

出國報告（出國類別：實習）

核能電廠發電機斷路器維護技術

服務機關：台灣電力公司第四核能發電廠

姓名職稱：李青洲 電機工程師

派赴國家：法國

出國期間：95年9月22日至95年10月5日

報告日期：95年11月20日

出國報告審核表

出國報告名稱：核能電廠發電機斷路器維護技術		
出國人姓名	職稱	服務單位
李青洲	電機工程師	台灣電力公司核四廠
出國期間：95年9月22日至95年10月5日		報告繳交日期：95年11月20日
出國計畫主辦機關審核意見	<input checked="" type="checkbox"/> 1. 依限繳交出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 2. 格式完整（本文必須具備「目地」、「過程」、「心得」、「建議事項」） <input checked="" type="checkbox"/> 3. 內容充實完備。 <input checked="" type="checkbox"/> 4. 建議具參考價值 <input checked="" type="checkbox"/> 5. 送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 6. 送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 7. 退回補正，原因： <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input checked="" type="checkbox"/> 8. 本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： <input checked="" type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會（說明會），與同人進行知識分享。 <input checked="" type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 9. 其他處理意見及方式：	
層轉機關審核意見	<input type="checkbox"/> 1. 同意主辦機關審核意見 <input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分_____（填寫審核意見編號） <input type="checkbox"/> 2. 退回補正，原因：_____ <input type="checkbox"/> 3. 其他處理意見：	

說明：

- 一、出國計畫主辦機關即層轉機關時，不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 三、審核作業應於報告提出後二個月內完成。

報告人	 單位 主管 	主管處 主管  	總經理 副總經理：徐懷賢 蕭專業 總工程師 施專業 總工程師  
-----	--	--	---

11.26.2

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

核能電廠發電機斷路器維護技術

頁數 35 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

台灣電力公司/陳德隆/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

李青洲/台灣電力公司/第四核能發電廠/電機工程師/(02)24902401ext2928

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：**95/09/22~95/10/05** 出國地區：**法國**

報告日期：**95/11/20**

分類號/目

關鍵詞：

發電機斷路器(Generator Circuit Breaker, GCB)

暫態恢復電壓(Transient Recovery Voltage)

隔相匯流排(Isolated Phase Bus)

同步並聯(Synchronizing)

故障電流(Fault Circuit)

非對稱程度(Degree of Asymmetry)

內容摘要：(二百至三百字)

早期的電廠電力系統設計理念與現今有些許差異，目前運轉服役中的三座核能發電廠的發電機與主變壓器之間皆未裝設發電機斷路器(Generator Circuit Breaker)，然而興建中的第四核能發電廠為將來國內首座採用發電機斷路器的核能電廠。雖然相關的理論與技術已相當成熟，但為了確保電力設備於日後運轉服役時能穩定且正常操作，有必要於現階段針對大容量發電機組所使用的發電機斷路器進行維護技術實習並汲取相關單位之經驗回饋。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

誌 謝

一份報告充其量僅是工作中一段經歷的見聞，它不是教科書，自然無法將所有相關的知識學問包括其中。報告撰寫的目的，除了記錄研習過程的見聞與收獲外，更重要的是藉由資料的整理與研究同相關領域的從業人員做經驗交流與回饋，從而使彼此之間在專業領域上能取得更大的成就與精進。本文主要是針對大容量發電機組尤其是核能發電廠所用的發電機斷路器(Generator Circuit Breaker)的應用與維護技術做一概括性的分析與探討。

在此感謝核四廠廠長徐懷瓊、副廠長邱德成、電氣課長陳肇寅等長官給予筆者此次赴法國研習的機會。感謝日本國女川原子力發電所電氣保修課瀧澤昌夫及東北電力駐WANO Tokyo Centre工程師山田愛子遞交珍貴的電力系統資料供參考。

感謝核四廠電氣課長陳肇寅與多位同仁在專業技術上的指導，感謝核四廠電算課商茹嵐在我於法國研習期間給予我在電腦設備問題上最及時的協助，讓我充份感受到工欲善其事，必先利其器。感謝綜合研究所黃啟原於相關參考資料收集與提供。感謝核三廠電氣課李青霖、林志冠高豪強、阮瑞凱於實務應用上的指導，以及美麗大方的課務小姐陳淑貞、陳淑靜所準備的香醇咖啡與下午茶，這些長官與同事們對我在專業領域上的成長有著決定性的影響與幫助。

接著要感謝的似乎與本篇報告沒有多大的關係，就是母校台灣科大國際標準舞社全體社員，感謝他們在我無聊的時候陪我練舞。及我摯愛的妻子余睿婕，感謝她在無數個浪漫的日子，陪著我在龍磐公園望星空、九棚沙漠騎四驅、關山夕照賞日落，用我倆在墾丁沙灘上的足跡伴我渡過在核三廠大修的日子。

目 錄

出國報告書審核表	02
出國報告提要	03
內容摘要	04
誌謝	05
目錄	06
圖表目錄	08
一、緒論	09
1.1 出國目的	09
1.2 出國行程	10
1.3 研究背景與動機	11
1.4 文獻回顧	12
1.5 研究貢獻	13
1.6 報告架構	13
二、發電機斷路器之必要性	14
2.1 發電機斷路器的使用與發展現況	14
2.2 發電機殘餘電壓對設備的衝擊	15
2.3 主變壓器故障的潛在風險	15
2.4 備用電源切換造成之電氣衝擊	17
2.5 發電機運轉中的不平衡負載	17
三、發電機斷路器之應用	18
3.1 發電機斷路器之主要功能	18
3.2 遮斷容量與故障電流	19
3.3 發電機斷路器組成部件	21
3.4 規劃設計與規格要求	24
四、發電機斷路器維護技術	27
4.1 產品特性簡介	27
4.2 裝設發電機斷路器技術分析	28

4.3 裝設發電機斷路器經濟分析	29
4.4 操作與維護保養技術要領	30
4.5 相關設備於全球服役現況	32
五、結論	33
5.1 心得	33
5.2 建議事項	33
5.3 後記	34
參考資料	35

圖表目錄

圖 1-1 變壓器內部壓力上升與時間之關係	16
圖 3-1 伊方一、二號機所內電源系統圖	19
圖 3-2 系統示意圖	20
圖 3-3 核四廠發電機斷路器剖面圖	22
圖 3-4 發電機斷路器單一極組立圖	23
圖 3-5 發電機斷路器內部實體圖	23
圖 3-6 典型故障電流波形	25
圖 3-7 加速故障電流衰減之波形	25
圖 3-8 GCB 開斷動作波形	26
圖 4-1 第四核能發電廠電力系統圖	30
表 1-1 變壓器內部故障分析	17
表 3-1 核四廠發電機斷路器性能參數	21

一、緒論

1.1 出國目的

台灣地區早期所興建的核能電廠皆未於發電機(Generator)與主變壓器(Main Transformer)之間裝設發電機斷路器(Generator Circuit Breaker)，如此設計雖然能降低初期投資的成本，但卻無形中增加未來運轉服役時的跳機與部份設備因故障所毀損的風險。

目前正在興建中的核四廠(Lungmen Nuclear Power Station)為台灣地區首座採用發電機斷路器(GCB)的核能電廠，本設備無論在實體體積、機械結構特性與電氣特性、額定容量等性能諸元皆為目前台灣地區所採用的發電機斷路器中最大者。核四廠所裝設的單一發電機組容量為國內最大者(1350MW)，由於缺乏發電機斷路器(GCB)於大容量發電機組應用與維護保養之經驗，因此於龍門計畫執行至相當階段時，有必要針對發電機斷路器於大容量發電機組之功能、應用、運轉與維護等相關技術進行研習，並汲取製造廠家與世界上其它電力事業單位對於類似產品之服役現況與經驗回饋。

近年來台灣地區發生 729、921 等重大停電事故，再加以核能電廠無論在安全性、可靠度與電力設備保護亦為未來優先考量之課題，發電機斷路器的設置實在有其必要性。此行除了研習本項設備的維護技術外，瞭解電力系統保護協調之最新趨勢與發展，亦為此次出國目的之一。

1.2 出國行程

AREVA T&D公司為世界知名之電力設備生產大廠，超過二萬五千名員工分佈在世界上 35 個國家中，產品銷售網遍及全球超過 100 個國家地區。正在興建中的第四核能發電廠所採用的發電機斷路器(GCB)亦向 AREVA T&D所採購。本次出國研習安排至AREVA T&D 位於法國里昂 (Lyon)的發電機斷路器生產製造與組裝工廠，針對龍門計畫所採購之設備，進行大容量發電機組暨核能電廠發電機斷路器維護技術實習。

行程及工作內容如下：

(一)95.09.22~95.09.23：往程(台北—巴黎—里昂)。

(二)95.09.24~95.10.02：

於 AREVA T&D 工廠進行核能電廠發電機斷路器維護技術實習。

(三)95.10.03~95.10.05：返程(里昂—巴黎—台北)。

1.3 研究背景與動機

早期由於發電機單一機組的容量並不大(小於 200MW)，且電廠電力系統設計理論的因素影響，由於大容量發電機組並不多見，因此大多未於發電機(Generator)與主變壓器(Main Transformer)之間裝設發電機斷路器(Generator Circuit Breaker)，如此設計雖然能降低電廠興建時初期投資的成本，但卻無形中增加未來運轉服役時的跳機與部份設備因故障電流所造成毀損的風險。

目前運轉服役中的三座核能發電廠皆未裝設發電機斷路器(GCB)，正在興建中的核四廠為台灣地區首座採用發電機斷路器(GCB)的核能電廠，本設備無論在實體體積、機械結構特性與電氣特性、額定容量等性能諸元皆為目前台灣地區所採用的發電機斷路器中最大者。

雖然台灣地區其他大型火力發電廠亦有使用發電機斷路器的經驗，但核四廠所裝設的單一發電機組容量為國內最大者(1350MW)，且性能型式亦有別於其他電廠所採用者。世界各知名生產廠家更將核能級專用的發電機斷路器(GCB)另外成立一個類別與研發單位。由於國內缺乏發電機斷路器(GCB)於大容量發電機組應用與維護保養之經驗，因此於龍門計畫執行至相當階段時，有必要針對發電機斷路器(GCB)於大容量發電機組之功能、應用、運轉與維護等相關技術進行研習與研究，並汲取製造廠家與世界上其它電力事業單位對於類似產品之服役現況與經驗回饋。

筆者有幸能進入台灣電力公司服務從事電機電力方面工作，深切體會發電機斷路器(GCB)在電廠電力系統中所扮演的角色。再加以核能電廠無論在安全性、可靠度與電力設備保護亦為未來優先考量之課題，因此有必要對於發電機斷路器(GCB)進行實用性的探討，所有在電廠從事電機電力相關工作的人員亦應對此設備有一基本的認識與瞭解。

1.4 文獻回顧

早在電力系統發展初期，就已經使用高壓斷路器作為各種電路的開斷、閉合與隔離之用。早期的電廠電力系統設計上，由於大容量發電機組並不多見，因此大多未於發電機(Generator)與主變壓器(Main Transformer)之間裝設發電機斷路器(Generator Circuit Breaker)，雖然如此，仍有部份小容量機組(小於 200MW)的電廠電力系統設計採用高壓斷路器(High Voltage Circuit Breaker)充當發電機主回路出口斷路器(Generator Main Circuit Breaker)。但隨著電力系統的發展日趨複雜，高壓斷路器漸漸難以勝任發電機斷路器的角色〔12〕。

近年來，無論在材料科學與製造科技的進步，使得高壓斷路器重新被拿來討論扮演發電機斷路器(GCB)的可行性〔14〕。然而發電機斷路器(GCB)所應具備的技術條件無論在功能、定義與應用維護上都十分嚴謹〔2、4、5〕，現今國內並無相關的規範可供遵循，實務應用上僅能參考世界上先進國家對此項設備所訂定的法規標準。

在諸多電力系統運轉穩定度的課題中，在故障發生時能有效保護發電機與主變壓器以及解決異步並聯現象發生時，對系統所造成的衝擊應屬最為重要〔9、10、13〕。雖然國際間對於發電機斷路器的理論與實務的研究已十分成熟，但國內對此相關領域的探討並不多見。核四廠所裝設的單一發電機組容量為國內最大者(1350MW)〔8〕，且採用的發電機斷路器亦有別於其他電廠所採用者〔6、7〕。針對發電機斷路器(GCB)於大容量發電機組之功能、應用、運轉與維護等相關技術進行研習探討，實屬必要。

1.5 研究供獻

本篇出國實習與研究報告主要是針對大容量發電機組(核能電廠)裝設發電機主回路出口斷路器的應用與為維護技術的探討，並就實際運轉服役中之機組進行優劣的比較分析。對於電廠電力系統設計、電力系統安全性與可靠度方面的改善應有所助益，因並期許更多的電機電力從業人員能對發電機的保護協調系統能更加重視。

1.6 報告架構

本篇出國實習與研究報告共分為六個章節，以下對各章節做概略性的描述。

第一章為緒論，敘述本報告之出國目的與行程、研究背景與動機、文獻回顧、研究貢獻。

第二章為發電機斷路器存在的必要性，說明發電機斷路器的使用及發展現況、發電機殘餘電壓對設備的衝擊、主變壓器故障的潛在風險、備用電源切換造成之電氣衝擊、發電機運轉中的不平衡負載。

第三章為發電機斷路器的應用，說明發電機斷路器之主要功能、遮斷容量與故障電流、發電機斷路器組成部件、規劃設計與規格要求。

第四章為發電機斷路器維護技術，說明核四廠所使用的 GCB 產品特性簡介、裝設發電機斷路器技術分析、裝設發電機斷路器經濟分析、操作與維護保養技術要領、相關設備於全球服役現況。

第五章為結論，包含本次出國研習的心得、建議事項與後記。

二、發電機斷路器之必要性

2.1 發電機斷路器的使用與發展現況

二次世界大戰結束後，工業技術與製造水平不斷提升，電力需求亦不斷增加。電機電力技術不斷精進，隨著發電機單機容量的不斷增加，使得短路或故障電流(fault current)也相對增大許多。一般傳統的中壓開關斷路器設備已無法滿足遮斷能力的需求，同時為了提高運轉的可靠度與安全性，促使隔相匯流排(Isolated Phase Bus)的問世與發展。自 1960 年起，許多電廠電力系統設計中漸漸體認到發電機斷路器(Generator Circuit Breaker)的存在有其必要性，世界先進國家在電廠設計中，其大容量發電機出口端皆考慮裝設 GCB。自 1969 年第一台發電機斷路器問世迄今已逾 37 年，經過不斷地研究改進，整體故障率已小於 0.3%。現今的發電機斷路器已不僅僅是一台斷路器，而是集合了電壓互感器、電流互感器、隔離開關、接地開關等發電機與主變壓器之間的設備，成為具備多種功能的電力設備總成。電力系統的發展趨勢朝向大電網、大機組、超高壓，如何簡化電廠電力設備的運轉維護，提高機組的可用率以及提高系統的安全性和穩定性等問題，使得發電機斷路器(Generator Circuit Breaker)的研究發展成為電廠電力系統中一項重要的課題。

目前世界上重要的電力設備研發機構對於發電機斷路器的技術發展十分重視，從原來的少油型向 SF6 型和真空型、壓縮空氣型斷路器，體積愈來愈小，額定電流和遮斷電流愈來愈大，機械壽命更超越 10000 次以上。隨著研發能力與製造技術的提升，GCB 對於電廠電力設備的保護將日趨完善。

2.2 發電機殘餘電壓對設備的衝擊

目前台灣地區三座運轉中的核能電廠皆無裝設發電機斷路器(Generator Circuit Breaker)，此一設計，對於任何因故障所造成的保護設備動作所造成的跳機事件，於發電機出口端將無法提供保護協調的功能。雖然相關的保護電驛將適當動作甚至使發電機跳機，卻無發電機斷路器作為隔離來自發電機持續大約 5~20 秒的破壞能量。主要原因為發電機於去磁過程中，需耗時數秒乃至數十秒才能將其出口端電壓降至安全水平。

在此我們需留意一點，發電廠的電力系統配置中，發電機、主變壓器與隔相匯流排中，除了隔相匯流排基本上可視為安全無虞的設備外，其餘設備一旦發生故障皆有可能導致重大災害。因此，設置一套合乎需求的保護系統乃發電廠運轉與維護的重要課題。

2.3 主變壓器故障的潛在風險

對於沒有裝設發電機斷路器的電廠電力系統而言，主變壓器(Main Transformer)一旦發生故障，很可能導致發電機損毀。假設主變壓器高壓側套管對地發生故障，高壓斷路器雖然可立即切斷故障電流，但發電機仍會不斷把電流送至故障點，直到滅磁設備起作用，一般去磁過程所需時間約 5~20 秒不等。特別是對那些在主變壓器高壓側的故障，在最初的 40ms 內，燃弧電流來自系統側和發電機側，將造成變壓器油箱內部壓力迅速上升。40ms 時，高壓斷路器把系統與故障點分開，燃弧電流僅由發電機供給，發電機會把一個因滅磁而衰減的電流源源不斷地送至燃弧點，並持續幾秒的時間。變壓器油箱內部的壓力最終上升至發生爆炸的極限壓力，從而引發變壓器油箱爆炸。但在裝設發電機斷路器的情況下，約在 60ms 時 GCB 將動作切斷發電機故障電流，如此一來，變壓器油箱壓力將可被限制在發生爆炸的壓力以下，變壓器就可避免爆炸。由此可

知，採用發電機斷路器可有效保護主變壓器。

一般而言，變壓器可能發生故障的原因與機率分別為套管間或套管對地間之閃絡故障(30%)，切換器(Tap Changer)接觸端子間短路故障(25%)，部份線圈間閃絡故障(15%)，線圈與外殼間閃絡故障(15%)，高壓側全線圈間閃絡故障(10%)，低壓側全線圈間閃絡故障(10%)。

根據上述故障成因計算其累積破壞能量(Arc Energy)可得到變壓器內部壓力上升與時間之關係，如圖 2-1 所示。表 2-1 的分析可知發電機斷路器對於變壓器內部故障可提供一定程度的保護。

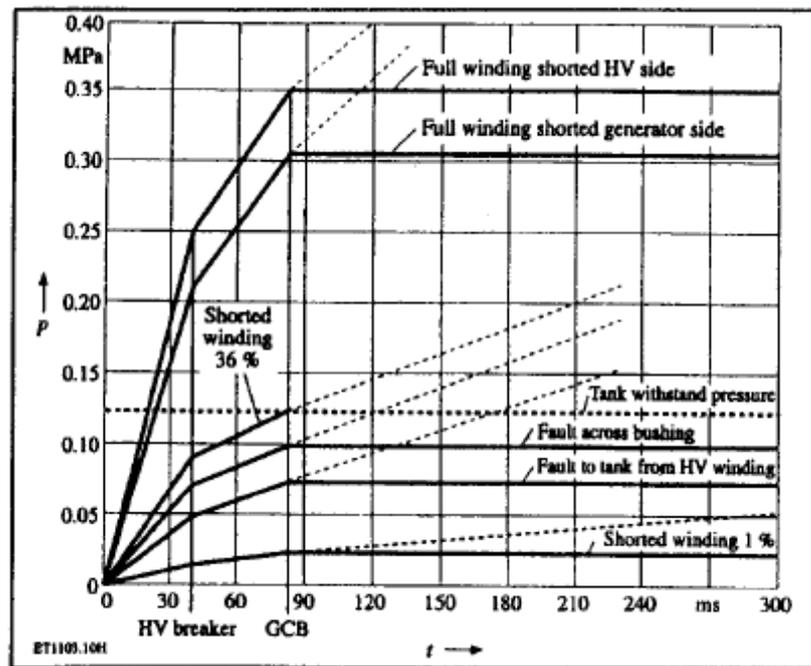


圖 2-1 變壓器內部壓力上升與時間之關係

項目	故障點	比例	GCB 可否防止外殼爆裂
1	套管間或套管對外殼間閃絡	30%	可
2	切換器接觸子間短路故障	25%	可
3	部份線圈間閃絡故障	15%	可 (36%以下)
4	線圈與外殼間閃絡故障	15%	可
5	高壓側全線圈間閃絡故障	10%	否
6	低壓側全線圈間閃絡故障	5%	否

表 21 變壓器內部故障分析

2.4 備用電源切換造成之電氣衝擊

未裝置發電機斷路器的電力系統於發生事故跳機時，輔機之電源切換所產生之瞬間突波將對電動機設備造成相當程度上的電氣與機械衝擊，此一現象可能導致許多旋轉電機機械的壽命大幅縮短。

2.5 發電機運轉中的不平衡負載

發電機於運轉中若有不平衡負載的現象發生，內部或外部發生不對稱短路時均有可能對發電機產生很嚴重的機械與熱應力。這種故障電流 (fault current) 及其非全相運轉的負相序分量，其頻率為兩倍同步頻率。此負相序成份電流引發的熱應力加在發電機轉子的阻尼繞組上，會產生異常的高溫而導致發電機轉子嚴重受損。電力系統若加裝發電機斷路器，則無論是長時間不平衡負載或是短時間事故性不平衡負載，故障現象都可在極短的時間內有相關的保護協調裝置檢出並且跳脫發電機斷路器，有效避免或減低損害的程度。

三、發電機斷路器之應用

3.1 發電機斷路器之主要功能

發電機斷路器(Generator Circuit Breaker)於電廠電力系統中並非單純扮演開斷、關合的功用，同時也具備了保護協調的能力。該設備的主要功能為在最短的時間內，遮斷來自發電機的故障電流並且有效隔離，使維護人員能夠進行故障排除以降低事故造成之損害。

在此，我們以2004年5月19日發生於日本伊方原子力發電所一號機送電停止事件為例，說明發電機斷路器存在的必要性與應用實例。圖3-1所示為伊方原子力發電所一、二號機所內電源系統圖。

事件名稱：伊方原子力發電所一號機送電停止

發生時刻：2004年5月19日 10:00(斷路器跳脫)

事件發生時的動作部件：伊方南幹線一號線斷路器

伊方南幹線二號線斷路器

事件發生時的運轉狀況：額定熱輸出下正常運轉中

事件發生經過：伊方原子力發電所一號機(額定電氣輸出566MW)於額定熱輸出下運轉(電氣輸出518MW)，2004年5月19日10:00伊方南幹線一、二號線斷路器跳脫導致送電停止。一號機的電氣輸出自動降至30MW，經勘察發現乃乙匯流排電壓低下導致後備保護電驛動作使斷路器跳脫。經查明原因並進行故障排除後，於21:30斷路器重新投入並正常供電，本事件並未對周邊環境造成任何幅射污染與放射線外洩。

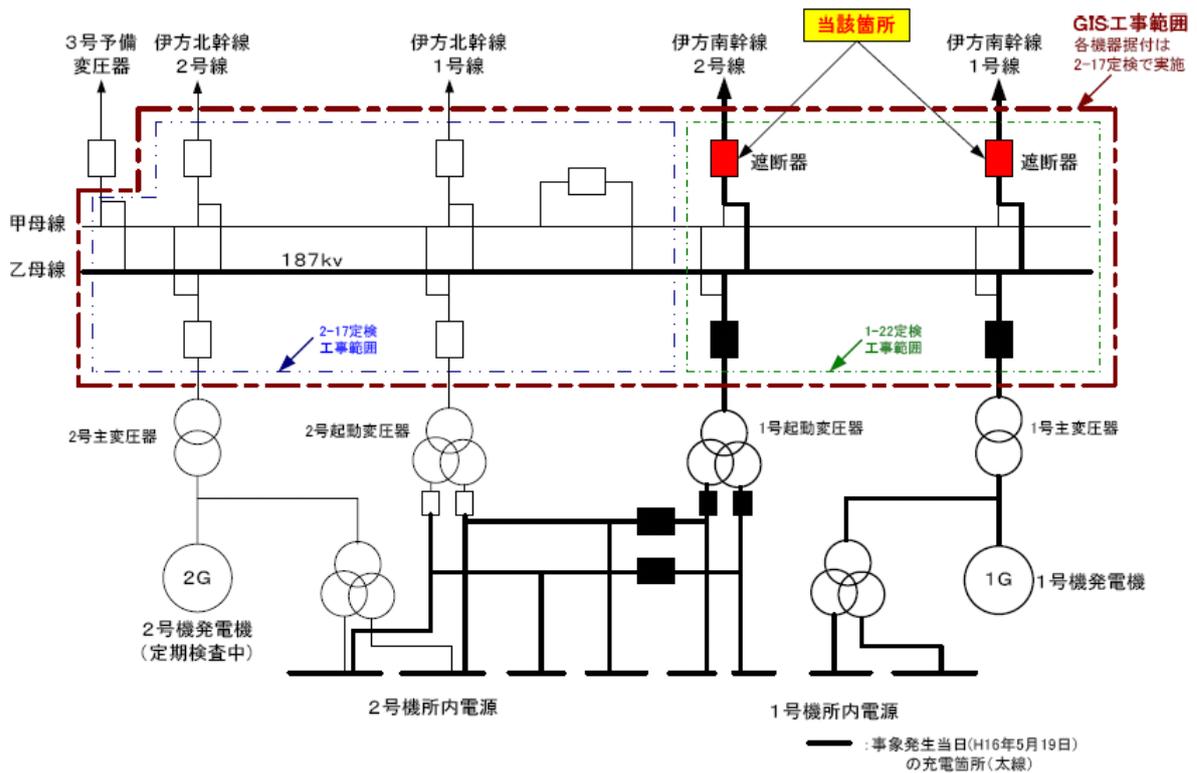


圖3-1 伊方一、二號機所內電源系統圖

由此例可知一旦故障點發生在187kV匯流排之後，則對電廠內部不會造成影響。相對地，萬一故障點發生在主變壓器、發電機匯流排、輔助變壓器等可能導致發電機跳脫的地方，則發電機跳脫後之轉動慣量與剩磁效應將使發電機組持續供應破壞能量至故障點5~20秒，可能造成部份設備嚴重損壞。

3.2 遮斷容量與故障電流

由圖 3-2 的系統示意圖可簡單說明發電機斷路器(GCB)的遮斷責務，當 a 點(發電機輸出端或 GCB 一次側)發生故障時，GCB 應具備承受或遮斷來自系統(包含電動機倒灌成份)之故障電流的能力。當 b 點(GCB 二次側)發生故障時，GCB 應具備承受或遮斷來自發電機之故障電流。

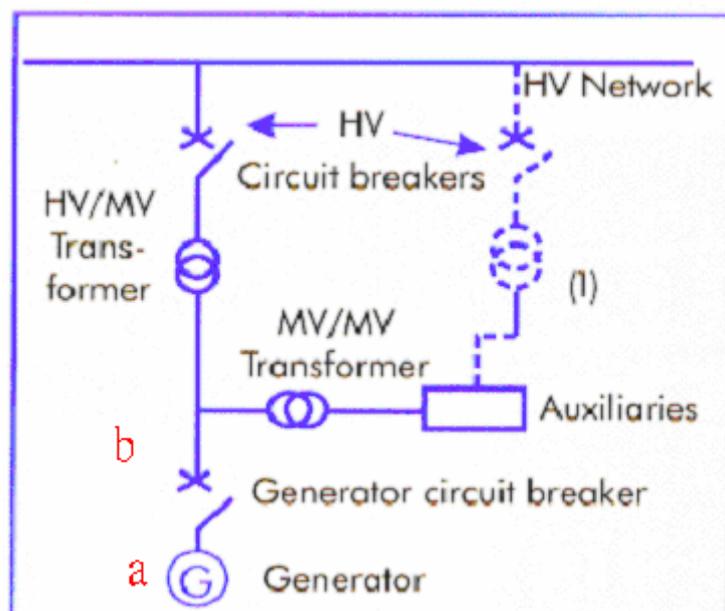


圖 3-2 系統示意圖

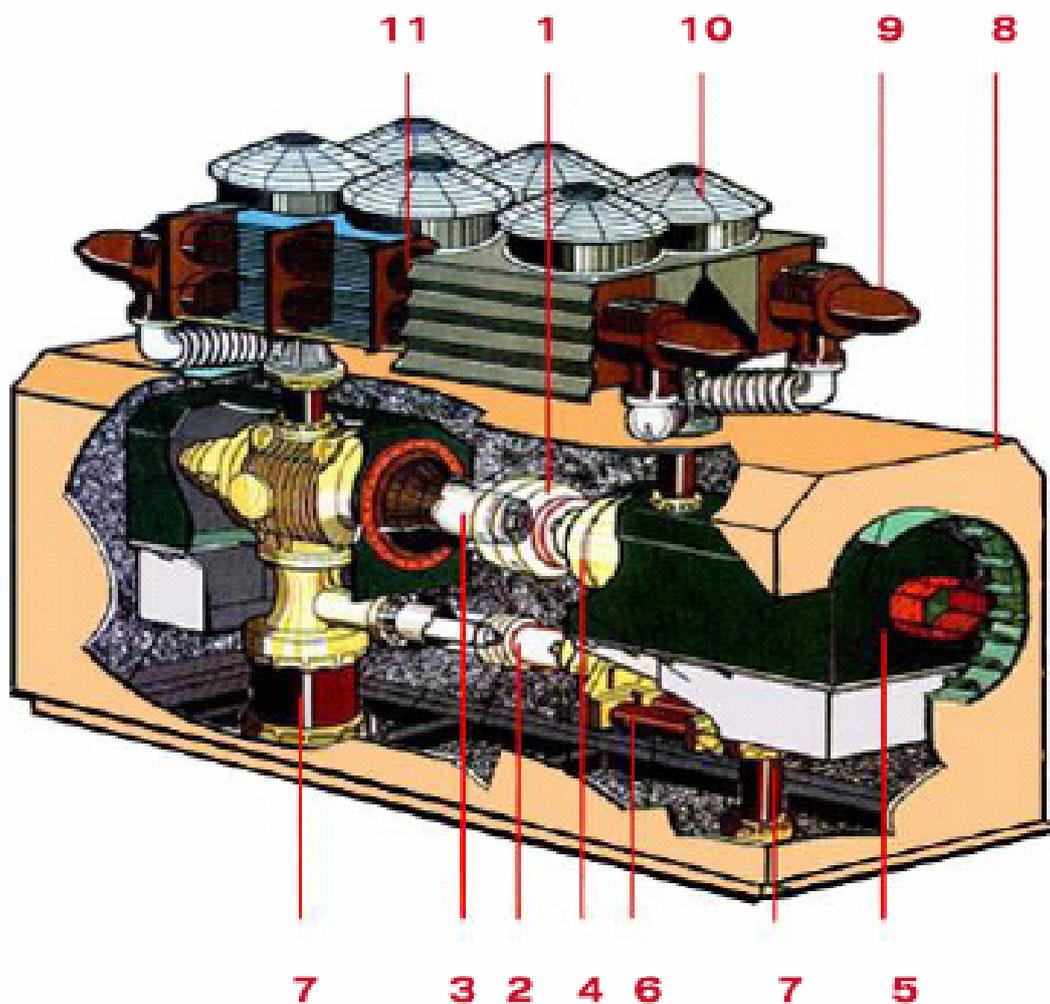
目前市面上已有商用的電力系統分析軟體可供使用者或電力事業單位計算與分析遮斷容量與故障電流，包含額定電流、來自系統之故障電流、來自系統故障電流之非對稱程度 (Degree of Asymmetry)、來自發電機之最大滿載電流、來自發電機故障電流之非對稱程度、最大故障電流尖峰值。發電機斷路器與一般的斷路器不同，所有的電氣性能參數都應被要求通過嚴格的計算與驗證無誤後，方得交付運轉服役。一般而言，發電機斷路器為當然之並聯操作點，但亦可於高壓側相關斷路器另設備用並聯點，以增加運轉維護的彈性。但以高壓斷路器充當同步並聯 (Synchronizing) 開關所牽涉到的技術層面極廣且複雜，這又是廠用電力系統設計中的另一門學問。

3.3 發電機斷路器組成部件

核四廠所使用的發電機斷路器乃採購自世界知名的電力設備製造商 AREVA T&D，其相關之電氣性能參數如表 3-1 所示，組成部件剖面圖如圖 3-3 所示。圖 3-4 為發電機斷單一極(pole)之組立圖，圖 3-5 則為發電機斷路器內部實體圖。

Rated maximum Voltage :	30.45 kV
Rated voltage range factor K :	1
Rated continuous current	35 kA
Rated frequency :	60 Hz
Rated full wave impulse withstand voltage bil (crest) :	150 kV
Rated short-circuit current (symmetrical) :	275 kA
Assigned out-of-phase switching current rating	137.5 kA
Rated interrupting time :	6 cycles
Maximum opening time :	4.5 cycles
Closing and latching capability (crest) :	738 kA
Duty-cycle :	CO - 30 min - CO
Normal operating pressure :	33.4 bar
Minimum operating pressure :	30.0 bar
Mass of tree-pole circuit-breaker :	17400 kg

表 3-1 核四廠發電機斷路器性能參數



Description of one pole of PKG

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 1 - Main Chamber | 7 - Insulated support |
| 2 - Auxiliary chamber | 8 - Enclosure |
| 3 - Moving contact | 9 - Blower |
| 4 - Fixed contact | 10 - Fan |
| 5 - Silencer | 11 - Radiator |
| 6 - Resistor | |

圖 3-3 核四廠發電機斷路器剖面圖



圖 3-4 發電機斷路器單一極組立圖

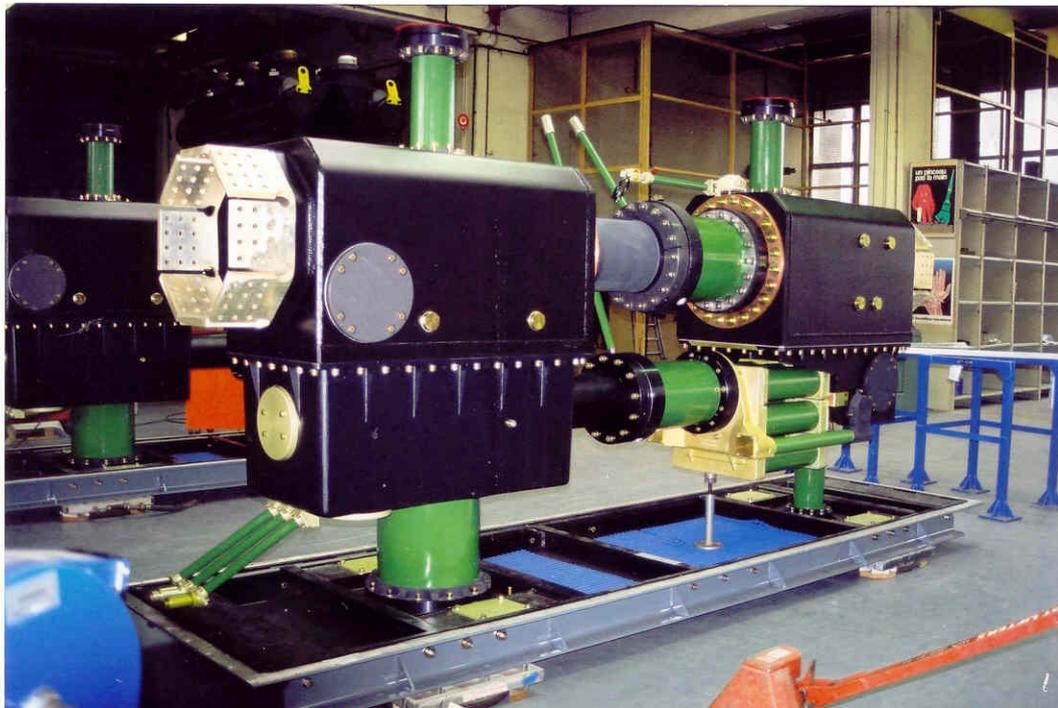


圖 3-5 發電機斷路器內部實體圖

3.4 規劃設計與規格要求

根據相關標準之定義，斷路器之啟斷容量為「斷路器在特定條件下(包括規定的暫態恢復電壓)所能啟斷之電流」。當斷路器開斷故障電流的瞬間所產生的暫態恢復電壓(Transient Recovery Voltage)主要由線路上的 R、L、C 參數決定，L 值愈大，線路之暫態恢復電壓及其上升率愈大，也就是說斷路器較難啟斷故障電流。相對地，C 值愈大，則暫態恢復電壓之上升率降低。因此，規劃設計之初應計算暫態恢復電壓，以確保開斷能力合乎需求。

除了開斷能力外，一些重要的規範項目包括：額定最高電壓、額定短路責務周期、額定允許跳脫延遲、額定負載電流切換能力、非同步電流切換能力、激磁電流切換能力，都是影響發電機斷路器應用的重要參數，在電力系統規劃設計之初都應列入考慮。

所有交流斷路器皆在電流為零點時完成遮斷故障電流的工作，然而下列兩點因素將使發電機斷路器延遲電流零點。第一、故障電流來自發電機本身；第二、非同步並聯時之異常故障電流。

故障點在發電機臨近回路時，來自發電機之故障電流可以下列公式表示：

$$i(t) = \sqrt{2} [(I_d'' - I_d') e^{-t/T_d''} + (I_d' - I_d) e^{-t/T_d'} + I_d] \cos \omega t + \sqrt{2} I_d'' e^{-t/T_a}$$

圖 3-6 為典型的來自發電機故障電流的波形，於該圖中實線曲線需延遲到 100ms 後才與零點交會，此乃因影響直流成份衰減時間常數($T_a = X_d''/R_a$)較大所致，大約 150~400ms。

當發電機斷路器執行開斷動作而接觸子開始分離時，在可動接點與固定接點之間將有電弧(arc)產生，此現象如同在故障回路上加入一電阻器。若產生之電弧電阻效應夠大則可有效降低時間常數 T_a ，將迫使故障電流快速衰減至與零點交會。如圖 3-7 所示，故障

電流約於 65ms 時與零點交會。此乃發電機斷路器必備且應被驗證無誤之功能。

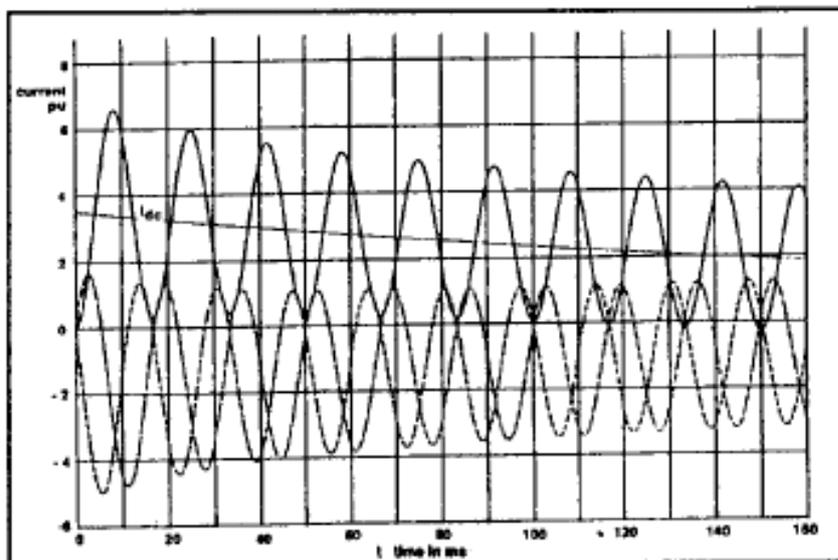


圖 3-6 典型故障電流波形

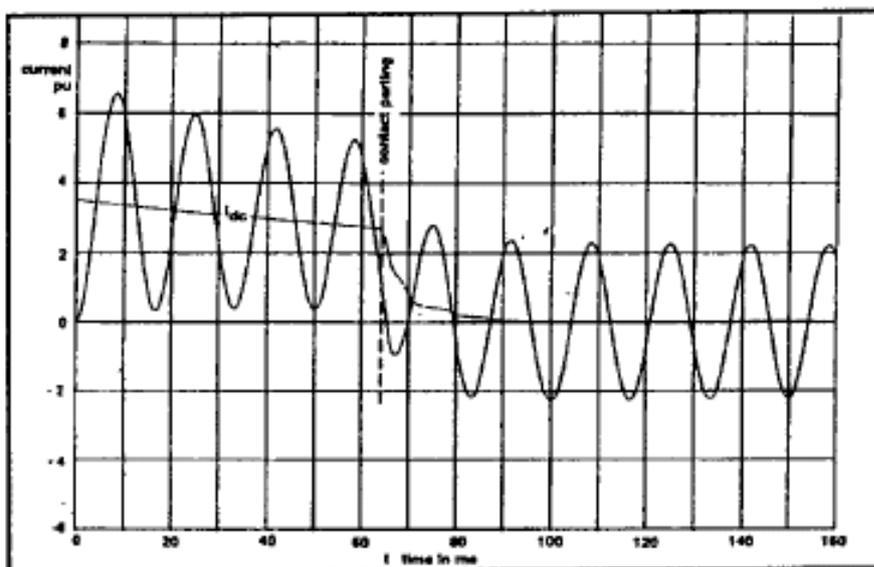


圖 3-7 加速故障電流衰減之波形

發電機於下列情況下將有可能與系統發生異常非同步並聯：第一、機組興建完成或相關維修工作後之第一次並聯試運轉；第二、比壓器(PT)二次側接線錯誤。現今所採用之自動並聯裝置及同步電驛將能有效排除人為操作錯誤的因素。圖 3-8 所示，裝設發電機斷路器能有效開斷異常故障電流。接觸子於 120ms 後分離，而電弧持續時間 35ms。如無發電機斷路器而採用具有電弧電阻效應之高壓側斷路器執行並聯動作，但由於變壓器變比(turn ratio)之因素，無法有效降低時間常數 Ta，因而無法開斷故障電流。此時接觸子將同樣於 120ms 後分離，但電弧持續時間將大於 100ms，一般應小於 40ms 方能正常啟斷，此時發電機斷路器不但極有可能損壞，更可能導致發電機毀損。由此可知，對於未裝設發電機斷路器(GCB)的發電廠電力系統，應於首次並聯試運轉前確實執行相關事前測試。

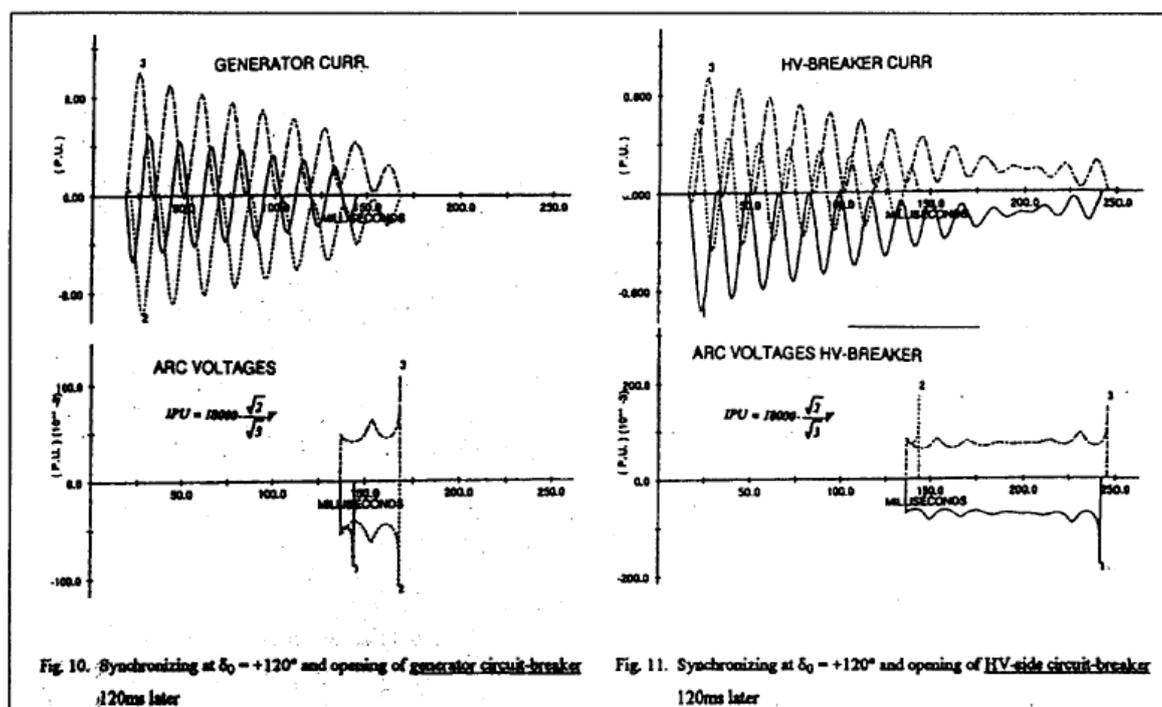


圖 3-8 GCB 開斷動作波形

四、發電機斷路器維護技術

4.1 產品特性簡介

AREVA T&D 所生產的發電機斷路器(Generator Circuit Breaker) 根據不同的額定容量與開斷能力共分為三大類。

(1) FKG1 發電機斷路器(Generator Circuit Breaker)

27.5kV --- up to 21000A and 80/100/120kA

此類發電機斷路器為三相(極)共置於一個以 SF6 為消弧介質的操作空間中，以液壓操作機構促其動作。此型斷路在自然冷卻下能承載 16000A 的電流值，若採用外部通風冷卻方式則提高其工作效率與額定電流值。

(2) FKG2 發電機斷路器(Generator Circuit Breaker)

24kV --- up to 9500A and 63kA

此類發電機斷路器是為一附有彈簧操作機構的，並且廣泛地使用於 AREVA T&D 所生產的 AIS 與 GIS 設備超過 50 年之久。專為電流額定值介於 3000A 至 9500A 的發電廠所設計，實用上分為有金屬外箱與無金屬外箱兩種。此類斷路器由於具備易改裝與多用途得特性，有時亦對於電力系統問題提供良好的解決方案。

(3) PKG 發電機斷路器(Generator Circuit Breaker)

36kV --- up to 50000A and 275kA

此類發電機斷路器是專為大容量發電機組(核能發電廠)所設計，此種斷路器具備絕佳的工作效率與大範圍的額定容量以適合整體市場的需求。由超過 35 年的運轉服役經驗，足以驗證其品質與可靠度符合核能電廠運轉與維護的需求。

4.2 裝設發電機斷路器技術分析

早期由於發電機具大的額定電流和短路電流以及啟斷電流的直流分量，使得 GCB 製造困難，造價甚高。基於技術層面與經濟因素的考量，除了小容量機組(單機容量 200MW 以下)的發電機出口端裝設 GCB 外，大容量機組一般採用發電機與主變壓器組單元接線，盡量使用隔相匯流排(Isolated Phase Bus)且不裝設出口斷路器與隔離開關。近年來，由於發電機斷路器製造技術突飛猛進且價格不斷降低，使得電力系統的安全性與可靠度日漸受到重視，發電機斷路器存在的必要性也被重新檢討。

大容量發電機組(單機容量 200MW 以上)採用發電機與主變壓器組的單元接線方式的優點在於省去了 GCB，同時也省去了相對應的保護協調繼電器及相關設備。但此種接線方式卻使得發電機、變壓器和系統的可靠度運轉在相當程度上取決於主變壓器高壓側的高壓斷路器。當高壓斷路器正常運作時，在執行解聯或並聯操作時，在事故狀態下的動作過程中，若發生一相或兩相斷路器的單極(pole)因故障、誤動作或絕緣擊穿導致非全相啟閉狀態時，則電力系統網路的安全性與可靠度將受到影響，極有可能因為非全相運行而造成主變壓器絕緣損壞甚至起火燒毀。發電機轉子因負序電流作用而使絕緣損壞甚至起火燒毀，系統穩定性面臨重大威脅而跳機解聯造成大面積區域停電等重大事故。

然而 GCB 的存在並不能避免電力系統內某一故障的發生，但卻可減少加在設備上的各種應力與故障所造成的損壞程度。當發電機側發生故障時，GCB 動作將故障點與系統隔離，避免發電廠內部電力系統事故發生，簡化了廠用電力系統的控制與保護協調，降低了保護動作的聯鎖複雜性。當主變壓器側故障時，GCB 可以迅速切除，使得發電機、主變壓器與其它高壓電力設備分別處於個自的保護範

圍內。此外，發電機斷路器可當作電廠電力系統與電網並聯的同步點，由於使用高壓斷路器和 GCB 來實現同步操作與不同步操作所引起的延遲過零電流，對系統有著不同的影響。在反相同步操作過程中，由於發電機轉子的快速轉動產生的延遲過零電流，高壓斷路器在切斷反相同步電流上非常有限，而 GCB 有足夠的能力切斷該電流。

當同步動作於高壓側進行操作時，高壓斷路器可能會受到過電壓作用而導致外部絕緣介質閃絡。高壓斷路器一般都不是三相機械聯動式，在同步操作過程中，就有可能發生較大的不同步現象，進而導至不平衡負荷的產生，給發電機帶來嚴重的機械與熱應力，造成損壞。

當同步動作設定於發電機電壓等級進行操作時，斷路器電壓等級的降低有助於防止外部絕緣閃絡。用 GCB 實現同步操作完全在發電廠同步範圍內，變電站操控可以不必介入，從而不會產生任何操控責任上的重疊。

4.3 裝設發電機斷路器經濟分析

近年來由於主變壓器與發電機斷路器製造技術的精進，大容量機組電力系統設計理念正發生變化。當 GCB 的價格與高低壓開關設備相近時，基於安全性與電力系統穩定度的考量，許多機組的設計均將 GCB 納入考量。在此，我們暫時很難以核四廠為例，針對發電機斷路器做經濟性的比較與分析，但基於許多文獻資料與研究報告，這一點應當是肯定的。待日後核四完工並商轉服役時，再行分析比較投資成本與經濟效益的優劣。

4.4 操作與維護保養技術要領

核四廠所採購之發電機斷路器(GCB) 系 AREVA T&D 所生產 PKG 型，專為大容量機組或核能發電廠所設計，其工作條件與技術要求有別於一般的高壓斷路器，其關鍵技術要領如下所述：

發電機回路電氣設備的工作特點是：額定電流大、短路電流大、直流分量含量高、非同步啟斷等。就啟斷方面的技術進行探討。

4.4.1. 額定啟斷電流(對稱值)：

如圖 4-1 所示為第四核能發電廠電力系統圖，K1、K2、K3 不同短路點的保護協調要求是不同的。對 GCB 而言 K1 點短路通過的是系統源提供的短路電流；K2 點通過的則是來自本機組發電機源提供的短路電流。由於主變壓器及系統的短路電抗之總和低於發電機的次暫態電抗(X_d'')，所以系統源提供的對稱短路電流總和大於發電機源提供的短路電流。一般中型機組還要於輔助變壓器之前端裝設 TCB(核四無此設計)，雖然回路額定電流不大，但 K3 短路時通過的短路電流卻為系統源和發電機源所提供的短路電流之和。

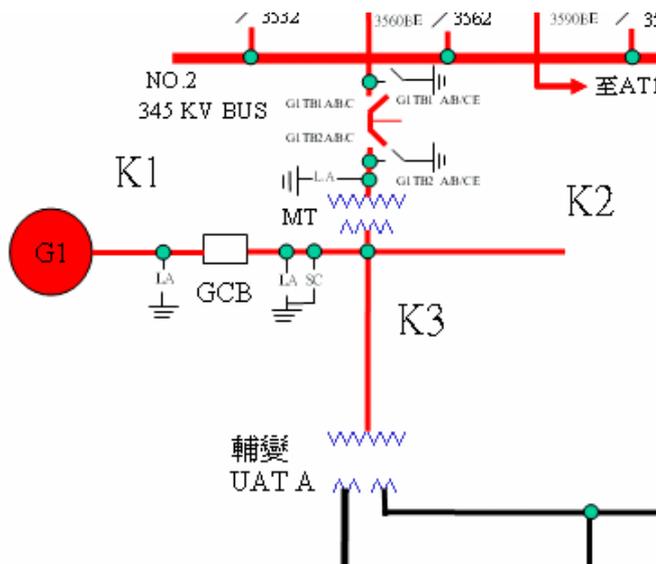


圖 4-1 第四核能發電廠電力系統圖

4.4.2. 額定啟斷電流(非對稱值)

短路故障電流中常伴有直流分量，直流分量的衰減與系統的 X/R 有關。由於系統參數的不同，直流分量衰減常數 $T=X/R$ 也不同。一般而言， X/R 的通用值為15，相當於 $T=0.04\sim 0.047$ 秒。但是考慮到常用配電斷路器的固有啟斷時間，建議配電斷路器的直流分量的開斷能力為周期分量幅值的20%。發電機斷路器所處的位置 X/R 非常小，直流分量衰減時間較長。

在相同的開斷時間內，發電機源比系統源所提供的短路電流中的直流分量含量更高。雖然廠用電力系統所採用的TCB額定電流不大，但開斷短路電流的周期分量和直流分量都非常大。一般而言，中大型發電機組出口短路其非對稱度可達到110%~130%。非對稱值的開斷往往超過了額定短路開斷電流對稱值。

4.4.3. 失步開斷

失步狀況是在斷路器操作瞬間，由於發電機和電力系統之間失去同步或達不到同步而引起的一種不正常回路狀況。此時斷路器兩邊電壓的旋轉向量之間出現了相位差，這種相位差有可能超過正常值，甚至高達 180° 。

在失步狀況下，斷路器的分合能力將下降。在全反相開斷情況下，額定失步開斷值為額定短路開斷電流值的25%。由此可知，失步開斷對發電機斷路器將造成極嚴苛的工作條件。

4.4.4. 暫態恢復電壓

由於回路參數的不同，發電機斷路器在開斷時將可能面臨極高的暫態恢復電壓陡度，主要原因為回路的分布電容較小，導致斷路器開斷時引起的高頻振盪頻率甚高，一般為 $10.4\sim 10.5\text{Hz}$ 。發電機

斷路器所接受的暫態恢復電壓陡度遠比配電用斷路器嚴苛許多。此一課題在日後仍有許多研究發展與改善的空間。

此外，關於發電機斷路器的維護保養方面，應確實遵守相關的使用手冊與保修技術文件。並且與世界先進國家所訂定的國家標準與法規相對照，研擬出一套適合台灣地區及核四廠所採用並遵循的維護保養程序，透過定期檢查並量測相關數據以確保在長達 40 年的服役過程中順暢無虞。

4.5 相關設備於全球服役現況

電廠電力系統設計理念漸漸重視並肯定發電機斷路器(GCB)存在的必要性，且發電機斷路器(GCB)於世界各地電力事業單位服役的情形已十分普遍。世界上也有許多生產、研發與製造發電機斷路器的廠家，本篇報告中僅就核四廠所採用的發電機斷路器的供應商 AREVA T&D 公司所生產的設備於世界各地的服役現況做一介紹。

目前採用 AREVA T&D 所生產的 PKG 型發電機斷路器的電廠分布於世界上 21 個國家或地區，分別採購了 125 部 PKG 發電機斷路器。其中絕大部份使用於核能發電廠，在過去的三十年間部份機組的發電機斷路器曾跳脫開斷故障電流並成功阻止了可能發生的重大事故，使得發電機斷路器的地位在現今的電力系統理論與實務中地位大大提升。目前在核能發電日漸受到重視的中華人民共和國與打算增建多部機組的大韓民國，更將發電機斷路器列為必要設備。

五、結論

5.1 心得

本次赴法國研習核能電廠發電機斷路器維護技術，更加瞭解核四廠所採用的發電機斷路器在電廠電力系統中所扮演的角色與重要性。目前國內外發電機斷路器的發展和應用十分迅速，無論是技術水平或是開發、製造的能力都不斷提升，體積愈來愈小，噪音減低，但額定電流和開斷電流卻愈來愈大，機械壽命與可靠度亦大大提升。透過許多研究分析，確切證實了發電機斷路器不僅可以保護發電機(Generator)和主變壓器(Main Transformer)，減少設備的平均維護時間、改善同步條件，使電廠的整體安全性與可靠性大大提升。不但方便電廠的運轉、管理和維護，同時亦能帶來明顯的經濟效益，使整個電廠壽命周期內的後勤保修成本得以降低，加速電廠的投資回報。在可預期的未來，裝設發電機斷路器將成為電廠電力系統設計的主流理念。因此，大容量發電機組於出口端裝設發電機斷路器是諸多改善電廠電力系統品質的概念中，值得考慮採納的方案之一。

5.2 建議事項

- (1) 參考國外相關標準與法規及現行國內各電廠發電機斷路器運轉與維護保養相關程序，訂定適用於台灣地區的發電機斷路器規範。
- (2) 對於發電機斷路器的同步並聯技術進行研究與探討。

5.3 後記

這是我的第一次歐洲行，但絕不是最後一次。撰寫這篇報告的時候，我人正在核三廠參與大修，雖然身在台灣的最南端，但歐洲行的印象彷彿歷歷在目。當航機掠過北朝鮮領空進入間宮(韃靼)海峽轉向西伯利亞時，內心充滿了無比的興奮，飛越傳說中神秘的泰密爾半島與通過歐亞大陸交界的烏拉爾山時，壯觀的景致更令人嘆為觀止。接著是新地島、可拉半島，這些從來都只能在地理課本中讀到的名詞，忽然彷彿是自家的後院一般。

工業重鎮里昂(Lyon)的繁華；美麗花都巴黎(Paris)的浪漫，令人難以忘卻歐洲的美。沉浸於歷史古蹟的薰陶；漫步於著名的塞納河畔，憑弔羅馬帝國乃至法蘭西共和在歷史上的興亡盛衰。駕著六速手排保時捷奔馳於歐洲大陸的無限速公路上，退檔加速齒輪咬合透入心坎；臨界轉速引擎聲響劃破天際。從時速二百七十公里的車中往外看，你將發現只有風---是靜止的。

回程途中航機經由印度進入青藏高原，通過昆明航行於中國領空。飛越香港飛航情報區進入台灣海峽，隨即抵達高雄上空。沿著中央山脈向北航行，很快就抵達桃園機場，降落在這塊熟悉的土地上。

迎接我回國的是一連串忙碌的行程，隨即趕赴核三廠參與貳號機EOC-16大修，來到實際運轉中的核能電廠學習並充實專業技能。核三廠電氣課全體同仁的熱心指導與南台灣居民的熱情，讓人在輕鬆愉快的氣氛中工作、學習，不免令人大聲讚嘆南台灣特有的資產—海洋、大地、豔陽天；追風、奔放、比基尼。

再多的歡笑與感謝總有結尾的時候，感謝核四廠的長官與同事的支持，讓我有此次赴法國實習的機會。感謝核三廠同仁在專業技術與實務經驗上的教導，讓我有所成長。最後，祝福所有的人在往後的日子裡，無論在各方面都能取得更大的成就。

參考資料

- [1] Chapman, S.J., Electric Machinery Fundamentals, 2d ed., McGraw-Hill, New York, 1991
- [2] IEEE Std C37.013-1997, "IEEE Standard for AC High-Voltage Generator Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis"
- [3] Oliver Fritz and Martin Lakner, Modeling and Simulation of Generator Circuit Breaker Performance, ABB Switzerland, 2004
- [4] 中華人民共和國國家標準
- [5] 中華人民共和國電力行業標準
- [6] 四國電力, 伊方原子力發電所事故報告, 平成十六年
- [7] 東北電力, 女川原子力發電所電力系統圖, 平成十六年
- [8] 台灣電力, 第四核能發電廠電力系統圖, 2004
- [9] 陳耀彬, "發電機斷路器之必要性", 台電工程月刊第 628 期
- [10] 陳耀彬, "發電機斷路器之應用", 台電工程月刊第 643 期
- [11] AREVA 廠家技術手冊
- [12] 林莘, 現代高壓電技術, 機械工業出版社, 2004
- [13] 黃啟貞, 電力系統發電機組檢修排程之研究, 國立成功大學電機工程研究所博士論文, 1992
- [14] 馮活蔚, 真空斷路器用作發電機出口斷路器的探討, 廣東省電力設計研究院, 2004