

變壓器之短路設計製造及試驗經驗

作者: 李紹利、張書英

一、前言

華城所銷售之外銷顧客都是世界級知名的工程或是電力公司，電力公司之採購策略非常嚴謹，最重要的不是價格、交期，而是品質穩定，尤其是對變壓器耐短路設計之要求，尤為重視。由於變壓器之短路能力不易以實際試驗來作驗證，所以通常要成為某一家電力公司之合格廠家，就必須向顧客證明我們的短路設計製造能力。於是乎華城公司在每兩三年就會有機會送產品至高能量實驗室去做短路試驗，以求得新顧客之認可。

2012 年製送一台 230kV-240MVA 變壓器送至歐洲 KEMA 實驗室做短路認證試驗，其容量、電壓、花費成本是創台灣變壓器製作廠家之紀錄，謹以此篇文章來說明期間之緣由及經過，以供同業先進參考。

二、變壓器之短路試驗認證程序

世界各國之規範對變壓器之短路試驗程序都有詳細之規定，本次試驗是採用 IEC 60076-5 章節所規定之方式，在歐洲 KEMA 實驗室做短路認證，認證程序首先需要依照 IEC 之規定設計好所要受試之變壓器，運送至實驗室組裝，組裝完成須先做基本測試，確定變壓器正常然後才可以正式做短路測試，IEC 規範規定，變壓器每相需要送短路電流三次，三相可以將切換器切換至不同之電壓。正式試驗時可以先以 50% 之電流做校正試驗，以確定受試變壓器之心體剩磁量為最佳。

試驗中每打一次短路試驗，皆須量測阻抗值，與基準值做比較，且不可以超過 IEC 規定變化量之上限值。而變壓器試驗完成後，既使阻抗變化量符合標準，變壓器還是需要將心體吊出配合實驗室人員檢查，內部不可以發現有明顯之位移或是變形，附件不可以發現有損壞之現象。KEMA 實驗室才可以正式予以認證，發與證書。

三、變壓器之短路設計

變壓器運轉會因為使用環境之狀況不同，產生大小不一之短路事故，事故可以是人為或是天災，機器老化會造成事故，或是電力系統器具損壞都有可能造成線路短路，造成短路電流襲擾變壓器，如果變壓器之耐短路之能力不佳，就容易造成變壓器事故。

如下圖 1. 所示，變壓器出廠運至現地，一次側送電激磁鐵心，二次側接上負載後，變壓器心體有流通負載電流，線圈之周圍產生漏磁場，此時變壓器線圈本身因為有磁場也有電流，所以實際上變壓器之線圈是有承受機械應力，變壓器本身之震動是鐵心磁歪震動加上線圈受機械力震動之結果。如果是變壓器的二次側短路，則輸配線路的負載瞬間消失，造成瞬間能量灌至變壓器，變壓器心體流通巨大短路電流。或是變壓器一次側線路短路，負載電流從系統回灌至變壓器造成短路電流大增，對變壓器設計之短路強度驗證是一大考驗。

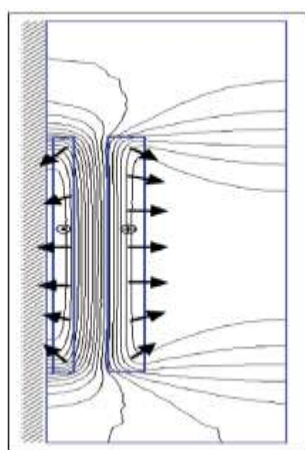


圖 1. 線圈漏磁

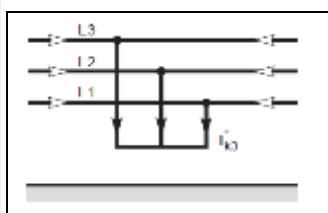


圖 2. 三相短路

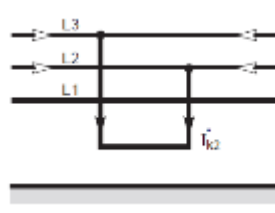


圖 3. 兩相短路

此短路電流之大小與輸配線路之故障模式 (如圖 2.、圖 3.)、故障點距離變壓器之距離遠近、變壓器之接線、變壓器之接線方式、變壓器之接地方法，皆有關聯。原因為三相線路中，不同之短路方式會造成短路電流不同之流通路徑，而每個回路路徑之阻抗不同。事故距離變壓器之遠近，也可以決定了變壓器短路時之系統阻抗之大小，通常事故距變壓器越遠，則短路阻抗越大，因而短路電流越小。

四、 變壓器之短路相關規範

目前世界上之變壓器規範大致上可以分為兩大系統，一為美規之 ANSI 系統，一為歐規之 IEC 系統，其他如澳洲規範(AS)，中國大陸(GB)，皆源於 IEC。而加拿大規範(CSA)、台灣(CNS)則是源於美規為主。一般來說，歐規要比美規來的嚴格，例如雖然變壓器之短路判定之合格與否是取決於變壓器試驗前後之漏抗變

化率來加以判斷，IEC 之規定 1%要比 ANSI 規定之 2%變化量要來的嚴格。依照文獻報告研究，對變壓器來說，短路前後 1%以上之漏抗變化是足以讓線圈有明顯的變形發生了。

以下為關於 IEC60076-5 及 ANSI C57.12.00 對於變壓器試驗阻抗合格變化率之相關規定。

類別	IEC 60076-5	ANSI C57.12.90
I	< 2%(25~2500 kVA)	< 7.5% (~ 500 kVA - 3 phase)
II	< 2%(2,501~100,000 kVA)	< 2% (501 ~ 5000 kVA - 3 phase)
III	< 1%(100,001~ kVA)	< 2% (5,001 ~ 30,000 kVA - 3 phase)
IV	N.A.	< 2% (30,000 ~ kVA - 3 phase)

依據 KEMA 實驗室發表之統計數據，變壓器之短路試驗失敗率是容量電壓越大越高，則失敗之機會越高，依據 KEMA 之統計，如以下兩個圖表(圖 4、圖 5)，

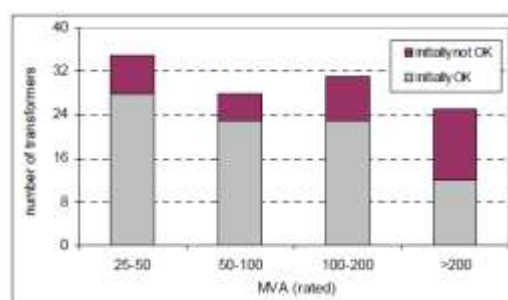


圖 4. 以容量區別統計成功率

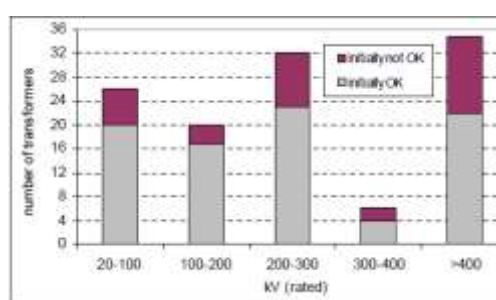


圖 5. 以電壓區別統計成功率

為 KEMA 統計 1996 年至 2009 年間之變壓器試驗成功率，其中受測試之變壓器包含有 50Hz 及 60Hz 的設計頻率，有三相變壓器也有單相變壓器，單相最大容量之變壓器為 250MVA，三相之變壓器最大容量為 440MVA，接線有包含 Dy、Yd、YYd 及 Auto-d 等各種接線。綜合來說，試驗之失敗率約為 40%，失敗之原因內部來說有線圈之變形，線圈變形多半造成變壓器阻抗電壓變大，線圈變形有線圈之端部旋轉變形(Spiraling Force)，這是因為大機械力之上下端部支撐不足造成，低壓側線圈則有皺起力(Buckling Force)，造成線圈凹陷，軸向力則是有造成線圈之彎曲變形及傾倒現象。另外，夾件結構之支撐強度不夠，締緊力不足，則是造成了線圈位移及對支撐結構絕緣或是銅線之絕緣結構破壞。依照 KEMA 之經驗，線圈之阻抗變化超過 1%則表示線圈有明顯變形，0.5%~1%則是可能線圈位移。所以 IEC 之短路規範要求試完短路之後，既使電抗變化量是通過標準，如果吊出心體檢查後發現變壓器內部有變形，還是不可認證為通過試驗。KEMA 的統計，約有 5%之 KEMA 試驗失敗是因為吊出發現變壓器內部有因短路破壞而無法取得 KEMA 認證證書。

五、 華城變壓器之短路試驗及結果

華城公司此次設計送試之變壓器規格為 Yd 接線之電廠用升壓變壓器，為華城最暢銷之外銷大容量變壓器機種，規格為 230kV-240MVA，HV 附無電壓切換器。此變壓器 KEMA 試驗之接線如下圖 6.所示。接線採 HV 送電，LV 短路之試驗方式，採 1.5 相之單相試驗方法，依據 IEC60076-5 之規範要求，每次短路 0.25 秒 (約 16 個 Cycle)。

KEMA 之試驗方法是採用先短路後送電(Post Set)之試驗方式，一般來說，先送電後短路之試驗方式較為符合變壓器實際在運轉時之狀況，但是考慮到實際上實行之困難度，KEMA 是採用較為容易之方式配合相角同步切換開關，可以控制短路之相角，以期望可以將鐵心剩磁之影響降至最低，這種試驗之方式也是 IEC 及 ANSI 規範所允許使用的，KEMA 實驗室使用的是發電機而不是使用輸配線路之電力。

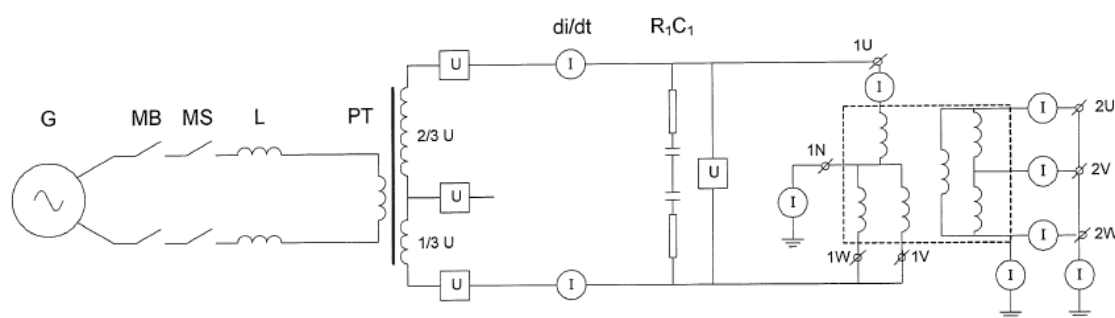


圖 6. 短路之試驗接線，採用單相電源試驗

每次試驗完後皆需馬上量測漏抗之值以用來計算變化量，試驗結果如下表所列，綜合來說，華城變壓器試驗之變化量最大 0.2%，遠小於 IEC 60076-5 所規範之小於 1%變化量之規定。

Tap postion 1									
Test number	Reactance								
	Measured between the phases			Calculated per leg			Change per leg		
	Ω			Ω			%		
	1U-1V	1U-1W	1V-1W	1U	1V	1W	1U	1V	1W
Before tests	84,60	84,65	84,41	42,18	42,42	42,23	--	--	--
AT 120204-4005	84,65	84,69	84,49	42,22	42,42	42,27	0,1	0,0	0,1
AT 120204-4007	84,66	84,69	84,50	42,23	42,43	42,26	0,1	0,0	0,1
AT 120204-4008	84,65	84,70	84,50	42,23	42,42	42,28	0,1	0,0	0,1
After tests	84,71	84,77	84,51	42,22	42,48	42,29	0,1	0,2	0,1

Tap postion 4									
Test number	Reactance								
	Measured between the phases			Calculated per leg			Change per leg		
	Ω			Ω			%		
	1U-1V	1U-1W	1V-1W	1U	1V	1W	1U	1V	1W
Before tests	73,86	73,90	73,63	36,80	37,06	36,83	--	--	--
AT 120204-4011	73,93	73,94	73,69	36,84	37,09	36,85	0,1	0,1	0,0
AT 120204-4012	73,94	73,96	73,69	36,84	37,10	36,85	0,1	0,1	0,1
AT 120204-4013	73,95	73,96	73,69	36,84	37,11	36,85	0,1	0,1	0,1
After tests	73,94	73,98	73,67	36,81	37,12	36,86	0,0	0,2	0,1

Tap postion 5									
Test number	Reactance								
	Measured between the phases			Calculated per leg			Change per leg		
	Ω			Ω			%		
	1U-1V	1U-1W	1V-1W	1U	1V	1W	1U	1V	1W
Before tests	70,99	71,02	70,71	35,33	35,65	35,37	--	--	--
AT 120204-4015	71,06	71,11	70,72	35,33	35,73	35,39	0,0	0,2	0,0
AT 120204-4016	71,08	71,10	70,76	35,37	35,71	35,39	0,1	0,2	0,0
AT 120204-4017	71,06	71,08	70,72	35,35	35,71	35,37	0,0	0,2	0,0
After tests	71,06	71,08	70,72	35,35	35,71	35,37	0,0	0,2	0,0

變壓器運送回台灣工廠後，配合 KEMA 工程師來廠做心體吊出檢視，無發現線圈有任何之變形跡象，因而裁定通過 KEMA 之短路認證，此台變壓器同時也通過溫升及衝擊耐壓試驗之認證，可以說本台之變壓器設計並沒有因為加強短路之強度而犧牲了變壓器之散熱或是其他之特性能力。



圖 7. 變壓器安裝在船上做短路測試



圖 8. 測試時，消防車在一旁待命

六、 結語

短路試驗可以說是變壓器廠的成年禮，要有這個經歷，才會讓變壓器廠家更謙卑，懂得去改善自家設計製造之產品，反省自我的機會。

一般顧客在採購變壓器時，如果沒有對變壓器有相當之認識，最好將變壓器廠家之短路試驗經驗納入考量，可當成採購之指標，認證流程對廠家之設計、製造、QC 流程來說，是最嚴格可靠之檢驗過程，實際的短路試驗是沒有人情可說，設計、製作品質之優劣可以立見高下。也是因為變壓器之短路試驗世界上絕大部分(99%以上)之變壓器廠無法在廠內做短路試驗驗證設計製造，所以更加深了變壓器廠短路試驗經驗之重要性。

參考資料

- IEC 60076-5 短路規範
- ANSI C57.12.00 變壓器通則規範
- ANSI C57.12.90 變壓器試驗規範
- KEMA 統計研究 (Fourteen years of test experiences with short circuit withstand capability of large power transformers - 2010)
- Transformer engineer
- 華城電機送試變壓器之 KEMA 短路試驗報告