

IEC60909 와 IEEE-141의 삼상 고장계산 비교

김 규왕, 김 건중, 황 인준, 신 만철*, 오 성균*
 충남대학교, (주)파워이십일*

Comparison of three-phase fault study between IEC60909 and IEEE-141

K.W. Kim, K.J. Kim, I.J. Hwang, *M.C. Shin, *S.K. Oh
 ChunNam Nat'l Univ. *Power21 Corp.

Abstract - In this paper We are trying to get the process of fault analysis and it's algorithm which is IEEE and IEC standards as a criteria to choose the circuit breaker.

And We'd like to compare IEEE standards' and IEC standard' fault analysis result for both fault current and it's magnitude by applying the same sample condition.

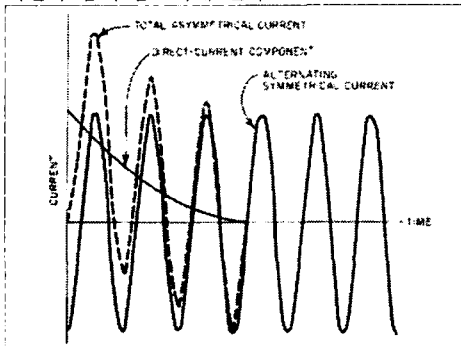
1. 서 론

전력계통 해석에 있어서 삼상고장계산은 차단기 용량선정, 전력기기의 기계적 강도 및 정격 결정, 보호계전기 선정, 통신 유도장해 검토, 계통 구성 방법 결정, 유효접지 조건 검토등 많은 목적을 수행한다. 그러나 현재 국내에는 고장계산에 관한 구체적인 규격이 없으며, 각 나라마다 여러 가지 규격이 있다. 본 논문에서는 현재 유럽기준인 IEC60909와 미국에서의 기준인 IEEE-141의 규격을 비교하여 삼상고장 계산에 관한 기본이론 및 차이점을 살펴 보고자 한다.

2. 고장전류 형태 및 각각 규격의 고장 계산 절차

2.1 고장전류의 형태

계통에 고장이 발생한 경우의 고장전류는 [그림 1]과 같이 횡축에 대하여 비대칭인 전류가 흐르며, 이 전류는 횡축에 대하여 대칭인 대칭(Symmetrical)분 교류전류와 DC성분으로 나누어진다. 고장전류 속에 포함되어 있는 직류분은 회로의 정수(X/R비)에 따라 크기가 정해지고 시간과 함께 감소하게 된다.



[그림 1] 고장전류의 시간에 따른 형태

2.2 IEEE 고장계산 절차

IEEE에서는 E/X법으로 고장전류를 계산하여, 이 값에 보정계수(Multiplying Factors)를 곱하여 계산을 한다.

기준용량 환산

$$I(\text{기준전류}) = \frac{kVA(\text{기준용량})}{\sqrt{3} V(\text{기준전압})}$$

$$Z(\text{기준임피던스}) = \frac{V(\text{기준전압})}{\sqrt{3} A(\text{기준전류})}$$

고장점에서 임피던스 합산 및 고장전류 계산

임피던스 합성은 고장점에서의 테브난 등가 임피던스를 구한다.

First Cycle Fault current

- 고장전류 초기 1/2 Cycle에서 가장 큰 값을 가지며, 그때의 값을 말한다.
- 고압퓨즈, 저압차단기 용량선정에 사용한다.
- 회전기기 임피던스는 [표1] 과 같이 선정한다.

[표1] 회전기기 리액턴스 계수

Type of rotating machine	First-cycle network	Interrupting network
All turbo generators: all by designators with amortisseur windings, all condensers	1.0 X _{d'}	1.0 X _{d'}
Hydrogenerators without amortisseur windings	0.75 X _{d'}	0.75 X _{d'}
All synchronous motors	1.0 X _{d'}	1.5 X _{d'}
Induction motors		
Above 1000 hp at 1800 r min or less	1.0 X _{d'}	1.5 X _{d'}
Above 250 hp at 3600 r min	1.0 X _{d'}	1.5 X _{d'}
All others, 50 hp and above	1.2 X _{d'}	3.0 X _{d'}
All smaller than 50 hp	neglect	neglect

Source: Based on IEEE Std. C37.09-1979 and IEEE Std. C37.10-1979

- 고장전류 계산식

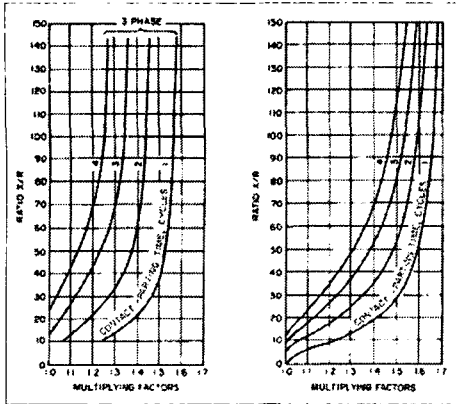
$$I_{SC} = 1.6 \frac{E_{PU}}{X_{PU}} \cdot I_b$$

M.F(Multiplying Factors)는 1987년 이전에는 1.6을 사용하고 이후에는 2.7을 사용한다.

Contact-parting(interrupting)duties forhigh-voltage circuit breakers

- 차단기 용량을 선정하는 고장전류 계산으로써 차단기 접점이 열리는 시점에서의 고장전류를 말한다.
- 초기대칭성분 고장전류에 차단기 특성을 고려한 M.F를 곱하여 산정한다.
- 차단기 용량을 구하는 식

$$I_B [KA] = \frac{\text{차단용량 } MVA}{\sqrt{3} \cdot \text{시스템전압 } kV}$$



[그림 2] 차단기 용량 산정을 위한 M.F

Short-circuit currents for time-delayed relaying devices

- 차단기가 동작한 이후의 고장전류를 말한다.
- 회전이 및 차단기 이후의 모선은 제거된 상태로 고장점에서의 테브난 등가 임피던스를 구한 뒤 E_{PU}/X_{PU} 해서 고장전류를 구한다.

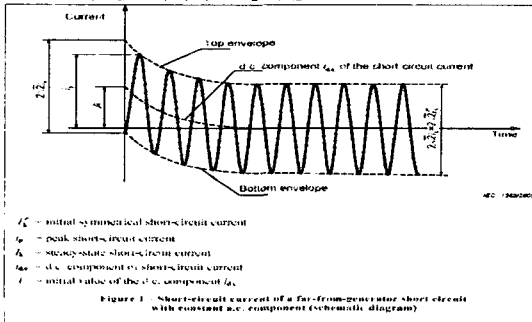
2.2 IEC 삼상 고장계산 절차

IEC에서는 임피던스 표현방식이 다르며, 발전기 근단에서 고장이 발생 할 경우에는 각 기기별로 별도의 계수 곱해준다. 그리고 기준전압에 Voltage factor를 사용한다.

[표2] 전압계수 c

공칭전압 U_n	전압계수 c	
	최대단락전류 C_{max}	최소단락전류 C_{min}
저전압 100~1000V	1.05 1.10	0.95
중간전압 >1kV~35 kV 고전압 (>35kV)	1.10	1.0

1) AC 성분의 감쇠가 없는 계통 고장계산 (발전기 원단에서의 고장계산)



[그림 3] 발전기 원단에서 고장전류 형태

계통임피던스 계산 및 임피던스 Factor

- 네트워크 feeder

$$Z_Q = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_{kQ}} \quad I_{kQ}: \text{초기 대칭전류}$$

- 변압기

2-권선 변압기의 임피던스 크기 $Z_T = |R_T + jX_T|$ 는

변압기의 정격 데이터로부터 아래와 같이 계산된다.

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$$

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

위에서

U_{rT} : 저압 또는 고압 측에서의 변압기 정격전압

I_{rT} : 저압 또는 고압 측에서의 변압기 정격전류

S_{rT} : 변압기 정격 피상전력

P_{krT} : 정격전류에서 총손실

u_{kr} : 정격전류에서 단락전압 [%]

u_{Rr} : 정격 음 전압(rated ohmic voltage)[%]

- 전동기

동기기는 동기 발전기와 같이 취급한다. 동기 전동기가 전압조정기능이 있는 경우에는 동기 발전기와 같이 취급하지만, 그렇지 않은 경우에는 별도의 고려가 있어야 한다. 전동기 또는 전동기 그룹의 정격전류가 전동기를 고려하지 않고 계산한 초기 단락전류 I_k 의 5%보다 크지 않으면 비동기 전동기의 영향은 무시한다.

- 단일전원 3상 단락전류 계산

$$I_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k}$$

- 비상망 전원 공급 3상 단락전류

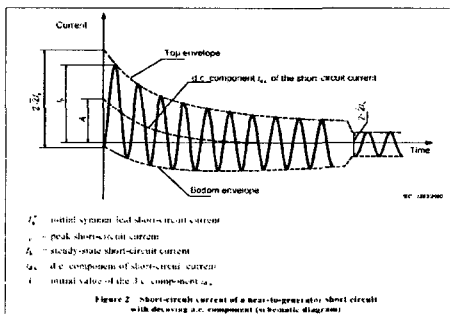
망상으로 연결되지 않은 전원으로 부터 공급받는 고장전류는 서로 독립적으로 공급되는 영상전류의 합으로 나타낸다. 대부분의 경우 두 영상전류의 위상은 거의 동일함으로 고장전류의 크기는 각 고장전류 크기의 합으로 하여도 무방하다.

- 망상 네트워크에서의 3상 단락전류

망상으로 연결된 전원으로 공급되는 고장지점에서의 초기 단락전류는 단일전원 공급 단락전류와 같다.

2) AC 성분의 감쇠를 고려한 단락전류 (발전기 근단에서의 단락)

AC 성분의 감쇠가 없는 발전기 원단에서의 고장계산처럼 [표2]에 규정된 등가 전압원을 고장지점에 삽입하여 고장전류 계산과정을 간단히 한다. 발전기 원단에서의 고장처럼 선로 전정용량, 비회전부하의 병렬 어드미턴스를 무시한다. IEC규격에서는 발전기, 발전기와변압기로 구성된 Power station unit(PSU)의 임피던스에 보정계수를 적용한다.



[그림 4] 발전기 근단에서 고장전류 형태

[표 3] 임피던스 보정계수

Appliances	Impedance	Correction
Generator	$Z_G = Z_C \cdot K_G$	$K_G = \frac{U_n}{U_{rc}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_r \sin \phi_{rc}}$
Transformer	$Z_T = Z_r \cdot K_T$	$K_T = \frac{U_n}{U_{rt}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_r(I_r^2/I_{rt}) \sin \phi_r}$ $K_T = 0.95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0.6x_r}$
Power plant with tapping change (TC)	$Z_S = K_{STC} \cdot (r^2 Z_C + Z_T)$	$K_{STC} = \frac{U_{r0}^2}{U_{rc}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTV}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d - x_r \sin \phi}$
Power plant without tapping change (WTC)	$Z_S = K_{SWTC} \cdot (r^2 Z_C + Z_T)$	$K_{SWTC} = \frac{U_{r0}}{U_{rc}(1 + \beta \phi)} \cdot \frac{U_{rTLV}(1 + \beta \phi)c}{1 + x_d - x_r \sin \phi}$

3) Peak short-circuit current

a) R/X or X/R 일정할 때 위와 같다.

$$I_P = k\sqrt{2}I''_k, \text{ 여기서, } k = 1.02 + 0.98e^{-3R/X}$$

b) 고장점에서의 R/X or X/R

$$I_{P(b)} = 1.15k_{(b)}\sqrt{2}I''_k$$

c) 등가 주파수가 f_c 일때

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f}$$

4) Symmetrical short-circuit breaking current

-Far-from-generator short circuit

$$I_b = I''_k, \quad I_b = \mu I''_k$$

$\mu = 0.84 + 0.26e^{-0.28 I''_k / I_{ka}}$	for $t_{min} = 0.02 \text{ s}$
$\mu = 0.71 + 0.51e^{-0.30 I''_k / I_{ka}}$	for $t_{min} = 0.05 \text{ s}$
$\mu = 0.62 + 0.72e^{-0.32 I''_k / I_{ka}}$	for $t_{min} = 0.10 \text{ s}$
$\mu = 0.56 + 0.94e^{-0.38 I''_k / I_{ka}}$	for $t_{min} \geq 0.25 \text{ s}$

-Non-meshed networks

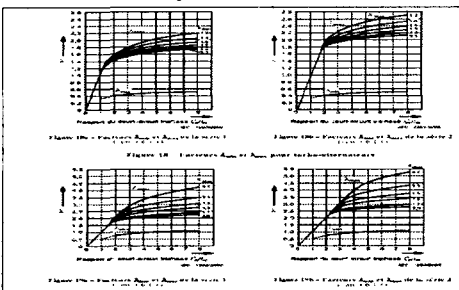
$$I_b = I_{bS} + I_{bT} + I_{bM} = \mu I''_{KS} + I''_{KT} + \mu q I''_{KM}$$

$q = 1.03 + 0.12 \ln(P_{rms}/P)$	for $t_{min} = 0.02 \text{ s}$
$q = 0.79 + 0.12 \ln(P_{rms}/P)$	for $t_{min} = 0.05 \text{ s}$
$q = 0.57 + 0.12 \ln(P_{rms}/P)$	for $t_{min} = 0.10 \text{ s}$
$q = 0.26 + 0.10 \ln(P_{rms}/P)$	for $t_{min} \geq 0.25 \text{ s}$

5) Steady-state short-circuit current

- Maximum : $I_{kmax} = \lambda \max I_{rG}$

- Minimum steady : $I_{kmin} = \lambda \min I_{rG}$



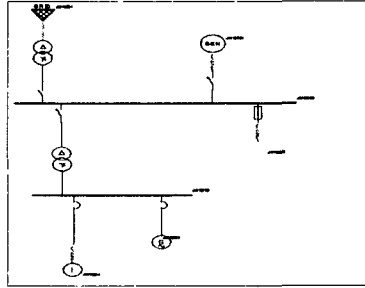
[그림5] 발전기 타입에 따른 계수 (λ_{min} , λ_{max})

- Minimum steady : $I_{kmin} = \lambda \min I_{rG}$

2.3 IEEE와 IEC 고장계산 비교

상용프로그램을 이용하여 샘플계통에 대해서 IEEE 방

법과 IEC방법을 사용해서 고장계산을 하여 비교 하였다.



[그림6] 샘플 계통도

[표4] 고장전류 비교표

BUS	전압 [KV]	X/R	고장 전류 [A]	IEEE 고장전류						IEC 고장전류		
				First cycle		Interrupt Rate		Minimum Fault [A]	I_P		I_B	
				MF	A	MF	A		MF	A		
1001	154	17	37490	1.6	59984	1.10	41371	37490	2.592	97169	37490	
1003	154	9.8	28138	1.6	45021	1.02	28273	28138	2.447	68863	28138	
1005	6.9	14.9	10291	1.6	16466	1.08	11084	10291	2.563	26372	10291	
1009	6.9	15.0	10186	1.6	16297	1.08	10983	10186	2.564	26118	10186	
1010	6.9	12.9	2947	1.6	4715	1.05	3089	2947	2.527	7446	2972	
1015	6.9	12.9	2947	1.6	4715	1.05	3089	2947	2.526	7445	2972	
1019	0.48	5.1	19635	1	19636			3079	2.193	43065	19063	
1021	0.48	4.9	19638	1	19639			3077	2.179	42580	18962	
1024	0.48	0.7	6869	1	6869			2670	1.447	994	6840	
1028	6.9	14.8	2968	1.6	4749	1.08	3180	2968	2.561	7601	2949	
1031	0.48	5.0	19618	1	19618			3077	2.185	42862	19034	
1035	6.9	12.8	2945	1.6	4712	1.05	3083	2945	2.524	7433	2974	
1037	6.9	11.2	2915	1.6	4664	1.03	3000	2915	2.485	7245	2886	
1038	6.9	1.0	0	1.6	0	1.0	0	0	0	0	0	
1041	6.9	12.9	2947	1.6	4715	1.05	3089	2947	2.527	7447	2972	

주) 초기 최대고장전류 및 차단기 선정에 위한 고장전류 값은 정상 상태 고장전류를 MF를 곱하여 산정한다. IEEE 차단기 선정 고장전류 MF는 차단기 TOTD를 기준한 MF이며, IEC에서 차단기 차단시간은 8Cycle 기준으로 함.

3. 결 론

동일한 계통을 가지고 IEEE와 IEC를 고장계산을 수행하여 비교하면 결과 정상상태의 고장전류는 같게 나타났으며, 초기 비대칭 전류를 계산하는 M.F의 값이 달라 대체로 IEC 규격이 높게 나타 났다. 그러나 IEEE 기준에서도 1987이후의 M.F값을 2.7로 하면, IEC보다 약간 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 차단기 선정에 위한 고장전류 값도 IEEE에서는 차단기 종류에 및 차단시간에 따라 M.F를 사용하지만, IEC에서는 일반적으로 정상상태의 값이 되며, 차단시간이 짧으면 약간의 M.F의 값이 달라진다. 최종정상상태의 고장전류계산에 있어서도 IEEE에서는 차단기의 접점이 열린 상태에서 차단기 이후의 계통을 고려하지 않고 계산하며, IEC에서는 발전기 단단 및 원단으로 나누어 정상상태 고장전류 값을 계산한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ismail Kasicki "Short Circuits in Power Systems-A Practical Guide to IEC60909" 2002
- [2] International Electrotechnical Commission " IEC 60909-0 Short-circuit current in three-phase a.c systems" 2001
- [3] IEEE std 141 ch.4 "Short-circuit current calculations" 19 93
- [4] 전력연구원 " 새로운 전력환경에서의 계통신뢰도를 고려한 고장용량 관리방안 연구" 2003