

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201336

基于 TSP 优化和潮流校核的 220 kV 电网远景网架构建方法

刘 巨, 赵红生, 杨东俊, 杜 治, 黄家祺, 王 博

(水火电资源优化配置与仿真技术实验室(国网湖北省电力有限公司经济技术研究院), 湖北 武汉 430077)

摘要: 电网目标网架是规划方案适应性分析和电力设施布局规划的基础。220 kV 电网网架结构相对复杂, 电网安全可靠性要求高, 目前缺乏典型的网架模式作为参考, 因此如何构建安全经济的 220 kV 电网远景网架亟待研究。基于此, 提出了一种基于 TSP 优化和潮流校核的 220 kV 电网远景网架构建方法。该方法通过变电站分群和 TSP 优化寻找得到 220 kV 网架构建的最短路径, 保障了所构建网架的经济性。通过交直流潮流 $N-1$ 校核确定该路径上的线路导线型号和回数, 保障了所构建网架能够通过 $N-1$ 安全校核, 进而保障了所构建网架的安全可靠性。我国某区域电网的仿真算例结果表明, 所提方法能够构建安全经济的 220 kV 网架, 具有工程实际应用价值。

关键词: 220 kV; 远景网架构建; TSP 优化; 潮流校核; 安全经济

220 kV long-term goal power grid planning method based on TSP optimization and power flow checking

LIU Ju, ZHAO Hongsheng, YANG Dongjun, DU Zhi, HUANG Jiaqi, WANG Bo

(Hydrothermal Power Resource Optimization and Simulation Laboratory (State Grid Hubei Electrical Power Co., Ltd. Economics Research Institute), Wuhan 430077, China)

Abstract: The long-term goal power grid is the basis for the adaptability analysis of the power grid planning scheme and the layout of the power facilities. The structure of the 220 kV power grid is relatively complex, and the security and reliability requirements of the power grid are high. At present, there is no typical grid model as a reference. Therefore, how to construct a safe and economical 220 kV long-term goal power grid is urgently needed for research. On this basis, a 220 kV long-term goal power grid planning method based on TSP optimization and power flow checking is proposed. This method first finds the shortest 220 kV power grid path through substation grouping and TSP optimization, ensuring the economy of the planning power grid structure, and then determines the tie-line type and number of the tie-line on the path through AC and DC power flow $N-1$ verification. Therefore, the planned power grid can pass through the $N-1$ safety check, thereby ensuring the safety and reliability of the planned power grid. The simulation results of a regional power grid show that the proposed method can construct a safe and economical 220 kV power grid and has practical engineering application value.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51707070) and the Science and Technology Project of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. (No. 52153818001F).

Key words: 220 kV; long-term goal power grid planning; TSP optimization; power flow check; safe and economical

0 引言

合理的电力系统规划是保障电网安全稳定运行和可靠供电的前提条件。随着我国经济快速发展和用电需求迅猛增加, 电网规模也不断增加, 电力系

统规划日益复杂。一方面, 电网发展受站址、廊道等资源限制, 需要通过合理的远景网架研究指导电力设施布局规划, 实现对重要廊道和站址的保护。另一方面, 随着电网发展模式逐步由规模化发展向高质量发展, 精准投资理念有效控制了电网建设规模, 电网发展必须做到“远近结合”, 实现电力资源的优化利用。因此, 构建合理的电网远景网架, 保障电网安全可靠经济运行在电网规划工作中具有良

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51707070); 国网湖北省电力有限公司科学技术项目资助(52153818001F)

好的指导作用。

目前,电网规划^[1]分为负荷预测^[2-3]、变电站选址定容以及网架构建三个阶段。电网远景网架构建是在确定远景年变电站地址和容量后如何确定其相互联络的问题。对于配电网而言,其结构相对简单,实际电网规划工作中一般采用典型供电模式来确定其网架。对于 220 kV 及以上电压等级的主网网架,其结构相对复杂,安全性要求高,缺乏典型的网架结构用于参考,需要根据实际需求开展研究。文献[4-8]分别从图论和电网生存性的角度提出了核心骨干网架的构建方法,有利于电网应对自然灾害带来的大停电风险;文献[9-16]针对大规模风电太阳能等随机不确定性电源接入后的网架构建和优化进行了研究,建立了考虑不确定性的电网网架构建模型和求解算法,有利于促进新能源并网消纳。文献[17-18]提出了基于降维搜索和启发式算法的网架重构方法,用于解决电网网架构建模型的数学求解问题。然而上述电网网架构建方法均将电网经济优化与潮流校核耦合在一起,由于潮流方程具有非线性,导致优化模型求解困难,只能对电网优化模型进行简化,与实际电网网架构建存在一定的差异,方法的实用性和适应性相对不足。

考虑电网网架构建的经济性问题其实是求解构建网架线路的最短路径,通过经济性优化确定网架路径并通过安全校核确定网架线路型号和回数,也是解决 220 kV 电网网架构建的一种思路。旅行商问题(Travelling Salesman Problem, TSP)是一个经典的最短路径求解问题。目前 TSP 优化算法已经被广泛应用于公共交通路径规划^[19]、地图导航路径规划^[20]、运输产品调度^[21]、集成电路布线^[22]等领域。文献[23-24]提出了基于 TSP 优化的配电网网架优化重构以及光伏阵列电网络规划与优化的方法。上述研究为 TSP 优化算法在 220 kV 电网网架构建中的应用提供了研究基础。另一方面,文献[25-26]提出了基于最优潮流的输配电网协调规划方法和交直流混合系统多目标最优潮流优化方法,为本文构建网络的安全校核提供了技术手段。

基于此,本文提出了一种基于 TSP 优化和潮流校核的电网远景网架构建方法。该方法首先通过 TSP 优化算法得到电网网架路径,然后根据潮流校核确定该路径上变电站之间线路的回数和型号,进而实现了变电站之间的网架构建。针对某电网的仿真结果表明:本文所提电网网架构建方法不仅能够保障电网安全可靠供电,而且具有良好的经济性,对当前电网具有良好的适应性。

1 变电站聚类分群

为了保障 220 kV 电网的安全可靠供电,220 kV 网架一般采用多环多通道结构。考虑采用 TSP 优化算法形成的网架构建方案中所有变电站均位于一个大的环状回路,这样形成的电网网架方案与实际存在差异,且难以通过安全校核。因此本文在进行 220 kV 电网网架构建时,根据变电站的地理分布情况进行聚类分群,将 500 kV 变电站和与其距离较近的 220 kV 变电站划分为一个群。对于每个群内的变电站通过 TSP 优化算法,实现 500 kV 变电站就近对 220 kV 变电站供电,通过对不同群之间进行联络,可以实现 220 kV 网架的多环多通道联络。具体的变电站分群实现步骤如下所述。

1) 根据 500 kV 变电站 220 kV 侧母线数量 N , 随机生成 N 个变电站聚类中心的位置。其中第 n 个变电站聚类中心的位置为 (X_n, Y_n) , $n=1, 2, \dots, N$ 。

2) 计算所有 220 kV 变电站与变电站聚类中心之间的距离 L_{ni} 为

$$L_{ni} = \sqrt{(X_n - X_i)^2 + (Y_n - Y_i)^2} \quad (1)$$

式中,第 i 个 220 kV 变电站的位置为 (X_i, Y_i) , $i=1, 2, \dots, M$, M 为 220 kV 变电站的数量。

3) 根据 L_{ni} 大小,将 220 kV 变电站归属于距离其最近的聚类中心,形成 N 个变电站群。

4) 对于所有变电站群,更新变电站群聚类中心的位置。更新后的聚类中心横坐标 X_n 等于群内所有 220 kV 变电站横坐标的平均值,其纵坐标 Y_n 等于群内所有 220 kV 变电站纵坐标的平均值。

5) 重复步骤 2)~步骤 4),直到前后两次计算得到的聚类中心位置保持不变,得到 N 个 220 kV 变电站群及其聚类中心位置。

6) 计算 500 kV 变电站与 220 kV 变电站群聚类中心位置之间的距离,选择距离最近的 500 kV 变电站和 220 kV 变电站群配对组成新的变电站群。

2 TSP 最优路径求解

TSP 优化算法是一个经典且被广泛应用的数学模型。TSP 问题可描述为:一个旅行商从某一城市出发,途径其他所有城市后回到出发的城市,如何规划一条路径使得旅行商总的路程最短。对于第 1 节求取得到的某个变电站群,其含有 M 个变电站,如果将其视为 M 个城市的集合,求取这些变电站之间最短的联络路径就成为了一个旅行商问题。

2.1 TSP 问题的数学模型

从数学描述的角度,旅行商问题是求取无向图

中路径最短的哈密顿回路。图 1 给出了某 7 个顶点无向图的两种哈密顿回路。即从一点出发, 经过所有的点必须且只能一次, 最终回到起点的路径。由此可见, TSP 问题是在带权图中求权重最小的哈密顿回路。

从图论的角度, 上述问题可以描述为: 对于无向带权图 $G=(V, E)$, 其顶点集合 $V=\{1, 2, \dots, n\}$, 其边的集合 $E=\{e_{ij}=(i, j)|i, j \in V, i \neq j\}$, 求取该图权重最小的哈密顿回路可以转换为如式(2)一式(6)的数学优化问题。

$$\min L = \sum_{i \neq j} L_{ij} \times x_{ij} \quad (2)$$

$$\text{s.t. } x_{ij} = \begin{cases} 1, & e_{ij} \text{ 在哈密顿回路上} \\ 0, & e_{ij} \text{ 不在哈密顿回路上} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_{i \neq j} x_{ij} = 1, i \in V \quad (4)$$

$$\sum_{i \neq j} x_{ij} = 1, j \in V \quad (5)$$

$$\sum_{i, j \in S} x_{ij} = |S| \quad (6)$$

式中: L 表示回路总的路径之和; L_{ij} 表示从顶点 i 到顶点 j 之间的距离, 由顶点坐标位置通过式(1)求取; x_{ij} 表示边 e_{ij} 是否在哈密顿回路上的有效标识; 式(4)约束了每个顶点的出度为 1, 式(5)约束了每个顶点的入度为 1, 二者共同约束了每个顶点只被求取的回路经过 1 次; S 表示图 G 的子图, $|S|$ 表示该子图的顶点个数, 式(6)约束了图 G 中不会有子回路。

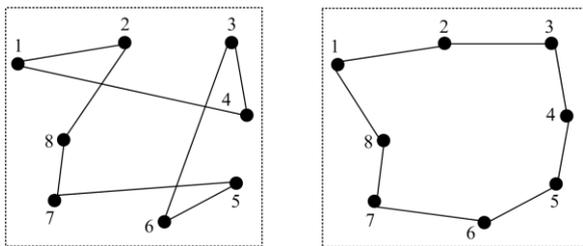


图 1 哈密顿回路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Hamilton loop

2.2 TSP 问题的求解

TSP 问题求解是优化领域的著名经典难题, 目前的求解方法主要包括完全算法和启发式算法。完全算法能够保障求解得到该问题的全局最优解, 但对于顶点数超过 100 的 TSP 问题存在计算困难的问题; 启发式算法能够应对更大规模的 TSP 问题求解, 但是其得到的只是满足实际需求的解, 不一定是全局最优解^[27-29]。考虑到本文中每个分群中变电站站

点数较少, 一般不超过 10 个, 因此本文采用完全求解算法中的动态规划算法进行求解。

假设 TSP 问题的起点为 s , $f(i, V')$ 表示从顶点 i 出发, 经过顶点集合 V' 中各个顶点有且仅有一次后再回到起点 s 的最短路径长度。根据 V' 中顶点的情况可以分为以下两种情况。

1) $V' = \phi$, 即 V' 为空集合, 表示从顶点 i 出发到顶点 s 的最短路径为 L_{is} , $f(i, V') = L_{is}$ 。

2) $V' \neq \phi$, 即 V' 为非空集合。按照 TSP 的最优子结构性性质可转化为对子问题的求解, 即在集合 V' 中遍历所有顶点, 寻找路径最短的 TSP 回路。

$$f(i, V') = \min_{k \in V'} \{L_{ik} + f(k, V' - \{k\})\} \quad (7)$$

综上所述, TSP 的动态规划求解方程为

$$f(i, V') = \begin{cases} L_{is} & V' = \phi \\ \min_{k \in V'} \{L_{ik} + f(k, V' - \{k\})\} & V' \neq \phi \end{cases} \quad (8)$$

因此, 通过动态规划算法从较小规模子问题最优解求得大规模问题的最优解, 从而可以实现对 TSP 问题求解。

2.3 网架构建路径求取

通过变电站分群和 TSP 优化算法可以求取得到每个变电站群内部网络的构建路径, 如图 2 所示。考虑到电网供电可靠性^[30]及实际需求, 不同变电站群之间是保持联络的, 因此, 需要构建路径实现不同变电站群之间互联互通, 其实现步骤如下:

1) 选择任意 1 个变电站群, 计算其内部变电站与其他所有变电站群内部变电站之间的距离, 选取距离最近的两个站点之间增加 1 回联络路径, 实现该变电站群与其他变电站群之间的联通。

2) 对于已完成相互联络的变电站群, 将其视为一个新的变电站群, 重复步骤 1), 直到所有变电站群均完成互联互通。

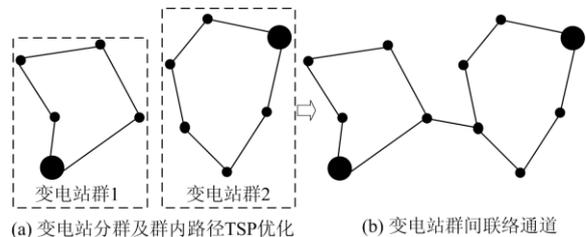


图 2 变电站联通路径构建示意图

Fig. 2 Construction of substation interconnection path

3 基于潮流校核的网架构建

基于 TSP 优化算法能够找到变电站之间联络的最短路径, 将有利于保障电网构建的经济性。然而

电力系统网架构建还涉及线路的选型和各输电廊道中线路的并联数,需要在变电站联通路径基础上进一步实现 220 kV 网架构建。

考虑到 220 kV 网架需要满足电网安全稳定校核,基于此,本文提出了基于潮流校核的线路选型和回路数确定方法,其实现的步骤如下:

1) 首先根据 TSP 优化算法求取的变电站联络路径,隐藏未来规划站点,形成现有站点之间的联络路径图,结合该路径联络图对现有网架通过变电站外线路对接或者变电站 π 接入站进行调整,使得现有网架与上述路径保持一致。

2) 对于每一个新规划的站点,按照 TSP 优化算法求取的路径,求取 π 接步骤 1) 中现有线路或者新建线路中更为经济的方案为其接入方案,实现所有规划变电站互联互通。

3) 根据各 220 kV 变电站负荷以及步骤 2) 求解得到的变电站联络路径,对于已有网架按照其当前线路参数、新添加线路选取 220 kV 典型型号导线 2×LGJ-300 导线参数,建立系统的直流潮流模型,求解得到所构建网络的基础潮流。

4) 基于该直流潮流,对系统进行 $N-1$ 校核和补强。如果 $N-1$ 校核中存在某两个变电站之间的线路潮流超过其输电能力,选择输电能力更大的导线型号重新构建电网网架,并更新直流潮流模型参数重新进行 $N-1$ 校核,如果这两个变电站之间潮流小于新型号导线的输电能力,这两个变电站之间的线路选择用该型号的导线。如果选用输电能力更大的导线仍不能满足 $N-1$ 校核,增加这两个站点之间的联络线路回数,对于步骤 1) 中已有的线路,保留其线型不变,新增线路从输电能力最小的导线型号往输电能力大的导线型号逐步进行校核,如果该通道 $N-1$ 后仍不通过,对步骤 1) 中已有的线路选择输电能力更大的导线进行改造,直到补强后通道满足潮流 $N-1$ 校核,并选择该种情况下线路联络回数和导线型号作为这两个站点之间的电网网架方案。重复上述步骤不断对电网网架进行补强,如果所有线路潮流在 $N-1$ 校核中均小于该线路的最大负载,表明所构建的网络满足直流潮流 $N-1$ 校核。

5) 针对步骤 4) 获得的电网网架进行交流潮流的 $N-1$ 校核,如果仍存在 $N-1$ 后线路潮流超过其输电能力的情况,按照步骤 4) 的规律进行网络补强,直到采用交流潮流 $N-1$ 校核后,所有线路潮流均小于其输电能力,得到 220 kV 电网的网架构建方案。

本文所选用的 220 kV 电网典型导线型号及其参数如表 1 所示。

表 1 典型导线参数表

Table 1 Typical parameter of transmission line

导线型号	电阻/ (Ω/km)	电抗/ (Ω/km)	电纳/ ($\mu\text{S}/\text{km}$)	造价/ (万元/km)	输电能力/ 万 kW
2×LGJ-300	0.048	0.311	3.580	111	51.4
2×LGJ-400	0.040	0.281	3.700	127	61.2
2×LGJ-630	0.023	0.265	3.760	142	69.8

4 算法实现流程

根据负荷增长情况,确定 220 kV 和 500 kV 变电站容量和位置后,本文基于旅行商优化和潮流校核方法实现 220 kV 网架构建的具体步骤如下:

1) 对变电站进行分群,将 500 kV 变电站与其就近的 220 kV 变电站组成变电站群。

2) 采用 TSP 优化算法,求得每个变电站群内部最短联络路径。

3) 计算隶属于不同变电站群站点之间的距离,选取距离最近的站点增加联络通道,实现不同变电站群之间的联通。

4) 以步骤 2)、步骤 3) 形成的变电站联络路径为基础,采用交直流潮流 $N-1$ 校核,对上述路径上的线路进行选型和线路回数确定。

5) 结合实际运行中输电线路的重要性,对重要输电通道中的线路型号和回数采用差异化造价重新进行导线选型和设计,保障重要输电通道的安全可靠。

5 仿真实例

为了验证本方法的有效性,以我国某地区 220 kV 局部电网规划为例进行仿真分析。如图 3 所示,该区域现有 500 kV 变电站 2 座,220 kV 变电站 8 座,当前电网网架结构如图中黑色实线所示。根据负荷发展情况,规划 15 年后的远景年变电容量和变电站站址情况,预计新增 220 kV 变电站 5 座,新增 500 kV 主变 3 台。远景年每座 500 kV 变电站主变容量为 3×100 万 kVA,其 220 kV 母线采用“1 台 500 kV 主变+2 台 500 kV 主变”双母线分段方式运行,220 kV 变电站 13 座。具体的变电站参数情况如表 2 所示。

本算例中 500 kV 变电站的 220 kV 母线采用分母运行方式,根据本文变电站分群方法将上述 220 kV 变电站分为 4 个群,其中变电站群 C_1 为 {8,9,10,15},变电站群 C_2 为 {5,7,14},变电站群 C_3 为 {3,4,11,12},变电站群 C_4 为 {6,13}。根据各变电站群的聚类中心位置与 500 kV 变电站的距离关系,将 500 kV 变电站与上述变电站群进行匹配,得到

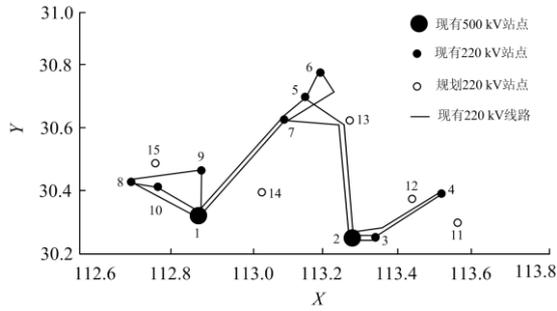


图 3 某地区电网已有和规划变电站位置分布图

Fig. 3 Location of the planned substations in a certain area

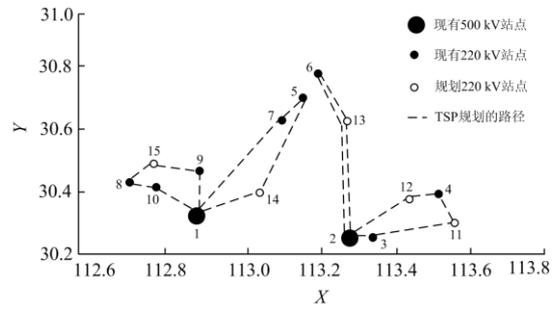


图 4 变电站群组间联络路径

Fig. 4 Path of the substation groups

表 2 远景年变电站参数表

Table 2 Parameter of the substations in the future

变电站 序号	X 坐标	Y 坐标	有功负荷/ 万 kW	电压等级/ kV
1	112.909 024	30.334 428	—	500
2	113.322 306	30.246 546	—	500
3	113.385 305	30.258 198	35.2	220
4	113.560 71	30.392 251	30.4	220
5	113.198 673	30.699 923	22.4	220
6	113.239 02	30.777 195	21.4	220
7	113.142 875	30.627 779	20.9	220
8	112.736 448	30.429 479	35.6	220
9	112.922 898	30.465 98	23.9	220
10	112.807 419	30.413 852	28.1	220
11	113.603 53	30.299 586	27.3	220
12	113.482 717	30.375 515	31.6	220
13	113.316 963	30.625 072	26	220
14	113.083 61	30.396 434	26.4	220
15	112.800 777	30.488 759	25.4	220

220 kV 和 500 kV 变电站组合的变电站群组 C_{51} 为 {1,8,9,10,15}, 变电站群组 C_{52} 为 {1,5,7,14}, 变电站群组 C_{53} 为 {2,3,4,11,12}, 变电站群组 C_{54} 为 {2,6,13}。

采用 TSP 优化模型及其求解算法分别对各变电站群组求取其内部联络最短路径, 计算结果如图 4 所示。其中变电站群组 C_{51} 的联通路程为 $E_{51} = \{(1,9),(9,15),(15,8),(8,10),(10,1)\}$, 变电站群组 C_{52} 的联通路程为 $E_{52} = \{(1,7),(7,5),(5,14),(14,1)\}$, 变电站群组 C_{53} 的联通路程为 $E_{53} = \{(2,3),(3,11),(11,4),(4,12),(12,2)\}$, 变电站群组 C_{54} 的联通路程为 $E_{54} = \{(2,6),(6,13),(13,2)\}$ 。

结合现有规划的电网络径图, 隐藏未来规划站点, 通过变电站外线路对接或者变电站 π 接入站进行调整, 使得现有站点之间的联络路径图与上述路径保持一致。然后对于每一个新规划的站点, 按照 TSP 优化算法求取的路径, 求取 π 接现有线路或者新建线路中更为经济的方案为其接入方案, 实现所有规划变电站互联互通, 得到未补强之前的电网络架方案如图 5 所示。

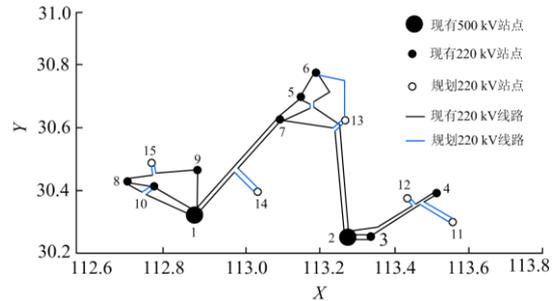


图 5 根据规划路径调整后的电网络架

Fig. 5 Adjusted power grid according to the planned path

计算不同变电站群之间各站点的相对位置, 选择距离最近的路径完成对所有变电站群之间的相互联络, 其中变电站群组 C_{51} 和 C_{52} 之间的联络路径为 $E_{12} = \{(9,14)\}$, C_{52} 和 C_{53} 之间的联络路径为 $E_{23} = \{(5,6)\}$, C_{53} 和 C_{54} 之间的联络路径为 $E_{23} = \{(12,13)\}$, 基于上述联络方式, 得到 220 kV 网架的路径方案如图 6 所示。

对于现有的线路按照其参数, 对于图 6 中 220 kV 网架方案上的规划线路按照表 1 所示的参数, 选择单回 $2 \times \text{LGJ-300}$ 型号导线构建系统的直流潮流。然后采用本文所提方法对系统进行 $N-1$ 潮流校核和网架补强, 得到满足潮流 $N-1$ 安全校核后的线路回数数和导线型号。进一步地, 结合实际运行中输电线路的重要性, 对重要输电通道中的线路型号

和回数采用差异化造价重新进行导线选型和设计。由于变电站 5、6、7、12 和变电站 1、2 之间有一条江间隔，为了保障上述区域供电的安全性，设计变电站 12、13 之间线路时，将满足 $N-1$ 校核的导线型号 $2 \times \text{LGJ-300}$ 进行重新设计，选择截面更大的导线型号 $2 \times \text{LGJ-400}$ 进行差异化设计。完成上述步骤后得到 220 kV 网架构建方案和正常方式下各线路的潮流负载情况如表 3 所示，其所对应的网架方案如图 7 所示。

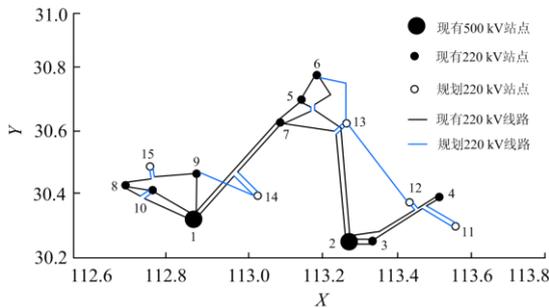


图 6 补强前的 220 kV 网架路径方案图

Fig. 6 Path of the 220 kV power grid before reinforcement

表 3 构建的 220 kV 网架方案和基础潮流

Table 3 Constructed 220 kV power grid and basic power flow

起始 变电站	结束 变电站	线路型号	并列线路 回数	线路潮流/ 万 kW
1	9	$2 \times \text{LGJ-400}$	2	51.242
1	10	$2 \times \text{LGJ-300}$	3	64.106
1	14	$2 \times \text{LGJ-400}$	2	43.044
1	7	$2 \times \text{LGJ-400}$	1	19.710
2	3	$2 \times \text{LGJ-630}$	2	75.158
2	12	$2 \times \text{LGJ-400}$	2	54.110
2	6	$2 \times \text{LGJ-400}$	1	20.743
2	13	$2 \times \text{LGJ-300}$	1	29.044
3	11	$2 \times \text{LGJ-300}$	2	39.812
4	11	$2 \times \text{LGJ-300}$	1	-12.294
4	12	$2 \times \text{LGJ-300}$	1	-18.106
5	6	LGJ-400	1	2.216
5	7	LGJ-400	2	0.670
6	13	$2 \times \text{LGJ-300}$	1	-3.081
7	13	$2 \times \text{LGJ-300}$	1	-3.655
7	14	$2 \times \text{LGJ-300}$	1	-17.915
8	10	$2 \times \text{LGJ-400}$	2	35.564
8	15	$2 \times \text{LGJ-300}$	1	-0.222
9	14	$2 \times \text{LGJ-300}$	1	1.573
9	15	$2 \times \text{LGJ-400}$	1	25.632
12	13	$2 \times \text{LGJ-400}$	1	3.971

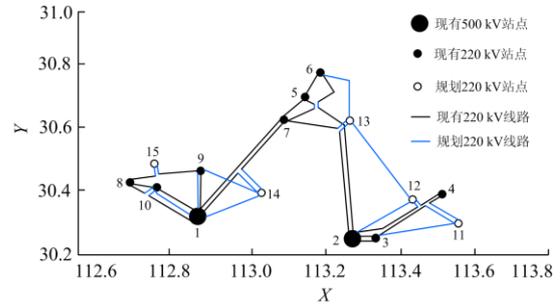


图 7 某地区电网 220 kV 网架构建方案

Fig. 7 Planning 220 kV power grid in a certain area

由此可知，采用本文所提的基于 TSP 优化和潮流校核的 220 kV 电网网架构建方法，通过 TSP 优化算法实现了网架构建路径的最短，保障了构建方案的经济性，通过潮流校核的网架补强方案有效保障了所构建方案的安全性。此外，针对实际电网中存在的路径需要避开湖泊、自然生态保护区等问题，可以通过在所需避让区域的边缘设置虚拟变电站节点，通过 TSP 优化实现路径的避让。同时本方法考虑到对现有网架进行继承和衔接，是一种实用、经济、安全的 220 kV 电网网架构建方案。

6 结论

配电网结构相对简单，在实际电网规划工作中可采用典型供电模式来确定其网架。220 kV 电网网架结构相对复杂，电网安全要求高，缺乏典型的网架结构用于参考，需要根据实际需求开展网架构建技术研究。基于此，本文提出了一种基于 TSP 优化和潮流校核的 220 kV 远景电网网架构建方法，研究结果表明：

- 1) TSP 优化算法能够有效找到 220 kV 网架的最短构建路径，进而有效保障了所构建网架的经济性；
- 2) 通过直流潮流进行网架 $N-1$ 校核和补强有效避免了潮流不收敛的问题，最后采用交流潮流进行 $N-1$ 校核补强，有效保障了所构建网架的安全性；
- 3) 我国某地区电网的仿真算例表明，所提方法能够有效构建 220 kV 电网网架方案具有较高的工程实用价值。

参考文献

[1] 官嘉玉, 江修波, 刘丽军. 考虑电动汽车随机充电行为及低碳效益的充电站规划[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 93-100.
GUAN Jiayu, JIANG Xiubo, LIU Lijun. Optimal allocation of charging stations considering stochastic

- charging behavior and low carbon efficiency of electric vehicles[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(4): 93-100.
- [2] 杨捷, 罗成臣, 张思路, 等. 相空间重构和 SVR 耦合的短期电力负荷预测[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(16): 96-100.
- YANG Jie, LUO Chengchen, ZHANG Silu, et al. Short-term load forecasting based on phase space reconstruction and SVR coupling model[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(16): 96-100.
- [3] 杜涵潇, 汤旻安. 基于 CEEMD-RSVPSO-KELM 的用户侧微电网短期负荷预测[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(18): 69-76.
- DU Hanxiao, TANG Min'an. Short-term load forecasting for user-side micro-grid based on CEEMD-RSVPSO-KELM model[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(18): 69-76.
- [4] 叶晓君, 单政博, 林冠强, 等. 基于图论算法的电网核心骨干网架构建[J]. *广东电力*, 2017, 30(10): 81-85.
- YE Xiaojun, SHAN Zhenbo, LIN Guanqiang, et al. Construction of core backbone grid based on graph theory algorithm[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(10): 81-85.
- [5] 董飞飞, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于改进 BBO 优化算法和电网生存性的核心骨干网架构建[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2659-2667.
- DONG Feifei, LIU Dichen, WU Jun, et al. A method of constructing of core backbone grid based on improved BBO optimization algorithm and survival ability of power grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2659-2667.
- [6] 林潇, 刘洋, 许立雄, 等. 基于系统生存性的骨干网架搜索方法[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(12): 49-56.
- LIN Xiao, LIU Yang, XU Lixiong, et al. A method of searching backbone grid based on survivability of power system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(12): 49-56.
- [7] 李响, 贾志伟. 基于 DE 算法的 10 kV 网架结构多目标规划[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(增刊 1): 99-104.
- LI Xiang, JIA Zhiwei. Multi-objective programming of the 10 kV network structure based on DE algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(S1): 99-104.
- [8] GUCHHAIT P K, BANERJEE A. Stability enhancement of wind energy integrated hybrid system with the help of static synchronous compensator and symbiosis organisms search algorithm[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(2): 138-150. DOI: 10.1186/s41601-020-00158-8.
- [9] 蒋霖, 郑倩薇, 王枫, 等. 考虑直接负荷控制与风电不确定性的输电网扩展规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(3): 138-146.
- JIANG Lin, ZHENG Qianwei, WANG Feng, et al. Transmission network expansion planning considering direct load control and wind power uncertainty[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(3): 138-146.
- [10] DU Wenjuan, DONG Wenkai, WANG Haifeng. A method of reduced-order modal computation for planning grid connection of a large-scale wind farm[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1185-1198.
- [11] 冯艳, 吕文, 万淑娟, 等. 大规模新能源分布对目标网架的影响分析研究[J]. *电气时代*, 2017(9): 49-51.
- FENG Yan, LÜ Wen, WAN Shujuan, et al. Analysis and research on the impact of large-scale renewable energy distribution on the target grid of power system[J]. *Electric Age*, 2017(9): 49-51.
- [12] 梁海平, 程子玮, 孙海新, 等. 计及风电预测误差不确定性的风电参与网架重构优化[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(7): 151-158.
- LIANG Haiping, CHENG Ziwei, SUN Haixin, et al. Optimization of power network reconstruction with wind farm considering uncertainty of wind power prediction error[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(7): 151-158.
- [13] CUI Quansheng, BAI Xiaomin, DONG Weijie. Collaborative planning of distributed wind power generation and distribution network with large-scale heat pumps[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019, 5(3): 335-347.
- [14] LI Gengyin, LI Guodong, ZHOU Ming. Comprehensive evaluation model of wind power accommodation ability based on macroscopic and microscopic indicators[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(3): 215-226. DOI: 10.1186/s41601-019-0132-6.
- [15] 边巧燕, 徐开, 孙黎滢, 等. 考虑风电功率概率分布不确定性的输电系统规划[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(20): 60-65.
- BIAN Qiaoyan, XU Kai, SUN Liying, et al. Transmission system planning method considering wind power probability distribution[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(20): 60-65.
- [16] 谢仕炜, 胡志坚, 王珏莹, 等. 基于不确定随机网络理论的主动配电网多目标规划模型及其求解方法[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(5): 1038-1054.
- XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Jueying, et al. A multi-objective planning model of active distribution network based on uncertain random network theory and its solution algorithm[J]. *Transactions of China*

- Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1038-1054.
- [17] 郑爽, 杨晓楠, 句荣滨, 等. 两种启发式电网规划算法的比较与改进[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 109-116.
ZHENG Shuang, YANG Xiaonan, JU Rongbin, et al. Comparison and improvement of two heuristic algorithms for power network planning[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 109-116.
- [18] 徐君茹. 电力系统网架重构优化方法及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
XU Junru. Research on optimization method and application of power system architecture reconfiguration[J]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [19] CAZIN N, SCLEIDOROVICH P, WEITZENFELD A, et al. Real-time sensory-motor integration of hippocampal place cell replay and prefrontal sequence learning in simulated and physical rat robots for novel path optimization[J]. Biological Cybernetics: Advances in Computational Neuroscience, 2020, 114(2).
- [20] 王建雨. 多点导航在智慧旅游中的研究[J]. 信息技术与信息化, 2015(3): 116-118.
WANG Jianyu. The study of multi-navigation in smart tourism[J]. Information Technology and Informatization, 2015(3): 116-118.
- [21] ZHANG Luyan, LI Huihui, MENG Lei, et al. Ordering of high-density markers by the k-optimal algorithm for the traveling-salesman problem[J]. The Crop Journal, 2020, 8(5): 701-712.
- [22] ERRICO F, CRAINIC T G, MALUCELLI F, et al. A benders decomposition approach for the symmetric TSP with generalized latency arising in the design of semiflexible transit systems[J]. Transportation Science, 2016.
- [23] 魏书荣, 符杨, 黄玲玲. 太阳能光伏阵列集电网络规划与优化研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2124-2129.
WEI Shurong, FU Yang, HUANG Lingling. Research on the planning and optimization of the electrical collection network for solar photovoltaic[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015, 36(9): 2124-2129.
- [24] 张敏, 侯姗姗. 基于 GA 与 TSP 路径优化的城市中压配电网规划[J]. 电测与仪表, 2014, 51(23): 1-5.
ZHANG Min, HOU Shanshan. Urban medium voltage distribution network planning based on GA and TSP path optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(23): 1-5.
- [25] 徐小琴, 王博, 赵红生, 等. 基于交替方向乘法及最优潮流的输配电网协调规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 18-27.
XU Xiaoqin, WANG Bo, ZHAO Hongsheng, et al. Coordination planning method of a transmission and distribution network based on alternating direction method of multipliers and optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 18-27.
- [26] 张明, 马洲俊, 王勇, 等. 基于换流器 π 型等效模型交直流混合配电网潮流计算[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 30-37, 45.
ZHANG Ming, MA Zhoujun, WANG Yong, et al. Power flow calculation of AC/DC hybrid distribution network based on equivalent π -model of converter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 30-37, 45.
- [27] 尚宝平, 焦建强, 裴杰, 等. 一种求解 TSP 问题的多策略改进蚁群算法[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(2): 215-224.
SHANG Baoping, JIAO Jianqiang, PEI Jie, et al. Research on an improved multi-strategy ant colony algorithm for TSP problem[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49(2): 215-224.
- [28] GUO Ping, HOU Mengliang, YE Lian. MEATSP: a membrane evolutionary algorithm for solving TSP[J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 199081-199096.
- [29] NIENDORF M, KABAMBA P T, GIRARD A R. Stability of solutions to classes of traveling salesman problems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(4): 973-985.
- [30] 王云飞, 姜世公, 时光远, 等. 适应高可靠供电需求的城市中压配电网网架构建研究[J]. 供用电, 2020, 37(6): 33-39.
WANG Yunfei, JIANG Shigong, SHI Guangyuan, et al. Research on the construction of city area medium voltage distribution network adapted to the demand of high reliable power supply[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(6): 33-39.

收稿日期: 2020-11-03; 修回日期: 2021-03-11

作者简介:

刘 巨(1988—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网规划及运行、新能源与储能高效安全并网; E-mail: liujuhust@qq.com

赵红生(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划及运行; E-mail: 183575350@qq.com

杨东俊(1975—), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为电网规划及运行。

(编辑 许威)