

# 配电网单相接地故障选线方案

肖白<sup>1,2</sup>, 穆钢<sup>1</sup>, 黎平<sup>1</sup>, 束洪春<sup>3</sup>

(1. 东北电力学院电力工程系, 吉林 吉林 132012; 2. 华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003;

3. 昆明理工大学电气工程学院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 配电网单相接地故障选线问题由来已久, 以往的研究主要集中在相对理想情况下的基于单一特征量的选线方法, 而缺乏对单相接地故障的准确确认和对故障信息的充分、有效利用, 并且对选线判据在复杂条件下的自适应性和容错性的分析不够深入, 这就导致了在实际的生产运行中难以正确实现既定的选线方法, 最终容易造成误选。该文首先区分可能造成混淆的故障类型; 然后提出了同时运用电压、电流分量的自适应性强、容错性能好的内积选线判据; 最后, 提出考虑极端情况下的补救方法, 从而实现了选线方法在理论上的完备性。大量的 EMTP 仿真分析结果都表明, 该方法能够准确地判定单相接地故障、可靠地选出接地线路, 具有很强的鲁棒性。

**关键词:** 配电网; 单相接地故障; 故障选线; 小波变换; 继电保护

**中图分类号:** TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)24-0001-05

## 0 引言

我国 3 ~ 60 kV 的配电网普遍采用中性点不接地、经高阻接地或经消弧线圈接地的运行方式, 即在大多数情况下属于小接地电流系统。这种系统的优点是供电可靠性高, 人身、设备安全性好。但与此同时, 由于单相接地时故障电流较小, 造成了故障选线的困难。

为解决这一问题, 国内外学者进行了深入而广泛的研究, 提出了多种选线方法 (如图 1 所示), 并开发出了相应的保护装置, 先后推出了几代产品。然而迄今为止, 此类装置在实际运行当中的效果仍然不能令人满意<sup>[1]</sup>。

由于并不要求故障瞬时得到选线结果, 而是及时即可, 这就为离线处理, 采用复杂、高级的分析方法提供了可能。本文讨论了现有选线装置选线不准的原因, 并通过对现有选线方法的分类分析, 论证了基于单一特征量的选线方法存在缺陷是不可避免的; 提出了使用多特征量的、新的选线方法; 建立了能够充分利用故障信息的小波判据; 增添了辅助判据, 从而避免了主选线判据在极端情况下可能出现的失效状态。分别在不同的接地位置、过渡电阻、故障类型的情况下, 应用 EMTP 进行了大量的仿真试验, 得到了令人满意的结果。

## 1 现有选线方法的不足

### 1.1 使用单一特征量的问题

为了阐述基于单一特征量的选线方法存在的固

有缺陷, 这里把现有的选线方法分为三大类, 如图 1 所示。

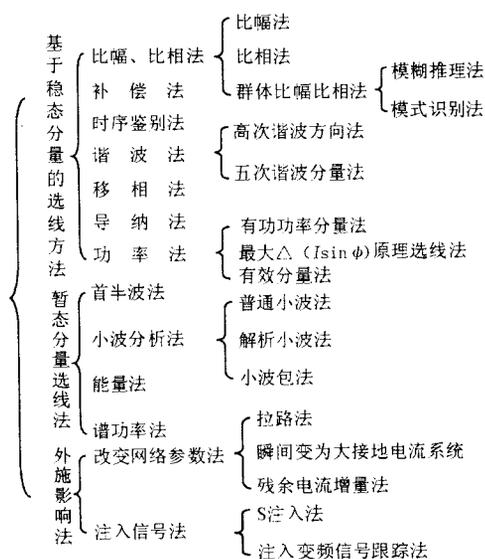


图 1 单相接地故障选线方法

Fig 1 Methods of fault circuit selection for phase-A-to-ground faults

由图 1 可知, 为了能够适用于中性点各种运行方式, 基于稳态分量的选线方法通常使用零序电流的高次谐波或基波中的某些分量作为特征量。然而, 对于小接地电流系统来说, 稳态故障分量的特点是相对稳定, 但不明显, 如果再计及互感器误差、信道衰耗和负荷不对称等多种因素的影响, 很容易出现误判的情况。而且, 该类方法无法反映哪条线路更容易出现瞬时性单相接地故障 (即存在事故隐

患),在单相电弧接地的情况下更是失去效用<sup>[2]</sup>。

基于暂态分量的选线方法是以暂态故障分量作为特征量的,在理论上可适用于中性点的各种运行方式。不过,暂态分量的特点是相对明显,但是很不稳定,特别是在故障相电压过零值附近时,几乎没有暂态过程而直接进入稳态;以及如何充分、有效地利用暂态故障信息,是实现该类方法时必须解决好的两个问题。另外,过渡电阻的大小直接影响到暂态分量幅值的大小,从而影响到选线结果是否正确。

基于外施影响的选线方法在选线准确性方面是可以令人满意的。但是该类方法大多需要对一次设备进行操作,可见其选线的准确性是以牺牲人身、设备安全为代价而得到的。注入法则会受到过渡电阻较高、适用的电压等级较低(通常是10 kV)、运行和维护工作量较大及间歇性电弧等问题的困扰。

综上所述,现有的基于单一特征量的选线方法在理论上就是不完备的。

### 1.2 永久性单相接地故障判定的问题

现有的选线方法基本上都是以零序电压大于整定值就启动选线装置并执行其判线结果的。但是当系统发生铁磁谐振,或电压互感器(其一次侧有叠落式开关的情况)一次侧熔断时也会出现零序电压,而且其幅值大于整定值。若此时仍然按照单相接地故障来处理,则势必导致误动。

### 1.3 缺乏补救措施的问题

由于配电网运行条件非常复杂,选线过程受互感器误差、线路长短、故障位置、故障时刻、过渡电阻、负荷等多种因素的影响,一旦在极端情况下误选,则只能恢复使用原始的手动选线方法,阻碍了真正实现配电自动化。

### 1.4 将小波分析应用于选线时的问题

到目前为止已有多篇文献提出利用小波工具来确定故障线路的不同方法,可以大大提高选线精度<sup>[1]</sup>。但笔者认为这些方法还需要完善,例如在做好基前的预处理、基后的善后处理,明确阐述整个处理过程与选线问题物理本质的对应关系,以及避免使用阈值、提高容错性能等方面,还可以深入研究。

最后需指出,使用负序分量、分量或相电流作为特征量的各种选线方法并未在图1中给出。

## 2 选线原理

针对上述选线方法的不足,把充分、有效地利用故障信息作为出发点,采取以暂态故障信息为主,同时兼顾稳态故障信息,最后辅以补救措施的方法,从

而实现准确选线的目的。

### 2.1 单相接地故障的判定

粗判(启动原则)

当  $u_0 > u_{dz}$  时,初步认为是单相接地故障。其中:  $u_{dz} = 15\% u_\phi$ ,  $u_\phi$  为相电势。即使是瞬时越限也要启动保护。

细判(执行原则)

当某两相电压高于额定值而另外一相电压低于额定值,并且各条线路对地电容电流不为零时,可以最终判定发生了永久性单相接地故障。

### 2.2 基于小波变换的选线方法

#### 2.2.1 故障后零序电流的特点

小接地电流系统发生单相接地故障之后,非故障线路上零序电流的频率成分主要包括工频、系统主谐振频率、以及该线路的自由振荡频率;故障线路上零序电流的频率成分则主要包括工频、系统主谐振频率、所有出线的自由振荡频率<sup>[3]</sup>。一方面,由于线路的自由振荡频率主要取决于该线路的长度、阻抗等参数,所以不同线路的自由振荡频率也各不相同,甚至相差较大,分布在较广的频带内,故该频率下的电流分量不利于进行集中比较;另一方面,系统主谐振频率下的电流分量在非故障线路上表现为从母线指向线路,在故障线路上表现为从线路指向母线,而且便于进行集中比较。

综上所述,可以通过对故障后零序电压进行分析,确定出系统的主谐振频率,然后利用各线路上零序电流在该频率及其附近范围内的分量实现选线。不难看出,该方法不论使用暂态分量,还是稳态分量都同样成立。不过,由于故障电压、电流在暂态过程中的数值比稳态时大几倍甚至几十倍,所以利用暂态量实现故障选线,必然具有更高的灵敏性和可靠性。

#### 2.2.2 小波基的选取

小波函数在理论上有无限多种,由其引出的小波基所具有的性质也各不相同,可以满足各种问题的需要。但对同一个信号利用不同的小波基进行处理,取得的效果并不相同,甚至差异较大。所以为了得到令人满意的结果,就必须对小波函数进行适当的选取<sup>[4]</sup>。

虽然目前还没有一个成熟的方法来确定在解决具体问题时所需的最佳小波函数,但通常有两种做法:一是把各种小波函数分类,并总结出每类小波函数的性质和特点,结合要解决的问题来确定使用哪一类,并在该类中进行试验比较来确定使用哪一个

小波函数得到的效果更好;二是根据问题的需要,构造出新的、适用的小波函数。

文献[5]利用汉明窗函数构造出了一个新的小波函数,具有分频严格、线性相位、良好的计算性及对信号奇异性非常敏感等优点。由于频带划分严格,不会出现混叠现象;具有线性相位,对通频带内的频率成分不会产生相位失真;对信号奇异性敏感,可以准确地描述暂态信号中突变的相位及大小,所以本文选用该小波函数进行选线,其时域和频域波形分别如图2(a)、(b)所示。

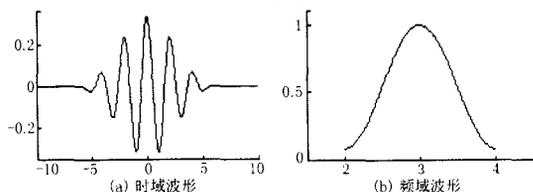


图2 小波函数

Fig 2 Wavelet function

### 2.2.3 内积判据(主判据)

首先,对零序电压在故障后四个周波内的数据进行小波变换,找出能量集中并且满足2.2.1小节要求的频带,从而确定出在小波变换的哪一个尺度下建立选线判据最好。

其次,对各出线上零序电流在故障后四个周波内的数据进行小波变换,在既定的变换尺度下得到一组小波系数 $w_{n0i}$ ,其中 $n$ 表示线路编号, $i$ 表示小波系数的序号。然后,任意选定一条出线作为参考线路,将其上零序电流的小波系数序列分别与其它线路上的零序电流小波系数序列做内积,并把这一内积结果作为一种测度,用 $S$ 来表示。

$$S_k = [W_{j0}, W_{k0}] = \sum_{i=1}^m (W_{ji} \cdot W_{ki}) \quad (1)$$

式(1)中, $j$ 是被任意选定的那条参考线路的编号; $k$ 是剩余线路的编号,即 $k = 1, 2, \dots, n$ ,且 $k \neq j$ ;  $n$ 是总的出线数目; $m$ 是小波系数的个数。

最后,就可以建立如下的选线判据:

1)若 $S_{jk}$ (其中: $k = 1, 2, \dots, n$ ,且 $k \neq j$ )不同时大于零或小于零,则使 $S_{jk} > 0$ 成立的线路是非故障线路;而使 $S_{jk} < 0$ 成立的线路是故障线路。

2)若 $S_{jk}$ 同时小于零,则线路 $j$ 为故障线路。

3)若 $S_{jk}$ 同时大于零,则为母线故障。

### 2.3 改进的拉路选线法

#### 2.3.1 切除非故障线路前后零序电流的变化

假设由于某种原因造成了选线装置误动作,那么在切除某一条非故障线路之前,非故障线路上的

零序电流幅值等于自身的对地电容电流 $|I_{0i}|$ ;故障线路的零序电流幅值等于所有非故障元件的对地电容电流与补偿电流之和 $|I_{0L} - \sum_{i=1, (i \neq f)}^n I_{0i}|$ ,其中 $f$ 表示故障线路的编号。

在切除某一条非故障线路之后,其余非故障线路上的零序电流幅值仍然等于自身的对地电容电流 $|I_{0i}|$ ;而故障线路的零序电流幅值此时则变为余下的所有非故障元件的对地电容电流与补偿电流之和

$|I_{0L} - \sum_{i=1, (i \neq f, k)}^n I_{0i}|$ ,其中 $f$ 表示故障线路的编号, $k$ 表示被切除的非故障线路的编号。

#### 2.3.2 拉路判据(辅助判据)

由上可见,如果系统发生了稳定的永久性单相接地故障,并且选线装置错误地切除了一条非故障线路,那么整个网络表现为:(a)零序电压还存在;(b)只有一条出线上的零序电流幅值发生变化(幅值变大,其变化大小等于被切除线路对地电容电流的幅值),这条线路就是接地线路;(c)其余线路上的零序电流幅值均没有发生变化,是非故障线路。

这样,就可以建立如下的选线判据:

$$E_f = |I_{0f}| - |I_{0f}| - I_{0z} \quad (2)$$

式中:

$$I_{0z} = \frac{1}{2} \times \ln \{ |I_{0f}|, f = 1, 2, \dots, n \}$$

$|I_{0f}|$ 表示误切之前各线路上稳态零序电流幅值。

$|I_{0f}|$ 表示误切之后各线路上稳态零序电流幅值。

1)若 $E_f > 0$ ,则线路 $f$ 为故障线路。

2)若 $E_f$ 均小于零,则为母线故障。

#### 2.4 几点说明

首先,考虑到故障后网络的暂态电容电流的自由振荡频率由线路、元件参数决定,对架空线来说,一般为300~1500 Hz;电缆线路的电感远较架空线路为小,而对地电容却较后者大许多倍,故电容电流暂态过程的振荡频率很高,一般为1.5~3 kHz<sup>[6]</sup>,所以在实现故障选线过程中的采样率可取10 kHz。

其次,由于小波变换自身算法上的原因,在变换过程中会把数据窗的右边界当成突变点,使得各尺度分量在右边界附近会出现较大值,这就是小波变换的边界效应。为了克服边界效应给选线带来的不利影响,虽然对各出线上零序电流在故障后四个周波内的数据进行小波变换,但只取前三个周波内的

小波系数做内积。

再次,做内积的实质是在进行极性比较。大的小波系数在比较过程中有利,结果可靠;而小的的小波系数在比较过程中就会有容易受误差的影响,以至于得到错误结论。通过做内积的办法,就相当于使大系数的比较结果在测度中占有高权重,而小系数的比较结果在测度中占有低权重。这样就在很大程度上克服了误差的影响,大大提高了选线精度,又避免了使用阈值。

最后,新方法适用于小接地电流系统的各种运行方式,能够正确区分多种故障,虽然其主判据的选线准确率非常高,但是考虑到实际运行条件的复杂性,还是增添了辅助判据,该辅助判据在实现过程中使用了包含基波成分在内的所有故障信息,同时彻底消除了互感器误差、三相不平衡、负荷不对称等因素的影响,所以其结果是十分可靠的。整个选线流程如图 3 所示。

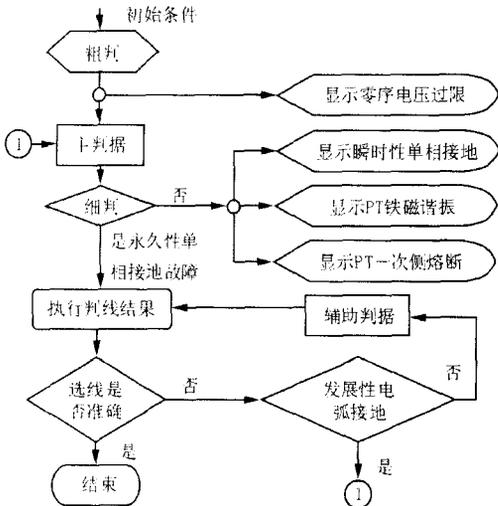


图 3 单相接地故障选线流程图

Fig 3 Flow chart of fault circuit selection for phase-A-to-ground faults

### 3 仿真分析

本文用于仿真分析的小接地电流系统,是由架空线组成的典型辐射状配电网[2],如图 4 所示。其中:  $R_p$  为一高值电阻,  $L_n$  为消弧线圈的电感,  $R_n$  为消弧线圈的电阻,  $R_j$  是与消弧线圈并联的一个非线性电阻。图 4 系统的中性点运行方式是用开关  $K_1$ 、 $K_2$  控制的。

#### 3.1 算例 1

考虑图 4 仿真系统中性点经消弧线圈接地,距

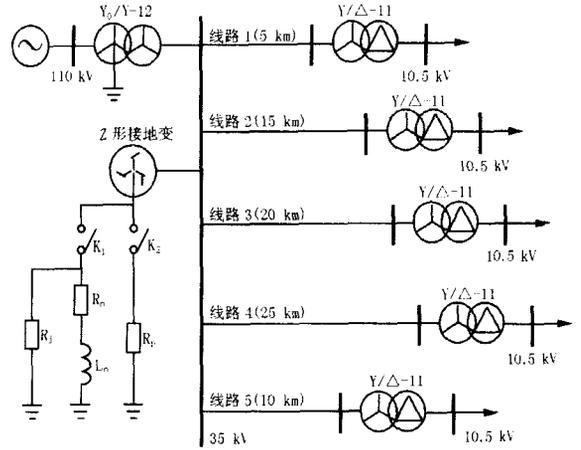


图 4 辐射状小电流接地系统

Fig 4 Schematic diagram of a radial ungrounded neutral system

线路 1 始端 4 km 处, A 相在其电压峰值时发生接地故障。母线处零序电压及其在尺度 1 至 5 下的小波分解如图 5 所示,可以确定出系统主谐振频率所在频段对应于尺度 4。图 6 给出了线路 1 至 4 上零序电流在该尺度下的小波分解。若取线路 1 作为参考

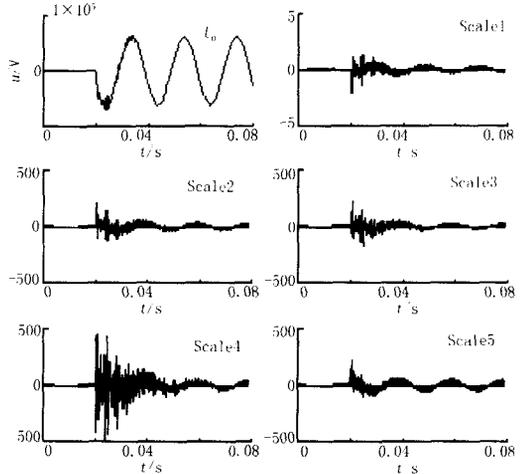


图 5 零序电压及其小波分解波形

Fig 5 Zero-sequence voltage and its detailed version under each scale

线路,则各线路小波系数的内积测度分别为  $S_{11} = 109.9$ ;  $S_{12} = -27.49$ ;  $S_{13} = -23.82$ ;  $S_{14} = -44.32$ ;  $S_{15} = -14.48$ ,根据主判据可确定线路 1 为故障线路。

本方法对于短线路近端、远端,长线路近端、远端和母线发生单相接地故障都能够准确选线,其仿真结果见表 1(把线路 1 作为参考线路)。

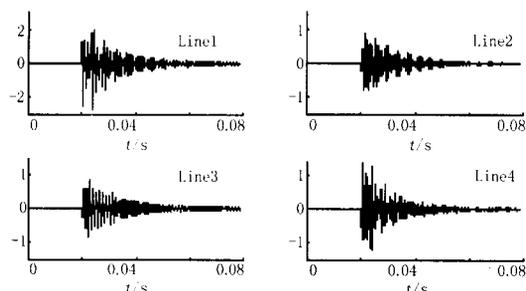


图6 各线路零序电流在尺度4下的小波系数

Fig 6 Wave coefficient of zero-sequence current under scale 4

表1 各线路零序电流在尺度4下的小波系数内积测度

Tab 1 Wave coefficient of zero-sequence current under scale 4

| 小波测度  | 线路1   | 线路2    | 线路3    | 线路4    | 线路5    | 结果  |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-----|
| s(短近) | 114.2 | -31.68 | -21.01 | -46.04 | -15.63 | 线路1 |
| s(短远) | 109.9 | -27.49 | -23.82 | -44.32 | -14.48 | 线路1 |
| s(长近) | 2.537 | 1.109  | 0.822  | -5.508 | 1.050  | 线路4 |
| s(长远) | 1.199 | 0.223  | 0.183  | -1.245 | 0.094  | 线路4 |
| s(母线) | 2.475 | 0.979  | 0.518  | 2.143  | 1.204  | 母线  |

注: s(短近)表示线路1始端1 km处故障时小波内积测度;

s(短远)表示线路1始端4 km处故障时小波内积测度;

s(长近)表示线路4始端1 km处故障时小波内积测度;

s(长远)表示线路4始端24 km处故障时小波内积测度;

s(母线)表示故障时小波内积测度。

### 3.2 算例2

考虑图4仿真系统中性点经消弧线圈接地,假设距线路1始端1 km处,A相在其电压峰值时发生接地故障,却把线路4切除了,那么根据辅助判据可得到表2所示仿真结果,准确选出故障线路。

表2 补救判线结果

Tab 2 Result of fault line selection for remediation

|       | $I_{01}/A$ | $I_{02}/A$ | $I_{03}/A$ | $I_{04}/A$ | $I_{05}/A$ | 选线结果 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------|
| 切线前   | 0.3002     | 2.9439     | 3.4540     | 4.3335     | 1.9462     |      |
| 切线后   | 4.6306     | 2.9217     | 3.4756     | 0.0000     | 1.9415     |      |
| $E_r$ | 4.1803     | -0.1723    | -0.1285    | -4.4836    | -0.1548    | 线路1  |

限于篇幅,不再给出更多的仿真数据。

## 4 结论

通过对现有选线方法的科学分类、分析,找出了基于单一特征量的选线方法存在固有缺陷,并构造出了具有自适应性强的、容错性高、新的选线主判据。

通过小波分析可以实现对信号的分频带描述,而并不要求信号必须是跃变的。所以,尽管该方法使用暂态过程中的数值来分析,但是在相电压过零附近发生单相接地而直接进入稳态时,该方法仍然有效。即使如此,文中还辅以补救判线方法。可见,新方法对基于稳态分量、暂态分量和外施影响的三类选线方法兼收并蓄,各取其长,最大限度地避免了失效状态,在理论上具有完备性。

该方法对于提高故障排除的准确性与时效性,实现真正意义上的配电自动化,减少故障造成的损失,有显著的效果。

### 参考文献:

- [1] 肖白,束洪春,高峰.小接地电流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 Method of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Fault in Networks with Ungrounded Neutral[J]. Relay, 2001, 29(4): 16-20.
- [2] 束洪春,肖白.配电网单相电弧接地故障选线暂态分析法[J].电力系统自动化,2002,26(21):58-61.  
SHU Hong-chun, XIAO Bai A Transient-based Study of Fault Line Selection for Single-phase-to-ground Faults on Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 58-61.
- [3] 薛永端,冯祖仁,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.
- [4] 彭玉华.小波变换与工程应用[M].北京:科学出版社,2000.  
PENG Yu-hua Wavelets Transform and Engineering Application[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [5] 王建隼.基于小波变换的电力系统暂态信号分析方法研究(博士学位论文)[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,1999.  
WANG Jian-ze A Study on Analysis Method of Power System Transient Signal Based on Wavelet Transform, Doctoral Dissertation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1999.
- [6] 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 The Resonant Earth in Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

收稿日期: 2005-07-19

作者简介:

肖白(1973-),男,博士研究生,讲师,从事电力系统稳定性及继电保护方面研究;Email: xclxiaobai@sina.com

穆钢(1957-),男,博士,教授,博士生导师,从事电力系统稳定与控制及输电网网损与负荷预报等方面研究;

(下转第68页 continued on page 68)

- ture Edition[M]. McGraw-Hill, 1998
- [4] McDysan D. IP与ATM网络中的QoS和业务量管理[M]. 黄锡伟, 黄建伟, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- McDysan D. QoS & Traffic Management in IP & ATM Networks[M]. HUANG Xi-wei, HUANG Jian-wei, Trans Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [5] 李旭. 电力系统通信网技术改造[J]. 工业控制计算机, 2003, 16(2): 9-11.
- LI Xu Reconstruction of Power Communication Network[J]. Industrial Control Computer, 2003, 16(2): 9-11.
- [6] 陈小平. 电力调度数据网的建设[J]. 电力系统通信, 2004, (10): 1-4.
- CHEN Xiao-ping Construction of Jiangsu Regional Power Dispatching Data Network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2004, (10): 1-4.

收稿日期: 2005-05-07; 修回日期: 2005-06-21

作者简介:

蒋杰(1981-),男,硕士研究生,研究方向电力系统通信; E-mail: jiangjiejj@eyou.com

江道灼(1960-),男,教授,主要从事HVDC微机控制技术、FACTS及其应用技术、配网自动化等方面的教学与科研工作;

倪承波(1966-),男,高级工程师,长期从事电网调度运行、电网运行管理等工作,对电网调度自动化、变电站综合自动化技术等方面有深入的研究。

### QoS techniques in ATM networks of power system communication

JIANg Jie<sup>1</sup>, JIANg Dao-zhuo<sup>1</sup>, NI Cheng-bo<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying 257001, China)

**Abstract:** The concept of point-to-point QoS is introduced in this paper. The basic parameters and different kinds of services for QoS are analysed, and the solution to implement QoS is proposed. Methods for data-division according to ATM service classes in power system communication networks are presented. It also presents the importance to adopt QoS in power system communication networks.

**Key words:** QoS; power communication; ATM networks; service classes; traffic control; congestion control

(上接第5页 continued from page 5)

黎平(1961-),女,硕士,教授,从事自动控制理论及继电保护方面研究;

束洪春(1961-),男,博士后,教授,博士生导师,从事

电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波等方面的研究。

### Project of fault line detection for single-phase-to-earth in distribution system

XIAO Bai<sup>1,2</sup>, MU Gang<sup>1</sup>, LI Ping<sup>1</sup>, SHU Hong-chun<sup>3</sup>

(1. Northeast Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China; 2. North China Electric Power University,

Baoding 071003, China; 3. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract:** As an unflagging research project, fault line detection for single-phase-to-earth in distribution system has been mainly concentrated on development of different methods based on single eigenvalue in perfect cases, but rarely on the correct affiance for the fault, the sufficient and effective use for the fault information, and deeper field. Analysis of the character of self-adaptiveness and mistake enduring for the criterion under complex condition is needed. The mistake for fault line selection can not be entirely avoided. In this paper, firstly, several types of faults is distinguished. Secondly, the self-adaptive criterion based on voltage and current is brought out. Last, with the method for remediation under extreme condition brought forward, the maturity in fault line selection theory is realized. EMTP simulations show that the proposed method can check out the fault line in distribution system exactly and reliably, and is robust.

**Key words:** distribution system; single phase-to-ground fault; fault line detection; wavelets transform; protective relaying