

22.9kV 초전도 케이블 실계통 적용을 위한 절연협조 검토

양병모* 강지원*, 강연욱*, 박진우*, 조흥상*, 김태훈*, 정창호**
 한국전력공사 전력연구원*, PTS**

Insulation Coordination on 22.9kV HTS Power Cable for Applying to Real Grid

B.M Yang*, J.W Kang*, Y.W Kang*, J.W Park*, T.H Kim*, C.H Jung**
 KEPCO KEPRI*, PTS**

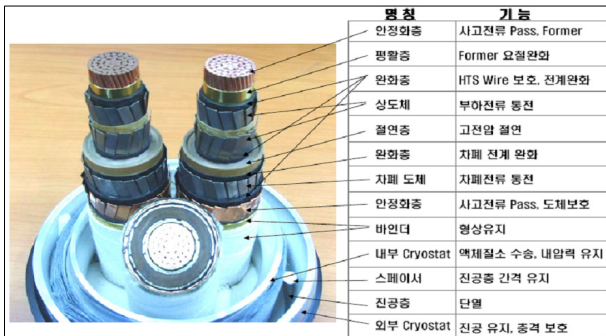
Abstract - 초전도 케이블을 실계통에 연계한 계통이 운용되고 있으므로 인해 많은 계통 과도현상의 모델링이 필요하다. 초전도 전력기기의 특성을 고려한 계통영향 분석을 통해 향후 초전도 기기의 확대 보급을 위한 적용기술 기반 확보가 필요하다. 그래서 본 논문에서는 초전도케이블의 실계통 적용을 위해서 이천변전소에 시범 적용된 초전도케이블 계통을 대상으로 전력계통의 뇌격 침입에 의한 계통의 과전압 현상을 파악하기 위한 전력계통 모델링 및 계통모의를 실시하였다. 최근 낙뢰로 인한 전력계통의 고장율도 증대되고 이로 인한 피해도 증가되고 있어, 향후 실계통 적용될 초전도 전력기기에 대한 과전압 특성에 대한 기술적 분석은 반드시 요구되고 있다.

1. 서 론

최근 초전도 전력기기 시범사업으로 이천변전소가 선정되어 초전도 기기로서 초전도 케이블과 초전도 한류기가 설치되어 운영 예정에 있다. 전압레벨은 22.9kV로서 50MVA 용량으로 설계되어 있으며 향후 확대 보급을 위한 적절용량 설계 및 후보지 선정에 기술적 검토를 진행하고 있어 현재 설치 운영예정인 이천변전소의 초전도 케이블의 운영실적과 기술적 분석을 다양한 분야에 걸쳐 실시하고 있다. 따라서 본 논문에서는 이천변전소의 22.9kV급 50MVA 용량의 초전도 케이블을 대상으로 전력계통 절연설계를 위한 과도 과전압 모의와 BIL(Basic Insulation Level)을 계산하였다. 22.9kV 급의 절연설계는 일반적으로 규격화된 피뢰기 설치외에 별다른 상세한 해석모의를 실시하지 않지는 않지만 본 논문에서는 기존 전력케이블의 특성과 상이한 특성을 가진 초전도기기를 대상으로 하였기 때문에 해석방법과 모델링에 대한 추가적인 기술적 분석이 필요할 것으로 생각되어 검토하였다. BIL 계산은 IEC 60071-1 규정에 의해 계산한 결과이며 모의는 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하였다.

2. 본 론

이천 초전도시범사업에 적용되고 있는 초전도 케이블은 그 구조가 일반 케이블의 구조와는 상이한 구조로 되어 있으며 고장전류가 통과하는 Former만을 고려하면 기존 케이블과 유사한 구조로 되으나, 이 Former를 중심으로 그 주위에 초전도체(2G HTS wire, YBCO)가 감싸고 있으며 차폐도층에도 같은 제질의 초전도체가 사용되어 있고 각 도체와 차폐부분의 초전도체에 냉각된 액체질소가 유입되어 케이블의 초전도성을 유지할 수 있는 극저온 저온냉각장치(Cryostat)가 설치되어 외부로 전자기장이 거의 유도되지 않는 친환경 구조이다. 그림 1은 이천변전소에 설치된 22.9kV 50MVA 3상 일괄형 초전도 케이블 구조이다.



〈그림 1〉 22.9kV 50MVA 초전도 케이블의 구조 (3상 일괄형)

2.1 BIL(Basic Insulation Level) 계산

BIL은 전력계통의 절연계급으로서 전압레벨과 전력기기의 종류에 따라서 분류되어 있다. 현재 한전에서 배전계통에 운용하고 있는 절연협조를 위한 절연강도는 개폐장치, CT,PT 그리고 변압기가 150kV로 설계되어 있다. IEC(60071-1)에는 전력기기별로 절연설계를 위한 가이드라인이 제시되어 있는데 총 4단계에 걸쳐 계산이 이루어져 있다. 계통내 과도 과전압은 상용주파 과전압(TOV)과 개폐서지 과전압(Slow-Front Overvoltage) 그리고 뇌서지 과전압(Fast-Front Overvoltage)으로 분류할 수 있으며 본 논문에서 BIL계산은 상용주파, 개폐서지, 뇌서지에 대해 실시하였고 계통모의는 뇌서지에 의한 과전압이 가장 크기 때문에 뇌서지 과전압(FFO)에 대해서만 실시하였다. 아래 표 1은 IEC의 계산과정에 따른 BIL계산결과이다. IEC 계산과정은 일반적인 전력계통 기기를 대상으로 한 절연계급 계산으로서 초전도기기의 특성은 고려되지 않은 것이다. 계산결과에서 Internal insulation은 기기의 내부절연으로서 변압기의 경우 권선을 의미하며 케이블의 경우 케이블 절연체를 의미한다. 또한 External insulation은 변압기 및 케이블의 경우 부상의 절연계급을 의미한다. 표 1의 BIL 계산결과에서 보듯이 뇌서지의 경우 외부절연으로 약 110kV의 절연강도가 필요함을 알 수 있다. Urw(s), Urw(c)는 IEC의 계산과정에서 사용된 변수로서 계산결과에서 큰 값을 사용한다.

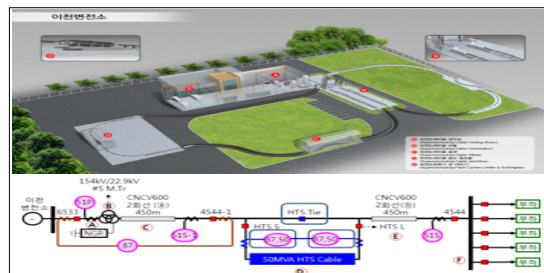
〈표 1〉 22.9kV 배전선로 BIL 계산결과

Withstand Overvoltage Type		External insulation		Internal insulation	
		Urw(s)	Urw(c)	Urw(s)	Urw(c)
Power frequency (kVrms)	phase to earth	20.95	33.29	21.58	26.59
Switching impulse (kVPeak)	phase to earth	54.9	-	53.18	-
Lightning impulse (kVPeak)	phase to earth	109.09	71.37	105.68	58.5

현재 이천변전소에 설계된 초전도기기의 절연강도는 150kV로서 BIL 계산결과는 설계값을 초과하지 않는 약 0.73pu로서 약 27%의 마진을 가지고 있음을 알 수 있다.

2.2 22.9kV 초전도케이블 뇌서지 과전압 모의

뇌서지에 의한 과전압 모의는 그림 2에서 보듯이 이천 초전도시범사업관련 실계통 적용된 22.9kV 50MVA 초전도 케이블을 대상으로 하였으며, 사용된 프로그램은 PSCAD/EMTDC 으로서 각 기기의 모델링은 IEC(60071-4)에서 제시한 방법에 따라 실시되었다.



〈그림 2〉 이천변전소의 22.9kV 초전도 케이블 설치 구성

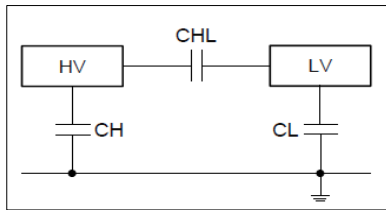
절연협조를 위한 IEC 가이드에 의하면 상용주파 과전압(TOV), 개폐서지 과전압(SFO), 뇌서지 과전압(FFO)에 따라 전력기기의 모델링 방법이 기기별로 표준으로 추천되어 있으며 이 가이드에 따라 모델링된 기기는 다음과 같다.

2.2.1 변압기

뇌서지 과전압(FFO) 해석을 위해 변압기는 커패시턴스로서 모델링된다. 뇌서지가 주입되었을 경우 변압기 임피던스는 상당히 큰 값이 되며 서지전류는 커패시턴스를 통해 흐르게 된다. 변압기의 커패시턴스는 그림 3에서 보듯이 고압측과 저압측 그리고 고-저압측로 분류된다. 시뮬레이션에서 사용된 변압기 커패시턴스 값은 동종의 변압기에서 실측한 값을 사용하였으며, 경우에 따라서 실측한 값이 없는 경우 IEEE 추천한 값을 사용하기도 한다.

2.2.2 케이블

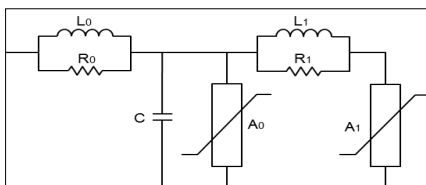
일반케이블과 초전도 케이블이 연계된 계통이므로 각각 주파수 의존모델을 사용하여 이천 초전도시험사업과 관련된 실제 이천 변전소 구조의 특성을 반영하였으며 초전도케이블의 경우 각 층별 Former층, 초전도층, 차폐층, 안정화층이 각각 모의되었다. 이천 변전소의 GIS와 Busduct의 경우 일반적으로 아주 짧기 때문에 반사파가 고려되지 않은 Bergeron 모델을 사용할 수도 있지만, 본 논문에서는 GIS 및 Busduct의 특성은 고려하지 않았다. 배전 부하선로의 경우 서지임피던스 300[Ohm]으로 축약하였다.



〈그림 3〉 이천변전소 변압기 서지해석 축약 모델링

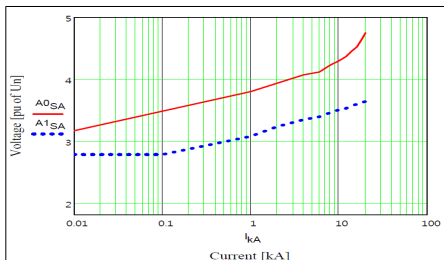
2.2.3 피뢰기 및 뒤편서지

피뢰기의 경우 IEC 가이드라인에 의하면 뇌서지 과전압(FFO) 모의를 위해서 IEEE WG 3.4.11에 의한 모의방법을 추천하고 있다. IEEE WG 3.4.11에 의하면 뇌서지 분석을 위한 피뢰기 모의를 비선형저항 2개를(A0, A1)이용한 방법을 제시하고 있으며(그림 4 참조) 각 파라미터 계산방법도 제시되어 있다. 계산결과와 V-I 특성은 그림 5와 같으며 뇌서지는 8/20us 레벨로 직격뢰를 상정하였다.



〈그림 4〉 IEEE 피뢰기 서지해석 축약 모델링

R_0 : 64.1[ohm], L_0 : 0.128[uH],
 R_1 : 41.7[ohm], L_1 : 9.615[uH], C : 156[pF]

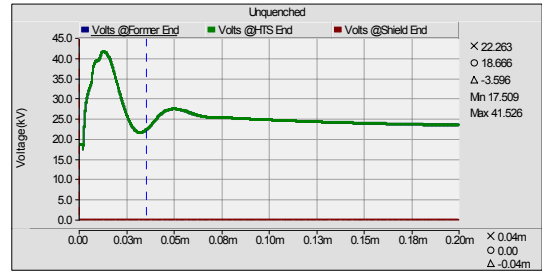


〈그림 5〉 축약된 피뢰기의 V-I 특성(IEEE WG. 3.4.11)

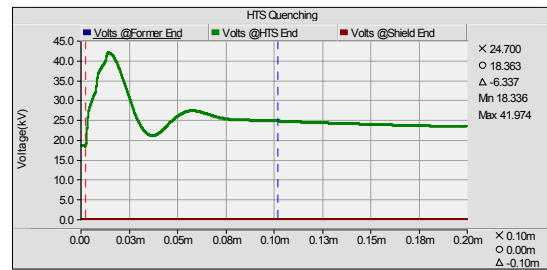
2.2.4 모의결과

이천변전소에 설치된 초전도 케이블은 인입단과 인출단에 약 500m의 일반 전력케이블(CNCV 600SQ)이 접속되어 있으며, 접속지점에 피

뢰기가 외부에 설치되어 있다. 따라서 직격뢰의 인입지점은 일반 전력케이블과 초전도케이블의 접속지점으로 상정하였다. 초전도케이블의 경우 정격이상의 에너지가 흐르면 초전도체내에서 Quenching현상이 발생하는데 Quenching이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우에 대해 각 Former 층과 초전도 통전층, 차폐층, 안정화층의 전압을 측정된 결과는 그림 6과, 7 그리고 표 2와 같다. 모의결과 10kA 직격뢰의 경우 Quenched, Unquenched상태에서 모두 HTS 인출단의 Former층, 초전도 통전층의 최고전압은 41.5kV, 42kV이며 절연강도는 BIL정격의 약 28% 정도이다. 초전도케이블의 Quenched상태에서 초전도 통전층의 과전압이 Unquenched상태와 큰 차이가 없는 것은 초전도케이블이 Quenched와 Unquenched상태에 따라 초전도 통전층과 Former층의 서지임피던스의 차이가 적기 때문으로 생각된다. HTS 인출단은 배전선에서 반사된 반사파가 누적되어 전압이 증가되고 있으며 주변 케이블의 선로가 상대적으로 짧아 약 20us후에 최고전압이 되었다.



〈그림 6〉 초전도케이블 인출단의 전압(Unquenched)



〈그림 7〉 초전도케이블 인출단의 전압(Quenched)

〈표 2〉 이천변전소 22.9kV 초전도케이블 뇌서지 과전압 모의결과

계측점	HTS(BIL=150kV) (Unquenched)				HTS(BIL=150kV) (Quenched)			
	HTS인입단		HTS인출단		HTS인입단		HTS인출단	
	kV peak	% BIL	kV peak	% BIL	kV peak	% BIL	kV peak	% BIL
Former HTS	36.9	25%	41.53	28%	36.9	25%	42.0	28%
GIS	-	-	40.36	27%	-	-	40.5	27%

3. 결 론

본 논문에서는 현재 확대보급을 위해 설치 운영예정인 이천변전소의 배전급 22.9kV 50MVA 초전도 케이블의 절연협조 분석을 하고자, PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전급 초전도케이블을 모의하였고 뇌서지 침입에 의한 과도 전압을 모의하여 설계된 절연강도를 평가하였으며, 현재 설계된 기존의 절연강도의 범위를 초과하지 않음을 알 수 있었다. 향후 초전도케이블의 설계용 확대 적용과 송전급 초전도케이블의 설계용 적용을 고려하여 절연협조 분석 및 검토를 실시하여 대용량 초전도케이블의 설계용 적용시 문제시 될 수 있는 절연협조에 대한 추가 연구를 실시할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] "초전도전력기기 설계용 운영기술개발 개발", 2차년도 진도보고서, 지식경제부, 2010.10
- [2] "Insulation Coordination(Part 4 Modeling guide), IEC 60071-4.
- [3] "Modeling of Surge Arresters", IEEE Working Group 3.4.11IEC, 1992
- [4] P.Pinceti, "A simplified model for surge arresters", IEEE Power Delivery, Vol. 14, No. 2, 1999