

變壓器差動保護電驛之運用

◎李河樟

壹、前言

電力系統主要的目的是滿足用戶的電力需求，爲了供應各類型之負載，電力系統中除了必須具備充裕電源—發電機組之外，尚需要輸配電線路來傳送電力。但發電機輸出之電壓均不高（一般約在24KV以下），爲便於電力之傳輸並減少傳輸過程中的損失，通常需要經過電力變壓器將電壓提昇（一般爲69KV、161KV、345KV、500KV或更高）；然而如此高之電壓，並不適合於電器設備直接使用，故電力在送到用電戶之前，還是需要經過電力變壓器，再將電壓降低到適合於各工廠、住戶等用電設備的電壓等級。由此可見，變壓器在電力系統中，擔負著承上啓下之角色，其重要性自不待言，對變壓器之保護當然更須格外慎重。

變壓器本體由於均密閉於箱體內，受外物碰觸之機會較小。根據統計分析，容量在500KVA以上的變壓器，其故障的機

會遠比電力系統中其他的設備低，平均每年一萬具變壓器的總故障次數約76次。因爲其故障率低，所以很容易使人誤認爲變壓器只要隨便有個簡單的保護即可，甚至認爲不需要有保護。其實，我們不能祇看其故障次數的多寡，重要的是統計分析裡，也突顯了變壓器故障的修護時間，通常是其他設備的數倍到數百倍。變壓器一發生故障，其停用時間幾乎都是以日計算，如果損壞嚴重，修復時間可能要好幾個月，甚至於無法修復，必須重新訂購、安裝，所費時間更長，將直接造成部份設備長時間無法用電；如果是連接發電機的變壓器，則發電機必然長期不能發電，所造成的損失更爲嚴重。因此，對於變壓器的保護是不能掉以輕心的。

變壓器常見的事故，大部分爲繞組的故障，如繞組層間短路、繞組線圈斷線、繞組線圈絕緣破壞等，或是因過熱、機械應力、震動、電壓突波等造成繞組受損；

當然也有可能是因組裝不當、搬運過程中受損或設計不當等原因致負載分接頭切換器故障；也有因其連接設備—如變壓器套管故障等之事故。一般而言，約10%的故障發生在變壓器箱體內部，65%的故障發生在負載分接頭切換器，15%為套管發生弧光閃絡。對於這些事故，如果不能迅速隔離，將導致變壓器嚴重損害，甚至燒燬，尤其在環保意識高漲的現在，其所產生的後遺症，更是難以預料。故必須倚靠保護電驛正確、快速的動作，予以有效隔離，以減輕其損傷程度。

貳、變壓器之保護方式

變壓器保護方式，隨變壓器容量的大小、所在地點重要性之不同，而有不一樣的保護方式。小容量變壓器（2.5MVA以下）通常使用一種構造簡單，且成本低廉的延時保護裝置—電力熔絲，做為變壓器之一次側短路故障保護應已足夠。選擇電力熔絲時，應考慮其遮斷容量是否高於電力熔絲安裝處所之系統故障容量，且其時間—電流特性，必須不會因變壓器加壓時所產生之磁化突入電流而誤動作。

變壓器之另一種保護方式為過電流電驛，過電流電驛在某些情況下，可做為變壓器之主要保護（變壓器之容量在5MVA~10MVA），亦可做為變壓器之後衛保護。如係做為變壓器之主要保護，則

必須能分辨外部故障電流、負載電流與內部故障所產生之電流。其始動值設定為變壓器容許最大過載電流之115%以上（或最大額定電流之150%），動作時間，這樣才不致於因外部事故而誤動作。

變壓器內部故障雖可由過電流電驛保護，但因必須與低壓側保護設備協調，動作時間較長，可能會因故障隔離的時間較久，導致變壓器內部產生電弧、起火，也可能因大量故障電流持續過久，使得電磁及機械應力，造成變壓器結構產生變化，傷及繞組或變壓器外殼，甚或套管炸燬而危害到鄰近設備甚至人員。故一般變壓器之容量大於10MVA時，為求快速隔離變壓器內部故障，最周全有效之保護方法為：採用比率差動電驛保護方式。

參、差動電驛之基本原理

差動電驛是利用流入與流出被保護設備的電流之相量(大小、相位與時間)差，而判斷是否該動作的一種電驛。當被保護設備在正常運轉狀態時，此兩電流之差值為零；當故障發生於被保護設備之外時，情況亦同；但當故障發生於被保護設備之內部時，則兩電流之差值不再為零，以此來判別故障點是否發生於保護範圍內，而決定是否動作之電驛謂之差動電驛。

差動電驛運用於變壓器保護的最簡單方式，為利用過電流電驛原理。是由變壓

器高、低壓側之比流器的二次側並接後，再接入一套過電流電驛，做為差動保護電驛用。但因變壓器高、低壓側之電壓不同，繞組接線方式亦不盡然相同，更由於變壓器一、二次側電壓及比流器比值等，並非均可以完全匹配，故一般很少採行。再者，大部份的變壓器其內部尚有負載分接頭切換器，隨著負載的變化而自動調整電壓，但比流器比值到目前為止，還沒有可以自動調整的。因而，就算是已將變壓器兩側的電流，經比流器調整到完全沒有差電流，但當變壓器經有載分接頭切換後，將因兩側電流無法正確匹配，而產生差電流，造成差動電驛誤動作。又由於變壓器一、二次側電壓、電流不同，其比流器的型式、比值、等級、特性選用亦可能不同。在此情況下，雖可藉比流器比值的正確選定，使得正常情況下之差電流趨近於零，但外部故障時所產生的大電流，將因變壓器兩側比流器特性差異、飽和程度不一等因素，導致差電流達到差動電驛之始動值，而引起誤動作。由於這些差電流產生的原因，皆與實際流經變壓器之一、二次側線圈電流成正比（即流經變壓器之電流越大，則差電流越大），如利用這些電流對電驛之動作產生一些制衡作用，則電驛之安全度將可大為提高。但並不可以因為安全的理由，而過度犧牲電驛的靈敏度。對於此問題，非常簡單、有效對策

為：使用比率差動電驛。

比率差動電驛之簡單接線如圖一所示，主要由動作線圈(Operating Coil)及抑制線圈(Restraining Coil)所組成，其動作原理類似於前述之電流平衡式過電流電驛。主要區別在於前者僅利用其差電流，而後者係利用差電流—動作電流與抑制電流兩者間獲致一定之比率，差電流 $I_d=I_{s1}-I_{s2}$ ，而抑制電流為各電流之平均值 $I_r=(I_{s1}+I_{s2})/2$ ，當 $I_d > K \cdot I_r$ 時電驛動作， K 為比率差動特性之斜率，通常以百分比表示，如15%，20%，30%，40%，50%...等等，很明顯的比率愈小電驛動作愈靈敏。

一般使用於變壓器之比率差動電驛，其差動比率設定範圍在10%~60%之間。實際的比率差動特性如圖二所示。

肆、變壓器差動電驛應用必須考慮的因素

一、突入磁化電流

變壓器加壓時，為了建立鐵芯所需要的磁通，必須由加壓端輸入電流，此電流稱為變壓器突入磁化電流，使得差動電驛的基本原理受到挑戰，此乃由於變壓器之磁化回路，在變壓器沒有發生故障時，其阻抗可能非常低，因此變壓器加壓時的突入磁化電流很大，有時可能達到變壓器額

定滿載電流數倍甚或十倍以上之多(請參考表一)。而這些電流僅出現在加壓之一側，變壓器另一側則無電流，這對差動電驛而言，就好像是內部故障(電流只流進變壓器而沒有流出)，因而導致差動電驛立即動作。

表一、變壓器突入磁化電流值

容量 MVA	Ir/I _{FL} (磁化電流為滿載電流倍數)				Ir/2 衰減 時間 cycle
	冷軋延矽鋼片		熱軋延矽鋼片		
	HV	LV	HV	LV	
0.5	11.0	16.0	6.0	9.4	8~10
1.0	8.4	14.0	4.8	7.0	8~10
5.0	6.0	10.0	3.9	5.7	10~16
10.0	5.0	10.0	3.2	3.2	16~
50.0	4.5	9.0	2.5	2.5	3600

突入磁化電流，雖然一般僅於變壓器加壓時一起考慮，但是變壓器磁化電壓突然的改變，一樣可能產生突入磁化電流。此一磁化電壓突然改變的暫態現象，包括變壓器所在臨近電力系統事故發生、故障清除、故障特性改變(如單相接地事故轉變成兩相接地故障)、不同步併聯等。另外，如在同一變電所內，已經有其他變壓

器經加壓中(使用中)，當再加壓另一變壓器時，則其突入現象，須包含已經加壓之變壓器及當時加壓之變壓器，這時突入暫態現象會持續特別長的時間。

電力系統的故障電流，其波形幾乎為一純的正弦波，再加上直流暫態成份；而變壓器的突入磁化電流，則隨鐵芯的飽和程度而有很大的不同，但均非單純的正弦波，其波形可視為由直流成份及各種不同頻率的正弦波所組成，這些正弦波包括電力系統的基本頻率，及其二、三、四、五次諧波，由這些諧波的大小及相位，決定了突入磁化電流的波形。從以上分析可知：一般故障電流所含的諧波成份非常少，而突入磁化電流則含有相當成份的諧波量。故變壓器之差動電驛如為快速保護者，為防止變壓器加壓時的突入磁化電流引起電驛誤動作，最好是使用具有諧波抑制功能的差動電驛。突入磁化電流內含有的各次諧波成分，詳如表二所列之：基本波與各次諧波成份比較表所示。一般變壓器加壓時的突入磁化電流，其二次諧波約佔15%或更高，但近年來由於變壓器鐵芯材質的改善，突入磁化電流內二次諧波的含量已經可以降到大約7%以下，差動電驛運用時，其諧波抑制比例必須配合做適當的設定或調整。

表二、變壓器加壓時突入電流與內部故障電流之基本波與各次諧波成份比較

	突入磁化電流	內部故障電流	
		CT未飽和	CT飽和
基本波	100	100	100
直流成份	58	38	0
二次諧波	62	9	4
三次諧波	25	4	32
四次諧波	4	7	9
五次諧波	2	4	2

變壓器突入磁化電流尚有如下之特性：1.變壓器飽和磁通密度 ϕ_s 愈低，則突入磁化電流愈高。2.最大的突入磁化相電流，發生在投入角度為 0° 時（即零電壓時）。3.最大的突入磁化線電流，發生在投入角度為 $\pm 30^\circ$ 時，詳細資料請參閱表三。最大突入磁化電流，可能為變壓器額定電流之十倍以上，其持續時間可能會有數秒甚至一分鐘之長，保護電驛運用上應詳加考慮，尤其是在變壓器一次側使用瞬時過電流或延時過電流保護時，設定始動值與動作時間，均應考慮此種變壓器特有的現象。

表三. 一般突入磁化電流計算表

ϕ_s	投入角度	突入磁化電流之峰值 (pu)					
		I_r	I_s	I_t	I_{rs}	I_{st}	I_{tr}
1.40	0°	5.60	-3.73	-3.73	8.33	-3.73	-8.33
1.40	30°	5.10	-1.87	-5.10	5.96	5.10	-9.20
1.15	0°	6.53	-4.67	-4.67	10.20	-4.67	-0.20
1.15	30°	6.03	-2.80	-6.03	7.83	6.03	-1.06

影響此突入磁化電流大小之因素包括：1.變壓器加壓時投入之相角。2.變壓器容量之大小（容量越大者突入磁化電流之比例越小）。3.電力系統電源特性及容量大小。4.變壓器鐵芯材質--冷軋延矽鋼片突入磁化電流較大、熱軋延矽鋼片較小。5.變壓器及電力系統之L/R比值。

對於突入磁化電流的大小，影響因素很多，又隨著變壓器設計的不同而有極大的差異，如無法獲得確實的資料，在進行保護電驛協調將遭遇困擾。此時，可假設變壓器的突入磁化電流為其滿載電流的8或12倍，衰減時間為0.1秒，來做保護電驛協調，雖然不很精準，但一般在運用上還可接受。

二、比流器比值設定

由於變壓器兩端電壓等級不同，因此比流器型式、比值及性能也許均不相同。

在考慮比流器比值設定時，一般都儘可能的選擇最低的比值，以提高電驛靈敏度，除了要計算其比例，以配合差動電驛比率分接頭設定值之外，一般都儘可能的選擇最低的比值，以提高電驛靈敏度，但還要考慮在外部最大故障電流通過時，所有比流器均不會發生飽和現象，以確保電驛不會誤動作。

爲了考慮比流器飽和的問題，一般而言，比流器等級的選定，必須經過實際評估，這當然與比流器所接負擔有直接的關係，故在實用上一般的共識爲：『差動保護電驛單獨使用一組比流器』，不與其他電驛或設備共用，這對提高比流器性能有最直接的幫助。

三、變壓器Y- Δ 接產生之相位偏移

因爲變壓器星形-三角(Y- Δ)接線，造成一、二次側電流產生 30° 之相位差。變壓器一般的接法，大多依據IEEE的標準，高壓側超前低壓側 30° ，此一電流之相位差在引入差動電驛前，必須藉由比流器二次側之接線，設法給予補償。即變壓器Y接之一側，其比流器應接成 Δ 接線；反之，變壓器 Δ 接之一側，其比流器應接成Y接線。

四、變壓器具有分接頭調整設備

變壓器因具有分接頭調整設備，其變壓比可能隨時會有小幅度之變化(通常約 \pm

10%)。這會造成一、二次側實際電流，與計算電驛標置時之預測電流產生誤差。此一誤差，必須在考慮整個比率差動電驛匹配誤差時涵蓋進去。亦即此一將近10%之誤差，應在選用適當百分比斜率時加計進去，否則極易引起電驛誤動作。

伍、變壓器差動電驛之接線方式

保護電驛要能發揮功能，必須要供給電驛所需的資訊，差動電驛只需要電流訊號，就可以判斷電驛該不該動作，但其先決條件是，所獲得的電流訊號要正確。這就要從比流器比值與電驛各設定值的匹配，以及比流器與變壓器接線方式的配合等著手。

變壓器差動電驛之正確接線與設定，應遵循如下之步驟：1.相位配對--利用Y- Δ 接線，使流進差動電驛之電流取得相同相位。【在負載電流或外部故障電流時，流進抑制線圈之兩側電流，相位相差 180° 】，如圖三。2.比值調整--適當選擇比流器比值及電驛抑制分接頭。分述如下：

一、相位配對

變壓器兩端比流器的接線，必須使得於負載電流或是任何外部故障時，其二次側電流進入差動電驛之抑制線圈爲相同相位。如何達到此目的，可先在紙上畫一簡單的三相變壓器圖，並將比流器依變壓器

接法(Y或 Δ)所對應的接線方式也畫上，然後試著將比流器二次側的引線正確的接入差動電驛，較為簡單之方式為從變壓器之Y接線側開始，如圖三，假設 I_r 、 I_s 、 I_t 從Y接線側流進右側之繞組，變壓器之極性如圖上所示，則流經高壓側繞組 Δ 接線，到右側R、S、T系統之電流分別為： $I_r - I_s$ 、 $I_s - I_t$ 、 $I_t - I_r$ 。

如前所述，在r、s、t側之比流器，必須接成 Δ 接線；而R、S、T側之比流器，則必須接成Y接線。如圖所示之比流器極性與接線方式，在R、S、T側之比流器的二次側電流 $I_r - I_s$ 、 $I_s - I_t$ 及 $I_t - I_r$ 流進電驛之抑制線圈。於負載情況或外部故障時，這些電流將流經另一抑制線圈而到右邊；而在右邊r、s、t之Y接線側，比流器二次側電流為 I_r 、 I_s 、 I_t 。最後只要將r、s、t側之比流器二次側接成 Δ 接線，則第一步的相位配對已然完成。

相位配對工作之進行，是先假設平衡電流流經變壓器Y接繞組，再經變壓器將這些電流轉換到 Δ 側。將 Δ 側比流器接成Y接線，再引接到差動電驛之抑制線圈，這些電流再流經電驛之另一抑制線圈，而到變壓器Y接繞組之比流器所接成的 Δ 接線，而構成一電流迴路。假如變壓器兩側均為 Δ 接線，則兩側之比流器均應接成Y接線，再引入差動電驛。

比流器接成 Δ 接線，將會使得零序電流在 Δ 接線內循環，而不會流入電驛。對於此點，或許會令人產生一種疑慮—比流器 Δ 接線時，電驛對於變壓器發生接地故障時，能否提供有效的保護功能？答案是肯定的，因為對於變壓器發生接地故障時，電驛雖無零序電流 I_0 ，但可以由故障時產生之正序 I_1 、負序電流 I_2 而動作。差動電驛對於保護區域內部之故障，是依所有的故障分量而動作。因此，對於單相接地故障而言，總的故障電流為 $I_1 + I_2 + I_0$ ，而此時 $I_1 = I_2 = I_0$ ，故差動電驛接用 Δ 接線比流器時，對於內部故障將得到 $I_1 + I_2$ 或 $2I_1$ 之動作電流。

如圖三，在低壓側發生單相接地之內部故障時，則將由高壓側提供正序及負序故障電流，並由低壓側流入正序、負序及零序電流。低壓側之比流器為 Δ 接線，阻擋了零序電流進入電驛，但可從高壓側與低壓側之正序與負序電流相加後，流進電驛之動作線圈，而促使電驛動作。

如果在高壓側發生外部之單相接地故障時，正序及負序故障電流由低壓側提供，而正序、負序及零序電流則由高壓側供給。因而，如果高壓側比流器為Y接線時，所有流進差動電驛之故障電流分量為 $I_1 + I_2 + I_0$ ，而從低壓側(變壓器為 Δ 接線)流進電驛的故障電流為 $I_1 + I_2$ 。這將會因產生

顯著之零序不平衡電流，而導致差動電驛誤動作。因此，高壓側比流器之二次側應接成 Δ 接線。

二、比流器比值與電驛分接頭選擇

此一步驟也就是通常所稱的電驛標置，其主要目的是，在負載電流或是外部故障電流時，儘量減低流經差動電驛之動作線圈的不平衡電流。由於變壓器高、低壓側電流差異，及比流器比值分接頭選用受到限制(只能分段改變，如100/5、200/5...但無法選用105/5)，因此須由比率差動電驛之分接頭來加以改善。大部份的變壓器差動電驛分接頭選擇並非毫無限制，而是有其固定之數個分接頭。故所選用分接頭是否能夠達到減低流經差動電驛動作線圈的不平衡電流之目的，尚須加以驗證，也就是必須計算高、低壓側所選用以比流器比值與電驛分接頭，其匹配誤差之百分率是否合於要求(依變壓器是否具有載切換分接頭、比流器等級、選用差動電驛之比率值)。亦有些差動電驛，是將變壓器高、低壓側的電流，在流入電驛之前，以補助比流器將其電流值轉換為相等，故其差電流正常情況為零，此類差動電驛無須電流分接頭。一般常見的分接頭，可容許抑制電流差異約為一比二或一比三，詳如表三所示。

匹配誤差百分率可由下式來表示：

$$M\% = 100 \times \frac{|I_H / I_L - T_H / T_L|}{S} \%$$

一般以不高於5%為原則。這要看所使用差動電驛的抑制斜率及是否有負載分接頭切換器等因素。通常是考慮比流器誤差10%、負載分接頭切換器切換範圍 $\pm 10\%$ 、安全裕度5%再加上匹配誤差的百分比來選用差動電驛的百分比斜率。

I_H, T_H 分別為高壓側之比流器二次側電流與電驛分接頭設定值。

I_L, T_L 分別為低壓側之比流器二次側電流與電驛分接頭設定值。

S為公式中電流或分接頭比值之最小者。

表三：差動電驛分接頭比值表

TAP	2.9	3.2	3.5	3.8	4.2	4.6	5.0	8.7
2.9	1.000	1.103	1.207	1.310	1.448	1.586	1.724	3.000
3.2	0.906	1.000	1.094	1.188	1.313	1.438	1.563	2.719
3.5	0.829	0.914	1.000	1.086	1.200	1.314	1.429	2.486
3.8	0.763	0.842	0.921	1.000	1.105	1.211	1.316	2.289
4.2	0.690	0.762	0.833	0.905	1.000	1.095	1.190	2.071
4.6	0.630	0.696	0.761	0.826	0.913	1.000	1.087	1.890
5.0	0.580	0.640	0.700	0.760	0.840	0.920	1.000	1.740
8.7	0.333	0.368	0.402	0.437	0.483	0.529	0.575	1.000

為了使差動保護電驛獲得較佳的靈敏度，比流器比值的選擇應越低越好。但是

要注意(1)最大可能負載電流時，比流器二次側電流不可超過其額定值。最大負載電流應考慮變壓器在短時間內之緊急運轉情形，變壓器通常皆標示三種額定值：正常、風扇冷卻、強迫冷卻等，一般在強迫冷卻時為最大電流額定。(2)在可能的最大負載電流時，比流器二次側電流，不可超過電驛的電流連續額定值。一般考慮電驛的電流連續額定值，是針對通過抑制線圈的電流而言。因為如果接線正確，則流過動作線圈的電流，為兩通過抑制線圈之電流的差，其值最大約為抑制線圈電流最高者的三分之二。大部份差動電驛的抑制線圈，電流連續額定值均為10安培或更高。(3)可能的最大外部故障電流時，比流器的誤差不可超過10%，即不能使比流器發生飽和現象。

綜上所述，相位配對及比流器比值與電驛分接頭選擇，可歸納為下述諸項：

1. 比流器接線方式：

變壓器接法	比流器接法
Δ-Y	Y-Δ
Y-Δ	Δ-Y
Y-Y	Δ-Δ
Δ-Δ	Y-Y

2. 決定比流器比值及電驛分接頭：

①計算最大線電流(根據變壓器繞組在

迫冷額定KVA之最大電流)

$$I_M = \frac{\text{Max. KVA}}{\sqrt{3}KV_{L-L}}$$

②計算滿載額定線電流(根據變壓器繞組在自冷額定KVA之最大電流)

$$I_{FL} = \frac{\text{KVA}}{\sqrt{3}KV_{L-L}}$$

③選擇適當比流器比值，使得 I_M 之比流器二次側電流，小於比流器二次側之熱額定值(一般為5安培或1安培)，並且要使得流進電驛的電流，能與電驛的分接頭妥適匹配。有些電驛其最大電流與最小電流的比值不能超過3倍，如HU、BDD、STD系列電驛；有些則不能超過2倍，如CA、CAT、IJD系列電驛。

對於Y接比流器，

$$R = \frac{I_{FL}}{N}$$

對於Δ接比流器，

$$R = \frac{\sqrt{3}I_{FL}}{N}$$

I_R ：流進電驛之電流

N：比流器之比值

④校驗電驛電流與電驛分接頭之匹配誤差，儘可能獲致最小之誤差值。一般選用30%靈敏度特性的電驛，則可運用於匹配誤差不高於10%的情況

(10%的變壓器分接頭變化，加上10%比流器誤差，再加上10%的匹配誤差)。

$$M\% = 100 \times \frac{|I_H / I_L - T_H / T_L|}{S} \%$$

如匹配誤差大到不可容忍的程度，則選擇不同比流器比值，再重新計算，直到獲得滿意的匹配誤差值。

④校驗可能最大故障電流時(內部或外部故障)，流入電驛之電流不可超過電驛之額定。

3.比流器性能核驗：

爲了確保在任何情況下，差動保護方式均可正確發揮其應有功能，必須檢驗在最大外部故障電流下，比流器的比值誤差不會超過10%。如果比流器是採用美國ANSI電驛用比流器標準，則只要核驗在此最大故障電流下，跨於比流器二次側所接負載兩端的電壓，不高於比流器的飽和電壓即可。否則將導致比流器發生飽和現象，引起差動電驛誤動作。又考慮最壞情況下，當接地故障發生於比流器與變壓器之間，沒有故障電流流經變壓器之中性點。故障電流僅流過一組比流器，則流經比流器二次側的電流即爲電驛之差電流，此時如果比流器發生飽和現象，有可能造成差動電驛失效。所幸，除非飽和程度極爲嚴重，此種情況或許不致於有電驛動作

的問題，故障時的電流通常大於電驛始動電流有數倍之多。故考慮比流器飽和問題，還是應把重點放在可能的最大外部故障電流，是否會造成比流器發生飽和現象，而引起電驛誤動作。

在以美國ANSI爲標準的比流器，有一簡略但仍可接受的比流器性能核驗方法，即C等級的比流器只要合於下列式子，就可認爲適合於此保護電驛之應用：

$$\left[\frac{N_p V_{CL} - (I_{ext} - 100)R_s}{I_{ext}} \right] > Z_T$$

$$N_p = N / N_T$$

N_p = 比流器選用比值與滿匝比的比例

N = 選用比流器的比值

N_T = 比流器滿匝比的比值

V_{CL} = 所使用C等級比流器的飽和電壓

I_{ext} = 可能流經此比流器的最大外部故障電流

R_s = 比流器二次側繞線阻抗

Z_T = 比流器的總負擔(比流器二次側繞組導線阻抗+比流器二次側到電驛之電纜阻抗+電驛負擔)

計算比流器的負擔，可依比流器二次側可能的接線方式，分別由下列兩種方式計算：

3-1.比流器二次側爲Y接線方式：

a. 單相接地事故時

$$Z_T = Z_R + \frac{Ne + 2.5f}{1000} + 1.13Z_L$$

b. 三相短路事故時

$$Z_T = Z_R + 2 \left[\frac{Ne + 2.5f}{1000} + 1.13Z_L \right]$$

3-2. 比流器二次側為 Δ 接線方式：

a. 單相接地事故時

$$Z_T = 2 \left[Z_R + \frac{Ne + 2.5f}{1000} + 1.13Z_L \right]$$

b. 三相短路事故時

$$Z_T = 3 \left[Z_R + \frac{Ne + 2.5f}{1000} + 1.13Z_L \right]$$

Z_R =電驛負擔

N =選用比流器之匝數

e =比流器二次側每匝的阻抗 $m\Omega$

f =比流器二次側引線阻抗 $m\Omega$

Z_L =比流器二次側電纜阻抗 Ω

1.13及2.5兩係數為考慮最大CT引線及溫升的修正因素。

從上述式子中可以發現，影響保護電驛功能的因素很多，包括：比流器等級的選用、可能流經比流器的最大故障電流、所使用電驛的負擔等等。一般在比流器選用上，常會因經濟因素而忽略了應有的容

量、等級。比流器的性能如不詳加檢討，可能造成難以預料的後果，將是因小失大的又一事例。因而在比流器等級一經選定後，即應就可能流過的最大故障電流，檢討其是否適用；如發現有問題，應設法改善，在無法改變系統結構下， I_{ext} 要想減低有其限制，此時能夠改善的除了提高選用比流器比值之外，就是減少 Z_T 。但是提高比流器比值時，必須考慮不能降低電驛的靈敏度，也要配合電驛的設定分接頭匹配限制。另外減低比流器的負擔，可從電驛的阻抗及比流器二次側引接的電纜阻抗著手。電驛當然是選用阻抗愈低愈佳，目前各廠牌的差動電驛其阻抗均已相當低，何況在檢討時可能電驛選用已經定案，除非別無他途，否則更換的可能性很小。那麼比流器飽和的問題，就僅能就CT電纜來改善了。也就是當計算結果，發現比流器會發生飽和現象時，唯一還可做的是縮短電驛與比流器的距離，或是將CT電纜的線徑換出粗，以適當減小 Z_L 的值，直到比流器不會發生飽和現象。

在上述計算過程中，所需要的資料包括：比流器的二次側繞組的內阻、電纜長度、電纜種類及線徑大小，這些資料均可從材料規範中取得。萬一資料取得有困難時，可以使用以下數值為計算參考：

比流器二次側每匝的阻抗

$$e=0.00185 \text{ m}\Omega/\text{匝}。$$

比流器二次側引線阻抗 f ，如不是很长一般可忽略不計。

電纜線的電阻(以 20°C 為準)則依線徑大小分列於下表：

線徑 mm^2	阻抗值 Ω/KM
2.0	10.10
3.5	5.65
5.5	3.62
8.0	2.51
14.0	1.41

本節所述為變壓器差動保護電驛的運用過程中，必需要做的一些步驟，為使讀者更容易了解，試舉以下一實際範例以供參考：

例：如圖三所示為一161/23KV之變壓器，高壓側為星形(Y)接法，低壓側為三角(Δ)接法，其額定容量為60MVA。比流器等級高、低壓側皆為C400，滿匝比為2000/5。可能最大故障電流一次側為10KA，CT電纜線徑為 5.5mm^2 ，長度為100M。

設定步驟為：

①額定電流計算：

a.高壓側：

$$60\text{MVA} / (161\text{KV}\sqrt{3}) = 215\text{A}$$

b.低壓側：

$$60\text{MVA} / (23\text{KV}\sqrt{3}) = 1506\text{A}$$

②比流器接法及比值選定：

因變壓器接法為Y- Δ

a.高壓側：CT接法為 Δ ，比流器比值選用
 $215 \times 1.5 = 322.5$ 選用400/5

b.低壓側：CT接法為Y，比流器比值選用
 $1506 \times 1.5 = 2259$ 選用2000/5

③計算電驛側電流：

$$I_H = 215 \div (400/5) \times 1.732 = 4.654\text{A}$$

$$I_L = 1506 \div (2000/5) = 3.765\text{A}$$

$$④ I_H / I_L = 4.654\text{A} / 3.765\text{A} = 1.236$$

⑤選取電驛分接頭：

參考表三最接近1.236的為1.211，故選擇 $T_H = 4.6$ ， $T_L = 3.8$

$$⑥ T_H / T_L = 4.6 / 3.8 = 1.211$$

⑦匹配誤差M%

$$M\% = \frac{1.236 - 1.211}{1.211} \times 100\% = 2.1\%$$

⑧核驗比流器性能

以HU-1差動電驛為例：電驛負擔

$$Z_R = 0.15 / \text{Tap} = 0.15 / 4.6 = 0.032\Omega$$

CT電纜 5.5mm^2 ，長度為100M，阻抗為

$$Z_L = 3.62\Omega/\text{KM} \times 0.10\text{KM} = 0.362\Omega$$

高壓側CT爲 Δ 接，三相短路故障時

$$Z_T = 3 \left[Z_R + \frac{Ne + 2.5f}{1000} + 1.13Z_L \right]$$

$$= 3 \left[0.032 + \frac{400 \times 0.00185 + 0}{1000} + 1.13 \times 0.362 \right]$$

$$= 1.323\Omega$$

$$N_p = 400/2000 = 0.2$$

$$I_{\text{ext}} = 10000/(400/5) = 125$$

$$V_{\text{CL}} = 400\text{V}$$

$$125 \times 1.323 = 165.4\text{V} > 80\text{V} (400 \times 0.2) \text{ 或}$$

$$\left[\frac{N_p V_{\text{CL}} - (I_{\text{ext}} - 100)R_s}{I_{\text{ext}}} \right]$$

$$= \frac{0.2 \times 400 - (125 - 100) \times 0.00074}{125}$$

$$= 0.64$$

$$0.64\Omega < 1.323\Omega$$

即在可能最大外部故障電流時，比流器會發生飽和現象，必須重新檢討。

但如不想更換比流器，則可有其他方法？從降低比流器負擔來考慮(可考慮提高比流器比值，以降低外部故障時二次側的電流，同時提高比流器的飽和電壓，再重新設定分接頭，檢討匹配誤差等；或是考慮降低比流器負擔，其中以降低CT電纜之阻抗最爲直接)試著選用線徑爲 8.0mm^2 的電纜。

重新計算 Z_L

$$Z_L = 2.51\Omega/\text{KM} \times 0.10\text{KM} = 0.251\Omega$$

$$Z_T = 3 \left[0.03 + \frac{400 \times 0.00185 + 0}{1000} + 1.13 \times 0.251 \right]$$

$$= 0.947$$

$$0.64 < 0.947 \text{ 或}$$

$$125 \times 0.947 = 118.4\text{V}, 118.4\text{V} > 80\text{V}$$

故比流器在可能最大故障電流 10KA 時，還是發生飽和現象，如再考慮電纜換成線徑更大的 14mm^2 ，並重新檢討，得 $Z_T = 0.574\Omega > 0.64\Omega$ ，可滿足下列必要條件：

$$\left[\frac{N_p V_{\text{CL}} - (I_{\text{ext}} - 100)R_s}{I_{\text{ext}}} \right] > Z_T$$

如考慮電纜線徑太大，材料與施工成本，可能比更換比流器更高；則要使此一差動電驛要能正常運用，另一選擇爲使用C800等級的比流器。如果比流器更換爲C800，電纜爲 5.5mm^2 ， $Z_T = 1.323\Omega$ ； $800 \times 0.2 = 160$ ， 160V 小於 246.5V ，或

$$\left[\frac{N_p V_{\text{CL}} - (I_{\text{ext}} - 100)R_s}{I_{\text{ext}}} \right]$$

$$= \frac{0.2 \times 800 - (125 - 100) \times 0.00074}{125}$$

$$= 1.28$$

1.28 仍小於 $1.323(Z_T)$ ，故此差動保護無法正常運用。但使用 8.0mm^2 的電纜，則 $Z_T = 0.947 < 1.28$ ，差動保護即可正常運用。

因此，本範例比流器比值與電纜線

徑大小之匹配有兩種選擇：第一為C400、14mm²電纜或C800、8.0mm²電纜。整個設定整理如下表。

項目	高壓側	低壓側
1.額定電流	215安培	1506安培
2.比流器比值及接法	400/5 Y接	2000/5 Δ接
3.電驛側電流	$I_H = 215/80 \times \sqrt{3} = 4.654$ 安培	$I_L = (1506/400) = 3.765$ 安培
4. I_H/I_L	1.236	
5.選取電驛分接頭	$T_H = 4.6$	$T_L = 3.8$
6. T_H/T_L	1.211	
7.匹配誤差M%	$M\% = \frac{1.236 - 1.211}{1.211} \times 100\% = 2.1\%$	
8.檢驗比流器性能	$\left[\frac{N_p V_{CL} - (I_{ext} - 100)R_s}{I_{ext}} \right] > Z_T$	

三、多繞組變壓器之差動保護接線方式

如圖四所示，仍然依循兩繞組之方式，第一步先做相位匹配，第二步做比流器比值及電驛分接頭選擇。特別注意的是，多繞組變壓器相位匹配時，必須一對一對的做，並且最好是包括一組Y接線及一組Δ接線。尤其是在做第二步驟時，亦即做變壓器其中兩組繞組時，暫時忽略其他繞組，並假設其他繞組之電流為零。這一對做完之後，再以同樣方式做另外一對，並檢驗其最大匹配誤差是否在容許範圍之內。

陸、比率差動電驛運用應注意事項

比率差動電驛分接頭設定愈低、比流器比值愈低，電驛愈靈敏。然而，由於以下諸多限制，最小比流器比值及最小電驛分接頭可能無法獲得。如果選擇提高比流器比值或提高電驛分接頭皆為可行時，一般皆選擇提高比流器比值。此乃因相對於電流的引線的阻抗，電驛本身之負擔較小。提高比流器比值，由於降低了二次側最大故障電流，及提高比流器之有效飽和電壓，相對的改善了比流器之性能。一般差動電驛在運用上應注意事項如下：

- 1.正常情況下，比流器二次側電流，不可超過其連續額定電流。
- 2.在變壓器最大額定(強迫冷卻)時，其流進電驛之電流，不可超過標置分接頭之兩倍—電驛之溫度額定。
- 3.參考電驛使用手冊內電驛額定值，選擇比流器比值時，必須在最大內部故障電流時，二次側電流不會造成電驛受損。
- 4.如果所使用的電驛具有瞬時跳脫元件，其始動值並無分接頭可供選擇，而是正比於比例分接頭設定值，有些電驛是分接頭的8倍(BDD)；有些則是10倍(HU,HU-1)或15倍(HU-4)。所以最大外部故障時的對稱電流，在變壓器兩側比流器因飽和程度不同，所產生的不平衡電流流經電驛動作線圈，其值不能超過電驛設定

最小分接頭的8倍、10倍或15倍。

5.比流器二次側引線接入電驛時，必須注意與電驛設定匹配，高低壓側(或大電流與小電流接腳，各種廠牌電驛並無一致的方式，最可靠的方法是依據電驛特性試驗來判別。如引接錯誤，將導致電驛在正常情況下，負載高到某一程度即發生誤動作，通常此一情況可在負載校驗時(接線試驗)檢驗出來。

6. 比流器比值的選用，必須可以提供8倍的電驛分接頭電流(視所使用的電驛之IIT始動值，HU-4則需15倍)，而其總誤差不超過20% (BDD)或15%(HU系列)。假如比流器產生的電流在低於8倍(15倍)的電驛分接頭值時且其誤差大於20%(15%)，則可能導致在內部故障時，比流器二次側電流的諧波成份大到過度抑制，而使電驛差動元件無法有效動作，同時瞬時元件又無足夠電流動作，將造成保護電驛拒絕動作之嚴重後果。

7.在某些運用上，電力變壓器連接在一個半斷路器匯流排或環狀匯流排時，經由兩個斷路器連接於高壓或低壓系統，在此情況下，比流器比值必須適當選擇，使得匯流排之負載電流，加上變壓器之負載電流，不致於引起二次側繞組產生熱過載(Thermal Overload)。最好低壓側任一斷路器之比流器，個別連接到不同的抑制線

圈，以確保在大量之外部故障電流循環於此等匯流排時，亦能有效抑制。

柒、差動保護電驛之測試

差動電驛之完整試驗，是變壓器獲得可靠保護的保證。差動電驛的種類、型式很多，如BDD、HU、STD、CAC1、CAT、IJD、CA等等，每一型電驛都有其特點與不同的試驗要求，但一般差動電驛的試驗至少應包含下列數項：

一、始動值試驗

電驛的始動值，是指當電驛僅一抑制線圈通過電流並流經其動作線圈時，最小的動作電流稱之。根據所選用電驛及選定的抑制分接頭設定，電驛始動值約為30%或35%之分接頭設定值，這依各型電驛使用手冊之定義而有所不同，有些電驛甚至可高到分接頭設定的50%。

二、諧波抑制試驗(無諧波抑制功能者免)

依所使用電驛的種類，測試其諧波(通常以二次諧波為主要成份)抑制比例是否為所要的15%或20%，或是調整到所要的抑制比例。其計算方式是以恰好能夠閉鎖差動元件動作的二次諧波電流值，除以當時基本頻率電流值的百分比例。二次諧波(或含二次以上諧波)抑制比例，每種廠牌的電驛並不完全一樣，但大約多在10~20%之間，也有可以調整到10%以下

的，確實比例要參看各型電驛使用手冊。

三、比率差動特性試驗--SLOPE--

Through-Current Restraint

按各型電驛使用手冊所述或所選用的設定比例15%、25%、40%或30%、35%或50%等，測試不同抑制線圈之間的比例，是否合於所預定的值。

四、瞬時動作元件(IIT)始動值測試

較為週全的差動電驛(有諧波抑制功能者)，內部均附有IIT元件，其目的是萬一當變壓器加壓時發生故障，因加壓時突入電流的諧波成份之抑制作用，電驛差動元件功能被閉鎖，此時須靠IIT元件來動作，以快速隔離此故障變壓器。另外，如果內部故障電流比預期的還要大時，可能造成比流器發生飽和現象，而使得流入電驛動作線圈的電流比設定的低，且因比流器飽和導致其二次側電流的諧波成份較實際故障電流高，此一現象造成差動元件被閉鎖無法動作失去保護功能，此時就須靠瞬時過電流元件來保護。因此IIT的作用相當重要，其始動值是否正確，甚至是否能動作，必須加以確認，否則此種差動電驛的測試就顯得太粗糙了。

五、功能測試及負載試驗

測試電驛的直流接線與比流器二次側接線等，是否均與當初設計時的要求相符

合，以確認電驛動作後真正可以跳脫斷路器，以及電驛能獲得正確的電流訊號。可從此一試驗中得知差動電驛的所有接線及比流器比值與電驛分接頭設定等均正確無誤，這樣才能確保電驛的保護功能。

捌、結論

影響差動電驛保護功能的因素很多，規劃變壓器保護時，應對於該變壓器的相關資料確實掌握，對於這些因素加以檢討，如使用何種比流器等級、最大匝比應為多少，CT電纜的線徑、長度，以及所使用電驛的型式，需不需要有諧波抑制功能等等，這些都與變壓器的保護息息相關。如事到臨頭才要謀求補救，則所花費的人力、物力都是很大的損失；萬一稍有不慎，而未能事先察覺不當之處、加以改正，則將使該變壓器隱藏著無窮後患。

保護電驛不是萬靈丹，更不是擺著求心安而已。電氣工作者，時刻思考著電氣設備如何能安全、正常運作，萬一有事故發生，應有何種的保護措施，其可靠度又是如何？因此，對於電力系統中這麼重要的設備--變壓器，又是給予何種妥適的保護？這些問題，應是在變壓器正式運轉之前，必須要仔細思考的課題。

期待變壓器獲得週全的保護，並不是隨意安裝了幾套保護設備就能得到的，

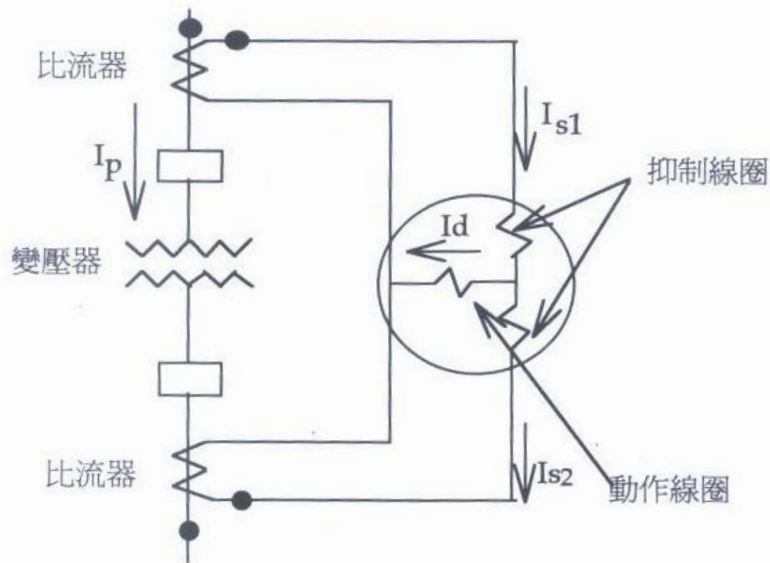
如沒有妥善的規劃，並做周詳的檢討與測試，則這些保護措施，可能只是自我安慰的擺設罷了，更可怕的是，還可能成爲造成不必要停電的禍首！例如，因對於變壓器突入電流已有充分考慮，而使用了具有諧波抑制功能的差動電驛來保護，但因未確實得知其最大諧波比例，而輕易決定使用20%諧波抑制的電驛，結果是變壓器仍然一加壓即跳脫，原因在於所保護的變壓器，事實上其突入電流的諧波比例並不會高於15%，當然所要達到的諧波抑制效果就會落空，這僅是常有的事例之一。或是保護電驛用比流器的接線錯誤，而未及時發現(未確實執行接線試驗或稱負載校驗)並加以更正，當負載提升到某一程度或是發生外部事故時，差動電驛即產生誤動作，而造成不必要的停電，這是典型的因小失大案例，此種做法與觀念殊不足取。

另外，對於比流器飽和問題的檢討，亦應確實謹慎從事，不能存有倖倖心態，否則因而導致差動電驛誤動作的情形，將是無可避免的。至於電驛的測試，更應不厭其煩的逐項仔細執行，不同類型電驛各有其試驗重點，不能一種方式就要適用所有遇到的電驛，也不應有因循的心

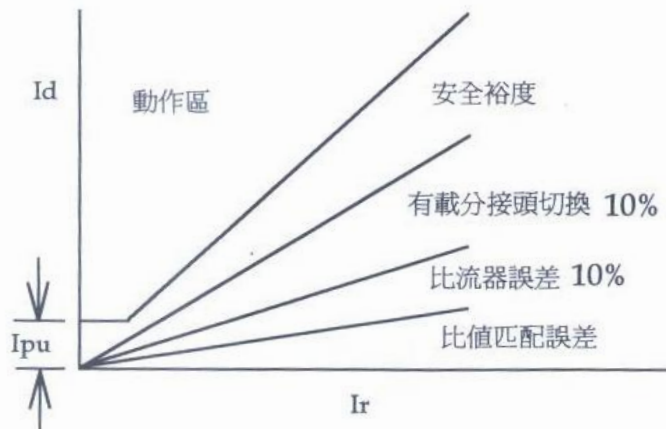
理。保護電驛不會有奇跡，不是隨意擺著就可保變壓器平安無事的，保護電驛必須要妥善的規劃、設定、接線並有完整的測試維護，方可達到保護的最終目的。

參考資料：

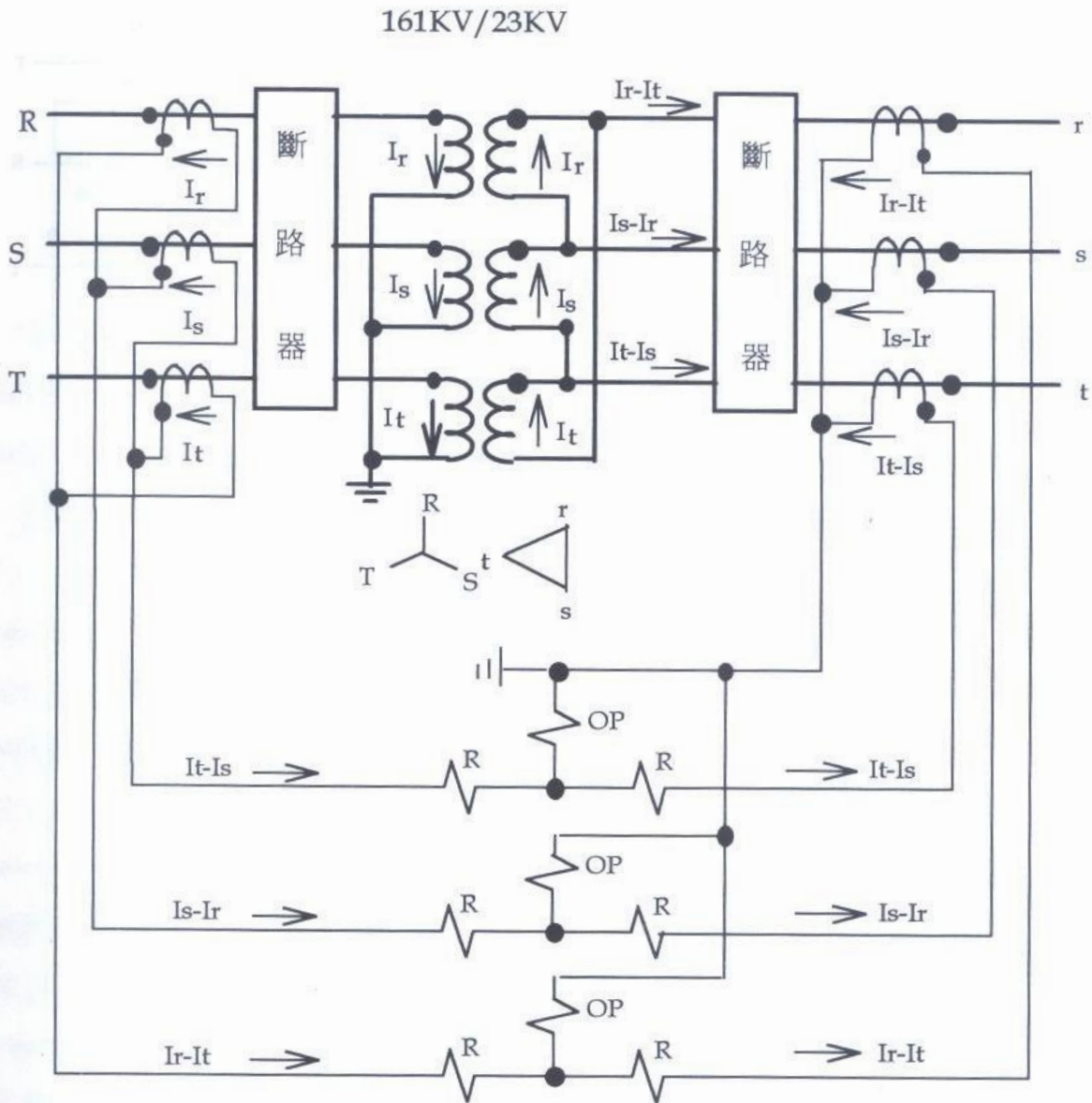
1. Applied Protective Relaying WH.
2. Protective Relaying Blackburn
3. Protective Relaying Theory and Applications 1994 by ABB
4. Transformer Differential Relay With Percentage And Harmonic Restraint BDD15B, BDD16B Instructions GE
5. Differential Relays For Protection of AC Generators, Transformers, and Station Bus WH.
6. Type HU AND HU-1, HU-4 Transformer Differential Relay Instructions ABB
6. Type CAC1-10-M3 Bias Differential Relay Instructions MITSUBISHI
8. Protective Relays THEIR THEORY AND PRACTICE Volume Two by A.R van C. WARRINGTON



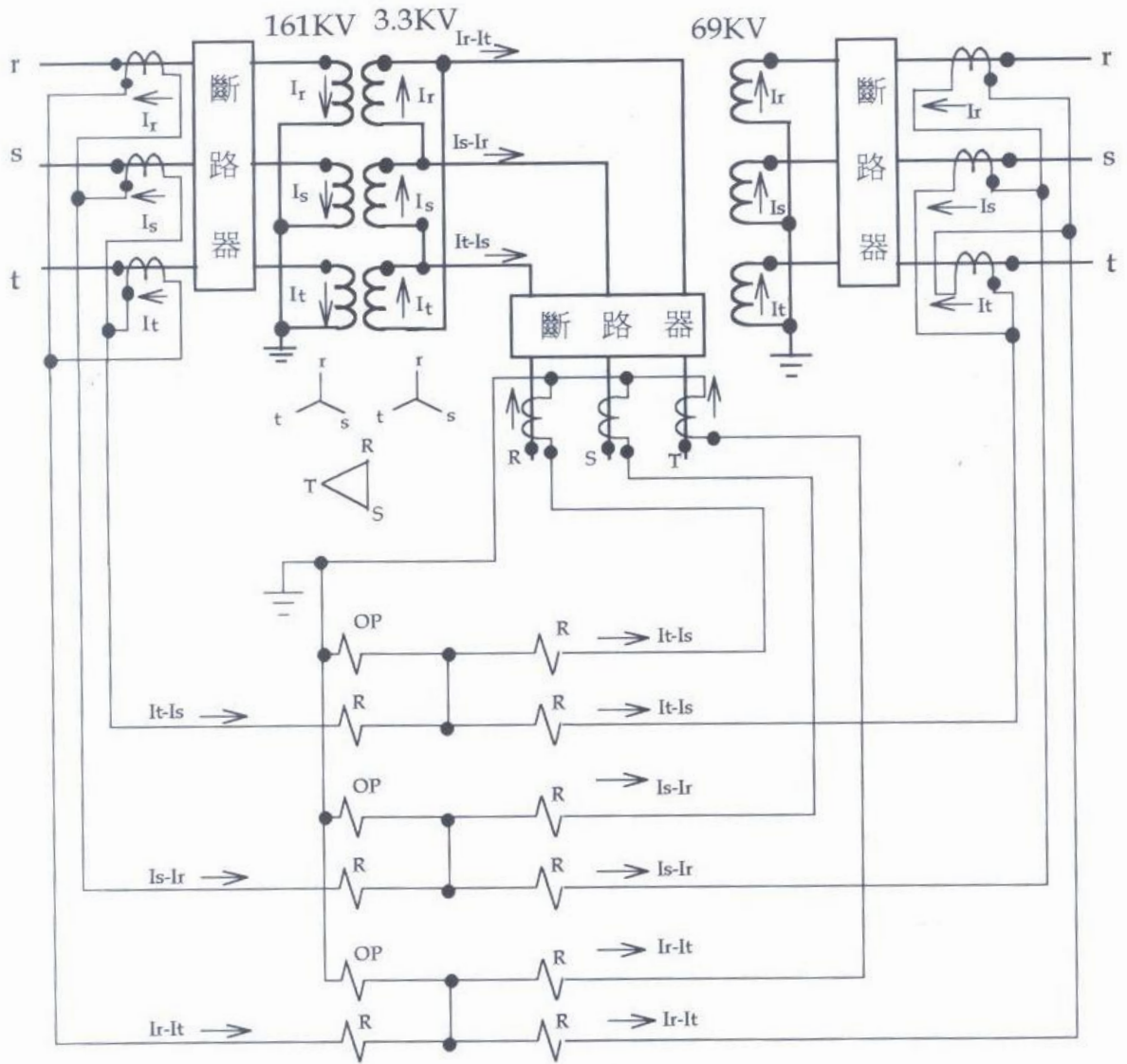
圖一 比率差動電驛簡單接線圖



圖二 比率差動電驛特性圖



圖三 Y-Δ接線兩繞組變壓器差動保護電驛接線圖



圖四. 多繞組變壓器差動保護電驛接線圖