

基于形态梯度与小波变换模之和的行波启动元件

苏煜¹, 罗四倍², 王薇¹

(1. 西安供电局, 陕西 西安 710032; 2. 河南科技大学车辆与动力工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 行波启动元件是超高速保护和行波测距中必不可少的重要组成元件。在阐述数学形态学基本理论的基础上, 提出将形态梯度应用于行波启动元件, 以解决现有的行波启动元件算法在弱故障下灵敏度不足、可能拒动的问题; 进而通过能够用于非孤立奇异信号检测的小波变换模之和来准确区分故障行波与噪声干扰, 从而构成一套较为完善的行波启动元件算法, 弥补了以往行波启动算法的不足。大量 ATP 仿真测试验证了该启动算法在保证快速性的同时, 既有效提高了反应故障的灵敏度, 又增强了启动的可靠性。

关键词: 输电线路; 超高速保护; 暂态量保护; 行波; 启动元件; 形态梯度; 小波变换

Traveling-wave starting algorithm based on morphological gradient and wavelet transform modulus sum

SU Yu¹, LUO Si-bei², WANG Wei¹

(1. Shaanxi Xi'an Power Supply Company, Xi'an 710032, China;

2. School of Vehicle & Motive Power Engineering, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: The traveling-wave based starting element is very important for ultra-high-speed protection and traveling-wave based fault locator. Based on illustrating the basic theory of mathematical morphology, morphological gradient is applied to the new traveling-wave based starting element in order to solve the deficient sensitivity and even fail-function under weak faults, which problems appear in the previously proposed starting algorithms. And because wavelet transform modulus sum is quite suitable for the non-isolated singularity detection, it is also utilized in the new starting algorithm to correctly distinguish fault traveling-wave from noise disturbance. Thus a newly perfect starting element is proposed, and a number of ATP simulation tests show that the new starting algorithm is sensitive and reliable, while ensuring the fast operation.

Key words: transmission line; ultra-high-speed protection; transient based protection; traveling wave; starting element; morphological gradient; wavelet transform

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)23-0005-04

0 引言

近年来, 随着我国电网建设的迅速发展, 互联大电网已成趋势。快速切除故障不仅有助于提高输电线路的传送功率, 充分发挥其经济性, 更重要的是能增强系统的暂态稳定性。因此, 基于故障暂态量、具有超高速动作特性的暂态量保护原理日益受到广大继电保护工作者的重视^[1]。同时, 行波测距装置的研究和应用也取得了长足进展^[2]。

无论是暂态量保护还是行波测距, 启动元件都是必不可少的, 它担负着灵敏、快速地探测系统故障扰动的任务。暂态量保护和行波测距对启动元件提出了更高的要求: ①在很短时间(如 1 ms)内做出正确判断——故障时可靠灵敏地启动, 正常或噪声

干扰情况下不误启动; ②准确标定故障发生时刻, 使故障处理程序能正确获取故障发生前后的数据。

故障暂态量包含着丰富的故障信息, 其中故障初始行波到达保护或测距装置安装处即标志着故障发生, 这是行波启动元件构造的物理依据。故障暂态信号是由故障点初始行波在输电线路多次折、反射的叠加而形成, 因此它是具有突变性质的非平稳信号, 频率随时间的变化而变化。

据此, 文献[3,4]分别提出了利用小波变换进行信号奇异性检测的行波启动元件算法。然而, 上述两种算法存在弱故障下灵敏度不足、可能拒动的问题, 文献[5]采用了改进的梯度算法, 一定程度上弥补了以上两种算法的不足, 但该梯度算法在理论上尚缺乏有力支撑。为此, 本文充分利用数字信号处

理领域的新技术——数学形态学的研究成果，将形态梯度应用于行波启动元件，进而通过能够用于非孤立奇异信号检测的小波变换模之和来准确区分故障行波与噪声干扰，从而构成一套较为完善的行波启动元件新算法。ATP 仿真测试验证了本文算法的有效性。

1 数学形态学与形态梯度

数学形态学^[6-8] (Mathematical Morphology) 建立在积分几何与随机集论的基础之上，是在对二维数字图像处理的研究中发展起来的。它设计了一整套理论完备的变换（运算）、概念和算法，能够很好描述图像的基本特征，可用来解决抑制噪声、特征提取、边缘检测、图像分割、形状识别、纹理分析、图像恢复与重建和图像压缩等图像处理问题。目前，数学形态学已在数字图像处理领域（包括二值图像和灰度图像）获得了广泛应用。

数学形态学是一种非线性分析方法，不存在相移和幅度衰减等问题；与傅立叶变换和小波变换相比，计算更简单，仅有加减法和取极值运算，具有并行快速、易于硬件实现的优点。作为一种非线性的数字信号处理新技术，近年来，数学形态学已跨越二维图像处理，越来越多地被引入到电力系统的一维信号处理中，尤其是故障暂态信号处理，并取得了一定研究成果^[9]。

下面仅讨论针对一维信号处理的数学形态学理论。形态和差（膨胀与腐蚀）是数学形态学的基础，由此可导出一系列运算，如开运算、闭运算等。

定义 1 膨胀与腐蚀

设 $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别表示待处理信号和结构元素 (Structure Element)， D_f 和 D_g 分别为 $f(x)$ 和 $g(x)$ 的定义域，则用结构元素 $g(x)$ 对信号 $f(x)$ 进行的膨胀和腐蚀分别定义为

$$(f \oplus g)(x) = \max \{ f(x-y) + g(y) \} \quad (1)$$

$$(f \ominus g)(x) = \min \{ f(x+y) - g(y) \} \quad (2)$$

式中： $(x-y), (x+y) \in D_f, y \in D_g$ 。

注意到膨胀运算的形式即式 (1) 与卷积相似，只是采用最大值运算代替了卷积求和，加法运算代替了卷积乘积；而腐蚀运算的形式即式 (2) 与相关运算相似，只是采用最小值运算代替了相关运算中的求和，减法运算代替了相关的乘积。

作为形态学运算重要组成部分的结构元素自身直接携带“知识”（起点位置、形状和幅值等），可视作收集信息的“探针”，当探针不断移动时，便可提取到所研究信号的结构特点和某些有价值的特征

信息。

梯度运算可有效地凸现边缘信息（突变），便于检测故障暂态信号，但其缺点是对大多数噪声非常敏感，而形态学运算具有极佳的抑制噪声能力^[10]，因此两者的结合便构成了奇异性检测性能优越的形态梯度 (Morphological Gradient)。

定义 2 形态梯度

待处理信号 $f(x)$ 经结构元素 $g(x)$ 腐蚀、膨胀后的数学差分，基本的形态梯度定义为

$$\text{Grad}(f) = (f \oplus g)(x) - (f \ominus g)(x) \quad (3)$$

在一维信号的处理中，常采用扁平结构元素，即定义域内的结构元素取同一数值，考虑到计算量和输入信号的不确定性，通常均设为 0。此时，形态梯度实际上是对信号进行极大值、极小值滤波后的数学差分。在应用扁平结构元素的场合，为了提取暂态信号的上升沿和下降沿（即正负突变），扁平结构元素应具有不同起点，可定义为

$$g^+ = \{ g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, \underline{g}_l \}$$

$$g^- = \{ \underline{g}_1, g_2, \dots, g_{l-1}, g_l \}$$

其中：结构元素 g^+ 和 g^- 分别用来提取暂态信号的上升、下降边沿，值均为 0； l 为结构元素的长度；在 g^+ 和 g^- 中带下划线的元素表示进行形态学运算的原点位置，设其下标为 0，则结构元素 g^+ 对应的下标从 $-l+1$ 到 0，而结构元素 g^- 对应的下标从 0 到 $l-1$ 。

根据膨胀与腐蚀、形态梯度的定义，可知提取上升沿，有

$$\text{Grad}(f)_{g^+} = (f \oplus g^+)(x) - (f \ominus g^+)(x) \quad (4)$$

提取下降沿，有

$$\text{Grad}(f)_{g^-} = (f \ominus g^-)(x) - (f \oplus g^-)(x) \quad (5)$$

则

$$\text{Grad}(f)_g = \text{Grad}(f)_{g^+} + \text{Grad}(f)_{g^-} \quad (6)$$

需要注意的是：① 之所以要求扁平结构元素 g^+ 和 g^- 具有不同的原点位置，是因为需要错开腐蚀和膨胀的操作时序，否则将出现正负突变相互抵消的结果；② 扁平结构元素只有一个待定参数（即结构元素的长度 l ），确定起来简单方便。

故障初始行波的波形可近似看作阶跃信号或斜坡信号^[4]。结构元素长度 l 取 4，根据式 (4) ~

(6) 对典型阶跃信号和斜坡信号进行形态梯度变换的结果如图 1~2 所示。由此表明，形态梯度不仅能够准确定位和检测暂态信号的突变，而且能够指示突变的极性——形态梯度值的正负恰好与上升和下降边沿相对应。此外，形态梯度虽也对噪声较敏感，但不会加强或放大噪声。因此形态梯度可应用于行

波启动元件, 解决现有的行波启动元件算法在弱故障下灵敏度不足、可能拒动的问题。

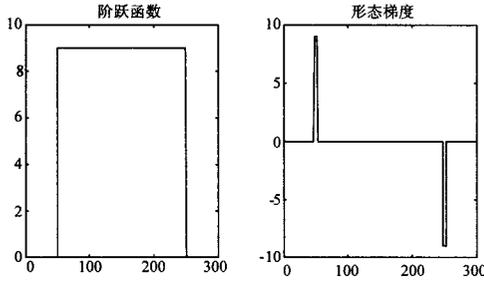


图1 阶跃函数及其形态梯度

Fig. 1 Step function and its morphological gradient

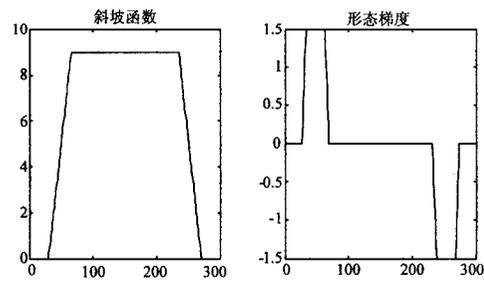


图2 斜坡函数及其形态梯度

Fig. 2 Ramp function and its morphological gradient

2 改进的行波启动元件新算法

行波启动元件首先要检测信号奇异性, 区分正常情况与奇异情况。正是由于这一判别环节导致了现有行波启动元件算法在弱故障下灵敏度不足、可能拒动^[5], 因此本文采用形态梯度进行这一判别, 将充分发挥形态梯度良好的奇异性检测能力。

其次, 检测奇异性来源, 排除噪声(包括白噪声和脉冲噪声)干扰。本文采用能够用于非孤立奇异信号检测的小波变换模之和进行这一判别^[4], 以增强检测的可靠性和区分度。小波变换模之和法检测奇异性来源是有理论上的保证的, 文献[4,5]也已用大量实例证明了此方法的有效性。

综合利用形态梯度与小波变换模之和的优势, 本文提出如下基于电流的改进的行波启动元件新算法:

对于离散电流信号序列 $i(k)$,

(1) 由式(4)~(6)计算形态梯度值 $Gradi(k)$, 若梯度模极大值 $Gradi(k_0) = \max\{|Gradi(k)|\} > \epsilon_0$, 则信号奇异。 ϵ_0 为阈值。

(2) 计算奇异点 k_0 影响锥内的小波变换系数 $Wi(j, k)$; 进而求出 k_0 影响锥内的小波变换模之和 $Ni(j, k_0)$ 。 $j=1, 2, 3$, 是小波变换分解尺度。

(3) 若 $Ni(2, k_0)/Ni(1, k_0) < \sqrt{2}$ 或 $Ni(3, k_0)/Ni(2, k_0) < \sqrt{2}$, 则判别该信号为噪声干扰, 启动元件不动作; 否则启动元件动作。

作为暂态量保护和行波测距方案的重要组成部分, 启动元件的程序流程如图3所示。

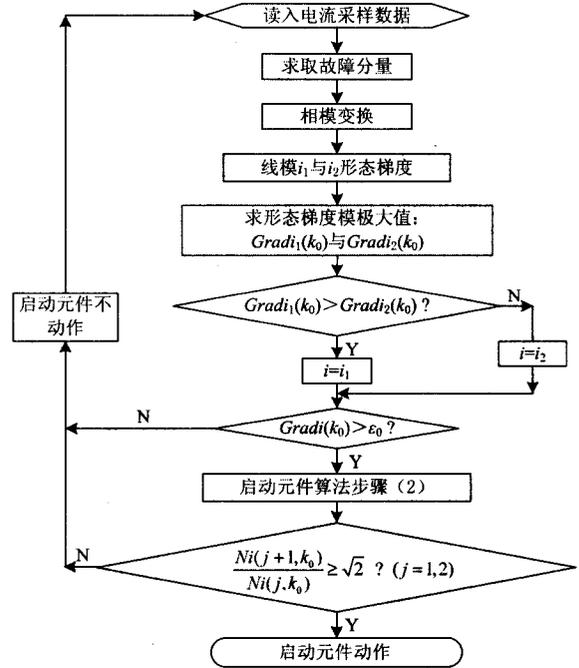


图3 启动元件程序流程

Fig. 3 Flowchart of starting algorithm

对于图3所示的程序流程, 需说明的几点是:

- ①对电流信号执行求取故障分量和相模变换(此为Clarke相模变换), 可为故障处理程序中其他元件的计算做好准备。
- ②为了能反映各种故障类型, 使用1、2两个线模量, 并且通过比较1模量和2模量的形态梯度模极大值, 取其中的大者作为后续计算的模量, 暂态量保护和行波测距方案中其他元件也将使用此处模量选取的结果。
- ③小波变换: 选择具有1阶消失矩的二次B样条小波(也称三阶B样条小波)进行二进小波变换。

3 ATP 仿真研究

以图4所示的500 kV超高压输电系统作为测试系统, 线路长度 $l_{PM}=214$ km, $l_{MN}=160$ km, $l_{NQ}=301$ km, 线路结构及参数取自东北电网董辽线, 仿真模型采用频率相关模型, 母线系统对地等效电容 C_g 为 $0.01 \mu\text{F}$ 。计及线路三相参数不平衡对启动元件的影响, 三条线路均不换位。数据采样率设为 400 kHz, 结构元素采用长度为4的扁平结构元素, 梯度模极大值的定值 ϵ_0 设为15, 对位于被保护

线路 MN 的 M 侧的启动元件进行性能测试。

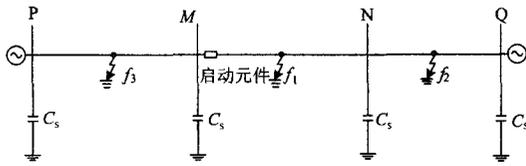


图 4 超高压输电系统

Fig. 4 EHV transmission system

表 1~2 为部分仿真测试结果，分别给出了梯度模极大值 $Gradi(k_0)$ 、2 尺度与 1 尺度小波变换模之和的比值 $Ni(2, k_0)/Ni(1, k_0)$ 、3 尺度与 2 尺度小波变换模之和的比值 $Ni(3, k_0)/Ni(2, k_0)$ 。其中，表 1 故障初始角固定为 45° (A 相)；表 2 弱故障为故障初始角 5° 的 A 相接地故障。

从表 1~2 的测试结果看，基于形态梯度与小波变换模之和的启动元件新算法在各种故障情况下均能够正确启动，与文献[3,4]相比，在保证启动可靠性的同时，提高了弱故障下的启动灵敏度；与文献[5]相比，由于采用了理论完备的形态梯度检测奇异性，使本文启动元件的广泛适用性得到了保证。

表 1 故障初始角一定时启动元件的性能

Tab. 1 Performance of starting element under the fixed inception angle

故障位置	故障类型	过渡电阻/ Ω	$Gradi(k_0)$	$Ni(2, k_0)/Ni(1, k_0)$	$Ni(3, k_0)/Ni(2, k_0)$	
线路 MN	Ag	0	451.85	2.453	2.442	
		300	161.43	2.481	2.499	
	f_1 ABg	0	1 111.39	2.600	2.408	
		300	1 133.55	2.587	2.411	
	中点	AB	0	1 141.45	2.584	2.412
			300	502.75	2.588	2.421
线路 NQ	ABC	0	974.96	2.671	2.372	
		300	974.94	2.671	2.372	
	Ag	0	262.73	2.984	2.705	
		300	93.97	2.992	2.728	
	f_2 ABg	0	802.29	2.925	2.599	
		300	826.23	2.932	2.611	
线路 PM	AB	0	835.38	2.935	2.616	
		300	367.99	2.936	2.619	
	ABC	0	847.01	3.015	2.713	
		300	847.05	3.015	2.713	
	Ag	0	569.51	2.782	2.255	
		300	203.51	2.781	2.247	
中点	f_3 ABg	0	1 270.62	2.792	2.269	
		300	1 280.85	2.791	2.269	
	AB	0	1 284.49	2.791	2.269	
		300	565.66	2.789	2.262	
ABC	0	1 213.99	2.791	2.266		
	300	1 213.98	2.791	2.266		

表 2 弱故障时启动元件的性能

Tab. 2 Performance of starting element under weak faults

故障位置	过渡电阻/ Ω	$Gradi(k_0)$	$Ni(2, k_0)/Ni(1, k_0)$	$Ni(3, k_0)/Ni(2, k_0)$
线路 MN	0	58.03	2.649	2.546
首端 1km	300	21.60	2.893	2.795
线路 MN	0	57.66	2.561	2.647
中点	300	20.59	2.903	2.680
线路 MN	0	63.91	2.791	2.507
末端 1km	300	23.90	2.903	2.725
母线 N	0	50.24	3.166	2.734
	300	19.87	2.956	2.783
线路 NQ	0	56.77	2.920	2.516
中点	300	20.31	3.438	3.374
母线 M	0	75.42	2.218	1.503
	300	28.29	2.067	1.490
线路 PM	0	171.82	2.763	2.200
中点	300	61.39	2.715	2.049

其次，对含噪声干扰的弱故障情况下启动元件的动作性能进行考查。线路 MN 上距离 N 端 1 km 处发生 A 相接地故障，故障初始角 5° ，过渡电阻为 300Ω ，故障时刻附近存在高斯白噪声的 1 模量电流行波及其形态梯度变换结果如图 5 所示。此时， $Gradi(k_0)=35.45$ ， $Ni(2, k_0)/Ni(1, k_0)=1.89$ ， $Ni(3, k_0)/Ni(2, k_0)=2.07$ 。可见，虽然是弱故障并且同时有噪声干扰，本文的启动元件仍能够正确动作，满足超高速暂态量保护和行波测距的要求。

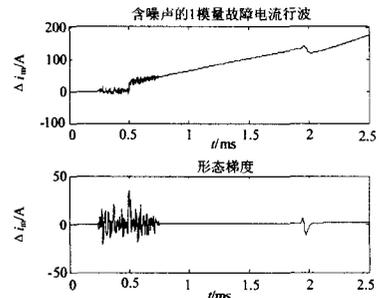


图 5 含噪声的电流行波及其形态梯度

Fig. 5 Current traveling wave containing noise and its morphological gradient

注意到在理论上电压过零点的单相故障和相间电压差为零的两相故障没有行波过程的存在，因此基于行波的启动元件将失效，可采用文献[5]中提出的方法解决绝对零度的弱故障的启动问题。

4 结论

在阐明形态梯度良好奇异性检测能力的基础

(下转第 34 页 continued on page 34)

QIAN Hao, ZHAO Rong-xiang. Interharmonics Analysis Based on Interpolation FFT Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21):87-91.

[12] 曾泽昊,余有灵,许维胜.一种减小泄漏的同步化算法[J].电测与仪表,2005,(479):12-14.
ZENG Ze-hao,YU You-ling,XU Wei-sheng. A Synchronization Algorithm for Reducing Spectrum Leakage[J].Electrical Measurement & Instrumentation, 2005,(479):12-14.

[13] 曾泽昊,余有灵,许维胜.基于插值同步算法的频谱泄漏分析与仿真[J].系统仿真技术,2005,1(3):148-152.
ZENG Ze-hao,YU You-ling,XU Wei-sheng. The Analysis and Simulation of Spectrum Leakage Based on Interpolated Synchronous Algorithm [J]. System Simulation Technology, 2005,1(3):148-152.

[14] 惠锦,杨洪耕.改进的时域同步插值算法在基于 TDA 谐波和间谐波测量中的应用 [J].电工技术学报,2008,(23):124-129.
HUI Jin,YANG Hong-geng. Application of Improved Time-domain Interpolated Synchronous Algorithm in

Harmonic and Interharmonic Measurement Based on TDA[J]. Proceedings of the CSEE, 2008,(23):124-129.

[15] Liu Z, Himmel J, Bonfig K W. Improved Processing of Harmonics and Interharmonics by Time-domain Averaging[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(4):2370-2380.

[16] 布赖母.快速傅立叶变换[M].柳群,译.上海:上海科学技术出版社,1979.

[17] 程佩青.数字信号处理教程[M].北京:清华大学出版社,2001.

收稿日期: 2008-12-07; 修回日期: 2009-01-04

作者简介:

惠锦(1985-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统谐波与间谐波分析,谐波发射水平估计; E-mail:hj4655@163.com

杨洪耕(1949-),男,教授,博士生导师,长期从事电能质量及其控制的教学与研究。

(上接第 8 页 continued from page 8)
上,通过数学形态学和小波变换的综合利用,提出基于形态梯度与小波变换模之和的启动元件新算法,构成了较为完善的行波启动元件。大量 ATP 仿真测试验证了本文启动元件可在保证启动可靠性的同时,有效地提高弱故障下的启动灵敏度。

参考文献

[1] 罗四倍,段建东,张保会.基于暂态量的 EHV/UHV 输电线路超高速保护研究现状与展望[J].电网技术, 2006, 30(22): 32-41.
LUO Si-bei, DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui. Present Status and Prospect of Research and Development of Transient Component Based Ultra-high-speed Protection for EHV/UHV Transmission Lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 32-41.

[2] 陈平,牛燕雄,徐丙垠,等.现代行波故障测距系统的研制[J].电力系统自动化,2003,27(12):81-85.
CHEN Ping, NIU Yan-xiong, XU Bing-yin, et al. Development of Modern Travelling Wave Based Fault Locating System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 81-85.

[3] 董新洲,贺家李,葛耀中.小波变换在行波故障检测中的应用[J].继电器,1998,26(5):1-4.
DONG Xin-zhou, HE Jia-li, GE Yao-zhong. Application of Wavelet Transform in Detection of Fault Travelling waves[J]. Relay, 1998, 26(5): 1-4.

[4] 段建东,张保会.行波启动元件的算法研究[J].中国电机工程学报,2004,24(9):30-36.
DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui. Study of Starting Algorithm Using Traveling-waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 30-36.

[5] 魏军,罗四倍.基于信号奇异性检测的行波启动元件算法的探讨[J].继电器,2007,35(21):1-6.
WEI Jun, LUO Si-bei. Traveling-wave Starting Algorithm Based on Signal Singularity Detection[J]. Relay, 2007, 35(21): 1-6.

[6] Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology [M]. New York: Academic Press, 1982.

[7] Maragos P. Tutorial on Advances in Morphology Image Processing and Analysis[J]. Optical Engineering, 1987, 26(7): 623-632.

[8] 崔屹.图像处理与分析——数学形态学方法及应用[M].北京:科学出版社,2000.

[9] 尹文琴,刘前进.数学形态学在电力系统中的应用综述[J].继电器,2007,35(19):76-83.
YIN Wen-qin, LIU Qian-jin. Mathematical Morphology Review and Its Applications in Power System[J]. Relay, 2007, 35(19): 76-83.

[10] 林湘宁,刘沛,高艳.基于数学形态学的电流互感器饱和和识别判据[J].中国电机工程学报,2005,25(5):44-48.
LIN Xiang-ning, LIU Pei, GAO Yan. A Novel Method to Identify the Saturation of the Current Transformer Using Mathematical Morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 44-48.

收稿日期: 2008-12-08

作者简介:

苏煜(1973-),男,硕士,主要从事电力系统继电保护方面的工作; E-mail: linghusu@163.com

罗四倍(1982-),男,硕士,主要从事电力系统继电保护和数字化变电站的研究;

王薇(1977-),女,硕士,从事变电运行管理方面工作。