

## 초전도 전력케이블의 전력계통 적용을 위한 고장전류 특성에 관한 연구

김재호, 박민원, 심기덕\*, 조전욱\*, 유인근  
 창원대학교 전기공학 전문전공, 한국전기연구원

### A Study on the Fault Current Characteristics for the Utility Application of HTS Power cable

Jae-Ho Kim, Minwon Park, Ki-Deok Sim\*, Jeonwook Cho\*, In-Keun Yu  
 Dept. of Electrical Engineering Changwon National University, Korea Electrotechnology Research Institute\*

**Abstract** - Several kinds of High Temperature Superconducting(HTS) power cables have already been developed and evaluated for use in the utility power network. HTS power cable is expected to be used as a very powerful energy delivery system supplying electric power for densely populated cities in the near future, because HTS power cable is capable of the high current density delivery with low AC loss and the size effect comparing with the conventional cable whose capacity is same. Before applying the HTS power cable to real utility network system analysis should be carried out by some simulation tools. Hereby the electrical power system analysis is very important for the practical use of HTS power devices.

In this paper, authors propose a real-time simulation method which incorporates a real HTS tapes into the simulated 22.9kV utility power network system using Real Time Digital Simulator(RTDS). For the simulation analysis, a test sample of HTS tapes was actually manufactured, and the transient phenomenon of HTS power cable system was analyzed in the simulated utility power network.

#### 1. 서 론

국내의 전력계통 설비용량은 전력수요의 비약적인 증가로 인해 규모가 대형화되고 있다. 정부에서 발표한 제 3차 전력수급 기본계획에 따르면 최대 전력 수요는 5967만 8000kW에 이르고, 총 설비용량은 69만 2000kW를 기록하는 등 설비 예비율이 10.1%대를 유지할 것으로 예상되고 있다[1]. 이에 따라 지중선로와 변전소 건설이 필요하며 추가적으로 발생하는 문제점으로는 도심 교통난과 과다한 건설비용 및 환경적 측면의 제약이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 다양한 방안 중 고온초전도 전력케이블의 도입은 다양한 기술적 대안 중에서 친 환경적, 경제적, 기술적 관점에서 유력한 대안중의 하나로 평가 받고 있다[2].

초전도 전력케이블을 실 계통에 투입하기 전에는 반드시 사전 시뮬레이션 해석이 먼저 선행되어야 하는데, 초전도 전력케이블은 정상전류 상태에서는 전기 저항이 없지만, 고장전류에 의한 쿼츠발생 시에는 저항 값이 크게 변화하는 특징이 있다. 이에 저자들은 PSCAD/RTDS를 이용하여 초전도 전력케이블의 계통적용 알고리즘을 개발하였으며, 동특성 모델을 제작하여 해석을 실시하였다[3].

본 연구에서는 초전도 전력케이블에 사용되고 전기적 특성이 가장 결정적인 영향을 주는 초전도선을 직접 시뮬레이션 내에 삽입하여 초전도 전력케이블의 후미 선로에 고장이 발생 되었을 때 전력계통 적용 동특성 결과를 시뮬레이션을 통해 확인 하였다.

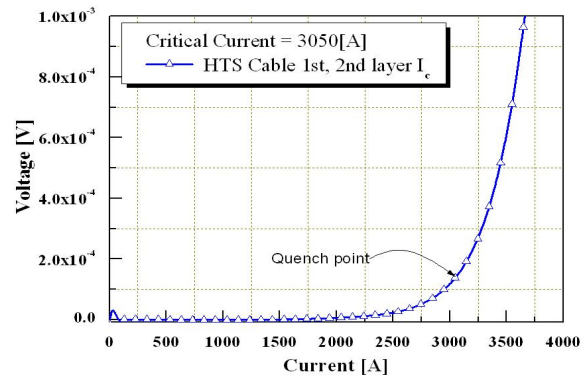
#### 2. 시스템 구성 및 시뮬레이션 방법

##### 2.1 초전도 선의 특성

<표 1> 실험에 사용된 Bi-2223 HTS wire

Maker	Critical current[A] (1 $\mu$ V/Cm, 77K)	Dimension[mm] (width <thickness)< th=""> <th>Sheath</th> </thickness)<>	Sheath
AMSC	115.2	4.2 $\times$ 0.37	Ag-alloy (Cu-Zn Laminated)

표 1의 초전도선을 이용하여 실험 Sample을 제작하였다. Sample의 전체 길이는 300mm이고, 전압탭간 거리는 200mm이다. 실험에 사용된 고온초전도선은 Powder-in-tube의 공정으로



<그림 1> 초전도 전력케이블의 임계전류 특성

제작되었으며, 과전류에 의한 선로의 단선보호, 기계적 강도 향상등의 목적으로 초전도선의 양면에 Cu-Zn 합금의 wire가 적층 되어있다.

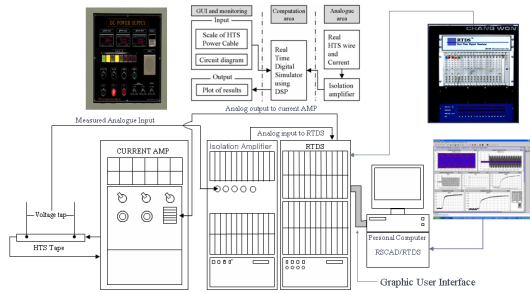
##### 2.2 RTDS와 초전도 선의 연계 방법

RTDS는 전력시스템의 전자기적 과도현상을 모의하기위한 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 GUI키편트들의 조합으로 만들어진다. 사용자는 RSCAD 소프트웨어를 사용하여 RTDS를 구동시키고 입력 및 출력을 제어할 수 있다. 또한 RSCAD 상에서 설계하고자 하는 시스템 선로를 작성하고 시뮬레이션 조건과 원하는 출력 값의 범위를 설정할 수 있다. RTDS가 다른 시뮬레이터와 다른 점은 실시간으로 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 수 있다.

그림 1은 한국전기연구원과 LS전선에서 공동으로 개발한 초전도 전력케이블의 임계전류 그래프이다. 그림에서와 같이 임계전류 이하에서 저항은 "0" 이다. 하지만, 임계전류 이상에서는 비선형적으로 증가하는 저항 특성을 나타낸다. 본 논문에서는 RTDS와 초전도선의 연계 시뮬레이션을 위하여 RSCAD를 이용하여 계통을 구성한 후 초전도선의 전압을 피드백 받아 계산된 저항 값을 초전도 전력케이블의 용량으로 증가한 후 계통의 가변저항으로 입력 하였다. 이에 따라 초전도 전력케이블 용량에 따른 다양한 조건에서의 시뮬레이션이 가능하게 되었다.

##### 2.3 시스템 구성

그림 2는 시뮬레이션 시스템의 전체 구성을 나타내고 있다. 선로 및 제어 회로의 구성, 키편트, 시퀀스, 시뮬레이션의 실행은 Personal Computer 부분에서 담당하고 실시간 시뮬레이션을 위한 계산은 RTDS에서 이루어 진다. Optic Isolation Rack은 RTDS와 외부 입력 및 출력 신호의 전기적인 절연을 목적으로 사용되며, Current Amp는 RTDS통해 실시간으로 출력되는 시뮬레이션 내의 가상 전류를 실제 값의 크기만큼 증폭시켜 주어 초전도선에 전류 통전을 시켜준다.



<그림 2> 시뮬레이션 시스템의 하드웨어 구성

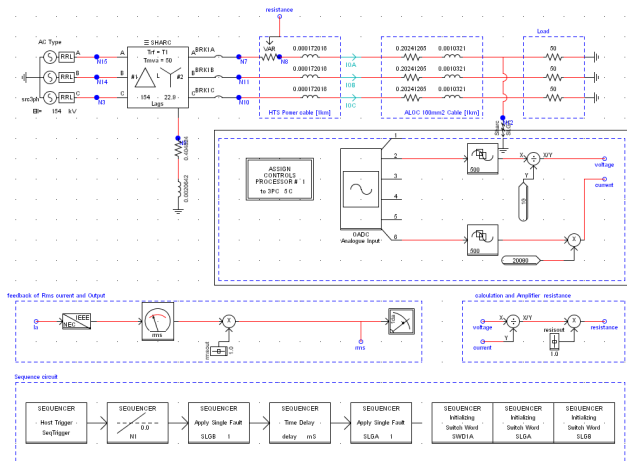
전체 시스템의 흐름은 개발된 알고리즘에 의해 폐루프로 운전 된다[3]. RTDS와 Current Amp, 초전도선의 연계운전 알고리즘 구현을 위해 RSCAD 상에서 초전도선의 전압을 피드백 받아 Current Amp의 출력을 제어하는 선로 및 회로를 구성하였다. 그리고 Personal Computer를 통해 RTDS와 연결하였으며, RTDS의 Digital Signal Processor(DSP)를 통해 실시간 시뮬레이션의 계산이 수행 된다.

기존에 개발된 초전도 전력기기의 계통적용을 위한 실시간 시뮬레이션 기법[3]은 Workstation 기반의 PSCAD를 사용하였으며 초전도선의 V-I 그래프에서 방정식을 유도하여 PSCAD 내부 전력계통 선로의 가변저항 Component를 구현 하였으나, 초전도선의 종류와 통전용량이 달라짐에 따라 방정식을 다시 유도하여 선로의 가변저항 Component를 구현해야 되는 단점이 있었다. 하지만 Personal Computer 기반의 RSCAD로 Upgrade 되면서 가변저항 Component가 기본적으로 제공되어 초전도선에 통전 되는 전류와 전압을 입력받아 계산된 저항값을 가변저항 Component에 입력함으로써 모든 종류의 초전도선과 용량에 관계없이 시뮬레이션이 가능하게 되었다.

실시간 시뮬레이션에 입력 및 출력 되는 전기적인 신호는 SCXI (Signal Conditioner)에서 측정하였으며, LabVIEW 프로그램 사용하였다.

<표 2> RSCAD/RTDS에서 시뮬레이션된 22.9kV급 Power system

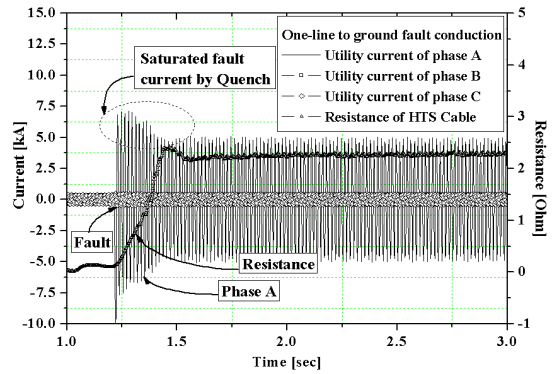
Voltage class	22.9[kV]
Transformer	60[MVA] ( $\Delta$ -Y), 154[kV]/22.9[kV]
Overhead line	ALOC 160mm <sup>2</sup> 1km
HTS Power line	HTS Power Cable 1km
Rated current	1.512 [kA]
Rated impedance	8.74 [ohm]



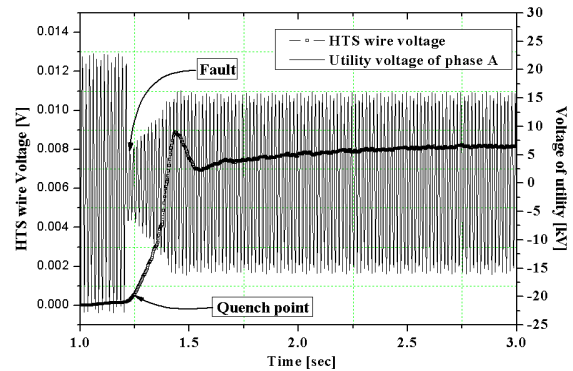
<그림 3> RTDS의 RSCAD에서 구현된 22.9kV급 전력 시스템 모델 및 control circuit

### 3. 시뮬레이션 결과

그림 3은 시뮬레이션을 위해 표 2의 Parameter를 이용하여 RSCAD에서 전력 시스템 모델을 구성하고 주변장치를 제어하기 위한 회로도 이다.



(a) 계통의 전류 및 초전도 케이블의 저항 변화



(b) 계통의 전압 및 초전도선의 전압 변화

<그림 4> 1선지락 고장 발생시 시뮬레이션 결과

그림 4는 RTDS와 초전도선을 연계하여 1선 지락고장 발생시 실험결과이다. 고장이 발생하면 선로에 흐르는 전류는 증가하고 전압은 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 4(a)는 켄치에 의해 비선형적으로 증가한 저항에 의해 선로의 고장전류가 제한되는 것을 확인 하였으며, 3상 대칭좌표법을 이용한 계산결과(7.76[kA])와  $\pm 5\%$  이내에서 일치하였다. 그림 4(b)는 선로에 고장발생시 전압 변화 그래프이다.

## 4. 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 초전도선과 RTDS의 연계운전 시뮬레이션으로 초전도 전력 케이블의 포화 전류값을 확인할 수 있었으며, 3상 대칭좌표법에 의한 계산 결과와 초기 고장 전류값이  $\pm 5\%$  이내에서 일치 하는것을 확인 하였다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다

## [참 고 문 헌]

- [1] 제 3차 전력수급 기본계획서, 산업자원부, 2006
- [2] Ladie Pierluigi, Mansoldo Andea, "HTS Cable application studios and technical/economical comparisons with conventional technologies", PES-WM, 2002
- [3] 김재호, "초전도 전력기기의 계통적용을 위한 실시간 시뮬레이션 기법 개발", vol 19, no. 11, 전기전자재료학회 2006
- [4] 한국전력공사, "2002년 장기 송변전 설비계획", 2002
- [5] S. Honjo and Y. Takahashi, "Outline of Verificati on Tests",Cryogenic Eng. In Japan 36, pp242, 2001
- [6] 방중현, "한국 초전도 저온 공학회, 임계전류, 임계온도 및 회복시간을 고려한 초전도 전력케이블의 EMTDC 모델 컴포넌트 개발", 한국초전도 저온공학회 2006