

多负荷水平下配电网电容器优化配置算法

张程¹, 王主丁¹, 张宗益², 赵俊光¹, 樊亚辉³

- (1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044;
2. 重庆大学 电力能源技术经济研究院, 重庆市 沙坪坝区 400044;
3. 普洱供电局, 云南省 普洱市 665000)

An Algorithm for Optimal Configuration of Capacitors in Distribution Network Under Multi-Load Levels

ZHANG Cheng¹, WANG Zhuding¹, ZHANG Zongyi², ZHAO Junguang¹, FAN Yahui³

- (1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China; 2. Electric Energy Technology and Economy Institute, Chongqing University, Shapingba District, Chongqing 400044, China; 3. Puer Electric Power Supply Bureau, Puer 400039, Yunnan Province, China)

ABSTRACT: An algorithm for optimal configuration of capacitor banks in distribution network under multi-load levels is proposed. Firstly, under high load level the initial solutions of reactive power compensation, including the positions of compensation points and corresponding compensation capacity, are determined; then based on these initial solutions the switching capacities of capacitor banks, which make the network loss minimal under medium- and low load levels, are solved by analytical method to implement effective configuration of each capacitor bank at each compensation point under various load levels; finally, by use of genetic algorithm the feasible solution of reactive compensation is optimized by generation to attain optimal reactive power compensation scheme. Simulation results of IEEE 33-bus system verify the effectiveness of the proposed optimization algorithm.

KEY WORDS: multi-load levels; distribution networks; optimal reactive power planning; reactive power compensation; genetic algorithm; capacitor configuration

摘要: 提出了多负荷水平下的配电网电容器优化配置算法。首先,在大负荷水平下,根据节点补偿容量上限确定无功补偿初始解;然后,基于各初始解采用解析法求得中小负荷水平下使系统损耗最小的电容器投切容量,实现了各补偿点电容器在不同负荷水平下的有效配置;最后应用遗传算法对无功补偿可行解进行迭代优化,求得最优无功补偿方案。IEEE 33节点系统算例验证了该算法的有效性。

关键词: 多负荷水平; 配电网; 无功规划优化; 无功补偿; 遗传算法; 电容器配置

0 引言

配电网无功规划优化通过选择无功补偿设备的最优安装位置和容量,使系统以最经济的投资维持在合理的电压水平,并降低系统网损,是一个多变量、多约束条件的混合非线性规划问题^[1]。长期以来,国内外学者对该问题进行了大量研究^[2-5]。文献[6]提出了一种基于节点补偿容量动态上限和遗传算法的既有序又随机的配电网无功规划优化方法,该方法使初始种群尽可能多地包括可行解,提高了寻优效率和质量。但仅依据单一负荷水平进行无功配置所得方案对其它负荷水平不一定经济,因此进行无功规划优化时需要考虑多种负荷水平的影响^[7-10]。文献[10]分析了常用损耗计算方法的误差,指出随着最大负荷小时数的减小,最大负荷损耗时间法求得的损耗误差将增大。文献[11]把免疫算法^[12-14]和最优覆盖原理应用到多负荷水平下的配电网无功规划优化中,无功规划优化问题中变量与约束条件种类多且类型不一,该方法在一定范围内有效解决了变量求解困难的问题,但该方法存在一定不足:1)未明确提出待补偿点的确定方法,而这正是解决配电网无功规划优化问题的关键;2)基于最大覆盖原理求取中小负荷补偿容量理论的严密性有待进一步研究,如无功不能倒送的条件(通常现有导则仅要求最小负荷时无功不能倒送)。

为扩大配电网无功规划优化适用范围,本文将不局限于某一负荷水平,提出多负荷水平下配电网电容器优化配置算法,以降低系统损耗,减少无功

补偿设备投资。

1 数学模型

1.1 目标函数

本文将配电网系统负荷分为大、中、小3个水平，考虑配电网因无功补偿减少的电能损耗带来的经济效益与新增无功补偿设备所需增加投资后，以净收益最大为目标。因此，目标函数包含了各负荷水平下的电能损耗

$$\max C = C_e \sum_{k=1}^3 [(\Delta P_k - \Delta P'_k) T_k] - (\alpha + \beta) \sum_{i \in M} (C_{iv} Q_{ic} + a C_{if}) \quad (1)$$

式中： C_e 为电能损耗边际值，万元/kW·h； ΔP_k 、 $\Delta P'_k$ 分别为补偿前后第 k 个负荷水平下的系统功率损耗； T_k 为在第 k 个负荷水平下系统运行时间； α 、 β 分别为折旧维修率和投资回收率； C_{iv} 为节点 i 处补偿电容器单位容量价格，万元/kvar； C_{if} 为节点 i 处补偿电容器的固定投资费用，万元； M 为补偿节点的集合； Q_{ic} 为大负荷水平下节点 i 处的电容器补偿总容量，kvar； a 为补偿系数，若节点 i 为新增补偿点，则 $a=1$ ，否则 $a=0$ 。

1.2 约束条件

约束条件包括节点功率平衡方程和节点电压上下限

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{Gi} - P_{Di} - U_i \sum_{j=1}^{N_b} [U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})] = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} - U_i \sum_{j=1}^{N_b} [U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})] = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (3)$$

式中： P_{Gi} 、 Q_{Gi} 为注入节点 i 的有功功率和无功功率； P_{Di} 、 Q_{Di} 为节点 i 的负荷有功功率和无功功率； U_i 、 U_j 为节点 i 、 j 的电压幅值； G_{ij} 、 B_{ij} 、 δ_{ij} 分别为节点 i 、 j 间的电导、电纳和电压相角差； N_b 表示所有与节点 i 直接相连的节点集合； $U_{i \max}$ 、 $U_{i \min}$ 为节点 i 电压幅值的上、下限。

1.3 适应度函数

令

$$G = C_e \sum_{k=1}^3 (\Delta P'_k T_k) + (\alpha + \beta) \sum_{i \in M} (C_{iv} Q_{ic} + a C_{if}) \quad (4)$$

由式(1)(4)可知，要使式(1)越大，则式(4)越小越好。遗传算法中适应度越大越好，本文的适应度函数 f 为

$$f = 1/G \quad (5)$$

2 初始补偿方案确定

2.1 大负荷水平下初始解生成

2.1.1 节点补偿容量上限的确定

假设整个配电网中仅有1个补偿点，大负荷水平下在节点 i 处进行无功补偿所带来的净收益 A_i 可近似表示为

$$A_i = C_e T_{\max} \sum_{b \in H} \left[\frac{Q_b^2 - (Q_b - Q'_{ic})^2}{U_b^2} R_b \right] - (\alpha + \beta) (C_{iv} Q'_{ic} + C_{if}) \quad (6)$$

式中： T_{\max} 为大负荷水平下系统运行时间； H 为从源节点出发到节点 i 最短路径上所有支路的集合； Q_b 为无功补偿前支路 b 末端的无功功率； Q'_{ic} 为大负荷水平下对节点 i 进行单点补偿时的电容器补偿容量； R_b 为支路 b 的电阻； U_b 是支路 b 末端节点电压。

将 A_i 对 Q'_{ic} 求导可得

$$\dot{A}_i = \frac{2C_e T_{\max}}{U_b^2} \sum_{b \in H} [(Q_b - Q'_{ic}) R_b] - (\alpha + \beta) C_{iv} \quad (7)$$

令 $\dot{A}_i = 0$ ，可得最佳补偿容量：

$$Q_{ic, \max} = [2A \sum_{b \in H} (Q_b R_b) - (\alpha + \beta) C_{iv}] / (2A \sum_{b \in H} R_b) \quad (8)$$

式中 $A = C_e T_{\max} / U_b^2$ 。

若将式(8)代入式(1)可得最大净收益 A_i^* ，则节点 i 补偿效益的灵敏度可表示为

$$S_i = A_i^* / Q_{ic, \max} \quad (9)$$

根据式(9)计算得到各候选补偿点的补偿效益灵敏度，并进行排序，按此顺序对各节点逐次补偿生成初始解，并作为遗传算法初始种群中的解。

2.1.2 初始解动态生成策略

初始解动态生成策略具体步骤为：

1) 按照补偿效益灵敏度确定的补偿顺序对补偿节点 i 进行补偿。

2) 确定节点 i 的动态最大补偿容量 $Q_{ic, \max}$ ，其大小与其上游支路的最新(动态)无功潮流 Q_b 相关，则补偿电容器组数上限 $m_{ic, \max}$ 可表示为

$$m_{ic, \max} = Q_{ic, \max} / Q_{cs} \quad (10)$$

式中 Q_{cs} 为电容器标准容量。由于电容器无功补偿以组为单位，而 $m_{ic, \max}$ 可能不是整数，本文对其上限取整数。

3) 在 $[0, m_{ic, \max}]$ 之间产生一个随机整数，将其作为在该解中此节点的补偿电容器组数，用该组数乘以 Q_{cs} 可得此节点无功补偿的近似容量。由于该容量与节点电压的平方成正比，可考虑使用该节点

的最小可能电压进行修正,以便保守地使下个补偿节点有一个可能大的补偿容量上限值。

4) 使用节点优化编号^[15]中得到的父节点(某节点上游或电源方向上离该节点最近的节点)信息找到此节点上游的所有支路,将这些支路的无功功率分别减去该节点的无功补偿容量即为相应支路更新后的无功功率。

5) 如果节点*i*为源节点或补偿效益灵敏度为0,则停止补偿;否则,转到步骤2),按大小次序对下一个补偿点进行补偿。

6) 对配电网所有节点经上述操作后即可得到初始种群中的一个解。

2.2 中小负荷水平下电容器投切容量确定

得到大负荷水平下的待补偿点位置和补偿容量后,采用解析法可快速得到中小负荷水平下的电容器最佳投切容量。

设*n*为支路总数,*m*为补偿点总数, α_j 为从源节点出发到节点*j*的最短路径上所有支路的集合。

未安装并联电容器时,由无功功率流动引起的配电网总损耗为

$$P_L = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i^2}{U_N^2} R_i \right) \quad (11)$$

式中: P_L 为配电网总损耗; Q_i 为线路*i*上流动的无功功率; R_i 为线路*i*的电阻; U_N 为线路额定电压。系统接入并联电容器后,支路功率满足

$$Q^{\text{new}} = Q - DQ_c'' \quad (12)$$

式中: Q^{new} 为*n*维列向量,表示支路最新无功功率; Q 为*n*维列向量,表示补偿前支路无功功率; D 为*n*×*m*阶矩阵,若支路*i*∈ α_j ,则 $D_{ij}=1$,否则 $D_{ij}=0$; Q_c'' 为*m*维列向量,表示待补偿点处电容器补偿容量。

根据支路最新无功功率,补偿系统总损耗为

$$P_L' = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[Q_i - \sum_{j=1}^m D_{ij} Q_{jc}'' \right]^2 / U_N^2 R_i \right\} \quad (13)$$

由式(11)和式(13)可得系统损耗减少量为

$$S = P_L - P_L' = \frac{1}{U_N^2} \sum_{i=1}^n \left\{ 2Q_i \sum_{j=1}^m (D_{ij} Q_{jc}'') - \left[\sum_{j=1}^m (D_{ij} Q_{jc}'') \right]^2 \right\} R_i \quad (14)$$

将*S*对 Q_{jc}'' 求导,并令其值均为0,则

$$\begin{cases} \partial S / \partial Q_{1c}'' = 0 \\ \partial S / \partial Q_{2c}'' = 0 \\ \vdots \\ \partial S / \partial Q_{mc}'' = 0 \end{cases} \quad (15)$$

若式(15)写成线性方程形式,则

$$A Q_c'' = B \quad (16)$$

因此,补偿点位置确定以后,采用解析法可快速得到中小负荷水平下系统电容器最佳投切容量(Q_c''),即

$$Q_c'' = A^{-1} B \quad (17)$$

式中: A 为*m*×*m*阶矩阵; B 为*m*维列向量。 A 、 B 中的元素为

$$A_{jj} = \left(\sum_{i \in \alpha_j} R_i \right) / U_N^2 \quad (18)$$

$$A_{jk} = \left(\sum_{i \in (\alpha_j \cap \alpha_k)} R_i \right) / U_N^2 \quad (19)$$

$$B_j = \left[\sum_{i \in \alpha_j} (Q_i R_i) \right] / U_N^2 \quad (20)$$

由式(18)–(20)可知, A 与 B 只与补偿前系统支路电阻和无功功率相关。值得注意的是:

1) 若大负荷水平下 $m_{ic,\text{max}}=0$,即*i*节点无需补偿时, A 将变为(*m*–1)维方阵, B 将变为(*m*–1)维列向量,待补偿点最佳容量也会发生变化。

2) 中小负荷水平下电容器无功补偿组数的选取采取四舍五入法则,若得出的组数大于大负荷水平的补偿组数,则投切组数取大负荷水平下的补偿组数。

2.3 中小负荷水平下网络损耗减小量近似计算

当中小负荷水平下的投切容量确定后,便可近似求出网络损耗减小量

$$S = \sum_{k \in \{2,3\}} \left\{ T_k \sum_{b \in H} \left[\frac{(Q_b^k)^2 - (Q_b^k - Q_{bc}^k)^2}{U_N^2} R_b \right] \right\} \quad (21)$$

式中: T_k (*k*=2,3)为中小负荷水平运行时间; Q_b^k (*k*=2,3)为无功补偿前中小负荷水平下支路*b*末端的无功功率; Q_{bc}^k (*k*=2,3)表示中小负荷水平下配电网接入补偿装置后流过支路*b*的无功功率。

因仅需计算一次补偿前交流潮流获得的 Q_b^k 便可得到各计算方案的损耗节约量,所以中小负荷水平下的网络损耗近似计算可大大提高优化速度。

3 应用遗传算法优化目标函数

遗传算法(genetic algorithms, GA)为模拟生物遗传进化机制的随机搜索自适应寻优算法,该算法适用于离散机制和非线性结构优化问题,理论上可从整个可行解空间寻找到最优解。参数编码、初始种群生成、适应度函数设计、遗传操作这4个要素组成了遗传算法的核心内容,算法具体步骤如下:

1) 参数编码。

本文以十进制整数代替二进制数编码,基因信息

包括无功补偿点的位置、大负荷水平下在 $[0, m_{ic,max}]$ 之间随机产生的补偿电容器组数、中小负荷水平下由解析法得出的补偿电容器组数。当某个节点的补偿组数为 0 时，表示此节点不需要进行无功补偿。

2) 初始种群生成。

在初始种群产生过程中，若中小负荷水平下的补偿组数大于大负荷水平下的补偿组数，则基因信息取大负荷水平下的补偿组数随机值。初始种群形成后，把初始种群中的解放入种群 P 中， P 为与初始种群规模(人口数)相同的另一个种群，使种群 P 和初始种群的解相同。

3) 进行遗传操作。

遗传算法可以看作为一个由可行解组成的群体逐步进化的过程，其中选择、交叉和变异构成了遗传算法的遗传操作。

4) 进行适应度评估。

根据式(5)的适应度函数对中间种群和种群 P 中的解进行适应度评估，并进行排序，选择适应度高的、个数等于种群 P 人口数的解替换种群 P 中原来的解。

5) 进行收敛判断。

如果某代中解的平均适应度与最优适应度的相对误差小于 0.01，且连续 5 代的最优解保持不变，则输出该最优解，算法结束；如果在最大遗传代数限定范围内没有满足收敛判据的解，则输出当前最优解，算法结束；否则重复步骤 3) — 5)。

按照上述遗传算法进行求解，本文配电网电容器优化配置流程见图 1。

4 算例

应用本文算法与文献[4]算法对 IEEE 33 节点网络进行电容器配置。网络参数为：系统运行时间以 1 a 计，大负荷(1.0 pu)运行时间为 2 000 h，中负荷(0.5 pu)运行时间为 4 760 h，小负荷(0.25 pu)运行时间为 2 000 h， $Q_{cs}=4$ kvar， $C_e=0.45$ 元/kW·h， $C_{iv}=50$ 元/kvar， $C_{if}=5000$ 元。

大负荷水平下，应用本文算法得到的补偿点为母线 29 和 13，应用文献[4]算法得到的补偿点为母线 29 和 16。采用本文算法对系统进行补偿前后其部分节点电压情况见表 1。

由表 1 可知，安装无功补偿装置后，各负荷水平下的节点电压得到了不同程度的改善。算例共有 33 个节点，大负荷水平下补偿前有 16 个节点的电

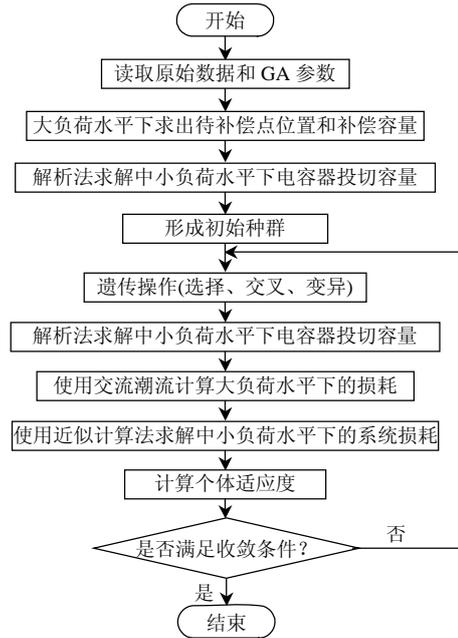


图 1 配电网电容器优化配置流程

Fig. 1 Flow chart of optimal configuration of capacitors in distribution network

表 1 补偿前后部分节点电压

Tab. 1 Nodes' voltages before and after compensation

节点	大负荷水平下 节点电压/kV		中负荷水平下 节点电压/kV		小负荷水平下 节点电压/kV	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
11	10.23	10.27	10.37	10.39	10.44	10.44
13	9.99	10.09	10.26	10.30	10.38	10.40
17	9.20	9.58	9.89	10.00	10.20	10.26
29	9.26	9.64	9.92	10.08	10.22	10.30
32	9.17	9.56	9.88	10.04	10.20	10.28

压低于 0.95 pu(基准电压为 10 kV)，补偿后各节点电压均符合标准；小负荷水平下补偿前后均无节点电压高于 1.05 pu。采用文献[4]算法对系统进行无功规划优化后，小负荷水平下补偿后有 11 个节点的电压超过约束条件，占总节点数的 33%。

采用本文算法与文献[4]算法得到的补偿容量和投资费用见表 2，其中大负荷水平下 2 种算法的网损和投资收益见表 3。

由表 3 可知，本文算法得到的投资效益高于文献[4]，且 1 a 内就可把用于无功补偿的投资费用收回，经济效益可观，补偿效益显著。

表 2 电容器容量配置与投资费用

Tab. 2 Capacitor capacity configuration and investment costs

算法	补偿节点	补偿容量/kvar	投资费用/万元
本文	29	852	4.76
	13	428	2.64
文献[4]	29	900	5.00
	16	296	1.98

表3 补偿前后结果比较

Tab. 3 Results comparison before and after compensation

项目	补偿前网损/kW	补偿后网损/kW	投资收益/万元
本文	318	217.9	8.224
文献[4]	318.16	220.22	7.123

5 结论

本文结合配电网特点建立了多负荷水平下配电网无功规划优化模型,目标函数考虑了大、中、小3种负荷水平下的系统损耗和补偿设备综合投资,较好地反映了系统运行情况。本文在补偿方案求解过程中,将遗传算法与解析法结合起来,有效压缩了遗传算法搜索空间,提高了算法求解速度。本文电容器优化配置方案降低了系统网损,减少了无功补偿设备投资,可为配电网无功优化研究提供参考。

参考文献

- [1] 程浩忠,张焰. 电力网络规划的方法与应用[M]. 上海:上海科学技术出版社,2002:1-3.
- [2] 胡海燕,刘健,武晓朦. 配电网低压侧自动无功补偿装置安装位置的优化规划[J]. 继电器,2004,32(19):24-28.
Hu Haiyan, Liu Jian, Wu Xiaomeng. Optimal placement of automatic reactive compensation equipment on the low voltage side of distribution transformers[J]. Relay, 2004, 32(19): 24-28(in Chinese).
- [3] Huang Y C, Yang H T, Huang C L. Solving the capacitor placement problem using tabu search approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1868-1873.
- [4] 李亚男,张粒子,舒隽,等. 结合专家知识的遗传算法在无功规划优化中的应用[J]. 电网技术,2001,25(7):14-17.
Li Yanan, Zhang Lizi, Shu Jun, et al. Application of expert knowledge adopted genetic algorithm to optimization of reactive power planning [J]. Power System Technology, 2001, 25(7): 14-17(in Chinese).
- [5] 张粒子,舒隽,林宪枢,等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报,2000,20(6):5-8.
Zhang Lizi, Shu Jun, Lin Xianshu, et al. Reactive power planning based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 5-8 (in Chinese).
- [6] 江洁,王主丁,张宗益,等. 基于有效生成初始种群的配电网无功规划优化遗传算法[J]. 电网技术,2009,33(8):60-65.
Jiang Jie, Wang Zhuding, Zhang Zongyi, et al. Effective initial population generation based genetic algorithm for optimal capacitor placement in radial distribution networks[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 60-65(in Chinese).
- [7] 余健明,杜刚,姚李孝. 结合灵敏度分析的遗传算法应用于配电网无功补偿优化规划[J]. 电网技术,2002,26(7):46-49.
Yu Jianming, Du Gang, Yao Lixiao. Application of genetic algorithm combining sensitivity analysis to optimized planning of reactive power compensation for distribution networks[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 46-49(in Chinese).
- [8] 王成山,张义. 基于Bender's分解和内点法的无功优化规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(4):46-50.
Wang Chengshan, Zhang Yi. Optimal reactive power planning using bender's decomposition technique and interior point method[J]. Proceeding of the EPSA, 2003, 15(4): 46-50(in Chinese).
- [9] 杨丽徙,徐中友,朱向前. 基于改进遗传算法的配电网无功优化规划[J]. 华北电力大学学报,2007,34(1):26-30.
Yang Lixi, Xu Zhongyou, Zhu Xiangqian. Optimization of reactive power planning of distribution systems based on improved genetic algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(1): 26-30(in Chinese).
- [10] 霍佳丽,王主丁,聂崇峡. 常用电能损耗近似计算方法的误差分析[J]. 电网技术,2009,33(18):50-56.
Huo Jiali, Wang Zhuding, Nie Chongxia. Error analysis of widely used electric energy loss calculation methods[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 50-56(in Chinese).
- [11] 王佳贤,程浩忠,胡泽春. 多负荷水平下的配电网无功优化规划方法[J]. 电网技术,2008,32(19):56-61.
Wang Jiaxian, Cheng Haozhong, Hu Zechun. Optimal reactive power planning for distribution systems considering multi-load levels[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 56-61(in Chinese).
- [12] 钟红梅,任震,张勇军,等. 免疫算法及其在电力系统无功优化中的应用[J]. 电网技术,2004,28(3):16-19.
Zhong Hongmei, Ren Zhen, Zhang Yongjun, et al. Immune algorithm and its application in power system reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 16-19(in Chinese).
- [13] 贺峰,熊信良,吴耀武. 改进免疫算法在电力系统电源规划中的应用[J]. 电网技术,2004,28(11):38-44.
He Feng, Xiong Xinyin, Wu Yaowu. Application of modified immune algorithm in power system generation expansion planning[J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 38-44(in Chinese).
- [14] Endoh S, Toma N, Yamada K. Immune algorithm for n-TSP[C]//1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. San Diego, USA: IEEE, 1998: 3844-3849.
- [15] Zhuding Wang, Farrokh Shokooh, Jun Qiu. An efficient algorithm for assessing reliability indexes of general distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 608-614.



张程

收稿日期:2010-03-25.

作者简介:

张程(1986),男,硕士,主要从事电力系统运行与优化研究, E-mail: chongqing.zc@163.com;

王主丁(1964),男,教授,IEEE高级会员,主要从事电力系统运行与优化研究;

张宗益(1964),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力技术经济分析和管理等。

(编辑 徐梅)