

## 고온초전도선을 이용한 초전도전력케이블의 실시간 시뮬레이션 알고리즘 개발

### Development of a Real-Time Simulation Algorithm of HTS Power Cable using HTS Wire

김재호\*, 박민원\*\*, 조전욱\*\*\*, 심기덕\*\*\*, 유인근#

Jae-Ho Kim\*, Minwon Park\*\*, Jeonwook Cho\*\*\*, Ki-Deok Sim\*\*\*, In-Keun Yu#

**Abstract:** In this paper, authors developed a real-time simulation algorithm for the power device application of HTS(High Temperature Superconducting)wire by using Real Time Digital Simulator(RTDS). At present, in order to extend the power capacity of some area where has a serious problem of power quality, especially metropolitan complex city, there are so many problems such as right of way for power line routes, space for downtown substations, and the environmental protection, etc. HTS technology can be useful to overcome this problem. Recently, according to the advanced HTS technology, the power application is being researched well. Simulation is required for safety before installation of HTS power cable, a fabrication model used at the power system simulation. This paper describes a real time digital simulation method for the application of HTS wire to power device. For the simulation analysis, test sample of HTS wire was actually manufactured. And the transient phenomenon of the HTS wire was analysed in the simulated utility power grid. This simulation method is the world first trial in order to obtain much better information for installation of HTS power device into a utility network.

**Key Words:** RTDS, HTS power cable, HTS wire.

## 1. 서 론

수도권 혹은 신도시와 대도시 지역은 타 지역에 비해 부하밀도가 지극히 높으므로, 도시내부에 있는 대부분의 송배전 계통은 지중선로와 옥내 GIS 변전소로 건설되고 있다. 향후 2015년까지 지속적인 부하성장이 예상되며, 추가적인 지중선로 포설과 변전소 건설이 예상되며, 추가적인 지중선로 포설과 변전소 건설이 필요하다[1]. 하지만, 지중선로와 변전소 건설에 따른 도심 교통난과 과도한 건설비용 및 환경적 측면의 제약이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 다양한 방안 중 고온초전도 전력케이블의 도입은 다양한 기술적 대

안중에서 친환경적, 경제적, 기술적 관점에서 유력한 대안 중의 하나로 평가받고 있다[2].

초전도 전력케이블은 기존 전력케이블의 구리도체 대신 고온 초전도체를 사용하며, 매우 낮은 온도에서 전기저항이 영이 되는 초전도 현상을 이용하여 저손실, 대용량 전력수송이 가능한 전력케이블로서 대도시의 전력공급 문제를 해결할 수 있는 친환경적 신 개념의 전력케이블이다[3].

최근 입계전류가 높고 기계적 특성이 크게 개선된 고온 초전도체가 상용화급 수준으로 개발됨에 따라 초전도 전력케이블의 상용화 연구가 더욱 활발히 진행되고 있으며, 이와 병행하여 초전도 전력케이블의 실 계통 투입에 관한 연구도 점점 활기를 띠고 있다.

특히, 초전도 전력케이블을 실 계통에 투입하기 전에는 반드시 사전 시뮬레이션 해석이 먼저 선행되어야 하는데, 초전도 전력케이블은 정상전류 상태에서는 전기 저항이 없지만, 고장전류에 의한 퀵치발생 시에는 저항 값이 크게 변화하는 특징이 있다. 이에 저자들은 PSCAD/RTDS를 이용하여 초전도 전력케이블의 동특성 모델을 제작하여 각종 계통적용 해석을 실시하였다 [4]. 그러나 상용화 되어 있는 초전도선의 종류만도 여러 종류가 되고 실시간 시뮬레이션이 아님으로 인해 시뮬레이션의 확장성도 부족하였던 것은 사실이다.

본 논문에서는 초전도 전력케이블에 사용되고 전기적 특성에 가장 결정적인 영향을 주는 실제의 초전도선을 직접 시뮬레이션 내에 삽입하여 실시간으로 초전도 전력케이블의 전력계통 적용 동특성 결과를 제공할 수 있는 새로운 실시간 초전도 전력케이블 시뮬레이션 기법을 제안하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 RTDS를 이용한 실시간 시뮬레이션 알고리즘

RTDS는 전력시스템의 전자기적 과도현상을 모의하기 위한 실시간 Digital Simulator이다. RTDS는 현재 전력 시스템의 제어 알고리즘이나 보호 장비 등의 동작 특성을 분석 하는데 널리 사용되고 있다.

RTDS는 실시간 계산이 가능한 고속의 프로세서들이 들어있는 하드웨어와 시뮬레이션을 모의하고 동작시키는 소프트웨어가 결합된 형태이다. 모의하고자 하는 전력 시스템은 컴퓨터의 소프트웨어를 통하여 GUI 컴포넌트들의 조합으로 만들어진다. 사용자는 PSCAD 소프트웨어를 사용하여 RTDS를 구동시키고 입력 및 출력을 제어할 수 있다. 또한 PSCAD 상에서 설계하고자 하는 시스템 도면을 작성하고 시뮬레이션 조건과 원하는 출력 값의 범위를 설정할 수 있다.

RTDS가 다른 시뮬레이터와 다른 점은 실시간으로

\* 정 회 원 : 창원대 대학원 전기공학과 박사과정

\*\* 정 회 원 : 창원대 전기공학과 조교수

\*\*\* 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도응용연구그룹

# 정 회 원 : 창원대 전기공학과 교수

원고접수 : 2006년 8월 16일

심사완료 : 2006년 9월 11일

계속해서 시뮬레이션을 수행할 수 있다는 점이다. 이것은 RTDS가 실제 계통에서의 조건을 더 사실적으로 나타낼 수 있게 해줄 수 있음을 의미한다. 시뮬레이션 결과가 실시간으로 나타나기 때문에 시뮬레이터는 전력 시스템과 직접 연결될 수도 있다[5].

본 논문에서는 초전도 전력 케이블의 실시간 시뮬레이션 해석을 위해 RTDS를 사용하였다.

### 2.2 실험 구성

Fig. 1은 실시간 시뮬레이션의 시스템 개략도를 나타낸 것으로 RTDS와 HTS wire의 연계운전을 나타내고 있다. RTDS와 Current Amp, HTS wire의 연계운전 알고리즘 구현을 위해 PSCAD 상에서 HTS wire의 전압을 피드백 받아 Current Amp의 출력을 제어할 수 있는 선로를 구성하고 워크스테이션을 통해 RTDS와 연결한 후 RTDS의 프로세서를 통해 실시간 시뮬레이션이 이루어지게 된다. 초기 출력전류는 RTDS 내부 선로 임피던스 값에 의해 HTS wire에 통전되는 Current Amp의 출력전류가 결정되며, 퀘칭 현상이 발생하면 HTS wire의 전압을 피드백 받게 되고 선로의 임피던스 변화에 의해 출력 전류가 제어된다. Optic Isolation Rack은 외부의 전기적 신호로부터 RTDS를 보호해 주는 역할을 하며, SCXI에서 입력 및 출력되는 전기적인 신호를 모니터링 하였다.

실험 구성을 통해 RTDS 내부에 구성된 선로 임피던스에 의한 실제 초전도 전력 케이블 선로의 사고 유형별 고장전류 값을 비교 분석 하였고 실제 HTS wire와 RTDS를 연계 운전할 수 있는 알고리즘을 개발 하였다.

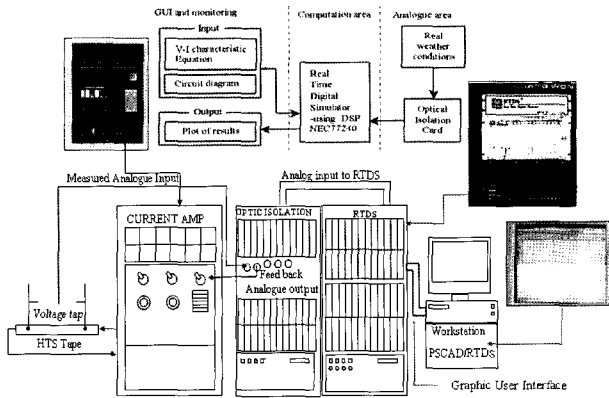


Fig. 1. Conceptual diagram of the proposed real time simulation of HTS power cable.

Table 1. Characteristics of each model sample.

HTS wire		Critical Current	R1 [20cm]	R2 [20cm]
Bi-2223	brass(st)	115.71[A]	2.747[ $\mu\Omega$ ]	0.236[m $\Omega$ ]
	Sus(st)	123.32[A]	7.654[ $\mu\Omega$ ]	0.278[m $\Omega$ ]
Coated Conductor	Sus(st)	70.68[A]	238[ $\mu\Omega$ ]	0.189[m $\Omega$ ]

## 3. 모델 샘플제작 및 실험방법

### 3.1 모델샘플제작 및 특성

Fig. 2는 Table 1을 이용하여 만든 샘플이다. 샘플의 전체 길이는 44cm이며 전압 탭 간 거리는 20cm 이고 Current lead로 구성되어 있다.

Table 1은 샘플을 이용하여 실험에 사용된 Bi-2223 HTS wire와 YBCO Coated Conductor 초전도선의 임계전류 특성 실험을 통해 확보된 Critical Current값과 선재 종류에 따른 저항의 구간별 값을 나타내고 있다.

Fig. 3은 Table 1의 HTS wire중 Bi-2223 HTS wire stabilizer brass, Sus 그리고 YBCO Coated Conductor Sus의 임계전류 특성곡선 실험 결과와 고온초전도체의 비선형적인 저항 특성을 구간별로 나타내었으며,  $R_0$ 는 Quench전,  $R_1$ 과  $R_2$ 는 Quench 후 비선형적으로 증가하는 저항특성을 나타내었다. 이 실험 결과를 초전도 전력 케이블 모의 선로에 적용시켜 고온초전도 선재가 전력 케이블에 적용되었을 때 가지는 특성을 확인 할 수 있다.

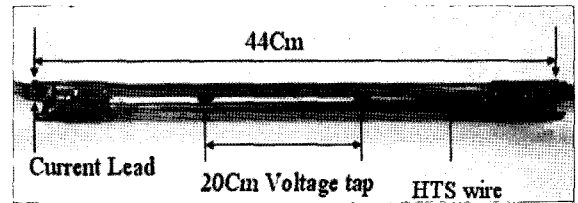


Fig. 2. Picture of the manufactured model sample of HTS wire.

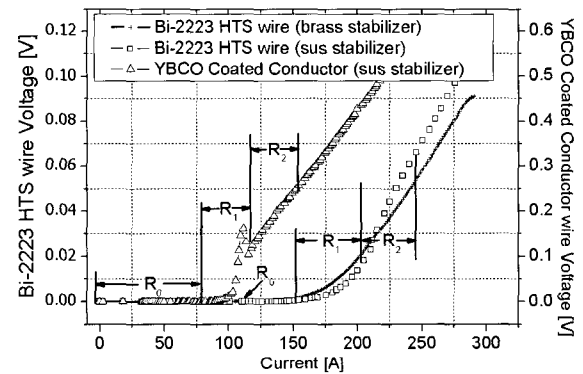


Fig. 3. Voltage and current characteristic curve of a HTS wire.

### 3.2 실험방법

Fig. 1에서와 같이 하드웨어는 크게 RTDS, Current Amp, HTS wire의 세부분으로 이루어져 있다. RTDS 내의 PSCAD에서 초전도선로의 모의회로를 구성하고 PSCAD내의 초전도 전력케이블의 저항 값은 RTDS와 연결된 실제 HTS wire의 저항 값으로부터 초전도 전력케이블에 사용된 HTS wire의 갯수 및 길이에 따라 일정한 배수 값으로 설정된다. 초전도 전력케이블의 후미 선로에 고장전류가 발생하게 되면 초전도 전력 케이블에도 고장전류가 흐르게 되고 그 값은 RTDS 아날로그 출력 단을 통해서 출력 되고 출력 된 값은

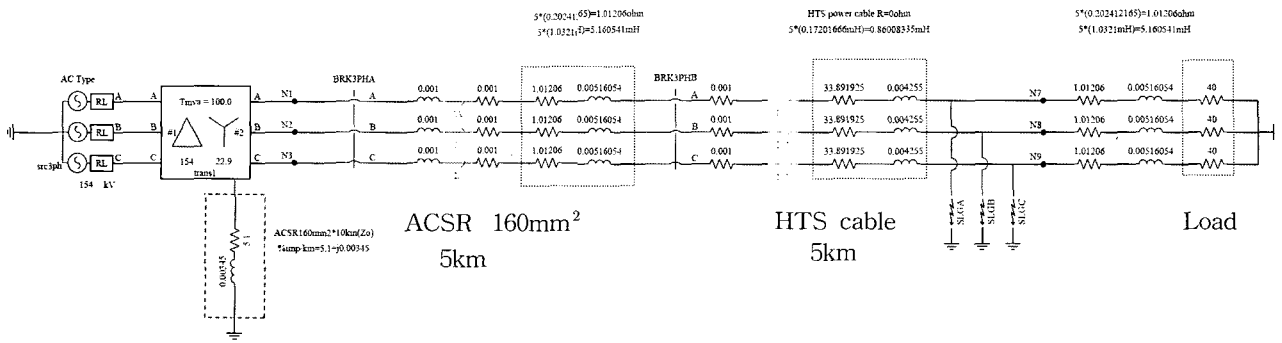


Fig. 4. Simulated 22.9kV class power line in PSCAD/RTDS.

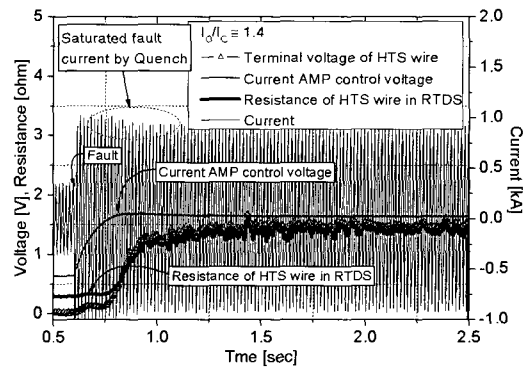
Current Amp를 통해서 일정한 크기로 증폭되어 실제 모델샘플(HTS wire)에 흐르게 된다. 고장전류의 값이 임계전류보다 큰 경우에는 HTS wire에 퀘치가 발생하고 이로 인해 저항 값이 급변하게 되는데, 다시 변환된 저항 값은 RTDS 아날로그 입력을 통해 입력되고 순시 적으로 PSCAD내의 초전도 전력케이블 저항 값으로 계산되어진다. 상기 설명된 내용이 모두 하나의 RTDS 샘플링 시간(50 $\mu$ s)에 이루어지게 되어 실제 시스템과 거의 동일한 동특성 데이터를 확보할 수 있게 된다.

#### 4. 실험결과

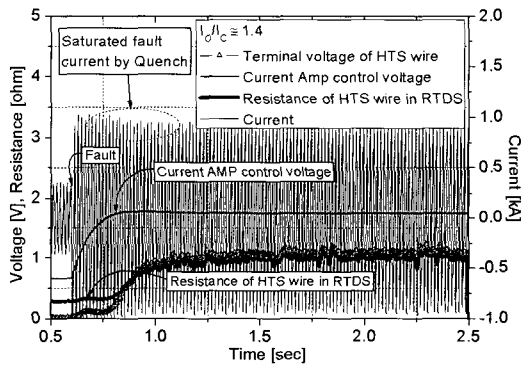
Fig. 4는 22.9[kV]급 배전선로를 PSCAD/RTDS상에서 구현한 모의 선로이다. 이 선로는 전원, 변압기, 차단기, ACSR 160mm<sup>2</sup>선로와 초전도 전력케이블과 부하로 구성되어 있다. 초전도 전력 케이블의 종류에 따라 실제 HTS wire의 임피던스 값을 적용하여 고장 유형에 따라 시뮬레이션 하고 실제 HTS wire를 1선지락 고장에 대해 실험하여 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과를 비교 분석 하였다.

Fig. 5는 RTDS와 각기 다른 HTS wire를 연계하여 1선지락시 실험한 결과이다. RTDS와 전류 앰프를 통해 출력된 전류 값과 RTDS내의 저항, HTS Voltage로 나타내었다. 이때 RTDS와 시뮬레이션 내 전류값과 전류 앰프를 통한 전류값의 비는 45 대 1이다. Fig. 5 (a)의 HTS wire는 정상상태에서 부하조건에 따라 다르나, 본 시뮬레이션에서는 약 50A의 전류가 HTS wire에 통전되고 있고 선로에 사고가 발생하면 162A까지 증가하게 되어, 퀘치가 발생한다. Fig. 5 (b)의 HTS wire는 또한 정상상태에서 50A의 전류가 HTS wire에 통전되고 있고 선로에 사고가 발생하면 173A까지 증가하게 되고 Fig. 5 (c)의 HTS wire의 경우 정상 상태 시 50A의 전류가 HTS wire에 통전되며 선로에 사고 발생시 99A까지 증가하게 된다. HTS wire에서 퀘치 발생으로 RTDS로 피드백 되는 저항이 증가하게 되어 이로 인해 선로 내부 임피던스가 증가하여 선로의 고장전류가 일부 제한되게 된다.

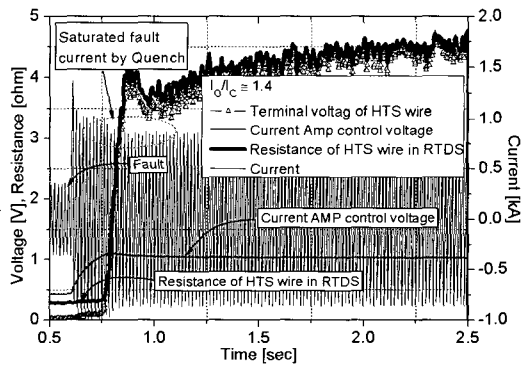
이 결과로 HTS wire중 Bi-2223와 YBCO Coated Conductor를 비교하여 각 선재가 가지는 저항의 특성 그리고 PSCAD/RTDS에서 구현된 모의 선로의 내부 저항의 특성을 확인하였다.



(a) Bi-2223 brass\_stabilizer.



(b) Bi-2223 Sus\_stabilizer.



(c) YBCO Coated Conductor Sus\_stabilizer.

Fig. 5. Simulation result of real HTS wire and RTDS using Fig 1 at fault condition.

Table 2는 RTDS를 이용한 시뮬레이션에 적용된 각 초전도 전력케이블 선로 5km일 때의 저항 값과 인덕턴스 값이다. 이 값을 모의 선로를 이용해 실제 실험에도 사용하였다.

Table 3은 RTDS를 이용한 초전도 전력케이블의 각 구간별 시뮬레이션 결과이다. 초전도 전력케이블의 고장전류 비교를 위해 1선 지락, 선간단락, 3상 단락 3가지의 사고 종류에 따라 고장 계산법에 의한 계산값과 시뮬레이션 결과값을 비교하였다.

Table 2. Resistance and inductance value of the simulated HTS power cable.

HTS wire		L[mH]	R1[mΩ]	R2[mΩ]
Bi-2223	brass(st)	0.004255	68.675	588.75
	Sus(st)	0.004255	191.35	6952.5
Coated Conductor	Sus(st)	0.004255	5950	47250

Table 3. Change of the fault current levels according to the differences of HTS wire used in HTS power cable.

단위: 고장전류[kA]		line-ground fault		line-line fault		three phase short fault	
		R1	R2	R1	R2	R1	R2
Bi-2223	brass(st)	1.2189	1.0857	0.7299	0.6689	0.7402	0.6684
	Sus(st)	1.2112	0.7911	0.7303	0.6533	0.7130	0.6463
Coated Conductor	Sus(st)	1.0842	0.4247	0.6680	0.2420	0.6677	0.2555

Fig. 6은 계통에서 가장 많이 발생하는 1선 지락 사고 발생시 초전도 전력케이블의 각 구간별 시뮬레이션 결과 그래프이며, Fig. 7은 선간단락, Fig. 8은 3상 단락 결과 그래프이다. 대칭좌표법에 의한 계산 결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

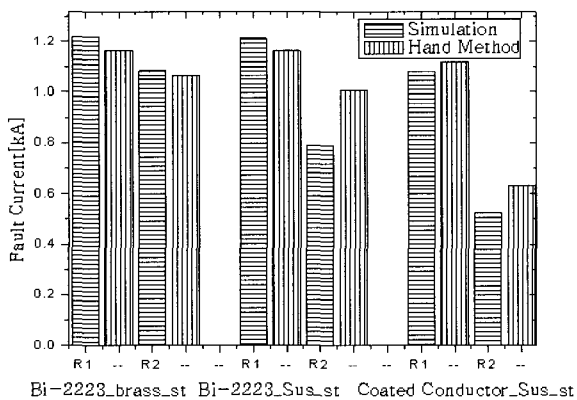


Fig. 6. Comparison of fault current levels between symmetrical components and simulation due to differences of HTS wire at line-ground fault.

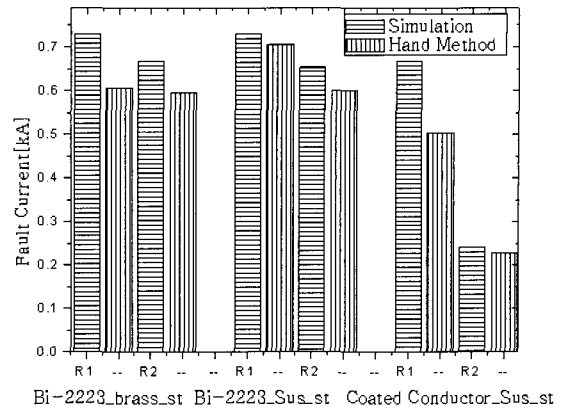


Fig. 7. Comparison of fault current levels between symmetrical components and simulation due to differences of HTS wire at line-line fault.

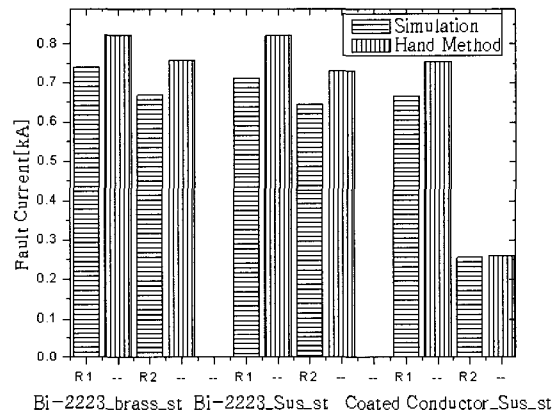


Fig. 8. Comparison of fault current levels between symmetrical components and simulation due to differences of HTS wire at three phase short fault.

### 5. 결론

본 연구를 통해 고온 초전도선 종류에 따른 전력 케이블 사고 발생시 고장전류 값을 RTDS를 이용하여 모의 시뮬레이션 하였다. 초전도 전력케이블은 사고 전류에 의한 켄치 현상으로 비선형적인 저항 특성을 나타내며, 저항이 증가함에 따라 고장전류가 감소하는 것을 알 수 있었다. 그리고 실제 HTS wire와 RTDS의 연계운전 시뮬레이션으로 초전도 전력 케이블의 포화 전류 값이 각각의 사용되는 초전도 선의 종류에 따라 차이를 확인할 수 있었다. 이러한 연계운전 알고리즘 기법 개발로 초전도 전력기에 필수적으로 사용되어야 할 초전도선의 통전전류에 따른 전력기의 동특성 해석을 가능하게 하였다. 그 결과 정상상태 해석에서는 일반적인 대칭좌표법해석과 일치하는 과도해석 결과를 얻었으며 초전도 전력 케이블의 실 계통 투입 전 시뮬레이션 해석이 필요함을 본 실험에서 보여주었다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] 한국전력공사, "2002년 장기 송변전 설비계획", 2002.
- [2] Ladie Pierluigi, Mansoldo Andea, "HTS Cable application studios and technical/economical comparisons with conventional technologies", PES-WM 2002.
- [3] S. Honjo and Y. Takahashi, "Outline of Verification Tests", Cryogenic Eng. In Japan 36, pp. 242, 2001.
- [4] 한국 초전도 저온 공학회, 임계전류, 임계온도 및 회복시간을 고려한 초전도 전력케이블의 EMTDC 모델 컴포넌트 개발, 방종현, 2006.
- [5] Real-Tme Digital Simulator Users Manual, monitoba HVDC Research Centre, 1995.
- [6] 차귀수의, "고온 초전도 변압기 개발", 고온초전도 변압기 개발에 관한 최종 보고서, pp. 167-185, 2001.
- [7] Minwon. Park, et al, "Real Weather Condition Based Simulation of Stand-Along Wind Power Generation System Using RTDS", KIEE International Trans. on EMECS. VO. 4-B NO. 3, pp. 146-252, 2004.
- [8] Minwon Park, et al, "A Nover Real-Time Simulation Technique of photovoltaic Generation System Using RTDS", IEEE Trans. on Energy Conversion. VOL 19, NO. 1, March 2004.
- [9] Jeffery O.Willis, "Superconducting Transmission Cables" IEEE Power Engineering Review, pp. 10-14, 2000.
- [10] Jae-Duk Lee, Minwon Park, In-Keun Yu, "A STUDY ON THE MODELING OF SUPERCONDUCTING FAULT LIMITERS USING EMTDC", IFAC Symposium on Power Plants & Power System Control, Vol. 1, pp. 339-404, 2003.

저자 소개



김재호(金載浩)  
1976년 11월 17일생, 2000년 인제대학교 전자공학과 졸업, 2005년 창원대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사), 2003년 10월~2006년 8월 전기연구원 초전도응용연구그룹 위촉 연구원, 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



박민원(朴敏遠)  
1970년 2월 12일생, 1995년 창원대 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 일본 오사카대학 대학원 전기공학과 졸업(공학석사, 공학박사), 2001년 10월~2004년 8월 한국전기연구원 차세대 초전도응용기술개발사업단 기술팀장, 2004년 9월 현 창원대학교 전기공학과 조교수.



조전욱(趙全旭)  
1960년 3월 2일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1990년~현 한국전기연구원 초전도응용 연구그룹 책임연구원.



심기덕(沈基德)  
1973년 2월 1일생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도 응용연구그룹 선임연구원.



유인근(劉仁根)  
1954년 2월 18일생, 1981년 동국대학교 졸업, 1983년 한양대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년 6월~1988년 2월 한국 전기연구원선임 연구원(지중송전연구실장), 1988년 3월~현재 창원대학교 전기공학과 교수.