

架空和电缆混合馈线的电压损耗快速估算

周卓敏¹, 李湘华¹, 何禹清², 彭建春²

(1. 湖南省电力公司长沙电业局, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 提出了一种架空和电缆混合馈线的电压损耗快速估算方法。基于架空线路和电缆线路的电压损耗分析构造了混合馈线最大电压损耗的非线性估算模型, 模型中的变量包括最长供电路径所含架空线长度、电缆线长度、和馈线首端的有功无功功率。运用 Gauss-Raphson 方法给出了估算模型中参数的求解方法。运用实测数据对所提模型和算法进行了仿真计算和分析, 验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: 配电网; 架空线; 电缆线; 电压损耗; 估算

Fast estimation of voltage loss in feeders consisting of overhead line and power cable

ZHOU Zhuo-min¹, LI Xiang-hua¹, HE Yu-qing², PENG Jian-chun²

(1. Changsha Electric Power Bureau, Hunan Electric Power Company, Changsha 410082, China;
2. College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper presents a method for fast estimation of voltage loss in feeders consisting of overhead line and power cable. First, a nonlinear estimation model for maximum voltage loss in this kind of feeders is built based on the analysis of voltage loss along an over-head line and a cable. The model's independent variables include the lengths of both overhead line and power cable along the main trunk, as well as the active and reactive powers into the sending end of the feeder. Then the unknown parameters in the estimation model are solved by Gauss-Raphson method. At last, the data from actual distribution systems are employed to test the proposed model. Simulation results show that the proposed method is effective and feasible.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50677015).

Key words: distribution network; overhead line; power cable; voltage loss; estimation

中图分类号: TM74 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)17-0169-05

0 引言

城市配电网是电力系统的主要负荷中心, 是城市现代化建设的重要基础设施, 因此它在整个电力系统中占据着重要地位^[1-2]。随着城网改造工程的不断推进, 城区 10 kV 馈线的电缆化率越来越高, 架空和电缆混合馈线及纯电缆馈线越来越多, 这不仅使 10 kV 母线电压调整频繁、而且还可能使 10 kV 母线电压调整困难。这是因为, 用户对电能质量的要求越来越高, 城区电网中时常出现 10 kV 母线电压稍高、就导致多电缆的馈线上用户电压偏高, 而遭到用户的高电压投诉; 10 kV 母线电压稍低就引起少电缆的馈线上用户电压低, 而遭到低电压投诉; 甚至负荷率低的个别时段、同时有高低电压投诉的

现象。为确保母线电压的快速调整, 复杂配电网中电压损耗的快速估算是关键。

本文提出了一种架空和电缆混合馈线最大电压损耗的快速估算模型和算法, 以快速估算架空和电缆混合馈线的电压损耗, 为实现母线电压的快速调整提供高效工具。

1 10 kV 馈线的参数情况

电力网络中, 线路参数包括结构和运行参数两类。对我国 10 kV 馈线, 通常其架空和电缆线路的结构参数有详细记录、易于获取。

但对运行参数, 一方面由于 10 kV 馈线的分布量大面广, 运行参数的全面实时监测投资太大、不现实; 另一方面, 由于历史原因, 当前我国城市配电网中的变压器分为公变和专变两类, 即使公变的运行参数可从实时监测系统中获取, 但专变的实时运

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677015)

行参数却只能从现场抄表得到。这不仅使用户负荷数据缺失、难于获取，而且使运行人员难以运用潮流分析的方法进行馈线的相关计算（如线损计算、电压损耗计算）和分析。

值得注意的是，我国配电网中，馈线首端的电压、电流、有功和无功功率及电量、功率因数等运行参数都有实时监测和记录，易于获取。因此，像配电网线损估算一样，基于这些参数也应该可以估算馈线上的电压损耗。

2 架空/电缆线路的近似电压损耗

2.1 架空线路的电压损耗

10 kV 架空线路的电压等级不高，其对地电容和电晕损耗可忽略。因此，一条 10 kV 架空线路通常用一个串联阻抗电路来等效，如图 1 (a) 所示。

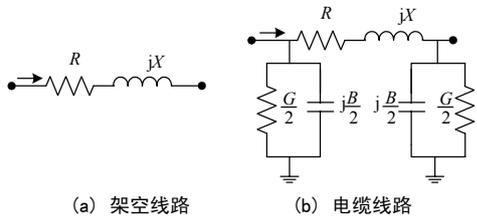


图 1 10 kV 架空线路的等值电路

Fig.1 Equivalent circuit for a 10 kV over-head line

设末端电压为 $\bar{V}_r = V_r \angle 0^\circ$ ，则架空线路首端电压 \bar{V}_s 为：

$$\bar{V}_s = \bar{V}_r + \frac{P_r - jQ_r}{V_r} (R + jX) = (V_r + \frac{P_r R + Q_r X}{V_r}) + j \frac{P_r X - Q_r R}{V_r} \quad (1)$$

其中， R 和 X 分别为线路的等值电阻和电抗。

线路首端电压的幅值 V_s 为：

$$V_s = [(V_r + \frac{P_r R + Q_r X}{V_r})^2 + (\frac{P_r X - Q_r R}{V_r})^2]^{0.5} \quad (2)$$

由于 $(P_r X - Q_r R)$ 比 $(P_r R + Q_r X)$ 小得多，因此有

$$(V_r + \frac{P_r R + Q_r X}{V_r}) \gg (\frac{P_r X - Q_r R}{V_r}) \quad (3)$$

按二项式定理展开式 (2) 并取前两项、再考虑式 (3) 得

$$V_s \approx V_r + \frac{P_r R + Q_r X}{V_r} + \frac{1}{2} (\frac{P_r X - Q_r R}{V_r})^2 / (V_r + \frac{P_r R + Q_r X}{V_r}) \approx V_r + \frac{P_r R + Q_r X}{V_r} \quad (4)$$

本文称 $\Delta V = V_s - V_r$ 为该段架空线路的电压损耗，则

$$\Delta V \approx (P_r R + Q_r X) / V_r \quad (5)$$

在标么值下，线路上的电压接近 1.0 p.u.，因此 ΔV 可进一步近似为

$$\Delta V \approx P_r R + Q_r X \quad (6)$$

即一段架空线路的电压损耗主要由流经它的有功和无功、线路的等值电阻和电抗决定。

2.2 电缆线路的电压损耗

电缆线的等值电路如图 1 (b) 所示，其对地电容不容忽略。考虑到电缆的绝缘电阻很大，按与架空线路一样的方法分析，则应该用 $(Q_r - 0.5BV_r^2)$ 代替式 (4) 中的 Q_r ，按式 (4) 得电缆线路首端电压的幅值 V_s 如下

$$V_s \approx V_r + \frac{P_r R + (Q_r - 0.5BV_r^2)X}{V_r} \quad (7)$$

同样，在标么值下电缆线路上的电压接近 1.0 p.u.，因此一段电缆线路的电压损耗近似为

$$\Delta V \approx P_r R + Q_r X - 0.5BX \quad (8)$$

3 混合馈线的最大电压损耗估算模型

3.1 混合馈线的最大电压损耗

从长沙地区 10 kV 配电网的实际情况看，架空和电缆混合馈线具有如下特点：在结构方面，电缆线不仅可能出现在馈线首端和中间，而且由于环境条件的限制还可能出现在馈线末端，还有少数馈线由多段架空和电缆线构成。馈线的长度通常在 8 km 左右，其中电缆线长大多不超过馈线总长的 1/2；在运行方面，馈线实际传输的负荷通常在 5 MW 左右。由于 10 kV 电压等级低、馈线中电缆线路不长，混合馈线上沿功率流动方向电压有效值单调下降，即馈线上的最低电压往往出现在最长供电路径的末端。

为此，本文称 10 kV 架空和电缆混合馈线上、首端与最长供电路径末端之间电压的有效值之差为该馈线的最大电压损耗 ΔV 。它是运行调度人员在电力生产过程中要掌握的重要信息。

3.2 混合馈线最大电压损耗的估算模型

结合配电网参数获取的特点和配电网线损估算的经验^[3]，本文对架空和电缆混合馈线上的最大电压损耗估算拟基于线路的结构参数和馈线首端的有功和无功进行。

从式 (6) 和式 (8) 知，线路的电压损耗与线路传输的有功和线路电阻之积成正比、与线路传输

的无功和线路电抗之积成正比、与线路对地电纳和线路电抗之积成正比。考虑这些因素, 特构造架空和电缆混合馈线的最大电压损耗 ΔV 的估算模型如下:

$$\Delta V = P(\alpha_1 l_1 + \alpha_c l_c) + Q(\beta_1 l_1 + \beta_c l_c) - \gamma_c l_c^2 \quad (9)$$

其中: P 和 Q 分别为馈线首端的有功和无功功率; l_1 为该馈线的最长供电路径上架空线路的总长度; l_c 为最长供电路径上电缆线路的总长度; α_1 、 α_c 、 β_1 、 β_c 、 γ_c 为待求常数。式中 ΔV 、 P 、 Q 、 R 和 X 的单位都为 p.u. (取 $S_{\text{base}}=10 \text{ MVA}$ 、 $V_b=10 \text{ kV}$), l_1 和 l_c 的单位为 km。

电压损耗估算模型式 (9) 右边的三个和差项分别对应线路有功与串联电阻引起的电压损耗项、线路无功与串联电抗引起的损耗、和线路充电功率引起的损耗。

4 待求常数的 Gauss-Raphson 回归分析

式 (9) 给出了架空和电缆混合馈线上最大电压损耗 ΔV 的估算公式。由于馈线首端的有功和无功功率、以及架空和电缆馈线的长度容易获取, 因此, 要估算出电压损耗, 就必须先求得式 (9) 中的常数 α_1 、 α_c 、 β_1 、 β_c 和 γ_c 。

按统计学分析原理, 对一条馈线至少给出 5 个不同的运行状态才能用回归分析法求得这些常数^[4-9]。式 (9) 描述的关系是非线性的, 考虑到非线性回归的 Gauss-Raphson 解法对初值不敏感、收敛速度快且具有全局收敛能力, 本文采用它求解这些常数。

式 (9) 的关系可以写成如下的一般形式

$$Y = f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}) + \varepsilon \quad (10)$$

式中: $Y = \Delta V$ 是因变量, 是待估计的对象; $\mathbf{X} = [P, Q, l_1, l_c]$ 是自变量, 是影响因素; $\boldsymbol{\theta} = [\alpha_1, \alpha_c, \beta_1, \beta_c, \gamma_c]$ 是未知常数 (待求); ε 是除 X 之外, 被忽略或无法考虑到的因素, 它服从正态分布 $N(0, \sigma)$ 。

设已知观测值 $\{(Y_i, \mathbf{X}_i); i=1, 2, \dots, m\}$, 按统计学理论, 问题就是如何求取 $\boldsymbol{\theta}$ 的最小二乘估计值, 即求 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 使得对任何 $\boldsymbol{\theta}$ 都有 $S(\boldsymbol{\theta}) \leq S(\hat{\boldsymbol{\theta}})$, $S(\boldsymbol{\theta})$ 为残差平方和函数:

$$S(\boldsymbol{\theta}) = \sum (Y_i - f(\mathbf{X}_i, \boldsymbol{\theta}))^2 \quad (11)$$

$S(\boldsymbol{\theta})$ 极小等价于下面的导数为零

$$\frac{dS}{d\boldsymbol{\theta}} = \sum (Y - f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})) \left(-\frac{df(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})}{d\boldsymbol{\theta}} \right) = -Z(\boldsymbol{\theta})(Y - f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})) \quad (12)$$

式中, $Z(\boldsymbol{\theta}) = \frac{df(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})}{d\boldsymbol{\theta}}$ 。

按非线性回归的 Gauss-Raphson 解法, 用 $f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})$ 的一阶泰勒级数展开式近似代替 $f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})$ 求解问题。设 $\boldsymbol{\theta}$ 的初始值为 $\boldsymbol{\theta}_1$, 则 $f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})$ 可近似为:

$$f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}) \approx f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}_1) + \frac{df(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})}{d\boldsymbol{\theta}} \Big|_{\boldsymbol{\theta}_1} (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_1) = f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}_1) + Z(\boldsymbol{\theta}_1)(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_1) \quad (13)$$

其中, $Z(\boldsymbol{\theta}_1) = \frac{df(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})}{d\boldsymbol{\theta}} \Big|_{\boldsymbol{\theta}_1}$ 。

对于有 m 个样本数据的情况, 残差平方和为:

$$S(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^m (Y_i - f(\mathbf{X}_i, \boldsymbol{\theta}_1) - Z_i(\boldsymbol{\theta}_1)(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_1))^2 = \sum_{i=1}^m (Y_i(\boldsymbol{\theta}_1) - Z_i(\boldsymbol{\theta}_1)\boldsymbol{\theta})^2 \quad (14)$$

式中, $Y_i(\boldsymbol{\theta}_1) = Y_i - f(\mathbf{X}_i, \boldsymbol{\theta}_1) + Z_i(\boldsymbol{\theta}_1)\boldsymbol{\theta}_1$ 。

由于 $\boldsymbol{\theta}_1$ 是事先设定的一个初值, 因此式 (13) 和式 (14) 中的 $Y_i(\boldsymbol{\theta}_1)$ 和 $Z_i(\boldsymbol{\theta}_1)$ 可由样本 (Y_i, \mathbf{X}_i) 计算得到。这样, 式 (14) 所示的残差平方和函数就转换为一个线性回归模型的残差平方和函数, 即:

$$Y_i(\boldsymbol{\theta}_1) = Z_i(\boldsymbol{\theta}_1)\boldsymbol{\theta} + \varepsilon_i \quad (15)$$

对式 (15) 按最小二乘法构造残差平方和得:

$$\boldsymbol{\theta}_2 = \frac{\sum_{i=1}^m Y_i(\boldsymbol{\theta}_1) Z_i(\boldsymbol{\theta}_1)}{\sum_{i=1}^m (Z_i(\boldsymbol{\theta}_1))^2} = [\hat{Z}(\boldsymbol{\theta}_1) Z(\boldsymbol{\theta}_1)]^{-1} \hat{Z}(\boldsymbol{\theta}_1) \hat{Y}(\boldsymbol{\theta}_1) \quad (16)$$

式中: $\hat{Z}(\boldsymbol{\theta}_1)$ 为关于 $Z_i(\boldsymbol{\theta}_1)$ 的列向量; $\hat{Y}(\boldsymbol{\theta}_1)$ 为关于 $Y_i(\boldsymbol{\theta}_1)$ 的列向量。

由式 (16) 可知, 当设定 $\boldsymbol{\theta}$ 的一个初值 $\boldsymbol{\theta}_1$ 后, 就可以求得一个新的估计值 $\boldsymbol{\theta}_2$ 。反复进行迭代, 便得到 $\boldsymbol{\theta}$ 的迭代序列 $\{\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \dots, \boldsymbol{\theta}_n\}$ 。 $\boldsymbol{\theta}_n$ 的一般表达式为:

$$\boldsymbol{\theta}_n - \boldsymbol{\theta}_{n-1} = [\hat{Z}(\boldsymbol{\theta}_{n-1}) Z(\boldsymbol{\theta}_{n-1})]^{-1} \hat{Z}(\boldsymbol{\theta}_{n-1}) (Y - f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}_{n-1})) \quad (17)$$

依据式 (17), 当迭代过程达到 $\boldsymbol{\theta}_{n+1} = \boldsymbol{\theta}_n$ 时, 有 $\hat{Z}(\boldsymbol{\theta}_{n-1}) (Y - f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}_{n-1})) = 0$, 即此时的 $\boldsymbol{\theta}_n$ 为非线性回归模型参数的最优估计。本文的实际计算中取相对

误差 $\left| \frac{\boldsymbol{\theta}_n - \boldsymbol{\theta}_{n-1}}{\boldsymbol{\theta}_{n-1}} \right| < \delta$ 为迭代收敛条件。

5 工程实例

5.1 样本构造

采用长沙电业局5个变电站的23条馈线数据作为样本进行了非线性回归分析。这23条馈线的长度从1.24~22.6 km不等，且长度主要集中在5~10 km范围内。这些馈线中不仅包含多种不同型号的电缆和架空线路，而且电缆在馈线中的位置也具有多样性（如处于馈线首端、中部、末端以及混合分布），因此样本在馈线结构上具有较好的复盖性。

选取每条馈线尖、峰、平、谷四种时段和20个随机时段的运行状态作为回归分析的运行参数。这样，最终进行回归分析的样本数扩展到23(条馈线)×24(个负荷水平)=552个。上述运行参数中，负荷值集中在平荷的0.7~1.5倍之间，功率因数分布在0.85~0.95之间，负荷水平及功率因数(运行参数)均具有很好的覆盖性。

5.2 仿真结果和分析

利用 Gauss-Raphson 法和 552 个统计分析样本回归计算式(9)中的未知系数，得到 α_1 、 α_c 、 β_1 、 β_c 、 γ_c 分别为0.25, 0.40, 0.18, 0.12, 0.001。即有如下的架空和电缆混合馈线最大电压损耗估算公式：

$$\Delta V = P(0.25I_1 + 0.40I_c) + Q(0.18I_1 + 0.12I_c) - 0.001I_c^2 \quad (18)$$

样本电压损耗绝对值的平均值为27.57 V，对于10 kV电压等级，其误差在0.3%以内。回归分析的相关系数为0.909，接近理想值1，表明估算公式描述的变量之间的相关程度很高；本文回归分析的决定系数为0.780，接近理想值1，表明回归公式能合理描述自变量和因变量间的关系，回归公式的效果好；在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下，查表得回归分析的F统计值为2.39，只有当实际算得的F统计值大于2.39时统计分析才有效，而计算得到的本例的F值为323.25、远大于2.39，说明回归公式中自变量和因变量的相关关系是显著的。从上述统计分析合理性的各项检验指标看，本文给出的电压损耗估算模型有效、可行。

为更清楚地展示估算效果，表1给出了随机抽取的10个样本的电压损耗估算结果。

从表1可见，在这10个随机抽出的样本中，电压损耗估算值的相对误差在1.60%~4.96%的范围内，最大值不超过5%，估算效果好。

为更全面直观地展示估算效果，图2还给出了随机抽取的70个样本的实际值和预测值的曲线(样

本不宜太多、否则图2不清晰)。从图2中可直观看出，实际电压损耗曲线和预测电压损耗曲线吻合得很好。因此，本文给出的电压损耗估算方法是可行的。

表1 预测与实际电压损耗及误差

Tab.1 Estimation and actual voltage losses and errors

样本编号	实际电压损耗/V	预测电压损耗/V	绝对误差/V	相对误差/%
1	164.17	168.48	4.31	2.62
2	180.02	173.45	6.57	3.65
3	54.24	56.93	2.69	4.96
4	276.59	288.34	11.75	4.25
5	339.23	325.67	13.56	4.00
6	173.52	176.29	2.77	1.60
7	183.48	175.06	8.42	4.59
8	424.29	403.49	20.80	4.90
9	202.43	194.51	7.92	3.91
10	213.25	198.03	5.22	2.45
最小值	54.24	56.93	2.69	1.60
最大值	424.29	403.49	20.80	4.96

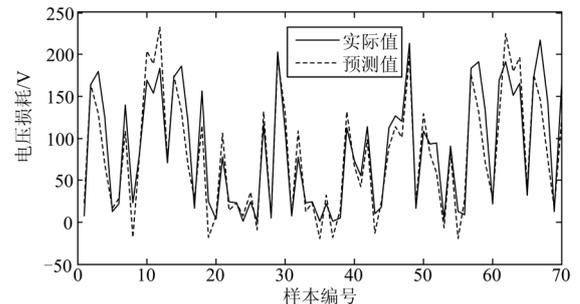


图2 电压损耗预测值与实际值

Fig.2 Estimation and actual voltage losses

6 结论

城区配电网电缆化率的升高使配电网电压调整愈益频繁和困难。为确保母线电压的快速调整，复杂配电网中电压损耗的快速估算是关键。架空线和电缆线的长度以及馈线首端的有功和无功功率与线路电压损耗之间是复杂非线性关系。以统计学理论为基础的馈线电压损耗估算是可行的。

参考文献

[1] 刘健, 倪建立, 邓永辉. 配电自动化系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
 [2] 陈堂. 配电系统及其自动化技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
 [3] 王春生, 彭建春, 卜永红. 配电网线损分析与管理系

- 统的研制[J]. 中国电力, 1999, 32 (9): 48-50.
WANG Chun-sheng, PENG Jian-chun, BU Yong-hong. Development of analytical and managing system for line losses in distribution grid[J]. Electric Power, 1999, 32 (9): 48-50.
- [4] 周纪芸. 回归分析[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1991.
- [5] 吕涛, 石永强, 黄诚. 非线性回归法求解爆破振动速度衰减公式参数[J]. 岩土力学, 2007, 28 (9): 1871-1878.
Lü Tao, SHI Yong-qiang, HUANG Cheng. Study on attenuation parameters of blasting vibration by nonlinear regression analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (9): 1871-1878.
- [6] 李春燕, 俞集辉, 谢开贵. 基于多元非线性回归的阻塞管理优化模型[J]. 电工技术学报, 2008, 23 (2): 96-102.
LI Chun-yan, YU Ji-hui, XIE Kai-gui. Optimal model of congestion management based on non-linear regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23 (2): 96-102.
- [7] 李笑, 苏小江. 盾构滚刀磨损的多元非线性回归预测[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2009, 28 (2): 281-283.
LI Xiao, SU Xiao-jiang. Forecast of wear shield's disc cutters based on multivariate nonlinear regression[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2009, 28 (2): 281-283.
- [8] 陈金山, 韦岗. 一种新的非线性回归模型参数估计算法[J]. 控制理论与应用, 2001, 18 (5): 808-810.
CHEN Jin-shan, WEI Gang. A new algorithm for estimation of parameter of nonlinear regression modeling[J]. Control Theory & Applications, 2001, 18 (5): 808-810.
- [9] 郑国庆, 张国权. 基于模拟退火算法的半参数线性回归模型的参数估计[J]. 华南农业大学学报, 2006 (4): 115-117.
ZHENG Guo-qing, ZHANG Guo-quan. Parameter estimations of semi-parametric linear regression models using simulated annealing algorithm[J]. Journal of South China Agricultural University, 2006 (4): 115-117.

收稿日期: 2009-09-17; 修回日期: 2009-11-12

作者简介:

周卓敏 (1972-), 女, 高级工程师, 主要从事电网规划;

李湘华 (1978-), 男, 工程师, 主要从事电网运行管理工作;

何禹清 (1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与控制。

(上接第 137 页 continued from page 137)

3 结语

本文提出了一种适用于 10 kV 系统的继电保护平台, 在此平台基础上, 开发了系列保护产品, 产品顺利通过国家继电保护及自动化设备质量监督检验中心电磁兼容 (EMC) 测试。并在全国范围内投入使用, 实践检验证明, 此平台完全满足 10 kV 系统的要求, 使用方便、可靠性高, 解决了备货繁杂问题, 得到了用户的认可。

参考文献

- [1] 易永辉, 赵志华, 薛玉龙, 等. 一种新型的继电保护软硬件平台[J]. 电力系统保护与控制, 2002, 30 (6): 26-28.
YI Yong-hui, ZHAO Zhi-hua, XUE Yu-long, et al. A new software and hardware frame of relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2002, 30 (6): 26-28.
- [2] 杜肖功, 毛鹏, 李小滨, 等. 新型数字式高压保护装置硬件平台设计[J]. 电力系统保护与控制, 2004, 32 (9): 45-47.
DU Xiao-gong, MAO Peng, LI Xiao-bin, et al. Design of new digital HV protection hardware platform[J]. Power System Protection and Control, 2004, 32 (9): 45-47.
- [3] 李艳丽, 李晓明, 周春生. 一种提高 DSP 芯片内置 A/D 转换器精度的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33 (2): 58-61.
LI Yan-li, LI Xiao-ming, ZHOU Chun-sheng. A method of enhancing the precision of built-in A/D converter[J]. Power System Protection and Control, 2005, 33 (2): 58-61.

收稿日期: 2009-09-16; 修回日期: 2009-11-05

作者简介:

焦坡 (1969-), 男, 专科, 工程师, 主要从事继电保护产品及自动装置的研发工作; E-mail: poj@xjgc.com

常玉峰 (1983-), 男, 本科, 助工, 主要从事继电保护产品及自动装置的研发工作;

常琦 (1975-), 男, 本科, 助工, 主要从事继电保护产品及自动装置的研发工作。