

出國報告（出國類別：開會）

參加日本電力資料交換組織(IERE)
變壓器絕緣紙老化新指標(甲醇)
第二階段研究小組工作會議

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：化學工程監

李立棋

派赴國家：日本

出國期間：112年10月09日至10月12日

報告日期：112年11月15日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加日本電力資料交換組織(IERE)變壓器絕緣紙老化新指標

(甲醇)第二階段研究小組工作會議

頁數____ 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/翁玉靜/(02) 23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

李立棋/台灣電力公司/綜合研究所/化學工程監/(02)23601013

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：112 年 10 月 09 日~112 年 10 月 12 日 出國地區：日本

報告日期：112 年 11 月 15 日

分類號/目

關鍵詞：變壓器、絕緣紙、糠醛、油中氣體、聚合度、甲醇、老化

內容摘要：

本次參加日本電力資料交換組織(IERE)變壓器絕緣紙老化新指標(甲醇)第二階段研究小組工作會議，除了 Engie 公司及台電綜合研究所對近期甲醇與絕緣紙平均聚合度之開蓋驗證結果進行更新報告外，更透過國際變壓器診斷技術經驗簡報分享活動，對變壓器診斷在 AI 與機器學習、熱升級紙的熱老化模擬計算診斷、線上 DGA 診斷案例、糠醛攜帶式快速測試產品開發、亭置式變壓器糠醛模型、脂類油加速老化試

驗、循環加速老化試驗、絕緣油採購規格等主題進行交流討論，並參訪新豐洲地下變電站，對東京電力公司在六氟化硫氣體絕緣開關設備(Gas Insulated Switchgear，簡稱為 GIS)、六氟化硫氣體絕緣變壓器(Gas Insulated Transformer，簡稱為 GIT)、1500MVA 油浸式變壓器的設計與維護策略進行了解。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

(<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

報告目次

	頁次
出國報告審核表.....	1
出國報告提要.....	2
報告目次.....	4
報告內容	
壹、出國目的.....	5
貳、出國行程.....	5
參、會議內容.....	6
肆、心得與建議.....	20

壹、出國目的

本公司應用變壓器油中糠醛作為絕緣紙老化指標已有多多年，目前從國際相關研究報告發現，變壓器油中糠醛作為傳統絕緣紙(適合溫升 55°C)老化指標較為可靠，但對於耐熱型絕緣紙(適合溫升 65°C)，則效果不佳。而本公司之電力變壓器有 90% 為使用耐熱型絕緣紙，故有必要汲取國際最新絕緣材料劣化之研究資料，作為變壓器老化診斷參考。IERE 研究小組針對耐熱型絕緣紙老化反應靈敏的甲醇化學指標進行研究，在第一階段研究成果已對甲醇和絕緣紙老化關係獲得確認，並預定於第二階段中透過國際開蓋內檢結果進行化學指標與聚合度關係驗證，期第二階段結束時可建立甲醇與絕緣紙老化數學關係模型。

IERE 『利用變壓器油中甲醇含量作為絕緣紙老化新指標研究』工作小組第一階段研究工作共進行 4 年，分別在加拿大、香港、墨西哥及台灣舉行會議，本年度為該計畫推動之第二階段研究工作第二次舉行年度會議，參加第二階段研究的成員包含香港 CLPRI (中電科技研究院)、日本 CRIEPI (電力中央研究所)、挪威 SINTEF (工業技術研究院)、芬蘭 VAISALA (研發生產量測設備之公司)、韓國 KEPRI (KEPCO 電力公社研究機構)、韓國 Hyundai Electric (電氣元件與設備分銷公司)。第二階段研究於 2019 年啟動，台電綜合研究所於 2020 年加入該研究團隊，並於 2021 年首次參加工作小組會議(視訊)，本次會議將對各國近期開蓋成果及其他國際變壓器診斷技術經驗進行國際分享。

貳、出國行程

日期	拜訪公司	城市	工作內容
112年10月9日			往程(台北—日本-東京)
112年10月 10日~11日	VAISALA	日本 東京	參加日本電力資料交換組織(IERE)變壓器絕緣紙老化新指標(甲醇)第二階段研究小組工作會議
112年10月12日			返程(日本-東京—台北)

參、會議內容

一、變壓器甲醇診斷模型建立開發進度

1.1 台電綜合研究所開蓋驗證近況簡報

台電綜合研究所為驗證絕緣紙老化後甲醇與平均聚合度間數學模型關係，近年致力於退役變壓器之內檢驗證，獲取變壓器繞組之絕緣紙樣品，取樣點包含高壓與低壓繞組之上部、中部、底部的內、中、外部位導線，並針對每條導線的靠銅側與靠油側絕緣紙分別取樣測試其平均聚合度(圖 1)。絕緣紙的平均聚合度表示絕緣紙的老化程度，絕緣紙新品的平均聚合度約 800~1200，平均聚合度隨絕緣紙老化而降低，一般將 200 視為壽命終點。



圖 1: 台電綜合研究所繞組絕緣紙取樣點

台電綜合研究所本次分享三種典型老化模式的平均聚合度分布結果(圖 2)，並以顏色呈現平均聚合度測試值，平均聚合度越高(老化程度越少)顏色偏綠，平均聚合度越低(老化程度越嚴重)顏色偏紅。

典型的絕緣紙老化分布共通性，在低壓繞組因運轉電流較高壓繞組大，線溫較高，因此會有相對高壓繞組更嚴重的絕緣紙老化；而絕緣油因熱對流與變壓器散熱設計的特性，

會在變壓器的上部有較高的油溫，導致上部的絕緣紙發生較嚴重的熱老化。但台電公司觀察到三種擁有不同特徵型態的特殊老化典型，包含高線溫引起的熱老化、絕緣油高水分與酸價引起的催化性老化，以及繞組散熱不良引起的區域性老化。

我們可以在並聯電抗器 D56031 的絕緣紙平均聚合度分布中，觀察到高線溫引起的熱老化典型。變壓器投入使用時負載由 0%~100% 依供電需求起伏，但並聯電抗器一旦投入使用即為 100% 負載，這造成需長時間連續運轉之並聯電抗器容易有高線溫與高油溫情形。而我們在並聯電抗器的老化模型中觀察到靠銅絕緣紙較靠油側絕緣紙有明顯老化程度較嚴重的情形，其靠銅側平均聚合度顯著低於靠油側絕緣紙。

在台電公司僅有少數大型變壓器絕緣油酸價有高於 0.1mg/ KOH g，而這些變壓器通常也會觀察到絕緣油界面張力偏低與糠醛過高的情形。在酸價過高的變壓器 B06040 的拆解變壓器驗證中，我們可以觀察到絕緣油高水分與酸價引起的催化性老化典型。在與持續接觸流動絕緣油的靠油側絕緣紙，平均聚合度有顯著低於靠銅側絕緣紙的老化現象，研判係為酸催化下加速反應使平均聚合度降低的結果。

而在品牌不同但與 B06040 變壓器同為自然風冷之降溫設計之 69kV 25MVA 變壓器 B03035，我們則可以觀察到其絕緣紙老化最嚴重區分布於繞組中部，此與變壓器在繞組上部老化最嚴重之典型分布不同，顯示本變壓器油道等散熱設計相較於多數變壓器在繞組內部的散熱能力較差。

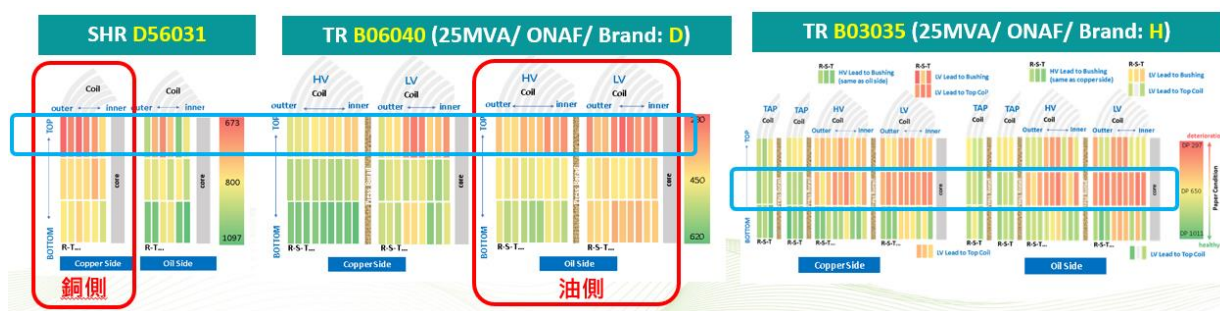


圖 2: 台電綜合研究所開蓋驗證分享案例

台電綜合研究所自 2015 年起已累計 10 件拆解變壓器驗證案例，並預定 2024 年尚有 1~2 件案例持續進行甲醇可用性驗證。依目前案例經驗，同為老化指標之二氧化碳屬熱老化指標氣體，產出濃度對溫度敏感性較高，使用之絕緣油或絕緣紙之材料亦影響產氣量，因此二氧化碳濃度與絕緣紙老化程度(平均聚合度間)之數學關係性不佳；而糠醛產出濃度則與使用之絕緣紙為普通絕緣紙或熱升級絕緣紙有顯著關係，並應套用不同數學模型來推估絕緣紙老化情形，當使用絕緣紙材料種類資訊不足時將無法決定應套用何數學模型，另外糠醛對絕緣油酸價的敏感性及油處理的影響性高，此可能為導致拆解變壓器驗證結果無法與數學模型吻合的原因；甲醇為目前拆解變壓器驗證結果與數學模型最吻合的化學指標，使用甲醇作為化學指標在未來應可對變壓器老化程度之評估更為精準。

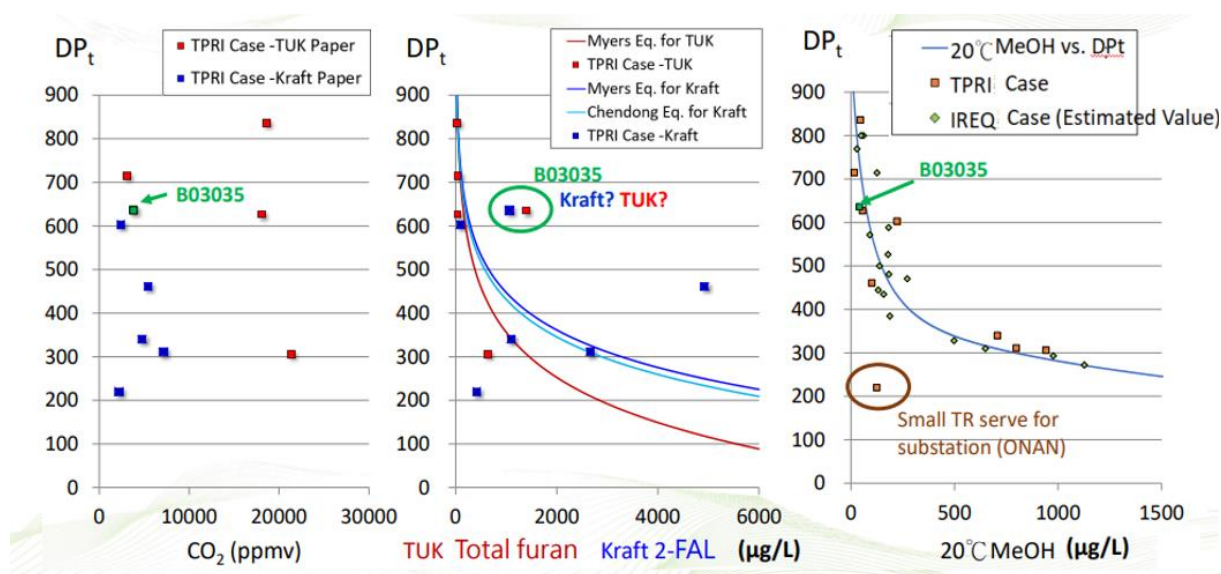


圖 3: 台電綜合研究所開蓋驗證案例總匯

1.2 IERE 研究團隊開蓋驗證近況簡報 (Engie 公司)

目前 IERE 變壓器絕緣紙老化新指標(甲醇)第二階段研究小組共累計拆解變壓器驗證案例共 25 件，其中共 15 件為資訊不完整之案例，無法應用於本次變壓器老化數學模型建立，另 10 件為可用案例，各研究小組成員拆解之案例數統計如表 1。

資訊不完整之案例可能存在下列情形導致該拆解案例無法使用：(1)數據呈現相當高的平均聚合度，且甲醇濃度值低於方法偵測極限，顯示該設備狀態接近新品，無研究價值。該設備被作為拆解對象可能導因於其發生故障，而非具有老化問題之變壓器於退役後進行拆解研究；(2)缺乏甲醇濃度、油溫、低平均聚合度或高平均聚合度之必要資訊；(3)有極低的平均聚合度測值，但甲醇測值偏高，顯示其可能經過換油或濾油等油處理影響數據值，而應被視為異常值排除進入統計與數學模型建立用。

考量拆解案例之資料完整性及建立模型所需之案例數量，本拆解案例之數據統計不考量絕緣紙樣品來自導線靠油側或靠銅側，亦不考量其來自相同垂直高度點的內、中、外部位，直接使用所獲得之數據或取數據平均值使用。可用案例至少應包含下列資訊：(1)20°C 甲醇濃度值；(2)低平均聚合度(低壓繞組上部絕緣紙)；(3)高平均聚合度(高壓繞組下部絕緣紙)。

表 1:IERE 變壓器絕緣紙老化新指標(甲醇)第二階段研究小組拆解案例數統計

研究小組成員	拆解案例數(統計至 2023 年)
CLPR	4
HYUNDAI Electric	6
KEPRI/KEPCO	1
SINTEF	4
ENGIE Laborelec	6
FUJI Electric	1
TPRI	3

加拿大魁北克電力公司研究所(IREQ)於 2018 年已發表甲醇換算絕緣紙平均聚合度數學模型公式。該模型由單一電力公司所驗證，IERE 變壓器絕緣紙老化新指標(甲醇)第二階段研究小組期待能對數學模型公式進行來自國際各成員之多元驗證，並將公式進一步發展為高平均聚合度與低平均聚合度雙曲線，以期能利用甲醇測值對整台變壓器的平均聚合度的高低分佈有所架構，而非僅獲得數據平均值資訊。其中，低平均聚合度為評估設備使用風險程度之重要關鍵。

目前因拆解案例數仍偏少，且需再蒐集高甲醇、低平均聚合度之拆解案例，方能將數學模型建置更完整，因此原定 2023 年截止之研究，決議順延至 2024 年，由各國持續努力並期待新成員的加入，增加數學模型的完整度。

二、變壓器診斷經驗技術分享簡報摘要

2.1 AI 與機器學習在變壓器診斷之應用

香港 CLPRI (中電科技研究院) 11kV 配電變壓器在香港共約 2 萬台，矽油變壓器每 12 年試驗 1 次，礦油變壓器每 6 年試驗 1 次，每年超過 1000 個樣品，缺乏 DGA 變壓器診斷標準、設備規格資料、有經驗的診斷工程師人力，為解決人力短缺問題，並防止經驗斷層不利業務推行，遂發展 AI 與機器學習技術，對絕緣油試驗結果進行自動化診斷。

透過輸入(INPUT)包含變壓器製造年份、絕緣油類型等基本設備規格，以及油中氣體分析數據(含杜威三角等診斷法套用結果)、水分、耐壓、酸價等絕緣油試驗結果，利用電腦 AI 產出該變壓器應持續監測、重新取樣、縮短試驗週期、不需處理之之 OUTPUT 診斷結果。當 OUTPUT 診斷結果有偏差時，再利用有經驗工程師的意見回饋，重新訓練導正 AI。

表 2:香港 CLP 公司 AI 與機器學習之輸入與輸出資訊

INPUT	OUTPUT
1.各種油試結果 2.設備規格等資訊 3.診斷法套用結果	1.持續監測 2.重新取樣 3.縮短試驗週期 4.不須處理(no action)

2.2 熱升級紙的熱老化模擬計算診斷

日本 CRIEPI 利用紀錄周溫、電壓、電流、電阻、電容等資訊，建立熱源傳遞與損失之數學模型來計算線圈歷史溫度，進而計算紙的熱老化程度。Kraft 紙在 2012 年依此數學模式計算 DP，拆解變壓器驗證結果計算 DP 值與量測 DP 值差異約在 10% 以內。

利用老化試驗確認 TU 紙聚合度降低時間與溫度的關係後，重新建立適用於 TU 紙的數學模型。雖老試驗溫度為

>100°C，但假設<100°C老化速率在 Kraft 紙與 TUK 相同建立 TU 紙之數學計算模型，所發展的方法將能夠評估動態考慮熱點的電源變壓器額定負載溫度和絕緣紙的壽命消耗。

2.3 線上 DGA 診斷案例

VAISALA 公司 9 種溶解性氣體成分之變壓器線上狀態監測產品，安裝於某 100MVA 送油風冷單相外鐵式變壓器。該變壓器因油中含 DBDS 於高溫時有產生腐蝕硫之風險，於 2017 年安裝線上 DGA。2021 年線上 DGA 警報，但保護電驛未動作，杜威五角診斷結果為絕緣紙被覆部位過熱。內檢結果發現繞組出口至套管之引線疑似因 lead joint 接點鬆動過熱。此為有效利用線上多成分油中溶解性氣體監測設備，成功預警並輔助故障部位診斷後修復變壓器之案例。

2.4 糠醛攜帶式快速測試產品開發

韓國 KEPRI 開發油中糠醛之快速檢測產品。利用藥劑對絕緣油進行萃取後，汲取萃取液沾濕顯色試紙，即可對 0.1~10ppm 之糠醛濃度進行顯色，濃度越高顏色越紅，再利用將試紙插入快速辨色可攜裝置自動判定數據結果。該產品為高成本之實驗室檢測以外，另一適用於現場即時大量快速檢測之方式。

2.5 亭置式變壓器糠醛模型

韓國 KEPCO 國內有約 60000 台亭置式變壓器，預定進行延壽使用，因此每年抽風險高的 3000 台做絕緣油試驗。為確認糠醛測值與亭置式變壓器絕緣紙老化程度間的關係，KEPCO 拆解 10 台亭置式變壓器測試絕緣紙平均聚合度，建立專有之數學模型。

2.6 加速老化試驗

韓國 KEPCO 離岸變電所之變壓器為考量環境友善，選擇使用脂類油取代礦物油的比例自 2017 年起從 10% 持續增加。為確認脂類油特性，依 IEC C57.106 進行 150°C、180°C、210°C 加速老化試驗，並測試黏度、水分、耐壓、油中氣體、平均聚合度、糠醛、甲醇。

脂類油在 180°C 加速老化試驗中發現，甲醇會在前 300 小時中快速出現後，疑似與脂類油反應又快速消逝；而糠醛 (furfural) 則在 300~600 小時的成長後緩慢消失，疑似轉化為呋喃 (furan)。

韓國 Hyundai 公司使用熱升級絕緣紙利用不同條件(溫度、紙重、水分等)下的加速老化試驗，測試甲醇、糠醛、含水量等數據，希望建立壽命評估模式。對測試結果的解讀方式目前還在研究中。

2.7 循環加速老化試驗

比利時 Engei 公司參加 CIGRE D1.76 研究團隊進行循環加速老化試驗研究。有別於一般加速老化試驗僅對絕緣紙持續性加熱，循環加速老化試驗透過重複的加熱、降溫、開蓋(接觸空氣)的循環程序進行。在降溫的過程會使水分回到絕緣紙中造成加速老化，因此在循環溫度的老化試驗中老化速度比持續加溫的老化速率更快，且應更貼近實際變壓器的運轉狀況模擬。研究結果發現不論使用 TU 或 KRAFT 紙，DP 在濕度較高的絕緣紙中均下降較快，而不論使用 TU 或 KRAFT 紙，DP 在礦物油中下降較脂類油中快。

2.8 絕緣油採購規格

為避免絕緣油之非故障產氣特性影響 DGA 診斷，IEC 60296 正式於 2020 年新增迷走氣體(stray gassing)試驗允收標準，而比利時 Engei 公司則依 ASTM 法測定迷走氣體後之數據統計結果訂定之採購允收標準。依其允收規格可看出，迷走氣體在無添加抗氧化劑之絕緣油中會產出較多，而

添加抗氧化劑的絕緣油產品迷走氣體的產生量較低。

表 4: 比利時 Engei 公司 2023 絕緣油採購契約 Strya Gassing 規格要求

絕緣油種類		測試方法	允收
Engie公司 高級礦物油 氧化安定性較佳 總硫量Max 0.05%	添加抗氧化劑 DBPC 0.2~0.4%	ASTM D7150 (A法、空氣)	H2: Max 100ppmv CH4: Max 20ppmv C2H6: Max 20ppmv
		IEC 60296 (空氣、銅)	H2: Max 50ppmv CH4: Max 50ppmv C2H6: Max 50ppmv
Engie公司 標準礦物油 氧化安定性一般 總硫量Max 0.15%	無添加抗氧化劑 DBPC <0.005%	ASTM D7150 (A法、空氣)	H2: Max 200ppmv CH4: Max 200ppmv C2H6: Max 200ppmv
	添加抗氧化劑 DBPC 0.2~0.4%	ASTM D7150 (A法、空氣)	H2: Max 100ppmv CH4: Max 20ppmv C2H6: Max 20ppmv

三、新豐洲地下變電站參訪

由於日本嚴格的空間限制，現在在山區、建築物內和市中心地下等不同地點建造變電站，變電站需要採用緊湊型設計，以滿足日益增長的電力需求並降低建造成本。在山區、城市中心和地下等小限制區域建造大型 500kV 變電站為電力公司之重要技術。500 kV 新豐洲地下 GIS 變電站自 2000 年起由東京電力公司 (TEPCO) 運營為日本東京地區供電，其為全世界第一所 500kV 地下變電所，該變電站採用先進的壓實設計，經濟性地減少建設工期和變電站建設成本。

新豐洲變電站採用世界上第一座圓形建築。設備佈局方面由三個單元組成，每個單元位於圓形的 120 度扇區之一。為了實現設備的小型化，透過在變壓器、並聯電抗器等設備附近安裝避雷器，將雷電衝擊耐受電壓 (LIWV) 從 1300kV 降低到 1050kV。變壓器本體可分為四段 (每相)，以在建造期滿足東京地區嚴格的運輸規定。500kV 設備，母線為三相外殼式，斷路器為垂直單相外殼式，具有一斷點，降低設備高度。東京電力開發了多項技術來最大限度地減少變電站面積，如下所示。

(1)由於道路交通限制，大型三相變壓器均以單相機組運輸。然而，目前變壓器在工廠被拆成繞組、鐵芯和油箱，並在工廠測試後運送到現場。然後它們在現場重新組裝。變壓器安裝採用此運輸方式。

(2)新豐洲變電所採用立式單斷點斷路器。

(3)由於採用高性能避雷器減少了雷擊突波和操作突波，GIS 間隔輸電線路的空氣絕緣距離由 34m 減少到 27m。

(4)由於採用了更高應力的墊片和耐熱密封材料，提高了罐體允許溫度，GIS 罐體直徑減少。因此，與 20 世紀 70 年代建造的傳統空氣絕緣變電站相比，這些技術改進使所需面積減少了約 80%。

新豐洲變電站 1500 MVA 變壓器總長約 60 米，安置於地下四樓，因此設備設計之散熱採水冷式，直接於變壓器旁散熱油管外以水冷管進行冷卻，不需將油管拉回 1 樓地面戶外進行風冷散熱。為強化散熱，變壓器內部採導向破油設計，經水冷後的絕緣油透過導引之油道流入繞組內部降溫。因該變壓器設計散熱良好，TEPCO 公司認為無熱故障問題，因此在維護策略上安排每 6 年執行 1 次油中溶解性氣體檢測。

新豐洲變電站 300 MVA 變壓器採 SF6 氣體絕緣設計，結合 GIS 和 CHD 設計於變壓器內部結構中，可將總體積降低至油浸式變壓器與獨立之 GIS 和 CHD 體積合的 50% 以下。本氣體絕緣變壓器(GIT)每 1 年執行 1 次多成分分析，且評估該設備運轉狀況良好又結構緊湊，未來 300MVA 變壓器規劃將全面使用氣體絕緣設計。而其 275 kV 氣體絕緣開關設備(GIS)目前運作良好，無規劃定期執行之 SF6 化學檢測，亦無加裝其他線上設備。

表 5: 日本 TEPCO 公司新豐洲變電站電力設備之設計與維護

電力設備	設計與維護策略
500 kV/1500 MVA 油浸式變壓器	1. 導向破油水冷(ODWF)。 2. 每 6 年執行 1 次 DGA 檢測。

275 kV/ 300 MVA 氣體絕緣變壓器	<ol style="list-style-type: none"> 1. 每 1 年執行 1 次多成分分析。 2. 未來 300MVA 變壓器全面生產 GIT。
500 kV/ 275 kV GIS	<ol style="list-style-type: none"> 1. 必要時始執行含水量、純度、SO₂ 檢測(無定期檢測)。 2. 無線上監測設備。

肆、心得與建議

1. 甲醇應用於變壓器診斷在台電公司之拆解變壓器驗證中效果良好，未來將與國際合作持續研究。台電公司及台灣之工業環境提供優良的內檢驗證資源，可有效提升台電公司電力設備之檢驗與診斷能力，並透過參與國際老化模型之建立過程，提供台電公司數據資訊應用於數學模型之擬合，可使未來國際公告之數學模型更適用台電公司電網系統。
2. 並聯電抗器之運轉模式在長時間投入使用時會產生較高的線溫與油溫，導致設備之熱老化情形較電力變壓器顯著，又台灣夏季戶外溫度高，如風冷之散熱鰭片遇西曬時可能導致散熱效果受限。新豐洲變電站 1500 MVA 變壓器使用水冷方式散熱，可於室內建置相關設備，惟所內耗電量可能較風冷式高，又應慎防漏油與生鏽問題，但對散熱環境較嚴苛之並聯電抗器或變壓器亦可作為採購時評估與參考。
3. 迷走氣體(stray gassing)在 IEC 60296 及比利時 Engei 公司等單位均納入新油採購規格，主要目的為避免非電氣故障產生之油中溶解性氣體影響 DGA 診斷。近年台電公司在變壓器未發生異常狀態下絕緣油有 CO 偏高之情形，影響線上與實驗室 DGA 偵測與警報之有效性，而部分設備則有 H₂ 與 C₂H₆ 氣體產量偏高情形影響 DGA 診斷。台電公司目前電力變壓器依 I002 材料規範進行絕緣油採購，所購油種屬於微量抗氧化劑絕緣油，無法直接參考現有 IEC 60296 及比利時 Engei 公司迷走氣體採購規格要求，而微量抗氧化劑絕緣油主要基礎油以無抗氧化劑絕緣油為主，在 Engei 公司經驗屬較易產生迷走氣體之油品。為在變壓器 DGA 診斷提升精準性，避免迷走氣體的產出影響線上監測與實驗室診斷，建議本公司建立迷走氣體試驗法，並對絕緣油進行廣泛性抽測後，評估將迷走氣體納入採購規範之需求。