

차단기의 차단용량과 비대칭 전류

글/김 정 철

한국전기철도기술주식회사 상임고문
태정시스템 고문/기술사 ☎ 02)525-6473

일 반적으로 차단기의 차단 용량은 대칭 실효치(rms symmetrical)로 표시하고 있다. 그러나 실제 전력 계통의 고장 전류는 고장 최초 몇 사이클 동안에는 상당한 직류분 전류가 포함되어 있어 비대칭 전류가 흐르게 마련이다.

따라서 전력 계통해석 뿐만 아니라 차단기의 용량을 정하고자 하는 분들 가운데에는 계통 고장시의 비대칭 전류 계산을 원하는 분들이 상당히 있어 비대칭 전류의 생성과 계산에 대하여 설명하고자 한다.

1. 비대칭 전류

대칭 실효치라 함은 고장 전류 가운데 교류분만의 실효치를 말한다.

반면 단락 전류의 비대칭 실효치란 단락 전류에 포함되어 있는 직류분을 포함한 전류의 실효치를 말한다. 일반적으로 고전압 회로에 있어서는 전원 측의 저항은 리액턴스에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작다.

따라서 단락 전류는 전원 전압에 비하여 위상각이 거의 90° 늦게 된다. 그러나 저압 회로에 있어서는 저항의 비율이 상대적으로 크기 때문에 전류의 상차각은 90° 보다 작게 된다.

리액턴스로만 구성되어 있는 회로에서 전원 전압과의 파고점에서 단락이 발생하면 단락 전류는 0에서(전압 보다 90° 늦은 점) 출발하여 전압과에 대하여 회로 역률 각과 같은 90° 늦은 X축에 대칭인 사인(Sine) 곡선을 그리게 된다(그림 1 참조).

반면 단락 사고가 전원 전압과 0인 점에서 발생하면 전류는 0에서 출발하나 이 단락 전류는 전압보다 90° 늦음으로 최대 전류는 다음의 전압 0인 점(사고 점에서 180° 되는 점)이 되어, X축에 대칭인 사인 곡선을 그리지 않고 파고치에서의 단락 전류보다 90° 늦고 동시에 Y축의 윗 방향(+방향)으로 대칭 전류의 파고치 만큼 이동하게 된다(그림 2 참조).

이 두 가지 경우는 모두 회로 역률이 0인 경우로 극단적인 예를 든 것이다. 이와 같은 이유로 단락 전류는 만일 단락이 전원 전압의 파고점과 0인 점 사이의 어떤 점에서 발생하면 단락이 발생한 전압 곡선상의 위치에 따라 정도가 다른 비대칭 전류가 되게 된다. 따라서 최대 비대칭 단락 전류는 전압과 0인 점에서 단락이 발생하였을 때로써 단락 발생 후 $1/2\text{Hz}$ 되는 점의 파고치임을 알 수 있다.

이에 따라 비대칭 전류의 계산은 교류

대칭 전류와 직류의 2가지 성분으로 나누어 분석한다. 직류분의 감쇄 곡선은 전원 계통 회로의 저항과 리액턴스, 즉 회로 시정수(Time Constant)와 시간에 따라 식(5)에 의하여 다음의 식(1)과 같이 감쇄하여 간다.

$$I_{dc} = \sqrt{2} I_{s0} e^{-\frac{x}{R}t} \dots (1)$$

2. 고압 회로의 비대칭 전류

발전기로부터 거리가 상당히 멀리 떨어져 있어 발전기의 차 과도리액턴스의 영향이 없을 때 전원측은 $X/R < 15$ 로 되어 단락 전류의 교류 분은 감소하지 않는다. 이때에는

$$I_k = I_b = I_{s1} \dots (2)$$

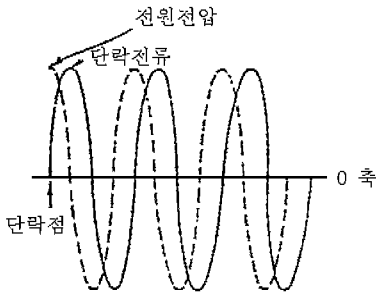


그림 1 대칭 전류와 전압

$$i_p = x \sqrt{2} I_{s1} \dots (3)$$

$$x = 1.02 + 0.98 e^{-3R/X}$$

여기서,

I_k = Steady state short circuit current (r.m.s)

I_b = Symmetrical short circuit breaking current (r.m.s)

I_{s1} = Initial symmetrical short circuit current (r.m.s)

i_p = Peak short circuit current (crest)

의 관계가 성립한다⁽¹⁾.

(2)식은 곧 차단기의 차단 또는 투입은 비대칭 전류와 관계 없이 투입 전류는 i_p 에 의하여, 차단 전류는 I_b 에 의하여 결정되는 것을 의미한다.

ANSI/IEEE 에서도 회로의 $X/R < 15$ 일 때에는 Multiplying Factor를 1로 하고, $X/R > 15$ 이

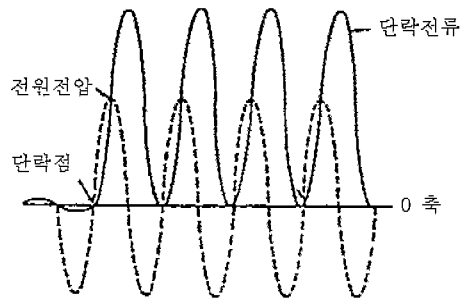


그림 2 비대칭 전류와 전압

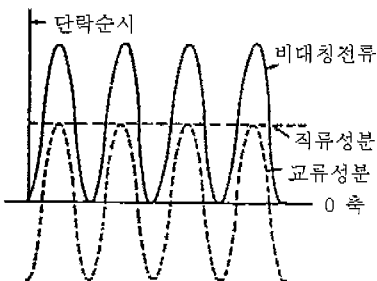


그림 3 비대칭 전류의 직류 성분

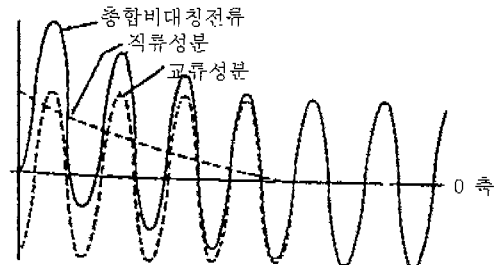


그림 4 직류 성분 감쇄와 비대칭전류

상일 때로써 비대칭 전류의 보다 정밀한 계산이 필요한 경우에 그림 5의 Multiplying Factor를 곱하도록 되어 있다⁽²⁾.

일반적으로 $X/R < 15$ 일 때 또는 특별히 전동기의 기여 전류를 고려하여야 할 필요가 있는 경우를 제외하고는 대칭 용량이 적절한 차단기는 해당 비대칭 전류에 대하여도 그 용량이 충분하다고 한다⁽³⁾.

그림 5에서 보는 바와 같이 비록 $X/R > 15$ 인 경우라 할지라도 고압 또는 특고압 차단기에 있어서는 비대칭 계수가 1.25보다 큰 경우가 거의 없음을 알 수 있으며 JEC181에서도 비대칭 전류계수(= $\frac{\text{비대칭전류}}{\text{대칭전류}}$)를 1.5Hz 에서 1.19로 간주하고 있으며 비록 이 값이 큰 경우 일지라도 1.25배를 초과하지 않으므로 비대칭 계수를 무시하고 필요한 대칭 전류만으로 차단기의 용량을 구하고 있다⁽⁴⁾.

이에 따라 고압에서는 차단 시간이 수 ms 이내인 Fuse, 저압에서는 0.02sec 전후에 회로를 차단하는 몰드차단기(MCCB)에 대하여서는 비대칭 전류를 표시 할 때가 있으나 일반적으로 고압 이상의 차단기에는 비대칭 전류를 표시하지 않는다.

비대칭 전류는 계통 회로의 R성분에 의한 손

실로 인하여 직류 분이 $e^{-\frac{x}{Rt}}$ 에 비례하여 감소하므로 매 사이클마다 그 값이 감소하는 것을 알 수 있다.

문헌⁽⁵⁾에 따르면 비대칭 전류의 계산 방법에는

- ① 정밀 계산법
- ② 준 정밀 계산법
 - ㄱ. Catenacci 법
 - ㄴ. Huening 법
- ③ 간이 계산법
 - ㄱ. 일본전기학회 공동연구회의 추천 방법
 - ㄴ. VDE의 계산 법

등이 있으나 ①, ②의 방법은 계통에 연결되어 있는 선로는 물론 발전기의 차과도 리액턴스

(Sub-Transient Reactance)의 시간대별 값 또는 계통 내의 모든 회전기의 개로 차과도 시정수(Open Circuit Sub-Transient Time Constant) 등 복잡한 Data를 필요로 하므로 이와 같은 계산은 한전 연구소나 대학교의 연구 영역에 속한다고 할 수 있다.

여기에서는 일본 전기학회가 제시한 간이 계산법은 ANSI가 제시한 방법과 동일하고 비교적 계산이 간단하므로 이를 소개하고자 한다.

$$I_{as} = \sqrt{I_s^2 + I_{dc}^2} \quad \dots (4)$$

$$I_{sl} = \frac{E}{Z_1} = \frac{V}{\sqrt{3} Z_1} \quad \dots (5)$$

- 단, I_{as} = 비대칭전류(실효치)
- I_{sl} = 초기 대칭단락전류 rms 값
- I_{dc} = 직류성분전류
- E = 계통의 상 전압
- Z_1 = 계통 정상(Positive) Impedance
- V = 선간 전압

여기서 I_{dc} 의 값은 그림 6의 Percentage d.c component in relation to time interval τ 에 의하여 구한다.

중(Y)축의 Percentage d.c component는

$$\text{Percentage d.c component} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{2} I_{so}} [\%]$$

$$I_{dc} = dc\% \times \sqrt{2} I_{so} \quad \dots (6)$$

$$I_{sl} = k_t I_{so}$$

단, I_{so} = 단락순시의 대칭단락전류 rms 값

k_t 의 값은 $X/R < 15$ 이면 $k_t = 1$ 로 하고 $15 < X/R < 30$ 및 $X/R \geq 30$ 인 경우에는 수화력 발전소의 구성비에 따라 별도로 정하는 Factor를 곱한다⁽⁶⁾.

일반적으로 특별한 경우를 제외하고는 자가용 계통에 있어서는 $X/R < 15$ 로 $k_t = 1$ 이므로 $I_{dc}\%$ 의 값을 IEC의 감쇄 곡선에 따라 비대칭과 대칭 실효 전류의 비를 계산해 보면 다음 표와 같다

단락발생후시간 (ms)	비대칭전류 대칭전류	사이클
10	1.510	$\frac{1}{60} \times 1000 = 16.67 \text{ ms}$
20	1.339	
30	1.225	
50	1.098	
70	1.039	
90	1.014	

위 표와 같이 직류성분은 70ms를 전후하여 20% 이하로 감소하는 것을 알 수 있다.

직류 성분이 20% 이하일 때에는 비대칭 비율이 $\sqrt{1+(0.2\sqrt{t})^2} = 1.04$ 로 그 영향이 미미하므로

IEC에서는 직류 성분이 20% 이하일 때에는 이를 무시하고 계산하는 것을 허용⁽⁷⁾ 하고 있다. 이에 따라 이와 같은 과도 상태에 대한 비대칭 계산은 일반적으로 4~5사이클 까지로 하고 있다.

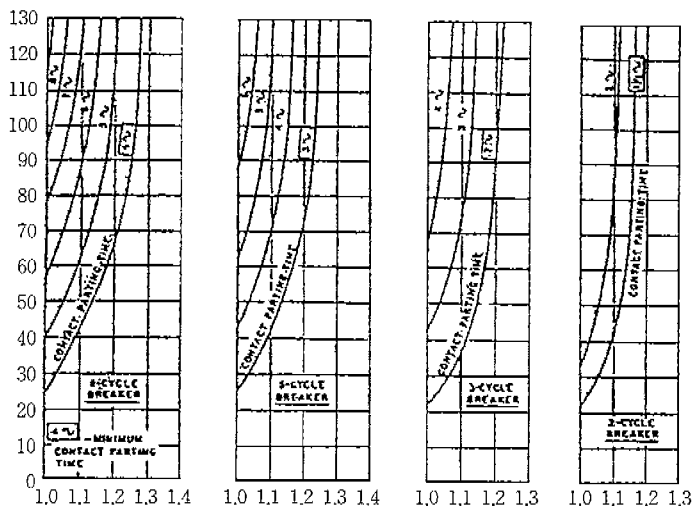


그림 5 Asymmetrical multiplier의 예(ANSI C37-010 Fig8)

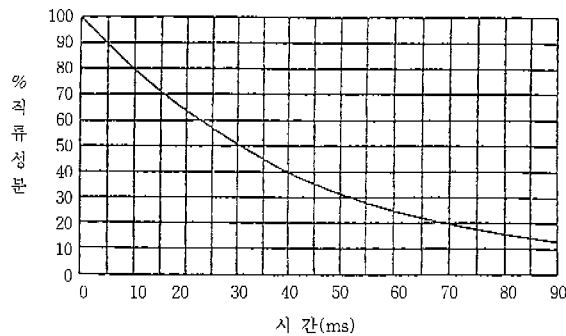


그림 6 Percentage dc component in relation to time interval τ (IEC56 Fig9)

3. 저압 회로의 비대칭 전류의 최대 값

고압회로에 대하여 위에서 설명한 바와 같이 계통단락시의 비대칭 전류의 실효치는

$I_{as} = \sqrt{I_{sl}^2 + I_{dc}^2}$ 이며 비대칭 전류의 최대 값 I_{ASP} 는

$$I_{ASP} = \sqrt{2}I_{sl} + \sqrt{2}I_{sl} \epsilon^{-\frac{2\pi R}{X}C}$$

이다. 여기서 R, X, C는 전원측의 저항, 리액턴스 및 단락사고후의 시간을 사이클수로 표시한 것으로서 위 식의 1항은 교류분의 최대치이고, 2항은 직류 성분 시간 t를 주파수로 표시한 것이다.

비대칭 단락 전류의 실효치는 직류분이 최대가 되는 시점에서 최대가 된다. 즉 그림 4에서 보는 바와 같이 비대칭 단락 전류 $C=1/2Hz$ 에서 최대가 됨으로 단상 단락시 비대칭 실효치의 최대값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{as} &= \sqrt{I_{sl}^2 + I_{dc}^2} = \sqrt{I_{sl}^2 + \left[\sqrt{2}I_{sl} \cdot \epsilon^{-\frac{2\pi R}{X}C} \right]^2} \\ &= I_{sl} \sqrt{1 + 2 \cdot \epsilon^{-\frac{2\pi R}{X}C}} \end{aligned}$$

3상 단락 시는 A상에 최대 전류가 흐른다면 B, C상은 A상에 비하여 $120^\circ, 240^\circ$ 각각 늦기 때문에 각상의 전류의 크기가 각각 다름으로 1/2Hz 후의 각상 평균치를 취하여 3상 평균 비대칭 단락 전류 값으로 한다. 따라서

$$\begin{aligned} \text{단상 단락시} \quad I_{as} &= I_{sl} \sqrt{1 + 2\epsilon^{-\frac{2\pi R}{X}C}} \\ \text{3상 단락시} \quad I_{as} &= I_{sl} \cdot \frac{1}{3} \left\{ \sqrt{1 + 2\epsilon^{-\frac{2\pi R}{X}C}} \right. \\ &\quad \left. + 2\sqrt{1 + \frac{1}{2} \epsilon^{-\frac{2\pi R}{X}C}} \right\} \end{aligned}$$

여기서 R, X는 회로의 저항과 리액턴스이다.

또 단락 전류의 최대 순시 값은 그림 4에서 보는 바와 같이 비대칭 실효치의 1/2Hz에서

의 값이며 이때 최대치 I_P 는 $C=0$ 일때의 전류의 합계보다 작으므로

$$I_P < \sqrt{2}I_{sl} + \sqrt{2}I_{sl} \epsilon^{-\frac{2\pi R}{X}C} = 2\sqrt{2}I_{sl}$$

이 됨을 알 수 있다. 일반적으로 I_P 는 직류분의 1/2Hz 동안의 감소를 감안하여 최대 순시 치로는 계수를 2 대신에 1.8을 취하여 $I_P = 1.8\sqrt{2}I_{sl} = 2.5I_{sl}$ 으로 하고 있다. 이 값은 차단기의 투입 전류로서 차단기 용량을 결정하는 중요한 요소가 된다.

여기서 주의할 점은 전원의 단락 용량이 작거나 중성점을 직접 접지하여 계통의 정상 Impedance가 영상 Impedance 보다 큰 경우에는 지락 전류가 3상 고장 전류보다 크게 됨으로 이런 때에는 차단기의 용량은 3상 고장 전류보다는 지락 고장 전류에 의하여 결정되게 된다는 점이다.⁽⁷⁾

(주)

- (1) IEC 909-p45 Calculation of short circuit current.
- (2) ANSI/IEEE C 37-010 33p 5.3.2 E/X Method with adjustment for AC and DC decrements.
- (3) ANSI/IEEE C 37-010 27p 4.10.2 Asymmetrical requirements.
- (4) 電氣設備技術計算HANDBOOK p I-323 a.定格遮斷電流
- (5) 電力用遮斷器 p44 3.1 단락 전류 日本 電氣學會
- (6) 電力用遮斷器 p53 그림 제3.6도 日本 電氣學會
- (7) IEC 56 p43 4.101 Rated short circuit breaking current-note
- (8) 자가용 전기설비의 모든 것, 김정철 저 기다리 간