

# HVDC 시스템의 고장 시 소음 및 진동 분석

김 찬 기\*, 명 근 식\*\*

(전력연구원 \*선임연구원, \*\*전력계통연구소장)

## 1. 서론

본 논문을 서술하게 된 동기는 논문이란 것은 적어도 다른 사람에게 학술적으로 도움을 주고 논문이 과학의 발전에 기여해야 한다는 기본 명제를 가지고 출발하였다. 본 논문을 서술하게 된 직접적인 동기는 2005년에 제주 HVDC시스템에 중대고장이 발생하면서 시스템이 Trip이 되었는데, Trip의 전기적인 발생원인 뿐만 아니라 Trip이 발생하면서 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 수학적 인 메커니즘 규명, 두 번째 HVDC시스템의 사고에 대한 분석과 문제점 파악, 세 번째, Smoothing Reactor 지지물의 Crack원인 분석을 서술하였다.

## 2. HVDC시스템에서 소음

### 2.1 소음의 정의

소음은 공기나 물 또는 어떤 매질에서 압력의 변화(Pressure Vibration)로 정의될 수 있고, Sound Pressure나

Sound Intensity 또는 Sound Power로 정의될 수 있고, 잡음은 단순히 "원하지 않는 소음"으로 정의될 수 있으며, 단위는 [Pascal]을 사용한다.

#### ● Sound Pressure level

실제로 소음의 기준은 인간의 귀에 들리는 주파수를 기준으로 하기 때문에 다음과 같은 Sound Pressure Level이 사용된다.

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

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

#### ● 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

#### ● Sound Propagation ( $L_p$ )

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

$$L_p = L_w - 10lg(2\pi r^2) \quad (3)$$

● Sound Radiation의 Directivity( $L_p$ )

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

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

● 배경소음 (Background Noise)

배경소음의 정의는 어떤 지점에서 원치 않는 소음을 말한다.

● Topography(지형학적인 관점)

소음에서 지형학적인 위치는 산이나 언덕등과 같이 지형학적으로 소음의 반사(Reflection), 흡수(Absorption), 차단(Screen) 그리고 감쇄(Attenuation)를 유발시키는 형태를 말한다.

● Meteorological Condition(기상학적인 관점)

- 바람의 속도와 방향

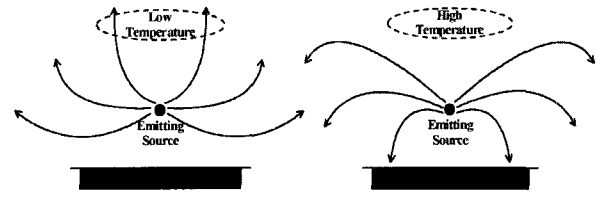
대지의 저항 때문에 대기에서 바람의 속도는 대기보다는 낮다. 그리고 소리의 속도는 바람의 속도와 실제 소리의 속도와의 Vector 합이기 때문에 바람 부는 날에 측정된 소음은 낮은 대기부근에서는 소음이 크게 나오고 높은 지역에서는 작게 나온다.

- 온도

대지의 온도가 높을가 아니면 낮은가에 따라 대기의 수직적인 온도분포가 생길 수 있다. 이것은 소음의 전달에 중요한 역할을 하는 것으로 찬 공기보다는 따뜻한 공기가 소음의 전달이 잘된다는 것을 의미한다. 그림 1은 밤에 일어나는 현상이다.

- 대기조건(온도, 습도 그리고 압력)

대기로 진행하는 소음은 공기에 의해서 에너지를 잃기 때문에 대기의 마찰력계수가 소리감쇄의 주된 요소가 된다. 대기의 마찰력계수는 낮은 주파수에서는 별 문제가 없는데, 높은



(a) Faster near the ground (b) Slower near the ground.

그림 1 Sound Travels

주파수에서는 크게 문제가 될 수 있다.

- 비, 안개 그리고 눈의 영향

비나 안개가 많은 날에 소리가 더 많이 전달되는 경향이 있는데, 이러한 원인은 비나 바람의 소음특성이 아니라 온도나 바람의 영향이 크기 때문이다. 즉, 비나 안개는 소음과는 관계가 작다는 것이 실험에 의해서 증명되었다. 눈은 소음을 흡수하는 역할을 하기 때문에 눈이 쌓인 곳에서 소음은 급격히 소멸한다.(즉, 눈이 오는 날 고요한 것이 이유가 있다!!)

2.3 소음 원

HVDC 시스템에서 주된 소음 원

- Converter Transformer
- Reactor
- Capacitor
- Cooling Fan

다른 소음 원

- Switching Device
- Cooling Circuit Pumps
- 동기조상기
- Outdoor Valve
- 디젤 발전기
- Air Conditioner Plant
- Corona Source

● Converter Transformer

과거에는 Core Vibration이 변압기 소음의 주된 원인으로 평가되었다. 소음은 주로 변압기 정격출력과 Core의 Magnetic Density에 의해 결정되었다. 그러나 최근에는 Core Joint기술이나 Magnetostriction기술의 향상에 의해서 Core Vibration소음은 많이 절감되었다. 요즘 변압기의 소음은 주로 Winding 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.

일반적으로 정상상태에서 변압기에서 발생하는 소음은 1(kHz)이하이다. 그리고 권선 Noise는 120Hz이고, Core Noise는 120Hz의 2<sup>nd</sup>에서 5<sup>th</sup> 고조파를 함유하고 있다.

● HVDC 변압기

HVDC변압기는 AC변압기에 비해서 같은 용량인 경우에 높은 소음을 발생시키고 있다. 이러한 이유는 컨버터 변압기에 흐르는 전류는 AC에 비하여 높은 고조파를 가지고 있으며, 사이리스터 Valve가 연결되어 있는 권선에 DC전압이 인가되기 때문이다. 이러한 원인들은 HVDC변압기가 AC변압기보다 Sound Power Level이 평균 10[dB] 높게 나오게 한다.

점호의 불 균일과 변압기사이의 임피던스 차이 그리고 HVDC시스템의 전위(Valve 정위와 Electrode전위사이의 차)의 차이에서 DC Magnetization이 발생한다.

DC변압기의 DC Magnetizing은 가청소음을 증가시킨다. DC Magnetizing은 Power Frequency를 더해주고, 기본파의 기수고조파를 증가시킨다.

● 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,  $\omega$ 는 Vibration 크기,  $\chi$ 는 가청 주파수

● Reactor

HVDC시스템에서 Reactor는 전류를 평활 시키는 평활리액터와 고조파 리액터 그리고 무효전력을 흡수하는 Shunt Reactor로 구성되어 있으며 대부분의 Reactor는 공심형이다(철심 형은 극단적인 오염이나 기후 조건에서 사용). Reactor의 권선은 절연된 알루미늄 도체로 만들어진 캡슐화되고 송진으로 압축된 권선 층으로 구성되어 있다. 공심형 리액터의 소음은 주로 권선의 진동에 의해서 발생되고, 권선 진동은 권선에 흐르는 전류와 자계에 의한 Interaction에 의해서 발생된다. 철심형인 경우에는 자계회로의 진동은 기계전체의 진동을 유발하고, 갭이 있는 철심형(Gaped iron-cores)이 사용된다면, Gap에서 발생하는 소음은 Magnetostriction보다 크다. 권선에서 발생하는 진동은 축과 방사방향으로 진동을 유발하며, 각각의 진동모드는 기계적인 구조에 달려 있다.

1) Breathing Mode

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

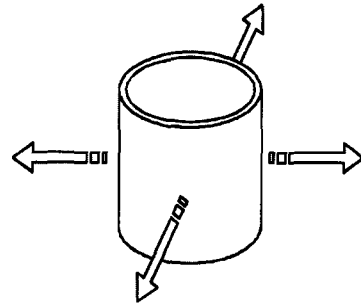


그림 2 리액터의 권선의 단순화된 모형

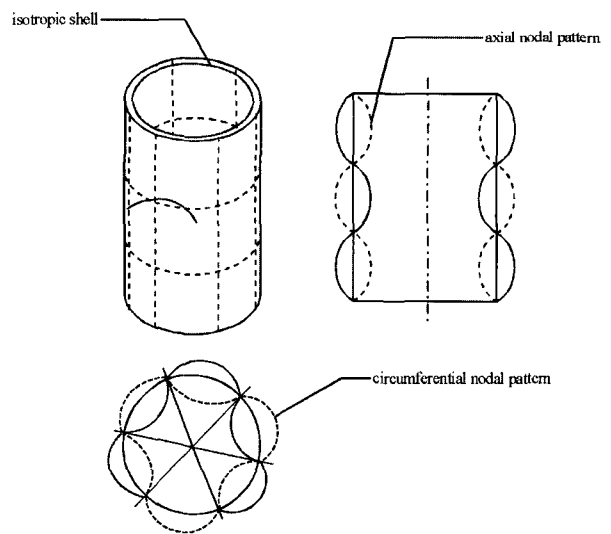


그림 3 단순화된 권선 층의 Flexural Mode

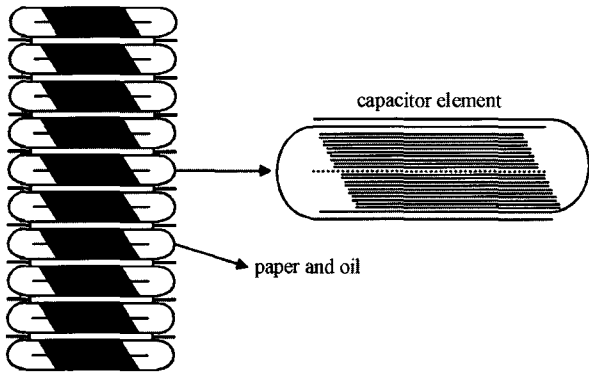


그림 4 커패시터 적층구조

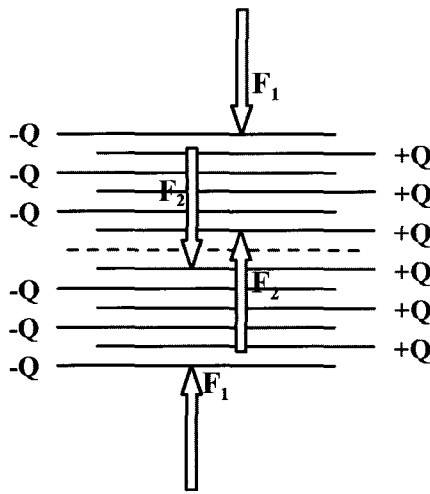


그림 5 커패시터의 힘 역학

## 2) Compression Mode

공기 중에서 수축과 팽창이 같은 방향으로 발생되는 Mode

## 3) Flexural Mode

철판과 같이 진동은 옆으로 발생이 되지만 소음은 진동과 90도 방향으로 발생되는 Mode

### ● Capacitor

HVDC 시스템에는 많은 커패시터가 존재한다. 대표적으로 무효전력을 보상하는 커패시터와 전압을 측정하는 CVT 그리고 고조파를 제거하는 필터를 예로 들 수 있다.

그림 4에서 보는 바와 같이 Energized한 커패시터의 단면은 전하를 전달하는 알루미늄 판의 대부분을 보여주고 있으며, 각 단면은 서로 당기는 힘 때문에 힘의 평형을 유지한다. 평형을 유지하지 않는 호일은 그림에서 보는 바와 같이  $F_1$  과  $F_2$  에서 힘의 균형이 이루어지지 않기 때문에 진동이 일어나고 이러한 진동은 소음을 유발한다.

$$F = \frac{dW}{dx} \quad (8)$$

여기서,  $W$ 는 커패시터에 저장된 에너지,  $x$ 는 커패시터 판 사이의 거리

$$W = \frac{V^2 C}{2} \quad (9)$$

여기서,  $V$ 는 커패시터에 걸리는 전압,  $C$ 는 정전용량

$$F = -\frac{V^2 C}{2x}$$

$$V(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t) \quad (10)$$

윗 식이 의미하는 것은 커패시터의 양단에 걸리는 전압에 의해서 힘이 결정된다는 것을 보여준다.

$$L_W^{stack} = L_W^{unit} + 1 - \lg(n) \quad (11)$$

여기서,  $L_W^{stack}$  완전한 커패시터 스택의 Sound Power Level,  $L_W^{unit}$ 는 커패시터 Unit의 Sound Power Level,  $n$ 은 커패시터의 수

커패시터의 Sound Power Radiation은 다음 사항에 달려 있다.

1. 커패시터의 기본파와 고조파 전압
2. 기계적인 Stiffness
3. 기계적인 공진 주파수(커패시터 Packing 과 Housing)
4. 커패시터 유닛의 수
5. Unit/Rack의 Position/location

### ● 기타 소음

Cooling Fan, Switching Device

차단기와 단로기는 동작하면서 Audible Noise(가청소음)을 유발한다.

Cooling Circuit Pumps, 동기조상기, Outdoor Valve, 디젤 발전기, Air Conditioner Plant, Corona Source,

## 3. 사고 분석

2005년 제주 HVDC #2 Pole에서 60회 이상의 정류실패를 유발되고, 심한 경우에는 커다란 소음과 함께 시스템 Trip이 발생하였다. 그림 6은 사이리스터로 만들어진 인버터의 동작

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

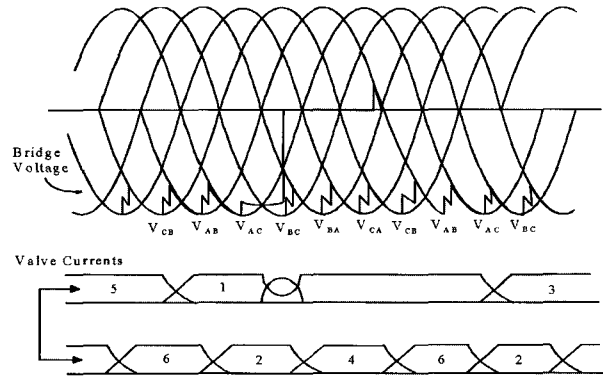


그림 7 HVDC 정류실패

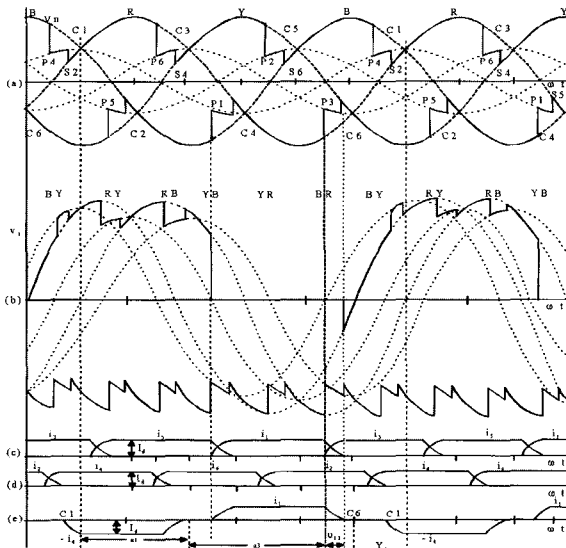


그림 6 사이리스터 밸브전압과 도통 상태(인버터 모드)

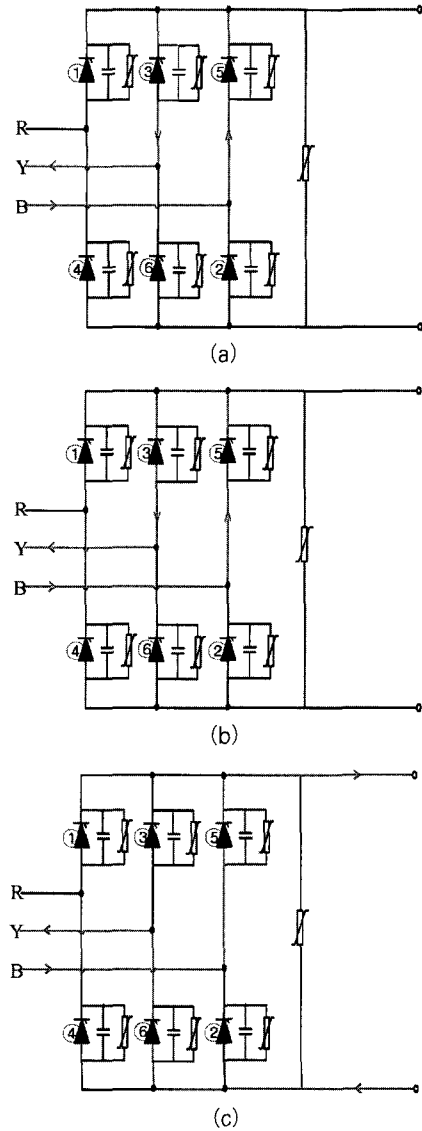


그림 8 내부고장 전류 경로

특성을 보여주고 있다.

3.1 정류실패 원인 검토

- 외부의 사고에 의한 파급 가능성
- 사이리스터 고장 가능성
- 사이리스터와 병렬로 연결된 콘덴서 불량가능성
- 사이리스터와 병렬로 연결된 피뢰기 불량가능성
- HVDC 제어기 오동작 및 Misfiring 가능성

3.2 고장 분석

3.2.1 외부의 사고에 의한 파급가능성은 없음.

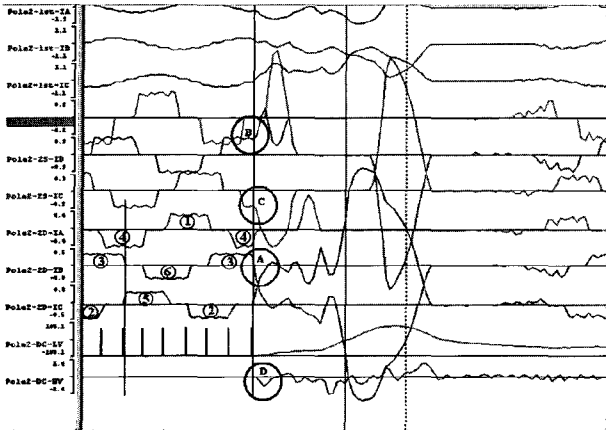


그림 9 고장 파형

- DTR 파형 확인결과 AC계통 동요는 없음.
- 외부에서 파급된 고장은 정류실패의 파형이 그림 7과 같음.

### 3.2.2 사이리스터의 내부고장에 대한 가능성

그림 8의 a)는 사이리스터가 소손된 경우를 보여주는 것으로 사이리스터가 소손되면 "Short" 상태가 되기 때문에 이 경우에는 해당되지 않는다. 그림 8의 b)의 경우는 사이리스터와 병렬로 연결된 콘덴서가 소손된 경우에 나타나는 파형이다. 그림 8의 c)는 파괴기가 소손된 경우를 보여주는 것으로 만약 파괴기가 소손되었다면, 그림 8 a)와 같은 파형이 도출되어야 한다.

만약, 6번 밸브를 통하여 전류가 도통되는 것도 생각해 볼 수 있으나 이 경우에는 점호카드의 문제에 의하여 점호 순서가 바뀌어야 한다.

### 3.2.3 DTR(Digital Transient Recorder) 파형 분석

그림 9는 고장 시 발생한 HVDC 파형을 DTR(Digital Transient Recorder)로 분석한 자료로 그림 9를 이용하여 고장원인에 대하여 분석하였다. 그림 9에서 "A"로 표시된 밸브의 전류가 영(零)이 되지 않고 Negative가 되는 것을 알 수 있음. 이러한 현상은 3번 밸브의 콘덴서가 Negative 전압에 대하여 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.

콘덴서의 용량은 2100[pF]이기 때문에 콘덴서의 불량은 DC전압의 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 10과 같다.

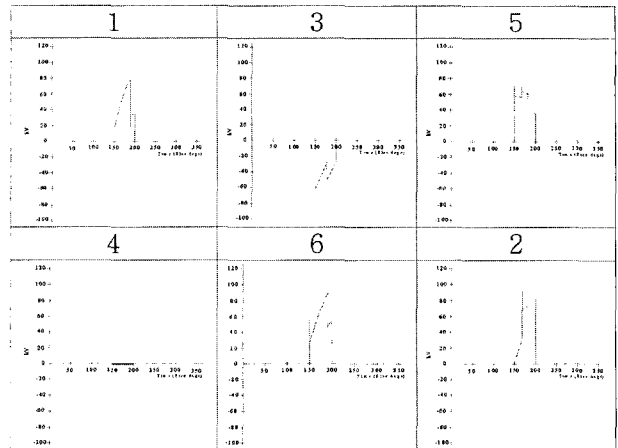


그림 10 사이리스터 밸브전압

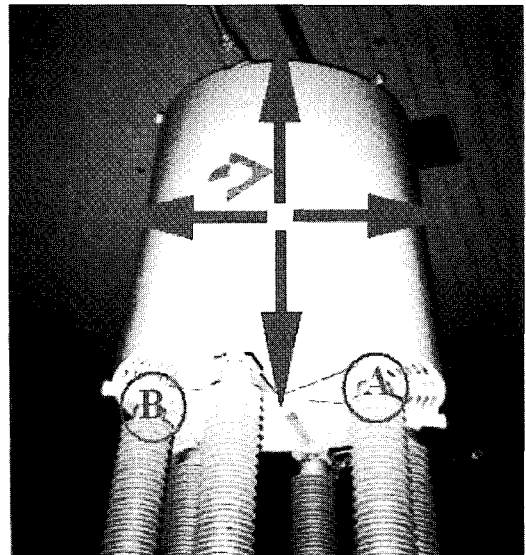


그림 9 Smoothing Reactor

그림 10으로부터 사이리스터 3번 밸브와 병렬로 연결된 콘덴서의 역 전압 특성이 불량인 것으로 분석되었으며, 이러한 가정은 실제로 최근에 밸브용 콘덴서 특성을 분석한 결과 역 전압 지지 능력에 문제가 있음이 들어났다.

또한, HVDC 시스템에서 그림 10과 같은 고장은 정상상태와 다르게 시스템에 커다란 소음과 진동을 유발하는데, 고장 시의 Smoothing Reactor의 소음과 진동은 Breathing Mode와 Compression Mode 보다는 Flexural Mode에 의해서 발생되고 이러한 진동은 그림 9에서 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.

#### 4. 결론

본 논문은 제주-해남 HVDC시스템의 고장 시 커다란 소음이 발생하였으며, 이러한 소음의 원인을 수학적 분석한 결과로써 전력전자 시스템에서 시스템 고장 시 발생하는 소음 원인을 분석하는데 유용하고, 시스템 설계 시에 리액터의 지지물에는 보다 강한 지지대와 고려가 필요함을 보여주었다. 본 논문이 전력전자기술에 작은 도움이 되기를 바라며, 새로운 관점에서 시스템을 분석한 면을 강조하고 싶다.

#### 참고 문헌

- [1] ISO 3746, 1995 Acoustics - Determination of Sound Power levels of Noise Source Using Sound Pressure-Survey Method Using an Enveloping Measurement Surface over a Reflecting Plane-with Corrigendum.
- [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.

### 〈 저 자 소 개 〉



#### 김찬기(金燦起)

1996년 한전 전력연구원 입사. 현재 전력연구원 선임연구원. 당 학회 학술위원.



#### 명근식(明根植)

1974년 한전 전력연구원입사. 현재 전력연구원 전력계통연구소 소장(처장)