

电力系统潮流问题的电路解析

王宗义¹, 郭志忠²

(1. 中国南方电网有限责任公司市场交易部, 广东 广州 510623;

2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 基于电路基本理论解析潮流问题的关键, 是如何处理潮流模型中 PQ 支路和 PV 支路的约束问题。利用电路的节点电压法和回路电流法, 分别提出了解决电力系统潮流问题相应的数学模型, 其修正方程式的不平衡量分别为节点注入电流和回路电压, 从而揭示了潮流问题的电路本质。理论分析和算例表明, 所提出的节点法其计算性能与常规的牛顿法潮流相当, 可用于实际计算, 而回路法在实际应用时则显得较为繁琐。

关键词: 潮流; 电路理论; 节点电压法; 回路电流法; 支路约束处理

Interpretation of power system load flow by circuit theory

WANG Zong-yi¹, GUO Zhi-zhong²

(1. China Southern Power Grid Co., Ltd, Guangzhou 510623, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The key point of interpreting load flow model by the circuit theory is how to solve the constraints of PQ branch and PV branch. Using the node voltage method and loop current method of circuit theory, the corresponding mathematical models of load flow are put forward, in which the unbalanced items of corrected equations are nodal injected current and loop voltage respectively. By this way, the circuit essence of load flow is interpreted. Theoretical analysis and case studies show that the proposed nodal method is comparable to traditional Newton method which can be used practically and the proposed loop method is relatively complicated.

Key words: load flow; circuit theory; node voltage method; loop current method; branch constraints treatment

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)09-0016-05

0 引言

潮流计算作为电力系统的基本计算, 能够根据网络结构、元件参数和边界条件来确定系统的运行状态, 其算法在 20 世纪 70 年代逐步发展成熟, 结合稀疏技术的牛顿-拉夫逊法成为最基本的潮流算法^[1,2], 此后又得到了不断的完善和发展^[3-10]。电力系统属于电网络的范畴, 其网络部分通常可看作是线性的, 而其节点边界条件多以功率或电压幅值的形式给出, 由此导致网络方程的非线性形式。常规的牛顿法模型把潮流问题当作一般的非线性问题处理, 不仅淡化了潮流问题的网络特点, 在一定程度上也影响了解算效率。

基于电路的基本理论分析潮流问题, 力图更直观地揭示潮流问题的电路本质, 是本文的主要出发点。潮流问题研究电力系统内的功率流动问题, 其约束条件主要来自于发电和负荷支路, 不同于常规电网络中的电压源和电流源。本文首先对潮流问

题和一般电网络问题的特点进行了比较分析, 在此基础上分别提出了基于节点和回路方法的潮流计算数学模型, 并进一步分析了两种模型的物理意义和计算性能。

1 潮流分析与一般电路计算的比较

一般的电路分析, 揭示的是网络中电流和电压之间的关系。在电网络理论中, 支路是网络元件的物理载体, 节点和回路表征支路的连接关系。作为最基本的两种分析方法, 节点电压法的激励为节点注入电流源, 回路电流法则为回路电压源。对于线性网络, 若不考虑受控源, 描述网络的节点导纳阵和回路阻抗阵都是对称阵, 电压和电流满足线性关系。电流在网络内流动是没有损耗的。

潮流问题, 揭示的是电力系统中功率流动随约束条件的变化规律, 二者为非线性关系。发电机和负荷一般为接地支路, 符合 PV 或 PQ 节点约束的要求。不考虑 PV 支路约束, 仅考虑 PQ 支路约束,

对于线性网络,描述功率变化与节点电压变化之间关系的雅可比矩阵也不再是对称阵,而是结构对称(非零元素对称),对应元素数值不相等。同时考虑PV支路和PQ支路约束,则雅可比矩阵的结构也不再对称。功率在网络内流动是有损耗的。

2 节点电压法潮流解析

节点法的状态变量为节点电压,将潮流问题的PQ支路和PV支路约束与转化为注入电流源的形式,是解决问题的关键。

2.1 数学模型

设电力网络节点数为 n ,对于节点 i ,其节点注入电流平衡方程为

$$I_i(V, P_i, Q_i) = \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j - \frac{P_i - jQ_i}{\hat{V}_i} = 0 \quad (1)$$

其中: V 为网络节点电压向量, P_i 、 Q_i 为节点 i 的有功、无功注入功率, y_{ij} 为节点导纳矩阵元素,上标 \wedge 表示共轭。

在直角坐标下,式(1)可写成下式的实数形式,即

$$\begin{bmatrix} I_{Xi} \\ I_{Yi} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Xj} \\ V_{Yj} \end{bmatrix} - \frac{1}{V_{Xi}^2 + V_{Yi}^2} \begin{bmatrix} V_{Xi} & V_{Yi} \\ V_{Yi} & -V_{Xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

将式(1)在 (V, P_i, Q_i) 处根据Taylor公式展开,并略去高次项,得

$$\Delta I_i(V, P_i, Q_i) = \sum_{j=1}^n y_{ij} \Delta V_j - \frac{\Delta P_i - j \Delta Q_i}{\hat{V}_i} + \frac{P_i - jQ_i}{\hat{V}_i^2} \Delta \hat{V}_i \quad (3)$$

在直角坐标系下,式(3)写成实数形式,有

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{Xi} \\ \Delta I_{Yi} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{Xj} \\ \Delta V_{Yj} \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} G_{ii} & -B_{ii} \\ B_{ii} & G_{ii} \end{bmatrix} + D_{ii} \right) \begin{bmatrix} \Delta V_{Xi} \\ \Delta V_{Yi} \end{bmatrix} - \frac{1}{V_{Xi}^2 + V_{Yi}^2} \begin{bmatrix} V_{Xi} & V_{Yi} \\ V_{Yi} & -V_{Xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中:

$$D_{ii} = \frac{1}{(V_{Xi}^2 + V_{Yi}^2)^2} \begin{bmatrix} V_{Xi} & -V_{Yi} \\ V_{Yi} & V_{Xi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{Xi} & V_{Yi} \\ V_{Yi} & -V_{Xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i & -Q_i \\ Q_i & P_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

对于PQ节点,节点有功、无功注入功率保持不变,即 $\Delta P_i = 0$, $\Delta Q_i = 0$ 。对于PV节点,有 $\Delta P_i = 0$,而 $\Delta Q_i \neq 0$,并且要求电压幅值保持不变,即

$$\Delta |\hat{V}_i|^2 = (V_{Xi}^2 + V_{Yi}^2) - V_{is}^2 = 0 \quad (6)$$

其牛顿法修正方程形式为

$$\Delta |\hat{V}_i|^2 = 2V_{Xi} \Delta V_{Xi} + 2V_{Yi} \Delta V_{Yi} \quad (7)$$

引入PV节点的无功注入功率 Q 作为状态变量,设系统节点数为 n ,令节点 n 为松弛节点,1至 m 为PV节点, $m+1$ 至 $n-1$ 为PQ节点。由式(2)和式(6)组成潮流的计算方程,方程数为 $2(n-1)+m$,与状态变量数相等,方程可解。由式(4)和式(7)组成牛顿法修正方程式,即

$$\begin{bmatrix} (Y+D)_{2(n-1) \times 2(n-1)} & N_{2(n-1) \times m} \\ M_{m \times 2(n-1)} & O_{m \times m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{X1} \\ \Delta V_{Y1} \\ \vdots \\ \Delta V_{Xn-1} \\ \Delta V_{Yn-1} \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta I_{X1} \\ \Delta I_{Y1} \\ \vdots \\ \Delta I_{Xn-1} \\ \Delta I_{Yn-1} \\ \Delta |\hat{V}_1|^2 \\ \vdots \\ \Delta |\hat{V}_m|^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中:对于雅可比矩阵的 $(Y+D)_{2(n-1) \times 2(n-1)}$ 部分,

Y 为导纳矩阵的实数形式,即

$$Y = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11} & -B_{11} \\ B_{11} & G_{11} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} G_{1(n-1)} & -B_{1(n-1)} \\ B_{1(n-1)} & G_{1(n-1)} \end{bmatrix} \\ \vdots & & \vdots \\ \begin{bmatrix} G_{(n-1)1} & -B_{(n-1)1} \\ B_{(n-1)1} & G_{(n-1)1} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} G_{(n-1)(n-1)} & -B_{(n-1)(n-1)} \\ B_{(n-1)(n-1)} & G_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (9)$$

D 为对角块,即

$$D = \text{Diag}(D_{11}, D_{22}, \cdots, D_{(n-1)(n-1)}) \quad (10)$$

D_{ii} 的定义见式(5)。每次迭代形成雅可比矩阵时, $(Y+D)$ 块中只有 D 发生变化,并且 D_{ii} 只与

第*i*节点的 P_i 、 Q_i 、 V_{xi} 和 V_{yi} 有关。

矩阵块 $M_{m \times 2(n-1)}$ 每行只有两个非零元素,即

$$\begin{cases} M(i, 2i-1) = 2V_{xi} \\ M(i, 2i) = 2V_{yi} \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

矩阵块 $N_{2(n-1) \times m}$ 每列只有两个非零元素,即

$$\begin{cases} N(2i-1, i) = -\frac{V_{yi}}{V_{xi}^2 + V_{yi}^2} \\ N(2i, i) = \frac{V_{xi}}{V_{xi}^2 + V_{yi}^2} \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

矩阵块 $O_{m \times m}$ 元素全为零。

2.2 物理意义

节点法潮流方程的注入电流源来自PQ、PV节点的发电和负荷支路,由式(3)看出,注入网络节点*i*的电流源的变化量可表示为

$$\Delta I'_i = \frac{\Delta P_i - j\Delta Q_i}{\hat{V}_i} - \frac{P_i - jQ_i}{\hat{V}_i^2} \Delta \hat{V}_i \quad (13)$$

上式右手项第一部分可看作是注入功率变化引起的注入电流变化量,相当于功率型电流源。右手项第二部分可以看作是节点电压变化引起的注入电流变化量,相当于受控电流源。如图1所示,其中,

$$\Delta I'_1 = -\frac{P_i - jQ_i}{\hat{V}_i^2} \Delta \hat{V}_i$$

$$\Delta I'_2 = \frac{\Delta P_i - j\Delta Q_i}{\hat{V}_i}$$

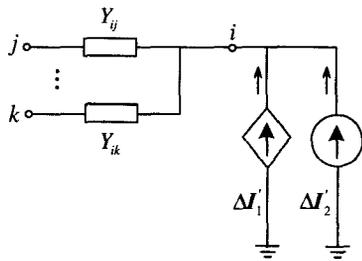


图1 节点注入电流变化的组成

Fig. 1 Components of nodal injected current variation

进一步分析,式(4)中 D_{ii} 项的物理意义在于当节点注入功率不变,而仅仅由于节点电压变化引起的节点注入电流变化反映到导纳矩阵中引起的附加项。

2.3 与传统牛顿法潮流的比较

本文提出的基于节点法的电流型潮流模型其方程式基于节点电流平衡,而传统的功率型潮流方程式是基于节点功率平衡,二者在本质上是一致的,

只是处理方法和表现形式不同。

传统牛顿法潮流的雅可比矩阵所有非零元素在迭代过程中不断变化,而本文算法雅可比矩阵的 $(Y+D)$ 块只有对角元发生变化,其余保持不变,物理意义明显,形式整齐,便于编程实现。

PV节点无功功率作为状态变量的引入,虽然修正方程式维数增加,由于雅可比矩阵增加的部分高度稀疏,采用稀疏技术后,增加的存储量和计算量并不明显。但对于PV节点与PQ节点相互转换以及节点无功电压控制问题,处理起来比较方便。

3 回路电流法潮流解析

电网络理论中回路分析法的状态变量为回路电流,边界条件为回路电压源。本节将在构造电力系统基本回路的基础上,探求PQ支路和PV支路约束与回路电压源之间的对应关系。

3.1 数学模型

回路电流法用于电力网络潮流计算,首先需要选择基本回路。本文采用的方法是:电力网络采用 π 型等值模型,同一节点的所有接地支路合并为一条支路,将接地支路当作网络的树支,其它支路作为网络的连支,则每一条连支与其相联的两条树支构成一个基本回路。

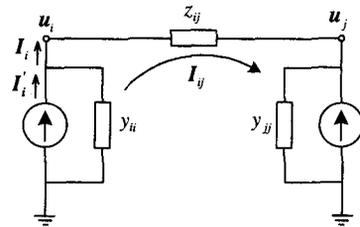


图2 基本回路的构建

Fig. 2 Construction of basic loop

对于图2所示回路,连支路阻抗为 z_{ij} ,所连接的两条树支的对地电压分别为 u_i 和 u_j ,回路电流为 I_{ij} 。按照图2定义的参考方向,则回路方程为

$$z_{ij} I_{ij} = u_i - u_j \quad (14)$$

考察支路*i*,其等值导纳为 y_{ii} ,发电或负荷功率为

$$P_i + jQ_i = u_i \hat{I}'_i = u_i \hat{I}_i + u_i \hat{u}_i \hat{y}_{ii} \quad (15)$$

其中: I_i 为支路电流,其大小可表示为

$$I_i = \sum_{l \in i} I_{il} \quad (16)$$

其中: $l \in i$ 表示与支路*i*相关联的基本回路。

对于 PQ 节点, 其有功和无功功率已知; 对于 PV 节点, 其有功功率已知, 而无功功率未知, 补充电压幅值约束方程, 则由式(14)、(15)、(16)和 PV 支路电压约束方程组成的方程组, 其未知量与方程式的数目相等, 方程组可解。

由式(14), 得回路电压的修正方程, 即

$$\Delta \mathbf{u}_{ij} = z_{ij} \Delta \mathbf{I}_{ij} - \Delta \mathbf{u}_i + \Delta \mathbf{u}_j \quad (17)$$

其中: $\Delta \mathbf{u}_i$ 和 $\Delta \mathbf{u}_j$ 由各自的支路约束方程求得。对式(15)求微分, 可得到如下形式,

$$\Delta \mathbf{u}_i = f_1 \Delta P_i + f_2 \Delta Q_i + f_3 \sum_{l \in i} \Delta \mathbf{I}_{il} \quad (18)$$

其中: f_1 、 f_2 和 f_3 皆为 $(P_i, Q_i, y_{ii}, \sum_{l \in i} \mathbf{I}_{il})$ 的函数, 表达式比较繁琐, 篇幅所限, 不再写出。

为简化起见, 本文假设 $y_{ii} = 0$ 。注意, 在实际计算中应视具体情况确定是否采取此种假设。则有

$$\Delta \mathbf{u}_i = \frac{\Delta P_i + j \Delta Q_i}{\sum_{l \in i} \hat{\mathbf{I}}_{il}} - \frac{P_i + j Q_i}{(\sum_{l \in i} \hat{\mathbf{I}}_{il})^2} \sum_{l \in i} \Delta \hat{\mathbf{I}}_{il} \quad (19)$$

对于 PQ 节点, 有 $\Delta P_i = 0$, $\Delta Q_i = 0$ 。对于 PV 节点, 有 $\Delta P_i = 0$, 而 $\Delta Q_i \neq 0$, 同时要求 $\Delta |\mathbf{u}_i|^2 = 0$ 。

令 $A = \operatorname{Re}(\sum_{l \in i} \hat{\mathbf{I}}_{il})$, $B = \operatorname{Im}(\sum_{l \in i} \hat{\mathbf{I}}_{il})$, 则

$$\Delta |\mathbf{u}_i|^2 = \frac{2(P_i \Delta P_i + Q_i \Delta Q_i)}{A^2 + B^2} - \frac{P_i^2 + Q_i^2}{(A^2 + B^2)^2} 2(A \Delta A + B \Delta B) \quad (20)$$

引入 PV 支路无功功率 Q 作为状态变量, 将式(18)或(19)代入式(17), 结合式(20), 便得到回路法潮流计算的修正方程式, 即

$$\begin{bmatrix} (Z + \Delta Z) & J \\ K & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{I}_l \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_l \\ \Delta |\mathbf{u}_l|^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中: Z 为回路阻抗矩阵; ΔZ 为附加项, 由式(18)右首项的系数 f_3 组成。 $\Delta \mathbf{I}_l$ 为回路电流变化量, $\Delta \mathbf{u}_l$ 为回路电压变化量, ΔQ 和 $\Delta |\mathbf{u}_l|^2$ 分别为 PV 支路无功功率和电压幅值的变化量。

$$J = \frac{\partial \Delta \mathbf{u}_l}{\partial \Delta \mathbf{I}_l}, \quad K = \frac{\partial \Delta |\mathbf{u}_l|^2}{\partial \Delta \mathbf{I}_l}, \quad L = \frac{\partial \Delta |\mathbf{u}_l|^2}{\partial \Delta Q}$$

3.2 物理意义

由式(17)、(18)可以看出, 回路电压的变化量取决于接地支路约束条件, 不仅与支路功率变化量有关, 而且与回路电流有关, 二者共同决定了回路电压的大小。式(21)中 ΔZ 项的物理意义在于当接地支路功率不变, 而仅仅由于回路电流变化引起的回路电压变化反映到阻抗矩阵中引起的附加项。

由于接地支路可能与多个基本回路关联, 因此 ΔZ 项不仅会引起回路阻抗矩阵对角元的变化, 还会引起非对角元的变化。

4 算例分析

对于节点法, 本文采用 IEEE14、30、57、118 节点系统进行了计算, 其中 PV 节点无功功率的迭代初始值取 0。计算结果与传统牛顿法完全相同, 计算时间和收敛速度也无明显区别, 表 1 列出了对 IEEE 57 节点和 118 节点系统进行计算的迭代次数和计算时间。

表 1 IEEE 57 和 118 节点系统的计算结果
Tab.1 Results for IEEE 57-bus and 118-bus test system

		常规牛顿法	本文算法
迭代次数 ($\mathcal{E} = 0.001$)	57 节点系统	3	3
	118 节点系统	4	4
计算时间/s	57 节点系统	0.08	0.08
	118 节点系统	0.42	0.38

对于回路法, 则采用较简单的算例, 进行了分析, 证明了所提算法的正确性。由于潮流问题的边界条件多以节点量的形式给出, 回路法分析显得较为繁琐, 实际应用范围受到限制。

5 结论

对电力系统潮流问题, 运用电路理论的节点法和回路法分别进行了分析, 得到以下结论:

1) 两种方法都引入 PV 支路无功功率 Q 作为状态变量, 使得 PV 支路边界处理较为方便, 既能保持节点法(回路法)电流源(电压源)的物理意义, 又能使修正方程式保持整齐的形式。

2) 提出的电流注入型潮流算法(节点法)在计算效率上可与常规的牛顿法潮流相比拟, 可用于实际计算。

3) 回路分析方法在形式上较为繁琐, 原因是潮流问题的边界条件多以节点量的形式给出, 实际应用范围受到限制。

参考文献

- [1] Tinney W F, Hart C E. Power Flow Solution by Newton's Method[J]. IEEE Trans on PAS, 1967, 86(11):1449-1460.
- [2] Scott B. Review of Load Flow Calculation Methods[J]. Proceedings of IEEE, 1974, 62(7): 916-929.
- [3] Amerongen R A M. A General Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2): 760-770.
- [4] Nguyen H L. Newton-Raphson Method in Complex Form[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1355-1358.
- [5] 张伯明,相年德. 电网计算中的广义网络流的回路分析及其在线应用(II)-在线潮流计算中的应用[J]. 清华大学学报, 1986,26(5):22-31.
ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. The Loop Analysis Theorem of General Network Flow and Its Application in Real-time Computation(II) —Application in On-line Load Flow[J]. Journal of Tsinghua University, 1986,26(5):22-31.
- [6] 程浩忠. 电力系统直角坐标潮流二次方程新的表达式[J]. 中国电机工程学报, 1996,16(3):211-213.
CHENG Hao-zhong. A Novel Quadratic Formulation of Load Flow Equations in Rectangular Coordinates[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3):211-213.
- [7] 朱凌志,周双喜. 电压稳定分析的潮流算法研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(5): 1-4.
ZHU Ling-zhi, ZHOU Shuang-xi. Study on Power Flow Arithmetic for Voltage Stability Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(5): 1-4.
- [8] 于继来,王江,柳焯. 电力系统潮流计算的几点改进[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 88-93.
YU Ji-lai, WANG Jiang, LIU Zhuo. Improvements on Usual Load Flow Algorithms of Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9):88-93.
- [9] 赵晋泉,江晓东,张伯明. 潮流计算中 PV-PQ 节点转换逻辑的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 54-59.
ZHAO Jin-quan, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. Study on PV-PQ Bust Type Switching Logic in Power Flow Computation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 54-59.
- [10] 王宗义,郭志忠. 电流型牛顿法潮流[J]. 继电器, 2005,33(18):27-29.
WANG Zong-yi, GUO Zhi-zhong. Newton Load Flow Algorithm Based on Current Balance Equations[J]. Relay, 2005, 33(18):27-29.
- [11] 薛永端,徐丙垠,李京,等. 铁路 10kV 自闭/贯通线路行波故障测距技术[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 68-73.
XUE Yong-duan, XU Bing-yin, LI Jing, et al. Traveling Waves Based Fault Location in 10 kV Automatic Blocking and Continuous Railway Power Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 68-73.
- [12] 王元虎,周东明. 卫星时钟在电网中应用的若干技术问题[J]. 中国电力, 1998, 31(2): 10-12, 16.
WANG Yuan-hu, ZHOU Dong-ming. Some Technical Problems of Satellite Clock Applied on Power Network[J]. Electric Power, 1998, 31(2): 10-12, 16.

收稿日期: 2007-09-24; 修回日期: 2007-10-27

作者简介:

王宗义(1971-),男,博士,高级工程师,从事电力交易及电力市场研究工作; E-mail: zywang0531@hotmail.com

郭志忠(1961-),男,博士,教授,博士生导师,当前主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统光学测量技术、电网络分析。

(上接第 15 页 continued from page 15)

- CHEN Ping. Modern Travelling Wave Based Fault Location of Transmission Lines and Its Applications, Doctoral Dissertation[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- [8] 徐丙垠,李京,陈平,等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62-65.
XU Bing-yin, LI Jing, CHEN Ping, et al. Modern Travelling Wave Based Fault Location Technology and Its Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 62-65.
- [9] CHEN Ping, XU Bing-yin, LI Jing. A Traveling Wave Based Fault Locating System for HVDC Transmission Lines[A]. In: Proceedings of 2006 International Conference on Power System Technology[C]. Chongqing: 2006.
- [10] 季涛,孙同景,徐丙垠,等. 配电混合线路双端行波故障测距技术[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 89-94.
JI Tao, SUN Tong-jing, XU Bing-yin, et al. Study on Fault Location of Distribution Mixed Feeders Based on Double Terminal Method of Traveling Waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 89-94.

收稿日期: 2007-09-14; 修回日期: 2007-11-30

作者简介:

于桂音(1953-),男,副教授,研究方向为电力系统故障监测; E-mail: sdygy@126.com

陈平(1969-),男,博士,副教授,研究方向为电力系统继电保护;

徐丙垠(1961-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统继电保护。