

IEC규격에 의한 고장전류해석 및 차단기용량선정

(The short-circuit calculation and circuit breaker selection as IEC standard)

이경호*

(Kyung-Ho Lee)

* 삼성물산 (주) 건설부문 기술연구소

Abstract

This paper analyzes how to calculate the three phase short-circuit currents for ac electrical system and select the high & low voltage circuit breaker based on IEC60909, IEC60056 and IEC60947-2 standards. We proposed the multiplying factor considering system time constant and circuit breaker rating to select circuit breaker accurately.

1. 서론

세계무역기구(WTO) 출범으로 글로벌 시장 경제체제가 형성되고, 기술장벽 해소정책(TBT)에 의해 우리나라도 자재와 기술기준에 관한 KS규격이 국제규격인 IEC규격으로 개정되고 있다.

한편 국내에 현재 사용되는 차단기규격은 IEC규격 [1,2]을 적용하여 생산하고 있으나 미국규격(ANSI/IEEE)에 의한 고장전류계산[3,4]이나 NEMA규격에 의한 비대칭계수 적용[5]을 하고 있어 이중규격 적용으로 인한 혼란을 가져오고 있다. 또한 전기계통의 고장전류는 교류성분과 직류성분이 복합되어 있는 비대칭전류이며, 시간에 따라 직류성분이 지수함수로 감소하는 과도특성을 갖고 있으므로 차단기의 성능을 고려하여야 하나 일반적인 수 계산이나 상용화 전력계통 해석 프로그램[6,7]에 의해 계산되는 값은 IEC규격 차단기 성능에 따른 차단기 상승계수를 반영되어 있지 않다.

본고에서는 IEC60909고장전류계산 방법[8]과 IEC차단기규격을 비교 검토하였으며 규격을 일치시켜 고장전류를 해석하고 정확한 고압 및 저압 차단기선정을 위한 차단기 상승계수를 제안한다.

2. 본론

2.1. 고장전류의 특성

정확한 고장전류계산은 각종 전기기기의 과도특성을 고려한 단락회로의 미분방정식[8] 해석으로 가능하지만 현실적으로 복잡한 지로의 미분방정식을 만든다는 것은 어려우므로 차단기선정을 위한 고장전류는 아래와 같

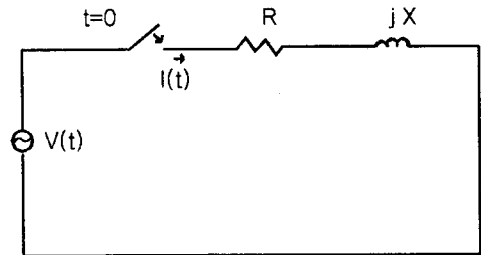
은 가정 하에 계산하고 있다.

1) 고장유형은 고장점의 임피던스가 영인 완전 삼상 단락을 가정하여 삼상을 등가단상으로 하며 정상분 임피던스만을 고려한다.

2) 단락 전압원은 시간의 변화에 따라 일정한 정현파의 정전압원이다.

3) 고장직전의 부하전류는 고장전류에 미치는 영향이 미미하므로 무시한다.

이와같은 가정하에 고장점에서의 등가회로는 그림1과 같다. 즉 등가회로는 내부저항이 영인 정현파의 이상 전압원 $V(t)$ 와 저항 R 과 인덕턴스 X 가 직렬로 연결된 고장임피던스로 구성된다.



$$V(t) = \sqrt{2}E\sin(2\pi t + \theta) \quad t: \text{Cycles}$$

그림 1. 고장점에서의 등가회로

Fig. 1. System Equivalent Circuit on fault

그림1에서 t=0인 시점에 스위치가 닫혔을 경우 고장 전류 I_k는 정현파의 교류(AC)성분과 시간에 따라 감소하는 직류(DC)성분으로 복합되어 있는 그림과 같은 비대칭(Asymmetrical)파형으로 나타난다.

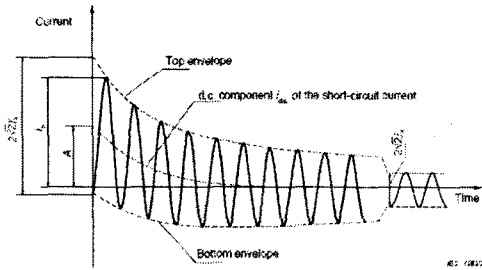


그림 2. 고장전류파형
Fig. 2. Typical waveform of fault current

t=0에서 역률 및 전압이 영일경우 이 파형을 최대 비대칭치 발생기준으로 식을 표현하면 식(1)과 같다.

$$I = \sqrt{2}I_k'' \{ \sin[2\pi ft - (\pi/2)] + \text{EXP}[-2\pi ft/(X/R)] \} \quad \text{----- (1)}$$

여기서 I_k''는 초기 대칭단락전류 실효치, f는 전원주파수

식(1)에서 단락전류의 비대칭과고치는 고장발생 직후 1/2주기 부근에서 발생되며, 그 최대치는 식(2)와 같다.

$$I_p = \sqrt{2}I_k'' \{ 1 + \text{EXP}[-\pi/(X/R)] \} \quad \text{----- (2)}$$

단락전류의 비대칭실효치는 교류성분의 실효치 제곱과 직류성분의 제곱을 합한 것의 제곱근으로서 식(3)과 같이 표시된다.

$$I_{rms} = \sqrt{(I_k'')^2 + \{ \sqrt{2} I_k'' \text{EXP}[-2\pi ft/(X/R)] \}^2} \quad \text{(3)}$$

식(2)와 식(3)은 실제로 차단기가 정상 상태의 대칭 단락전류(I_k'')로 도달하기 전에 차단되기 때문에 기계적, 열적 능력을 비교하기 위한 투입전류(Making Current) 및 차단전류(Breaking Current)를 계산하는데 중요한 식이다.

2.2. IEC규격 고장전류해석

IEC60909 고장전류계산 규격은 1929년 독일 VDE규

격을 근간으로 1998년 최초 제정되어 2001년에 개정되었다. 이규격에 의하면 고장전류의 기본이 되는 초기 대칭 단락전류(I_k'') 외에 전압계수, 계통 X/R비, 회전기의 감쇠특성, 차단기의 동작시간)을 고려하여 비대칭 최대단락전류(I_p)과 대칭차단전류(I_b)를 구하는 방법을 기술하고 있다. 이를 요약하면 표1과 같다.

표 1. IEC 규격의 단락전류구분
Table 1. Short circuit classification of IEC Standard

명칭	의미	수식
I _k ''	초기 1/2주기 대칭분 실효치: 고장발생 순간에 예상되는 단락전류의 교류대칭분의 실효치	$I_k'' = V/Z$ 여기서 V는 고장점의 고장직전의 전압이며 Z는 고장점에서 테브난등가 임피던스임.
I _p	최대단락전류: 예상되는 단락전류의 최대순시치	$I_p = k \sqrt{2} I_k''$ $k = 1.02 + 0.98 \exp(-3R/X)$
I _b	대칭차단전류: 차단기나 퓨즈등이 작동하는 순간의 단락전류 실효치	정지기: $I_b = I_k''$ 동지기: $I_b = \mu I_k''$ 비동지기: $I_b = \mu q I_k''$

IEC규격의 고장해석 방법은 표1과 같이 초기 대칭분 실효치(I_k'')을 기준으로 초기 최대전류, 각 시간별 대칭 전류, 직류분 및 비대칭전류를 계산하는 방식이며 이것은 각 지로에 의한 기여 전류성분을 합산하는 방식이다.

IEC규격 단락전류 계산시 기본이 되는 초기 대칭 단락전류는 그림1에서 t=0인 시점에 스위치 투입시 교류성분의 최대치를 나타내는 것으로 단락직전의 계통 공칭전압(V)와 테브난정리에 의한 고장점에서 본 등가 임피던스(Z_k)를 구하면 오옴의 법칙에 의거 식(4)로 정의된다.

$$I_k'' = \frac{CV}{\sqrt{3Z_k}} \quad \text{-----식 (4)}$$

특이사항으로 전압계수(c, 최대 고압1.1, 저압1.05이며 최소 고압1.0, 저압0.95임.)를 아래와 같은 이유로 반영을 권장하고 있다.

- 1) 전압의 변화는 시간과 장소에 따라 변화한다.
- 2) 변압기 탭(Tap)이 변화된다.
- 3) 발전기 및 전동기의 초기과도 특성을 고려한다.

기기정격 선정시에는 최대계수를 보호계전기 선정시에는 최소계수를 구분하여 적용하여야 한다.

IEC규격은 비대칭 최대단락전류(I_p)를 식(5)과 같이 정의하고 있으며, 각 지로의 임피던스 X/R비에 따라 변화

된다. 식(8)의 최대 단락전류계수(x)는 변형근사식(6)로 정의하고 있다.

$$I_p = x\sqrt{2} I_k'' \quad \text{식 (5)}$$

여기서 $x = 1.02 + 0.98 \text{ EXP} [-3 / (X/R)]$ ----- 식 (6)

이같은 차단기선정시 단락순시의 파고값에 전기,기계적으로 견딜 수 있는 용량을 나타내며, 고압차단기규격 IEC60056은 1/2주기에서 직류분이 80% 감소되는 것을 하여(X/R=16.5기준) $I_p=1.8 \sqrt{2} I_k'' = 2.5I_k''$ 로 표준을 정하고 있다. 또한 저압차단기 규격 IEC60947-2는 차단기의 정격 차단전류에 따라 표2와 같이 각기 다른 성능기준을 정하고 있다.

표 2. IEC 저압차단기의 표준 X/R비
Table 2. Standard X/R Ratio of IEC Circuit Breaker

정격차단전류 [kA]	표준역률	표준X/R비	I_p/I_b 비
$4.5 < I < 6$	0.7	1.0	1.5
$6 < I < 10$	1.73	1.73	1.7
$10 < I < 20$	3.18	3.18	2.0
$20 < I < 50$	3.87	3.87	2.1
$50 < I$	4.9	4.9	2.2

IEC규격에 따른 대칭 차단전류(I_b)는 교류성분이 감소되지 않는 가정하에서는 초기 대칭 단락전류(I_k'')의 값과 같다. 그러나 전기계통에서 회전기(발전기 및 전동기부하)의 기여 단락전류를 계산할 경우 단락전류의 대칭분 감소(교류성분 감소)를 고려하여야 하므로 일반적으로 초기 대칭 단락전류보다 적다. 한편 정확한 회전기의 시정수를 알 수 없으므로 IEC규격이 정한 회전기의 정격전류와 단락전류의 비 및 차단기 동작시간을 고려한 그림3의 μ 계수 적용하여 식(7)와 같이 차단전류를 결정하여야 한다. 또한 유도전동기 부하의 경우에는 전동기의 시정수가 작을수록 즉, 전동기 출력과 회전수가 작은 전동기일수록 단락전류의 감소가 빨라지므로 2극당 전동기출력, 회전수 및 차단기동작시간에 따른 그림4의 q계수를 추가로 고려하여 식(8)과 같이 고장전류를 계산하여야 한다.

o 동기기 : $I_b = \mu I_k''$ -----식 (7)

o 비동기기 : $I_b = \mu q I_k''$ -----식 (8)

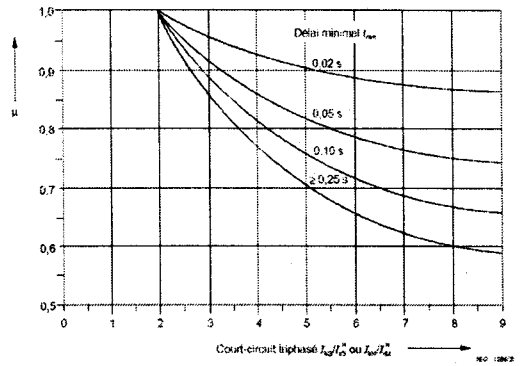


그림 3. μ 계수
Fig. 3. μ factor

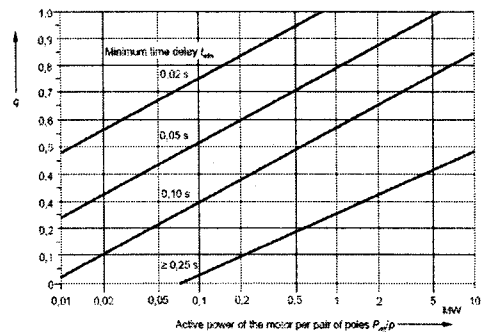


그림 4. q계수
Fig. 4. q factor

2.3. 등가임피던스 (Z_k) 계산

IEC규격의 고장해석 방법은 표1과 같이 초기 대칭분 실효치(I_k'')을 기준으로 초기 최대전류, 각 시간별 대칭전류, 직류분 및 비대칭전류를 계산하는 방식이며 이것은 각 지로에 의한 기여 전류성분을 합산하는 방식이다.

그러나 실제로 네트워크 형태로 구축된 계통에 관해 각지로의 고장전류 기여분을 각각 계산하기 매우 복잡하므로 계통의 단락용량 및 ,케이블,변압기,발전기,전동기의 임피던스 자료를 행렬로 표현하는 방식을 사용한다. 회전기의 경우 시정수를 고려하여야 하므로 고장기여 부분을 임피던스 표현으로 변환하여 식(7)과 식(8) 같이 변경시켜 임피던스를 적용하여야 한다.[9]

$$Z_{Syn} = (1/\mu)Z''_{Syn} \quad \text{-----}(7)$$

$$Z_{Asyn} = (1/(\mu q))Z''_{Asyn} \quad \text{-----}(8)$$

여기서 Z''_{Syn} 와 Z''_{Asyn} 은 각각 동기기 및 비동기기

기의 차과도 임피던스이며 Z_{Syn} 및 Z_{Asyn} 은 시간 t 에서의 동기 및 비동기의 임피던스이다. 따라서 계통상의 나머지 임피던스 성분들은 시 불변이며 회전기의 경우 식(7) 및 식(8)와 같이 시변성으로 표현된다면 계통은 시변성의 임피던스 네트워크로 표현될 수 있다.

고장전류 계산을 하기 위해서는 임피던스자료로부터 Y BUS의 모선을 구성한 후 역행렬에 의해 Z BUS 행렬을 구성하면 각모선의 등가 임피던스 (Z_k)을 구할 수 있으면 식(1)에서 모선 고장전류를 구할 수 있다.[10]

2.4. IEC규격 차단기용량 선정

차단기의 정확한 용량선정을 위하여 고장전류의 과도 특성과 각 규격에서 제시하고 있는 차단기의 특성이 다르므로 이에 대한 충분한 고려가 있어야 한다. IEC60056규격 고압차단기는 정격차단전류를 교류성분의 실효치로 나타내고 있으며 정격투입전류를 정격차단전류의 2.5배에 해당하는 비대칭피크치로 규정하고 있으며 표준 X/R비는 16.5이다. 따라서 고장점에서 등가 X/R비가 16.5를 초과할 경우 식(9)의 상승계수를 고장전류 교류성분 실효치에 곱한후 이를 차단기 정격차단전류와 비교 검토하여야 한다.

고압차단기 상승 계수

$$= \frac{(I_b)^2 + \{\sqrt{2} I_k \cdot \text{EXP} [-2\pi ft/(X/R)]\}^2}{(I_b)^2 + \{\sqrt{2} I_k \cdot \text{EXP} [-2\pi ft/(X/R)]\}^2} \quad (9)$$

또한 1/2주기에서의 고장전류 비대칭피크치가 차단기정격 투입전류 이내이어야 한다.

IEC60947-2규격은 저압차단기 및 MCCB에 각각 적용되는 규격으로서, 정격차단전류는 교류성분의 실효치로 나타내며 정격투입전류는 표2와 같이 정격차단전류별로 표준X/R비를 다르게 적용하고 있다. 따라서 고장점에서 등가 X/R비가 표준의 X/R비를 초과할 경우 식(10)의 상승계수를 1/2주기에서의 고장전류 교류성분 실효치에 곱한 값이 정격차단전류보다 작아야 한다.

저압차단기 상승 계수

$$= \frac{1.02 + 0.98\text{EXP} [-3 / (X/R)]}{1.02 + 0.98\text{EXP} [-3 / (Y)]} \quad (10)$$

3. 결론

본 논문에서는 차단기의 용량은 고장전류의 AC성분 뿐만 아니라 DC성분도 영향이 있음을 알 수 있었으며 고장전류해석과 차단기관련 IEC규격을 분석하여 정확한 차단기용량선정을 위한 상승계수를 제안하였다. 따라서 고장전류의 과도특성과 차단기의 비대칭전류 차단 및 투입능력에 대한 충분한 검토가 있어야 할 것이다.

고장전류에 대한 차단기 용량 선정절차를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수계산이나 ETAP, Power Tools 등의 상용전산프로그램을 이용하여 모선의 고장전류를 계산한후 본 논문에서 제시한 상승계수를 적용한다.
- 2) 고압차단기의 경우 규격이 제시하는 차단기 차단용량(AC성분의 실효치와 비대칭전류 실효치)이 차단기 개극시각의 고장전류 AC성분 실효치와 비대칭전류 피크치보다 각각 커야 한다.
- 3) 저압차단기의 경우 규격이 제시하는 차단기 차단용량(AC성분 실효치)이 0.5cycle에서의 고장전류 AC성분 실효치보다 커야 한다.
- 4) 고,저압차단기 모두 차단기의 투입용량(비대칭전류 피크치)이 0.5cycle에서의 고장전류 비대칭피크치보다 커야 한다.

참고 문헌

- [1] IEC Standards 60056, High-Voltage Alternating-Current Circuit Breaker, 2001.
- [2] IEC Standards 60947-2, Low-Voltage switchgear and controlgear-Part2: Circuit Breakers, 2001.
- [3] Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a symmetrical current basis, ANSI/IEEE C37.010-1999
- [4] IEEE recommended practice for electric power distribution for industrial plants, ANSI/IEEE Std. 141, 1986
- [5] 보호계전시스템의 실무활용기술, 기다리, 2002, 74-75쪽
- [6] PowerTools Manual, SKM
- [7] ETAP Manual, OTI
- [8] IEC Standards 60909-0, Short circuit currents in three-phase a.c. systems, 2003.
- [9] 저압계통 보호 엔지니어링을 위한 시각화 소프트웨어 개발, 전기학회논문지 55A-7-5, 2006
- [10] Computer Modeling of Electrical Power Systems, J. Arrillaga & Arnold, 1983