

HVDC 시스템의 고장 시 소음 및 진동 분석

김찬기, 박종광, 최영도, 임성주, 문형배
 전력연구원, 한국전력공사

The Sound Noise and Vibration Analysis for HVDC System Faults

Chan-Ki Kim, Jong-Kwang Park, Young-Do Choi, Seong-Joo Lim, Hyoung Bae-Moon
 Korea Electric Power Research Institute

ABSTRACT

This paper deals with the HVDC system fault analysis and the sound noise analysis. In this paper, the reasons of the audible noise and vibration were analyzed, the fault waveform were analyzed using DTR (Digital Transient Recorder). Finally, using the fault current waveform and the vibration equation, the reason of crack of smoothing reactor support is estimated.

1. 서론

본 논문을 서술하게 된 직접적인 동기는 HVDC시스템이 문제를 일으키면, 전기적인 현상이외에도 커다란 소음과 진동이 유발되면서 HVDC 시스템이 심하게 흔들리는 현상에 대하여 분석요청이 있었기에 이것에 대한 수학적 해석과 그리고 시스템을 개발하려는 경우에 이러한 진동과 소음에 대한 고려를 하는 것이 필요하기 때문이다. 특히, 전력전자 기술 분야는 시스템 기술 분야이기 때문에 열역학(방열판)과 구조역학(시스템 배치)을 어느 정도 알면, 보다 상품성이 큰 제품을 만들 수가 있다.

본 논문은 전력전자 분야에서 필요하나 많은 사람들이 관심을 갖지 않았던 분야를 분석하여 정리한 것이다.

본 논문의 내용은 다음과 같다.
 첫 번째, HVDC 시스템 사고에 의한 소음과 진동의 수학적인 메커니즘 규명, 두 번째 HVDC시스템의 사고에 대한 분석과 문제점 파악, 세 번째, 평활 리액터 지지물의 균열의 원인 분석을 서술하였다.

2. HVDC시스템에서 소음

2.1 소음에 관한 용어 정의

소음은 공기나 물 또는 어떤 매질에서 압력의 변화(Pressure Vibration)로 정의될 수 있으며, Sound Pressure나 Sound Intensity 또는 Sound Power로 정의된다. 한편 음은 단순히 '원하지 않는 소음'으로 정의될 수 있으며, 단위로는 Pascal을 사용한다.

(1) Sound Pressure level

$$L_P = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (1)$$

여기서, L_P 는 Sound Pressure Level, P 는 측정된 RMS(Root Mean Square) Sound Pressure, P_0 는 Reference RMS Sound Pressure 20×10^{-6} [PASCAL]

(2) Sound Power Level(L_W)

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (2)$$

$$W = \int_A I^* \cdot dA^*$$

여기서, A 는 소음이 방출되는 표면적, I^* 는 Sound Intensity의 벡터, W 는 Sound Power, W_0 는 가청에 관계된 Reference Power $1 \times 10^{-12} W$, A-weight : 사람에 대한 가청소음, C-weight : 비행기 소음

(3) Sound Propagation(L_P)

어느 지점에서 Sound Pressure Level은 소음 원(Sound Source)에서 떨어진 거리를 표현한다.

$$L_P = L_W - 10 \lg(2\pi r^2) \quad (3)$$

(4) Sound Radiation의 Directivity (L_P)

$$L_P = L_W - 10 \lg \frac{4\pi r^2}{Q} \quad (4)$$

여기서, L_W 는 소음원에서 Sound Power, r 는 소음원에서 Receiver와 사이의 거리, Q 는 Sound Radiation의 Directivity, $Q = 1$ 는 구형에서 Sound Propagation, $Q = 2$ 는 반구형에서 Sound Propagation, $Q > 2$ 는 비정형적인 형태에서 Sound Propagation

2.2 소음에서 환경적인 영향

- (1) 배경소음 (Background Noise)
- (2) Topography(지형학적인 관점)
- (3) Meteorological Condition (기상학적인 관점)

- 바람의 속도와 방향
- 온도

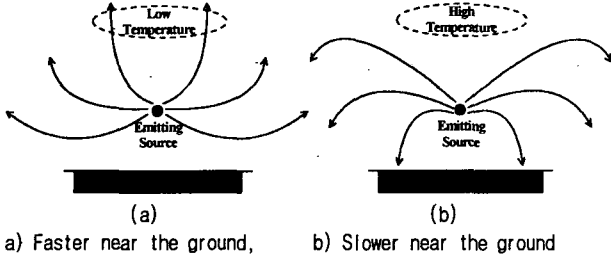


그림 1 소음 경로
Fig. 1 Sound Travels

- 대기조건(온도, 습도 그리고 압력)
- 비, 안개 그리고 눈의 영향

2.3 소음원

(1) HVDC 변압기

과거에는 철심 동요가 변압기 소음의 주된 원인으로 평가되었다. 소음은 주로 변압기 정격출력과 철심의 자속밀도에 의해 결정되었다. 그러나 최근에는 철심 접속기술이나 Magnetostriction기술의 향상에 의해서 철심동요 소음은 많이 절감되었다. 요즘 변압기의 소음은 주로 권선 소음이 주류를 이루고 있으며, 만약 정격전압에서 Core Induction Level이 1.4T로 낮아진다면, Winding Noise의 Sound Power Level은 근사적으로 다음과 같다.

$$L_{WA,W} \approx 39 + 10 \log \left(\frac{S_r}{S_p} \right) dB(A) \quad (5)$$

여기서, $L_{WA,W}$ 은 정격전류와 주파수 그리고 전압에서 권선의 A-weight Sound Power level, S_r 는 MVA에서 정격출력, S_p 는 1 MVA에서 기준출력.

(2) HVDC 변압기 권선 소음

변압기 권선의 소음은 전류가 권선에 흐를 때, 변압기의 전자계는 변압기의 소음을 발생시킨다. 권선에서 발생하는 힘의 변동은 다음과 같은 오른손의 법칙에 따라 발생한다.

$$F \sim B \cdot I \sim I^2 \quad (6)$$

여기서, F 는 권선에 걸리는 힘, B 는 권선의 자속밀도, I 는 권선의 전류

한편 소음은 전계에서 발생하는 힘에 비례하며 다음과 같은 수식이 성립한다.

$$W \sim v^2 \sim (\omega \cdot \chi)^2 \sim F^2 \sim I^2 \quad (7)$$

여기서, W 는 방사되는 Sound Power, v 는 Vibration Velocity, ω 는 Vibration 크기, χ 는 가청 주파수

(3) 리액터

HVDC시스템에서 리액터를 전류를 평활 시키는 평활리액터와 고조파 리액터 그리고 무효전력을 흡수하는 병렬 리액터로 구성되어 있으며 대부분의 리액터는 공심 형이다.

1) Breathing Mode

구(球:Globe)나 어떤 물체가 호흡하는 것과 같이 전체적으로 수축과 진동을 반복하는 모드

2) Compression Mode

공기 중에서 수축과 팽창이 같은 방향으로 발생하는 모드

3) Flexural Mode

철판과 같이 진동은 옆으로 발생이 되지만 소음은 진동과 90도 방향으로 발생하는 모드

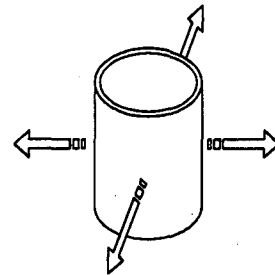


그림 2 리액터의 권선의 단순화된 모형
Fig.2 Simplified shape of the symmetrical breathing mode of a reactor winding.

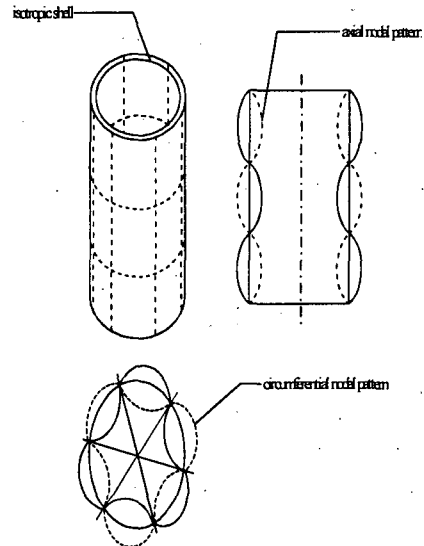


그림 3 단순화된 권선 층의 Flexural Mode
Fig. 3 Example of flexural modes for a simply supported winding layer without Axial Constraint.

(4) 기타 소음

냉각 팬, 스위칭 소자
차단기와 단로기는 동작하면서 가청소음을 유발한다. 냉각펌프, 동기조상기, 에어컨, 디젤 발전기

표 1 HVDC 시스템에서 Sound Power Level

Sound Emitting Source	Component Sound Power $L_{W(A)}$ in dB
HVDC Converter Transformer	
- Nominal Load	100-125
- No Load	90-110
HVDC Smoothing Reactor	85-100
AC Filter reactor	90-100
AC Filter Reactor	70-90
AC Filter Capacitor Stack	60-105
Cooling Fan	
- Fan Speed 300rpm	Approx. 55/85
* Cooling Capacity 30kW/300kW	
- Fan Speed 900rpm	Approx. 90/105
* Cooling capacity 500kW/1300kW	
Switching Device	(Impulse Noise)
- Air Blast Circuit Breaker	150-160
- Oil-and SF6 Circuit Breaker	105-130

3. 사고 분석

2005년 제주 HVDC #2 Pole에서 60회 이상의 정류실패를 유발되고, 심한 경우에는 커다란 소음과 함께 시스템 Trip이 발생하였다. 그림 4은 사이리스터로 만들어진 인버터의 동작 특성을 보여주고 있다.

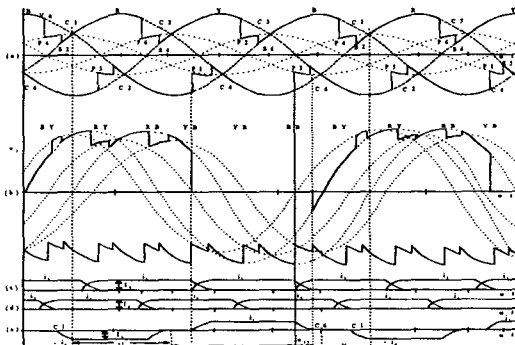


그림 4 사이리스터 밸브전압과 도통 상태(인버터 모드)
Fig. 4 Thyristor Valve Voltage and On-State (Inverter Mode)

3.1 정류실패 원인 검토

- (1) 외부의 사고에 의한 파급 가능성
- (2) 사이리스터 고장 가능성
- (3) 사이리스터와 병렬로 연결된 콘덴서 불량가능성
- (4) 사이리스터와 병렬로 연결된 피뢰기 불량가능성
- (5) HVDC 제어기 오동작 및 Misfiring 가능성

3.2 고장 분석

그림 5는 고장 시 발생한 HVDC 파형을 DTR (Digital Transient Recorder)로 분석한 자료로 그림 5를 이용하여 고장 원인에 대하여 분석하였다. 그림 5에서 "A"로 표시된 밸브의 전류가 영(零)이 되지 않고 Negative가 되는 것을 알 수 있음. 이러한 현상은 6번 밸브의 콘덴서가 dv/dt 특성이 나쁜 경우에

나타날 수 있는 현상으로 "D"와 같이 DC전압이 감소하고, 이로 인하여 "B"와 "C"와 같이 도통전류의 크기가 갑자기 커지는 현상을 보고 알 수 있다.

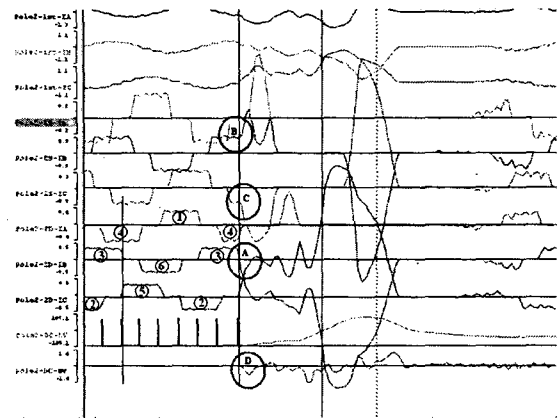


그림 5 고장 파형
Fig. 5 Fault Waveform

콘덴서의 용량은 2100[pF]이기 때문에 콘덴서의 불량은 DC 전압의 감소를 유발하기에 너무 작고 단지 역 전압에 대한 경로를 제공하는 역할을 수행할 수 있다. 콘덴서의 역 전압 특성의 불량 이유는 정류실패 시에 각 사이리스터에 인가되는 전압을 시뮬레이션 하면 그림 6과 같다.

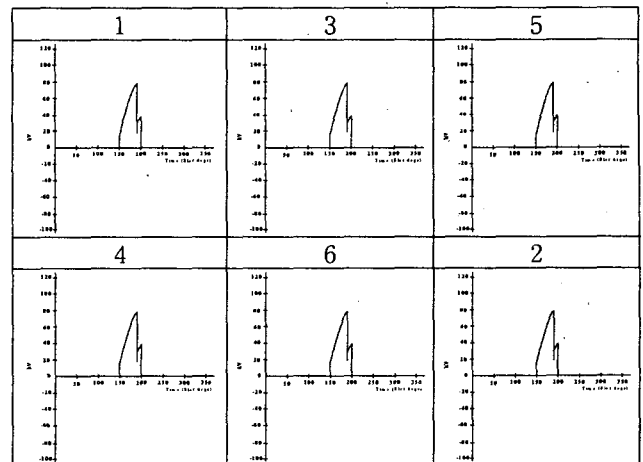


그림 6 사이리스터 밸브전압
Fig. 6 Thyristor Valve voltage

또한, HVDC 시스템에서 그림 6과 같은 고장은 정상상태와 다르게 시스템에 커다란 소음과 진동을 유발하는데, 고장 시의 평활 리액터의 소음과 진동은 Breathing Mode와 Compression Mode 보다는 Flexural Mode에 의해서 발생되고 이러한 진동은 그림 5에서 보는 바와 같이 "A"와 "B"와 같은 지지물 사이에 Crack을 유발하고 Crack이 발생하는 경우에 커다란 진동과 소음을 유발한다. 따라서, 고장 시에 발생한 소음은 Flexural Mode소음과 진동이외에 Flexural Mode에 의해서 발생한 Crack에 의한 소음을 합한 소음이 발생하였으며, 이 정도의 소음은 보통 철골이 부서지는 정도의 소음으로 느껴진다.

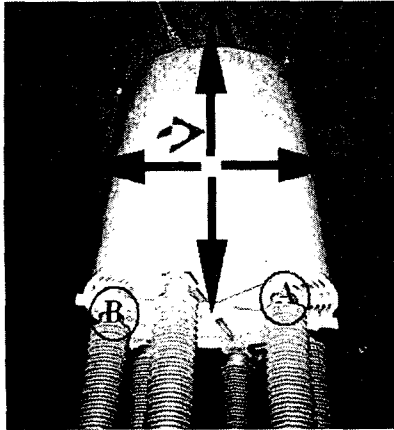


그림 7 평활 리액터
Fig. 7 Smoothing Reactor

4. 결 론

본 논문은 HVDC시스템의 고장 시 커다란 소음이 발생하였으며, 이러한 소음의 원인을 수학적으로 분석한 결과로써 전력 전자 시스템에서 시스템 고장 시 발생하는 소음 원을 분석하는데 유용하고, 시스템 설계 시에 리액터의 지지물에는 보다 강한 지지대와 고려가 필요함을 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] Determination of Sound Power levels of Noise Source Using Sound Pressure-Survey Method Using an Enveloping Measurement Surface over a Reflecting Plane-with Corrigendum, ISO 3746, 1995 Acoustics.
- [2] HVDC Converter Transformer Noise Considerations, the CIGRE JOINT WORKING Group 12/14.10, Electra No. 167, August 1996.
- [3] "Cheju-Haenam HVDC Manual", made by GEC Alstom, 1993.