

# 某线路开关对线路——主变压器 非全相合闸充电时继电保护动作分析

×××水电局 何良济

## (一) 前言:

某线路开关由于不允许合切206公里的220千伏空载线路，故向线路充电时规定要带上120兆伏安空载自耦变压器。但在充电过程中，多次发生开关非全相合闸(二相合上，一相合不上)，致使主变压器过电压及受端有关晶体管继电保护动作，对运行安全造成威胁。为了研究分析工频过电压情况、晶体管继电保护动作的正确性，以及非全相合闸充电对继电保护的要求，本文进行了一些粗浅的计算与探讨。错误之处，在所难免，请有关同志批评指正。

## (二) 某线路开关B、C二相合闸对线路——主变压器充电时电压和电流的分析计算

### 1、系统接线及等值电路

某线路开关向线路——主变压器合闸充电时接线图见图1

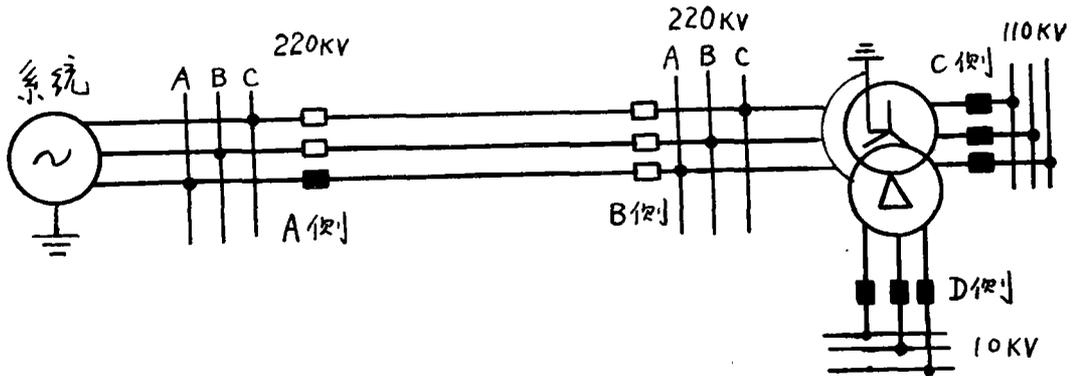


图 1

非全相(二相)合闸充电各序网络如下。正(负)序网络见图2

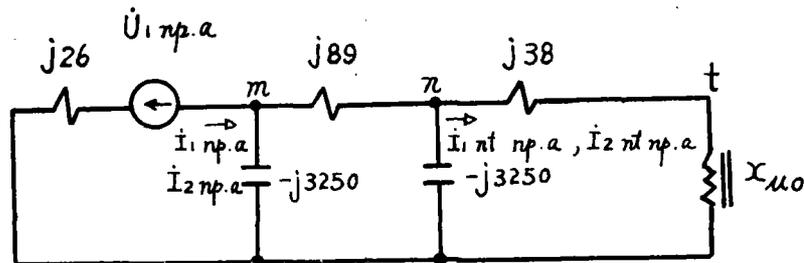


图 2

另序网络见图 3

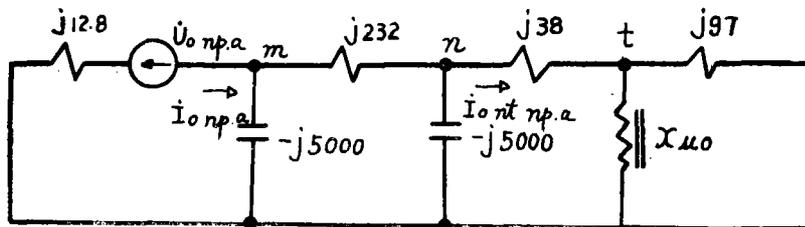


图 3

图中  $j26$ 、 $j12.8$  为系统正（负）序及另序电抗， $j89$ 、 $j232$  为线路正（负）序及另序感抗， $-j3250$ 、 $-j5000$  为线路正（负）序及另序容抗， $j38$  为主变 220kV 侧等值电抗， $j97$  为主变 10kV 侧等值电抗， $X_{MO}$  为主变励磁电抗（随工频过电压程度而变化），单位均为欧姆。

## 2、故障相电压及电流的计算

实际运行表明，变压器在  $\Delta$  侧二相合闸充电时产生工频过电压，所以变压器铁心将因过电压而迅速趋向饱和，出现较大的故障电流。

正常运行时变压器的空载电流为  $I_0 = 0.357\% I_H$ ，即  $I_0 = 1.123a$ ，相当于励磁电抗  $X_{MO} = 133000$  欧，而在过电压状态下则  $X_{MO}$  将大幅度下降。我们在分析计算时关于  $X_{MO}$  是一个未知数，故只好假定若干个  $X_{MO}$  来进行计算，然后作出有关的电压、电流曲线来分析问题。

现假设  $X_{MO} = 662$  欧为例来计算分析二相合闸充电时的故障电压和故障电流：

(1) 综合电抗的计算（由图 2 及图 3 序网图求得）

$$\begin{aligned} \text{因为} \quad & j662 + j38 = j700 \\ & j700 // -j3250 = j893 \\ & j893 + j89 = j982 \\ & j982 // -j3250 = j1400 \end{aligned}$$

所以正（负）序综合电抗

$$X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = j1400 + j26 = j1426$$

$$\begin{aligned} \text{又因为} \quad & j97 // j662 = j84.6 \\ & j84.6 + j38 = j122.6 \\ & j122.6 // -j5000 = j126 \\ & j126 + j232 = j358 \\ & j358 // -j5000 = j385 \end{aligned}$$

所以另序综合电抗

$$X_{0\Sigma} = j385 + j12.8 = j397.8$$

由上述正（负）序及另序综合电抗，可以算出

$$\frac{1}{X_{1\Sigma}} = \frac{1}{X_{2\Sigma}} = \frac{1}{j1426} = -j0.000702$$

$$\frac{1}{X_{0\Sigma}} = \frac{1}{j397.8} = -j0.00252$$

(2) 故障相的纵向电压及其相序电压的计算

根据一相开断的计算公式，纵向电压及其相序电压为

$$\begin{aligned}\dot{U}_{np,a} &= 3\dot{U}_{1np,a} = 3\dot{U}_{2np,a} = 3\dot{U}_{0np,a} \\ &= \frac{3 \cdot \dot{I}_{\text{нар} \cdot a}^{(3)}}{\frac{1}{X_{1\Sigma}} + \frac{1}{X_{2\Sigma}} + \frac{1}{X_{0\Sigma}}}\end{aligned}$$

式中  $\dot{I}_{\text{нар} \cdot a}^{(3)}$  系指在A侧全相合闸时由系统综合电动势所决定的充电电流（相当于负荷电流），为了计算纵向电压及其相序电压首先要决定充电电流，下面计算全相合闸时充电电流  $\dot{I}_{\text{нар} \cdot a}^{(3)}$

全相合闸时系统等值电路见图4

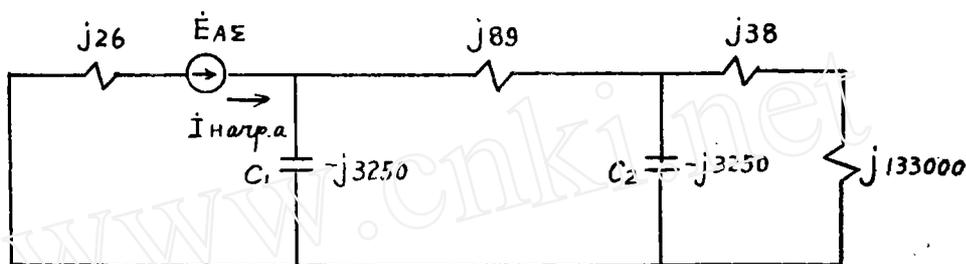


图 4

综合电抗计算如下

$$\begin{aligned}\text{因为 } (j38 + j133000) // -j3250 &= -j3340 \\ -j3340 + j89 &= -j3251 \\ -j3251 // -j3250 &= -j1625 \\ -j1625 + j26 &= -j1599\end{aligned}$$

故综合电抗  $X_{\Sigma} = -j1599$

系统综合电动势  $E_{A\Sigma}$  为131千伏，综合电动势被综合电抗除可以得到全相合闸充电时充电电流为

$$\dot{I}_{\text{нар} \cdot a}^{(3)} = \frac{E_{A\Sigma}}{X_{\Sigma}} = \frac{131000}{-j1599} = j82 \text{ 安}$$

根据全相合闸时的充电电流及综合序电抗，故障相的纵向电压  $\dot{U}_{np \cdot a}$  为

$$\dot{U}_{np \cdot a} = \frac{3 \times j82}{-j(0.000702 + 0.000702 + 0.00252)} = -62.5 \text{ 千伏}$$

故障电压的相序分量为

$$\begin{aligned}\dot{U}_{1np,a} = \dot{U}_{2np,a} = \dot{U}_{0np,a} &= \frac{1}{3} \cdot \dot{U}_{np,a} \\ &= \frac{-62.5}{3} = -20.8 \text{ 千伏}\end{aligned}$$

(3) A侧开关故障相相序电流的计算

已知故障相纵向电压的相序分量，根据有关公式可算出A侧开关故障相的相序电流为

$$\begin{aligned}\dot{I}_{1np,a} &= -\frac{\dot{U}_{1np,a}}{jX_{1\Sigma}} = -\frac{(-20.8)}{j1426} = -j14.6 \text{ 安} \\ \dot{I}_{2np,a} &= \dot{I}_{1np,a} = -j14.6 \text{ 安} \\ \dot{I}_{0np,a} &= -\frac{\dot{U}_{0np,a}}{jX_{0\Sigma}} = -\frac{(-20.8)}{j397.8} = -j52.3 \text{ 安}\end{aligned}$$

(4) B侧开关故障电流相序分量及故障相全电流的计算

已知A侧开关故障相相序电流，运用电流分支系数的原理，可求得流经B侧开关故障电流的相序分量，即：

先求出流经线段mn的电流故障分量

$$\dot{I}_{1mn.nP.a} = \frac{j1400}{j982} (-j14.6) = -j21 \text{安}$$

$$\dot{I}_{2mn.nP.a} = \dot{I}_{1mn.nP.a} = -j21 \text{安}$$

$$\dot{I}_{0mn.nP.a} = \frac{j385}{j358} (-j52.3) = -j56.5 \text{安}$$

再求出流经B侧开关电流的故障分量

$$\dot{I}_{1nt.nP.a} = \frac{j893}{j700} (-j21) = -j27 \text{安}$$

$$\dot{I}_{2nt.nP.a} = \dot{I}_{1nt.nP.a} = -j27 \text{安}$$

$$\dot{I}_{0nt.nP.a} = \frac{j126}{j122.6} (-j56.5) = -j58.4 \text{安}$$

故障相流过B侧开关全电流可由其故障分量之和而得出，因为变压器空载电流甚小，故在此忽略不计，即：

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A\Sigma} &= \dot{I}_{1nt.nP.a} + \dot{I}_{2nt.nP.a} + \dot{I}_{0nt.nP.a} \\ &= (-j27) + (-j27) + (-j58.4) = -j112.4 \text{安} \end{aligned}$$

(5) 主变压器高压侧附加相电压故障分量及故障相全电压的计算

根据以上流经B侧开关电流的故障分量，可求出由于B、C二相合闸充电时主变压器220千伏侧附加相电压的故障分量为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{1TnP.a} &= \Delta \dot{U}_{2TnP.a} = -j27 \cdot j700 \\ &= 18.9 \text{千伏} \end{aligned}$$

$$\Delta \dot{U}_{0TnP.a} = -j58.4 \cdot j122.6 = 7.15 \text{千伏}$$

因为故障相全电压为全相合闸充电时主变压器220千伏侧相电压及附加相电压之矢量和，故应先计算出全相合闸充电时主变压器220千伏侧相电压：

已知全相合闸时的充电电流，再用电流分支系数可算出流经电容 $C_2$ 的电流，容抗 $X_{C_2}$ 上的压降即为全相合闸时的相电压。

因为

$$\dot{I}_{mn} = \frac{-j1625}{-j3251} \cdot j82 = j41 \text{安}$$

$$\dot{I}_{C_2} = \frac{-j3340}{-j3250} \cdot j41 = j42 \text{安}$$

故全相合闸充电时主变压器高压侧相电压为

$$\dot{U}_{H.\varphi} = j42 (-j3250) = 137 \text{千伏}$$

由以上计算已知全相合闸时的相电压，再加上前面算得的相电压的附加电压，即可求出故障相的全电压，亦即工频过电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A.\varphi.\Sigma} &= \dot{U}_{A.H.\varphi} + \Delta \dot{U}_{1TnP.a} + \Delta \dot{U}_{2TnP.a} + \Delta \dot{U}_{0TnP.a} \\ &= 137 + 18.9 + 18.9 + 7.15 = 181.95 \text{千伏} \end{aligned}$$

3、非故障相电压和电流的计算

已知故障相电压及电流，运用对称分量法即可求出非故障相的电压及电流。

(1) A侧开关非故障相电流的计算

$$\begin{aligned}\dot{I}_{B(A侧)} &= a^2 \dot{I}_{1nP.a} + a \dot{I}_{2nP.a} + \dot{I}_{0nP.a} + a^2 \dot{I}_{\text{Harp}.a}^{(3)} \\ &= (-1)(-j14.6) + (-j52.3) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) j82 \\ &= 71 - j78.7 = 106e^{-j47^\circ}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{C(A侧)} &= a \dot{I}_{1nP.a} + a^2 \dot{I}_{2nP.a} + \dot{I}_{0nP.a} + a \dot{I}_{\text{Harp}.a}^{(3)} \\ &= (-1)(-j14.6) + (-j52.3) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) j82 \\ &= -71 - j78.7 = 106e^{-j133^\circ}\end{aligned}$$

顺便指出，A侧开关故障相(A相)电流显然等于零。

(2) B侧开关非故障相电流的计算

$$\begin{aligned}\dot{I}_{B\Sigma} &= a^2 \dot{I}_{1nt.nP.a} + a \dot{I}_{2nt.nP.a} + \dot{I}_{0nt.nP.a} \\ &= (-1)(-j27) - j58.4 = -j31.4 \text{安}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{C\Sigma} &= a \dot{I}_{1nt.nP.a} + a^2 \dot{I}_{2nt.nP.a} + \dot{I}_{0nt.nP.a} \\ &= (-1)(-j27) - j58.4 = -j31.4 \text{安}\end{aligned}$$

以上 $\dot{I}_{B\Sigma}$ 、 $\dot{I}_{C\Sigma}$ 计算中忽略主变压器空载电流，因其值很小。

(3) 主变压器高压侧非故障相全电压的计算

$$\begin{aligned}\dot{U}_{B\varphi \cdot \Sigma} &= a^2 \Delta \dot{U}_{1TnP.a} + a \Delta \dot{U}_{2TnP.a} + \Delta \dot{U}_{0TnP.a} + a^2 \dot{U}_{AH \cdot \varphi} \\ &= (-1)18.9 + 7.15 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) 137 \\ &= -80.25 - j118.8 = 144e^{-j124.5^\circ}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{C\varphi \cdot \Sigma} &= a \Delta \dot{U}_{1TnP.a} + a^2 \Delta \dot{U}_{2TnP.a} + \Delta \dot{U}_{0TnP.a} + a \dot{U}_{AH \cdot \varphi} \\ &= (-1)18.9 + 7.15 + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) 137 \\ &= -80.25 + j118.8 = 144e^{j124.5^\circ}\end{aligned}$$

#### 4、非全相(二相)

合闸充电时电流电压矢量  
图 断相点纵电压:

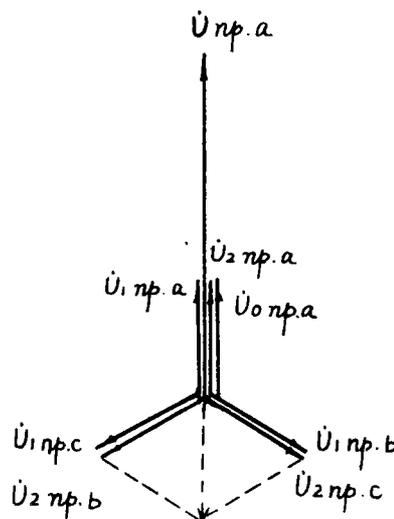


图 5

A侧开关电流:

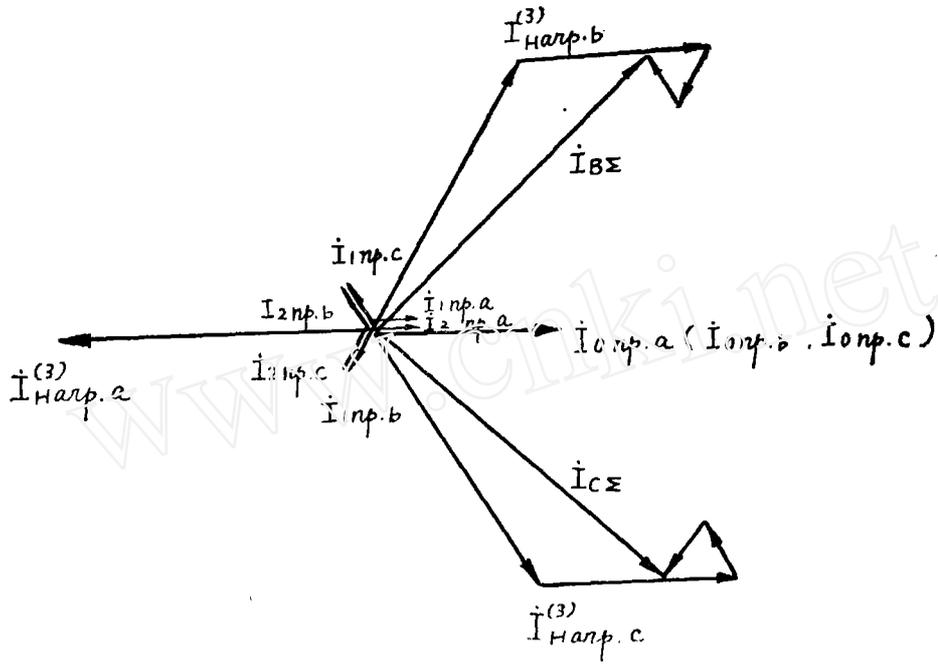


图 6

B侧开关电流:

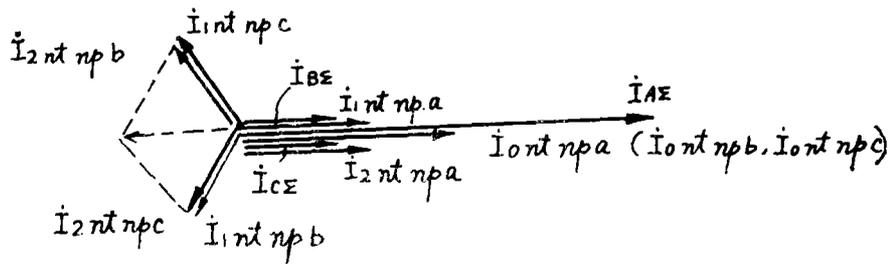


图 7

主变220KV侧相电压:

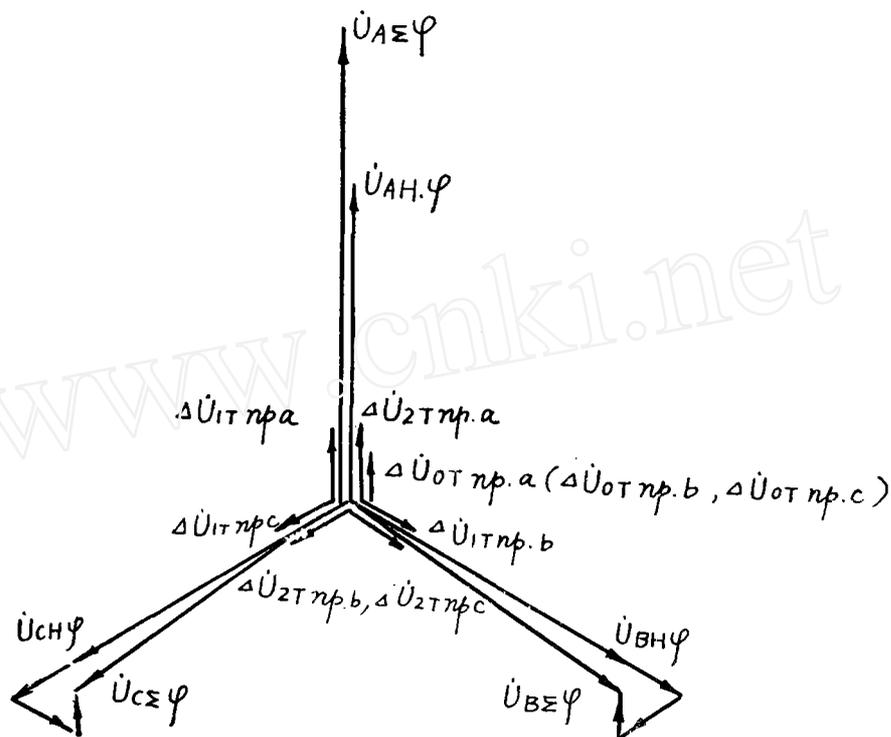


图 8

### 5、非全相（二相）合闸充电时电压电流曲线

众所周知，变压器是一个非线性元件，在铁心饱和情况下，励磁电抗  $X_{MO}$  的值决定于过电压的程度，即在一定的过电压下有一定的  $X_{MO}$ 。而我们在分析计算时  $X_{MO}$  是一个未知数，故假定了若干个  $X_{MO}$ ，采用前面的同样计算方法，得出有关的电压电流值，再作出在不同  $X_{MO}$  下的主变压器220KV侧故障相电压，B侧开关负序、另序电流的曲线。根据实测的故障相电压数值便可以得出此时的  $X_{MO}$  及其对应的负序、另序电流值，籍以分析继电保护动作的正确性。

为了缩短本文篇幅，现将  $X_{MO}$  为462、662、762及1330欧时的计算结果列表于下（见附表），表中计算时的全相合闸充电电流均为

$$i_{\text{нар.а}}^{(3)} = j82 \text{安}$$

附 表

主变励磁电抗 (欧)	$x_{MO}$	j1330	j762	j662	j462
断相点纵电压 (仟伏)	$\dot{U}_{npa}$	-95	-68	-62.5	-51.3
A 侧开关故障 电流(安)	$\dot{I}_{1npa}$	-j3.18	-j12.5	-j14.6	-j19.3
	$\dot{I}_{0npa}$	-j75	-j56.7	-j52.3	-j43.4
流经线段mn 故障电流(安)	$\dot{I}_{1mnpa}$	-j12.9	-j20.4	-j21	-j24.4
	$\dot{I}_{0mnpa}$	-j81.2	-j61.3	-j56.5	-j46.8
B 侧开关故障 电流(安)	$\dot{I}_{1ntpa}$	-j22.2	-j27	-j27	-j28.9
	$\dot{I}_{0ntpa}$	-j83.5	-j63	-j58.4	-j48
主变故障相相 电压(仟伏)	$\dot{U}_{A\varphi\Sigma}$	209.5	188	181.95	171.35

根据附表数据现作出不同励磁电抗下主变压器 220 仟伏侧故障相相电压、流经B 侧开关的负序电流及另序电流曲线，见下图。

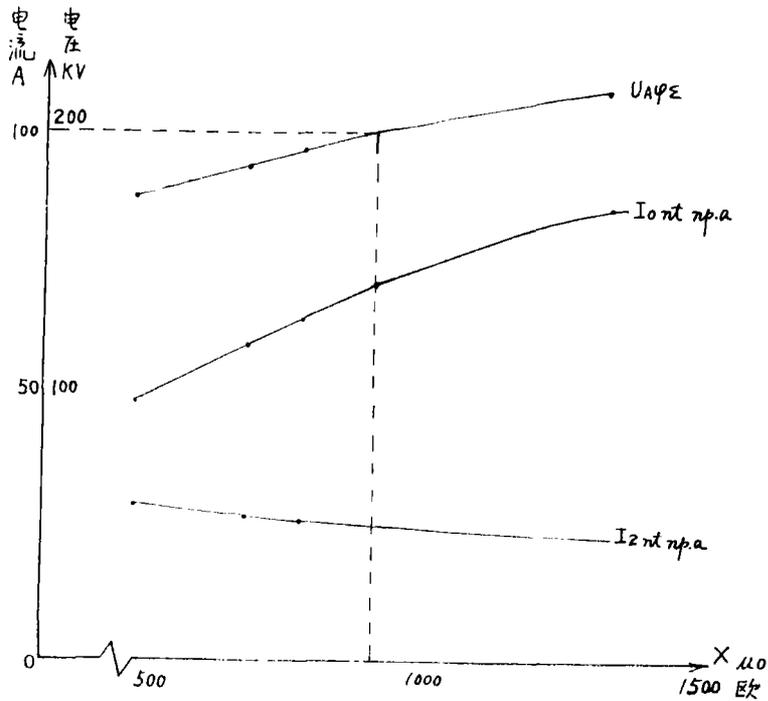


图 9

### (三) 非全相(二相)合闸充电时继电保护动作分析

由图9曲线可知,只要已知主变压器高压侧故障相电压 $\dot{U}_{A\varphi\Sigma}$ ,便可查出主变压器此时的励磁电抗 $X_{MO}$ ,以及流经B侧开关的负序电流及另序电流。

现根据现场实测的 $\dot{U}_{A\varphi\Sigma}$ 及曲线查得的故障电流来分析受电侧有关继电保护的動作情况(送电侧保护理论分析及实践证明不会动作)。

现场表计实测的 $\dot{U}_{A\varphi\Sigma}$ 为194千伏,查曲线10得:

$$\text{负序电流 } I_{2nt.nPa} = 25A$$

$$\text{另序电流 } I_{0nt.nPa} = 69.5A$$

$$\text{三倍另序电流 } 3I_{0nt.nP} = 208.5A。$$

线路两侧保护均采用JL-1型晶体管距离另序保护,JGX-1型晶体管相差高频保护,并装有机电型三段另序方向保护。

在非全相合闸充电时JGX-1相差高频负序电流启动元件,因两侧开关流过不同的负序电流,有可能造成B侧功放启动,A侧不启动,引起误动。但因JGX-1具有远方启动回路,故高频保护没有动作。

JL-1型另序方向保护I、II、III段整定值(一次动作电流)分别为420安、120安及66安,I段定值大于非全相合闸充电时的三倍另序电流,故不动作,II段和III段均小于三倍另序电流( $3I_{0nt.nP}$ )并且从矢量图8和9可以看出, $3I_{0nt.nP}$ (正方向假定为线路指向母线,见图3)滞后另序电压 $3\Delta\dot{U}_{0TnP}$ 为 $90^\circ$ ,相当于线路正方向故障,因而线路另序方向保护(包括机电型另序方向保护)动作是正确的。

自耦变压器采用JBZ-1型晶体管元件保护,其220千伏侧接有另序方向及负序方向保护,均为线路的后备保护。

另序方向保护一次整定值为188安,小于非全相合闸充电时的 $3I_{0nt.nP}$ ,同时动作方向如前述也是正确的,故保护动作正确。

负序方向保护也曾动作过,其动作原因经检查系调正试验不当,一次整定值由原定值60安变小到39安(负序方向电流元件和负序电流保护的电流定值调正时互相影响,整定试验时没有反复检查),加之返回系数太低(仅0.6左右),致使负序方向保护电流元件在非全相合闸充电的暂态过程中启动而不能返回,并且由图8和9的向量分析可以看出负序电流 $I_{2nt.nP}$ (正方向假定由线路指向母线,见图2)滞后负序电压 $\Delta\dot{U}_{2TnP}$ 为 $90^\circ$ ,负序方向保护方向元件亦相当于线路正方向故障。因此负序方向保护误动原因是清楚的。

顺便说明,在非全相合闸充电时,B侧开关的JL-1距离保护也曾误动过,经现场检查系该保护装置多相补偿阻抗元件的A相电压互感器(3YH)在故障相(A相)过电压冲击下,A相引线对屏蔽线击穿短路,造成A相失去电压,加之由于非全相合闸充电的暂态过程中出现较大的负序电流,使震荡闭锁开放,保护II段动作出口。为此已由制造厂将多相补偿阻抗元件电压互感器(3YH、4YH、5YH)由原设计耐压1.1倍更换为1.3倍(线路两侧保护均作了更换),再没有发生过误动作。应当指出,以上动作的各套保护装置在非全相合闸充电时虽有时限配合,但鉴于运行上的特殊要求,其跳闸方式作了必要的改变,即由设计作用跳B侧开关暂改为作用跳C侧开关,因充电时C侧开关尚在断开位置(尚未同期并列),故上述有关保护均可动作出口。因为不作用跳B侧开关,因此非全相合闸的故障不能切除,要等

待A侧开关人为断开后才能消除故障。

#### (四) 结束语:

1、A侧开关在非全相(二相)合闸充电时,两侧故障相过电压倍数较高。经试验录波,在暂态过程中,A侧故障相过电压(由开关外侧电容式电压互感器录取)最大为435千伏(相当于额定相电压 $U_{H\phi}$ 的3.43倍),经400毫秒后衰减到291千伏(即2.29倍 $U_{H\phi}$ );B侧故障相过电压最大为373千伏(即2.93倍 $U_{H\phi}$ ),经400毫秒后衰减到208千伏(即1.64倍 $U_{H\phi}$ )。从以上试验电压的合闸相角来看,上述过电压并非最严重情况。而且在过电压同时伴随有较大的故障电流,尤其是三倍另序电流(试验录波为283安,因有谐波分量存在,故比工频计算电流208.5安稍大)流过自耦变压器。因此,对一次设备有较严重的危害。为了防止损坏主变压器等一次设备,拟在A侧开关加装非全相合闸充电的专用保护装置。若受端(B侧)保护作用B侧开关跳闸,虽可保护受端设备,但势必造成A侧开关非全相切除空载长线,为A侧开关所不允许。

2、A侧开关非全相合闸充电时,受电侧出现较大的另序电流,方向另序电流保护整定值如果躲不开故障电流 $3I_{act.n\phi}$ ,将使该保护动作。方向负序电流因为负序电流一般较小,故不大可能动作。对用负序电流元件作为启动元件,且不具远方启动回路的高频相差保护,因两侧流过大小不同的负序电流,可能造成误动作。

3、本文关于非全相(二相)合闸对线路——主变压器充电时的计算分析,可有一定的普遍意义。例如:超高压远距离输电线路,当因某种原因出现线路送端开关先行跳闸,且三相不同期分闸时;或在单相故障送端跳开故障相开关,故障已经消除,而受端尚未跳开相应相开关时;或在单相重合闸过程中,线路故障已经消除,送端开关后重合(或不能重合),受端开关先重合(或能够重合),估计会产生上述类似现象。此外,当非全相合闸充电的另一种形态,即一相合上、二相合不上也可能出现这种情况。诸如此类,由于我们无这方面生产斗争的实践,故没有进行分析,有待进一步实践和探讨。