

## 配电网线损概率评估及应用

陈芳<sup>1</sup>, 张利<sup>2</sup>, 韩学山<sup>2</sup>, 张萍<sup>3</sup>, 王传勇<sup>3</sup>

(1. 济南大学自动化与电气工程学院, 山东 济南 250022; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061;  
3. 山东省枣庄供电公司, 山东 枣庄 277000)

**摘要:** 针对配电网线损评估, 以及在降损策略中应用所存在的问题, 提出一种配电网线损的概率评估方法, 并应用于降损策略的分析。该方法针对配电网线损概率评估缺乏实时运行数据的问题, 首先根据配电线路负荷的特点将其分类, 并设定每类负荷的功率特征曲线, 然后按照各负荷的实际供电量进行负荷匹配, 获取各负荷自身的功率曲线, 进而利用典型日配电线路首端负荷曲线, 采用匹配潮流法校正得到所有配电负荷的等效运行曲线。在此基础上, 考虑负荷波动的概率分布函数, 借助蒙特卡罗模拟技术, 从而获取配电线路的线损率分布特征, 为降损策略提供决策依据。以山东某地区 10 kV 配电线路的实测数据验证了该方法的有效性。

**关键词:** 电力系统; 配电网; 线损; 蒙特卡罗模拟

### Line loss evaluation and application in distribution network

CHEN Fang<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup>, HAN Xue-shan<sup>2</sup>, ZHANG Ping<sup>3</sup>, WANG Chuan-yong<sup>3</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Zaozhuang Power Supply Company, Zaozhuang 277000, China)

**Abstract:** To solve existing problems for evaluation of distribution line loss and the related improvement measurement, this paper presents a probabilistic algorithm, which is used to evaluate the loss reduction strategy. In view of lack of real-time data about distribution network, firstly, the distribution loads are classified by their characteristics, and the same class loads have similar power curve. The loads obtained are assigned by power curve and energy supply. Then, all of load data are revised by matching power flow and data under typical data. Based on above-mentioned, the mathematic distribution character of line loss with load fluctuation is calculated by Monte Carlo simulation method, which is the basis for evaluation of loss reduction. The validity and efficiency of the proposed method is testified by real-time data of 10 kV distribution line at somewhere in Shandong Province.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50677036).

**Key words:** power system; distribution line; line loss; Monte Carlo simulation

中图分类号: TM732; TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)13-0039-06

## 0 引言

据统计, 目前我国国家电网公司的综合线损率约为 7.5%, 其中的 50%是由中、低压配电网运行引起的<sup>[1]</sup>。可见, 如何采取有效措施以降低配电网的损耗是至关重要的。配电网的降损措施主要涉及线路和变压器改型升级<sup>[2]</sup>、无功优化<sup>[3-4]</sup>、负荷调整、负荷波动抑制等<sup>[5]</sup>。如何评估配电网是否经济运行则是降损规划的必要技术支撑<sup>[6-7]</sup>, 其中对电能损耗

的有效计算尤为重要。通常采用的方法有典型日均方根电流法及人工智能算法<sup>[8]</sup>两大类。目前现场多以前者为主, 而各项降损措施的评估则以典型日负荷状况为基准, 采用简化计算得到每一降损措施投入前后的损耗电量, 进而得出节约电量。该方法多通过对配电网线损影响因素的解耦的分析<sup>[9]</sup>, 进而对单一措施的降损规划提出指导意见。由此, 配电网线损评估存在的主要问题是: 一方面, 简化计算采用历史数据统计分析<sup>[10]</sup>或典型值等确定性计算方法, 线损功率与电网实际潮流状况不符, 难以真实反映配电网负荷随机变化等不确定性因素的影响, 存在一定的局限性<sup>[11]</sup>; 另一方面, 配电网线损

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (50677036); 山东省自然科学基金 (ZR2013EEL005)

是多种因素共同作用的结果,解耦分析法使评估的精度不能保证,这造成我国配电网降损方面普遍存在改造方式单一、组合优化不成体系<sup>[12]</sup>的问题,而多种措施的综合利用,往往能全面提升配电网的能效<sup>[13]</sup>。

在输电网线损分析中,以潮流计算技术与概率潮流概念为基础的线损功率研究<sup>[14-16]</sup>更好地体现了线损的物理本质,能在得出线损功率概率分布特征的基础上,更准确地评估不同降损措施的投资风险。输电网概率潮流计算,是以正态分布随机数模拟节点注入功率或负荷功率的变化,并结合完备的电网运行数据进行的。由于自身特点及量测条件的限制,配电网难以全面获得实时运行数据,因此上述方法应用于配电网时尚不尽如意。

为克服目前配电网线损评估中存在的问题,本文将概率评估方法引入配电网线损评估,并针对配电网难以获取实时运行数据的问题,提出一种典型负荷运行曲线的建立方法,并以此为基础,采用匹配潮流法<sup>[17-18]</sup>进一步修正得到电网的等效运行数据;进而模拟配电负荷的随机变化,通过随机样本的配电网潮流计算分析馈线线损的概率分布特性,评估降损措施的实施效果。算例分析验证了本文方法的有效性。

## 1 概率评估方法的基本思想

线损概率评估的基本思想是在考虑不确定性因素的情况下进行随机潮流计算以确定线损的概率分布。根据现有配电网自动化状况,大部分线路均可已知的信息仅包括各负荷的月供电量或典型日供电量,及典型日线路首端有功、无功功率及电压曲线。线路上大部分负荷的运行数据严重缺乏。显然,针对配电网线损评估的难点在于随机负荷模型的建立。

然而,各负荷用户供电量的历史数据较为丰富,通过统计分析,可获得各负荷月供电量的分布特征。由此,若可利用负荷统计数据及典型负荷运行曲线,并通过一定匹配方法得到电网的等效运行数据,则可进行潮流计算,得到与配电网实际运行状况相吻合的线损率。

## 2 等效运行数据的建立

### 2.1 典型负荷及其归一化曲线

负荷模型的精确与否是影响线损计算精度的关键因素。理想情况是能获取每个负荷的运行曲线。对于分布区域广泛且数量众多的配电负荷而言,是件极其困难的事情,目前配电网的自动化水平还不

足以实现该目标。尽管配电负荷数目众多且个体之间存在差异,但根据其运行特点可大致被划分为几大类,且每类负荷运行方式较为统一,负荷曲线形状没有很大区别。基于此,可将负荷进行分类处理,分类原则如下:

(1) 将负荷按用电类别进行归类划分,并且假定各类负荷具有相同的典型运行曲线;

(2) 对于不确定用电类别的负荷,假设其典型负荷曲线及功率因数与配电线路首端一致。

负荷分类后,每类负荷可选取典型负荷进行监测,其运行数据可用来建立该类负荷的典型运行曲线,对该曲线进行归一化处理(图1),其中

$$\mu_{i,t} = \frac{P_{i,t}}{\sum_{t=1}^{24} P_{i,t}} \quad (1)$$

其中:  $P_{i,t}$  为该类负荷实测的整点时刻有功功率值;  $\mu_{i,t}$  为该类负荷在  $t$  时刻的有功功率匹配因子。若已知  $i$  类负荷  $j$  的月电量数据,典型日该负荷  $t$  时刻的有功功率匹配为

$$P_{i,t}^{(j)} = \frac{W_j}{Days} \cdot \mu_{i,t} \quad (2)$$

其中:  $W_j$  为负荷  $j$  的月供电量;  $Days$  为该月天数。

同理,负荷无功功率可用相同方法获得,亦可根据有功功率及功率因数求取

$$Q_{i,t}^{(j)} = P_{i,t}^{(j)} \cdot \tan(\arccos \varphi_j) \quad (3)$$

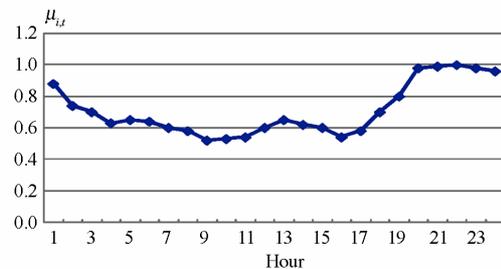


图1 配电负荷归一化典型运行曲线

Fig. 1 Normalized characteristic line of distribution load

### 2.2 典型负荷曲线的校正

由典型负荷曲线可初步获得各负荷全天整点时刻的初始有功、无功功率曲线。但整条配电线路的电量供需应该是平衡的,即各负荷的功率之和应与典型日首端功率一致。因此,需要通过馈线首端功率曲线对各负荷24点功率进行校正,校正方法如下:

(1) 设  $t=0$ ;

(2) 对负荷进行分类, 并依据式(2)、式(3)求取所有配电负荷  $t$  时刻的有功功率  $P_{i,t}^{(j)}$ 、无功功率  $Q_{i,t}^{(j)}$ ,  $j=1, \dots, m$  ( $m$  为负荷个数);

(3) 根据  $t$  时刻首端  $P_{0,t}$ 、 $Q_{0,t}$ 、 $V_{0,t}$ , 进行匹配潮流计算, 收敛后, 各负荷节点功率校正为  $P_{i,t}^{(j)}$ 、 $Q_{i,t}^{(j)}$ 、...

(4)  $t=t+1$ , 若  $t < 24$ , 转(2);

(5) 计算完, 根据式(1)对各负荷曲线进行归一化处理, 得到各负荷的等效特征曲线。

### 2.3 负荷月电量的取样

负荷月用电量是随机波动的, 其变化的分布特征可通过对历史数据的统计分析得到, 假定其期望值为  $\bar{W}_j$ , 方差为  $\sigma_j^2$ 。评估周期内任一月, 负荷  $j$  的月用电量可表示为

$$W_j = (1 + \Delta W_{i,\%}) \cdot \bar{W}_j + \Delta W_j \quad (4)$$

其中:  $\Delta W_{i,\%}$  为  $i$  类负荷预期增长百分比;  $\Delta W_j$  为负荷随机波动值, 该值服从正态分布  $N(0, \sigma_j^2)$ , 可通过蒙特卡洛模拟确定。

根据负荷的等效日负荷曲线, 可由式(4)模拟生成负荷电量的样本数据, 然后可由式(2)、式(3)匹配得到各负荷 24 整点的有功功率及无功功率数据。

## 3 评估算法

结合蒙特卡罗模拟方法, 对所有负荷月用电量进行模拟抽样, 并计算其一天 24 整点的功率后, 计算配电网潮流, 得到该线路线损电量, 重复抽样计算形成馈线线损率的概率评估方法, 具体流程如下:

(1) 将配电线路上的负荷进行分类, 并设置每类负荷的典型运行曲线;

(2) 根据典型日馈线首端电压、功率曲线对负荷的典型运行曲线进行校正、归一化处理, 作为该负荷的特征运行曲线;

(3) 收集负荷月电量数据, 进行统计分析, 得到每个负荷的月电量分布特征, 设置各负荷的样本方差;

(4) 采用蒙特卡罗模拟方法, 随机抽样生成各样本日负荷电量数据, 并生成负荷的等效日运行曲线;

(5) 进行潮流计算, 得出各样本日的线损计算结果;

(6) 收敛判断: 计算线损率方差, 若达到收敛精度, 则输出计算结果; 否则, 转(4)。

## 4 算例及分析

以山东省某地区 2010 年石膏矿线(图 2)为例进行分析。2010 年该线路全长 43.37 km, 导线以 LGJ50、LGJ-70 型号为主。当年典型日理论线损计算中该线路线损率为 4.24%, 属于线损率较高的线路。从图 2 可知, 线路主要负荷在节点 2 处分为两大分支。其中分支 1 所属区域线路总长度为 15.92 km, 负荷月供电量占全线路月供电量的 67%, 分支 2 所属区域线路总长度为 14.64 km, 负荷月供电量占 33%, 该分支内多为小型煤矿用户。

依据前述原则, 将该线路负荷划分为四类: (1) 普通工业负荷; (2) 商业负荷; (3) 民用负荷; (4) 其他。其中第 4 类负荷的运行曲线采用与配电线路首端一致的形式, 其他三类负荷的运行曲线见附录 A。

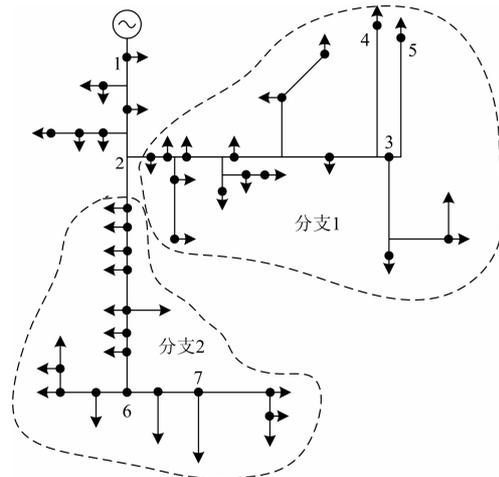


图 2 2010 年石膏矿线示意图

Fig. 2 Distribution line of Shigaokuang in 2010

拟对该线路进行降损技术改造, 可采取的各项降损措施如表 1 所示。表 1 三种方案中, 传统方法需要分别计算损耗的变化量, 其中后两种方案以改造前损耗电能  $\Delta A$  与改造前后电阻值  $R_1$ 、 $R_2$  为参数进行简化计算, 降损电能  $\Delta(\Delta A) = \Delta A(1 - R_2 / R_1)$ , 根据该式计算得到方案 2、方案 3 单日降损电能分别为 0.625 MW、0.986 3 MW, 改造后线损率分别为 2.51%、3.99%。需要注意的是该简化计算是以假定馈线首端的运行数据不变为前提的, 因而以此计算的节约电量在实际负荷变化的情况下显然会有较大的误差。

负荷月供电量波动方差选取如下: 类型 1 工业负荷为 3%, 其他负荷 2%。考虑经济发展因素, 各类负荷逐年递增, 且增幅分别为: 工业负荷 4%,

其他负荷为 3%。评估计算时间为三年。经模拟计算，未改造前与采用不同降损方案计算结果见表 2。

表 1 可选择的降损方案

Table 1 Program of single measure

方案序号	方案内容
1	对部分厂矿用户增加无功补偿，使其功率因数最低维持在 0.95 以上
2	更换线路型号：节点 1 至节点 2 之间红色标识线路 LGJ-50 更换为 JKLGJYJ-185，全长 10.47 km
3	减小供电半径：将电量较大、距离电源点较远的分支 2 从节点 2 处直接接至电源端

表 2 各方案的降损结果

Table 2 Result of single measure

方案	日供电量期望值/MWh	典型日线损电量期望值		合计损失电量期望/MWh
		期望值/MWh	期望值/%	
未改造前	26.926	1.170 4	4.344	1 281.63
方案 1	26.925 8	1.170 2	4.343	1 281.36
方案 2	26.424	0.668 5	2.528	731.95
方案 3	26.607	0.639 1	2.400	699.84

表 2 中合计损失电量期望为三年总计损失电量。从表 2 中数据可看出：单项节能方案中，方案 3（缩短供电半径）的降损效果最为明显，相对于未改造前，三年总计可节约电量约 581.79 MWh；其次为方案 2（更换主干部分导线的型号），也有明显的节能效果，但需要的改造投资较大；方案 1（无功补偿）的降损效果最差，原因是虽然部分工矿企业存在功率因数较低的情况，但该部分用户用电所占比例较少。

在单项节能措施基础之上，考虑多项措施综合作用后果，设定降损方案（表 3），计算结果见表 4。

表 3 综合降损方案

Table 3 Program of comprehensive measures

方案序号	方案内容
4	方案 1 与方案 3 组合（无功补偿+更换线路型号）
5	方案 2 与方案 3 的组合（更换线路型号+缩短供电半径）
6	方案 1、方案 2 与方案 3 的组合（更换线路型号+无功补偿+缩短供电半径）

表 4 综合降损方案计算结果

Table 4 Result of comprehensive measures

方案	日供电量期望值/MWh	典型日线损电量期望值/MWh	线损率期望值/%	合计损失电量期望/MWh
方案 4	26.004	0.631 9	2.374	589.356 0
方案 5	26.177	0.421 4	1.609	461.437 4
方案 6	26.175	0.419 5	1.602	459.417 0

表 4 数据显示，多项措施综合作用，可以进一步降低损耗，但综合效果节约的电量并不等于各单项措施节约电量之和。以缩短供电半径和更改线路为例，单项措施下可分别节约电量 549.68 MWh 和 581.79 MWh，两项综合作用时共可节约电量 820.19 MWh，小于两单项节约电量之和。

根据表 2、表 4 的计算结果，电力用户可根据资金条件选择合适的方案进行实施。

基于上述评估结果，供电公司对该线路进行了缩短供电半径的技术改造，将膏矿线拆分为两条线路：10 kV 13 膏矿线与 10 kV 25 膏矿线（见附录 B）。两条线路至 2013 年月供电量 684.254 MWh，增长率达 17.6%，但理论线损计算表明，两条线路合计线损率 1.45%，降损效果达到预期。

## 5 结论

本文提出了一种配电网线损的概率评估方法，可利用典型日数据和负荷历史数据，建立等效运行数据，实现考虑负荷随机波动条件下的配电网线损概率评估。本方法的优点在于：(1) 利用配电负荷的供电量及典型日运行数据即可完成分析，可适应大多数现场的数据获取条件；(2) 通过模拟负荷的增长及随机波动，能较为准确地对线损率进行评估；(3) 为多项节能措施综合作用效果评估提供了有效方法，提高线损评估效率。

### 附录 A 典型负荷特征曲线

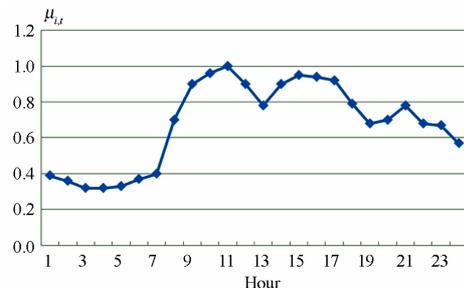


图 A.1 一般工业负荷特征曲线

Fig A.1 Characteristic curve of general industrial load

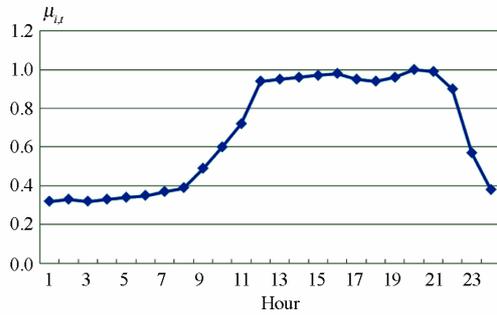


图 A.2 商业负荷特征曲线

Fig A.2 Characteristic curve of commercial load

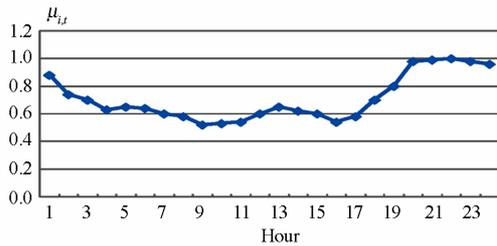


图 A.3 民用负荷特征曲线

Fig A.3 Characteristic curve of civil load

## 附录 B 配电线路接线图

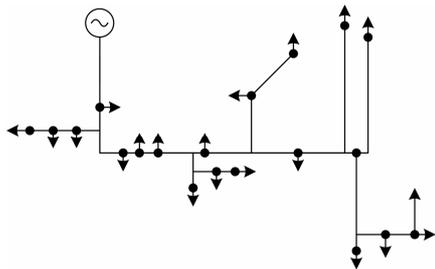


图 B.1 10 kV 13 膏矿线接线图

Fig B.1 Circuit diagram of 10 kV 13 Gaokuang

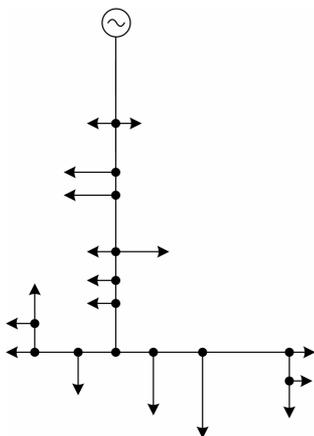


图 B.2 10 kV 25 膏矿线接线图

Fig B.2 Circuit diagram of 10 kV 25 Gaokuang

## 参考文献

- [1] 电力节能技术编委会. 用电系统节能技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 张勇军, 陈超, 廖民传. 配电网节能改造优化建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 51-64.  
ZHANG Yong-jun, CHEN Chao, LIAO Min-chuan. Research on optimal model for energy saving reconstruction of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 51-64.
- [3] 胡泽春, 钟明明, 王佳贤, 等. 考虑多负荷水平的中低压配电网无功补偿优化规划[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 167-173.  
HU Ze-chun, ZHONG Ming-ming, WANG Jia-xian, et al. Optimal reactive power compensation for medium and low voltage distribution network considering multiple load levels[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 167-173.
- [4] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-174.  
ZHANG Li, XU Yu-qin, WANG Zeng-ping, et al. Reactive power optimization for distribution system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-174.
- [5] 国家电力公司发输电运营部. 供电生产常用指导性技术文件及标准(第一册 无功补偿、电能质量及损耗)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [6] 马丽叶, 卢志刚, 胡华伟, 等. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 163-171.  
MA Li-ye, LU Zhi-gang, HU Hua-wei, et al. A fuzzy comprehensive evaluation method for economic operation of urban distribution network based on interval number[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 163-171.
- [7] 刘健, 段璟靓. 配电网极限线损分析与降损措施优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 27-35.  
LIU Jian, DUAN Jing-jing. Line loss limitation analysis and optimal planning of loss reduction for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 27-35.
- [8] 李秀卿, 汪海, 许传伟, 等. 基于免疫遗传算法优化的神经网络配电网网损计算[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 36-39.

- LI Xiu-qing, WANG Hai, XU Chuan-wei, et al. Calculation of line losses in distribution systems using artificial neural network aided by immune genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 36-39.
- [9] 葛江北, 黄伟, 李乐, 等. 配电网节能改造经济性风险的量化评估[J]. 现代电力, 2010, 27(4): 87-90.  
GE Jiang-bei, HUANG Wei, LI Le, et al. Quantitative evaluation for economic risk of energy saving program in distribution network[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(4): 87-90.
- [10] CHEN C S, HWANG J C, CHO M Y, et al. Development of simplified loss models for distribution system analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(3): 1545-1551.
- [11] 王成山, 刘姝, 林勇. 基于区间算法的配电网线损理论计算[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 22-27.  
WANG Cheng-shan, LIU Shu, LIN Yong. Electric network loss calculation using interval iteration method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 22-27.
- [12] 张勇军, 石辉, 许亮. 配电网节能潜力评估系统开发方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 51-55.  
ZHANG Yong-jun, SHI Hui, XU Liang. Systematic developing program of distribution network energy saving potential evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 51-55.
- [13] 张勇军, 石辉. 基于灰关联加权的配电网紧凑型节能改造投资规划[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 46-50.  
ZHANG Yong-jun, SHI Hui. Distribution network energy-saving investment compact planning based on gray connectedness weighting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 46-50.
- [14] MELIPOULOS A P, CHAO X. Transmission loss evaluation based on probabilistic power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 364-371.
- [15] 穆钢, 徐兴伟, 周莹, 等. 输电系统网损功率概率分布函数的计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 426-428.  
MU Gang, XU Xing-wei, ZHOU Ying, et al. Computation and analysis of probabilistic distribution function of power loss in a bulk transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 426-428.
- [16] 颜伟, 吕志盛, 李佐君, 等. 输电网的蒙特卡罗模拟与线损概率评估[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 39-44.  
YAN Wei, Lü Zhi-sheng, LI Zuo-jun, et al. Monte Carlo simulation and transmission loss evaluation with probabilistic method[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 39-44.
- [17] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 配电匹配潮流技术及其在配电状态估计中的应用[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(7): 18-22.  
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. Distribution matching power flow technology and its application to state estimation for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(7): 18-22.
- [18] 陈得治, 郭志忠. 基于负荷获取和匹配潮流方法的配电网理论线损计算[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 80-84.  
CHEN De-zhi, GUO Zhi-zhong. Distribution system theoretical line loss calculation based on load obtaining and matching power flow[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 80-84.

---

收稿日期: 2013-09-24

作者简介:

陈芳(1973-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: cse\_chenf@ujn.edu.cn

张利(1965-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统调度自动化。