

低圧回路の短絡電流計算法

Calculation of Short-circuit Current for Low Voltage System

梅 里 泰 正*
Yasumasa Umesato

I. は し が き

システムを計画するにあたって、短絡電流がどの程度になるかを知ることは、しゃ断器の選定に対し不可欠なことであり、同時に系統直列機器の機械的強度、熱的強度などを検討するために必要なことである。

短絡電流は、その検討目的に対し時間・労力をいくらかけても正確に求めなければならない場合もあるが、しかし系統の短絡電流を筆算にて求める以上は、いかに正確に計算したとしてもその程度には限度がある。

従来、低圧系統の短絡電流計算は、系統のインピーダンスマップを使用して行なわれていたが、低圧系統の短絡電流につき特に注目すべき点は、電動機のコントリビューションとケーブルによる短絡電流の減少であることを考慮し、対称短絡電流実効値を充分実用に供する精度にて求める方式をまとめたのでここに示す。

II. 短絡電流算出に使用する系統のインピーダンス

短絡電源から故障点までの回路に考えられるインピーダンス構成要素としては、

1) 受電変圧器一次側インピーダンス

電力供給者より提示される短絡容量から算出して用いる。求められた値はリアクタンスと考えてよい。

2) 受電変圧器、電動機のインピーダンス

変圧器インピーダンスは主として一次電圧および変圧器の容量によって決まる。

電動機のインピーダンスは、その出力により異なる。なお計算に使用する値は過渡値である。

一般に変圧器、電動機のインピーダンスは、リアクタンス値と考えてよい。

3) 配線のインピーダンス

低圧系統では、ケーブルのインピーダンスが短絡電流抑制に大きな役割をはたしているため、ケーブルのリアクタンス、抵抗を考慮しなければならない。特にロードセンタで受電し、長いケーブルを経て各場所のコントロールセンタに供給される場合などにおいて、コントロー

ルセンタのしゃ断器選定にはケーブルを考慮するか否かで大きな相違を生ずる。

4) そ の 他

低圧系統に使用される主回路機器として、ACB、NFB、CTなどがある。それらのインピーダンス値がわかっている場合は考慮する。ただし使用する値はリアクタンス値で、しかも短絡電流に対する値でなければならない。一般にわかっている数値は定格電流に対する値であり、この値を使用すると、短絡時の飽和を考えていないためリアクタンス値として大きめの値を使うことになるので注意を要す。

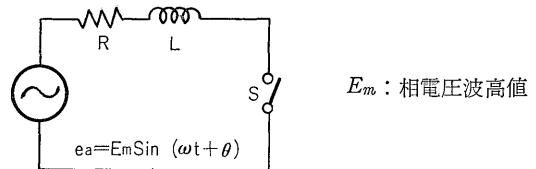
バスダクトの場合もリアクタンス値として影響するので、数値が判っている場合は考慮する。

III. 受電電源よりの短絡電流

1) 短絡電流の算出

一般に系統計画に使用されるのは、三相短絡電流であり、しかも短絡発生後 $\frac{1}{2}$ サイクル時での瞬時値、実効値が主である。これは、低圧系統のしゃ断器規格がすべて $\frac{1}{2}$ サイクル時での保障をしているためと同時に、最大瞬時値の計算も楽なためである。

三相短絡電流を計算するには、等価単相回路を解けばよい。等価回路は次のように表わされる。



短絡が生じるということは、スイッチ S が投入されることに等しいから、短絡電流を i_s とすれば、

$$E_m \sin(\omega t + \theta) \mathbf{1} = R i_s + L \frac{d i_s}{d t} \quad \dots \dots \dots (1)$$

上式を解けば

$$i_s = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left\{ \sin(\omega t + \theta - \varphi) - e^{-\frac{R}{L} t} \sin(\theta - \varphi) \right\} \dots \dots (2)$$

φ : 短絡回路力率

θ : 短絡発生位相

* 開発部

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

2) 対称短絡電流実効値

対称短絡電流実効値とは、交流分の実効値のことであるから式(2)において

$$I_{R(rms)sy} = \frac{E_m}{\sqrt{2} \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \dots\dots\dots(3)$$

3) 短絡発生後1/2サイクルでの最大値

低圧しゃ断器の規格に従がい、短絡発生後1/2サイクル時での各種短絡電流を計算する。

(1) 瞬時値

式(2)において、 $t = 1/2$ サイクル、 θ を変数として最大値を求める。

$$A = \sin(\omega t + \theta - \varphi) - \varepsilon^{-\frac{R}{L}t} \sin(\theta - \varphi) \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial A}{\partial \theta} = \cos(\omega t + \theta - \varphi) - \varepsilon^{-\frac{R}{L}t} \cos(\theta - \varphi)$$

$$= -\cos(\theta - \varphi) (1 + \varepsilon^{-\frac{R}{L}t}) \dots (t = 1/2 \text{ cycles を代入})$$

ゆえに A が最大となるには

$$\frac{\partial A}{\partial \theta} = 0 \text{ より } \cos(\theta - \varphi) = 0$$

$$\therefore \theta - \varphi = \pm 90^\circ \dots\dots\dots(5)$$

式(4)(5)より

$$|A_{max}| = 1 + \varepsilon^{-\frac{R}{L} \times 1/2 \text{ サイクル}} \dots\dots\dots(6)$$

50%系において数値を求めれば第1表のようになる。

第1表 1/2 サイクル時における最大瞬時値

Table 1. Maximum instantaneous value at 1/2 cycle after a short-circuit breaks out

cos φ	0.15	0.3	0.5	0.866
$ A_{max} $	1.625	1.376	1.163	1.004

ゆえに、最大瞬時値は、式(2)、式(6)より、

$$I_{Rmax} = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} (1 + \varepsilon^{-\frac{R}{L} \times 1/2 \text{ サイクル}}) = \gamma I_{R(rms)sy} \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 γ は最大非対称短絡電流瞬時値係数

$$\gamma = \sqrt{2} (1 + \varepsilon^{-\frac{R}{L} \times 1/2 \text{ サイクル}}) \dots\dots\dots(8)$$

(補) 機械的強度を検討するには、短絡発生後の理論上の最大瞬時値を求める必要がある。すなわち式(3)において、 θ, t が変数となるので2変数関数の最大値を求めることになる。この条件に求められた値および第1表との比較を参考のため(補)の付表に示す。

(2) 非対称電流実効値

交流分実効値は時間に関係なく一定であるから、1/2 サイクル時で直流分が最大となる、すなわち直流分が最大値より減衰する条件より求めればよい。

直流分最大： $\sin(\theta - \varphi) = \pm 1$ ゆえに式(2)は

(補)の付表

短絡力率 cos φ	0.15	0.3	0.5	0.866
力率角 φ	81°20'	72°30'	60°	30°
投入位相 θ	180° 0°	120° 0°	180° 0°	180° 0°
最大値を示す時間 t (sec)	0.00921	0.00863	0.00795	0.00659
理論最大値 $ A_{max} $	1.6357	1.3982	1.1979	1.0136
比較値 $\Delta A\%$	-0.6	-1.6	-2.9	-0.9

(注1) $\Delta A\%$ は理論最大値を基準とした%値である。
(注2) 理論最大値を示す投入位相 θ は、力率に関係なく常に $\theta = 0^\circ$ (または 180°) となる。

$$i_s = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \{ \sin(\omega t \pm 90^\circ) \mp \varepsilon^{-\frac{R}{L}t} \} \dots\dots\dots(9)$$

上式より

$$\text{交流分実効値: } I_{ac} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

$$\text{直流分実効値: } I_{dc} = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \varepsilon^{-\frac{R}{L}t} (\text{1/2 サイクル})$$

ゆえに合成実効値は次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{最大非対称電流実効値: } I_{R(rms)asy} &= \sqrt{I_{ac}^2 + I_{dc}^2} \\ &= \frac{E_m}{\sqrt{2} \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sqrt{1 + 2\varepsilon^{-\frac{2R}{L}t} (\text{1/2 サイクル})} \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

最大非対称実効値係数 α とすれば

$$\alpha = \frac{I_{R(rms)asy}}{I_{R(rms)sy}} = \sqrt{1 + 2\varepsilon^{-\frac{2R}{L} \times 1/2 \text{ サイクル}}} \dots\dots\dots(11)$$

すなわち、最大非対称電流実効値は、交流分実効値を α 倍すれば求まる。

(3) 三相平均非対称電流実効値

式(9)において求めたのは、三相電流の1相分であり、他の相は $2\pi/3, 4\pi/3$ の相差角を有す。

$\theta - \varphi = 90^\circ$ とし、最大相を a 相とすれば、

$$\left. \begin{aligned} I_{Rdc(a)} &= \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \varepsilon^{-\frac{R}{L}t} \\ I_{Rdc(b)} &= -\frac{1}{2} \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \varepsilon^{-\frac{R}{L}t} \\ I_{Rdc(c)} &= -\frac{1}{2} \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \varepsilon^{-\frac{R}{L}t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

交流分実効値は各相とも

$$I_{Rac} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \text{ より}$$

三相平均非対称電流実効値 $I_{R(rms)av}$ は

$$\begin{aligned} I_{R(rms)av} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \cdot \frac{1}{3} \left\{ \sqrt{1 + 2\varepsilon^{-\frac{2R}{L}t}} \right. \\ &\quad \left. + 2\sqrt{1 + \frac{1}{2}\varepsilon^{-\frac{2R}{L}t}} \right\} \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

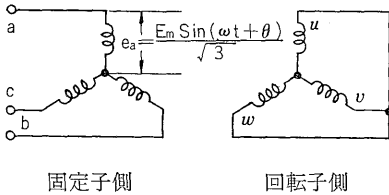
三相平均非対称係数を β とすれば、

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{I_{R(rms)av}}{I_{R(rms)sy}} = \frac{1}{3} \left(\sqrt{1 + 2\varepsilon^{-\frac{2R}{L} \times 1/2 \text{ サイクル}}} \right. \\ &\quad \left. + 2\sqrt{1 + \frac{1}{2}\varepsilon^{-\frac{2R}{L} \times 1/2 \text{ サイクル}}} \right) \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

IV. 電動機短絡電流

1. 理論式の誘導

誘導電動機からの短絡電流は、誘導電動機の等価回路を求め、この過渡解析より求められる。



上図のような誘導電動機に対し、計算に必要とする定数は、

固定子側定数

R_a : a 相の抵抗 = 各相の抵抗

L_1 : 各相の自己インダクタンス

M_{ab} : ab 間相互インダクタンス

$$M_1 \cos \frac{2}{3}\pi \left(= -\frac{1}{2}M_1 \right)$$

$$M_{ac} : M_1 \cos \frac{4}{3}\pi \left(= -\frac{1}{2}M_1 \right)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

回転子側定数

R_u : u 相の抵抗 = 各相の抵抗

L_2 : 各相の自己インダクタンス

$n\omega t$: 回転子角速度、すなわち固定子-回転子間位相角

$$M_{au} = M_{bv} = M_{cw} = M_2 \cos n\omega t$$

$$M_{av} = M_{bw} = M_{cu} = M_2 \cos \left(n\omega t + \frac{2}{3}\pi \right)$$

$$M_{aw} = M_{cu} = M_{cv} = M_2 \cos \left(n\omega t + \frac{4}{3}\pi \right)$$

$$i_u + i_v + i_w = 0$$

a 相と仮想中性線間に、 e_a なる電圧を印加すると、

$$\begin{aligned} \frac{E_m}{\sqrt{3}} \varepsilon^{j(\omega t + \theta)} &= (R_a + DL_1) i_a + DM_1 \cos \frac{2}{3}\pi \cdot i_b \\ &+ DM_1 \cos \frac{4}{3}\pi \cdot i_c + DM_2 \left\{ \cos(n\omega t) \right. \\ &\cdot i_u + \cos \left(n\omega t + \frac{2}{3}\pi \right) i_v + \cos \left(n\omega t \right. \\ &\left. + \frac{3}{4}\pi \right) i_w \left. \right\} = \left\{ R_a + D \left(L_1 + \frac{1}{2}M_1 \right) \right\} \\ &i_a + DM_2 \varepsilon^{jn\omega t} \left(i_u - \frac{1}{2}i_v - \frac{1}{2}i_w \right) \end{aligned}$$

ただし $\frac{d}{dt} = D$

ここで $L_1 + \frac{1}{2}M_1 = L_a$, $\frac{3}{2}M_2 = M$ とすれば

$$\frac{E_m}{\sqrt{3}} \varepsilon^{j(\omega t + \theta)} = (R_a + DL_a) i_a + DM \varepsilon^{jn\omega t} i_u \dots\dots (15)$$

同様に回転子側にて式をたてれば、

$$0 = (R_u + DL_u) i_u + DM \varepsilon^{-jn\omega t} i_a \dots\dots\dots (16)$$

式(15), (16)は、電動機端子に電圧を印加した場合の式であるが、短絡電流に対しては次のように考えればよい。

“電動機に、定常時 $e_a = \frac{E_m}{\sqrt{3}} \sin(\omega t + \theta)$ なる電圧が印加されているが、短絡が生じることにより印加電圧が 0、換言すれば、 $-e_a$ なる電圧を e_a に直列に印加したに等しい。 e_a により流れていた定常電流は $-e_a$ による逆向き、同値の定常電流に打消され、結局式(15), (16)を解いた場合の過渡解が求めるべき短絡電流である”。

電動機端子から、外部インピーダンス (R, X) を経た点で短絡を生じた場合は式(15)において

$$R'_a = R_a + R, L'_a = L_a + L$$

として計算すればよい。

なお電動機の始動電流は、式(15), (16)において $n=0$ すなわち、回転子の回転がないとして式を解けば、初期数サイクルの値が求まる。この場合は定常電流を含めた電流が始動電流となる。

式(15), (16)を解けば、その過渡解は次のように表わされる。

$$i_{ms} = \frac{E_m \varepsilon^{j\theta}}{\sqrt{3} \sigma L_a} \sum_{i=1}^2 \frac{A(D_i) \varepsilon^{D_i t}}{(D_i - j\omega) B'(D_i)} \dots\dots\dots (17)$$

ただし

$$A(D) = D + k_u - jn\omega$$

$$B(D) = D^2 + \left(\frac{k_a}{\sigma} + \frac{k_u}{\sigma} - jn\omega \right) D + \frac{k_a k_u}{\sigma} - \frac{k_a}{\sigma} jn\omega$$

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_a L_u}, k_a = \frac{R_a}{L_a}, k_u = \frac{R_u}{L_u}$$

$$D_{1,2} = -\frac{k_a + k_u}{2\sigma} + j \frac{n\omega}{2}$$

$$\pm \sqrt{\left(\frac{k_a + k_u}{2\sigma} - j \frac{n\omega}{2} \right)^2 - \frac{k_a}{\sigma} (k_u - jn\omega)} \dots\dots (17a)$$

2. 近似式の検討

式(17)より、電動機からのコントリビューションを求めることは複雑であり、多くの時間を要するばかりでなく、系統内に多くの電動機がある場合、そのおのおのにつき計算することは、各電動機の定数が不明であることもあって不可能に近い。そこで系統計画においては、電動機群を簡単に取り扱えるような近似式が必要である。

誘導電動機において、一般に $R_a \div R_u, X_a \div X_u$ であり、また $n \div 1, \left(\frac{2k}{\sigma n\omega} \right)^2 \ll 1$ (ただし $k_a \div k_u = k$ として) より、(17a)に示す根 $D_{1,2}$ は、

$$D_1 = -\frac{k}{\sigma} + j\omega, D_2 = -\frac{k}{\sigma} \dots\dots\dots (18)$$

ゆえに式(18)を式(17)に代入すれば

$$i_{ms} = \frac{E_m}{\sqrt{3}(x_1+x_2)} \left\{ \sin\left(\omega t + \theta - \frac{\pi}{2}\right) \varepsilon^{-\frac{k}{\sigma}t} - \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \varepsilon^{-\frac{k}{\sigma}t} \right\}$$

$$= \sqrt{2} I_L \frac{100}{(x_1+x_2)\%} \varepsilon^{-\frac{k}{\sigma}t} \left\{ \sin\left(\omega t + \theta - \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right\} \dots\dots\dots(19)$$

ただし、

$$(x_1+x_2)\% : \frac{x_1+x_2}{Z} \times 100(\%)$$

Z: 電動機定格インピーダンス

$$x_1+x_2 : \sigma X_a \div \sigma X_u$$

I_L: 電動機定格電流

受電回路短絡電流と同様、短絡発生後1/2サイクル時の値を求めれば、式(19)は

$$i_{ms} = \sqrt{2} I_L \cdot m \cdot \left\{ \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) - \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right\} \dots\dots\dots(20)$$

$$m = \frac{100}{(x_1+x_2)\%} \varepsilon^{-\frac{k}{\sigma}t(\%)} : \text{電動機コントリビューション係数}$$

すなわち代表的電動機につき“m”を求めておけば、式(20)より各種電動機のコントリビューションは求まることになる。

ただし投入位相θは式(20)が最大となる条件0°と考える。

なお外部インピーダンスを考慮する場合は、IV.2.項に示す“ケーブルによる短絡電流の減少”の理論がそのまま成立する。

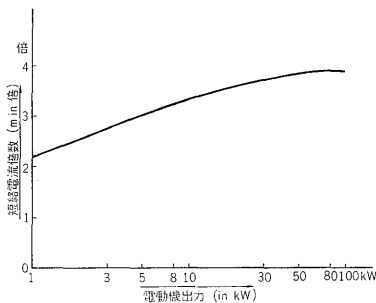
式(17)と式(20)による計算結果を第2表に示す。

この結果からわかるように、低出力の電動機(内部抵抗がリアクタンスに比して大きい場合)では、式(18)を求め

第2表 電動機コントリビューション計算結果理論式と近似式

Table 2. Motor contribution computed by theoretical equation and approximate equation

電動機出力 (kW)	理論式と近似式の区別	1/2サイクル瞬時値 (A)			1/2サイクル実効値 (A)	
		I _{ac}	I _{dc}	合成	I _{ac} /√2	合成
0.75	理論式	10.5	2.1	12.6	7.5	7.8
	近似式	3.1	3.1	6.2	2.2	3.8
3.7	理論式	21.3	37.3	58.6	15.0	40.4
	近似式	20.4	20.4	40.8	14.5	25.0
11	理論式	102.7	101.5	204.2	72.6	124.2
	近似式	93.4	93.4	186.8	66.0	117.0
30	理論式	285.0	310.0	595.0	201.5	370.0
	近似式	280.0	280.0	560.0	198.0	343.0
100	理論式	905.0	976.0	1,881.0	680.0	1,170.0
	近似式	949.0	949.0	1,898.0	671.0	1,160.0



第1図 電動機コントリビューション係数 m

Fig. 1. Motor contribution factor “m”

第3表 電動機定数
開放かご形、三相誘導電動機 400V, 4P, 50%, A種
(オーム値は人結線一相当たり)

Table 3. Motor constant

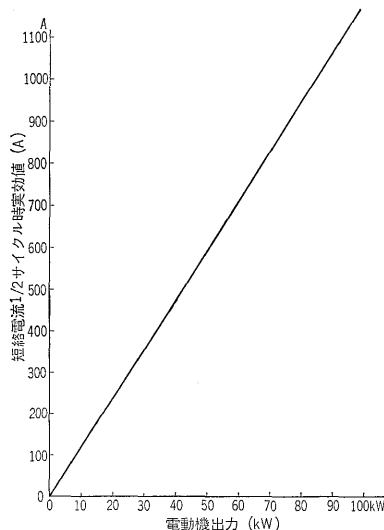
電動機出力 (kW)	全負荷回転速度 (Pu)	抵抗, リアクタンス (Ω)						
		R _a	R _u	x _a	x _u	x _m	x ₁	x ₂
0.75	0.950	11.5	8.90	239.7	240.4	230.9	8.82	9.46
3.7	0.944	1.56	2.13	66.70	66.6	64.10	2.51	2.46
11	0.9700	0.378	0.361	25.00	25.31	24.20	0.769	1.105
30	0.9740	0.0911	0.121	13.18	13.25	12.84	0.34	0.41
100	0.9870	0.02130	0.0187	4.249	4.285	4.130	0.119	0.155

る条件が成立しなくなり式(19)に示す近似式のように交流分と直流分に明確に分離できなく、短絡電流が小さく求まる。そこで、理論式(17)にて補正した電動機コントリビューション係数“m”を第1図に示す。

なお第2表および第1図を求めるに使用した電動機定数を第3表に示す。

3. 電動機群の取り扱い方

理論式(17)にて求めた1/2サイクル時での電動機コントリビューション合成実効値(第2表に結果を示す)を、電動機出力に対しプロットすると、第2図のように直線となる。ゆえにコントリビューションと出力の関係は、



第2図 電動機出力とコントリビューションの関係

Fig. 2. Relation between motor output and contribution

$$I_{(A)} = kP(\text{kW}) \quad k = \text{const} \dots \dots \dots (21)$$

ゆえに電動機群を取り扱うには、電動機群の相加平均容量を求め、この電動機につきコントリビューションを求め、これを電動機台数倍すればよい。

今系統内の電動機構成が P_i (kW), N_i (台) よりなるとすれば、全合成コントリビューションは、

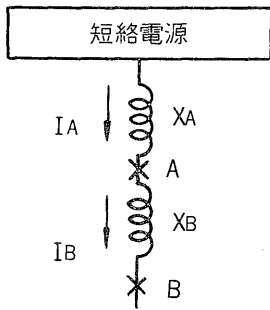
$$I_T = (\sum N_i) \times I_{\text{mean}} \dots \dots \dots (22)$$

ただし I_{mean} は、

$$P_{\text{mean}} = \frac{\sum N_i P_i}{\sum N_i} \text{ (kW) の電動機に対するコントリビューション。}$$

IV. インピーダンスによる短絡電流の減少

1) リアクタンスによる短絡電流の減少



左図のごとき系統において、A点における故障電流 I_A 、線間電圧 E_{volt} および A-B 間のリアクタンスがわかっているとき B 点での故障に対する電流 I_B は、次のように求められる。

$$I_A = \frac{E}{\sqrt{3} X_A} \dots \dots \dots (23)$$

$$I_B = \frac{E}{\sqrt{3} (X_A + X_B)} \dots \dots \dots (24)$$

ゆえに

$$\frac{I_B}{I_A} = \frac{X_A}{X_A + X_B} = \frac{1}{1 + \frac{X_B}{X_A}}$$

$$\therefore I_B = \frac{1}{1 + \frac{X_B}{X_A}} \cdot I_A \dots \dots \dots (25)$$

リアクタンスによる減少係数を a とすれば、

$$I_{B(\text{rms})\text{sy}} = a I_{A(\text{rms})\text{sy}} \dots \dots \dots (26)$$

ここで

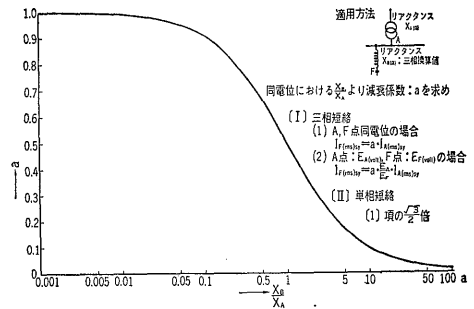
X_A : 短絡電源側リアクタンス

X_B : バスダクト、変圧器などのリアクタンス (A-B 間にあるリアクタンス要素)

a : リアクタンスによる減少係数

$$\frac{1}{1 + \frac{X_B}{X_A}} \dots \dots \dots \text{第 3 図に示す。}$$

- (注) (1) 変圧器が接続され、線間電圧 $E_{A\text{volt}}$ が $E_{B\text{volt}}$ になる場合には、 X_A, X_B を同電位に対する値とし、第 3 図に X_B/X_A をとり、 a を求める。
 (2) 単相変圧器が三相回路に接続される場合は、等価的に三相変圧器が接続されたとして、三相



第 3 図 リアクタンスによる減少係数 a

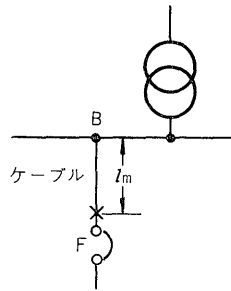
Fig. 3. Damping coefficient of reactance "a"

短絡電流を求め、最終的に $\sqrt{3}/2$ 倍すればよい。

等価的三相変圧器とした場合、単相変圧器のリアクタンスを $X_{(1\phi)}$ とすれば、

$$X_{B(3\phi)} = \frac{1}{2} X_{(1\phi)} \dots \dots \dots (27)$$

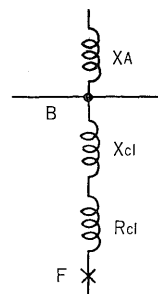
2) ケーブルによる短絡電流の減少



F 点でのしゃ断器選定に当たり、B 点からケーブル長 l_m を経た点における短絡電流が、B 点故障での短絡電流とどのような関係にあるかを示す。

このような回路は、ロードセンタからコントロールセンタにいたる回路に多くみられ、コントロールセンタのしゃ断器選定において計算されねばならない。

一般に、B 点より電源側は、リアクタンス要素と考えてよいから、上図をインピーダンス線図に表示すれば次のようになる。



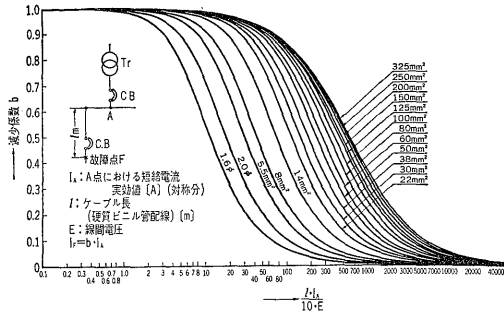
ここにおいて、B 点短絡の場合の故障電流 $I_{B(A)}$ 、線間電圧 E_{volt} 、B 点より電源側のリアクタンス $X_{B(A)}$ 、またケーブル単位長さ当たりの抵抗 $R_{C(A)}$ 、リアクタンス $X_{C(A)}$ 、ケーブル長 l_m 、F 点での短絡電流 I_F とする。

$$I_B = \frac{E}{\sqrt{3} X_B} \dots \dots \dots (28)$$

$$I_F = \frac{E}{\sqrt{3} \sqrt{(lR_C)^2 + (lX_C + X_B)^2}} \dots \dots \dots (29)$$

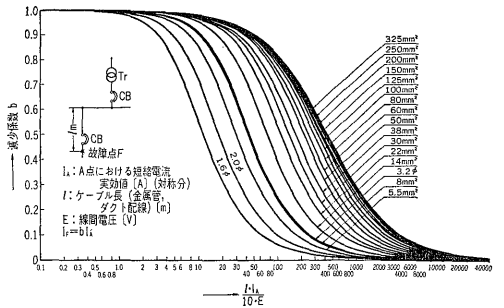
ここで、B 点から F 点までのケーブルによる減少係数を b とすれば

$$b = \frac{I_F}{I_B} = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\sqrt{3} X_C \left(\frac{lI_B}{E} \right) + (\sqrt{3} Z_C)^2 \left(\frac{lI_B}{E} \right)^2}} \dots \dots \dots (30)$$



第4図 ケーブルによる減少係数 b (鋼製の管またはダクトに収めた絶縁電線またはケーブル)

Fig. 4. Damping coefficient of cable " b " (in magnetic duct)



第5図 ケーブルによる減少係数 b (鋼製の管またはダクトに収めないケーブル・ビニル管配線)

Fig. 5. Damping coefficient of cable " b " (in nonmagnetic duct)

第4表 ケーブルのインピーダンス
Table 4. Cable impedance

電線の太さ	電線1本の長さ10m 当たりのリアクタンス (Ω)			電線1本の長さ10m 当たりの抵抗 (Ω)
	鋼製の管またはダクトに収めた絶縁電線またはケーブル	鋼製の管またはダクトに収めないケーブルビニル管配線	屋内のがいし引配線	
1.6mm				0.089
2				0.056
3.2	0.0020	0.0012	0.0031	0.022
5.5mm ²				0.033
8				0.023
14				0.013
22				0.0082
30	0.0015	0.0010	0.0026	0.0062
38				0.0048
50				0.0037
60				0.0030
80				0.0023
100				0.0018
125	0.0013	0.0009	0.0022	0.0014
150				0.0012
200				0.0009
250				0.0007
325				0.0005

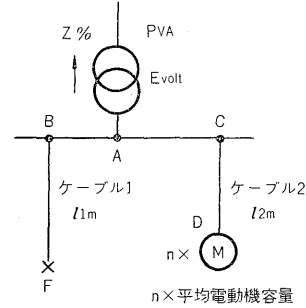
備考 (1) 60%ではリアクタンスが1.2倍となるので電源側リアクタンスに2割分のリアクタンスを加えて I_B を求めること。
(2) 電線を2本または3本並列に使うときのリアクタンスや抵抗は、電線の長さを、実際の長さの1/2または1/3になったとして計算すること。

$b = I_B/E$ につき、ケーブル・サイズをパラメータにグラフを描いておけば、 F 点故障における短絡電流は、 B 点での短絡電流 I_B 、線間電圧 E 、使用ケーブルおよびケーブルサイズを知ることにより求められる。

ケーブルによる減少係数 b をグラフに示せば第4図、第5図のようになる。これは第4表に示したケーブルインピーダンスの内、「鋼製の管またはダクトに収めた絶縁電線またはケーブル」および「鋼製の管またはダクトに収めないケーブル・ビニル管配線」につき示した。なおこの数値は日本電設工業会発行「400V 配線に関する基準についての研究」による。

V. 合成短絡電流

短絡電流源として、受電変圧器と誘導電動機群とを考えた下図のような系統につき、 F 点における短絡電流は次の手順にて計算される。



[手順1] 受電電源からの A 点に対する短絡電流の算出

$$i_R = \sqrt{2} \cdot \frac{P}{\sqrt{3} E} \cdot \frac{100}{Z\%} \left\{ \sin(\omega t + \theta - \varphi) - \varepsilon^{-\frac{R}{L}t} \sin(\theta - \varphi) \right\} \dots (2)$$

ゆえに、短絡発生後 $1/2$ サイクル時における交流分、直流分は、 $1/2$ サイクルでの最大条件(5)より、

交流分

$$\text{瞬時値} : \frac{\sqrt{2}P}{\sqrt{3} E} \times \frac{100}{Z\%}$$

$$\text{実効値} : \frac{P}{\sqrt{3} E} \times \frac{100}{Z\%}$$

直流分

$$\text{瞬時値} : \frac{\sqrt{2}P}{\sqrt{3} E} \times \frac{100}{Z\%} \times \varepsilon^{-\frac{R}{L}t(1/2)}$$

実効値：瞬時値に同じ

[手順2] 電動機群からの A 点に対する短絡電流の算出

電動機端子短絡の場合、1台の電動機によるコントリビューションは、

$$i_{ms} = \sqrt{2} I_L m \{1+1\} \dots (20)$$

ゆえに、平均電動機に対する定格電流 I_L および電動機短絡係数 m を求めておけば、電動機群からの短絡電流は次のように求まる。

交流分

$$\text{瞬時値: } \sqrt{2}nI_Lm = \frac{\sqrt{2}P}{\sqrt{3}E} \times \frac{M\%}{100} \times m$$

$$\text{実効値: } nI_Lm = \frac{P}{\sqrt{3}E} \times \frac{M\%}{100} \times m$$

直流分

$$\text{瞬時値: } \sqrt{2}nI_Lm = \frac{\sqrt{2}P}{\sqrt{3}E} \times \frac{M\%}{100} \times m$$

実効値: 瞬時値に等しい。

ただし

$\frac{M\%}{100}$: 変圧器容量に対する, 電動機合計容量。

電動機群の定格電流実効値は,

$$\frac{P}{\sqrt{3}E} \times \frac{M\%}{100} \text{ (A) となる。}$$

m : 電動機短絡係数, 第 1 図より求める。

(注) 電動機群からの短絡電流は, A-D 間で理論上減少する。しかし実系統において, C-D 間の減少は, 平均電動機 1 台分のコントリビューションに対するもので, コントリビューションが小さいことから無視してさしつかえない。また A-C 間は一様にインピーダンスも小さく減少しないと考える。

[手順 3] A 点での合成対称短絡電流実効値の算出

A 点に流入する短絡電流は, 受電電源よりの短絡電流と, 電動機群からのコントリビューションであるから, 合成対称短絡電流実効値

$$I_{A(rms)sy} = \frac{P}{\sqrt{3}E} \times \frac{100}{Z\%} + \frac{P}{\sqrt{3}E} \times \frac{M\%}{100} \times m$$

$$= \frac{P}{\sqrt{3}E} \left(\frac{100}{Z\%} + \frac{mM\%}{100} \right) \dots\dots\dots(31)$$

[手順 4] インピーダンスによる減少

F 点において短絡を生じた場合の短絡電流は, A 点での短絡電流と A-F 間のインピーダンスによる短絡電流の減少係数を知ることにより求まる。

(1) A-B 間にリアクタンスがあるとしたとき

a を求める: X_B/X_A を求め第 3 図より

$$\therefore I_{B(rms)sy} = aI_{A(rms)} \dots\dots\dots(32)$$

(2) B-F 間にケーブルがあるとした場合

b を求める: $lI_B/10E$ を求め第 4 図または第 5 図より

$$\therefore I_{F(rms)sy} = bI_{B(rms)sy} \dots\dots\dots(33)$$

[手順 5] F 点における各種短絡電流

F 点における対称短絡電流実効値 $I_{F(rms)sy}$ により, 第 5 表から短絡回路力率を求め, この力率から第 6 図各種短絡電流係数 α, β, γ を求めれば,

最大非対称短絡電流実効値: $I_{F(rms)asy} = \alpha I_{F(rms)sy}$

三相平均非対称短絡電流実効値: $I_{F(rms)av} = \beta I_{F(rms)sy}$

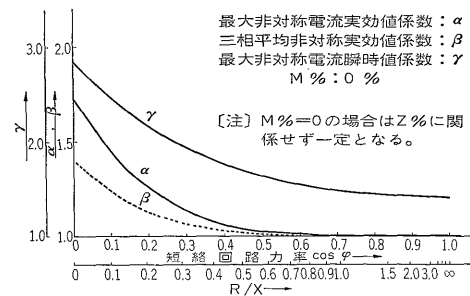
最大非対称短絡電流瞬時値: $I_{Fmax} = \gamma I_{F(rms)sy}$

なお第 4 表に短絡力率から求まる各係数 α, β, γ を参考のため記載する。

第 5 表 対称短絡電流実効値に対する短絡力率および各種短絡電流係数 α, β, γ

Table 5. Short-circuit power factor and short-circuit current multiplying factor at RMS symmetrical short-circuit current

対称短絡電流実効値	短絡回路力率 ($\cos \varphi$)	参 考		
		α	β	γ
10,000A 以下	0.3	1.13	1.07	1.94
10,000A 超過 20,000A 以下	0.2	1.25	1.13	2.15
20,000A 超過	0.15	1.33	1.17	2.29



第 6 図 短絡電流係数 α, β, γ

Fig. 6. Multiplying factor for calculation of each short-circuit current α, β, γ

VI. 本方式とインピーダンス法による計算および実測値との比較

本計算法が, 従来短絡電流計算法として一般に採用されてきているインピーダンス法とどの程度の差違があるか, および実存するあるビルの各所について短絡電流の実測をしたので比較する。

回路としては第 7 図単線接続図に示すとおりであり, 仮想故障点としては 12 個所を選定した。

ただし, 故障点 11 の電源側変圧器インピーダンスは仮定値である。

(1) 本計算法算出条件

本系統は電力会社から責任分界点までのリアクタンスが大きいのでこれを考慮した。その他のインピーダンスは低圧側のみを考え次のとおり。

(a) 変圧器のリアクタンス, バスダクトリアクタンス, ケーブルインピーダンス。

(b) 短絡時電動機からのコントリビューションは, 系統上電動機が不明のため無視した。わかっている系統では考えるべきである。

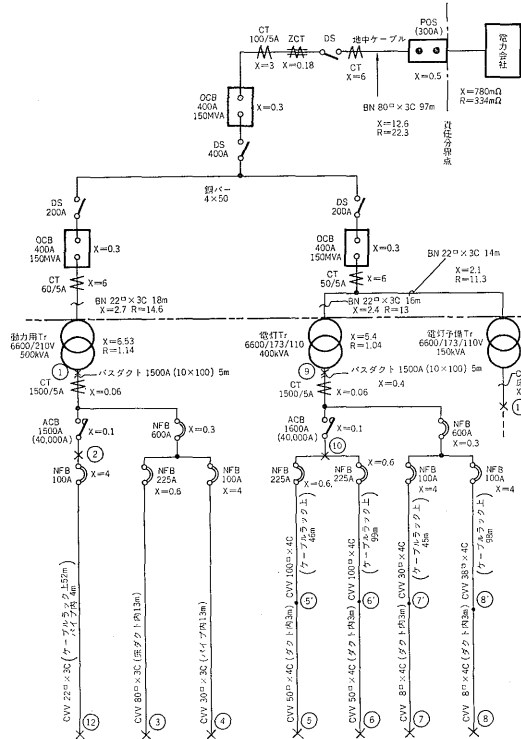
(2) インピーダンス法による計算の条件

詳しく計算することを目的とし, 第 7 図中でインピーダンス値のわかっているもの (ACB, NFB, CT, ZCT など) はすべて含めた。

(3) 各種方式による短絡電流の比較

第 6 表, 第 7 表に示す。

(4) シャ断器の選定



第7図 系統単線接続図

Fig. 7. System skeleton diagram

第6表 対称短絡電流実効値

Table 6. RMS symmetrical short-circuit current

故障点	実測値		インピーダンス法計算値		簡易計算値	
	(A)	(%)	(A)	(A)	(A)	(%)
1	15,200	93.1	16,316	16,700	102.4	
2	13,700	84.6	16,192	15,870	98.0	
3	10,000	82.3	12,151	13,000	107.0	
4	8,300	89.2	9,302	9,690	104.2	
5	6,260	96.1	6,522	6,650	102.0	
6	3,350	86.0	3,903	4,230	108.2	
7	2,420	94.2	2,669	3,210	120.0	
8	1,570	90.6	1,734	2,000	115.2	
9	14,900	90.2	16,516	17,350	105.0	
10	13,500	89.1	15,144	16,300	107.7	
11	13,000	69.1	18,800	21,400	113.7	
12	2,250	90.5	2,486	2,460	99.0	

上表中%値は、インピーダンス法計算値に対する値である。

第6表、第7表に示す短絡電流を基に、当社ACB、NFBのフレーム値を選定すると、第8表のようになる。ただしACBの選定は第6表、NFBの選定は第7表の短絡電流による。

実際に使用するしゃ断器を選定するには、第8表のフレーム値および適用する回路の負荷電流から求めるフレーム値のどちらか大きい方をとることになる。

VII. む す び

実際にしゃ断器を選定する場合、実測値による訳にはいかず、従来はインピーダンス法によっていた。そこで

第7表 三相平均非対称電流実効値

Table 7. Mean value of short-circuit current in three phase circuit at 1/2 cycle after a short-circuit breaks out

故障点	実測値		インピーダンス法計算値		簡易計算法	
	(A)	(%)	(A)	(A)	(A)	(%)
1	16,400	89.1	18,400	18,900	102.5	
2	14,800	80.2	18,450	17,900	97.0	
3	10,100	81.0	12,460	14,700	118.0	
4	8,360	90.0	9,302	10,400	111.8	
5	6,260	96.2	6,522	7,100	109.0	
6	3,350	85.9	3,903	4,530	116.0	
7	2,420	94.2	2,669	3,440	129.0	
8	1,570	90.5	1,734	2,140	123.4	
9	15,700	84.9	18,500	19,600	106.0	
10	15,000	86.8	17,300	18,400	106.1	
11	13,500	70.4	19,200	25,000	130.0	
12	2,250	90.5	2,486	2,640	106.0	

第8表 各故障点に使用するしゃ断器のフレーム値

Table 8. Selected frame size of circuit breaker at each fault point

故障点	気中しゃ断器フレーム値			配線用しゃ断器フレーム値		
	実測値	インピーダンス法	本方式	実測値	インピーダンス法	本方式
	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)
1	400	400	400	100	100	100
2	400	400	400	100	100	100
3	200	400	400	100	100	100
4	200	200	200	100	100	100
5	200	200	200	100	100	100
6	200	200	200	50	50	50
7	200	200	200	30	50	50
8	200	200	200	30	30	30
9	400	400	400	100	100	100
10	400	400	400	100	100	100
11	400	400	1,000	100	100	225
12	200	200	200	30	30	30

(注) ヒューズの場合はすべて同じものよい。

選定されたフレーム値を、インピーダンス法と本方式につき比較してみると、故障点11のみが違ってくるだけである。ゆえに本計算法によりしゃ断器を選定しても問題はない。

なお第6表対称短絡電流を比較すると、従来のインピーダンス法に対し実測値は故障点11を除き、82.3%以上、また本計算値は、115%以下である。一般に本方式の方が幾分大きめに定めているが、計算の簡易化を考える以上安全側な数値となるのはやむを得ないと考える。

ここに示した実測値に、電動機のコントリビューションが入っていないのは残念である。今後は、このコントリビューションも含んだ実測値と比較してみたいと考えている。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。