Regular Paper
J. KIEEME
Vol. 23, No. 10, pp. 804-808, October 2010
DOI: 10.4313/JKEM.2010.23.10.804

362 kV GIB 내에서 건조공기의 절연파괴 특성

한기선[1,a], 주형준[1], 윤진열[1], 유홍근[1]
[1] 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소

Breakdown Characteristics of Dry Air under 362 kV GIB

Ki-Son Han[1,a], Hyung-Jun Ju[1], and Jin-Yul Yoon[1], and Hong-Geun You[1]
[1] Transmission and Distribution Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, Daejon 305-380, Korea

(Received August 16, 2010; Revised September 14, 2010; Accepted September 17, 2010)

Abstract: In this paper, we studied the dielectric breakdown voltage characteristics by the AC withstand voltage test on using green insulation dry air instead of SF_6 insulation gas used in the GIB (gas insulated bus) of 362 kV GIS (gas insulated switchgear). The AC withstand voltage test applied to the standard KEPCO's 362 kV GIB with dry air insulation, and the equivalence of dielectric breakdown voltage for dry air and SF_6 gas were examined, and the empirical formulas of dielectric breakdown voltage for dry air were calculated, and the criterion of AC withstand voltage test for dry air insulation was derived. Using the criterion, dry air can be used instead of SF_6 gas for 362 kV GIB in the factory acceptance test was confirmed.

Keywords: 362 kV GIS, 362 kV GIB, Dry air, Breakdown voltage charecteristic, AC withstand voltage

1. 서 론

초고압 변전기기의 절연매체로써 널리 사용되고 있는 SF_6 가스는 높은 절연내력과 우수한 아크소호능력, 무독성 및 안정적인 열적·화학적 특성을 가지고 있고, 공기 절연에 비해 약 20%의 공간으로 설치가 가능하여 변전기기의 축소화 및 고신뢰화를 가능하게 하였다. 그러나 SF_6 가스는 저온 및 고압에서 액화되기 쉽고 불평등 전계에서 절연내력이 낮아지며 다른 가스에 비해 가격이 비싼 단점이 있다. 특히 SF_6 가스는 지구온난화지수 (global warming potential, GWP)가 CO_2의 23,900배로 매우 높고 화학적으로 안정되어 있어 지구온난화에 끼치는 영향이 지대하므로 2005년 교토의정서에 의해 온실가스에 포함되었다. 우리나라는 2013년부터 SF_6 가스 감축이 불가피할 것으로 예상되므로 한전과 중전기기 제작사는 SF_6 가스를 절감할 수 있는 다양한 연구와 개발이 필요할 것으로 판단된다. 특히 SF_6 가스는 100% 회수가 곤란하여 중전기기 제작사의 공장 검수시험 시 약 30%, 한전의 설비 유지보수 및 증설시 약 20%가 미회수되어 대기 중으로 배출되고 있어 SF_6 가스 절감대책에 대한 연구가 절실한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 공장시험 시 대기 중으로 배출되는 약 30%의 SF_6 가스 미회수를 막기 위해 대체 방법으로 N2 가스와 O_2 가스가 혼합된 건조공기의 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

362 kV GIB (gas insulated bus)의 절연매체로 SF_6 가스와 건조공기 사용 시 전계해석을 통하여 건조공기의 대체 적용 가능성을 검토하였으며, 한전 현장에서 설치 운영하고 있는 GIS (gas insulated switchgear)의 약 67%를 점유하고 있는 효성중공업에서 제작한 362 kV 상분리형 GIB와 상일괄형 GIB를 대상으로 상용주파전압을 인가하여 건조공기의 압력변화에 따른 상용주파 절연파괴 실험을 통하여 측정한 절연파괴전압과 SF_6 가스 사용 시의 절연파괴전압을 비교하고 등가성을 분석하여 건조공기 사용 시 절연파괴전압 실험식을 산출하였다. 또한 산출된 절연파괴전압

a. Corresponding author; hankison@kepco.co.kr

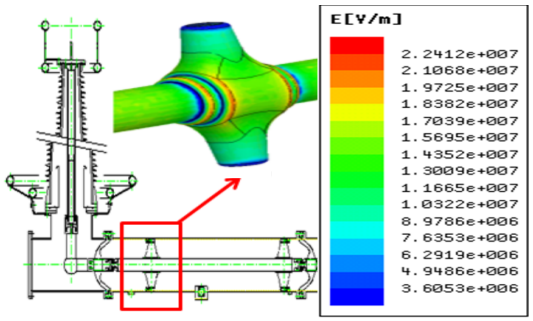

Fig 1. 362 kV 1 phase type GIB & electric field distribution.

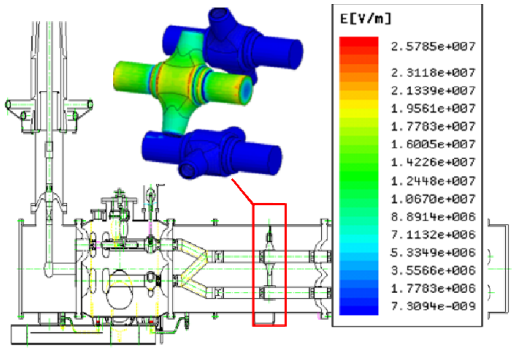

Fig. 2. 362 kV 3 phase type GIB & electric field distribution.

실험식으로부터 상용주파내전압 시험 기준식을 도출하고 적합도를 검증하기 위하여 전계해석상의 취약한 부위에 이물질을 부착하여 실제 절연파괴가 내전압 시험기준 값 이하에서 발생하는지를 확인하였다. 이상의 실험결과 본 논문에서는 SF_6 가스 사용량을 감축하기 위하여 362 kV GIB의 공장 검수시험 시에 SF_6 가스 대신 대체 절연가스인 건조공기의 적용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

362 kV GIB에 절연매체로 N_2 가스와 O_2 가스가 혼합된 건조공기 사용 시 내부 구조물에 분포되는 전계를 기존의 SF_6 가스 사용 시 전계와 비교하기 위해 전계해석 프로그램인 Ansys사의 Maxwell 3D를 사용하여 해석하였다. 실제 한전에서 사용중인 효성중공업제의 362 kV 상분리형과 상일괄형 GIB를 대상으로 하였으며 건조공기가 1, 3, 5 기압으로 충진된 경우를 가정하여 절연파괴에 가장 취약한 부위인 포스트부의 전계분포를 해석하였다.

Table 1. Electric field strength with SF_6 gas insulated and dry air insulated.

Condition / Pressure [Atm]	MAximum electric field [kV/mm]			Flash over voltage [kV]			
	Dry air		SF_6 gas	Dry air		SF_6 gas	
	1 phase	3 phase	standard level	1 phase	3 phase	1 phase	3 phase
1	2.41	2.07	3.94	151.2	113.9	248.7	217.1
3	5.42	5.41	8.27	341.5	297.6	521.0	454.9
5	6.40	6.87	11.18	403.2	377.9	704.3	614.9

그림 1에 해석에 사용된 362 kV 상분리형 GIB 모델과 전계해석 분포를 나타냈으며, 그림 2는 해석에 사용된 362 kV 상일괄형 GIB 모델과 전계해석 분포를 보여준다. 건조공기 절연시 전계해석 결과는 기존 SF_6 가스 절연의 경우와 비교하여 표 1에 나타내었다.

표 1의 전계해석 결과 건조공기 절연시 362 kV 상분리형 GIB 포스트부의 최고전계강도는 SF_6 가스절연과 비교하여 압력에 따라 평균 60%의 값을 나타냈으며, 상일괄형 GIB 포스트부의 최고전계강도는 SF_6 가스절연과 비교하여 압력에 따라 평균 61%의 값을 보였다. 절연파괴전압도 최고전계강도와 같은 결과를 보였다. 따라서 건조공기로 절연한 경우가 SF_6 가스절연과 비교하여 낮은 전계강도 분포와 절연파괴전압 특성을 보임을 알 수 있었다. 또한 충진된 건조공기 압력에 따라 362 kV GIB 상일괄형 포스트부가 상분리형 포스트부보다 높은 전계강도와 낮은 절연파괴전압을 보였다.

건조공기 절연 시 최고전계강도를 고려하여 계산으로 얻어진 절연파괴전압은 그림 3과 같이 압력이 증가함에 따라 상분리형과 상일괄형 GIB 포스트부 모두 증가하는 경향을 보이며, 이는 SF_6 가스절연과 유사한 특성을 보인다. 즉 건조공기 절연시 절연파괴전압은 기존의 SF_6 가스절연과 비교하여 일정한 패턴을 갖고 있음을 확인하였다.

따라서 전계해석 결과 362 kV GIB에 대한 상용주파내전압 시험 시 SF_6 가스를 대체하여 건조공기의 사용 가능성을 알 수 있었다.

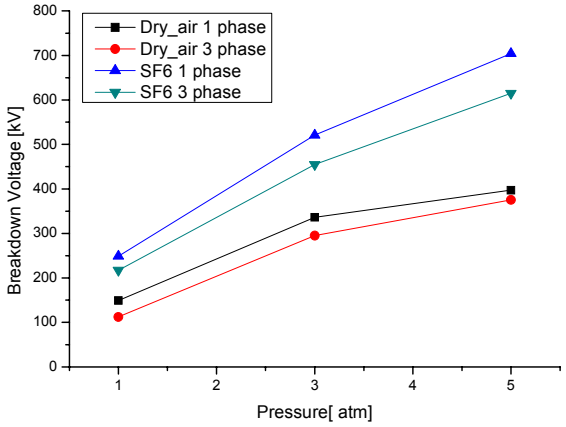

Fig. 3. Breakdown voltage of SF_6 gas and dry air insulated.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험장치

실험은 한전 현장에서 설치 운영하는 효성중공업제의 362 kV 상분리형 GIB와 상일괄형 GIB를 대상으로 건조공기와 SF_6 가스를 절연가스로 충진하여 실험하였다.

실험장치의 구성은 그림 4와 같으며 GIB에 전압을 가하는 내전압 시험기의 출력전압은 최대 800 kV이며 GIB에 충진하는 건조공기의 성분은 표 2에 따른다.

3.2 AC 상용주파 절연파괴 실험 및 특성

AC 상용주파 절연파괴 실험대상인 362 kV 상일괄형과 상분리형 GIB는 조립 후 진공작업을 실시하고 GIB 내부의 진공도를 확인하여 0.03 Torr 이하를 유지하였다. 건조공기와 SF_6 가스를 1기압에서 5기압의 조건으로 충진한 후 수분을 측정하여 10 ppm 이하를 유지하였다. AC 내전압 시험기를 통하여 60 Hz의 인가전압을 1 kV씩 증가하며 절연파괴전압을 측정하였다. 각 실험 후 GIB를 분해하여 절연파괴 위치를 확인하고 보수점검 및 재조립하여 가스를 충진하고 재실험하였다. AC 내전압 시험기의 인가전압 상승은 예상파괴전압의 70% 까지는 직선상승법을 적용하고, 이후는 1 kV/s의 계단상승법을 적용하여 실험하였다. 건조공기의 압력은 1, 3, 5기압을 적용하였으며 비교실험인 SF_6 가스절연의 경우 순도 95% 이상의 가스

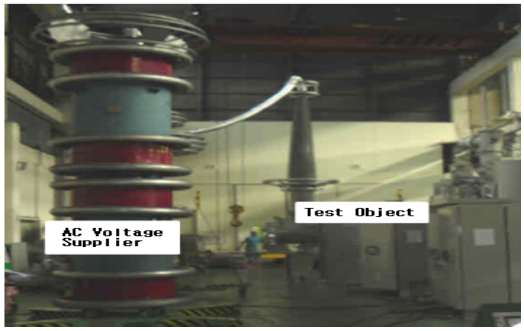

Fig. 4. AC withstand voltage test equipment configuration.

Table 2. Components of dry air used in the experiments.

No.	Component	Composition,
1	O_2	Less than 19.5%
2	N_2	80%
3	Dew point	Less than -65℃
4	Moisture contain	Less than 10 ppm

Table 3. AC breakdown voltage experimental results of dry air.

Condition / Pressure	Breakdown voltage by experiment [kV]*)		Breakdown voltage by simulation [kV]	
	1 phase	3 phase	1 phase	3 phase
1	149.05	112.28	151.2	113.9
3	336.26	295.31	341.5	297.6
5	397.16	375.49	403.2	377.9

*) 95% confidence interval minimum value

를 1기압으로 충진하여 실험하였고 절연파괴특성 실험에서 전압인가 횟수는 매 조건에서 30회 이상으로 하였다. 건조공기 사용 시 AC 상용주파 절연파괴 실험결과는 표 3과 같이 나타내었다.

실험을 통하여 절연파괴 실험식을 구하는 방법은 다양한 방법이 보고되고 있으나, 본 연구에서는 실험데이터의 신뢰도 구간 95%를 적용하여 최소 절연파괴전압을 사용하여 Allometry방법으로 실험식을 도출하였다. 도출된 362 kV 상분리형 GIB와 상일괄형 GIB의 AC 상용주파 절연파괴 실험식은 다음의 식 (1), (2)와 같다.

$$V_{bd} = 153.481\,P^{0.62989} \quad \text{362 kV 상분리형 GIB} \qquad (1)$$

$$V_{bd} = 115.5794\,P^{0.7708} \quad \text{362 kV 상일괄형 GIB} \qquad (2)$$

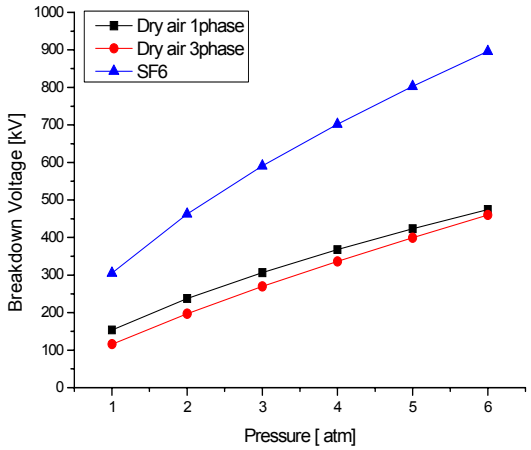

Fig. 5. The breakdown voltage of dry air and SF_6 gas.

건조공기 절연인 경우의 상기 AC 상용주파 절연파괴 실험식과 SF_6 가스 사용 시 전계해석에 의해 각각 계산된 절연파괴전압을 압력에 따라 그림 5와 같이 비교하여 등가성을 확인하였으며, 표 3에서 실제 실험에 의한 절연파괴전압과 전계해석에 의한 절연파괴전압을 비교하여 실험데이터의 정합성을 검증하였다. 이상의 실험결과 362 kV GIB에 대한 상용주파내전압 시험 시 SF_6 가스를 대체하여 건조공기의 사용이 가능한 것으로 판단된다.

건조공기를 사용하여 362 kV GIB의 상용주파내전압 시험 시 적용하기 위한 기준식을 도출하기 위해서는 상기 도출된 AC 상용주파 절연파괴 실험식 중 절연파괴전압이 낮은 362 kV 상일괄형 GIB에 대한 실험식을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 따라서 362 kV 상일괄형 GIB의 상용주파 절연파괴 실험식에 실험데이터의 확률편차 σ (0.984)와 효성중공업에서 상용주파내전압 계산시 적용하는 오차계수 K_1 (0.9)과 오손계수 K_2 (0.95)를 적용하여 상용주파 내전압 기준식을 다음과 같이 도출하였다.

$$V_s = 115.58P^{0.7708} \cdot \sigma \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (3)$$

3.3 결함에 의한 상용주파내전압 기준식 검증

도출된 362 kV GIB의 상용주파 내전압 기준식을 검증하기 위해 인위적으로 길이 1 cm, 두께 1 ㎜인 금속 이물질을 그림 6과 같이 362 kV 상일괄형과 상분리형 GIB 내에 부착한 후 절연파괴 실험을 시행하였다. 이물질의 부착위치는 전계해석결과 최고의 전계분포를 갖는 스페이서, 포스트 및 말단부에 부착하였다. GIB 내부의 건조공기 압력은 3기압의 조건으로 유지한 후 수분은 10 ppm 이하를 유지하였다. 표 4에 금속 이물질에 의한 AC 상용주파 절연파괴 실험결과를 나타내었으며 상용주파 내전압 기준식에 의해 산출한 전압 (226 kV)보다 낮은 전압에서 절연파괴가 발생함을 확인함으로써 상용주파 내전압 기준식의 적용 가능성을 검증하였다.

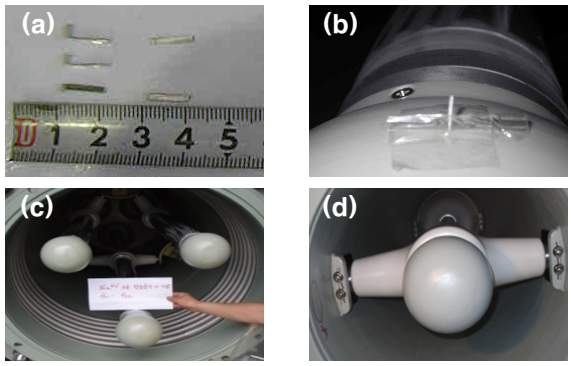

Fig. 6. Photos of metallic defect, and attached inside GIB. (a) Defects (b) Defect on 1 phase GIB (c) Defect on 3 phase end part of GIB (d) Defect on 1 phase end part of GIB

Table 4. AC breakdown voltage experimental results by metal defects.

Division	AC breakdown voltage [kV]	AC experimental breakdown voltage by equation [kV]
1 Phase type	185	226
	190	
3 phase type	175	
	176	
	174	
	168	
	200	

4. 결 론

본 논문에서는 실제 한전에서 사용하는 362 kV GIB에서 기존 SF_6 가스 대신 건조공기를 사용하여 상용주파전압에 의한 절연파괴 특성을 연구하였다. 상용주파전압을 인가하여 건조공기와 SF_6 가스의 절연파괴전압을 비교하여 등가성을 확인하고 건조공기에 대해서 상용주파 절연파괴 실험에 의한 전압과 전

계해석에 의한 절연파괴전압을 비교하여 실험 데이터의 정합성을 검증하여 건조공기에 대한 상용주파 절연파괴 실험식을 산출하였다. 이 실험식에 확률편차, 오차계수 및 오손계수를 적용하여 362 kV GIB에 대해 상용주파내전압 시험 시 기준식을 도출하였으며, 이물질에 의한 절연파괴 실험을 통해 상용주파 내전압 기준식에 대해 검증하였다. 따라서 본 연구를 통해 도출한 362 kV GIB에 대한 상용주파내전압 기준식을 이용하여 SF_6 가스를 대체하여 건조공기를 사용한 상용주파내전압 시험 가능성을 제시함으로써 한전 및 중전기기 제작사의 공장 검수시험 시 SF_6 가스가 대폭 절감될 것으로 기대되어 진다.

REFERENCE

[1] J.-D. Kim, W.-P. Song, and D.-E. Kim, *Proceeding of KIIEE*, **7**, 21 (1993).

[2] N. H. Melik and A. H. Qureshi, *IEEE Trans. Electr. Insul.* **EI-14**, 1 (1979).

[3] E.-H. Cho, B.-H. Goo, E.-K. Kim, and K.-S. Lee, *Trans. KIEE* **23**, 5 (2009).

[4] M. Landry, G. St-Jean, R. Jeanjean, and D. Demissy, *IEEE Trans. Power Deliv.* **3**, 1029, 1988.

[5] M. Hikita, T. Hoshino, T. Kato, N. Hayakawa, T. Ueda, and H. Okubo, *IEEE Int. Symp. Electr. Insul.* (IEEE, Montreal, Canada, 1996) pp. 117.

[6] C. Beyer, H. Jenett, and D. Klockow, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **7**. 234 (2000).

[7] K.-S. Lee, *Trans. KIEE,* **52C**, 8 (2003).

[8] N. Hayakawa, K. Hatta, S. Okabe, and H. Okubo, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **13**, 842 (2006).

[9] E.-H. Choi, K.-S. Park, J.-W. Kim, C.-H. Lim, and K.-S. Lee, *8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials ICPADM 2006,* (IEEE, Bali, Indonesia, 2006) p. 396.

[10] C.-H. Lee, Y.-S. Kim, J.-B. Kim, Y.-G. Choi, and K.-S. Lee, equal/unequal electric field breakdown characteristics of Dry air insulation, *Conf. KIIEE* (KIIEE, Korea, 2007) p. 247.