

72.5 kV 풍력 발전용 Dry-air Switchgear의 절연 특성

양찬희* · 오진석** · 박희태** · 김영일**

Insulation Characteristics of Dry-air Insulated Switchgear for 72.5 kV Wind Power Generation

Chan-Hee Yang*, Jin-Seok Oh**, Hee-Tae Park** and Young-il Kim**

Key Words : Dry-air (건조 공기), Switchgear (개폐장치), $E_{MAX,50}$ (50%방전확률 최대 전계), $E_{MAX,1KV}$ (1kV 인가시 최대 전계)

ABSTRACT

This paper describes the insulation breakdown characteristics of 72.5 kV dry-air insulated switchgear under development for installation in a wind power generator when a lightning impulse voltage is applied. For this study, the weak point of insulation due to the electric field concentration of the switchgear's internal shape was identified by finite element method (FEM) analysis, and the shape was actually simulated to measure and analyze the polarity of the lightning impulse voltage and the insulation breakdown characteristics according to the gas pressure at dry-air pressures of 0.1 Mpa to 0.45 Mpa. This study derives the maximum electric field with a 50 % discharge probability for each switchgear internal insulation vulnerable point based on the actual test and electrical simulation, which will be useful as reference data for supplementing and changing insulation design in the future.

기호설명

V : 전압 [kV]
 V_{BD} : 섬락 발생 전압(Break Down Voltage)[kV]
 d_{path} : 절연 최단 거리 [mm]
 E_{MAX} : 최대 전계 [kV/mm]

E_{mean} : 평균 전계 [kV/mm]
 $E_{MAX,1KV}$: 1kV 인가시 최대 전계 [kV/mm]
 $E_{MAX,50}$: 50%방전확률 최대 전계 [kV/mm]
 δ : 전계 이용율

1. 서론

현재 차단기, 개폐기를 포함한 개폐 장치의 절연 매질로는 SF₆ 가스를 주로 사용하고 있다. SF₆ 가스의 절연 강도가 높고, 열적 안정성, 열전도율 측면에서 우

수하나 온난화계수(GWP : Global Warming Potential)가 CO₂ 보다 약 23,900 배 높아 교토 의정서에 의해 온실가스로 분류되었으며 사용이 제한되고 있다.

따라서, SF₆ 가스를 대체할 수 있는 절연 가스가 연구되고 있으며, 그중에서도 Dry-air(건조 공기)가 친환경 절연 매질로서 주목받고 있다.

본 연구는 Dry-air를 절연 매질로 사용하는 72.5 kV 정격인 Switchgear의 절연 설계 과정에서 Dry-air의 절연 특성 파악과 더불어 추후 최적화 설계를 위한 기준 자료로 사용하기 위하여 진행되었다. [3, 7]

* 인택전기전자(주), 전력기이연구소
E-mail : didcksgml123@naver.com
DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2024.15.2.001>
Received : November 17, 2023, Revised : May 27, 2024,
Accepted : June 21, 2024

2. 뇌충격 시험 장치 및 방법, 결과

2.1 시험계

시험 Tank는 총 3개의 구획으로 나뉘어 있으며, 양 끝 구획의 내부 구조는 전압 인가를 위한 도체 Dummy로 되어있다. 가운데 위치한 구획에는 유한요소소법(FEM) 해석을 통해 선별 및 모의한 시험 전극을 배치하였다.

전압 인가 장치는 Robinson(社)의 1200 kV 용량 Impulse test system이다. (Fig. 1)

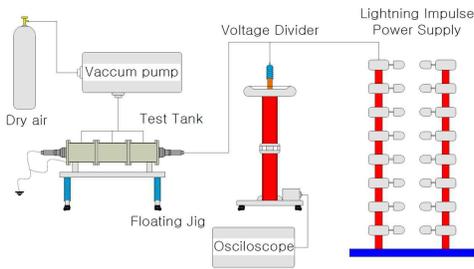


Fig. 1 Lightning impulse withstand voltage test configuration

2.2 시험 방법

Dry-air 중에서의 전극 형상 및 간격에 따른 뇌 임펄스 내전압 시험을 위하여 Test Tank 가운데 구획에 시험 전극을 수평 배치한 후, 한쪽은 High Voltage를 인가하고, 반대쪽은 접지 처리(Low voltage)하였다. 이때 설치되는 전극은, 유한요소해석(FEM)을 통해 Switchgear내 전계 집중으로 인한 절연 취약 지점을 선별한 후, 총 4개의 시험 전극 형상 (Obj.1 ~ Obj.4)을 선정 및 모의하였다. Obj.1 ~ Obj.3은 Switchgear 내에서 절연 파괴 시 기중으로 파괴가 진전될 수 있는 극간 형상을 모의하였으며, Obj.4는 절연 파괴 시 연면으로 파괴가 진전될 수 있는 절연물을 모의하였다. 각, 시험 전극별 최소 절연거리 d_{path} 는 Table 1과 같다. (Fig. 2)

Dry-air를 시험 Tank에 주입하기 위해, 진공 펌프를 사용하여 Tank 내부 및 가스 튜브 내부를 5×10^{-2} Torr의 중진공(Medium Vacuum) 상태로 만들고, 가스를 4.5 bar·G 까지 주입하였다.

시험 전압은 IEC 62271-1 (2021.10 Ed 2.1)에 명시된 정격 뇌 임펄스 내전압 시험 전압 325 kV 에 자체 안전율 5 %를 추가 적용하여 약 340 kV로 시험하였다. [5, 6]

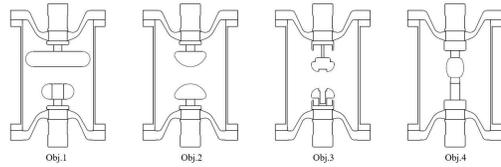


Fig. 2 Placement of test electrodes

Table 1 Insulation distance(d_{path}) by electrode

	Obj.1	Obj.2	Obj.3	Obj.4
d_{path} (Per Unit)	1	1	1	1.35

전압 인가시 파형의 파두는 $1.2 \mu s (\pm 30 \%)$, 파미는 $50 \mu s (\pm 20 \%)$ 를 준수하였다. [5, 6]

전압 인가는 낮은 전압에서 단계적으로 전압을 상승시키는 방법을 적용하였으며, 매 SET의 첫 회 인가 전압은 정격 시험 전압보다 현저히 낮은 전압인 250 kV를 인가하고 단계적으로 승압하여 시험 전압에 도달하면 15회 연속으로 인가하여 확인하였다. [5, 6]

인가전압은 Voltage Divider로 분압 후, 설치된 Oscilloscope (band width : 100 MHz, Sampling rate : 2 GS/s)를 통해 관측하였다.

시험 전압에서 정·부극성 임펄스 전압 인가 중 섬락이 발생하지 않은 경우, 시험 전극을 배치한 구획의 가스를 1.0 ~ 4.5 bar·G 범위에서 단계적으로 저감시키며 재시험하였다. 만일, 초기 압력의 50 % 이상 저감시킨 2.0 bar·G 이하의 압력에서도 섬락이 발생하지 않으면, 전압을 400 kV까지 단계적으로 승압시켜 섬락 전압을 확인하였다. 400 kV의 전압에서도 섬락이 일어나지 않으면 전압을 상승시키지 않고 시험 구획의 압력을 1.0 bar·G 까지 저감시킨 후 재시험 하였다.

시험 중 섬락 발생 시, 전압을 수차례 인가하여 해당 압력에서 발생 확률이 50 %가 되는 전압(V_{50})을 확인하였으며, 추가적으로 압력을 저감시켜 시험하지 않았다.[3, 6]

2.3 뇌 임펄스 내전압 시험 결과

뇌 임펄스 내전압 시험을 통해 Test tank에 모의한 형상 4개분에 대해 Dry-air 압력 저감 시의 절연 특성을 확인하였다. 시험 시에는 Test electrodes와 Test tank 사이 전하 이동 발생 가능성을 배제하기 위하여 Floating jig를 사용하여 Test tank와 대지를 분리한 후 진행하였다.(Fig. 1)

기준 압력인 4.5 bar·G에서 압력을 저감시키며 시험한 결과, Obj.1, 2, 4의 경우는 1 bar·G에서 섬락이 발생하였으며, Obj.3의 경우는 2 bar·G에서 섬락이 발생하였다.

시험을 통해 확인된 형상별 50 % 섬락전압값(V_{BD})은 Table 2와 같다.

Table 2 Verification of Insulation V_{BD} by Experiment

		Obj.1	Obj.2	Obj.3	Obj.4
V_{BD} (kV)	p.p*	330	395	-	375
	n.p**	300	-	395	350
V_{BD} pressure (bar·G)		1	1	2	1

p.p* : positive polarity
n.p** : negative polarity

3. 유한요소법을 통한 전계 해석

3.1 최대 전계 및 전계 이용률

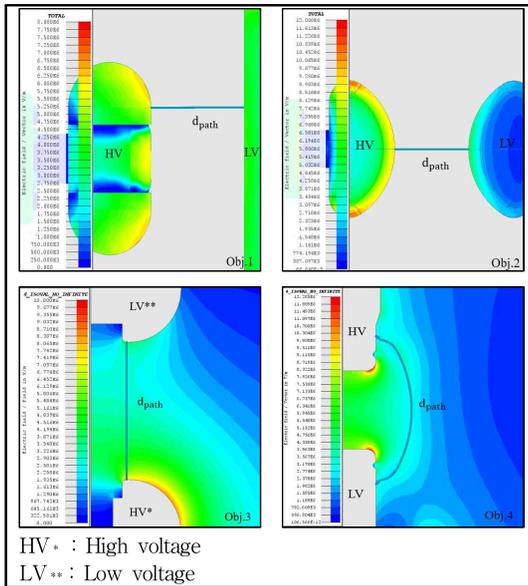


Fig. 3 Placement of test electrodes

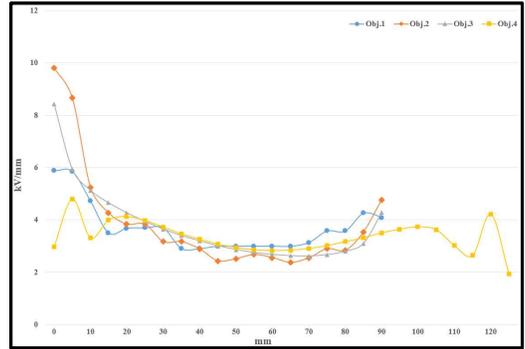


Fig. 4 Example of analysis results (on d_{path})

절연 취약 지점 파악을 위해 Switchgear 전체에 대한 3차원 유한요소해석을 실시하였으며, 전계 집중도가 높았던 전극 형상 4개 개체를 선별하였다. 선별된 전극 형상은 실제 시험 구성이 가능한 형태로 Test tank에 수평 배치로 모의하여 2차원 및 3차원 유한요소해석을 추가로 진행하였다. 해석시에는 전극 한쪽에 전압을 인가하고 반대쪽 전극에 접지한 상태를 모의하였으며, 해석 결과로 도출되는 최대 전계는 E_{MAX} 라고 규정했다. (Fig. 3, Fig. 4)

추가적으로, 선별된 전극의 최대 전계에 대한 전계 평응도를 파악하기 위해 전계 이용률을 산출하였다. 전계 이용률은 최대 전계에 대한 평균 전계의 비이다. 이때, 최대 전계(E_{MAX})는 각 형상별 전압 인가부(High voltage)와 접지부(Low voltage) 사이에 절연 최단 거리(d_{path}) 상에서의 최대 전계값이며, 평균 전계(E_{mean})는 d_{path} 상에서 모든 전계값들의 산술평균이다.

전계 이용률은 0과 1 사이의 수로 표현되며, 전계 이용률을 구하는 식은 식 (1)과 같다.

$$\text{전계 이용률}(\delta) = \frac{V}{dE_{MAX}} = \frac{\text{평균전계}(E_{mean})}{\text{최대전계}(E_{MAX})} \quad (1)[3]$$

전계 이용률이 1에 가까울수록 전극 형상의 전계 평응도가 높음을 알 수 있으며, 이를 통해 절연 설계 중 부품의 전극 형상과 배치 판단 시에 적합 여부를 판단하는 근거를 제공할 수 있다.

해석을 통해 도출된 E_{MAX} (최대 전계), $E_{MAX,1kV}$ (1 kV 인가시 최대 전계) 및 δ (전계 이용률) 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 Electric field analysis result

	Obj.1	Obj.2	Obj.3	Obj.4
E_{MAX} (kV/mm)	5.97	9.8	8.43	4.8
$E_{MAX,1kV}$ (kV/mm)	0.018	0.03	0.025	0.014
δ	0.60	0.37	0.43	0.69

4. 시험, 해석 결과에 따른 절연 특성 검토

4.1 시험, 해석 결과에 따른 절연 특성

유한요소 해석 결과와 뇌 임펄스 전압 시험 결과를 통해 절연이 파괴되어 섬락이 발생할 확률이 50 % 일 때의 최대 전계($E_{MAX,BD}$)를 산출하였다. 산출식은 식(2)와 같다.

$$E_{MAX,BD} = V_{BD} \times E_{MAX,1kV} \quad (2)[1]$$

$E_{MAX,BD}$ 값은 절연 파괴의 기준이 되는 전계 값을 제공하며, 형상별 $E_{MAX,BD}$ 값은 Table 4와 같다.

Table 4 $E_{MAX,BD}$ by shape of electrode

	Obj.1	Obj.2	Obj.3	Obj.4
$E_{MAX,BD}$	5.4	11.85	9.87	4.9
V_{BD} Pressure (bar · G)	1	1	2	1

5. 결론

본 연구에서는 풍력발전기 내에 설치하기 위해 개발 중인 Dry-air 절연 Switchgear의 절연 설계 시 기준 자료로 활용하기 위해 유한요소해석과 뇌 임펄스 내전압 시험을 진행했다. 그 결과로, Switchgear 내부에 존재하는 절연 취약 지점 파악과 각 형상 별 전계 평등 정도를 해석을 통해 파악할 수 있었으며, 뇌 임펄스 내전압 시험을 통해 절연 파괴가 일어나는 압력 및 전압을 알 수 있었다. 또한, 해석과 시험의 결과를 조합하여 절연 파괴가 발생하는 전계 값을 도출할 수

있었다.

연구를 통해 얻은 결과는, 추후 발생할 수 있는 Switchgear 내 부품 설계 보완 시에 절연 설계 기준 자료로서 유용한 정보로 사용될 것이다.

후기

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : 20221A1010001C, 과제명 : (세부3)해상 풍력 연계 66kV급 핵심기기 및 진단기술 개발)

참고문헌

- [1] Nam, S. H. and Gang, H. G., 2010, "A study on the analysis of insulation strength characteristics of Dry-air by pressure for the development of environment-friendly high-pressure distribution board", KIEE(The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers) Vol. 60, No.8, pp.1560 ~ 1565, 2011.
- [2] Lee, B., Yoo, Y. Y., Kim, D. G. and Lee, B. H., 2010, "Insulation characteristics of SF6 and Dry-air for Lightning Impulse voltage". JIEIE(Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers) Vol. 24, No.8, pp.142 ~ 149, 2010.
- [3] Bang, S. M., Lee, O. Y., Kim, J. I., Gang, J. O., Lee, H. S., Go, T. G. and Gang, H. G., 2010, "Insulation characteristics of GN2 for eco-friendly high voltage power equipment development", KIEE(The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers) Vol. 63P, No. 4, pp. 356 ~ 360, 2014.
- [4] H. Saitoh, K. Morita, T. Kikkawa, N. Hayakawa and H.Okubo, 2002. 8 "Impulse partial Discharge and Breakdown Characteristics of Rod-Plane Gaps in N2-SF6 Gas Mixtures", IEEE Trans. on DEI, Vol.9, No.4, pp.544~550.
- [5] IEC, 2021, "High-voltage switchgear and controlgear Part 1 : Common specifications for alternating current switchgear and controlgear, IEC 62271-1 Standard, 2.1 Edition, International

Electrotechnical Commission.

- [6] IEC, 2010, “High-voltage test techniques Part 1 : General definitions and test requirements, IEC 60060-1 Standard, 3.0 Edition, International

Electrotechnical Commission.

- [7] Government of the Republic of Korea, 2020, “South Korea’s 2050 Carbon Neutral strategy”.