内部水冷 CV ケーブルの許容電流の計算

正員 倉田 守 (東京電力)
 正員 川崎 勝利 (三菱電線)
 正員 中村 重人 (三菱電線)

1. ま え が き

過密都市供給用大容量地中線として、目標送電容量 1,500 MVA/cct の 275 kV 内部冷却ケーブルが検討されている^{(1)~(3)}。内部冷却ケーブルは導体内部に冷却管を設け、これに純水、油、フロンなどの冷媒を流してケーブル発生熱を直接冷却するので、冷却効果が従来技術のトラフ内間接冷却や洞道冷却に比較して 1.5~2.2 倍大きい。著者らは、これまで東京電力と共同して 275 kV 内部水冷 CV ケーブル (以下、内冷 CV ケーブルと略記) の開発を進めている。内冷 CV ケーブルの洞道布設時の許容電流計算法は、既に確立されているが^{(4)~(7)}、土壤熱容量の考え方^{(8)~(10)}が明確でなく、特に内部冷却ケーブルについて記述されたものはない。更に内冷ケーブルの管路布設時の許容電流計算法については検討されたものはあるが⁽⁴⁾、土壤の相互熱抵抗の影響を考慮したものや、過渡現象について検討されたものはなく、著者らはそれらをすべて考慮した計算法の開発を進めている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。また内冷ケーブルが他の従来技術の強制冷却方式と総合比較し、その適用性ならびに運用について議論されたものはない。そこで、本論文で洞道布設および管路布設における内冷ケーブルの定常時ならびに過渡時の許容電流計算法を示し、その妥当性を検証すると同時に他の強制冷却方式との比較検討を行い、更にその運用についての一検討を行った。

2. 許容電流計算法

〈2・1〉 洞道布設 内冷 CV ケーブルとその送水

Calculation Method of Allowable Current Capacity in Internally Water Cooled XLPE Cables. By Mamoru Kurata, Member (Tokyo Electric Power Co., Inc.), Katsutoshi Kawasaki, Member & Shigehito Nakamura, Member (Mitsubishi Cable Industries, Ltd.).

倉田 守: 正員, 東京電力 (株)

川崎勝利: 正員, 三菱電線工業 (株)

中村重人: 正員, 三菱電線工業 (株)

管が図 1 に示す洞道へ布設された場合の熱回路は図 2 で示される。同図で $T_1, T_2, T_5, T_7, T_8, T_B$ はそれぞれ冷媒管内冷却水、導体、トラフ内空気、洞道内空気、送水管内冷却水および土壤基底温度、 W_c, W_d, W_s, W_i, W_p はそれぞれ導体、誘電体、シース、二次系および洞道軀体の発生ロス、 $R_c, R_w, R_1, R_2, R_3, R_{TR}, R_{GP}, R_p$ はそれぞれ導体、冷媒管内境膜、絶縁体、防食層、ケーブル表面放散、トラフ、送水管および土

*1 内冷ケーブルの冷媒供給管、*2 洞道冷却時は洞道冷却管

図 1 洞道布設 (内冷ケーブルのトラフ内間接冷却併用 3 回線)

Fig. 1. Tunnel installation (3 cct).

図 2 内冷ケーブルの熱回路 (洞道布設 3 回線)

Fig. 2. Thermal circuit of internally cooled cables in tunnel.

熱抵抗, $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$ はそれぞれ冷媒管内冷却水, 導体, 絶縁体, シース, 防食層, トラフ, 洞道内空気と土壌および送水管熱容量, C, C_a は水および空気の比熱, ρ, ρ_a は水および空気の密度, Q_1, Q_2 は冷媒管および送水管内流量, Q_a は換気風量である。図2で各部熱容量を考慮しない定常時の熱方程式は次式で表される。

$$[L]d\{T\}/dx + [R]\{T\} = [E] \dots\dots\dots (1)$$

ここで, T_i は各部冷却水温度で $T_1=T_1, T_2=T_7, T_3=T_8, L_{ij}$ は $L_{11}=C\rho Q_1(RC+R_W+R_1+R_2+R_3+3R_{TR}), L_{21}=9C\rho Q_1, L_{22}=C_a\rho_a Q_a, L_{33}=C\rho Q_2 R_{GP}$, その他の L_{ij} は 0, R_{ij} は $R_{11}=1, R_{12}=-1, R_{22}=3/R_{GP}+1/R_a, R_{23}=-3/R_{GP}, R_{32}=-1, R_{33}=1$, その他の R_{ij} は 0, $E_1=(R_1+R_2+R_3+3R_{TR})W_C+(0.5R_1+R_2+R_3+3R_{TR})W_d+(R_2+R_3+3R_{TR})W_s, E_2=W_p+W_i+9(W_c+W_d+W_s)+T_B/R_g, E_3=0$ である。(1)式は常微分連立方程式であり, その一般解は Silvester 展開定理を適用することで解析的に次式のように求められる。

$$\{T\} = [R]^{-1}[E] + [K(x)][C] \dots\dots\dots (2)$$

ここで,

$$K(x) = \sum_{r=1}^m e^{-\lambda_r x} \prod_{\substack{s=1, m \\ s \neq r}} (\lambda_s [u]) + [L]^{-1}[R] / (\lambda_s - \lambda_r)$$

ただし, $[u]$ は単位行列, λ は $\lambda(u) + [L]^{-1}[R] = 0$ の固有値, C は積分定数で境界条件より求める。

次に図2の熱回路で各部熱抵抗, 熱容量のすべてを考慮した場合の熱方程式は次のように表される。

$$-C_1 \partial T_1 / \partial t - C\rho Q_1 \partial T_1 / \partial x + (T_2 - T_1) / (R_C + R_W) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$-C_2 \partial T_2 / \partial t + W_c - (T_2 - T_1) / (R_C + R_W) - (T_2 - T_3) / (0.5 R_1) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$-C_3 \partial T_3 / \partial t + W_d + (T_2 - T_3) / (0.5 R_1) - (T_3 - T_4) / (0.5 R_1) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$-C_4 \partial T_4 / \partial t + W_s + (T_3 - T_4) / (0.5 R_1) - (T_4 - T_5) / (0.5 R_2) = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$-C_5 \partial T_5 / \partial t + (T_4 - T_5) / (0.5 R_2) - (T_5 - T_6) / (0.5 R_2 + R_3) = 0 \dots\dots\dots (7)$$

$$-C_6 \partial T_6 / \partial t + 3(T_5 - T_6) / (0.5 R_2 + R_3) - (T_6 - T_7) / R_{TR} = 0 \dots\dots\dots (8)$$

$$-C_7 \partial T_7 / \partial t - C_a \rho_a Q_a \partial T_7 / \partial x + W_p + W_i + 3(T_6 - T_7) / R_{TR} - (T_7 - T_8) / R_g - 3(T_7 - T_8) / R_{GP} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

$$-C_8 \partial T_8 / \partial t - C\rho Q_2 \partial T_8 / \partial x + (T_7 - T_8) / R_{GP} = 0 \dots\dots\dots (10)$$

(3)~(10)式は偏微分連立方程式であり, 解析的手法で求めることは困難である。従って, 差分近似を行って連立方程式の形で表し, 与えられた初期条件および境界条件の下で数値解法によって求める。

(2.2) 管路布設 図3に示す3段4列の管路へ, 内冷または従来 CV ケーブル3回線と送水管3本をそれぞれ管路1孔1条ずつ布設する場合を考える。管路布設の場合, 各ケーブル管路および送水管管路の土壌熱抵抗や熱容量がそれぞれ異なるため, ケーブルおよび送水管が収納されるすべての管路について熱回路を考慮する必要がある。図3の1回線ケーブル (No. 1~3) とその送水管 (No. 4) についての代表的熱回路を図4に示す。同図で $R_4, R_6, R_7, R_8, R_9, R_5$ はケーブル管路, 送水管境膜, 送水管, 送水管表面放散, 送水管管路および土壌熱抵抗, $C_6, C_8, C_9, C_{10}, C_7$ はケーブル管路, 送水管内冷却水, 送水管, 送水管管路および土壌熱容量である。図4で各部熱容量を考慮しない場合の定常時の熱方程式は, 洞道布設時と同様に

図3 管路布設 (内冷ケーブル1孔1条布設3回線)

Fig. 3. Duct installation (3 cct).

図4 内冷ケーブルの熱回路 (図3の管路布設の①~④について)

Fig. 4. Thermal circuit of internally cooled cables into ducts.

(1)式の形で表される。

ここで、 T_i は各部冷却水温度、 L_{ij} はケーブル管路 ($i=1\sim 3, 5\sim 7, 9\sim 11$) について

$$\begin{aligned} L_{ij} &= C\rho Q_1(R_c + R_w + R_1 + R_2 + R_3 \\ &\quad + R_4 + R_{5i}) \quad (i=j) \\ &= C\rho Q_1 M_{ij} (i \neq j, j=1\sim 3, 5\sim 7, 9\sim 11) \\ &= C\rho Q_2 M_{ij} \quad (j=4, 8, 12) \end{aligned}$$

送水管管路 ($i=4, 8, 12$) について

$$\begin{aligned} L_{ij} &= C\rho Q_2(R_6 + R_7 + R_8 + R_9 + R_{5i}) \quad (i=j) \\ &= C\rho Q_2 M_{ij} (i \neq j, j=1\sim 3, 5\sim 7, 9\sim 11) \\ &= C\rho Q_1 M_{ij} \quad (j=4, 8, 12) \end{aligned}$$

ただし、 M_{ij} は管路 ij 間の土壌相互熱抵抗、 $[R] = [u]$ 、また E_i はケーブル管路 ($i=1\sim 3, 5\sim 7, 9\sim 11$) について

$$\begin{aligned} E_i &= T_B + (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_{5i})W_{ci} \\ &\quad + (0.5R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_{5i})W_d \\ &\quad + (R_2 + R_3 + R_4 + R_{5i})W_{si} \\ &\quad + \sum_{\substack{j=1, 4n+m \\ j \neq i}} M_{ij}(W_{cj} + W_d + W_{sj}) \\ &\quad (n=0\sim 2, m=1\sim 3) \end{aligned}$$

送水管管路 ($i=4, 8, 12$) について

$$\begin{aligned} E_i &= T_B + \sum_{j=1}^{4n+m} M_{ij}(W_{cj} + W_d + W_{sj}) \\ &\quad (n=0\sim 2, m=1\sim 3) \end{aligned}$$

次に図4の熱回路で各部熱抵抗、熱容量のすべてを考慮した熱方程式は次のように表される。

ケーブル管路部 ($j=0\sim 2, k=0\sim 2$) について

$$-C_1 \partial T_{L+1} / \partial t - C\rho Q_1 \partial T_{L+1} / \partial x + (T_{L+2} - T_{L+1}) / (R_c + R_w) = 0 \dots (11)$$

$$\begin{aligned} -C_2 \partial T_{L+2} / \partial t - (T_{L+2} - T_{L+1}) / (R_c + R_w) \\ - (T_{L+2} - T_{L+3}) / (0.5R_1) + W_{c, N+1} = 0 \end{aligned} \dots (12)$$

$$\begin{aligned} -C_3 \partial T_{L+3} / \partial t + (T_{L+2} - T_{L+3}) / (0.5R_1) \\ - (T_{L+3} - T_{L+4}) / (0.5R_1) + W_d = 0 \end{aligned} \dots (13)$$

$$\begin{aligned} -C_4 \partial T_{L+4} / \partial t + (T_{L+3} - T_{L+4}) / (0.5R_1) \\ - (T_{L+4} - T_{L+5}) / (0.5R_2) + W_{s, N+1} = 0 \end{aligned} \dots (14)$$

$$\begin{aligned} -C_5 \partial T_{L+5} / \partial t + (T_{L+4} - T_{L+5}) / (0.5R_2) \\ - (T_{L+5} - T_{L+6}) / (0.5R_2 + R_3) = 0 \end{aligned} \dots (15)$$

$$\begin{aligned} -C_6 \partial T_{L+6} / \partial t + (T_{L+5} - T_{L+6}) / (0.5R_2 + R_3) \\ - (T_{L+6} - T_{L+7}) / R_4 = 0 \dots (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -C_{7, N+1} \partial T_{L+7} / \partial t + (T_{L+6} - T_{L+7}) / R_4 \\ - (T_{L+7} - T_{L+8}) / (R_{5, N+1}) = 0 \dots (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{L+8} &= \sum_{n=0}^2 \left\{ \sum_{m=0}^2 M_{N+1, 4n+m+1} (T_{29n+8m+7} \right. \\ &\quad \left. - T_{29n+8m+8}) / (R_{5, 4n+m+1}) + M_{N+1, 4n+4} \right. \\ &\quad \left. \times (T_{29n+28} - T_{29n+29}) / (R_{5, 4n+4}) \right\} + T_B \end{aligned} \dots (18)$$

送水管管路部 ($j=0\sim 2$) について

$$\begin{aligned} -C_8 \partial T_{29j+25} / \partial t - C\rho Q_2 \partial T_{29j+25} / \partial x \\ - (T_{29j+25} - T_{29j+26}) / (R_6 + 0.5R_7) = 0 \end{aligned} \dots (19)$$

$$\begin{aligned} -C_9 \partial T_{29j+26} / \partial t + (T_{29j+25} - T_{29j+26}) / (R_6 \\ + 0.5R_7) - (T_{29j+26} - T_{29j+27}) / (0.5R_7 \\ + R_8) = 0 \dots (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -C_{10} \partial T_{29j+27} / \partial t + (T_{29j+26} - T_{29j+27}) \\ / (0.5R_7 + R_8) - (T_{29j+27} - T_{29j+28}) / R_9 \\ = 0 \dots (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -C_{7, 4j+4} \partial T_{29j+28} / \partial t + (T_{29j+27} - T_{29j+28}) \\ / R_9 - (T_{29j+28} - T_{29j+29}) / (R_{5, 4j+4}) = 0 \end{aligned} \dots (22)$$

$$\begin{aligned} T_{29j+29} &= \sum_{n=0}^2 \left\{ \sum_{\substack{m=0, 2 \\ j \neq n}} M_{4j+4, 4n+4m+1} (T_{29n+8m+7} \right. \\ &\quad \left. - T_{29n+8m+8}) / (R_{5, 4n+m+1}) \right. \\ &\quad \left. + M_{4j+4, 4n+4} (T_{29n+28} - T_{29n+29}) \right. \\ &\quad \left. / (R_{5, 4n+4}) \right\} + T_B \dots (23) \end{aligned}$$

(11)～(18)式で $L=29j+8k$, $N=4j+k$, また(18)式第1項で $N+1 \neq 4n+m+1$, (23)式第2項で $4j+4 \neq 4n+4$ である。(11)～(23)式は偏微分連立方程式であり、解析的に求めることは困難であり、洞道布設の場合と同様に前述の数値解法で求める。数値解法は、定常時および過渡時の冷却計算はもちろん可能であるが、各部熱定数の非線形まで容易に考慮することができる。

3. 計算式の妥当性の検証

〈3.1〉 洞道布設 電力中央研究所横須賀研究所にて東京電力と共同研究を行った約230mの内冷CVケーブル線路で得られた冷却効果試験の概要を以下に示す⁽¹³⁾。

(1) 検討条件 洞道は地下と地上洞道から形成され、その断面は2.2m×2.3m、地下洞道の土冠りは0.7～1.7mである。内部水冷CVケーブルは表1に示す簡易しゃ水層CVケーブル(以下、LLVと略記)とSUS被CVケーブル(以下、CSZVと略記)があり、前者(113m)は地上洞道へ、後者(117m)

表 1 ケーブル構造 (275 kV 1×2,000 mm²)

Table 1. Cable construction.

	非冷却 CV CAZV	内 冷 CV		
		Al シース CAZV	簡易遮水層 LLV	SUS シース CSZV
冷媒管内径	—	45.0	45.4	45.4
導体内径	—	48.2	48.6	48.6
導体外径	53.8	74.5	74.5	74.5
内半外径	57.8	78.5	78.5	78.5
絶縁体外径	111.8	126.5	126.5	126.5
外半外径	119.8	131.6	129.8	129.8
アルミ被平均内径	128.2	141.4	2.3φ×80本*	146.0**
アルミ被平均外径	134.4	148.0		147.6**
防食層内径	140.6	154.5	136.8	153.6
防食層外径	152.6	165.1	149.2	164.0

* ワイヤースールド, ** SUS 被, ワイヤースールドは LLV に同じ

図 5 過渡温度応答の実測値と計算値の比較

Fig. 5. Comparison between measured and calculated transient temperature.

は地下洞道内へ縦スネーク布設されている。洞道内には内部水冷 CV ケーブルのほか、内部油冷 OF ケーブルもある。

(2) 検討結果 一例として、流量のステップ変化に対する過渡温度応答の実測値と計算値の比較を図 5 に示す。また、洞道内長手方向のケーブルの温度分布についても実測値と計算値が良く合致することを確認している。後述するように、内部冷却ケーブルの場合、ケーブル発熱の土壤に及ぼす影響は極めて小さいこと、また地上洞道が存在することなどの理由で、ここでは計算値は洞道内気温をベースにとって考えた。

〈3・2〉 管路布設 管路布設については、実測値がないため定常時（連続負荷時）の解析解法と数値解法による計算値の比較検討を行った。その結果を表 2 に示す⁽¹¹⁾。

表 2 で厳密解とは〈2・2〉節で述べたすべての管路を考慮した手法であり、近似解とはケーブルおよび送水管各 1 本をそれぞれ図 3 の管路⑥、⑧などで代表させ

表 2 内冷 CV ケーブル管路布設時の各部温度と冷却容量の比較 (送水管配置: 表 3 のケース 3)

Table 2. Comparison of calculated temperature and cooling capacities of internally water cooled cables into ducts.

(cct)		U		V		W		T _a	冷却容量 (USRT)
		T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂		
厳密解	数値解	1	50.9	53.5	56.8	59.8	54.0	56.8	13.5
	解析解	2	53.8	56.7	61.9	65.3	54.5	57.5	13.8
		3	56.3	59.2	61.3	64.6	60.8	64.0	14.6
		1	51.0	53.6	56.8	59.9	54.0	56.9	13.5
		2	53.9	56.7	62.0	65.3	54.7	57.6	13.8
		3	56.4	59.3	61.4	64.7	60.9	64.1	14.6
近似解	数値解	—	—	66.4	70.0	—	—	15.6	1254.4 (1249.7)
	解析解	—	—	66.5	70.1	—	—	15.7	1256.7

電流: 3,200 A 入口水温: 10°C 冷却水流量: 2.07 l/s

(): 電流が 2,000 A から 3,200 A ヘステップ変化した 200 h 後の値

T₁: 冷媒管内水温 T₂: 導体温度 T_a: 送水管内水温

表 3 内冷ケーブル管路布設の送水管配置の効果

Table 3. Cooling effect of coolant sending pipes into ducts.

ケース	cct	導体温度 (°C)			冷却容量 (USRT)	送水管配置
		U	V	W		
1	1	64.9	62.8	61.6	1270.7	U1 V1 W1 ●
	2	66.5	93.7	62.8		U2 V2 W2 ●
	3	65.4	83.2	62.1		U3 V3 W3 ●
2	1	47.7	54.8	49.5	885.3	U1 V1 W1 U3
	2	49.8	61.1	54.5		U2 V2 W2 V3
	3	50.5	55.5	50.1		U1 V1 W1 U3
3	1	45.5	51.1	48.4	853.7	U1 V1 W1 U3
	2	48.3	56.2	49.1		U1 V1 W1 U3
	3	50.6	55.6	53.1		U1 V1 W1 U3
4	1	51.8	62.0	52.0	1075.2	U1 V1 W1 U3
	2	58.3	77.3	58.5		U1 V1 W1 U3
	3	59.8	76.4	60.0		U1 V1 W1 U3

● 送水管

たときの計算手法である。表 2 より、解析解は数値解と非常に良く一致しており、また電流を 2,000 A から 3,200 A にステップ変化させた 200 時間後の過渡時の数値解が、3,200 A の定常解と良く一致している。このことより、管路布設時の解析解法と数値解法の計算手法は妥当性があると言える。更に、近似解は厳密解に対してかなり安全側評価となり、厳密解を採用したほうが好ましいこともわかる。

管路布設の場合、送水管の配置によって冷却効果が変化することを検討した結果を表 3 に示す。これよりケース 3 の配置が最も冷却効果が大きく、以後管路

布設はこのケースで検討を進める。

土壌の等価熱回路は後述の表 5 のモデル A で近似している。

4. 各種冷却方式の比較

275 kV 1×2,000 mm² 内冷 CV ケーブルおよび同一サイズの従来ケーブル（非冷却 CV ケーブル）を洞道布設し、トラフ内間接冷却あるいは洞道冷却を行った場合、また従来ケーブルの管路間接冷却、内冷 CV ケーブルの管路布設を行った場合について、定常時および過渡時（日間負荷変動時）での許容電流の比較検討を行う。

（4・1）定常時（連続負荷時） 検討対象 A1 被 CV ケーブル（CAZV）の構造を表 1 に示す。洞道布設、管路布設いずれもケーブル 3 回線を考え、線路こう長は 2.5 km とした。各種冷却方式の冷却条件を表 4 に示す。洞道冷却では往路管 1 本に対し帰路管 1 本で一对とし、トラフ内間接冷却はトラフ内の往路管 2 本に対し帰路管 1 本とした。内冷 CV ケーブルは 1 回線に対して送水管 1 本とした。ケーブル配置は洞道布設は図 1、管路布設は図 3 とした。また土壌熱抵抗率は 80℃・cm/W、基底温度 17℃、二次系ロスおよび洞道躯体ロスは無視した。更に導体交流抵抗は温度補正を行った。

図 6 に内冷 CV ケーブルおよび従来 CV ケーブルの洞道冷却、トラフ内間接冷却および管路間接冷却時の冷却特性を示す。これより、洞道冷却では流量あるいは換気風速の増大と共に許容電流は飽和する傾向にある。この傾向は洞道冷却の冷却管対数の増加に対しても同様である。このことは従来ケーブルの各冷却方式について、ある一定電流以上の許容電流は導体温度で制限され、ケーブル外部の冷却設備を増強させても導体まで冷却効果が及ばないためである。従って、トラフ内間接冷却および洞道冷却方式で流量 5 l/s のような過冷却条件で換気を併用しても、許容電流はほとんど変化しない。また洞道冷却に比してトラフ内間

表 4 冷却条件

Table 4. Cooling conditions.

		洞道冷却	トラフ内間接冷却	管路間接冷却	内部水冷
冷却水入口温度	℃	10	10	10	10
最大流量	l/s	5	5	5	2.07
最大換気風速***	m/s	2	2	2	2
往路管(内径-外径)	mm	80-100	80-100	200-230	45*
帰路管(内径-外径)	mm	80-100	150-180	200-230	150-180**

*: 冷媒管内径 **: 送水管 ***: 換気入口温度は 32℃

図 6 各種冷却方式の冷却特性

Fig. 6. Calculated continuous current capacities for several cooling systems.

図 7 各種冷却方式の冷却区間長に対する連続許容電流

Fig. 7. Calculated continuous current capacities for cooling section length.

接冷却のほうが有利であることもわかる。管路間接冷却に関しても、ある一定電流以上で許容電流は導体温度で制限され、許容電流は低流量域から飽和の傾向となる。このように従来ケーブルの強制冷却技術では冷却設備を増強しても、必ずしも冷却効果が向上しないことがわかる。一方、内冷 CV ケーブルの冷却効果は非常に優れており、連続許容電流は従来技術の強制冷却に対して 1.5~2.2 倍である。また後述するように

許容電流が洞道内気温やシース温度で制限を受けるので、外部冷却方式の併用などにより、更に増容量が可能である。

図7に、導体サイズをパラメータとしたときの各種冷却方式の冷却区間長に対する連続許容電流を示す。これより許容電流のサイズ効果は、内冷 CV ケーブルと従来 CV ケーブルについては洞道温度やシース温度（管路布設時）で制限されるので小さく、従来 CV ケーブルのトラフ内間接冷却や管路間接冷却では導体温度で制限されるので大きい。また、許容電流の冷却区間長の影響は間接冷却の場合は小さく、内冷ケーブルの場合は大きいことがわかる。

〈4・2〉 過渡時（日間負荷変動時） 過渡時の許容電流を算出する場合、土壤部の熱回路の考え方が重要となる。従来の熱回路の考え方は図2および図4に示したように土壤熱容量 C 、と土壤熱抵抗 R の1段近似であり、 R は Kennelly の式を用いているため洞道あるいは管路温度は飽和時の値となっている。しかし、実際には C は非常に大きく、洞道あるいは管路温度が飽和するのに数十年を要すると考えられており⁽¹⁰⁾、また負荷として年間の最大負荷を用いているため過大評価を与え、冷却設備を過大設計させる結果となる。従って、実際の土壤熱抵抗の経時変化を考慮した土壤部の等価熱回路を考察しておく必要がある。

土壤部について分布定数回路として、その過渡解を積分指数関数で表す方法⁽⁸⁾⁽⁹⁾や熱伝導基本方程式から、ベッセル関数で表す方法があるが⁽¹⁰⁾、後者のほうが基本式から求められているので厳密である。この方法で図1および図3に示す洞道および管路について、一定負荷時の土壤熱抵抗の経時変化を求めると図8の

表 5 土壤等価熱回路

Table 5. Equivalent thermal circuit of soil.

モデル	熱回路	考 え 方
A	$C_g \text{ --- } R_g$	従来の CR 1 段回路近似であるが R_g は 30 年後の土壤熱抵抗、又熱時定数 $C_g R_g$ は $45h^{(6)}$ とした。
B	$R_g \text{ --- } C_x \text{ --- } R_x$	R_g はモデル A と同じ、 $C_x R_x$ は図 8 の 30 年以降を CR 1 段回路で近似。（本論文で提案）
C	$\begin{matrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ & & \\ C_1 & C_2 & C_3 \end{matrix}$	図 8 の厳密解に一致するように CR 3 段回路で近似。

実線のようにになる。しかし、ベッセル関数の厳密解を得るには電算機の所要 CPU 時間が極めて長くなり、過渡時の数値計算に対しては土壤を CR 回路で近似する方法が望まれ、表5に示す3種類のモデルで近似する。近似回路として T 形と I 形が考えられるが、 T 回路は負荷がステップ増加する場合に安全側評価となるが、 $t=0$ で土壤基底温度とならず、また負荷がステップ減少する場合は逆に危険側評価をするために I 回路のほうが合理的である⁽¹⁵⁾。図8にはこれらの CR 回路の近似解を併記してある。表5のモデルに従って各種冷却方式の許容電流を検討する。表5でモデル A は従来から用いられている CR 1 段回路、モデル B は本論文で提案した CR 1 段回路、モデル C は CR 3 段回路である。

洞道布設時では、内冷 CV ケーブルのみ、従来 CV ケーブルのトラフ内間接冷却（換気なし）および従来 CV ケーブルのみ（非冷却）の三つの方式について、表5の3種のモデル回路を用いて日間負荷変動時の許容電流検討例を図9に示す。これより従来の CR 1 段回路（表5のモデル A）は、本論文で提案した CR 1 段回路（表5のモデル B）に対して若干危険側評価となる。

また CR 3 段回路（表5のモデル C）は、数十年にわたる数値計算が不可能なため、ケーブル運用後数日後の日間負荷変動による温度分布を示しているが、日間の繰返し計算を数十年相当分行えばモデル B に収束することが予測される。図9の日間負荷変動時の許容電流は13時のピーク電流で定義する。

管路布設の場合も洞道布設と全く同様に、内冷 CV ケーブルのみ、従来 CV ケーブルの管路間接冷却および従来ケーブル（非冷却）の三つの方式について、表5に示す3種の土壤熱回路モデルを用いて日間負荷変動時の許容電流を検討した例を図10に示す。これより従来の CR 1 段回路（モデル A）は、本論文で提案した CR 1 段回路（モデル B）に対してかなり危険側評価を与えることがわかる。また図9、図10よりわかるように、冷却プラントの運転制御をせずに流量

図 8 土壤熱抵抗の経時変化
Fig. 8. Time variation of soil thermal resistance.

図 9 日間負荷変動時の各部温度(洞道布設)

Fig. 9. Calculated temperature of several cooling systems in tunnel for daily cyclic load.

図 10 日間負荷変動時の各部温度(管路布設)

Fig. 10. Calculated temperature of several cooling systems into ducts for daily cyclic load.

を一定とした場合は、内冷 CV ケーブルの導体温度の変化は洞道布設で 25~55°C、管路布設で 23~55°C と大きく、ポンプ動力も最大となる。従って、導体温度変化を小さくするような流量制御が望まれる。

次に日間負荷変動時の連続負荷時に対する許容電流を比較したものを表 6 に示す。これより日間負荷変動時の連続負荷時に対する許容電流の増加率は、洞道布設について従来ケーブル(非冷却)で 19%、従来ケー

表 6 日間負荷変動時と連続負荷時の許容電流の比較

Table 6. Comparison of calculated allowable current capacities for continuous and daily cyclic loads.

単位 (A)

	洞道布設			管路布設		
	非冷却	トラフ	内部冷却***	非冷却	間接冷却**	内部冷却***
連続負荷	▲656 (▲599)	●1,839 (●1,837)	▲3,220 (▲3,195)	●933	●1,485	○3,260
日間変動負荷****	▲783	●2,206	▲3,450 [▲3,274]	○1,200	●1,827	○3,485

*, **: 流量 $Q=5 \text{ l/s}$ 一定 ●: 導体温度制限
 ***, **: 流量 $Q=2.07 \text{ l/s}$ 一定 ○: A1 シース温度制限
 ****: ピーク電流 ▲: 洞道気温制限
 (): 土壤熱抵抗に Kennelly 値を採用
 []: 流量制御あり

ブルのトラフ内間接冷却で 20%、内冷 CV ケーブルで 7%、また管路布設について従来ケーブル(非冷却)で 29%、従来ケーブルの管路間接冷却で 23%、内冷 CV ケーブルで 7% である。このように内冷 CV ケーブルの増加率が極めて小さいのは、導体の直接冷却により熱応答性が速く、ケーブル外部へ放散する熱流が極めて小さいため、土壤などのケーブル外部の熱回路の影響が受けにくいと考えられる。一方、従来ケーブルと従来技術の強制冷却方式は、ケーブル外部の熱放散が大きく、従って土壤熱回路への影響が大となり、増加率も大きくなる。

以上のことより、内冷 CV ケーブルの日間負荷変動問題は、従来ケーブル(非冷却)やそれらの従来技術の強制冷却方式より、土壤熱回路を CR 1 段近似モデルで取扱って差しつかえないことがわかる。従って、日間負荷変動時の許容電流計算に適した土壤の熱等価回路は、モデル C の CR 3 段回路が最も正確であり、ケーブル運開後の初期検討に適切である。しかし、30 年間相当後の許容電流計算はモデル B の CR 1 段回路が最も安全側であり適切であると考えられる。また表 6 よりわかるように、従来技術の強制冷却方式はいずれも許容電流は導体温度で制限を受けており、〈4.1〉節で述べたように冷却設備を増強しても冷却効果が導体まで及ばず許容電流の向上は不可能である。一方、内冷 CV ケーブルは洞道布設が洞道内気温、管路布設が A1 シース温度で制限を受けているため、前者は洞道冷却の併用、後者はシース材を A1 シースからワイヤーシールドに変更して、シース渦電流損を低減させることで許容電流の向上が可能である。

5. 冷却運転制御

内冷 CV ケーブルは許容電流も大きく、発生熱量

図 11 内冷ケーブルの流量制御シミュレーション (洞道布設)

Fig. 11. Coolant flow rate control simulation of internally cooled cables in tunnel.

すなわち冷却容量の大きいことから、循環冷却機器の運転制御方法はシステムの信頼性ならびに省エネルギーの観点から重要な問題であり、〈3・1〉節で述べたケーブル試験線路でも運転制御特性試験が検討されている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。著者らも最も消費電力の大きいポンプ動力について PID 制御シミュレーションを電算機で行い、最適な PID 定数の選定をして、その妥当性を SLPC (single loop programmable controller) とパソコンを用いた流量制御実験結果より検証している⁽¹⁸⁾。この手法を用いて、図 9 に示した洞道布設時の内冷 CV ケーブルの導体温度を 50°C に設定し、流量制御のシミュレーションを行った結果を図 11 に示す。これより流量制御することによりポンプ動力 W_p は、 $W_p \propto Q^{2.25(13)}$ として約 46% 低減される。ただし、導体温度を負荷変動に関係なくほぼ一定に制御しているため、送電ロスに流量制御なしに対して約 2.9% 増加することになる。総合的に流量制御は一定流量に対して 1.5% の省エネ効果があるに過ぎない。従って、冷却運転制御はポンプ動力、送電ロスおよび冷却機器動力などの総合的評価を行って、循環冷却機器運転制御の最適設計を行う必要がある。

6. む す び

275 kV 内冷 CV ケーブルを洞道あるいは管路へ布設した場合の汎用性のある許容電流計算方法を示し、それらの妥当性を洞道布設については実測値、また管路布設は解析解法と数値解法の比較検討によって検証した。これらの解析手法より、内冷 CV ケーブルの連続許容電流は非冷却 CV ケーブルの従来技術の強制冷

却と比較して 1.5~2.2 倍大きいこと、また日間負荷変動時許容電流計算に適した土壤等価回路は、ケーブル運開初期は CR 3 段回路 (モデル C)、30 年相当後は CR 1 段回路 (モデル B) であり、特に内冷 CV ケーブルは熱応答性が速く、ケーブル外部への熱放散が極めて小さく、他の従来技術の冷却方式のものより土壤熱回路を厳密に取扱う必要がないことが判明した。更に非冷却 CV ケーブルの従来技術の冷却方式の許容電流は導体温度で制限されるので、冷却設備を増強しても冷却効果が導体まで及ばず、許容電流の増加が不可能であるのに対して、内冷 CV ケーブルは洞道内気温または AI シース温度で制限を受けるので、前者は洞道冷却の併用、後者はシース材の変更などの許容電流増加策は可能である。

また内冷 CV ケーブルは許容電流が大きくとれることから導体発生熱量、すなわち所要冷却容量が大きく循環冷却機器で最も消費電力の大きいポンプ動力削減を考えた流量制御方式を採用することにより、確かにポンプ動力は約 46% 節減されるが、送電ロスは約 2.9% 増大するなどの問題もあり、それらの総合評価を行って循環冷却機器の最適運転制御方式を選定することが必要である。

終りに、本論文の取りまとめにあたり御指導を賜りました東京大学 河村達雄教授に深甚なる謝意を表すると共に、御協力していただいた東京電力(株)の方に深謝する次第である。

(昭和 62 年 11 月 25 日受付、同 63 年 5 月 2 日再受付)

文 献

- (1) Kobayashi, et al.: IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-104, 775 (1985)
- (2) Kobayashi, et al.: *ibid.*, PAS-104, 1234 (1985)
- (3) 中村, 他: 電学論 B, 106, 411 (昭 61-5)
- (4) The Calculation of Continuous for Forced Cooled Cables, ELECTRA, No. 66, p. 59 (1979)
- (5) Forced Cooled Cables Calculation of Thermal Transients and Cyclic Loads, *ibid.*, No. 104, p. 23 (1986)
- (6) 森, 他: 昭 58 電気学会全大, No. 1310
- (7) 中村, 他: 昭 59 同上, No. 1250
- (8) Current Ratings of Cables for Cyclic and Emergency Loads, ELECTRA, No. 24, p. 63 (1972)
- (9) 安藤・金丸: 昭 57 電気学会全大, No. 1190
- (10) 中村, 他: 昭 60 同上, No. 1384
- (11) 川崎・中村・酒井: 昭 61 同上, No. 1363
- (12) 川崎・中村: 昭 62 同上, No. 1418
- (13) 倉田, 他: 昭 61 同上, No. 1354
- (14) 深川・神永: 電学論 B, 94, 383 (昭 49-8)
- (15) 木村, 他: 藤倉電線技報, No. 53, 7 (昭 50)
- (16) 倉田, 他: 昭 61 電気学会全大, No. 1335
- (17) 倉田, 他: 昭 62 同上, No. 1407
- (18) 川崎, 他: 昭 62 同上, No. 1411