

本資料はとんちんかんソフトのホームページに公開の技術計算ソフト“短絡過渡電流”のプログラム構成の根拠となる技術事項をまとめたものである。

## 1. 交流 RL 回路の過渡現象

インダクタンスや静電容量などのエネルギーを蓄える要素がある場合、電気回路のスイッチングに伴い回路電流などがすぐに最終の定常状態まで突発的に変化できず、ある時間の経過を伴う。

この現象が電気回路の過渡現象である。

電気回路の短絡事故や短絡試験回路は一般に静電容量は無く、抵抗 (R) とインダクタンス (L) だけの直列回路になる。

電流が時間的に増減する時インダクタンスには電流の変化を妨げる向きの起電力 E が生じる。

$$E = -L \frac{di}{dt} \quad (1) \quad (\text{ここに } i \text{ は電流、 } t \text{ は時間})$$

電源電圧が  $E_m \sin \omega \cdot t$  の回路でスイッチ S を投入するとき、電圧位相に対する投入時期の遅れを  $\theta$  とすればスイッチ投入時刻  $t=0$  を基準にした電源電圧は  $E_m \sin(\omega \cdot t + \theta)$  となりその回路は図 1 に示される。(  $t=0$  のとき電源電圧は  $E_m \sin \theta$  )

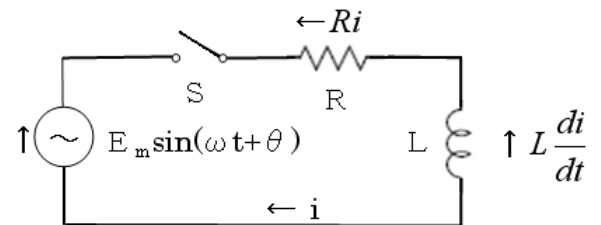


図 1

$\theta$  を一般に投入角という。(図 2 も合わせて参照)

スイッチを投入した後の電流を  $i$  とすれば抵抗 R の両端電圧は  $-Ri$ 、またインダクタンス L の両端電圧は (1) 式だから、この回路の方程式は次式となる。

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E_m \sin(\omega \cdot t + \theta) \quad (2)$$

初期条件  $t=0$  のとき  $i=0$  としてこの微分方程式を解けば (3) 式が得られる。

$$i = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left\{ \sin(\omega \cdot t + \theta - \phi) - \sin(\theta - \phi) \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \right\} \quad (3)$$

ただし

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} = \text{力率角 (rad)}$$

また  $I_s$  を交流電流実効値とすれば、 $\frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \sqrt{2} I_s$  であるから

$$i = \sqrt{2} I_s \left\{ \sin(\omega \cdot t + \theta - \phi) - \sin(\theta - \phi) \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \right\} \quad (4)$$

尚、インダクタンス L をリアクタンス X に置き換えれば次式となる。

$$i = \sqrt{2} I_s \left\{ \sin(\omega \cdot t + \theta - \phi) - \sin(\theta - \phi) \exp\left(-\frac{R}{X} \omega \cdot t\right) \right\} \quad (5)$$

この式の第1項を  $i_{AC}$  とすれば  $i_{AC} = \sqrt{2}I_s \sin(\omega \cdot t + \theta - \phi)$  となり、これを定常電流といい、  
 図2のオレンジ色の交流波形で示される。

第2項を  $i_{DC}$  とすれば  $i_{DC} = -\sqrt{2}I_s \sin(\theta - \phi) \exp\left(-\frac{R}{X} \omega \cdot t\right)$  であり、これを過渡電流といい  
 図2の青色で示した減衰する直流成分で示される。

勿論  $i = i_{AC} + i_{DC}$  となり図2の赤色の波形となる。

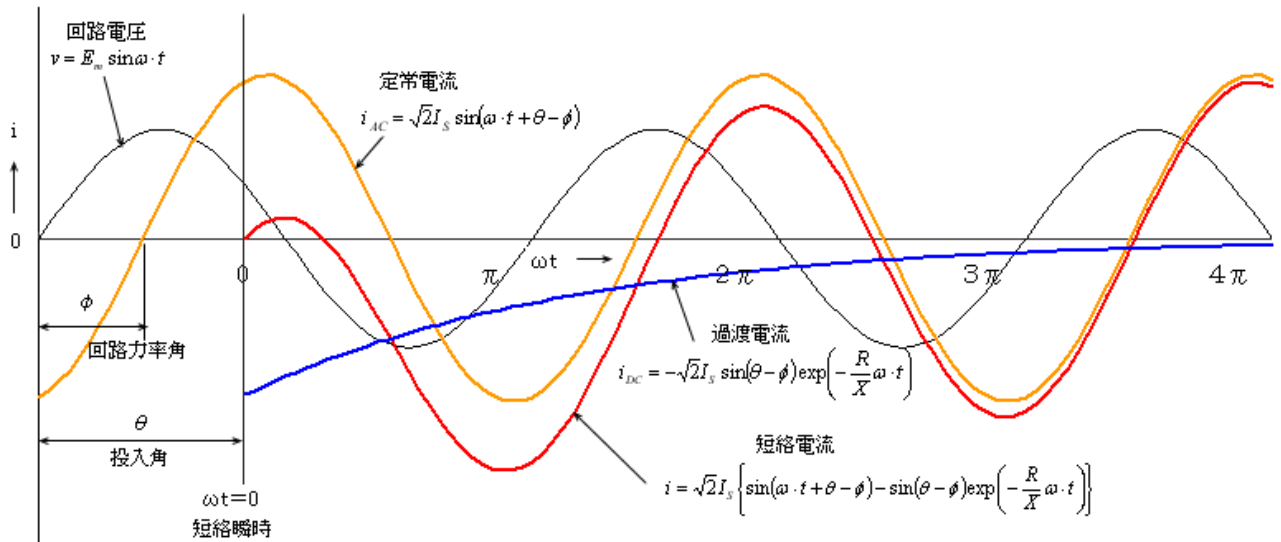


図2

$t = 0$  のときは定常電流と過渡電流は絶対値の等しい逆方向電流となり合成電流は0となって  
 微分方程式の初期条件と一致する。更に  $t \rightarrow \infty$  のときは過渡電流が0となり、定常電流だけになる。

これらは(5)式からも容易にわかる。

以上の検討は短絡電流が流れても導体抵抗に変化が無いことを前提にしている。

実際の短絡では過大な電流に伴うジュール熱によって導体温度が上昇するため短絡回路の抵抗も時間とともに増大して電流は上記計算式より少し減衰する。

但し、短絡電流に耐えうる電気機器の設計を考慮する場合は想定される最大の電流や最大の電磁力、発生ジュール熱などが問題になるので一般に短絡過渡電流を考える場合は抵抗増大に伴う電流減衰性は考慮していない。更には通常の短絡は回路に組み込まれた遮断機によって速やかに遮断されるので実用的にジュール熱による電流減衰を考慮する必要も少ない。

尚、 $\frac{R}{L}$  の逆数  $T \equiv \frac{L}{R}$  は時定数と呼ばれ、電流が飽和するまでの時間は時定数の約4.6倍

になるなどの過渡現象の性質を示すがここでは詳細割愛する。

また、短絡電流の最大瞬時値は投入角によって変わる。特に単相では  $\theta = \phi$  の場合直流成分の過渡電流は発生しない。すなわち短絡のタイミングで電流の値が大きく変わってしまう。

従って、短絡強度を考慮する場合は次項の非対称係数や投入容量係数などを考慮して想定される最大電流を把握する必要がある。

## 2. 短絡電流の大きさの表現方法と種類

### 2.1 対象短絡電流実効値 $I_S$

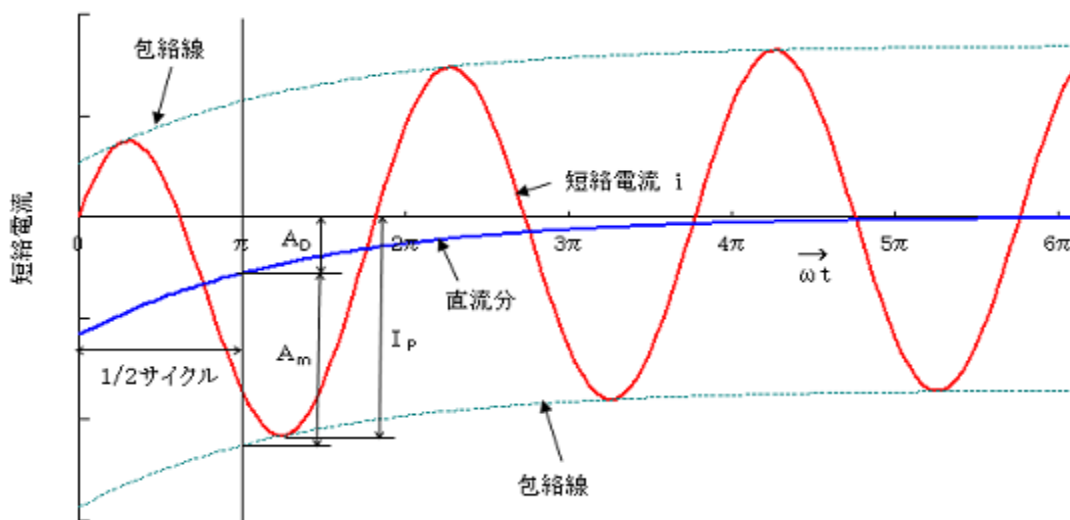


図 3

$I_S$  は直流分を含まない交流分実効値で図 3 に示す交流分最大値を  $A_m$  とすれば

$$I_S = \frac{A_m}{\sqrt{2}} \quad (6) \quad \text{をいう。 (正弦波交流の実効値は最大値を } \sqrt{2} \text{ で除した値になる)}$$

配線用遮断機などの JIS 規定では短絡試験電流の大きさは短絡発生後 1/2 サイクルにおける交流分の実効値で表すとされておりこの  $I_S$  に相当する。

(三相の場合も同様であるが短絡発生後 1/2 サイクルでの各相の平均値とする。)

一般に回路の短絡電流計算値や電気機器の短絡強度もこの値で示される。

但し、これだけでは実際電流の最大値は把握しにくい。

### 2.2 非対称短絡電流実効値 $I_{AS}$

$I_{AS}$  は直流分を含んだ実効値で図 3 の短絡発生後 1/2 サイクル後の直流分を  $A_D$  とすれば

$$I_{AS} = \sqrt{I_S^2 + A_D^2} = \sqrt{\left(\frac{A_m}{\sqrt{2}}\right)^2 + A_D^2} \quad (7) \quad \text{で与えられる。}$$

#### 1) 単相の非対称係数 $K_1$

$I_{AS}$  が最大になる条件は  $A_D$  が最大になる時で、単相では  $\theta - \phi = \pm \pi/2$  の時に最大になる。すなわち (5) 式の第 2 項の  $\sin(\theta - \phi)$  に  $\pm 1$  を代入すれば  $i_{DC}$  の最大値

$$i_{DC \max} = \pm \sqrt{2} I_S \exp\left(-\frac{R}{X} \omega \cdot t\right) \quad (8) \quad \text{が得られる。}$$

短絡試験電流は短絡発生後 1/2 サイクルのときの値であるから、(7) 式の  $A_D$  に (8) を代入し、合わせて、 $\omega t = \pi$  を代入すれば非対称短絡電流実効値  $I_{AS}$  は次式となる。

$$I_{AS} = \sqrt{I_S^2 + A_D^2} = \sqrt{I_S^2 + \left\{ \sqrt{2} I_S \exp\left(-\frac{R}{X} \pi\right) \right\}^2} = I_S \sqrt{1 + 2 \exp\left(-\frac{2\pi R}{X}\right)} \quad (9)$$

$$\text{ここで } K_1 = \sqrt{1 + 2 \exp\left(-\frac{2\pi R}{X}\right)} \quad (10) \quad \text{とおけば}$$

$I_{AS} = K_1 I_S$  となり  $K_1$  を単相交流における非対称係数という。

## 2) 三相の非対称係数 $K_3$

三相の場合、各相の電圧位相はそれぞれ  $2\pi/3$  ずつずれている。従って R 相の  $(\theta - \phi)$  を直流が最大となる  $\pi/2$  として S 相と T 相の位相を考慮して 3 相それぞれに  $I_{AS}$  求めてその平均をとれば次式が得られる。

$$I_{AS} = I_S \times \frac{1}{3} \left\{ \sqrt{1 + 2 \exp\left(-\frac{2\pi R}{X}\right)} + 2 \sqrt{1 + \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{2\pi R}{X}\right)} \right\} \quad (11)$$

ここで

$$K_3 = \frac{1}{3} \left\{ \sqrt{1 + 2 \exp\left(-\frac{2\pi R}{X}\right)} + 2 \sqrt{1 + \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{2\pi R}{X}\right)} \right\} \quad (12) \quad \text{とおけば}$$

$$I_{AS} = K_3 I_S$$

となり、 $K_3$  を三相の非対称係数という。

$K_1, K_3$  共に短絡回路の  $R$  と  $X$  だけの関数だから  $R$  と  $X$  が決まれば非対称係数も決まる。

また、 $X/R$  の値が大きいほど ( $\cos \phi$  が小さいほど) 非対称係数は大きくなる。

すなわち、同じ短絡試験電流  $I_S$  であっても、短絡回路力率  $\cos \phi$  が小さいほど直流成分が大きくなり短絡電流は過大になる。

## 2.3 最大非対称短絡電流瞬時値 $I_P$

$I_P$  は非対称短絡電流の最大値をいう。(図 3 参照)

短絡電流は概ね  $\theta = 0$ ,  $\omega t = \pi/2 + \phi$  に最大となる。

よって (5) 式に  $\theta = 0$ ,  $\omega t = \pi/2 + \phi$  を代入して

$$I_P = \sqrt{2} I_S \left[ 1 + \sin \phi \cdot \exp\left\{-\frac{R}{X} \left(\frac{\pi}{2} + \phi\right)\right\} \right] \quad (13) \quad \text{を得る}$$

ここで

$$K_P = \sqrt{2} \left[ 1 + \sin \phi \cdot \exp\left\{-\frac{R}{X} \left(\frac{\pi}{2} + \phi\right)\right\} \right] \quad (14) \quad \text{とおけば}$$

$$I_P = K_P I_S$$

となり、 $K_P$  を投入容量係数 (または最大非対称短絡電流瞬時値係数) という。

$\cos \phi$  が小さいほど  $K_P$  は大きくなることは非対称係数と同様である。

### 3. $K_1$ , $K_3$ , $K_P$ のグラフ

以上のまとめとして  $K_1$ ,  $K_3$ ,  $K_P$  のグラフを図4に示す。

この値は想定される最大の値であることは前項での計算式導入から明らかである。

(投入角によってはより小さな値となる。)

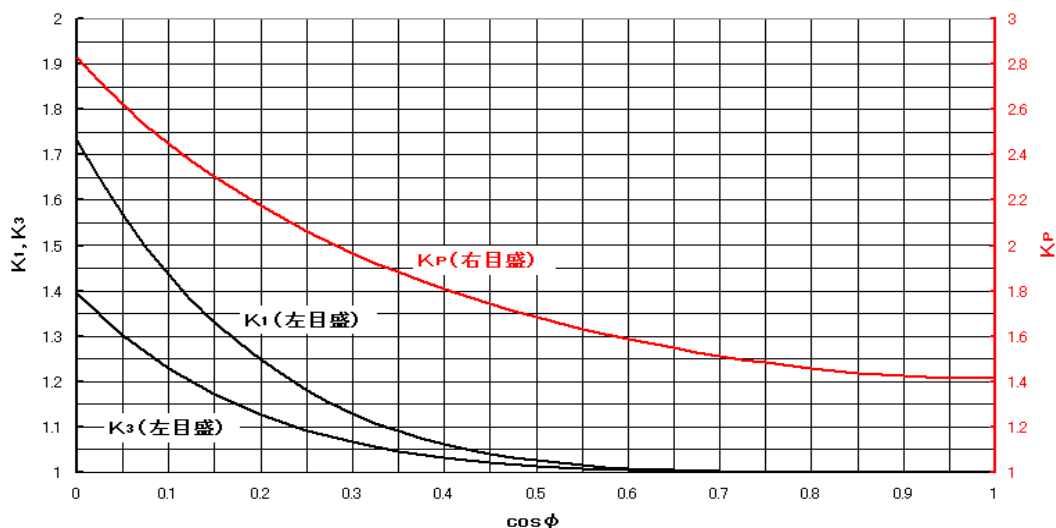


図4

### 4. 電気機器の短絡強度

本資料では短絡過渡現象と短絡電流の表し方を示したが電気機器の設計に当たっては一般に次の検証が必要になる。

- 1) 過大な短絡電流のジュール熱に耐えられるか？
- 2) 直流を含む非対称電流に伴って生じる過大な電磁反発力に機械的に耐えられるか？

ことに電気母線のブスバーでは導体の相間寸法だけでなく導体の配置形態 {縦 (|)、横 (—) の区分} や導体自身の寸法によっても電磁力は大きく異なってくる。

また三相では1極の導体には他の2極の導体との間に電磁力が生じ、且つ線電流は過渡的に変化するので短絡試験以外で具体的に母線強度の検討を行うためには過渡現象の中でその電磁力を合成して検討することが必要になる。

以上

### 参考文献

- 1) 解析学概論 矢野 健太郎 石原 繁 共著

(株) 裳華房 発行 昭和48年4月15日

- 2) 電気学 西巻 正郎 著

森北出版(株) 発行 1973年10月30日

- 3) 『ノーヒューズ遮断機・漏電遮断機 技術資料集』2007年版：三菱電機(株)

[http://www.mitsubishielectric.co.jp/haisei/01sei/03sei\\_siryou/main\\_03sei\\_siryou.htm](http://www.mitsubishielectric.co.jp/haisei/01sei/03sei_siryou/main_03sei_siryou.htm)

このURLから低圧遮断機→技術資料集