

## 고조파의 영향을 고려한 GIS 모선의 통전 용량 예측

김중경, 윤일주, 김승욱, 한성진  
동아대학교 전기공학과

### Ampacities Prediction of GIS Busbar Including the Effects of Harmonics

Joong-Kyoung Kim, Iel-Joo Yoon, Seung-Wook. Kim, Sung-Chin Hahn  
Dept. of Elec. Eng. Dong-A Uni.

**Abstract** - 최근 전력계통에 연결된 비선형 장치가 부하의 큰 부분을 차지하고 있다. 비선형 장치는 계통전류에 고조파를 발생시키고 기본파 전류에 의한 도체 손실에 고조파 전류손이 더해져서 도체의 온도를 상승시킨다. 도체의 온도 상승에 관한 연구는 주로 정현파 60Hz 전류에 기초해서 통전용량을 계산하고 그에 따른 손실을 계산하였다.

본 논문에서는 GIS 모선에 고조파 전류가 포함되는 경우 고조파의 영향에 따른 통전용량을 계산한다. 즉, GIS 모선에 주파수의 영향에 따른 손실비를 구하고, 유한 요소 해석을 통해 계산된 GIS 모선의 고조파에 따른 손실값을 정현파 60Hz 전류일 때에 계산된 손실값과 비교한다. 이 결과는 GIS 모선의 정확한 통전용량을 예측하는데 사용될 것이다.

#### 1. 서 론

가스 절연 계폐장치(GIS : Gas Insulated Substation)란 변압기를 제외한 차단기(GCB), 단로기(DS), 접지개폐기(ES), 모선(Bus), 스페이서(Spacer), 봇싱, PT, CT 등을  $SF_6$  가스가 들어있는 금속용기에 넣어 시스템화한 전력기기이다[1]. 이 장치의 고압 전류부가 모두  $SF_6$  가스와 함께 금속 용기에 밀봉되어 있기 때문에 설계와 제작시 고도의 신뢰성이 요구된다[2].

GIS 모선의 설계 기술에는 절연 설계와 통전 설계로 나뉘며 지금까지 통전 설계시 통전 용량 계산은 주로 60Hz의 정현파 전류에 기초하여 계산하고 그에 따른 손실을 계산하였다. 그러나 GIS 모선에는 일반적으로 4000[A] 이상의 대전류가 흐르고 그 모선에 고조파 전류가 포함된다면 모선에서의 손실은 상당히 커질 것이다. 그로 인해 도체에 열을 발생시키고 이 열은 모선의 온도를 더욱 상승시켜 모선의 경격 온도를 초과할 수도 있다[3].

본 논문에서는 GIS 모선에 고조파 전류가 흐를 때 모선 손실에 관련된 여러 가지 파라미터들에 대해 알아보고 이때 모선의 통전 용량과 손실에 대해 다룰 것이다[4]. 이렇게 구한 손실값과 60Hz 정현파 전류가 흐를 때 모선의 손실값을 비교함으로써 GIS 모선의 정확한 통전 용량을 예측할 수 있을 것이다.

#### 2. 고조파 영향을 고려한 통전 용량 이론

##### 2.1 도체의 저항 손실

모선의 통전 용량 계산은 전류가 흐르는 도체의 저항 손실로 계산되며, 이때 도체의 손실  $P$ 는

$$P_{loss} = \int_S \frac{I^2}{\sigma} dS \quad (1)$$

여기서,  $J =$  전류밀도

$dS =$  전류가 흐르는 미소 단면적

도체의 손실을 총 실효 전류  $I$ 로 다시 표현하면

$$P_{loss} = I^2 R_{eff} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } R_{eff} = \frac{\int_S \frac{I^2}{\sigma} dS}{I^2}$$

전도율  $\sigma$ 인 물질 내에서 전류 밀도  $J$ 는 공간과 시간의 함수이며 무한히 긴 도체의 경우 전류밀도는 2차원 공간에서만 변화한다.  $x, y$ 의 두 좌표를 선택했을 때 두 점  $(x_0, y_0), (x_1, y_1)$ 에 대해 키르히호프의 전류 법칙을 적용하면

$$\frac{J(x_1, y_1)}{\sigma} - \frac{J(x_0, y_0)}{\sigma} + \frac{d\Phi}{dt} = 0 \quad (3)$$

여기서,  $\Phi =$  단위길이당 자속

##### 2.2 저항비

모선에 교류 전류가 흐를 때 증가한 손실을 계산하기 위해서는 표피효과와 근접효과를 고려해야 한다. 그러나 이 방법은 어려우므로 본 논문에서는 DC조건에서 발생하는 손실과 AC조건에서 발생하는 손실의 비를 이용했다. 이 비는 AC/DC 저항비가 되며 다음과 같다.

$$\left( \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right) = \frac{\int_S \frac{(J(x, y))^2}{\sigma} dS}{I^2 R_{dc}} \quad (4)$$

이때 도체와 탱크의 손실을 모두 고려해야 하며 각 요소의 손실은 서로 따로 계산한다.

$$\left( \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right) = 1 + x_c = 1 + x_{cs} + x_{cp} + x_{pt} \quad (5)$$

여기서,  $x_c =$  도체에 발생한 손실의 증가

$x_{cs} =$  표피효과에 따른 손실의 증가

$x_{cp} =$  다른 도체의 근접효과에 따른 손실의 증가

$x_{pt} =$  탱크의 근접효과에 따른 손실의 증가

표피효과에 따른 손실의 증가는

$$x_{cs} = \frac{ka}{2} \frac{M_0(ka)}{M_1(ka)} \sin\left\{\theta_1(ka) - \theta_0(ka) - \frac{\pi}{4}\right\} - 1 \quad (6)$$

여기서,  $k = \sqrt{2\pi f n \mu \sigma}$

$a$  = 도체 반경 [m]

$f$  = 주파수 [Hz]

$\mu$  = 도체 투자율

$\sigma$  = 도체 전도율

$n$  = 고조파 차수

$M_0(ka), M_1(ka), \theta_0(ka), \theta_1(ka)$  = Bessel Ftn

다른 도체의 균접효과에 따른 손실의 증가는

$$x_{cp} = F(x_p) \left( \frac{D_c}{s} \right)^2 \left\{ \frac{1.18}{F(x_p) + 0.27} + 0.312 \sqrt{n} \left( \frac{D_c}{s} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

여기서,  $x_p = \frac{k}{\sqrt{\sigma \pi R_{dc}}} \sqrt{k_p}$

$D_c$  = 도체 직경 [m]

$k_p$  = 균접효과 상수

$s$  = 도체 간격 거리 [m]

탱크의 균접효과에 따른 손실의 증가는

$$x_{ct} = 0.5(x_{cs} + x_{cp}) \quad (8)$$

### 2.3 고조파 영향을 고려한 손실

고조파가 포함된 전류는 도체의 저항 손실을 증가시키며 이러한 손실의 증가는 전류 성분의 증가와 주파수에 따른 도체 저항의 증가 때문이다.

어떤 순시에 대한 전류의 순시값은

$$i(t) = \sum i_n(t) \quad (9)$$

여기서,  $i(t)$  = 도체의 총 순시 전류

$i_n(t)$  =  $n$ 번째 고조파 전류의 순시값

$n$  = 고조파 차수

고조파 영향을 고려한 손실은 각각의 고조파에 대한 손실을 계산하고 그 합을 취해 구한다.

$$\begin{aligned} P_{loss} &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 (R_{ac})_n \\ &= R_{dc} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \left( \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_n \end{aligned} \quad (10)$$

정격주파수에 대한  $n$ 번째 고조파의 비  $\gamma_n = \frac{I_n}{I_f}$  일 때

$$P_{loss} = R_{dc} I_f^2 \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n^2 \left( \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_n \quad (11)$$

그러므로 실제 왜곡 AC/DC 저항비는

$$\left( \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_{dist} = \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n^2 \left( \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_n \quad (12)$$

이 실효 저항비는 모선에 흐르는 각 고조파의 크기 합수이며 손실은 총 고조파 왜곡 (THD=total harmonic distortion)과 왜곡 분포에 따라 변한다.

총 고조파 왜곡(THD)은

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (13)$$

모선의 고조파 감쇄 계수(HDF = harmonic derating factor)는 기본파의 정격 전류가 흐를 때와 같은 손실을 유지하기 위해 감소되어야 하는 전류량을 나타낸다. 즉,

$$(I_{derated})^2 R_{dc} \left( \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_{dist} = (I_{rated})^2 R_{dc} \left( \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_{fund} \quad (14)$$

여기서,  $I_{derated} = (1 - \delta) I_{rated}$

고조파 감쇄 계수(HDF)  $\delta$ 는

$$\delta = 1 - \sqrt{\frac{\left( \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_{fund}}{\left( \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_{dist}}} \quad (15)$$

## 3. 해석 모델 및 결과

### 3.1 GIS 모선 모델

#### 3.1.1 단상 모선

본 논문에서 다룬 단상 모델은 362kV 63kA 4000A GIS 모선부로서 사양은 다음 그림 1과 표 1에 나타나 있다.

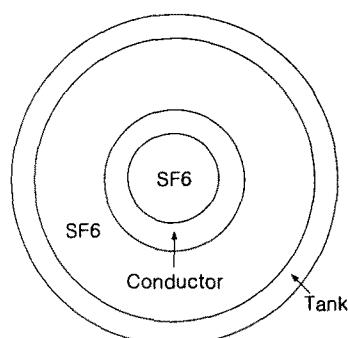


그림 1. 단상 모선의 단면

표 1. 단상 모선의 사양

	물질	전도율 [S/m]	내경 [mm]	외경 [mm]
도체	AL	3.82e7	85	120
탱크	STS	0.11e7	570	605

#### 3.1.2 삼상 모선

본 논문에서 다룬 삼상 모델은 362kV 63kA 4000A GIS 모선부로서 사양은 다음 그림 2와 표 2에 나타나 있다.

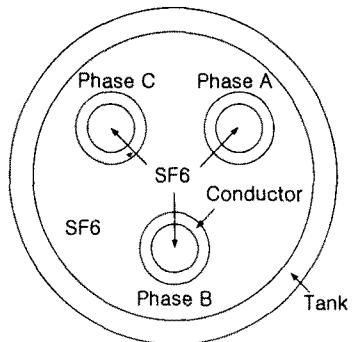


그림.2. 삼상 모선의 단면

표 2. 삼상 모선의 사양

	물질	전도율 [S/m]	내경 [mm]	외경 [mm]
도체	AL	3.82e7	92	120
탱크	STS	0.11e7	900	920

### 3.1.3 고조파 항목

모선에 흐르는 전류의 실효값은 4000[A]이고 입력 주파수는 60Hz이다. 이 모선에 고조파를 고려한 항목은 표 3과 같다. 단, 표 3에 표시된 고조파 성분비는 실제 측정된 성분비가 아니고 [5]의 Cable 해석에서 적용된 성분비이다.

표 3. 고조파 항목

고조파 차수	모선의 전류 [A]	주파수 [Hz]
기본파	4000 (positive)	60
제3고조파	914.3 (zero)	180
제5고조파	137.2 (negative)	300
제7고조파	137.2 (positive)	420

### 3.2 해석 결과

#### 3.2.1 단상 모델 해석

단상 모선에서 고조파의 영향을 고려한 도체와 탱크의 손실은 표 4와 같다.

표 4. 단상 모선의 손실

고조파 차수	전류 [A]	주파수 [Hz]	손실 [W/m]	
			도체	탱크
1	4000	60	109.34	412.628
3	914.3	180	11.4198	23.7736
5	137.2	300	0.3386	0.5443
7	137.2	420	0.4015	0.5526
총손실 [W/m]	도체		121.4999	
	탱크		437.4985	

표에서 나타난 바와 같이 고조파에 따른 각 손실값이

존재하므로 기본파만을 고려한 경우 보다 총손실이 도체에서 11.1%, 탱크에서 6% 증가함을 알 수 있다.

#### 3.2.2 삼상 모델 해석

삼상 모선에서 고조파의 영향을 고려한 도체와 탱크의 손실은 표 5와 같다.

표 5. 삼상 모선의 손실

고조파 차수	전류 [A]	주파수 [Hz]	손실 [W/m]			
			A상 도체	B상 도체	C상 도체	탱크
1	4000	60	113.63 8	113.63 8	113.63 7	621.62 9
3	914.3	180	10.840 1	10.839 8	10.839 8	63.419 2
5	137.2	300	0.3350	0.3349	0.3350	1.5671 3
7	137.2	420	0.4007	0.4007	0.4007	1.6152
총손실 [W/m]	A상 도체		125.2139			
	B상 도체		125.2135			
	C상 도체		125.2125			
	탱크		688.2305			

삼상의 경우에도 단상에서와 마찬가지로 고조파를 고려하였을 경우 총손실이 A상·B상·C상 도체에서 10.2%, 탱크에서 10.7% 증가함을 알 수 있다.

### 4. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 고조파 영향을 고려한 GIS 모선의 통전 용량 문제를 연구하였고 이때 발생하는 총 손실은 각각 고조파 손실의 합으로 표현됨을 알 수 있다. 그리고 고조파 손실 성분의 합은 모선의 감쇄를 야기하며 감쇄량은 각각 고조파 전류와 저항의 크기로 표현됨을 알 수 있다. 기본주파수에 따른 손실값과 고조파 영향을 고려한 손실값을 비교함으로써 GIS 모선의 정확한 통전 용량을 예측할 수 있다. 향후 계획은 고조파 성분의 비를 산정하는 방법을 도출하고 표피효과와 근접효과를 포함한 총 ac 도체 저항 계산을 통한 계산값과 해석값을 비교 검토하여 타당성을 검증할 것이다. 그리고 고조파 영향을 고려한 GIS 모선의 온도 상승 문제를 다룰 것이다.

#### (참고문헌)

- [1] 이 경행, “초고압 전력기기의 기술 동향”, 전기학회지, 제46권 제8호, pp.23-30, 10월 1997년
- [2] H.Sadakuni, K.Sasamori, H.Hama, K.Inami, “Insulation and current carrying design for GIS”, JIEE, SP-96-12, pp.33-42, 1996년
- [3] A.Hiranandani, “Calculation of Cable Ampacities Including the Effects of Harmonics”, IEEE Industry Application Magazine, March/April, pp.42-51, 1998년
- [4] J.A.Palmer, R.C.Degeneff, T.M.McKernan, T.M.Halleran, “Pipe-type Cable Ampacities in the Presence of Harmonics”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.8 No.4, pp.1689-1695, Oct. 1993년
- [5] A.P.Sakis Meliopoulos, M.A.Martin, “Calculation of Secondary Cable Losses and Ampacity in the Presence of Harmonics”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.7 No.2, April 1992년