

# HVDC시스템 밸브홀의 기계적 강도 계산

김찬기<sup>†</sup>, 이성두<sup>1</sup>, 강지원<sup>1</sup>, 윤용범<sup>1</sup>

## Mechanical Strength Calculation of HVDC Valve Hall

Chan-Ki Kim<sup>†</sup>, Seong-Do Lee<sup>1</sup>, Ji-Won Kang<sup>1</sup>, Yong-Beum Yoon<sup>1</sup>

### Abstract

This paper presents electromagnetic force effect of the conductor and insulator in the HVDC valve hall. This paper is based on IEC 60865, which is applicable to the mechanical and thermal effects of short-circuit currents. The paper contains procedures for the calculation of the electromagnetic effect on HVDC conductors and flexible conductors, as well as the thermal effect on HVDC conductors. The results are applied to the Godeok - Dangjin HVDC system.

**Key words:** HVDC, Electromagnetic force, IEC 60865

### 1. 서 론

HVDC 시스템은 전력전자 기술과 고전압을 포함하는 전력계통기술 그리고 제어기술로 구성된 복합기술로써 기존의 학문적인 영역을 벗어나는 부분이 많기 때문에 전문가가 적고, 기술을 체계적으로 완성하기가 어렵다는 점을 들 수 있다.

본 논문에서 서술하고자 하는 부분은 HVDC 시스템의 밸브홀 부분으로 밸브홀의 도체와 애자를 설계할 때 도체와 애자에 기계적인 강도(Strength)를 어떠한 근거로 결정하는지를 서술한 내용이다. 기계적인 강도는 전기공학에서 다루기가 어려운 부분이나 기계적인 강도를 결정하는 인자가 대부분 전기적인 특징에 의해서 결정되고, 설계의 대부분은 경험에 의한 상수이기 때문에 초기 개발자들에게는 생소한 부분일 수 있다. 이러한 점이 본 논문이 엔지니어링 보고서에 가깝지만, 많은 분들에게 도움을 줄 수 있는 실제적인 보고서이기 때문에 논문으로써 가치가 있다고 판단되어 본 논문을 투고하였다. 마지막으로 본 논문의 결과는 현재 진행중인 북당진-고덕 HVDC 시스템에 적용되었음을 알려준다.

#### 1.1 도체 사이에 작용하는 힘

평행도체 사이에서 도체 사이에 작용하는 힘의 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a} \quad (1)$$

여기서,  $i_1$ 과  $i_2$ 는 도체전류의 순시값(A),  $l$ 은 지지물 사이 거리(m),  $a$ 는 도체 사이 거리(m)

두 도체에서 전류가 동일한 방향일 때는 당기는 힘 그리고 전류의 방향이 반대일 경우에는 밀어내는 힘이 작용한다. 식 (1)을 확장해서, 3상 계통에서 동일한 평면상에 배치된 주 도체사이의 힘의 방정식은 식 (2)과 같이 표현된다.

DC 계통의 선간 단락사고 및 AC 계통사고에 의한 도체간 최대 전자기계력은 아래와 같이 계산된다<sup>[1]</sup>.

$$F_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_{SCPeak}^2 \cdot \frac{l}{a} \quad (2)$$

여기서,  $F_m$  : 최대 전자기력(N),  $I_{SCPeak}$  : 최대 단락전류 (A),  $a$  : 도체 사이의 거리 (m),  $l$  : 지지대 사이의 거리 (m),  $\mu_0$  : 진공중의 투자율(Permeability),  $\mu_0=4\pi 10^{-7}$

또한, 대칭 3상 단락회로에서는 식 (3)과 같이 표현되고, 선간단락의 경우에는 식 (4)과 같이 표현된다<sup>[1]</sup>.

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_p^2 \cdot \frac{l}{a_m} \quad (3)$$

Paper number: TKPE-2016-21-5-10

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: chankikim@kepco.co.kr

Power Transmission Laboratory, KEPCO Research Institute

Tel: +82-42-865-5873 Fax: +82-42-865-5844

<sup>1</sup> Power Transmission Laboratory, KEPCO Research Institute

Manuscript received Jun. 10, 2016; revised Jul. 8, 2016;

accepted Jul. 28, 2016

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i_p^2 \cdot \frac{l}{a_m} \quad (4)$$

여기서,  $i_p$  : 평형 3상 단락의 경우에 단락전류 피크값, (A),  $l$  : 인근 지지점 사이의 최대 중간선 거리 (m),  $a_m$  : 주 도체 사이의 유효거리 (m)

1.2 지지물에 작용하는 힘

도체 지지물에 가해지는 힘은 식(5)과 같이 계산한다<sup>[1]</sup>.

$$F = V_F V_{rm} \cdot \alpha \cdot F_m \quad (5)$$

여기서,  $F_m$  : 최대 전자기력 (N),  $\alpha$  : 지지물의 형식에 따라 결정되는 요소,  $V_F$  : 지지점에서 정적인 힘과 동적인 힘의 비율,  $V_{rm}$  : 3상 재폐로 성공시 동적인 스트레스와 3상 재폐로 실패시 주 도체 사이의 힘에 의해서 발생하는 동적 스트레스 비율

표 1에서  $f_y$ 는 인장점에 가해지는 스트레스 [ $N/m^2$ ],  $\sigma_{tot,d}$ 는 총 도체 스트레스 설계값 [ $N/m^2$ ]을 나타낸다<sup>[1]</sup>. 식 (5)에서 설명하는  $V_F V_{rm}$ 는 표 1에서 보여주는 것과 같이 단락전류 유형에 따라 적용에 따른 요소이다.  $\alpha$ 는 표 2에 보여주는 지지대의 형태와 개수에 따라 결정되어진다<sup>[1]</sup>. 또한, SF는 안전율로써 도체의 지지물에 수평 및 수직방향 힘을 고려해서 계산된다<sup>[2]</sup>.

1.3 HVDC 밸브 홀의 최대 전류

HVDC 시스템 밸브홀에 인가되는 최대전류는 싸이리스터 밸브와 변압기 2차측 사이에서 단락사고가 발생하는 경우에 흐른다. 최대전류를 만드는 계통조건은 다음과 같다<sup>[3]</sup>.

- AC계통의 전압이 최대인 경우
- AC계통의 주파수가 최소가 되는 경우
- HVDC 시스템이 최대용량에서 운전하는 경우
- 변압기의 탭이 최대 밸브 권선전압을 유지하는 경우
- 필터가 최대한 인가된 경우

AC계통에서 “Peak Asymmetrical Fault Current ( $I_{fault,peak}$ )”가 흐르는 경우에는 전류는 다음과 같이 계산된다<sup>[3]</sup>.

$$I_{fault,peak} = K \cdot I_{fault} \quad (6)$$

$$(K = \sqrt{2} \left[ 1 + \left[ e^{-\left( \tan^{-1} \left( \frac{X}{R} \right) + \frac{\pi}{2} \right) \frac{R}{X}} \right] \sin \left( \tan^{-1} \left( \frac{X}{R} \right) \right) \right])$$

식 (6)에서  $X$ 는 AC계통의 등가 리액턴스이고  $R$ 은 등가저항이다. 그림 2는 HVDC단에서 고장전류를 계산한 결과를 보여주고 있다.

TABLE 1  
FORCE COEFFICIENTS OF SUPPORT ACCORDING TO FAULT TYPES

Fault type	$V_F V_{rm}$
Line to line	
Three phase	

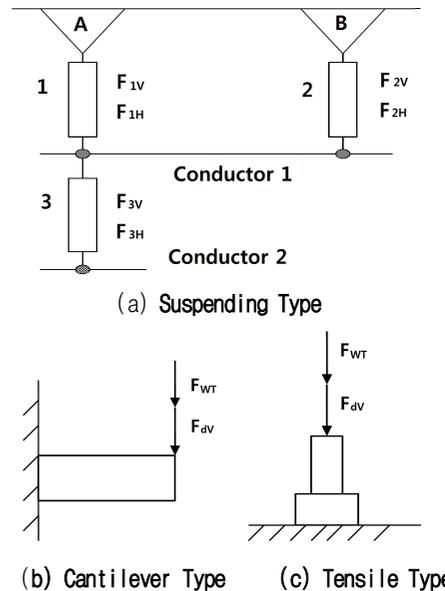


Fig. 1. Structure of support.

1.4 밸브 홀에 존재하는 지지물의 구성

지지물에 대한 기계적인 강도를 계산하는 경우에 지지물의 구조와 구조에 따른 힘의 계산방법을 고려해야 한다. 그림 1은 구조물의 종류를 보여 주는 것으로, 식 (7)~(9)은 구조물의 종류에 따른 구조물의 기계적인 힘 계산 방법을 보여 주고 있다<sup>[1]</sup>.

식 (7)은 식 (5)에 최악상황을 고려하여 안전율(SF)을 추가로 적용한 식이 된다. 식 (7)은 Suspensing타입에 대한 식을 나타내면, 식(8)과 식 (9)은 각각 Cantilever 타입과 Tensile 타입에 대한 식을 나타낸다.

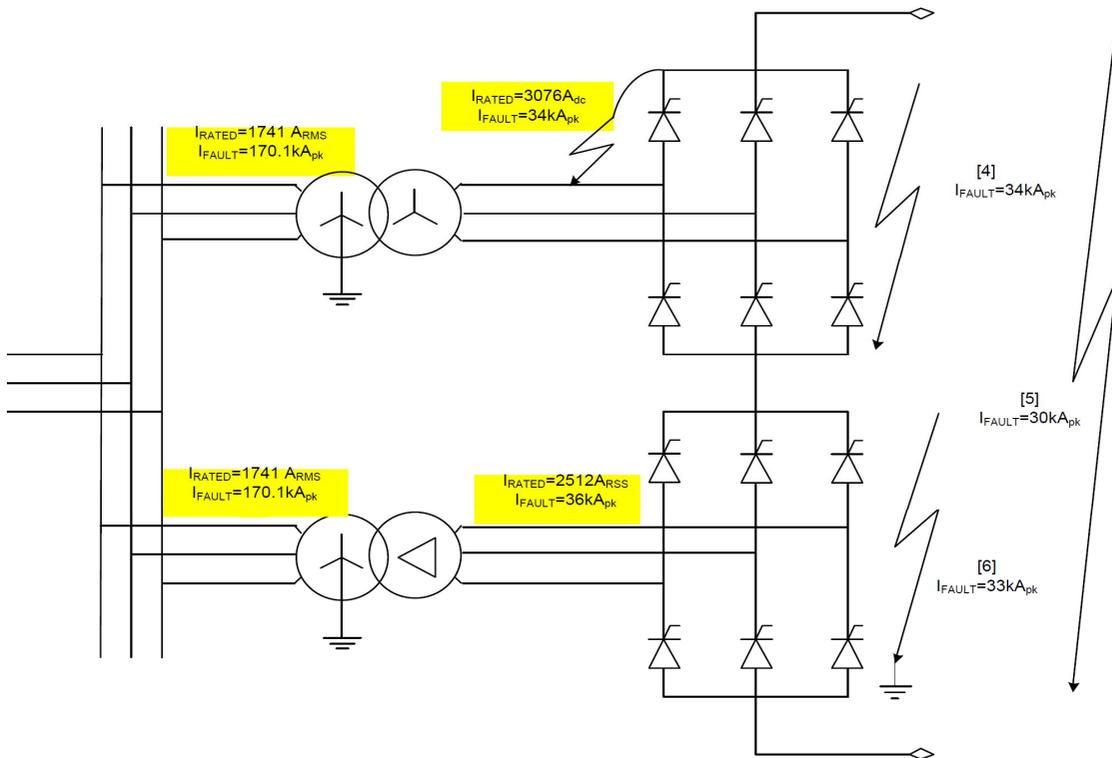
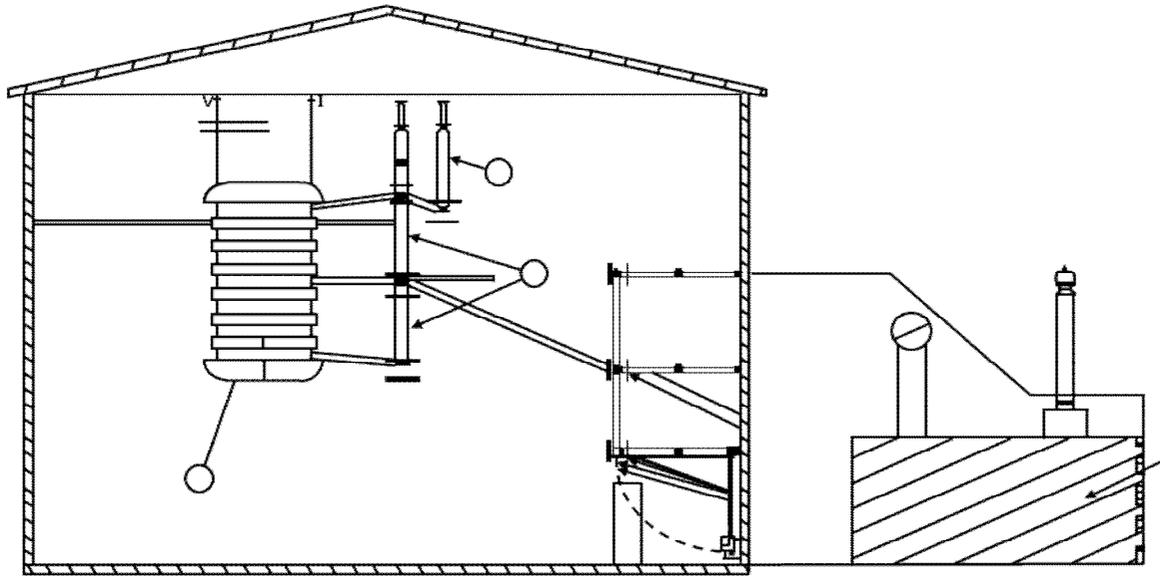


Fig. 2. Fault current calculation in valve hall.

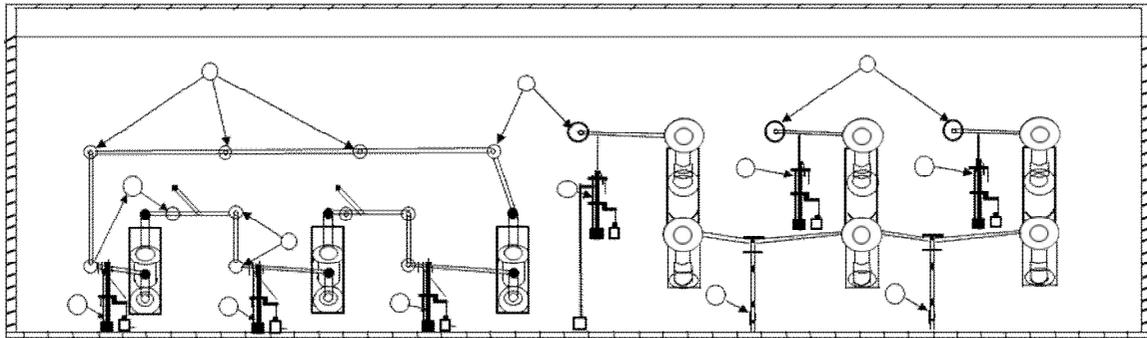
TABLE II  
FACTORS  $\alpha, \beta, \gamma$  FOR DIFFERENT BUSBAR SUPPORT ARRANGEMENTS

Type of beam and support			$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Single span beam	A and B: simple supports		A: 0.5 B: 0.5	1.0	1.57
	A: fixed support B: simple support		A: 0.625 B: 0.375	$\frac{8}{11} = 0.73$	2.45
	A and B: fixed supports		A: 0.5 B: 0.5	$\frac{8}{16} = 0.5$	3.56
Continuous beam with equidistant simple supports	Two spans		A: 0.375 B: 1.25	$\frac{8}{11} = 0.73$	2.45
	Three or more spans		A: 0.4 B: 1.1	$\frac{8}{11} = 0.73$	3.56

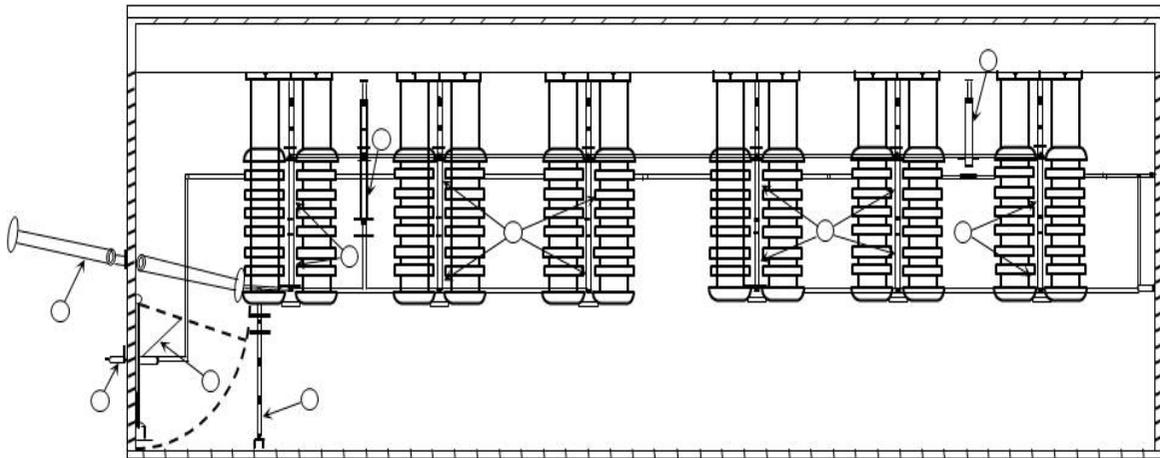
※  $\alpha$ :지지점 작용힘에 대한 요소,  $\beta$ :주 도체 스트레스에 대한 요소,  $\gamma$ :고유주파수 평가를 위한 요소



(a) HVDC Valve and Conductors (Left Side View)



(b) HVDC Valve and Conductors (Front View)



(c) HVDC Valve and Conductors (Right Side View)

Fig. 3. HVDC valve and supports and busbar.

TABLE III  
NUMBERS OF INSULATOR AND INSULATOR TYPES

Description	Installation Position	Quantity
LVDC Wall Insulators	Horizontal	17
Star Floor Insulator	Vertical Floor	2
Star Wall Insulator	Vertical Floor	3
Valve Arrester Suspension Insulator	Vertical Underhung	6
Bridge Arrester Suspension Insulator	Vertical Underhung	1
Mid-point Suspension Insulator	Vertical Underhung	1
HVDC Floor Insulator	Vertical Floor	1
Delta Wall Insulator	Horizontal	11

a) Suspending 타입

$$F_{Suspending} = V_F \cdot V_{rm} \cdot \alpha \cdot SF \cdot F_m \quad (7)$$

b) Cantilever 타입

$$\begin{aligned} F_{Cantilever} &= F_{WT} + F_{Cantil} \quad (8) \\ F_{WT} &= (W_{CO} + W_{BU}) \cdot SF \cdot g \\ F_{Cantil} &= V_F \cdot V_{rm} \cdot \alpha \cdot SF \cdot F_m \end{aligned}$$

여기서,  $W_{CO}$ = 커넥터의 무게(kg),  $W_{BU}$ = 모선의 무게(kg),  $g$ =중력상수( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

c) Tensile 타입

$$\begin{aligned} F_{Tensile} &= F_{WTT} + F_{Tent} \quad (9) \\ F_{WTT} &= (W_{SA} + W_{CO} + W_{BU}) \cdot SF \cdot g \\ F_{Tent} &= V_F \cdot V_{rm} \cdot \alpha \cdot SF \cdot F_m \end{aligned}$$

여기서,  $W_{SA}$ =지지물의 무게(kg),  $W_{CO}$ =커넥터의 무게(kg),  $W_{BU}$ =모선의 무게(kg),  $g$ =중력상수( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

## 2. 본 론

### 2.1 벨브홀 구성

그림 3은 벨브홀의 기준 배치도를 보여주고 있는 것으로 도체와 애자 그리고 지지물에 대한 위치를 나타내고 있다. 표 3은 벨브홀에서의 애자수량과 종류를 정리한 것이다.

### 2.2 사례 연구

표 3의 벨브홀 애자중에서 Suspending, Cantilever, Tensile 타입별로 1개씩을 골라서 단락고장시 발생하는 전자기력과 함께 도체 사이에 적용되는 힘을 계산하였다.

#### 2.2.1 Suspension Insulator (Valve Arrester Insulator)

본 케이스는 표 4의 8번 케이스에 해당되며 단락고장

시 도체에 인가되는 전자기력은

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i_{p2}^2 \cdot \frac{l}{a_m} = 392.85N$$

여기서,  $i_{p2}$ =단락회로전류(36000 A),  $l$ =지지물 사이 중심선 거리 (9.7m),  $a_m$ =이웃한 주 도체 사이의 유효거리(m)

$$a_m = \sqrt{a_{mH}^2 + a_{mV}^2} = \sqrt{0^2 + 6.4^2} = 6.4m$$

여기서,  $a_{mH}$  = 이웃 주요 도체 사이의 수평거리(m)  
 $a_{mV}$ = 이웃 주요 도체 사이의 수직거리(m)

수평방향의 힘이 없기 때문에, 단락회로 상태 동안 도체의 수직성분은 다음과 같다.

$$F_{m2V} = F_{m2} = 392.85N$$

단락회로 상태 동안 애자의 힘의 수직성분은 다음과 같다.

$$F_{dN} = V_F \cdot V_{rm} \cdot \alpha \cdot SF \cdot F_{m2V} = 1230N$$

여기서,  $V_F V_{rm} = 2$ ,  $\alpha = 0.625$ , SF(안전율) = 2.5

#### 2.2.2 Cantilever Insulator (Delta Wall insulator)

본 케이스는 표 4의 6번 케이스에 해당되며, 단락고장시 도체에 인가되는 자기력은

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i_{p2}^2 \cdot \frac{l}{a_m} = 324.00N$$

여기서,  $i_{p2}$ = 단락회로전류(36000 A),  $l$ =지지물 사이의 중심선 거리(4.5 m),  $a_m$ =이웃한 주 도체 사이 유효거리(m)

$$a_m = \sqrt{a_{mH}^2 + a_{mV}^2} = \sqrt{0^2 + 3.6^2} = 3.6m$$

여기서,  $a_{mH}$ =이웃 주요 도체 사이의 수평거리(m),  $a_{mV}$ =이웃 주요 도체 사이의 수직거리(m)

고장동안 도체에 인가되는 힘의 수직방향은 다음과 같다.

$$F_{m2V} = F_{m2} = 324.00N$$

$$F_{dV} = V_F \cdot V_{rm} \cdot \alpha \cdot SF \cdot F_{m2V} = 1010N$$

여기서,  $V_F V_{rm} = 2$ ,  $\alpha = 0.625$ , SF(안전율) = 2.5

TABLE IV  
ELECTROMAGNETIC FORCES OF SUPPORT AND INSULATOR IN VALVE HALL

Case	Case name	Frequency (Hz)	Isc peak (A)	Fault Type	S (m)	L (m)	Fm (N)	Angle [°]	Fm Vert. (N)	Fm Hori. (N)
1	D1-D2 H	60	36000	Thyristor Valve	8.40	7.60	234.51	0	0.00	234.51
2	D3-Y3 H	60	36000	Thyristor Valve	8.80	6.80	200.29	0	0.00	200.29
3	Y2-Y3 H	60	36000	Thyristor Valve	9.10	6.00	170.90	0	0.00	170.90
4	TFD-H	60	36000	Transformer secondary	7.86	7.00	230.71	12	46.94	225.88
5	TFY-H	60	36000	Transformer secondary	6.54	4.00	158.55	67	63.04	145.48
6	DA V	60	36000	Transformer secondary	3.60	4.50	324.00	0	324.00	0.00
7	DA H	60	36000	Transformer secondary	7.70	7.30	245.74	0	0.00	245.74
8	S1	60	36000	Thyristor Valve	6.40	9.70	392.85	0	392.85	0.00
9	S2	60	36000	Thyristor Valve	6.40	6.00	243.00	0	243.00	0.00
10	A0	60	36000	Thyristor Valve	5.69	3.90	177.79	66	71.92	162.59
11	S3	60	36000	Thyristor Valve	6.40	6.00	243.00	0	243.00	0.00
12	S4	60	36000	Thyristor Valve	6.40	8.50	344.25	0	344.25	0.00
13	S5	60	36000	Thyristor Valve	6.40	10.50	425.25	0	425.25	0.0
14	V1	60	36000	Thyristor Valve	8.78	3.90	115.13	75	28.85	111.46
15	V2	60	36000	Thyristor Valve	9.17	3.90	100.26	76	26.46	107.04
16	V3	60	36000	Thyristor Valve	2.20	3.90	459.49	0	459.49	0.00

▶ D : 변환용변압기  $\Delta$ 결선 ▶ Y : 변환용변압기 Y결선 ▶ H : HVDC 고압측

▶ S : 변환용변압기 2차 AC측 모선 ▶ V : 밸브측 DC모선 사이

▶ D1-D2 H : 첫 번째와 두 번째 변환용변압기  $\Delta$ 결선의 HVDC 고압 (밸브 측) 모선 사이

▶ D3-Y1 H : 세 번째 변환용변압기  $\Delta$ 결선과 첫 번째 변환용변압기 Y결선의 HVDC 고압(밸브 측) 모선 사이

▶ Y2-Y3 H : 두 번째와 세 번째 변환용변압기 Y결선의 HVDC 고압(밸브 측) 모선 사이

▶ TFD-H는 변환용변압기  $\Delta$ 결선의 연결모선과 밸브의 고압 측 모선사이

▶ TFY-H는 변환용변압기 Y결선의 연결모선과 밸브의 고압 측 모선사이

▶ DA V : 변환용변압기  $\Delta$ 결선의 AC 측과 밸브의 저압 측 모선사이

▶ DA H : 변환용변압기  $\Delta$ 결선의 AC 측과 밸브의 고압 측 모선사이

또한, 수직방향에서 애자에 인가되는 힘은 장비의 무게가 포함되어야 하기 때문에 다음과 같이 계산된다.

$$F_{WT} = (W_{CO} + W_{BU}) SF g = 9.81 \text{ kN}$$

여기서,  $F_{WT}$  =장비무게 기여분(N),  $W_{CO}$ =커넥터 무게(100kg),  $W_{BU}$ =모선 무게(300kg),  $g$ =중력상수( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $SF$ (안전율)=2.5

Delta Wall insulator의 Cantilever Insulator에 인가되는 힘은 다음과 같다.

$$F_T = F_{dV} + F_{WT} = 1.01 + 9.81 = 10.82 \text{ kN}$$

### 2.2.3 Floor Insulator (Tensile type)

본 케이스는 표 4의 10번 케이스에 해당되며, 단락고장시 도체에 인가되는 자기력은

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i_{p2}^2 \cdot \frac{l}{a_m} = 177.79 \text{ [N]}$$

여기에서,  $i_{p2}$ =단락회로전류(36000A),  $l$ =지지물 사이의 중심선(9.7m),  $a_m$ =이웃한 주 도체 사이의 유효거리(m)

$$a_m = \sqrt{a_{mH}^2 + a_{mV}^2} = \sqrt{5.2^2 + 2.3^2} = 5.69 \text{ [m]}$$

여기서,  $a_{mH}$ = 이웃 주요 도체 사이의 수평거리(m),  $a_{mV}$ = 이웃 주요 도체 사이의 수직거리(m)

단락회로 동안에 애자의 수직성분의 힘은 각도  $66^\circ$ 를 적용하여 다음과 같다.

$$F_{dV} = V_F V_{rm} \cdot \alpha \cdot SF \cdot F_{m2V} = 0.22 \text{ [kN]}$$

여기서,  $V_F V_{rm} = 2$ ,  $\alpha = 0.625$ ,  $SF$  : 안전율 = 2.5  
 $F_{m2V} = F_m \cos(66^\circ) = 72.3 \text{ [kN]}$

또한, 수직방향에서 애자에 인가되는 힘은 장비의 무게가 포함되어야 하기 때문에 다음과 같이 계산된다.

$$F_{WT} = (W_{SA} + W_{CO} + W_{BU}) \cdot SF \cdot g = 14.715 \text{ [kN]}$$

여기서,  $F_{WT}$  =장비무게 기여분(N),  $W_{SA}$ =애자 무게(200kg),  $W_{CO}$ =커넥터 무게(100kg),  $W_{BU}$ =모선 무게(300kg),  $g$ =중력상수( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $SF$ (안전율)=2.5

애자의 총 인장력은 :

$$F_T = F_{dV} + F_{WT} = 14.72 + 0.22 = 14.94 \text{ [kN]}$$

## 3. 결 론

본 논문은 밸브 홀 내부의 애자 그리고 지지대에 가해지는 최대 전자력이나 최소 전자력 그리고 기계력에 대한 검토를 수행하였다. 본 계산은 IEC 60865-1 표준에 따라 계산되었으며, 실제적인 계산 결과이기 때문에 대용량 전력전자설비 설계에 많은 참고가 되리라 사료된다.

본 논문에 자료를 제공하여 준 KAPES사의 성판영 부장님에게 감사를 전합니다.

## References

- [1] IEC 60865-1, Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1 : Definitions and calculation method, 2011
- [2] Dangjin Short-Circuit Forces Calculation Note, 2016, KAPES.
- [3] Circuit Current Requirement, 2016, KAPES



### 김찬기(金燦起)

1991년 서울과학기술대 전기공학과 졸업. 1996년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 한전 전력연구원 차세대송변전연구소 고효율송전그룹 책임연구원.



### 이성두(李性斗)

1996년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 한전 전력연구원 차세대송변전연구소 고효율송전그룹 선임연구원.



### 강지원(姜地原)

1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년~현재 한전 전력연구원 차세대송변전연구소 고효율송전그룹장.



### 윤용범(尹用範)

서울대 전기공학과 석·박사(1986, 1995). 한전경제경영연구원 팀장. 전력연구원 HVDC PM. 現 한전 전력연구원 차세대 송변전연구소장.