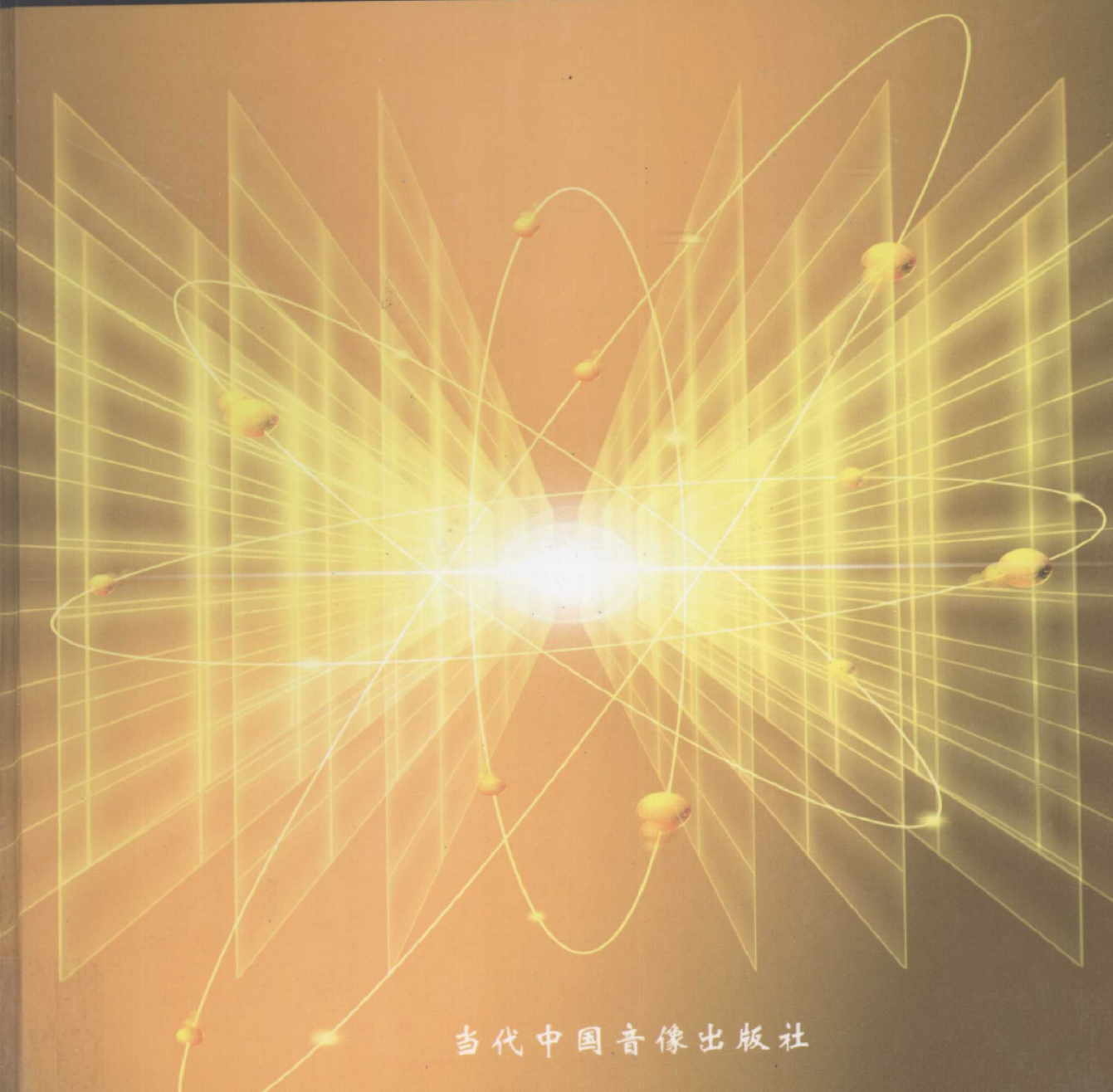


电力中性点接地方式选择、设计、施工、 运行与改造实用手册



当代中国音像出版社

ISBN 7-900108-95-5

定价:998.00 元

电力中性点接地方式选择、 设计、施工、运行与 改造实用手册

李 健 于硕实 主编

第二册

TN17-6/1

当代中国音像出版社

第四篇

中性点经消弧线圈接地

第一章 消弧线圈的补偿原理

第一节 概 述

近年来,我国城市 10kV 电网越来越多地用电缆作为供电线路,这必然会使单相接地电容电流大幅度增加,也必须考虑限制措施。

传统的消弧线圈都是单相的,而我国供电系统变压器的 6~10kV 侧都是三角形联接的,要使消弧线圈能与三相电网相联,必须有三相接地变压器配合,通过接地变压器组成的人为中性点才能与电网相联。近年来,国内外新研制了几种自动跟踪的消弧线圈,但结构上仍然没有多少变化,还是单相的。要在 6~10kV 电网上使用,依然需要接地变压器的配合。

第二节 6~10kV 电网单相接地电流的计算

单相接地电流在有关章已进行过计算,但为了后面分析问题的方便,在这里采用另外一种方法来计算单相接地电流。在中性点不接地的 6~10kV 电网中,电网每相对地存在着分布电容和分布绝缘电阻,在计算接地电流时,可以把它们用集中参数来表示,如图 4-1-1 所示。当电网某相发生单相经电阻接地时(电阻为零便为直接接地),在接地点有一接地电流流过,下面分析一下接地电流的计算。

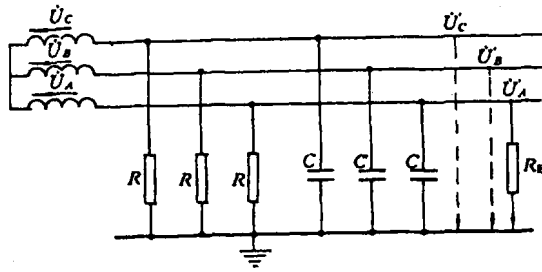


图 4-1-1 6~10kV 供电系统

U ——电网各相对地电压；
 C ——电网每相对地电容； R ——电网每相对地绝缘电阻； R_E ——接地电阻

当电网某相(如图 4-1-1 中的 A 相)经电阻 R_E 接地时,按照对称分量法的原理,可以将故障点处的三相电流、电压分解成正序电流(I_{A1}, I_{B1}, I_{C1})、电压(U_{A1}, U_{B1}, U_{C1}),负序电流(I_{A2}, I_{B2}, I_{C2})、电压(U_{A2}, U_{B2}, U_{C2})和零序电流 I_0 、零序电压 U_0 。可以求出流过电阻 R_E 的电流 I_E 和各序电流的关系是:

$$I_{A1} = I_{A2} = I_0 = -\frac{1}{3}I_E \quad (4-1-1)$$

由式(4-1-1)得出复合序网如图 4-1-2 所示。

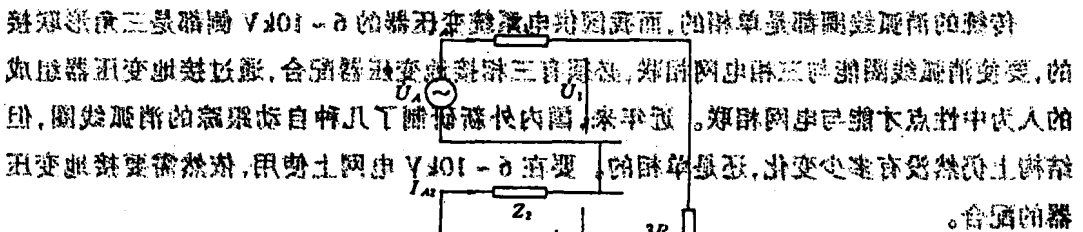


图 4-1-2 单相接地故障的复合序网

图 4-1-2 中 Z_1, Z_2, Z_0 分别表示电网的正序阻抗、负序阻抗、零序阻抗。由于 Z_1, Z_2 是电网线路和变压器的漏抗与电网对地阻抗的并联,其值很小,均可忽略, Z_0 是电网线路阻抗与电网对地阻抗的串联,有:

$$Z_0 = Z_1 + 3R_E$$

$$Z_0 \approx Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C}$$

根据对称分量的原理,故障点处的对地电压:

$$\begin{cases} \dot{U}'_A = \dot{U}'_{A1} + \dot{U}'_{A2} + \dot{U}'_0 \\ \dot{U}'_B = \dot{U}'_{B1} + \dot{U}'_{B2} + \dot{U}'_0 \\ \dot{U}'_C = \dot{U}'_{C1} + \dot{U}'_{C2} + \dot{U}'_0 \end{cases} \quad (4-1-2)$$

可以得出:

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \dot{U}_{A1} \\ \dot{U}_B = \dot{U}_{B1} \\ \dot{U}_C = \dot{U}_{C1} \\ \dot{U}_{A2} = \dot{U}_{B2} = \dot{U}_{C2} = 0 \end{cases} \quad (4-1-3)$$

所以在故障点存在正序电压和零序电压,负序电压接近于零。

下面分析计算一下零序电压和零序电流以及接地电流。根据前面的分析我们知道:流过每相对地电容和对地绝缘电阻及流过接地电阻的电流分别为:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A + \dot{U}_0}{Z} \\ \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B + \dot{U}_0}{Z} \\ \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C + \dot{U}_0}{Z} \\ \dot{I}_E = \frac{\dot{U}_A + \dot{U}_0}{R_E} \end{cases} \quad (4-1-4)$$

由于 $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_E = 0$, 从而得:

$$\dot{U}_0 = \frac{-\dot{U}_A Z}{Z + 3R_E} \quad (4-1-5)$$

流入每相对地电容和对地绝缘电阻的电流可以分解为正序分量和零序分量,即:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_0 \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_0 \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_0 \end{cases} \quad (4-1-6)$$

因为 $\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} = 0$, 所以 $\dot{I}_E = -3\dot{I}_0$, 则:

$$\dot{I}_E = \frac{3\dot{U}_A}{Z + 3R_E} \quad (4-1-7)$$

从上面的分析可以看出:流过接地点的电流在数量上就等于整个电网的零序电流之和,其大小不仅同电网的电压、单相接地电阻有关,而且同电网对地的电容以及对地的绝缘电阻有关。对于6~10kV电网来说,由于电网对地电容较大,容抗远小于电网对地绝缘电阻值,所以,当电网发生单相接地故障时,流过接地点的电流主要是电容电流。

我们也可以用如图4-1-3所示的零序等效电路来计算接地电流 I_E 。

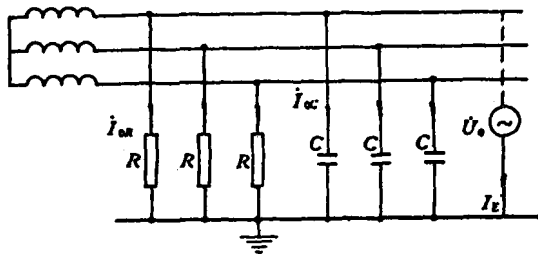


图 4-1-3 零序等效电路

I_{OC} ——流过电网对地电容的零序电流;

I_{OR} ——流过电网对地绝缘电阻的零序电流

当接地电阻 $R_E = 0$ 时,电网就相当于发生了单相直接接地故障,由式(4-1-5),(4-1-7)得:

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = -\dot{U}_A \\ \dot{I}_E = \frac{3\dot{U}_A}{Z} = 3\dot{U}_A \left(\frac{1}{R} + j\omega C \right) \end{cases} \quad (4-1-8)$$

第三节 消弧线圈的补偿原理

我们知道,6~10kV 电网单相接地电流中主要是电容电流,而流过接地点的电流是整个电网的零序电流,在同一零序电压 $\dot{U}_0$ 的作用下,电感电流的方向总是和电容电流的方向相反,要减少电网单相接地电流值,就必须在电网上附加一些能够产生零序电感电流的设备,以抵消电容电流,如图4-1-4所示。

当电网发生单相漏电(包括单相直接接地)故障时,在故障点将产生一零序电压 $\dot{U}_0$,在 $\dot{U}_0$ 的作用下,电网每相产生对地的零序电容电流 I_{OC} 、零序绝缘电阻电流 I_{OR} 以及消弧

线圈的零序电感电流 I_L 。由于设计接地变压器时,总是希望它的零序阻抗尽可能小,所以,可以近似认为,消弧线圈的零序电压就是电网的零序电压 $\dot{U}_0$,总的零序电流 $I_{0\Sigma}$ ($-I_E$)为:

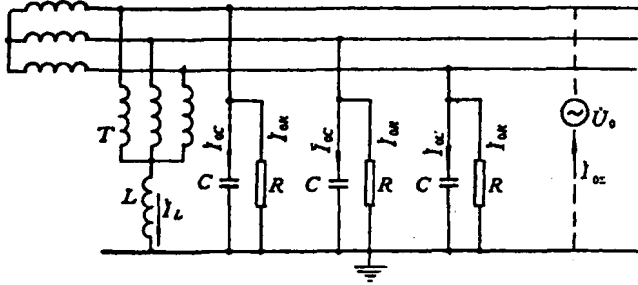


图 4-1-4 消弧线圈补偿原理

T ——三相接地变压器; L ——消弧线圈;

$I_{0\Sigma}$ ——电网总的零序电流; R_L ——消弧线圈并联电阻

$$\begin{aligned} I_{0\Sigma} &= 3I_{0A} + 3I_{0C} + I_L + I_{RL} \\ &= \dot{U}_0 \left(\frac{3}{R} + j3\omega C + \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R_L} \right) \end{aligned} \quad (4-1-9)$$

在计算零序电压 $\dot{U}_0$ 时,要考虑消弧线圈支路的影响。由于流过电感 L 的电流是全部零序电感电流,相当于每相对地零序电感值为 $3L$ 。同理,若消弧线圈支路并联有电阻 R_L ,等效于每相对地并联电阻 $3R_L$ 。

为了讨论问题的方便,引入使用消弧线圈时的两个参数:

(1)消弧线圈补偿状态的脱谐度 ν , 定义为:

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{I_{C\Sigma} - I_L}{I_{C\Sigma}} = \frac{\omega C_\Sigma - \frac{1}{\omega L}}{\omega C_\Sigma} \\ &= 1 - \frac{1}{\omega^2 C_\Sigma L} \end{aligned} \quad (4-1-10)$$

式中 $C_\Sigma = 3C$;

$$I_{C\Sigma} = 3I_{0C}$$

(2)电网对地的阻尼率 d , 定义为:

$$d = \frac{3I_{0R} + I_{RL}}{I_{C\Sigma}} = \frac{\frac{1}{R_\Sigma} + \frac{1}{R_L}}{\omega C_\Sigma} \quad (4-1-11)$$

式中 $R_z = R/3$ 。

电网每相对地的零序阻抗为：

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{3R_L} + j\omega C + \frac{1}{j3\omega L}}$$

$$= \frac{1}{\omega C(d + j\nu)} \quad (4-1-12)$$

当电网 A 相经电阻 R_E 接地时的零序电压 $\dot{U}_0$ 为：

$$\dot{U}_0 = \frac{-\dot{U}_A Z}{Z + 3R_E} = \frac{-\dot{U}_A}{3R_E \omega C(d + j\nu) + 1} \quad (4-1-13)$$

总的零序电流 $I_{0\Sigma}$ 为：

$$I_{0\Sigma} = \frac{-3\dot{U}_A}{Z + 3R_E} = \frac{-3\dot{U}_A \omega C(d + j\nu)}{3R_E \omega C(d + j\nu) + 1} \quad (4-1-14)$$

通过前面的分析,结合式(4-1-12),(4-1-13)和(4-1-14),我们知道, $I_{C\Sigma} = I_L$, 即 $\omega C_\Sigma = \frac{1}{\omega L}$, $\nu = 0$, 称消弧线圈处于全补偿状态,此时,电网零序阻抗 Z 最大,零序电压 U_0 最高,总的零序电流 $I_{0\Sigma}$ (即接地电流 I_E) 最小, $I_{0\Sigma}$ 全部为电阻性电流。 $I_{C\Sigma} > I_L$, 即 $\omega C_\Sigma > \frac{1}{\omega L}$, $\nu > 0$, 称消弧线圈处于欠补偿状态,总的零序电流 $I_{0\Sigma}$ 为电容性的。 $I_{C\Sigma} < I_L$, 即 $\omega C_\Sigma < \frac{1}{\omega L}$, $\nu < 0$, 称消弧线圈处于过补偿状态,总的零序电流 $I_{0\Sigma}$ 为电感性的。图 4-1-5 分别给出了消弧线圈处于三种状态下的电流、电压矢量图。

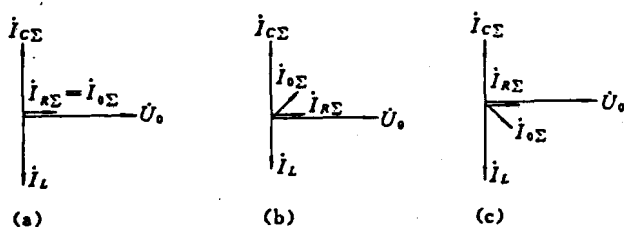


图 4-1-5 消弧线圈补偿电网的接地电流、电压矢量图

(a)全补偿;(b)欠补偿;(c)过补偿

图 4-1-5 中 $I_{E\Sigma} = 3I_{0R} + I_{0L}$, 从该矢量图上我们可以看出,当电网的中性点经消弧线圈接地时,其接地电流将会大大降低,特别是在消弧线圈处于全补偿状态时,接地电流最小,全部为电阻性电流。将 $R_E = 0$ 代入式(4-1-13)和式(4-1-14),即可求得单相直接接地时的 $\dot{U}_0$ 和 $I_{0\Sigma}(-I_E)$,其零序电压与零序电流、接地电流的相位关系不变。

第二章 消弧线圈的自动控制调节原理

第一节 概 述

第一章全面分析了消弧线圈补偿电网对地电容电流的原理。随着人们对电网电容电流危害性的认识逐渐加深,特别是近年来,煤矿自备电厂越来越多,不少自备电厂的发电机发出的 6kV 电源和煤矿 6kV 供电系统直接相联,过大的单相接地电流对发电机将造成危害,要求单相接地电流最好能限制在 5A 以下,这就需要消弧线圈能自动跟踪补偿电网对地电容电流的变化。以往的消弧线圈是靠调节线圈的抽头来补偿电网对地的电容电流。消弧线圈的匝数一经整定,就固定不变,要改变匝数,必须先让消弧线圈退出运行,然后再整定,而匝数的整定,或者是根据人们的运行经验,或者是实测电网对地的电容电流的数值,很不方便,不能适应煤矿 6kV 电网电流频繁变化的需要,残余电流往往较大。到了 80 年代以后,国内外相继研制出几种自动跟踪补偿的消弧线圈。本章首先讨论消弧线圈补偿电网对地电容电流的三种工作状态,即过补偿、欠补偿、全补偿;然后分析消弧线圈的几种调节原理和控制方法。

第二节 消弧线圈的工作状态

一、消弧线圈过补偿工作状态

对固定调整抽头的消弧线圈用得最多的是过补偿工作状态。之所以如此,是因为要避免电网运行时的变化,这种变化会使消弧线圈处于全补偿工作状态,于是要求电网在对地电容最大时,即所有支路都投入运行的情况下,仍处于过补偿工作状态,这样,电网在任何情况下均处于过补偿工作状态。在这种补偿工作状态下的残余电流往往较大。那么,为什么要避免全补偿工作状态呢?主要理由是怕电网对地电容与消弧线圈的电感会出现串联谐振过电压,使中性点位移电压过高,超过标准要求的不大于相电压 15% 的限值。下面分析一下谐振过电压的形成原因。

先分析中性点不接地供电系统,即消弧线圈未投入的情况,如图 4-2-1 中的 G_A , G_B , G_C 分别为电网各相对地泄漏电导,并认为 $G_A = G_B = G_C = G_0$; C_A , C_B , C_C 为电网各相对地电容。如果 $C_A \neq C_B \neq C_C$,在电源的中性点便会出现一自然位移电压 U_{bd} ,又称为不对称电压, U_{bd} 可由下式求得:

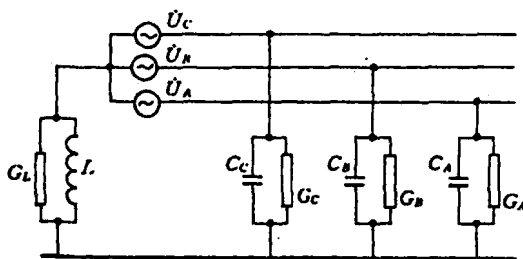


图 4-2-1 中性点经消弧线圈接地电网

$$\dot{U}_{bd} = -\frac{\dot{\rho}\dot{U}_A}{1-jd_0} \approx -\dot{\rho}\dot{U}_A \quad (4-2-1)$$

式中 $\dot{\rho} = \frac{C_A + \alpha^2 C_B + \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C};$

α ——算子, $\alpha = e^{j120^\circ};$

d_0 ——电网自然阻尼率, $d_0 = \frac{G_0}{\omega C} \ll 1$, 其中,

$$C = \frac{1}{3}(C_A + C_B + C_C)。$$

下面将消弧线圈支路电感 L 及其等值损耗电导 G_L 考虑进去来分析。运用戴维南等效发电机定理, 便可求得电感两端的电压, 即电网正常时的零序电压 $\dot{U}_0$, 其等效电路如图 4-2-2 所示。

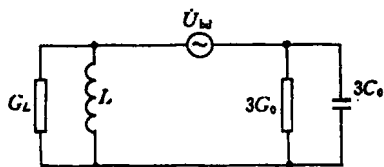


图 4-2-2 计算位移电压的等值电路

由图 4-2-2 知:

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= \frac{\dot{U}_{bd}}{\frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + G_L} + \frac{1}{j3\omega C_0 + 3G_0}} \times \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + G_L} \\ &= \frac{\dot{U}_{bd}}{\nu - jd} \end{aligned} \quad (4-2-2)$$

$\dot{U}_0$ 的有效值为:

$$U_0 = \frac{U_{bd}}{\sqrt{\nu^2 + d^2}} \quad (4-2-3)$$

式中 $d = d_0 + d_L$, $d_L = \frac{G_L}{3\omega C_0}$ 。

从式(4-2-3)中可以看出, 当阻尼率 d 很小, 消弧线圈又处于全补偿工作状态, 即 $\nu = 0$, 电网正常时的偏移电压 U_0 将会很大, 这就是人们尽量避免消弧线圈处于全补偿工作状态的理由。

二、消弧线圈欠补偿工作状态

消弧线圈的欠补偿工作状态, 过去人们很少用, 其原因是电网在负荷较轻的情况下, 比如煤矿 6kV 电网部分回路检修等, 电网电容电流减小较多时, 会使消弧线圈处于全补偿工作状态, 出现较大的偏移电压。近年来, 人们提出使用欠补偿工作状态的主要原因是希望原有基于零序电流方向型接地(漏电)保护装置仍然可以使用。

由于电网对地的绝缘电阻及其和消弧线圈并联的等值电阻均较大,电阻性电流较小,为分析问题的方便,均忽略,所以在图 4-2-3 中未画出来。从图 4-2-3 可以知道,当电网 N_1 支路发生 A 相接地故障,在故障点将出现一零序电压 $\dot{U}_0$,在 $\dot{U}_0$ 的作用下,在电网与大地之间将形成零序电流。故障支路的零序电流 i_{01} 经过本支路对地电容形成回路,不经过零序电流互感器 LH1。经过 LH1 的电流 i_{LH1} 是所有非故障支路的零序电流之和以及消弧线圈电流 i_L ,流过非故障支路零序电流互感器的仅是本支路的零序电流。流过故障支路的零序电流互感器的零序电流是由线路指向母线,流过非故障支路零序电流互感器的电流是由母线指向线路的。如果规定由母线指向线路为零序电流的正方向的话,由上面的分析可以画出图 4-2-4 的矢量图。

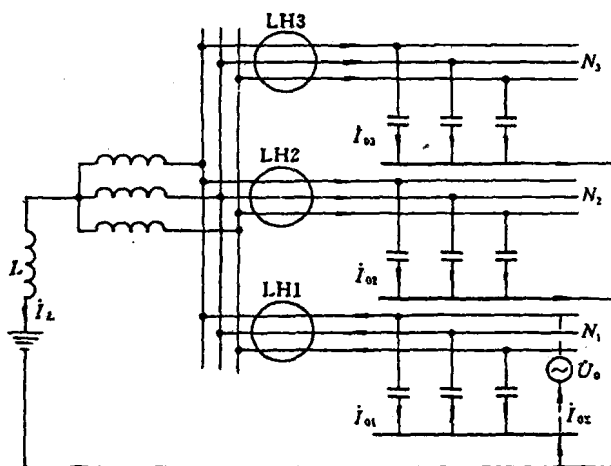


图 4-2-3 中性点经消弧线圈接地电网的零序等值电路

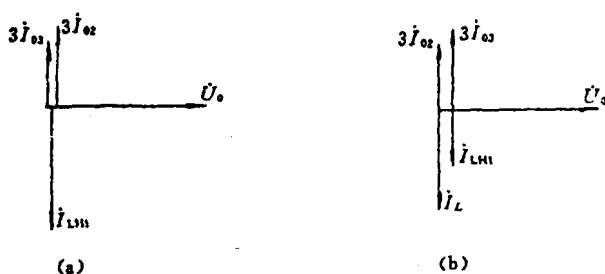


图 4-2-4 零序电压、电流矢量图

(a)消弧线圈未投入;(b)消弧线圈欠补偿投入

图 4-2-4(a)表示消弧线圈未投入时,流过故障支路的零序电流互感器的零序电流

(I_{LH1})是所有非故障支路零序电流之和,方向相反,即 $I_{LH1} = -3(I_{02} + I_{03})$,零序电流方向型的接地(漏电)保护原理就是根据流过各零序电流互感器的零序电流方向的不同来区分故障支路与非故障支路的。当电网的中性点经消弧线圈接地时,流过故障支路零序电流互感器的零序电流 $I_{LH1} = -(3I_{02} + 3I_{03} + I_L)$,由于电感电流和电容电流在相位上相差 180° ,所以要保证流过故障支路零序电流互感器的零序电流 I_{LH1} 的方向与未接入消弧线圈时相同,即与非故障支路相反,必须有 $I_L < 3I_{02} + 3I_{03}$,否则,就不能用零序电流的方向来区分故障支路与非故障支路。因此,为了保证接地选线的正确性,就必须让消弧线圈工作在欠补偿状态,而且欠得较多。于是,消弧线圈的电感电流与电网对地总的电容电流之差要满足:

$$I_L < \frac{U_0}{\omega(C_Z - C_m)} \quad (4-2-4)$$

式中 U_0 ——零序电压有效值,单相直接接地时, $U_0 = U_\phi$;

C_Z ——电网对地三相总的电容值之和;

C_m ——电容最大支路的三相对地电容值之和。

对于像煤矿等特殊企业的 6 kV 电网,用消弧线圈欠补偿工作状态来使接地选择性保护正确动作(而不是从保护原理进行研究的话),消弧线圈的补偿效果是很差的,脱谐度必然很大。因为煤矿 6kV 电网的主要负荷在井下,并主要集中在一两条下井支路上,井下全是电缆供电网络,对地电容主要为下井支路。例如,某一煤矿 6kV 电网单相直接接地的电容电流为 40A,下井两条支路,一条 20A,一条 15A,地面其他支路为 5A。要实现基于零序电流方向接地(漏电)保护选线的正确性,只有让所使用的消弧线圈的电流 $I_L < 40 - 20 = 20A$,才能保证在所有支路,包括电容电流最大支路(20A)上发生单相接地故障时选线的正确性。显然,补偿效果明显是较差的,脱谐度 $\nu > 50\%$,残余电流大于 20A。另外,每条支路的电容电流是经常变化的,计算和实测都比较困难。

三、消弧线圈全补偿工作状态

消弧线圈处于全补偿工作状态时,电网单相直接接地电流最小,只剩下电阻性电流。以往人们担心的中性点偏移电压过大,会超过规定的 $15\% U_\phi$,实际上我们可以通过适当加大电网的阻尼率 d ,使偏移电压降低。若脱谐度 $\nu = 0$,则式(4-2-3)变成 $U_0 = \frac{U_{bd}}{d}$ 。6~10kV 电网以架空线为主的网络自然不平衡电压 U_{bd} 一般约为 $1\% U_\phi$,以电缆为主的网络则更小。只要在消弧线圈支路并(串)联一定的电阻,增加阻尼率 d ,使 $d = 10\% \sim$

20%,就完全可以将电网正常时的偏移电压 U_0 限制在规定的范围以内。从降低电弧接地过电压和熄弧效果来讲,消弧线圈处于全补偿状态也最为有利,若在消弧线圈两端并一电阻,就更佳。在本书的有关章节已有论述,国内外不少专家、学者对消弧线圈的脱谐度与电弧接地过电压及熄弧效果进行了大量的理论和实验研究,结论大体上是相同的。消弧线圈的脱谐度 $|v|$ 越小,再并联以一定的电阻,无论是对降低电弧接地过电压的总体水平,还是对降低电弧接地过电压的频度,均是有利的。因为脱谐度 $|v|$ 越小,故障相恢复电压上升的速度就越慢,也就越有利于介质绝缘强度的恢复,使燃弧次数大为减少,而阻尼率 d 的适当增加,有利于存储能量的释放,降低过电压的幅值。

从接地(漏电)保护装置的情况看,近年来,国内外已基本解决了适合于消弧线圈接地电网的保护原理及装置的研制。保护原理大体上有三种:

(一)利用暂态分量的保护原理

由于消弧线圈电感电流的延时作用,利用刚发生接地故障时的暂态电流,即可判断故障支路与非故障支路。

(二)高次谐波零序电流方向的保护原理

电网的电压不仅有基波,还存在一定量的高次谐波。由于消弧线圈的感抗是同频率成正比的,而电网对地电容的容抗是同频率成反比的,所以,当电网发生单相接地故障时,消弧线圈高次谐波的电感电流远小于电网对地高次谐波的电容电流,可以忽略高次谐波电感电流,从而可以利用故障支路与非故障支路高次谐波零序电流方向的不同来实现选择性接地保护。

(三)零序电流有功分量的保护原理

如果在消弧线圈支路中并(串)联一定的电阻 R_L ,当电网发生单相接地故障时,消弧线圈的有功电流要流过故障支路的零序电流互感器,非故障支路的零序电流互感器虽也流过本支路电网对地绝缘电阻的电流,但由于绝缘电阻很大,其电流很小,而且从前面的分析知道,流过非故障支路零序电流互感器的零序电阻性电流的方向也同流过故障支路零序电流互感器的零序电阻性电流方向相反,因此可以利用零序电流有功分量(电阻性)的方向和大小来实现选择性接地保护。由中国矿业大学研制的 WLD 系列接地选线保护装置,就是采用了这种原理,在不少煤矿 6kV 电网中性点经消弧线圈(串、并电阻)接地的供电系统中使用,效果很好,得到了使用单位的赞誉。