

HVDC 시스템의 고장 시 소음 및 진동 분석

(The Sound Noise and Vibration Analysis for HVDC System Faults)

김찬기*

(Chan-Ki Kim)

요 약

본 논문은 HVDC 시스템의 고장 시 고장 원인과 소음의 원인 및 기계적인 균열에 관하여 분석한 논문이다. 본 논문에는 전기설비의 소음과 진동의 원인을 분석하였고, 시스템의 고장을 정량적으로 분석하였다. 최종적으로 고장 전류와 소음과 진동 방정식을 이용하여 Smoothing 리액터의 지지물의 균열의 원인이 분석되었다.

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.

Key Words : HVDC, Audible Noise

1. 서 론

본 논문을 서술하게 된 직접적인 동기는 HVDC 시스템이 문제를 일으키면, 전기적인 현상 이외에도 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(방열

판)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 메커니즘 규명, 두 번째 HVDC 시스템의 사고에 대한 분석과 문제점 파악, 세 번째, 평활 리액터 지지물의 균열의 원인 분석을 서술하였다.

2. HVDC 시스템에서 소음

2.1 소음에 관한 용어 정의

소음은 공기나 물 또는 어떤 매질에서 압력의 변

* 주저자 : 한전 전력연구원 선임연구원
Tel : 042-865-5871, Fax : 042-865-5844
E-mail : ckkim@kepri.re.kr
접수일자 : 2006년 3월 10일
1차심사 : 2006년 3월 14일, 2차심사 : 2006년 5월 22일
심사완료 : 2006년 5월 29일

화(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.

2.1.1 Sound Pressure level

실제적으로 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 20×10^{-6} [PASCAL]

2.1.2 Sound Power Level(L_w)

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right)$$

$$W = \int_A I^* \cdot dA \quad (2)$$

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

2.1.3 Sound Propagation(L_p)

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

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

2.1.4 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

2.2.1 배경소음 (Background Noise)

배경소음의 정의는 어떤 지점에서 원치 않는 소음을 말한다.

2.2.2 Topography(지형학적인 관점)

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

2.2.3 Meteorological Condition(기상학적인 관점)

- 바람의 속도와 방향

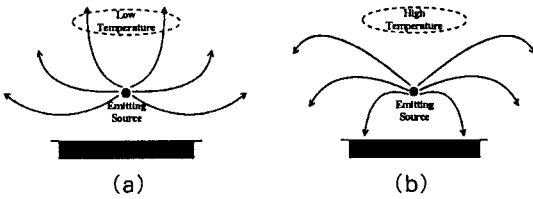
대지의 저항 때문에 대기에서 바람의 속도는 대기 보다는 낮다. 그리고 소리의 속도는 바람의 속도와 실제 소리의 속도와의 벡터 합이기 때문에 바람 부는 날에 측정된 소음은 낮은 대기부근에서는 소음이 크게 나오고 높은 지역에서는 작게 나온다.

- 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 진행되는 소음은 공기에 의해서 에너지를 잃기 때문에 대기의 마찰력계수가 소리감쇄의 주된 요소가 된다. 대기의 마찰력계수는 낮은 주파수에서는 별 문제가 없는데, 높은 주파수에서는 크게 문제가 될 수 있다.



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

그림 1. 소음 경로
Fig. 1. Sound Travels

- 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.

2.3 소음원

HVDC 시스템에서 주된 소음 원을 기술하면 다음과 같다.

2.3.1 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[MVA]에서 기준출력.

일반적으로 정상상태에서 변압기에서 발생하는 소음은 1[kHz]이하이다. 그리고 권선 Noise는 120[Hz]이고, Core Noise는 120[Hz]의 2nd에서 5th 고조파를 함유하고 있다.

HVDC 변압기는 교류 변압기에 비해서 같은 용량인 경우에 높은 소음을 발생시키고 있다. 이러한 이유는 컨버터 변압기에 흐르는 전류는 교류에 비하여 높은 고조파를 가지고 있으며, 사이리스터 밸브가 연결되어 있는 권선에 직류전압이 인가되기 때문이다. 이러한 원인들은 HVDC 변압기가 교류 변압기보다 Sound Power Level이 평균 10[dB] 높게 나오게 한다.

점호의 불균일과 변압기사이의 임피던스 차이 그리고 HVDC 시스템의 전위(밸브 전위와 전극봉 전위 사이의 차)의 차이에서 직류 자화가 발생한다.

직류 변압기의 직류자화는 가청소음을 증가시킨다. 직류자화는 기본과 주파수에 더해지고, 기본파의 기수 고조파를 증가시킨다.

2.3.2 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 자속 밀도, 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, W 는 Vibration 크기, χ 는 가청 주파수

2.3.3 리액터

HVDC시스템에서 리액터는 전류를 평활 시키는 평활리액터와 고조파 리액터 그리고 무효전력을 흡수하는 병렬 리액터로 구성되어 있으며 대부분의 리액터는 공심 형이다(철심 형은 극단적인 오염이나 기후 조건에서 사용). 리액터의 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 상호작용에 의해서 발생된다. 철심형인 경우에는 자계회로의 진동은 기계전체의 진동을 유발하고, 갭이 있는 철심형(Gaped iron-cores)이 사용된다면, 갭에서 발생하는 소음은 Magnetostriction보다 크다. 권선에서 발생하는 진동은 축과 방사방향으로 진동을 유발하며, 각각의 진동모드는 기계적인 구조에 달려 있다.

2.3.3.1 Breathing Mode

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

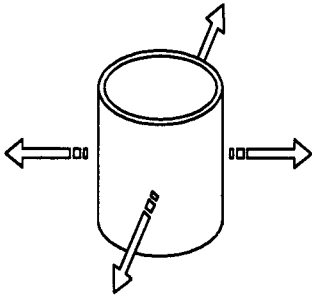


그림 2. 리액터의 권선의 단순화된 모형
Fig. 2. Simplified shape of the symmetrical breathing mode of a reactor winding.

2.3.3.2 Compression Mode

공기 중에서 수축과 팽창이 같은 방향으로 발생되는 모드

2.3.3.3 Flexural Mode

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

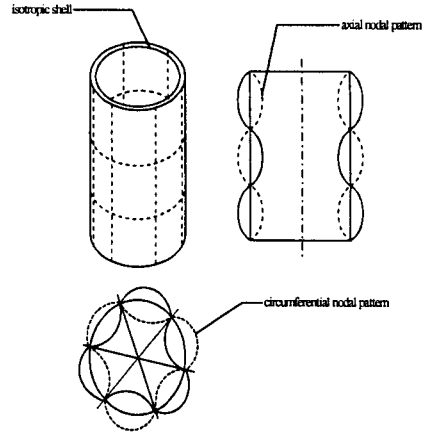


그림 3. 단순화된 권선 층의 Flexural Mode
Fig. 3. Example of flexural modes for a simply supported winding layer without Axial Constraint

2.3.4 커패시터

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 충전된 커패시터의 단면은 전하를 전달하는 알루미늄 판의 대부분을 보여 주고 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.

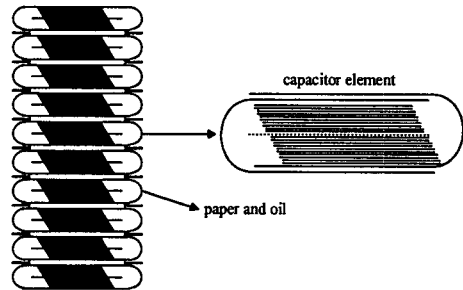


그림 4. 커패시터 적층구조
Fig. 4. Capacitor Element Package with Capacitor Elements

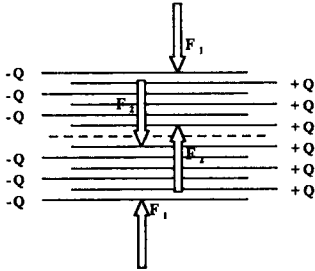


그림 5. 커패시터의 힘 역학
Fig. 5. Forces in Capacitor Element

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

여기서 W 는 커패시터에 저장된 에너지, x 는 커패시터 판사이의 거리

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

여기서 V 는 커패시터에 걸리는 전압, C 는 정전 용량

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

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

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 달려있다.

1. 커패시터의 기본파와 고조파 전압
2. 기계적인 Stiffness

3. 기계적인 공진 주파수(커패시터 Packing 과 Housing)

4. 커패시터 유닛의 수

2.3.5 기타 소음

냉각 팬, 스위칭 소자

차단기와 단로기는 동작하면서 가청소음을 유발한다. 냉각펌프, 동기조상기, 에어컨, 디젤 발전기 표 1은 HVDC 시스템에서 Sound Power Level을 표시하고 있다.

표 1. HVDC 시스템에서 Sound Power Level
Table 1. Sound Power Level in HVDC System

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 30[kW]/300[kW]	
• Fan Speed 900rpm	Approx. 90/105
- Cooling capacity 500[kW]/1300[kW]	
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 6은 사이리스터로 만들어진 인버터의 동작 특성을 보여주고 있다.

HVDC 시스템의 고장 시 소음 및 진동 분석

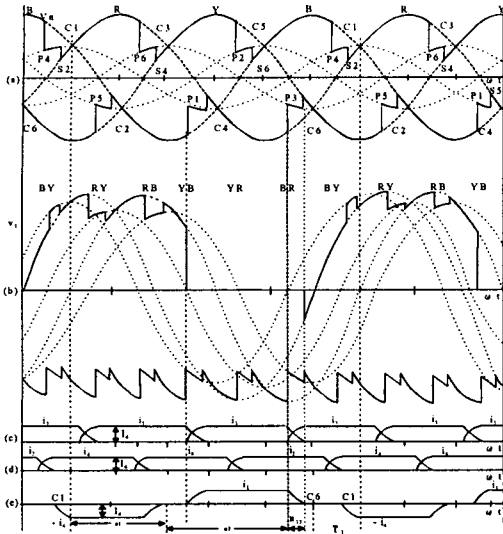


그림 6. 사이리스터 밸브전압과 도통 상태(인버터 모드)
Fig. 6. Thyristor Valve Voltage and On-State (Inverter Mode)

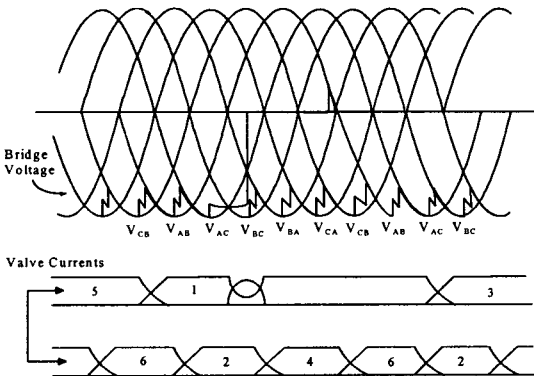


그림 7. HVDC 정류실패
Fig. 7. HVDC Commutation Failure

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

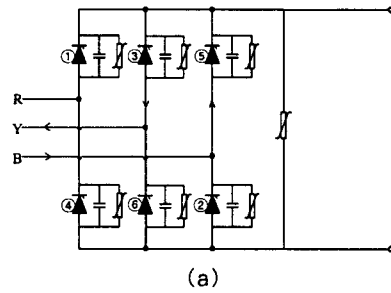
3.2.1 외부의 사고에 의한 파급가능성은 없음

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

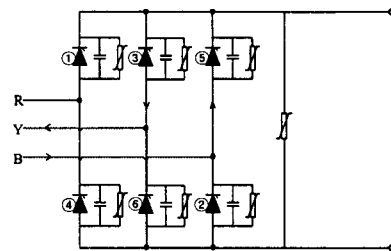
3.2.2 사이리스터의 내부고장에 대한 가능성

그림 8의 a)는 사이리스터가 소손된 경우를 보여주는 것으로 사이리스터가 소손되면 "Short" 상태가 되기 때문에 이 경우에는 해당되지 않는다.

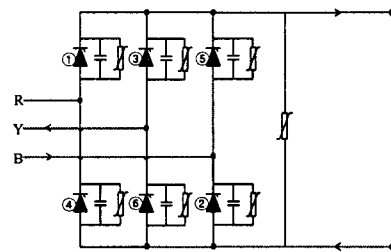
그림 8의 b)의 경우는 사이리스터와 병렬로 연결된 콘덴서가 소손된 경우에 나타나는 파형이다.



(a)



(b)



(c)

그림 8. 내부고장 전류 경로

Fig. 8. Current pass of Internal Fault

그림 8의 c)는 피뢰기가 소손된 경우를 보여주는 것으로 만약 피뢰기가 소손되었다면, 그림 8 a)와 같은 파형이 도출되어야한다.

만약, 6번 밸브를 통하여 전류가 도통되는 것도 생각해 볼 수 있으며 이 경우에는 점호카드의 문제에 때문에 유발된다.

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 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.

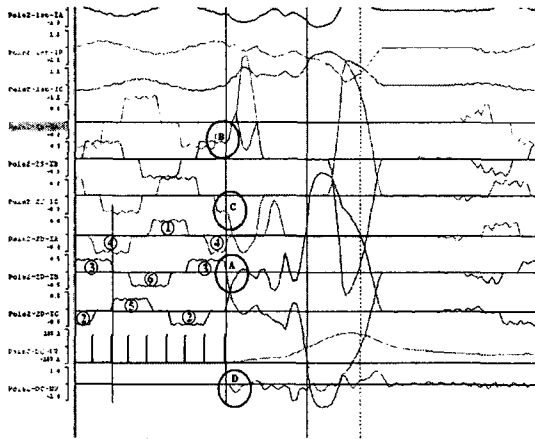


그림 9. 고장 파형
Fig. 9. Fault Waveform

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 정류 실패 시에 각 사이리스터에 인가되는 전압을 시뮬레이션 하면 그림 10과 같다.

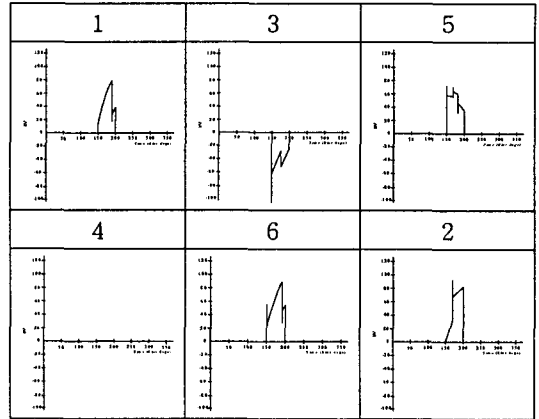


그림 10. 사이리스터 밸브전압
Fig. 10. Thyristor Valve voltage

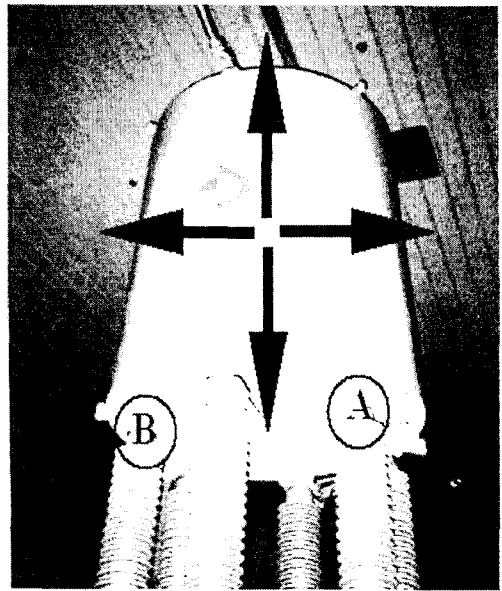


그림 11. 평활 리액터
Fig. 11. Smoothing Reactor

그림 10으로부터 사이리스터 6번 밸브와 병렬로 연결된 콘덴서의 [dv/dt] 특성이 불량인 것으로 분석되었으며, 이러한 가정은 실제로 최근에 밸브용 콘덴서 특성을 분석한 결과 [dv/dt] 능력에 문제가 있음이 들어났다.

또한 HVDC 시스템에서 그림 10과 같은 고장은 정상상태와 다르게 시스템에 커다란 소음과 진동을 유발하는데, 고장 시의 평활 리액터의 소음과 진동

HVDC 시스템의 고장 시 소음 및 진동 분석

은 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. 결 론

본 논문은 HVDC시스템 고장 시 발생하는 소음에 대한 연구결과로서, 소음원과 소음의 전달경로, 그리고 소음과 진동이 HVDC 시스템에 미치는 영향을 분석하였다.

References

- [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 CEC Alstom, 1993.

◇ 저자소개 ◇

김찬기 (金燦起)

1968년 12월 17일생. 1991년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 한전 전력연구원 선임연구원.