# 补偿自耦变流器抽头的合理选擇

齐 皝 海編著

电力工業出版社

变压器的从联差动保护装置，在两侧变流器的二次电流不平衡程度超过一定限度时，需要装設补偿变流器来加以补偿。补偿变流器一般是自耦型的，备有很多抽头，以适应各种不同程度的补偿，使其設計及使用标准化。

但是一般补偿变流器抽头比例的选擇都有其缺点。不是抽头过多，構造复杂，就是抽头的比例选擇不当。例如，有一种旧式的补偿变流器，各抽头与共同端子間的圈数各为 90、157、164、171、178、186 及 196，共計七个抽头。抽头数量虽然不少，但是由于各抽头之間圈数的比例选擇不当，因此补偿范圍太小。假定有一个变压器兩側变流器二次电流的比例为 1.5:1 时，若用該变流器进行补偿，补偿后的不平衡程度仍在 15% 以上。这是因为各抽头沒有能發揮它們的作用，很多抽头之間的比例不必要地重复了，如：

$$\frac{196}{186}\approx\frac{186}{178}\approx\frac{178}{171}\approx\frac{171}{164}\approx\frac{164}{157}\approx 1.05$$

$$\frac{196}{178}\approx\frac{186}{171}\approx\frac{178}{164}\approx\frac{171}{157}\approx 1.09$$

………………………………………

…………………………

以上各比例非常接近，相当于重复，因此要补偿兩側二次电流的比例为 1.05 时，使用这种补偿变流器可以有五种不同的接綫方法。但是在 $\frac{196}{157}=1.25$ 与 $\frac{157}{90}=1.74$ 这样二个相差很大的比例之間，却沒有一个中間的比例可以利用。实际上一个設計良好的五个抽头的补偿变流器，比这种变流器可以有更高补偿精密程度与更大的补偿范圍。

苏联 ВУ-25Б 型补偿变流器，抽头的設計比較好。补偿精密度很高，补偿范圍也相当大。在兩側二次电流的比例介乎 1.63 与 1 之間时(指大电流側与小电流側的比例)，补偿精密度为 1 %，即补偿后的不平衡可以減少到 1 %以下(不包括由于变流器或补偿变流器誤差所产生 的不平衡程度)。但是这种变流器有十个抽头，連共同端子共有十一个端子，構造过分复杂。在实际应用上不需要这样高的补偿精密度，因为补偿变流器原有的誤差 ±2% 已經超过其精密度。其次 ВУ-25Б 的抽头設計虽然比前面所举的例子要好得多，但是还可以进一步的加以改进。

(1)一个良好的变流器，首先应該構造簡單，使用便利，而且安全可靠。因此除了端子上的引出綫以外，不应該在使用时再在各端子上另有其他的接綫(如短接綫)或插头等裝置如 BTH-561 型飽和变流器。以上所举的二种变流器，在这方面是能符合这个要求的。

(2)其次应該要有足够的补偿范圍，使其能适用于实际可能想到的兩側二次电流的不平衡程度。补偿范圍可以用最高抽头与最低抽头的圈数比例来表示。比例愈大，补偿范圍也愈大。但是补偿范圍也不宜过大，否則会使变流器的鉄心与导綫截面增加，不能达到經济性的要求。

現在我国生产的标准比例的变流器，其相鄰二級的比例相差不超过一倍。适当地选取变流器的比例，可以使变压器兩側变流器二次电流的不平衡比例不超过$\sqrt{2}$。

假定变压器一側的变流器比例已經固定，而另一側尚待选取，根据計算結果，若欲使兩側二次电流絕对平衡，

待选取的变流器的比例应該是 $a$，但是这可能不是一个标准比例。假定标准比例中比 $a$ 略大的一級是 $a_1$，而比 $a$ 略小的一級是 $a_2$，则

$$a_1 \leqslant 2a_2$$

如选取 $a_1$，则需要补償的比例是 $a_1/a$；如选取 $a_2$，则需要补償的是 $a_1/a_2$，

$$\frac{a_1}{a} \times \frac{a}{a_2} = \frac{a_1}{a_2} \leqslant 2$$

若 $$\frac{a_1}{a} = \frac{a}{a_2}$$

则 $$\frac{a_1}{a} = \frac{a}{a_2} \leqslant \sqrt{2}$$

如 $$\frac{a_1}{a} \neq \frac{a}{a_2}$$

则 $a_1/a$ 或 $a/a_2$ 中必須有一个小于 $\sqrt{2}$，因此适当地选取 $a_1$ 或 $a_2$，可以使二次电流不平衡的比例小于 $\sqrt{2}$。

以上假定一側变流器的比例已經固定，如兩側变流器的比例同时选取，二次电流不平衡的比例可以更小。

考慮变压器的电压分接头可能有±12%的調整，若以 $r$ 为补償范圍，则

$$r = 1.12\sqrt{2} = 1.59$$

因此适当的补償范圍应該是 1.6 左右。

(3)最后，一个良好的补償变流器应該要用最少的抽头来达到所要求的补償精密度。

假定有一个 $m$ 个抽头的补償变流器，各抽头的圈数为

$$n_1, n_2, n_3, \cdots\cdots n_a, \cdots\cdots n_b, \cdots\cdots n_m$$

而 $n_1<n_2<n_3<\cdots\cdots<n_a<\cdots\cdots<n_b<\cdots\cdots<n_m$

则应該使各抽头圈数的比例，亦即补偿比例，服从下述公式

$$\frac{n_b}{n_a}=k^{x_{a-b}} \qquad (1)$$

其中 $k$ 是一个大于 1 的常数。$x_{a-b}$ 是整数，随 $n_b$ 与 $n_a$ 而变化。欲使变流器在补偿范圍內的补偿精密度均匀一致，$k$ 必須是一个常数，在各 $n_b$ 与 $n_a$ 情况下保持不变。

$$r=\frac{n_m}{n_1}=k^{x_{1-m}} \qquad (2)$$

在已知的抽头数 $m$ 时，欲在补偿范圍內达到最高的补偿精密度，应該使各个指数 $x_{a-b}$ 的数値能够排成一列从 1 开始的、連續不断的、重复最少的整数列。换言之，$x_{a-b}$ 的整数列应該从 1 到 $x_{1-m}$ 不能殘缺，而 $x_{1-m}$ 应該愈大愈好。因为 $x_{1-m}$ 愈大則 $x_{a-b}$ 的变化愈多，即补偿比例变化愈多，补偿的精密度自然应該愈高。在公式 (2) 中，若 $r$ 不变，則 $x_{1-m}$ 愈大，$k$ 就愈小。

从公式 (1)，可以得到

$$\frac{n_2}{n_1}=k^{x_{1-2}},\quad \frac{n_3}{n_2}=k^{x_{2-3}},\quad \cdots\cdots$$

$$\frac{n_3}{n_1}=\frac{n_2}{n_1}\times\frac{n_3}{n_2}=k^{x_{1-2}}\cdot k^{x_{2-3}}=k^{x_{1-2}+x_{2-3}}$$

$$\frac{n_b}{n_a}=\frac{n_{a+1}}{n_a}\times\frac{n_{a+2}}{n_{a+1}}\times\cdots\cdots\times\frac{n_b}{n_{b-1}}$$

$$=k^{x_{a-(a+1)}}\cdot k^{x_{(a+1)-(a+2)}}\cdot\cdots\cdots\cdot k^{x_{(b-1)-b}}$$

$$=k^{x_{a-(a+1)}+x_{(a+1)-(a+2)}+\cdots\cdots+x_{(b-1)-b}}$$

$$\frac{n_b}{n_a}=k^{x_{a-b}}$$

$$\therefore x_{a-b}=x_{a-(a+1)}+x_{(a+1)-(a+2)}+\cdots\cdots x_{(b-1)-b}$$

$$x_{a-b}=\sum_{a=a}^{a=b-1}x_{a-(a+1)} \qquad (3)$$

公式(3)指出抽头 $b$ 与抽头 $a$ 圈数比例的指数 $x_{a-b}$，等于此二抽头之間各相鄰抽头圈数比例指数的和。即 $x_{a-b}$决定于各 $x_{a-(a-1)}$ 的数值及排列。$x_{a-(a+1)}$ 的选取主要依靠試算，但是也有一些規律。

在 $m=3$ 时，可以选取

$$x_{1-2}=1, \quad x_{2-3}=2$$

則
$$x_{1-3}=x_{1-2}+x_{2-3}=1+2=3$$

以上各 $x_{a-b}$ 的数值中，从 1 到 3 俱全，不殘缺亦不重复。因此三个抽头的变流器，各抽头的圈数应該是

$$n_1=n$$

$$n_2=k^{x_{1-2}}n_1=kn$$

$$n_3=k^{x_{2-3}}n_2=k^2kn=k^3n$$

而各抽头圈数的比例是

$$1:k:k^3$$

在 $m=4$ 时，可以选取

$$x_{1-2}=1, \quad x_{2-3}=3, \quad x_{3-4}=2$$

則
$$x_{1-3}=x_{1-2}+x_{2-3}=1+3=4$$

$$x_{2-4}=x_{2-3}+x_{3-4}=3+2=5$$

$$x_{1-4}=x_{1-2}+x_{2-3}+x_{3-4}=1+3+2=6$$

以上各 $x_{a-b}$ 中从 1 到 6 俱全，因此四个抽头的变流器，各抽头圈数的比例应該是 $1:k:k^4:k^6$

在 $m=5$ 时，可以选取

$$x_{1-2}=1,\ x_{2-3}=3,\ x_{3-4}=3,\ x_{4-5}=2$$

$$x_{1-3}=4,\ x_{2-4}=6,\ x_{3-5}=5$$

$$x_{1-4}=7,\ x_{2-5}=8$$

$$x_{1-5}=9$$

以上各 $x_{a-b}$ 的整数从 1 到 9 俱全，但数字 3 重复了。但这个重复是無法避免的。虽然一共有十个 $x_{a-b}$，但是要使它們从 1 到 10 各各不同是不可能的。$x_{1-5}=9$ 是我們可能得到的最大的数值。因此五个抽头的变流器，各抽头圈数的比例应該是 $1:k:k^4:k^7:k^9$

在 $m\geqslant6$ 时，可以根据不列規律来选取 $x_{a-(a+1)}$ 的数列。

(一)使 $x_{1-2}$ 至 $x_{(m-1)-m}$ 依次等于

$$1,c,1,c,\cdots\cdots\cdots\cdots1,c,1,2,2,\cdots\cdots2 \qquad (4)$$

(二)$c$ 的数値比最后一个 $c$ 以后所有数字的和大 1。

(三)在 $m$ 的数値介乎 $(4y+1)$ 与 $(4y+4)$ 之間时，$c$ 应該有 $y$ 个。

以上这个規律虽然是根据各种試算的結果而归納的，但是也有其一定的理由及証明。

例如 $m=10$ 时，$y=2$，因此 $c$ 应該是二个，$x_{1-2}$ 到 $x_{9-10}$ 依次 应該是 $1,c,1,c,1,2,2,2,2$

$c$ 比最后五个数字的和大 1，因此 $c=10$，即

$$1,10,1,10,1,2,2,2,2 \qquad (5)$$

$$x_{1-10}=1+10+1+10+1+2+2+2+2=31$$

一个 1,2,2,……,2 的数列，相鄰各数字的和可以从 1 开始，一直到所有数字的总和不殘缺。如数列（5）最后五个数字，可以从 1 到 9 不殘缺。前面加了二个数字 1、10 以后，从 10 开始可以用 10 与其他相鄰数字的和組成 10 到 20，仍保持不缺。若前面再加二个数字 1,10，則从 21 开始可以用二个 10 之間的数字与相鄰的数字組成 21到 31。前面加 1,10 而不在后面加2,2 的目的是使 $x_{1-m}$ 的数值增大。很明显$c$的数值比最后几个数字的总和大 1，是可以使 $x_{a-b}$不殘缺，而又可能得到最大可能的$x_{1-m}$ 值的必要条件。

$c$ 的数值的大小与 $c$ 的个数是从互相平衡中求其可能使 $x_{1-m}$ 最大而得到的。例如 $m=10$ 时，若只用一个 $c$ 可以得到下面的数列

$$1,14,1,2,2,2,2,2,2 \qquad (6)$$

$$x_{1-10}=28$$

若用三个 $c$ 可以得到下面的数列

$$1,6,1,6,1,6,1,2,2 \qquad (7)$$

$$x_{1-10}=26$$

与数列（5）比較，$x_{1-10}$ 要小一些，因此都不采用。

每增加一个 $c$，会使后面減少二个 2，因此使 $c$ 的数值小 4。如以上的例子，$c$ 由二个增加到三个，$c$ 的数值就由 10 減到 6。相反，$c$ 的数字減少一个，可以使其数值增加 4。

假定現在有一个 $x_{a-(a+1)}$ 的数列，$c$ 有 $y$ 个，而后面的 2 有 $z$ 个，則

$$m=2y+1+z+1=2y+z+2 \tag{8}$$

$$z=m-2-2y \tag{9}$$

$$c=(1+2z)+1=2z+2=2m-4y-2 \tag{10}$$

$$\begin{aligned} x_{1-m}&=y(1+c)+1+2z \\ &=y(1+2m-4y-2)+1+2(m-2-2y) \\ &=(2m-3)+(2m-5)y-4y^2 \end{aligned} \tag{11}$$

若 $m$ 不变而增加一个 $c$，使 $y'=y+1$，则

$$\begin{aligned} x'_{1-m}&=(2m-3)+(2m-5)y'-4y'^2 \\ &=(2m-3)+(2m-5)(y+1)-4(y+1)^2 \\ &=(4m-12)+(2m-13)y-4y^2 \end{aligned} \tag{12}$$

$$x_{1-m}-x'_{1-m}=-2m+9+8y$$

若
$$x_{1-m}>x'_{1-m}$$

$$-2m+9+8y>0$$

$$\therefore m<4y+4.5 \tag{13}$$

若 $m$ 不变而减少一个 $c$，使 $y''=y-1$，则

$$\begin{aligned} x''_{1-m}&=(2m-3)+(2m-5)y''-4y''^2 \\ &=(2m-3)+(2m-5)(y-1)-4(y-1)^2 \\ &=-2+(2m+3)y-4y^2 \end{aligned} \tag{14}$$

$$x_{1-m}-x''_{1-m}=(2m-1)-8y$$

若
$$x_{1-m}>x''_{1-m}$$

$$2m-1-8y>0$$

$$\therefore \quad m>4y+0.5 \tag{15}$$

为了使 $x_{1-m}$ 的数值最大，$x_{1-m}$ 应該大于 $x'_{1-m}$ 或 $x''_{1-m}$，因此 $m$ 与 $y$ 的数值应符合公式(13)与(15)。但 $m$ 与 $y$ 都是整数，因此可以將公式(13)与(15)改为

$$m \leqslant 4y+4 \tag{16}$$

$$m \geqslant 4y+1 \tag{17}$$

$$\therefore \quad 4y+1 \leqslant m \leqslant 4y+4 \tag{18}$$

这个公式証明上述規律中的第(三)点是正确的，即当$m$的数値介于$(4y+1)$与$(4y+4)$之間时，$c$的数字应該有$y$个。

將公式(18)代入公式(11)可以得到

当$m=4y+1$或$m=4y+4$时，

$$x_{1-m}=\frac{1}{4}(m^2+3m-8) \tag{19}$$

当$m=4y+2$或$m=4y+3$时，

$$x_{1-m}=\frac{1}{4}(m^2+3m-6) \tag{20}$$

以上所述$x_{a-(a+1)}$的数列，可以將其顚倒，而并不影响其結果。例如在$m=10$时，$x_{1-2}$到$x_{9-10}$可依次等于数列(5)，也可以依次等于

$$2,2,2,2,1,10,1,10,1 \tag{21}$$

根据数列(5)設計时，各抽头圈数比例应該是

$$1:k:k^{11}:k^{12}:k^{22}:k^{23}:k^{25}:k^{27}:k^{29}:k^{31}$$

若根据数列(21)設計，各抽头圈数的比例成为

$$1:k^2:k^4:k^6:k^8:k^9:k^{19}:k^{20}:k^{30}:k^{31}$$

但以上兩种变流器可以达到完全相同的效果。

$k$的数值可以由公式(2)求得。若取补偿范圍等于1.6，則

$$r=k^{x_{1-m}}=1.6$$

$$k=\sqrt[x_{1-m}]{1.6} \tag{22}$$

但是实际上，这个公式不能絕对代表 $k$。在 $x_{1-m}$ 比較大时，可以用这个公式。当 $x_{1-m}$ 数值不大时，应該采用更精确的公式 $r=k^{x_{1-m}+\frac{1}{2}}=1.6$

$$k=\sqrt[(x_{1-m}+\frac{1}{2})]{1.6} \qquad (23)$$

这是因为在补偿精密度的限度以內，补偿范圍可以比 $k^{x_{1-m}}$ 略大，等于 $k^{x_{1-m}+\frac{1}{2}}$。

令 $d$ 为补偿精密度，则 $d=(\sqrt{k}-1)\times 100\%$

$$=\left[\sqrt[(2x_{1-m}+1)]{1.6}-1\right]\times 100\% \qquad (24)$$

从公式(23)及(24)，可以算出三个到十个抽头的变流器，$k$ 及 $d$ 的数值如表 1。

从表一可以看到，在抽头比較少时，每增加一个抽头，可以使补偿精密度提高很多。但在抽头数較多时，增加一个抽头所能提高的精密度很有限。

在实际应用上，2.5% 的精密度已能滿足变压器差动保护的要求。按照表 1，这种变流器只要五个抽头，比 BУ-25Б 少了一半。抽头較少的变流器不但構造可以簡單，而且更为可靠，又可以节約工料，若在全国范圍內推广，节約的資金一定不少。因此建議国家采用这种变流器作为标准大量生产。

这种五个抽头的变流器，各抽头圈数的比例，上面曾經提到，应該是 $1:k:k^4:k^7:k^9$

**在补偿范圍等于1.6时各个抽头的变流器补偿精密度表**

表 1

| $m$ | $x_{1-m}$ | $k$ | $d\%$ |
|---|---|---|---|
| 3 | 3 | 1.144 | 7.0 |
| 4 | 6 | 1.075 | 3.7 |
| 5 | 9 | 1.051 | 2.5 |
| 6 | 12 | 1.038 | 1.9 |
| 7 | 16 | 1.029 | 1.4 |
| 8 | 20 | 1.023 | 1.2 |
| 9 | 25 | 1.019 | 0.9 |
| 10 | 31 | 1.015 | 0.8 |

从表 1，

$$k=1.051$$

$$\therefore \quad k^4=1.219.$$

$$k^7=1.414$$

$$k^9=1.561$$

因此若 $n_1=n$，则 $n_2=1.051n$，$n_3=1.219n$，$n_4=1.414n$，$n_5=1.561n$。根据这样的比例来設計的变流器，若欲在二次側得到 5 安电流，一次側电流与兩側接綫方法詳見表 2，其中 0 代表共同端子。

我們可以很明显地看到上述变流器的优越性。它比我們以前所說的旧式变流器少了二个抽头，补償精密度几乎相同，而且补償范圍更大。表面上看起来后者的补償范圍似乎更大，有

$$r=\frac{196}{90}=2.08,$$

但是我們已經說过在1.25与1.74之間缺了一大段。

**五个抽头的补偿变流器为了在二次侧得到5安电流的接綫方法表**

表2

| 一次侧电流 安 | 一次側接綫端子 | 二次側接綫端子 | 一次侧电流 安 | 一次側接綫端子 | 二次側接綫端子 |
|---|---|---|---|---|---|
| 3.12—3.28 | 0—5 | 0—1 | 5.13—5.39 | 0—1 | 0—2 |
| 3.28—3.45 | 0—5 | 0—2 | 5.39—5.66 | 0—4 | 0—5 |
| 3.45—3.62 | 0—4 | 0—1 | 5.66—5.95 | 0—2 | 0—3 |
| 3.62—3.81 | 0—4 | 0—2 | 5.95—6.25 | 0—1 | 0—3 |
| 3.81—4.00 | 0—5 | 0—3 | 6.25—6.57 | 0—3 | 0—5 |
| 4.00—4.20 | 0—3 | 0—1 | 6.57—6.90 | 0—2 | 0—4 |
| 4.20—4.42 | 0—3 | 0—2 | 6.90—7.25 | 0—1 | 0—4 |
| 4.42—4.64 | 0—5 | 0—4 | 7.25—7.62 | 0—2 | 0—5 |
| 4.64—4.88 | 0—2 | 0—1 | 7.62—8.00 | 0—1 | 0—5 |
| 4.88—5.13 | 0—5 | 0—5 | | | |

苏联 BУ-25Б 型变流器的十个抽头，其圈数比例依次是

$$1:k:k^{14}:k^{15}:k^{17}:k^{19}:k^{21}:k^{23}:k^{25}:k^{27}$$

$$x_{1-10}=27$$

它的 $x_{1-2}$ 至 $x_{9-10}$ 分别等于　1,13,1,2,2,2,2,2,2

与我們的規律很接近，但是还不够好。若改用数列(5)可以得到

$$x_{1-10}=31$$

在其他一切条件相同时，若用我們的規律来改进BУ-25Б抽头的圈数，可以提高其补偿精密度約15%左右。

若有特殊的要求，需要补偿范圍比1.6更高，或精密度比2.5%更高的补偿变流器时，可以用以上所述規律及公式来进行設計。所获得的变流器一定能够有最好的效果。