

600 kV 직류 초고압 측정표준 구축

이상화*, 이결*, 김성태*, 이형규*

Development of a 600 kV DC Ultra-High Voltage Measurement Standard

Sang-Hwa Lee*, Gyu Lee*, Seong-Tae Kim*, and Hyung-Kew Lee*
Korea Research Institute of Standards and Science

Abstract - 본 연구에서는 직류 600 kV급 초고압 발생기 및 분압기의 교정을 위한 이동형 국가 측정표준 시스템을 확립하였다. 기존 ± 200 kV 수준의 교정 범위를 확장하기 위해 호주 국가표준기관인 NMIA의 150 kV 분압기 CA150 모듈 4개를 직렬로 구성하여 600 kV 교정시스템을 설계하였다. NMIA로부터 본 시스템의 교정을 통하여 0.02 % 불확도 수준의 측정 소급성과 신뢰성을 확보하였다. 또한 구축된 이동형 표준기를 활용하여 시험 기관이 보유한 1,200 kV급 직류 초고압 발생기에 대하여 600 kV까지 현장 평가를 수행하였다. 평가 결과로 출력값과 측정값의 최대 편차는 0.2 %, 그리고 측정불확도는 0.2 % 이내로 평가되어 시스템의 현장 적용 타당성을 검증하였다. 또한 향후 CA150 모듈의 추가 확장을 통해 1,000 kV 이상의 초고압 측정의 확장 가능성도 확인하였다.

1. 서 론

전 세계적으로 신재생 에너지 연계 및 장거리 대용량 전력 전송의 필요성이 대두됨에 따라, 초고압 직류송전(HVDC) 시스템의 도입이 가속화되고 있으며, 이에 따른 직류 고전압 측정 및 평가기술의 중요성이 요구되고 있다. 고전압 기술은 산업 전력 망뿐만 아니라 고에너지 물리학, 가속기, 임펄스 전압 발생 장치 등 다양한 첨단 과학 분야의 핵심 기반 기술이다. 특히 지중 및 해저 송전용 케이블의 절연 성능 평가를 위해 ± 800 kV 이상의 가혹한 직류 초고압 시험 환경이 현장에서 요구되고 있다[1].

한국표준과학연구원 조셉슨 직류 전압 표준(Josephson Voltage Standard)에 소급된 직류 1 kV를 기준 전압으로 사용하여, 고전압 분압비 평가 기법과 국가 측정 소급체계를 확립해 왔다[2]. 그동안 ± 200 kV 범위의 직류 고전압 표준을 유지하며 산업체 및 공인시험기관에 교정 서비스를 제공해 왔으나, 국내 중전기 산업의 고도화에 따라 더 높은 전압 대역에 대한 현장 측정 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 본 논문에서는 이러한 산업적 요구에 부응하기 위해 새롭게 확립된 600 kV 이동형 직류 초고압 국가 측정 표준기의 설계, 구성 방식 및 현장 교정 적용 결과를 정리하였다.

2. 본 론

2.1 직류 초고압 분압기 모듈

직류 초고압 정밀측정에 사용되는 고전압 분압기(Divider)는 저항 분할 방식을 채택하고 있으며, 본 연구에서는 호주 NMIA에서 개발한 150 kV급 고정밀 분압기 모듈인 CA150 모듈을 적용하였다[3]. 단일 CA150 모듈은 150개의 개별 정밀 저항기로 구성되어 있으며 단일 모듈의 총저항값은 225 M Ω 이다. 하나의 모듈로도 저전압 압과 함께 독립적인 분압기로 사용할 수 있다. CA150 모듈은 테프론 재질로된 원기둥의 몸체에 개별 저항을 금속 튜브에 배치하고 나선형 모양으로 구성하였다. 이러한 설계는 고전압 인가 시 발생하는 코로나 방전을 억제하고 누설 전류를 최소화할 수 있다[4].

2.2 직류 600 kV 초고압 표준 분압기 구성

구축된 600 kV 초고압 분압기는 그림 1 (A)에 나타난 CA150 모듈 4개를 수직으로 적층한 직렬 구조로 설계되었다. 이 구성에 따른 시스템의 명목 분할비(Nominal Ratio)는 60,000:1로, 600 kV 전압 인가 시 저전압 압 양단에 10 V의 분압 전압이 발생하므로 고정밀 멀티미터를 사용하여 초고압 발생기의 출력을 측정할 수 있다.

구축된 600 kV 초고압 분압기의 유효성 및 전압 의존성을 세밀히 검증하기 위해 호주 NMIA에서 기존 분압기와 비교방법을 사용한 교정을 수행하였다. 교정에 사용된 NMIA의 기준 분압기는 CA150 모듈 6개를 직렬 연결한 900 kV급 시스템(C)이며, 구축된 600 kV 분압기(B) 또한 동일한 모델인 CA150 모듈로 구성되었다. 교정 결과로 구축된 600 kV 표준 분압기의 측정 불확도는 0.02 % 이하로 평가되어 우수한 성능을 확인하였다.



〈그림 1〉 직류 600 kV 분압기의 NMIA 교정

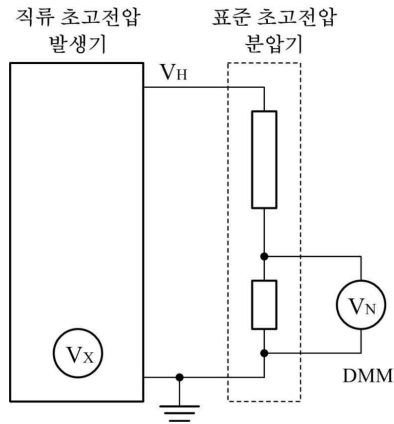
2.3 직류 초고압 발생기의 교정 방법

그림 2에 직류 초고압 발생기의 교정 방법의 도식을 나타내었다. 직류 초고압 발생기의 출력 V_H 를 표준 초고압 분압기의 고전압 전극에 연결하고 분압기의 저전압 단자 양단 전압 V_N 을 디지털멀티미터(DMM)를 사용하여 측정한 후 표준 분압기의 비율을 곱하여 초고압 발생기의 출력전압을 교정한다. 교정결과, 측정편차를 얻기 위한 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\Delta e = V_X - \Gamma_N \times V_N$$

여기서,

 Δe : 측정편차 V_X : 직류 초고압 발생기의 출력전압 설정값 Γ_N : 표준 초고압 분압기의 분압비 V_N : DMM으로 측정한 표준 분압기의 저전압 단자 측정값



〈그림 2〉 직류 초고압 발생기 교정 방법

2.4 구축된 직류 초고압 표준의 현장 검증

초고압 분압기의 특성 평가로부터 확립된 600 kV 이동형 표준 분압기의 현장 검증을 위해 한 시험기관으로 이동하여 1,200 kV급 직류 초고압 발생기의 출력을 이용하여 현장 검증을 하였다. 그림 3은 현장 교정을 위한 시스템의 설치를 보여준다. 여기서 (A)는 본 연구로 구축된 600 kV 표준 분압기이며 (B)는 구축된 표준기의 현장 검증을 위해 사용된 직류 초고압 발생기이다.

현장 검증을 위해 직류 초고압 발생기의 출력전압을 점진적으로 60 kV 단위로 증압시키며 최대 600 kV 구간까지 수행하였다. 평가 결과, 인가된 직류 초고압 발생기의 출력값과 측정 결과 간의 최대 편차는 0.2 % 수준으로 나타났으며, 전체 측정 구간에서의 측정불확도는 0.2 % 이하로 산출되었으며 표 1에 나타내었다. 초고압 발생기의 평가 결과는 표 2에 나타내었다.

〈표 1〉 직류 600 kV 초고압 측정의 불확도 총괄표

불확도 요인	불확도(%)
직류 고전압 분압기 교정성적서	0.0167
직류 고전압 분압기 선형성	0.02
직류 고전압 분압기 장기안정도	0.001
디지털멀티미터 교정성적서	0.00025
디지털멀티미터 안정도	0.00571
반복측정에 의한 A형 불확도	0.05
직류 초고압 발생기의 분해능	0.029
합성표준불확도, u_c	0.064
확장불확도 ($k=2$), U	0.13



〈그림 3〉 직류 초고압 표준의 현장 검증

〈표 2〉 직류 초고압 표준기의 현장검증 결과

발생기 출력 (kV)(A)	측정결과 (kV)(B)	측정편차 (%) (B-A)
60.18	60.07	-0.2
120.3	120.2	-0.1
180.3	180.3	0.0
240.7	240.7	0.0
300.9	300.9	0.0
360.5	370.5	0.0
420.5	420.5	0.0
480.6	480.6	0.0
539.2	539.0	0.0
-60.39	-60.45	0.1
-120.6	-120.7	0.1
-180.4	-180.5	0.1
-240.0	-240.0	0.0
-300.9	-300.8	0.0
-361.3	-361.0	-0.1
-420.2	-419.8	-0.1
-481.8	-481.3	-0.1
-540.1	-539.7	-0.1
-601.1	-600.1	-0.2

3. 결 론

본 연구를 통해 직류 최대 600 kV 초고압을 정밀하게 평가할 수 있는 이동형 직류 초고압 교정용 국가 표준기를 성공적으로 확립하였다. 호주 국가표준기관(NMIA)의 교정을 통하여 0.02 % 이하의 불확도 수준을 확보하였고, 실제 현장에서의 초고압 발생기 교정을 통해 안정적인 현장 교정 수행 능력을 실증하였다. 향후 본 시스템을 기반으로 국내 전력 기기 산업체 및 공인시험기관에 직류 600 kV 대역까지 확장된 고품질의 교정 서비스를 제공함으로써, 관련 산업의 기술 경쟁력 향상에 기여할 수 있는 확고한 기반이 마련되었다. 또한 향후 CA150 모듈의 추가 확장을 통해 1,000 kV 이상의 초고압 측정의 확장 가능성도 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국표준과학연구원(KRISS) “지능형 전력망 표준체계 확립을 위한 국가 최상위(Primary) 측정시스템 핵심 기술 개발”(KRISS-2026-GP2026-0011)의 지원을 받아 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Klaus Schon, “High Voltage Measurement Techniques”, Springer Nature Switzerland AG, pp 43, 2019.
- [2] Sang Hwa Lee, Kwang Min Yu, Jeong Hong Kang, Munseog Kim, Kyu Tae Kim, “A Josepson voltage-traceable DC high-voltage divider evaluation using the binary step-up method”, *Measurement*, **45**, pp 488-492, 2012.
- [3] Y. Li, M. K. Eiriweera, F. S. Emms and A. Lohrshy, “A Development of precision DC high-voltage dividers”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 7, pp. 211-2216, 2011.
- [4] J. H. Park, “Special shielded resistor for high-voltage dc measurements,” *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, vol. 66C, no. 1, pp. 19 - 24, Jan. - Mar. 1962.