

## 小电流接地系统单相接地故障选线方法探究

鲁改凤<sup>1</sup>, 化雨<sup>2</sup>, 金小兵<sup>3</sup>, 任志强<sup>4</sup>

(1. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011; 2. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074; 3. 三门峡供电公司, 河南 三门峡 472000; 4. 周口市建筑设计研究院, 河南 周口 466000)

**摘要:** 针对国内外小电流接地系统中单相接地保护方法, 提出了一种新的基于零序电流高频幅值差的选线方法, 形成新的选线判据。利用此选线判据可分别对故障线路和非故障线路加以权重, 放大故障线路和非故障线路特性区别。采用小波变换对故障后各线路零序电流高频分量进行分析, 依选线判据进行处理, 从而获得各线路的权重。通过 Matlab 建立仿真模型, 对不同情况进行模拟仿真实验, 验证了此判据的正确性。

**关键词:** 小电流接地系统; 小波变换; 故障选线; 单相故障

### Research on a method of fault line selection for single-phase earth fault in ineffectively grounded power systems

LU Gai-feng<sup>1</sup>, HUA Yu<sup>2</sup>, JIN Xiao-bing<sup>3</sup>, REN Zhi-qiang<sup>4</sup>

(1. North China Institute of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Sanmenxia Power Supply Company, Sanmenxia 472000, China; 4. Zhoukou Architectural Design and Research Academy, Zhoukou 466000, China)

**Abstract:** This paper puts forward a new single-phase earth fault line selection method based on the difference of zero-sequence high-frequency amplitude as line selection criterion. The new method is for the single-phase protection in ineffectively grounded power systems. With this method, weights is given to the fault line and the non-fault line respectively, and the characteristic difference between the fault line and the non-fault line is enlarged. This paper analyzes high-frequency amplitude after the fault line of the signal processed by wavelet transform, then processes them, thus gets the weight of each line. The validity of the criterion is testified with simulation experiments in various conditions.

**Key words:** ineffectively grounded power systems; wavelet transform; fault line selection; single-phase earth fault

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0044-06

## 0 引言

小电流接地系统发生单相接地故障时其接线电压仍然对称, 不影响对用户供电, 故不必立刻断开故障线路, 按规程规定还可继续运行 1~2 h, 提高了供电可靠性, 所以, 国内外中低压配电网一般都采用小电流接地运行方式<sup>[1]</sup>。随着电网建设的发展, 配电网输电线路越来越长, 电缆应用越来越多, 使得线路的对地电容增大。若仅采用中性点不接地方式时, 故障点的短路电流增大, 不利于灭弧, 并对设备绝缘形成更大的威胁。所以我国的配电网系统中性点接线方式有: 中性点不接地方式、中性点经小电阻接地方式、中性点经消弧线圈接地方式。消弧线圈和电阻的接入减小了单向接地故障时电流, 也减弱了利用这些信息量来选择故障线路装置

的灵敏性和选择性, 影响了供电的可靠性。

现有的小电流接地系统单相接地故障选线方法, 无论是基于暂态量还是基于稳态量的, 都受到 CT 不平衡、出线回路数、线路长短、系统运行方式及过渡阻抗的影响, 使得我们要对新的选线方法要求更加急切, 从而提高选线正确率的精度。

本文采用小波变换对故障信号进行分析, 利用信号的第一极大值和经小波变换第一尺度高频分量的第一极大值, 视高频分量的第一极大值为一权重系数, 达到选出故障线路的目的。并提出基于零序电流暂态电流第一极大值的选线判据。然后利用 Matlab 建立小电流接地系统仿真模型, 通过大量的仿真数据验证了本文提出的选线方案的正确性和可靠性。

## 1 小波分析理论在选线方法中的应用

小波分析是一门新兴数学分支和应用方法,它是数学理论与工程应用相结合的产物。小波变换是一种信号的时间-频率分析方法,它具有多分辨率分析的特点,而且在时、频两域都具有表征信号局部特征的能力,是一种窗口大小固定不变但其形状可变,时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法,即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,如果要分析高频信号,则采用具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率窗口,很适合于对奇异信号的瞬间分析,所以被誉为分析信号的显微镜<sup>[2]</sup>。

在实际应用中,因为连续小波变换的冗余性,同时为了使小波变换能实现快速计算,常需要把连续小波变换离散化<sup>[3]</sup>,其离散化的方法就是将小波基函数 $\psi_{a,b}(t)$ 的尺度因子 $a$ 和平移因子在一些离散点上取值,通常取 $a = a_0^j$ ,  $b = ka_0^j b_0$ ,  $j \in Z$ ,  $a_0 > 1$ ,则与其相应的离散小波函数为:

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^j}} \psi\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (1)$$

离散化小波变换系数可表示为:

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi_{j,k}(t)} dt \quad (2)$$

其重构公式为:

$$f(t) = C \sum_{-\infty}^{+\infty} \sum_{-\infty}^{+\infty} C_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (3)$$

多分辨率分析<sup>[4]</sup> (Multi-Resolution Analysis) 又称为多尺度分析,是建立在函数空间概念上的理论。其思想是根据观察和分析的不同需要,可以将尺度的大小自由调节,得到观察对象的细微部分,满足分析的需要。本文利用小波变换的 Mallat 分解算法来获得模极大值点对应于采样数据的奇异点,因此信号的奇异性检测就转变为小波变换模极大值的检测。

使用小波变换进行时频分析时,要提取的是非平稳信号的瞬时、奇异与突变成分,所选小波主要考虑其在时、频两域的紧支撑能力,要求其具有相对较好的频域特性,基于以上分析并考虑到故障选线的计算量,由于 Db5 小波基具有较好的时、频两域的紧支撑能力,较好的频域特性、正交性和快速

计算能力,本文最终选用 Db5 小波。

## 2 小波变换高频分量第一模极大值的获得

中性点不接地系统当发生单相接地故障时,系统中将出现零序电压和零序电流,且故障相的零序电流等于所有非故障相对地电容电流之和,故障相零序电流值最大,且相位相反;当发生母线故障时,所有线路的零序电流相位相同。

首先通过仿真得到线路的零序电流原始信号图,如图 1;再利用小波分析对所有线路的零序电流信号进行 Db5 分析,可以得到高频 1 尺度的分解系数下的第一幅值极大值。其对比图如 2 所示。

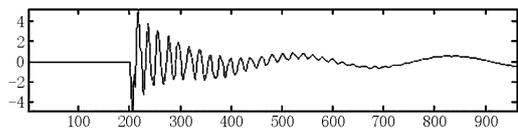


图 1 非故障线路 1 的原始信号图

Fig.1 Original signal of non-fault line 1

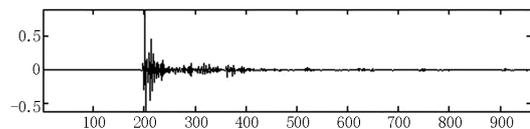


图 2 非故障线路 1 经 Db5 分解尺度 1 结果

Fig.2 Results of the non-fault of line 1 through Db5 decomposition in scale 1

因为尺度 1 是对高频分量的分解,正适合利用暂态分量的思路,从图 2 中也可以看到经过分解后的 1 尺度上,可以获得第一幅值模最大值。

如果所采集到的信号中含有噪声干扰,可以用前面讲过的小波去噪的方法,将信号中的噪声滤除,其去噪过程由图 3 所示。

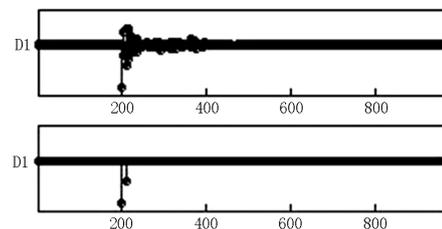


图 3 小波去噪过程

Fig.3 Process of wavelet de-noising

经过小波去噪后,对信号进行重构,然后再对重构后的信号做 Db5 小波分解,这样可以很清楚的找出第一幅值模最大值,其第一幅值模最大值为 0.91。图 4 是重构后信号做 Db5 分解后的 1 尺度图。

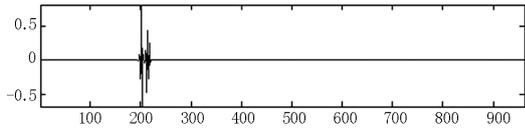


图4 非故障线路1去噪后做Db5分解的尺度1结果图  
Fig.4 Results of the non-fault of line 1 through de-noising Db5 decomposition in scale 1

### 3 选线判据

针对现有的选线方法受到电网的运行方式、线路长短、过渡电阻的影响，使得各种选线方法都有自身的盲点。当发生单相接地故障时，如果有上述条件影响而信号微弱，则更难判别。从上面的分析中可以知道，稳态分量虽然可靠，但幅值较小，难以识别；在发生故障的情况下，暂态分量数值大，但衰减比较快，难以捕捉。鉴于要避免各种影响选线方法的因素，采用了小波分析方法对发生接地瞬间的暂态信号进行分析，提取信号中的特征信息来实现选线，下面对中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统的选线判据进行分析。

#### 3.1 中性点不接地系统

从上面的分析中可以得出：故障相零序电流的第一模最大值最大，且故障相的模最大值的方向与非故障相的方向相反。

由于发生故障后，故障相的零序电流第一个到达的最大值比非故障相的零序电流第一个到达的最大值大，并且经过小波分解后，其第一幅值模最大值也为故障相最大，所以可以利用下面方法算出故障相，如表1。

表1 中性点不接地系统单相故障选线判据

Tab.1 Line selection criterion for the single-phase fault

of neutral ungrounded system					
	$p_1$	$p_2$	...	$p_N$	sum
$p_1$	$p_1/p_1$	$p_1/p_2$	...	$p_1/p_N$	$\sum_{n=1}^N p_1/p_n$
$p_2$	$p_2/p_1$	$p_2/p_2$	...	$p_2/p_N$	$\sum_{n=1}^N p_2/p_n$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	$\vdots$
$p_N$	$p_N/p_1$	$p_N/p_2$	...	$p_N/p_N$	$\sum_{n=1}^N p_N/p_n$

表1中： $N$ 表示母线上有 $N$ 条出线。

$$p_i = L_i \times M_i \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

式中： $L_i$ 表示第 $i$ 条线路出现零序电流后第一个最大值点的数值的绝对值； $M_i$ 表示第 $i$ 条线路的零序

电流经过Db5分解后在第一尺度上的第一幅值极大值。所以， $p_i$ 为第 $i$ 条线路上零序电流第一个最大值点的数值，与其经Db5分解后的在第一尺度上的第一幅值极大值的乘积。然后将每一行相加，获得sum列，即为各条线路的权重。

假设第 $i$ 条线路故障，设：

$$M_{\max} = \sum_{n=1}^N p_i / p_n \quad (5)$$

得到的最大值再进行纵向比较，即：

$$\frac{M_{\max}}{\sum_{n=1}^N p_j / p_n} > 1.9 \quad (6)$$

$$j = 1, 2, \dots, N, j \neq i$$

式(6)为大量各种情况下仿真计算后的一最小值，也可称为不接地系统故障线路的门槛阈值。如果某条线路满足式(6)，其行标就是故障线路。如果没有满足式(6)的线路，则为母线故障。

#### 3.2 经消弧线圈接地系统

对于中性点经消弧线圈接地系统，由于有消弧线圈的补偿电流对零序电流进行了补偿，使其特征更难提取。但是从上面的理论分析可知，如果改动消弧线圈的电感值，只有故障相的零序电流变化较大，非故障相的零序电流几乎不变。因此为了得到明显的特征量，采用改变前后的数值之差作为寻找故障相的特征前提。

其选线判据如表2所示。

表2 中性点经消弧线圈接地系统单相故障选线判据

Tab.2 Line selection criterion for the single-phase fault of neutral grounded system via arc-suppression coil

	$\Delta p_1$	$\Delta p_2$	...	$\Delta p_N$	sum
$\Delta p_1$	$\Delta p_1 / \Delta p_1$	$\Delta p_1 / \Delta p_2$	...	$\Delta p_1 / \Delta p_N$	$\sum_{n=1}^N \Delta p_1 / \Delta p_n$
$\Delta p_2$	$\Delta p_2 / \Delta p_1$	$\Delta p_2 / \Delta p_2$	...	$\Delta p_2 / \Delta p_N$	$\sum_{n=1}^N \Delta p_2 / \Delta p_n$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	$\vdots$
$\Delta p_N$	$\Delta p_N / \Delta p_1$	$\Delta p_N / \Delta p_2$	...	$\Delta p_N / \Delta p_N$	$\sum_{n=1}^N \Delta p_N / \Delta p_n$

表2中： $N$ 表示母线上有 $N$ 条出线。

$$\Delta p_i = \Delta L_i \times M_i \quad (7)$$

式中： $\Delta L_i$ 表示第 $i$ 条线路调整(失谐度)消弧线圈电感值前后出现零序电流后第一个最大值点的数值之差； $M_i$ 表示第 $i$ 条线路的零序电流经过Db5分解后在第一尺度上的第一幅值模极大值。所以， $\Delta p_i$

为第  $i$  条线路上调整 (失谐度) 消弧线圈电感值前后出现零序电流后第一个最大值点的数值之差, 与其经 Db5 分解后的在第一尺度上的第一幅值极大值的乘积。然后将每一行相加, 获得  $sum$  列, 即为各条线路的权重。

假设第  $i$  条线路故障, 设:

$$M_{gz} = \sum_{n=1}^N \Delta p_i / \Delta p_n \quad (8)$$

得到的最大值再进行纵向比较, 即:

$$M_{gz} \times \sum_{n=1}^N \Delta p_j / \Delta p_n < 0 \quad (9)$$

$$j = 1, 2, \dots, N, j \neq i$$

如果某条线路满足式 (9), 其行标就是故障线路。如果没有满足式 (9) 的线路, 则为母线故障。

由于这种选线方法用的是零序电流的残流, 并且由以上分析也知道故障线路在消弧线圈电感值变动时, 其变动比较大, 而非故障线路变动比较小, 如果出现  $\Delta p_j = 0$ , 表 2 所述算法失效, 为了避免这种情况发生, 需要做以下处理, 即把零序电流第一个最大值点的数值之差等于零的, 使其等于第一个最大值点的数值之差中大于零数值的最小值。用公式表示如下:

$$\begin{aligned} \Delta p_j &= \min(\Delta p_i) \\ i &= 1, 2, \dots, N, i \neq j, \\ \Delta p_i &> 0 \end{aligned} \quad (10)$$

### 3.3 选线步骤

(1) 采用零序电压的突变启动选线, 即零序电压的突变时刻就是故障发生的时刻。

(2) 发生故障的相, 相电压最低, 但经过过渡电阻接地时, 对于中性点不接地系统, 电压升高相

的下一相为接地相; 对于经消弧线圈接地系统, 过补偿情况下, 则升高相的下一相为接地相。

(3) 对所有线路的零序电流信号进行去噪处理, 得到零序电流第一次到达最大值时的数值。对于经消弧线圈接地的电网, 需要改变消弧线圈的电感值, 得到零序电流第一个最大值点的数值之差。

(4) 根据 Mallat 算法, 利用 Db5 小波对去噪后的信号进行 5 尺度分解。分别求出各条线路在小波变换下第一尺度的第一幅值模极大值。

(5) 利用上节判据, 选出故障线路。

## 4 算例仿真

按照图 5, 在 Matlab 中利用电力系统仿真工具箱建立仿真模型。当线路 3 发生单相接地故障时, 通过提取信号中的第一最大值和经过小波变换的 Db5 分解后的第一尺度最大值, 按照上述分析中的判据进行计算, 仿真结果如下。

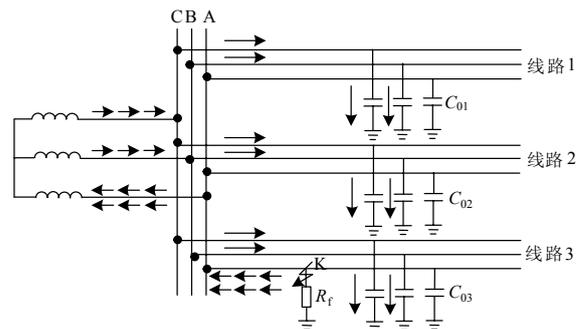


图 5 中性点不接地系统单相接地故障时电流分布  
Fig.5 Current distribution of single-phase grounded fault in neutral ungrounded system

在中性点不接地系统仿真中, 分别对不同长度的线路、故障发生时的不同角度以及母线故障仿真, 如表 3 所示, 均能正确选择出来故障线路。

表 3 中性点不接地系统

Tab.3 Neutral ungrounded system

峰值电流	模最大值		L1	L2	L3	sum	线路长度	相角
线路 3 故障								
5.24	1.22	L1	1.00	0.73	0.26	1.99	20	0
6.28	1.39	L2	1.36	1.00	0.35	2.71	25	0
9.58	2.60	L3	3.89	2.85	1.00	7.75	15	0
8.23	1.17	L1	1.00	1.79	0.32	3.11	40	0
4.67	1.15	L2	0.56	1.00	0.18	1.76	25	0
13.00	2.31	L3	3.12	5.59	1.00	9.71	20	0
线路 3 在相角 30° 时故障								
7.52	1.16	L1	1.00	1.60	0.40	3.00	40	30

续表 3

峰值电流	模最大值		L1	L2	L3	sum	线路长度	相角
4.54	1.20	L2	0.62	1.00	0.25	1.88	25	30
9.14	2.38	L3	2.50	3.99	1.00	7.49	20	30
3.82	1.12	L1	1.00	0.73	0.25	1.99	25	0
5.36	1.09	L2	1.37	1.00	0.35	2.71	30	0
7.64	2.21	L3	3.95	2.89	1.00	7.83	45	0
母线故障								
5.12	1.59	L1	1.00	0.67	0.52	2.19	20	0
7.69	1.59	L2	1.50	1.00	0.79	3.29	25	0
5.82	2.67	L3	1.91	1.27	1.00	4.18	15	0
7.08	1.84	L1	1.00	1.33	1.86	4.19	40	30
5.77	1.70	L2	0.75	1.00	1.40	3.16	25	30
4.30	1.63	L3	0.54	0.71	1.00	2.25	20	30

在中性点经消弧线圈接地系统仿真中，我们分别对不同长度的线路、故障发生时的不同角度以及母线故障仿真，如表 4 所示，均能正确选择出来故障线路。

表 4 中性点经消弧线圈接地系统

Tab.4 Neutral grounded system via arc-suppression coil

电流峰值差	模最大值		L1	L2	L3	sum	线路长度	相角
线路 3 故障								
0.17	1.07	L1	1.00	1.06	-0.43	1.63	20	0
0.18	0.98	L2	0.94	1.00	-0.40	1.54	25	0
-0.21	2.05	L3	-2.34	-2.49	1.00	-3.83	15	0
0.08	0.72	L1	1.00	0.29	-0.12	1.18	40	0
0.23	0.89	L2	3.41	1.00	-0.39	4.01	25	0
-0.23	2.24	L3	-8.63	-2.53	1.00	-10.17	30	0
线路 3 在相角 30° 时故障								
0.13	1.08	L1	1.00	0.79	-0.15	1.63	25	30
0.17	1.05	L2	1.27	1.00	-0.19	2.07	30	30
-0.40	2.25	L3	-6.51	-5.13	1.00	-10.64	45	30
0.26	1.08	L1	1.00	0.92	-0.31	1.61	40	30
0.30	1.02	L2	1.09	1.00	-0.33	1.76	15	30
-0.43	2.13	L3	-3.26	-2.99	1.00	-5.25	30	30
母线故障								
0.01	1.51	L1	1.00	0.31	0.09	1.41	25	135
0.05	1.26	L2	3.21	1.00	0.30	4.51	30	135
0.15	1.39	L3	10.69	3.33	1.00	15.02	45	135
0.15	1.88	L1	1.00	2.02	2.09	5.11	40	30
0.07	1.99	L2	0.49	1.00	1.03	2.53	25	30
0.10	1.35	L3	0.48	0.97	1.00	2.45	20	30

对中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统在故障点处有过渡电阻影响，仿真结果如表 5，均能正确选择出来故障线路。

表 5 故障处经过渡电阻接地  
Tab.5 Fault spot ground via transition resistance

电流峰值差	模最大值		L1	L2	L3	sum	线路长度	过渡电阻
A 中性点不接地系统经过渡电阻接地								
3.53	1.09	L1	1.00	0.70	0.24	1.94	20	100
5.02	1.09	L2	1.42	1.00	0.34	2.76	25	100
7.48	2.18	L3	4.24	2.98	1.00	8.22	15	100
5.61	1.04	L1	1.00	1.83	0.43	3.26	40	100
3.47	0.92	L2	0.55	1.00	0.23	1.78	25	100
6.96	1.97	L3	2.35	4.30	1.00	7.65	20	100
B 中性点经消弧线圈接地系统经过渡电阻接地								
0.26	1.20	L1	1.00	0.22	-0.13	1.09	20	100
0.85	1.67	L2	4.57	1.00	-0.60	4.97	25	100
-1.00	2.35	L3	-7.57	-1.65	1.00	-8.22	15	100
0.44	0.81	L1	1.00	0.92	-0.31	1.61	30	100
0.09	1.01	L2	1.09	1.00	-0.33	1.76	25	100
-0.6	1.66	L3	-3.26	-2.99	1.00	-5.25	15	100

## 5 总结

分析了信号经小波变换之后主要特征体现在模极大值上, 使零序电流第一个最大值点的数值之差与模极大值相乘, 相当于模极大值是一个权重, 增加选线信号的强度, 最后提出了自己的选线判据与选线步骤。

通过对中性点不接地系统发生金属性接地和经过渡电阻接地、中性点经消弧线圈接地系统发生金属性接地和经过渡电阻接地各种情况进行仿真的结果分析, 可以看出, 此方法可避免线路长度、发生故障时的相角以及过渡电阻对其造成的影响。因此, 针对中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统所形成的此选线判据是正确的。

## 参考文献

- [1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 三版. 北京: 中国电力出版社, 1994.
- [2] 吴玲, 孙莹. 连续小波变换在小电流接地系统单相接

地故障选线中的应用[J]. 继电器, 2003, 31(11): 20-24.  
WU Ling, SUN Ying. Application of continuous wavelet transform to select the fault line of single-phase earth faults in non-solid earthed power system[J]. Relay, 2003, 31(11): 20-24.

- [3] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4] 陈基明. 小波分析基础[M]. 上海: 上海大学出版社, 2002.

收稿日期: 2009-12-17; 修回日期: 2010-03-22

### 作者简介:

鲁改凤(1963-), 女, 副教授, 本科, 主要从事电力系统安全运行与保护教学、研究及电力设计等; E-mail: lugaifeng@yahoo.com.cn

化雨(1989-), 男, 主要研究方向为电气工程及其自动化;

金小兵(1984-), 男, 助工, 研究生, 硕士, 主要从事电力系统安全运行与保护工作及研究。

(上接第 43 页 continued from page 43)

- [6] 汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [7] 彭东海. 基于模拟退火的混合遗传算法[J]. 湖南工程学院学报, 2005, 15(3).  
PENG Dong-hai. A mixed genetic algorithm based on simulated annealing[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2005, 15(3).
- [8] 张铭, 王丽萍, 安有贵, 等. 水库调度图优化研究[J].

武汉大学学报: 工学版, 2004, 37(3).

ZHANG Ming, WANG Li-ping, AN You-gui, et al. Optimizing study on reservoir operation chart[J]. Journal of Wuhan University: Engineering Edition, 2004, 37(3).

收稿日期: 2009-08-14; 修回日期: 2009-10-09

### 作者简介:

邵琳(1984-), 女, 硕士研究生, 主要从事水(火)电调度自动化方面的研究。E-mail: ner7@163.com