

가스절연 송전선로(GIL) 장기신뢰성 시험방안 검토분석

장태인*, 양병모*, 윤형희*, 석광현*, 김재승*, 류희석**
한국전력공사, 한국전기연구원

Review and Analysis on Testing Method for Long-term Reliability of Gas Insulated Transmission Lines

Tae-In Jang*, Byeong-Mo Yang*, Hyung-Hee Yoon*, Kwang-Hyun Suk*, Jae-Seung Kim*, Hee-Suk Ryoo**
KEPCO*, KERI**

Abstract - 본 논문은 국산화 개발중인 GIL시스템의 장기신뢰성 시험 방안을 검토 및 분석한 것이다. 개발될 GIL시스템을 실선로에 적용하기 위해서는 사전에 그 성능을 검증하기 위한 일련의 시험이 필요한데, 본 논문은 그 첫 단계로 국산화 개발 GIL의 사양을 근거로 시험전압원 및 전류원, 시험선로 구성, 그리고 주요 시험항목 등에 대한 내용을 다룬다.

1. 서 론

최근 국내에서 대도시 확장 및 신도시 개발에 따른 기존 345kV급 대용량 가공 송전선로의 경과지에 들어서는 신규 택지개발 지구의 발달, 대도시 대용량 가공송전 선로에 대한 지중화 민원 등으로 이들 개소에 적용 가능한 친환경 지중송전선로의 건설이 절실히 요구되고 있다. 이에 따라, 초고압 대용량 가공 송전선로에 일대일로 대응하면서 지중송전이 가능한 GIL(Gas Insulated Lines)의 도입 필요성이 대두되어 최근에 정부과제로 GIL 국산화 개발과제가 시작되었다. 본 논문은 이와 관련된 연구의 일환으로 국산화 개발 GIL에 대한 성능 및 신뢰성을 시험평가하기 위한 항목에 대하여 조사, 검토, 분석한 것으로, 국내 345kV GIL의 사양, 효과적인 시험평가를 위한 시험설비 기본사양, 그리고 마지막으로 장기신뢰성시험인 PQ(Pre-Qualification) 시험방안에 대하여 차례로 다룬다.

2. 본 론

2.1 GIL 개발 사양

현재 국내에서 개발하고자 하는 GIL의 정격은 345kV 4번들 도체 구성을 가지는 대용량 가공송전선로에 일대일로 대응하면서 지중송전이 가능한 사양으로서 정격전압은 362kV이고, 정격전류는 4,000A이다. 그 주요 사양을 요약하면 다음 표 1과 같다.

〈표 1〉 개발 GIL의 주요 사양

구분	주요 사양
정격전압	• 공칭전압 : 345kV, 60Hz • 정격전압 : 362kV, 60Hz
정격전류	• 연속정격 : 4000A 표준 • 단시간정격 : 63kA, 1~2초(최대과고치는 정격 단시간 정격의 2.6배)
온도상승	• 전력구내 설치시 외함 최대온도 : 70°C 이하 • 옥외 설치시 : 80°C 이하 • GIL 각부의 온도상승 : IEC61640, IEC60694 참조
구조	• 곡률반경 400m미만 개소 곡각부(Angle Unit) 사용 • 보호회로 : 중전부와 대지간에 상용주파 2,000V/1분 • 외함 : 362kV, 최대 520mm
절연강도	• 정격전압 : 362kV, rms • 상용주파내전압 : 450kV, 실효치 • 뇌충격내전압 : 1,175kV, 1.2/50μs, 파고치 • 개폐충격내전압 : 950kV, 250/2500μs, 파고치

2.2 GIL 시험 설비

2.2.1 인정 시험의 종류

개발된 GIL의 실사용을 위한 인정시험은 크게 단시간시험인 Type 시험과 장시간시험인 PQ 시험으로 나누어질 수 있다. 물론 공장검수시험 등과 같이 제조 공장에서 수행되는 다양한 종류의 시험이 있지만 본 문에서는 국산화 개발과정 및 실제 현장적용을 위해 필수적인 주요 전기적 시험항목을 중심으로 일부 Type 시험 및 장시간시험인 PQ 시험방안에 대하여 살펴본다.

2.2.2 주요 시험설비의 사양

2.2.2.1 기본시료 및 최대시료 길이

개발시험용 시료는 부품시료를 제외하고 대략 7종이 필요하나 전압원 가변에서 최장시료는 모든 부품이 종합되는 PQ시험 시료이다. 단위가스 구간은 12m unit 5개로 구성된 60m로 선정하고 곡각부 (4+12)m, 기중중단 8m, 기중연결부 8m, 가스중단 2m 등으로 구성하여 기본 단위시료의 길이는 94m로 선정한다. 단상, 삼상, 저압보상, 고압보상 등 전류회

로 구성방식에 따라 실제 회로길이는 달라지나 최대길이는 6시료 단상 저압보상방식의 643m이다. 참고로 6시료 단상고압보상방식은 597m, 삼상저압보상방식은 634m, 그리고 삼상고압보상방식은 610m로 계산된다.

2.2.2.2 시험전압원

시험전압중 뇌임펄스와 개폐찌지를 제외하고 가장 높은 시험전압인 상용주파 최대 시험전압 450kV를 기준으로 시험전압원의 전압 및 전류용량을 결정하였다. 여기서, 시험전압원의 전류용량은 중전류용량으로서 CIGRE Brochure 218[2]의 GIL 표준 정전용량을 이용하여 결정하였다.

○ 전압의 결정

정격전압	최고전압	여유분	시험기전압
362kV	450kV	1.2	540kV

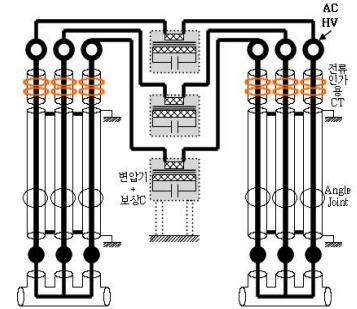
○ 전류용량 결정 ($i = \omega CV$)

시험기전압	부하 (정전용량)	최대길이	여유분	전류용량
540kV	68.6nF/km	643m	1.1	9.878A

따라서, 시험전압원은 540kV/10A 이상의 것을 구비하여야 한다.

2.2.2.3 시험전류원

저저항 대전류시험회로는 무효전력이 대부분을 차지하므로 회로상의 보상점이 어디인가에 따라 비용에 많은 차이가 있다. 주회로에 결합변압기를 사용하여 회로의 L을 보상하는 고압 회로보상방식, 보상 없이 전원단에서만 C를 이용하여 전원력을 보상해주는 저압보상방식이 있다. 무효전력비율이 대단히 높고 총 필요 설비용량이 매우 크며 대구경 CT가 필요한 GIL시험회로에서는 고압회로보상 방식이 적합하다고 사료된다. GIL의 특성은 CIGRE Brochure 218의 데이터를 인용하고 다양한 시료수 및 설비확보 비용을 고려하여 그림 1의 회로와 같은 3상 고압보상방식을 검토한다. 설비용량은 산출크기의 121%를 상정한다.



〈그림 1〉 고압보상전류회로 구성개요

○ GIL 단위시료특성(1상 1시료 98m, Tie adapter 등 연결부 고려)

인덕턴스	커패시턴스	교류저항	Z _R (90°C)	Z _L	Z _{tot}
162nH/m	68.6pF/m	6.7μΩ	0.376mΩ	10.014mΩ	10.05mΩ

○ AC 시험전류의 크기

항목	시험 조건	비고
통전 전류	정격전류: 4000A, 1회선고장시를 고려한 경우: 5,430A (345kV 송전선 도체 열용량의 80%의 2배(848*4*0.8*2))	평상시 80% 운전 가정

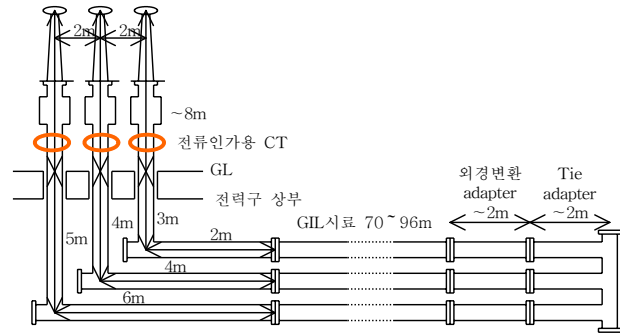
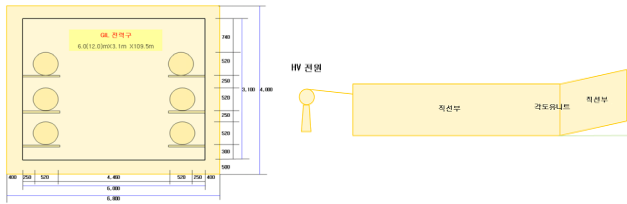
시험전류원은 6kA정도를 인가할 수 있어야 하므로 과부하 시험상황 및 설비운영의 여유를 고려하여 최대 시험전류 값을 8kA로 선정한다.

○ AC 전류원 용량 (3상 6시료, 5시료 구성을 위한 예비수량 포함)

정격 전류	1상당 CT출력	1상당 출력전압	1상당 보상 TR+C용량	CT정격/수량	보상TR+C 용량/수량	비고
4kA	14.56kVA	3.31V	388.75kVA	1V	8kA	정격전류 시험전류 설비최대전류
6kA	32.76kVA	4.964V	872.42kVA	8kVA	1.6MVA	
8kA	48.13kVA	5.47V	1,550.35kVA	8kVA /6*4set	1.6MVA / (3+1)set	

2.2.2.4 시험선로

현재 계획되어 있는 시험선로의 구조를 고려하여, GIL 시험선로는 기본적으로 전력구에 배치되는 것으로 하며, GIL의 전력구내 배치도는 그림 2와 같다.



〈그림 2〉 GIL 시험선로 배치도(전력구)

2.3 PQ 시험 방안

2.3.1 인가 전압 및 시간

장기 과전시험은 GIL 내부 도체와 외함 사이의 스페이서 등 절연물의 절연성능이 수명기간 동안 이상이 없을 것인가를 검증하기 위한 것으로 GIL의 사용수명을 50년으로 가정하여 인가전압 및 인가시간이 결정되게 된다.

시험전압은 유전체의 전기적 열화 경험규칙 $t = K \cdot V^n$ (t : 수명, V : 인가전압, n : 열화지수, K : 정수)으로부터 나오는 $V-t$ 특성을 적용하여 산정하였으며, n 은 스페이서(Epoxy 주형품)의 $V-t$ 특성인 $n = 15$ 를 채용하였다. 이때, 상기 과전시험 전압치는 다음 식 (1)과 같이 정해진다[3].

$$V = V_0 [t_0 / (t \times n)]^{1/n} \\ = (362 / \sqrt{3}) \times [(50 \times 12) / (6 \times 0.8)]^{1/15} \quad (1) \\ = 290 \text{ kV} \quad (t = \text{시험기간 6개월인 경우})$$

여기서, V_0 : 최고 대지전압(kV), t_0 : 절연성능 검증기간(50년x12개월), t : 시험기간(개월), n : 과전효율(0.8: 시험기간 중의 시험설비 점검 및 시험선로의 정기측정 등에 의한 과전 정지를 고려한 값)이다. 시험기간에 따른 인가전압의 크기를 정리하면 아래와 같다[3].

〈표 2〉 시험기간에 따른 인가전압치

시험기간(개월)	1.45	3.5	6	12	2U ₀	비고
인가전압(kV)	320	300	290	280	420	U ₀ = 210kV (362kV/1.732기준)

PQ 시험은 보통 6개월 이상의 기간을 두고, 실제 운영상황을 최대한 반영하는 조건을 상정하여 시험을 실시하는 것이 원칙이다. 그러나, 시험기간을 단축하고자 할 경우 위 표에 계산되어 있는 전압값 보다는 가혹한 조건에서 시험을 실시해야할 것으로 사료된다.

2.3.2 열사이클 시험

개발 GIL의 기본특성인 열기특성 및 교류내전압특성 확보여부를 확인하기 위한 열사이클 시험은 통상 전력부하 패턴을 고려하여 8시간 가열/16시간 냉각의 24시간 사이클을 기본으로 한다. 냉각특성이 충분히 확보된다고 평가되는 경우 총 시험기간을 단축하기 위하여 8시간 가열/4시간 냉각형태를 적용할 수도 있다. 시험기간 및 조건은 총 목표수명기간에 걸쳐 발생하는 열부하 조건을 고려하여 최소 200회 이상의 가열 및 냉각 사이클을 가져야하며, 목표 수명기간동안 매년 1회 최대 설비용율에 도달하는 상황을 기본으로 상정하여 도체 최고온도에 50회 이상 도달하는 것을 목표로 한다.

한편, 수명기한 동안의 설비안정성을 평가하기 위한 장기 과전시험은 50년 동안의 목표수명기간 동안 설비의 실제운전 조건으로 가정되는 연속운전조건을 모의하는 것으로, 전류인가 후 냉각시간에만 전압을 인가하는 경우 절연체에 에너지가 가해진 상태가 아닌, 즉

무부하 조건에서만 전압을 인가하는 형국이 되므로 냉각 시 뿐만 아니라 전류인가 상태에서 전압을 인가하는 것이 연속운전조건 모의에 적합한 시험방법으로 사료된다. 해외사례 역시 대부분 전압, 전류를 동시에 인가하여 시험을 실시한 것으로 나타났다.

2.3.3 시료길이(가스구획 길이)

가스 구획은 거리가 짧을수록 Arc 발생 시 압력 증가분이 커지는 가혹조건이 되며, 가스구획이 지나치게 짧을 경우 제조원가 상승 및 고장발생 확률이 높아진다. 따라서 실선로에서는 최소 단위가 60m [= 1unit(12m) x 5] 이상이 될 것으로 사료되나, 시험 전력구의 수용능력 및 가혹조건을 상정하여 GIL 가스구획의 길이는 60m 정도로 한다.

2.3.4 시험선로 곡각부 각도

접속부에서 열 수축 팽창에 의해 발생하는 축력에 의한 응력을 계산하였으며, 해석 결과에서 알 수 있듯이 접속부는 각이 작을수록 발생하는 응력이 커짐을 알 수 있다.



이처럼 곡각부 설계에 있어서 접속 각도가 작을수록 응력이 집중되어 기계적으로 취약한 경향이 있으나, 전기적인 측면에서는 90°가 가장 악조건인 것으로 나타나고 있다. 한편, 실선로 조건에서 GIL 선로의 실용적 배치를 고려한다면 15° 또는 20° 등의 곡각부의 채용 및 시험을 검토해야 한다.

2.3.5 시험 절차

PQ 시험은 완제품에 대한 종합시험이기 때문에 개별부품의 성능 및 안정성이 확인된 상태에서 진행되어야 한다. 따라서 시험시료가 설치되기 이전에 부품에 대한 시험절차가 진행되어야 할 필요가 있다. 이러한 순서는 필연적으로 시험기간을 장기화하므로 시험전 제품개발 과정에서 진행된 부품의 사전 공장시험 기록들을 제출 받아 검토할 필요가 있다. 이러한 부품 및 시료에 대한 선행조건이 만족되는 경우 가장 오랜 시험기간이 소요되는 PQ 시험과 타 인정시험 항목을 동시에 실시함으로써 최소의 시험기간이 달성될 수 있다. PQ 시험은 대략 아래의 절차로 수행될 예정이다.

- ① PQ시험 선행조건 검토
- ② PQ시료의 설치
- ③ PQ시료와 시험전압원 및 전류원 회로와의 연결
- ④ 시험 및 측정회로 구성
- ⑤ 시험 진행 I (PQ시험 선행조건이 만족된 경우)
- ⑥ 시험 진행 II (PQ시험 선행조건이 만족되지 않은 경우)
- ⑦ 유지보수 절차 수행
- ⑧ PQ시험 완료 및 시험보고서 작성

선행조건이 만족되어 여러 시험항목이 동시에 시작되는 경우 PQ 시험기간에 설치 및 평가기간을 고려하여 표준적으로 대략 200일 정도가 필요하며 선행조건이 만족되지 않을 경우 300일 이상이 예상된다. PQ시험 기간 등 세부사항은 추후 시험의뢰처와 사용처와의 협의의 거쳐 확정될 것이다.

3. 결 론

대용량 지중송전선로의 필요성에 의하여 최근 국내외적으로 관심을 끌고 있는 GIL에 대한 성공적인 국산화 개발 및 현장 적용의 신뢰성 확보를 위한 연구의 첫 단계로서 시험전압원, 전류원, 시험선로, 그리고 몇 가지 주요 PQ 시험항목에 대하여 살펴보았다. 이 논문의 결과들은 향후 GIL 시험평가 설비구축 및 성능평가를 위한 핵심 기술 자료로 심분 활용될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사, "345kV GIL 구매 규칙", 2007
- [2] CIGRE Brochure 218, "Gas Insulated Transmission Lines", 2002
- [3] 일본 CRIEPI, "275kV 관로 기중송전선(GIL)의 실무용 종합시험", 장기 과전시험", 1994