

輸電線路更新升級技術

目 錄	1
第一章 引言	3
一、目的	3
二、過程	5
第二章 德國輸電業概況	6
一、德國的輸電系統	6
二、德國的輸電產業	7
三、德國的電力公司	8
(一) 主要的電力公司	8
(二) 政府的相關政策	8
(三) 電力公司經營輸電業的困境	13
四、工程單位和設備廠商	15
(一) 廠商體系	15
(二) 設備器材之研發	16
五、學術機構和制訂規範組織	22
第三章 線路更新升級方法	23
一、保留鐵塔抽換導線	23
(一) ACSR	23
(二) TACSR	24
(三) GTACSR	26
(四) ZTACIR	35
(五) ACCR	37
(六) 導線綜合評比	37

二、重建鐵塔增加導線	38
三、重建鐵塔提高電壓	39
四、採縮合型線路技術	40
五、更新方法綜合評比	41
第四章 縮合線路技術	43
一、發展沿革	43
二、相間距離與送電容量	45
三、設計要素	47
(一) 相間距離的決定	47
(二) 導線在塔上的間距保持	48
(三) 導線在徑間的移位控制	48
(四) 雷害防治	49
(五) 便於運轉維護	49
四、縮合型線路案例	50
(一) 線路概要	50
(二) 懸擺式鐵塔	51
(三) 絕緣型橫擔	57
(四) 線路穩定度	59
第五章 結語	60
一、心得	60
二、建議	62

第一章 引言

一、目的

台灣的用電量持續成長，台灣電力公司(以下簡稱台電)民國 96 年度售電量成長率為 3%。為滿足未來的用電需求，台電無可避免必須新建輸電線路。而新建輸電線路所面臨的最嚴重問題之一，就是路權之交涉時程冗長，且受制於地主及地方政府之配合意願，工程進度非台電所能確切掌握。

前幾年台電由日本引進了「利用既有輸電線路來抽換高容量低弛度導線之技術」，希望讓提高送電量的工程，能避開路權交涉而縮短建造時程。然而這種更新輸電線路的方法有下述一些缺點和限制。

台電的輸電線路設計標準於民國 66 年賽洛馬颱風後曾經重新訂定。既有線路若係根據舊標準設計，保留之鐵塔將較新標準弱，導線與地面或建築物之距離也往往不符合新標準之要求。而且線路電流增加，地面之磁場將增加。這些都將造成運轉與維護上的困擾。

配合既有架空線路抽換高容量導線，線路兩端之開關設備必須擴充，需要變電所有足夠之空間。線路中間若有既設地下電纜，亦必須增加電纜數，若既設管路空間不足，則必須增加埋設管路。這些擴充的空間若無法取得，僅抽換架空線路的導線，是無法提高

送電容量的。

德國工業實力雄厚，尖端科技執世界牛耳。其有關輸電線路之工程技術及器材設備亦應比較先進。本次德國研習，希望能發現並引進其他適合的輸電線路更新升級技術，來幫助解決上述「利用既有輸電線路來抽換高容量低弛度導線之技術」的缺點和限制。

我國電業法正於立法院討論修正中，依行政院版本之草案第43條，將來輸電線路通過之土地須予補償，但因輸電線路通過之土地地主眾多，是否會因須一一交涉補償，更增加台電建設輸電線路之時間及成本，是一潛在顧慮。

配合電業法的修正，政府也正著手修訂「屋外線路裝置規」，對於一般民眾所關心的輸電線路所產生之電磁場問題，必然也會有比較嚴格的限制。

台灣地屬海島，許多重要的架空輸電線路，一直飽受鹽霧害之苦，礙子需經常清掃。前幾年由日本引進半導電釉礙子，於近海區換裝取代普通陶瓷礙子，希望能免除礙子清掃工作，但效果不如預期，已經暫停更換。

本次德國研習，也希望能了解德國電力公司的規劃，工程單位的設計及設備廠商的研發方向，作為台電未來在更新輸電線路時，能同時兼顧解決上述路權交涉補償、電磁場及鹽霧害等問題之參考。

二、 過程

本次德國研習，從 97 年 8 月 16 日至 97 年 10 月 12 日，共計 8 週。前 3 週承蒙駐註代表處經濟組鼎力協助安排，於杜塞爾道夫的 3M，柏林附近的 WDI 及 Vattenfall 參訪及研習。後 5 週於史圖嘉特的 Pfisterer 參訪及研習。

在 3M 主要是研習最新超輕以強化纖維管來代替傳統鋼心的 ACCR 導線技術，參訪 3M 在德國的研發總部。

在 WDI 主要是研習大容量低弛度的 GTACSR 及 ZTACIR 導線技術，聽取導線構造及架設 GTACSR 的方法，參訪導線製造工廠。

在 Vattenfall 主要是研習輸電線路之規劃、設計、施工、維護技術。與其線路設部門人員交流輸電線路之設計準則及路權交涉經驗。與其線路維護部門人員討論電磁場抑制、礙子清掃、活線作業、鹽霧害及雷害防治等議題。並且參訪其調度中心、發電廠、開關廠及輸電線路等電力設施。

在 Pfisterer 主要是研習電纜的接續匣、終端匣及架空線路的聚合礙子及縮合線路技術。與其地下電纜部門人員討論電纜匣的研發及最新的輸電設備發展方向。與其架空線路部門人員討論聚合礙子的研發及最新的輸電工程發展方向。期間也走訪設備製造工廠及大電力實驗室，並且參觀輸電線路。

第二章 德國輸電業概況

一、 德國的輸電系統

德國的輸電系統電壓約可分為 DC、380kV、220kV、110kV 等四級。它們的分布大致如圖 1.1 所示。DC 均為海底電纜。110kV 有部分為配電業所擁有。220kV 逐漸被改建淘汰。380kV 為德國輸電線路之骨幹。德國的輸電系統與荷蘭、法國、瑞士、義大利、捷克、波蘭等周圍比鄰各國及北歐諸國相連。

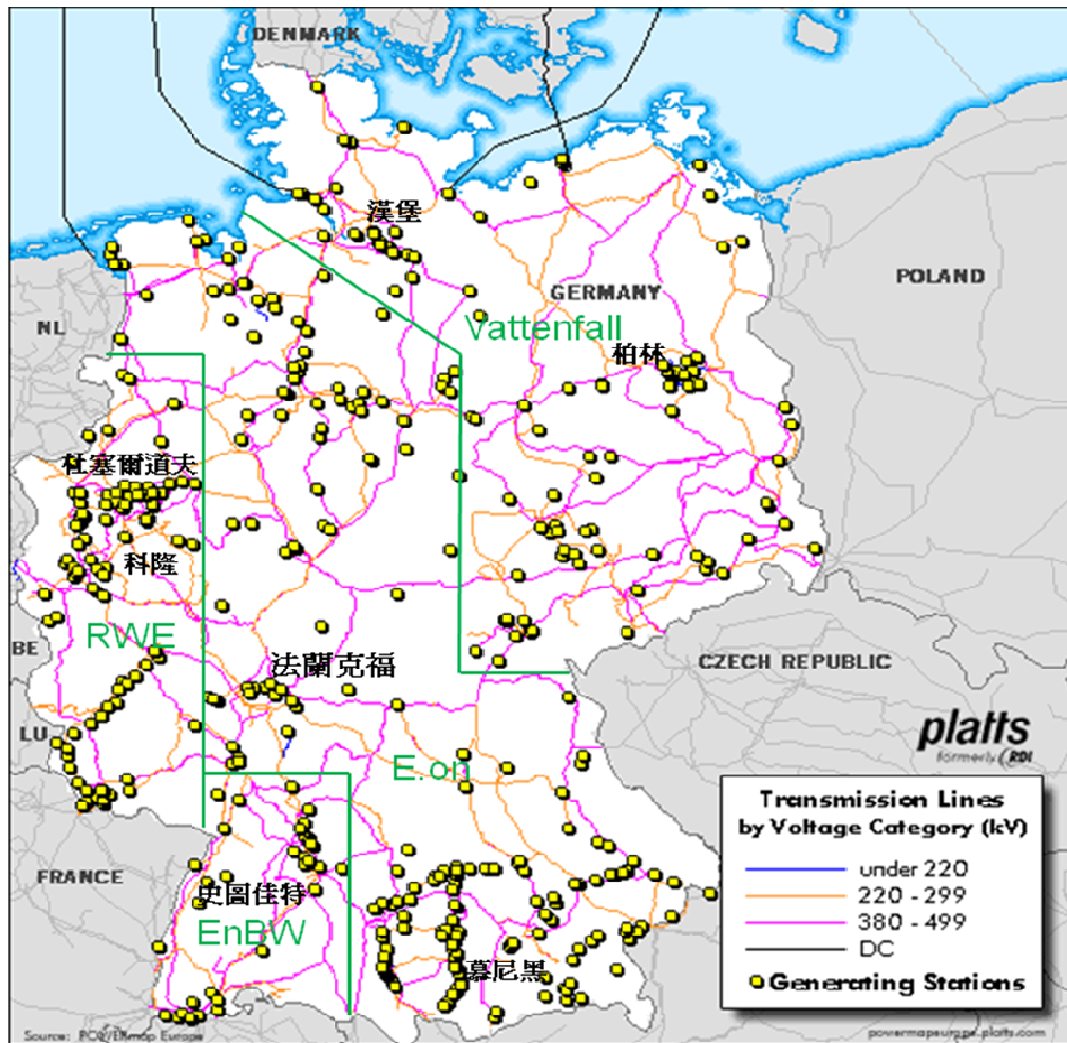


圖 2.1 德國輸電線及輸電公司分布

二、 德國的輸電產業

構成德國輸電業產業的成員，可區分為電力公司、工程單位、設備廠商、學術機構、訂定規範組織等五種。成員間的上下游關係，大致可以圖 2.2 來表示。

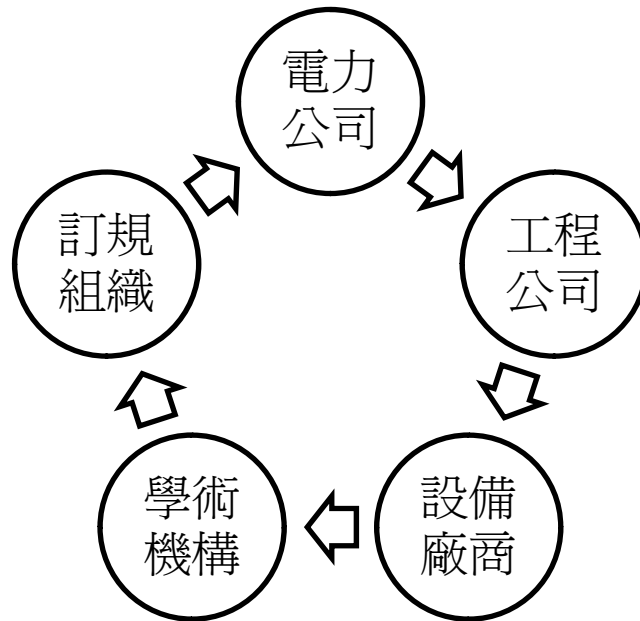


圖 2.2 德國輸電產業鏈結構

電力公司規劃並提出興建輸電工程之需求及提供資金。工程單位負責設計、施工、採購設備及安裝。設備廠商研發、製造輸電器材，大型的設備廠商(例如 ABB、西門子)又有一群中型或小型設備廠商為其協力廠商。學術機構(例如 Cigre)與各型設備廠商合作研發新器材或工法，發表論文，接受訂定規範組織之委託撰寫器材規範。訂定規範組織參考學術機構之意見，訂定或修訂標準器材規範(例如 IEC)並公佈發行。電力公司再參照標準規範規劃輸電工程。

三、 德國的電力公司

(一) 主要的電力公司

德國的電力公司有 900 多家，大多為獨立發電公司(IPP)或配電公司。配電公司大多為地方政府所擁有或持股。德國主要的電力公司有四家，按規模大小順序排列為 E. on、RWE、Vattenfall、EnBW。這四家電力公司囊括了全德國約 80%的發電量及 100%的輸電網路。它們營運的地區範圍大致如圖 2.1。

(二) 政府的相關政策

1. 自由化及民營化

德國電業已經自由化及民營化。德國沒有綜合電業，即沒有同時經營發、輸、配電業的電力公司。但電力公司可以同時經營礦業。例如德國東北部地區（包含柏林及漢堡德國之第一、二大城）最主要的電力公司 Vattenfall 即擁有屬於自己的煤礦場。該公司不但經營發電及輸電業，同時也於國內外銷售褐煤。德國政府為了加強電力市場的競爭，及讓獨立發電公司(IPP)有更公平連離(access)輸電網的機會與待遇，正在研擬要求電力公司將輸電業與發電業分開獨立經營的政策，即電力公司不得再同時經發電與輸電業。據說 Vattenfall 為了因應這種情勢，正在接洽出售其輸電網給 3M。

2. 環境保護政策

德國人民的環境保護意識十分強烈，政府約束電力公司之相關法令日趨嚴苛。例如：核電機組運轉 32 年須除役。發電公司必須有一定比例以上之天然氣、風力、太陽能發電。輸電公司必須保障獨立發電公司(IPP)之再生能源優惠收購價格等規定。

因為天然氣或再生能源的發電成本比燃煤或核能高許多，德國政府鼓勵再生能源及潔淨電力(green power) 的政策，使得德國的電價是全歐洲最貴的，但也因此造就了德國再生能源產業的蓬勃發展。今日德國生產的風力發電機在全世界的市場佔有率是最高的，而在減少或淨化燃煤電廠的排放物質方面，德國的電力公司也不斷地有突破性的技術發展，據說 Vattenfall 已經開發出 CCCS(Carbon Capture Convey Storage)技術，能捕捉燃煤發電機所排放出來的二氧化碳，加以處理，再運回礦場埋存。

由於風力及太陽能發電裝置散播範圍廣泛，必須建設許多輸電線路來將其生產之電力輸送至電網。且由於 2006 年 11 月 14，德國某一輸電線為配合船隻出港暫時停電，不意引發了連鎖效應，造成歐洲大停電，使政府及電力界驚覺電力網之脆弱。此後德國大幅增加電網建設經費，全德每年投資超過 20 億歐元，占電力總投資 50%以上。

Vattenfall 發電燃料結構與台電相似，燃煤發電仍為最主要

的發電方式，其次是核能發電，其餘為風力、太陽能等再生能源發電。

圖 2.3 是 Vattenfall 在 Boxburg 的燃煤發電廠，以其自產的褐煤為燃料。本人參訪期間，此電廠正在分階段進行更新及擴增機組的計劃，圖片中細長的三支黑煙囪已經廢棄，由粗短的三支白煙囪取代，據說排放的廢氣甚為乾淨，幾乎沒有污染物。



圖 2.3 Vattenfall 的電廠更新

配合 Boxburg 電廠機組的擴增及更新，必須增建條兩回 380kV 的輸電線路，來將電力輸送至 Lubbenau 附近的開關廠。這

條輸電線路係由 Vattenfall 自己的工程單位設計及發包。
該線路為傳統的鐵塔線路，鐵塔均已裝建完成，導線及地線亦均已延放於鐵塔上，正在進行緊線作業。

圖 2.4 是施工人員在 Boxburg 電廠出口的輸電線路鐵塔下方組裝礙子連，這座鐵塔使用的仍為普通的陶瓷礙子。



圖 2.4 配合電廠更新施工中之輸電線路

圖 2.5 為距離 Boxburg 電廠出口約 1 公里的輸電線路鐵塔，該座鐵塔正進行緊線作業中，礙子連已吊掛於鐵塔上，由圖片中可以看出一側使用玻璃礙子，另一側使用陶瓷礙子，使用玻璃礙子的，係遠離電廠的一側，使用陶瓷礙子的，係接近電廠的一側。



圖 2.5 輸電線路鐵塔上的礙子連

目前為止，在比較接近發電廠的鐵塔，其上的礙子連，Vattenfall 仍大多使用陶瓷礙子。據線路維護人員表示，在電廠還沒有更新以前，由於電廠所排放的廢氣，對礙子連的污染甚為嚴重，起初需要約每年清掃兩次礙子，後來使用矽油膏塗佈於陶瓷礙子表面，防制污染效果良好，僅約需每三年清掃一次礙子。而於電廠更新以後，因為電廠所排放的廢氣十分乾淨，僅含少許的污染物，偶有黏附於礙子表面的污染物，很快就會被雨水沖洗乾淨，因此不再需要清掃礙子工作了。

圖 2.6 為引進 Lubbenau 附近開關廠的輸電線路。在鐵構上

的礙子連所使用的仍為陶瓷礙子，但在鐵構後面，許多開關設備的套管，已經使用聚合礙子了。



圖 2.6 開關廠的礙子連

(三) 電力公司經營輸電業的困境

1. 路權取得困難

德國的電力公司興建輸電線路，鐵塔基礎用地是不需要取得所有權的。但電力公司必須交涉徵得整條線路寬度兩倍範圍內所有土地，當然包含鐵塔基礎用地地主之同意，並給予補償及取得使用權。經交涉補償所取得的使用權即所謂的路權(right of way)。

由於線下地主人數眾多，民間環境保護意識強烈，地主對線路產生

之電磁場多有疑慮，路權交涉人員必須一一化解，協商議定補償價格，工作倍嘗艱辛。對 Vattenfall 來講，還有前東德留下的地籍資料混亂問題，許多土地補償紛爭，尚在法院審理中，使得路權取得工作更顯困難。

由於新的輸電線路路權取得不易且曠日費時，因此德國的電力公司盡量利用既有的輸電線路路權來更新設備提升送電量。Vattenfall 即計劃將其境內所有的 220kV 輸電線全部提升為 380kV，以滿足持續成長之用電需求，並逐漸達成將其輸系統電壓簡化成單一層級之長遠計畫。

由於電力公司必須盡量利用既有的路權或土地來擴充輸電量，新建輸電線路之空間受到限制，需要設備廠商及工程單位開發小尺寸大容量之設備，及縮小設備佔地面積的工程技術，以充分利用難能可貴的路權及土地。

2. 熟練技術人力短缺

由於德國長久以來出生率為負，年輕人又喜歡往大都市集中，不願意在荒山闢野從事輸電線路的建設與維修工作，富經驗的技術人力逐漸老化，年輕的技術人力不易培植，造成熟練技術人力極度短缺現象。需要設備廠商開發重量輕、免維護及易安裝之輸電器材，以節省技術人力。

3. 建設資金趨緊

近年原物料價格上漲，環境保護法今日趨嚴苛，電力公司獲利能力大不如前。加以最近全球金融風暴，景氣衰退，可以預期德國的電力公司投入新興輸電計畫及維護輸電設備的預算將緊縮，因此也希望設備廠商開發低成本的器材。

四、 工程單位和設備廠商

(一) 廠商體系

工程單位負責輸電線路的設計、施工、設備採購及安裝。在德國，有時工程單位是屬於電力公司的一個部門，有時電力公司將輸電線路的設計、施工、設備採購及安裝等工作之部分或全部外包，委託給工程公司或設備廠商施作。

ABB 和西門子是德國最大的兩家輸電設備製造廠商，他們也承攬輸電工程，從事輸電線路及變電所的設計及施工。大型的設備廠商常常與中型或小型設備廠商合作，提供輸電工程所需要的各項設備、材料、機具及零件等。例如 Pfisterer 製造的電纜接續及終端匣，供應 ABB 製造的電纜接續或西門子製造的 GIS 開關與變壓器連接。

大型的設備廠商向國外銷售產品及承攬工程，中小型的設備廠商跟著大型廠商外銷零組件。中型的設備廠商也能自行在海外設立據點，銷售產品。近年來，基於市場、成本或策略的考量，設備廠商之間

興起整併風潮，且有不少成了跨國集團。

德國的鋼鐵及化學等工業基礎雄厚，材料科技處於領先地位，且位處歐洲的中心，屬於歐體的一員。設備廠商的原料、機器及人力，都能方便且能以最經濟的方式自由取得。但相對的，也必須面對充分的競爭。德國政府對輸電產業沒有任何的保護政策。

(二) 設備器材之研發

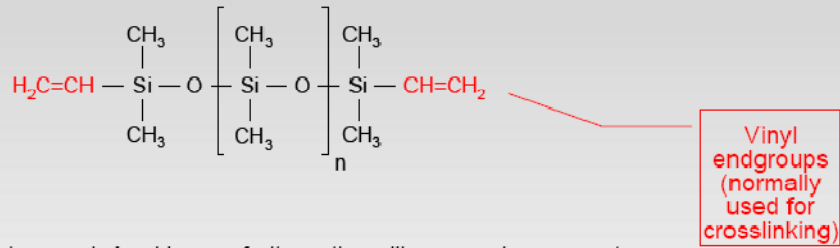
1. 高容量低弛度導線

傳統導線的材料是鋁和鐵。導線製造廠商為了提升導線的送電容量，不斷地研發比鋁更耐高溫的鋁合金材料。同時為了抑低導線的弛度，也繼續地研發不隨溫度升高而膨脹的鐵合金材料。德國的導線製造廠商，例如 WDI，能製造各型「金屬」製的導線。然而最近 3M 在美國的工廠，發展了以鐵與玻璃「合金」製成的強化纖維束為「鋼心」的導線，減輕了導線的重量，希望能抑低導線的弛度。有關導線技術的發展，將於下一章中進一步說明。

2. 抗壓耐照矽膠聚合礙子

聚合礙子問世已超過 30 年，一直希望能取代笨重易碎的陶瓷或玻璃礙子。早期的聚合礙子係以 EPDM 為材料，EPDM 雖然比陶瓷或玻璃輕，但比較容易被污染物黏附及因高溫或日照而硬化。目前大多數的聚合礙子是以矽膠(Silicone Rubber) 為材料。矽膠的分子式如圖 2.7。

Silicone Rubber - Chemical Structure



- inorganic backbone of alternating silicone and oxygen atoms
- organic groups attached to the silicone atoms
- High Bonding energy of Si-O bond: 460 kJ/mol (due is substantial ionic character); for comparison: bonding energy of C-C is only 345 kJ/mol
- Intrinsic UV resistant
- Molecular weight of single molecule (n) determines the consistency

圖 2.7 矽膠的分子式

矽膠礙子具有良好的厭水性(hydrophobicity)。矽膠的分子甚輕，能不斷地向沾附於礙子表面的污染層遷移，如圖 2.8，藉此把矽膠礙子的厭水性轉移給污染層，使得矽膠礙子能耐污染，號稱可以免清洗。

Special Property - Hydrophobicity Transfer

- migration of molecule groups from the bulk silicone to a foreign pollution layer on the surface
- this transfer works for longer than the technical lifetime

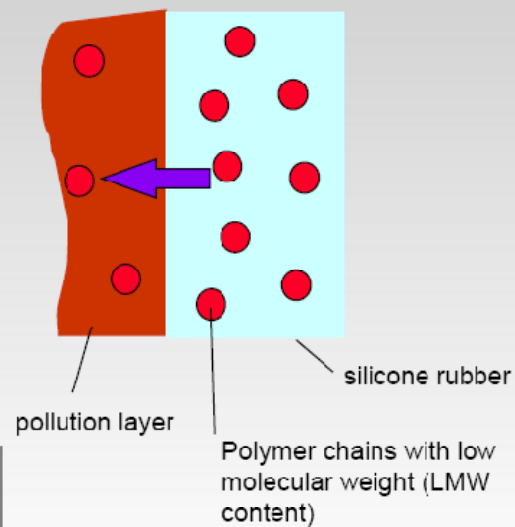


圖 2.8 矽膠礙子厭水性的轉移

近年矽膠的材質由室溫固化(Room Temperature Vulcanizing)精進到高溫固化(High Temperature Vulcanizing)，如圖 2.9，使矽膠聚合礙子更能抗紫外線，裝設於屋外的設備上會更耐久。

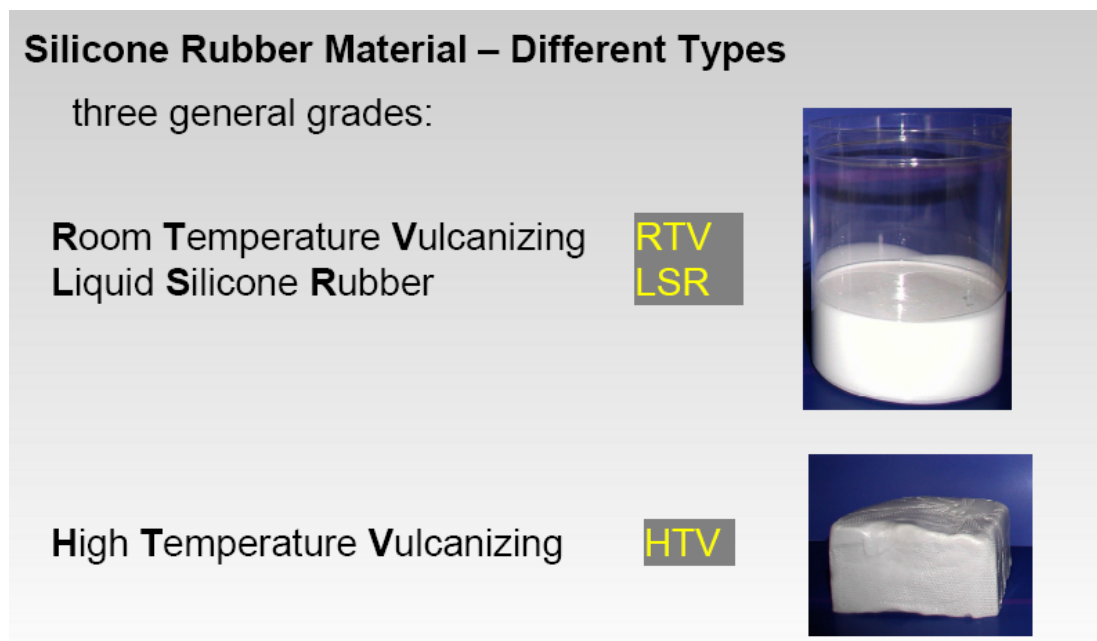


圖 2.9 矽膠材質的進化

在某些特別的地區，聚合礙子有被大鳥啃蝕的紀錄，根據國外的文獻，即使聚合礙子的葉片(Sheds)被啃蝕大半，礙子串軸心(core)，以強化玻璃纖維製成的管幹(Rod)，強度不受影響，仍然能夠支持或懸掛導線或構件。

台電引進使用聚合礙子也已超過 10 年，其重量輕及耐污染的特性能夠肯定，但目前最大的問題是使用於高張力的線路有顧慮，因為曾經發生過聚合礙子串鬆脫的事故。聚合礙子串的結構如圖 2.10。其中鐵件(fittings)是用來連結礙子與鐵塔，必須與玻璃纖維製成的管幹

(Rod)有完妥的結合，並緊密包覆，否則化學物質容易堆積於接合處侵蝕鐵件，造成鬆脫。而如何使鐵件與玻璃纖維有完密的結合，這就需要比較高超的製造技術來達到。

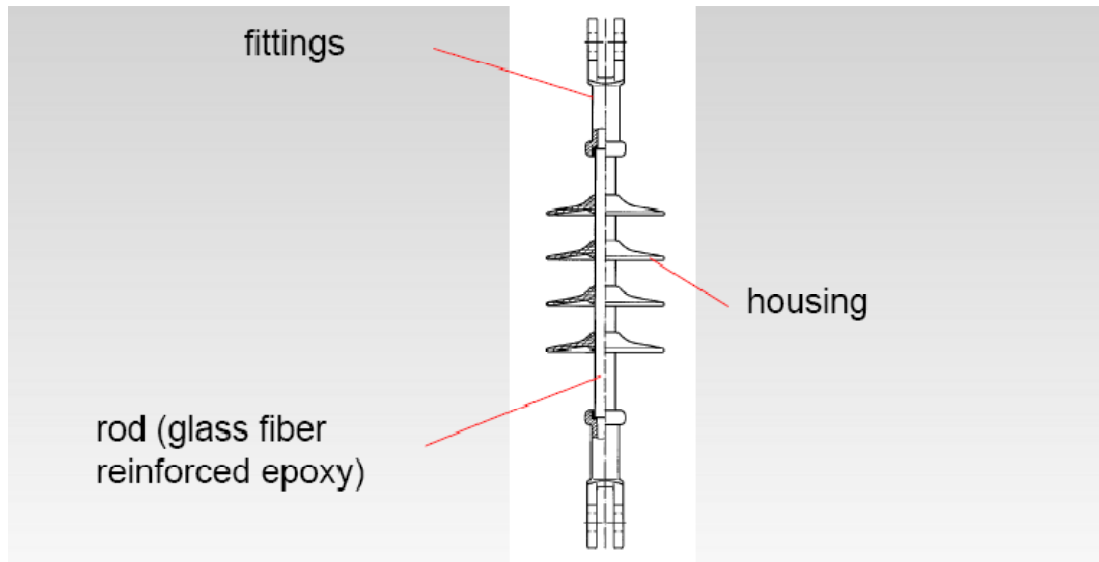


圖 2.10 聚合礙子串的結構

強化玻璃纖維管重量輕、韌度高，如圖 2.11。

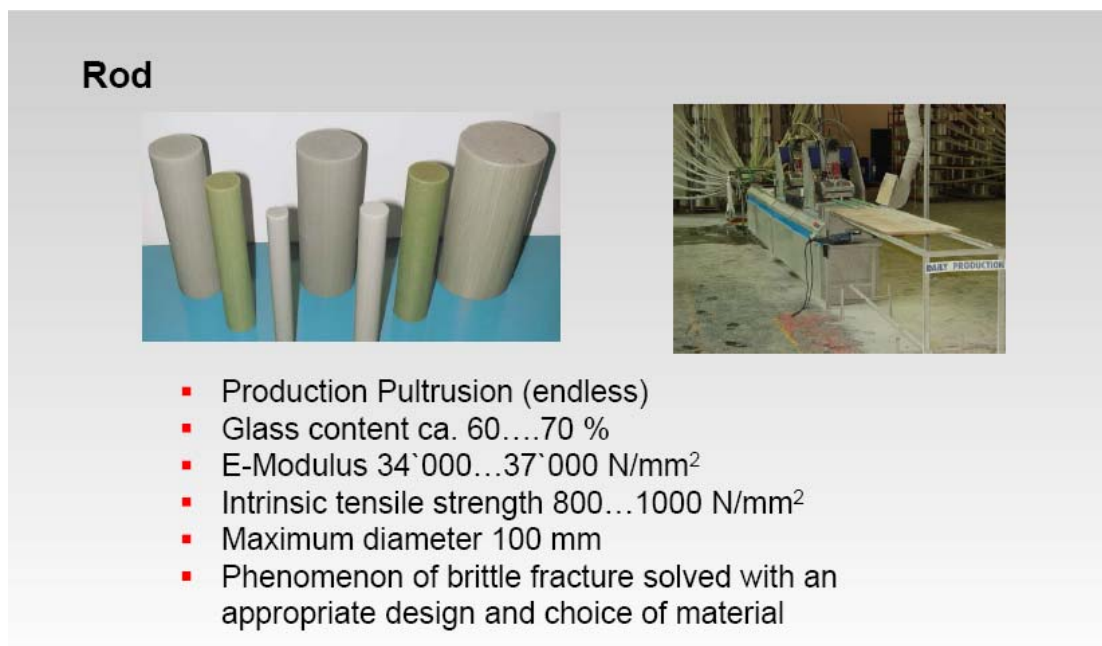


圖 2.11 強化玻璃纖維管

大直徑的中空(hollow core) 玻璃纖維圓柱管，可以增加抗壓能力，被用來製造需抗高壓的支持碍子及套管，如圖 2.12。

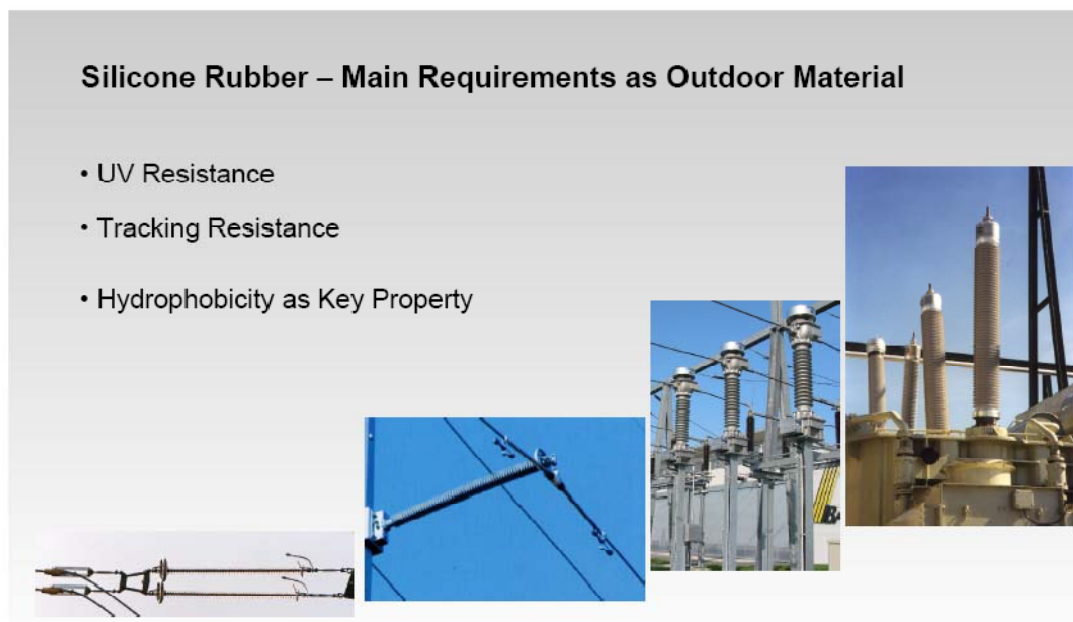


圖 2.12 屋外支持碍子及套管

3. 乾式插入型電纜終端匣

乾式插入型電纜終端匣的的開發，是希望電力電纜也能像家用電器的電源線一樣，使用插頭及插座，容易插入及拔出。

一般GIS或變壓器的電纜終端匣Housing是封裝絕緣油或SF6氣體。想把電纜頭與終端匣連接時，必須先把終端匣Housing內的氣或油卸除，拆開Housing，然後把兩者的導體壓接相連，再封裝Housing，灌入油或氣。通常安裝一組電纜終端匣約需要一天的時間。

乾式插入型電纜終端匣係使用矽膠為絕緣體，不需要封裝油或氣之Housing，僅需夾住電纜頭之Bushing。而電纜頭是靠彈簧的力量與

終端匣內導體緊密相連，其構造詳圖 2.13。

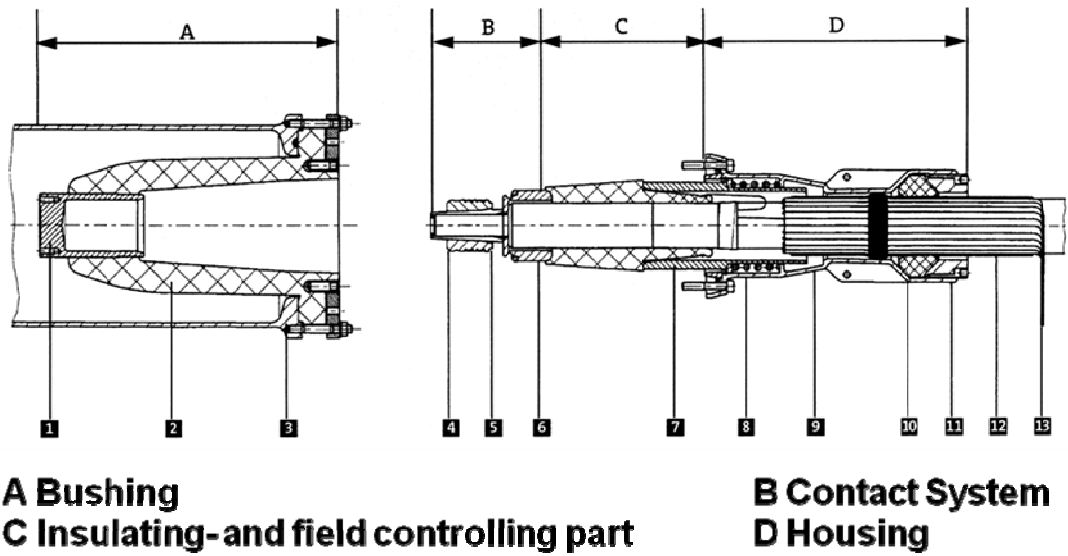


圖 2.13 乾式插入型電纜終端匣構造

由於乾式插入型電纜終端匣，電纜頭插入或拔離終端匣均不需要拆封 Housing，現場安裝容易，通常僅需要約一個小時，便於新設備的連接及舊設備的訂期測試保養。惟目前該型電纜終端匣尚只適用於 245kV 以下電壓等級的設備。其運用的場合如圖 2.14。

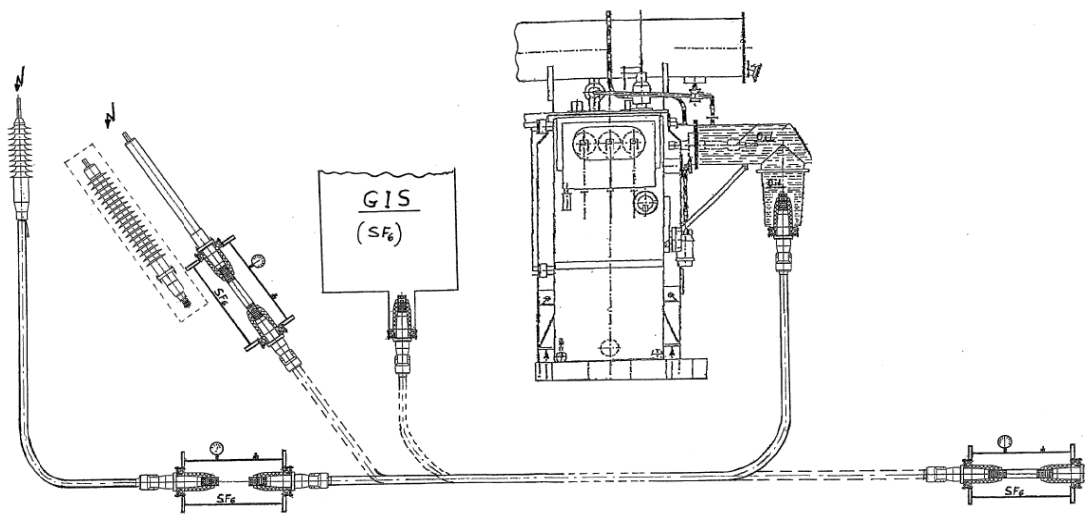


圖 2.14 乾式插入型電纜終端匣連接輸電設備

4. T型電纜接續匣

T型電纜接續匣構造詳圖 2.15，係以 SF6 絕緣，體積龐大，需要較大的人孔讓地下電纜能在人孔中分歧。台電應可考慮使用於用戶線，可以避免讓電纜經過用戶變電站分歧，用戶間互相影響的困擾。

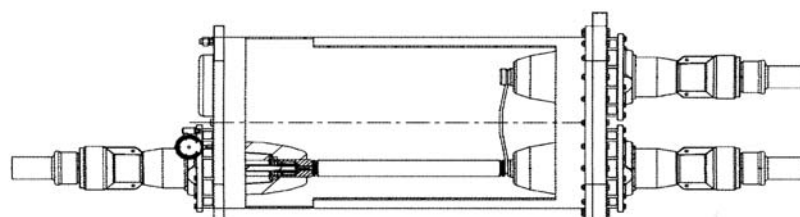


圖 2.15 T型電纜接續匣構造

五、學術機構和制訂規範組織

Cigre 是歐體最重要的電力研究機構，大部份 IEC 的規範均是委託 Cigre 的技術小組編擬，其地位相當於北美的 EPRI。原則上 Cigre 每項重要輸電器材，例如碍子、導線、電纜、接續匣都會有一個委員會，每一項器材委員會，會邀請每個國家推派一人為委員。

因為 Cigre 的委員或工作小組成員大多來自於工程公司或設備廠商，而 Cigre 又是 IEC 規範的主要編擬者，因此三者的關係密切。也因為 IEC 是國際公認的標準規範之一，因此設備廠商新開發的器材，容易被世界各國的電力公司及客戶所接受。

第三章 線路更新升級方法

整理目前國內外較常用的輸電線路更新升級方法有保留鐵塔抽換導線、重建鐵塔增加導線、重建鐵塔提高電壓、採用縮合線路技術等四種，將分別說明如下。

一、 保留鐵塔抽換導線

保留鐵塔抽換導線通常是將既有鐵塔上的普通鋼心鋁絞線 ACSR 抽換為高容量低弛度的耐熱鋼心鋁絞線。高容量低弛度的導線目前有 GTACSR、ZTACIR、XTACIR 及 ACCR 等。各種導線之主要區別將簡單說明如下，但其中 GTACSR 因國內尚未使用過，而其製造及緊線施工方式又比較特殊，將予以比較詳細的說明。

(一) ACSR

早期以注油木桿或水泥桿為支持物架設的輸電線路，一般係採用全鋁線 AAC(All Aluminium Conductor)為導線來架設。目前的輸電線路則多以鐵塔為支持物，一般係採用可以承受較高張力的鋼心鋁絞線 ACSR(Aluminium Conductor Steel Reinforced) 為導線來架設。因為鐵塔線路的跨距長，需使用較高的架線張力，可以避免鐵塔間的導線太過下垂，使得線下安全距離不足，或避免使用太高的鐵塔，不符合經濟效益。

鋼線的破壞強度比鋁線大，鋼心鋁絞線係將鋼素絞合後，再將鋁素

線絞合於鋼絞線外層，因此可以提高導線整體的破壞強度，因而可以承受較高的張力。

(二) TACSR

當鋁線的運轉溫度大於 90°C 時，抗張強度會顯著的衰減，若時間持久，熱軟化(annealing) 效應會不斷地累積，並且隨著溫度的升高，軟化現象會快速地變得嚴重。而鋼心則於運轉溫度小於 300°C 內，不會顯著受到影響。

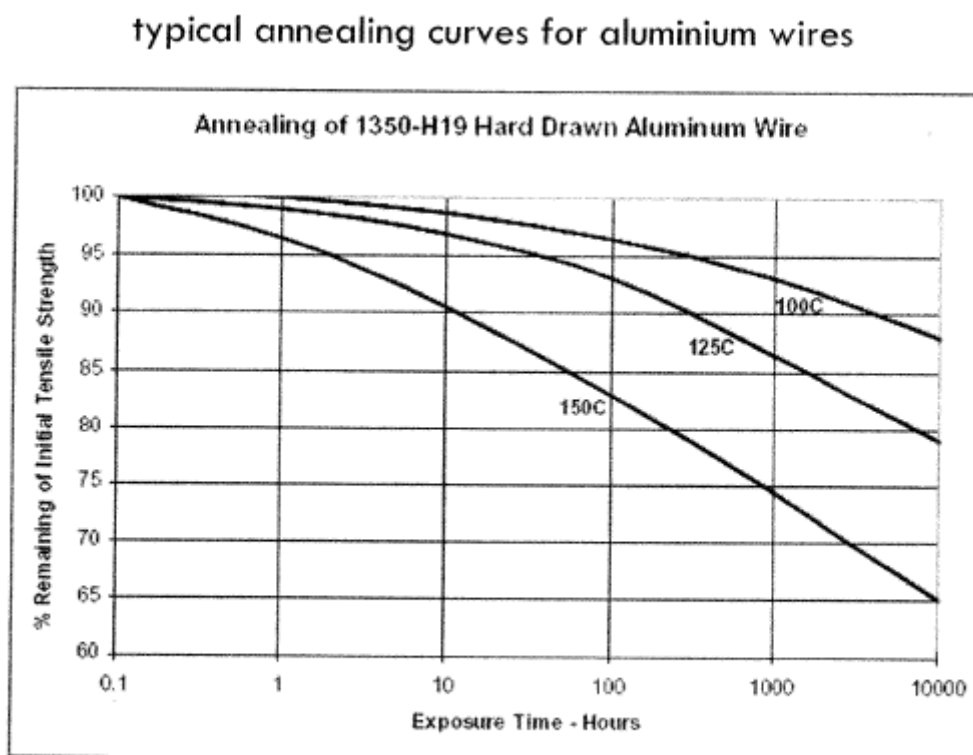


圖 3.1 鋁線的軟化效應

因為鋼心的容許運轉溫度可達 300°C ，而一般鋁線的容許運轉溫度只有 90°C ，所以只要提高鋁線的運轉溫度，就可達到提升送電容量的目的，因此導線製造廠商以在鋁中加入鎂元素的金屬合金，來製成耐

熱鋁線，與鋼心分別絞合，成為耐熱鋼心鋁絞線 TACSR(Thermal Aluminium Conductor Steel Reinforced)，各型耐熱鋁合金之容許常時及緊急運轉溫度如表 3.1。

thermal-resistant aluminium alloys

alloy	tensile strength min (kg/mm ²)	conductivity (% IACS)	max. temperature operation	
			continuous	emergency
HAl	16,2	61,0	90	120
58TAl	16,2	50,0	150	180
60TAl	16,2	60,0	150	180
KTAl	22,9	55,0	150	180
UTAl	16,2	57,0	200	230
ZTAl	16,2	60,0	210	240
XTAl	16,2	58,0	230	310

表 3.1 耐熱鋁合金之特性

TACSR 較早被民間獨立發電業的輸電線路所普遍使用，例如台塑的麥寮~嘉民 345kV 線。台電係於民國 90 年代初期，因為建造大潭~龍潭 345kV 線，才開始使用 TACSR。

一般使用的耐熱鋼心鋁絞線，係為容許常時運轉溫度為 150°C 的耐熱鋼心鋁絞線。因為使用更高容許運轉溫度的導線，考慮導線達到的弛度必然更大，鐵塔就要設計得更高，不一定符合經濟效益。而欲利用 TACSR 來抽換既有鐵塔線路的 ACSR 以提高送電容量，更是不太可行的，因為 TACSR 的運轉溫度高，弛度也變大，若無法保持線下安全距離，則既設鐵塔仍必須拆除重建增高。

(三) GTACSR

為了提升導線的容許運轉溫度，又可保持導線的低弛度，導線製造廠商以特殊的製程，在鋁線層與鋼心之間保持間隙 (gap)，製成間隙型耐熱鋼心鋁絞線 GTACSR (Gap type Thermal Aluminium Conductor Steel Reinforced)，傳統的 GTACSR 構造如圖 3.2。

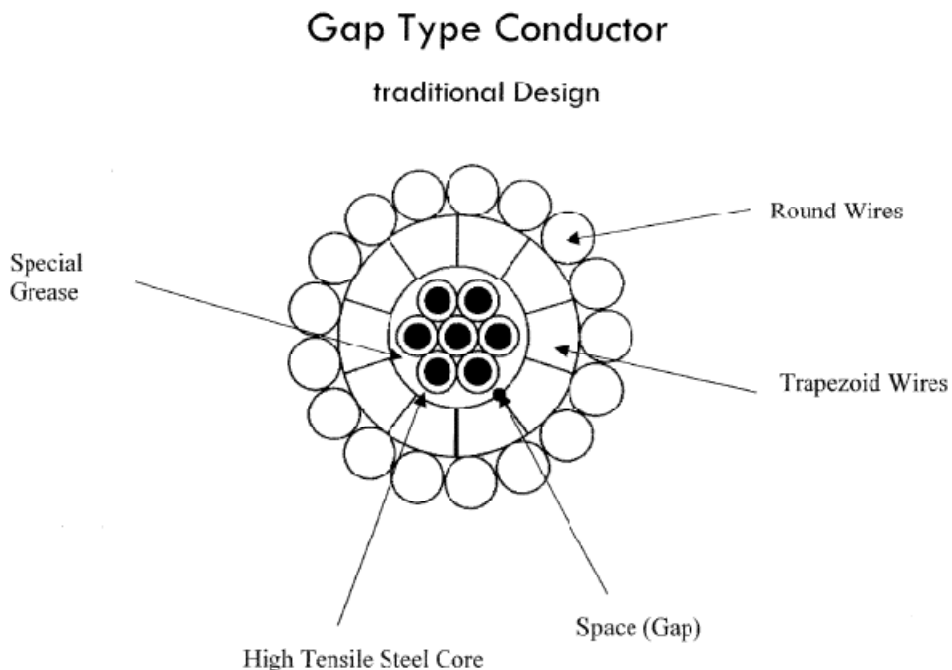


圖 3.2 傳統的 GTACSR 構造

鋼心鋁絞線 ACSR 或耐熱鋼心鋁絞線 TACSR，在製造時，鋼素線先絞合完成，外面再圍繞絞合鋁素線，絞合完成後，內層鋼絞線與外層鋁絞線是緊密結合的，鋼心與鋁線會同步伸縮位移。

GTACSR 是在外層鋁線絞合時以特別的模具，參考圖 3.3，使得鋼絞線與鋁絞線層之間保持間隙，同時於間隙內充塞耐熱潤滑劑 (grease)，即鋼心與鋁線不是緊密結合的，鋼心與鋁線不會同步伸縮位移。

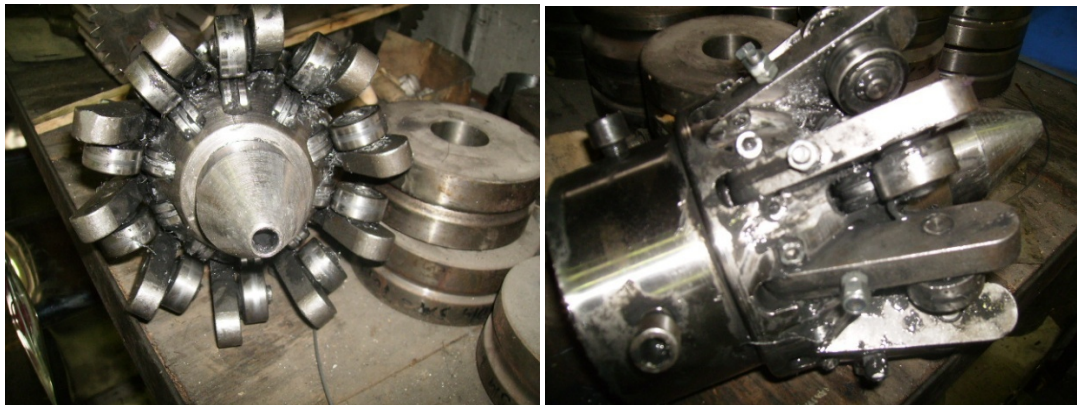


圖 3.3 製造 GTACSR 的模具

ACSR 的溫度膨脹係數(thermal expansion coefficient)是鋼心與鋁線合成的溫度膨脹係數，也就是隨著運轉溫度的升降，導線伸縮的行為係受鋼心與鋁線整體合成的溫度膨脹係數所控制。

GTACSR 於緊線時，僅有鋼心承受機械應力，鋁線層是不起作用的。

即緊線時，鋁線層是不受張力的。鋼心與鋁線層之間的 gap 以及

grease 讓鋼心能「自由」移動。

當 GTACSR 導線的運轉溫度高於緊線時的溫度，鋁導線層將不受舒張力(tension)，或者反受壓縮力(compression)，這時候導線的伸縮行為單由鋼心所主控，即導線的溫度膨脹係數為鋼心的溫度膨脹係數， $11.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

當 GTACSR 導線的運轉溫度低於緊線時的溫度，鋁導線層與鋼心同時承受舒張力(tension)，這時候導線的伸縮行為由鋼心與鋁線整體合成的溫度膨脹係數所控制，即導線的溫度膨脹係數為一般 ACSR 的溫度膨脹係數 $20 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

由於導線的伸縮行為以緊線時的溫度區分，當送電量增加，導線溫度升高，導線僅隨鋼心伸長，因此可以達到抑制弛度的效果。而緊線溫度，亦成為弛度計算之重要參數，稱為轉換溫度點 (Knee point)。

為了讓緊線時，GTACSR 之鋁線層不受張力，當 GTACSR 延放於鐵塔上後，一端完成緊線，另一端會先把線尾之鋼心與鋁線分開，牽引鋼心使導線達最終弛度，再分別壓縮鋼心及鋁線於夾板上，然後銜接礙子連固定於鐵塔。

以往 GTACSR 的緊線施工方式是於導線拉到定位後，在鋼心承受高張力的情況下，以人力在鐵塔上先把導線外層的鋁線剝開，露出鋼心壓接，如圖 3.4，具有危險性，國外曾經發生意外。

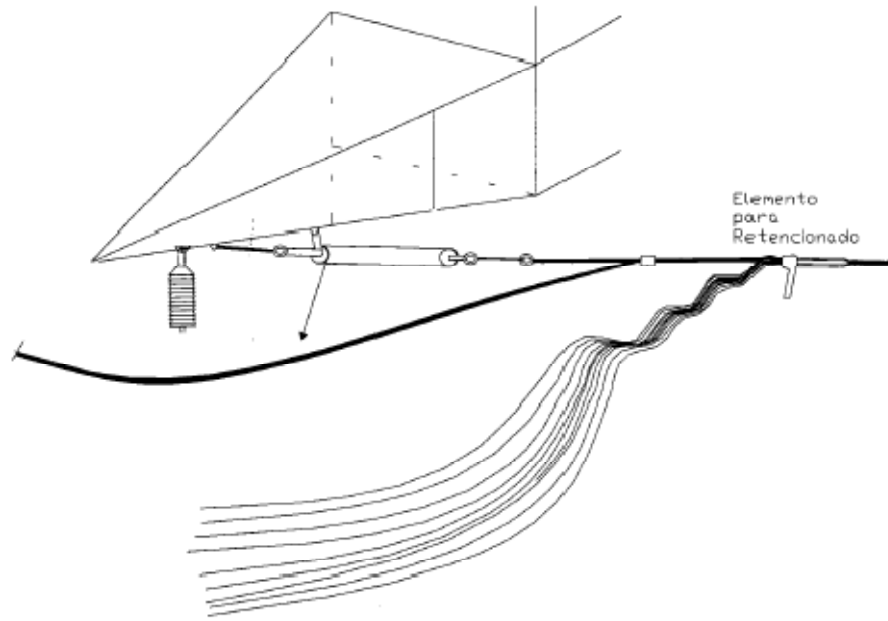


圖 3.4 以往 GTACSR 的緊線工法

現在 GTACSR 的結構已有改變，在鋁導線層與鋼心的 gap 之間，有鋁管，grease 被包在鋁管中，不易散失潤滑的效果，也減少施工人員衣物被 grease 玷污的機會。現代的 GTACSR 構造圖 3.5

Gap Type Conductors

TREFINASA – SAPREM design

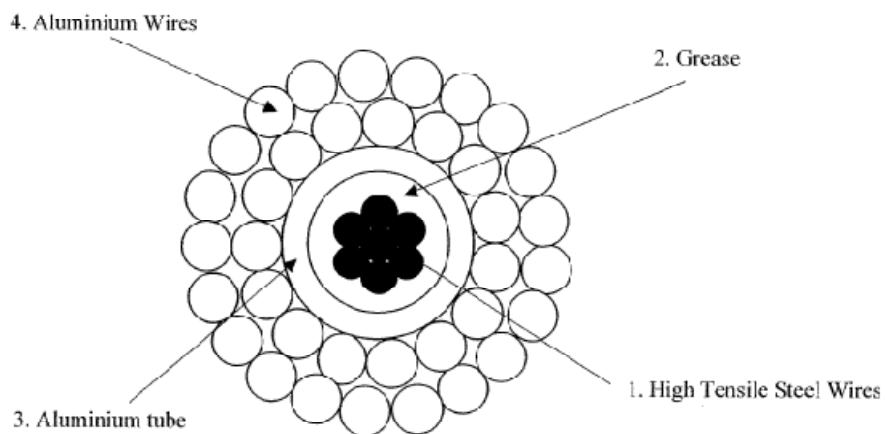


圖 3.5 現代的 GTACSR 構造

現在也已製造出 GTACSR 專用的緊線機(tensioning machine)，並採用新的緊線工法，可以降低危險性。一個緊線區間，也就是兩座耐張鐵塔之間，現代的緊線施工步驟，說明如下。

第 1 步：像一般延放 ACSR 導線一樣，將 GTACSR 延放於鐵塔上，臨時緊線弛度不超過最終弛度之 70%，如圖 3.6。

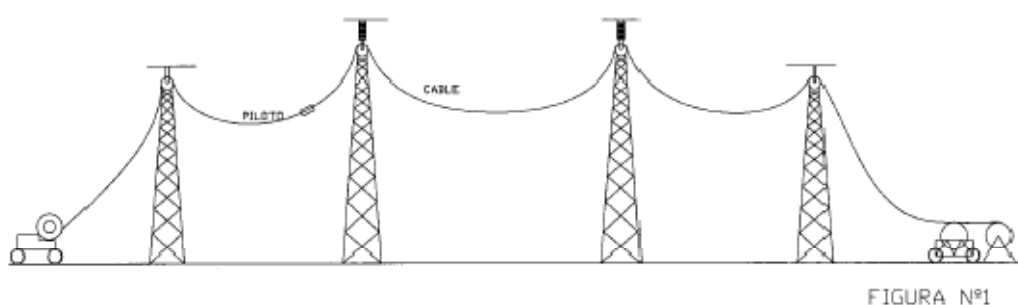


圖 3.6 完成延線及臨時緊線

第 2 步：將一端的耐張鐵塔上的 GTACSR 剪斷，壓縮導線於終端夾板，連接耐張礙子連，固定於鐵塔上，終端夾板壓接之施工方式與 ACSR 一樣，如圖 3.7。

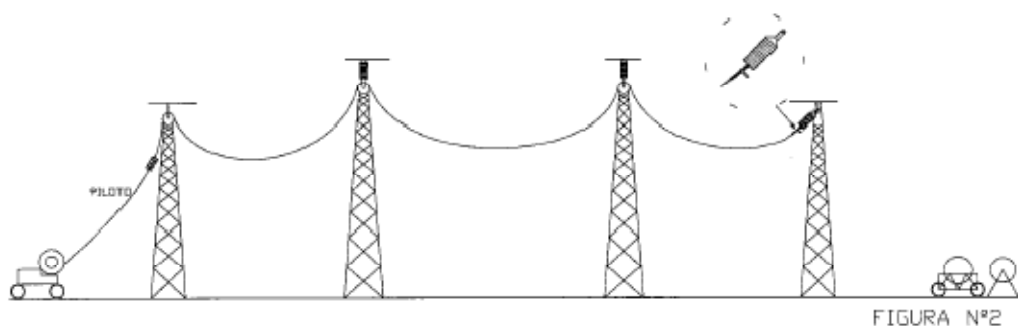


圖 3.7 完成一端的終端夾板壓接

第 3 步：於另一端耐張鐵塔上，以鋁夾線器(Aluminium come-along

clamp)及拉吊機拉引導線至其線尾失去張力，但不要超過 70%最終弛度，如圖 3.8。

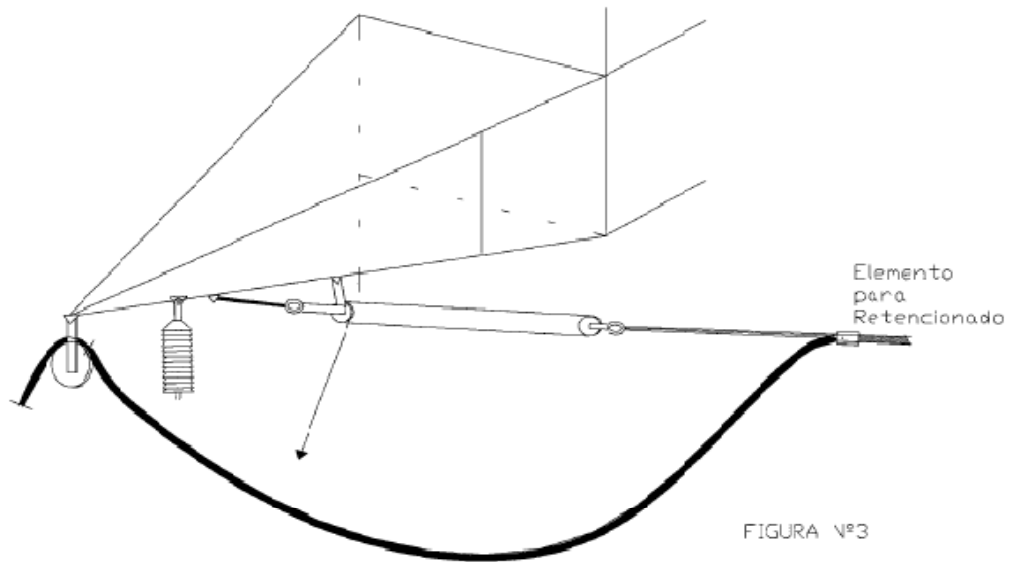


圖 3.8 另一端以線夾拉引導線

第 4 步：先剪斷導線，再依事先計算好的長度，切除鋁線層，使鋼心露出，如圖 3.9。

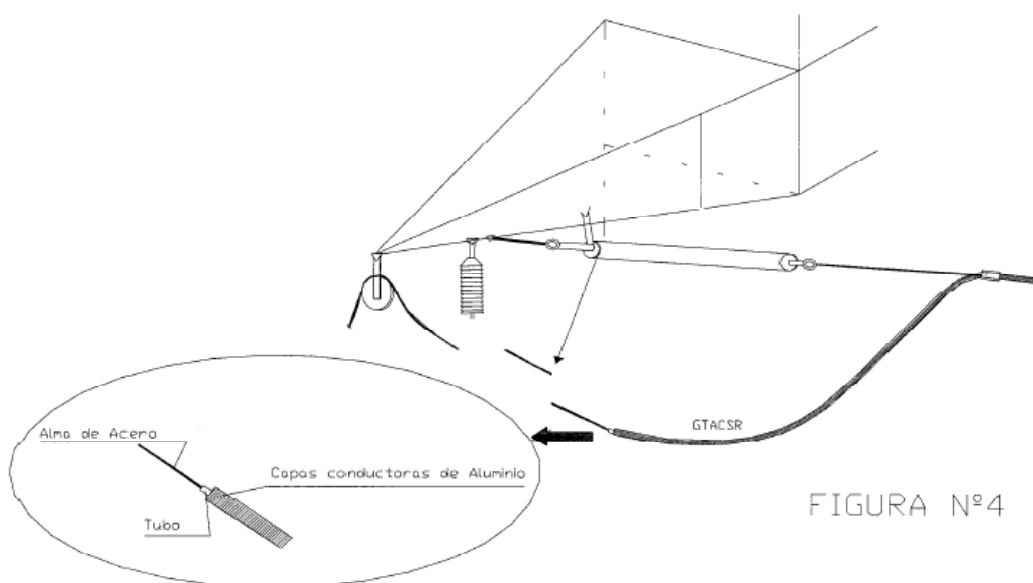


圖 3.9 裁切導線及鋁線層

第 5 步：分別套入鋁體終端夾板及鋼心終端夾板，如圖 3.10。鋼心終端夾板是特殊設計的，其結構如圖 3.11。

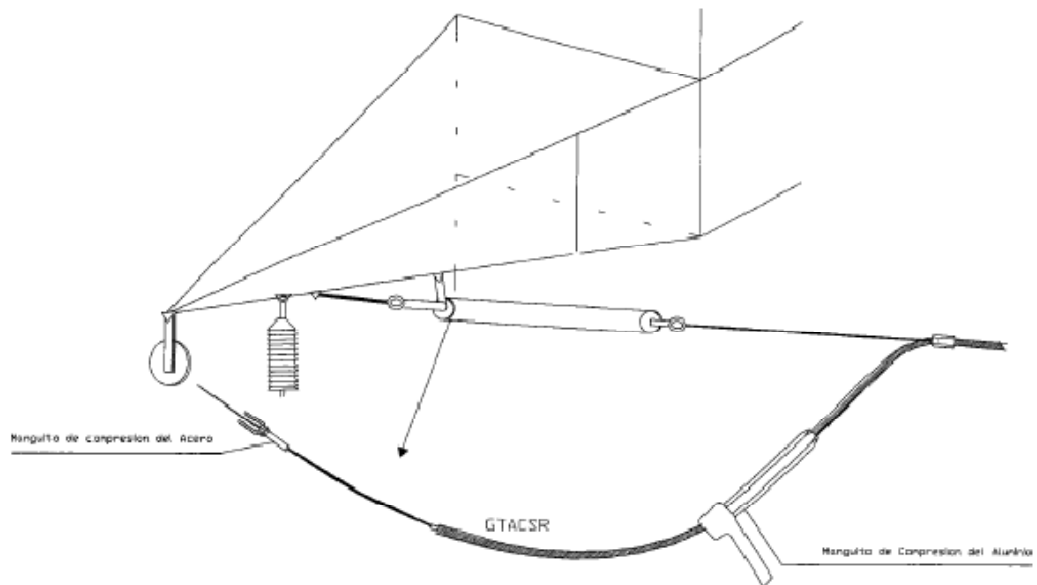


FIGURA N°5

圖 3.10 套入終端夾板

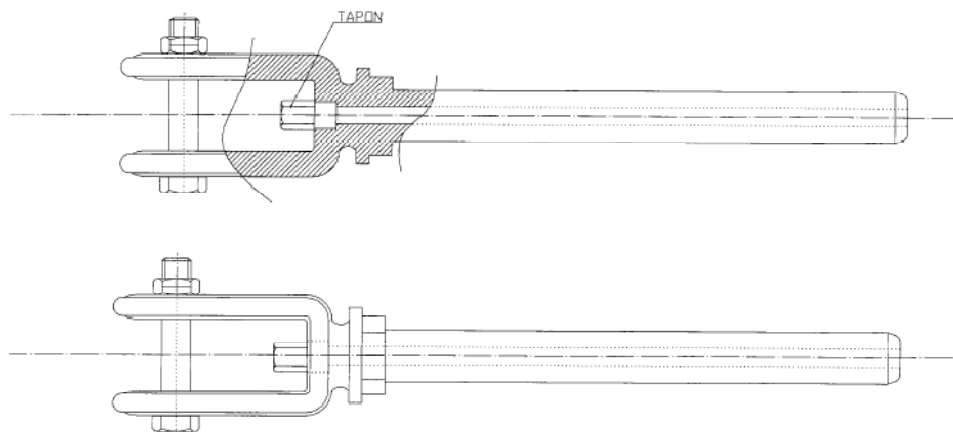


圖 3.11 鋼心終端夾板結構

第 6 步：於鋼心尾端套入油壓緊線機，並將緊線機固定於鐵塔，如圖 3.12。緊線機是專門設計的，其構造如圖 3.13。

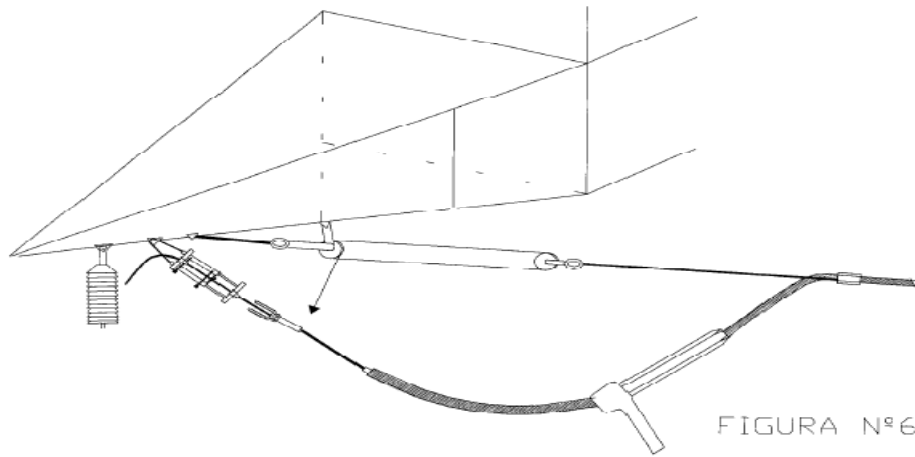


FIGURA N°6

圖 3.12 套入緊線機

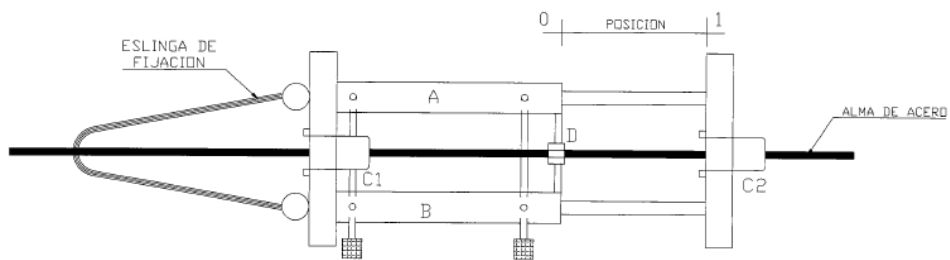


圖 3.13 油壓緊線機的構造

第 7 步：以緊線機拉引鋼心至夾線器與拉吊機失去張力，如圖 3.14。

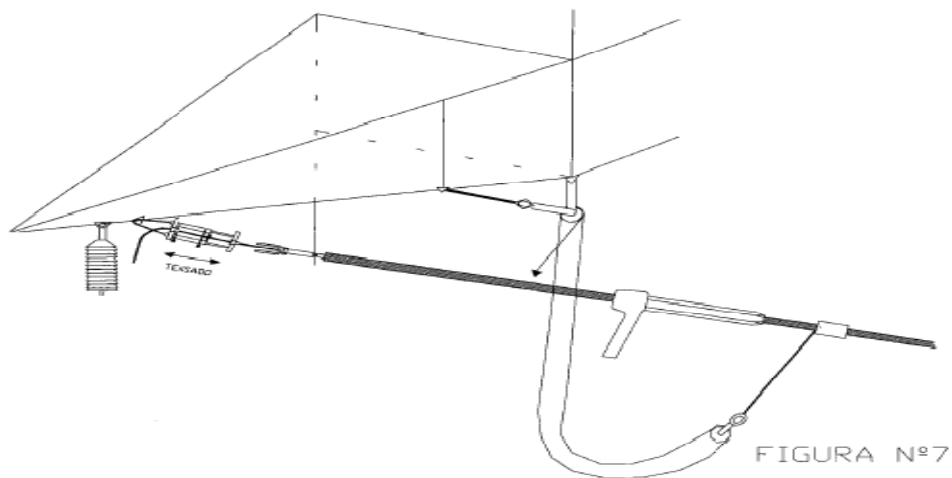


FIGURA N°7

圖 3.14 拉引鋼心

第 8 步：卸除夾線器與拉吊機，並繼續以緊線機拉引鋼心至最終弛度，
如圖 3.15。

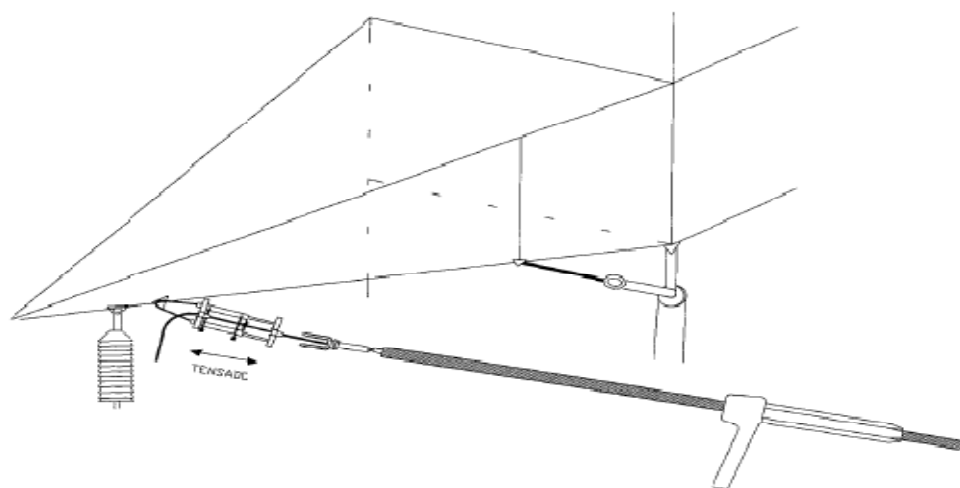


FIGURA N°8

圖 3.15 卸除夾線器

第 9 步：壓縮鋼心終端夾板，把礙子連固定於鋼心終端夾板及鐵塔，
卸除緊線機，如圖 3.16。

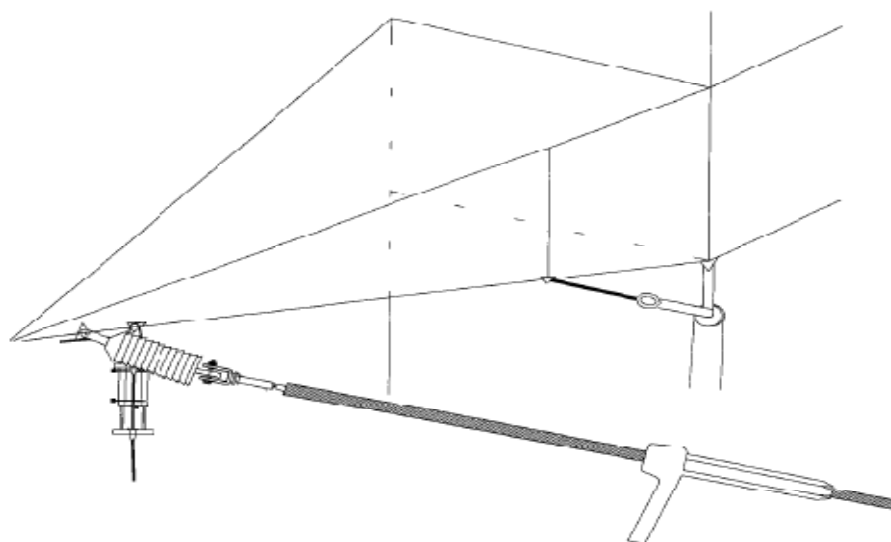


FIGURA N°9

圖 3.16 卸除緊線機

第 10 步：壓縮鋁線終端夾板，如圖 3.17。

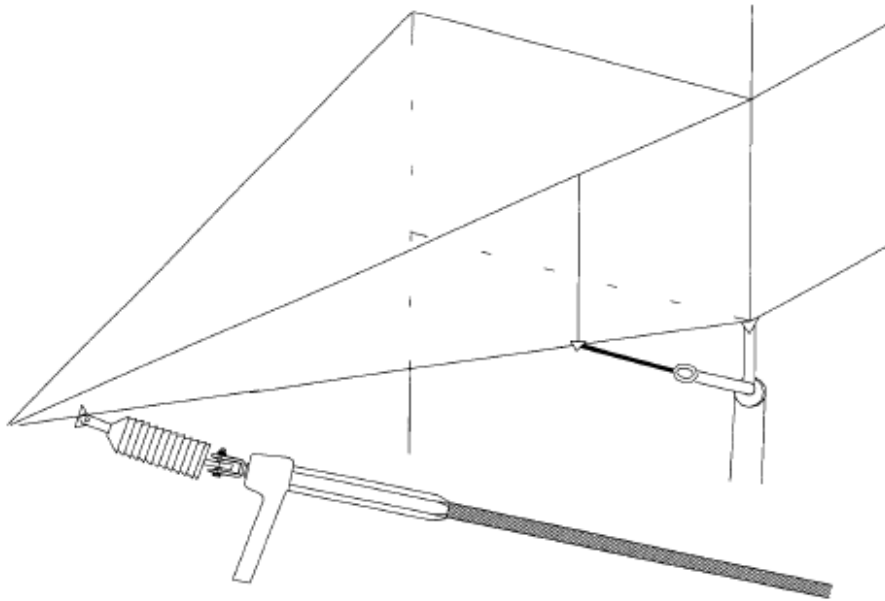


FIGURA N°10

圖 3.17 壓縮鋁體終端夾板

可能由於工作安全及特殊的施工機具及配件的顧慮，台電尚未使用過 GTACSR。但因為 GTACSR 的材料與製程，都和 TACSR 相似，能生產的電線廠商家數較多，因此價格已趨近 TACSR，在國外仍被普遍使用。

(四) ZTACIR

為了提升導線的容許運轉溫度，又可保持導線的低弛度，且又能與 ACSR 導線使用同樣的施工方法、機具及配件，導線製造廠商以在鋼中加入鎳元素的合金，來製成不易隨溫度變化的 INVAR(INAVERIABLE to temperature)鋼心，與 ztal 製成之耐熱鋁合金線分別絞合，成為低弛度耐熱鋼心鋁絞線 ZTACIR(Ztal Thermal Aluminium Conductor

Invar Reinforced)，當溫度高於某一溫度 Knee Point 時，ZTACIR 幾乎不再隨溫度上升而伸長。各型鋼心之相關特性如表 3.2。

steel core performance comparison

material	tensile Strength (N/mm ²)	thermal expansion coefficient ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)	modulus of elasticity (N/mm ²)
Galvanized Invar	105 - 110	2.8	16,500
Aluminium Clad Invar	105 - 110	3.7	15,500
Galvanized Steel	125 - 135	11.5	21,000
Aluminium Clad Steel	125 - 135	12.6	15,200

表 3.2 鋼心之特性

ZTACIR 之容許常時運轉溫度為 210°C，若以與 xtal 製成之鋁合金線與 INVAR 鋼心製成 XTACIR，其容許常時運轉溫度可達 230°C。當然，XTACIR 的價格亦比 ZTACIR 貴。

ZTACIR 之 INVAR 鋼心與外層鋁線，與 ACSR 一樣是緊密絞合的。當溫度低於 Knee Point，導線伸縮行為與 ACSR 一樣，是鋼心與鋁線整體控制。當溫度高於 Knee Point 後，導線伸縮行為完全被 INVAR 鋼心所主控，幾乎不再伸長，因此可以達到抑制弛度的效果。且由於 ZTACIR 之構造與 ACSR 相同，因此它們緊線的方式完全相同，亦不需要特殊的緊線工具及配件。

XTACIR 比 ZTACIR 更早由日本引進台電。XTACIR 最早於民國 90 年代

中期試用於是石門~松樹 161KV 線，後來嘉民~雲林 161KV 線及大鵬~台東 161KV 線之導線抽換，使用的是 ZTACIR。

(五) ACCR

ACCR 是以玻璃加金屬合金的強化纖維管來代替傳統導線的鋼心，使整體導線變得很輕，用來架設一般線路，可以降低鐵塔高度，節省建造成本。用來抽換既有鐵塔線路的導線，可以減少弛度，提升送電溫度及送電容量。

ACCR 是 3M 最近開發出來的新型導線，目前僅有 3M 在美國工廠生產。已經在美國導入市場，並已外銷到巴西，但其相關的特性、配件、工法及效果等尚無法詳細得知或確認。

(六) 導線綜合評比

導線的運轉溫度愈高，送電量愈高，但也表示線路的損失愈大。對於需要長期高負載運轉之線路，需考慮成本與效益。

GTACSR 的構造不同於 ACSR，需有比較特別的施工方法和機具，但生產 GTACSR 廠商較多，導線易取得，價格也比較便宜。

ZTACIR 與 ACSR 的構造相同，施工方法和機具也相同，但鋼心係含貴金屬合金，生產的廠商比較少，價格也比較貴。

ACCR 之特性、價格及效果則尚不明朗，且全球僅有 3M 生產，建造及後續維修器材之取得，恐較不易。

表 3.3 係將各種導線的特性及表現，以同線徑之 ACSR 為基準，綜合評估比較。

	容許 溫度	送電 容量	線路 損失	緊線 工法	機具 配件	運轉 實績	價格
ACSR	90°C	1.0 倍	少	普通	普通	甚多	低
TACSR	150°C	1.5 倍	大	普通	普通	多	稍高
GTACSR	180°C	1.6 倍	大	特殊	特殊	少	稍高
ZTACIR	210°C	2.0 倍	甚大	普通	普通	甚少	高
ACCR	不明	不明	不明	不明	不明	稀少	甚高

表 3.3 高容量導線綜合評比

二、重建鐵塔增加導線

台電的南北一路建於民國 60 年代。當時採複導體設計。而後期興建的南北二路為四導體設計，其送電量本來可以至少是為南北一路的兩倍。但由於顧慮全載送電時，萬一南北二路任一回線發生事故，突增的故障電流恐無法由南北路一路吸收而造大規模輸電線路之跳脫停電，甚至導致電力系統崩潰。因此即使當時南電北送之負荷甚大，南北二路一直無法全載送電。

為了分擔南電北送之負荷，台電規劃了南北三路，也是採四導體設計。南北三路於民國 90 年代中期建造完成後，調度窘境大獲紓解。此時

台電始有餘裕，能夠計畫將南北一路，分期逐段更新改建。

若要提昇南北一路的送電量與南北二路與三路相當，比較省錢省時的方法應該是把 ACSR 導線抽換為高容量低弛度導線。但南北一路是依舊標準設計，而南北二路與三路是依新標準設計。舊標準的鐵塔僅考慮平均風速設計，而未考慮陣風。因此舊標準的鐵塔及基礎都比新標準的為弱。

舊標準是以導線長時運轉溫度 60°C 設計，而新標準為 80°C 設計。而且舊標準大部份的線下高度要求都比新標準為低。若僅抽換導線，而依新標準來運轉，必定無法達到高容量低弛度導線原來可以達到的送電溫度。也就是送電量的提升將受限。因此評估結果，南北一路係以重建鐵塔並架線設四導體，使與南北二路與三路一致。

在「保留路權」的考量下，不先拆除舊鐵塔及導線，且要盡量在舊鐵塔的用地內範圍內，施設新基礎、安裝新鐵塔並架設新線路，在施工方面，比建造全新線路更困難與複雜。南北一路正在逐段改建中，台電與協力廠商合作發展了一些工法，發表於相關文獻，值得從事線路工作者參考。

三、 重建鐵塔提高電壓

德國有些電力公司有要把所有的 220kV 輸電線路全部改建為 380kV 的遠大計劃。許多 380kV 線路是要利用原來 220kV 的路徑來改建。當然，

要提高電壓就必須改建鐵塔，而 380kV 的「標準」鐵塔橫擔寬度比 220kV 的寬得多。依德國法律，線路路權寬度是其鐵塔橫擔寬度的兩倍，電力公司必須徵得路權範圍內所有地主之同意，議定補償並取得使用權。

要把 220kV 改建為 380kV 線路，最困難的就是要交涉新增路權內地主的同意，取得使用權，也許還要花費一大筆土地補償款。

重建鐵塔提高輸電線路的電壓，可以大幅提升送電容量，使「昂貴」的路權，發揮更高的效益。但是成本高，工期長，且受制於線下地主的意願，難以掌握完成時間。

四、採縮合型線路技術

若要把低電壓的輸電線路更新升級為高電壓，高電壓的鐵塔橫擔寬度大於低電壓的鐵塔，那麼必須向新增的地主交涉取得諒解，一旦某段既有線路跨越人口比較多的地區，那麼新地主就會抗議。

縮合型線路之導線相與相間的距離比較短，鐵塔橫模擔寬度可以減少，更新之輸電線路路權可以完全在已取得的路權範圍內，不會增加新的地主，因此減少了路權交涉的時間。

另外由於線路相間距離縮小，線路送電容量會提高，壓降會降低，損失會減少，地面電磁場會降低，當然也有雷害及維護問題必須克服，這些將在下一章中詳細討論。

五、更新方法綜合評比

要提昇既有線路送電容量，最省時省錢的方法，就是把既有線路鐵塔上的普通導線(ACSR)，抽換為高容量低弛持度導線(GTACSR、ZTACIR、XTACIR 或 ACCR)，使送電電流增加。但電流增加，鐵塔高度不變，地面之磁場強度將會增加。

台電的輸電線路設計標準於民國 66 年賽洛馬颱風後曾經重新訂定。既有線路的鐵塔若係根據舊標準設計，只考慮平均風速，而根據新標準設計的鐵塔，除了考慮平均風速外，還考慮了陣風，因此若留用的鐵塔係根據舊標準設計，將會比較弱。

ACSR 導線與地面或建築物之距離，舊標準僅考慮容許運轉溫度 60°C，而新標準考慮 80°C。根據舊標準設計之線路，即使抽換了相同線徑的高容量低弛度的導線，有時候為了保持安全距離，必須限制導線運轉溫度，即限制電流，這將造成線路運轉與維護上的困擾。

目前高送電容量的導線，多是靠提高導線的運轉溫度來達到提高送電容量的目的。但導線的運轉溫度愈高，表示線路的損失愈大，而且對運轉維護單位而言，要加倍防範線下的樹林失火，還有飛鳥也有可能被燙傷甚至死亡，不利環境保育。

重建鐵塔增加線路的導線數，若不提高鐵塔高度，一樣會使地面的磁場強度增加。且因鐵塔及基礎需改建，成本增加，工期拉長。

重建鐵塔提高線路的電壓，可以大幅地提升線路的送電容量。例如把 69kV 線路，升級為 161kV 線路，每回線送電容量可以提升 5 倍；升級為 345kV 線路，每回線送電容量可以提升超過 20 倍。但線路之電壓層級提高，標準鐵塔的橫擔寬度亦須增加，產生新的路權地主，增加路權交涉取得的時間，工期拉長。

採用縮合線路技術來更新升級輸電線路，不會增加新的線下地主，工期不至於拉長。且由於線路相間距離縮小，電壓降及線路損失會減少；地面磁場強度也會降低。而一般縮合型線路係使用重量輕、耐碰撞、耐污染之聚合礙子，將使線路維護工作變得比較容易。

表 3.4 係以既有 161kV 線抽換高容量導線或升級為 345kV 線路為基準，將各種方法之利弊綜合評估比較。

	送電容量提升	成本	工期	線路損失	地面磁場	運轉維護
保留鐵塔抽換導線	1.5~2 倍	低	短	增加	增強	困難
重建鐵塔增加導線	2 倍	高	中	維持	增強	普通
重建鐵塔提高電壓	5 倍	高	長	維持	維持	普通
採縮合型線路技術	5 倍	高	中	減少	減弱	容易

表 3.4 提升線路送電容量方法綜合評比

第四章 縮合線路技術

一、發展沿革

縮合型線路（compact lines，大陸翻譯為緊湊型線路），是採用比一般傳統線路各相導線之間距離為短的方式，來設計建造線路。採用縮合型線路，最主要的目的，在於減少線路寬度及線路壓降。減少線路寬度有利於路權的交涉取得，特別是對於線下土地必須要交涉補償的地區更然。減少線路壓降，可以使輸電線路的電力傳送得更遠，這對幅員遼闊的國家，比較具有重要性。

縮合型線路於 1980 年代在希臘首先被採用。以後經先進各國電力公司、學術機構及設備廠商人員，不斷合作研究改良，技術已趨成熟。如今西歐、北美、日本、中東及中國大陸都已經有縮合型線路在運轉或建造中。中國大陸且已經有 500kV 的縮合型線路建造完成在運轉中。

通常縮合型線路需使用支持礙子以保持導線與鐵塔的安全距離。最早縮合型線路使用的是陶瓷礙子。自從聚合礙子開發出來以後，後來建造的縮合型線路，大多使用較輕耐撞的聚合礙子。

圖 4.1 是中東杜拜附近的發電廠出口增建的一條 420 kV 的輸電線路，受旁邊既有線路的影響，該增建線路的寬度受到限制，於是建造團隊採用縮合線路技術來設計建造。

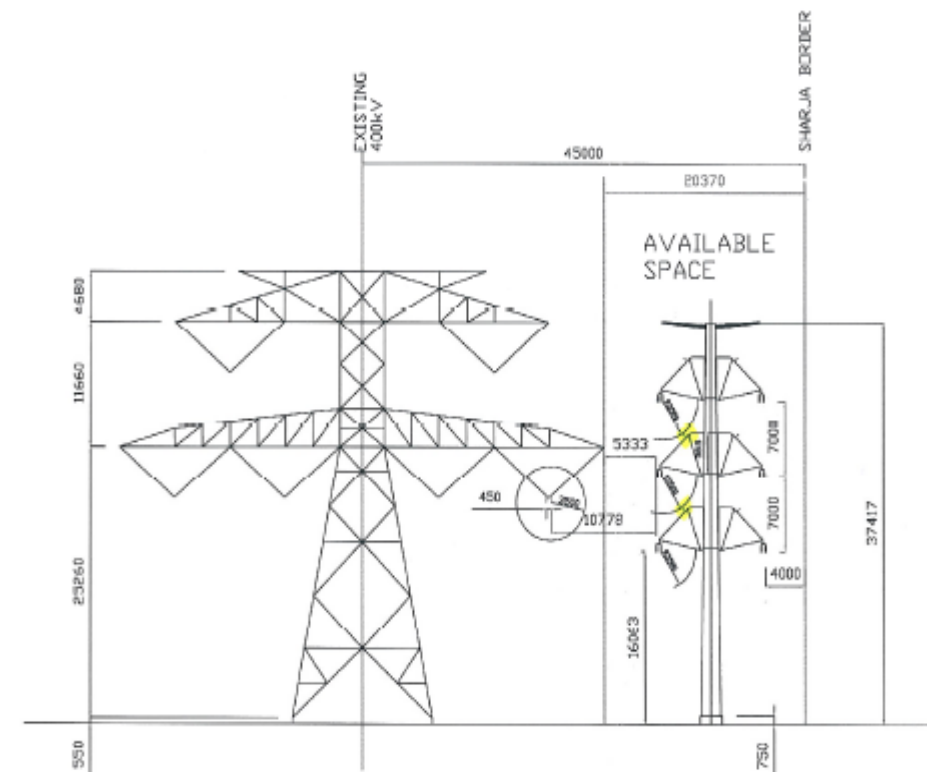


圖 4.1 中東的縮合型輸電線路

二、相間距離與送電容量

輸電線路完工以後，它的「固有」線路阻抗就決定了，與負載的變化無關，因此也稱為線路常數。從線路阻抗可以求得一回輸電線路的「自然」(nature)送電容量，如下式：

$$P_{nat} = \frac{U_{pp}^2}{Z}$$

U_{pp}：相對相電壓
Z：波組抗

波阻抗的計算，如下式：

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

L：線路電感
C：線路電容

因此，輸電線路的自然送電容量，隨線路電容的增加而增加；也隨線路電感的減少而增加。線路電感的計算，如下式：

$$L' = \frac{u_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D_m}{R_b} + \frac{1}{4n_2} \right)$$

D_m：平均相間距離
R_b：等效相束半徑
H_m：平均導線高度

相對的，線路電容的計算，如下式：

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_m}{R_b} \sqrt{1 + (D_m/2H_m)^2}}$$

D_m：平均相間距離
R_b：等效相束半徑
H_m：平均導線高度

由上述的這些式子得知，要增加輸電線路的自然送電容量，可以經由減少線路的波阻抗達到，而減少線路的波阻抗，又可經由「減少相間距離」、「增加相束半徑」或「降低導線高度」等三條途徑達到。其中「降低導線高度」之途，對自然送電容量的影響輕微。

表 4.1 係以 420kV 輸電線路，依上述公式，按「標準線路設計」為基準，計算「減少相間距離」及「增加相束半徑」兩途所增加的自然送電容量。

		Standard Line	Compact Line	Line with increased bundle radius
Height of conductor at tower	A	25m	25m	25m
	B	25m	25m	25m
	C	37m	37m	37m
Mean phase spacing		12m	7m	12m
Radius of single conductor		16mm	16mm	16mm
Number of conductors per bundle		4	4	4
Distance of conductors in a bundle		400mm	400mm	1000mm
Surge Impedance		355 Ω	310 Ω	296 Ω
Increase in Transmission Power		0%	15%	20%

表 4.1 線路阻抗與送電容量比較

就表 4.1 的條件而言，「增加相束半徑」比「減少相間距離」所增加的自然送電容量為高，但實務上，「增加相束半徑」會增加配件及鐵塔的荷重，基於經濟的考量，並不普遍被採用，僅曾在某些拉丁美洲國家試過。

「減少相間距離」，除了可以達到增加自然送電容量的效果，還可以減少線路寬度。而且，理論上各相導線距離接近，磁場相互抵銷之效果增加，線路所產生於地面之磁場也因而降低。另外，可以想見的，導線相間距離縮小，鐵塔橫擔可以變窄，鐵塔高度可以降低，鐵塔負

荷也可以變小。因此線路工程人員朝「減少相間距離」的方向，發展了縮合線路技術。

輸電線路的相間距離縮短，自然送電容量就會增加，那就代表線路損失會減少，線路尾端的壓降也會減少，因此線路傳輸電力的距離也就可以增長了。

三、 設計要素

(一) 相間距離的決定

首先依照線路設計標準要求的基本絕緣位準 BIL(Basic Insulation Level)，求出導線在各種狀況下，須與其他物件應保持的安全距離。所決定的相間距離必須保證在線路完成後，在送電狀況下，任何時間都符合這些安全距離的要求。這些要求是相間距離的下限。

其次是考慮路權(right of way)寬度。若是利用電壓較低的既有舊線路來改建為電壓較高的線路，那麼相間距離的上限，往往就是既有線路的寬度。若是要新建的線路附近，有其他的線路或建築物，或者有居民特別的要求，也會影響相間距離的上限。

縮合線路的相間距離應於上述的上下限間，檢討導線的擺動(swing)或跳動(galloping)、雷擊影響、線路維護工作人員的安全，並考量配件的繁簡、路權的保障、基礎施工的基地運用、鐵塔裝建的空間運用以及經濟效能等因素，綜合評估選定。

(二) 導線在塔上的間距保持

為了保持導線與鐵塔間的安全距離，及減少線路建造成本。縮合型線路的懸垂型鐵塔，可使用絕緣型橫擔，即以強化玻璃纖維及聚合礙子連組成橫擔來代替傳統的鐵橫擔。在耐張鐵塔上則可以使用支持礙子連來避免跳線向鐵塔塔體靠近，造成閃絡。由於以往的陶瓷支持礙子笨重，施工不易，且增加支持礙子將會增加礙子遭受鹽霧害的風險，增加清掃礙子的負擔。所以現代的縮合型線路大多採用重量輕、耐碰撞，耐污染的聚合礙子。

(三) 導線在徑間的位移控制

導線在徑間的位移控制的考慮有兩項，一為擺動(swing)、二為跳動(galloping)，在冰雪地區 galloping 往往主控了導線徑間距離的設計，而台灣雖無雪害，但有颱風，必須考慮的是 swing，研究發現，導線的 swing 使相間距離接近的嚴重程度，並非隨跨距的增加而增加，若以 110kV 線路，風速 25m/s 為例，最嚴動的距離約在 120m，最大的位移不超過 0.55m，因此對於 1.5m~1.7m 相間距離的縮合型線路，並無造成閃絡之風險。

國外由於雪害導致之 galloping，往往主控了相間距離的設計，有時必須使用相間間隔器來保持相間距離，相間間隔器一般使用中空型的玻璃纖維管，以增加應力，減輕重量。

(四) 雷害防治

當雷直接擊中導線，導線電位上升，造成由導線經鐵塔或輸電設備向大地之閃絡，稱為正閃絡。對於正閃絡，縮合型線路與一般線路有著相同的機會，因此不予討論。

當雷擊中地線或鐵塔，使鐵塔電位上升，造成由鐵塔向導線之閃絡，稱為逆閃絡。由於縮合型線路在某些狀況下，導線與鐵塔之距離較近，國外的文獻報導，逆閃絡之機會可能增加，其中又以單相逆閃絡之機會最多。對於比較敏感地區的鐵塔，可以降低接地電阻或加裝避雷器來減低逆閃絡之機會。對於重要線路，甚至可以考慮運用單相復閉技術來減少輸電線路之不穩定度。

(五) 便於運轉維護

輸電線路的設計建造，應盡量朝減少維護甚至免維護的方式發展。一般最常見的線路維護工作就是清掃礙子。矽膠聚合礙子由於有很好的厭水性，並能把其厭水性透過分子移動傳遞給附著其上的污染層，因此號稱可以免清洗。

有時為了運轉需要，線路的維修必須在不停電的狀況下進行活線作業(life working)。但活線作業必須要有取得有證照的技術人員、服裝配備以及直昇機，方能執行。這些資源國內都尚不普遍，因此台電若要設計縮合型線路，必須特別注意考量，在同一座鐵塔上，

一次僅能停一回線維修時，當一回線停電維修其他回線送電中之情況下，工作人員安全的確保。

四、縮合型線路案例

瑞士的土地面積僅比與台灣大一點，土地價格相當昂貴，輸電線路路權取得的難度及成本都很高。因此瑞士的電力公司有許多利用既有線路的路權來更新輸電線路之案例。

(一) 線路概要

於 1995 年左右，瑞士的電力公司 EOS 負責新建一條洛桑到日內瓦的輸電線路。這條線路是要共架兩回 420kV 的線輸電，及一回 132kV 用戶線。線輸電屬於 EOS 自己的。用戶線則是屬於瑞士聯邦鐵路局 (SBB) 的。

EOS 的 420kV 輸電線是三相三線式，SBB 的 132KV 用戶線是單相兩線式。SBB 的用戶線用的是單導體 ACSR，外徑 21.0mm，截面積 261.5 mm^2 ，其中鋁為 212mm^2 ，鋼為 49.2mm^2 。EOS 的輸電線用的是複導體 ACSR，外徑 38 mm，截面積 845 mm^2 ，其中鋁為 745mm^2 ，鋼為 97mm^2 。

這條 420/132 kV 的輸電線路是要利用一條將廢棄的 125kV 二回線的輸電線路路權。而其中有約 1 公里的區間，經過人口稠密的地區，兩邊有房屋，附近居民反應強烈，不允許以傳統的 400kV 線路經過，如圖 4.2。

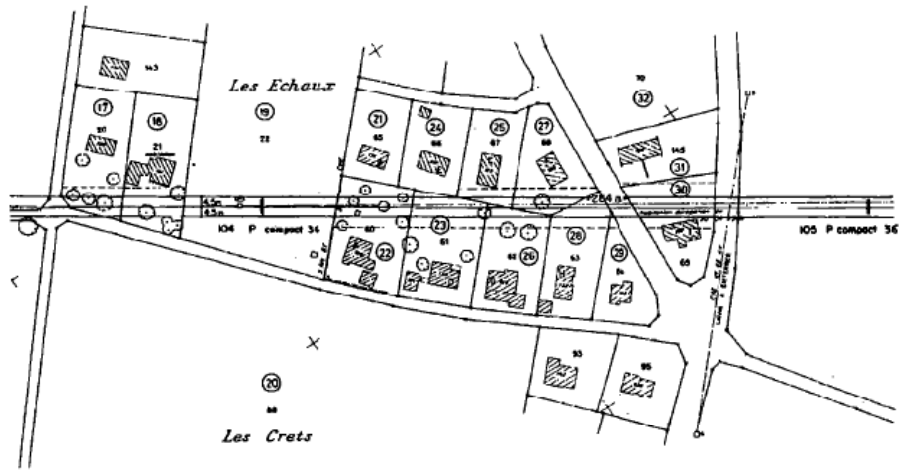


圖 4.2 線路經過地區

傳統的 420kV 線路需要 2×15 公尺的路權寬度，而既有的 125kV 線路只有 2×9.5 公尺寬的路權。由於居民反對，欲交涉取得擴增的路權，幾乎不可能，在這種的狀況下，僅有的解決方案就是讓這條 420/132 kV 線路的寬度限縮在 125kV 線的路權寬度之內，也就是必須採用縮合線路技術。

配合既有的鐵塔位置，在這 1 公里的區間內，EOS 設計採用了 3 座懸擺式縮合型懸垂鐵塔，而於區間的兩端，採用了 2 座傳統窗格式耐張型鐵塔。

(二) 懸擺式鐵塔

鐵塔橫擔的寬度及相間距離，主要決定於路權寬度。由於線路的寬度必須小於 9.5 公尺，也就是鐵塔橫擔的寬度必須小於 9.5 公尺。傳統的 420kV 鐵塔橫擔的寬度為 19 公尺。在這個特殊的區

間，建造團隊必須設計縮合型鐵塔，經過計算檢討，鐵塔的相間距離訂為 8.6 公尺，如圖 4.3。

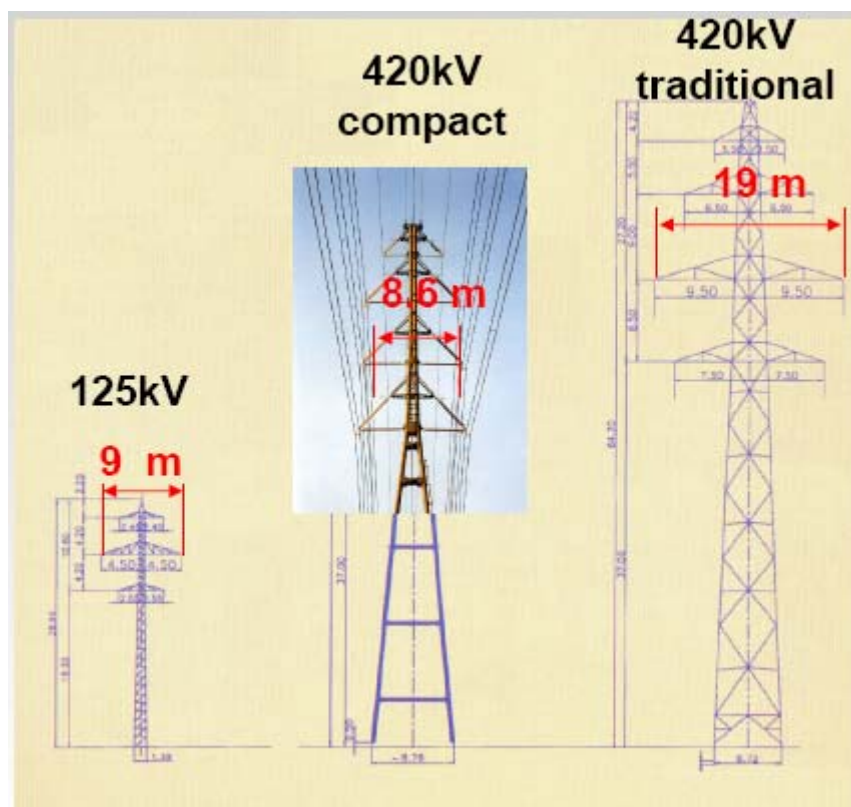


圖 4.3 鐵塔橫擔的寬度

鐵塔的高度主要決定於電磁場強度的影響。根據瑞士的法令要求，更新之輸電路所產生之電磁場，於地面之強度不得高於原線路所產生者。因此為了使這條新的 420/132 kV 的輸電線路所產生之電磁場，於地面之強度，不高於舊的 125 kV 的輸電線路所產生者，即使縮合型線路由於相間距離縮小，產生的磁場會比較小，但因為送電的電壓提高了，經檢討新的縮合型鐵塔高度仍必須高於舊的 125 kV 鐵塔，必須達到 56 公尺，方能使

新的 420/132 kV 的輸電線路於地面的電磁場強度與既有的 125kV 線路相同，如圖 4.4。

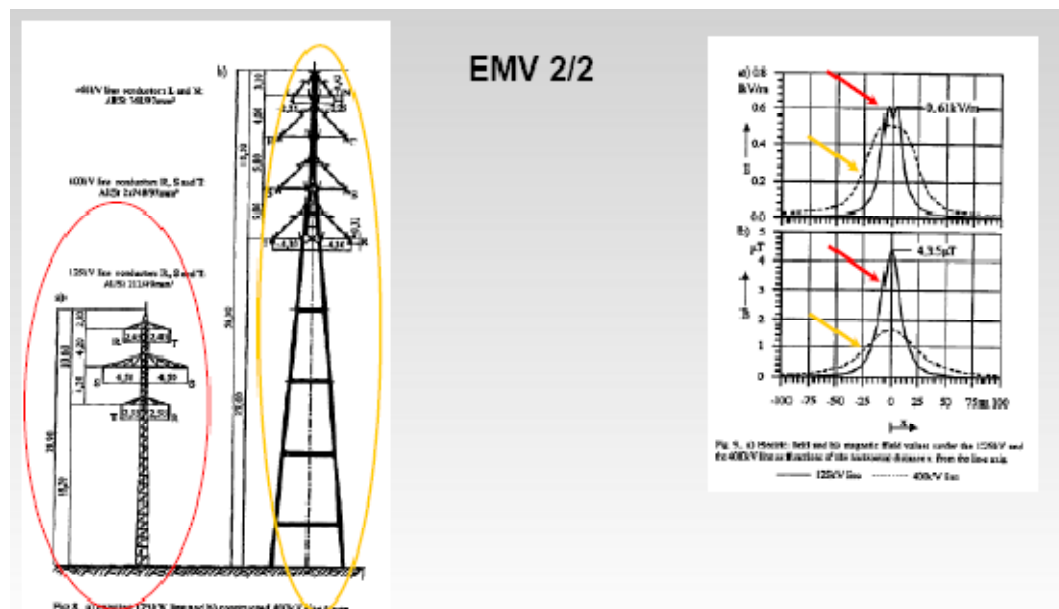


圖 4.4 地面電磁場強度

鐵塔的外型主要決定於其對視覺的衝擊。為了符合新進的環境保護法令要求，輸電線路之支持物，外型必須盡量與環境調和，塔腳隻數次必須盡量減少，結構必須盡量簡明，以降低對視覺的衝擊。傳統三維式的窗格式鐵塔，構件較為龐雜，在市區或村莊，較不易與環境調和。

理想的縮合型線路，最好使用單腳懸背式鋼管桿來取代傳統三維式的窗格式鐵塔，以減少對土地的佔有和視覺的衝擊。但是由於這條線路的鐵塔負荷太大，無法使用單腳鋼管桿，因此建造團隊發展了二維的雙腳懸擺式鐵塔，即平面式的結構體，如圖 4.5。



圖 4.5 懸擺式縮合型鐵塔

懸擺式鐵塔的設計負載條件與一般「標準」鐵塔相同。但懸擺式鐵塔對於垂直線路方向的橫向負載 (transversally) 而言，視同鋼體結構，可將橫向負載直接傳遞到大地。

雖然沒有線路角度，但由於風襲、著冰不平衡及斷線等原因，懸擺式鐵塔也會有平行線路方向的縱向負載 (longitudinally)。懸擺式鐵塔對於縱向負載而言，視同懸臂樑，是被鐵塔頂端的兩條地索 (earthwires and b) 懸提，並固定於鐵塔基礎上擺動。縱向負載主要是透過地索，也有部分是透過地線及懸掛於可旋轉橫擔上的導線傳遞到兩端的自持式耐張型鐵塔，如圖 4.6。



圖 4.6 地索傳遞縱向負載。

由於懸擺式鐵塔的橫向負載係經由塔腳傳遞到大地，為了抵抗高扭力，塔腳需要有類管型(tubular-like)斷面的柱材，因此建造團隊設計了以兩個冷壓成型的折角型鋼(cold-formed folded shells)中間以細長圓形鋼焊接的斷面，如圖 4.7。

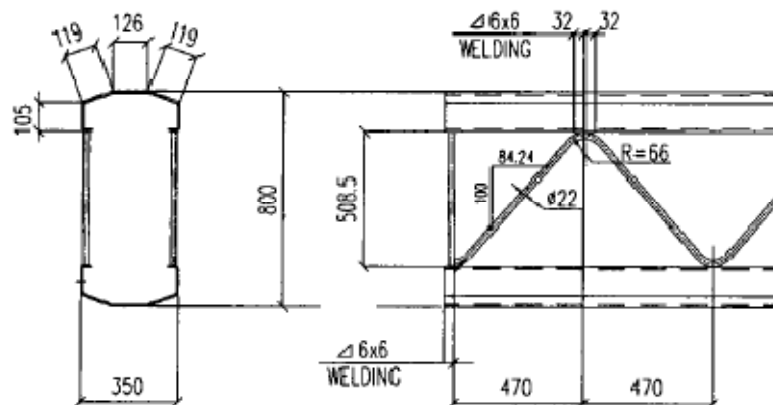


圖 4.7 類管型柱材斷面

建造團隊希望以這樣類管型斷面的柱材，如圖 4.8，來取代傳統的鋼管構件，因為鋼管構件不易鍍鋅，可能導致內部腐蝕。



圖 4.8 類管型柱材

為了讓縱向負載能透過地索傳遞到兩端的自持式耐張型鐵塔，懸擺式鐵塔的兩隻塔腳，可於基礎上前後擺動，如圖 4.9。

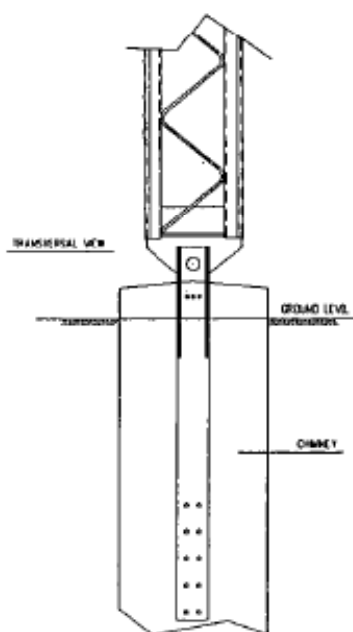


圖 4.9 懸擺式鐵塔的基礎

絕緣型橫擔由聚合礙子連組合而成，主要是因為聚合礙子比陶瓷或玻璃礙子輕許多，對鐵塔的設計有利，也比較容易裝建。其次聚合礙子不像陶瓷或玻璃礙子那樣容易破碎，比較容易承受突然來的斷線衝擊。

聚合礙子連要兼鐵塔橫擔，最主要的限制是在於橫向支撐的抗壓能力。電壓愈高，相導體數愈多，導線距離鐵塔愈遠，橫向支撐的抗壓能力需愈強。對這條線路而言，一般實心的玻璃纖維管已無法負荷，因此建造團隊使用了大直徑中空(hollow core) 的玻璃纖維圓柱管，來作為聚合礙子連的管幹(Rod)，如圖 4.11。



圖 4.11 聚合支持礙子連橫擔

(四) 線路穩定度

使用懸擺式鐵塔的線路，線路結構穩定度的檢討，不能像傳統的自持式鐵塔一樣，僅逐座檢討鐵塔強度，而還必須要核對兩座耐張鐵塔之間，整個區間線路的行為作整體檢討。

一旦區間中某一跨距遭受風襲，著冰不平衡或斷線，兩側懸擺式鐵塔被加上縱向負載，由於鐵塔是被固定於基礎上的，並被地索、地線和部份的導線所懸提在基礎上搖擺，因此在受縱向負載的懸擺式鐵塔旁的第一個跨距，地索承受最大的張力。依序遞移至隔鄰的跨距，在區間之尾端，耐張鐵塔前的跨距，地索的張力降至最低，那裡將發生最大的弛度。檢討線路穩定度最大的目的之一，就是要證明最大的地索容許張力，和最小的電氣容許絕緣距離，保證都不會被超過。

要檢討像這類彈性的輸電線路(flexible transmission lines)的線路穩定度，由於伴隨基礎和橫擔的旋轉，導線的表現為非線性行為，會牽涉到必須解非線性的方程式，計算起來比較複雜，國外係使用使用電腦軟體程式來檢討。

第五章 結語

一、心得

德國人民及政府對電力公司的要求甚為嚴苛，德國的電力公司從事輸電事業正面臨路權、人力及資金短缺的困境。德國的輸電設備廠商不斷地朝小尺寸、大容量、重量輕、易安裝、免維護的方向開發器材，希望能幫助電力公司解決所面臨的困境。

由於金屬合金、玻璃纖維及矽膠的材質不斷精進，利用這些先進的材料，德國的輸電設備廠商開發或改善了一些輸電器材，包括高容量低弛度導線、乾式插入型電纜終端匣及絕緣型鐵塔橫擔等。

德國的輸電設備廠商與國際標準 IEC 製定的規範機構甚為靠近，關係密切，容易影響這些器材規範的製定，進而影響世界各國電力公司對於輸電設備的規劃、設計及採購。

台電從事輸電線路之建造也大致面臨與德國一樣的困境。台電輸電線路之規劃、設計大都參考或跟隨國際標準。台灣的輸電設備廠商也大都沿用國外的製造技術。德國的輸電產業處於一個完全開放競爭的市場，台灣的輸電產業則還處在一個被保護的市場。

利用既有鐵塔抽換高容量低弛度導線能夠避免路權交涉，省時省錢。

目前台電已經引進的高容量低弛度導線有 ZTACIR 及 XTACIR，在國外 GTACSR 也普遍被採用，因其價格較為低廉。超輕的 ACCR 導線則

因為特性及效果尚未明朗，未被大量使用，但其後續發展情形，值得關注。

利用既有鐵塔抽換大容量低弛度導線，雖然省時省錢，但是線路損失及地面磁場會增加，且可能有鐵塔老舊或地上高不足等問題。對於簡化輸電系統之電壓層級方面，也不能提供幫助。

縮合線路技術能使架空線路跨越土地之範圍縮小一半以上，可幫助電力公司縮短路權交涉時間及減輕土地補償負擔。近年因為聚合礙子性能提升，讓需大量運用聚合礙子的縮合型線路更具優勢。

現階段縮合線路技術最適合引進使用於台電的「利用既有路權更新升級」、「配合發電廠增建」及「通過人口較密集地區」等之輸電線路工程。未來設計及運轉經驗成熟後，亦可普遍推廣使用於一般新建或改建之線路。

配合架空線路更新升級所需要的大容量小尺寸之電纜及開關設備，國外也在不斷地研發中。據說小尺寸之 GIS 已經出現，詳細情形尚待了解。至於大容量電纜之發展，至今尚無突破。

總體而言，輸電設備及工程的小型化是全球趨勢。台電及台灣的輸電設備廠商應把握契機與國際接軌。台電提供工程需求及資金，設備廠商運用承攬台電工程的機會吸收新技術，再運用台灣豐厚的製造業基礎，在國際輸電產業分工體系中，爭取扮演舉足輕重的角色。

二、 建議

縮合型線路技術牽涉線路設計，鐵塔設計、鐵塔製造及碍子製造等領域之知識。國內在這些領域，分別有專門的人員從事研究，並且也累積了許多的經驗和技術。但為了完成一件縮合型線路的規劃、設計、施工、器材供應及測試安裝，必須集合這些專家，一起努力。最好的方式應該是邀集志同道合的專家，組織成立「縮合線路知識社羣」，透過知識社羣的互相討論，希望能幫助台電研訂「縮合型線路設計標準」。

國際間討論縮合型線路場合，有 IEEE 及 CIGRE 這些學術性期刊，「縮合線路知識社羣」的成員，可以先透過研讀這些文章來瞭解並溝通彼此的看法。若國外有相關的專家來訪，也可以安排發表會或座談會吸收他們的經驗。無論如何，從事縮合型線路的研究，必然能夠提昇自己本身的設計及製造能力，並藉與國際的專業接軌。

然而由於縮合型線路之設計及施工，仍然牽涉到許多細部的技術和專利，例如軟體程式，測試儀器，材料特性、器材製造等技術。這些比較精深的技術，有時候可能必須透過實際工程或設備的採購來取得。

將 69kV 系統廢除以簡化輸電系統的電壓層級是台電既定的政策。建議視輸電計畫之需要，選擇一條 69kV 線路，更新升級為 161kV 或

345kV 縮合型線路。工程單位可採設計含施工之統包，允許承攬廠商尋求國外技術合作，並要求技術轉移給台灣廠商及台電，藉以落實引進縮合線路技術。

引進縮合線路技術相信可以幫助台電在規劃輸電系統時，多一個方向，幫助工程單位在建造輸電線路時，多一種方法。也希望能夠幫助輸電設備廠商取得先進技術。

但願在台灣從事輸電業的人員及團體，能早日在全球的輸電產業及設備市場中，分擔工作，貢獻所長。