

Transient State Analysis of HTS Cable Using EMTP-RV

하철종* · 양병모** · 이현철*** · 이근준§ · 백영식†

(Chul-Jong Ha · Byeong-Mo Yang · Hyun-Chul Lee · Geun-Joon Lee · Young-Sik Baek)

Abstract - A high temperature superconducting power cable (HTS power cable) was applied large current capacity by no resistance in normal state. Fault state was risen out of over-current but, it was limited to resistance. this study was modeling equivalence, and unbalanced state analyzed operating characteristics of HTS power cable. The equivalence model was composed superconductor, shield, and former part. This model simulation was appeared conductor and shield current in normal state, but fault state was appeared former current as rise current by resistance. so it need to sufficiently influenced the quench characteristic when the former design.

Key Words : HTS cable, Quench, Fault current, Superconductor

1. 서론

매년 계속 증가하는 전력에너지의 소비 증가와 인구의 도시 집중화로 인해 보다 높은 밀도의 전력 수송 수단을 필요로 하고 있다. 기존 전력수송설비의 주류를 이루는 것은 ACSR을 이용한 가공 송전 선로와 XLPE 지중케이블은 지속적으로 증가하고 있는 전력수요를 충족시키기에는 무리가 있다. 그러나 최근의 전력시장 규제완화 및 환경문제에 대한 관심도의 제고 추세는 전력수송선로 및 배전선로의 추가 건설은 현실적인 문제에 부딪혀 어려운 것이 사실이다.

초전도 케이블은 1986년 고온 초전도체가 발견된 이래 꾸준한 기술 진보를 보이고 있으며, 절연과 냉각 및 도체 배열 방식에 따라 다양한 특성을 갖는 1[GVA]급 수백 [m]급 고온초전도 케이블(High Tc Superconductor cable : HTS cable)이 일본, 미국, 유럽을 중심으로 제작 시험되고 있고, 우리나라에서도 22.9kV급 HTS 실증시험장을 건설을 추진 중에 있어 2010년을 전후로 HTS 케이블은 보다 현실적인 경쟁력을 가진 전력수송수단으로 등장할 것으로 전망된다[1].

초전도 케이블의 경우 제작 비용과 설치 비용이 매우 비싸다. 그러므로 실계통에 적용되기 이전에 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 해석이 반드시 포함되어야 한다. 초전도 케이블의

경우 기존의 일반 케이블과는 달리 정상상태에서는 저항이 거의 없는 상태이지만 사고가 발생하면 퀘칭 저항이 발생하고 사고 전류가 클 경우 온도도 상승하여 케이블이 파손되는 위험이 있다.

본 논문에서는 과도상태 해석 툴인 EMTP-RV를 이용하여 초전도 케이블을 모델링하고 정상상태와 과도상태를 해석하였다. 흔히 발생하는 1선 지락사고와 사고 전류가 가장 큰 3상 단락 사고를 모의하여 사고 시 나타나는 초전도체와 쉴드간에 전류 관계, 은쉬스와 초전도체, 포머에 흐르는 전류 관계, 그리고 상승되는 온도와 퀘칭 저항, 임계 전류 등에 대하여 분석하였다. 이는 실계통 적용 전에 초전도 케이블의 특성을 파악하는데 많은 참고가 될 것이라고 생각한다.

2. 본론

2.1 초전도 케이블 모형화

그림 1은 초전도 케이블을 모형화한 것이다[12]. I_{HTS} 는 본선에 흐르는 전류이고, I_{shield} 는 쉴드선에 흐르는 전류이다. L_1 과 L_2 는 초전도선과 쉴드선의 리액턴스값이고, R_{quench} 는 과도상태가 될 때에 저항이 증가하는 퀘칭에 대한 특성값이다.

그림 1의 경우 개념적인 회로도를 나타낸 것이다. 이 회로도를 바탕으로 본 논문에서는 EMTP-RV를 이용하여 초전도 케이블을 모형화하였다. 각 저항 성분은 식에 의해 결정되어지는 값들이기 때문에 수식을 포함하는 저항 소자를 선택하여 모형화하였으며 인덕턴스의 경우 각 성분의 자기 인덕턴스와 상호인덕턴스를 상호인덕턴스의 모형에 그 값을 삽입하였다.

* 준 회원 : 경북대 전자전기컴퓨터학부 석사과정

** 정 회원 : 한국전력연구원 선임연구원

*** 정 회원 : 그린넷파워(주) 연구원

§ 시니어회원 : 충북도립대 전기학과 교수

† 교신저자, 펠로우회원 : 경북대 IT대학 전기공학과 교수

E-mail : ysbaek@knu.ac.kr

접수일자 : 2009년 11월 11일

최종완료 : 2010년 4월 5일

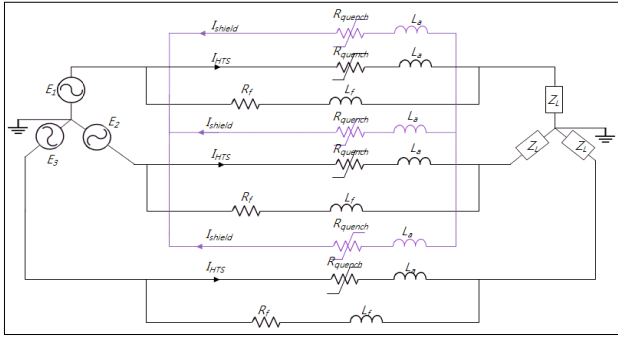


그림 1 초전도 케이블 모형
Fig. 1 HTS cable model

2.2 계통 적용 시 과도상태 해석

2.2.1 모의 계통 모형화

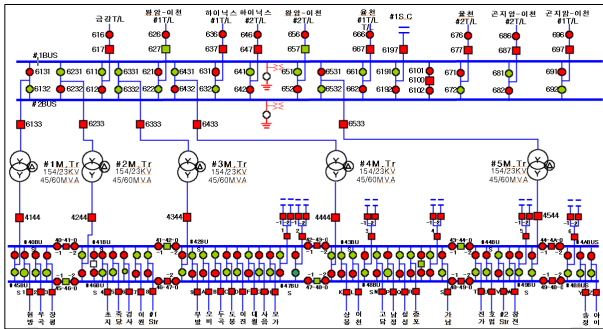


그림 2 154kV 이천변전소 단선도
Fig. 2 Single-line diagram of 154kV Icheon substation

표 1 이천변전소 전원등가 임피던스 및 고장용량
Table 1 Icheon substation's short-circuit impedance and short-circuit capacity

최소 임피던스(%)			
정상	역상	영상	
0.105+j1.146	0.107+j1.149	0.527+j2.900	
3상 단락		1선 지락	
용량(MVA)	위상각	용량(MVA)	위상각
9646.652	-84.92	6345.74	-82.05

그림 2는 이천변전소의 단선도이다. 차후에 이천변전소에 초전도 케이블이 설치될 예정이다. 따라서 이천변전소를 EMTP-RV로 모델링하고 분석할 것이다. 이천변전소 모형화에 필요한 데이터는 표 2와 표 3에서 나타내었다. 표 2는 계통 임피던스이다. EMTP-RV의 경우 임피던스가 옴[Ω]값으로 들어가므로 변환을 하여 모형화를 하였다.

표 2 이천변전소 피더별 중요 부하 현황
Table 2 Major loads of Icheon substation

BANK	부하량 (MW)	
	하계	동계
#1 M.Tr	20.2	34.5
#2 M.Tr	40.9	46.4
#3 M.Tr	34.1	45.9
#4 M.Tr	32.6	44.5
#5 M.Tr	35.4	49.5
계	163.2	220.8

표 2는 이천변전소의 피더별 중요 부하량을 계절별로 나타내고 있다.

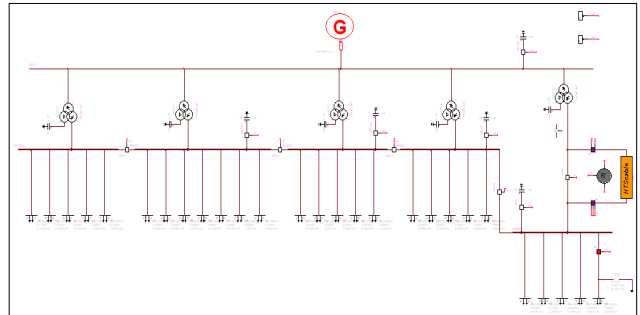


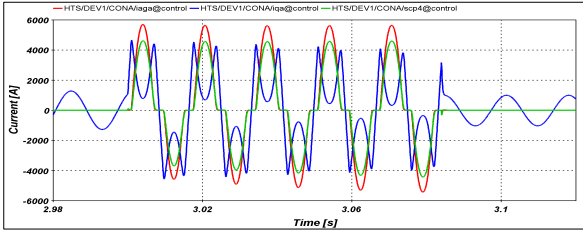
그림 3 EMTP-RV를 이용한 이천변전소 모형
Fig. 3 Model of Icheon substation using EMTP-RV

그림 3은 EMTP-RV로 이천변전소의 계통 모델링하고 초전도케이블을 설치한 것으로 이천변전소의 #5 M.Tr.에 초전도 케이블을 설치한 모형이다.

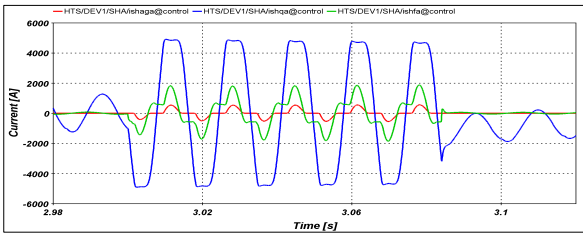
2.2 1선 지락 사고

그림 4는 1선 지락 사고 시 초전도 케이블의 전류파형을 나타낸 것이다. 사고 모의는 3~3.08[sec], 5cycle동안 지속되는 것으로 하였다. 이는 계전기가 동작한 것으로 사고 시 순시 동작 시간을 5cycle로 설정하였다. 본 논문에 사용한 계전기는 초전도체 양단에는 87번 차동계전기를 설치하였으며 각 피더에 50/51번 과전류 계전기와 50N/51N 지락과전류계전기이며 한국 전력 규정에 맞게 EMTP-RV를 이용하여 모형화한 것이다[2]. 모의 실험결과, 초전도 케이블의 전류는 사고 발생 전에 대부분이 초전도체로 흐르고, 사고 발생 후 초전도체에 저항이 발생하여 은과 구리의 저항에 의해 전류가 분배되는 것을 볼 수 있다.

사고 전의 파형은 초전도체이며 사고 후에 큰 전류는 은에 흐르는 전류이며 작은 전류는 구리에 흐르는 전류이다.



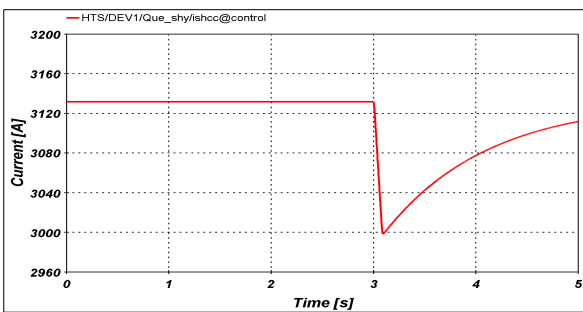
(a) 통전부 사고 전류 파형



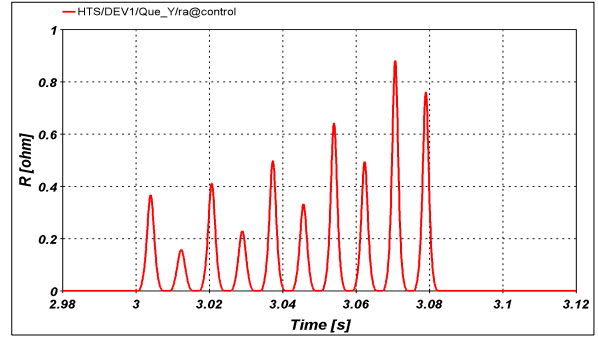
(b) 실드부 사고 전류 파형

그림 4 초전도케이블의 1선 지락 사고 시 전류파형
Fig. 4 Single-phase ground-fault current of HTS cable

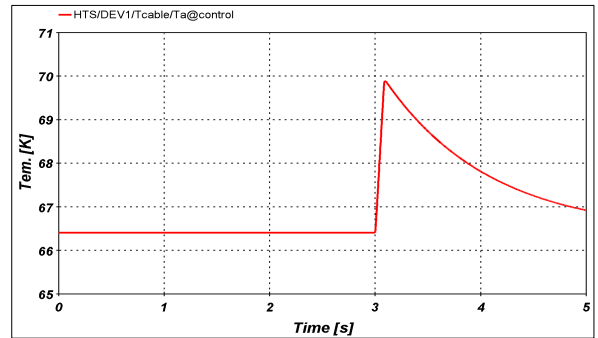
그림 5는 1선 지락 사고 시 임계전류와 초전도 케이블의 저항, 케이블 온도와 초전도체 순간 온도의 그래프이다. 사고가 발생하면 임계전류가 급격히 줄어들어 초전도체는 퀘칭 현상이 발생하고 그 결과 퀘칭 저항이 발생을 하여 온도가 증가한다. 온도의 경우 케이블 전체 온도와 초전도체만의 순간 온도가 있다. 케이블 온도의 경우 105K가 되면 질소 용액에 기포가 발생하기 시작한다. 사고 상태를 방지하게 되면 케이블의 파손에 이르게 된다. 순간 온도의 경우 300K 이상이 되면 케이블의 손상이 시작된다. 이번 시물레이션에서의 초전도체의 순간온도는 190K로 순간적으로 급격하게 증가하며, 일반 계전기의 순시 동작시간인 3cycle ~ 5cycle 보다 짧은 0.002[sec]로 나타났다. 만약 계전기가 고장으로 동작하지 않는다면 케이블은 파손될 것이다. 따라서 여러 종류의 계전기를 설치하고 상황에 따라 동작할 수 있게 해야할 것이다. 아니면 최근에 초전도 케이블과 마찬가지로 활발한 연구가 진행되고 있는 초전도환류기(SFCL) 등을 사용하여 사고 전류를 제한하는 것도 좋은 방법이 될 수 있을 것이라고 생각한다.



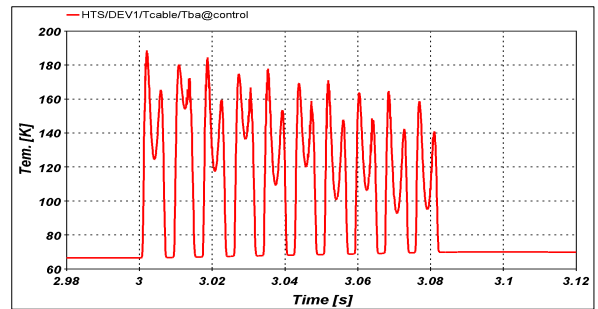
(a) 임계전류



(b) 퀘칭 저항



(c) 케이블 온도



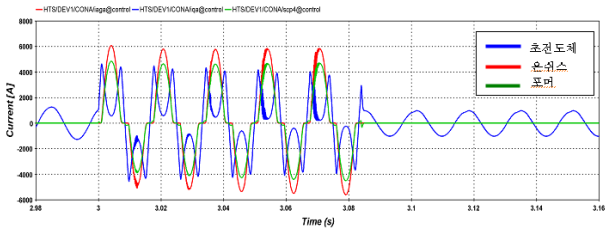
(d) 초전도체 순간 온도

그림 5 초전도케이블의 임계전류, 저항, 온도 (1선 지락 사고)
Fig. 5 Critical current, resistance, temperature of HTS cable (Single-phase ground-fault)

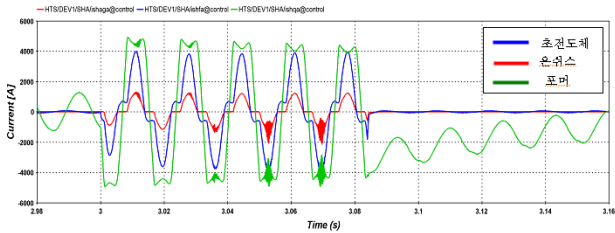
2.3 3상 단락 사고

그림 6은 3상 단락 사고 시 초전도 케이블의 전류파형을 나타낸 것이다. 사고 모의는 3~3.08[sec], 5cycle동안 지속되는 것으로 하였다. 이는 1선 지락과 마찬가지로 계전기의 동작에 의해 순시로 5cycle만에 차단이 되는 것을 보여준다.

모의 실험결과, 1선 단락 사고에 비해 사고 전류의 크기가 크지만 거의 비슷한 파형으로 사고 발생 전에 대부분의 전류가 초전도체로 흐르고, 사고 발생 후 초전도체에 저항이 발생하여 은과 구리의 저항에 의해 전류가 분배되는 것을 볼 수 있다. 3상 단락 역시 분배된 전류의 크기가 초전도체, 은, 구리의 전류가 비슷한 양상으로 분배되는 것을 시물레이션을 통해 볼 수 있었다.



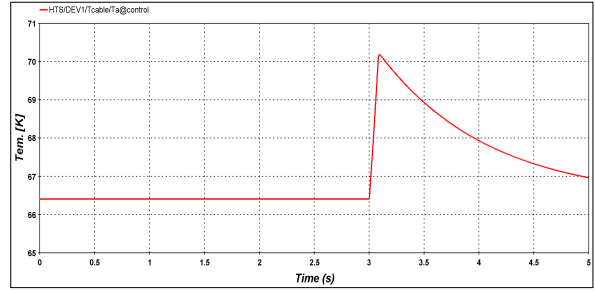
(a) 통전부 사고 전류 파형



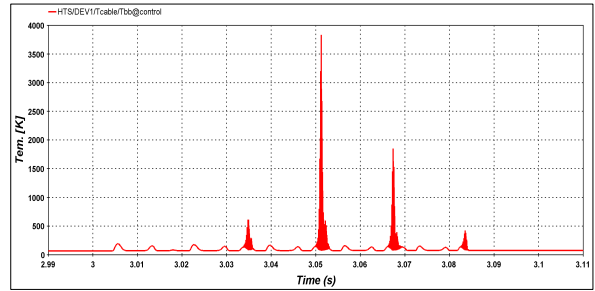
(b) 실드부 사고 전류 파형

그림 6 초전도케이블의 3상 단락 사고 시 전류파형
Fig. 6 Three-phase short-circuit current of HTS cable

그림 7은 3상 단락 사고 시 임계전류와 초전도케이블의 저항, 케이블 온도와 초전도체 순간 온도의 그래프이다. 임계전류와 케이블 온도 변화는 1선 지락 사고와 유사한 결과 파형이 나오는 것을 확인 할 수 있으며, 1선 지락 사고 보다 는 사고 전류가 크기 때문에 더욱 위험한 사고이다. 온도도 높고 퀘칭 저항도 커지는 것을 파형을 통해 관찰할 수 있다. 그러므로 3상 단락 사고는 더 각별한 보호 협조가 이루어져야 할 것이다.



(c) 케이블 온도



(d) 초전도체 순간온도

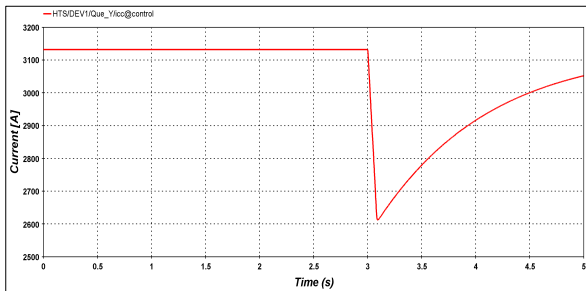
그림 7 초전도케이블의 임계전류, 저항, 온도(3상 단락 사고)
Fig. 7 Critical current, resistance, temperature of HTS cable

3. 결 론

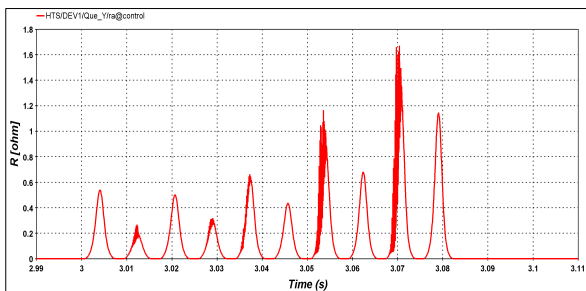
본 논문에서는 높은 밀도의 전력 수송 수단인 초전도 케이블에 대해서 소개하고 향후에 실제 변전소에 설치될 초전도 케이블에 대해 미리 분석하고 나타날 문제점의 해결 방안에 대해 논해 보았다. 앞의 내용들을 요약해 보면 다음과 같다.

첫 번째로 초전도 케이블을 모형화 하였다. 여러 과도 상태 해석을 위해서는 일단 초전도 케이블의 모형화가 필요하다. 이를 EMTP-RV를 통해서 모형화하여서 여러 과도현상에 대해 살펴보았다.

두 번째로 1선 지락 사고와 3상 단락 사고에 대해 모의해 보았다. 실제로 발생할 수 있는 사고에 대해 모의해 본 결과 여러 가지 문제점이 나타났다. 열에 민감한 초전도체이기 때문에 사고 시에 급격한 전류 상승은 급격한 온도 상승으로 이어졌고 이는 케이블이 파괴될 수 있는 심각한 문제이다. 온도의 상승시간도 매우 짧아서 기존의 보호 기기의 차단 시간으로는 도저히 사고를 미리 차단할 수 있는 방법이 없는 것으로 보인다. 따라서 초전도 한류기 등을 설치하여 사고 전류를 최소화 시키는 것이 매우 중요할 것이다. 초전도 한류기는 지금도 매우 활발하게 진행되는 연구 과제 중의 하나이다. 이를 초전도 케이블과 같이 설치하게 되면 보다 더 안전하고 높은 신뢰성을 확보할 수 있을 것이다. 또 다른 방법으로는 보호 기기 분야를 연구하여 차단 시간을 매우 빠르게 하는 것도 한 방법이라고 생각된다. 초전도체가 파괴되지 않을 만큼의 빠른 차단 시간이 가능하면 이 또한 좋은 방법일 것이다.



(a) 임계전류



(b) 초전도체 저항

본 논문은 앞으로 연구될 초전도 케이블 분야에 많은 도움이 될 것이라고 생각한다. 앞에서 모형화한 케이블을 이용하여 여러 가지 상황에 대해 분석하고 연구 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

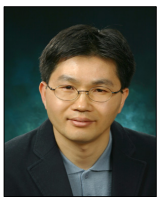
- [1] A. Ghosh, S. Devadas, K. Keutzer and J. White, "Estimation of Average Switching Activity in Combinational and Sequential Circuits," ACM/IEEE Design Automation Conf., pp. 253-259, 1992.
- [2] F.N. Najm, "A Survey of Power Estimation Techniques in VLSI Circuits," IEEE Trans. on VLSI Systems, pp. 446-455, Dec. 1994.
- [3] J. Monteiro, S. Devadas, and B. Lin, "A Methodology for Efficient Estimation of Switching Activity in Sequential Logic Circuits," ACM/IEEE Design Automation Conf., pp. 12-17, 1994.
- [4] R. Burch, F. N. Najm, P. Yang, and T. N. Trick, "A Monte Carlo Approach for Power Estimation," IEEE Trans. on VLSI systems, vol. 1, No. 1, pp.63-71, March 1993.

저 자 소 개



하 철 중 (河 哲 鍾)

1981년 3월 3일생. 2007년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 졸업. 2010년 동 대학원 전자전기컴퓨터학부 졸업(석사).
Tel : (053) 940-8802
E-mail : bsullove@naver.com



양 병 모 (梁 炳 模)

1969년 04월 24일생, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학 졸업(공학석사), 현재 한전 전력연구원 선임연구원
Tel : 042-865-5922
E-mail : bmyang@kepri.re.kr



이 현 철 (李 賢 哲)

1979년 12월 13일생. 2002년 원광대 전자공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년-2005년 (주)네스랩연구원. 2007년-현재(주)그린넷 파워연구원
Tel : 043-731-7448
Fax : 043-731-7433
E-mail : oneyel@naver.com



이 근 준 (李 根 準)

1981년 울산공대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대학교 대학원 전기공학과(석사) 1996년 울산대 전기공학과(공학박) 1976-1998년 한전전력연구원 선임연구원. 1988-1989년 미국 University of Texas at Arlington Energy System Research Center 연구원, 2001-2002년 미국 Arizona State University PSERC 교환교수. IEEE Senior Member, 발송배전 기술사. 현재 충북과학대학 전기과 교수.
Tel : 043-731-7448
Fax : 043-731-7433
E-mail : gjlee@ctech.ac.kr



백 영 식 (白 榮 植)

1950년 7월 8일생. 1974년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1977년 명지대 전기공학과 조교수. 현재 경북대전전자전기컴퓨터학부 교수.
Tel : (053) 950-5602
E-mail : ysbaek@mail.knu.ac.kr