

초전도 전력케이블의 계통 적용을 위한 보호계전기의 동작특성 분석

김재호*, 김진근*, 심기덕**, 조전욱**, 이승렬**, 윤재영**, 박민원*, 유인근*
 창원대학교*, 한국전기연구원**

Operational characteristics analysis of protective relay for utility application of HTS power cable

Jae-Ho Kim*, Jin-Geun Kim*, Ki-Deok Sim**, Jeonwook Cho**, Jae-Young Yoon**, Seung Ryul Lee**, Minwon Park*, In-Keun Yu*
 Dept. of Electrical Engineering Changwon National University*, Korea Electrotechnology Research Institute**

Abstract - Recently, several kinds of superconductivity applications are implemented and evaluated in the utility power networks. The protection system for HTS(High Temperature Superconducting) power devices safe operation has not been established yet. For the protection of the HTS apparatus, a better understanding of the quench properties against fault current and appropriate protection devices are required.

In this study, an algorithm of protection system is developed with respect to HTS power cable. The protection system of HTS power cable was analyzed in the simulated power system. Results obtained from simulation will provide much more decisive data in order to design a certain superconducting power device, and can give a good information for the installation in power system.

1. 서 론

1980년대 고온초전도체가 발견된 이후 대용량 송전이 가능한 고온초전도 전력케이블 개발을 위해서 미국, 일본 등의 선진국을 중심으로 많은 투자와 연구가 진행되어 왔으며, 전 세계적으로 실 계통 투입 및 장기운전 중에 있다. 한국의 경우 21세기 프론티어 사업의 일환으로 한국전기연구원 및 LS전선에서 개발 완료한 22.9kV/50MVA, 3상 100m 고온 초전도 전력케이블은 현재 전북 고창 한전실증시험장에 설치되어 장기운전 실험과 국제 공인 실험을 완료한 상태이다[1]. 하지만, 초전도 전력케이블을 실 계통에 투입하기 이전에 반드시 사전 시뮬레이션 해석이 먼저 선행되어야 하는 몇가지 연구내용들이 있다. 초전도 전력케이블은 정상전류 상태에서는 전기 저항이 없지만, 고장전류에 의한 쿼치발생시에는 저항 값이 크게 변화하는 특성이 있다. 이에 저자들은 RSCAD/RTDS를 이용하여 초전도 전력케이블의 계통적용 알고리즘을 개발하였으며, 동특성 모델을 제작하여 특성 해석을 실시하였다[2].

본 연구에서는 초전도 전력케이블에 사용되고 전기적 특성에 가장 결정적인 영향을 주는 초전도선을 이용하여 미니모델 초전도 전력케이블을 제작하였으며, 이를 직접 시뮬레이션 내에 삽입하였다. 그리고 현재 계통에서 적용되고 있는 기본적인 제페로 및 보호계전기의 동작 시간을 고려하여 초전도 전력케이블의 후미 선로에 고장이 발생 되었을 때 전력계통 적용 동특성 결과를 시뮬레이션을 통해 확인 하였다. 그리고 초전도 전력케이블의 전기적 특성을 이용하여 RSCAD에서 모델링 하였으며, 실제 배전급에서 사용되는 보호계전기와 연계하여 고장조건에 따른 동작특성을 해석하였다.

2. 시뮬레이션 방법 및 하드웨어 구성

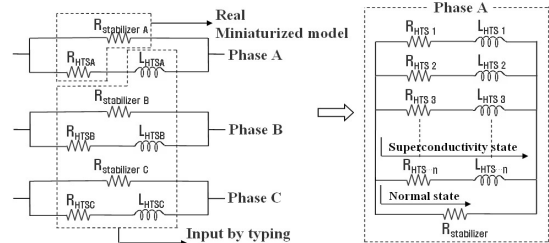
2.1 제페로 및 보호계전기의 동작 시간

현재 송전 및 배전 시스템에서 발생하는 고장중 70~95%가 1선지락 고장이고, 1선지락 고장의 70~90%는 아크고장이다. 아크고장은 일정시간동안 무 전압으로 두면 자연 소거되는 고장으로, 이 경우 자동 제페로를 도입함으로써 계통의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 자동 제페로는 선로의 고장 검출에 의해 선로가 차단되었을 때 일정한 시간이 지나고 정해진 조건이 만족할 때 차단기를 재투입하는 방법이다. 22.9kV급 배전 선로에서 고장제거를 위한 제페로 시퀀스는 총 2회 이상 동작을 함에 있어서 순시동작이나 한시동작을 1회 이상 해야 된다. 국내에서 시행되고 있는 전형적인 자동 제페로 시퀀스는 2회의 순시동작과 1회의 한시동작의 시퀀스로 구성되어 있다. 순시동작은 일시적 고장의 빠른 해소를 위해 선택되어지며, 특히 설비피해 및 퓨즈 동작전에 사고를 제거하기 위한 것으로 국내의 경우 3~5[cycle] 정도에 동작하게 된다. 만일 사고가 순시동작 이후에도 제거되지 않으면 영구 사고로 판단되어, 국소지역으로 영구정전을 제한하기 위해서 지선상의 퓨즈나 구분 개폐기가 동작하도록 시간지연특성을 전달하도록 한시동작을 한다. 제페로 지연시간은 1회때는 0.5초, 2회때는 15초로 셋팅되어진다.

2.2 시뮬레이션 방법

그림 1은 초전도 전력케이블의 설드층을 포함하지 않은 회로이다. 시뮬레이션내에 입력되는 파라미터는 초전도 전력케이블의 저항값을 제외하고 직접 입력해서 설정하도록 구성되어 있다. 초전도 전력케이블의 저항값은 미니모델 초전도 전력케이블에서 RTDS의 아날로그 입력 포트를 통해 실시간 직접 입력되어 진다. 그리고 초전도 전력케이블의 전기적 특성은 초전도선의 종류에 따라 결정되어 진다.

본 논문에서는 미니모델 초전도 전력케이블의 저항값을 실제 초전도 전력케이블의 저항값으로 변환하기 위해 수식 (1), (2), (3), (4)를 이용하였다.



<그림 1> 초전도 전력케이블의 회로

$$N_{HTS_wire} = \frac{I_{C_HTS_cable}}{I_{C_m_HTS_cable}} \tag{1}$$

$$I_f = \frac{I_a}{N_{HTS_wire}} \tag{2}$$

$$R_{so} = \frac{1}{\frac{1}{R_{HTS1}} + \frac{1}{R_{HTS2}} + \dots + \frac{1}{R_{HTS-n}}} \tag{3}$$

$$R_{no} = \frac{R_{so} \times R_s}{R_{so} + R_s} \tag{4}$$

N_{HTS_wire} 는 초전도선의 개수, $I_{C_HTS_cable}$ 는 초전도 전력케이블의 임계전류, $I_{C_m_HTS_cable}$ 는 미니모델 초전도 전력케이블의 임계전류, I_f 는 미니모델 초전도 전력케이블에 흐르는 전류, I_a 는 계통에 흐르는 전류, R_{so} 는 초전도 상태에서 초전도 전력케이블의 저항, R_{HTS-n} 는 초전도선의 저항, R_{no} 는 정상상태에서 초전도 전력케이블의 저항, R_s 는 안정화계의 저항이다. 초전도 전력케이블에 사용된 초전도선의 개수는 수식 (1)에 의해 결정되며, 미니모델 초전도 전력케이블에 흐르는 전류는 수식 (2)에 의해 결정된다. 그리고 초전도 상태에서의 전체 저항은 수식 (3), 고장 상태에서의 전체 저항은 수식 (4)에 의해 결정된다.

2.3 하드웨어 구성

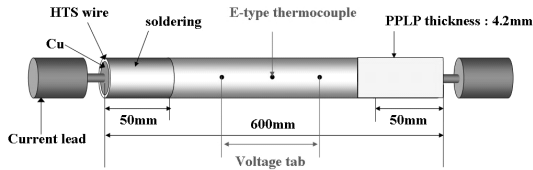
표 1은 실험에 사용되어진 Bi-2223 고온초전도선, YBCO 고온초전도선의 특성을 나타내었다.

<표 1> 고온초전도선의 특성

Type	Critical current [A], 77K	Stabilizer	Dimension (width x thickness)
Bi-2223 HTS Tape	Type 1 : 116	Brass	4.4mm x 0.33mm
	Type 2 : 118	Sus	4.4mm x 0.32mm
	Type 3 : 84	Non	4.4mm x 0.22mm
YBCO HTS Tape	Type 4 : 73	Copper	4.4mm x 0.20mm
	Type 5 : 78	Copper	4.28mm x 0.098mm

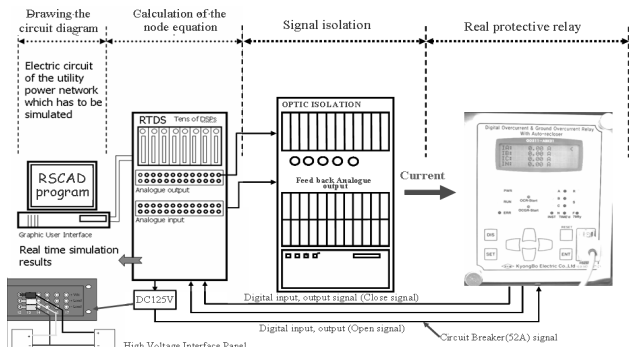
그림 2는 RTDS와 연결하여 초전도 전력케이블의 특성을 시뮬레이터에 입력하기위해 초전도선과 절연층을 가지는 미니모델 초전도 전력케이블의 구성도를 나타내고 있다. 절연층은 실제 초전도 전력케이블과 동

일한 4.2mm가 권선되어 있으며, 이는 실제 초전도 전력케이블과 열적으로 동일한 환경에서 실험 조건을 재구성 하기 위해서 이다. 그리고 구리 안정화제도 실제 초전도 전력케이블과 동일한 비율로 구성되어 있으며, 초전도선의 온도변화 측정을 위해 E-type 열전점을 사용하였다. 실험은 액체질소 환경에서 이루어 졌으며 모든 데이터는 SCXI를 이용하여 측정하였다.



〈그림 2〉 초전도 전력케이블의 미니모델

그림 3은 실제 보호계전기를 연계한 시스템 구성도 이다. 전체 시스템의 흐름은 개발된 알고리즘에 의해 페루프로 운전된다[2]. RTDS와 보호계전기의 연계운전 알고리즘 구현을 위해 RSCAD에 구성된 계통의 전류를 피드백 받아 보호계전기의 CT에 입력하였다.

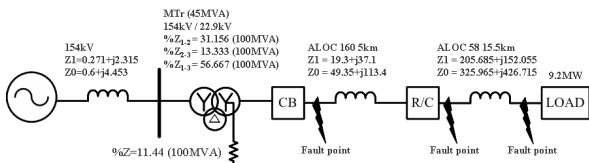


〈그림 3〉 보호계전기 연계 실험 구성도

표 2는 시뮬레이션에 사용된 선로의 보호계전기 정정표이다. 그림 4는 RSCAD에서 구현된 22.9kV급 전력시스템의 파라미터이며, 실 계통의 임피던스를 기준으로 구성하였다. 모델링된 초전도 전력케이블의 적용 위치는 CB (Circuit Breaker) 후단의 ALOC 160 5km를 대체하여 구성하였다. 시뮬레이션은 그림 4의 전력시스템에서 초전도 전력케이블 적용 전·후 고장시간 (0.2sec, 1.5sec), 1선지락 및 3상단락 고장발생시 보호계전기의 동작특성을 비교 분석 하였다.

〈표 2〉 보호계전기 정정표

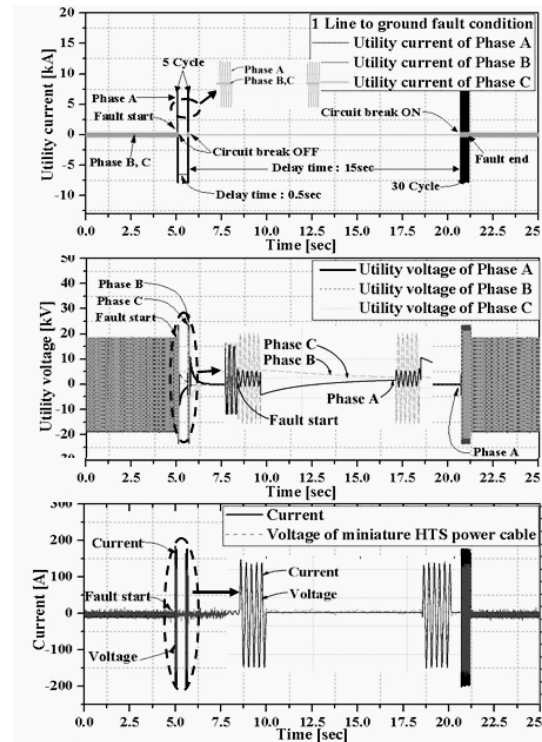
계전기명	형식	Time (한시)				INST (순시)				CT비
		Curve	Pickup	Time Dial	Ext.Blk	Curve	DT Time	Pickup	Ext.Blk	
OCR	GD311-ABK01	KVI	5.0	3.2	No	DT	0.04	40	YES	400/5
OCGR	GD311-ABK01	KVI	1.0	3.3	No	DT	0.04	10	YES	
Auto Reclose		Shots	2	close Pul	Fail Pul	Free Time	Disc Time	Recl Time	1st Time	2nd Time
Reclose	GD311-ABK01		2	2.0	60	60	2	180	0.5	15



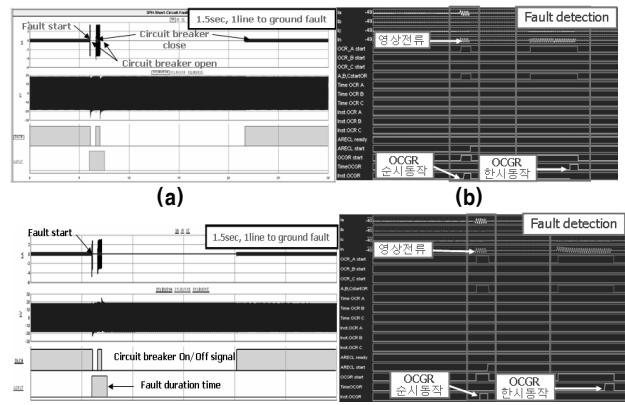
〈그림 4〉 RSCAD에서 구현된 22.9kV급 전력시스템 파라미터

3. 분석결과

그림 5는 A상에 1선지락 고장 발생시 재페로 시퀀스를 고려한 Type 2 Bi-2223 고온초전도선의 시뮬레이션 결과이며, 재페로 시간동안 미니모델 초전도 전력케이블의 온도상승은 1K 이내이다. 그 이유는 초전도 전력케이블에 통전되는 고장전류의 시간이 5~15cycle로 짧으며, 이로 인해 미니모델 초전도 전력케이블의 쿨링 회복시간이 빨라졌기 때문이다. 그림 6은 실제 모델링된 초전도 전력케이블과 실제 보호계전기의 연계 실험결과이다. 그림 6(a), (b)는 기존 전력케이블, (c), (d)는 초전도 전력케이블 적용 후 1선지락 고장 발생시 시뮬레이션 결과이다. 그림 6(a), (c)는 RSCAD의 RunTime의 결과이고 그림 6(b), (d)는 보호계전기의 동작 결과이다. 기존 전력케이블 적용시 보호계전기의 동작과 초전도 전력케이블 적용시 보호계전기의 동작 결과는 일치하는 것을 확인 하였다.



〈그림 5〉 Type 2 초전도선을 이용한 재페로 동작시 시뮬레이션 결과



〈그림 6〉 R/C단 1선지락 고장 발생시 보호계전기 연계 실험 결과, (a),(b) 기존 전력케이블일 경우 (c),(d) 초전도 전력케이블일 경우

4. 결론

RTDS를 이용하여 전력계통에서 재페로 특성을 고려한 초전도 전력케이블의 고장전류 특성 및 모델링된 초전도 전력케이블과 실제 보호계전기를 연계하여 특성을 분석하였다. 본 시뮬레이션에서는 초전도 전력케이블과 동일한 저항특성을 가지는 모델 초전도 전력케이블을 제작하여 적용하였으며, 실제 배전선로에 적용되는 보호계전기의 알고리즘을 적용하였다. 본 연구를 통해 초전도 전력케이블 계통 투입시 기존 재페로 및 보호계전기 알고리즘 적용에 큰 문제가 없는 것을 확인하였으며, 선로의 길이 및 초전도선의 전기적 특성이 상이한 경우에는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술 개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

[참고 문헌]

[1] Jeonwook Cho, "Development of a single-phase 30 m HTS power cable", Cryogenics, vol. 46, no. 5, p. 333-337, May 2006.
 [2] J.H.Kim, M.Park, A.R.Kim, J.Cho, K.D.Sim, I.K.Yu, "A Novel Real-Time Simulation Method of the Utility Power Network including the HTS Power Cable", Physica C 463-465, p. 1163-1167, 2007.