도변압기의 누설임피던스가 상전도변압기와 동일하거나 약간 적은 반면에, 용량은 상전도변압기의 2배 이상이기 때문이다. 본 논문에서는 초전도변압기와 케이블이 병행 적용되는 미래 신 배전계통에서의 고장전류 추이를 해석하고[7], 초전도한류기의 적용방안에 대하여 검토하였다.

3. 초전도 한류기 적용방안 분석

3.1 해석대상 계통

초전도전력기기를 적용한 미래 배전계통을 검토하기 위하여 그림 1과 같은 해석대상 계통을 선정하고 이를 EMTDC로 모의하여 해석하였다. 그림 1은 저압대용량 방식의 초전도전력기기를 적용한 신 배전계통으로서[2], 계통구성 기기와 모의 데이터는 표 1과 같다. 표 1의 데이터는 기존 154kV 및 배전계통의 대표적인 계통정수를 적용한 것이며, 초전도기기에 대해서는 현재 상태에서 예상되는 기기 정격을 상정한 것이다.

표 1. 신 배전계통 구성기기 및 모의데이터

Table 1. Data for future new distribution system

항 목	기본 데이터
전원임피던스	$Z_s = 1.778(\Omega)$ (154kV모선고장전류 50kA)
154kV 변압기	90 혹은 130MVA, %Z=12%
S/S 한류기	변압기 2차측 일괄, 한류저항 2(Ω) 이하
22.9kV저압대용량케이블	22.9kV 200MW 2회선, CNCV 325(mm ²) 임피던스 10% 적용
22.9kV배전용 초전도케이블	초전도 50MW급, 2개 Section, Section당 2개 Feeder 배치
부 하	초전도 50MW급 1개 Feeder당 50+j20(MVA), PF=0.92
분산전원	1개 Feeder당 최대 3MW 이하 배치, $Z_s+Z_f=20\%$ 상정 (자기용량 기준)

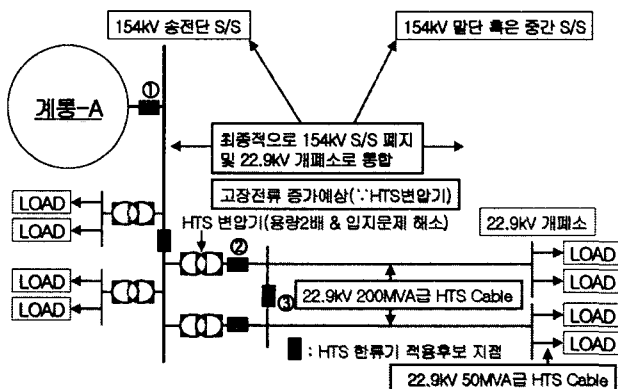


그림 1. 배전계통 초전도한류기 적용대상 지점

Fig. 1. Application places of HTS-FCL

3.2 한류기 설치 위치분석

22.9kV 배전계통에서 발생하는 고장전류를 감소시키기 위한 한류기의 적용위치는 154kV와 22.9kV 측에 배치하는 방안을 모두 고려할 수 있다. 154kV 모선에 일괄 배치하는 경우와 변압기 2차측 및 22.9kV 모선 Tie 방식으로 연결하는 각각의 경우에 대하여 검토하였다. 신 배전계통에서 고장전류 크기는 154/22.9kV 초전도변압기의 용량과 누설임피던스에 의해 크게 좌우되는데, 표-2에 초전도변압기의 OA 용량이 130MVA인 경우에 대한 고장전류 해석결과를 나타내었다. 검토결과를 분석하면 병렬 초전도변압기의 용량이 130MVA 이상인 경우 1-Bank가 배치되어도 한류기가 없으면, 고장전류가 차단용량인 25kA를 초과함을 알 수 있다. 실제로는 저압 대용량 초전도케이블 용량인 200MVA 이상의 변압기가 배치되어야 하며, 이 경우에는 고장전류가 47.5kA를 상회하는 것으로 해석되었다. 이러한

22.9kV 모선측 고장전류를 저감하기 위해 154kV 모선에 일괄하여 초전도한류기를 설치하는 방안은 154kV와 22.9kV 양측을 모두 만족시키는 한류저항 값을 선정하기 곤란한 문제가 있다. 반면에 22.9kV 선로에 설치하는 것은 한류저항 값을 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. 전체적으로는 한류기 적정 저항 값 선정과도 연관되지만 154/22.9kV 초전도변압기의 2차측에 설치하는 것이 합리적으로 판단된다.

표 2. 한류기 설치위치 및 한류저항별 고장전류 (초전도변압기 OA용량 90 및 130MVA 기준)

Table 2. Fault current for each HTS-FCL resistance

한류기 설치위치	한류 저항 (Ω)	고장위치 및 고장전류(kA)		비 고
		154kV 모선	22.9kV 모선	
154kV 모선 일괄<그림1> ①위치	0(Ω)	50.0	25.3/17.9 ^{*)}	22.9kV 모선분리 조건
	10(Ω)	8.7	23.3/17.2	
	30(Ω)	2.9	15.6/13.3	
154/22.9kV 변압기 2차측 <그림1> ②위치	0 (Ω)	-	25.3/17.9	22.9kV 모선분리 조건
	1 (Ω)	-	11.7/10.6	
	10(Ω)	-	1.54/1.32	
22.9kV 모선 Tie-방식 <그림1> ③위치	0 (Ω)	-	47.0/33.9	모선연결
	1 (Ω)	-	31.2/24.0	
	10(Ω)	-	25.4/18.8	
	∞ (Ω)	-	25.3/17.9	

* 1) A/B값은 각각 초전도변압기 OA용량 90 혹은 130MVA 용량 기준임.

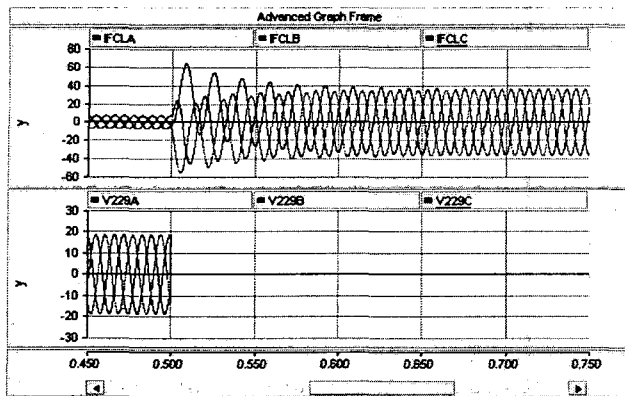


그림 2. 22.9kV 모선 고장전류 및 전압 (변압기 130MVA 기준)

Fig. 2. Fault current and voltage of 22.9kv BUS (based on 130MVA Transformer rating)

3.3 한류저항 선정검토

한류저항 크기는 계통관점에서 적정하게 선정되어야 한다. 그 이유는 한류저항이 너무 적으면 고장전류가 저감효과가 미약하다. 반대로 한류저항이 지나치게 크면 고장전류 감소효과는 커지만, 배전계통에서 약간의 고저항 지락이 발생하여도 고장전류와 부하전류의 차이가 없으므로 보호계전기가 부동작 할 우려가 있다. 또한, 한류저항이 크다는 것은 초전도한류기 자체의 경제성이 낮고, 냉각수요도 증가하므로 계통안정성에 오히려 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 초전도한류기의 적정 한류저항 값은 계통조건을 감안하여 적정하게 선정되어야 한다. 본 검토에서는 154/22.9kV 변압기 2차측에 한류기를 설치한다고 전제할 때 한류저항의 크기를 검토하였다. 그림 3은 22.9kV 모선고장 시에 변압기 용량별로 한류저항 크기가 서로 다를 때의 고장전류 변화추이를 나타낸 것이다. 분석결과 한류저항이 클수록 고장전류는 감소되지만, 한류저항이 2(Ω) 이상인 경우 고장전류 감소효과는 거의 포화됨을 알 수 있었다. 예를 들어 한류저항이 5(Ω)이면 고장전류가 대폭 감소하여 오히려 최대 부하전류보다 적음을 알 수 있다. 이는 신 배전계통이 저압대용량 방식의 초전도케이블을 근간으로 하므로 이므로 기존 배전계통보다 정격부하전류가 훨씬 크기 때문이다. 또한, 그림 4는 변압기 용량이 130MVA인 경우에 한류저항 크기에 따른 22.9kV 저압대용량 초전도케이블 선로의 고장위치에 따른 고장전류 해석결과이다. 그림에서 선로길이가 길수록 고장전류는 미미하게 감소하지만, 큰 변화는 없었다. 그 이유는 초전도케이블 자체의 선로임피던스가 기존 케이블 선로보다 훨씬 적기 때문이다. 결과적으로 신 배전계통에 적용하는 초전도한류기의 한류저항은 1-2(Ω) 내외에서 적용하는 것이 타당하다고 판단되어진다. 모든 그림에서 한류저항이 0(Ω)인 것은 초전도한류기가 없음을 의미한다.

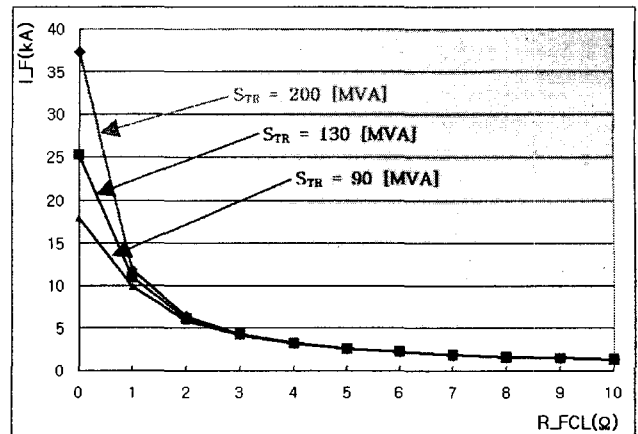


그림 3. 한류저항 크기에 따른 22.9kV 모선 고장전류 크기 변화

Fig. 3. Fault current of 22.9kV BUS for each HTS-FCL resistance

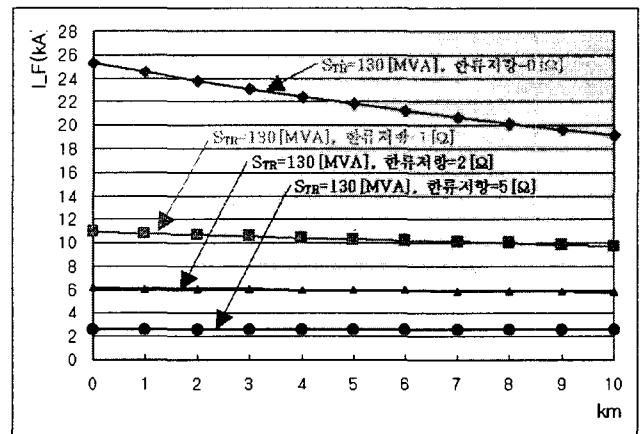


그림 4. 초전도케이블 선로고장시 고장전류 크기변화 (S_{TR}=130[MVA], 한류저항=0, 1, 2, 5(Ω))

Fig. 4. Fault current variation in case of HTS-cable line fault (S_{TR}=130[MVA], R_{FCL}=0, 1, 2, 5(Ω))

3.4 배전계통 보호방식에의 영향

표 3은 국내 22.9kV 배전계통의 보호계전방식을 나타낸 것이다. 국내 배전계통은 수기상 계통임을 전제로 하여 과전류계전방식을 채택하고 있으며, 지중선로에서는 영구고장을 감안하여 자동 재폐로를 시행하지 않고 있다. 앞 절의 검토결과 초전도한류기를 적용하면 한류저항 값에 따라서 고장전류가 크게 감소함을 알 수 있었다. 특히, 선로 길이 10km 위치에서 고저항 지락이 발생할 때 지락저항 크기에 따른 고장전류 크기변화를 나타내면 그림 5와 같다. 그림에서 한류저항 혹은 지락저항이 수(Ω) 이면 고장전류 값이 크게 감소하여 부하전류보다 적음을 알 수 있다. 이는 곧바로 보호계전 방식에 문제를 발생시킬 수 있다는 것을 의미한다. 결과적으로 초전도한류기를 적용할 경우, 과전류 계전방식의 설정치를 정정하고, 이와 더불어 별도의 계전방식을 조합하여 적용할 필요성이 있다.

표 3. 22.9kV 배전선로 보호계전방식

Table 3. Protective relaying for 22.9Kv distribution system

구분	보호방식	자동재폐로	
가공선로	과전류계전방식	3상, 2회	
지중선로	과전류계전방식	미적용	
복합선로	지중30%미만	과전류계전방식	3상, 2회
	지중30%이상	과전류계전방식	3상, 1회

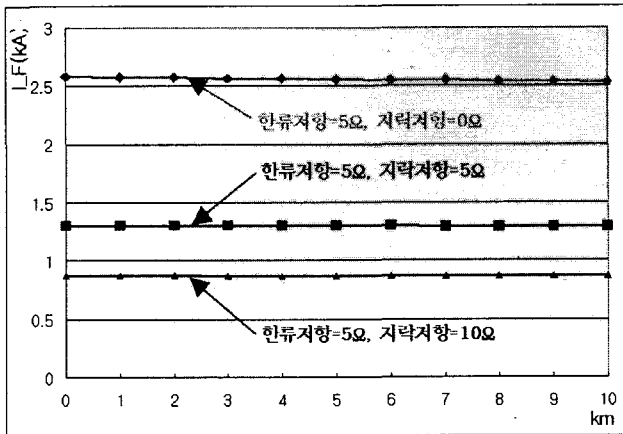


그림 5. 지락저항에 따른 고장전류 변화추이 (S_{TR}=130(MVA), 한류저항=5[Ω], 지락저항=0, 5, 10[Ω])

Fig. 5. Fault current variation for each fault grounding resistance

3.5 분산전원 영향검토

현재 기준상으로 분산전원 연계용량은 일반 배전선로에서 최대 3MW, 전용 배전선로는 10MW 이하가 될 것으로 예상되고 있다.[7] 일반 배전선로에서 3MW의 분산전원이 운전되는 경우, 분산전원과 계통연계용 변압기의 임피던스를 최소 15%로 상정하더라도 고장전류 증가분은 최대 0.5kA 이하이며, 이는 해석결과와 일치하는 값이다. 만약, 분산전원 전용 배전선로를 가정한다면 분산전원과 고장위치 사이의 거리 때문에 고장전류 증대효과는 최대 1.5kA 정도로 나타났다. 또한, 미래 배전계통에서 Spot Network 방식의 적용이 증가하더라도 서로 다른 변전소에서 병렬 수전하지 않는다면 고장전류의 증가폭은 크지 않다. 전체적으로 고장전류에 미치는 분산전원과 Spot Network 적용 확대의 영향은 크지 않다고 분석되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 신 배전계통에 대한 저항형 초전도한류기 적용 필요성에 대하여 분석하여 적절한 한류저항 값을 제안하였다. 본 논문의 주요 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 현재 국내 배전계통에서 한류기의 적용 필요성은 낮지만, 초전도 전력기가 적용되는 저압대용량 방식의 미래 신 배전계통에서는 초전도변압기 적용으로 고장전류가 크게 증가하므로 초전도한류기의 적용이 필요하다.

- 신 배전계통의 고장전류를 저감하기 위한 초전도한류기의 설치위치는 154kV 모선측 보다는 154/22.9kV 변압기 2차측에 배치하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.
- 초전도한류기를 적용하는 경우 고장전류 감소에 따라서 과전류계전방식의 설정치를 조정해야 하며, 타 계전방식과의 조합도 필요할 것으로 예상된다.
- Quenching과 Recovery 임계전류 등 세부적인 초전도한류기의 파라미터를 선정하기 위해서는 실 계통조건을 고려한 케이스별 세부 기술적인 검토가 향후 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

“This research was supported by a grant from Center for Applied Superconductivity Technology of the 21st Century Frontier R&D Program funded by the Ministry of Science and Technology, Republic of Korea”

참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사, “2002년 장기 송변전 설비계획”, 2002
- [2] 윤재영의 2인, “초전도기기를 적용한 신 배전계통 구성방안”, 한국전기연구원, 2004
- [3] M. Noe, B. R. Oswald, “Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems” IEEE Transactions on applied superconductivity, June 1999,
- [4] J. N. Nielsen, J. J. Ostergaard, “Applications of HTS fault current limiters in the danish utility network”
- [5] H. Kameda, “Setting method of specific parameters of a superconducting fault current limiter considering the operation of power system protection” IEEE Transactions on applied superconductivity, June 1999
- [6] CAST, “차세대 초전도응용기술 개발사업 Annual Report”, 2004
- [7] 한국전기연구원, “계통연계운전형 신 에너지전원의 표준화 및 보급체제 정비”, 2002
- [8] 한국전기연구원, “초전도한류기 적용가능성 분석자료”, 초전도한류기 기획자료-초안, 2004
- [9] J-Y. YOON, “Application Methodology of 22.9kV HTS Cable in Metropolitan city of South Korea”, IEEE GM, 2004
- [10] 한국전기연구원, “22.9kV 초전도케이블 적용 가능성 분석” 초전도케이블 기획자료, 2003

저 자 소 개



윤재영 (尹在暎)

1962년 07월 30일생, 1985년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1994년 전기기술사(발송배전분야), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력시스템 연구그룹장
Tel : 055-280-1316
Fax : 055-280-1390
E-mail : jyoon@keri.re.kr



김종율 (金鍾律)

1974년 07월 06일생, 1997년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력시스템 연구그룹 선임연구원
Tel : 055-280-1336
Fax : 055-280-1390
E-mail : jykim@keri.re.kr



이승렬 (李昇烈)

1975년 09월 23일생, 1999년 고려대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2003년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료, 현재 한국 전기연구원 전력연구단 신전력시스템 연구그룹 연구원
Tel : 055-280-1358
Fax : 055-280-1390
E-mail : srlee@keri.re.kr



김호용 (金豪溶)

1952년 09월 01일생, 1979년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1982년 미국 텍사스 Austin 전기공학과 졸업(공학석사), 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 전력연구단장
Tel : 055-280-1300
Fax : 055-280-1390
E-mail : jykim@keri.re.kr