

氣象因子對於超高壓輸電線線溫影響之研究

萬健君¹ 陳家榜² 張博雄³ 顧欣怡³ 張育璋³ 廖清榮⁴ 江昭皚^{1*}
生物產業機電工程學系¹ 電機工程學系² 中央氣象局預報中心³ 臺灣電力公司綜合研究所⁴
臺灣大學^{1,2} 中央氣象局³ 臺灣電力公司⁴
*通訊作者 (jajiang@ntu.edu.tw)

摘要

有鑑於輸電線線路導體溫度對於輸電安全及提升輸電效益的重要性，然而輸電線線路導體溫度資訊現階段的作法皆由IEEE標準規範的動態額定熱容量公式推估而來，以輸電線路本身規格資訊以及當地氣候資訊進行線溫推估，其估計值的正確性攸關著輸電安全，是為輸電系統安全評估的一大重要課題。本研究將我國中央氣象局所發佈的氣象資訊導入，探討氣象因子對於輸電線線路溫度的影響性。首先將驗證線溫推估值的正確性，由我國臺灣電力公司的一套SMT1超高壓輸電線路監測設備獲得實際測量的線溫資訊，佐證以氣象資訊輔IEEE Std 738-2006標準規範的動態額定熱容量公式所推估線溫值，將後者估算的線路溫度值與前者實際量測的線路溫度進行比較。結果表明此推估值與實際量測溫度差異不大，均方根誤差值僅有攝氏0.37度。由此得知，根據當地氣候資訊輔以動態額定熱容量公式推估而得的線溫值是具有高可信度的參考性。本研究接著將觀察環境溫度與風速對線溫推估值的影響，並假定不同的線路載流量，再次驗證環境溫度與風速對於線溫有著高度影響性，其中尤以風速因子最為劇烈。因此本研究表明輸電線路上的導體溫度與氣象參數息息相關，甚至與其所能負載的電流容量皆有重大影響，在輸電安全評估上亦與氣候參數有著密不可分的關係。

關鍵字：輸電線線溫；動態額定熱容量；氣象因子

一、前言

臺灣是一個狹長型的海島國家，由於位於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊交接處，地形落差大且複雜。亦因如此，絕大部分的超高壓輸電線路皆為透過電塔架空方式傳送電力，藉此克服大幅度的地形落差。同時，臺灣氣候屬高濕度及高鹽度的海島氣候，超高壓輸電線運作時容易受到自然天候因素影響，導致輸電線與電塔的元件機構老化。當部分元件的機械強度受天候因素影響而消磨殆盡時，就有可能發生危害超高壓輸電線網路安全性的事件。此外，隨著電力需求量不斷增長，超高壓輸電線路被迫提升載流量以滿足供電需求。超高壓輸電線路於高載流量作業下，將使輸電線路上累積大量的熱能，造成線路溫度上升與線路弛張的問題。

輸電線路的輸電能力多受制於「熱容量」，因此準確地估算輸電線上額定熱容量，可有效地提升輸電效率與兼顧輸電安全性。為了妥善利用整體輸電線網路且發揮其最大效益，關於提升整體輸電負載容量的研究紛紛嶄露頭角。常見的額定熱容量估算方式為動態額定熱容量估算法，以IEEE Std 738-2006的標準規範(IEEE Std 738-2006, 2007)為基礎，進行估算模型輔以當地資訊調校以符合各地輸電容量的需求。

輸電安全課題中最為關鍵的環節為線路溫度與載流量，然而這兩者的關係實為密不可分。於本研究中，以線路溫度為首要考量探討線路溫度與當時本地氣候的關係。

輸電線線溫資訊皆由IEEE標準規範的動態額定熱容量公式推估而來，為了先驗證IEEE Std 738-2006推估值的正確性，本研究利用我國臺灣電力公司購買一套由西班牙ARTECHE公司開發的SMT1超高壓輸電線路監測設備，藉由此項設備可以獲得輸電線路的導體電流與導體溫度資訊，同時亦建置了氣候站以獲得太陽輻射熱、風速、方向及環境溫度等資訊。此項監測超高壓輸電線路的感測設備裝設於山上 ~ 龍崎四路的161 kV線路的42號電塔上進行實際線溫監測，實際裝設位置距離電塔五公尺處。藉SMT1的實際量測值與IEEE Std 738-2006推估值做比較，證實IEEE Std 738-2006的高可靠度。

由於輸電線路上的導體溫度與其所負載的電流容量皆與氣象參數息息相關，輸電安全評估亦與氣候參數有著密不可分的關係，但其參考項目相當多且複雜。同時，大氣資訊隨著時間與空間有著不同的變化趨勢，因此要達到準確地預估效果具備一定難度。再確認推估值具高可靠度的參考性後，本研究將進一步探討各項氣象參數，主要以環境溫度、風速和風向進而影響導體生成熱和散逸熱，對此推估值的影響性。

在輸送電力的安全性課題中，線路溫度可謂是衡量輸電安全性的一大指標。為了有效且準確地進行輸

電線路溫度的估算，本研究導入我國中央氣象局所發佈的氣象資訊進行與輸電線導體溫度的關係探討。氣象因子與輸電線導體溫度的高度影響性可為輸電安全性帶來前瞻性的安全評估與預測。

二、動態額定熱容量模型

IEEE Std 738-2006規範的動態額定熱容量估算方法以熱平衡方程式為基礎，由基礎熱力學可知散失的熱能等於生成的熱能，以輸電線路為背景的穩態熱平衡公式如式(1)。

$$q_s + I^2 \cdot R(T_c) = q_c + q_r \quad (1)$$

q_s 為日照照射在輸電線路生成的熱，單位為W/m； I 為輸電線路當下所承載的電流容量，單位為A，而 $R(T_c)$ 則代表隨著線溫變化的導體阻抗，單位為 Ω ，所以此項 $I^2 R(T_c)$ 則代表輸電容量對整體線路生成的熱功率，單位為W/m； q_c 為環境中因對流因素所散失的熱功率，單位為W/m； q_r 則代表環境中因熱輻射所散失的熱功率，單位為W/m，其關係圖如圖1。

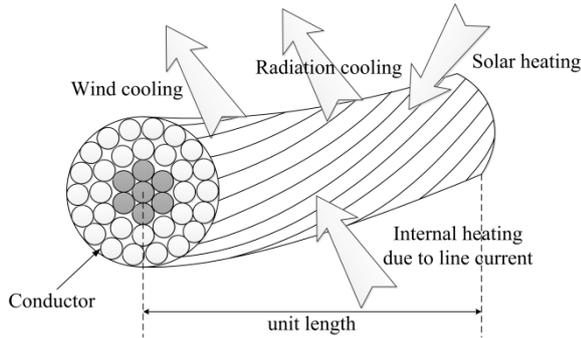


圖1 輸電線導體穩態熱平衡關係圖

(一)日照生成的熱功率 q_s 計算：

$$q_s = \alpha \cdot K_{\text{solar}} \cdot Q_s \cdot \sin \theta \cdot A \quad (2)$$

在式(2)中， α 為太陽吸收率，其值介於0.23~0.91之間，通常為0.5。 K_{solar} 為太陽高度的相關因子，其值與海拔高度 H_c (單位為m)有關，如式(3)。 Q_s 則是太陽與天空輻射所生成的熱能，如式(4)，其與太陽高度角 H_c (單位為degrees)有關，如式(5)。

$$K_{\text{solar}} = 1 + 1.148 \cdot 10^{-4} \cdot H_c + (-1.108) \cdot 10^{-8} \cdot H_c^2 \quad (3)$$

$$Q_s = 53.1281 + 14.211 \cdot H_c + 6.6138 \cdot 10^{-1} \cdot H_c^2 + (-3.1658) \cdot 10^{-2} \cdot H_c^3 + 5.4654 \cdot 10^{-4} \cdot H_c^4 + (-4.3446) \cdot 10^{-6} \cdot H_c^5 + 1.3236 \cdot 10^{-8} \cdot H_c^6 \quad (4)$$

$$H_c = \sin^{-1} [\cos(Lat) \cos \delta \cos \omega + \sin(Lat) \sin \delta] \quad (5)$$

$$\delta = 23.4583 \cdot \sin \left(\frac{284 + N}{365} \times 360 \right) \quad (6)$$

θ 代表著輸電線路與太陽輻射的有效夾角，常數 A 是為單位長度線路所投影的面積(單位： m^2/m)，而太陽

高度角又可以式(5)計算得知，主要與導線所在緯度 Lat 、太陽傾角 δ 、時間角 ω 有關。其中太陽傾角可由式(7)表示， N 代表一年中的第 N 天(若為1月11日，其值為11；若為2月12日，其值為43，以此類推)。時間角則是由 $+180^\circ$ 至 -180° ，由正午12點開始每小時增加 15° ；正午前為負值，正午後則為正值。

$$\theta = \cos^{-1} [\cos(H_c) \cos(Z_c - Z_l)] \quad (7)$$

$$Z_c = C + \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat) \cos(\omega) - \cos(Lat) \tan(\delta)} \right) \quad (8)$$

θ 與太陽高度角 H_c 、太陽相位角 Z_c 以及導體相位角 Z_l (單位為degrees)有關，如式(7)。 Z_l 視導體線路走向而定(若為南北走向則為 0° ；以東西走向則為 90°)。 Z_c 能以式(8)表示， C 值代表太陽方位常數。

(二)電流對線路導體生成的熱能 $I^2 R(T_c)$ 計算：

$$R(T_c) = \left[\frac{R(T_{\text{high}}) - R(T_{\text{low}})}{T_{\text{high}} - T_{\text{low}}} \right] (T_c - T_{\text{low}}) + R(T_{\text{low}}) \quad (9)$$

此項為輸電線上通以高電流 I ，因導體本身的阻抗而產生的熱功率損耗。而導體本身的阻抗與導體溫度亦有關係，如式(9)所示。 T_c 為導體溫度，單位為 $^\circ\text{C}$ 。 T_{high} 與 T_{low} 則是導體分別為通以交流電的情形下，其線路溫度的最大與最小值。 $R(T_{\text{high}})$ 與 $R(T_{\text{low}})$ 則分別為線路最高及最低溫時，整體線路的阻抗值。

(三)空氣對流的熱損耗功率 q_c 計算：

$$q_{c1} = 0.0205 \rho_f D^{0.75} (T_c - T_a)^{1.25} \quad (10)$$

$$q_{c2} = \left[1.01 + 0.0372 \left(\frac{D \rho_f V}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] K_f K_\beta (T_c - T_a) \quad (11)$$

$$q_{c2} = 0.0119 \cdot \left(\frac{D \rho_f V}{\mu_f} \right)^{0.6} \cdot K_f K_\beta (T_c - T_a) \quad (12)$$

q_c 對流造成的熱損失項，此項可依據氣候因素而細分為三種情形，分別為自然對流情況、微風吹拂情形與強風吹拂情形。自然對流代表風速為零時的情形，其熱損耗功率 q_{c1} 可以式(10)表示。微風時與強風時造成的熱損耗功率(q_{c1} 、 q_{c2})分別如式(11)及式(12)。

$$T_{\text{film}} = \frac{T_c + T_a}{2} \quad (13)$$

$$\rho_f = \frac{1.293 - 1.525 \times 10^{-4} \times H_c + 6.379 \times 10^{-9} \times H_c^2}{1 + 0.00367 \times T_{\text{film}}} \quad (14)$$

$$\mu_f = \frac{1.458 \times 10^{-6} \times (T_{\text{film}} + 273)^{1.5}}{T_{\text{film}} + 383.4} \quad (15)$$

$$K_f = 2.424 \times 10^{-2} + 7.477 \times 10^{-5} \times T_{\text{film}} - 4.407 \times 10^{-9} \times T_{\text{film}}^2 \quad (16)$$

$$K_\beta = 1.194 - \sin \beta - 0.194 \cos(2\beta) + 0.368 \sin(2\beta) \quad (17)$$

不論何種情形，對流造成的熱損失功率皆與導體直徑 D (單位為mm)、導體溫度 T_c 及環境溫度 T_a (單位為 $^\circ\text{C}$)、空氣密度 ρ_f (單位為 kg/m^3)、空氣動態黏性 μ_f (單位為Pa-s)、空氣熱導率 K_f (單位為 $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$)以及風向因子

K_{β} 。各個相關參數可分別以式(13)至式(17)表示。其中，風向因子 K_{β} 與風向有關，而 β 則代表風向與導線的法線所夾角度。

自然對流情形相當罕見，風速為零導致對流作用不顯著，對線路溫度而言為最糟情形。而微風與強風的判斷，則是將以上式(14)至式(17)代表的參數代入 q_{c1} 與 q_{c2} ，然後取其較大者，是為線路之對流熱損耗功率值。

(四)輻射造成的熱損耗功率 q_r 計算：

$$q_r = 0.0178 \cdot D \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (18)$$

輻射熱損耗功率 q_r 可以式(18)表達之，其主要與導線直徑 D 及輻射發射率 ε 有關。 ε 為常數值，介於 0.23 ~ 0.91 之間，常為 0.5。

在穩態熱平衡公式下，將輸電線路當下所承載的電流容量代入式中，輔以各式氣象參數與導體特性參數，進而推估輸電線路當時的工作溫度。

三、模型驗證

此小節將首先驗證IEEE Std 738-2006標準規範的動態額定熱容量推估值的正確性。為了驗證動態額定熱容量推估值的正確性，利用我國臺灣電力公司購買一套由西班牙ARTECHE公司開發的SMT1超高壓輸電線路監測設備，藉由此項設備可以獲得輸電線路的導體電流與導體溫度資訊，同時亦建置了微氣候站以獲得太陽輻射熱、風速、方向及環境溫度等資訊。此項監測超高壓輸電線路的感測設備裝設於山上 ~ 龍崎四路的161 kV線路的42號電塔上進行實際線溫監測，實際裝設位置距離電塔五公尺處，如圖2所示(臺灣電力公司，2013)。微型氣候站建置於電塔端，其監測項目包括風速、風向、太陽輻射量(日射計)、環境溫度及相對濕度感測器，實際建置情形如圖3(臺灣電力公司，2013)。

根據SMT1微氣象站所監測的氣象資訊輔以IEEE Std 738-2006標準規範的動態額定熱容量公式可以估算出線路溫度值，將估算出的線路溫度值與SMT1實際量測的線路溫度進行比較，如圖4所示。如圖所示，此為2013年1月2日的實際線路溫度與利用IEEE Std 738-2006所推估線溫值比較圖，資料點從00點00分至23點50分，每十分鐘一筆資料，共144筆。結果顯示，根據動態額定熱容量的公式輔以當地氣候站的資訊進行線溫推估，此推估值與實際量測溫度比較結果差異不大，以2013年1月2日的資料為例，均方根誤差值僅有0.37 °C。



圖2 SMT1實際裝設於輸電線路上的情形(臺灣電力公司，2013)

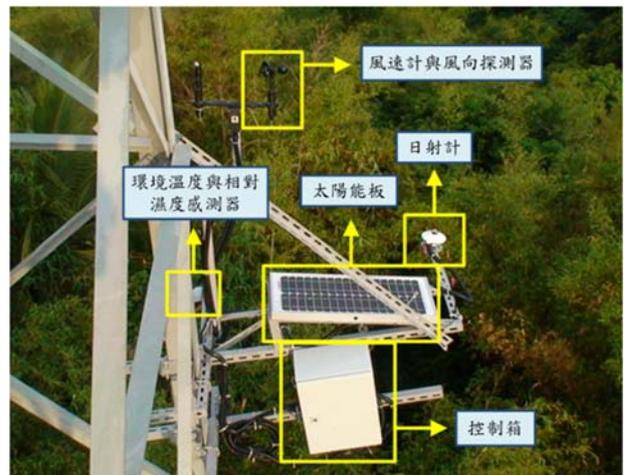


圖3 SMT1微氣象站實際裝設於電塔端情形(臺灣電力公司，2013)

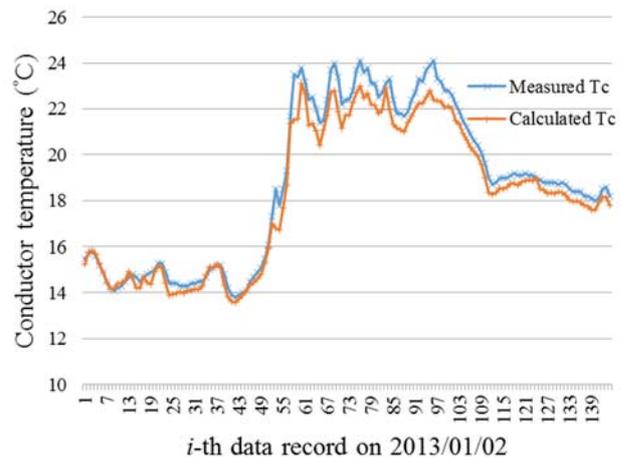


圖4 2013年1月2日(冬季)的實際線路溫度與推估線溫值比較圖

根據上個小節的資訊可得知線路溫度除了與輸電線路參數和輸電線路當下所承載的電流容量有關，亦與當下氣象狀態有著密不可分的關係。接著將比較不同季節的氣象狀態下實際線路溫度與利用IEEE Std 738-2006所推估線溫值之間的差異比較，藉以驗證不同的氣象狀態是否影響IEEE Std 738-2006標準

規範的動態額定熱容量公式的準確性。以圖4-圖7為例，將以一季三個月為一單位，2013年1月2日作為冬季代表，接此由2013年4月2日、2013年7月7日和2013年10月4日，分別做為春季、夏季和秋季的代表，根據氣候分佈明顯差異的四組資料去觀察對動態額定熱容量公式精準度的影響性。

除了先前所敘述在2013年1月2日的資料結果，根據圖5-圖7結果顯示，均方根誤差值分別為0.38 °C、0.36 °C和0.32 °C。此結果展現出動態額定熱容量公式的可靠性，不受氣候分佈明顯差異影響線溫推估值的精準度。

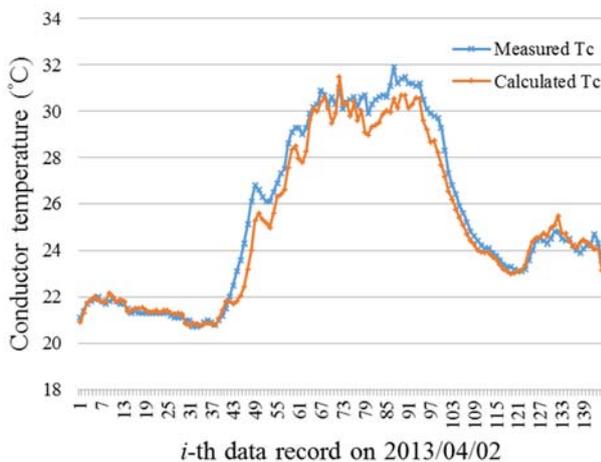


圖5 2013年4月2日(春季)的實際線路溫度與推估線溫值比較圖

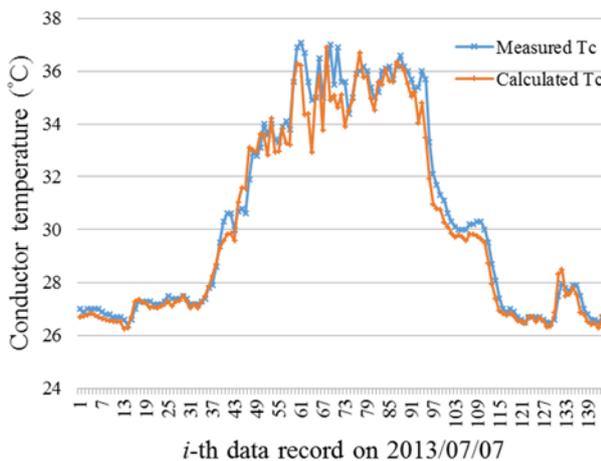


圖6 2013年7月7日(夏季)的實際線路溫度與推估線溫值比較圖

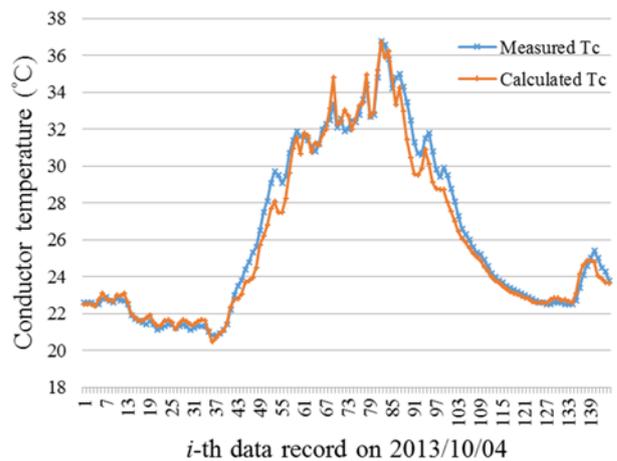


圖7 2013年10月4日(秋季)的實際線路溫度與推估線溫值比較圖

確認推估值具有高可靠度的參考性之後，本研究將進一步探討各項參數對此推估值的影響性。根據動態額定熱容量公式可得知其線路溫度值與線路參數及氣象資訊有關，因此接下來將分析電流及氣候資訊對於線溫推估值的影響性。

四、實驗方法與結果

本研究將我國中央氣象局所發佈的氣象資訊導入動態額定熱容量模型中，藉此計算出345 kV超高壓輸電線線路溫度值。本研究所提出的動態熱容量模型其參考資料來源為氣象局所發佈的實際歷史氣象資訊，其地形解析度皆為2.5 km見方的地形解析度。實際氣象資訊的時間解析度為每小時，實際氣象資訊則包括溫度、相對溼度、雨量、風速、風向等。此外，有鑑於全臺超高壓輸電線路分佈範圍廣泛且跨越各種複雜地形，氣象預報資訊的解析度遠低於電塔分佈狀況。因此，此模型將會使用最近鄰居法，各電塔參考的氣象預報資訊為距離其最近的格點資訊替代。綜合以上所述，根據我國中央氣象局的實際氣象資訊，輔以上小節所述的動態額定熱容量估算方法，本研究擬進行輸電線路溫度的估算方法。

圖8為氣候條件皆相同的情形中，不同電流狀況下推估而得的線溫值，從600 A至1400 A，逐次提升200 A，可明顯看出線溫隨著電流的增加而上升，同時以此例可看出若電流增加一倍，線溫值便可增加約20 °C，線路載流量對於線溫的影響性可見一般。

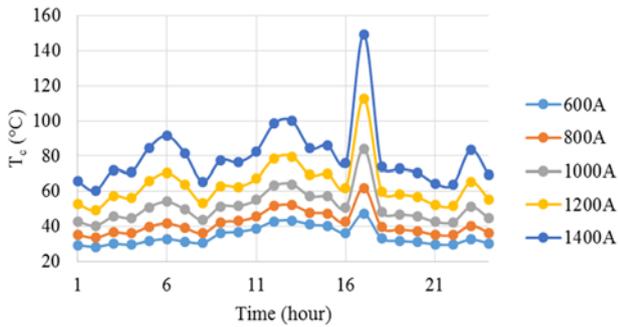


圖8 不同電流情形的線溫變化比較圖

除了線路載流量對於線溫有著高度影響性之外，氣象參數亦是不容忽視的關鍵因子。根據文獻可了解氣象參數中，影響線溫變化最劇烈者為環境溫度、風速、風向及太陽照射量等，其中又以環境溫度與風速的影響性最為劇烈(Kim *et al.*, 2006)。因此，本研究接著將觀察環境溫度與風速對IEEE Std 738-2006所推估的線路溫度值的影響。

在345 kV超高壓輸電線系統中，以中火－峨嵋紅白線路中的電塔編號1為例，其地理座標為經度：120.572，緯度：24.184，海拔高度：209.134 m。圖9是以電流800 A為假定的當下所承載的電流容量，橫坐標以小時為刻度，由世界統一時間(Coordinated Universal Time, UTC)時間的00點至23點的2013年2月21日中火－峨嵋紅白線路中電塔編號1的線溫變化。其中 T_c 為輸電線線路溫度； T_a 為環境溫度，由中央氣象局所發佈的實際歷史氣象溫度，使用最近鄰居法找尋該電塔參考的氣象溫度資訊； V 則為風速，同樣由中央氣象局所發佈的實際歷史氣象風速推得。在圖9中可看出線溫分佈於30 °C以上，同時發現當環境溫度上升時線溫亦跟著增加；更值得注意的是，當風速下降時線溫呈現急遽上升的現象。由此可知風速因子對於線路溫度有著相當高的影響性。

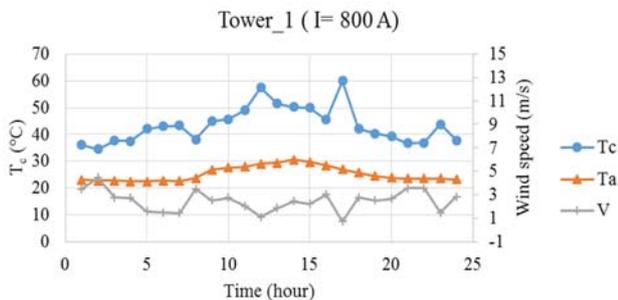


圖9 2013年2月21日中火－峨嵋紅白線電塔編號1 載流800 A的線溫分佈

若載流量提升觀察線溫分布的狀況，圖10則為通以1000 A為假定的當下所承載的電流容量的線溫分佈結果，相較於載流量為800 A的結果，提升200 A的載流量導致其線溫整體提升約10 °C，則分佈於40

°C以上。對於環境溫度與風速的影響則與載流800 A的結果相同，再次驗證環境溫度與風速對於線溫有著高度影響性，其中尤以風速因子最為劇烈。

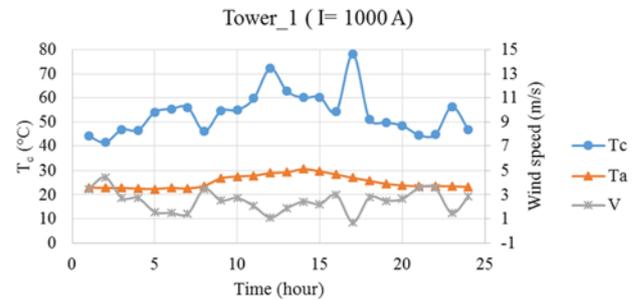


圖10 2013年2月21日中火－峨嵋紅白線電塔編號1 載流1000 A的線溫分佈

五、結論

由此得知，根據當地氣候資訊輔以IEEE Std 738-2006動態額定熱容量公式推估而得的線溫值是具有高可信度的參考性。此結果代表著若有成本考量下，並非每個電塔皆可配備即時監測設備。若該電塔缺乏即時監測設備，其線溫值亦可透過氣候資訊進行推估。但由於線溫資訊攸關輸電安全性，即時監測設備仍為勢在必行的課題，透過實際線溫的量測可再將推估值進行修正，避免因為錯估線溫導致輸電安全事故產生。

六、參考文獻

- 臺灣電力公司。2012。輸電線路操作準則。電力系統運轉操作章則彙編 5: 1-19。
- 臺灣電力公司。2013。架空輸電線之溫度與電流額定容量監測系統。臺電內部文件。
- IEEE std 738-2006 (Revision of IEEE Std 738-1993). 2007: Standard For Calculating The Current-Temperature of Bare Overhead Conductors
- Kim, D. M., J. M. Cho, H. S. Lee, H. S. Jung, and J. K. Kim. 2006. "Prediction of Dynamic Line Rating Based on Assessment Risk by Time Series Weather Model", International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2006