

基于 FTU 的小电流接地系统故障定位方法再研究

吴杰, 王政

(东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 结合配电网基于 FTU 的馈线自动化工作模式, 提出了一种基于 FTU 的小电流接地系统故障定位方法: “递进组合识别法”。该方法根据基于 FTU 馈线自动化的特性, 将零序电流增量分析法和谐振频率信号电流注入法两种选线方法加以改进, 并将改进后两个判据模块组合使用, 以弥补两种判据各自存在的局限。文中分别介绍两种判据模块的基本原理及判据, 并用 Matlab 6.0 在不同中性点运行方式及过渡电阻的故障情况下对这两种判据模块做了仿真, 结果证明“递进组合识别法”不仅有效弥补了目前已有小电流单相接地故障选线的缺陷, 而且更将故障具体定位在线路故障最小切除单元: 两相邻分段开关之间, 实现了快速、可靠的故障定位。

关键词: 中性点; 递进组合识别法; 零序电流; 谐振

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)22-0029-06

0 引言

现有的小电流接地系统单相接地故障选线方法有: 拉线法、零序电流比幅法、零序电流相对相位法^[1]、群体比幅比相法、谐波分量分析法^[2]、基于 (I_{sin}) 原理的方法^[3]、有功分量方向法^[4]、首半波法^[5]、“S 注入法”^[6]等。但这些选线方法不能同时很好地满足以下几个方面的要求: 不受 CT 饱和和产生的不平衡电流的影响; 不受过渡电阻 R_f 大小的影响; 不受故障引入时间的影响; 不受流经中性点消弧线圈补偿电流的影响, 既能适用于中性点不接地系统, 又能适用于中性点经消弧线圈

接地系统。另一方面, 这些方法只能实现故障选线, 而不能将故障具体定位在线路上相邻两个分段开关之间的区间里。

1 基于 FTU 小电流接地系统单相接地故障定位复合判据的提出

本文将基于 (I_{sin}) 原理的方法和注入变频信号法^[9,10]相结合, 并结合基于 FTU 馈线自动化的工作原理和特点^[7,8], 将两种选线方法加以改进, 提出了基于 FTU 的“递进组合识别法”。图 1 为实现基于 FTU 的馈线自动化的中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时的系统示意图。

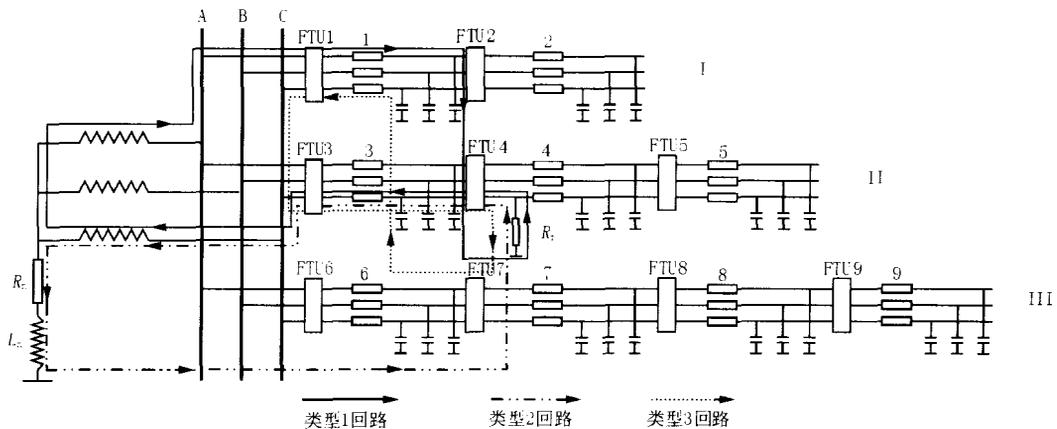


图 1 中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时的系统结构简图

Fig. 1 Systematic structure with neutral grounding by arc while a single phase fault occurs

在“递进组合识别法”里, 利用故障后系统自身产生的零序电流作为研究对象的“零序电流增量分

析法”优先于“谐振频率信号电流分析法”使用。在第 2 节中将分析到当过渡电阻数值太大时, 工频零

序电流数值很小,将不能满足“零序电流增量分析法”的精确工作电流。这时按照“递进组合识别法”规定将进入“谐振频率信号电流分析法”继续判断。第3节将分析到“谐振频率信号电流分析法”要求过渡电阻数值不能太小,这种情况恰好在“零序电流增量分析法”的有效工作区内,因此这两种方法可以弥补各自的缺陷。

2 “零序电流增量分析法”基本原理及判据

2.1 “零序电流增量分析法”基本原理^[11]

分析系统的零序等值图,见图2。图中 U_{g0} 表示故障接地点处的零序电压。根据文献[14]中提供的架空线路参数可知:线路分布参数的等值电阻和感抗值远小于线路对地容抗以及中性点消弧线圈支路的阻抗,因此可以忽略不计。

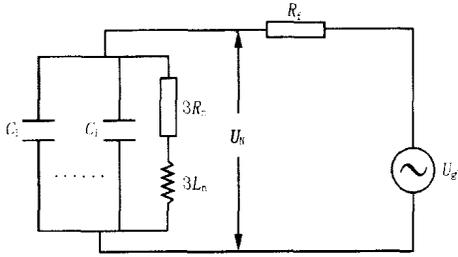


图2 计算稳态时零序电流的等值电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of stable zero-sequence current

图中, C_i 为每个区段的等值接地电容, R_n 、 L_n 分别为中性点消弧线圈支路的电阻和电抗, U_N 为母线处零序电压。由图2计算可得流经线路上各区段接地电容的零序电流的表达式为:

$$I_i = U_N j \omega C_i \quad (1)$$

计算流经中性点消弧线圈支路的零序电流的表达式为:

$$I_n = \frac{U_N}{3R_n + j3\omega L_n} \quad (2)$$

由于考虑到 CT 饱和产生的不平衡电流,故障前在区段上 FTU 将会测出一定数值的零序电流。考虑到故障前后短时间内线路上的负荷电流数值基本不变,因此可以假设故障前后短时间内由于 CT 饱和产生的零序电流数值不变。以故障后检测到的零序电流减去故障前检测到的零序电流所得的增量作为研究对象,可以消去 CT 饱和产生的零序电流的影响。

在中性点不接地系统中,若以母线指向线路方向为正方向,那么故障前后流经故障区段左侧线路

上的 FTU 的零序电流增量总是滞后母线处零序电压 $/2$ 相位,若将该电流在母线处零序电压及其垂直方向上进行分解,那么在滞后母线零序电压 $/2$ 方向的分解量为正值。流经故障区段右侧线路及正常线路上 FTU 的零序电流增量总是超前母线处零序电压 $/2$ 相位,将该电流在母线处零序电压及其垂直方向上进行分解,其在滞后母线零序电压 $/2$ 方向上的分解量为负值。

在中性点经消弧线圈接地系统中,由于消弧线圈中电流的补偿作用,若以母线指向线路方向为正方向,故障前后流经故障区段左侧的 FTU 的零序电流增量在滞后母线处零序电压 $/2$ 方向上的分量可能是正值(对应欠补偿情况),也可能是负值(对应过补偿情况)。而流经故障区段右侧线路或正常线路上 FTU 的零序电流增量仍然超前母线处零序电压 $/2$ 相位。此时由于中性点消弧线圈支路上有电阻存在,流经消弧线圈支路的零序电流中含有电阻性的电流分量,将流经故障区段左侧线路上 FTU 的零序电流增量在母线处零序电压及其垂直方向上进行分解,那么在滞后母线处零序电压 $/2$ 方向上的分量为正值。

但如果过渡电阻 R_f 数值较大时,式(1),式(2)中母线处零序电压 U_N 数值很小,这时 I_i 、 I_n 数值很小,不能满足精度工作电流要求,这时“零序电流增量分析法”将会失效。

2.2 “零序电流增量分析法”判据

为了保证计算的精度要求,设定一个最小精度要求的“零序电流增量分析法”判据整定值 I_{wpz} ,可得“零序电流增量分析法”的判据如下所示:

```

if 中性点不接地
{if Min{| F(m)| , m = 1, 2, ..., M} > I_wpz & ∃ m (1, 2, ..., M), F(m) - F(m - > next) < 0 & F(m) > 0
    断定 m 区段发生故障;
elseif Min{| F(m)| , m = 1, 2, ..., M} > I_wpz & ∀ m (1, 2, ..., M), F(m) - F(m - > next) > 0
    断定母线发生故障;
else
    “零序电流增量分析法”无法满足精度要求,进入下一层判据:“谐振频率信号电流注入法”
endif}
if 中性点经消弧线圈接地
{for m = 1 : M
{if K(m) > I_wpz
Flag(m) = 1;
else
    
```

```

Flag(m) = - 1
endif}
if  ∃m ( 1,2, ...,M ),Flag(m) ·Flag(m - > next) <
0&Flag(m) = 1
    断定 m 区段发生故障;
else
    “稳态零序电流增量分析法”无法满足精度要求,进入下一层判据:“谐振频率信号电流注入法”
endif}
    
```

其中 $F(m) = \{ I_{m-0} \cos[\arctan(I_{m-0(lm)} / I_{m-0(Re)}) - \arctan(U_{0(lm)} / U_{0(Re)}) + / 2] \}$ 为流经区段 m 零序电流增量在滞后母线处零序电压 U_0 方向上分量;

$K(m) = \{ I_{m-0} \cos[\arctan(I_{m-0(lm)} / I_{m-0(Re)}) - \arctan(U_{0(lm)} / U_{0(Re)}) +] \}$ 为流经区段 m 零序电流增量在滞后母线处零序电压 U_0 方向上分量

$$m - > next = \begin{cases} m + 1 & (1 \leq m < M) \\ 1 & (m = M) \end{cases} \quad \text{其中, } M \text{ 为线}$$

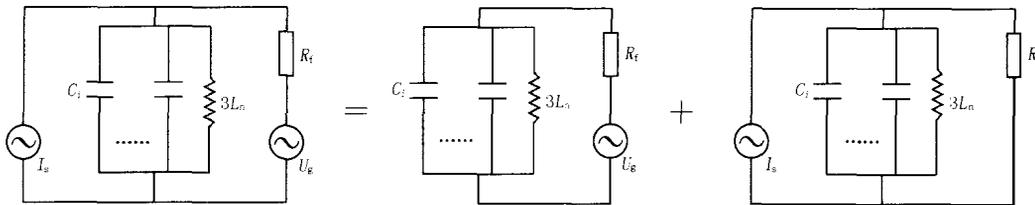


图3 接入信号电流后系统的零序电流等值图

Fig. 3 Equivalent diagram of zero sequence current after injecting signal current

ω 为对应 f_x 的角频率。当 ω 满足

$$3j \omega L_n = \frac{1}{j \omega \sum_i C_i} \quad (3)$$

时,有:

$$3j \omega L_n // \frac{1}{j \omega \sum_i C_i} \rightarrow \quad (4)$$

这时有:

$$I_{s0} \approx I_s \quad (5)$$

从这里可以看出,由于消弧线圈电感或谐振电感和对地电容发生并联谐振,式(4)中两者并联支路阻抗值非常大,因而可以保证即使 R_f 为某一较大数值时,式(5)仍然能够成立。

这时流经各对地电容支路的谐振频率信号电流为:

$$I_{s0i} = I_{s0} \cdot R_f \cdot j \omega \sum_i C_i \quad (6)$$

母线处测得的谐振频率信号电压为:

$$U_s = I_{s0} \cdot R_f \quad (7)$$

路区段总和。 $m - > next$ 为 m 的下一个区段。

3 “谐振频率信号电流注入法”的基本原理及判据

3.1 “谐振频率信号电流注入法”的基本原理^[9,10]

谐振频率信号电流注入法的基本原理是:在中性点处接入一个信号电流源 I_s ,使该电流源的频率 f_x 满足并联谐振要求。由于在中性点处注入信号电流,因此该信号电流将在系统中产生频率为 f_x 的零序电流。由线性电路的叠加性可知,将信号电流注入系统后,稳态零序等值电路分解为两个等值电路之和:一个以稳态工频电压源为激励,就是“零序电流增量分析法”中对应的等值电路图;而另一个以谐振频率信号电流源为激励。“谐振频率信号电流注入法”着重分析后一个等值电路,其等值图如图3所示。

由上面几个式子可知,从中性点处注入谐振频率零序电流后,流经故障点处的信号电流 I_{s0} 和中性点处谐振频率零序电压 U_s 相位基本相同,而经对地电容流入地的谐振频率零序电流 I_{s0i} 超前 U_s 近似 $1/2$ 相位,而流经故障区段左侧线路上 FTU 的谐振频率零序电流应该是两者之和;而流经故障区段右侧和正常线路上 FTU 的谐振频率零序电流只包含了经对地电容流入地的谐振频率零序电流部分。因此若将各 FTU 测得的信号频率零序电流在 U_s 方向及其垂直的方向上进行分解,那么流经故障区段左侧线路 FTU 的谐振频率零序电流在 U_s 方向的分解量数值接近于 I_{s0} ,而流经故障区段右侧和正常线路上 FTU 的谐振频率零序电流在 U_s 方向上分解量数值非常小。

信号电流发生装置是一个类似于综合电能质量补偿器的电力电子装置,该装置可通过静态并联补偿器注入信号电流,而且可以调节信号电流的频率。该装置通过内部电路的隔离可使整个装置的等值阻抗无穷大,对原系统的运行不产生影响。所以该信

号电流源可以实现并能够达到预期的效果。

3.2 “谐振频率信号电流注入法”的判据

若设定“谐振频率信号电流注入法”的判据整定值为 I_{xpz} , 在图 1 所示仿真系统中, 考虑到线路电阻, 电感分布参数的影响, 流经故障区段左侧线路 FTU 的谐振频率零序电流在 U_S 方向上分量数值会减小, 本文设定 $I_{xpz} = I_S/4$, 我们可以得出以下“谐振频率信号电流注入法”判断模块的判据:

```

if  $\exists m (1, 2, \dots, M), S(m) > I_{xpz} \& S(m - next) < I_{xpz}$ 
    断定 m 区段发生故障;
elseif  $\forall m (1, 2, \dots, M), S(m) < I_{xpz}$ 
    母线发生故障;
endif
 $S(m) = I_{Sm-0} \cos[\arctan(I_{Sm-0(I_m)} / I_{Sm-0(Re)}) -$ 
    
```

$\arctan(U_{S(I_m)} / U_{S(Re)})]$ 为流经区段 m 的谐振频率零序电流在母线处谐振频率零序电压方向上的分量。 $m - next$ 的定义和 2.2 节相同。

但谐振频率信号电流注入法存在着一个不足的地方, 当过渡电阻较小时, 根据式(7)可知, 在中性点处产生的谐振频率零序电压数值很小, 线路上谐振频率零序电流在其方向上作分解时, 会产生较大误差, 而且这时线路上的电阻、电感数值不能忽略不计, 对结果有较大影响。

4 基于 FTU“递进组合识别法”的仿真

本文借助 Matlab 6.5 软件对中性点接地方式不同的一个 10 kV 系统进行了仿真, 仿真示意图见图 4。

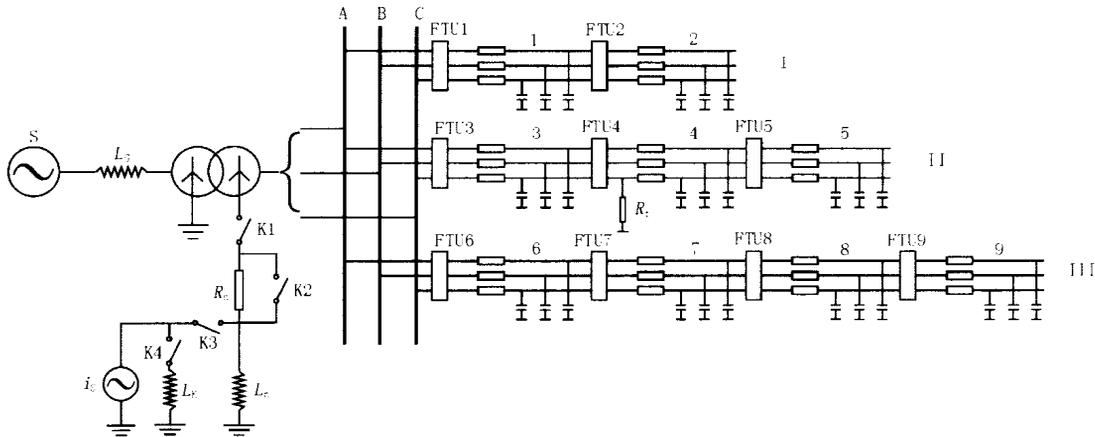


图 4 小电流接地系统单相接地故障仿真示意图

Fig. 4 Simulation of a single-phase-to-ground fault in a power system with neutral unearthed

为了模拟由于 CT 饱和而产生的不平衡电流的影响, 在故障前后线路各 FTU 测量点采样的数据上分别加上不同相位的某小幅值工频干扰电流分量。系统仿真模型各元件参数如下^[12~14]:

电源 S 电压为 $110/\sqrt{3}$ kV; 电源等值电感为 0.096 H; 变压器变比为 110/10 kV, 一次绕组采用星形中性点直接接地方式, 二次绕组设为中性点不接地或中性点经消弧线圈接地两种可调接线方式, 短路损耗 $P_k = 148$ kW, 短路电压 $U_s \% = 10.5 \%$; 每个区段架空线路的长度为 10 km, 架空线正序电阻, 零序电阻, 正序电感, 零序电感, 正序对地电容, 零序对地电容值分别为 $R_{L1} = 0.17 \Omega/\text{km}$, $R_{L0} = 0.23 \Omega/\text{km}$, $L_{L1} = 7.6 \times 10^{-3}$ H/km, $L_{L0} = 34.4 \times 10^{-2}$ H/km, $C_{L1} = 61 \times 10^{-9}$ F/km, $C_{L0} = 38 \times 10^{-9}$ F/km; 负荷以恒定功率负荷表示, 通过配电变压器接入系统, 配电变压器短路损耗 $P_k = 10$ kW, 短路电压 $U_s \% = 4.5 \%$ 。

如图 4 所示仿真系统, 设定区段 4 的 C 相线路发生单相接地故障。

(1) 中性点不接地系统过渡电阻数值较小

令过渡电阻 $R_f = 50 \Omega$, 以线电压 U_{AB} 为参考相量, 即可寻找到故障前流经各 FTU 的零序电流和故障后出现的母线处零序电压及零序电流的相位关系, 可以算出故障后的零序电流增量, 并得到流经各 FTU 的零序电流增量在滞后母线处零序电压 $\sqrt{2}$ 方向上的分量见表 1。

表 1 流经各 FTU 的零序电流增量在滞后母线处零序电压 $\sqrt{2}$ 方向上的分量

Tab. 1 The component of zero sequence current via every FTU on the direction behind the zero sequence voltage on bus

	FTU1	FTU2	FTU3	FTU4	FTU5	FTU6	FTU7	FTU8	FTU9
数值/A	-2.63	-1.32	8.19	9.42	-1.05	-5.56	-4.23	-2.85	-1.43

根据“零序电流增量分析法”判据, 可得故障发生在 FTU4 和 FTU5 之间的区段 4。

(2) 中性点经消弧线圈接地系统过渡电阻数值较小
 设过渡电阻 $R_f = 50$,中性点经消弧线圈支路上 $R_n = 100$, $L_n = 1$ H, 计算出流经各 FTU 的零序电流增量在母线处零序电压方向上的分量见表 2。

表 2 流经各 FTU 的零序电流增量在
 母线处零序电压方向上的分量

Tab. 2 Component of zero-sequence current via every
 FTU on the direction of zero-sequence voltage on bus

	FIU1	FIU2	FIU3	FIU4	FIU5	FIU6	FIU7	FIU8	FIU9
数值/A	-0.025	-0.013	2.355	2.355	0.046	-0.062	-0.049	-0.034	-0.017

根据“零序电流增量分析法”判据,可断定故障区段为 4,结论正确。

(3) 中性点不接地系统过渡电阻数值较大

设定从中性点处接入的信号电流源频率为 25 Hz,幅值为 2 A,过渡电阻大小为 10 000 ,表 3 为流经各区段 FTU 谐振频率零序电流在母线处谐振频率零序电压方向上的分量。

表 3 流经各区段 FTU 谐振频率零序电流在
 母线处谐振频率零序电压方向上的分量

Tab. 3 Component of zero-sequence current at resonant
 frequency via every FTU on the direction of
 zero-sequence voltage at resonant frequency

	FIU1	FIU2	FIU3	FIU4	FIU5	FIU6	FIU7	FIU8	FIU9
数值/A	0.01	0.01	0.64	0.64	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01

根据“谐振频率信号电流注入法”判据,可以判断出故障发生在 FTU4 和 FTU5 之间的区间 4,结论正确。

(4) 中性点经消弧线圈接地系统过渡电阻数值较大

设定过渡电阻为 10 000 ,中性点消弧线圈电感值 L_n 为 1 H,表 4 为流经各 FTU 的零序电流在母线处零序电压方向上的分量。

表 4 流经各 FTU 的零序电流在母线处
 零序电压方向上的分量

Tab. 4 Component of zero-sequence current at resonant
 frequency via every FTU on the direction of
 zero-sequence voltage at resonant frequency

	FIU1	FIU2	FIU3	FIU4	FIU5	FIU6	FIU7	FIU8	FIU9
数值/A	0.06	0.03	0.55	0.54	0.04	0.13	0.10	0.07	0.04

根据“谐振频率信号电流注入法”判据,可以判断出故障发生在 FTU4 和 FTU5 之间的区间 4,结论正确。

5 结论

经过仿真检验,由两种判断方法所组成的“递进组合识别法”可以从以下几方面很好地解决已有选线方法的局限。

1) 当过渡电阻不大时,采用“零序电流增量分析法”能够很好地判断出故障位置;当过渡电阻较大时,采用“谐振频率信号电流注入法”可以准确地判断出故障位置。适用于很大范围过渡电阻的变化。

2) 在克服 CT 饱和产生的不平衡电流方面:“递进组合识别法”中两种方法分别以故障前后稳态零序电流增量和谐振频率零序电流作为研究对象,在假设故障前后、接入信号电流源前后由 CT 饱和产生的不平衡电流基本保持不变的前提下,通过差量的形式消除数据采样中 CT 不平衡电流的影响。

3) “递进组合识别法”两个判据既满足中性点不接地系统,又满足中性点经消弧线圈接地系统。

4) 在基于 FTU“递进组合识别法”的每个判据模块中,通过比较各 FTU 测量数据,能够将故障定位在线路上故障最小切除单元:两个相邻 FTU 之间。

参考文献:

- [1] 肖白,束洪春,高峰 (XIAO Bai, SHU Hong-chun, GAO Feng). 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述 (Survey Methods of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Fault in Networks with Ungrounded Neutral) [J]. 继电器 (Relay), 2001, 29(4): 17-20.
- [2] 郝玉山,高曙,杨以涵,等 (HAO Yu-shan, GAO Shu, YANG Yi-han, et al). MLN 系列小电流接地微机选线装置动作原理 (Action Principles about Microcomputerized Line Selection of Series MLN in Small Grounding Current System) [J]. 电力情报 (Electric Information), 1994, (2): 7-11.
- [3] 檀国彪,涂东明,陈大鹏 (TAN Guo-biao, TU Dong-ming, CHEN Da-peng). 基于最大 Isin 或 (Isin) 原理的微机选线装置 (Microcomputerized Fault Line Discriminator Based on Active Component Direction of Zero-sequence Current) [J]. 中国电力 (Electric Power), 1995, 28(7): 16-20.
- [4] 袁进伶,张涛 (YUAN Jin-ling, ZHANG Tao). 6~66kV 电力系统电容电流自动跟踪补偿及接地选线装置及应用 (Theory and Application of Capacitive Current Automatic Tracing Compensation and Grounded Line Selection) [J]. 中

- 国电力 (Electric Power), 1998, 31(1): 67-68.
- [5] 贺家李, 宋从矩 (HE Jia-li, SONG Cong-ju). 电力系统继电保护原理 (Principles of Relay Protection in Electric Power System) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1994. 56-64.
- [6] 王慧, 范正林, 桑在中 (WANG Hui, FAN Zheng-lin, SANG Zai-zhong). "S注入法"与选线定位 (The "S Signal Injection Method" and Its Application in Single Phase-to-earth Fault Line Identification and Fault Point Location) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 1999, 19(3): 18-20.
- [7] 方富淇 (FANG Fu-qi). 配电网自动化 (Distribution Automation) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2000. 9-11.
- [8] 刘健, 倪建立, 邓永辉 (LIU Jian, NI Jian-li, DENG Yong-hui). 配电网自动化系统 (Distribution Automation System) [M]. 北京: 中国水利水电出版社 (Beijing: Publishing House of China Water Resources and Hydropower), 1999. 60-84.
- [9] Zeng X J, Li K K, Chan W L, et al. On-site Safety Evaluation for Earth Fault in Mining Power Systems [J]. Thirty sixth IAS Annual Meeting, 2001. 2: 1404-1410.
- [10] 曾祥君, 尹顶根, 于永源, 等 (ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, YU Yong-yuan, et al). 基于注入变频信号法的消弧线圈接地系统控制与保护新方法 (New Methods for Control and Protection Relay in a Compensated Medium Voltage Distribution Network Based on Injecting Various Frequency Current) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2000, 20(1): 29-32.
- [11] 王政, 吴杰 (WANG Zheng, WU Jie). 配合 FTU 的小电流系统单相接地故障定位方法 (Method of Single Phase Grounding Fault Location for FTU in Networks with Ungrounded Neutral) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2003, 23(2): 21-26.
- [12] 唐松建 (TANG Song-jian). 中性点不接地系统单相接地故障测距研究 (硕士学位论文) (Research on Single Phase-to-earth Fault Distance Measure in Neutral Ungrounded System, Thesis) [M]. 南京: 东南大学 (Nanjing: Southeast University), 1997. 9-13.
- [13] 贾清泉, 肖鹏, 杨以涵, 等 (JIA Qing-quan, XIAO Peng, YANG Yi-han, et al). 小电流接地电网单相接地故障的小波选线方法 (Wavelet Line Selection Method for Single Phase-to-earth in Small Grounding Current Systems) [J]. 继电器 (Relay), 2001, 29(3): 5-8.
- [14] 曹绳敏 (CAO Sheng-min). 电力系统课程设计及毕业设计参考资料 (Course Design of Electric Power System and Reference Documents of Graduate Design) [M]. 北京: 中国水利水电出版社 (Beijing: Publishing House of China Water Resource and Hydropower), 1995.

收稿日期: 2004-03-15; 修回日期: 2004-05-18

作者简介:

吴杰 (1946 -), 男, 副教授, 从事电力系统运行与控制, 配电网自动化等方面的研究; E-mail: wujie@seu.edu.cn

王政 (1979 -), 男, 助教, 从事电力系统运行与控制, 配电网自动化等方面的研究。

Reinvestigation for approaches to fault location based on FTU in power system with neutral unearthed

WU Jie, WANG Zheng

(Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the working mode of feeder automation based on FTU, a method of fault location in power system with neutral unearthed based on FTU is put forward and it is named as "gradual and combined identifying law". According to the features of feeder automation based on FTU, the two line choosing methods, which are zero-sequence current increment analysis method and signal current with resonant frequency injection method, are modified and combined to make up their shortcomings. The basic principles and criterions of two methods are also introduced. With Matlab6.1, simulation about the two methods are implemented under different neutral running modes and different grounding resistors, and the result has proved that the proposed method will not only make up the shortcomings of current line choosing methods when single-phase grounding fault happens in power system with neutral unearthed, but also locate the fault in the minimal unit on feeders: the segment between two close switches can realize fast and credible fault location.

Key words: neutral point; gradual and combined identifying law; zero-sequence current; resonance