ETAP Technical Report – No. 028

ETAP による短絡電流計算結果の評価（IEC60909-0, 2001）

IEC 60909-0, 2001 に基づく ETAP による短絡電流計算結果と手計算による計算結果が一致しないというコメントを度々受けることがます。 どうして？
ETAP（IEC）による短絡電流計算は、IEC に規定されている下記の補正係数をきちんと適用して計算しています。 手計算の場合はどうでしょうか？

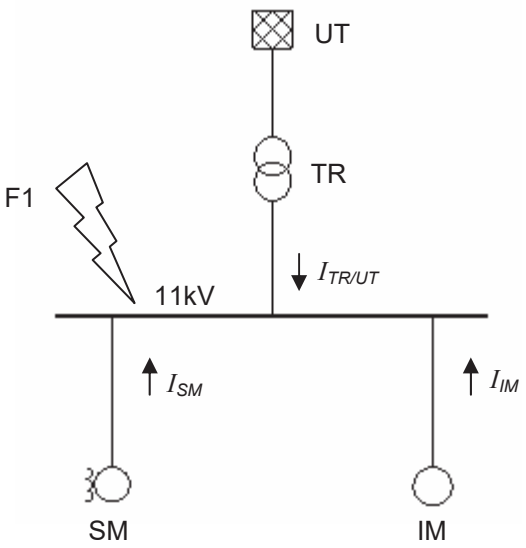
1. 電圧係数 c ➔ 電圧の補正
2. インピーダンス補正係数 K_G および K_S または K_{SO} ➔ 発電機の短絡インピーダンスの補正
3. インピーダンス補正係数 $K_{G,S}$, $K_{T,S}$ または $K_{G,SO}$, $K_{T,SO}$ ➔ 部分短絡電流の補正（発電機と変圧器間での短絡の場合）
4. インピーダンス補正係数 K_T ➔ 配電用変圧器の短絡インピーダンスの補正
5. 係数 κ ➔ 短絡電流ピーク値の計算
6. 係数 μ および q ➔ 同期電動機（μ）および 誘導電動機（μ, q）の寄与電流の減衰
7. 係数 λ ➔ 短絡電流定常値の計算
8. 係数 m および n ➔ 熱等価短絡電流（Thermal Equivalent SCC）の計算

補足：これらの諸係数の詳細については IEC TR 60909-1 をご参照下さい。

ここでは、下記の例題を基に、11kV 母線（at F1）で 3相短絡事故が生じた場合の短絡電流について、ETAP による短絡電流計算の結果と、この例題に関連する上記の諸係数を適用した手計算による短絡電流計算の結果を比較してみることにします。 なお、紙面の都合上、3相短絡、初期対称実効値（I"k）についてのみの比較とします。

補足：IEC 60909-4, 2000 Example 4 に基づく、3相短絡電流（I"k, Ip, Ib, Ik）および 1線地絡電流（I"k, Ip）に関する評価レポートが http://www.etap.com/qa_casedocs.htm より、ダウンロードできますので、併せてご参照下さい。

例題： **11kV 母線（at F1）で 3相短絡事故が生じた場合の短絡電流（I"k：初期対称実効値）について検証する。 電圧係数は $c = c_{max} = 1.1$ とする。**



UT
MVA_{SC} = 10,000 (MVA)
X/R = 10

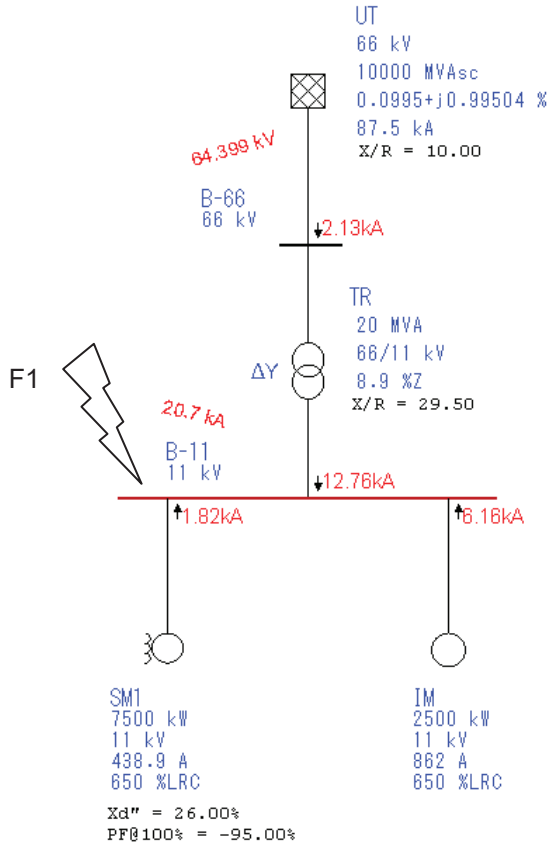
TR
20 (MVA)
66/11 (kV)
I_{base} = 1,050 (A)
X''_d = 8.9%
X/R = 29.5

SM
7,500 (kW)
11 (kV)
I_{fL} = 438.9 (A)
X''_d = 26 %
X/R = 35
pf@100% = -95%

IM
2,500 (kW)
11 (kV)
I_{fL} = 862 (A)
I_{LR}/I_{rM} = 650%

ETAP による計算

ETAP による計算結果を下図に示す。



ETAP による計算結果

I''_k = **20.689 (kA)**

I_p = 52.509 (kA)

$I_{b\ sym}$ = 30.589 kA (at 0.01 S), 15.156 kA (at 0.3S)

I_L = 13.928 (kA)

手計算の結果（次頁以降参照）

I_{F1} (I''_k) = **20.688 (kA)**

結果の差 (I''_k) = 0.0048 %

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-Phase fault at bus: **B-11**

Nominal kV = 11.000 Voltage c Factor = 1.10 (Maximum If)

Peak Value = 52.509 kA (Method C)
Steady State = 13.928 kA rms

Contribution		Voltage & Initial Symmetrical Current (rms)				
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	kA Real	kA Imaginary	X/R Ratio	kA Magnitude
B-11	Total	0.00	1.738	-20.615	11.9	20.689
B-66	B-11	97.57	0.453	-12.753	28.2	12.761
IM	B-11	100.00	1.233	-6.039	4.9	6.164
SM1	B-11	100.00	0.052	-1.824	35.0	1.824

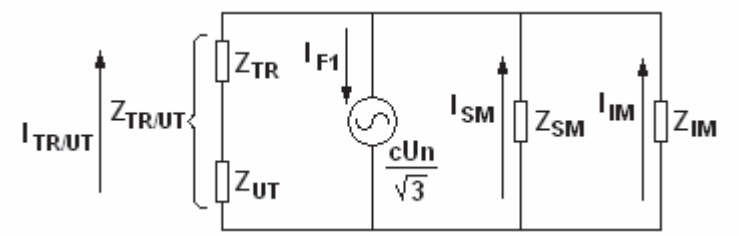
Breaking and DC Fault Current (kA)

Based on Total Bus Fault Current

TD (S)	Ib sym	Ib asym	Idc
0.01	20.063	30.589	23.091
0.02	19.827	27.469	19.012
0.03	19.452	25.288	16.159
0.04	18.792	23.448	14.024
0.05	18.156	21.949	12.333
0.06	17.863	20.944	10.934
0.07	17.577	20.096	9.742
0.08	17.297	19.364	8.705
0.09	17.024	18.723	7.792
0.10	16.758	18.155	6.982
0.15	16.214	16.714	4.059
0.20	15.695	15.873	2.368
0.25	15.204	15.267	1.384
0.30	15.124	15.145	0.811

手計算

F1 で短絡事故が生じた場合の等価インピーダンスダイアグラム



$$I_{F1} = I_{TR/UT} + I_{SM} + I_{IM}$$

1. 商用電源系統 UT の正相インピーダンス（Z_{UT}）

$$Z_{UT} = \frac{c \cdot (U_{nQ})^2}{MVA_{SC}} = \frac{1.1 \times 11^2}{10{,}000} = 0.01331\ (\Omega)$$ IEC 60909(0)-2001 の式（4）

$$X_{UT} = \frac{Z_{UT}}{\sqrt{1+\left(\frac{1}{X/R}\right)^2}} = \frac{0.01331}{\sqrt{1+\left(\frac{1}{10}\right)^2}} = 0.01324\ (\Omega)$$ IEC 60909(0)-2001 の式（5）

$$R_{UT} = \sqrt{Z_{UT}{}^2 - X_{UT}{}^2} = \sqrt{0.01331^2 - 0.01324^2} = 0.001363\ (\Omega)$$

$$\therefore Z_{UT} = R_{UT} + jX_{UT} = 0.001363 + j0.01324\ (\Omega)$$

2. 変圧器 TR の正相インピーダンス（Z_{TK}）

$$Z_{TK} = K_T \cdot Z_T = K_T \cdot (R_T + jX_T)$$ <1> IEC 60909(0)-2001 の 3.3.3 項

ここで、 Z_{TK} ： 修正後の変圧器のインピーダンス
Z_T ： 変圧器のインピーダンス
K_T ： 補正係数

$$K_T = 0.95 \times \frac{C_{max}}{1 + 0.6 \times X_T}$$ <2> IEC 60909(0)-2001 の式（12a）

ここで、 C_{max} ： 電圧係数（定格電圧が 1kV 超過 35kV 以下の場合 Cmax =1.1）
X_T ： 変圧器の Per Unit リアクタンス

変圧器データ $\%Z_{TR}$ = 8.9% および X/R = 29.5 より、$Z_{TR(Ohm)}$ を求める。

$$Z_{TR(Ohm)} = Z_{TR(BASE)} \cdot \left(\frac{\%Z_{TR}}{100}\right)$$ ここで、 $$Z_{TR(BASE)} = \frac{(kV_{TR})^2}{MVA_{TR}}$$

$$\therefore Z_{TR(Ohm)} = \frac{(kV_{TR})^2}{MVA_{TR}} \cdot \left(\frac{\%Z_{TR}}{100}\right) = \frac{11^2}{20} \times \frac{8.9}{100} = 0.53845\ (\Omega)$$

$$X_{TR} = \frac{Z_{TR(Ohm)}}{\sqrt{1+\left(\frac{1}{X/R}\right)^2}} = \frac{0.53845}{\sqrt{1+\left(\frac{1}{29.5}\right)^2}} = 0.53814\ (\Omega)$$

$$R_{TR} = \sqrt{Z_{TR}{}^2 - X_{TR}{}^2} = \sqrt{0.53845^2 - 0.53814^2} = 0.0182686\ (\Omega)$$

すなわち、 $Z_{TR} = R_{TR} + jX_{TR} = 0.0182686 + j0.53814\ (\Omega)$ となる。

次に、Per Unit リアクタンス（X_{TRpu}）を求める。

$$X_{TRpu} = \frac{X_{TR}}{(kV)^2/MVA} = \frac{0.53814}{11^2/20} = 0.0889488\ (pu)$$

式 <2> より

$$K_T = 0.95 \times \frac{C_{\max}}{1+0.6\times X_{TRpu}} = 0.95 \times \frac{1.1}{1+0.6\times 0.0889488} = 0.992055$$

式 <1> より

$$Z_{TRK} = K_T \cdot Z_{TR} = 0.992055 \times (0.0182686 + j0.53814) = 0.018123 + j0.533864\ (\Omega)$$

3. 商用電源および変圧器回路のインピーダンス（$Z_{T/UT}$）と寄与電流

$$Z_{TR/UT} = Z_{TRK} + Z_{UT}$$
$$= (0.018123 + j0.533864) + (0.001363 + j0.01324) = 0.019486 + j0.547104\ (\Omega)$$

この回路を流れる短絡電流（$I_{T/UT}$）は、

$$I_{TR/UT} = \frac{c \cdot Un}{\sqrt{3} \cdot Z_{TR/UT}}$$ IEC 60909(0)-2001 の式（29）

$$= \frac{1.1\times 11}{\sqrt{3}\times\sqrt{0.019486^2 + j0.547104^2}} = 12.7608\ (kA)$$ <11>

$$\theta_{TR/UT} = \tan^{-1} X/R = \tan^{-1} 0.547104/0.019486 = 87.96°$$

$$I_{TR/UT(R)} = 12.7608 \times \cos(87.96°) = 0.454249\ (kA)$$
$$I_{TR/UT(X)} = 12.7608 \times \sin(87.96°) = 12.752712\ (kA)$$

4. 同期機電動機 SM の正相インピーダンス（Z_{SM}）と寄与電流

$$Z_{GK} = K_G \cdot Z_G = K_G \cdot (R_G + jX''_d) \qquad \langle 3 \rangle$$

IEC 60909(0)-2001 の式（17）

ここで、 Z_{GK} ： 修正後の同期機の初期過渡インピーダンス
Z_G ： 同期機の初期過渡インピーダンス
K_G ： 補正係数

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{C_{\max}}{1 + X''_d \cdot \sin\varphi_{rd}} \qquad \langle 4 \rangle$$

IEC 60909(0)-2001 の式（18）

ここで、 C_{max} ： 電圧係数（定格電圧が 1kV 超過 35kV 以下の場合 1.1）
U_n ： 系統の公称電圧
U_{rG} ： 同期機の定格電圧
ϕ_{rd} ： I_{rG} と $U_{rG}/\sqrt{3}$ との位相角
X''_d ：同期機の初期過渡リアクタンス（定格インピーダンス基準）

式〈4〉より

$$K_{GSM} = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{C_{\max}}{1 + X''_d \cdot \sin\varphi_{rd}} = \frac{11{,}000}{11{,}000} \cdot \frac{1.1}{1 + 0.26 \times \sin\left(\cos^{-1} 0.95\right)} = 1.0174$$

$$Z_{GSM} = \sqrt{\left(\frac{X''_d}{X/R}\right)^2 + \left(X''_d\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.26}{35}\right)^2 + 0.26^2} = 0.2601061\ (pu)$$

式〈3〉より

$$Z_{GKSM} = K_{GSM} \cdot Z_{GSM} = 1.0174 \times 0.2601061 = 0.264632\ (\Omega)$$

この回路を流れる短絡電流（I_{SM}）は、

$$I_{SM} = \frac{c \cdot U_n \cdot I_{fLSM}}{Z_{GKSM}} = \frac{1.1 \times 1.0\,pu \times 438.9\,A}{0.264632} = 1.8244\ (kA) \qquad \langle 12 \rangle$$

$$\theta_{SM} = \tan^{-1} X/R = \tan^{-1} 35 = 88.36°$$

$$I_{SM(R)} = 1.8244 \times \cos(88.36°) = 0.052213\ (kA)$$
$$I_{SM(X)} = 1.8244 \times \sin(88.36°) = 1.823653\ (kA)$$

5. 誘導電動機 SM の正相インピーダンス（Z_{IM}）と寄与電流

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}}$$ 〈5〉 IEC 60909(0)-2001 の式（26）

ここで、 U_{rM} ： 誘導電動機の定格電圧
I_{rM} ： 誘導電動機の定格電流
I_{LR}/I_{rM} ：誘導電動機の拘束電流と定格電流の比

式〈3〉より

$$Z_{IM} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}} = \frac{1}{6.5} \times \frac{11{,}000}{\sqrt{3} \times 862} = 1.1335\ (\Omega)$$

この回路を流れる短絡電流（I_{SM}）は、

$$I_{IM} = \frac{c \times U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot Z_{IM}} = \frac{1.1 \times 11{,}000}{\sqrt{3} \times 1.1335} = 6.1632\ (kA)$$ 〈13〉

$$\theta_{IM} = \cos^{-1} pf = \cos^{-1} 20 = 78.46°$$

$$I_{IM(R)} = 6.1632 \times \cos(78.46°) = 1.232961\ (kA)$$
$$I_{IM(X)} = 6.1632 \times \sin(78.46°) = 6.038613\ (kA)$$

6. 事故点 F1 に流れる短絡電流

〈11〉, 〈12〉 および 〈13〉 で求めた、電源系統、同期電動機および誘導電動機からの寄与電流をベクトル和して、事故点 F1 に流れる3相短絡電流（I″k： 初期対称実効値）を求める。

$$\begin{aligned} I_{F1} &= \sqrt{\left(I_{TR/UT(R)} + I_{SM(R)} + I_{IM(R)}\right)^2 + \left(I_{TR/UT(X)} + I_{SM(X)} + I_{IM(X)}\right)^2} \\ &= \sqrt{(0.454249 + 0.052213 + 1.232961)^2 + (12.752712 + 1.823653 + 6.038613)^2} \\ &= \sqrt{1.739423^2 + 20.614978^2} \\ &= \sqrt{428.002910} \\ &= 20.688\ (kA) \end{aligned}$$

ETAP による計算結果との比較は、Page 2 of 6 をご参照下さい。

お願い

上記の初期対称実効値（I″k）の計算に加え、 Ip, Ib および Ik について、どなたか引き続き計算していただけないでしょうか。 そして、ETAP ユーザー会での発表、大歓迎です。