

輸電線壓接套管熔斷原因探討

■ 翁基振

台電公司嘉南供電區營運處

一、前言

輸配電線電流通過時，將產生熱量使導線的溫度上升。同時，靠輻射、對流及傳導作用向四週散熱。在同樣的環境下，若導線電流固定，當溫度上升到達平衡狀況時，其散熱的熱量等於其導線內產生的熱量。導線為裸線時，其熱量易於散入空氣中；但當該導線上覆以絕緣材料時，散熱並不容易，故到達其平衡狀況時之溫度較高。

導線所產生的熱量，視導線之電阻、流過的電流及所經歷之時間長短而定；而導線熱量之散熱，與導線的種類、材質及其所接觸空氣之表面積、溫度、速度和時間等等有關。

在單位時間內，若導線所產生的熱量比其散熱的熱量大，則導線溫度將升高。當導線溫度上升未達平衡狀況之前，若其溫度已高達導線熔點溫度，則將造成導線熔斷。一般熔斷處大都會發生在該線路單位長度之電阻最高的地方，如該線路之斷股或壓接處。

輸電線在正常供電中或發生短路故障時，曾經造成導線熔斷的事例偶有所聞，例如：

- 1.80年5月19日板橋 P/S 轄區的土城 S/S 負載，欲由松樹 P/S 轄區的三峽 S/S 代送時，當三峽 S/S 分界點 # 610 C.B.投入後，造成土城~三峽線 # 31 桿跳線 S 相接點熔斷。
- 2.84年2月27日板橋 P/S 轄區系統正常供電中，發生樹林鶯北線 # 2 ~ # 3 桿間，S 相導線熔斷。同日松樹 P/S 轄區的三峽 S/S 負載，由板橋 P/S 轄區土城 S/S 代送中(樹林鶯北線故障停電中)，造成土城三峽線 # 42 桿 S 相跳線熔斷。
- 3.84年4月5日8點25分台南 P/S 轄區甲四 C/S 臨時要求停電工作，同日9點10分該用戶誤投入線路端 # 611E 接地 ABS，造成三相短路故障事故，導致甲一甲三線 # 51 桿跳線 R 相 T 型壓接套管熔斷。

二、導體特性：

一般導體材料最重要之特性，如表一 所示〔1〕：

表一、一般導體材料最重要特性之比較

Comparison of the most important properties of common conductor materials						
Property		Cooper (E-Cu)	Pure aluminium m(E-Al)	Pantal (E-AlMg Si 0.5)	Brass (Ms 58)	Steel (galvanized)
Density	kg/cm ³	8.9	2.7	2.7	8.5	7.85
El conductivity at 20°C	m/Ω.mm ²	56	35	30	≈18	≈7
El conductivity at 60°C	m/Ω.mm ²	48	30	26	≈16	≈6
Conductivity density		6.3	13	11	≈2	≈1
Spec resistance at 20°C	Ω. mm ² /m	0.0178	0.0286	0.0333	≈0.0555	≈0.143
Temperature coeff of el resistance between 1°C and 100°C	K ⁻¹	0.0038	0.0040	0.0036	0.0024	0.005
Melting point	°C	1083	658	630	≈912	1400
Heat of fusion	Ws/g	181.28	386.86	376.81	167.47	293.07
	Ws/cm ³	1612	1047	1017	1444	2302
Mean spec heat between 1°C and 100°C	Ws/g·K	0.393	0.92	0.92	0.397	0.485
	Ws/cm ³ ·K	3.475	2.386	2.386	3.391	3.558
Thermal conductivity between 1°C and 100°C	Ws/cm·s·K	3.85	2.2	1.9	1.1	0.46
Mean coeff of expansion between 1°C and 100°C	mm.m.K	0.017	0.024	0.023	0.018	0.012
Young's modulus	N/mm ²	110,000	65,000	70,000	≈90,000	210,000
Thermal limit current density	A/ mm ²	154	102	89	91	
Melting current density	A/ mm ²	3,060	1,910	1,690	1,900	
Thermal limit current density is the current density at which the conductor temperature rises from 35°C to 200°C when loaded for 1s. Conductive heat removal disregarded.						
Melting current density is the current density at which the conductor temperature rises to the melting temperature when loaded for 1/100 s. Values according to Müller-Hillebrand.						

表一中指出，溫度(熱)之極限電流密度(Thermal limit current density)，係指當導體負荷達 1 秒鐘後，其溫度由 35 °C 升高至 200 °C 之電流密度，且導體散熱忽略之。熔解之電流密度(melting current density)，係指當導體負荷達百分之一秒後，其溫度升高至熔解的溫度之電流密度，此值是根據 Müller — Hillebrand。

[驗算一]：

假設有一截面積 1mm^2 ，長度 1m 之鋁線導體，試問該導體通過多少電流，經歷 1 秒鐘後，將可使其溫度由 35 °C 升高至 200 °C，且導體散熱忽略之。

[解]：

由表一可知鋁之特性如下：

比熱 $S=0.92 \text{ ws/g}$ $k=0.92 \text{ 焦耳/克}^\circ\text{C}$

密度 $d=\text{kg/dm}^3=2.7\text{g/cm}^3$

比阻係數 $\rho_{20^\circ\text{C}}=0.0286 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，

電阻溫度係數 $\alpha=0.004/^\circ\text{C}$

欲使截面積 1mm^2 ，長度 1m 之鋁線導體的溫度由 T_1 35 °C 升高至 T_2 200 °C，其所需之熱量 H 為：

$$\begin{aligned} H &= SMT \\ &= Sdv (T_2 - T_1) \\ &= SdAL (T_2 - T_1) \\ &= 0.92 \text{ 焦耳/克}^\circ\text{C} \times 2.7 \text{ 克/cm}^3 \times 0.01 \\ &\quad \text{cm}^2 \times 100 \text{ cm} \times (200 - 35) ^\circ\text{C} \\ &= 409.86 \text{ 焦耳 (瓦秒)} \end{aligned}$$

該導體通過電流，經歷 1 秒鐘，由於此一秒鐘期間，導體溫度是由 35 °C 逐漸線性升高至 200 °C (因導體散熱忽略)，其電阻亦隨之增加。所以該導線之電阻 R 不是取 35 °C 或 200 °C 之電阻值，而應採 35 °C 至 200 °C 間之中央值，即 117.5°C ($35 + \frac{200 - 35}{2} = 117.5$)。

截面積 1mm^2 ，長度 1m 之鋁線導體，在溫度 20 °C 時之電阻 R_{20} 為：

$$\begin{aligned} R_{20} &= \rho_{20} \frac{L}{A} \\ &= 0.0286 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \times \frac{1\text{m}}{1\text{mm}^2} \\ &= 0.0286 \Omega \end{aligned}$$

所以，在溫度 117.5 °C 時，其電阻

$R_{117.5^\circ\text{C}}$ 為：

$$\begin{aligned} R_{117.5^\circ\text{C}} &= R_{20}[1 + \alpha(T_{117.5} - T_{20})] \\ &= 0.0286 \Omega [1 + 0.004/^\circ\text{C}(117.5 - 20)^\circ\text{C}] \\ &= 0.039754 \Omega \end{aligned}$$

故流經該導體一秒鐘產生的熱量為 409.86 焦耳，其所需之電流為：

依據焦耳定律：

$$H = I^2 R t$$

$$\text{所以， } I = \sqrt{\frac{H}{R t}}$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{\frac{409.86 \text{ 焦耳}}{0.039754 \Omega \times 1 \text{ 秒}}} \\ &= 101.5377 \text{ A} \approx 102 \text{ A} \end{aligned}$$

經驗算結果，此值與表一中鋁之溫

度(熱)的極限電流密度 102 A/mm^2 相符。

〔驗算二〕：

假設有一截面積 1mm^2 ，長度 1m 之鋁線導體，試問該導體通過多少電流，經歷 0.01 秒鐘後，將可使導體溫度(若室溫 25°C)升高至熔解的溫度(658°C)，導體散熱忽略之。

〔解〕：

欲使截面積 1mm^2 ，長度 1m 之鋁線導體的溫度由 $T_1 25^\circ\text{C}$ 升高至熔解的溫度 $T_2 658^\circ\text{C}$ ，其所需之熱量 H 為：

$$\begin{aligned} H &= SmT \\ &= SdV(T_2 - T_1) \\ &= SdAL(T_2 - T_1) \\ &= 0.92 \text{ 焦耳/}^\circ\text{C} \times 2.7 \text{ 克/cm}^3 \\ &\quad \times 0.01 \text{ cm}^2 \times 100 \text{ cm} \times (658 - 25)^\circ\text{C} \\ &= 1572.372 \text{ 焦耳(瓦秒)} \end{aligned}$$

該導體通過電流，經歷 0.01 秒鐘，由於此 0.01 秒鐘期間，導體溫度是由 25°C 快速線性升高至熔解的溫度 658°C (因導體散熱忽略)，其電阻亦隨之增加，所以，該導體之電阻 R 不是取 25°C 或 658°C 之電阻值，而亦應採 25°C 至 658°C 間之中央值，即 341.5°C ($25 + \frac{658 - 25}{2} = 341.5$)。

又截面積 1mm^2 ，長度 1m 之鋁線導體，在溫度 20°C 時之電阻 R_{20} 為 0.0286Ω (詳驗算一)。

因該鋁線導體在溫度 341.5°C 時之電阻溫度係數 $\alpha_{341.5^\circ\text{C}}$ 為：

$$\begin{aligned} \alpha_{341.5^\circ\text{C}} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + T_{341.5^\circ\text{C}}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{0.004/^\circ\text{C}} + 341.5^\circ\text{C}} \\ &= 0.00169/^\circ\text{C} \end{aligned}$$

所以，在溫度 341.5°C 時，其電阻 $R_{341.5^\circ\text{C}}$ 為：

$$\begin{aligned} R_{341.5^\circ\text{C}} &= R_{20^\circ\text{C}} [1 + \alpha_{341.5^\circ\text{C}} (T_{341.5^\circ\text{C}} - T_{20^\circ\text{C}})] \\ &= 0.0286 \Omega [1 + 0.00169/^\circ\text{C} (341.5 - 20)^\circ\text{C}] \\ &= 0.044 \Omega \end{aligned}$$

故流經該導體 0.01 秒鐘產生熱量 1572.372 焦耳，其所需之電流依據焦耳定律為：

$H = I^2 R t$ ，所以

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{H}{R t}} \\ &= \sqrt{\frac{1572.372 \text{ 焦耳}}{0.044 \Omega \times 0.01 \text{ 秒}}} \\ &= 1890.4 \text{ A} \end{aligned}$$

經驗算結果，此值與表一中鋁熔解的電流密度 1910 A/mm^2 比較，其誤差值僅為 1.03% ($\frac{1910 - 1890.4}{1910} = 0.0103 = 1.03\%$)。因表一中導體之熔解的電流密度係依據 Müller — Hillebrand 而得，由

於沒有說明導體剛通過電流之起始溫度，以及導體散熱是否忽略之。因此，實很難判斷其是經由實驗得知，抑或筆算而來。如果是藉由實驗得知，因其過程中必有導體散熱作用，其結果將會稍大於筆算之值。

依據焦耳定律及導體熱效應之關係，可表示為：

$$H = I^2 R t = S M T$$

$$\begin{aligned} \text{即 } H &= I^2 \rho \frac{L}{A} = S d V T \\ &= S d A L T \end{aligned}$$

由上式可知，當截面積 A 固定之導體，其通過電流 I ，及經歷時間 t ，其所產生之熱量 H ，與該導線之長度 L 成正比；而且，欲使該導體溫度升高 T °C，其所需之熱量 H ，亦與其長度 L 成正比。故當導體截面積 A ，其所通過之電流 I ，及所經歷之時間 t 若固定時，則其任意單位長度所產生的熱量 H ，使該導體所升高之溫度 T °C 均一樣，亦即該導體任一段之溫升均相等。因此，分析導體電熱效應，採任意單位長度，其分析結果均將相同。

三、進一步分析：

導線溫度之升高原因有二，一為導線本身通過電流後線路損失（ $I^2 R$ ）所產生之熱能；另外，因陽光之照射亦可使導線之溫度更為增加。此等熱量可經

由傳導、對流及輻射等三種途徑發散到周圍的空氣中。根據報導，導線熱量之發散以對流及輻射為主，而經傳導作用發散之熱量甚微，可以忽略不計。

在同樣的環境下，若導線電流固定，當溫度上升到平衡狀況時，導線產生的熱量等於其散熱的熱量，即

$$I^2 R + Q_s = Q_c + Q_r$$

式中， I ：負載電流（A）

R ：導線交流電阻（ Ω ）

Q_s ：陽光照射熱量（W）

Q_c ：對流散熱量（W/ft）

Q_r ：輻射散熱量（W/ft）

1. 陽光照射熱量：

陽光照射熱量與標高及空氣之清淨度有關，據報導陽光照射熱量經過大氣層的吸收後，尚有 70 ~ 96.4 watts/ft² 到達地面。在冬季時，因陽光微弱影響甚微，但如發生在炎熱的夏季時，導線因日照而引起的溫升則不可忽視。陽光照射熱量公式如下：

$$Q_s = a \mathbf{\hat{A}} (q_s \sin \theta + q_d)$$

q_d 係大氣輻射熱，其值甚微，可不考慮，故 $Q_s = a \mathbf{\hat{A}} q_s \sin \theta$

式中， a ：吸收係數

$\mathbf{\hat{A}}$ ：導線投影面積（ft²）

q_s ：陽光直接照射熱（W/ft²）

θ ：陽光有效入射角

2. 對流散熱：

對流散熱因氣候及導線尺寸之不同，可分為下列幾種計算公式：

(一)有風時之計算式：

$$\text{當 } 1.2 \leq \frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \leq 12000 \text{ 時}$$

$$Q_c = [1.01 + 0.371 \left(\frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \right)^{0.52}] K_f (t_c - t_a)$$

$$\text{當 } 1.2 \leq \frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \leq 60000 \text{ 時}$$

$$Q_c = 0.1695 \left[\frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \right]^{0.6} K_f (t_c - t_a)$$

(二)無風時之計算式：

當標高為零公尺時

$$Q_c = 0.072 D^{0.75} (t_c - t_a)^{1.25}$$

當有標高時

$$Q_c = 0.283 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (t_c - t_a)^{1.25}$$

式中， ρ_f ：空氣密度 (lbs/ft³)

K_f ：空氣導熱係數 (W/ft² · °C)

μ_f ：空氣粘度 (lbs/hr · ft)

D：導線外徑 (inch)

V：風速 (ft/hr)

t_c ：導線溫度 (°C)

t_a ：導線周圍溫度 (°C)

3. 輻射散熱：

輻射散熱與導線表面光亮程度有關，其計算公式如下：

$$Q_c = 0.138 D \varepsilon \left[\left(\frac{k_a}{100} \right)^4 - \left(\frac{k_c}{100} \right)^4 \right]$$

式中， $k_c = 273 + t_c$

$$k_a = 273 + t_a$$

ε = 熱量放散係數

上述有關空氣密度、粘度及導熱等相關係數，詳表二所示，表中 $t_f = (t_c + t_a)/2$

導線周圍溫度及風速，參考氣象局歷年統計之結果，並為了運用方便起見，將本島氣象簡化為冬、夏兩季，如表三所示：

表三 溫度與風速統計表

季 別	夏季	冬季
溫度 (°C)	30	20
風速 (ft/hr)	7200	7200

太陽經緯度及其照射熱量，詳見表

四所示：

[驗算三]

假設有一南北向，緯度 25° 之 AAC 477MCM(19)69 KV 或 161KV 線路，在夏季上午 11 點左右，室外溫度 30 °C，風速 7200ft/hr 時，該線路負載穩定時，若測得導線溫度為 80 °C，試問其負載電流為多少？

[解]：

因同一線路，每一小段通過之電流均相同，其溫度亦一樣，故取一 ft 長度來分析。AAC 477MCM(19)導線之直徑 $D = 2.0142 \text{ cm} = 0.793 \text{ in}$ ，80 °C 時，長度 1 ft 之電阻 $R = 4.484 \times 10^{-5} \Omega/\text{ft}$ ；長度 1 ft 之投影面積 $A = 0.0661 \text{ ft}^2$

導線吸收係數 $a = 0.5$

導線熱量放散係數 $\varepsilon = 0.5$

表二 空氣粘度、密度以及熱傳導係數

溫度 t_r		$(\frac{^{\circ}K}{100})^4$	粘 度 μ_r lb/(hr)(ft)	密 度 lb/cu ft				熱傳導係數 watts/(sq ft)($^{\circ}C$) K_r
$^{\circ}F$	$^{\circ}C$			Sea Level	5,000 ft	10,000 ft	15,000 ft	
32	0	55.55	0.0415	0.0807	0.0671	0.0554	0.0455	0.00739
41	5	59.73	0.0421	0.0793	0.0660	0.0545	0.0447	0.00750
50	10	64.14	0.0427	0.0779	0.0648	0.0535	0.0439	0.00762
59	15	68.80	0.0433	0.0765	0.0636	0.0526	0.0431	0.00773
68	20	73.70	0.0439	0.0752	0.0626	0.0517	0.0424	0.00784
77	25	78.86	0.0444	0.0740	0.0616	0.0508	0.0417	0.00795
86	30	84.29	0.0450	0.0728	0.0606	0.0500	0.0411	0.00807
95	35	89.99	0.0456	0.0716	0.0596	0.0492	0.0404	0.00818
104	40	95.98	0.0461	0.0704	0.0586	0.0484	0.0397	0.00830
113	45	102.26	0.0467	0.0693	0.0577	0.0476	0.0391	0.00841
122	50	108.85	0.0473	0.0683	0.0568	0.0469	0.0385	0.00852
131	55	115.74	0.0478	0.0672	0.0559	0.0462	0.0379	0.00864
140	60	122.96	0.0484	0.0661	0.0550	0.0454	0.0373	0.00875
149	65	130.52	0.0489	0.0652	0.0542	0.0448	0.0367	0.00886
158	70	138.41	0.0494	0.0643	0.0535	0.0442	0.0363	0.00898
167	75	146.66	0.0500	0.0634	0.0527	0.0436	0.0358	0.00909
176	80	155.27	0.0505	0.0627	0.0522	0.0431	0.0354	0.00921
185	85	164.26	0.0510	0.0616	0.0513	0.0423	0.0347	0.00932
194	90	173.63	0.0515	0.0608	0.0506	0.0418	0.0343	0.00943
203	95	183.40	0.0521	0.0599	0.0498	0.0412	0.0338	0.00952
212	100	193.57	0.0526	0.0591	0.0492	0.0406	0.0333	0.00966

表四、太陽經緯度及其照射熱量對照表

表 4.1 Total Heat Received by a Surface at Sea Level Normal to the Sun's Rays

Solar Altitude Degrees H_c	q_s watts/sq ft (參考表 4.2)	
	Clear Atmosphere	Industrial Atmosphere
5	21.7	12.6
10	40.2	22.3
15	54.2	30.5
20	64.4	39.2
25	71.5	46.6
30	77.0	53.0
35	81.5	57.5
40	84.8	61.5
45	87.4	64.5
50	90.0	67.5
60	92.9	71.6
70	95.0	75.2
80	95.8	77.4
90	96.4	78.9

表 4.2 Solar Heat Multiplying Factors for High Altitudes

Elevation above Sea Level, feet	Multiplier for Values In 表 4.1
0	1.00
5,000	1.15
10,000	1.25
15,000	1.30

表 4.3 Altitudes and Azimuth in Degrees of the Sun at Various Latitudes
Declination 23.0° Northern Hemisphere June 10 and July 3

Degrees North Latitude	Local Sun Time					
	10:00 A.M.		12:00 N.		2:00 P.M.	
	H_c	Z_c	H_c	Z_c	H_c	Z_c
20	62	78	87	0	62	282
25	62	88	88	180	62	272
30	62	98	83	180	62	262
35	61	107	78	180	61	253
40	60	115	73	180	60	245
45	57	122	68	180	57	238
50	54	128	63	180	54	232
60	47	137	53	180	47	223
70	40	143	43	180	40	217

上午 11 點時，由表 4-3 知，太陽之地平經度 Z_c 與緯度 H_c 分別為：

$$Z_c = (88^\circ + 180^\circ) / 2 = 134^\circ$$

$$H_c = (62^\circ + 88^\circ) / 2 = 75^\circ$$

查表 4-1 得知，陽光直接照射熱

$$q_s = 95.4 \text{ W} / \text{ft}^2$$

又因線路為南北向，所以，導線地平經度 $Z_L = 180^\circ$ ，故陽光有效入射角

$$\begin{aligned} \theta &= \cos^{-1}[\cos H_c \cos(Z_c - Z_L)] \\ &= \cos^{-1}[\cos 75^\circ \cos(134^\circ - 180^\circ)] \\ &= 79.64^\circ \end{aligned}$$

因導線溫度 $t_c = 80^\circ\text{C}$

導線周圍溫度 = 30°C

所以， $t_f = (t_c + t_a) / 2$

$$= (80 + 30) / 2 = 55^\circ\text{C}$$

查表二得知：

空氣粘度 $\mu_f = 0.0478 \text{ lb} / \text{hr} \cdot \text{ft}$

空氣密度 $\rho_f = 0.0672 \text{ lb} / \text{ft}^3$

空氣傳導係數 $k_f = 0.0086 \text{ W} / \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \text{因 } \frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} &= \frac{0.793 \times 0.062 \times 7200}{0.0478} \\ &= 8026.89 < 12000 \end{aligned}$$

所以：

$$Q_c = [1.01 + 0.371 \left(\frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \right)^{0.52}] \times k_f (t_c - t_a)$$

$$\text{又 } I^2 R + Q_s = Q_c + Q_r$$

$$\text{即 } I^2 R + a q_s \sin \theta$$

$$= [1.01 + 0.371 \left(\frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \right)^{0.52}] k_f (t_c - t_a)$$

$$+ 0.138 D \varepsilon \left[\left(\frac{kc}{100} \right)^4 - \left(\frac{ka}{100} \right)^4 \right]$$

相關係數、參數代入上式可得

$$I^2 \times 4.484 \times 10^{-5} + 0.5 \times$$

$$95.4 \times 0.0661 \times 0.9837 =$$

$$\left[1.01 + 0.371 \left(\frac{0.793 \times 0.0672 \times 7200}{0.0478} \right)^{0.52} \right] \times$$

$$0.00864(80-30) + 0.138 \times 0.793 \times$$

$$0.5 \left[\left(\frac{273+80}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+30}{100} \right)^4 \right]$$

$$I^2 \times 4.484 \times 10^{-5} + 3.102$$

$$= 17.624 + 3.884$$

解得 $I = 640.7 \text{ A} \approx 641 \text{ A}$

此負載電流 641 A 即為該 AAC 477 MCM (19) 導線通稱之安全電流，詳見表五。

四、實例分析：

84 年 4 月 5 日 8 點 25 分甲四 C/S 臨時要求停電工作，同日 9 點 10 分當台南 P/S 值班人員指令其於 #610 ~ #611 間掛接地線時，該用戶誤投入線路端 #611E 接地 ABS，造成三相短路故障事故，其故障電約高達 6713A，故障持續時間約長達 45 cycle，引起甲一 S/S #620 C.B. 跳脫，其動作電驛為 R 相和 S 相 CO-8 過流電驛，且導致甲一甲三線 #51 桿跳線 (AAC 477 MCM) R 相 T 型壓接套管熔斷，其熔斷處所流過之故障電流約為 6713A，詳見圖一。

表五、AAC之安全電流

CONDUCTOR	COND DIAM. IN CM	AC RESIST AT 80°C IN OHM/K	AC RESIST AT 105°C IN OHM/KM	NORMAL OPERATION				EMERGENCY OPERATION			
				SUMMER		WINTER		SUMMER		WINTER	
				80°C NO SUN EFFECT	80°C SUN EFF. PRESENT	80°C NO SUN EFFECT	80°C SUN EFF. PRESENT	105°C NO SUN EFFECT	105°C SUN EFF. PRESENT	105°C NO SUN EFFECT	105°C SUN EFF. PRESENT
2/0 (7) AAC	1.0516	0.5243	0.5672	304	286	331	316	360	347	382	370
4/0 (7) AAC	1.3259	0.3298	0.3572	409	383	447	423	486	466	515	497
300 MCM(19) AAC	1.5977	0.2322	0.2512	515	480	562	530	612	585	649	624
477 MCM(19) AAC	2.0142	0.1471	0.1589	693	641	756	708	825	785	874	837
636 MCM(37) AAC	2.3317	0.1142	0.1205	832	766	908	847	990	940	1050	1002
795 MCM(37) AAC	2.6060	0.0896	0.0964	959	879	1046	973	1146	1084	1214	1156
636 MCM(61) AAC	2.6111	0.0896	0.0964	959	879	1046	974	1146	1085	1215	1157
954 MCM(37) AAC	2.8550	0.0752	0.0814	1076	983	1174	1089	1283	1212	1359	1292
954 MCM(61) AAC	2.8600	0.0752	0.0814	1077	984	1174	1089	1283	1212	1360	1293
1113 MCM(61) AAC	3.0866	0.0651	0.0707	1162	1054	1268	1169	1410	1330	1494	1418
1272 MCM(61) AAC	3.3020	0.0579	0.0626	1261	1142	1376	1267	1502	1411	1592	1506
1431 MCM(61) AAC	3.5027	0.0521	0.0564	1356	1225	1480	1360	1615	1515	1712	1618
1590 MCM(61) AAC	3.6932	0.0476	0.0515	1445	1302	1576	1447	1722	1613	1824	1622

REMARKS : 1. AMBIENT TEMPERATURE = 30°C FOR SUMMER & 20°C FOR WINTER.

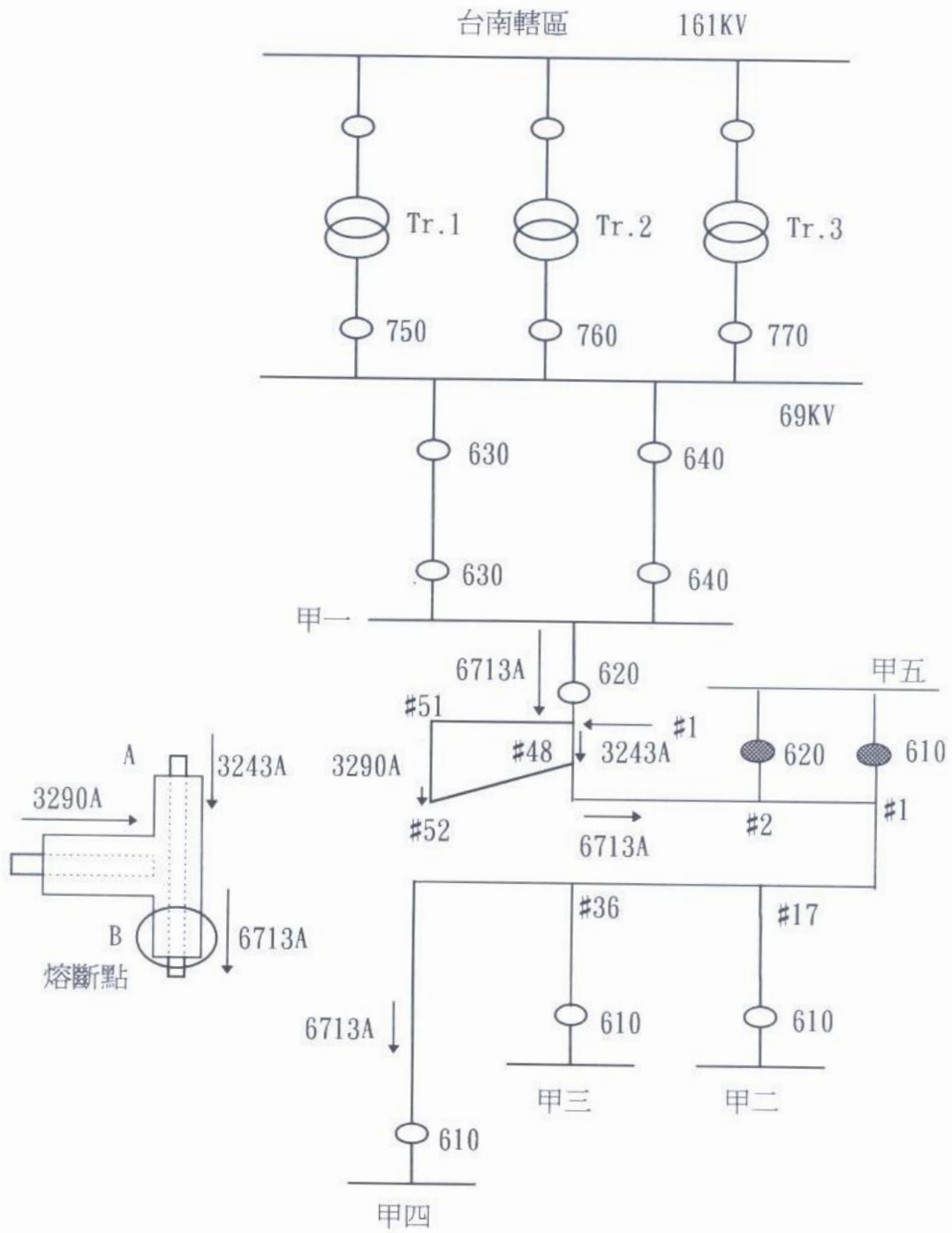
2. VELOCITY OF AIR STREAM = 0.6M/SEC(2FT/SEC)

3. COEFFICIENT OF EMISSIVITY = 0.5

4. COEFFICIENT OF SOLAR ABSORPTION = 0.5

5. EMERGENCY OPERATION = 120 HOURS/YEAR, 3,600 HOURS MAXIMUM DURING SERVICE.

6. ASSUME LINES RUN N-S LATITUDE 25 DEGREE N IN CLEAR ATMOSPHERE. TAKE AVERAGE ALTITUDE HC BETWEEN 10 A.M. AND NOON.



圖一、甲四 C/S 事故 T 接熔斷示意圖

甲一 S/S #620 C.B. 是採中興製 GCB，其額定遮斷時間為 5 cycle，該 CTR 為 600/5，T/L 是 6/2.5，若以故障電流 6713A，查 CO-8 型過流電驛動作特性曲線，其動作時間約為 0.65 秒，即 39cycle，與台南 P/S 示波器顯示故障持續時間 45cycle 比較，確定該保護電驛和 CB 之動作週期均屬正常。故本次 T 型壓接套管熔斷，並非保護設備異常致使其故障週期過長而造成熔斷。

經查詢相關運轉、設計、施工單位，以及導線製造廠商，如中華、太平洋和華新麗華等電線電纜公司，均稱其目前並無 ACSR 或 AAC 各種導線所能承受多少故障電流與時間之關係，其將造成熔斷之對照表；有關各種導線熔斷之測試報告亦均欠缺。

目前並無明文規定“直通”或“T 型”套管壓接處，其接觸電阻最高限制值，故施工單位在導線壓接後，並無測量其接觸電阻之程序，且很難以目視判斷其壓接是否良好或有斷股情形，尤其是老舊線路改接。一般導線壓接正常時，導線外加套管之厚度，因其截面積比導線本體大，故壓接處所能承受之安全（或故障）電流應比導線本體為高。因此，若壓接良好時，則發生短路故障致使線路熔斷情形，其熔斷處應在導線

本體上，而不該發生在套管壓接處。

甲一甲三線約於民國 40 幾年加入系統，而#51 桿跳線是於 82 年 7 月改 T 接。若本次熔斷點是在該 T 接之 B 端側之導線本體，則係可能因該線路年久劣化之故，因其所流過之故障電流約為該 T 接之 A 或 C 端側導線之兩倍。但這次熔斷點是在 T 型套管本體 B 端壓接處，顯然該 T 型套管之單位長度之電阻值比導線本體為高。基於上述理由，故初步推測本次熔斷原因可能係壓接處接觸不良，致其接觸電阻過高所造成。

【問題一】：

84 年 4 月 5 日 9 點 10 分甲四 C/S 發生三相短路事故，流經甲一甲三線#51 桿跳線 R 相 AAC 477 MCM T 型壓接套管 (B 端) 之故障電流為 6713A (詳圖一)，故障週期達 45 cycle，造成該套管熔斷；故障前，該套管 (B 端) 負載電流是 36A，方位是北偏東 30°，周圍環境溫度為 22 °C，試問故障前該 T 型套管之溫度及其單位長度之接觸電阻多少？

解：

由於 AAC 477 T 型套管經壓接後，變為每邊之邊長 1.56 cm，對邊長度為 2.7 cm，對角長度為 3.12 cm 之等邊六角型，其截面積為 6.313 cm²，由於單位長度取多少，其所分析之結果均相同，所以，

單位長度以 3.2 cm 來分析：

由題意可知：

故障前負載電流 $I=36A$

故障電流 $I_f=6713A$

導線周圍溫度 $t_a=22^\circ C$

故障週期 $T_f=45 \text{ cycle}=0.75 \text{ 秒}$

因 T 型壓接套管 (B 端) 之方位為北偏東 30° ，所以其地平經度位置 $Z_L=150^\circ$

上午 9 點 10 分時，由表 4-3 可知太陽之地平經度 Z_c 與緯度 H_c 分別為：

$$Z_c=88 - \left(\frac{180-88}{2} \times \frac{5}{6} \right) = 49.67^\circ$$

$$H_c=62 - \left(\frac{88-62}{2} \times \frac{5}{6} \right) = 51.17^\circ$$

查表 4-1 得知陽光直接照射熱

$$q_s=90.0 \text{ W/ft}^2$$

陽光有效入射角

$$\begin{aligned} \theta &= \cos^{-1}[\cos H_c \cos(Z_c-Z_L)] \\ &= \cos^{-1}[\cos 51.17^\circ \cos(49.67^\circ-150^\circ)] \\ &= 96.46^\circ \end{aligned}$$

又套管外徑 $D=3.12 \text{ cm}=1.228 \text{ in}$

套管截面積 $A=6.313 \text{ cm}^2$

套管投影面積

$$A_s=3.12 \times 3.2$$

$$=9.984 \text{ cm}$$

$$=1.075 \times 10^{-2} \text{ ft}^2$$

由表三可知

風速 $V=7200 \text{ ft/hr}$

鋁之熔點溫度 $t_m=658^\circ C$

鋁之密度 $d=2.7 \text{ 克/cm}^3$

鋁之比熱 $S=0.92 \text{ 焦耳/克}^\circ C$

鋁之吸收系數 $a=0.5$

鋁之熱量放散係數 $\epsilon=0.5$

令 t_c 為 T 型套管故障前之溫度。

R_c 為故障前溫度 t_c 所對應之電阻。

α_{tc} 為鋁在溫度 t_c 之電阻溫度係數。

R_e 為故障前溫度 t_c 至熔點溫度 t_m 之中央溫度所對應之電阻。

由於 T 型套管故障前之溫度 t_c 未知，故無法直接查得空氣之有關係數，為得故障前之空氣正確有關係數，故先假設 T 型套管故障前溫度 t_c 為 $38^\circ C$ ，若所求結果與假設相差太多，則再行修正。

$$\text{因 } t = \frac{t_c + t_a}{2} = \frac{38 + 22}{2} = 30^\circ C$$

查表二可得知：

空氣粘度 $\mu_r=0.045 \text{ lb/hr}\cdot\text{ft}$

空氣密度 $\rho_r=0.0728 \text{ lb/ft}^3$

空氣熱傳導係數 $k_r=0.00807 \text{ W/ft}^2\cdot^\circ C$

$$\begin{aligned} \text{因 } \frac{D \cdot \rho_r \cdot V}{\mu_r} &= \frac{1.228 \times 0.0728 \times 7200}{0.045} \\ &= 14303.744 > 12000 \end{aligned}$$

$$\text{所以 } Q_c = 0.1695 \left[\frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \right]^{0.6} k_f (t_c - t_a)$$

1.故障前

T型套管溫度達平衡狀況時，其產生的熱量等於其散熱的熱量，即

$$\begin{aligned} I^2 R_c + Q_s &= Q_c + Q_r, \text{ 亦即} \\ I^2 R_c + a q_s \sin \theta & \\ = 0.1695 \left(\frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \right)^{0.6} k_f (t_c - t_a) &+ 0.138 D \varepsilon \\ \times \left[\left(\frac{k_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{k_a}{100} \right)^4 \right] &\dots\dots\dots (A) \end{aligned}$$

將上述相關係數和數據代入可得：

$$\begin{aligned} 36^2 R_c + 0.5 \times 90 \times 1.075 \times 10^{-2} \times \sin 96.46^\circ \times \frac{3.2}{2.54 \times 12} & \\ = 0.1695 \left(\frac{1.228 \times 0.0728 \times 7200}{0.045} \right)^{0.6} \times 0.00807 \times & \\ (t_c - 22) \times \frac{3.2}{2.54 \times 12} + 0.138 \times 1.228 \times 0.5 \times & \\ \left[\left(\frac{273 + t_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 22}{1100} \right)^4 \right] \times \frac{3.2}{2.54 \times 12} & \\ \Rightarrow 1296 R_c + 0.05048 = 0.0447 (t_c - 22) & \\ + 8.896 \times 10^{-3} \left[\left(\frac{273 + t_c}{100} \right)^4 - 75.734 \right] & \\ \Rightarrow 1296 R_c - 0.0447 t_c - 8.896 \times 10^{-3} \left(\frac{273 + t_c}{100} \right)^4 & \\ = -1.70761 \dots\dots\dots (B) & \end{aligned}$$

2. 故障後：

當發生短路故障瞬間至故障清除期間，故障電流所產生的熱量，將等於使T型套管之溫度，由故障前溫度 t_c 升高至其熔點溫度 t_m 所需之熱量。依據焦耳

定律和導體熱效應關係，可表示為：

$$\begin{aligned} H &= I^2 R_c T_f = S d A L (t_m - t_c) \text{ 即,} \\ I^2 R_c \left\{ 1 + \alpha_{tc} \left[\left(\frac{t_m - t_c}{2} + t_c \right) - t_c \right] \right\} T_f & \\ = S d A L (t_m - t_c) \dots\dots\dots (C) & \\ \Rightarrow (6713)^2 R_c \left\{ 1 + \frac{1}{250 + t_c} \left[\left(\frac{658 - t_c}{2} + t_c \right) - t_c \right] \right\} \times 0.75 & \\ = 0.92 \times 2.7 \times 6.313 \times 3.2 \times (658 - t_c) & \\ \Rightarrow 33798276.75 R_c \left[1 + \frac{1}{250 + t_c} \left(329 - \frac{t_c}{2} \right) \right] & \\ = 50.18 (658 - t_c) & \\ \Rightarrow 33798276.75 R_c \left[1 + \frac{1}{250 + t_c} \left(329 - \frac{t_c}{2} \right) \right] & \\ + 50.18 t_c = 33018.44 \dots\dots\dots (D) & \end{aligned}$$

由 (B) 和 (D) 式聯立方程式可解出四組解，但只有 t_c 介於 22 °C 至 658 °C 之間，才是合理解，故利用試誤法 (Try Error Method) 可解得：

$$\begin{aligned} t_c &= 33.44 \text{ }^\circ\text{C} \\ R_c &= 441.0 \text{ } \mu \Omega \end{aligned}$$

但由於所解得之 T 型套管故障前溫度 t_c 為 33.44 °C，與原先所假設之溫度 38 °C 仍有偏差，故需再行修正空氣相關係數。所以，再假設 $t_c = 33.44 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\text{則 } t_f = \frac{t_c + t_a}{2} = \frac{33.44 + 22}{2} = 27.72 \text{ }^\circ\text{C}$$

由表二查得 $\mu_f = 0.0447 \text{ lb/hr ft}$

$$\rho_f = 0.0734 \text{ lb/ft}^3$$

$$K_f = 0.00801 \text{ W/ft}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

因

$$\frac{D \cdot \rho_r \cdot V}{\mu_r} = \frac{1.228 \times 0.0734 \times 0.00801}{0.0447}$$

$$= 14518.4 > \underline{12000}$$

$$\text{故 } Q_c = 0.1695 \left(\frac{D \cdot \rho_r \cdot V}{\mu_r} \right)^{0.6} K_f (t_c - t_a)$$

所以，再將相關係數重新代入 (A) 式，可得

$$36^2 R_c + 0.5 \times 90 \times 1.075 \times 10^{-2}$$

$$\times \sin 96.46^\circ \times \frac{3.2}{2.54 \times 12}$$

$$= 0.1695 \left(\frac{1.228 \times 0.0734 \times 7200}{0.0447} \right)^{0.6} \times$$

$$0.00801 \times (t_c - 22) \times \frac{3.2}{2.54 \times 12}$$

$$+ 0.138 \times 1.228 \times 0.5 \left[\left(\frac{273 + t_c}{100} \right)^4 - \right.$$

$$\left. \left(\frac{273 + 22}{100} \right)^4 \right] \times \frac{3.2}{2.54 \times 12}$$

$$\Rightarrow 1296 R_c + 0.05048 = 0.0448 (t_c - 22)$$

$$+ 8.896 \times 10^{-3} \times \left[\left(\frac{273 + t_c}{100} \right)^4 - 75.734 \right]$$

$$\Rightarrow 1296 R_c - 0.0448 t_c - 8.896 \times 10^{-3} \times$$

$$\left(\frac{273 + t_c}{100} \right)^4 = -1.70981 \dots \dots \quad (\text{E})$$

再由 (D) 和 (E) 式聯立方程式可解得：

$$t_c = 33.42^\circ\text{C}$$

$$R_c = 441.1 \mu \Omega$$

此時所解得之 t_c 值 (33.42°C) 與所再假設之 t_c 值 (33.44°C) 已相近，故不需再修正空氣相關係數。因此，在故障前，該 T 型壓接套管在負載電流 36A 時之溫度 t_c 為 33.42°C ，且單位長度 3.2 cm 之接觸電阻 R_c 為 $441.1 \mu \Omega$ 。

五、實驗測試：

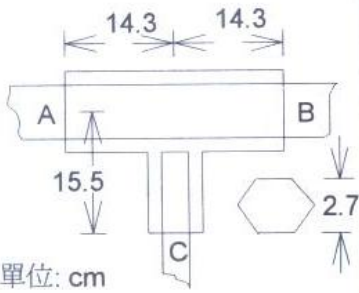
以 84 年 4 月 5 日所更換下來之 AAC 477 MCM 舊導線和 AAC 477 MCM 新導線各一段，以及 3 個新的 AAC 477 MCM T 型直通套管，分別作三組壓接試驗，即一組為全新導線、一組為舊導線、另一組為舊導線但經表面處理。於 84 年 6 月 6 日 (晴天，室溫 28°C) 請線務施工人員依據原先接線方法〔2〕進行壓接；並請維護人員協助測量其接觸電阻，且當 T 型套管之三端各壓接一次時，隨即測量一次接觸電阻，每端分別壓接三次，其測量結果如表六所示。

表六、AAC 477 T型直通套管壓接測試

結果 單位： $\mu\Omega$

	測試端	壓接 一次	壓接 二次	壓接 三次
全新 導線	AB	26	23	28
	AC	31	28	31
	BC	30	28	30
舊線 有處理	AB	27	25	29
	AC	41	34	40
	BC	37	31	39
舊線 無處理	AB	39	28	38
	AC	53	46	58
	BC	53	46	62

備註：



單位: cm

六、檢討分析：

由上述問題一可知，在故障前，解得該 T 型套管之溫度 t_c 為 33.42°C 時，且

T 型套管每 3.2 cm 單位長度之接觸電阻 R_c 為 $441.1 \mu\Omega$ ；但從實驗測試結果得知，在室溫 28°C 時，即使 AAC 477 MCM 舊導線且表面未經處理，經壓接後其 BC 端之接觸電阻僅為 $62 \mu\Omega$ （長度 29.8 cm）。換言之，每 3.2 cm 單位長度之接觸電阻 R_L 為 $6.66 \mu\Omega$ 。此值 (R_L) 遠小於問題一所解得之接觸電阻值 $R_c(441.1 \mu\Omega)$ 。

若由實驗結果之 R_L 大於 R_c (由問題一解得) 時，則顯然是該 T 型套管當初壓接時導線處理不良而造成熔斷。但今測試結果為 R_L 小於 R_c ，所以，這不單純是導線處理問題而已，且該 T 型套管造成熔斷既屬事實，故由此可知：

1. 該 T 型套管若當初壓接良好，則經過近兩年 ($82.7 \sim 82.4$) 時間，其壓接處每 3.2 cm 單位長度之接觸電阻最少已由 $6.66 \mu\Omega$ 增加至 $441.1 \mu\Omega$ 。

2. 其接觸電阻如此迅速增加之原因可能是氧化腐蝕、龜裂斷股或防蝕處理等因素所致。

七、臨界溫度

台南 P/S 轄區甲一甲三線目前有甲二、甲三和甲四等三家 69 KV 大用戶，其中甲四 C/S 設有 50 噸 AC 電弧爐。電弧爐每爐煉製過程分溶解期(點弧期)和精煉期兩階段，其中以溶解期之負載電流

變化最大，由於電弧長度的隨機變動，促使電流呈現極度的變動（0 ~ 300 安培）與不平衡，且功率因數較低；當進入精煉期時，電弧爐可藉由自動電壓調整器控制，以獲得較高的功因，且電流變化較小。通常每爐分三次加料（每次 3 分鐘），每次加料後均需經 15 分鐘熔解期，最後再經 20 分鐘精煉期即可出鋼（3 分鐘），若無補爐（5 分鐘）情況，則又接著繼續煉製下一爐，平均每一爐時程約 77 ~ 82 分鐘。該線路冬夏季負載相差不多，夏季最大負載是 470 安培（84 年 5 月），冬季最大負載是 465 安培（84 年 12 月），例假日負載約 30 安培，平常日若甲四 C/S 無煉爐時，負載約 100 ~ 150 安培；如有煉爐時，負載約 150 ~ 470 安培。

〔問題二〕：

接問題一，在故障前正常供電中，若流經該 T 型壓接套管之負載電流各分別為 30 A、100 A、150 A、200 A、300 A 和 400 A，且在夏季上午 11 點左右，周圍環境溫度為 30 °C 時，試問在上述各負載電流下，當溫度達平衡狀況時，該套管之溫度各為多少？

【解】：

本題導體長度仍以 3.2 cm 來分析：上午 11 點時，由表 4-3 可知：

$$Z_c = (88+180)/2 = 134^\circ$$

$$H_c = (62+180)/2 = 75^\circ$$

查表 4-1 可得 $q_s = 95.4 \text{ W/ft}^2$

$$\begin{aligned} \theta &= \cos^{-1}[\cos 75^\circ \cos(134^\circ - 150^\circ)] \\ &= 75.59^\circ \end{aligned}$$

令 t_{30} 為 T 型套管在負載 30 A 時之溫度。

R_{30} 為 T 型套管在溫度 t_{30} 時之電阻。

為得 T 型套管在溫度 t_{30} 時之空氣正確有關係數，故先假設

$$t_{30} = 40^\circ \text{C}$$

$$\text{所以， } t_f = (t_{30} + t_a)/2$$

$$= (40+30)/2$$

$$= 35^\circ \text{C}$$

查表三可得：

$$\mu_f = 0.0456 \text{ lb/hr}\cdot\text{ft}$$

$$\rho_f = 0.0716 \text{ lb/ft}^3$$

$$k_f = 0.00818 \text{ W/ft}^2\cdot^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{因 } \frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} &= \frac{1.228 \times 0.0716 \times 7200}{0.0456} \\ &= 13882.9 > \underline{12000} \end{aligned}$$

$$\text{故 } Q_c = 0.1695 \left(\frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \right) K_f (t_{30} - t_a)$$

在 T 型套管負載電流 30 A，當溫度

達平衡狀況時，

$$I^2 R_{30} + Q_s = Q_c + Q_r$$

$$\Rightarrow I^2 R_c \left[1 + \frac{1}{\frac{1}{0.004} + t_c} \right] (t_{30} - t_c) + a q_s \sin$$

$$\theta = 0.1695 \left(\frac{D \cdot \rho r \cdot V}{\mu r} \right)^{0.6} \cdot k_f (t_{30} - t_a) +$$

$$0.138 \cdot D \cdot \varepsilon \left[\left(\frac{k_{30}}{100} \right)^4 - \left(\frac{k_a}{100} \right)^4 \right]$$

$$\Rightarrow 30^2 \times 441.1 \times 10^{-6} \left[1 + \frac{1}{\frac{1}{0.004} + 33.42} \right] (t_{30}$$

$$- 33.42) + 0.5 \times 95.4 \times 1.075 \times$$

$$10^{-2} \times \sin 75.59^\circ \times \frac{3.2}{2.54 \times 12}$$

$$= 0.1695 \left(\frac{1.228 \times 0.0716 \times 7200}{0.0456} \right)^{0.6}$$

$$\times 0.00818 (t_{30} - 30) \times \frac{3.2}{2.54 \times 12}$$

$$+ 0.138 \times 1.228 \times 0.5 \left[\left(\frac{273 + t_{30}}{100} \right)^4 \right.$$

$$\left. - \left(\frac{273 + 30}{100} \right)^4 \right] \times \frac{3.2}{2.54 \times 12}$$

$$\Rightarrow 0.350554 + 0.00139 t_{30} + 0.05214$$

$$= 0.04453 t_{30} - 1.3359 + 8.896$$

$$\times 10^{-3} \left(\frac{273 + t_{30}}{100} \right)^4 - 0.74983$$

$$\Rightarrow 0.04314 t_{30} + 8.896 \times 10^{-3}$$

$$\left(\frac{273 + t_{30}}{100} \right)^4 = 2.488424$$

$$\text{由上式可解得 } t_{30} = 38.32^\circ \text{C}$$

同理，可解得該 T 型壓接套管在各負載電流情況下之溫度如表七所示。

表七、T 型套管之電流與溫度對應表

負載電流 A	30	100	150	200	300	400
套管溫度 °C	38.32	40.12	52.0	74.6	153.3	> 170

由表七可知，今後在夏季上午 11 點，周圍環境度 30 °C，甲一甲三線 # 51 桿跳線 T 型壓接套管之負載電流為 30 A (或 100 A) 時，如其溫度超過 38.32 °C (或 40.12 °C)，則甲四 C/S 若再發生三相短路故障時，該 T 型壓接套管將可能熔斷。

八、實地測溫：

為知道甲一甲三線之接頭是否有發熱現象，故於 85 年 7 月 2 日至 16 日以紅外線測溫儀，實地測量該線路所有接頭之溫度，經測量結果顯示(詳見表八 1. 至表八.3)，以甲一甲三線 # 24 桿 T 相跳線接頭之溫度(51.2 °C)，在測量該接頭時之氣溫是 30 °C，電流約為 100 安培。

又經 85 年 10 月 1 日複測結果，該接頭之溫度仍高達 48.6 °C，而當時之氣溫是 29 °C，電流約為 115 A，與上次比較氣溫稍低，但負載較重。

依據表七可知，在氣溫 30 °C，甲一甲三線為 100 A，如果接頭溫度超過 40.12 °C 時，若甲四 C/S 發生三相短路故障，則即將可能造成接頭熔斷。

表八.1 甲一~甲三線紅外線測溫紀錄

單位：°C

鐵塔(桿) 編號	氣溫 °C	電流 A	甲一~甲三線			甲一~甲四線			日期 年 月 日
			1	2	3	1	2	3	
甲三-#1	29	125	37.0	38.9	39.5	36.1	36.3	36.2	850702
#1	29	125	38.2	38.0	37.8	36.8	38.5	37.6	850702
#2	29	120	34.9	37.2	43.9				850702
#4	29	103				40.1	43.4	48.2	850702
#6	29	103	43.4	42.7	44.0		31.9		850702
#8	29	100	33.6	33.8	35.6		36.4		850702
#12	30	200	31.4	30.7	32.4				850702
#13	30	98				34.5	32.4	34.4	850702
#16~#17	30	98						32.3	850702
#16~#17	30	98						32.2	850702
#19	29	111	31.7	30.3	31.1	33.7	30.4	32.2	850703
#20	29	108	31.9	37.0	31.0	32.0	32.9	34.2	850703
#23~#24	29	101				32.3			850703
#30	30	100	31.5	33.3	35.3	35.5	35.4	35.3	850703
#31~#32	30	100				30.0			850703
#37~#38	30	98				31.1	30.8	31.6	850703
#38~#39	30	98		31.4	30.7				850703
#38	29	98	31.1	30.6	33.4	32.8	32.3	30.3	850704
#36~#37	30	96			32.7				850704
#39~#40	30	97		35.4					850704
#40~#41	30	97			32.2			38.6	850704

表八.2 甲一~甲三線紅外線測溫紀錄

單位：°C

鐵塔(桿) 編號	氣溫 °C	電流 A	甲一~甲三線			甲一~甲四線			日期 年 月 日
			1	2	3	1	2	3	
#41~#42	30	98	33.3					35.4	850704
#46-2~#47	29	104	34.0	35.1	33.6				850716
#46-2~#47	29	104	33.8	37.2	43.9				850716
#46-3~#47	29	102				35.7	38.2	35.8	850716
#47	30	102	34.0	35.1	32.0	32.2	35.8	35.9	850716
#47	30	102	33.8	30.1	31.8	31.9	37.0	38.4	850716
#47	30	102				32.4	36.9	35.8	850716
#47~#48	30	100	34.5	35.5	34.1	35.0	35.7	37.7	850716
#47~#48	30	100		33.3					850716
#48~#49	30	100	35.8		37.1				850716
#50-1	30	100	34.6	35.2	35.1				850716
#50-1	30	100	32.8	35.5	35.4				850716
#51	30	98	37.5	36.7	39.1				850716
#51	30	98	37.2	37.4	39.3				850716
#51	30	98	35.1	36.6	39.4				850716
#51~#52	30	99					32.4	34.4	850716
#51~#52	30	99						33.6	850716
#52	30	99				32.8	34.1	35.1	850716
#58	30	99	37.1	36.2	37.2				850716
#1	30	99	42.7	42.0	40.8				850716
#1	30	99	40.8	41.8	44.3			38.6	850716

表八.3 甲一~甲三線紅外線測溫紀錄

單位：°C

鐵塔(桿) 編號	氣溫 °C	電流 A	甲一~甲三線			甲一~甲四線			日期 年 月 日
			1	2	3	1	2	3	
#1~#1-2	30	99	40.8	39.8	42.5				850716
#1-2~#1-3	30	99	36.3	36.9	38.4				850716
#4	30	99	34.9	36.6	35.1				850716
#5	30	98	41.7	41.7	41.0				850705
#15	30	98	36.7	35.8	38.9				850705
#16	30	98	39.6	42.9	42.0				850705
#16	30	98	42.9	43.4	41.0				850705
#16	30	98	40.9	46.3	40.7				850705
#17	30	100	41.1	42.8	40.7				850705
#22	30	100	46.9	47.0	46.1				850705
#22	30	100	44.0	44.9	44.6				850705
#23-2	30	100	44.2	43.0	45.5				850705
#24	30	100	48.6	50.0	51.2				850705
#24~#25	30	100		43.5					850705
#27	30	100	41.8	40.5	40.7				850705
#28	29	100	37.5		38.6				850705
#29	29	102		37.6					850705
#32	29	102	45.0	45.6	43.2				850705
#32	29	102	45.4	44.6	40.0				850705
甲三分歧	29	102	35.4	39.7	37.8				850705
甲三分歧	29	102	42.0	43.4	39.8				850705

由以上可知，甲一甲三線經測溫結果，如接頭溫度超過 40.12°C 時，則表示接頭已有發熱現象，若接頭不更換，萬一甲四 C/S 再次發生三相短故障時，則將可能在該線路溫度最高之接頭處熔斷。

由於甲四 C/S 再次發生三相短路故障之機率很低，或許在近一、二年內不可能發生，甚至永遠都不會發生。因此，為證明本報告之正確性，今後若遇甲一甲三線有停電工作時，建議將其 #24 桿 T 相跳線接頭更換，並測量其接觸電阻，是否超過 $441.1 \mu\Omega / 3.2 \text{ cm}$ ，且將該接頭解剖，以了解接頭壓接情形及其接觸面之氧化程度。

九、結語與建議：

一般線路壓接套管之單位長度之接觸電阻遠較導線本體為高，且易產生氧化腐蝕，故遇線路熔斷情況，通常均發生在壓接套管處。

本報告為求簡化，考慮套管不受拉力且其接觸面之電阻隨溫度之變化值，採鋁之電阻溫度係數。利用導體熱效應、陽光照射熱量、散熱作用以及焦耳定律等理論，以甲一甲三線為例，推導其套管熔斷之臨界溫度及接觸電阻。而甲一甲三線所求得之接觸電阻遠大於實

驗測試結果，故該 T 型壓接套管熔斷之原因可歸納為：

1. 該套管由於長時間受環境溫度、負載電流之變化和集膚效應所產生之熱脹冷縮現象，促使套管接觸部份氧化腐蝕。此情況與導線夾板、空斷開關等發熱現象類似。

2. 由於該線路老舊，當初該套管在壓接過程中(高空作業)，也許有龜裂、斷股現象或防蝕處理情形不良，加速接觸電阻日益增加。

目前該套管已修復，今後每逢夏季紅外線測溫時，可參考表七所示，例如，當時負載電流為 100A ，而所測量之溫度若超過 40.12°C (150A ， 52°C) 時，則該套管必須更換，否則當甲四 C/S 再次發生三相短路故障時，則該套管將可能又會熔斷。

由於實際架設之線路，除跳線之外，其餘兩塔(桿)間之導線及套管均有承受拉力(依塔距及導線種類而定)，且導線和套管之耐張力(破壞張力)亦隨溫度升高而降低。因此，導線或套管之溫度在尚未達到熔點溫度之前，將可能被拉斷。至於在某拉力(kg)之情況下，各種導線或套管之溫度，若到達多少 $^{\circ}\text{C}$ ，則將造成導線斷落，此將是未來研究方向之一。

台電公司輸電導線在正常運轉與緊急運轉之容許最高溫度分別為 80 °C 及 105 °C，亦即，南北向線路在夏季上午 11 點左右，環境溫度 30 °C，風速 7200ft/hr 時，若其負載電流是該線之額定安全電流(AAC 477，641A)或是緊急運轉電流，則此時導線之溫度約為 80 °C 或是 105 °C(詳見驗算三)。還有，導線在緊急運轉情況之限制條件為：

1. 每年不得超過 120 小時。
2. 實際運轉以後，累計不可超過 3600 小時。

由此可見，線路在額定安全電流範圍內，若套管溫度超過 105 °C 時，則宜考慮更換壓接套管。在每年夏季例行紅外線測溫時，因目前尚無從依據，無法藉由測溫結果，直接判斷壓接套管是否需更換，否則該線路萬一發生短路故障時，則該套管將可能熔斷。由於變電所或線路各點之短路容量和導線種類、電驛設定均不同，且當進行紅外線測溫時之負載電流和環境溫度亦隨時隨地而異，以及推導過程複雜且需反覆運算。因此未來的研究方向應是：

發展一套軟體程式，針對各種線路壓接套管，只要鍵入測溫時間、環境溫

度、導線種類、負載電流以及故障電流和故障持續時間等，便可得知該壓接套管若遇短路故障時，即將造成熔斷之臨界溫度，而將此溫度與紅外線測溫結果比較，以作為判斷該套管是否需更換之參考。

最後，承蒙台電公司新桃供電區黃經理明松先生提供此研究題目和資料，並殷切指導與鼓勵，以及鄭經理武雄先生任副處長期間提供寶貴建議，同時在研究過程中，感謝黃副理天敏先生、李錦槍課長、鍾金樹課長、林安志課長、黃光城段長、洪瑤股長、呂世彬股長和蕭耀丕君之大力支持與協助，及維護同仁之協助壓接與測試，使本報告得以順利完成，謹此致謝。

參考資料：

1. Asea Brown Boveri Pocket Book, Switchgear Manual, 8th edition page 476。
2. 台灣電力公司 輸配電工程處 輸電工程作業手冊，第二篇第二章第一節 page26。