

IEC 60909에 의한 삼상 고장계산

Three-phase Fault Calculation by IEC 60909

손 석 금[†]
 (Seok-Geum Son)

Abstract - This paper analyzes how to calculate the three phase short circuit current calculation procedures used in the IEC 60909 short circuit. It presented the new procedure of the fault current for the interrupting capacity of the circuit breaker. This procedure is applied to the future power system and calculates the fault current. Power demands are increased because of the growth of the economy for this reason, the fault current of the power system is largely increased and the fault current procedure for the proper interrupting capacity calculation of the existing or the new circuit breaker is essential. How to calculate the three phase short circuit current for ac electrical system and select the high voltage and low voltage circuit breaker based on IEC 60909 standards.

Key Words : IEC 60909, Fault current, Three-phase fault calculation, Short circuit current, Circuit breaker

1. 서 론

전력계통의 고장계산은 송전선이나 발·변전소에 있어서 3상단락, 1선지락, 선간단락 및 2선지락으로 구분하고 3상단락 고장계산은 차단기 용량선정, 전력기기의 기계적 강도 및 정격 결정, 보호계전기 선정, 통신 유도장해 검토, 계통 구성 방법 결정, 유효접지 조건 검토 등 많은 목적을 수행한다 [1]. 하지만 현재 국내에 현재 사용되는 차단기규격은 IEC 규격을 적용하여 생산하고 있으나[2][3] 미국규격(ANSI/IEEE)에 의한 고장전류계산이나 NEMA규격에 의한 비대칭계수 적용을 하고 있어 이중규격 적용으로 인한 혼란을 가져오고 있다[4][5][6].

최근 영국의 Sinclair Knight Merz(SKM)에서 유럽, 중동, 아시아, 아프리카, 미주와 호주의 계통 운용자(SO)를 대상으로 각 나라에서 적용하고 있는 고장전류 해석 방법에 대하여 조사한 결과 응답자의 50%가 IEC 60909를 적용하고 있으며, 그 다음으로 20%의 응답자가 IEEE/ANSI 기준을 적용하고 있는 것으로 그림 1과 같이 나타났다[7][8].

IEC 60909 고장전류계산 규격은 1929년 독일 VDE규격을 근거로 1998년 최초 제정 2001년에 개정되었다[9]. 이 규격에 의하면 고장전류의 기본이 되는 초기 대칭 단락전류 외에 전압계수, 계통 X/R비, 회전기의 감쇠특성, 차단기의 동작시간을 고려하여 비대칭최대단락전류와 대칭차단전류를 구하는 방법으로 계산한다[10][11][12].

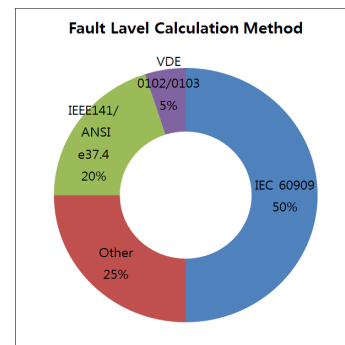


그림 1 고장전류 계산 기준에 대한 적용비율
 Fig. 1 Calculated based on the applicable percentage of fault currents

2. 본 론

2.1 고장전류 형태

계통에 고장이 발생한 경우 고장전류는 횡축에 대하여 비대칭인 전류가 흐르며, 이 전류는 횡축에 대하여 대칭인 대

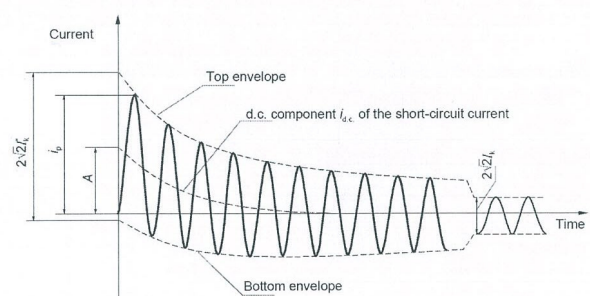


그림 2 고장전류파형
 Fig. 2 Typical waveform of fault current

[†] 교신저자, 정회원 : 오산대학교 전기시스템제어과

E-mail : skson@osan.ac.kr

접수일자 : 2013년 11월 25일

수정일자 : 2014년 1월 15일

최종완료 : 2014년 2월 4일

칭분과 교류전류와 DC성분으로 나누어진다. 고장전류 속에 포함되어 있는 직류분은 회로의 정수(X/R)에 따라 크기가 정해지고 시간과 함께 감소하게 된다.

2.1.1 비대칭계수

일반적으로 단락전류는 단락발생순간 전압의 위상과 회로의 역률에 의해 정해지는 어떤 크기의 직류전류가 과도현상(중첩)으로 전류가 흐른다. 이 직류분은 곧 감쇄하지만 배선용 차단기나 퓨즈처럼 고속차단을 하는 경우에는 이 직류분을 포함한 값을 고려하여야 한다. 또 전로의 기계적 강도에 관한 고찰을 할 경우는 최대순시값이 고려되어야 하고 따라서 단락전류의 크기는 구별하여 적용한다[2][6].

비대칭 단락전류실효값(I_{as})는 식 (1)로 나타낸다.

$$I_{as} = \sqrt{\left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right)^2 + I_d^2} \tag{1}$$

여기서, I_m : 단락고장전류 순시값

I_d : 직류분 전류값

단상회로에서 직류분을 포함한 고장전류가 최대로 되는 값은 1/2사이클 부근이며, 최대값은 식 (2)와 같이 주어진다.

$$I_{as} = I_s \cdot \sqrt{1 + 2e^{-\frac{2\pi R}{X}}} = I_s \cdot K_1 \tag{2}$$

여기서, K_1 : 단상 최대비대칭계수

I_s : 대칭 단락전류 실효값

3상 회로에서는 각상의 위상각이 다르므로 I_{as} 의 값은 각 상이 각각 다르다. 그래서 1/2사이클 후 각 상의 평균을 취하여 3상 평균 비대칭단락전류로 한다. 이 값은 식 (3)과 같다.

$$I_{as} = I_s \cdot \frac{1}{3} \sqrt{1 + 2e^{-\frac{2\pi R}{X}}} + 2\sqrt{1 + \frac{1}{2}e^{-\frac{2\pi R}{X}}} = I_s \cdot K_3 \tag{3}$$

3상회로 비대칭 실효값도 대칭 단락전류 실효값과 회로의 역률에서 계산할 수 있다. 배선용차단기의 차단용량은 보통 이 비대칭값으로 표시하고 있으며 표 1에 단락전류의 역률과 단락회로의 $\frac{X}{R}$ 을 기준값으로 한 K_1, K_3 값을 표시한다 [13].

2.1.2 단락전류 및 단락용량의 계산

임피던스 Map이 작성되면 단락점의 등가회로를 작성하여 식 (4)와 같이 임피던스를 계산한다.

$$\%Z = \sqrt{(\Sigma\%R)^2 + (\Sigma\%X)^2} \tag{4}$$

%임피던스가 계산되면 식 (5)와 같이 단락전류와 단락용

표 1 K_1, K_3 계수

Table 1 K_1, K_3 Factor

역률	단락회로의 X/R	비대칭계수	
		K1	K3
0	∞	1.732	1.394
1	100.00	1.696	1.374
2	49.993	1.665	1.355
3	33.322	1.630	1.336
4	24.979	1.598	1.318
5	19.974	1.568	1.301
6	16.623	1.540	1.285
7	14.251	1.511	1.270
8	12.460	1.485	1.256
9	11.066	1.460	1.241
10	9.9501	1.436	1.229
15	6.5912	1.330	1.171
20	4.8990	1.247	1.127
25	3.8730	1.181	1.093
30	3.1798	1.130	1.066
35	2.6764	1.091	1.046
40	2.2913	1.062	1.031
45	1.9845	1.041	1.020
50	1.7321	1.026	1.013
55	1.5185	1.015	1.008
60	1.3333	1.009	1.004
65	1.1691	1.001	1.002
70	1.0202	1.002	1.001
75	0.8819	1.008	1.00004
80	0.7500	1.002	1.00005
85	0.6123	1.004	1.00002
100	0.0000	1.000	1.00000

[비고 1] 단락발생후 1/2사이클 시점의 비대칭계수

[비고 2] K_1 : 단상 최대비대칭 실효값

[비고 3] K_3 : 3상 최대비대칭 실효값

량을 계산한다.

$$I_s = K \frac{100}{\%Z} I_n [A]$$

$$P_s = K \frac{100}{\%Z} P_n [KVA] \tag{5}$$

2.2 IEC 규격 고장전류 해석

2.2.1 초기대칭 단락전류

IEC 규격의 고장전류 해석 방법은 초기 대칭분 실효값을 기준으로 초기 최대전류, 각 시간별 대칭전류, 직류분 및 비대칭전류를 계산하는 방식이며 이것은 각각 지로에 의한 전류성분을 합산하는 방식이다. IEC 규격 단락전류는 스위치 투입시 교류성분의 최대치를 나타내는 것으로 테브난의 정리와 옴의 법칙에 의해 식 (6)으로 정의 된다.

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \tag{6}$$

여기서, U_n : 계통 공칭전압[V]
 Z_k : 고장점에서 바라본 등가 임피던스
 c : 전압계수 [표 2] 참조

표 2 IEC 60909 Table 공칭전압에 의한 전압계수 “c”
Table 2 IEC 60909 Table Voltage factor according to Nominal voltage “c”

공칭전압(U_n)	전압계수	
	최대단락고장 전류(c_{max})	최소단락고장 전류(c_{min})
100V이상 1000V (IEC 60038 table I)	1.05(3) 1.1(4)	0.95
1kV 초과 35kV (IEC 60038 table III)	1.1	1.0
35kV 초과 230kV (IEC 60038 table IV)	1.1	1.0

- [비고1] c_{max} U_n 은 전력계통기기의 최고전압(the highest voltage) U_m 을 초과하지 않아야 한다.
- [비고2] 공칭전압이 정의되어 있지 않으면 $c_{max} U_n = U_m$ 또는 $c_{min} U_n = 0.9 \times U_m$ 이 적용되어야 한다.
- [비고3] +6%의 오차를 가진 저압계통에 대하여 적용한다. 예를 들면 380V에서 400V까지로 정의되는 계통에 대하여 IEC에 따라 c_{max} 는 1.05를 적용한다.
- [비고4] +10%의 오차를 가진 저압계통에 적용한다.

2.2.2 단락고장전류의 Peak값

Non-mesh 계통에서 3상단락회로의 각각의 지로부터 공급되는 Peak 고장전류는 식 (7)과 같이 계산한다.

$$i_p = k\sqrt{2}I_K'' \tag{7}$$

여기서, k : R/X 또는 X/R ratio를 함수로 하는 직렬회로의 계수 값은 그림 3과 같이 적용한다.

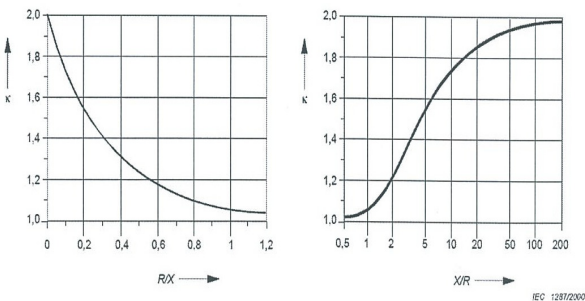


그림 3 k계수
Fig. 3 k Factor

IEC에서는 임피던스 표현방식이 다르며, 발전기 운전 상태에 따라서 전압이 변동하고 계산값과 작은 변압기 TAP값으로 운전하는 경우 정전부하 및 콘덴서에 의한 영향과 발

전기와 전동기의 과도적인 영향에서 고장이 발생 할 경우 최소, 최대전류를 계산하기 위하여 등가전압원의 값을 조정하는 전압계수를 기기별로 별도의 계수를 곱해준다. 이 계수는 운전상태에 따라서 운전전압이 공칭전압과 다른 경우의 안전계수라고 할 수 있다.

또한 최대 및 최소 단락전류의 계산은 다음 항목을 기초로 한다.

1. 단락이 지속되는 동안 3상단락회로는 3상단락이 지속되고, 1선지락회로는 1선지락이 지속되는 것과 관련하여 변경이 없는 것으로 한다.
2. 변압기의 임피던스는 탭절환장치의 중심점에 있는 것으로 한다. 전력계통에 접속된 임피던스 보정계수를 도입하기 위하여 인정되는 것이다.
3. 아크 저항은 계산에 포함하지 않는 것으로 한다.
4. 선로 정전용량, 병렬 어드미턴스, 비회전 부하는 영상 회로 계통에는 무시하는 것으로 한다.

2.2.3 최대 단락전류 최소단락전류

최대 단락전류를 계산할 때 다음 상태의 적용을 필요로 한다.

1. 최대 단락전류의 계산을 위해서 전압계수 c_{max} 를 적용한다.
2. 계통 설정과 고장점에서 고장전류의 최대값으로 되게 하는 발전장치와 Power Feeder로부터 최대기여전류 혹은 고장전류를 제어하는 계통의 인정된 부분을 선택한다.
3. 등가 임피던스(Z_k)는 대표적으로 외부의 전력계통에 사용되며, 최소 등가 단락임피던스는 Network Feeder로부터 최대단락 기여전류에 부합되도록 사용된다.
4. 전동기는 비동기 전동기 및 정지형 Convertors에 부합하여 적절하다면 포함한다.
5. 선로저항(가공선 또는 케이블) R_L 은 20°C의 온도에서 적용되는 것으로 한다.

최소 단락전류를 계산할 때 다음 상태의 적용을 필요로 한다.

1. 최소 단락전류의 계산을 위해서 전압계수 c_{min} 를 적용한다.
2. 전동기 영향은 무시한다.
3. 선로(가공선, 케이블 선로도체, 중선선)의 저항 R_L 은 높은 온도를 적용한다.

$$R_L = [1 + \alpha(T_c - 20)] \cdot R_{L20}$$

여기서, R_{L20} : 도체의 20°C에서의 저항
 T_c : 단락 직전의 도체의 온도
 α : 도체의 온도저항계수(동:0.00393)

2.2.4 동기기

원격발전기 전원에 의한 단락고장이 발생하였을 때 차단

기 차단시점의 대칭단락차단전류는 교류감쇄가 없으므로 초기대칭단락전류와 동일하다[14].

$$3\text{상 단락 시 } I_b = I_K'' \quad (8)$$

단일전원 단락회로 또는 Non-mesh network의 경우 감쇄된 대칭단락차단전류는 초기대칭단락전류에 감소계수 μ 를 곱한 값이 된다[14].

$$I_b = \mu I_K'' \quad (9)$$

여기서, μ : 회전기 감소계수, 교류감쇄를 고려하는 인자로서 차단기의 최소동작시간 t_{\min} 와 I_{kG}'' / I_{rG} 에 의하여 좌우된다. 식 (10)을 적용한다[12].

I_{kG}'' : 발전기로부터 공급되는 초기대칭단락전류
 I_{rG} : 발전기의 정격전류
 t_{\min} : 차단기의 최소동작지연시간

$$\begin{aligned} t_{\min} = 0.02s & \quad \mu = 0.84 + 0.26e^{-0.26I_{kG}''/I_{rG}} \\ t_{\min} = 0.05s & \quad \mu = 0.71 + 0.51e^{-0.3I_{kG}''/I_{rG}} \\ t_{\min} = 0.10s & \quad \mu = 0.62 + 0.72e^{-0.32I_{kG}''/I_{rG}} \\ t_{\min} = 0.25s & \quad \mu = 0.56 + 0.94e^{-0.38I_{kG}''/I_{rG}} \end{aligned} \quad (10)$$

I_{kG}'' / I_{rG} 의 값이 2.0보다 크지 않다면, $\mu=1.0$ 을 적용한다. 또한 계수 μ 값은 그림 4로부터 구할 수 있다[14].

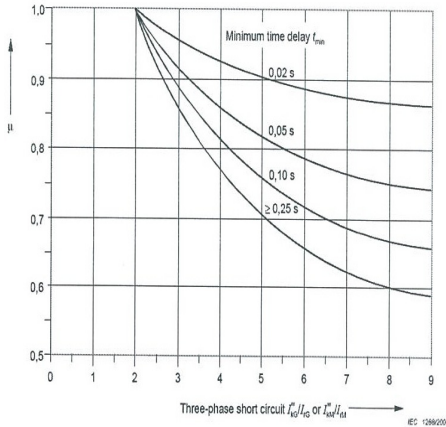


그림 4 μ 계수
 Fig. 4 μ Factor

2.2.5 비동기기

Non-meshed networks에서 단락고장이 발생하면 Network Feeder, 발전기, 전동기로부터 고장전류가 유입된다. 차단기 차단시점의 대칭분 단락전류는 식(11)와 같이 각각의 고장전류 공급원으로부터 기여하는 전류를 합산하여 계산한다[14].

$$I_b = \sum I_{bi} \quad (11)$$

여기서, $I_b = I_{bS} + I_{bT} + I_{bM} = \mu I_{KS}'' + I_{KT}'' + \mu q I_{KM}''$
 I_{KS}'' , I_{KT}'' , I_{KM}'' : 각 고장전류 공급원의 초기 대칭 단락전류

μ : 회전기 감소계수, 교류감쇄를 고려하는 인자로서 차단기의 최소동작시간 t_{\min} 와 I_{kG}'' / I_{rG} 에 의하여 좌우된다. 식 (12)를 적용한다[12].
 q : 유도전동기 감소계수 식 12와 같이 계산한 q 값이 1.0보다 큰 값으로 되면, $q=1.0$ 으로 한다. 또한 q 의 값은 그림 5로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} t_{\min} = 0.02s & \quad q = 1.03 + 0.12\ln(P_{rM}/P) \\ t_{\min} = 0.05s & \quad q = 0.79 + 0.12\ln(P_{rM}/P) \\ t_{\min} = 0.10s & \quad q = 0.57 + 0.12\ln(P_{rM}/P) \\ t_{\min} = 0.25s & \quad q = 0.26 + 0.12\ln(P_{rM}/P) \end{aligned} \quad (12)$$

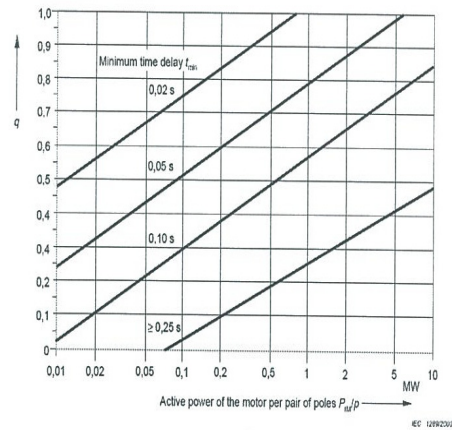


그림 5 q 계수
 Fig. 5 q Factor

3. 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션은 SKM사 POWER TOOLS 소프트웨어[15]를 사용하여 샘플 계통을 대상으로 하여 검토하였으며 수전설비 구성을 보면 수전전압은 22.9kV, 주변압기 용량은 750KVA이며 부하는 전동기 3기와 일반부하 및 전등전열부하를 각 모선에 F-CV케이블로 연결하여 구성하였다[15][16].

그림 6은 시뮬레이션을 위해 채택한 수전설비의 계통도를 단선도로 나타낸 것이다.

3.1 고장전류 계산

임피던스는 제조사에서 제시된 값을 사용하였으며, 시간에 따른 고장전류 계산은 SKM POWER TOOLS에 의한 계산과 IEC 60909 기준에 의한 두 기준에서 제시된 비대칭계수를 각각 적용하였으며, 차과도 임피던스를 기준으로 하여 초기 1/2Cycle 차과도 임피던스 8Cycle까지 과도 임피던

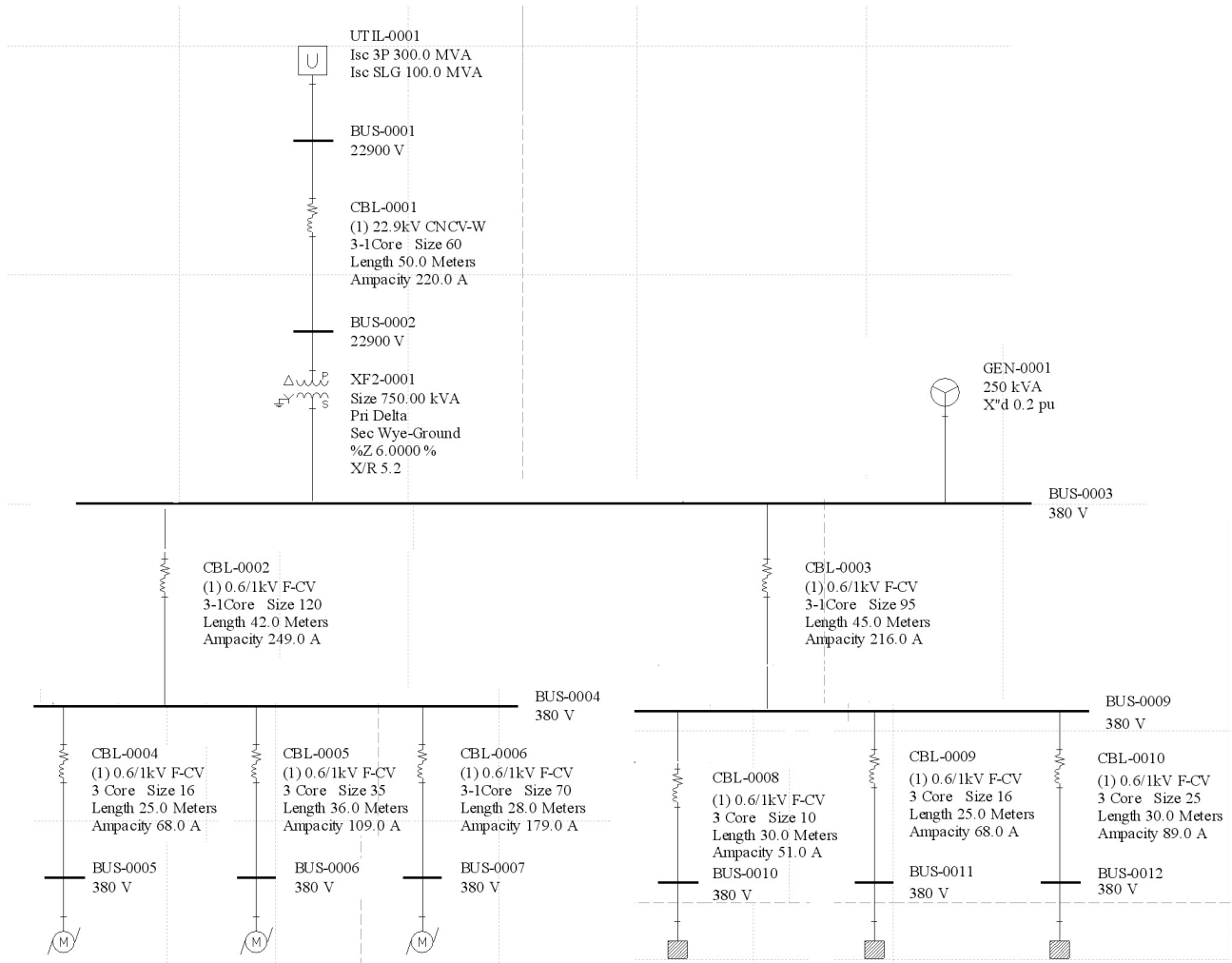


그림 6 시뮬레이션용 전력계통
Fig. 6 Power System for the simulation

표 3 고장전류 비교표

Table 3 Comparison of fault current

BUS NO	전압 [V]	1/2 CYCLES		2 CYCLES		3 CYCLES		5 CYCLES		8 CYCLES		X/R
		POWER TOOLS	IEC	POWER TOOLS	IEC	POWER TOOLS	IEC	POWER TOOLS	IEC	POWER TOOLS	IEC	
BUS-1	22,900	10,522	10,534	7,931	7,930	7,677	7,671	7,611	7,602	7,608	7,597	8.007
BUS-2	22,900	10,289	10,358	7,803	7,830	7,602	7,609	7,558	7,556	7,556	7,551	7.385
BUS-3	380	27,905	30,243	21,843	22,857	21,598	22,202	21,567	21,860	21,567	21,648	5.778
BUS-4	380	13,315	15,201	13,068	14,099	13,068	13,923	13,068	13,767	13,068	13,644	1.586
BUS-5	380	4,529	5,853	4,529	5,776	4,529	5,751	4,529	5,725	4,529	5,707	0.384
BUS-6	380	5,956	7,451	5,956	7,284	5,956	7,231	5,956	7,181	5,956	7,141	0.583
BUS-7	380	8,865	10,531	8,848	10,198	8,848	10,114	8,848	10,039	8,848	9,974	1.004
BUS-9	380	11,151	13,038	11,104	12,844	11,104	12,817	11,104	12,796	11,104	12,777	1.149
BUS-10	380	2,568	3,420	2,568	3,420	2,568	3,420	2,568	3,420	2,568	3,420	0.213
BUS-11	380	4,153	5,421	4,153	5,421	4,153	5,421	4,153	5,421	4,153	5,421	0.345
BUS-12	380	4,910	6,316	4,910	6,316	4,910	6,316	4,910	6,316	4,910	6,316	0.432

스를 적용하였다.

전압은 SKM POWER TOOLS에서는 공칭전압을 기준으로 계산하였고, IEC 60909에서는 전압에 따른 전압계수를 적용하여 고장계산을 실시하여 표 3과 같이 계산되었다.

고장전류 계산 결과를 표 3과 그림 7에서와 같이 비교해보면 현행 절차에 의해서 계산하는 값보다 IEC 규정에 의한 결과 값이 적게는 5[%]에서 많게는 10[%] 까지도 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 BUS-3에서는 30[%]정도의

큰 차이를 보이고 있는데 이는 IEC에서는 초기 대칭전류 계산에 전압계수를 사용하고 또한 회전기의 기여전류 및 보정계수와 같은 여러 가지 변수에 의해서 크게 계산된 것으로 분석된다.

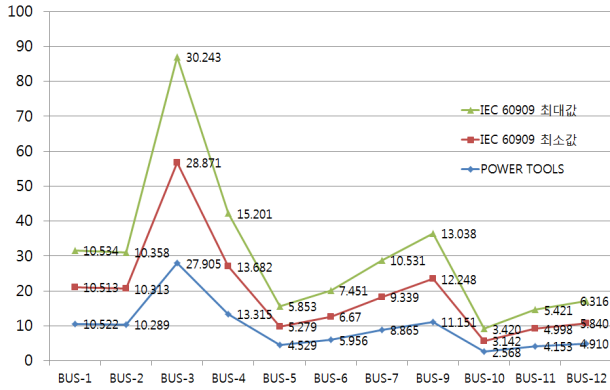


그림 7 IEC 60909에 의한 고장전류
Fig. 7 Fault current by IEC 60909

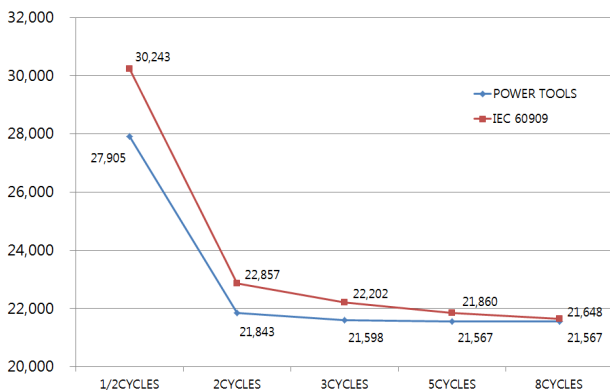


그림 8 고장전류의 시간에 따른 변화
Fig. 8 The changes over time of the fault current

동일한 시뮬레이션용 계통을 가지고 현행 행해지고 있는 고장전류 계산과 IEC를 비교해본 결과 그림 7과 같이 정상상태의 고장전류는 거의 비슷하게 나타났으나 초기 비대칭전류에 의한 고장전류에서는 IEC 규격에 의한 고장전류가 높게 나타났다.

4. 결론

국내에서 명확한 기준 없이 계산하고 있는 고장전류에 대해서 검토하였다. 고장계산은 차단기 용량선정, 전력기기의 기계적 강도 및 정격 결정, 보호계전기 선정, 통신 유도장해 검토, 계통 구성 방법 결정, 접지 조건 검토 등 많은 목적에 수행되는 만큼 정확한 계산이 필요하다. 하지만 현실은 그렇지 않기 때문에 IEC 60909를 적용하여 고장계산을 검토하였다.

동일한 계통을 가지고 현재 우리나라가 적용하고 있는 고장전류계산과 IEC 60909를 적용한 고장계산을 수행하여 비

교해본 결과 IEC 60909는 비대칭 전류를 계산하는 전압계수의 최소전류와 최대전류에 의해 고장전류가 5~20[%]까지 높게 계산이 되었다.

이렇게 IEC규격에서는 발전기 근거리 및 원거리로 나누어 고장전류를 계산하고 변압기의 보정계수와 회전기의 기여전류와 같은 변수를 적용해 보다 정확한 고장전류 계산을 하기 위한 변수를 적용하고 있어 실제 고장전류계산값은 상당한 차이가 발생 되는 것으로 분석되었다.

따라서 계통구성에 따라 임피던스 보정계수를 사용하고 회전기 임피던스 계수 μ, q 를 사용하여 차단기 선정 시 고장전류를 IEC 60909 규정을 적용한 계산이 빠른 시일 내에 국내에 적용되는 것이 바람직할 것이다.

또한 계통의 변경되거나 추가로 신설될 경우에는 고장전류의 크기가 변하므로 장기적인 안목을 가지고 미리 고장전류의 크기 및 기기별 고장용량을 고려하여 여유 있게 기기를 선정하는 것이 바람직 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Duk-Kyeong Park, "The Fault Current Procedure for the Interrupting Capacity Calculation of the Circuit Breaker", Chungnam National University, 2004.
- [2] IEC Standard 60056. High-Voltage Alternating-Current Circuit Breaker. 2001.
- [3] IEC Standards 60947-2, Low-Voltage, switchgear and control gear-Part2 : Circuit Breakers, 2001.
- [4] Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a symmetrical Current basis, ANSI/IEEE C37.010-1999
- [5] IEEE recommended practice for electric power distribution for industrial plants, ANSI/IEEE Std. 141, 1986
- [6] Bong-Gyu Sung, Hwa-Chang Song, "Standards of Power System Fault Current Analysis", KIEE Summer Conference 2012, p84-85, 2012.
- [7] SKM, Survey to Review Best Practice in the Analysis of Fault Currents, March 2011.
- [8] K.W. Kim, K.j. Kim, I.J. Hwang, "Comparison of three-phase fault study between IEC 60909 AND IEEE-144" KIEE Summer Conference 2014, p400-p402, 2004.
- [9] Ismail Kasikci "Short Circuits in Power Systems A Practical Guide to IEC60606", 2002
- [10] International Electrotechnical Commission "IEC 60606-0 Short-circuit current in three-phase a.c systems", 2001
- [11] Lee-Jo Son, "IEC 60909 Short Circuit Study", SAEHONG ENGINEERING &CONSULTANT CO. LTD, 2013
- [12] Lee-Jo Son, "power Tools for Windows Fault Current Calculation and Coordination", SAEHONG ENGINEERING &CONSULTANT CO. LTD, 2008

- [13] Lee-Jo Son, "SKM, Power Tools for Windows",
SAEHONG ENGINEERING &CONSULTANT CO.
LTD, 2006
[14] Power Tools Manual, SKM, 2006

저 자 소 개



손 석 금 (孫 錫 鎭)

1969년 8월 10일생. 1997년 한밭대 전기
공학과 졸업. 2000년 성균관대 전기공학
과 졸업(석사). 2012년 숭실대 대학원 전
기공학과 졸업(공학박), 발송배전기술사
현재 오산대학

Tel : (031) 370-2677

Fax : (031) 370-2679

E-mil : skson@osan.ac.kr