

基于分层分区的配电网差异化节能规划方法研究

涂春鸣, 董泰青, 姜飞, 刘子维

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对配电网节能规划的差异化和系统化问题, 提出了一种考虑投资成本和节能效益的分层分区规划模型。上层规划在规定降损目标和总投资成本约束下, 实现改造线路的优选及其投资金额的分配。下层规划模型以线路总支出费用最小为目标, 满足各种运行约束和改造安装约束, 生成节能改造优化组合方案。采用了线损预测和前排回代潮流计算相结合的混合算法对所提模型进行求解。实际对比某市节能技术改造方案的制定结果, 验证了所提差异化节能规划方法的合理性和实用性。

关键词: 配电网; 差异化; 节能规划; 二层规划模型; 线损预测

Research on differentiated energy saving method of partitioned distribution networks based on bi-level planning

TU Chunming, DONG Taiqing, JIANG Fei, LIU Ziwei

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on differentiated and systematic characteristic of energy saving programming in distribution networks, bi-level programming model for partitioned distribution network is established with considering investment cost and energy saving benefit. The determinate loss reduction target and total investment costs are used as the upper programming constraints, which satisfy optimal selection of reconstructive lines and its investment allocation. The follower programming objective is minimization of total expenditures, and its constraints are operation restricts and reconstruction restricts, which let energy saving reconstruction collaborative optimal schemes meet above requirements. Hybrid algorithm which integrates line loss prediction and forward and backward substitution flow calculation method is proposed to solve the above model. The results of examples and energy saving technological reconstruction programs in certain city verify the rationality and practicability of the proposed differentiated planning method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377051).

Key words: distribution networks; differentiated; energy saving planning; bi-level programming model; line loss prediction

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0148-07

0 引言

电网企业作为能源优化管理的平台, 在国家节能减排工作中一直占据重要地位。在电力系统各个环节中, 配电网作为重损层, 节能潜力最大^[1]。采用差异化技术^[2]分析配电网节能方案, 对于节能工作高效开展具有重要意义。

研究表明, 针对同一线路不同的节能手段降损潜力不同^[3-4]; 同一种节能手段针对不同的线路

运行条件, 节能潜力依旧有较大差距^[5]。因此, 通过对不同节能技术手段^[6-7]在不同线路上节能潜力的对比分析, 有助于节能方案的高效实施。

目前, 配电网节能工作多利用考虑经济性的优化模型进行求解规划问题, 并取得了众多成果。文献[8]在导线改造和无功补偿之间实现了节能手段的协同优化, 降损空间得到充分挖掘。文献[9]从约束条件入手增加规划模型的适用范围, 提高灾害场景下电网可靠性, 减少差异化投资。然而以上研究主要针对单条线路, 未能从配电网的系统角度统一考虑不同节能技术手段交互作用下

的节能效益。

配电网差异化节能是不仅满足单条线路不同节能技术手段的优化组合问题, 又是满足节能经济性和运行条件约束下多条线路的配网多目标规划问题。分层规划^[10]可使此类多目标问题实现上下分层决策, 一定程度上实现不同目标性质的优化求解。文献[11]提出考虑经济安全性指标的双层分区多目标规划模型, 优化区域电网联络线的输电能力和资源分配。然而, 分层优化及其求解算法^[12-13]在配电网节能规划中的应用有待进一步研究。针对配电网支路多、网络结构复杂的特点, 分区制定节能规划可便于管理、提高工程实用性。文献[14]提出将电力系统进行分区优化, 可以大大加快优化计算的速度、增加算法实用性。文献[15]从地区电网分层分区管理模式提供了改造投资分配规划方法。

基于以上分析, 本文提出了一种改进型分层分区电网节能规划方法。首先, 在梳理节能指标的基础上利用系统灰预测方法进行线损预测, 根据节能潜力和电网规模情况实现分区资金分配, 将区域配网多目标规划问题分解为各子区配网的并行规划问题; 其次, 在子区配网中分别建立以投资成本和经济效益为目标的双层规划模型, 一则实现区域配电网节能改造投资优化分配, 二则完成单条线路节能方案协同优化; 最后, 将本文所提方法应用于某市中心城区配网节能规划方案制定, 对比结果证明了所提方法的优越性。

1 差异化节能规划模型

1.1 分层节能规划思路

基层电网企业配电网节能任务一般由上一级电网公司下达, 具体节能规划项目和投资金额方案按实地考察情况进行汇总, 最终经上级电网公司批复制定。本文所提节能规划目的是解决线路各改造方案的投资分配和效益分析问题。

针对待改造区域电网按照供电片区或者变电站进行解列分区为各子区配网, 然后根据子区配网节能指标情况, 利用线损预测方法完成节能潜力的分析, 实现改造资金的首次分配(阶段 A 到阶段 B), 即图 1 中的分区规划; 其次在待改造子区中以投资成本和节能效益为目标函数完成改造资金的二次分配(阶段 B 到阶段 C), 即上层规划;

以中压线路运行参数为基础, 采用前推回代潮流计算求取降损值, 得出各线路协同优化方案(阶段 C 到阶段 D), 即下层规划, 最终完成节能改造方案的优选和投资分配。

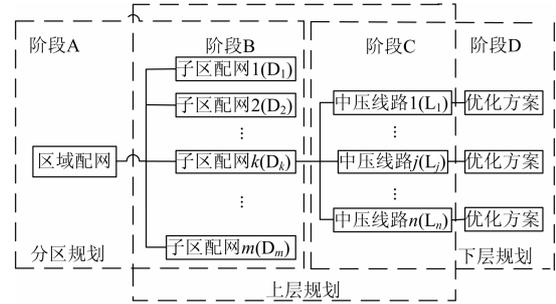


图 1 节能规划分层思路

Fig. 1 Hierarchical thinking of energy conservation planning

本文建立了考虑区域配网总体节能经济性和各线路各节能改造方案协同优化的规划模型。上层模型从系统角度实现投资金额的分配, 下层模型优化出单条线路的协同节能改造方案。

1.2 上层规划模型

配电网节能投资是按改造项目类型分类, 节能效益是按各线路分类, 依照此原则建立计及投资成本和节能效益的上层规划模型, 具体如下

$$\min F = \sum_{i \in \Omega_p} C_i(P_{gi}(t)) - \sum_{j \in \Omega_l} D_j(Q_{hj}(t)) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 \leq P_{gi}(t) \leq \overline{P}_{gi} \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \Omega_p} P_{gi}(t) \leq P_{\max} \quad (3)$$

$$\sum_{j \in \Omega_l} Q_{hj}(t) \geq Q_{\min} \quad (4)$$

式中: $P_{gi}(t)$ 为单项节能改造方案 i 的改造成本; \overline{P}_{gi} 为单项节能改造方案 i 的成本上限, 为保障电网规模和可靠性设定; $Q_{hj}(t)$ 为线路 j 降损值; $C_i(P_{gi}(t))$ 为节能方案投资成本函数; $D_j(Q_{hj}(t))$ 为节能效益函数; 式(2)~式(4)分别为单项改造方案资金约束, 总改造成本约束和总降损效果约束。

1.3 下层规划模型

针对单条线路建立下层规划模型, 以线路各节能改造方案组合作用下的支出费用最小为目标函数, 具体如下

$$\min f = \mu f_1 + f_2 \quad (5)$$

式中: 资金回收系数 $\mu = \beta(1 + \beta)^n / (1 + \beta)^n - 1$; β

表示贴现率,一般取值 8%; n 表示设备的经济使用年限,一般配电变压器取 15 年,配电线路取 20 年,配电变压器无功补偿装置取 10 年,需根据实际调研确定; f_1 为线路节能改造总投资,包含配电线路改造、配电变压器改造、无功补偿、经济运行等; f_2 为总网损费用。具体为

$$f_1 = \sum_{\Omega_j} [(c_L + c_T + c_{MD} + c_M) - c_{rA} + c_s] \quad (6)$$

$$f_2 = \sum_{\Omega_j} \Delta P_j \cdot a \cdot T \quad (7)$$

式中: Ω_j 为该线路中各支路集; c_L 、 c_T 、 c_{MD} 、 c_M 分别为线路投资、变压器投资、无功补偿设备投资和运行维护投资; c_{rA} 、 c_s 为设备残值和停电损失费; ΔP_j 为各支路的有功功率损耗; a 为单位电价; T 为各设备年等效运行小时数。

(1) 潮流方程约束

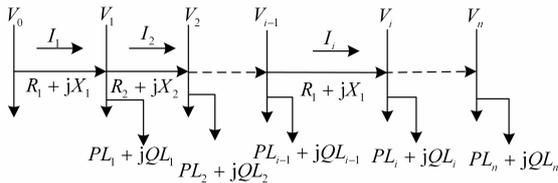


图 2 配电网结构图

Fig. 2 Structure chart of power distribution network

$$|V_i| = \sqrt{\left[\left(P_i R_i + Q_i X_i - \frac{1}{2} |V_{i-1}|^2 \right)^2 - (R_i^2 + X_i^2) (P_i^2 + Q_i^2) \right]^{\frac{1}{2}} - \left(P_i R_i + Q_i X_i - \frac{1}{2} |V_{i-1}|^2 \right)} \quad (8)$$

$$P_i^{(k)} = \sum_{j=i}^n PL_j^{(k)} + \sum_{j=i+1}^n \Delta P_j^{(k)} \quad (9)$$

$$Q_i^{(k)} = \sum_{j=i}^n QL_j^{(k)} + \sum_{j=i+1}^n \Delta Q_j^{(k)} \quad (10)$$

$$\Delta P_i^{(k)} = \frac{R_i \left((P_i^{(k)})^2 + (Q_i^{(k)})^2 \right)}{\left(|V_i|^{(k-1)} \right)^2} \quad (11)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = \frac{X_i \left((P_i^{(k)})^2 + (Q_i^{(k)})^2 \right)}{\left(|V_i|^{(k-1)} \right)^2} \quad (12)$$

$$I_i = \frac{V_{i-1} - V_i}{R_i + jX_i} \quad (13)$$

$$V_i = \frac{P_i + jQ_i}{I_i^*} \quad (14)$$

式中: 结合配电网结构图进行潮流方程说明; V_i 表示节点电压; R_i 、 X_i 表示线路的阻抗; P_i 、 Q_i

表示线路始端的有功潮流和无功潮流; PL_i 、 QL_i 表示节点的负荷功率; ΔP_i 、 ΔQ_i 表示线路的功率损耗; k 为迭代次数。

(2) 无功补偿设备约束

无功补偿考核指标为功率因数、电压偏差、供电半径,根据灵敏度选择补偿点和补偿容量,增设无功补偿设备。

$$c_{MD} = \sum_{i \in \Omega_N} (G_i + a_{mdi} Q_i) \quad (15)$$

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \quad (16)$$

$$Q_{imin} \leq Q_i \leq Q_{imax} \quad (17)$$

式中: Ω_N 为安装无功补偿设备的节点集合; G_i 为补偿装置安装费用; a_{mdi} 为单位容量投资成本; Q_i 为安装容量; V_{imin} 、 V_{imax} 为节点电压上下限; Q_{imin} 、 Q_{imax} 为无功补偿容量的上下限。

(3) 变压器改造约束

变压器改造的考核指标为负载率、变损率、运行年限、型号,改造方式包含更换配变、新增公变台区等。

$$\beta_{min} \leq \beta \leq \beta_{max} \quad (18)$$

式中: β_{min} 、 β_{max} 为变压器运行负载率上下限,使其运行在安全负载区间内。

(4) 线路改造约束

线路改造的考核指标为负载率、电压偏差、供电半径、线损率、运行年限、线路截面,改造方式包含更换线路、双电源更换改造、线路切改。

$$I_{imin} \leq I_i \leq I_{imax} \quad (19)$$

式中: I_{imax} 、 I_{imin} 为线路各支路电流上下限,防止电流超限。

(5) 优化运行技术约束

优化运行技术的考核指标为三相不平衡度、运行电压、负荷不平衡度,改造方式有负荷调整转移、负荷分相补偿、线路调压器调压等,此种情况根据实际情况增设约束条件,本文暂不做详细介绍。

2 模型求解

针对差异化节能规划模型,首先采用线损预测方法实现子区配网的筛选;其次将配电网节能方案优化问题利用下层模型转换为子区配网各线路的并行优化问题,得出各线路的节能改造组合方案;最后,采用上层模型求解实现规划方案的投资金额分配。

2.1 子区配网线损预测

系统灰预测方法将线损率和线损影响因子组成预测序列, 可以实现规划年的线损预测, 即将一个GM(1,1)模型的预测值代入下一个GM(1,N), 使其转化为GM(1,1), 逐步递推计算, 最后获得所有行为变量的预测值, 建立过程如下。

(1) 作出系统灰预测序列。按照时间序列(1,2,⋯,n)进行排序, 将线损率作为因变量 x_1 , 将各节能指标作为自变量 x_i ($i=2,3,4,\dots,n$), 给出预测序列, 并进行初始化。

(2) 构造嵌套模型。首先对 $x_N^{(0)}$ 作出GM(1,1)建模, 求出 $x_N^{(0)}(k)$; 然后对 $x_N^{(0)}$ 、 $x_{N-1}^{(0)}$ 作出GM(1,N)建模, 求出 $x_{N-1}^{(0)}(k)$; 依次进行建模求解, 最后对 $x_1^{(0)}$ 、 $x_2^{(0)}$ 、⋯、 $x_N^{(0)}$ 作GM(1,N)建模, 最终求出 $x_1^{(0)}(k)$ 、 $x_2^{(0)}(k)$ 、⋯、 $x_N^{(0)}(k)$ 。

(3) 求得预测值。依次代入可以求得当自变量发生变动时, 因变量 $\hat{x}_1^{(0)}(n+1)$ 、⋯、 $\hat{x}_1^{(0)}(n+\xi)$ 的预测值(ξ 为预测次数)。

将各子区配网历年的线损率和静态节能指标形成判断矩阵, 采用系统灰预测方法实现分区线损率预测, 根据节能潜力和子区规模进行各子区的投资分配。

2.2 节能改造组合方案优化

针对下层模型采用前推回代法进行参数计算, 算法的具体步骤如下。

(1) 根据广度优先, 结合配网单线图, 对线路节点、支路进行编号, 便于数据录入和管理。

(2) 输入电网数据。包括馈线首端电压 V_0 , 各支路的线路电阻 R_i 、电抗 X_i , 典型负荷日最大潮流下各节点负荷功率 PL_i, QL_i ($i=1,2,\dots,n$), 即变压器一二侧功率情况;

(3) 设置迭代次数 $k=0$, 选取迭代精度 ε 。令所有的支路损耗为0, 即 $LP_i^k=0$ 、 $LQ_i^k=0$; 通过式(9)、式(10)计算各节点流过的功率 P_i^k 、 Q_i^k ; 通过式(8)从馈线端节点计算各点的电压幅值 $|V_i^k|$, 进行前推计算;

(4) 通过式(11)、式(12)计算各支路的损耗 LP_i^{k+1} 、 LQ_i^{k+1} ; 通过式(13)、式(14)迭代计算支路电流和节点电压, 并计算 $\Delta LP_i = LP_i^{k+1} - LP_i^k$, $\Delta LQ_i = LQ_i^{k+1} - LQ_i^k$ 。

(5) 进行收敛判断。当 $\max|\Delta LP_i| < \varepsilon$ 且 $\max|\Delta LQ_i| < \varepsilon$ 时, 停止计算输出结果; 否则继续下一

步; 进一步判断是否到达最大迭代次数, 如果达到则停止计算, 输出结果; 否则迭代次数加一, 即 $k=k+1$, 从步骤(3)循环执行, 直到满足条件。

经过上述条件约束, 用于求解单条线路无功补偿、变压器改造、线路改造和优化运行配置的组合优化方案问题。

模型求解框架示意图如图3所示。本文所提出的差异化节能规划模型分为三部分求解, 其中第一部分优化改造样本完成分区投资分配, 增加规划工作目标性, 第二部分的下层规划嵌套在上层规划中进行整体寻优, 最终完成改造线路及改造方案的优选。

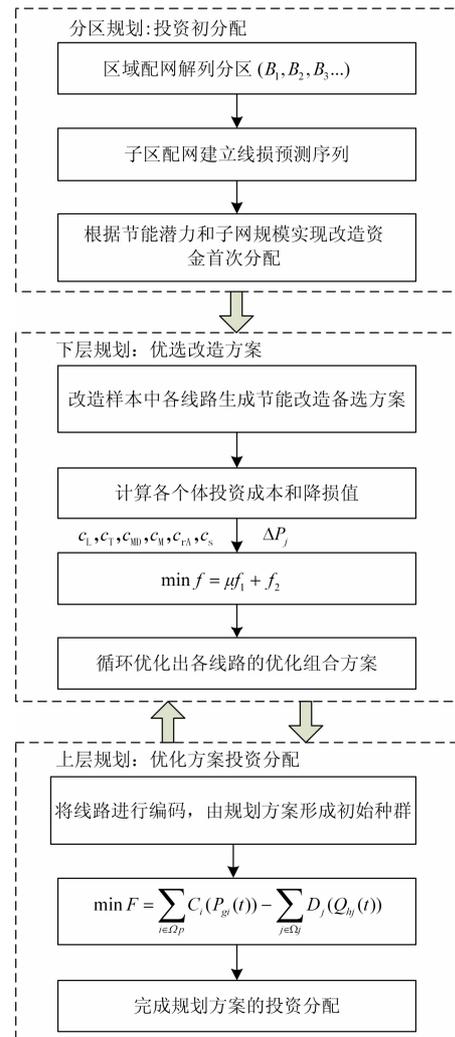


图3 规划模型求解框架图

Fig. 3 Framework of programming model computation

3 算例分析

以江西电网某市的局域配网为实施对象,

制定节能改造规划。将该局域配网按变电站分为 B₁、B₂ 共 2 个分区，改造工程预算的资金约束为 1000 万元，降低线损的节能目标为 2%。综合子区配网线损预测和电网规模情况，完成各分区及单项改造方案资金分布约束，如表 1 所示。

表 1 子区配网和单项改造方案资金分布

Table 1 Fund distribution of subarea and single reconstruction scheme

| 子区配网 | 分区改造资金/万元 | 改造方案 | 单项投资上限/万元 |
|----------------|-----------|----------------|-----------|
| B ₁ | 615 | P ₁ | 685 |
| B ₂ | 385 | P ₂ | 325 |
| | | P ₃ | 350 |
| | | P ₄ | 185 |

选取子区配网的 7 条 10 kV 馈线进行规划说明。首先针对线路 1 (L₁) 代入下层规划模型求得该线路的协同节能规划方案。该线路的拓扑结构如图 4 所示，在进行节能改造规划时考虑到规划期期间的负荷增长。根据各线路的大负荷方式、一般负荷方式、小负荷方式下的月潮流负荷情况，

将运行时间全部折算到较大负荷运行方式下的运行时间，得出负荷等效运行小时数，用于计算年网损费用，其中，年网损费用=[(线路损耗+配变总铜损)×年等效运行小时数+配变铁损×8760]×单位电价，单位电价按 0.6 元/(kWh) 计算。

其中将各单项改造方案即导线更换(P₁)、变压器改造(P₂)、无功补偿(P₃)和优化电压(P₄)和利用下层模型协调以上单项方案得到的组合优化方案(P₅)对比，进行同一线路不同方案降损效果分析，如表 2 所示。

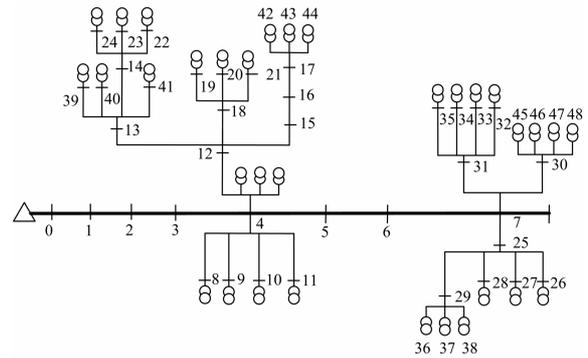


图 4 配电线路拓扑结构图

Fig. 4 Topological structure of distribution lines

表 2 同一线路不同方案降损效果

Table 2 Energy saving effects of different schemes in the same line

| 节能比较项目 | 改造前 | 方案一(P ₁) | 方案二(P ₂) | 方案三(P ₃) | 方案四(P ₄) | 方案五(P ₅) |
|------------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 总供电有功/kW | 3755 | 3729 | 3730 | 3720 | 3744 | 3708 |
| 总供电无功/kvar | 1763 | 1728 | 1754 | 1453 | 1735 | 1385 |
| 总有功损耗/kW | 176.388 | 150.45 | 163.33 | 141.74 | 165.02 | 133.28 |
| 线路总有功损耗/kW | 116.52 | 91.28 | 108.84 | 85.11 | 107.56 | 74.15 |
| 配变总铜损/kW | 34.19 | 36.33 | 32.23 | 30.95 | 31.78 | 33.45 |
| 配变总铁损/kW | 25.68 | 25.68 | 22.26 | 25.68 | 25.68 | 25.68 |
| 功率因数 | 0.905 | 0.907 | 0.905 | 0.931 | 0.907 | 0.937 |
| 线损率/% | 4.69 | 4.03 | 4.38 | 3.81 | 4.41 | 3.59 |
| 线损降幅/% | --- | 14.1 | 6.6 | 18.8 | 6.0 | 23.45 |
| 网损费用/万元 | 67.75 | 59.44 | 62.48 | 55.23 | 63.66 | 52.23 |

然后依次将线路 L₂~L₇ 代入下层模型进行优化，分别得出相应的协同优化方案，整体代入上层规划模型循环优化，最终实现综合节能改造投资方案求解。

表 3 所示为五种节能规划方案的投资分配及降损效果。其中资金闲置率用以体现改造成本约束，网损降幅用以体现节能目标约束，投资回收

期作为两者的直观展示。C₁~C₇ 分别表示针对线路 L₁~L₇ 的投资成本，P₁~P₄ 为针对全网的单项改造方案，每项方案投资均按投资上限进行分配，P₅ 为利用本文分层分区规划模型求得的节能改造投资方案。

由表 3 各方案结果显示，方案 P₅ 资金闲置率仅 5.3%，为各方案中最低；网损降幅达 4.58%，

大大超过了节能降损 2% 的目标, 达到了节能潜力的充分挖掘; 投资回收期预估为 4.83 年, 满足投资要求。同时, 方案 P₁ 和 P₃ 也满足了降损目标, 有一定的经济性, 当投资金额较少时可作为

分多阶段投资的单项方案考虑。综上, 本文提出的差异化节能规划方法用于基层电网公司区域配电网规划工作中, 不仅能够深层挖掘节能潜力、优化线损指标, 而且能为节能改造方案提供指向性。

表 3 差异化规划投资方案及降损效果对比

Table 3 Comparison of investment schemes and its energy saving effects of differentiated planning

| 方案 | B ₁ 分区投资/万元 | | | B ₂ 分区投资/万元 | | | | 资金闲置率/% | 网损降幅/% | 年节省电量/MWh | 投资回收期/年 |
|----------------|------------------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|---------|--------|-----------|---------|
| | C ₁ | C ₂ | C ₃ | C ₄ | C ₅ | C ₆ | C ₇ | | | | |
| P ₁ | | | | 685 | | | | 31.5 | 2.83 | 2020.5 | 5.65 |
| P ₂ | | | | 325 | | | | 67.5 | 1.17 | 835.3 | 6.48 |
| P ₃ | | | | 350 | | | | 65 | 2.42 | 1727.8 | 3.38 |
| P ₄ | | | | 185 | | | | 81.5 | 0.84 | 600 | 5.14 |
| P ₅ | 76 | 104 | 185 | 232 | 262 | 50 | 38 | 5.3 | 4.58 | 3270 | 4.83 |

4 结论

本文提出配电网分层分区的差异化节能规划方法, 用于对投资成本和节能效益进行协调规划, 在整个局域配网中实现定位目标改造线路和制定具体规划方案的目的。一方面, 分区可以将系统的电网规划问题分解为并行优化问题, 增加规划工作效率。另一方面, 建立的分层规划模型采用上、下层目标函数, 得到的规划方案相互反馈, 实现整体寻优。其中协同优化方案的制定和投资金额的分配都体现了规划中的差异化意义, 实现了降损效果和投资成本的综合最优。算例表明, 本节能规划方法有助于区域配电网的节能规划工作的开展, 提高节能改造投资决策水平, 具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 余卫国, 熊幼京, 周新风, 等. 电力网技术线损分析及降损对策[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 54-57.
YU Weiguo, XIONG Youjing, ZHOU Xinfeng, et al. Analysis on technical line losses of power power grids and countermeasures to reduce line losses[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 54-57.
- [2] 宋春丽, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于差异化全寿命周期成本的电网规划经济性评估方法[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1849-1855.
SONG Chunli, LIU Dichen, WU Jun, et al. An economic assessment of power system planning based on differentiated life cycle cost[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1849-1855.
- [3] 李鹏, 张勇军, 谭伟聪, 等. 长安配网节能降耗潜力评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 97-100.
LI Peng, ZHANG Yongjun, TAN Weicong, et al. Study on energy saving potential assessment for Changan distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 97-100.
- [4] ZHAO Zilan, LIU Wenyong, XU Peng, et al. Comprehensive energy-saving potential evaluation of distribution network based on analytical hierarchy process[C] // IEEE/PES Power and Energy Engineering Conference: Asia Pacific, 2013: 1-5.
- [5] 曾建敏, 白先红, 张勇军, 等. 多目标配电网综合节能潜力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 100-105.
ZENG Jianmin, BAI Xianhong, ZHANG Yongjun, et al. Multi-objective comprehensive energy saving potential evaluation of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 100-105.
- [6] 张晓虎, 罗隆福, 刘洁. 基于负荷实测的配电网无功优化及其降损节能效益分析[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 226-231.
ZHANG Xiaohu, LUO Longfu, LIU Jie. Load measurement based reactive power optimization for distribution network and analysis on its effects in loss reduction and energy conservation[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 226-231.
- [7] 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 Zechun, ZHONG Mingming, WANGJiaxian, 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.
- [8] 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): 60-64.
ZHANG Yongjun, CHEN Chao, LIAO Minchuan. Research on optimal model for energy saving reconstruction of distribution networks[J]. Power System

- Protection and Control, 2010, 38(15): 60-64.
- [9] 徐国新, 夏清, 康重庆. 抗灾型电网规划模式与模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 17-21.
XU Guoxin, XIA Qing, KANG Chongqing. Research on mode and model of anti-disaster transmission network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 17-21.
- [10] 范宏, 程浩忠. 考虑经济性可靠性的输电网二层规划模型及混合算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 1-7.
FAN Hong, CHENG Haozhong. Transmission network bi-level programming model considering economy and reliability and hybrid algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 1-7.
- [11] 屈刚, 程浩忠, 马泽良, 等. 考虑联络线传输功率的双层分区多目标输电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 40-46.
QU Gang, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. Bi-level multi-objective transmission planning with consideration of tie-line power transfer capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 40-46.
- [12] 许旭锋, 黄民翔, 王婷婷, 等. 基于模糊机会约束二层规划的配电网检修计划优化[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 157-163.
XU Xufeng, HUANG Minxiang, WANG Tingting, et al. Optimization of distribution network maintenance scheduling based on fuzzy chance-constrained bi-level programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 157-163.
- [13] 盛四清, 王浩. 用于配电网规划的改进遗传算法[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 69-72.
SHENG Siqing, WANG Hao. An improved genetic algorithm for distribution network planning[J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 69-72.
- [14] 程新功, 厉吉文, 曹立霞, 等. 基于电网分区的多目标分布式并行无功优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 109-113.
CHENG Xingong, LI Jiwen, CAO Lixia, et al. Multi-objective distributed parallel reactive power optimization based on subarea division of the power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 109-113.
- [15] 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 Yongjun, 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.
- [16] CHARLES D L, H AFEEZULLA K I, RAVICH ANDRAN S. Distribution network reconfiguration for loss reduction using ant colony system algorithm[C] // Proceedings of the 2005 Annual IEEE India Conference (INDICON'05), December 11-13, 2005, Chennai, India: 619-622.
- [17] 章文俊, 程浩忠, 王一, 等. 基于树形结构编码单亲遗传算法的配电网优化规划[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 154-160.
ZHANG Wenjun, CHENG Zhonghao, WANG Yi, et al. Distribution network optimal planning based on tree structure encoding partheno-genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 154-160.

收稿日期: 2014-09-30; 修回日期: 2014-11-27

作者简介:

涂春鸣(1976-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用, 电力系统先进节能技术及应用;

董泰青(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网电气节能; E-mail: dong.taiqing@163.com

姜飞(1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统先进节能技术及应用。

(编辑 姜新丽)