防止发电机变压器负序电流保护误动作的几点措施

徐州电业局中调所　李春硕、许凤珍

当系统发生不对称短路或非全相运行时，在发电机定子线卷中将流过负序电流，负序电流产生的旋转磁场和正序旋转磁场的方向相反，以两倍同步转速切割转子，在其中产生感应电流，并沿转子表面、楔条、套箍中流过，这一感应电流在流过的各部件中产生附加损耗，引起发热，甚至引起局部高温造成发电机损坏，1963年湘潭发电厂20MBA变压器35千伏侧C相套管引线烧断引起非全相运行时，曾烧坏两台发电机，因此必须在发电机上装设负序电流保护，以避免发电机转子损坏，负序电流保护投入运行后，由于缺乏运行经验，措施考虑不周，曾发生过一些误动作事故，现将我们所遇到的几个问题和改进意见介绍于下，以供参考。

1.防止变压器空载投入电网时，引起负序电流保护误动作的问题。

变压器空载励磁涌流中含有较大的高次谐波分量，为了分析高次谐波电流对负序电流保护的影响，我们先看看三相电流中各相的高次谐波的相位关系，设A相电流为

$$i_A=f(wt)=I_{1m}Sinwt+I_{2m}Sin2wt+I_{3m}Sin3wt+\cdots\cdots$$

因为B相电流开始周期比i_A迟$\frac{1}{3}$个周期$\left(T=\frac{2\pi}{w}\right)$的时间，所以

$$i_B=f\left[w\left(t-\frac{T}{3}\right)\right]=I_{1m}Sinw\left(t-\frac{T}{3}\right)+I_{2m}Sin2w\left(t-\frac{T}{3}\right)+I_{3m}Sin3w\left(t-\frac{T}{3}\right)+\cdots\cdots$$

$$=I_{1m}Sin(wt-120^\circ)+I_{2m}Sin(2wt-240^\circ)+I_{3m}Sin(3wt)+\cdots\cdots$$

C相电流开始周期比i_A迟$\frac{2}{3}$个周期的时间，故

$$i_C=f\left[w\left(t-\frac{2T}{3}\right)\right]=I_{1m}Sinw\left(t-\frac{2T}{3}\right)+I_{2m}Sin2w\left(t-\frac{2T}{3}\right)+I_{3m}Sin3w\left(t-\frac{2T}{3}\right)+\cdots\cdots$$

$$=I_{1m}Sin(wt-240^\circ)+I_{2m}Sin(2wt-120^\circ)+I_{3m}Sin(3wt)+\cdots\cdots$$

从以上所得可知，分解出来的各次谐波电流中1、4、7……等次谐波为正序分量，2、5、11……等次谐波为负序分量，3、6、9……等次谐波为另序分量。

我们曾对一台150MVA变压器(Yo/Yo/△-12-11)多次由220KV侧空载投入录波试验，结果发现如以基波电流为100%，则励磁涌流中二次谐波电流为40～75%，而且衰减时间较长。曾因引起变压器负序电流保护误动作过，后来我们在负序电流继电器上加装了二次谐波滤过器后，就没有再发生误动作了，变压器空载励磁涌流中三次谐波分量也较大，但对负序电流保护没有影响，只对另序保护有影响，其他谐波分量较少，故也无关系，但需注意：对少数三铁芯柱变压器因磁路不对称等原因，励磁涌流中5次谐波成份也较大，必要时还要加装五次谐波滤过器。

2.防止电流互感器二次回路断线引起负序电流保护误动作问题。

根据水电部63年“关于补充同期发电机和同期调相机不平衡电流允许值的技术通报”中规定：当负序电流标么值到0.45～0.6时，对空气或氢气表面冷却的和导线直接内冷的发电机应立即停机。因此发电机负序电流保护一般整定为0.5标么值，6～7秒跳闸，当发电机电流互感器二次回路断线时，负序电流保护是会误动作跳闸的。

解决的办法，是负序电流保护加负序电压闭锁，有人耽心，在没有短路故障时，由于机械原因造成变压器引线或线路导线断相，负序电压灵敏度是否足够的问题，会不会引起负序电流保护拒动，从下面分析可以知道，单线断相时的负序电流和负序电压与断相前该相的负荷电流值和断相处的正序、负序、另序综合阻抗有关。

在图1中示出大接地电流电网单侧电源输电线路上A相断线。当线路空载时（$I_H=0$）显然供电侧的电压和电流不会发生任何畸变，只是在电流为I_H时的带负荷线路发生断相时才会出现畸变。此时电流的大小决定所产生的不对称程度。

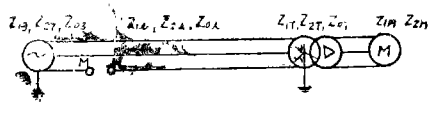

图1　单电源一次系统结线图

为了确定上述由断相引起电网的不对称性，在A相断线处附加一个使A相综合电流为零（$\dot{I}_{YA}=0$）的纵向电压$\triangle\dot{U}_{YA}$，这样电网便变为没有断相的三相电网，应用对称分量法可将纵向电压分为各相序电压之和即

$$\triangle\dot{U}_{1YA}-\triangle\dot{U}_{2YA}+\triangle\dot{U}_{OY}=\triangle\dot{U}_{YA}\quad\cdots\cdots\cdots(1)$$

因断相点非故障相（B相和C相）中无纵向电压，故$\triangle\dot{U}_{YB}=\triangle\dot{U}_{YC}=0$，根据将三个不对称分量分解成正序、负序和零序对称分量式得：

$$\left.\begin{aligned}\triangle\dot{U}_{OY}&=\frac{1}{3}\left(\triangle\dot{U}_{YA}+\triangle\dot{U}_{YB}+\triangle\dot{U}_{YC}\right)=\frac{1}{3}\triangle\dot{U}_{YA}\\\triangle\dot{U}_{1YA}&=\frac{1}{3}\left(\triangle\dot{U}_{YA}+a\triangle\dot{U}_{YB}+a^2\triangle\dot{U}_{YC}\right)=\frac{1}{3}\triangle\dot{U}_{YA}\\\triangle\dot{U}_{2YA}&=\frac{1}{3}\left(\triangle\dot{U}_{YA}+a^2\triangle\dot{U}_{YB}+a\triangle\dot{U}_{YC}\right)=\frac{1}{3}\triangle\dot{U}_{YA}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(2)$$

故得　$\triangle\dot{U}_{1YA}=\triangle\dot{U}_{2YA}=\triangle\dot{U}_{OYA}=\frac{1}{3}\triangle\dot{U}_{YA}\quad\cdots\cdots\cdots(3)$

在线路A相断线处外加纵向电压后，A相综合电流则为负荷电流$\left(\dot{I}_{YA}^{(H)}\right)$与纵向电压单独作用下事故电流两者之和且等于零。

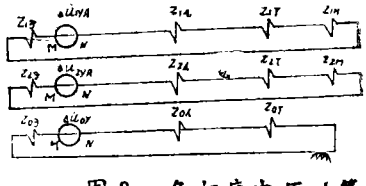

图2　各相序电压计算

在电压$\triangle\dot{U}_{YA}$作用下，各相序电流可按图（2）求得：

$$\left.\begin{aligned}
\dot{I}_{1YA}^{(P)} &= -\frac{\triangle\dot{U}_{1YA}}{Z_1\partial+Z_{1Q}+Z_{1T}+Z_{1H}} = \frac{-\triangle\dot{U}_{1YA}}{Z_{1\Sigma}} = \frac{-\triangle\dot{U}_{YA}}{3Z_{1\Sigma}} \\
\dot{I}_{2YA}^{(P)} &= -\frac{\triangle\dot{U}_{2YA}}{Z_2\partial+Z_{2Q}+Z_{2T}+Z_{2H}} = \frac{-\triangle\dot{U}_{2YA}}{Z_{2\Sigma}} = \frac{-\triangle\dot{U}_{YA}}{3Z_{2\Sigma}} \\
\dot{I}_{OY}^{(P)} &= -\frac{\triangle\dot{U}_{OY}}{Z_O\partial+Z_{OQ}+Z_{OT}} = -\frac{\triangle\dot{U}_{OY}}{3Z_{O\Sigma}} = -\frac{\triangle\dot{U}_{YA}}{3Z_{O\Sigma}}
\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(4)$$

自电源指向线路的方向取为各相序电流的正方向，它与纵向电压的正方向相反，因此，上式中右侧各项均冠负号。

线路中电源电动势产生的负载电流$\dot{I}_H$是从电源指向负载的方向，它与电流的事故分量方向相同，因此线路A相的综合电流等于：

$$I_{YA}=\dot{I}_{YA}^{(H)}+\dot{I}_{1YA}^{(P)}+\dot{I}_{2YA}^{(P)}+\dot{I}_{OY}^{(P)}=0\cdots\cdots\quad(5)$$

将(4)式代入(5)式则

$$-\frac{\triangle\dot{U}_{YA}}{3Z_{1\Sigma}}-\frac{\triangle\dot{U}_{YA}}{3Z_{2\Sigma}}-\frac{\triangle\dot{U}_{YA}}{3Z_{O\Sigma}}+\dot{I}_{YA}^{(H)}=0$$

即 $$\triangle\dot{U}_{YA}=\frac{3\dot{I}_{YA}^{(H)}}{\frac{1}{Z_{1\Sigma}}+\frac{1}{Z_{2\Sigma}}+\frac{1}{Z_{O\Sigma}}}\cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

将(6)式代入(4)式得：

$$\left.\begin{aligned}
\dot{I}_{1YA}^{(P)} &= -\frac{\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}}{1+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{O\Sigma}}}\dot{I}_{YA}^{(H)} \\
\dot{I}_{2YA}^{(P)} &= -\frac{1}{1+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{O\Sigma}}}\dot{I}_{YA}^{(H)} \\
\dot{I}_{OY}^{(P)} &= -\frac{\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{O\Sigma}}}{1+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{O\Sigma}}}I_{YA}^{(H)}
\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(7)$$

$$\dot{I}_{1Y}=\dot{I}_{YA}^{(H)}+\dot{I}_{1YA}^{(P)}=\frac{1+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{O\Sigma}}}{1+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{O\Sigma}}}\dot{I}_{YA}^{(H)}\cdots\cdots\cdots(8)$$

非故障相综合电流为：

$$\dot{I}_{YB}=a^2\left(\dot{I}_{YA}^{(H)}+\dot{I}_{1YA}^{(P)}\right)+a\dot{I}_{2YA}^{(P)}+\dot{I}_{OY}^{(P)}=\frac{-1.5\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{O\Sigma}}-j\sqrt{3}\left(1+\frac{Z_{2\Sigma}}{2Z_{O\Sigma}}\right)}{1+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{O\Sigma}}}\dot{I}_{YA}^{(H)}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

$$\dot{I}_{YC}=a\left(\dot{I}_{YA}^{(H)}+\dot{I}_{1YA}^{(P)}+a^2\dot{I}_{2YA}^{(P)}+\dot{I}_{OY}^{(P)}\right)=\frac{-1.5\left(\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{O\Sigma}}\right)+j\sqrt{3}\left(1+\frac{Z_{2\Sigma}}{2Z_{O\Sigma}}\right)}{1+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{O\Sigma}}}\dot{I}_{YA}^{(H)}$$

……(10)

同理，当线路两相断开时，线路非故障相的各相序电流和总电流亦可利用重迭原理求出。（推算过程略）

$$\dot{I}_{1YA}^{(P)}=\frac{Z_{2\Sigma}+Z_{O\Sigma}}{Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma}+Z_{O\Sigma}}$$

$$\dot{I}_{2YA}^{(P)}=\dot{I}_{OY}^{(P)}=\frac{Z_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma}+Z_{O\Sigma}}\dot{I}_{YA}^{(H)}$$

……(11)

$$\triangle\dot{U}_{OY}=-\frac{Z_{1\Sigma}Z_{O\Sigma}}{Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma}+Z_{O\Sigma}}\dot{I}_{YA}^{(H)}$$

$$\triangle\dot{U}_{1YA}=-\frac{Z_{1\Sigma}(Z_{2\Sigma}+Z_{O\Sigma})}{Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma}+Z_{O\Sigma}}\dot{I}_{YA}^{(H)}$$

$$\triangle\dot{U}_{2YA}=-\frac{Z_{1\Sigma}Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma}+Z_{O\Sigma}}\dot{I}_{YA}^{(H)}$$

……(12)

根据(4)(7)(11)(12)式可以看出，断线处的负序电流与负序电压成正比，断线前的负荷电流愈大，负序电流与负序电压也愈大，同时根据上式也可以算出断线处的负序电流与电压。然后再推算到保护装置安装处的负序电流与负序电压，以验算保护装置的灵敏度。

两侧电源线路上一相断开时，式(6)仍然适用，小接地电流电网中一相断开时，零序输入阻抗可视为无限大，即$Z_{O\Sigma}=\infty$。

一般负序电压按躲过正常不平衡电压整定，约5～6伏，与负序电流灵敏度比较，一般还是较高的。

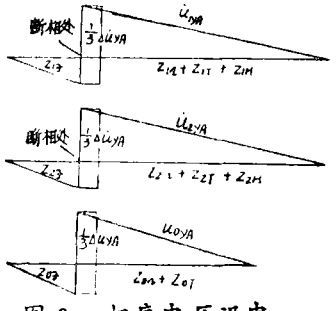

图3 相序电压沿电网元件阻抗的变化

3. 关于负序电流保护灵敏度太高，易误动作的问题，这主要是定值整定配合不当问题，关于发电机、变压器负序电流保护的整定计算，“电力工程设计手册”第二册等有关资料中有详细介绍，这里不再重复，现将我们在计算中遇到的几个问题及解决办法介绍给大家参考：

(1)如果计算结果，变压器高压侧负序电流保护与大电流接地电网中相邻线路上的零序电流保护灵敏度配合整定时，负序电流定值太高，而使得发电机负序电流保护难于按灵敏度与其配合时，可设法在该线路上再增加一段零序电流保护，以降低零序电流定值，适当提高零序电流时限，以便降低变压器高压侧负序电流定值，以满足与发电机负序电流保护灵敏度的配合。

(2)在整定相邻线路的线路后备保护时，尽量使它保持足够的灵敏度，少数特殊运行方式临时改定值，这样在某些少有的特殊运行方式下，变压器负序电流保护灵敏

度与这些线路后备保护灵敏度虽不配合，但可减少误动作的机会。

（3）由于保护原理不同，负序电流保护是为了防御负序电流流过时引起发电机转子发热不致损坏，故灵敏度较高。例如某发电厂由一条110KV线路至一变电所经变压器降压向35KV或10KV系统送电，经计算在35KV或10KV线路发生非全相运行时，发电厂侧变压器负序电流保护能够引起误动作，为了减小停电范围，应在变电所的变压器35KV或10KV侧加装负序电流保护，分两级时限，先跳线路非全相运行易引起负序电流保护动作的线路，以较长一△t的时限跳变压器35KV或10KV总开关。以免越级至发电厂变压器开关跳闸。

结　束　语

据统计变压器、发电机负序电流保护误动作机会最多的是电流互感器二次回路断线，和变压器励磁涌流中的二次和五次谐波分量所引起，加负序电压闭锁和二次谐波滤过器后，就可解决，再加上搞好定值整定配合计算，误动作的机会就更少了。