

500 kV 及 220 kV 自耦变压器对电网单相短路电流的影响

江林¹, 王自强², 张庆庆², 李卓³(1. 江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏 南京 210036; 2. 开封供电公司, 河南 开封 475000;
3. 许继集团, 河南 许昌 461000)

摘要: 江苏部分 500 kV 枢纽变电站 220 kV 母线单相短路电流大于三相短路电流较多, 且已经逼近了断路器的额定开断能力。主要是由于大量采用自耦变压器引起的, 考虑更换自耦变为非自耦变以降低单相短路电流, 实质是减少零序网接地支路。通过序网图原理分析发现更换 500 kV 自耦变为非自耦变比更换 220 kV 站内的自耦变为非自耦变对单相短路电流的抑制作用大, 算例也证明了理论分析的正确性。但是更换 500 kV 自耦变在技术和经济上可行性都不强, 所以抑制单相短路电流的最有效措施是 500 kV 自耦变中性点加装小电抗。

关键词: 单相短路电流; 三相短路电流; 正序阻抗; 负序阻抗; 零序阻抗; 自耦变压器; 中性点接地

Impact of using 500 kV and 220 kV autotransformers to the single-phase short circuit current

JIANG Lin¹, WANG Zi-qiang², ZHANG Qing-qing², LI Zhuo³(1. Jiangsu Electrical Power Research Institute, Nanjing 210036, China; 2. Kaifeng Power Supply Company, Kaifeng 475000, China;
3. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The single phase short circuit current is bigger than the three-phase short circuit current of 220 kV buses in some key 500kV stations of Jiangsu grid, and the single phase short circuit current exceeds the rated breaking ability of breakers. It is due to mass use of autotransformers, so the measure of using non-autotransformers instead of autotransformer to decrease the single-phase short-circuit current is considered. The essential of the measure is to reduce the earthing branches. It is found that the effect of replacing the 500kV autotransformers into non-transformers is better than that of replacing the 220kV autotransformers. As replacing 500kV autotransformers is not feasible, adding small reactance is still the most effective way to decrease the single-phase short circuit current.

Key words: single-phase short circuit current; three-phase short circuit current; positive-sequence impedance; negative-sequence impedance; zero-sequence impedance; autotransformer; neutral ground

中图分类号: TM711 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)18-00108-05

0 引言

随着江苏电力需求的快速增长, 电力系统的规模日益扩大, 电源、电网更加密集, 电网的短路电流也持续上升。针对 2007~2008 水平年江苏电网的短路电流计算表明, 部分 500 kV 枢纽变电站的 220 kV 母线单相短路电流大于三相短路电流, 且已经逼近断路器的额定遮断能力 (50 kA)。当单相短路电流超标, 也会使断路器在开断短路电流时受到电动力和热应力破坏, 还会对相邻通信线路产生干扰, 对变电所的跨步电压和接触电压也有影响。由于单相短路发生的概率很高 (约占全部短路故障的 65%~70%), 因此必须加以重视, 分析原因, 采取措施加以抑制。

1 单相短路电流大于三相短路电流的原因

对于单相接地短路, 短路电流公式为
$$i^{(1)} = \frac{3\dot{E}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}$$
; 对于三相接地短路, 短路电流公式为 $i^{(3)} = \dot{E} / Z_{1\Sigma}$ 。式中: $Z_{1\Sigma}$ 、 $Z_{2\Sigma}$ 、 $Z_{0\Sigma}$ 分别为从短路点向电源侧看进去的等值正、负、零序阻抗, \dot{E} 为发电机正序等值电势。

比较单相短路电流 $i^{(1)}$ 和三相短路电流 $i^{(3)}$ 的大小, 实际上就是比较 $Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma}$ 和 $Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}$ 的大小。

电力系统的主要元件分为旋转元件和静止元件。所有的静止元件 (如线路、变压器等) 的正序、负序阻抗均相等, 而旋转元件 (如发电机) 的正序、负序阻抗则不相等。因此 $Z_{2\Sigma}$ 与 $Z_{1\Sigma}$ 的不同主要是由旋转元件的正序和负序阻抗不等所致。当短路点靠近电源时, 发电机序阻抗在总的序阻抗 $Z_{1\Sigma}$ 和 $Z_{2\Sigma}$ 中

将自耦变更换为非自耦变的也是专门抑制单相短路电流的措施之一, 如果将自耦变更换为非自耦变, 则不论从继电保护要求有零序通路的角度, 还是从过电压绝缘的角度, 一个站内都只需要一台变压器接地即可。此时, 变压器自身的正负零序阻抗没有变化(短路比相同), 只是接地方式发生了变化, 变压器中性点接地数目减少, 即零序网接地支路减少, 那么从短路点向电源侧看进去的零序阻抗增大。那么更换 220 kV 自耦变对 $X_{0\Sigma}$ 的改变大呢, 还是更换 500 kV 自耦变呢? 定量分析如下。

电网密集的苏南地区已基本实现了 500 kV/220 kV 的分层分区运行, 部分分区是 1 个 500 kV 站带一片 220 kV 电网, 部分分区是 2 个 500 kV 站带一片 220 kV 电网。图 1 是比较典型的苏南分区, 即 1 个 500 kV 站带一片 220 kV 电网的零序网络图。

(1) 220 kV 自耦变更换为非自耦变, $X_{i0}/2$ 变为 X_{i0} , 图 1 中的 A 部分为单台 220 kV 自耦变零序阻抗 X_{i0} 。取 120 MVA 的变压器, 典型参数为 $U_{hm} = 9\%$, $U_{hl} = 31\%$, $U_{ml} = 21\%$, 以 100 MVA 为基准, 计算得到高压侧阻抗 $X_1 = 0.079$ p.u., 中压侧阻抗 $X_2 = -0.004$ p.u., 低压侧阻抗 $X_3 = 0.179$ p.u.。220 kV 站内两台自耦变, 则等值零序阻抗为 $X_{i0}/2 = 0.179$ p.u., 如果两台都是非自耦变, 则只需一台主变接地, 所以等值零序阻抗为 $X_{i0} = X_h + X_l = 0.258$ 。

(2) 220 kV 变压器再串联上 220 kV 线路, 图 1 中的 B 部分, 即一个 220 kV 通道的等值零序阻抗。统计了某 500 kV 枢纽变 220 kV 线路到其相邻 220 kV 变电站的长度, 平均约 10 km, 线路型号取 LGJ-2*400, 则单回线路的阻抗为 $X_{l0} = 0.004$ p.u., 两回并联则为 $X_{l0}/2 = 0.002$ p.u.。所以在这部分零序阻抗中, 220 kV 变电站的零序阻抗占主导, 线路零序阻抗比它小很多。当 220 kV 变电站均为自耦变时, 此部分等值零序阻抗为 $X_{i0}/2 + X_{l0}/2 = 0.179 + 0.002 = 0.181$, 更换为非自耦变, 此部分等值零序阻抗为 $X_{i0} + X_{l0}/2 = 0.258 + 0.002 = 0.260$ p.u.。

(3) 500 kV 枢纽变的 220 kV 出线一般有 3~8 个通道, 通常是双回线组成一个通道, 则有 6~16 回出线。500 kV 枢纽变通常有 6 个通道, 则这 6 个通道零序阻抗并联得到 220 kV 侧的等值零序阻抗, 即 $X_{220} = (X_{i0}/2 + X_{l0}/2)/6 = 0.03$ p.u., 若 220 kV 变为非自耦变, 则 $X_{220} = (X_{i0} + X_{l0}/2)/6 = 0.043$ 。

(4) 从 220 kV 母线短路点向电源侧看进去的

等值零序阻抗 $X_{0\Sigma}$ 是由 220 kV 侧和 500 kV 侧等值零序阻抗并联形成的, 其大小还要看 500 kV 侧等值零序阻抗。500 kV 侧零序阻抗的大小由 500 kV 自耦变零序阻抗和 500 kV 系统内阻抗组成。

取 750 MVA 的变压器, 典型参数为 $U_{hm} = 14\%$, $U_{hl} = 40\%$, $U_{ml} = 25\%$, 以 100 MVA 为基准, 计算得到单台变压器高压侧阻抗 $X_1 = 0.020$ p.u., 中压侧阻抗 $X_2 = -0.001$ p.u., 低压侧阻抗 $X_3 = 0.034$ p.u.。两台变压器并联, 则高中低阻抗分别是 $X_1 = 0.010$ p.u., $X_2 = -0.0005$ p.u., $X_3 = 0.017$ p.u.

假设 500 kV 开关短路容量为 63 kA, 500 kV 母线三相短路电流一般都大于三相短路电流, 说明 500 kV 系统正序阻抗小于零序阻抗。根据某地区 500 kV 三相短路电流与单相短路电流的大小比值统计, 得到 500 kV 系统内阻抗 $X_0 = 1 \sim 2 X_1$, 取平均值 $X_0 = 1.5 X_1$, 根据单相短路电流不超过 63 kA, 则 $3/(X_1 + X_1 + 1.5 X_1) = 63\sqrt{3}U_B/S_B$, 计算出 500 kV 系统零序内阻抗 $X_{S0} = 0.0015$ 。可见 500 系统零序内阻抗非常小, 500 kV 侧的系统等值零序阻抗主要由 500 kV 主变的零序阻抗主导。

因此当两台 500 kV 变压器都为自耦变, 500 kV 等值零序阻抗 $X_{500} = 0.006$ p.u., 当更换为非自耦变时, 这个值变为 0.012 p.u.。

(5) 比较 220 kV 侧等值零序阻抗和 500 kV 侧等值零序阻抗的大小(均是自耦变的情况), $X_{220} = (X_{i0}/2 + X_{l0}/2)/6 = 0.03$ p.u., $X_{500} = 0.006$ p.u., 可见, X_{500} 比 X_{220} 小很多, 不在一个数量级上, $X_{0\Sigma}$ 受 500 kV 侧等值零序阻抗 X_{500} 主导。如果 500 kV 变电站有三台自耦变, 则 $X_{0\Sigma}$ 更加受 500 kV 侧等值零序阻抗主导。这就是为什么更换 500 kV 自耦变对单相短路电流的抑制作用大于更换 220 kV 自耦变。

(6) 更换 220 kV 自耦变和更换 500 kV 自耦变对抑制单相短路电流的作用定量分析如下, 各种元件参数都取典型参数。

A. 当 500 kV 站以及 220 kV 站的变压器都为自耦变, 即中性点都接地时, $X_{\Sigma 0} = X_{500} // X_{220} = 0.006 // 0.03 = 0.0053$ p.u., 更换 220 kV 自耦变为非自耦变, 500 kV 变压器不更换, 那么 220 kV 每个站只有一台变压器接地。 $X_{\Sigma 0} = X_{500} // X_{220} = 0.006 // 0.043 = 0.0053$ p.u., 可见, $X_{\Sigma 0}$ 的变化非常小, 不是一个数量级上的变化, 因此单相短路电

流的变化也不会大。所以更换 220 kV 自耦变为非自耦变对抑制 500 kV 枢纽变的 220 kV 母线单相短路电流作用不大。

B. 更换 500 kV 自耦变为非自耦变, 220 kV 自耦变不更换, 那么 500 kV 站只有一台变压器接地。 $X_{\Sigma 0} = X_{500} // X_{220} = 0.012 // 0.03 = 0.009$, 比没有更换变压器时的 $X_{\Sigma 0} = 0.005$ 大得多, 是一个数量级上的变化。虽然 $X_{\Sigma 0} < X_{\Sigma 1}$ (因为讨论的是 500 kV 枢纽变 220 kV 母线单相短路电流大于三相短路电流的情况), $X_{\Sigma 0}$ 占单相短路公式 $i^{(1)} = 3\dot{E} / (X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})$ 中分母总阻抗的 1/3 不到, 但是 $X_{\Sigma 1}$ 、 $X_{\Sigma 2}$ 、 $X_{\Sigma 0}$ 在数量级上同属一个数量级, 所以此时 $X_{\Sigma 0}$ 在同一个数量级上的变化, 对抑制 500 kV 枢纽变的 220 kV 母线单相短路电流作用较大。

以上分析的是 1 个 500 kV 变电站带一片 220 kV 变电站的情况, 2 个 500 kV 变电站带一片 220 kV 变电站也是同样的道理。

3 更换自耦变为非自耦变算例分析

以 2007 年冬季梅里片区和车坊吴江片区为例, 计算分别更换 500 kV 自耦变和 220 kV 自耦变后 500 kV 枢纽变 220 kV 母线单相短路电流变化情况。

3.1 梅里片

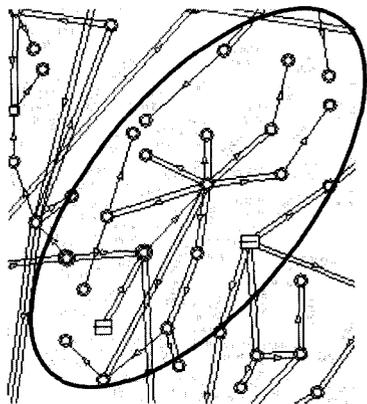


图 2 梅里片地理接线图
Fig.2 Geographical diagram of Meili grid

如图 2 所示, 2007 年冬季, 梅里片区由 500 kV 梅里变 (3×1000 MVA) 带一个 220 kV 片区, 220 kV 片区内有小环网也有辐射支路, 没有电厂接入。计算了三种情况下梅里 220 kV 母线的三相和单相短路电流。第一种是梅里 3 台 500 kV 主变以及其所在片区内 220 kV 主变均为自耦变的情况; 第二种是梅里

500 kV 主变保持为自耦变, 分区内 220 kV 自耦变为非自耦变 (每个 220 kV 站 1 台接地) 的情况; 第三种是梅里 500 kV 主变更换为非自耦变 (只有 1 台接地), 分区内 220 kV 保持为自耦变为非自耦变的情况。计算结果如表 1 所示。

表 1 梅里变 220 kV 母线单相短路电流

Tab.1 220 kV bus single-phase short-circuit current of Meili substation

项目	三相短路 电流/kA	单相短 路电流 /kA	正序等值 阻抗 /p. u.	负序等值 阻抗/p. u.	零序等值 阻抗/p. u.
分区内 220 kV 及 500 kV 均为自耦变 (全接地)	36.34	44.15	0.0076	0.0076	0.0036
更换分区内 220 kV 自耦变为非自耦变 (每个 220 kV 站 1 台接地)	36.34	42.98	0.0076	0.0076	0.0041
更换梅里 500 kV 自 耦变为非自耦变 (只有 1 台接地)	36.34	39.87	0.0076	0.0076	0.0056

3.2 车坊吴江片

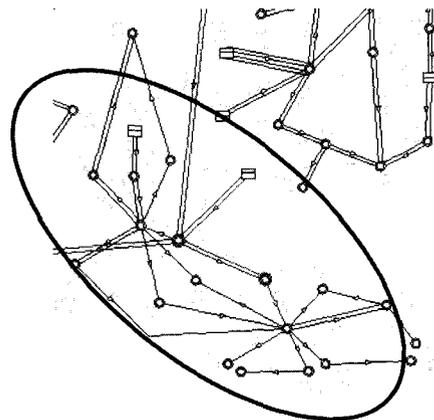


图 3 车坊吴江片地理接线
Fig.3 Geographical diagram of Chefang-Wujiang grid

表 2 车坊 220 kV 母线单相短路电流
Tab.2 220 kV bus single-phase short-circuit current of
Chefang substation

项目	三相短路 电流/kA	单相短 路电流 /kA	正序等值 阻抗/p. u.	负序等值 阻抗/p. u.	零序等值 阻抗 /p. u.
分区内 220 kV 及 500 kV 均为自耦变 (全接地)	43.67	51.24	0.0064	0.0064	0.0035
更换分区内 220 kV 自耦变为非自耦变 (每个 220 kV 站 1 台接地)	43.67	50.36	0.0064	0.0064	0.0038
更换车坊 500 kV 自 耦变为非自耦变 (只有 1 台接地)	43.67	47.00	0.0064	0.0064	0.0050

如图 3 所示, 2007 年冬季, 车坊吴江片区由

500 kV 车坊变 (2×1000 MVA) 和吴江变 (3×1000 MVA) 带一个 220 kV 片区, 220 kV 片区内有小环网也有辐射支路, 有少量电厂接入。同样计算了三种情况, 结果如表 2 所示。

从以上计算结果可以看出:

(1) 500 kV 主变 220 kV 母线单相短路电流大于三相短路电流, 大出约 7 kA。

(2) 更换自耦变为非自耦变, 不论是 500 kV 还是 220 kV 电压等级的主变, 都只对单相短路电流有作用, 对三相短路电流没有影响。因为更换自耦变为非自耦变就是改变变压器的接地方式而已, 仅仅影响零序等值阻抗, 正序负序阻抗不变, 因此只改变单相短路电流的大小, 三相短路电流不变。

(3) 保持 500 kV 主变为自耦变, 将分区内 220 kV 站内的自耦变更换为非自耦变 (即每个 220 kV 站内只有一台主变接地), 单相短路电流有所下降, 但下降幅度较小, 大约 1 kA, 对于抑制单相短路电流的作用较小。

(4) 保持分区内 220 kV 站内主变为自耦变, 更换 500 kV 主变为非自耦变 (即站内只有一台主变接地), 对于抑制单相短路电流的作用比较明显, 单相短路电流大约降低了 4 kA。

通过计算发现, 将 500 kV 变压器由自耦变更换为非自耦变, 对抑制 500 kV 变电站 220 kV 母线单相接地短路电流的抑制作用比较明显, 而将一个 220 kV 分区内的 220 kV 变压器由自耦变更换为非自耦变, 则对该分区内 500 kV 变电站 220 kV 母线单相接地短路电流的抑制作用不明显。

4 更换自耦变为非自耦变的可行性

这种方法对于已有的 500 kV 变电站耗资比较大, 而且也会使变电站较长时间处于停电状态, 但是对于新建变电站, 这个方法也许可以考虑。但是, 电力行业标准 (DL/T620-1997)《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》的 3.1.1 条规定: 330 kV 及 500 kV 系统中不允许变压器不接地运行。也就是说 500 kV 系统只能直接接地或经小电抗接地。主要原因是:

(1) 500 kV 系统若仿照 220 kV 系统的作法, 部分变压器不接地, 则不接地变压器中性点过电压比 220 kV 高很多, 过电压保护困难。不接地变压器运行也存在很大的安全隐患, 会存在与 110 kV 和 220 kV 中性点保护类似的问题, 发生中性点避雷器爆炸、间隙误动、误切变压器、“失地”和中性点绝缘破坏等事故。

(2) 500 kV 变压器中性点绝缘水平也要如同 220 kV 系统做法一样, 提高到半绝缘水平, 达到 250~275 kV 等级, 使得变压器的造价和制造难度大

幅度提高, 同时变压器的体积也要增大许多, 造成运输困难。总之, 500 kV 系统变压器中性点采用不接地方式在技术和经济上是不合理的。

500 kV 系统的变压器采用经小电抗接地方式比起采用不接地方式的过电压要低得多, 因而解决了不接地方式发生事故的隐患, 一般可降低中性点的绝缘水平到 66 kV 等级。但比起直接接地时要求的 35 kV 绝缘水平来说, 还是提高了绝缘水平。

因此, 500 kV 主变采用非自耦变以控制 220 kV 母线单相短路电流的方法, 在技术和经济上都还需要认真校核。

5 其他降低单相短路电流的措施

不管是梅里分区还是车坊吴江分区, 即使采用 500 kV 非自耦变压器, 单相短路电流仍然大于三相短路电流, 那么采用 500 kV 自耦变中性点加装小电抗的方式效果如何呢? 仍以 2007 年冬季车坊变为例, 计算结果如表 3。

表 3 不同小电抗值对应的车坊变 220 kV 母线单相短路电流
Tab.3 220 kV bus single-phase short-circuit current of Chengfang substation corresponding to different reactance values

小电抗阻值/ Ω	220 kV 母线单相短路电流/kA
0	51.24
5	44.40
10	41.88
15	40.56
20	39.75

可见, 加装 5 Ω 小电抗可将单相短路电流降至 44.40 kA, 与三相短路电流 43.67 kA 接近, 若加装 10 Ω 小电抗, 则可将单相降至比三相短路电流还低。所以加装小电抗对于降低单相短路电流的作用相当明显。不过, 在变压器中性点加装小电抗有可能造成其非有效接地, 需进行校核。另外, 自耦变中性点加装小电抗对系统工频过电压、操作过电压、雷电过电压和变压器绕组内部波过程都会产生一定影响, 因此校验计算以满足过电压和绝缘要求。由于小电抗的添加改变了系统零序阻抗, 因此还需调整相关继电保护定值。

其他还有如 220 kV 线路开断、搭接, 220 kV 母线分裂运行, 220 kV 分区运行等改变电网运行方式的措施降低短路电流措施, 它们不仅能降低 220 kV 母线单相短路电流, 还能降低三相短路电流。

6 结语

更换自耦变为非自耦变可以抑制 500 kV 枢纽变

(下转第 116 页 continued on page 116)

ms 延时清除该标志位。一旦装置启动元件动作且手合加速标志存在,则开放手合加速保护 200 ms,并退出纵联保护,启动收发信机发信。200 ms 后手合加速保护退出,纵联保护投入。通过上述措施,可以保证工频变化量方向纵联保护在手合过程中,两侧保护工频变化量方向继电器均感受正方向的情况下,不发生误动。

从发电厂侧微机保护故障录波报告可以看出,微机保护启动发信继电器,保护启动后,一直处于启动发信状态,而收信继电器仅短时动作。从变电所侧微机保护故障录波报告中可以看出,微机保护启动后启动发信继电器动作,在工频变化量方向元件感受为正方向时,立即停信。通过分析两侧微机保护故障录波报告可以得出结论:发电厂侧 RCS-901A 配合的 LFX-912 型收发信机在合环以前发生异常,在整个合环过程中,因为停信功能的光耦被击穿,导致一直处于停信状态。

1.4.2 变电所侧保护动作分析

由于发电厂侧 LFX-912 型收发信机一直处于停信状态,使得变电所侧 RCS-901A 型微机保护满足了纵联变化量方向动作的三个条件,因此在该线路合环过程中,发生误动跳闸。

2 结论

通过以上分析可以看出,对于使用 RCS-901A 型微机保护的线路,在线路送电过程中,一定要保证收发信机和高频通道的正常工作,才能避免类似事故再次发生。

(上接第 112 页 continued from page 112)

的 220 kV 母线单相短路电流,但是更换 500 kV 自耦变为非自耦变的作用比较大,而更换 220 kV 站内的自耦变为非自耦变作用比较小。对于现有的变电站,这种方法耗资比较大,对于新建变电站,500 kV 主变采用非自耦变以控制 220 kV 母线单相短路电流的方法,在技术和经济上都还需要认真考虑。因此,仅就降低 220 kV 母线单相短路电流而言,采用 500 kV 自耦变加装小电抗的措施是很有效的。改变电网运行方式则既可降低 220 kV 母线单相短路电流又能降低三相短路电流。

参考文献

[1] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社,2005.
ZHU Sheng-shi. The Theory and Technique of High Voltage Network Protection(Third Edition)[M]. Beijing: China Electric Power Press,2005.
- [2] 南京南瑞继保电气有限公司. RCS-901A(B.D)型超高压线路成套保护装置技术说明书[Z].2002.
NARI-Relays Electric Corporation Limited. Technical Manual for RCS-901A(B.D) Protection Equipment of Extra-high Voltage Transmission Line[Z].2002.
- [3] 于桂华. 微机保护装置中工频变化量方向元件的应用[J]. 电站系统工程,2004,20(4): 63.
YU Gui-hua. Application of Directional Element for Power-frequency variable at PC Protection[J]. Power System Engineering,2004,20(4): 63.
- [4] 南京南瑞继保电气有限公司. LFX-912、LFX-913 继电器保护专用收发信机[Z].2007.
NARI-Relays Electric Corporation Limited. LFX-912 LFX-913 Transceiver Specially Used for Relay Protection[Z].2007.

收稿日期: 2007-10-18

作者简介:

吴千(1980-),男,工学硕士,工程师,从事继电保护和变电站自动化工作; E-mail: tinyqianqian@126.com

王星洁(1981-),男,工学学士,助理工程师,从事继电保护和变电站自动化工作;

夏传帮(1980-),男,工学学士,助理工程师,从事继电保护和变电站自动化工作。

出版社, 1986.

LIU Wan-shun. Power System Fault Analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1986.

收稿日期: 2007-11-13; 修回日期: 2008-01-16

作者简介:

江林(1974-),女,硕士,工程师,从事电力系统分析计算工作; E-mail: jiang_lin@jsepc.com.cn

王自强(1979-),男,助理工程师,长期从事电力系统现场运行及继电保护工作;

张庆庆(1983-),女,整定计算专责,长期从事电力系统继电保护工作。