

电力系统接地短路故障中零模分量的依频关系分析

李友军¹, 徐丽娜²

(1. 国家电力公司电力自动化研究院, 江苏 南京 210003; 2. 江苏省苏北供水局, 江苏 南京 210029)

摘要: 通过介绍零模的概念, 从各个方面分析了零模行波波头依频变化的关系。得到了零模波头的频谱曲线、零模行波传播的衰减系数依频关系曲线、故障距离和零模波头中最大频率分量的关系曲线以及零模波速度和频率的关系曲线, 并就分别利用零模波头中最大频率分量和零线模波速差法的故障测距方法做了简要的分析。

关键词: 零模分量; 频率分析; 零模行波; 故障定位

Relationship between earth mode surge and frequency on power system earth fault

LI You-jun¹, XU Li-na²

(1. Nanjing Automation Research Institute of State Power Company, Nanjing 210003, China;
2. Water Supply Bureau of North Jiangsu, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the discussion about earth mode concept, the relationship between earth mode surge and frequency is described. The curve of earth mode surge frequency spectrum, the curve of earth mode surge transmission coefficient via frequency, the curve between maximum frequency of earth mode surge and fault location, and the curve between earth mode wave-velocity and frequency are drawn and discussed. The fault location method using earth mode surge is briefly discussed.

Key words: earth mode component; frequency analysis; earth mode travelling wave; fault location

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)15-0004-05

0 引言

高压输电线路发生接地短路故障后, 故障点将产生暂态行波, 暂态行波以三种传输模式向母线处传播, 因此在母线处将会检测到突变的行波波头。不同的行波传播模式, 其传播的特性不同。例如线模的传播速度快, 而且各个频率下其传播速度基本一样, 而零模分量的传播速度慢一些, 而且不同频率分量的传播速度不一样。由于零模分量的传播过程涉及输电线路的零序参数, 所以零模分量的传播系数和特征阻抗以及不同频率分量传播距离都和零序参数相关。零模分量的传播特性影响故障后输电线路上电压电流行波波头, 这就为利用暂态行波进行故障定位带来一些问题, 因此讨论零模分量的依频关系是正确理解暂态行波波头变化的关键问题。本文将围绕零模分量的传播系数依频关系、故障距离依频关系、零模速度依频关系等展开讨论。

1 模量的概念

对于三相输电线路可以列出波动方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial x} &= Zi \\ \frac{\partial i}{\partial x} &= Yv \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $v=[v_A, v_B, v_C]^T$; $i=[i_A, i_B, i_C]^T$; Z 和 Y 均为 3×3 阶矩阵。

式(1)可以改写为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} &= Pv \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} &= P^T i \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $P=ZY$; $P^T=YZ$ 。

对于故障线路来说, P 为非对角阵。由于 P 为非奇异阵, 根据线性代数, 总能找到变换矩阵 S 使

$$T = S^{-1}PS$$

为对角阵。这样式(2)变成如下的解耦形式:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 v_m}{dx^2} &= S^{-1}PS v_m \\ \frac{d^2 i_m}{dx^2} &= Q^{-1}P^T Q i_m \end{aligned}$$

其中: $v_m = [v^{(0)}, v^{(1)}, v^{(2)}]^T = S^{-1} [v_A, v_B, v_C]^T$; $i_m = [i^{(0)}, i^{(1)}, i^{(2)}]^T = Q^{-1} [i_A, i_B, i_C]^T$; Q 是和 S 同类型的变换矩阵; v_m 、 i_m 即为模量; $v^{(0)}$ 、 $v^{(1)}$ 、 $v^{(2)}$ 分别被称为零模、1 模、2 模, 经推导可知, 对高压输电线来说, 1 模和 2 模的波速一样, 统称为线模。线模的速度接近光速, 零模的速度慢一些, 其波头会滞后线模。

2 线路模型

本文所有的探讨都是基于 EMTP 的仿真结果, 文中采用分布参数线路模型。其中的仿真线路采用的是依频变化的分布参数线路模型。在这种模型下, 行波传播的两个重要的参数——特征阻抗和传播常数分别为:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}$$

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \quad (3)$$

式中的 R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 分别为线路单位长度的电阻、电感、电导和电容, 它们也是频率的函数。其中的电阻和电感受频率的影响最大, 电导和电容通常被认为是常数, 忽略频率变化的影响。非仿真线路模型采用的是恒定分布参数线路模型, 在这种模型中, R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 都是常数, 不随频率变化。分析中用到的零模分量的行波头都是从行波头初次到达检测点算起。数据窗长度是由频率步长和时域采样率决定的。

文中采用的系统线路图如图 1 所示。故障都设置在东明—三堡线上, 该线路的参数采用的是频率相关的分布参数线路模型, 使用 EMTP 的 LINE CONSTANT 支持程序计算线路的依频参数, 然后再计算线路故障波形。检测点设在三堡。

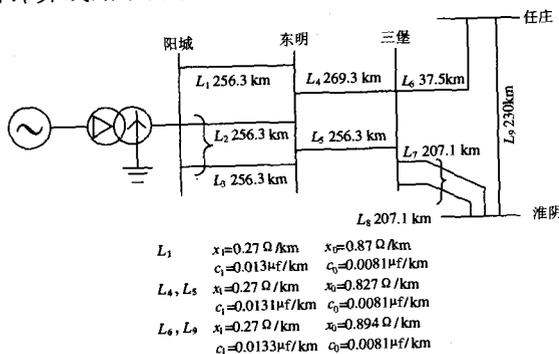


图 1 晋-苏 500 kV 输电线路示意图
Fig.1 Jin-Su 500 kV power transmission line

3 零序参数的依频分析

由式 (3), 零模分量的传播常数是由 R_0 、 L_0 、

G_0 、 C_0 决定的, 因此要分析零模行波的依频关系, 必须首先分析这些参数的依频关系。 G_0 很小, 忽略; C_0 基本上和频率无关^[1], 故本文不再赘述。

3.1 零序电阻的依频关系

影响导线电阻的因素有: 导体的材质、结构、尺寸、温度和频率等。前三个因素在输电线路架设完成后, 都是定值, 基本不发生变化; 温度在一年四季的变化很大, 但是它对电阻的影响较小, 也不容易定量分析; 频率对输电线路的电阻 (特别是对零序电阻) 影响很大。线路电阻的大小主要受集肤效应和邻近效应的影响, 集肤效应和邻近效应在频率越高、导体的电阻率越高和导体直径越大时越显著。图 2 是正序和零序电阻随频率变化的关系曲线。

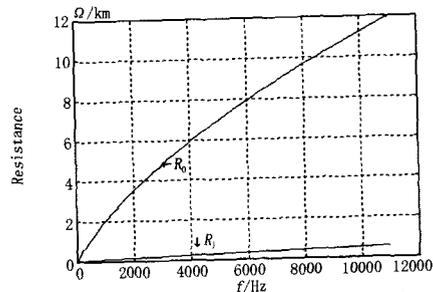


图 2 零序电阻和正序电阻随频率变化曲线
Fig.2 Zero-phase sequence and positive-phase sequence resistance via frequency

在低频的时候, 零序电阻和正序电阻相差不大, 随着频率的增加, 零序电阻迅速增加, 到了 1 kHz 的时候, 零序电阻已经比正序电阻大一个数量级了。利用零模行波进行故障定位时, 必须考虑零序电阻的依频关系。

3.2 零序电感的依频关系

电感和电阻一样, 也是因为集肤效应和邻近效应, 使其与频率密切相关。而零序电感则是因以大地为回路, 所以其和频率的关系要比正序电感密切的多。图 3 是用 EMTP 程序中的 AUX 模块计算出的线路电感随频率的变化曲线。

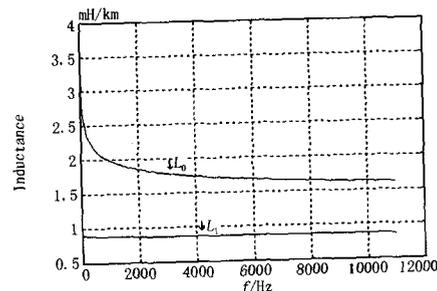


图 3 零序电感和正序电感随频率变化曲线
Fig.3 Zero-phase sequence and positive-phase sequence inductance via frequency

3.3 零模衰减系数的依频分析

式(3)中的传播常数 γ 的实部就是行波传播的衰减常数,从式(3)可知,零模衰减常数只和故障线路的单位参数有关,所以,不同故障距离的情况下,线路的衰减常数是一样的。由于零序电阻和零序电抗 (ωL_0) 都随频率增加而增加(分别如图2、8),所以零模行波的衰减常数随频率的增加而增加,频率越高,零模行波衰减越厉害。零模行波衰减系数和频率的关系曲线如图4所示。

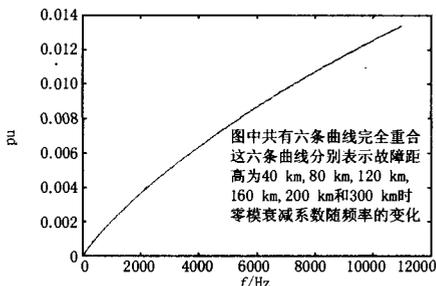


图4 零模衰减系数随频率变化曲线

Fig.4 Earth mode surge attenuation via frequency

4 零模波头的频谱分析

电力系统正常运行时,零模分量为零;当电力系统发生接地故障时,在故障点,零模分量的电压电流波形将发生突变,是阶跃信号。大家都知道,单位阶跃信号的频谱为:

$$\hat{u}(\xi) = 2\pi\delta(\xi) + \frac{1}{j\xi}$$

其幅值为:

$$|\hat{u}(\xi)| = 2\pi\delta(\xi) + \frac{1}{\xi}$$

所以阶跃信号的频谱是随频率按 $\frac{1}{\xi}$ 的衰减规律衰减的。所以,零模信号也应该具有类似的衰减规律。

零模分量在故障点的幅值随不同的故障类型和故障时刻而不同,简述如下:

对于单相短路(设A相短路):

$$u_A(t) = 0,$$

$$u_B(t) = A\sin(\omega t + \theta - 120^\circ),$$

$$u_C(t) = A\sin(\omega t + \theta + 120^\circ)$$

零模分量为:

$$u^{(0)}(t) = \frac{1}{3}(u_A + u_B + u_C) = \frac{1}{3}A\sin(\omega t + \theta)$$

对于两相接地短路(设A、B相接地短路),零模分量为:

$$u^{(0)}(t) = \frac{1}{3}u_C = \frac{1}{3}A\sin(\omega t + \theta + 120^\circ)$$

在单相短路情况下 $\theta = 0^\circ$ 、在两相接地短路情况下 ($\theta + 120^\circ$) $= 0^\circ$, 没有零模故障分量存在。故短路时刻决定零模幅值大小,最终决定观测点所能观测到的最高频率分量幅值的大小。零模的高频分量在向观测点传递过程中不停衰减,故障距离越远,零模分量中的高频分量越少。因此故障时产生零模幅值大小和故障距离决定检测点零模分量中最高频率分量的幅值大小。

虽然故障点的零模电流信号是一个阶跃信号,但是在检测点的零模电流信号的高频分量衰减较大,其波头比较光滑,奇异性较弱。用EMTP仿真了零模电流波形,如图5。

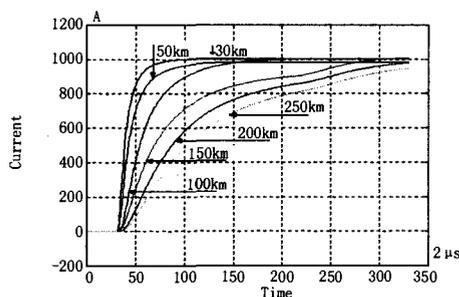


图5 不同故障距离情况下零模波头的比较

Fig.5 Earth mode surge under different fault distance

由图5可以得到如下结论:①零模波头比较光滑,高频成份少;②故障距离越远,波头越光滑,说明故障距离远,高频衰减厉害;③故障距离远,波头检测困难,故障距离近,波头检测容易;④故障点的零模波头将是一个阶跃波;⑤故障距离和零模波头的光滑度成正比,和最高频率分量成反比。

图5中的零模波头的频谱图如图6。由图6可看出:①各条幅频曲线都是随频率增大而衰减;②随着故障距离的增加,频率分量的幅值减小;③零模波头高频的有效范围是3~20k。

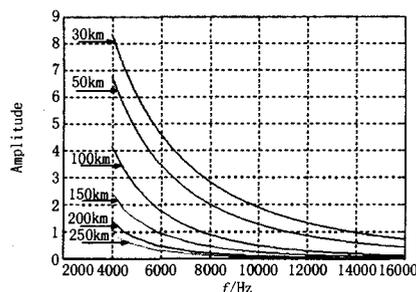


图6 零模波头的幅频曲线

Fig.6 Earth mode surge amplitude-frequency under different fault distance

另一方面, 零序电阻受集肤效应的影响, 随着频率的增大, 零序电阻急剧增加 (如图 2), 所以, 零模的衰减系数也将随频率的增大而迅速增加。

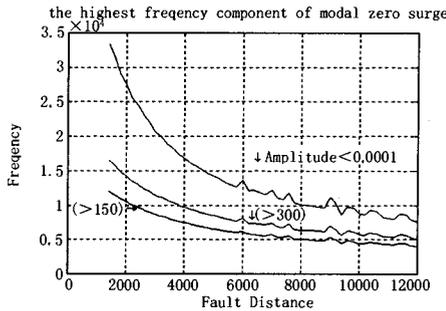


图 7 零模波头中最高频率和故障距离的关系

Fig.7 Highest frequency component of earth mode surge under fault distance

注: 最高频率的定义: 第一条曲线取频率幅值和 10^{-4} 最接近的频率分量; 第二、三条曲线分别取幅值是频率为 0 赫兹幅值的 $1/300$ 、 $1/150$ 的频率分量。

综合以上的分析, 零模首波头中的最高频率随故障距离的增加而单调减小; 故障距离越大, 零模波头中的高频成份越少, 零模波头越光滑。那么能不能利用零模波头的最高频率测量故障距离? 从理论上来说是可行的, 但是由于故障时故障点的电流行波阶跃幅度和故障时故障相角密切相关, 所以测距精度不会很高。

使用零模波头的最高频率测量故障距离时, 得到如图 7 的故障距离和最高频率的关系曲线。可以看出, 图 7 中的曲线整体上是单调递减的, 但并不是光滑递减的, 特别是故障距离大于 150km 之后, 曲线出现了震荡。所以直接使用零模波头的最高频率测距, 测距精度在故障距离较近时高一些, 故障距离较远时低。可以考虑作为辅助测距方法。

5 零模波速度的依频分析

行波传播的两个重要的参数是特征阻抗和传播常数, 其中的传播常数包含着行波传播的速度和衰减。设零模行波的传播常数为:

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta$$

用线路参数表示 β (由于电导 G_0 很小, 忽略) 如式 (4)。

通常认为线路的单位电容 C_0 是个常数, 和频率大小无关。式 (4) 中, 零序电阻随频率升高迅速增加 (如图 2), 而零序电感随频率升高略有降低 (如

图 3), 线路单位零序电抗 $X_0 = (\omega L_0)$ 随频率升高亦迅速增加。

$$\beta^2 = \frac{\sqrt{(\omega^2 L_0 C_0)^2 + (\omega R_0 C_0)^2} - \omega^2 L_0 C_0}{2} \cdot \frac{(\omega R_0 C_0)^2}{2 * (\sqrt{(\omega^2 L_0 C_0)^2 + (\omega R_0 C_0)^2} + \omega^2 L_0 C_0)} = \frac{\omega C_0 R_0^2}{2 * (\sqrt{(\omega L_0)^2 + R_0^2} + \omega L_0)} \quad (4)$$

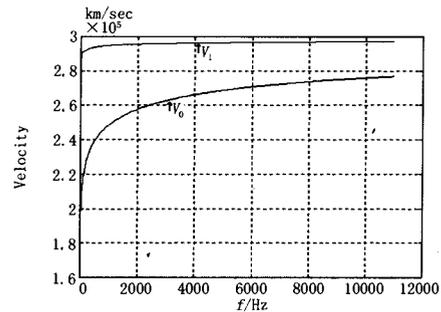


图 8 零模线模波速度随频率变化曲线

Fig.8 Wave-velocity of earth mode and line mode via frequency

对比图 3 和图 2 可知, 线路零序电抗随频率的增幅比电阻大得多, 所以式 (4) 中 β^2 将随着频率的增加而减小。零模的波速度 $v = \frac{\omega}{\beta}$ 将随着频率的

升高而增加。对线模, 由于正序电阻和电感基本上与频率无关, 所以线模波速度基本上保持不变。零模、线模波速度随频率的变化曲线如图 8。

综合以上的分析, 零模波速度随频率升高而增加, 所以零模波头中的各个频率分量将按频率从高到底依次到达检测点, 故障距离越远, 零模波头中的最高频率越低, 其速度也越小。零模波速度和故障距离的关系曲线如图 9。

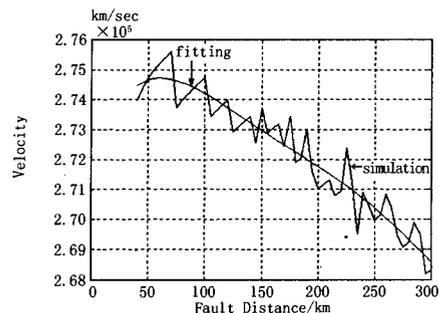


图 9 零模波速度和故障距离的关系

Fig.9 Wave-velocity of earth mode surge via fault distance

图 9 中仿真曲线的整体走势是速度随着故障距离的增加而减小, 如图中的拟合曲线所示; 曲线波动的原因是采样误差和零线模速度 v_0 、 v_1 太接近造成的。如果使用零模波头进行故障测距, 必须考虑零模波速度的变化。由于零模波速度和线路的零序阻抗和零序电阻有关系, 所以零模波速度和故障距离的关系曲线对于特定的线路来说, 应该是固定不变的, 或者说变化很小。所以在利用零模测距时, 可以考虑使用拟合的速度和距离的关系曲线。同时注意到这种方法的测距精度在故障距离远时高; 反之低。

6 零模、线模波速差法故障定位的 EMTP 仿真

用零模、线模波速差法进行故障定位应考虑零模行波的波速度随频率的变化。本文做 EMTP 仿真时采用的零模波速度是图 9 的拟合曲线, 随着故障距离的增加, 不断减小波速度, 以使计算结果尽量准确。线模速度基本上和频率无关, 认为是固定值, 采用 $v_1 = 2.98 \times 10^5$ km/s 计算。

用图 1 晋-苏 500 kV 输电线路示意图, 在东明—三堡线上做仿真试验, 仿真数据来自 EMTP, 检测点设在东明, 测距结果见表 1。

表 1 故障测距仿真结果 (单位: km)

Tab.1 Results of fault location with EMTP simulation (Kilometer)

故障实际距离	故障计算距离	误差	故障实际距离	故障计算距离	误差
20	18.3	1.7	137.3	138.5	-1.2
27.3	22.7	4.6	140.3	138.5	1.8
35.3	34.2	1.1	142.3	141.3	1
40.3	37.8	2.5	147.3	147	0.3
45.3	45	0.3	152.3	147	5.3
50.3	51.8	-1.5	160.3	158.4	1.9
55.3	55.1	0.2	172.3	167	5.3
60.3	64.6	-4.3	182.3	184.3	-2
70.3	67.7	2.6	192.3	198.1	-5.8
75.3	73.7	1.6	197.3	198.1	-0.8
80.3	82.5	-2.2	207.3	212.6	-5.3
90.3	85.4	4.9	217.3	218.2	-0.9
100.3	99.5	0.8	222.3	218.2	4.1
105.3	102.3	3	227.3	223.6	3.7
110.3	105	5.3	232.3	231.6	0.7
122.3	121.7	0.6	237.1	241.9	-4.8
132.3	127.3	5	242.3	239.4	2.9
135.3	130	5.3	247.3	251.8	-4.5

图 10 为测距误差分布曲线。

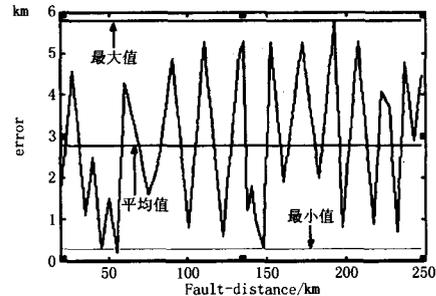


图 10 测距误差分布图

Fig.10 Error distribution of fault location

从误差曲线可以看出, 这种算法测距的最大误差接近 6 km, 是工程应用不能接受的。这种算法不能作为行波测距的实用方法。但是, 这种测距方法的可靠性却很高, 测得某线路上的故障距离不受其他线路波头干扰的结果。所以这种方法可以作为测距方法的辅助, 用以判断其他测距方法的结果是否正确。

7 结束语

零模行波波头中含有丰富的故障信息, 如何提取其中的故障信息, 是利用零模行波进行故障定位和实现快速保护的关键问题。通过以上的分析, 可以得到以下结论:

- 1) 零模波头的频谱和故障距离有密切的关系, 可以利用零模波头的频谱曲线进行故障定位, 方法是找到零模波头, 进行频谱分析, 找出其最大的频率分量, 利用图 7 的关系就可以得到故障距离。
- 2) 由于零模和线模行波的波速度不同, 因此零模波头和线模波头到达检测点的时间不同, 可以利用这个时间差测量故障距离, 具体方法参见文献[2]。
- 3) 利用零模波头中最高频率测距, 由于零模行波在故障点时的阶跃幅度不同, 因此测距结果的精度不高; 利用零线模波速差法的测距方法, 由于零模速度的依频变化, 加上零、线模波速度很接近, 所以这种方法的测距精度也不可能很高。但是这两种方法得到的测距结果可靠, 不存在误测距的问题, 因此可以将这两种方法得到的测距结果作为辅助结果, 用来剔除其他精度更高算法的误测距结果。

参考文献

[1] 李永庄, 林集明, 曾邵华. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
LI Yong-zhuang, LIN Ji-ming, ZENG Shao-hua. Power Systems EMTP Theory[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1991.

(下转第 23 页 continued on page 23)

- HE Ren-mu, WEI Xiao-ming, HAN Min-xiao. Power System Dynamic Load Modeling Based on the Measurements in the Field[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 151-154, 170.
- [11] 韩民晓. 人工神经网络及其在负荷建模中的应用(博士学位论文)[D]. 北京: 华北电力大学, 1995.
- HAN Min-xiao. Artificial Neural Network and Its Application in Electric Load Modeling, Doctoral Dissertation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 1995.
- [12] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- JU Ping, MA Da-qiang. Power System Load Modeling[M]. Beijing: China Water Power Press, 1995.
- [13] 西安交通大学, 清华大学, 等. 电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.
- Xi'an Jiaotong University, Tsinghua University, et al. Power System Computing[M]. Beijing: China Water Power Press, 1978.
- [14] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993. P135.
- SHEN Shan-de. Power System Identification[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [15] 金先级. 机电系统的计算机仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- JIN Xian-ji. Machinery and Electric System Computer Simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991. 11-14.
- [16] 王振永, 王然冉. 电机的数学模型和参数辨识[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- WANG Zhen-yong, WANG Ran-ran. Motor Mathematic Model and Parameter Identification[M]. Beijing: China Machine Press, 1991.
- [17] 魏权龄, 王日爽, 徐兵. 数学规划引论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991.
- WEI Quan-ling, WANG Ri-shuang, XU Bing. Mathematic Programming Introduction[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1991.
- [18] 章健, 贺仁睦, 韩民晓. 直接优化方法及其在负荷模型参数辨识中的应用[J]. 现代电力, 1996, 12(4): 8-14.
- ZHANG Jian, HE Ren-mu, HAN Min-xiao. A Direct Optimization Method and Application to Identification of Load Model Parameters[J]. Modern Electric Power, 1996, 12(4): 8-14.
- [19] 电力科学研究院. 电力系统分析综合程序—用户手册[R]. 北京: 电力科学研究院, 1996.
- Electric Power Research Institute. Power System Analysis Software Package[R]. Beijing: Electric Power Research Institute, 1996.
- [20] 章健. 电力系统负荷建模方法的研究(博士学位论文)[D]. 北京: 华北电力大学, 1997.
- ZHANG Jian. The Study of Electric Load Modeling, Doctoral Dissertation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 1997.

收稿日期: 2006-12-31; 修回日期: 2007-02-09

作者简介:

章健(1963-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力负荷特性辨识、电力系统分析与运行; E-mail: zdzhangj@tom.com

沈峰(1973-), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统辨识方面的研究。E-mail: shenfeng320@126.com

(上接第 8 页 continued from page 8)

- [2] 李友军, 王俊生, 郑玉平, 等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14).
- LI You-jun, WANG Jun-sheng, ZHENG Yu-ping, et al. Comparison of Several Algorithms of Travelling Wave Based Fault Location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14).
- [3] Bewley L V. Travelling Waves on Transmission Systems(Second Edition)[M]. John Wiley, 1951.
- [4] 覃剑, 陈祥训, 郑健超. 行波在输电线上传播的色散研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 27-30.

QIN Jian, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao. Study on Dispersion of Travelling Wave in Transmission Line[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 27-30.

收稿日期: 2007-01-04; 修回日期: 2007-05-24

作者简介:

李友军(1975-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统继电保护、故障测距及故障信息传输工作; E-mail: nari_liyj@163.com

徐丽娜(1977-), 女, 硕士, 工程师, 从事水利电力规划、设计、运行的研究工作。