

ETAP Technical Report – No. 029

IEC による短絡電流計算と機器定格の評価 (Part 1)

ETAP は IEC 60909-0, 2001 に基づき、3相短絡、線間短絡、2線地絡、1線地絡電流を計算します。今回は、第 17 回 ETAP ユーザー会で説明した資料「IEC による短絡電流計算方法と機器定格の評価」を用いて、ETAP (IEC に完全に準拠) による3相短絡電流の計算方法について説明します。

ETAP は、下記の短絡電流値を計算し、遮断器やヒューズなどの保護装置の短絡電流責務について検証します。短絡電流の構成要素については、添付資料の 3 頁を参照下さい。

| | |
|-------------------------|---|
| ▪ 初期対称実効値 ($I''k$) | Initial Symmetrical Short-Circuit Current |
| ▪ ピーク値 (i_p) | Peak Short-Circuit Current |
| ▪ 遮断電流値 (I_b) | Short-Circuit Breaking Current |
| ▪ 定常電流値 (I_k) | Steady-State Short-Circuit Current |
| ▪ 直流分 (i_{dc}) | DC Component |
| ▪ 熱等価短絡電流値 (I_{th}) | Thermal Equivalent Short-Circuit Current |

1. 最初に、初期対称実効値 ($I''k$) を計算する。 $I''k$ の計算式は、添付資料の 5 頁-6 頁を参照下さい。ETAP (IEC) 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あります。その主な理由として下記の 3 点が考えられます。
 - 電圧係数 Voltage Factor (c) を適用する → 添付資料の 7 頁- 11 頁参照
 - 誘導電動機の短絡インピーダンスの値が小さい → 誘導電動機のインピーダンスの計算式は添付資料の 15 頁参照
 - インピーダンス補正係数を適用する → 添付資料の 16 頁- 17 頁参照 (詳細計算式は今回省略)
2. 初期対称実効値 ($I''k$) をベースに ピーク値 (i_p) を計算する。 i_p の計算式は、添付資料の 23 頁-29 頁を参照下さい。係数 κ によって i_p の値が変わります。
X/R 比を求める方法 A, B, C および X/R 比と係数 κ との関係についても記述しています。
3. 遮断電流値 (I_b) を計算する。 i_b の計算式は、添付資料の 30 頁-35 頁を参照下さい。
Near-to-Generator の場合、係数 μ および係数 q によって同期機および誘導機からの寄与電流の減衰が変わります。
Near-to-Generator および Far-Form-Generator の規定については、添付資料の 18 頁-22 頁を参照下さい。
4. 直流分 (i_{dc}) を計算する。 i_{dc} の計算式は、添付資料の 36 頁を参照下さい。
5. 定常電流値 (I_k) を計算する。 I_k の計算式は、添付資料の 37 頁-40 頁を参照下さい。
係数 λ が関係します。
6. 熱等価短絡電流値 (I_{th}) を計算する。 I_{th} の計算式は、添付資料の 41 頁-42 頁を参照下さい。
係数 m および n が関係します。

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

補足2 : IEC 60909-4, 2000 Example 4 に基づく、3相短絡電流 ($I''k$, I_p , I_b , I_k) および 1線地絡電流 ($I''k$, I_p) 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。

次号では、ETAP (IEC) による計算結果と遮断器やヒューズなど保護装置の短絡電流責務の検証について説明します。

ETAP User Group - No.17

IEC 60909

IECによる短絡電流計算方法と 機器定格の評価

(抜粋)

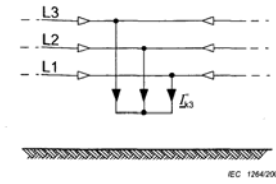
April 19, 2007

Based on IEC 60909-0, 2001

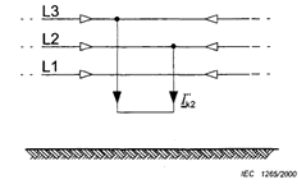
ELTECHS
Eltechs Engineering & Consulting, Co., Ltd

© 2006, Eltechs Engineering & Consulting, Co. Inc. All Rights Reserved.

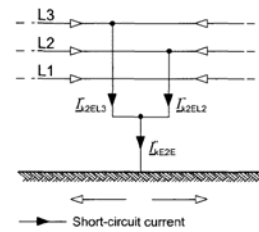
短絡事故の種類 (ETAP が対応する短絡事故の種類)



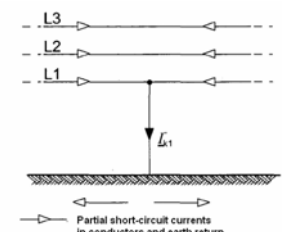
3相短絡



線間短絡

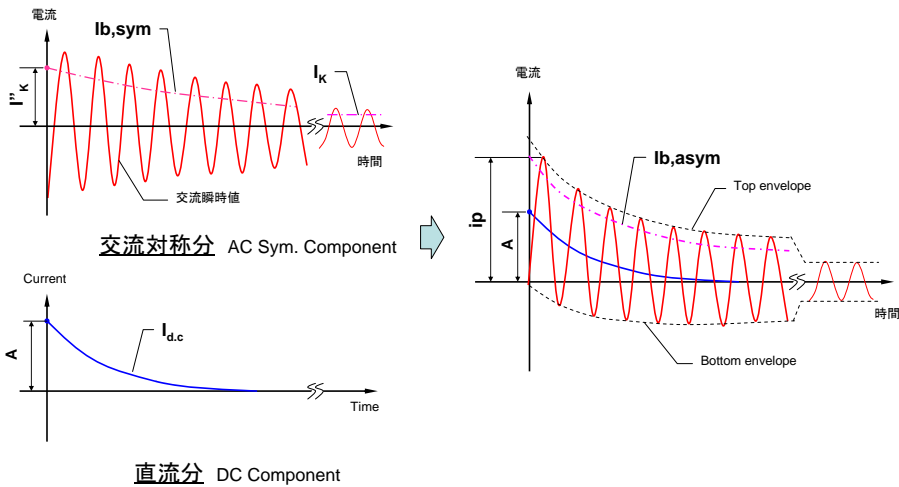


2線地絡



1線地絡

短絡電流の構成要素 Component of Short-Circuit Currents



IEC 909 による短絡電流計算

- 初期対称実効値 (I''_k) Initial Symmetrical Short-Circuit Current
- ピーク値 (i_p) Peak Short-Circuit Current
- 遮断電流値 (I_b) Short-Circuit Breaking Current
- 定常電流値 (I_k) Steady-State Short-Circuit Current
- 直流分 (i_{dc}) DC Component
- 熱等価短絡電流値 (I_{th}) Thermal Equivalent Short-Circuit Current

☆ 以下、3相短絡事故電流の計算について説明する。

短絡電流の計算方法 (I''_k)

(1/2)

I''_k の計算式

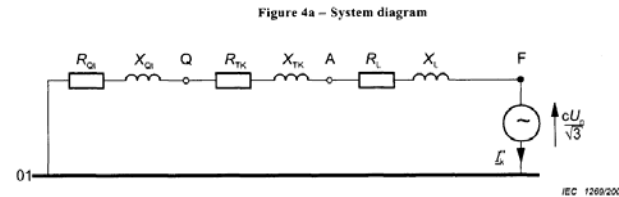
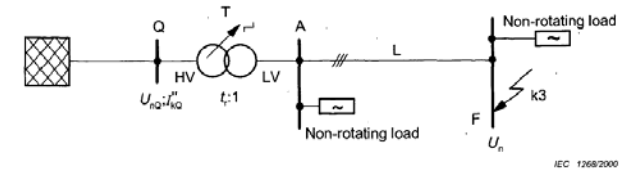
$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (29)$$

- 事故点における等価電圧源 (Equivalent Voltage Source)
- 母線の公称電圧および電圧係数に基づく等価電圧源
- 全系統のフィーダ、同期機および誘導機を各々の内部インピーダンスで置き換える
- インピーダンス補正係数を適用する

短絡電流の計算方法 (I''_k)

(2/2)

系統構成の例



電圧係数 Voltage Factor (c)

(1/5)

| Nominal voltage U_n | Voltage factor c for the calculation of | |
|---|--|---|
| | maximum short-circuit currents $c_{max}^{1)}$ | minimum short-circuit currents c_{min} |
| Low voltage 100 V to 1 000 V (IEC 60038, table I) | 1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾ | 0,95 |
| Medium voltage >1 kV to 35 kV (IEC 60038, table III) | 1,10 | 1,00 |
| High voltage²⁾ >35 kV (IEC 60038, table IV) | | |

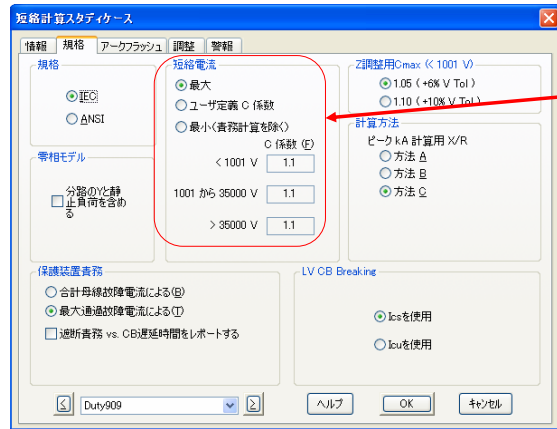
¹⁾ $c_{max}U_n$ should not exceed the highest voltage U_n for equipment of power systems.
²⁾ If no nominal voltage is defined $c_{max}U_n = U_m$ or $c_{min}U_n = 0,90 \times U_m$ should be applied.
³⁾ For low-voltage systems with a tolerance of +6 %, for example systems renamed from 380 V to 400 V.
⁴⁾ For low-voltage systems with a tolerance of +10 %.

電圧係数 Voltage Factor (c)

(2/5)

- 電圧係数は、運転状態によって運転電圧が公称電圧 (計算に用いた値) と異なる場合の安全係数
- なぜ、電圧係数を適用するのか？
 - 運転状態によって電圧が変動する
 - 計算値と異なった変圧器のタップ値で運転
 - 静的負荷およびコンデンサによる影響
 - 発電機や電動機の過渡的な影響

電圧係数 ETAP スタディケース - Max/Min SCC (3/5)



オプション:
最大/最小 短絡電流

電圧係数 ETAP スタディケース - Max/Min SCC (4/5)

短絡電流

- 最大
- ユーザー定義 C 係数
- 最小(責務計算を除く)

これらのオプションが選択すると!

- 最大電圧係数が適用される (ユーザー定義の場合はユーザーが入力した値)
- 最小インピーダンス値を適用 (「調整」の頁でユーザーが適用するよう選択した場合、マイナス方向の許容誤差および最小抵抗温度補正が適用される)

電圧係数 ETAP スタディケース - Max/Min SCC (5/5)

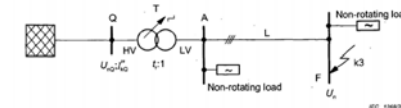
短絡電流

- 最大
- ユーザー定義 C 係数
- 最小(責務計算を除く)

このオプションが選択すると!

- 最小電圧係数が適用される
- 最大インピーダンス値を適用 (「調整」の頁でユーザーが適用するよう選択した場合、プラス方向の許容誤差および最大抵抗温度補正が適用される)

インピーダンス Z_k を求める (1/4)



インピーダンス Z_k を求める

(2/4)



同期発電機のデータ (Synchronous Generator Data)
 短絡電流計算に必要な同期発電機に関するデータは、下記のとおりです。

- 定格容量、電圧および力率 (Rated MW, kV, and power factor)
- 初期過渡、過渡リアクタンスおよびX/Rの値 (X_d' , X_d'' , and X/R)
- 発電機のタイプ (Generator type)
- IECによる励磁機のタイプ (IEC exciter type)

同期モータのデータ (Synchronous Motor Data)
 短絡電流計算に必要な同期モータに関するデータは、下記のとおりです。

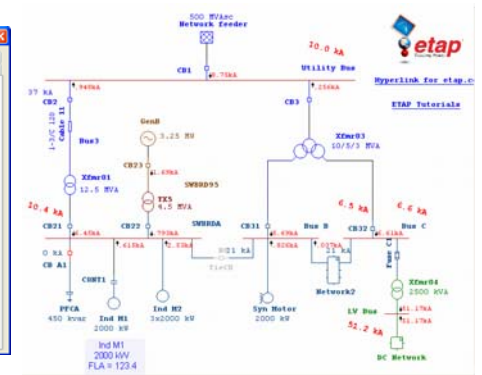
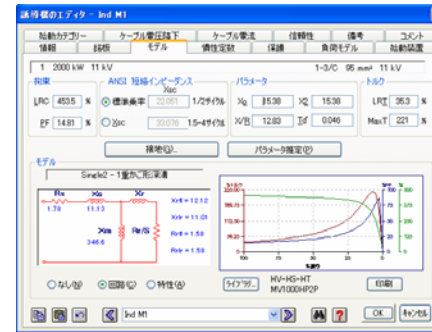
- 定格容量、電圧および極数 (Rated kW/hp, kV, and the number of poles)
- 初期過渡リアクタンスおよびX/Rの値 (X_d' および X/R)
- 始動電流率、直軸リアクタンスおよび初期直軸回路時定数(%LRC, X_d および T_{d0}' 、IECによる短絡電流計算の場合)

誘導モータのデータ (Induction Machine Data)
 短絡電流計算に必要な誘導モータに関するデータは、下記のとおりです。

- 定格出力および電圧 (Rated kW/hp and kV)
- X/Rの値および下記のデータ (どれか1つ)
 スサイクル および1.5から4サイクルにおける X_{sc} (ANSIにて、Short-Circuit Z オプションを X_{sc} と設定した場合)
 %LRC (ANSIにて、Short-Circuit Z オプションを $StdMf$ と設定した場合)
 %LRC および T_d' (IECによる短絡電流計算の場合)

インピーダンス Z_k を求める

(3/4)



インピーダンス Z_k を求める

(4/4)

誘導電動機のインピーダンス

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (26)$$

U_{rM} 定格電圧
 I_{LR} 拘束電流
 I_{rM} 定格電流
 S_{rM} 定格皮相電力

R_M/X_M の値が規定されていない場合、下記の値を適用する。

P_{rM} / 極の対数 ≥ 1 MW の高圧電動機: $R_M/X_M = 0.10$, $X_M = 0.995 Z_M$
 P_{rM} / 極の対数 < 1 MW の高圧電動機: $R_M/X_M = 0.15$, $X_M = 0.989 Z_M$
 低圧電動機群 (ケーブルを含む): $R_M/X_M = 0.42$, $X_M = 0.922 Z_M$

インピーダンス補正係数 (まとめ - 1/2)

変圧器

- 配電用変圧器 (Network XFMR) $\Rightarrow K_T$
- 発電機用変圧器 (Unit XFMR) 系統側で短絡事故の場合 $\Rightarrow K_S, K_{SO}$
- 発電機用変圧器 (Unit XFMR) 分岐系統側で事故の場合 $\Rightarrow K_{T,S}, K_{T,SO}$
- 発電機用変圧器 (Unit XFMR) 発電機と変圧器間で事故の場合 $\Rightarrow K = 1$

インピーダンス補正係数 (まとめ - 2/2)

同期機

- 発電機用変圧器 (Unit XFMR) がない場合
⇒ K_G
- 発電機用変圧器 (Unit XFMR) がある場合で、かつ系統側で短絡事故の場合
⇒ K_S, K_{SO}
- 発電機用変圧器 (Unit XFMR) がある場合で、かつ補機系統 (aux. system) 側で短絡事故の場合 (発電機と変圧器間での事故を含む)
⇒ $K_{G,S}, K_{G,SO}$

短絡電流のタイプ

(1/5)

下記の場合、短絡電流は **Near-to Generator**

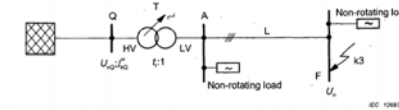
少なくとも1台の発電機が、発電機定格電流の2倍以上の初期対称短絡電流 (I''_k) を寄与する場合

または

同期電動機および誘導電動機の寄与電流が、電動機が無い場合の初期対称短絡電流 (I''_k) の 5% 以上の場合

上記以外の場合

短絡電流は **Far-From-Generator**

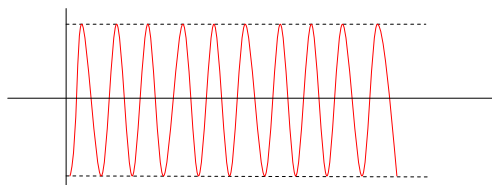


短絡電流のタイプ

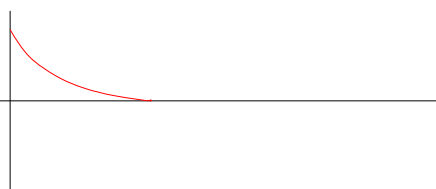
(2/5)

Far-From-Generator の場合の短絡電流

交流成分 (減衰しない)



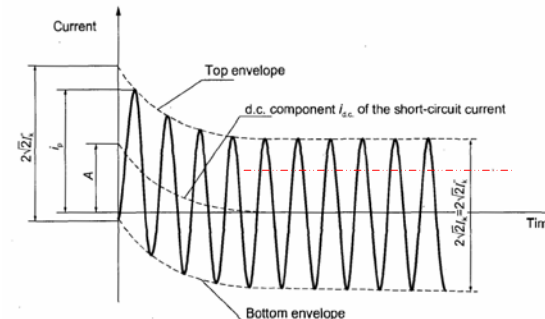
直流成分 (Zero まで減衰する)



短絡電流のタイプ

(3/5)

Far-From-Generator の場合の短絡電流



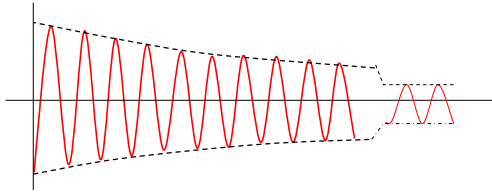
- I''_k = initial symmetrical RMS short-circuit current
- i_p = peak short-circuit current
- I_k = steady state short-circuit current
- $i_{d.c.}$ = d.c component of short-circuit current
- A = initial value of the d.c. component id.c.

短絡電流のタイプ

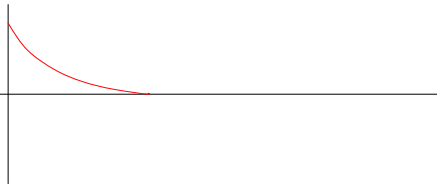
(4/5)

Near-to-Generator の場合の短絡電流

交流成分 (減衰する)



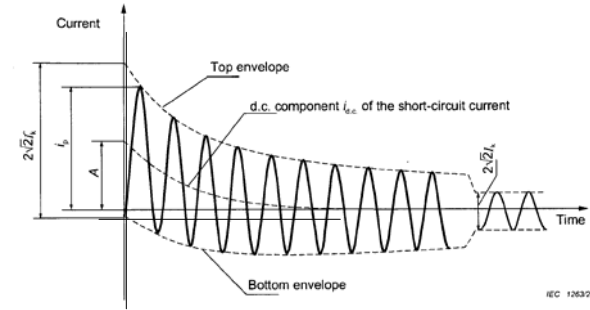
直流成分 (Zero まで減衰する)



短絡電流のタイプ

(5/5)

Near-to-Generator の短絡電流



- I_k'' = initial symmetrical RMS short-circuit current
- i_p = peak short-circuit current
- I_k' = steady state short-circuit current
- $i_{d.c.}$ = d.c component of short-circuit current
- A = initial value of the d.c. component id.c.

ピーク値 i_p の計算

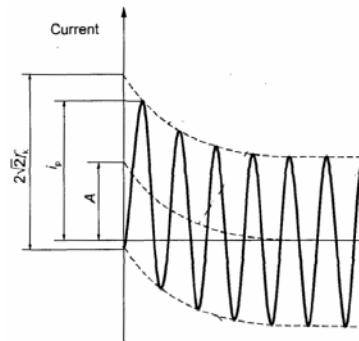
(1/7)

ピーク値 i_p の基本計算式 :

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (54)$$

係数 κ は IEC の 図 15 (次頁) または下記の式 (55) による

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (55)$$



注記:
上記の等式は、短絡電流がゼロ電圧から始まり、 i_p 約 1/2 cycle 後にピークに達するものとする。

ピーク値 i_p の計算

(2/7)

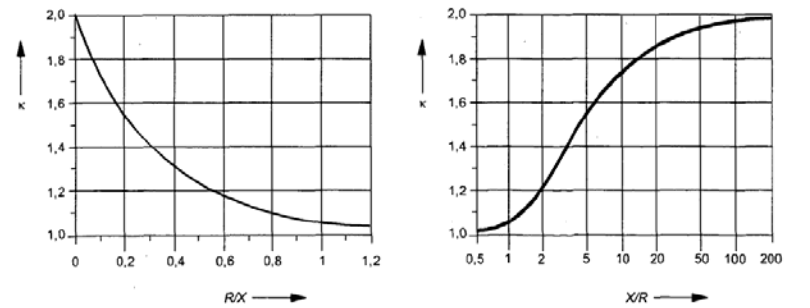


図 15

ピーク値 i_p の計算 (Non-Meshed)

(3/7)

短絡事故点における短絡電流のピーク値は、各分岐回路からの短絡電流のピーク値の総和として求める。

$$i_p = \sum_i i_{pi}$$

ここで、各分岐回路の i_p 下記の式による

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (54)$$

25

ピーク値 i_p の計算 (Meshed Network)

(4/7)

方法 A : 一定の R/X比 または X/R比 を用いて計算

係数 κ_a ($\kappa = \kappa_a$) は、図15 または 式 (55) より、短絡電流をもたらす分岐回路のうち 最小の R/X比 または 最大の X/R を用いて決定する。

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k''$$

$(\kappa = \kappa_a)$

26

ピーク値 i_p の計算

(5/7)

方法 B : 短絡事故点の R/X比 または X/R比を用いて計算

係数 κ_b は、系統の合成インピーダンスを求めて R/X比を算出する場合に生じる誤差を補うために、IEC の 図15 または 式 (55) より求めた係数 κ に 安全係数 1.15 を掛けて求める。

$$i_{p(b)} = 1.15 \kappa_{(b)} \sqrt{2} I_k''$$

係数 $\kappa_{(b)}$ は IEC の 図15 または 式 (55) より求める。

- 注記 : 1) R/X < 0.3 の場合は、係数 1.15 を適用しない。
2) $1.15 \kappa_{(b)}$ の結果は、1.8 in LV 系統では 1.8 を、MV & HV 系統では 2.0 を超えないものとする。

27

ピーク値 i_p の計算

(6/7)

方法 C : 等価周波数 $f_c = 20\text{Hz}$ (50Hz の場合) または 24Hz (60Hz の場合)を用いる

係数 κ_c ($\kappa = \kappa_c$) は、等価周波数との比を用いて、IEC の 図15 または 式 (55) より求める。

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

$Z_c = R_c + jX_c \rightarrow$ 等価電圧源の周波数が f_c である短絡事故点から見た等価インピーダンス。

28

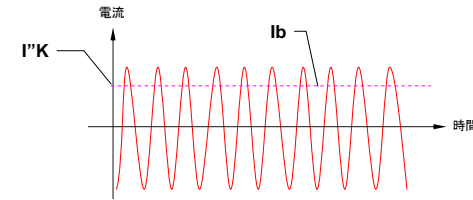
ETAP スタディケース - i_p の計算 (7/7)



遮断電流値 I_b の計算 (Far-From-Generator) (1/6)

対称短絡遮断電流 (I_b) は、初期対称短絡電流値 (I''_k) に等しい。

$$I_b = I''_k$$

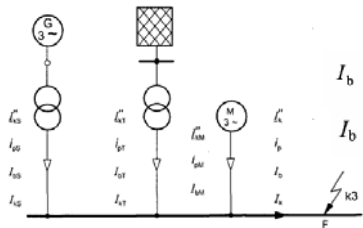


遮断電流値 I_b の計算 (Near-to-Generator) (2/6)

- 3相短絡電流 (Non-meshed networks)

$$I_b = \mu I''_k \quad \text{同期機の寄与電流}$$

$$I_b = \mu q I''_{kM} \quad \text{誘導機の寄与電流}$$



$$I_b = \sum_i I_{bi}$$

$$I_b = I_{bS} + I_{bT} + I_{bM} = \mu I''_{kS} + I''_{kT} + \mu q I''_{kM}$$

遮断電流値 I_b の計算 (Near-to-Generator) (3/6)

- 3相短絡電流 (Meshed networks)

$$I_b = I''_k \quad \text{(概略値)} \quad (74)$$

ETAP は、 I_b の計算精度を上げるために、下記の計算式を適用している。

$$I_b = I''_k - \sum_i \frac{\Delta U''_{Gi}}{c U_n / \sqrt{3}} (1 - \mu_i) I''_{kGi} - \sum_j \frac{\Delta U''_{Mj}}{c U_n / \sqrt{3}} (1 - \mu_j q_j) I''_{kMj} \quad (75)$$

$$\Delta U''_{Gi} = j X''_{diK} I''_{kGi} \quad (76)$$

$$\Delta U''_{Mj} = j X''_{Mj} I''_{kMj} \quad (77)$$

遮断電流値 I_b の計算 (Near-to-Generator) (4/6)

係数 μ の計算式 (同期電動機および誘導電動機)

$$\mu = 0,84 + 0,26 e^{-0,26 I_{kG}^* / I_{rG}} \quad \text{for } t_{\min} = 0,02 \text{ s}$$

$$\mu = 0,71 + 0,51 e^{-0,30 I_{kG}^* / I_{rG}} \quad \text{for } t_{\min} = 0,05 \text{ s}$$

$$\mu = 0,62 + 0,72 e^{-0,32 I_{kG}^* / I_{rG}} \quad \text{for } t_{\min} = 0,10 \text{ s}$$

$$\mu = 0,56 + 0,94 e^{-0,38 I_{kG}^* / I_{rG}} \quad \text{for } t_{\min} \geq 0,25 \text{ s}$$

I_{kG}^* / I_{rG} が 2 以下の場合は (Far-From-Generator)、全ての遮断時間 (t_{\min})において、 $\mu = 1$ とする。

遮断電流値 I_b の計算 (Near-to-Generator) (5/6)

係数 q の計算式 (誘導電動機)

$$q = 1,03 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) \quad \text{for } t_{\min} = 0,02 \text{ s}$$

$$q = 0,79 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) \quad \text{for } t_{\min} = 0,05 \text{ s}$$

$$q = 0,57 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) \quad \text{for } t_{\min} = 0,10 \text{ s}$$

$$q = 0,26 + 0,10 \ln(P_{rM}/p) \quad \text{for } t_{\min} \geq 0,25 \text{ s}$$

ここで、
 P_{rM} - 定格有効電力 (MW)
 P - 極の対数 (number of pairs of poles of the motor)
 上記の計算値が $q > 1$ の場合、 $q = 1$ とする、

遮断電流値 I_b の計算 (6/6)

where

μ_i, μ_j are the values given in equation (70) for both synchronous (i) and asynchronous (j) machines;

q_j is the value given in equation (73) for asynchronous motors (j);

$cU_{i/f}/\sqrt{3}$ is the equivalent voltage source at the short-circuit location;

$I_{k_i}^*, I_b$ are respectively the initial symmetrical short-circuit current and the symmetrical short-circuit breaking current with influence of all network feeders, synchronous machines and asynchronous motors;

$\Delta U_{G_i}^*, \Delta U_{M_j}^*$ are the initial voltage drops at the terminals of the synchronous machines (i) and the asynchronous motors (j);

X_{dk}^* is the corrected subtransient reactance of the synchronous machine (i):
 $X_{dk}^* = K_v X_{d0}^*$ with $K_v = K_G, K_S$ or K_{SO} ;

X_{M_j} is the reactance for the asynchronous motor (j);

$I_{kG_i}^*, I_{kM_j}^*$ are the contributions to the initial symmetrical short-circuit current from the synchronous machines (i) and the asynchronous motors (j) as measured at the terminals of the machines.

Note that the values $I_{k_i}^*$ and ΔU_{i}^* of equations (76) and (77) are measured at terminals of the machine and that they are related to the same voltage.

直流分 i_{dc} の計算 (1/1)

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} I_k^* e^{-2\pi f t R/X}$$

I_k^* 初期対称値
 f 系統の周波数
 t 遮断時間 (t_{\min})
 R/X R/X比

Meshed networksの場合、R/X比 (または X/R比) は 方法C にて決定する。
 $f \cdot t$ の値により、等価周波数との比 f_d/f を下記のように適用する。

| | | | | |
|-------------|------|------|-------|-------|
| $f \cdot t$ | <1 | <2,5 | <5 | <12,5 |
| f_d/f | 0,27 | 0,15 | 0,092 | 0,055 |

定常値 I_k の計算

(1/4)

■ 発電機単独の場合

最大短絡電流定常値 (Generator maximum excitation)

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{rG} \quad (78)$$

最大短絡電流定常値 (Generator No excitation)

$$I_{kmin} = \lambda_{min} I_{rG} \quad (79)$$

I_{rG} : 発電機の定格電流

定常値 I_k の計算

(2/4)

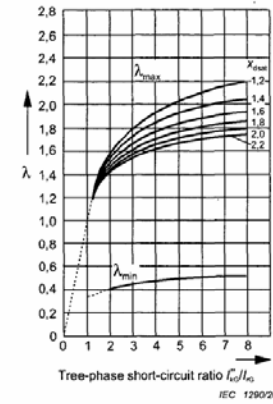


Figure 18a - λ_{min} and λ_{max} factors of series 1 (see 4.6.1.1)

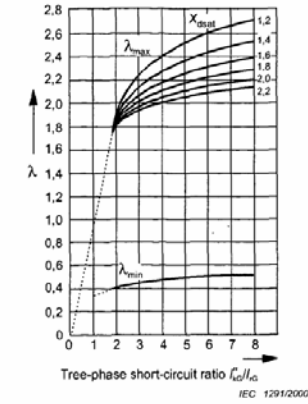


Figure 18b - λ_{min} and λ_{max} factors of series 2 (see 4.6.1.1)

Figure 18 - λ_{min} and λ_{max} factors for cylindrical rotor generators

定常値 I_k の計算

(3/4)

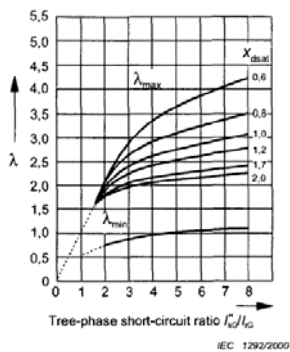


Figure 19a - λ_{min} and λ_{max} factors of series 1 (see 4.6.1.1)

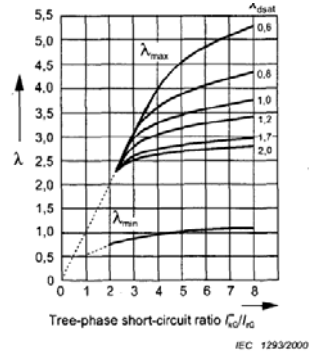


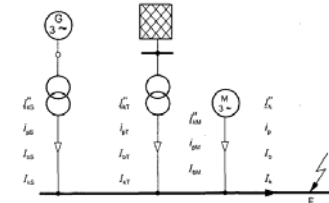
Figure 19b - λ_{min} and λ_{max} factors of series 2 (see 4.6.1.1)

Figure 19 - Factors λ_{min} and λ_{max} for salient-pole generators

定常値 I_k の計算

(4/4)

■ 3相短絡電流 (Non-meshed networks)



$$I_k = \sum I_{ki} \quad (82)$$

$$I_k = I_{kS} + I_{kT} + I_{kM} = \lambda I_{rG} + I_{kT}' \quad (83)$$

■ 3相短絡電流 (Meshed networks)

$$I_{kmax} = I_{kmaxM}' \quad (84)$$

$$I_{kmin} = I_{kmin}' \quad (85)$$

熱等価短絡電流値 I_{th} の計算

(1/2)

The joule integral $\int i^2 dt$ is a measure of the energy generated in the resistive element of the system by the short-circuit current. In this standard it is calculated using a factor m for the time-dependent heat effect of the d.c. component of the short-circuit current and a factor n for the time-dependent heat effect of the a.c. component of the short-circuit current (see figures 21 and 22)

$$\int i^2 dt = \sum_{i=1}^{i=r} I_{ki}^2 (m_i + n_i) T_{ki} = I_{th}^2 T_k \tag{104}$$

$$I_{th} = \sqrt{\frac{\int i^2 dt}{T_k}} \tag{105}$$

$$T_k = \sum_{i=1}^{i=r} T_{ki} \tag{106}$$

- I_{ki} is the initial symmetrical three-phase short-circuit current for each short circuit
- I_{th} is the thermal equivalent short-circuit current
- m_i is the factor for the heat effect of the d.c. component for each short-circuit current
- n_i is the factor for the heat effect of the a.c. component for each short-circuit current
- T_{ki} is the duration of the short-circuit current for each short circuit
- T_k is the sum of the durations for each short-circuit current (see equation (106))

熱等価短絡電流値 I_{th} の計算

(2/2)

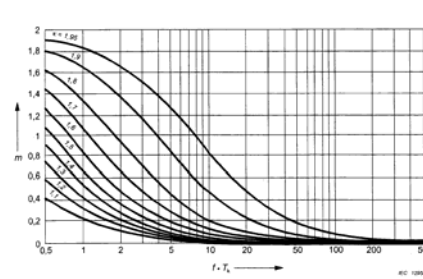


Figure 21 - Factor m for the heat effect of the d.c. component of the short-circuit current (for programming, the equation for m is given in annex A)

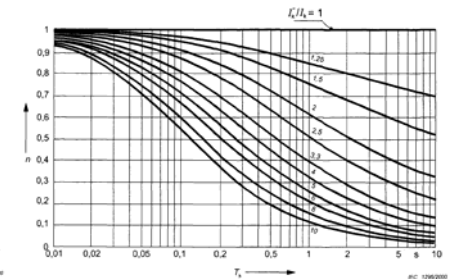


Figure 22 - Factor n for the heat effect of the a.c. component of the short-circuit current (for programming, the equation for n is given in annex A)