

DOI: 10.7667/PSPC162041

计及最大供电能力和最小联络建设费用的 主变联络结构优化

肖白¹, 王思莹¹, 谷禹²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 北京电力科学研究院, 北京 100075)

摘要: 针对现有面向最大供电能力提升的主变联络结构优化方法仅基于主变互联关系对联络通道进行规划, 未对通道内馈线联络关系展开讨论的不足, 提出一种基于帕累托最优的主变联络结构优化方法。首先, 为提高配电网区域最大供电能力、降低考虑地理因素的联络建设费用, 将馈线互联矩阵作为决策变量, 建立变电站主变间联络结构的多目标优化模型。其次, 采用 NSGA-II 算法对模型进行求解, 将所得帕累托前沿中的个体作为备选方案, 利用变异系数法和 TOPSIS 法对其进行排序, 选取最佳联络结构优化方案。所得优化结果不仅包含各主变间联络通道建设结果, 同时明确地表明通道内联络支路的数量及位置。工程实例分析结果表明该方法是正确和有效的。

关键词: 配电网; 最大供电能力; 馈线联络; 帕累托最优; NSGA-II 算法

Optimization for contact structure among main transformers between substations considering total supply capacity and minimum contact construction cost

XIAO Bai¹, WANG Siying¹, GU Yu²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: The current methods to optimize the contact structure among main transformer stations in distribution network based on power supply capability, only considers the interconnections of contact corridors among main transformers, but ignores the interconnections among feeders. In view of the shortages of existing methods, a method based on the Pareto optimality of the main transformers contact structure optimization is proposed. First, in order to improve total supply capacity of the distribution area and reduce construction cost which takes geographic factors into account, a multi-objective optimization model based on the feeder interconnection matrix for the contact structure of main transformers between substations is built. Furthermore, the NSGA-II algorithm is used to solve the model and the obtained individuals of Pareto frontier are taken as alternative options. To sort the alternative options, the variation coefficient method and the TOPSIS method are used and the optimal contact structure planning is screened out. The resulting optimization not only contains the contact corridors between the main transformers, but also shows the composition of the number and location of contact branches clearly. The validity and effectiveness of the proposed method is verified by the analysis of a practical example.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177009).

Key words: distribution network; total supply capacity; interconnections among feeders; Pareto optimality; NSGA-II

0 引言

随着城市经济的高速发展, 各级各类的用户负荷需求不断增加, 与此同时, 城市用地也变得日益紧张, 这使得变电站站址和电力通道走廊的选择十

分困难, 如果按照传统技术原则对高压变电站及中压配电网进行规划, 将很难在满足负荷需求的前提下降低建设规模、减少土地资源消耗^[1]。而联络线作为供电恢复和负荷转供的通道^[2], 可以利用较少的资源, 通过加大变电站站间负荷转供能力, 提高设备利用率, 满足负荷需求。主变联络结构优化是配电网运行方式选择和网架规划的重要内容^[3]。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51177009)

目前, 配电网最大供电能力(Total Supply Capability, TSC)^[4]开始越来越多地应用于指导配电网规划中, 文献[5-6]提出通过优化配电网结构及运行方式提升TSC满足新增负荷; 文献[1]以加权Voronoi图和基于主变互联及N-1准则的配电网供电能力分析方法为基础, 提出了主变站间联络结构优化方法; 文献[7]以提高区域供电能力、简化联络通道为基本立足点, 建立了主变站间联络结构的多目标优化模型; 文献[8]计算单位供电能力费用, 从单位效益考虑选取联络结构最优方案; 文献[9]利用加权联络均衡度的概念确定了最优联络位置和最优联络规模, 在此基础上建立最优馈线联络建设次序模型; 文献[2,10]提出了基于TSC的配电网联络有效性定义及联络简化方法; 文献[11-12]提出了一种新的基于TSC的配电网联络线瓶颈分析与改造方法。但上述这些方法仅就主变间联络通道及联络规模的优化展开研究, 而联络通道作为一个物理上的概念, 它是由主变间联络支路构成的集合, 并不包括具体的出线数目^[8], 所得规划结果无法表明通道内联络支路的数量及位置的构成, 不能对具体馈线间的联络关系进行指导, 同时, 在进行联络结构优化建模时, 未考虑地理因素的影响。

针对上述问题, 本文讨论了基于馈线互联关系的配电网TSC计算原理, 提出了基于帕累托最优的主变联络结构优化方法, 建立了综合考虑TSC和联络建设费用的配电网多目标主变联络结构优化模型, 利用NSGA-II算法对模型进行求解, 同时, 结合变异系数法和加权TOPSIS实现对帕累托前沿中个体的最优决策。本文提出的主变联络结构优化方法同传统的仅考虑联络通道的方法相比优化结果更加精细, 通过实际配电网验证了该模型的正确性和有效性。

1 主变联络结构优化模型的建立

1.1 基于帕累托最优的多目标优化

一般情况下多目标优化问题中的多个目标函数之间是无法比较且相互之间经常冲突, 一个目标函数的改进往往以牺牲另外一个目标函数的值为代价, 因此可以看出多目标优化问题往往包含多个解, 并且各个解之间无法比较其优劣性, 这些解统称为帕累托解集, 帕累托最优表征了问题解的各个子目标不能够再同时继续优化的状态, 一般的多目标优化问题可表述为^[12-17]

$$\begin{aligned} \min \mathbf{F}(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T \\ \text{s.t. } x &\in \Omega \end{aligned} \quad (1)$$

式中: x 为优化问题的解向量; Ω 为可行解集合; $\mathbf{F}(x)$ 为具有 n 个分量的目标向量; $f_n(x)$ 为优化子目标。对于极小化的多目标优化问题, 设 x^l 和 x^k 均为可行解向量, 若

$$\begin{cases} f_i(x^l) \leq f_i(x^k), & \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \\ f_i(x^l) < f_i(x^k), & \exists i \in \{1, 2, \dots, n\} \end{cases} \quad (2)$$

则称 x^l 支配 x^k , 记为 $x^l \prec x^k$, 若在可行解集合中不存在支配 x^l 的解, 则称 x^l 为多目标优化问题的一个非支配解(非劣解), 所有非支配解形成的区域称为帕累托前沿。

1.2 基于馈线互联关系的配电网TSC模型

根据文献[18-19]可知基于馈线互联关系的TSC模型如式(3)。

$$\begin{aligned} \max A_{\text{TSC}} &= \sum_{i=1}^N P_i \\ \text{s.t. } &\begin{cases} P_{Fm} = \sum_n P_{\text{uf-mn}} \\ P_i = \sum_{Fm \in T_i} P_{Fm} & \forall i = 1, 2, \dots, N \\ P_{\text{trt-ij}} = \sum_{Fm \in T_i, Fn \in T_j} L_{mn}^f P_{Fm} \\ L_{mn}^f P_{\text{uf-mn}} + P_{Fn} \leq R_{Fn} & \forall m, n = 1, 2, \dots, M \\ L_{ij}^l P_{\text{trt-ij}} + P_j \leq R_j' & \forall i, j = 1, 2, \dots, N \\ P_D \leq \sum_{i \in Z} P_i \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: A_{TSC} 为计算所得配电网最大供电能力; P_{Fm} 为馈线 m 的负荷; $P_{\text{uf-mn}}$ 为馈线 m 发生 N-1 故障时转带给馈线 n 的负荷量; P_i 为主变 i 所带负载; $P_{\text{trt-ij}}$ 为主变 i 发生 N-1 故障时转带给主变 j 的负荷量; N 为主变数量; M 为馈线数量; P_{Fn} 为馈线 n 的容量; $Fm \in T_i$ 表示馈线 m 出自主变 i 的对应母线; L_{mn}^f 表示第 m 条馈线与第 n 条馈线间的联络关系, 当馈线间存在联络关系时, $L_{mn}^f = 1$, 否则 $L_{mn}^f = 0$, 其矩阵形式为 \mathbf{L}^f ; L_{ij}^l 物理意义与 L_{mn}^f 相似, 表示主变 i 和主变 j 间的联络关系, 其矩阵形式为 \mathbf{L}^l ; R_j' 为修正后主变 j 的容量, $R_j' = R_j - P_{F_{j_{si}}}$, R_j 为主变 j 的容量, $P_{F_{j_{si}}}$ 为主变 j 上单辐射线负荷; P_D 为某个重载区负荷的下限; Z 为重载区所有主变集合^[4]。

1.3 考虑地理因素的联络建设费用模型

考虑到实际工程中, 铺设线路时穿越高速公路需要通过地下隧道排管, 穿越河流时需要与桥梁综合建设, 这些不利于穿越布线的地理因素将额外增加线路铺设费用^[20], 所以这里建立考虑地理信息的主变联络建设费用模型, 见式(4)。

$$\min C_{\text{link}} = \sum_{i,j=1}^N \sum_{\substack{F_m \in I_i \\ F_n \in I_j}} (W_{mn} + Z_{mn}) \times L'_{mn} \times \frac{r_0(r_0+1)^p}{(1+r_0)^p - 1} \quad (4)$$

$$W_{mn} = \alpha \times c_{mn}(R_{Fmn}) \times D_{mn} \quad (5)$$

式中: R_{Fmn} 为馈线 m 和馈线 n 间新建联络线容量, $R_{Fmn} = \max\{R_{Fm}, R_{Fn}\}$; α 为曲折系数, 本文取 1.5; $c_{mn}(R_{Fmn})$ 为 R_{Fmn} 容量下联络线单位长度造价; D_{mn} 为馈线 m 和馈线 n 间的距离, 根据潮流方向, 定义主馈线的首末端点, 以主馈线末端节点间距离作为两馈线间距离; W_{mn} 为馈线 m 和馈线 n 间不考虑地理因素时新建联络线费用; Z_{mn} 为馈线 m 和馈线 n 之间铺设线路时穿越不利地形所需要的额外建设费用, 障碍越多, Z_{mn} 越大, 当馈线 m 和馈线 n 之间无不利地形时, $Z_{mn}=0$; r_0 为贴现率; p 为线路的折旧年限。由于联络线只在故障时投入使用, 其年运行费用很小, 故仅考虑联络线建设费用。

1.4 多目标主变联络结构优化模型

由于主变间联络是依靠馈线间联络实现的, 故在明确馈线互联关系后, 主变互联关系也随之确定, 即主变互联矩阵 L' 可根据馈线互联矩阵 L^f 得到。本文以 L^f 作为决策变量, 建立了同时优化多个目标的主变联络结构优化模型, 综合考虑了 TSC 和计及地理因素的联络建设费用, 见式(6)。

$$\min F(L^f) = [f_1(L^f), f_2(L^f)]^T \quad (6)$$

式中: $f_1(L^f) = 1/A_{\text{TSC}}$; $f_2(L^f) = C_{\text{Link}}$ 。

2 主变联络结构优化模型的求解

2.1 NSGA-II 算法

在对多目标优化问题进行求解时, 传统方法常通过引入加权因子等方式平衡各指标间相对重要性及量纲的差异, 将多目标优化问题转化为单目标优化问题, 但由于所得结果很大程度上依赖于权重的合理选取, 在实际运用中效果并不理想。而基于遗传算法的多目标寻优策略无需考虑权重就能够得到具有代表性的非劣解, 避免陷入局部最优解, 为决策者提供尽可能多的备选方案, 目前得到了广泛的应用^[21]。

带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II), 通过引入快速非支配排序算法降低计算复杂度; 运用精英策略防止最佳个体的丢失, 提高算法鲁棒性; 采用拥挤度和拥挤度比较算子, 保证形成均匀分布的帕累托前沿, 维持种群多样性^[22]。NSGA-II 算法的基本思想为: 首先, 对随机模拟产生的规模为 N 的初始化种群 P_0 进行快速非支配排序, 并通过选择、交叉、变异算子产生同样规模的

子代种群 Q_0 , 将两种群合并形成规模为 $2N$ 的种群 R_0 。其次, 对新形成的种群 $R_t(t=0, 1, 2, \dots)$ 进行快速非支配排序后对每个非支配层中的个体进行拥挤度计算, 根据所得非支配关系以及个体的拥挤度选取合适的个体形成新的父代种群 P_{t+1} 。最后通过遗传算法操作产生新的子代种群 Q_{t+1} , 将 P_{t+1} 与 Q_{t+1} 合并形成新的种群 R_{t+1} , 重复以上操作, 直到满足结束条件为止^[23-25]。

2.2 求解主变联络结构优化模型的 NSGA-II 算法

由于联络结构优化是一个大规模组合优化问题, 故本文采用 NSGA-II 算法对模型进行求解, 为方便讨论, 本文仅以单联络接线模型为例说明(可推广至多联络接线模型), 具体步骤如下。

1) 编码: 对馈线联络矩阵进行编码, 由于单联络接线模式各馈线间两两对应, 故馈线联络矩阵对称且每行每列有且仅有一个元素为 1。据此, 采用实数编码, 染色体上基因的数目等于馈线总数, 一条染色体代表一个规划方案, 每个基因代表与该条馈线互联且馈线的编号互不相同。如馈线 m 与馈线 n 联络, 则染色体上第 m 个基因编码为 n 。

2) 种群初始化: 按所设计的遗传编码方式随机产生初始种群, 每一个个体代表一种联络结构优化方案, 调用 A_{TSC} 计算程序, 根据式(3)和式(4)计算出各目标函数的适应值。

3) 遗传操作: 每个种群采用 NSGA-II 算法进行遗传操作, 在进行非支配排序后, 根据个体的非支配序和拥挤度按照轮赛制选择算子进行选择运算, 对所选个体进行交叉重组和变异操作, 交叉概率设为 0.7, 变异概率设为 0.01, 形成新的子代种群, 即新的规划方案。

4) 校验和精英策略: 对遗传操作产生的新子代种群解码进行校验, 判断其联络结构是否符合约束条件, 淘汰未校验通过的方案, 利用精英策略选择父代种群和校验后子代种群合集的个体形成新的父代种群。

5) 迭代次数加 1, 返回第 3)步, 直至达到最大迭代次数为止, 种群中所有非支配解即构成帕累托最优解集。最大迭代次数设为 100。

2.3 基于变异系数法的指标权重确定

运用 NSGA-II 算法求解主变联络结构优化模型后, 能得到包含多个非支配解的帕累托前沿, 每一个非支配解对应一个联络结构备选规划方案, 为得到唯一的最优规划方案, 可建立多个对方案进行评价的指标, 并利用变异系数法确定它们的权重。

变异系数法作为一种客观赋权方法, 直接利用各项指标所包含的信息计算得到各指标权重, 相比

主观赋权法, 如 Delphi 法和 AHP 法等, 可以避免由于人的主观因素可能对评价结果造成的不良影响, 且计算步骤简单, 易于实现。

假设通过 NSGA-II 算法求解后在帕累托前沿中得到 m 个备选规划方案, 建立 n 个对规划方案进行评价的指标, 利用变异系数法确定权重时, 将每个备选规划方案的评价指标值用向量表示, 记为 $\mathbf{X}_i=(x_{i1} \ x_{i2} \ \cdots \ x_{ij} \ \cdots \ x_{in})^T, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$, 从而得到原始的评价矩阵 $\mathbf{X}_i=(x_{ij})_{m \times n}$, 对原始评价矩阵进行规范化处理, 消除量纲影响^[26], 本文采用均值化处理方法来实现规范化, 见式(7)。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (7)$$

用式(8)计算指标的变异系数。

$$\delta_j = \frac{d_j}{\bar{u}_j} \quad (8)$$

式中: δ_j 为第 j 个指标的变异系数; $d_j =$

$$\sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x'_{ij} - \bar{u}_j)^2},$$
 为第 j 个指标的均方差;

$$\bar{u}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x'_{ij},$$
 为第 j 个指标的均值。

最后, 用式(9)计算出各指标的权重 w_j 。

$$w_j = \delta_j / \sum_{j=1}^n \delta_j \quad (9)$$

2.4 加权 TOPSIS 法选取最优方案

根据变异系数法确定出指标权重后, 利用加权逼近理想点排序法(Technique for Order by Similarity to an Idea Solution, TOPSIS)对备选方案进行排序, 就可以得到最优联络结构规划方案。

在实现加权 TOPSIS 法对备选方案进行排序的过程中, 首先, 需将原始数据建立初始矩阵, 对指标进行同趋势化处理。由于 A_{TSC} 为高优指标, 联络建设费用为低优指标, 为使两指标方向一致, 故使用倒数法对 A_{TSC} 指标进行处理, 得到同趋势化后的指标矩阵 $(x_{ij})_{m \times n}$ 。其次, 对 $(x_{ij})_{m \times n}$ 进行归一化处理, 建立归一化矩阵 $(z_{ij})_{m \times n}$, 并确定有限方案中的最优方案对应的 Z^+ 和最劣方案对应的 Z^- 。最后, 计算各评价对象与最优方案和最劣方案间的加权欧式距离 D_i^+ 和 D_i^- 及各评价对象与最优方案的接近程度 C_i , 根据 C_i 的大小对非劣解集进行排序, 得到最优方案^[27-28]。上述计算中, 各变量的具体求解方法见式(10)~式(15)。

$$z_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2} \quad (10)$$

$$Z^+ = (z_1^+, \dots, z_j^+, \dots, z_n^+) \quad (11)$$

$$Z^- = (z_1^-, \dots, z_j^-, \dots, z_n^-) \quad (12)$$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [w_j (z_{ij} - z_j^+)]^2} \quad (13)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [w_j (z_{ij} - z_j^-)]^2} \quad (14)$$

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (15)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n; z_j^+ = \min_{1 \leq i \leq m} \{z_{ij}\}; z_j^- = \max_{1 \leq i \leq m} \{z_{ij}\}; w_j$ 为各指标权重; $C_i \in [0, 1]$, C_i 值越大, 规划方案评价越优。

2.5 优化模型的求解方法流程

主变联络结构优化模型的求解流程见图 1。

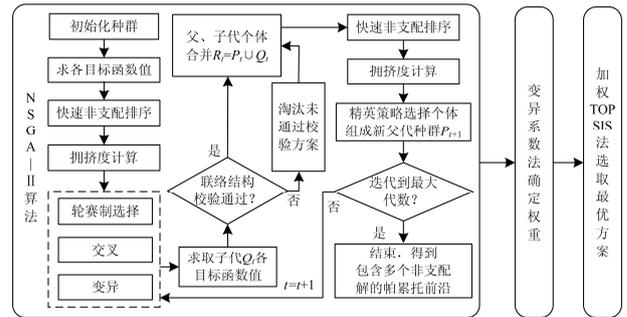


图 1 求解方法流程图

Fig. 1 Flow chart of the solving method

3 工程实例

3.1 实例背景

使用基于帕累托最优的主变联络优化方法对东北某城市经济技术开发区的部分主变进行联络结构规划。图 2 中阴影部分即为进行联络结构规划区域, 共有 3 座 66/10 kV 变电站, 6 台主变, 每台主变容量均为 40 MVA, 中压配电网主干线选取三相统包铝芯交联聚乙烯 300 mm²(YJLV-300)双根运行, 单位长度建设费用为 11 万元/km, 其极限传输容量为 10.65 MVA, 折旧年限为 20 年, 贴现率为 0.08。跨越一次不利地形的额外布线费取 5 万元。未进行站间联络时, 该部分配电网 A_{TSC} 为 120 MVA, 现有辐射网结构如图 3 所示。

这里将 A_{TSC} 和 C_{Link} 作为评价每个备选规划方案的指标, 指标向量变为 $\mathbf{X}_i=(x_{i1}, x_{i2})^T=(A_{TSC}, C_{Link})^T$ 。

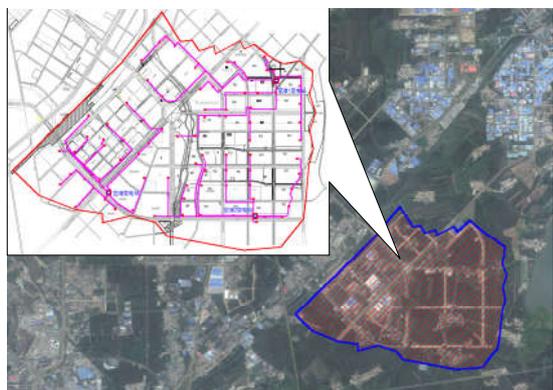


图2 规划区域示意图

Fig. 2 Regional satellite images

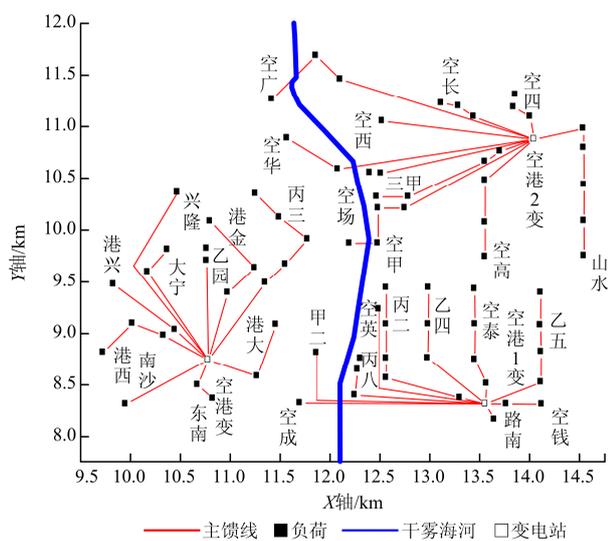
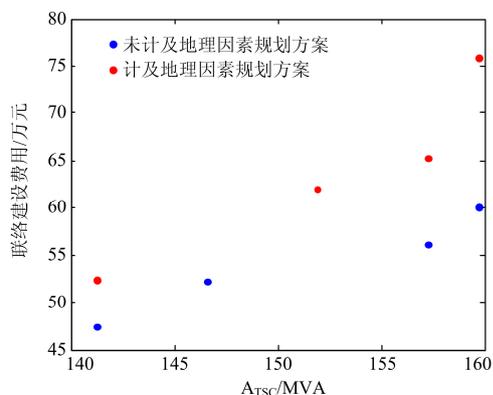


图3 现有辐射网结构图

Fig. 3 Current radial distribution networks

3.2 规划结果

为求解该地区配电网联络结构规划结果, 首先利用 NSGA-II 算法对式(6)进行计算, 各步骤实现过程如 2.2 节所述, 可得如图 4 所示的该地区配电网

图4 A_{TSC} -联络建设费用帕累托前沿Fig. 4 Pareto front of A_{TSC} and contact construction cost

A_{TSC} 与联络建设费用之间的帕累托前沿, 前沿中包括 4 个规划方案, 可将其作为备选方案, 方便后文利用加权 TOPSIS 选取最优方案。

图 4 中未计及地理因素影响的 4 个规划方案所对应的 A_{TSC} 、 C_{Link} 和 C 见表 1。

表 1 未计及地理因素的帕累托前沿

Table 1 Pareto front without taking geographical factors into account

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
A_{TSC}/MVA	141.300	146.625	157.275	159.75
$C_{Link}/\text{万元}$	47.368	52.227	56.174	60.006
C	0.507	0.542	0.512	0.361
$C'_{Link}/\text{万元}$	52.368	67.227	71.174	85.006
C'	0.503	0.518	0.548	0.315

表 1 中 A_{TSC} 为配电网计算所得 TSC, C_{Link} 为联络建设费用, C 为各方案与理想方案接近程度。根据变异系数法, 结合 A_{TSC} 和 C_{Link} 的数值, 确定出 A_{TSC} 和 C_{Link} 的权重分别为 0.517 和 0.483, 为得到唯一的最优规划方案, 再利用加权 TOPSIS 法求得表 1 中各方案与理想方案的接近程度 C , 因 C 为高优指标, 故方案 3 为最优, 其中各主变间馈线联络结构见图 5。

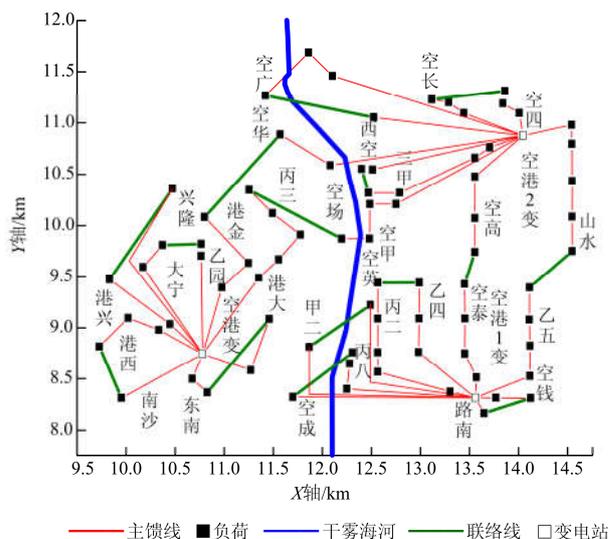


图5 未计及地理因素的主变联络结构理论规划结果

Fig. 5 Result of main transformers stations' contact structure optimization without taking geographical factors into account in theoretical condition

然而, 图 5 所示的方案 2 在实际应用时面临着 3 条联络线因跨过河流而导致建设费用增加的问题, 方案 1、3、4 也可能存在类似情况。4 个方案

的实际联络建设费用见表 1 中的 C'_{Link} , 此时 A_{TSC} 和 C'_{Link} 的权重分别为 0.521 和 0.479, 对应的实际应用中与最优方案的接近程度为 C' , 可见方案 2 不再是最优的了, 方案 3 则成为主变联络结构的事后最优方案, 其地理联络结构图如图 6 所示。

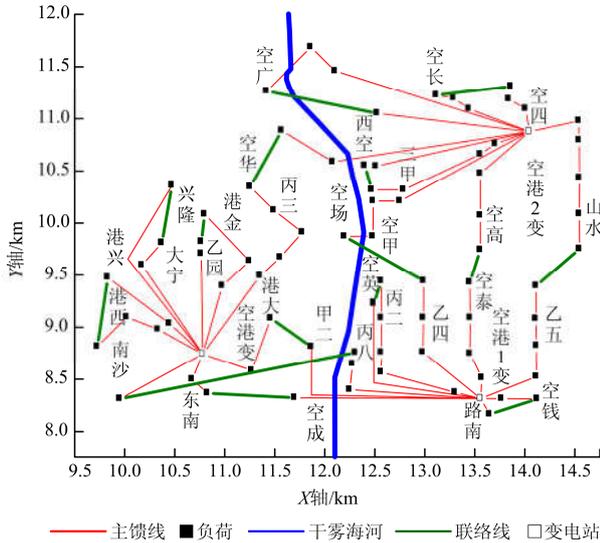
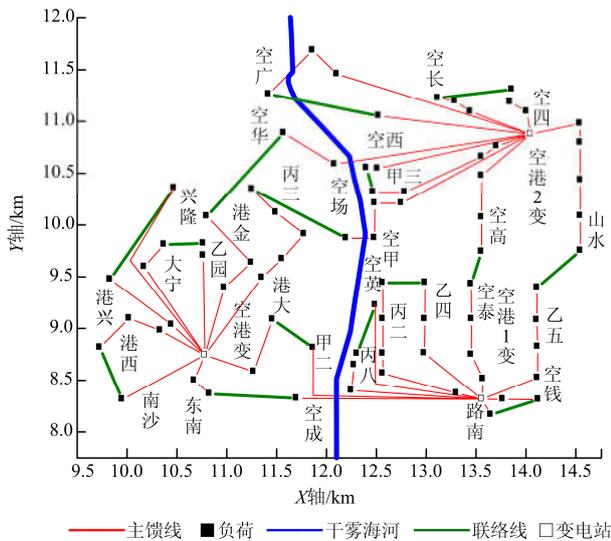


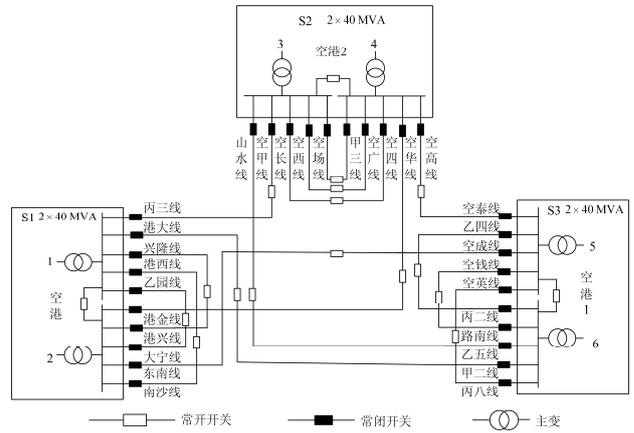
图 6 未计及地理因素的主变联络结构事后最优方案

Fig. 6 Optimal solution of main transformers stations' contact structure optimization without taking geographical factors into account in actual condition

进一步分析实际应用前就考虑地理因素的规划方案。图 4 中计及地理因素影响的 4 个方案对应的 A_{TSC} 、 C_{Link} 和 C 见表 2。 A_{TSC} 和 C_{Link} 的权重分别为 0.524 和 0.476。可见方案 6 为主变联络结构的事后最优方案, 其中各主变间馈线的联络结构见图 7。



(a) 地理联络结构图



(b) 主变联络结构图

图 7 计及地理因素的主变联络结构规划结果

Fig. 7 Result of main transformers stations' contact structure optimization with taking geographical factors into account

表 2 计及地理因素的帕累托前沿

Table 2 Pareto front with taking geographical factors into account

	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8
A_{TSC}/MVA	141.300	151.950	157.275	159.75
$C_{Link}/\text{万元}$	52.368	62.036	65.238	75.897
C	0.504	0.681	0.542	0.328

对比图 6 和图 7 并结合表 1 和表 2 可知, 实际应用前就考虑地理因素影响的最优规划方案(事前最优方案)的 C 为 0.681, 实际应用前不考虑地理因素影响而在实际应用时被迫考虑的最优规划方案(事后最优方案)的 C 为 0.548, 即方案 6 优于方案 3。

4 结论

本文建立了基于帕累托最优的计及不利地理因素影响的主变联络结构优化模型, 并利用 NSGA-II 算法及变异系数 TOPSIS 法对其求解得到最优规划方案。工程实例分析表明该方法是可行的、有效的。

该方法有以下特点:

1) 建立了馈线互联矩阵, 并将其用于主变联络结构优化模型, 不仅描述了主变间如何联络的情况, 同时也得到联络通道内联络支路数量和位置的构成情况, 规划结果详细, 可以更加具体地指导主变联络建设。

2) 事前计及了不利地理因素给优化主变联络结构时带来的影响, 使最终的最优规划方案更为合理。

参考文献

[1] 葛少云, 韩俊, 刘洪, 等. 基于供电能力的主变电站间联

- 络结构优化[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 129-135.
GE Shaoyun, HAN Jun, LIU Hong, et al. Optimization of contact structure among main transformer stations in regional power network based on power supply capability[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 129-135.
- [2] 肖峻, 郭晓丹, 王成山, 等. 基于供电能力的配电网联络有效性评价与化简方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 31-37.
XIAO Jun, GUO Xiaodan, WANG Chengshan, et al. A TSC-based evaluation and simplification method on tie-lines of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 31-37.
- [3] 陈章潮. 城市电网规划与改造[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] 肖峻, 谷文卓, 郭晓丹, 等. 配电系统供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 47-52.
XIAO Jun, GU Wenzhuo, GUO Xiaodan, et al. A supply capability model for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 47-52.
- [5] 肖峻, 张婷, 张跃, 等. 基于最大供电能力的配电网规划理念与方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 106-113.
XIAO Jun, ZHANG Ting, ZHANG Yue, et al. TSC-based planning idea and method for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 106-113.
- [6] 肖峻, 李振生, 张跃. 基于最大供电能力的智能配电网规划与运行新思路[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 8-14.
XIAO Jun, LI Zhensheng, ZHANG Yue. A novel planning and operation mode for smart distribution networks based on total supply capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 8-14.
- [7] 韩俊, 刘洪, 葛少云, 等. 面向供电能力提升的主变压器站间联络结构优化建模[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 42-47.
HAN Jun, LIU Hong, GE Shaoyun, et al. Optimization modeling for contact structure of main transformers between substations with improved power supply capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 42-47.
- [8] 葛少云, 张凯, 刘洪, 等. 考虑单位供电能力费用的主变联络结构优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(8): 23-28.
GE Shaoyun, ZHANG Kai, LIU Hong, et al. Optimization of tie-lines structure among main transformer considering unit power supply cost[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(8): 23-28.
- [9] 肖峻, 祖国强, 贺琪博, 等. 馈线联络对配电网最大供电能力的作用机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 38-44.
XIAO Jun, ZU Guoqiang, HE Qibo, et al. Influence mechanism of feeder links on total supply capability for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 38-44.
- [10] 肖峻, 祖国强, 李晓辉, 等. 基于最大供电能力的配电网馈线联络建设次序规划方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 49-55.
XIAO Jun, ZU Guoqiang, LI Xiaohui, et al. A TSC-based planning method on construction order of feeder links for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 49-55.
- [11] 肖峻, 徐兵山, 张跃, 等. 一种新的配电网联络线瓶颈分析与改造方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 35-41, 47.
XIAO Jun, XU Bingshan, ZHANG Yue, et al. A new method of bottleneck tie lines analysis and reformation for distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 35-41, 47.
- [12] 黄映, 李扬, 高赐威. 基于非支配排序差分进化算法的多目标电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 85-89.
HUANG Ying, LI Yang, GAO Ciwei. Multi-objective transmission network planning based on non-dominated sorting differential evolution[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 85-89.
- [13] 盛四清, 范林涛, 李兴, 等. 基于帕累托最优的配电网多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 51-57.
SHENG Siqing, FAN Lintao, LI Xing, et al. Multi-objective planning of distribution network based on Pareto optimality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 51-57.
- [14] 沈辉, 赵时桦, 刘传铨, 等. 配网运行综合量化评价体系的研究与应用[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(2): 48-52.
SHEN Hui, ZHAO Shihua, LIU Chuanquan, et al. Research and application of comprehensive quantitative evaluation system on distribution network operation[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(2): 48-52.
- [15] 王欣, 薛雯, 魏源彤. 数据挖掘在客户关系管理系统中的应用研究[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(4): 73-78.
WANG Xin, XUE Wen, WEI Yuantong. Research on data mining application in customer relationship management system[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(4): 73-78.
- [16] 孟安波, 李专. 采用多目标纵横交叉算法的电力系统动态环境经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016,

- 44(2): 109-115.
MENG Anbo, LI Zhuan. Dynamic environmental economic dispatch of power system adopting multi-objective crisscross optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 109-115.
- [17] 姚玉海, 王增平, 张首魁, 等. 基于偏好知识的多目标优化算法求解计及电源侧的配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 1-8.
YAO Yuhai, WANG Zengping, ZHANG Shoukui, et al. Multi-objective optimization algorithm based on decision preferences to solve distribution network service restoration considering power supply[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 1-8.
- [18] 肖峻, 谷文卓, 贡晓旭, 等. 基于馈线互联关系的配电网最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 72-77.
XIAO Jun, GU Wenzhuo, GONG Xiaoxu, et al. A total supply capability model for power distribution network based on feeders interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 72-77.
- [19] 肖峻, 苏步芸, 贡晓旭, 等. 基于馈线互联关系的配电网安全域模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 36-44.
XIAO Jun, SU Buyun, GONG Xiaoxu, et al. Model of distribution system security region based on interconnections of feeders[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 36-44.
- [20] 符杨, 卫春峰, 李振坤, 等. 考虑地理信息和行政边界的变电站供区优化[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 126-131.
FU Yang, WEI Chunfeng, LI Zhenkun, et al. Optimal partitioning of substation service areas considering impacts of geographic information and administrative boundaries[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 126-131.
- [21] LI H, ESEYE A T, ZHANG J H, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2: 14pp.
DOI 10.1186/s41601-017-0040-6
- [22] SRINIVAS N, DEB K. Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [23] 王茜, 张粒子. 采用 NSGA-II 混合智能算法的风电场多目标电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 17-24.
WANG Qian, ZHANG Lizi. Multi-objective transmission planning associated with wind farms applying NSGA-II hybrid intelligent algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 17-24.
- [24] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3405-3411.
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3405-3411.
- [25] 程虹, 高元海, 王淳, 等. 基于无重访 NSGA-II 算法的配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 10-16.
CHENG Hong, GAO Yuanhai, WANG Chun, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration based on non-revisiting NSGA-II algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 10-16.
- [26] 张文朝, 顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2741-2746.
ZHANG Wenchao, GU Xueping. Comprehensive evaluation of wind farms using variation coefficient method and technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2741-2746.
- [27] 曲如, 王震. 基于物元特征关联度及网络层次分析法的评价及应用[J]. 东北电力大学学报, 2014, 34(6): 91-97.
QU Ru, WANG Zhen. Evaluation research based on matter-element feature correlation and ANP of stock value[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2014, 34(6): 91-97.
- [28] 马成廉, 朱国栋, 孙黎. 基于 TOPSIS 法的地区电网黑启动方案评估[J]. 东北电力大学学报, 2014, 34(2): 32-37.
MA Chenglian, ZHU Guodong, SUN Li. The regional power grid black-start scheme valuation based on TOPSIS[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2014, 34(2): 32-37.

收稿日期: 2016-12-13; 修回日期: 2017-06-11

作者简介:

肖白(1973—), 男, 博士, 教授, 长期从事电力系统规划、城市电网风险评估、电力系统继电保护等方面的研究与教学工作; E-mail: xbxiaobai@126.com

王思莹(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事城市电网规划、风险评估的研究工作; E-mail: wsiwang92@163.com

谷禹(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电气设备质量检测和电力系统规划方面的工作。E-mail: guyu155@126.com

(编辑 周金梅)