

# 自动补偿电网零序对地导纳选线新方法的研究

冯艳, 徐玉琴, 沈志强

(华北电力大学电气工程学院, 河北保定 071003)

摘要: 自动调谐消弧线圈实现了电网电容电流测量的自动化以及单相接地故障的自动跟踪补偿, 提高了电网运行的安全性和供电可靠性, 却给电网的单相接地故障选线带来很大的困难。在简要分析谐波电流、零序有功、零序对地导纳以及信号注入等选线方法优缺点的基础上, 针对自动补偿电网的运行特点, 改进了零序对地导纳的计算方法, 研究了新的选线原理, 提高了该选线方法的准确性和适用范围。仿真分析结果说明了结论的正确性。

关键词: 自动补偿电网; 零序对地导纳; 消弧线圈

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)05-0027-05

## 0 引言

中性点经消弧线圈接地系统(也称为补偿电网)发生单相接地故障时, 允许继续运行 2 h, 在供电可靠性的提高、电气设备和线路绝缘水平的选择以及减轻对通讯系统的干扰等方面具有优势。为达到灵活、快速、及时、准确的调谐, 我国很多地方已安装了自动调谐消弧线圈成套装置, 大大提高了消弧线圈的动作成功率<sup>[1]</sup>。自动补偿电网运行的灵活、多样性(过补、欠补、完全补偿均可)却使在中性点不接地电网行之有效的“群体比幅、比相”选线方法<sup>[2]</sup>失去了选择性。

针对消弧线圈接地电网的运行特点, 国内外许多学者已经研究出多种单相接地故障选线方法: 谐波电流、零序有功、零序对地导纳以及信号注入法等<sup>[3-10]</sup>; 也有基于暂态零序电流的选线方法<sup>[6,7]</sup>。但实际的使用效果并不理想, 在现场运行中仅作为辅助判据。其原因是: 基于谐波零序电流的方法<sup>[3]</sup>虽然不受消弧线圈的影响, 但谐波分量小, 灵敏度要受到网络的特殊情况和系统负荷的影响。零序有功选线<sup>[4,5]</sup>的准确度受电网零序有功电流大小的影响, 相角也比较容易发生误判。利用暂态分量的保护<sup>[6,7]</sup>受故障时刻的影响, 易受干扰, 可靠性不高, 在电压过零点故障时还会出现保护动作的“死区”。注入法<sup>[8,9]</sup>是一种利用外加信号源进行选线的方法, 需要附加设备且仪器接线复杂, 同时会给系统带来一定的影响。

根据馈线的零序导纳, 可实现馈线的接地保护<sup>[10]</sup>, 也可实现单相接地故障的选线<sup>[1]</sup>。零序导纳接地保护即是将其他线路故障时馈线 k 的测量导纳

矢量与馈线 k 自身故障时的测量导纳矢量按动作特性进行区分。用于选线时则比较接地故障前后馈线零序导纳系数的变化, 可对所有馈线进行检测, 比较其差值, 提高了选线的可信度。这些方法的实现必须建立在各馈线正常运行时其零序导纳为已知的条件下, 这大大限制了方法的应用范围。

本文利用自动调谐消弧线圈的运行特点, 在电网正常运行时实时计算得到各条馈线的零序对地导纳; 在电网发生单相接地故障时判断出故障相, 对每条馈线逐一估算出接地电阻。零序对地导纳和接地电阻的计算均考虑了线路的自然不平衡影响。对于非故障线路, 接地电阻趋向于无穷大; 而对于故障线路, 可以得出接地电阻的估计值。通过比较接地电阻值进行选线, 进一步提高了选线的准确性和适用范围。

## 1 补偿电网在各种运行方式下的理论分析

补偿电网的等值接线如图 1 所示,  $L$  为消弧线圈电感值,  $g_L$  为消弧线圈的等效电导。在电网正常运行情况下, 图 1 中的  $R_g$  为无穷大, 同时可认为电气设备三相绝缘运行条件和污秽情况大致相同, 即三相对地泄漏电导相等 ( $g_A = g_B = g_C = g_0$ )。

对图 1 列写 KCL 方程, 并化简, 可得中性点位移电压  $U_0$  计算公式 (其中  $U_\phi$  为相电压,  $\phi = e^{j102^\circ}$ ):

$$U_0 = -\frac{j(C_A + {}^2C_B + C_C)}{g_L + 3g_0 + j(C_A + C_B + C_C) - j\frac{1}{L}}U_\phi = \frac{U_{00}}{v - jd} \quad (1)$$

其中  $v = \frac{(C_A + C_B + C_C) - \frac{1}{L}}{(C_A + C_B + C_C)}$  为补偿电网的脱谐

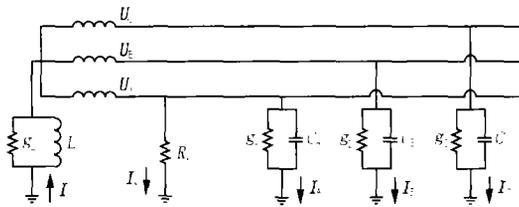


图 1 经  $R_g$  接地时补偿电网的等值接线图

Fig 1 Equivalent diagram of connection for compensated distribution network with earth fault through  $R_g$

$$度; d = \frac{g_L}{(C_A + C_B + C_C)} + \frac{3g_0}{(C_A + C_B + C_C)} = d_L + d_0$$

$$为整个补偿电网的阻尼率; U_{00} = \frac{C_A + C_B + C_C}{C_A + C_B + C_C}$$

$U_\phi$  为中性点不对称电压,是由电网的三相地对地电容不平衡引起的。

电网发生单相接地故障时,消弧线圈的电感电流补偿了系统的对地电容电流,大大减少了接地点残流  $I_g$ 。

当补偿电网发生非金属性的单相接地故障时,实际上相当于在故障点增加了一个过渡电阻  $R_g$ ,由此产生了一个附加的阻尼率。不失一般性,设接地故障相为 A 相,相应的零序等值电路如图 2 所示,图中  $C = C_A + C_B + C_C$  为三相导线对地电容;  $-U_A$  为与 A 相电压大小相等方向相反的相电压;  $U_0$  和  $U_{00}$  分别为中性点位移电压和不对称电压;考虑过渡电阻  $R_g$  的影响,可得中性点电压的表达式:

$$U_0 = -U_\phi \left[ \frac{u_{00}}{v - j(d + d_d)} + \frac{1}{1 + \frac{d + jv}{d_d}} \right] = -[U_0 + U_{00}] \quad (2)$$

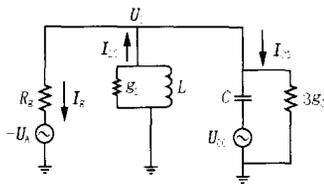


图 2 经  $R_g$  接地时补偿电网的零序回路

Fig 2 Zero-sequence circuit of compensated distribution network with earth fault through  $R_g$

由以上分析可知,在补偿电网中,电网正常运行时,由于不对称电压的存在,在回路中产生了很小的、很不规则的零序电流。发生单相接地时,故障电流包括三部分,一部分为整个系统的有功电流、一部分为系统总的对地电容电流、一部分为消弧线圈的电感电流。单相接地的产生使得各个馈线的零序电

流都发生了变化,随着故障时中性点位移电压的升高,即便是非故障馈线零序电流也会增大。其中,非故障馈线的零序电流,只包含本线路的电容性电流和阻性泄漏电流;而对于故障馈线,零序电流中还多了一些阻性电流,主要是由对地阻抗产生,即故障馈线的零序电流是由残流和本线路的电容电流以及阻性泄漏电流构成的。

## 2 零序对地导纳的计算及选线原理

小电流接地系统接地保护的基本要求是正确可靠地选出接地线路。本文根据故障时出现的零序电流稳态分量的特征和零序阻抗的变化特征研究了一种新的单相接地故障选线方案。

计及馈线的不平衡,对电网正常运行情况下的每条馈线均有:

$$I_{0i} = (U_0 - U_{00i}) Y_{Gi} \quad (3)$$

式中:  $I_{0i}$  为各条馈线的零序电流,  $U_0$  为中性点位移电压,  $U_{00i}$  为各条馈线的不对称电压,  $Y_{Gi}$  为各条馈线的零序对地导纳。

消弧线圈自动调谐时,往往要改变消弧线圈的电感值<sup>[1]</sup>,此时测量得到另一组零序电流  $I_{0i}^{(1)}$  和中性点位移电压  $U_0^{(1)}$ :

$$I_{0i}^{(1)} = (U_0^{(1)} - U_{00i}) Y_{Gi} \quad (3a)$$

用式 (3) 减 (3a), 消去  $U_{00i}$ , 有

$Y_{Gi} = I_{0i} / U_0$ 。该式可以精确求取各条馈线的零序对地导纳,不受电流互感器 CT 不平衡的影响。

当电网发生单相接地故障时,对于故障馈线:

$$I_{0i} = \frac{U_g}{R_g} + (U_0 - U_{00i}) Y_{Gi} \quad (4)$$

式中:  $I_{0i}$  为故障后故障馈线的零序电流,  $U_g$  为故障相电压,  $R_g$  为接地电阻,  $U_0$  为故障后的中性点位移电压,若以  $U_0$  的方向为基准,则  $U_{00i}$  为故障后故障馈线的不对称电压。对于非故障馈线则只有式 (4) 中的第二项。

式 (4) 减式 (3), 得:

$$I_{0i} = U_0 Y_{Gi} - U_{00i} Y_{Gi} + \frac{U_g}{R_g} \quad (5)$$

式中:  $I_{0i}$  为故障馈线零序电流的变化量,  $U_0$  为中性点位移电压的变化量,  $U_{00i}$  为不对称电压的变化量。式 (5) 第一、二部分是由于中性点位移电压的变化引起的电流变化,故障馈线和非故障馈线都会产生这样的影响,主要是三相电容性电流;第三部分代表流过接地电阻的故障电流,故障电流只流过故

障馈线。

当中性点位移电压超过正常值的 50% 时,选电压最低的相为故障相,当中性点位移电压不超过 50% 时,则选超前电压最低相的那一相为故障相。在判断出故障相别 (A、B、C) 之后,对式 (5) 进行变换,得到馈线的接地阻抗:

$$R_{gi} = \frac{U_g}{|I_{0i} - U_0 Y_{Gi} + U_{00i} Y_{Gi}|} \quad (6)$$

公式 (6) 可以针对于每一条馈线。对于非故障馈线,从理论上计算得到的  $R_{gi}$  是一个近乎无穷大的值;而对于故障馈线,计算得到的  $R_{gi}$  是真实接地电阻的一个近似值。因此,采用相对比较原理,在发生单相接地故障时,对各条馈线的接地阻抗值进行比较,选出数值最小的馈线即为故障线路。

### 3 实例仿真及数据分析

利用电磁暂态仿真程序 EMTTP 对某自动补偿电网进行仿真,如图 3 所示。其中, E 为三相电源; T 为三相变压器,变压器的变比是 38.5 kV/10.5 kV;  $L$ 、 $r$  分别为消弧线圈电感和相应的有功损耗等效电阻,其电感值在 1 625.5 ~ 1 025.5 mH 之间变化,  $r = 7.6576 \Omega$ ;  $R_g$  为过渡电阻;  $K_i$  为单相接地控制开关;  $l_1 \sim l_4$  为 4 条馈线,具体情况是:三条是架空线与电缆的混合馈线,一条是纯架空馈线。馈线 1 的不对称度为 1.8%, 馈线 2 为 2.3%, 馈线 3 为 2.7%, 馈线 4 为 2.0%。架空线的参数为:  $Z_1 = 0.45 + j0.37 \Omega/\text{km}$ ;  $C_1 = 9.49e-3 \mu\text{F}/\text{km}$ ;  $Z_0 = 0.6 + j1.30 \Omega/\text{km}$ ;  $C_0 = 5.2e-3 \mu\text{F}/\text{km}$ 。电缆线的参数为:  $C_0 = 0.27 \mu\text{F}/\text{km}$ 。架空线路的长度为:馈线 1: 9.438 km, 馈线 2: 8.600 km, 馈线 3: 2.071 km, 馈线 4: 6.257 km; 电缆线路的长度为:馈线 1: 2.530 km, 馈线 2: 0.879 km, 馈线 3: 0.000 km, 馈线 4: 1.670 km。电网的不对称度为 2%。

通过改变过渡电阻  $R_g$  的大小,模拟不同过渡电阻下的单相接地故障,故障点设在线路 1 的末端。

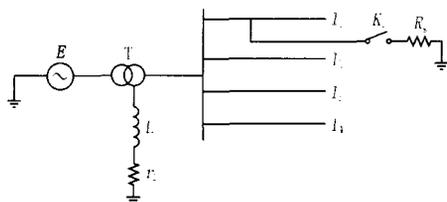


图 3 仿真模型示意图

Fig 3 Schematic diagram of simulation model

仿真计算过程简单介绍如下:首先利用 EMTTP 对电网的正常情况进行仿真,得出数据  $U_0$ 、 $I_{A0}$ 、 $I_{B0}$ 、 $I_{C0}$ ,并将其导入到 Matlab 中,分别对这些数据在 Matlab 环境下提取出一个周波的数据,并以  $U_0$  的方向为基准方向 (故障情况下提取故障稳态时对应的一个周波) 进行傅氏滤波,得到正常情况下的  $U_0$  和  $I_{0i}$ 。然后用 EMTTP 仿真单相接地故障情况,这里设接地故障相为 A 相。利用上述方法求出故障时的  $U_0$ 、 $I_{0i}$ 、 $U_g$ ,利用式 (6) 即可计算出故障线路和非故障线路的接地阻抗  $R_{gi}$ 。

在求取各线路的零序对地导纳时,利用 EMTTP 仿真电网的正常情况,分别令消弧线圈的电感值为 1625.5 mH 和 1025.5 mH,从而测得两组  $U_0$  和  $I_{0i}$ ,如表 1 所示。由表 1 可知,含有电缆线路越长的线路则其零序电流  $I_0$  越大。

计算结果如表 2~7。由表 2 可以看出,在考虑计算过程中出现的由于四舍五入而带来误差的情况下,故障线路 1 计算得到的  $R_{gi}$  与真实接地电阻近似,而非故障线路计算得出的  $R_{gi}$  远远大于真实值。随着接地电阻值的增大,故障线路计算得出的  $R_{gi}$  与真实值之间的误差越大,当接地电阻到达 20 k $\Omega$ ,计算得出的  $R_{gi}$  已经体现不出真实值,但与其他非故障线路相比,计算值仍然远小于非故障线路计算得出的  $R_{gi}$ 。表 3 显示了这一特点,并令:

$$= |I_{0i} - U_0 Y_{Gi} + U_{00i} Y_{Gi}|$$

由于在实际运行中用现有的方法求出各条线路的不对称电压  $U_{00i}$  繁琐且耗时大,并且电网在正常和故障的情况下中性点位移电压  $U_0$  都远远大于不对称电压  $U_{00i}$ ,忽略不对称电压  $U_{00i}$  时  $R_{gi}$  的计算公式为:

$$R_{gi} = \frac{U_g}{|I_{0i} - U_0 Y_{Gi}|} \quad (7)$$

利用 EMTTP 进行上述情况下的仿真,即模拟不同过渡电阻  $R_{gi}$  下的单相接地故障,并在线路 1 末端发生故障,仿真结果如表 4、5 所示。

表 2~5 的结果表明,在高过渡电阻下虽然故障线路计算得出的  $R_{gi}$  偏离真实值很大,但与其他非故障线路相比仍然远小于其计算得出的  $R_{gi}$  值。理论上此方法的耐过渡电阻能力很强,可达 100 k $\Omega$ 。但实际上由于过渡电阻太大时,故障线路和非故障线路的零序电流很小,故耐过渡电阻的能力还要受到实际系统中装置测量精度的影响。

从式 (2)可知,当  $R_{gi}$ 、 $d_d = 0$  时,

$$U_0 = \frac{-U_{00}}{v - jd'}, U_0 = 0, \text{故 } U_0 = \frac{U_{00}}{v - jd'}$$

此时与补偿电网正常运行时的情况相同。

改变电网的不对称度为 7.0%;其中线路 1 的不对称度为 6.0%,线路 2 为 7.7%,线路 3 为 10.0%,线路 4 为 8.0%。模拟线路 3 发生故障,并通过改变过渡电阻  $R_g$  的大小模拟单相接地故障,进行仿真,结果见表 6、表 7。

由表 6 可见,当过渡电阻到达 20 k 的时候,故障线路与非故障线路计算得出的  $R_g$  差别减小,为了看清这一特点,我们仍令:  $= |I_{0i} - U_0 Y_{Gi}|$ 。

由表 6、7 可见,当线路的不对称度增大到 7% 时,故障线路与非故障线路计算得出的  $R_g$  差别相对于不对称度为 2% 左右时减小,但是仍然不影响故障选线。由此可见,线路的不对称度越小,故障选线的精确度越高。如果考虑不对称电压  $U_{00i}$  的影响,则线路的不对称度不影响选线精度,且耐过渡电阻能力很强。但是在过渡电阻很高的情况下,选线能力要受到装置测量精度的影响。

表 1 电网正常运行情况下的  $U_0$  和  $I_{0i}$

Tab 1  $U_0$  and  $I_{0i}$  in normal operation condition

	$U_0/V$	$I_{01}/A$	$I_{02}/A$	$I_{03}/A$	$I_{04}/A$	$L/mH$
有效值	344.941 2	0.320 7	0.132 0	0.005 3	0.217 5	1 625.5
相角 /rad	-0.01	-1.58	-1.58	-1.58	-1.58	
有效值	105.922 7	0.152 7	0.066 9	0.002 8	0.106 3	1 025.5
相角 /rad	0.01	-1.56	-1.56	-1.56	-1.56	

表 2 不同过渡电阻  $R_g$  下计算得到的  $R_{gi}$

Tab 2  $R_{gi}$  calculated from different transition resistance  $R_g$

$R_g$	$R_{gi}$			
	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4
2	2 212.9	16 245.250 0	40 613.125 0	9 283.000 0
500	554.735 6	7.767 4e6	1.553 5e7	913 812.764 7
10 k	14 550.000 0	3.107 9e7	6.215 7e7	3.884 8e6
20 k	40 037.910 3	1.584 5e7	1.267 6e8	5.761 8e6

表 3 高过渡电阻  $R_g$  下计算得出的差值

Tab 3 D-value calculated from high transition resistance  $R_g$

$R_g/k$	$R_{gi}$			
	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4
50	0.034 0	0.000 2	0.000 0	0.000 1
80	0.012 8	0.000 7	0.000 0	0.000 1
100	0.006 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0

表 4 忽略不对称电压  $U_{00i}$  情况不同过渡电阻

$R_g$  下计算得到的  $R_{gi}$

Tab 4  $R_{gi}$  calculated from different transition resistance

$R_g$  with  $U_{00i}$  ignored

$R_g$	$R_{gi}$			
	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4
2	2 100.1	84 831.6	1 805.027 8	57.252 0
500	525.712 9	20 685.508 7	443 851.914 3	13 970.159 2
1 k	1 054.047 8	38 693.059 2	858 282.403 2	26 445.676 3
10 k	11 631.263 7	119 533.601 9	2 702.5e6	81 145.526 1
20 k	25 954.140 9	152 722.920 5	3.425 9e6	102 889.629 9
50 k	77 500.334 0	272 907.863 2	5.805 5e6	181 421.704 5

表 5 忽略不对称电压  $U_{00i}$  情况高过渡电阻

$R_g$  下计算得出的差值

Tab 5 D-value calculated from high transition

resistance  $R_g$  with  $U_{00i}$  ignored

$R_g/k$	$R_{gi}$			
	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4
50	0.082 4	0.023 4	0.001 1	0.035 2
80	0.046 9	0.017 3	0.000 7	0.024 8
100	0.035 4	0.014 3	0.000 6	0.021 4

表 6 忽略不对称电压  $U_{00i}$  情况不同过渡电阻

$R_g$  下计算得到的  $R_{gi}$

Tab 6  $R_{gi}$  calculated from different transition

resistance  $R_g$  with  $U_{00i}$  ignored

$R_g$	$R_{gi}$			
	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4
2	14.539 9	28 863.9	2 007.0	16 200.6
500	3 534.402 8	7 000.630 7	501.793 8	3 929.865 7
20 k	54 472.108 2	108 126.316 8	20 188.429 2	60 463.582 7

表 7 忽略不对称电压  $U_{00i}$  情况高过渡电阻

$R_g$  下计算得出的差值

Tab 7 D-value calculated from high transition

resistance  $R_g$  with  $U_{00i}$  ignored

$R_g/k$	$R_{gi}$			
	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4
20	0.132 2	0.066 6	0.356 7	0.119 1
50	0.058 4	0.029 4	0.143 5	0.052 5
80	0.041 8	0.021 1	0.089 7	0.037 6

## 4 结论

电缆线路在城市配电网中所占的比重越来越大,单相接地电容电流急剧增加,中性点不接地方式已不能满足电网的运行要求。自动调谐消弧线圈的应用更加广泛。

本文对补偿电网在正常和单相接地故障的运行状况进行了理论分析,提出了利用消弧线圈的自动

调谐过程,在线计算各馈线正常运行时的零序对地导纳;而当电网发生单相接地故障时逐一计算每条馈线的接地电阻。计算均采用零序电流变化量,摆脱了CT不平衡电流对测量的影响。采用相对原理实现故障线路的选择,不存在死区,理论上不受过渡电阻的影响。零序对地导纳选线新方法提高了选线的准确性和适用范围,仿真分析结果说明了结论的正确性。

文中讨论了线路三相参数不对称对零序对地导纳选线方法的影响,得出了有益的结论。

#### 参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京:中国电力出版社,2000.  
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue Resonance Neutral Earthing Technology in Power Electricity [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [2] 肖白,束洪春,高峰. 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述 [J]. 继电器, 2001, 29(4): 16-20.  
XIAO Bai, SHU Hong-chun, GAO Feng Survey of the Methods of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Fault in Networks with Ungrounded Neutral [J]. Relay, 2001, 29(4): 16-20.
- [3] 郝玉山,齐丽芳,尹永生,等. 零序网络中的谐波电流分布 [J]. 华北电力学院学报, 1995, 22(3): 1-17.  
HAO Yu-shan, QI Li-fang, YIN Yong-sheng, et al Harmonic Current Distribution in Neutral-point-ungrounded Systems [J]. Journal of North China Institute of Electric Power, 1995, 22(3): 1-17.
- [4] 杜丁香,徐玉琴. 消弧线圈接地电网的有功选线 [J]. 继电器, 2002, 30(5): 33-36.  
DU Ding-xiang, XU Yu-qin Faulted Line Detecting with Active Power in an Auto-compensated Distribution Network [J]. Relay, 2002, 30(5): 33-36.
- [5] 牟龙华. 零序电流有功分量方向接地选线保护原理 [J]. 电网技术, 1999, 23(9): 60-62.  
MOU Long-hua Principle of Selective Grounding Fault Protection Based on Active Component Direction of Zero-sequence Current [J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 60-62.
- [6] Chaarl O, Meunier M, Brouaye F Wavelets: A New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution System Relaying [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3).
- [7] 薛永端,冯祖任,徐丙垠,等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 48-53.  
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin, et al Earth Fault Protection in Non-solidly Earthed Network Based on Transient Zero Sequence Current Comparison [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.
- [8] 曾祥君,尹项根,于永源,等. 基于注入变频信号的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 29-32.  
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, YU Yong-yuan, et al Ground Fault Protection for Generator Stator Windings with Inductance Compensating Based on Injecting Signal [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 29-32.
- [9] 桑在中,张慧芬,潘贞存,等. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(2): 11-12.  
SANG Zai-zhong, ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun, et al Signal Phase Grounding Fault Protection by Injecting Currents in Ineffective Grounding Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(2): 11-12.
- [10] 曾祥君,尹项根,张哲,等. 零序导纳法馈线接地保护的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 5-10.  
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al Study on Feeder Grounding Fault Protection Based on Zero Sequence Admittance [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 5-10.
- [11] Welfonder T, Leitloff V. Location Strategies and Evaluation of Detection Algorithms for Earth Faults in Compensated MV Distribution Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1121-1128.

收稿日期: 2004-06-08; 修回日期: 2004-10-21

作者简介:

冯艳(1978-),女,硕士研究生,研究方向为继电保护的新原理与新技术; E-mail: fengyan789@sohu.com

徐玉琴(1964-),女,副教授,主要从事电力系统继电保护与控制的的教学研究工作; E-mail: xuyuqin\_ncepu@sina.com

沈志强(1978-),男,硕士研究生,研究方向为继电保护的新原理与新技术。

### Study of new method for fault line selection with zero sequence phase-to-ground admittance in an auto-compensated distribution network

FENG Yan, XU Yu-qin, SHEN Zhi-qiang

(下转第 37 页 continued on page 37)

- of the CSEE, 2003, 23 (6): 60-65.
- [4] 李勋,杨荫福,陈坚. 基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (9): 37-40  
LI Xun, YANG Yin-fu, CHEN Jian Switching Function Mathematical Model of UPFC Based on SPWM Control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (9): 37-40.
- [5] 章良栋,岑文辉,刘为. UPFC 的模型及控制器设计研究 [A]. 第十三届全国高等学校电力系统及其自动化专业学术论文集, 1997. 193-200.  
ZHANG Liang-dong, CEN Wen-hui, LIU Wei A Design and Study on the Model and Controller of UPFC [A]. Proceedings of the 13th CUS - EPSA. 1997. 193-200.
- [6] 叶其革,吴捷. 一种自组织模糊神经网络控制器 [J]. 控制与决策, 1998, 11: 694-699.  
YE Qi-ge, WU Jie A Self-organizing Fuzzy Neural Network Controller [J]. Control and Decision, 1998, 11: 694-699.
- [7] Dizdarevic N, Tesnjak S, Adersson G Converter Rating Powers of Unified Power Flow Controller [A]. Proceedings of the 2002 IEEE PES Summer Meeting on System Aspects of FACTS and HVDC. Chicago (USA): 2002. 1-7.
- [8] 王涛,于继来,鲁保春,等. 统一潮流控制器 (UPFC) 在电力系统中稳态调控范围分析 [A]. 第十三届全国高等学校电力系统及其自动化专业学术论文集, 1997: 224-229.  
WANG Tao, YU Ji-lai, LU Bao-chun, et al The Steady Control Range Analysis Application UPFC to Power System Stabilizer [A]. Proceedings of the 13th CUS-EPSA. 1997. 224-229.
- [9] 朱典旭,张锦生,赵雅利,等. PER D200G3 系列变频调速装置研究 [J]. 电力电子技术, 1996, (2): 1-5.  
ZHU Dian-xu, ZHANG Jin-sheng, ZHAO Ya-li, et al Research on PER D200G3 VVVF Series Equipment [J]. Power Electronics, 1996, (2): 1-5.

收稿日期: 2004-06-23; 修回日期: 2004-08-03

作者简介:

叶其革 (1969 - ), 男, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为自动控制理论及控制工程, 电力系统控制技术; E-mail: yeqi2003@163.com

王晨皓 (1971 - ), 女, 讲师, 主要研究方向为高频开关电源;

吴捷 (1937 - ), 男, 博士生导师, IEEE 会员, 主要从事自适应控制、电力系统运行监测与控制、电机控制、生物电子学等研究工作。

### Design of a new unified power flow controller

YE Qi-ge<sup>1</sup>, WANG Chen-hao<sup>2</sup>, WU Jie<sup>1</sup>

(1. Electric Power College, SCUT, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Post and Telecommunication Vocational Technology Institute, Guangzhou 510630, China)

**Abstract:** The paper introduces structure of a unified power flow controller (UPFC) voltage-space-vector PWM control technique and the mathematics model of single machine infinite power system including UPFC. Two control strategies are applied to design UPFC. Electric current forecasting d-q axis decouple control and voltage-space-vector PWM control technique are employed to regulate active power flow and reactive power flow. Self-organizing fuzzy neural network of multi-input-and-single-output, d-q axis decouple control and voltage-space-vector PWM control technique are adopted to regulate voltage on bus and voltage on direct circuit capacitor. MATLAB simulation shows that UPFC can effectively regulate active power flow, reactive power flow, voltage on bus and voltage on direct circuit capacitor.

**Key words:** self-organizing fuzzy neural networks; electric current forecasting; UPFC

(上接第 31 页 continued from page 31)

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Automatic tuning extinction coil realizes automatic measurement for capacitance current of power network and automatic tracking compensation for single-phase earth fault, which enhances the security of network operation and the reliability of power supply, but brings much difficulty to single-phase earth fault line selection. Based on brief analysis of harmonic current, zero sequence active power, zero sequence phase-to-ground admittance and signal injection, and with the operation characteristic of auto-compensated distribution network, this paper improves the calculation method of zero sequence phase-to-ground admittance and explores a new principle for fault line selection, which strengthens the accuracy and the suitable range of fault line selection with zero sequence phase-to-ground admittance. The result of simulation analysis shows the correctness of the conclusion.

**Key words:** auto-compensated distribution network; zero sequence phase-to-ground admittance; extinction coil