

DOI: 10.7667/PSPC150641

小方式下基于高压电网结构调整的新型电压控制方法研究

王晓旭¹, 郝文斌², 滕予非³, 胡沧粟⁴, 李坤⁵

(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 400044; 2. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610016; 3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610016; 4. 重庆大学自动化学院, 重庆 400044; 5. 国网内蒙古东部电力有限公司物资分公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 为避免部分电网在小方式下因感性补偿装置不足导致的母线电压越上限的情况, 提出了一种基于城市 110 kV 高压配电网结构调整的新型调压方法。本策略综合考虑了线路热稳、变压器容量和潮流断面传输功率的约束条件, 借鉴中低压配网重构思想, 通过改变原有 110 kV 电压等级变电站接线方式, 从而调整全网电压的偏移率。该方法采用贡献率指标评估对应变电站接线方式改变对系统电压的影响, 并根据计算结果对电网结构进行调整, 避免了传统的启发式优化算法导致的计算速度慢, 维数灾难等缺点。四川某地区电网实际算例显示, 提出的电压调整方法可以有效地改善网内电压分布, 具有简单易行的优点, 在工程中具有广泛的应用前景。

关键词: 小方式; 高压配电网; 网络重构; 电压调整; 贡献率

A new approach to voltage control based on HV grid transmission network reconfiguration during light load period

WANG Xiaoxu¹, HAO Wenbin², TENG Yufei³, HU Cangsù⁴, LI Kun⁵

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chendu Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610016, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610016, China; 4. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 5. Materials Branch of State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company Limited, Hohhot 010020, China)

Abstract: To avoid bus voltage conducting above the up limit for lack of compensation devices during light load periods, a new voltage regulation method based on 110 kV urban distribution network reconfiguration is introduced. The strategy takes example by medium voltage network reconfiguration and considers the restraint of line thermal stability, transformer capacity and switching power flow on boundary, through changing original 110 kV substation connection mode, finally optimizes the network voltage deviation degree. Contribution rate index is used to assess the influence of related substations' different connection mode on network-wide voltage amplitude, and according to the calculated results, the grid connection modes are regulated, thus classic heuristic algorithm's specific disadvantages of slow convergence speed and curse of dimensionality are avoided. Practical urban grid of Sichuan province indicates that the introduced voltage regulation method is simple and available, and can greatly optimize the voltage profile of the total network, so it has bright applying foreground in engineering.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277191) and Graduate Student Research Innovation Project (No. CYS14029).

Key words: light load periods; HV distribution network; network reconfiguration; voltage regulation; contribution rate

0 引言

为缓解城市供电线路走廊紧张等问题, 城市高

压配电网逐渐使用高压电缆替代传统的架空线路^[1]。由于高压电缆具有较大的对地电容, 因此在电压等级和距离长度相近的条件下, 高压电缆向电网注入的无功功率较架空线路增幅明显, 这对城市高压配电网的电压调整提出了新的挑战。特别是在“春节”等节假日期间, 由于工业用电降低, 系统负荷仅为

基金项目: 国家自然科学基金项目(51277191); 重庆市研究生科研创新项目资助(CYS14029)

典型小方式下的 1/4-1/5, 网内电压显著升高, 超出了传统调压手段调整的范围, 对电网的安全运行造成严重的威胁。

目前, 电压调整领域的探索侧重无功补偿的优化规划方法^[2]。文献[3]详细分析了电缆线间电容对全网无功平衡的影响, 提出对电网做感性无功补偿装置规划时, 需计及电缆充电功率以及节假日期间电网负荷的影响。同时部分学者从电网规划、无功电压调控及管理三个方面给出了小负荷水平下电网电压调整的建议, 在强调无功的就地平衡、分区平衡的同时, 探讨了传统电压调整方式对小负荷水平期间电压调整的影响^[4-5]。

在电网运行层面, 文献[6]针对鄂豫 500 kV 电网以及广东电网在春节期间的电压无功水平进行了细致分析, 针对感性无功补偿容量不足的现状, 提出通过开发机组进相潜力, 拉停部分轻载线路的方式进行电压调整, 实施效果显著。然而上述研究主要集中在高压输电网领域, 所提及的措施在配网中很难实施。

与此同时, 文献[7-14]提出了用优化的策略对配电网实施重构, 从而改善配电网的运行指标。然而随着城镇化的脚步快速增进, 高压配电网规模逐步增大, 优化算法将面临大计算量、频现孤岛节点、易陷入局部最优等问题。

本文在传统调压手段的基础上提出了基于城市负荷中心 110 kV 高压配电网重构的母线电压调整方法。该方法逆序选取指标贡献率 δ 对原有 110 kV 电压等级变电站接入节点进行转移, 通过调整网络结构改变全网无功流, 直至得到满意的电压幅值。本方法规避了启发式算法在中、大型网络计算中不易收敛、适应性差的问题, 大大提高了网络模型计算的仿真速度, 算例表明该方法较为理想地改善了大型城市配网的电压质量。

1 配电网网架调整改善电压分布机理

1.1 城市 110 kV 高压配电网结构及运行特点

城市 110 kV 高压配电网是连接上层输电网和下层中、低配电网的纽带, 以母线为单位呈辐射状运行, 各母线一次侧根节点通过高压输电网相连。为了提高可靠性, 配网之间采用“一供一备”的开环辐射状运行方式连接方式, 备用线路常置为热备状态。

图 1 所示为某城市部分高压输电网实际运行方式。矩形框图代表 220 kV 变电站, 正方形框图代表 110 kV 变电站, 连接线路端点部位实框表示开关闭合, 虚框表示开关断开。图 1 形象、清晰地表征了

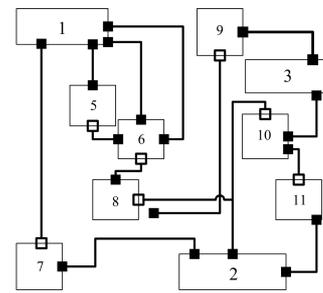


图 1 110 kV 网路电气连接图

Fig. 1 110 kV power grid topology

实际 110 kV 电压等级网络的运行状态。

由图 1 得知, 在城市辐射状网络中, 多个变电站往往由同一母线作为电能传输线路, 如图中 5~8 号 110 kV 变电站均由 220 kV 变电站中压侧直接供电。运行经验表明, 这些变电站母线节点电压越限往往性质相同: 同时越上限或越下限^[15]。特别在“春节”等节假日期间, 系统负荷仅为典型小方式下的 1/4~1/5, 电缆线路产生的大量无功无法被负荷与电网感性补偿装置完全吸收, 导致网内 110 kV 母线节点电压越上限运行, 因此消除 220 kV 变电站中压侧母线电压越限现象, 可使得与其相连的其他 110 kV 变电站越限现象也被消除或者缓解。

1.2 网架结构变更对系统节点电压的影响

研究表明, 网络结构的改变可以控制系统的有功流和无功流, 因此在重构前后节点电压以及网络损耗都会有较大变化。利用图 2 所示电网, 可对基于网络结构变更的电压调整的原理进行说明。

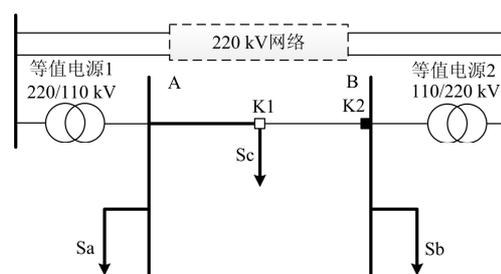


图 2 电压调整原理说明简图

Fig. 2 Simple schematic diagram of voltage control

图 2 中选择 220 kV 变电站中压侧作为供电电源, 负荷 Sa、Sb、Sc 是 110 kV 变电站的恒功率负荷模型。负荷 Sa、Sb 分别连接于母线 A 与母线 B 侧, Sc 与母线 A、B 组成“一供一备”的接线方式, 其中 A 为供电端, B 为热备端, 此时开关 K1、K2 分别为常开、常闭状态, 由于在实际工程中 K1 紧邻负荷 Sc, 因此在做等值线路模型时 BC 之间的线路充电功率不能忽略, 等值模型如图 3 所示。

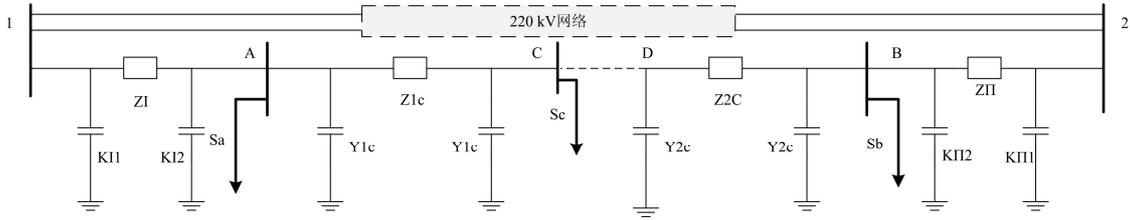


图3 等值电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model

为突出特点, 220 kV 等值网络的高压侧母线与单机无穷大系统相连, 在计算中其节点电压保持恒定。设各节点电压标幺值为 $1\angle 0^\circ$, 在已知末端功率 $\tilde{S}_C = P_C + jQ_C$ 的情况下, 利用辐射状网络潮流的求解方法, 由末端 C 向始端 1 回推得到关键节点功率^[16]为

$$\begin{cases} \tilde{S}_{CA}^* = \tilde{S}_c + Y_{CA}^* + (\tilde{S}_c + Y_{CA}^*)^* (\tilde{S}_c + Y_{CA}^*) Z_{CA} \\ \tilde{S}_{A1}^* = \tilde{S}_a + \tilde{S}_{CA}^* + Y_{A1}^* + (\tilde{S}_a + \tilde{S}_{CA}^* + Y_{AC}^* + Y_{A1}^*)^* \times \\ (\tilde{S}_a + \tilde{S}_{CA}^* + Y_{CA}^* + Y_{A1}^*) Z_{A1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \tilde{S}_c 、 \tilde{S}_a 为负荷功率; \tilde{S}_{CA}^* 、 \tilde{S}_{A1}^* 为 L_{CA} 、 L_{A1} 串联支路始端功率; Y_{CA} 、 Y_{A1} 为 L_{CA} 、 L_{A1} 并联支路的末、始端电纳。

由此得到

$$\dot{U}_A \approx \dot{U} - \frac{S_{A1}'' \cos(\varphi_1) X_{I1}}{\dot{U}} = \dot{U} - \frac{Q_{A1}'' X_{I1}}{\dot{U}} \quad (2)$$

式中: \dot{U}_A 为 A 端电压; $\cos \varphi_1$ 、 Q_{A1}'' 、 X_{I1} 为 L_{A1} 的串联支路始端功率因数、串联支路始端无功、串联支路电抗。

同理得到

$$\dot{U}_B \approx \dot{U} - \frac{Q_{B2}'' X_{II}}{\dot{U}} \quad (3)$$

式中: \dot{U}_B 为 B 端电压, Q_{B2}'' 、 X_{II} 为 L_{B2} 的串联支路始端功率因数、串联支路始端无功、串联支路电抗。

由式(1)~式(3)可知转换 Sc 两端的“供备”角色可得到母线 A、B 节点电压变化幅度为

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_A \approx \frac{-Q_C X_{I1}}{\dot{U}} \\ \Delta \dot{U}_B \approx \frac{Q_C X_{II}}{\dot{U}} \end{cases} \quad (4)$$

因此, 改变线路末端负荷 Sc 的接入点可以有效调节母线电压幅值, 与母线直接相连的其他节点电压也发生正相关改变, 其数值变化与电路拓扑结构有关。当母线 A 的电压偏高, 而母线 B 的电压偏低时, 通过调换 A、B 的供、备电角色, 改变负荷 Sc

接线方式, 使得无功流由电压较高处向较低处转移, 由此可以在不改变网架结构的基础上对消除或缓解电压越限现象。

2 算法描述

前文论述了通过网架方式调整, 改变电网负荷分布消除电网电压越限的原理。利用此特点, 将电压偏高节点相连的负荷转移到电压偏低的节点上, 通过改变无功注入点, 最终达到改善电压质量的目的。为评估网架方式调整后对电压调整的效果, 定义电压调整贡献率如式(5)所示^[17]。

$$\begin{cases} \delta = \min(\Delta U) \\ \Delta U = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\Phi(U_i - U_{i\max})}{\Delta U_{i\max}} \right]^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_i 为节点 i 的电压幅值; $U_{i\max}$ 为节点 i 规定的电压上限; $\Delta U_{i\max}$ 表示节点 i 的电压调整范围, 即上限与下限的差值为 $\Delta U_{i\max} = U_{i\max} - U_{\min}$; n 表示监测节点数, 函数 $\Phi(x) = \begin{cases} 0, x \leq 0 \\ x, x > 0 \end{cases}$ 。

由式(5)可知, 贡献率其本质上是全网监测节点电压与规定上限的最小偏差值, 可以得到基于网架结构改变的电压调整算法如图 4 所示。

Step1: 建立区域独立潮流数据模型, 调整至网络收敛;

Step2: 读取 $U_{110\max}$ 及与其相连的 220 kV 变电站中压侧 110 kV 母线电压, 判断该母线电压是否也越上限。通过上文分析并对比大量地区的运方数据认为该假设成立, 对于个别因线路过长而导致末端升高的 110 kV 变电站则将其连接的备用线路转换为冷备状态, 若仍不能改善其电压质量则进行标记待整个流程结束后由调度人员人工调整。

Step3: 依次计算每个可转移到该中压侧母线上的 110 kV 变电站转移后对于减小全网电压偏率率的贡献率 δ , 将贡献率 δ_{\min} 对应的 110 kV 变电站转移至该母线, 并满足线路热稳 $I_{i\max}$ 、变压器容量 S_i 及断面潮流 $P_{ij\max}$ 的约束条件。

$$\text{st.} \begin{cases} P_i < KS_i \\ I_i < I_{i\max} \\ P_{ij} < P_{ij\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中, K 为过负荷率, 在工程应用中变压器的过负荷能力不超过 30%~50%, 但本文中背景针对极小方式情况, 因此取 $K=1$ 。

Step4: 对已转移的变电站设置 flag 标志位, 在后续计算中不再做任何改动;

Step5: 重新计算全网潮流, 重复 Step 2 直至满足如下情况时跳出计算流程并输出调整方案:

(1) 监控节点完全遍历;

(2) 节点未遍历完全但连续几次全网电压偏移率变化不明显^[18-19]。

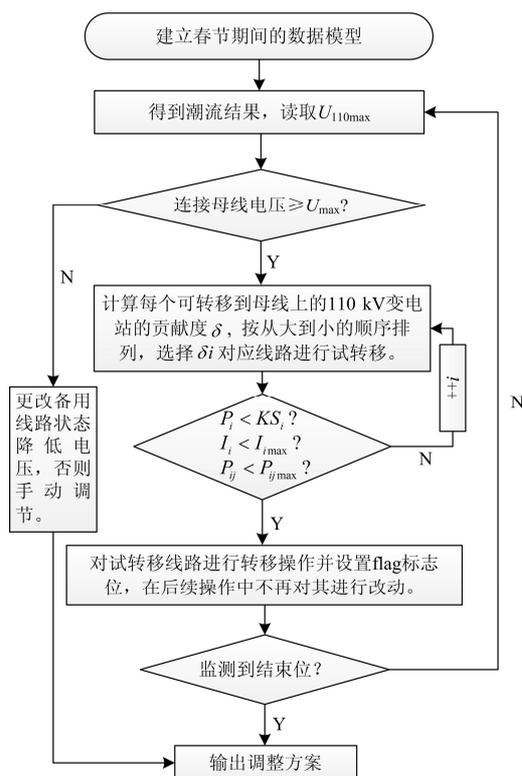


图 4 基于负荷转移的电压调整流程图

Fig. 4 Flow diagram of voltage adjustment based on load transferring

3 算例分析

3.1 算例电网及其在极小方式下的电压分析

四川东部某实际城市电网内有 220 kV 变电站 44 座, 110 kV 变电站 189 座, 无大型发电厂、调相机, 是典型受端网络, 节点众多, 结构复杂; 该地区仅有两座变电站在规划初期配置补偿电抗器, 在低谷负荷时期缺乏有效的无功调节手段, 导致无功

过剩、全网电压偏高的情况在节假日尤其是春节期间较为严重。由于春节期间负荷最轻, 因此该时段的运行方式能够较好的模拟出电网自身特点。了解到该地区春节期间负荷连续五年来约为 1 700 MW, 相比于冬季典型小方式而言, 负荷仅为 1/5 左右, 截至 2014 年 12 月 31 日, 该地区电网共有电缆线路 2150.188 公里, 产生无功合计 954.34 Mvar, 当传统调压手段用尽时, 依然存在 40% 左右的 110 kV 变电站越上限运行。为保证电力系统的安全运行, 该地区调度人员拉停了一部分轻载严重的线路, 此种做法大大降低了系统可靠性, 也为电网大面积停电事故埋下了安全隐患, 具体参数及拉停线路前的电压幅值如表 1、图 5 所示。

表 1 春节期间电网运行方式

Table 1 Operation mode during Spring Festival

拉停线路前正常运行方式	数值
无功负荷	600 MVA
可投感性补偿装置	32 MVA
电缆充电功率	900 MVA
全网 110 kV 母线越限率	40%
热备线路	220
单点最大电压差值	10.10 V

由表 1 可以看出春节期间网内负荷及补偿装置不能完全吸收线路充电功率, 由此导致网内无功过剩, 电压偏高, 采用传统调压手段后监控节点的电压偏移率仍高达 40%。

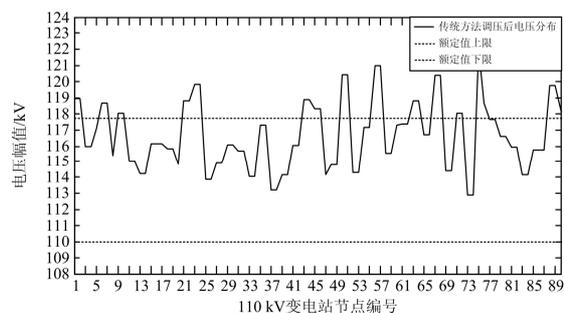


图 5 春节拉停线路前 110 kV 变电站母线电压波形

Fig. 5 Voltage waveform of 110 kV substations before circuit break during Spring Festival

由图 5 可以看出, 调整前母线电压越限程度较高, 各节点之间电压差值明显, 离散程度较为严重。

3.2 结果对比与分析

在参照该地区 2014 冬季典型小方式数据的基础上, 模拟了春节期间的开机方式、网络拓扑、负荷水平、无功补偿设备投运情况, 并以负荷和发电机替代潮流断面的交换功率, 建立了该地区的“孤网数据模型”, 对比潮流结果与实测数据, 各监测节

点电压相差 5 kV 范围内, 效果较为理想。利用图 4 所示的算法, 对网络电压进行调整, 程序运行结束后累计改动了 15 个变电站, 网络调整前后部分典型 110 kV 中心母线电压幅值及其他参数变化如表 2 所示。

表 2 优化前后参数对比

Table 2 Parameter comparison before and after network optimization

监控节点	优化前	优化后
节点 1	123.3 kV	116.9 kV
节点 2	119.8 kV	116.9 kV
节点 3	118.8 kV	117.6 kV
节点 4	112.2 kV	116.2 kV
节点 5	112.2 kV	116.8 kV
节点 6	113.9 kV	115.5 kV
越上限偏移率	40%	5%
功率因数	0.987 5	0.946 4

由表 2 看出, 在满足前文提及的电压、功率、热稳等约束条件的前提下对现有的 110 kV 配网系统进行优化重构后, 全网节点电压偏移率有效降至 5% 左右, 220 kV 变电站的下网功率因数由 0.98 降至 0.95, 相当于多吸收 200 Mvar 的无功, 单点越限差值降低, 系统离散程度减小, 网内电压均衡性能得到了良好改善。结果表明基于“削峰填谷”的思想的网络重构在电压调整中具有较好的应用前景, 并在实际应用中得到了可靠验证, 优化前后波形如图 6。

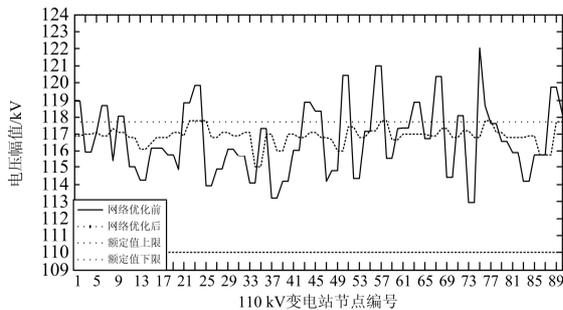


图 6 优化前后 110 kV 变电站母线电压波形

Fig. 6 Voltage waveform of 110 kV substations before and after network optimization

4 结论

本文提出了针对大型城市高压输电网络在节假日期间的电压调整方式: 在传统调压手段用尽的时候, 采用“削峰填谷”的思想, 计算改变相关电站接线方式对全网电压偏移率的贡献度, 并依此进行排序和转移, 直至网内电压达到《无功导则》规定的标准, 避免了使用启发式规则导致的维数灾难,

克服了中大型网络适用性较差的缺点, 深层挖掘电网本身资源, 在不依靠外力的条件下对偏高电压进行了调整。算例表明, 该方法不仅能够减小网内电压偏移率、降低单点越限程度, 而且可以有效吸收剩余无功, 效果良好。该算法具有计算速度快、收敛性好、优化效益高的特点, 是一个具有应用前景的调压方案。

参考文献

[1] 车仁青, 刘凌波, 宗占谊. 电缆线路对 110 kV 变电站无功补偿设计计算的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(1): 13-15.
CHE Renqing, LIU Lingbo, ZONG Zhanyi. Influence on cable lines to reactive power compensation design calculation of 110 kV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Compensation, 2011, 32(1): 13-15.

[2] 刘翰林. 地区电网感性无功补偿优化配置研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
LIU Hanlin. Research on optimal configuration of inductive reactive power compensators in regional power network[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[3] 赵璞, 蔡轼, 董丹煌, 等. 轻负荷时期高压电缆充电功率对电网无功平衡的影响分析[J]. 浙江电力, 2013(2): 20-23.
ZHAO Pu, CAI Shi, DONG Danhuang, et al. Impact analysis of charging power of high-voltage cable on reactive power balance of power grid during light load periods[J]. Zhejiang Electric Power, 2013(2): 20-23.

[4] 杨银国, 李扬, 李力. 广东电网春节期间无功电压调控存在的问题与对策[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 135-138.
YANG Guoyin, LI Yang, LI Li. Analysis and counter measures for Volt/Var control in Guangdong power grid during the period of Spring Festival[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 135-138.

[5] 王坚, 徐克强, 刘淼. 南方电网春节期间运行经验[J]. 南方电网技术, 2013, 7(1): 58-60.
WANG Jian, XU Keqiang, LIAO Miao. The operation experience of CSG during the spring festival[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 58-60.

[6] 丁心海, 黄涌, 雷军, 等. 2008 年春节期间鄂豫 500 kV 电网电压偏高问题仿真[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 36-41.
DING Xinhai, HUANG Yong, LEI Jun, et al. Simulation on the problem of high voltage in Hubei and Henan Provincial 500 kV power system during 2008 Spring Festival[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 36-41.

- 36-41.
- [7] 蒙文川, 邱家驹. 基于免疫算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 25-29.
MENG Wenchuan, QIU Jiaju. An artificial immune algorithm to distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 25-29.
- [8] 陈前宇, 陈维荣, 戴朝华. 电力系统无功优化多目标处理与算法改进[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 129-135.
CHEN Qianyu, CHEN Weirong, DAI Chaohua. Multi-objective reactive power optimization and improvement of practical swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 129-135.
- [9] 刘华臣, 王锡淮, 肖健梅, 等. 基于群搜索算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 93-99.
LIU Huachen, WANG Xihuai, XIAO Jianmei, et al. Reactive power optimization based on group search optimizer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 93-99.
- [10] 田昊, 吕林, 高红均, 等. 计及电网运行特性的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 9-14.
TIAN Hao, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network considering power grid operation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 9-14.
- [11] 李绍金, 周任军, 周胜瑜, 等. 电力系统环保经济负荷分配的模糊自修正粒子群算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 15-21.
LI Shaojin, ZHOU Renjun, ZHOU Shengyu, et al. Fuzzy self-correction particle swarm optimization of environmental economic load distribution in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 15-21.
- [12] CHIANG H D, JUMEAU R J. Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 2 solution algorithms and numerical results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3): 1568-1574.
- [13] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 一种混合智能算法在配电网网络重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 73-78.
LIU Zifa, GE Shaoyun, YU Yixin. A hybrid intelligent algorithm for loss minimum reconfiguration in distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 73-78.
- [14] 李晓明, 黄彦浩, 尹项根. 基于改良策略的配电网重构遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 49-54.
LI Xiaoming, HUANG Yanhao, YIN Xianggen. A genetic algorithm based on improvement strategy for power distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 49-54.
- [15] 邓佑满, 张伯明, 王洪璞. 配电网重构和电容器投切的综合优化算法[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(5): 5-9.
DENG Youman, ZHANG Bomong, WANG Hongpu. A comprehensive optimization algorithm for distribution network reconfiguration and capacitor switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(5): 5-9.
- [16] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 20-103.
- [17] 缪源诚, 程浩忠, 庄侃沁. 基于多回直流功率转移的受端电网节假日期间电压控制[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 45-51.
MIAO Yuancheng, CHENG Haozhong, ZHUANG Kanqin. Voltage control for receiving end power grid based on power transfer in multi infeed HVDC transmission system during holidays[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 45-51.
- [18] 宋勇超, 张勇军, 蔡泽祥, 等. 一种电力系统无功优化的新型混合优化算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 16-21.
SONG Yongchao, ZHANG Yongjun, CAI Zexiang, et al. A novel hybrid algorithm for reactive-power optimization of power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 16-21.
- [19] 张栋, 张刘春, 傅正才, 等. 配电网重构的快速支路交换算法[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 82-85.
ZHANG Dong, ZHANG Liuchun, FU Zhengcai, et al. A quick branch-exchange algorithm for reconfiguration of distribution networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 82-85.

收稿日期: 2015-04-16; 修回日期: 2015-06-18

作者简介:

王晓旭(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统无功优化、高压直流输电; Email: 953362470@qq.com

郝文斌(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护、变电所综合自动化及调度管理系统等。

(编辑 姜新丽)