

考虑负荷聚类分区与分布式发电接入的 配电网主次网架规划方法

徐 芮¹, 刘俊勇¹, 刘友波¹, 向 月¹, 张 逸², 陈金祥²

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要: 为提高配电网的经济性和电压水平, 从网络拓扑结构角度, 建立主次级配电网架。基于勒贝格公式的 K -means 聚类方法对供区进行最优分块, 并引入等效负荷点概念; 主级网架生成中构建考虑负荷节点和分布式电源出力的时序模型, 运用场景削减技术抽取场景并赋予权重, 采用雨刷摇摆搜索算法构造花瓣式网架结构; 以等效负荷点为电源点构建辐射状次级网架, 并以失负荷总量最小为目标为各区加设联络, 以降低线路投资, 提高系统可靠性。算例分析表明所提构建方法合理且有效, 主次网架结构具有较低的建设投资、较高且稳定的电压值和较小的网损。

关键词: 配电; 主次网架规划; 花瓣式结构; K -means 分区; 雨刷摇摆搜索算法; 时序模拟; 分布式发电

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.008

0 引言

目前, 我国城市配电网存在网架结构薄弱、电压合格率普遍较低、供电可靠性低等问题^[1]。同时, 随着主动配电网研究^[2]中分布式发电 DG (Distributed Generation) 的广泛接入, 其不确定性给网架规划带来新挑战, 如何构建具有较强适应性的配电网网架具有重要意义。

近年来, 国内外学者对配电网网架规划进行了大量的研究。文献[3]构建以投资、维护、网损总费用最低为目标函数, 考虑电压降落和电力平衡等约束的配电网规划模型; 文献[4]以总体负荷矩最小为目标函数综合考虑变电站规划和配电网线路规划的数学模型; 文献[5]基于设备全生命周期成本, 考虑规划方案初始投资、运行维护成本、停电成本、报废成本, 建立了配电网多阶段网架规划模型。然而文献[3-5]未考虑实际负荷点的地理信息情况。实际上, 空间负荷信息对配电网规划具有较大的影响, 不宜忽视。文献[6]探索考虑地理信息的网架规划研究, 利用 GIS 坐标系统标示规划区域, 进而辅助动态馈线路径的寻优, 但 2 点间仅考虑直线距离。传统配电网规划方案往往一次计及全部负荷节点, 某种程度上加大了求解难度, 尤其当配电网规模达到一定程度且 DG 渗透率较高时, 问题复杂度进一步增加, 故而在网架规划中可考虑分区的方法。文献[7]提出了

用于孤岛划分的分区方法, 对网架规划具有一定的参考价值; 文献[8]运用分区对模型降维, 得到了较好的应用效果, 但仅考虑辐射状网络结构, 可靠性有待提高。此外, 主动配电网背景下 DG 的渗透率逐渐提高, DG 主要以具有较强波动出力特性的风电和光伏为主被纳入规划^[9-10], 其出力时序性在传统规划中较少涉及。由上可知, 传统配电网网架规划中依靠分区的方法, 可减少决策变量, 降低计算维度, 避免陷入局部解, 且随着网络中 DG 渗透率的增长, 网络分层与分区有效结合可明确整个配电网层级关系, 快速进行负荷溯源, 充分挖掘各区 DG 的潜在利用率和负荷资源的均衡配置, 提高配电网综合规划品质。

配电网规划包含众多内容, 本文从网架结构着眼, 在变电站容量、位置既定的情况下提出一种基于负荷聚类分区及 DG 时序特性的主次网架规划方法。首先, 基于勒贝格公式的 K -means 聚类方法对供区进行最优分块, 并引入等效负荷点概念, 对多个具有不确定性的负荷和 DG 的不确定性进行聚类; 其次, 充分考虑负荷和 DG 的时序出力特性, 建立花瓣式结构的主级网架, 并运用雨刷摇摆搜索算法进行求解; 然后, 以等效负荷点为电源点构建辐射状次级网架, 并以失负荷总量最小为目标进行联络设计; 最后, 通过算例仿真验证分层模型的有效性。

1 配电网主次网架结构

配电网供区通常具有负荷点数目庞大且布局离散的特点, 本文针对单一变电站供电半径内各负荷进行分区处理。假设已知规划年负荷位置和初始容量、DG 的安装位置和容量变化, 配电网网架规划分层分区模型结构见图 1 (横轴 X 、纵轴 Y 表示地理尺寸)。

收稿日期: 2015-06-25; 修回日期: 2016-03-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2014AA-051901)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2014AA-051901)

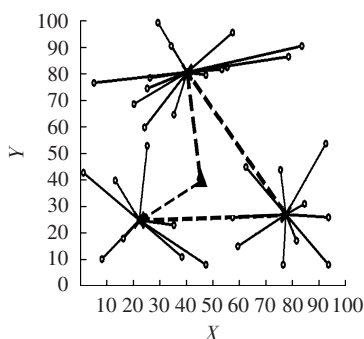


图 1 主次网架示意图

Fig.1 Schematic diagram of primary and subordinate distribution network

该网架为双层结构,图中三角形表示变电站,即电源点;叉形点为等效负荷点;圆圈表示实际负荷点。定义等效负荷点的地理位置为子区聚类中心,主级网架由电源点与等效负荷点间的连线构成,如图 1 中 4 条虚线所示;次级网架为表征实际负荷点与等效负荷点连接关系的供电路径,如图中实线所示。由图可知,构建主次网架的特点包括:配电网结构层次分明,脉络清晰,便于运行人员管理调度;实现主次有别,各层各区可按各自需求合理规划,提高设备利用率,并降低投资;缩短源荷间电气距离,提升电压水平;分区可等效区域内负荷/DG 的随机波动,且实现规划决策模型降维。

此外,为缩短线路长度,降低建设成本,本文网架基于最短路径原则构建。有研究表明,线路长度与线路故障次数呈现一定的正相关性^[11],长度的削减可进一步缩减维修和运行成本。

2 配电网主次网架的规划方法

2.1 基于地理信息的负荷及 DG 聚类分区

由图 1 知,在获取规划年负荷及 DG 二维地理信息基础上,结合聚类理论合理划分供区,并将聚类中心视为等效负荷点,用以代替各子区内的负载情况。一般而言,规划区内子区数越多,则整个供区的供电能力就越强,但随着子区数的增加,供电能力的提升幅度将逐渐降低,反而造成结构复杂性的增加和经济性的下降^[12-13];另一方面,过多的子区数会增加线路总长度,增大建设投资。因此,有必要在分区前确定最优分区数目。

现有聚类分析算法大体可分为基于划分、基于层次、基于密度、基于网格和基于模型的方法^[14]。其中,K-means 算法是一种启发式划分方法,具有简单、快速的优点,从而得到广泛应用。配电馈线一般沿公路和楼房的边缘布线,布置限制在类矩形网中,K-means 聚类的勒贝格公式计算的是 2 点间横坐标的差值和纵坐标的差值之和,较好地反映了线路走向和实际长度^[15]。以式(1)为目标函数,获取最优子

区数 M 及分区结果,式(2)为勒贝格公式。

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{n \in S_i} D_{ni} + \sum_{i \in S_M} D_{i0} \right\} \quad (1)$$

$$D_{ij} = |\Delta X_{ij}| + |\Delta Y_{ij}| \quad (2)$$

其中, D_{ni} 为第 n 个实际负荷点和第 i 个聚类中心的距离; ΔX_{ij} 、 ΔY_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 间横坐标差值和纵坐标差值; D_{i0} 为变电站至第 i 个聚类中心的距离; S_i 为 i 子区内实际负荷点的集合; M 为总子区数; S_M 为聚类中心的集合。式(1)前半部分表明实际负荷点到所属聚类中心的距离和,后半部分阐明聚类中心到变电站的距离之和。其中,DG 的处理方法与负荷点一致。

结合 K-means 算法的聚类分区步骤如图 2 所示。

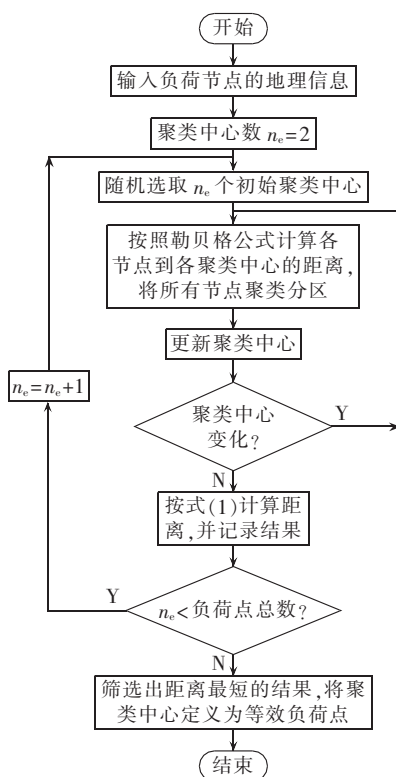


图 2 K-means 聚类算法流程图

Fig.2 Flowchart of K-means clustering algorithm

2.2 主级网架的构建方法

2.2.1 时序模型

DG 出力具有不确定性和波动性的特点,研究表明^[16-17]时序出力对规划的最终结果有一定的影响,故而本文在主级网架构建中应充分考虑等效负荷点的时序性,包含负荷节点的波动性和 DG 出力的不确定性,采用蒙特卡罗抽样获得时序数据。

a. 负荷。

本文在文献[18]的负荷模型基础上扩展延伸,考虑不同负荷类型特性差异,分别将需求水平因子细分为 24 种日因子和 12 类月因子,计入负荷波动和增长,可实现以小时为时间粒度,模拟任意时间尺

度负荷量的功能。因此,负荷类型为 m 的节点 i 在 t 时刻的负荷量可描述为:

$$S_{i,m,t}^D = S_{i,m,\text{base}}^D \times M_{Fm,t} \times D_{Fm,t} \times (1 + \alpha_m)^T \times R \quad (3)$$

其中, $S_{i,m,\text{base}}^D$ 为负荷类型为 m 的节点 i 的基准负荷; $M_{Fm,t}$ 和 $D_{Fm,t}$ 分别为 m 型负荷在 t 时刻对应的月需求水平因子和日需求水平因子; α_m 为负荷年增长率; T 为年份; R 为波动因子,通常取 0.9~1.1。

b. 风电出力。

风机的实际输出功率主要受风速的影响。在规划研究中,风速通常认为符合威布尔分布,根据历史气象数据可以得出规划区的风速时序特性曲线,按月分析求得 12 组形状参数 k_t 和比例参数 c_t ,可得 t 时刻改进的概率密度函数:

$$f(v_t) = \frac{k_t}{c_t} \left(\frac{v_t}{c_t} \right)^{k_t-1} \exp \left[- \left(\frac{v_t}{c_t} \right)^{k_t} \right] \quad (4)$$

其中, v_t 为 t 时刻抽取的风速; k_t 和 c_t 分别为 t 时刻对应的形状参数与比例参数。风电的输出功率 P_t 与风速 v_t 之间的函数关系可描述为^[19]:

$$P_t = \begin{cases} 0 & v_t < v_{\text{in}}^{\text{cut}}, v_t > v_{\text{out}}^{\text{cut}} \\ P_{\text{rated}} \frac{v_t - v_{\text{in}}^{\text{cut}}}{v_{\text{rated}} - v_{\text{in}}^{\text{cut}}} & v_{\text{in}}^{\text{cut}} \leq v_t \leq v_{\text{rated}} \\ P_{\text{rated}} & v_{\text{rated}} < v_t \leq v_{\text{out}}^{\text{cut}} \end{cases} \quad (5)$$

其中, v_{rated} 、 $v_{\text{in}}^{\text{cut}}$ 、 $v_{\text{out}}^{\text{cut}}$ 分别为额定风速、切入风速和切出风速; P_{rated} 为额定功率。

c. 光伏出力。

光伏发电的基本原理是根据光生伏打效应,利用光伏板组件将太阳能转化为电能。光伏电池板在 t 时刻的输出功率模型利用式(6)计算^[20]:

$$P_t = P_{\text{SIC}} \frac{r_t}{r_{\text{SIC}}} [1 + q(T_t - T_r)] \quad (6)$$

其中, P_{SIC} 、 r_{SIC} 分别为标准测试条件下光伏电池组件的最大输出功率和辐射强度; r_t 为 t 时刻实际辐射强度,其数值参考当地历史气象数据; q 、 T_t 、 T_r 分别为功率温度系数、电池温度和参考温度。

2.2.2 主级网架模型

现有馈线系统主要有辐射状、环状、网状 3 类。辐射状网架成本低且易于控制,但供电可靠性差;网状馈线系统有非常高的可靠性,但造价也相应大幅提高,且运行分析复杂;环状结构在投资成本不显著增大的同时供电可靠性能达到较高的水平^[15];花瓣式结构^[21]由于集合多环状网特点,具有高可靠性而得到应用,本文采用此结构搭建主级网架,并采用“闭环设计,开环运行”模式,馈线按 50% 的负荷设计,其基本结构如图 3 所示。图中三角形代表变电站/电源点,其余各点均为等效负荷点。虚线表示此线路配备常开开关,将回路中两侧总负荷量差值最小的线路设置为常开状态,可使正常运行状态下线路的负荷较为均衡。

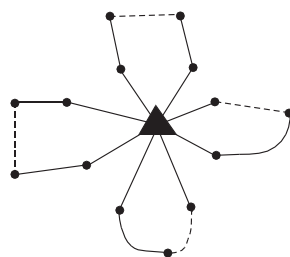


图 3 主级网架花瓣式结构

Fig.3 Petal-like structure of primary network

考虑到配电网复杂多样的运行工况,本节根据模拟所得时序场景数据,统计分析得到各等效负荷点数值,进而构建主级网架,基本步骤如下。

首先,确定各等效负荷点的数值,采用时序数据场景削减^[22]的方法实现。统计求取模拟时段中各等效负荷点对应的最大总负荷量和总 DG 安装容量,分别十等分制成 10×10 的框格,以 1 h 为时间粒度逐个将场景计入相应框格,一个时序场景计为 1 h,统计各框格的持续小时数。等效负荷点数值的获取用如下公式表述:

$$D_m = \sum_{k=1}^K \varepsilon_k \left[\alpha_k \left(\sum_{i=1}^n d_{i,t} \right)_{\text{max}} - \beta_k \sum_{j=1}^p g_j \right] \quad (7)$$

$$\varepsilon_k = \frac{t_k}{t_{\text{total}}} \quad (8)$$

其中, D_m 为第 m 个等效负荷点的数值; K 为场景削减后的场景总数; ε_k 为场景 k 的权重; α_k 和 β_k 分别为场景 k 下的负荷百分比和 DG 百分比; n 、 p 分别为在 m 子区内的负荷节点总数和 DG 节点总数; $d_{i,t}$ 为第 i 个负荷节点在 t 时刻的负荷需求值,此处求和后应取最大值; g_j 为第 j 个 DG 的安装容量; t_k 为场景 k 所表征框格的持续小时数; t_{total} 为总模拟小时数。以图 4 为例,箭头所指圆柱表示负荷需求在总量 40%~50% 区间内, DG 出力值为安装容量 0~10% 的场景的统计持续小时数是 712 h,用式(8)求得权重,在计算等效负荷点数值时用 $\alpha_k=50\%$ 和 $\beta_k=10\%$ 表征此框格内的场景集。

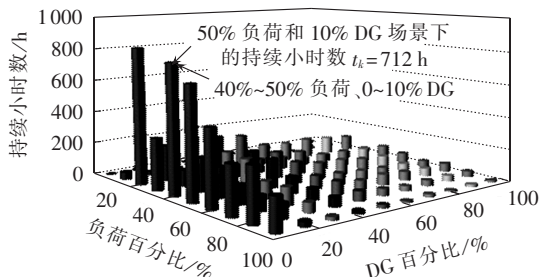


图 4 等效负荷点时序场景统计示意图

Fig.4 Schematic diagram of statistical time-sequence scenarios at equivalent load point

其次,确定花瓣式结构的“瓣”数。选定主级网架的线型, I_l 为其载流量,运用式(9)确定回路数:

$$N_h = \left\lceil \frac{\sum_{m=1}^n D_m}{\sqrt{3} \times U_n \times I_f \times \alpha} \right\rceil \quad (9)$$

其中, D_m 为第 m 个等效负荷点的数值; n 为供区内等效负荷点总数; U_n 为额定电压; α 为馈线裕度; $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。式(9)中分母表示单条线路的额定容量, 该式表示至少需要 N_h 条线路才可供应电力。

最后, 采用均质线路构建主级网架。以线路负荷方差最小为目标将所有等效负荷点均衡划分至不同环形回路中, 以提升线路利用率, 降低网架损耗, 平衡电压水平。主级网架模型如下所示, 模型采用 2.2.3 节中所述雨刷摇摆搜索算法求解。

$$\min \left(\sum_{h=1}^{N_h} \left(\sum_{m \in H} D_m - \frac{\sum_{m=1}^n D_m}{N_h} \right)^2 \right) \quad (10)$$

$$\text{s.t. } N_h \leq S \quad (11)$$

其中, N_h 为花瓣中含有的回路数; H 为回路 h 中等效负荷点集合; S 为变电站出线间隔数。其中, 模型中采用平方的算式一方面可保证结果非负, 另一方面可理解为惩罚因子, 使得求解所得各回路负荷量更均衡。

2.2.3 雨刷摇摆搜索算法

本文以雨刷摇摆搜索算法求解主级网架模型, 图 5 为该算法实施步骤。左上图为网架初态, 设定主级网由 3 个环网组成, X 轴为基准线, 直线 1、2、3 与其夹角分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 , 利用 3 条分割线将供区均分为 A 环、B 环、C 环区, 其中 A 环区为 $\theta_1 \sim \theta_2$ 范围, B 环区为 $\theta_2 \sim \theta_3$ 范围, C 环区为 $\theta_3 \sim \theta_1$ 范围; 为搜索出最优结果, 如右上图所示, 3 条分割线以旋转角度 $\Delta\alpha$ 的整数倍左右摇摆, 按式(10)计算得到最优结果, 重新确定 3 个环的范围; 左下图计算结果显示, 3 条分割线的位置均发生变动, 部分等效负荷点所属环有别于初态。运用该算法得到最优结果后, 即可构建花瓣式主级网架, 见图 5 右下图。主级网架构建成本为线路总长度(含虚线)与单位长度造价的乘积。

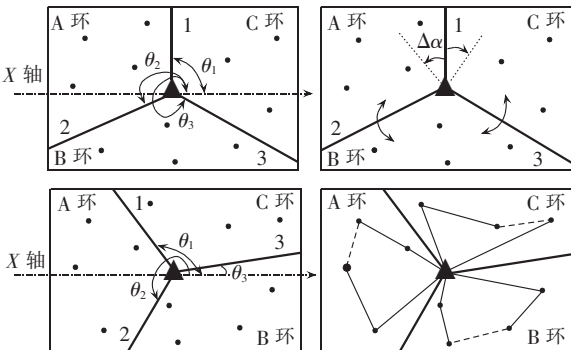


图 5 雨刷摇摆搜索示意图

Fig.5 Schematic diagram of wiper-swinging search algorithm

2.3 次级网架的构建方法

次级网架将等效负荷点视为电源点(非变电站), 采用各子区并行同步方式进行构建。首先将实际负荷点以辐射状结构连接于所属等效负荷点, 继而于各子区内部设置联络, 故同区应采用均质线路连接。各子区可按负荷需求选定线型, 依据式(12)确定次级线路应满足的最低电流值, 选线原则为所选线路额定电流不小于该计算结果, 即所选线路容量应满足该区负荷需求。

$$I_{f,m} = \frac{D_m}{\sqrt{3} \times U_n \times \beta} \quad (12)$$

其中, $I_{f,m}$ 为 m 分区的计算电流值; β 为线路电流裕度。

2.3.1 辐射状网架模型

次级网架单区域构建决策的数学模型如下, 其中 2 点间距离依旧采用式(2)计算。

$$\min \left(\sum_{(i,j) \in E_m} (x_{ij} \times C_{ij} \times L_{ij}) \right) \quad (13)$$

$$\text{s.t. } U_j \left(\sum_i I_{ij} - \sum_p I_{jp} \right) = d_j \quad \forall j \in S \quad (14)$$

$$\sum (x_{ij} + x_{ji}) \leq 1 \quad \forall (i,j) \in E_m \quad (15)$$

$$\sum_{(i,j) \in E_m} x_{ij} = n - 1 \quad (16)$$

$$U_i - U_j = R_{ij} I_{ij} \quad (17)$$

$$0 \leq I_{ij} \leq I_{ij(\max)} \quad (18)$$

$$0 \leq U_j \leq U_{n(\max)} \quad (19)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (20)$$

其中, E_m 为子区线路集合; S 为实际负荷点集合; n 为节点总数; x_{ij} 为 0/1 变量, 代表线路 ij 的连接情况, 1 为连接, 0 为不连接; C_{ij} 和 L_{ij} 分别为所选线型的单位造价和线路 ij 的长度; I_{ij} 和 I_{jp} 为线路电流, i 为 j 的父节点, p 为 j 的子节点; d_j 为节点 j 的负荷; U_i 和 U_j 分别为节点 i 和 j 的电压; $I_{ij(\max)}$ 为线路 ij 的最大额定电流值; $U_{n(\max)}$ 为节点最大额定电压值; R_{ij} 为线路阻抗。式(14)表述电力电量平衡, 式(15)、(16)确保网架连接为辐射状, 式(17)表述线路的电压降, 式(18)、(19)为线路电流约束和节点电压约束。该模型是 0-1 整数规划模型, 采用粒子群算法求解得出路径寻优方案, 得到连接矩阵 X 即可完成辐射状网架构建。其中, 常数矩阵 L 包含了各节点间的地理距离。

2.3.2 联络设置策略

在辐射状网架基础上, 次级网络各子区内部需加设联络线以提高电力传输的可靠性, 其设置目标为使子区内失负荷总量最小。任意选取子区内两实际负荷点连接作为联络线, 即对于 n 个节点的区域, 共有 C_n^2 种连接方案, 每种方案依据式(21)求得失负荷总量 E_{total} , 选择 E_{total} 最小的方案设置联络。

$$E_{\text{total}} = \sum_{m=1}^{M_i} PL_m \sum_{j=1}^n E_{m,j} \quad (21)$$

其中, M_i 为子区内线路总数(不含联络); P 为线路单位长度故障率; L_m 为线路 m 的长度; n 为实际负荷点总数; $E_{m,j}$ 为线路 m 切除后节点 j 的失负荷量, 若节点 j 在线路 m 切断后不受其影响或可通过联络进行负荷转供, 则 $E_{m,j}=0$ 。此外, 若某子区的实际负荷点均直接连接于等效负荷点, 没有多点串联的情况, 则不考虑加设联络。

3 算例分析

3.1 算例数据

算例采用 33 节点的待规划区, 网架电压等级为 10 kV, 首端电压设置为 1.05 p.u., 将其设计于 100×100 的坐标系中, 代表实际建设区域为 1km^2 的范围。负荷和分布式发电出力时序模型采用 2.2.1 节所构建模型, 各实际负荷点的坐标、负荷有功功率初始值、无功功率初始值、负荷类型、负荷年增长率见表 1, 其中, 节点 0 为电源点。分布式发电接入类型、接入节点及容量信息见表 2, 其中, 风速服从威布尔分

表 1 节点数据
Table 1 Load data of nodes

节点编号	坐标	负荷/(MV·A)	负荷类型	负荷年增长率
0	35,63	—	—	—
1	28,52	0.10+j0.01	居民	0.020
2	32,49	0.09+j0.02	居民	0.030
3	37,43	0.12+j0.01	工业	0.040
4	44,47	0.12+j0.01	商业	0.050
5	48,49	0.18+j0.02	工业	0.030
6	55,51	0.20+j0.01	商业	0.050
7	59,50	0.20+j0.04	商业	0.010
8	65,44	0.23+j0.02	商业	0.030
9	71,46	0.45+j0.02	商业	0.050
10	74,56	0.15+j0.03	商业	0.020
11	79,56	0.20+j0.04	居民	0.050
12	85,52	0.25+j0.04	居民	0.030
13	85,37	0.12+j0.02	居民	0.060
14	76,28	0.40+j0.01	居民	0.050
15	68,22	0.35+j0.02	工业	0.020
16	66,12	0.26+j0.02	工业	0.020
17	72,4	0.21+j0.04	工业	0.040
18	22,60	0.13+j0.02	工业	0.050
19	13,55	0.16+j0.04	居民	0.040
20	8,71	0.14+j0.04	居民	0.040
21	18,82	0.26+j0.04	工业	0.020
22	28,43	0.50+j0.03	工业	0.020
23	25,30	0.42+j0.04	工业	0.020
24	25,15	0.42+j0.05	居民	0.100
25	52,58	0.13+j0.03	居民	0.100
26	49,71	0.21+j0.03	商业	0.050
27	46,82	0.18+j0.02	商业	0.050
28	57,84	0.17+j0.07	商业	0.035
29	64,76	0.20+j0.06	商业	0.050
30	70,73	0.23+j0.07	商业	0.020
31	75,68	0.21+j0.04	工业	0.020
32	85,77	0.32+j0.04	工业	0.040

布, 其额定风速、切入风速和切出风速分别设置为 13.5 m/s、3 m/s、25 m/s; 光照强度参考值、电池温度参考值、光伏板的功率温度系数分别为 1000 W/m^2 、 25°C 、0.0025。架空线参数信息见表 3。

表 2 DG 接入节点数据
Table 2 DG data of nodes

节点号	DG 类型	容量/MW(接入时间/h)
16	WT	0.3(2000), 0.6(4000)
18	WT	0.2(500), 0.4(4000)
8	PV	0.5(1000), 1(3500)
14	PV	1(3000), 1.5(6000)

表 3 架空线参数
Table 3 Parameters of overhead lines

线路规格	单价/(元·km ⁻¹)	单位电阻/(Ω·km ⁻¹)	单位电抗/(Ω·km ⁻¹)	允许载流量/A
JKLYJ-10/50	5200	0.65	0.4	220
JKLYJ-10/70	7000	0.45	0.4	275
JKLYJ-10/120	9300	0.27	0.4	380
JKLYJ-10/240	15000	0.13	0.4	610

3.2 算例实施

(1) 聚类分区。

以实际负荷点二维坐标为输入数据, 运用式(1)、(2)计算不同分区数下的结果, 如图 6 所示。当分区数 $M=6$ 时存在最优解, 可将 6 个聚类中心作为等效负荷点(节点 $a-f$), 并统计各区的实际负荷点信息, 结果见表 4。

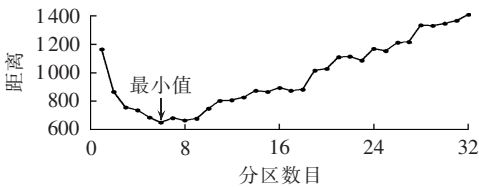


图 6 不同分区数计算结果
Fig.6 Calculative results of different partition quantities

表 4 等效负荷点信息
Table 4 Information of equivalent load points

等效负荷点序号	坐标	分区含有负荷点	功率/(MV·A)
a	52,50	4,5,6,7,25	$0.871+j0.112$
b	64,76	26,27,28,29,30,31,32	$1.560+j0.344$
c	68,12	15,16,17	$0.598+j0.124$
d	15.5,65.5	18,19,20,21	$0.546+j0.170$
e	28,43	1,2,3,22,23,24	$1.648+j0.160$
f	76,46	8,9,10,11,12,13,14	$1.077+j0.176$

(2) 时序模拟。

运用负荷、DG 时序模型模拟规划年节点的全年数据, 此数据涵盖负荷的增长、DG 安装容量的变化。图 7 展示了 24 h 内不同负荷类型的时序需求、风机时序出力和光伏时序出力; 图 8 为单负荷、单风机和单光伏时序模拟抽样的数据示意图, 用于展示全景信息。

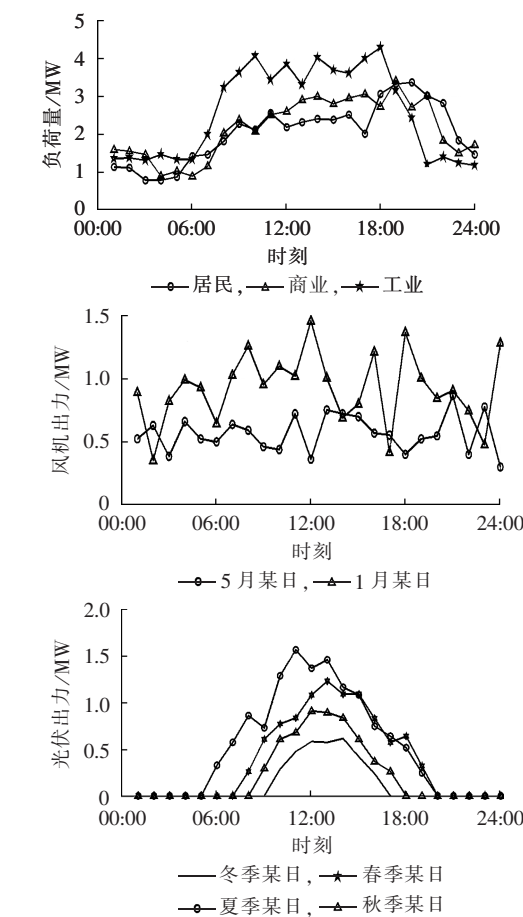


图 7 负荷和 DG 日时序模拟数据

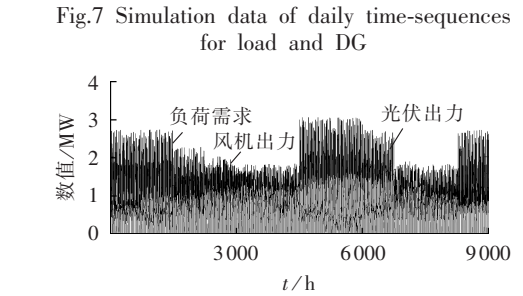


图 8 全景模拟数据
Fig.8 Simulation data of panorama

(3) 构建主级网架。

各实际负荷点聚类结果如表 4 所示,统计前一步骤所得时序模拟数据,由式(7)、(8)计算求得各等效负荷点(节点 $a-f$)的数值,见表 4 功率列结果。

经计算,供区的负荷总量为 $6337+j1086\text{ kV}\cdot\text{A}$ 。主级网架拟定采用 JKLYJ-10/240 型线路铺设,查询表 3 可知该线型的 $I_t=0.6\text{ kA}$,同时设置馈线裕度 $\alpha=0.5$,依据式(9)求解回路数为 2。运用雨刷摇摆搜索算法确定主级网架。

首先为两“雨刷”设置初始位置。如图 9 左图所示,将过变电站节点的横轴设置为基准轴,则雨刷 1、2 与基准轴的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 ,将供区分为 M 环区($\theta_1\sim\theta_2$)和 N 环区($\theta_2\sim\theta_1$),初态下 M 环区有 2 个等效负荷点 d 、 e ,N 环区有 4 个等效负荷点 a 、 b 、 c 、 f 。2

条分割线以旋转角度 $\Delta\alpha=5^\circ$ 的整数倍左右摇摆,按式(10)计算求取最优解。最终结果如图 9 右图所示,雨刷 1、2 的位置均发生变动,M 环区含有等效负荷点 a 、 c 、 e ,N 环区含有等效负荷点 b 、 d 、 f 。两环形回路的连接如图 9 所示,其中虚线代表常开线路,其设置原则为线路两侧总负荷量差值最小,故将联络线设置于 c 、 e 间和 b 、 f 间。

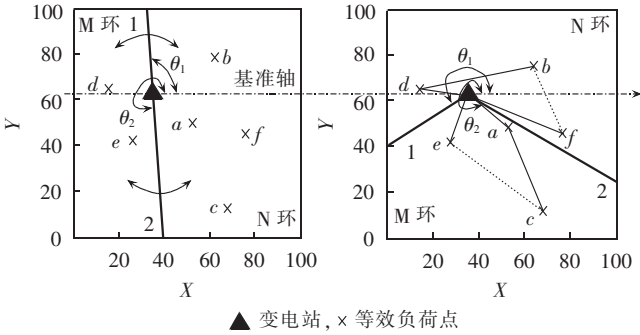


图 9 主级网架构建示意图
Fig.9 Schematic diagram of primary distribution network construction

(4) 构建次级网架。

次级网架建立前必先选定线型。结合式(12)计算各子区线路需满足的最低电流值,结果见表 5,其中,线路电流裕度 $\beta=0.75$,依据计算结果在表 3 中选定各区适宜线型。

表 5 子区线路选型		
Table 5 Line type selection for subdivisions		
子区序号	计算电流值/A	线型
A	67.598	JKLYJ-10/50
B	125.667	JKLYJ-10/50
C	47.025	JKLYJ-10/50
D	44.022	JKLYJ-10/50
E	127.463	JKLYJ-10/50
F	84.043	JKLYJ-10/50

用粒子群算法求解辐射状网架模型得到各区连接矩阵,建立辐射状网架如图 10 所示。

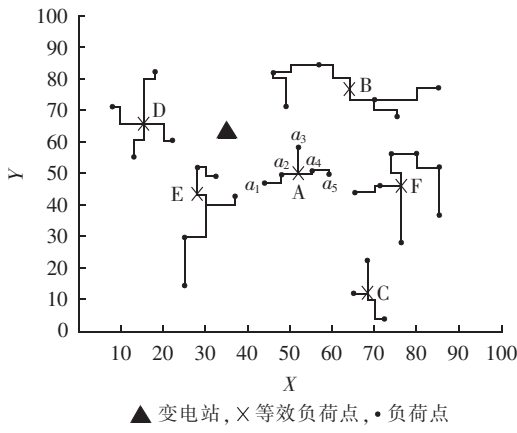


图 10 辐射状次级网接线图
Fig.10 Wiring diagram of radial subordinate distribution network

依据 2.3.2 节策略,将在 A、B、E、F 4 个子区的次级网架中设置联络,以 A 区为例说明:该区共有 5 个实际负荷点,则有 $C_5^2=10$ 种联络设置方案,按照式(21)计算失负荷总量,筛选出 E_{total} 最小方案,得到联络设置位置。完成以上设计,最终得到的主次网架接线如图 11 所示。

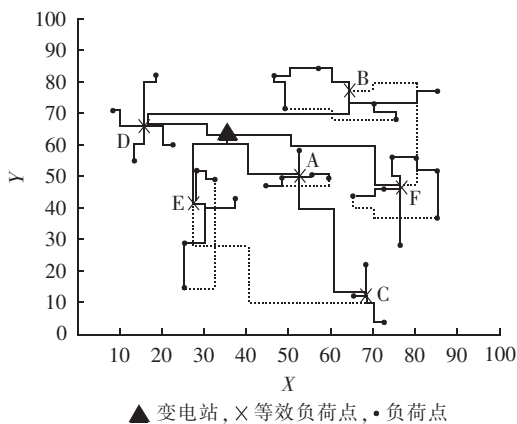


图 11 主次网架接线图

Fig.11 Wiring diagram of primary and subordinate distribution networks

3.3 对比分析

为说明主次网架特点,将其与 IEEE 33 节点标准接线方式(如图 12 所示)作对比分析。依据式(12)计算得线型为 JKLYJ-10/240,时序模拟两者全年的运行,分析仿真数据,对比电压水平、网架损耗和网架建设投资等指标。

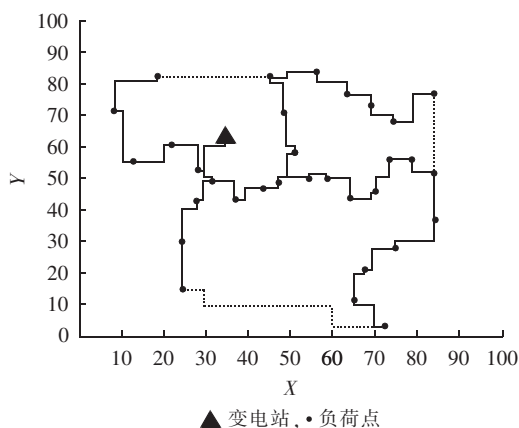


图 12 33 节点标准接线图

Fig.12 Standard wiring diagram of 33-bus system

由于全年数据量过于庞大,故着重展示 2 种接线结构某天的电压平均值和最低值,如图 13 所示,其中,实线代表主次网架的计算结果,虚线代表标准接线网架的结论。直线为平均电压值,带三角形的线条为最低电压值。表 6 为 2 种网架各指标的计算结果。

根据以上计算结果,可得如下结论。

a. 对比图 11 和图 12 可知,主次网架是双层结构,主级网为提高供电可靠性采用环形回路设计,组

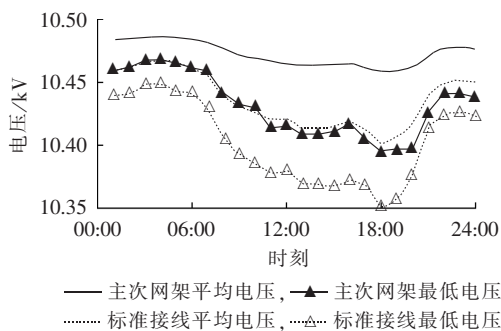


图 13 2 种网架 24 h 电压水平对比图

Fig.13 Comparison of 24-hour voltage level between two network structures

表 6 2 种网架指标对比

Table 6 Comparison of indices between two network structures

评价对象	主次级网架	标准接线网架
线路投资/元	75926	87150
平均总网损/MW	0.0181	0.0378
总网损方差	1.73×10^{-6}	7.82×10^{-6}
平均电压/kV	10.4738	10.4392
电压方差	1.09×10^{-6}	5.91×10^{-6}
平均最低电压/kV	10.4366	10.4069
最低电压值/kV	10.3663	10.3142
最低电压方差	7.06×10^{-6}	1.34×10^{-5}
网架层数	6	18

成花瓣式结构,次级网以失负荷量最小的目标加设联络,进一步提升网络可靠性;而标准接线模式为单层辐射状网架,仅在线路末梢少量考虑联络。

b. 据表 6 分析可知,主次网架可依据各子区负荷需求的差异设置不同线型,同时,双层网架采用不同的线路铺设,相比于标准接线模式,其经济性有一定的提升。此外,总网损及其方差数据表明,主次网架不仅有更少的平均网损,并且网损更集中于平均值附近,进一步表征了该网架较少出现网损特别严重的场景,其在网损方面的表现更优。

c. 电压方面,据图 13 显示,主次网架在此 24 h 内的电压平均值和最低值均高于标准接线模式下的电压水平,表明主次网架在电压方面的性能较优。表 6 中电压均值和方差的结果亦表明,即使在长时间尺度下,主次网架同样具有较高的电压值和较稳定的电压。这主要得益于主次网的构建方法,由网架层次对比可知,主次网的 6 层网架明显低于 18 层的标准接线网络,使得源荷间的电气距离减小,提升了电压质量。

4 结语

结合 DG 的时序特性,本文提出一种考虑负荷分区的配电网主次网架规划方法。其中,分区聚类采用基于勒贝格公式的 K-means 方法实现;主级网架生成中建立考虑时序模型和场景削减的优化模型,并

采用雨刷摇摆搜索算法构建花瓣式网架结构;次级网架在辐射状网络的基础上以负负荷总量最低为目标加设联络,以期增强网架的可靠性。算例仿真表明,主次网架的构建方法使得源荷间的电气距离减小,提升了电压质量;并在投资、网损等经济性方面有更优的表现和提升;网架结构清晰,便于调度、管理、决策;分层分区措施减少了规划时的决策变量,降低了计算难度。

参考文献:

- [1] 陈章潮,唐德光. 城市电网规划与改造[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [2] 方陈,张翔,程浩忠,等. 主动管理模式下含分布式发电的配电网网架规划[J]. 电网技术,2014,38(4):823-829.
FANG Chen,ZHANG Xiang,CHENG Haozhong,et al. Framework planning of distribution network containing distributed generation considering active management[J]. Power System Technology, 2014,38(4):823-829.
- [3] SAJAD N,SEYED H H,MEHRDAD A,et al. A framework for optimal planning in large distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(2):1019-1028.
- [4] 张李盈,范明天. 配电网综合规划模型与算法的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):59-64.
ZHANG Liying,FAN Mingtian. A new model and methodology for distribution network integration planning[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(6):59-64.
- [5] 苏海峰,张建华,梁志瑞,等. 基于LCC和改进粒子群算法的配电网多阶段网架规划优化[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):118-125.
SU Haifeng,ZHANG Jianhua,LIANG Zhirui,et al. Multi-stage planning optimization for power distribution network based on LCC and improved PSO[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):118-125.
- [6] BOULAXIS N,PAPADOPOULOS M P. Optimal feeder routing in distribution system planning using dynamic programming technique and GIS facilities[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002,17(1):242-247.
- [7] 伍言,刘俊勇,向月,等. 考虑光伏DG孤岛续航能力的配电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):112-118.
WU Yan,LIU Junyong,XIANG Yue,et al. Reliability evaluation for distribution system considering supplying ability of photovoltaic DG[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):112-118.
- [8] JIMÉNEZ-ESTÉVEZ G A,VARGAS L S,MARIANOV V. Determination of feeder areas for the design of large distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(3):1912-1922.
- [9] 白牧可,唐巍,张璐,等. 基于机会约束规划的DG与配电网架多目标协调规划[J]. 电工技术学报,2013,28(10):346-354.
BAI Muke,TANG Wei,ZHANG Lu,et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network incorporating distributed generation based on chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(10):346-354.
- [10] 向月,刘俊勇,刘友波,等. 考虑质心映射与路径解析的分布式电源优化配置搜索策略[J]. 电网技术,2012,36(6):133-140.
XIANG Yue,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. A search strategy for optimal configuration of distributed generation considering centroid mapping and path analysis[J]. Power System Technology, 2012,36(6):133-140.
- [11] 赵会茹,李娜娜,郭森,等. 配电网设备故障停电风险实时评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):89-94.
ZHAO Huiru,LI Nana,GUO Sen,et al. Real-time risk assessment on equipment failure outage of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):89-94.
- [12] 刘阳. 城市配电网网架结构优化两阶段研究[D]. 天津:天津大学,2012.
LIU Yang. A two-stage research on configuration optimization of urban distribution network[D]. Tianjin:Tianjin University,2012.
- [13] 葛少云,韩俊,刘洪,等. 中心城区10kV主干网络分析模型研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):15-20.
GE Shaoyun,HAN Jun,LIU Hong,et al. Analysis model of 10kV backbone network in center area[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):15-20.
- [14] KARYPIS G,HAN E H,KUMAR V. A hierarchical clustering algorithm using dynamic modeling[J]. IEEE Transactions on Computer,1999,32(8):68-75.
- [15] 范明天,刘健,张毅威,等. 配电系统规划参考手册[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [16] MOSTAFA N,RACHID C,MARIO P. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(5):2300-2310.
- [17] ZIO E,DELFANTI M,GIORGI L,et al. Monte Carlo simulation-based probabilistic assessment of DG penetration in medium voltage distribution networks[J]. Internal Journal of Electrical Power and Energy Systems,2015(64):852-860.
- [18] MAJID E J,MEHDI E,ABBAS F M. A dynamic fuzzy interactive approach for DG expansion planning[J]. Internal Journal of Electrical Power and Energy Systems,2012(43):1094-1105.
- [19] 曾博,刘念,张玉莹,等. 促进间歇性分布式电源高效利用的主动配电网双层场景规划方法[J]. 电工技术学报,2013,28(9):155-163.
ZENG Bo,LIU Nian,ZHANG Yuying,et al. Bi-level scenario programming of active distribution network for promoting intermittent distributed generation utilization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(9):155-163.
- [20] 张曦,康重庆,张宁,等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(6):6-13.
ZHANG Xi,KANG Chongqing,ZHANG Ning,et al. Analysis of mid/long term characteristics of photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(6):6-13.
- [21] 郑宗安,林平,陈家毅. 新加坡配网管理对福建电网的启示[J]. 国家电网,2007(2):80-83.
ZHENG Zongan,LIN Ping,CHEN Jiayi. Singapore distribution management revelation to Fujian Power Grid[J]. SGCC,2007(2):80-83.

Distributed generation & energy storage planning based on timing characteristics

SU Haifeng, HU Mengjin, LIANG Zhirui

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Based on the timing characteristics of wind power, photovoltaic generation and five load types, a model with the minimum sum of investment, maintenance cost, power purchase cost, reliability cost and environmental pollution compensation cost of distribution network as its objective is built for the locating and sizing of DG(Distributed Generation) and ES(Energy Storage) device, which adopts the coordinative optimization strategy of load, DG and ES to optimize the capacity and power of sodium-sulfur cell for improving the accommodation ability of distribution network to DG with the prerequisite that not too many ESs are installed and the economy and reliability of distribution network are guaranteed. The particle swarm optimization algorithm is adopted to solve the model for a typical case and the results verify the correctness and effectiveness of the proposed model and method.

Key words: distributed power generation; energy storage; locating and sizing; timing characteristics; coordination and optimization; particle swarm optimization algorithm

(上接第 55 页 continued from page 55)

[22] LUIS F O, CHRIS J D. Distribution network capacity assessment: variable DG and active networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 87-95.

作者简介:

徐 芮(1990—),女,四川成都人,硕士研究生,研究方向为配电网规划与运行(E-mail: 569801335@qq.com);



徐 芮

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力市场、电力系统稳定与控制、分布式发电及智能电网;

刘友波(1983—),男,四川成都人,讲师,博士,研究方向为主动配电网规划及运行分析(E-mail: liuyoubo@scu.edu.cn)。

Primary and subordinate distribution network planning considering load clustering partition and DG integration

XU Rui¹, LIU Junyong¹, LIU Youbo¹, XIANG Yue¹, ZHANG Yi², CHEN Jinxiang²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to improve the economy and voltage profile of distribution network, the primary and subordinate distribution networks are built from the aspect of network topology. The K-means clustering method based on Lebesgue formula is used for the optimal partition of power-supply area and the concept of equivalent load point is introduced. The time-sequence model considering load nodes and DG(Distributed Generation) outputs is built for the construction of primary network, the scenario reduction technology is applied to extract the scenarios and assign the weights, and the wiper-swinging search algorithm is adopted to construct the petal-like primary network. The radial subordinate network is constructed with the equivalent load points as the power sources, and the tie lines are designed with the minimum total load loss as the objective to decrease the investment and improve the system reliability. Case analysis shows that, the proposed method is rational and effective; the constructed network structure needs less investment, achieves higher and stable voltage and has less network loss.

Key words: electric power distribution; primary and subordinate network planning; petal-like structure; K-means partition; wiper-swinging search algorithm; time-sequence simulation; distributed power generation