

22.9kV 초전도 한류기 실계통 적용을 위한 절연협조 검토

The Study on Insulation Coordination on 22.9kV SFCL for Applying to Real Grid

김태훈¹, 강지원², 강연욱², 박진우³, 이한상⁴, 양병모^{5,*}

T.H Kim¹, J.W. Kang², Y.W Kang², J.W Park³, H.S Lee⁴, B.M Yang^{5,*}

Abstract: This paper proposes an insulation coordination and surge arrester design for superconducting power system with SFCL(Superconducting Fault Current Limiter) in Icheon substation. In the aspect of the economic analysis, since the superconducting devices are very expensive, the insulation coordination to prevent the dielectric breakdown caused by the lightning surge should be considered carefully. In this paper, the insulation coordination for real grid including SFCL and the design of the protection devices against lightning surge is verified using PSCAD/EMTDC.

Key Words: GIS, Insulation Coordination, Real grid, SFCL.

1. 서 론

전력계통에서 뇌격에 의하여 발생하는 과전압이나, 차단기의 개폐동작 중 발생하는 과전압이 절연설비에 침입하게 되면 절연파괴로 인하여 설비가 큰 손상을 입게 된다. 그러므로 전력계통을 설계할 때는 과전압을 방지하기 위해 절연협조가 반드시 필요하다. 따라서 본 논문에서는 이천변전소의 초전도시범사업으로 수행중인 22.9 kV 630 A 초전도 한류기를 대상으로 전력계통 절연설계에 필요한 과도 과전압 모의와 BIL (Basic Insulation Level)을 계산하였다. 본 논문에서는 기존 한류리액터의 특성과 상이한 특성을 가진 초전도 한류기를 대상으로 하였기 때문에 해석방법과 모델링에 대한 추가적인 기술적 분석이 필요할 것으로 생각되어 검토하였다. BIL계산은 IEC 60071-1규정에 의해 계산한 결과이며, 모의는 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하였다[1,3].

2. 초전도 한류기 개요

¹정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원
²정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 책임연구원
³정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 주임연구원
⁴정 회 원 : 경일대 철도전기공학부 전임강사
⁵정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

*교신저자 : bmyang@kepeco.co.kr
 원고접수 : 2011년 10월 13일
 심사완료 : 2012년 03월 16일
 게재확정 : 2012년 03월 19일

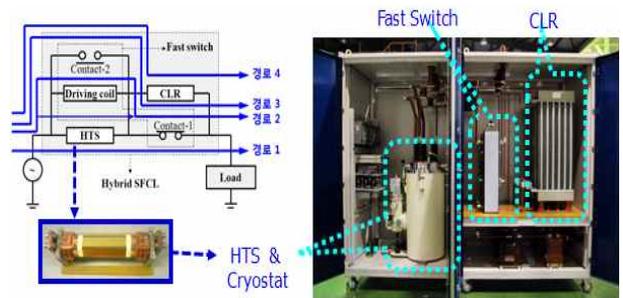


Fig. 1. Model and operation mode of SFCL.

그림 1은 초전도시범사업에 적용되고 있는 초전도체의 초전도성을 이용하여 고장전류를 제한하는 초전도 한류기의 구조를 나타낸 것으로 초전도 트리거부, 고속 스위치부, 리액터부로 각각 구성되었다. 초전도체 한류기는 정상상태에서는 초전도체(트리거 소자)로 부하전류를 통전하고, 사고전류발생시 초전도체(HTS, high temperature super conductor) 켄치상태로 대부분의 전류가 구동코일(Driving coil)로 우회하도록 되어 있다. 이 때 고속스위치가 구동함으로써 위쪽 접점이 닫히게 되고, 반주기 후 전류가 영점을 교차하는 시점에서 아래쪽 접점이 개로(아크소호)되어 선로에 한류저항(CLR: current limit resistor)으로 고장전류를 제한하는 효과를 발생시킨다. 즉, 저항형 한류기에 병렬로 한류리액터를 조합하는 개념이며, 여기서 전력계통에서 필요한 한류저항은 한류 리액터 값을 조정하여 적용하므로 계통 적용성이 좋고, 고속스위치를 채용하여 초전도체에 미치는 에너지 부담을 줄여주는 역할을 한다. 그림1은 실 계통에 적용된 복합형 초전도 한류기 구조 및 실제사진을 나타낸 것이다.

3. BIL(Basic Insulation Level)계산

BIL은 전력계통의 절연계급으로서 전압레벨과 전력기기의 종류에 따라서 분류되어 있다. 한전에서 배전계통에 운용하고 있는 절연협조를 위한 절연강도는 개폐장치, CT, PT 그리고 변압기가 150 kV로 설계되어 있다. IEC(60071-1)에는 전력기기별로 절연설계를 위한 가이드라인이 제시되어 있는데 총 4단계에 걸쳐 계산이 이루어져 있고, 각 단계는 다음과 같다.

- Step 1 : TOV, SFO, FFO 과전압계산
- Step 2 : 과전압별 협조 내전압 산정
- Step 3 : 과전압별 필요 내전압 결정
- Step 4 : 과전압별 내전압 계산결과 정규화

Table 1. Calculation for 22.9kV Distribution line.

Withstand Overvoltage Type		External insulation		Internal insulation	
		Urw(s)	Urw(c)	Urw(s)	Urw(c)
TOV (kVrms)	phase to earth	20.95	33.29	21.58	26.59
SFO (kVPeak)	phase to earth	54.9	-	53.18	-
FFO (kVPeak)	phase to earth	109.09	71.37	105.68	58.5

전력계통에서 과도 과전압은 상용주파 과전압 (Temporary Overvoltage), 개폐서지과전압(Slow-Front Overvoltage), 뇌서지 과전압 (Fast-Front Overvoltage)으로 분류할 수 있다. 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 않는다. 기기의 내부절연(Internal insulation)은 변압기의 경우에는 권선절연을 의미하며, 케이블의 경우에는 케이블 절연체를 의미한다. 또한 외부절연(External insulation)은 변압기 및 전력기기 부싱의 절연계급을 의미한다. 표 1의 BIL 계산결과, 뇌서지의 경우 외부절연으로 약 110 kV의 절연강도가 필요함을 알 수 있다. Urw(s), Urw(c)는 절연기기의 요구되는 내전압 최대치와 변환치를 의미하며 계산결과에서 큰 값을 사용한다[1]. 현재 이천변전소에 설계된 초전도기기의 절연강도는 150 kV로서 BIL계산결과를 설계값을 초과하지 않는 약 0.73 pu 즉, 27%의 마진을 가지고 있음을 알 수 있다.

4. 22.9kV 초전도한류기 뇌서지 과전압 해석모델

뇌서지에 의한 과전압 모의는 그림 2에서 나타난 것처럼 이천 초전도시범사업관련 실계통 적용된 22.9 kV 630 A급 초전도 한류기를 대상으로 하였다. 부하공급용 2회선은 장평D/L 전주에서 초전도제어동으로 가는 선로로 초전도한류기의 보호협조 및 유지보수를 위하여 설치된 부하공급용 SIS(Solid Insulated Switchgear)를 이용하여 초전도한류기를 경유하고, 장평D/L 입상주로 귀환하여 부하 단에 전력을 공급한다. 뇌서지 전압모의에 사용된 프로그램은 PSCAD/EMTDC이다. 뇌서지 모의는 지상에 노출된 부분이나, 반사파가 형성될 수 있는 접속점에 모의서지를 인가하여 검토하였다. 또한 배전선로 모델링을 위한 EMTDC의 PI Section 모델을 사용하여 모델링을 구성하였다. 사용데이터는 다음과 같다.

*정상분

- R = 1.7906e-5 [pu/m]
- X_L = 1.7906e-5 [pu/m]
- X_C = 7.117e-5 [pu/m]

*영상분

- R = 5.3222e-5 [pu/m]
- X_L = 1.7353e-5 [pu/m]
- X_C = 1.4234e-6 [pu/m]



Fig. 2. Schematic of the simulation for Lightning impulses Modeling with SFCL system.

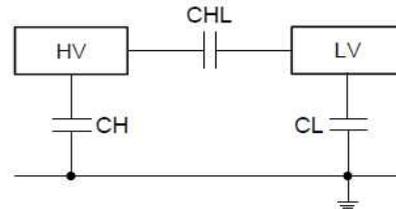


Fig. 3. Simple modeling of the Transformer surge analysis.

4.1 변압기

뇌서지 과전압 해석을 위해 변압기는 커패시턴스로서 모델링 된다. 뇌서지가 주입되었을 경우 변압기 임피던스는 상대적으로 큰 값이 되며 서지전류는 커패시턴스를 통해 흐르게 된다. 변압기의 커패시턴스는 그림 3에서 나타난 것처럼 고-저압측로 분류된다. 모의에서 사용된 변압기 커패시턴스 값은 동종의 변압기에서 실측한 값을 사용하였으며, 본 논문에서는 실제 이천변전소 실측값을 적용해서 모델링 하였다.

- LV (Winding Capacitance) : 3.57e-3 [μF]
- HV (Winding Capacitance) : 8.86e-4 [μF]
- CHL (Winding Capacitance) : 1.87e-3 [μF]

4.2 초전도한류기 모델링

EMTDC 모델링을 통해 SFCL의 기능을 설명하면, 정상운전 시 SFCL의 RA-HTS로 전류가 흐르다가, 고장이 발생하여 고장전류가 RA-HTS의 임계전류에 도달하면, RA-HTS의 저항이 증가하면서 전류는 구동코일(R, L_{DC})로 흐르게 된다. 이후 구동코일이 특정 전류값에 도달하게 되면 SW2를 닫고 동시에 SW1은 개방한다. 이때 HTS의 전류는 스위치 동작과 동시에 0 A가 되나, 구동코일의 전류는 인덕턴스 성분 때문에 상대적으로 서서히 전류가 감소되는 특성을 보인다. SW2가 투입되면 즉시 CLR이 동작하면서 전류를 제한하게 된다. 여기서 전류는 SW2 동작 이후 다음 전류파형이 영점을 지나면서 SW1의 전류는 0 A가 된다. 본 연구에서 설계한 SFCL은 반주기 후 한류가 시작되는 것으로 설계되었다[2].

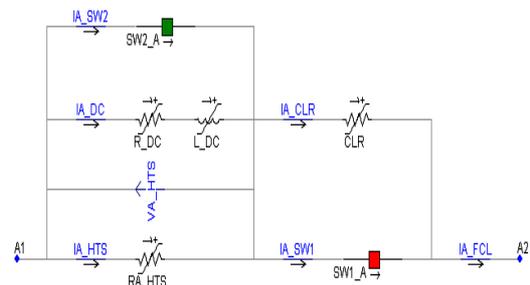


Fig. 4. The EMTDC modeling to SFCL.

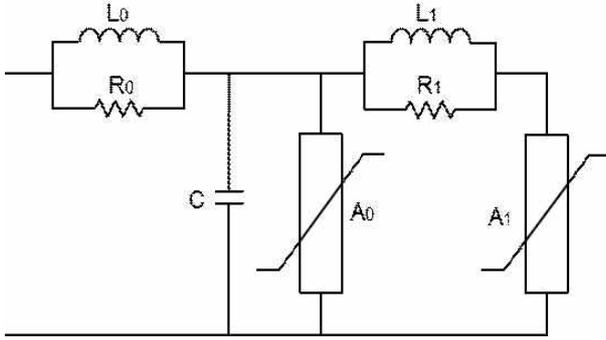


Fig. 5. The simple modeling of IEEE surge arrester.

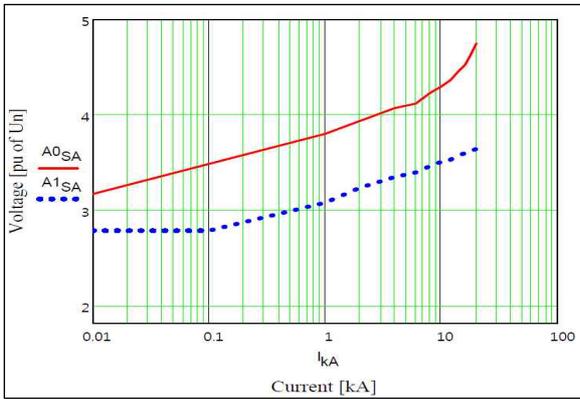


Fig. 6. (I-V) characteristics of the surge arrester.

4.3 피뢰기 및 뇌서지

피뢰기의 경우 IEC 가이드라인에 의하면, 뇌서지 과전압모의를 위해서 IEEE WG 3.4.11에 의한 모의방법을 추천하고 있다. IEEE WG 3.4.11에 의하면 뇌서지 분석을 위한 피뢰기 모의에서 비선형저항 2개를(A0, A1)이용한 방법을 제시하고 있으며(그림 5) 각 파라메타 계산방법은 식(1)~(5)과 같이 피뢰기 컬럼의 수(n), 피뢰기 길이(d)일 때 저항, 인덕턴스, 커패시터를 계산하였다.

$$L_o = 0.2 \times \frac{d}{n} = 0.128uH \quad (1)$$

$$L_1 = 15 \times \frac{d}{n} = 9.615uH \quad (2)$$

$$R_o = 100 \times \frac{d}{n} = 64.1\Omega \quad (3)$$

$$R_1 = 65 \times \frac{d}{n} = 41.665\Omega \quad (4)$$

$$C_1 = 100 \times \frac{d}{n} = 156.006uF \quad (5)$$

계산결과와 V-I 특성은 그림 6과 같으며 뇌서지는 8/20 us 레벨로 직격뢰를 상정하였다[3,4].

5. 사례연구

초전도 한류기가 설치된 이천변전소의 직격뢰 절연내력 모의를 위하여, 노출된 배전 GIS와 CNCV 케이

블 접속점에 이천변전소에 설치된 피뢰기(Zinc Oxide Surge Arrester)의 용량은 8/20 us, 40 kA를 기준으로 직격뢰를 상정하여 접속점을 비롯한 초전도 한류기 인입단, 인출단, 배전 전주 부분의 과전압을 모의하였다.

5.1 모의조건

모의조건은 정상상태와 최대 켄치저항을 가지는 상태의 초전도 한류기를 상정하여 모의를 수행하였다. 모의에 사용된 초전도 한류기의 최대 켄치저항은 0.15 옴으로, 임피던스가 '0'에 가까운 정상상태와 달리 한류기가 임피던스 값을 가지게 되면 뇌 전류가 진행함에 따라 한류기 양단에 전압차가 발생하기 때문에, 가장 큰 전압차를 나타내는 최대 켄치저항 조건을 상정하여 모의하였다.

5.2 모의결과

그림 7과 8은 40 kA 직격뢰 상정에 따른 각 계측부의 전압상승을 모의한 결과이며, 표 2에 모의결과를 정리하여 나타내었다. 정상상태와 최대한류저항상태의 초전도 한류기에 대하여, 직격뢰에 의한 전압상승은 150 kV BIL에 대해 약 24~32 % 수준의 안정한 값으로 모의되었다. 정상상태에서 초전도 한류기의 임피던스를 거의 '0'에 가까운 값으로 볼 수 있으므로 인입단과 인출단의 전압이 같게 모의되지만, 최대임피던스 상태(Quenched state)에서의 양단간 전압은 그림 9에서 나타난 것처럼 최대 0.17 kV로 모의되었다. 이것은 한류동작 과정에서 발생하는 양단전압보다 작은 값으로서, 40 kA 직격뢰에 대하여 한류기의 내부고장이 발생할 만큼 높은 과전압이 양단에 걸리지 않음을 확인할 수 있다. 그림 9에서 보는 바와 같이, 초전도 한류기 인출단의 전압이 인입단의 전압에 비해 높은 경우가 있는데, 이것은 직격뢰 서지 전류가 부하 단에서 반사되어 서지 전류의 반사파가 누적되어 나타나는 현상이다.

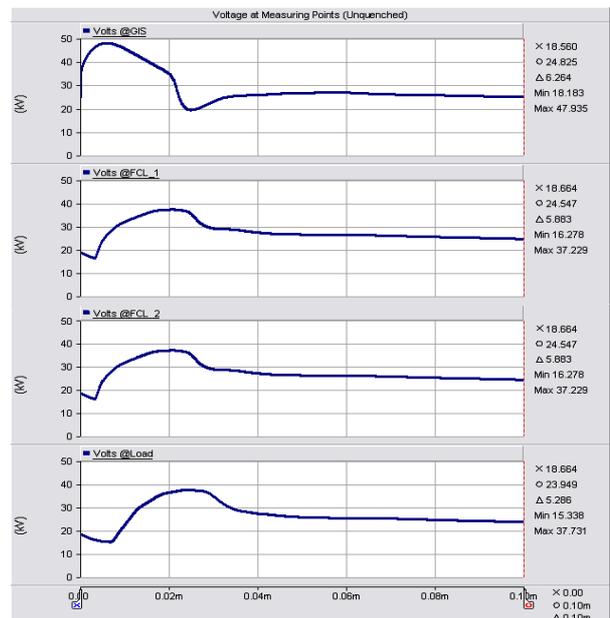


Fig. 7. Simulation of a voltage rise by direct strokes (Unquenched).

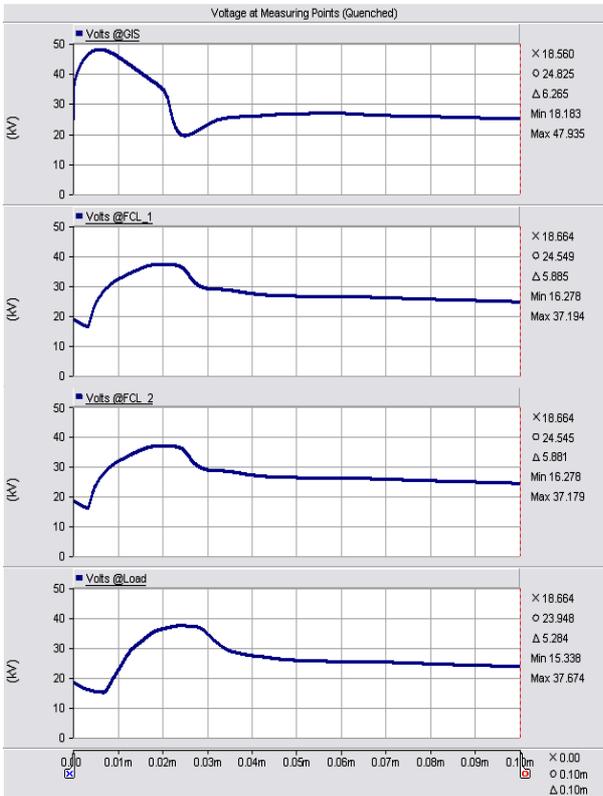


Fig. 8. Simulation of a voltage rise by direct strokes (Quenched).

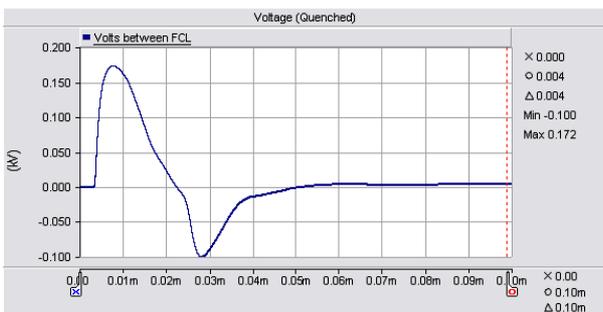


Fig. 9. Applied voltage of the SFCL at maximum current limiter resistance.

Table 2. Results of the SFCL simulation.

모의 조건	계측점	HTS FCL(BIL=150kV)	
		kV _{peak} (kV)	%BIL(%)
정상 상태	배전 GIS	47.935	31.96
	한류기 인입단	37.229	24.82
	한류기 인출단	37.229	24.82
	장평D/L	37.731	25.15
최대 한류 저항	배전 GIS	47.935	31.96
	한류기 인입단	37.194	24.80
	한류기 인출단	37.179	24.79
	장평D/L	37.874	25.25

6. 결 론

이천변전소에 설치된 초전도한류기는 #1 MTR의 2차측과 CNCV 325 mm² 케이블을 이용하여 지상에서 접속되었고, 초전도한류기를 지나서 장평D/L부하로 연결된 구조이며, 배전선로 BIL계산은 상용주파, 개폐서지, 뇌서지에 대해 실시하였다. 서지 계측부분은 SFCL입출단, GIS, 장평D/L 순으로 모의하였고, 모의 조건으로 정상상태(Unquenched)와 최대한류저항상태(Quenched)의 조건으로 SFCL에 대하여 직격뢰에 의한 전압상승은 150 kV BIL에 대해 약 31 % 수준의 안정한 값으로 모의 되었다. 초전도한류기의 특성에 따른 최대 한류저항상태에서는 양단간 전압이 0.17 kV로 모의 되었으나, 이것은 한류동작 과정에서 발생하는 양단전압보다 작은 값으로 안정한 동작을 유지할 수 있음을 보여준다. HTS 인입단의 SIS에서 약 47.935 kV로 최고 전압을 나타내고 있고 BIL의 마진이 68.04 %이므로 한류기 기기의 절연협조는 IEC의 규격에 의해 150 kV BIL값에 매우 적절한 수준이다.

감사의 글

본 과제는 지식경제부에서 시행한 전력산업원천기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] "Insulation Coordination"(Part 4 Modeling guide), IEC EN 60071-1, 1993.
- [2] 이승렬, 윤재영, 이병준 "22.9kV 반주기후한류방식 복합형 초전도한류기 해석모델 개발", 한국초전도저온공학회논문지, 12권 1호, pp. 6-11, 2010년 3월.
- [3] Sardi, J., Chian, J.O.C. "Modeling of metal oxide Surge Arresters", IEEE Working Group 3.4.11. IEEE Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 302-309, 1992.
- [4] P.Pinceti, P, Giannettoni, M. "A simplified model for zinc oxide surge arresters", IEEE Power Delivery, vol. 14, no. 2, pp. 393-398, 1999.

저 자 소 개



김태훈(金泰勳)

1979년 06월 23일생, 1998년 경북대 공대 전자공학과 졸업, 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전력공사전력연구원 .



강지원(姜地原)

1965년 01월 06일생, 1987년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학 졸업(공학석사), 2003년 동 대학원 전기공학 졸업(공학박사) 현재 한전 전력연구원 책임연구원.



강연옥(姜研瑛)

1965년 12월 25일생, 1988년 충남대학교 전기공학과 졸업, 1995년 충남대학원 전기공학 졸업(공학석사), 현재 한전 전력연구원 선임연구원.



박진우(朴眞佑)

1979년 12월 18일생, 1998년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2011년 충남대학원 전기공학 졸업(공학석사), 현재 한전 전력연구원 주임연구원.



이한상(李漢相)

1980년 1월 17일생, 2003년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업, 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 현재 경일대학교 IT융 복합대학 철도전기공학부 전임강사.



양병모(梁炳模)

1969년 04월 24일생. 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동대학원 전기공학과 박사수료. 1997년 한전 전력연구원입사, 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원.