

HVDC 케이블의 임펄스 중첩 시험회로 구성과 해석

박승록, 김정년, 전승익, 안용호
LS전선 전력연구소, 한전전력연구원*

Analysis and Construction of Superimposed Test Circuit for HVDC Cable

S. L. Park, J. N. Kim, S. I. Jeon, Y. H. Ahn*
Electric Power R&D Center, LS Cable Ltd., KEPRI*

Abstract - 1970년대 이후 반도체 기술의 발달로 Thyristor Valve 가 기존의 Mercury Arc Valve를 대체 하면서 HVDC 기술이 급격히 향상되고 교류송전에 비해 직류송전이 갖는 여러 가지 이점 때문에 최근 HVDC 송전이 점점 증가하고 있는 추세에 있다. 본 연구에서는 2000년에 발표된 CIGRE 189의 "800kV급까지의 HVDC 송전케이블의 전기적 평가 권고안"에 준하여, 제조된 케이블의 전기적 평가를 위한 고전압 임펄스 중첩회로를 모듈별로 구성하고 그 회로의 동작을 시뮬레이션 프로그램으로 모의하고 전기적 시험회로의 구성가능성을 평가 하였다.

1. 서 론

1954년 스웨덴 본토와 발틱해의 Gotland사이에 처음 포설된 이래로 HVDC 케이블 포설 및 송전용량은 꾸준히 증가하고 있다. 특히 1970년대 이후 반도체 기술의 발달로 Thyristor Valve가 기존의 Mercury Arc Valve를 대체 하면서 HVDC 송전기술이 급격히 향상되었고 교류송전에 비해 직류송전이 갖는 여러 가지 장점은 HVDC 송전의 증가를 가속화하고 있다.[1]

이러한 HVDC 송전기술은 케이블의 제조[2]와 포설, 교류와 직류의 상호 변환을 가능하게 하는 전력변환기술 등 여러 가지 분야가 결합된 기술분야 라고 할 수 있다.

한편, 최근의 송전전압은 초고압화 경향으로 현재 국내에서는 765[kV] 가공송전이 시운전중에 있다. 지중 및 해양 케이블 역시 송전용량의 증가에 따라 초고압화 경향으로 옮겨가고 있고 해저에 많이 포설되고 있는 HVDC 케이블 또한 초고압화 경향을 띄고 있다.

따라서, HVDC케이블 및 접속함의 전기적 시험평가방법도 송전전압의 증가에 따라 개정 되었다.

본 연구에서는 2000년에 발표된 CIGRE 189의 "800kV급까지의 HVDC 송전케이블의 전기적 평가 권고안"에 [3] 준하여, 제조된 케이블의 전기적 평가를 위한 고전압 임펄스 중첩회로를 모듈별로 구성하고 그 회로의 동작을 과도해석 프로그램인 EMTP로 모의하여 전기적 시험회로의 구성가능성을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 전기적 평가 권고안

아래 표1에 CIGRE 189의 전기적 평가권고안중 본 연구에서 다루고자하는 고전압 임펄스 중첩시험 부분을 표시하였다. 고전압 임펄스 중첩시험의 목적은 직류고전압으로 운전되고 있는 HVDC 케이블에 스위칭 써지(Switching Surge) 또는 뇌 임펄스(Lighting Impulse)가 침입시 케이블의 이상 유무를 시험하기 위한 것이다.

시험 항목	시험 방법
부하주기시험 (Loading Cycle Test)	도체와 쉬스(sheath)사이에 +DC($U_T = 1.8 \times U_0^*$) 10주기, -DC ($U_T = 1.8 \times U_0$) 10주기의 과동전 시험을 실시, 이 때 1 주기는 8시간의 도체가열과 16시간의 냉각으로 구성.
극성반전시험 (Polarity Reversal Test)	부하주기시험후 +DC($U_{TP} = 1.4 \times U_0$), -DC($U_{TP} = 1.4 \times U_0$)의 전압을 4시간 간격으로 극성 반전 시키는 과동전시험을 10주기 동안 실시, 이 때 1주기는 8시간의 도체가열과 16시간의 냉각으로 구성.
임펄스중첩시험 (Switching Surge*)	극성반전 시험후 -DC(U_0)전압을 2시간 인가한 후, 전압이 인가된 상태에서 10회의 (+) 임펄스 전압($U_{P2} = 1.15 \times SSL$)을 2분 이상 간격으로 인가. 같은 방법으로 +전압에 대한 (-) 임펄스 전압($U_{P2} = 1.15 \times SSL$) 인가 시험 실시
임펄스중첩시험 (Lighting Impulse*)	극성반전 시험후 -DC(U_0)전압을 2시간 인가한 후, 전압이 인가된 상태에서 10회의 (+) 임펄스 전압($U_{P1} = 1.15 \times LIPL$)을 2분 이상 간격으로 인가. 같은 방법으로 +전압에 대한 (-) 임펄스 전압($U_{P1} = 1.15 \times LIPL$) 인가 시험 실시

* U_0 : 케이블 운전전압

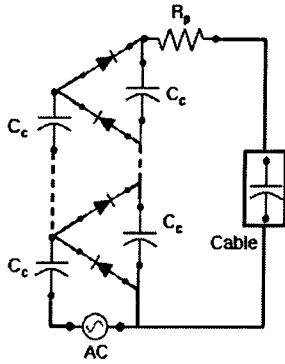
* Switching Surge Test waveform : time to crest $T_{CR} = 250\mu s \pm 20\%$, time to half value $T_2 = 2500\mu s \pm 60\%$ by IEC 60 & 230

* Lighting Impulse Test waveform : time to crest $T_1 = 1-5\mu s$, time to half value $T_2 = 50 \pm 10\mu s$ by IEC 60 & 230

표 1. HVDC 케이블의 전기적 평가권고안, CIGRE 189.
Table1. Recommendations For Tests Of Power Transmission DC Cables For Rated Voltage Up To 800 kV, CIGRE 189

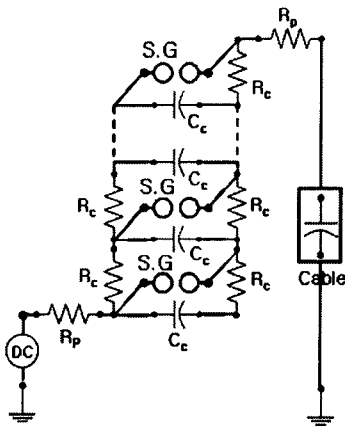
표에서 보는 것처럼 부하주기시험(Loading Cycle Test)과 극성반전시험(Polarity Reversal Test)은 극성반전이 가능한 고전압 직류 발생기가 있으면 가능한 시험들이다. 하지만 임펄스 중첩시험은 고전압 직류발생기와 고전압 임펄스 발생기가 있어야 하고 이들을 적절히 조합하여 원하는 파형과 크기의 중첩 전압을 발생시키는 회로를 구성하여야 한다. 따라서 고전압 직류발생기와 고전압 임펄스 발생기의 출력전압을 모듈별로 모의시험하고 2개의 모듈을 적절히 조합하여 원하는 출력을 발생시키는 회로구성의 가능성을 시험한다.

2.2 고전압 직류 및 임펄스 발생기



- Cc : Charging Capacitor
- Rp : Protecting Resistor
- AC : AC Source

그림 1. 고전압 직류 발생기
Fig. 1 High Voltage DC Generator



- DC : DC Source
- Rp : Protecting Resistor
- Rc : Charging Resistor
- Cc : Charging Capacitor
- S.G : Spark Gap

그림 2. 고전압 임펄스 발생기
그림 2. High Voltage Impulse Generator

그림 1은 고전압 다이오드와 커패시터를 여러단 연결하여 구성할 수 있는 고전압 직류발생기의 일반적인 구성을 보이고 있다. 그 구성은 비교적 간단하여 고전압 다이오드와 커패시터를 적절한 단만큼 연결하여 원하는 고전압 직류전압을 얻을 수 있다.

그림 2는 스파크갭(Spark Gap)과 충전커패시터 및 충전저항으로 구성된 대표적인 임펄스 발생기를 보이고 있다. 고전압 직류 발생기에서 발생된 직류고전압을 병렬로 연결된 충전커패시터에 각각 충전시키고 스파크갭의 방전에 의해 충전커패시터에 충전된 직류고전압을 순간적으로 직렬 방전시켜 고전압 임펄스를 발생시킬 수 있다. 그림 3과 4는 고전압 임펄스 발생기의 충전단을 5단으로 하고 각단의 직류충전전압을 +200[kV]로 했을 때

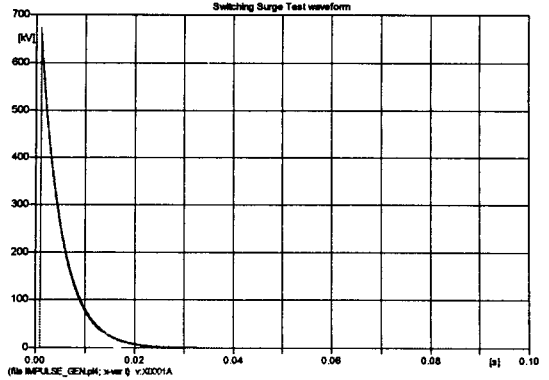


그림 3. 스위칭 써지 시험전압 파형
Fig 3. Switching Surge Test waveform

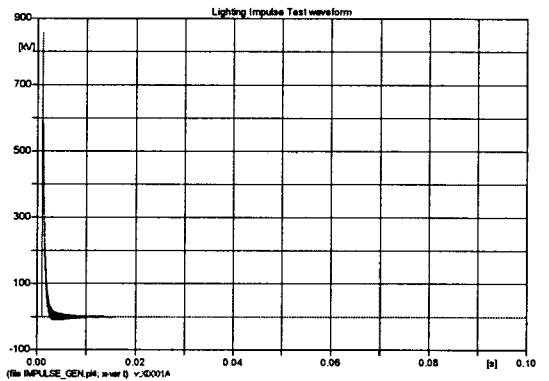


그림 4. 뇌 임펄스 시험전압 파형
Fig 4. Lighting Impulse Test waveform

출력파형을 보이고 있다. 고전압 임펄스의 펄스폭과 상승시간은 IEC 60&230에 따른 것으로 구체적인 값들은 표 1.의 하단에 표시되어 있다.

2.3 고전압 임펄스 중첩시험기의 구성과 시뮬레이션

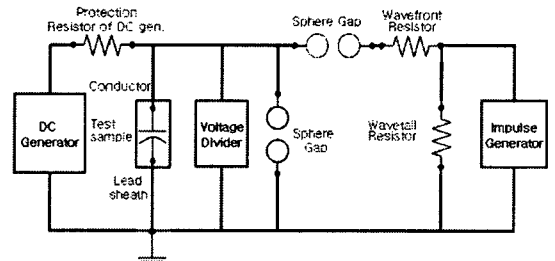


그림 5. 고전압 임펄스 중첩시험기로 개략도
Fig 5. Schematic of High Voltage Superimposed Impulse Test Circuit

그림 5는 HVDC 케이블의 고전압 임펄스 중첩시험을 위해 각 모듈을 병렬 구성하고 전압 분배기와 보호 및 분리를 위한 구갭(Sphere Gap)을 적절히 배치한 시험회로의 개략도이다. 개략도는 크게 고전압 직류발생기(DC Generator)와 보호저항(Protection Resistor), HVDC 케이블시료(Test Sample), 전압분배기(Voltage Divider),

보호용 구갯(Sphere Gap), 고전압 임펄스 발생기

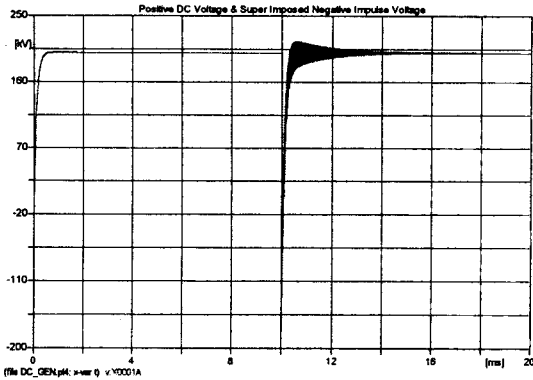


그림 6. 고전압 임펄스 중첩시험을 모의한 파형(직류고전압 : +200[kV], 임펄스고전압 : -1000[kV])
Fig 6. Simulated Waveform of High Voltage Superimposed Impulse Test.(High Voltage DC : +200[kV], Peak Impulse Voltage : -1000[kV])

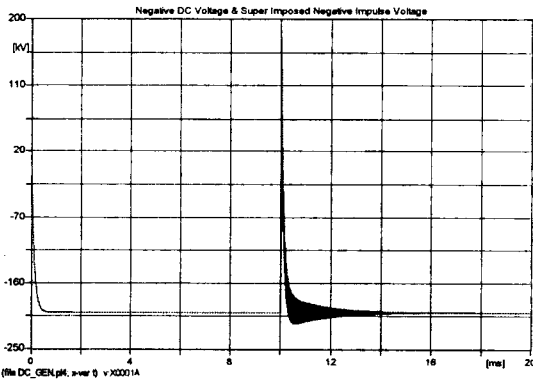


그림 7. 고전압 임펄스 중첩시험을 모의한 파형(직류고전압 : -200[kV], 임펄스고전압 : +1000[kV])
Fig 7. Simulated Waveform of High Voltage Superimposed Impulse Test.(High Voltage DC : -200[kV], Peak Impulse Voltage : +1000[kV])

(Impulse Generator)와 상승시간 및 펄스폭 조절용 저항(Wavefront and Wavetail Resistor)으로 구성되어 있다. 표 1. 에서와 같이 고전압 임펄스 중첩시험은 스위칭써지(Switching Surge Withstand)를 모의한 시험과 뇌 임펄스(Lighting Impulse Withstand)를 모의한 두가지의 시험이 있다. 시험은 직류고전압이 충분히 긴시간(2시간)인가된 후 인가된 직류전압과 반대극성의 고전압 임펄스를 동시에 인가한다. 이때 인가하는 고전압 임펄스의 파형은 IEC 60&230에 규정된 값을 따른다. 그림6은 +200[kV]의 직류고전압이 인가된 상태에서 최대치 -1000[kV]의 뇌 임펄스(Lighting Impulse)가 침입한 경우를 모의했을 때 HVDC 케이블 양단에 나타나는 전압파형이다. 케이블에 인가되는 상승시간이 빠른 고전압 임펄스의 영향으로 펄스 하강부에 중첩된 진행파가 나타나는 것이 보이고 최대치는 약 -400[kV]까지 인가된다. 이것은 고전압 임펄스 발생기의 충전전압이 -1000[kV]이나 회로내부의 각종 변수들과 케이블내에서 전압파의 투과와 반사의 영향으로 최대값이 줄어드는 것으로 사료된다. 따라서 시험권고안에 해당되는 고전압 임펄스를 인가하기 위해서는 고전압 임펄스 중첩시험회로 내부의

회로정수들과 시험하고자하는 케이블의 정수값들을 정확히 알고 있어야 하며 그에 따라 고전압 임펄스 발생기의 충전전압을 결정해야 한다.

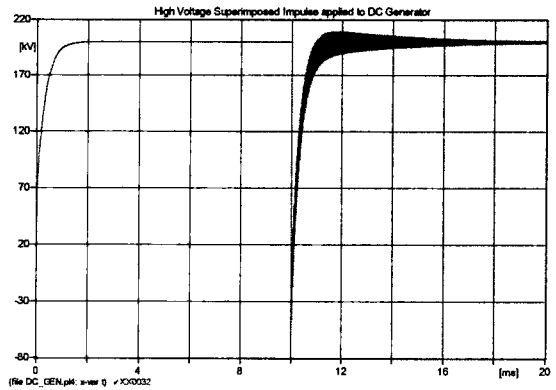


그림 8. 고전압 임펄스 중첩시험시 직류고전압 발생장치에 인가되는 전압파형(직류고전압 : +200[kV], 임펄스고전압 : -1000[kV])
Fig 8. Waveform Applied to High Voltage DC Generator in Superimposed Impulse Test.(High Voltage DC : +200[kV], Peak Impulse Voltage : -1000[kV])

그림7은 -200[kV]의 직류고전압이 인가된 상태에서 최대치 +1000[kV]의 뇌 임펄스(Lighting Impulse)가 침입한 경우를 모의했을 때 HVDC 케이블 양단에 나타나는 전압파형이다. 그림 6의 경우와 마찬가지로 펄스 하강부에 중첩된 진행파가 나타나는 것이 보이고 임펄스의 최대치는 약 +400kV까지 인가된다. 그림8은 +200[kV]의 직류고전압이 인가된 상태에서 최대치 -1000[kV]의 뇌 임펄스(Lighting Impulse)가 침입한 경우를 모의했을 때 고전압 직류발생장치 양단에 인가되는 임펄스 전압파형이다. 약 250kV의 역전압이 인가되는 것을 볼 수 있고 이때 고전압 직류발생장치의 출력저항값 및 내전압 한계값을 고려하여 그림 5의 직류고전압 발생장치의 출력단에 연결하는 보호저항값을 적절히 결정해야 한다.

3. 결 론

본 연구에서는 HVDC 케이블의 고전압 임펄스 중첩회로시험의 동작을 과도해석 프로그램인 EMTP로 모의하여 전기적 시험회로의 구성가능성을 평가하였고 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

모의시험에 의해 회로내의 정확한 정수들을 알고 있을 경우 고전압 임펄스 중첩시험시 규정된 임펄스의 최대치가 인가되기 위한 고전압 임펄스 발생기의 충전전압을 결정할 수 있다. 또한 시험회로에 병렬연결 되는 고전압 직류발생기에 인가되는 고전압 임펄스 전압값을 모의하여 적절한 보호저항값을 결정할 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] 안정석, 이석진, 신진철, 김찬기, "HVDC 기술동향", 전력전자학회지, Vol. 8, No. 3, pp17-21, 2003
[2] M.J.P. Jeroense, F. H. Kreuger, "Electrical Conduction in HVDC mass-impregnated Paper Cable" IEEE Trans. on Dielectrics and Insulation. Vol. 2, No. 5, pp718-723, 1995
[3] "Recommendations For Tests Of Power Transmission D C Cables For Rated Voltage Up To 800 kV" Electra No. 18 9, pp39-55, Apr. 2000