

零序电流过滤器在稳态短路电流作用下的不平衡电流的计算

大连电业局 阎善忠

摘要 零序电流过滤器的不平衡电流是由各方面因素决定的,尤以短路的过渡过程最为复杂,对它的研究应以在稳态短路电流作用下零序电流过滤器出现的不平衡电流为基础,进而再研究短路过渡过程中出现的不平衡电流。本文根据本人多年继电保护工作经验写成,对于在稳态短路电流作用下零序电流过滤器出现的不平衡电流提出了具有应用价值的分析计算方法,这对带时限零序电流保护的整定计算与灵敏度分析提供了有力的帮助。

关键词 继电保护 零序电流 过滤器

概述 零序电流过滤器LLL(本文一律采用汉语拼音取词首)的不平衡电流 I_b ,是由各方面因素决定的,在电力系统短路的过渡过程中尤为复杂。首先,此时的短路电流 I_{d1} 中出现大量非周期分量 I_{d1}, I_{d2} ,使短路电流偏于时间轴的一侧, I_{d1}, I_{d2} 又使电流互感器LH的铁芯饱和,导致励磁电流几十倍甚至上百倍地增长,同时在电流互感器的二次侧也出现非周期分量,使二次电流波形严重畸变,并出现谐波电流;第二,在切除短路电流时,在铁芯中造成大量剩磁,若再次发生短路,当 I_{d1} 对铁芯的磁化方向与原剩磁方向一致时,使LH的工作特性更坏,与原剩磁方向相反时,可以改善LH的工作特性;第三,由于三相制各相电流相差 120° ,在切除三相短路电流时,三相中 I_{d1} 的瞬时值不相等,在铁芯中造成的剩磁也不等,使零序电流过滤器中的三个电流互感器运行在不同的工作点上。所有这些因素,都使得零序电流过滤器的过渡过程不平衡电流发生急剧地变化,这就给研讨工作带来困难。短路的过渡过程结束之后,进入稳态短路,零序电流过滤器出现稳态不平衡电流,带时限零序电流保护由于动作时限较长,可以不考虑过渡过程中不平衡电流对它的影响,但需躲过稳态短路电流作用下出现的稳态不平衡电流,稳态不平衡电流究竟有多大,需予以重视,因为它影响零序电流保护的灵敏度。我们先以研究稳态不平衡电流为基础,弄清它的来龙去脉,再进而研究短路过渡过程中出现的过渡过程的不平衡电流。

1 零序电流过滤器的不平衡电流

零序电流过滤器通常是由三个电压等级相同、变比 n_L 相等、型号一样的单相电流互感器组成的,在二次侧把同极性端子并联后接到继电器上,如图1所示,图2为其等值电路图。

\dot{I}_A, \dot{I}_B 与 \dot{I}_C 为归算到二次侧的一次电流 \dot{I}_A, \dot{I}_B 与 $\dot{I}_C, \dot{I}'_{LC.A}, \dot{I}'_{LC.B}$ 与 $\dot{I}'_{LC.C}$ 为归算到二次侧的一次励磁电流 $\dot{I}_{LC.A}, \dot{I}_{LC.B}$ 与 $\dot{I}_{LC.C}, \dot{I}_a, \dot{I}_b$ 与 \dot{I}_c 为二次电流,流过继电器的电流为

$$\begin{aligned}\dot{I}_r &= \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = [(\dot{I}_A - \dot{I}_{LC.A}) + (\dot{I}_B - \dot{I}_{LC.B}) + (\dot{I}_C - \dot{I}_{LC.C})] / n_L \\ &= (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) / n_L - (\dot{I}_{LC.A} + \dot{I}_{LC.B} + \dot{I}_{LC.C}) / n_L\end{aligned}$$

$$= 3 \dot{I}_0 / n_L + \dot{I}_{b,0} \quad (1)$$

$$\dot{I}_{b,0} = -(\dot{I}_{LC.A} + \dot{I}_{LC.B} + \dot{I}_{LC.C}) / n_L \quad (2)$$

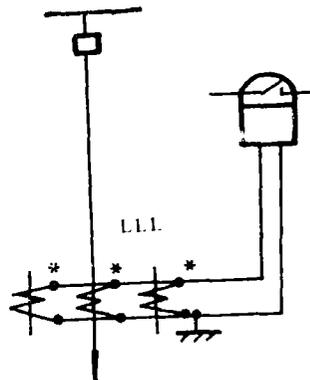


图1 零序电流过滤器接线

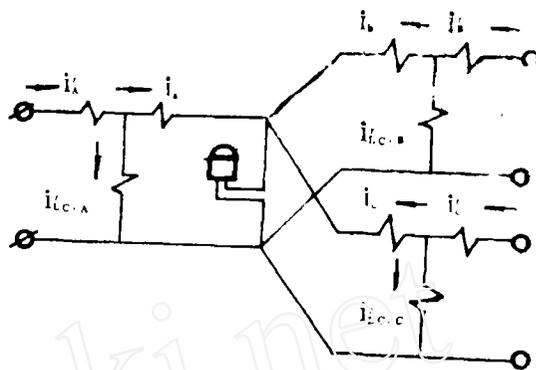


图2 零序电流过滤器等值电路

$\dot{I}_{b,0}$ 称为不平衡电流，它是三相电流互感器 LH 励磁电流的矢量和，取负号。流过继电器的电流 $\dot{I}_{b,0}$ 为两部分，第一部分为 $3 \dot{I}_0 / n_L$ ，当三相对称， $3 \dot{I}_0 / n_L = 0$ ，第二部分为不平衡电流 $\dot{I}_{b,0}$ ，由于电流互感器在制造工艺上的差别，即使是同型号同期出厂的产品，它们的励磁电流也是有出入的，所以 $\dot{I}_{b,0} \neq 0$ 。在铁芯未饱和的情况下，当三相电流互感器的励磁电流完全相等时， $\dot{I}_{b,0} = 0$ ，实际上由于励磁电流的差异，在铁芯未饱和的情况下，正常运行时，即使三相电路对称，继电器中总要流过一个不平衡电流 $\dot{I}_{b,0}$ 。

在铁芯未饱和的情况下，电流互感器的励磁特性是线性的，励磁电流也是线性的，就是说励磁电流是正弦波，如上面所说，若此时三相电流互感器的励磁电流完全相等，则 $\dot{I}_{b,0} = 0$ ，而当铁芯饱和时，情况就变了，电流互感器的励磁特性是非线性的，这时的励磁电流不再是正弦波，内含有谐波分量，含有谐波分量的励磁电流称为复波励磁电流，在这种情况下，即便是三相电流互感器的励磁电流完全相等，不平衡电流也不等于零，即 $\dot{I}_{b,0} \neq 0$ 。这是因为复波励磁电流中所含谐波分量的属性，即序别不同所致，为了下面叙述上的方便，把谐波分量的序别，即它是属于哪一个序分量作一说明。

2 谐波分量的序别

设基波的角速度为 ω ，第 k 次谐波的角速度为 $k\omega$ ，基波各相依次相差 120° 或 $2\pi/3$ ，各相谐波依次相差 $k2\pi/3$ ，令 k 次谐波各相相角差为 φ_k ，则有下列关系，

$$\varphi_k = k \frac{2}{3} \pi \quad (3)$$

令 k 为 3 的倍数，即 $k = 3n$ ，当 $n = 1, 2, 3 \dots$ 时， $k = 3, 6, 9, \dots$ ，将 $k = 3n$ 代入 (3) 式，得

$$\varphi_k = 3n \frac{2}{3} \pi = 2n\pi \quad (4)$$

(4)式表明相位重合关系,即三相电路中凡是满足 $k=3n$ 的各次谐波分量,它们的相位是重合的或相差 0° 或 360° ,说明 $k=3, 6, 9, 12\cdots$ 次谐波分量为零序组分量。

令 $k=3n+1, n=1, 2, 3, \cdots$ 时, $k=4, 7, 10, \cdots$, 将 $k=3n+1$ 代入(3)式, 得

$$\varphi_k = (3n+1) \frac{2}{3} \pi = 2n\pi + \frac{2}{3} \pi \quad (5)$$

(5)式表明各次谐波相差 $2\pi/3$,恰为正序分量之间的相位关系,所以三相电路中凡满足 $k=3n+1$ 的各次谐波分量相位差为 $2\pi/3$,说明 $k=4, 7, 10\cdots$ 各次谐波分量为正序分量组。

令 $k=3n-1, n=1, 2, 3\cdots$ 时, $k=2, 5, 8\cdots$, 将 $k=3n-1$ 代入(3)式, 有

$$\varphi_k = (3n-1) \frac{2}{3} \pi = 2n\pi - \frac{2}{3} \pi \quad (6)$$

上式表明各次谐波相位差为 $-2\pi/3$ 恰为负序分量相位关系,所以三相电路中凡满足 $k=3n-1$ 的各次谐波分量相位差为 -120° 或 $-2\pi/3$,说明 $k=2, 5, 8\cdots$ 各次谐波分量为负序分量组。上述各序别的谐波分量组示于图3, 下角注码1、2、0分别表示正序, 负序和零序。

3 电流互感器在正弦电压作用下铁芯饱和时励磁电流中的谐波分量

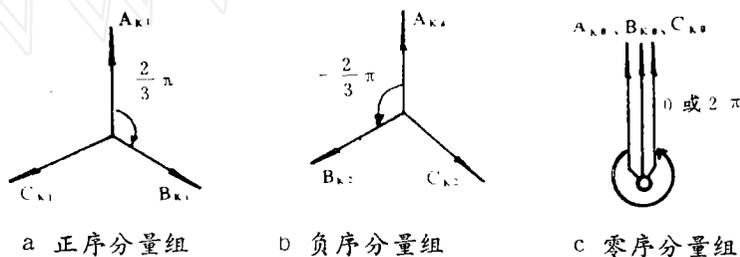


图3 各序别谐波分量组图

让我们来研究一下电流互感器在正弦电压作用下, 铁芯饱和时励磁电流中的谐波分量。

由于试验设备容量的限制, 一般是在电流互感器的二次绕组加电压, 一次绕组开路的情况下进行励磁特性或伏安特性试验, 如图4所示。

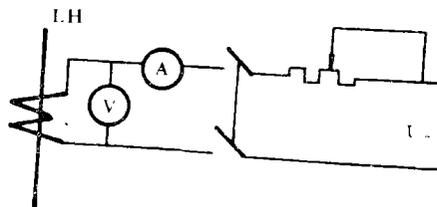


图4 电流互感器励磁特性试验

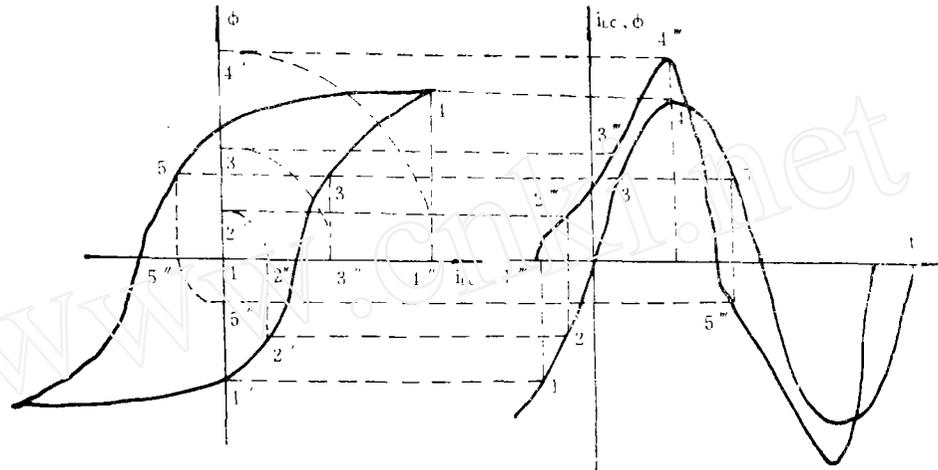
由试验可得 $\phi = bU$

$$b \text{ 为 - 正实数 } b = \frac{1}{\omega W_2}, W_2 \text{ 为匝数} \quad (8)$$

(8)式说明磁通与电压成正比, 当电流互感器的变比误差为10%时, 电流互感器是工作在临界饱和状态, 所以电流互感器的磁化曲线从直线部分一直到临界饱和点, 我们有理由认为磁通与电压之间保持线性关系, 如(8)式所示。(8)式表示在正弦电压作用下, 磁通也是正弦量, 并落后电压 90° 。当铁芯未饱和时, 电压是正弦量, 励磁电流也是正弦量, 电流互感器工作在磁化曲线的直线部分, 当铁芯饱和时, 磁化曲线开始弯曲且平直延伸, 电流互感器工作在磁化曲线的非线性部分, 虽然所加电压为正弦量, 由于铁芯饱和, 励磁电流已不是正弦量

了, 出现谐波分量, 如前所述, 励磁电流是一个复波励磁电流了, 复波励磁电流曲线是不规则的, 不能用数学方程去表达, 只能用图解法作近似计算。图 5 是考虑磁滞影响后的励磁电流曲线, 根据它的特点来分析一下励磁电流中所含谐波分量。考虑磁滞影响后, 励磁电流曲线发生扭曲, 由于励磁电流曲线的图形是以横轴对称的, 即把这种波形负的部分前移 180° , 绕横轴翻上去, 就能与波形正的部分重合。今设用函数 $y = f(x)$ 表示该波形曲线, 由图中显见有下列关系

$$f(x) = -f(x + \pi) \quad (9)$$



a 电流互感器铁芯的磁滞回线 b 励磁电流与磁通曲线

图 5 考虑磁滞影响后的励磁电流波形曲线关系

这是横轴对称图形的特点, 同时也说明凡是以横轴对称的电流波形中, 直流分量与偶次谐波分量等于零, 也就是说我们所研究的励磁电流中只含有奇次谐波分量。

4 励磁电流波形曲线不规则时付立叶级数各量的计算方法

为了后面叙述方便起见, 对不规则电流波形的付立叶级数各量的求法作一阐述。

B_k 的求法: 由于波形曲线不规则, 无法用数学方程表达, 求函数的积分可用求和运算来代替, 因此:

$$B_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y \sin kx dx = \frac{1}{\pi} \sum_{x_p=0}^{x_p=2\pi} y_p \sin kx_p \Delta x \quad (10)$$

在横坐标轴上把一个周期 2π 分成 N 等分, 即 N 个格, N 越大, 和值越逼近真值, N 的大小由计算精度决定。每个格用 Δx 表示, $\Delta x = \frac{2\pi}{N}$, 令横坐标轴上第 P 格的中点的横标为 x_p , 第 p 格中线的纵标为 y_p , 即有:

$$x_p = p \frac{2\pi}{N} - \frac{1}{2} \frac{2\pi}{N} = \left(p - \frac{1}{2}\right) \frac{2\pi}{N}$$

代入(10)式得

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{p=1}^N y_p \operatorname{sinc} \left(p - \frac{1}{2} \right) \frac{2\pi}{N} \quad (11)$$

有了上面的公式以后, 就为下面的分析计算打下基础。

5 电流互感器铁芯饱和时励磁 电流中各谐波分量的计算

结合生产实践, 下面对大连地区电力系统某线路安装的电流互感器, 根据实际技术数据进行定性定量分析计算, 励磁特性或伏安特性如表1所示, 电流互感器二次线圈的阻抗 Z_2 与励磁阻抗 Z_{LC} 相比是很小的, 即 $Z_{LC} \gg Z_2$, 作励磁特性试验时不考虑励磁电流在 Z_2 上的压降。

表1 电流互感器励磁特性试验

相 UV	I A					
	0.5	1	2	4	6	8
A	99	123	144	188	197	204
B	138	158	172	177	181	185
C	106	113	125	166	199	208

型号油浸绕线LDC-10型 CT比 $n_L = 1000/5 = 200$ $r_2 = 0.2$ 欧 $X_2 = 0.28$ 欧

5.2 不考虑铁芯剩磁的影响, 前面已经提到, 由于保护的動作时间较长, 已被短路电流所退磁。

以A相电流互感器为例, 先求出 $I_{LC} \phi$ 及相对单位 $I_{LC} \phi^*$ 值, 再作出 $\Phi - I_{LC} - \omega t$ 关系曲线, 如图8所示。

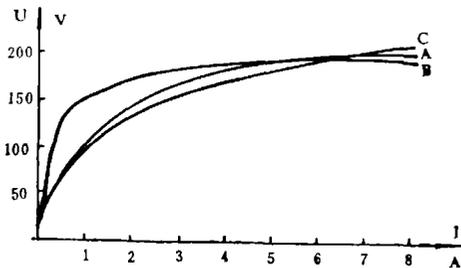


图7 电流互感器的励磁特性或伏安特性

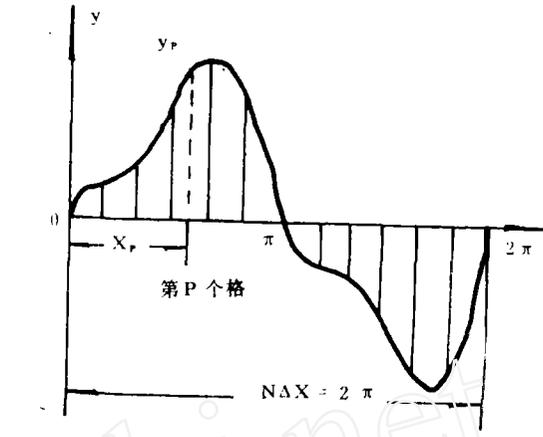


图6 B_1 与 C_2 图解求法

在作电流互感器的励磁电流曲线时, 顾及到下面两个因素, 因为我们研究的是带时限的零序电流保护用的零序电流过滤器, 由于動作时限较长, 只考虑受稳态短路电流的影响。

5.1 采用平均磁滞回线, 即通过原点的磁滞回线, 理由是电流互感器工作在交变的磁化场合中, 经过反复磁化, 其磁滞回线非常接近平均磁滞回线, 工程计算上允许这样作, 不影响分析结果, 而且也很难找到每种电流互感器铁芯的矫顽磁力。

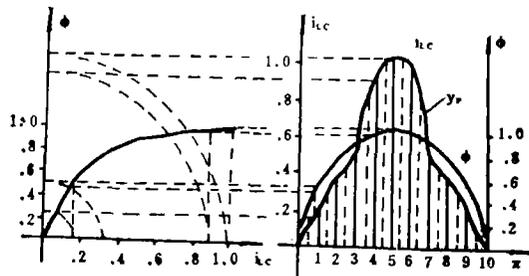


图8 A相电流互感器的励磁电流曲线

图7是电流互感器的伏安特性。从图8中可见,由于铁芯开始饱和,励磁电流波形不再是正弦波了,根据前面的分析,内含奇次谐波,现在计算各次谐波分量的大小,先求 B_1 ,取 $N=20$, $\Delta x = \frac{2\pi}{N} = \frac{2\pi}{20} = 18^\circ$,由于电流波形正半波与负半波完全一样,同时半周期内的电流波形又对称于峰值的轴线,我们只计算到1/4周期就行了。从图8中量得的各 y_p 值列于表2,现在开始计算 B_1^* 值。

表2 y_p 值

序号	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
y_p 值	0.08	0.25	0.35	0.8	0.99

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{p=1}^{N/4} y_p \sin\left(p - \frac{1}{2}\right) \frac{2\pi}{N}$$

$$= \frac{2}{20} \left[4 \sum_{p=1}^{N/4} y_p \sin\left(p - \frac{1}{2}\right) \frac{2\pi}{20} \right]$$

$$= \frac{8}{20} \sum_{p=1}^5 y_p \sin\left(p - \frac{1}{2}\right) 18^\circ \approx 0.8$$

同理: $B_3 = \frac{2}{N} \sum_{p=1}^N y_p \sin 3\left(p - \frac{1}{2}\right) \frac{2\pi}{N} \approx -0.2$

其余各次谐波分量太小,不必再算下去了。由于励磁电流正、负半波图形相同,半周期内的电流波形又对称于峰值轴线,所以 $C_1 = 0$,现在可写出励磁电流的表达式

$$i_{LC}^* = 0.8 I_{m.LC}^* \sin \omega t - 0.2 I_{m.LC}^* \sin 3\omega t + \dots$$

现在计算励磁电流各次谐波分量的有效值如下:

基波分量励磁电流有效值,令 $\alpha = \omega t$

$$I_{LC.I}^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (0.8 I_{m.LC}^* \sin \alpha)^2 d\alpha} = \sqrt{\frac{(0.8 I_{m.LC}^*)^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1 - \cos 2\alpha}{2} d(2\alpha)}$$

$$= \frac{0.8 I_{m.LC}^*}{\sqrt{2}} = 0.8 I_{LC}^*$$

同理得三次谐波分量励磁电流有效值

$$I_{LC.II}^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (0.2 I_{m.LC}^* \sin 3\alpha)^2 d\alpha} = 0.2 I_{LC}^*$$

复波励磁电流有效值

$$I_{LC} = \sqrt{I_{LC.I}^2 + I_{LC.II}^2} = 0.83 I_{LC}^*$$

$I_{LC}^* \neq 1$,说明还有其它谐波分量,由于数值很小,就不进行计算了。由 $I_{LC}^* = 0.83$,我们可以得出结论,铁芯饱和时,励磁电流主要由基波分量与三次谐波分量组成。

我对大连地区电力系统各种类型电流互感器,油浸绕线的或套管式的都用上述方法进行分析,发现其励磁电流当铁芯饱和时,一般的规律是基波分量励磁电流占励磁电流的60~80%,三次谐波分量励磁电流占励磁电流的20~40%,有了这一般规律,在计算零序电流过滤器不平衡电流时,就没有必要去做每一个电流互感器的励磁电流波形曲线了,对每一个谐波分量励磁电流取上限即可。例如对基波分量的励磁电流取80%,对三次谐波分量励磁电流取40%。

6 不平衡电流 I_{bp} 的计算

在上面已谈到,不平衡电流是三相电流互感器励磁电流的矢量和,当铁芯饱和时,励磁

电流主要是由基波分量与三次谐波分量组成的，那么顺理成章，不平衡电流也主要是由基波分量与三次谐波分量组成的。不平衡电流的计算一般采用下述方法。

基波分量不平衡电流有效值

$$\dot{I}_{b, \cdot I} = 0.66 (\dot{I}_{LC \cdot I \cdot A} + \dot{I}_{LC \cdot I \cdot B} + \dot{I}_{LC \cdot I \cdot C}) / n_L \quad (12)$$

标量形式

$$I_{b, \cdot I} = |\dot{I}_{b, \cdot I}| = 0.66 |(\dot{I}_{LC \cdot I \cdot A} + \dot{I}_{LC \cdot I \cdot B} + \dot{I}_{LC \cdot I \cdot C})| / n_L \quad (13)$$

三次谐波分量不平衡电流有效值

$$\dot{I}_{b, \cdot III} = 0.34 (\dot{I}_{LC \cdot III \cdot A} + \dot{I}_{LC \cdot III \cdot B} + \dot{I}_{LC \cdot III \cdot C}) / n_L \quad (14)$$

标量形式

$$I_{b, \cdot III} = 0.34 |(\dot{I}_{LC \cdot III \cdot A} + \dot{I}_{LC \cdot III \cdot B} + \dot{I}_{LC \cdot III \cdot C})| / n_L \quad (15)$$

0.66与0.34这两个数据援引自H、B、切尔诺布洛夫著《继电保护》一书。

由于试验设备容量有限，我们是在电流互感器的二次侧作励磁特性试验，还是采用二次励磁电流为宜。例如A相电流互感器的二次励磁电流为8安，归算到一次为 $8 \times n_L = 8 \times 200/5 = 1600 \text{ A}$ ，就是说二次8安的励磁电流相当于一次1600安的励磁电流，其效果是一样的。由于三次谐波分量是零序分量，矢量和即为算术和，又可写为

$$I_{b, \cdot \Sigma} = 0.34 (I_{LC \cdot III \cdot A} + I_{LC \cdot III \cdot B} + I_{LC \cdot III \cdot C}) \quad (16)$$

复波不平衡电流有效值

$$I_{b, \cdot \Sigma} = \sqrt{I_{b, \cdot I}^2 + I_{b, \cdot III}^2} \quad (17)$$

7 不平衡电流计算举例

以本地区系统某线路安装的电流互感器为例进行计算，具体技术数据已在表1中列出。

零序电流过滤器LLL上接有1.0秒零序电流保护如图9所示，在相邻元件出口端D点发生三相短路最大稳态短路电

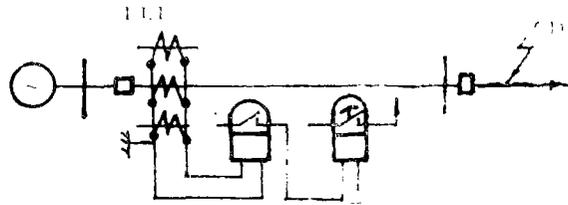


图9 计算LLL不平衡电流用的系统图

流 $I^{(3)}_{d, \cdot \Sigma} = 16000 \text{ A}$ ，已知电流互

感器的10%误差校验合格，向D点短

路，零序电流过滤器会出现多大不平衡电流？

解：a 我们在计算LLL的不平衡电流时，是以电流互感器工作在极限状态，也就是说假定LH的变比误差达10%为基础来计算 $I_{b, \cdot}$ 的。已知三相LH一次通过16000安，如果变比误差为10%，那么会有10%的电流通过励磁支路，90%的电流通过二次绕组，也就是说有 $16000 \times 10\% = 1600 \text{ A}$ 通过励磁支路， $16000 \times 90\% = 14400 \text{ A}$ 通过二次回路。归算到二次值，有 $16000 \times 10\% \times 1/n_L = 16000 \times 0.1/200 = 8 \text{ A}$ ，通过励磁支路；有 $16000 \times 90\% \times$

$\frac{1}{n_L} = 16000 \times 0.9 \times \frac{1}{200} = 72 \text{ A}$ 通过二次回路。 $I_{d, \cdot \Sigma}^{(3)} = 16000 \text{ A}$ 归算到二次 $I_{d, \cdot \Sigma}^{(3)'} = 16000$

$\frac{1}{n_L} = 16000 \frac{1}{200} = 80 \text{ A}$ ，等价图如图10所示。当励磁电流为8安时，电流互感器铁芯刚刚开始饱和。

b 计算基波与三次谐波分量的励磁电流

如表1所示，B相电流互感器的伏安特性低于A、C两相，假定B相电流互感器的变比

误差达到10%时,但A、C两相电流互感器的变比误差还小于10%。计算不平衡电流是以电流互感器工作在极限状态为基础,铁芯开始饱和的励磁电流为8A, B相LH的励磁阻抗:

$$Z_{LC.b} = \frac{U}{I} = \frac{185}{8} = 23.13 \Omega$$

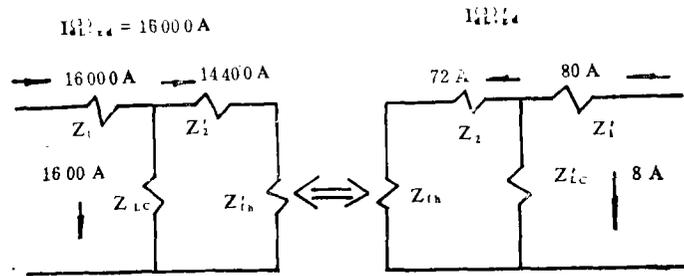


图10 LH一、二次电流关系

零序电流过滤器的二次是并联

联接A、C两相LH的二次励磁电压也是185V。由图7的伏安特性可以看出,对应于185V, A、C相LH的励磁电流为6.4A, $Z_{LC.a} = Z_{LC.c} = 185/6.4 = 28.9 \Omega$, 电流互感器是作为一个电流源工作在电力系统中, A、B、C三相LH的一次电流是恒定的,相等的,但二次电流不一定相等,这是因为励磁特性不同所致,本例中,如果B相LH的励磁电流为8A,二次电流为72A,那么A、C两相LH的励磁电流为6.4安,二次电流为80-6.4=73.6A。通过上面的分析得二次励磁电流为

$$I_{LC.a} = I_{LC.c} = 6.4 \text{ A}, I_{LC.b} = 8 \text{ A}$$

前面已分析过本例电流互感器的基波分量励磁电流为复波励磁电流的80%,三次谐波分量励磁电流为复波励磁电流的20%,各谐波分量励磁电流计算如下,基波分量励磁电流有效值

$$I_{LC.1.a} = I_{LC.1.c} = 0.8 I_{LC.a} = 0.8 \times 6.4 = 5.12 \text{ A}$$

$$I_{LC.1.b} = 0.8 I_{LC.b} = 0.8 \times 8 = 6.4 \text{ A}$$

三次谐波分量励磁电流有效值

$$I_{LC.3.a} = I_{LC.3.c} = 0.2 I_{LC.a} = 1.28 \text{ A}$$

$$I_{LC.3.b} = 0.2 I_{LC.b} = 1.6 \text{ A}$$

复波励磁电流,基波分量励磁电流,三次谐波分量励磁电流的矢量图如图11、12、13所示。

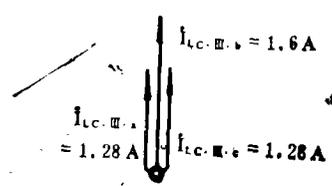
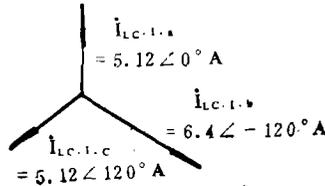
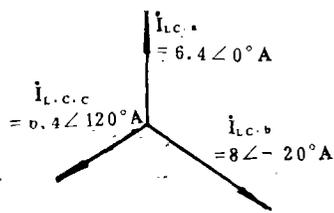


图11 复波励磁电流矢量图 图12 基波分量励磁电流矢量图 图13 三次谐波分量励磁电流矢量图

c 不平衡电流 $I_{b,1}$ 的计算

基波分量不平衡电流有效值,如图14所示:

$$\begin{aligned} I_{b,1} &= 0.66 | (\dot{I}_{LC.1.a} + \dot{I}_{LC.1.b} + \dot{I}_{LC.1.c}) | \\ &= 0.66 | (5.12 \angle 0 + 6.4 \angle -120^\circ + 5.12 \angle 120^\circ) | \\ &= 0.66 | (1.28 \angle -120^\circ) | = 0.84 \text{ A} \end{aligned}$$

三次谐波分量不平衡电流有效值

$$\begin{aligned} I_{b, \cdot I} &= 0.34 (I_{LC \cdot I \cdot a} + I_{LC \cdot I \cdot b} + I_{LC \cdot I \cdot c}) \\ &= 0.34(1.28 + 1.6 + 1.28) \\ &= 1.414 \text{ A} \end{aligned}$$

$I_{b, \cdot I}$ 复波不平衡电流有效值

$$\begin{aligned} I_{b, \cdot I} &= \sqrt{I_{b, \cdot I}^2 + I_{b, \cdot I}^2} \\ &= \sqrt{0.84^2 + 1.414^2} = 1.64 \text{ A} \end{aligned}$$

各谐波分量励磁电流占复波励磁电流的百分比

基波分量百分比

$$\frac{I_{b, \cdot I}}{I_{b, \cdot I}} 100\% = \frac{0.84}{1.64} 100\% = 51.2\%$$

三次谐波分量百分比

$$\frac{I_{b, \cdot I}}{I_{b, \cdot I}} 100\% = \frac{1.414}{1.64} 100\% = 86\%$$

把各分量不平衡电流百分比折合回复波百分比应当等于 1。

$I_{b, \cdot I} = \sqrt{0.512^2 + 0.86^2} = 1 = 100\%$ ，正确通过上面的计算可以看出，三次谐波分量不平衡电流占主要成分。

若不知道电流互感器各谐波分量占复波励磁电流百分比，可按前面介绍过的方法，取上限值来计算不平衡电流，计算出来的不平衡电流值是极限值，会使我们心中更有底，仍以上的电流互感器来计算，基波分量励磁电流取上限值 80%，已在前面算出为 $I_{b, \cdot I} = 0.84 \text{ A}$ ，三次谐波不平衡电流为

$$I_{b, \cdot I} = 0.34 \times 0.4 (I_{LC \cdot a} + I_{LC \cdot b} + I_{LC \cdot c}) = 2.828 \text{ A}$$

复波不平衡电流有效值

$$I_{b, \cdot I} = \sqrt{I_{b, \cdot I}^2 + I_{b, \cdot I}^2} = \sqrt{0.84^2 + 2.828^2} = 2.95 \text{ A}$$

通过上述分析可以发现，当三台电流互感器的励磁特性非常非常接近时，基波分量不平衡电流趋向零，即 $I_{b, \cdot I} \rightarrow 0$ 。

我们作分析计算时是假定电流互感器工作在极限状态，即变比误差为 10%，得本例题的不平衡电流为 1.64 安，实际上电流互感器都工作在 10% 误差以内并存有余度，实际的不平衡电流远小于 1.64 安，更远小于 2.95 安，现在运行的带时限零序过电流保护的二次动作值一般整定为 2 ~ 4 安，已经过实践的考验不会误动作，可见本文所介绍的不平衡电流计算方法是很有应用价值的，非常实用。

8 结语

在计算零序电流过滤器不平衡电流时，应按最大三相短路电流来计算，因为在通常情况下，三相短路电流大于两相短路电流，而且在两相短路时，故障相中的电流方向相反，零序电流过滤器的三次谐波分量不平衡电流为三次谐波分量励磁电流之算术差，远较三相短路的为小。

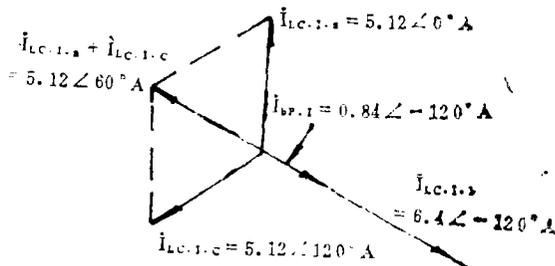


图 14 基波分量不平衡电流矢量图

