

# 一种新的小电流接地选线算法

李杰祎, 胡少强, 贺振华

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 在分析以往小电流接地选线各种算法的基础上, 提出了一种基于数学形态学及小波变换综合的选线算法, 该算法利用数学形态学滤波器对采集到的电压电流信号进行滤波, 而后利用小波变换的奇异性理论和模极大值理论来构成接地选线算法, 本算法很好地体现了形态学滤波器的噪声抑制能力和小波分解的奇异点检测能力。Matlab 仿真结果表明, 该算法不受中性点接地方式和线路参数的影响, 且具有较强的承受过渡电阻的能力。

**关键词:** 配电网; 消弧线圈; 单相接地; 接地故障选线; 数学形态学; 小波变换

## A new feeder selection algorithm for neutral ineffective grounded system

LI Jie-yi, HU Shao-qiang, HE Zhen-hua

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** This paper analyses the characteristics of various feeder selection algorithm. Then a new algorithm for fault feeder selecting based on morphological transform and wavelet transform is put forward, mathematical morphology filter is used to filter noise in the voltage and current signal collected and frequency localization character of wavelet transform is used to compose selection algorithm in this algorithm which combines the excellent singularity detecting together with the noise-repressing abilities of mathematical morphology filter. The results of simulation using MATLAB demonstrate that this algorithm is immune to the variation of network structures and parameters. It also has the ability of enduring high transition resistance.

**Key words:** distribution network; arc suppressing coil; single-phase earth fault; line selection of grounding; mathematical morphology; wavelet transform

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)03-0010-05

## 0 引言

我国配电网大多采用小电流接地(中性点不接地或经消弧线圈接地)方式。小电流接地系统零序阻抗大, 并受故障接地过渡电阻及故障时间隙电弧影响, 故障电流小, 故障线路与非故障线路的区别不明显。因此单相接地故障的快速可靠检测一直比较困难。目前根据实施接地保护时所采用电气量的不同, 接地保护原理可分为利用注入信号和故障信号两大类, 其中利用故障信号的方法又可分为利用故障信号稳态分量法和暂态分量法两类。利用电网稳态电气量提供的故障信息构成的自动选线法, 如: 零序电流比幅法、群体比幅比相法、零序导纳法<sup>[1]</sup>、五次谐波分量法、有功分量方向法、能量法等方法。利用电网暂态电气量特征提供的故障信息构成的自动选线法<sup>[2,3]</sup>, 如: 首半波法和小波法<sup>[4]</sup>。

## 1 小电流接地选线方法的分析

### 1.1 故障信号的稳态分量法

基于零序电压电流工频分量的方法检测灵敏度较低, 且受消弧线圈和接地过渡电阻的影响。基于零序信号5次或以上谐波的方法虽然不受消弧线圈影响, 但信号中谐波分量过小, 灵敏度受到很大限制。能量法虽然不受消弧线圈影响, 但由于零序能量函数中同时存在电感能量和电容能量, 并且电感和电容之间存在能量交换, 系统的能量不会释放完。因此能量函数不能完全反应线路由于故障产生的能量关系。

### 1.2 故障信号的暂态分量法

故障产生的暂态分量较稳态分量大若干倍, 基于暂态信号的选线方法灵敏度较高且不受消弧线圈的影响。首半波法是基于单相接地故障发生在相电压接

近最大值瞬间这一假设条件的。当线路在故障相电压接近于零瞬间发生单相接地故障时,在首半波时线路中过渡电流的数值并不大,并且当过渡电阻数值较大时,系统中不会产生周期衰减的过渡电流,同样也达不到首半波零序电流数值最大的要求。

小波法虽然不受线路故障瞬间电压相角以及消弧线圈的影响,但受电网中的谐波的影响。另外小波法需要较高的采样率,而较高的采样率又比较容易受各种噪声的影响,这都给信号的准确检测带来了一定困难。噪声抑制的传统方法一般是低通滤波,各种低通滤波算法虽然可以较好地滤除白噪声,但在抑制脉冲噪声方面显得无能为力,小波的低通滤波器一样也有以上不足。小波多尺度分析的去噪能力取决于分解的层数和滤波器的阶数,只有当它们数值较高时才能获得较好的滤波效果,这一方面将带来计算量的线性增加;另一方面现有的硬件在满足多尺度分解算法对计算量、计算速度及数据存储容量的要求方面也有一定难度。

### 1.3 基于数学形态变换的滤波方法

数学形态学是在积分几何和随机集论的基础上建立起来的一种数学分析方法,具有计算简单和并行快速的优点,一般只需要进行加、减法和取极大值或极小值等运算,易于硬件实现,且在进行信号处理时只取决于待处理信号的局部形状特性。该方法已在图像处理、纹理分析、模式识别、机器人视觉等方面获得了广泛应用。近年来,数学形态学也逐步应用到电力系统中,已在变压器励磁涌流的识别、超高速暂态线路保护、高压线路故障测距及电能质量扰动辨识等方面取得了较理想的效果。利用数学形态学构成低通滤波器,即使原始信号伴随较强的噪声、甚至发生了严重的畸变,其基本形状仍可被识别及重构。因此本文采用形态学滤波器对采集的小电流接地系统信号进行滤波,而后利用小波的奇异性检测理论及模极大值理论来构成接地选线算法。

## 2 数学形态学

### 2.1 基本运算

形态学的基本变换包括腐蚀、膨胀、形态开和形态闭等以及形态开、闭的级联组合<sup>[5]</sup>。因为电力信号一般为二维信号,故下面只介绍一维情况下的形态变换即多值形态变换。设  $f(n)$  是一维多值信号,  $g(n)$  为结构元素,  $H$ 、 $K$  分别为  $f(n)$  和  $g(n)$  的定义域。  $H=\{1, \dots, N\}$ ,  $K=\{1, \dots, M\}$ , 且  $N \geq M$ 。则信号  $f(n)$  关于结构元素  $g(n)$  的腐蚀和膨胀定义为:

$$\begin{aligned} (f \ominus g)(n) &= \min \{f(n+m) - g(m)\} \\ (m=1, \dots, M; \quad n=1, \dots, N-M+1) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (f \oplus g)(n) &= \max \{f(n-m) - g(m)\} \\ (m=1, \dots, M; \quad n=1, \dots, N-M+1) \end{aligned} \quad (2)$$

$M$  为结构元素的长度,其取值与信号采样率、脉冲噪声宽度及白噪声特性有关。在腐蚀和膨胀基础上定义的形态开  $f \circ g$  和形态闭  $f \bullet g$  运算为:

$$(f \circ g)(n) = (f \ominus g \oplus g)(n) \quad (3)$$

$$(f \bullet g)(n) = (f \oplus g \ominus g)(n) \quad (4)$$

对信号进行消噪处理往往采用形态开闭的级联形式<sup>[6]</sup>,对信号的开闭和闭开运算分别定义如下

$$(f \circ C g)(n) = (f \circ g \bullet g)(n) \quad (5)$$

$$(f C g)(n) = (f \bullet g \circ g)(n) \quad (6)$$

为了消除形态开闭产生的相反的偏差可以利用它们的线性组合来设计滤波器。

形态开、闭作为复合的形态运算,不仅是递增的、位移不变的,还具有等幂性。也就是说信号经过一次形态滤波后不再为相同结构元素的形态运算所改变。由这个性质可以构建高效的开、闭组合的形态滤波器,避免对信号作多次相同结构元素的开或闭操作。

基于以上性质本文设计如下级联滤波算子:设  $y(n)$  为输出信号,则

$$y(n) = (1/2) (f \circ C g_1 C g_2 + f C g_1 \circ C g_2) \quad (7)$$

其中:  $g_1$  和  $g_2$  为不同的结构元素。

### 2.2 结构元素

除了运算方式的组合外,结构元素的形状和大小对信号处理结果也有很大影响。处理一维信号时,常用直线、斜线、二角折线、三角形等结构元素。根据以上分析,所选结构元素应尽可能小并且其结构要尽可能接近待分析信号的图形特点。大量的计算结果表明,不同的信号处理要求需要有相关的结构元素才能较好地实现。

考虑到电力系统的信号特点和工程计算的要求,以及简化程序资源的需求,选取直线形的结构元素,其与水平方向成  $0$  角。因为这样的结构元素在进行噪声消除时既能保持信号的形状,又能最大限度地消除毛刺形状的噪声,而在进行直流偏移量提取时也能最好地将信号提取出来。本文采用元素个数递减的结构元素。  $g_1 = \{1, 1, 1\}$ ,  $g_2 = \{1, 1\}$ 。

## 3 小波变换

### 3.1 小波变换基本原理

通过对小接地电流系统单相接地故障时的零序电压、零序电流进行奇异性检测,可以确定出它们在故障后突变部分的极性和大小,比较其在各条出线上的不同变化情况,可以识别出故障线路。

我们将无限次可导的函数称为光滑的或没有奇异性;若函数在某处有间断或某阶导数不连续,则称

其在此处有奇异点。奇异性检测就是要将信号的奇异点识别出来并判断其奇异程度。数学上, 通常用 Lipschitz 指数来刻画信号的奇异性<sup>[7]</sup>。由于小波变换极大值在多尺度上的表现与 Lipschitz 指数之间存在对应关系, 这为通过小波变换检测信号奇异点并区分奇异点提供了依据。即小波变换后的模极大值能够反应接地故障的某些特征, 所以本方法利用此理论实现故障选线。

### 3.2 小波函数的选取

本文把小波应用到小电流接地系统的选线问题, 主要利用的是小波分析的信号突变检测能力、分频能力、时频局部化分析能力<sup>[8]</sup>, 最后以信号细节分量的极性为判据, 而这些都是多数小波变换所具有的基本功能和特点。从接地选线的角度分析, 所应用的小波应具有如下性质: (1)有正交性和正则性; (2)有高阶数的消失距; (3)检测暂态突变宜采用具有对称性或近似对称的小波; (4)为了提高运算效率, 减少占用空间, 小波基应具有紧支性或较短的滤波系数。正交性使小波变换具有快速算法, 正则性对于信号或图像的重构获得较好的平滑效果是非常有用的; 消失距越高, 则对于信号的奇异性检测比较有利; 对称性则使得小波变换具有线性相位; 紧支性或较短的滤波系数, 则有利于提高计算的速度, 减少消耗时间。综合考虑在时频两域内进行分析的需要, 并结合故障选线问题的特点, 通过采用几种小波进行多次仿真计算, 证明使用 db 系列小波可以得到较为理想的结果。

### 3.3 选线判据

配电网发生接地故障时, 它的故障特征主要体现在母线的零序电压和各出线的零序电流上。因此, 通过比较各条线路暂态零序电流中高频分量可以找出故障线路。故障瞬间将产生一个零序突变量或奇异量, 所有非故障线路零序电流突变的极性相同, 故障线路零序电流突变的极性与非故障线路零序电流突变极性相反, 故障线路零序电流突变幅值等于非故障线路零序电流突变幅值之和。利用小波奇异性检测理论对采集到的故障信号进行小波变换, 确定模极大值点, 并比较各条线路零序电流模极大值的大小和极性, 可以判别出故障线路。故障零序电流数值小, 信噪比低, 而故障零序电压数值很大, 信噪比高。识别线路故障时刻选择电压信号为启动选线信号, 根据电压信号小波变换模极大值确定故障时刻, 然后再根据各出线零序电流小波变换模极大值数值较大点逐点比较极性, 即可判断故障, 极性相反者为故障线路, 若极性都相同, 则为母线故障。

经过多次仿真分析, 本文利用 db2 小波对采样得来的零序电压和各出线零序电流序列进行小波变换,

得到各尺度的小波变换序列, 然后进行重构得到各个尺度上的细节分量。

## 4 仿真分析

在本文的研究中, 借助 Matlab 对中性点经消弧线圈接地的 10 kV 系统进行大量仿真, 本文采用的是一个具有 4 条出线的 10 kV 系统。线路采用分布参数模型, 系统接线图如图 1 所示。

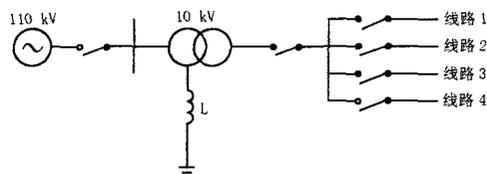


图 1 小电流接地系统仿真实例

Fig.1 Simulation model of neutral in-effective grounded system

仿真模型参数如下: 电压等级: 110/10 kV; 正序参数:  $R_1=0.48 \Omega/\text{km}$ ,  $L_1=0.9283 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_1=0.07038 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 零序参数:  $R_0=0.79 \Omega/\text{km}$ ,  $L_0=4.2146 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_0=0.0436 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 变压器电抗:  $Z_T=0.6017+j0.4132 \Omega$ ; 系统补偿度 110%。线路长度  $L_1=6 \text{ km}$ ,  $L_2=16 \text{ km}$ ,  $L_3=20 \text{ km}$ ,  $L_4=18 \text{ km}$ , 采样率选择为 5 kHz。

小波变换和传统的低通滤波器虽然对加性白噪声能起到一定程度上的抑制作用, 但是对脉冲噪声却无能为力。由于现场环境的复杂, 选线装置在选线时经常会收到脉冲噪声的干扰。因此本文设计一个数学形态滤波的前置单元, 然后利用小波变换的奇异性及模极大值理论构成本文的选线算法。经过大量的仿真分析, 验证了算法的可行性及可靠性。

本文给出了线路 4 在距离母线 4 km 处、接地过度电阻  $R=1000 \Omega$  及 A 相电压相角  $180^\circ$  时即  $t=0.010 \text{ s}$  时的仿真分析。为了突出说明形态滤波在强干扰下的滤波作用, 本文利用了 Matlab 仿真中的数据加入频率为 5 kHz 的连续正负脉冲。图 2 为加入脉冲干扰的母线零序电压和线路零序电流波形。图 4 为以 db2 小波对加入干扰的波形进行 5 层分解的第 3 层重构细节系数。由此可以看出加入脉冲后的波形经小波变换后在脉冲干扰的地方模极大值比故障暂态过程中的模极大值还大, 不能确定故障发生时刻。因此有关小波理论的选线判据将会失效。图 3 为经形态学滤波后的波形。图 5 为滤波后的小波变换第三层细节系数。由图 5 可以清楚的看出故障发生在  $t=0.010 \text{ s}$ , 并且在  $t=0.010 \text{ s}$  时线路  $L_4$  的小波细节系数与其他三条小波细节系数极性相反, 并且模值大于其他三条线路。由此可以判断是

线路  $L_4$  故障。本文给出的是电压过零的极限情况尚能正确选线的例子, 其他情况由于篇幅限制不再列出。图中标注的说明,  $U_0, I_{10}, I_{20}, I_{30}, I_{40}$  分别表示母线零序电压和各条线路零序电流,  $d_3$  表示第三层细节分量。

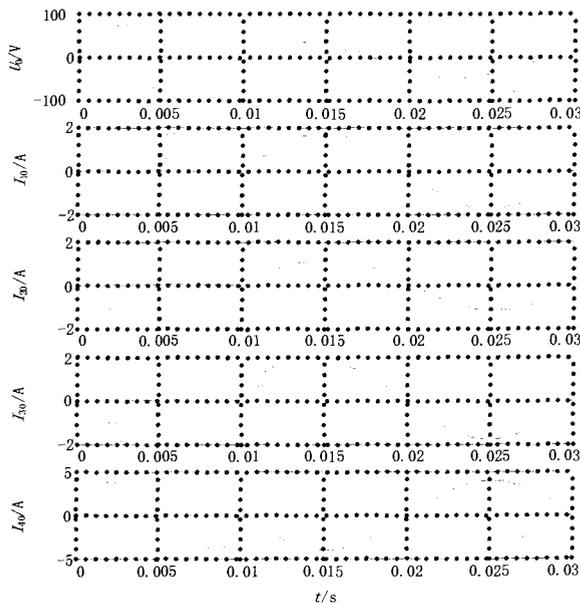


图 2 含脉冲噪声的零序电压电流波形

Fig.2 Zero-sequence current and voltage with impulse noise

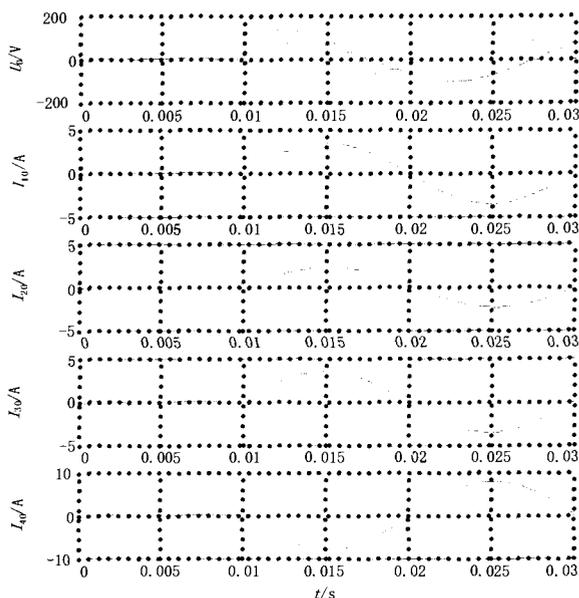


图 3 形态学滤波后的零序电压电流波形

Fig.3 Zero-sequence current and voltage after morphological transform

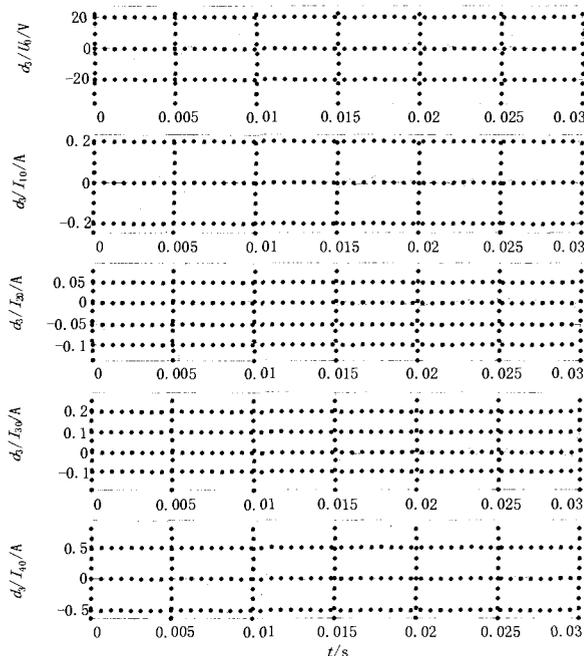


图 4 含脉冲噪声的波形小波分解的结果

Fig.4 Wavelet transform results of the zero-sequence current and voltage with impulse

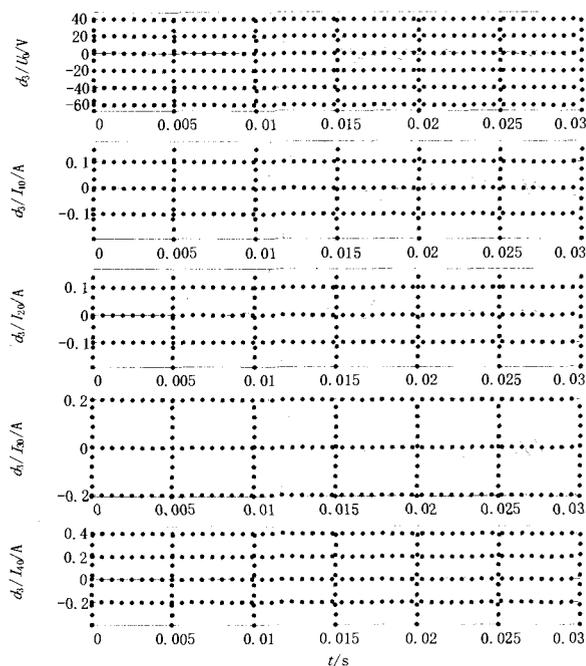


图 5 形态学滤波后小波分解的结果

Fig.5 Wavelet transform results of zero-sequence current and voltage after morphological transform

## 5 结论

本文结合数学形态学和小波变换设计了一种能

有效地抑制各种噪声干扰的信号奇异性检测算法,前置的形态开一闭组合滤波单元可滤除各种随机噪声和脉冲噪声;小波变换算法可有效地检测出故障时刻,并且小波变换后的小波系数极性非常明显,有利于各种选线判据的利用。另外由于数学形态学运算简单速度快,可以并行运算,易于硬件实现,现在 DSP 的飞速发展也使得将来形态滤波与小波变换相结合的算法能够在实际中提高选线的速度和准确率。为了提高滤波的精度,还可以设计按方差或均值最优来选取形态滤波器的线性组合系数<sup>[10]</sup>,还可以按形态百分数设计形顺序滤波器,可能会取得更加好的滤波效果。

### 参考文献

- [1] 曾祥君,尹项根,张哲. 零序导纳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. Study on Feeder Grounding Fault Protection Based on Zero Sequence Admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 5-10.
- [2] 张帆,潘贞存,张慧芬,等. 基于零序电流暂态极大值的小电流接地选线新判据[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 45-48.  
ZHANG Fan, PAN Zen-cun, ZHANG Hui-fen, et al. New Feeder Selection Criterion for Neutral Un-effectual Grounded System Based on Transient Zero Sequence Current Comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.
- [3] 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): 58-62.  
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): 58-62.
- [4] 苗友忠,孙雅明,杨华. 中性点不接地配电系统馈线单相接地故障的暂态电流保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 28-32.  
MIAO You-zhong, SUN Ya-ming, YANG Hua. A New Principle of Transient Current Grounded Relay for Feeder in Ungrounded Distribution Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 28-32.
- [5] Heijroans H J A M. Morphological Image Operators[M]. New York: Academic Press, 1994.
- [6] 林湘宁,刘沛,刘世明,等. 电力系统超高速保护的形态学—小波综合滤波算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 19-24.  
LIN Xiang-ning, LIU Pei, LIU Shi-ming, et al. A Novel Integrated Morphology-wavelet Filter Algorithm Used for Ultra-high Speed Protection of Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 19-24.
- [7] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [8] 任震,黄雯莹,何建军,等. 小波分析及其在电力系统中的应用(一)概论[J]. 电力系统自动化, 1999, 21(1): 5-9.  
REN Zhen, HUANG Wen-ying, HE Jian-jun, et al. Study On Intelligent Resigning Method of Rirect Supply System in Power Plant or Transformer Station[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 21(1): 5-9.
- [9] 操丰梅,苏沛浦. 小波变换在配电自动化接地故障检测中的应用研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(13): 33-37.  
CAO Feng-mei, SU Pei-pu. Study on the Application of Wavelet Transform to Detect Earth-fault in Distribution Automation System[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(13): 33-37.
- [10] 赵春晖,孙圣和. 一种形态开、闭自适应加权组合滤波器[J]. 电子学报, 1997, 25(6): 109-111.  
ZHAO Chun-hui, SUN Sheng-he. A Morphological Opening-closing Adaptive Weighted Combined Filter[J]. Transaction of Electronics, 1997, 25(6): 109-111.

收稿日期: 2007-07-30; 修回日期: 2007-08-20

作者简介:

李杰祎(1976-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护、控制与自动化; E-mail: lijieyi9158@163.com

胡少强(1955-), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事电力系统保护、控制与自动化的研究;

贺振华(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护、控制与自动化。

## 许继电气 800A 高压系列保护通过华中网局入网评审

日前,许继电气 800A 高压系列保护华中网局入网评审会在华中科技大学动模试验中心隆重举行。本次许继入网试验产品主要包括 800A 高压线路保护、母差保护、及高压保护辅助装置。许继 800A 系列保护装置采用了可视化编程以及透明化设计,变动特性保护原理的应用、双重化冗余设计。动模试验涵盖了动模大纲的全部内容,并根据各用户单位的运行经验完成了特殊项目的试验,各项试验均取得了满意结果。

与会领导、专家充分肯定了许继电气继电保护产品技术的先进性,在华中网局已投运的产品使用性能稳定,可靠性高。一致认为,许继 800A 系列保护产品符合国家最新颁布的继电保护和自动装置反事故措施实施细则和华中电网的有关规定,产品性能稳定,运行可靠,可以广泛推荐应用在华中电力系统。期望公司升级后的保护产品为华中电网稳定运行做出新的贡献。