

# 대용량 HVDC 컨버터의 Busbar 설계

## Busbar Design of High Power HVDC Converter

김찬기<sup>†</sup> · 박용훈\* · 김진영\*\*  
 (Chan-Ki Kim · Yong-Hun Park · Jin-Young Kim)

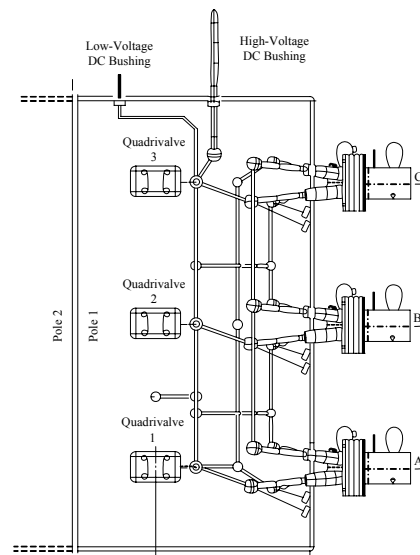
**Abstract** - This paper studies a busbar design of high power HVDC converter. In order to design a electrical busbar, we need to consider electrical, mechanical and environmental condition. In this papre, we focus on the electrical design in terms of temperaure and currnet. Busbar conductor can be damaged to burn due to the temperature and fault current of busbar. In this paper, Busbar design of Jindo-Jeju HVDC #2 System that will start operate in 2012 is considered.

**Key Words** : HVDC converter, Busbar design, Busbar material, Valve hall temperature

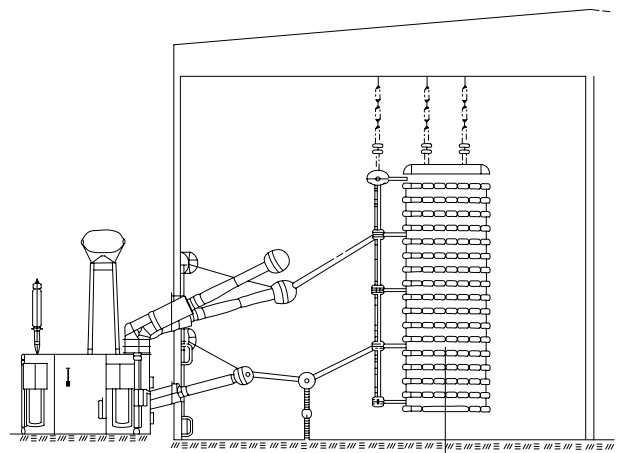
### 1. 서 론

전력설비의 Busbar 설계는 전기적 측면, 기계적 측면, 주위환경적 측면을 종합적으로 고려하여 설계되어야 한다. 전기적 측면에서는 정상 상태 및 과도 상태시에 인가되는 전압 및 전류를 기본적으로 고려하게 되는데 이때는 저항 성분 에 의한 발열에 따른 영향이 가장 중요한 파라미터가 된다. 기계적 측면에서는 Busbar 접속위치 및 취부되는 설비, 외함의 유무 등을 고려해 최종적으로는 기계적강도 및 절연 거리를 만족하는 도체의 폭과 길이를 결정하게 된다. 마지막으로 주위 환경적 측면에서는 주위온도, 습도, 진동 등을 고려하게 된다. 본 논문에서는 Busbar 저항에 의한 발열과 방열의 평형 관점, 즉 전기적 온도 상승에 따른 영향에 중점 착안하여 기술하였다.

기본적으로 부지 요건 및 최소 절연 거리를 만족하는 밸브와 변압기 간 이격거리 그리고 밸브와 DC선로 인출부까지의 거리에 따라 Busbar의 길이가 결정되고, 여기에 전기적 온도상승과 주위온도에 의한 발열 그리고 대류와 복사에 의한 방열을 고려해 Busbar 도체 직경 및 단면적(혹은 두께)를 설계하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 보통 200[MW] 대용량 컨버터 Valve의 높이가 10~20[m]정도가 되고 이들 사이를 연결하는 Busbar의 길이는 20~40[m]가 될 수 있기 때문에 온도에 의한 기계적인 강도가 문제될 수 있다. 즉, Busbar의 온도나 고장전류에 따라 그리고 도체의 강도와 재질에 따라 경우에 따라서는 도체가 기계적으로 소손되는 상황이 발생할 수 있기 때문에 이에 대한 검토가 필요하다. 본 논문은 2012년도 가압예정인 진도-제주 HVDC #2 시스템의 Busbar에 대한 설계를 다룬다.



(a) 평면도



(b) 측면도

그림 1 대용량 컨버터에서 Busbar의 배열  
 Fig. 1 Busbar Arrangement of High Power Converter

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 한국전력공사 전력연구원 책임연구원  
 E-mail : cckim@kepri.re.kr

\* 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

\*\* 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

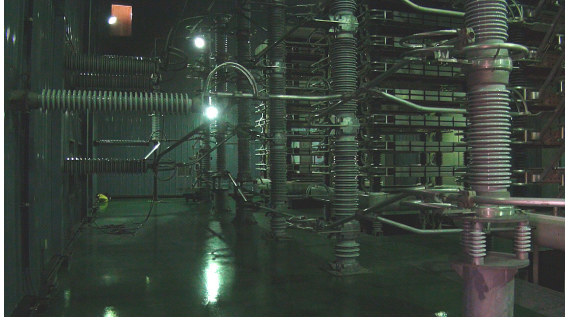


그림 2 해남-제주 HVDC#1 시스템 Busbar의 배열  
Fig. 2 Busbar Arrangement of HVDC#1 System

## 2. 대용량 컨버터의 Busbar 설계

### 2.1 정상 상태에서 도체의 온도계산

정상상태에서, Busbar의 동작온도는 주위와의 온도차에 의존하며, Busbar의 발열(도체에서 발생하는 Joule 손실)과 Busbar의 방열(주위 공기로의 대류와 복사)간에 평형을 유지한다. 그리고 컨버터나 변압기에 고장이 발생할 때는, 짧은 구간 동안 많은 전류가 흐르기 때문에, 방열량이 크지 않다. 따라서 Busbar의 온도는 도체의 전기적 발열에 의해서 결정되는 비율로 증가한다. 정상상태에서 Busbar의 열평형은 식 (1)과 같다.

$$W_{in} + W_{sol} = W_{con} + W_{rad} \quad (1)$$

여기서,

$W_{in}$  : Busbar의 Joule 효과에 의한 손실로 인한 열 [W/m]

$W_{sol}$  : 태양 복사에 의한 열 [W/m]

$W_{con}$  : 대류에 의해 도체로부터 방열되는 열 [W/m]

$W_{rad}$  : 복사에 의해 도체로부터 방열되는 열 [W/m]

Busbar에서 Joule 효과에 의한 손실은 식 (2)로 표현된다. 기본적으로 DC 저항값을 기본으로 계산하였고, 밸브와 변압기 2차측을 연결하는 Busbar의 경우 구형과의 AC 전류가 흐르기 때문에 표피효과에 의한 AC 저항 보정 상수( $f_r$ )를 적용하였다.

$$W_{in} = I_{op}^2 * R_{op} * f_r \quad [W/m] \quad (2)$$

$$R_{op} = \frac{1}{A} * r_{20} [1 + r_{dr} * (T_{op} - 20)] \quad [\Omega/m]$$

$$A = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \pi * \left(\frac{D}{2} - d\right)^2 = \pi * d * (D - d) \quad [mm^2]$$

여기서,

$I_{op}$  : 정상상태 Busbar 동작 전류 [A]

$R_{op}$  : 도체의 미터당 DC 저항 [ $\Omega/m$ ]

$T_{op}$  : 정상상태 Busbar 동작 온도 [ $^{\circ}C$ ]

$f_r$  : 표피효과에 의한 도체의 AC 저항 보정 상수

$A$  : 도체의 단면적 [ $mm^2$ ]

$D$  : 도체의 전체 직경 [mm]

$d$  : 튜브형 도체의 벽 두께 [mm]

$r_{20}$  :  $20^{\circ}C$ 에서 도체의 저항률 [ $\Omega \cdot mm^2/m$ ]

$r_{dr}$  : 온도에 따른 저항률의 변화 [ $\Omega \cdot mm^2/mK$ ]

본 논문에서는 2가지 형태의 도체를 고려하였는데 Strict (Rigid) 도체 및 Flexible 도체가 바로 그것이다. Strict (Rigid) 도체는 장방형, 원형, 직사각형 모양을 가진 알루미늄 판으로 형성된 강심 도체를 말하고 Flexible 도체는 몇 가닥의 알루미늄 소선을 꼬아서 만든 형태의 도체를 말한다. 실제로 #2 HVDC 시스템에 사용되는 도체들은 밸브와 컨버터 변압기 측(Star 권선 및 Delta 권선)을 연결하고 있는 Busbar 도체는 원형의 알루미늄 도체를 사용하고 있으며 각각의 밸브를 보호하는 Valve-arrester는 밸브와 2가닥의 Flexible 도체로 연결되어 있다.

Strict(Rigid) 도체의 경우에는 직경과 원형 알루미늄판의 두께로 그 규격을 정의하고 Flexible 도체의 경우는 직경과 단면적에 따라 구분한다. 최종적으로 Strict (Rigid) 도체로 설계된 밸브와 변압기간 Busbar, 밸브에서 인출되는 DC busbar에 대해서는 도체 외부 두께와 직경을 도출하고, Flexible 도체로 설계되는 밸브 간 피뢰기 연결 Busbar에 대해서는 직경과 단면적을 도출하게 될 것이다.

식 (2)에서 표피효과에 대한 보정 상수  $f_r$ 는 그림 3의 실험 결과에 따라 경험적으로 정해진다[1]. 그리고 Strict (Rigid) AC도체(휘어지지 않는 도체)에 대한 표피효과 보정 상수는 식 (3)과 같이 계산된다[5].

$$f_r = 1 + y_s + y_p \quad (3)$$

$$y_s = 1.5 \cdot \left( \frac{x_s^4}{192 + 0.8 * x_s^4} \right)$$

$$x_s^2 = \frac{8\pi * f}{R_{op}} * 10^{-7} * k_s$$

$$y_p = 1.5 \cdot \left( \frac{x_p^4}{192 + 0.8 * x_p^4} * \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 * 2.9 \right),$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi * f}{R_{op}} * 10^{-7} * k_p$$

여기서,

$f$  : 주파수 [Hz]

$d_c$  : 도체 직경 [mm]

$s$  : 도체 축간 거리 [mm]

$R_{op}$  : 도체의 미터 당 DC 저항 [ $\Omega/m$ ]

$y_s$  : 표피효과 상수

$y_p$  : 근접효과 상수

Flexible AC 도체에 대해서, 표피효과 보정상수는 식 (4)로부터 계산된다. 그리고  $k_s$ 와  $k_p$ 의 값은 표 1에 의거하여 구하였다[5].

$$f_r = 1 + y_s + y_p \quad (4)$$

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8 * x_s^4}$$

$$x_s^2 = \frac{8\pi * f}{R_{op}} * 10^{-7} * k_s$$

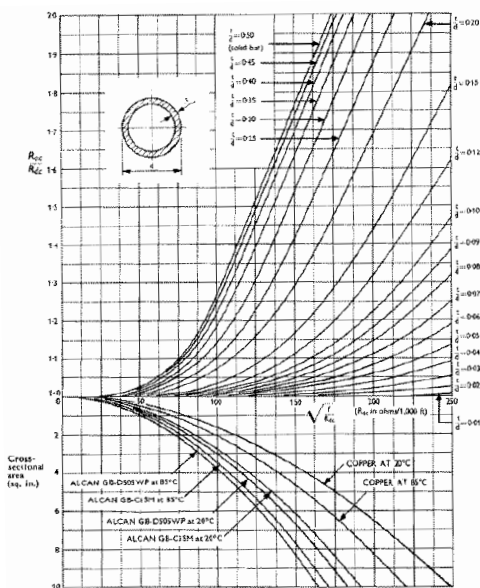
$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8 * x_p^4} * \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 * 2.9$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi * f}{R_{op}} * 10^{-7} * k_p$$

**표 1** 표피효과와 근접 효과의 실험치(IEC 60287)  
**Table 1** Experimental Results of Skin Effect and Approximate Effect

도체 유형	Dried/ Impregnated	$k_s$	$k_p$
Aluminium			
Round, stranded	Either	1	
Round, 4 segment	Either	0.28	
Round, 5 segment	Either	0.19	
Round, 6 segment	Either	0.12	
Copper			
Round, stranded	Yes	1	0.8
Round, stranded	No	1	1

만약 알루미늄 도체에 대한 계수  $k_p$ 가 실험을 통하여 구해지지 않는다면, 표준 알루미늄 도체의 경우는 표 1에 따라 구리 도체에서 주어진 값이 사용해도 무방하다[5]. 또한, 표피효과에 대한 보정상수는 그림 3과 같이 제작사에서 제시한 실험 데이터를 참조하였다.



**그림 3** 튜브형 도체에 대한 표피효과  
**Fig. 3** Skin Effects for Tube type Conductors

열복사에 대한 수식은 다음과 같이 근사된다.

$$W_{sol} = \frac{e * S_{sol} * D}{1000} \quad [W/m] \quad (5)$$

여기서,  
 $e$  : 복사 방사 계수  
 $S_{sol}$  : 태양복사 [ $W/m^2$ ]

열을 흡수하는 유효면적은 Busbar의 외부 지름 D로 정해지고, Valve Hall 도체의 경우, Valve Hall 내에 존재하므로 태양열 이득은 0 ( $W_{sol} = 0$ )이 된다.

그리고, 대류 열손실과 복사 열 손실은 SI 단위로 표현하면 다음과 같다.

$$W_{con} = \frac{7.654 * \sqrt{P} * (T_{op} - T_a)^{1.25}}{D^{0.25}} * A_c [W/m] \quad (6)$$

$$W_{rad} = \frac{57.2}{10^9} * e * (T_1^4 - T_2^4) * A_c [W/m],$$

$$A_c = \frac{\pi * D}{1000} \quad (7)$$

여기서,  
 $P$  : 대기 압력 [bar]  
 $T_a$  : 도체에서 공기 온도 [ $^{\circ}C$ ]  
 $A_c$  : 대류와 복사의 경우 도체의 경계 [m]  
 $T_1$  : 가열된 부분의 표면 온도, = Top + 273 [K]  
 $T_2$  : 주위의 표면 온도, = Ts + 273 [K]  
 $T_s$  : 주위 표면의 평균 온도 [ $^{\circ}C$ ]

### 2.2 과도조건에서 도체의 온도

참고문헌 [2]로부터, 고장전류, 고장구간 그리고 온도상승간의 관계는 다음과 같다. (SI시스템 단위 사용)

$$I_{sc} = \frac{217 * \frac{A * \sqrt{f_r}}{\sqrt{t_{sc}}} * \sqrt{\log_{10} \left( \frac{T_{fin} + 258}{T_{op} + 258} \right)}}{1000} \quad (8)$$

여기서,  
 $I_{sc}$  : 도체에 흐르는 고장 전류(rms) [kA]  
 $t_{sc}$  : 고장 전류의 구간 [s]  
 $T_{fin}$  : 고장전류에 따른 Busbar의 온도 [ $^{\circ}C$ ]

그리고, Busbar 저항이 운전온도의 함수이므로, 열전달 방정식이 평형에 도달할 때까지 변수를 반복적으로 조정해야 한다. 즉,  $W_{in} + W_{sol} - W_{con} - W_{rad} = 0$ 이라는 조건하에서 계산되어야 하고, 초기 선택값은  $T_{op} = 60^{\circ}C$  이다.

### 3. 대용량 컨버터 시스템 적용

이제 지금까지 제시한 내용에 따라 계산과정을 실제

HVDC 시스템에 적용하고자 한다. 적용하고자 하는 대상은 2012년도에 완공예정인 진도-제주 HVDC #2시스템으로써, Valve내에 설치되는 Busbar를 선정하기위해서 다음과 같은 사전 조건을 가져야만 한다.

3.1 정상상태 조건

- Valve Hall내의 Busbar가 위치한 공간의 공기는 안정적이고 순환된다.
- 최대 주위온도(ambient temperature)는 50[°C]로 한다.
- Busbar의 운전온도는 85°C를 초과하지 않아야 한다. (알루미늄 합금도체는 강도에 있어 뚜렷한 손실이 없이 90°C에서 연속적으로 운전한다)
- 복사에 의한 열 손실( $W_{rad}$ )을 계산하기 위해서, 표면 방사계수는 산화된 Busbar에 적용 가능한  $e=0.45$ 의 전형적인 값으로 주어진다.
- Flexible도체는 2개의 병렬 도체로 만들며 각각의 전류는 최대 전류의 1/4 이 된다.
- Busbar에 흐르는 최대전류는 표 2에 나타나 있다.

표 2 정상상태에서 선로 전류

Table 2 Conductor Current in Steady-State

Type	Steady State Line Currents (A)
AC Star	667
AC Delta	667
Valve-Arrestor	667
DC	667

3.2 과도상태 조건

넓은 범위의 정상상태 동작 전류와 온도로 인해, 고장에 따른 온도 상승의 계산은 하나의 표준화된 조건에 근거하여 이루어진다.

- AC의 경우 AC 저항에 대한 보정 계수는 식 (3)에서 정의되었다.
- 과도상태에서 고장 전류의 지속기간은 최대 1[s]이다.
- 과도상태에서 고장 전류의 크기는 표 3과 같다.

표 3 과도상태에서 고장전류

Table 3 Fault Current in Transient State

Type	Fault Current (kA)
AC Star	12
AC Delta	12
Valve-Arrestor 측	12
DC 측	12

3.3 Valve Hall 도체의 운전 온도

Valve Hall내에는 서로 다른 도체로 구성되어 있다. 도체 길이는 Valve Hall의 방열로 인한 안정성을 확보하기 위해

10%의 여유를 가지도록 결정된다. 그리고 도체의 길이는 그림 4에서 보여주는 Valve Hall의 도면을 참조하여 계산하였다.

표 4 Valve Hall 내에서 도체의 길이

Table 4 Conductor Length in Valve Hall

Type	Total Length [m]
AC Star 측(변압기)	18
AC Delta 측(변압기)	25
Valve-Arrestor	37.5
DC Line	46.5

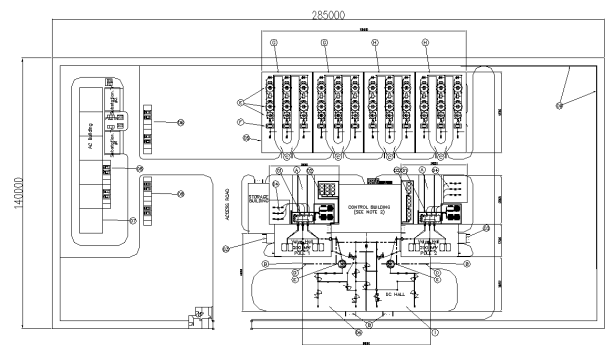


그림 4 HVDC Valve Hall 및 DC Area

Fig. 4 HVDC Valve Hall and DC Area

3.4 Busbar의 재질

Valve Hall Busbar와 Flexible 도체에 사용된 재질은 각각 알루미늄 AL 6101B T6과 AL 6201이며, 전기적 특성은 다음과 같다[6].

$$r_{20} = 0.028264 \Omega \cdot mm^2/m$$

$$r_{dr} = 0.00403 \Omega \cdot mm^2/mK$$

대기 온도 45°C에서 Valve Hall의 전체 방열량은 1.48[kW]로 계산된다. 열손실, 동작온도 및 과도 온도 상승을 고려했을 때, 두께 10[mm]를 갖는 90[mm] 직경의 튜브형 도체와 직경 26[mm]의 Flexible도체가 결정되었다.

표 5 계산된 Valve Hall 도체의 크기

Table 5 Calculated Conductor Size in HVDC Valve Hall

Type	Diameter[mm]	Wall Thickness[mm]
AC Star	90	10
AC Delta	90	10
Valve-Arrestor	36.8	-
DC	90	10

**표 6** Strict(Rigid) 도체  
**Table 6** Strict(Rigid) Conductor

위치	외경 [mm]	거리	정상상태			과도상태	
			$W_{IV}$ [kW]	$T_{op}$ [°C]	$I_{cap Tmax}$ [A]	$T_{fin}$ [°C]	온도 상승 [°C]
AC Y	90	10	0.16	54.31	2151.26	54.54	0.23
AC D	90	10	0.22	54.31	2151.26	54.54	0.23
DC	90	10	0.26	52.96	2656.61	53.30	0.35
Sub Total			0.64				

**표 7** Flexible 도체  
**Table 7** Flexible Conductor

위치	외경 [mm]	단면적 [mm <sup>2</sup> ]	정상상태			과도상태	
			$W_{in}$ [kW]	$T_{op}$ [°C]	$I_{cap Tmax}$ [A]	$T_{fin}$ [°C]	온도 상승 [°C]
밸브 피뢰기	26.00	400	0.84	62.54	1184.03	66.84	4.30
Sub Total			0.84				

### 3. 결 론

이 논문에서는 대용량 컨버터의 Busbar에서 Strict(Rigid) 도체와 Flexible도체를 각각 알루미늄 AL 6101B T6과 AL 6201를 적용하여 온도 상승을 고려한 결과 두께 10[mm]를 갖는 90[mm] 직경의 튜브형 Strict(Rigid) 도체와 직경 26[mm]의 Flexible 도체를 각각 설계하였다. 정상 동작동안 과 허용된 연속 과부하 조건동안 동작 온도는 85°C 보다 낮고 최악의 고장전류에 의해 발생하는 온도 상승은 모든 경우에 대해 70°C이하이며, Strict(Rigid)도체의 경우 0.23°C에서 0.35°C 사이, Flexible 도체의 경우 4.30°C이다. 알루미늄 합금도체는 연속적으로 90°C에서 기계적 손상없이 운전할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] Alcoa Aluminium Bus Conductor Handbook, Aluminium Company of America, Chapter 4, pp. 45~48.
- [2] Aluminium Busbar, Alcan Industries Ltd, Table 17, p. 92
- [3] ANSI/IEEE Std. 605-1987 IEEE Guide for Design of Substation Rigid-Bus Structures Automation Conf., pp. 12-17, 1994.
- [4] Engineering Electromagnetics, William H. Hayt. Jr, Fourth Edition, McGraw-Hill
- [5] IEC 60287 Electric Cables -- Calculation of the current rating
- [6] IEC 60889 Hard drawn aluminium wire for overhead line conductors

- [7] 진도- 제주 HVDC #2 설계도면
- [8] 진도-제주 HVDC #2 Manual

## 저 자 소 개



### 김 찬 기 (金 燦 起)

1968년 12월 17일 생, 충북 충주. 1991년 서울 산업 대학교 전기공학과 졸업(학사), 1993년 중앙대학교대학원 전기공학과 졸업(석사), 1996년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1996년 전력 연구원 입사, 현재 전력연구원 책임 연구원.

Tel : (042) 865-5892  
Fax : (042) 865-5844  
E-mail : ckkim@kepri.re.kr



### 박 용 훈 (朴 鏞 勳)

1976년 12월 20일 생, 2002년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업, 2004년 동 대학원 전자전기공학부 졸업(석사), 2008년 동 대학원 전자전기공학부 박사수료, 2004년 ~2006년 한국동서발전(주) 당진화력본부, 2006년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

Tel : (042) 865-5843  
Fax : (042) 865-5844  
E-mail : jdpriest@kepri.re.kr



### 김 진 영 (金 鎭 伶)

1981년 8월 30일 생, 2008년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(학사), 2007년 한국전력공사 입사, 현재 전력연구원 일반연구원.

Tel : (042) 865-5847  
Fax : (042) 865-5844  
E-mail : kgy9043@kepcoco.kr