

含分布式能源的交直流混合配电网网络配置规划模型

许 烽¹, 陆 翌¹, 李 莉², 倪晓军¹, 丁 超¹, 高 辉³, 胡依林³

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014;

2. 国网南京供电公司, 南京 210012; 3. 南京邮电大学, 南京 210023)

摘要: 提出一种针对交直流混合配电网的新型网络配置规划模型。考虑到每条支路和母线选用直流还是交流的不确定性, 以及负载需求和分布式电源随机接入行为, 该模型确定了交直流混合配电网支路和母线的最佳配置。模型采用蒙特卡洛仿真技术, 将网络配置规划问题划分为2个嵌套优化问题来求得最优解决方案: 主问题以系统建设成本和运行成本为目标函数, 使用遗传算法来求得最优交直流混合配置; 子问题使用经济调度细化主问题中运行成本的计算, 确定遗传算法求得的每种配置的最佳潮流解决方案。算例采用含光伏、风电、储能及电动汽车的13节点待规划网络, 分别采用交直流混合配置和传统交流配置对算例进行规划, 并就模型有效性和相关成本节约量进行比较。结果表明, 交直流混合配电网在各方面均优于传统交流配电网。

关键词: 交直流配电网; 分布式电源; 电动汽车; 配电网规划; 经济调度

文章编号: 1007-1881(2019)08-0077-08

DOI: 10.19585/j.zjdl.201908013

中图分类号: TM721.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Configuration Planning Model for AC/DC Hybrid Distribution Network with Distributed Energy

XU Feng¹, LU Yi¹, LI Li², NI Xiaojun¹, DING Chao¹, GAO Hui³, HU Yilin³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210012, China;

3. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: This paper proposes a new network configuration planning model for AC/DC hybrid distribution network. Given the selection uncertainty of DC and AC of each bypass and bus as well as the load demand and random access of distributed power, the model determines the optimal AC/DC hybrid configuration of the AC/DC hybrid distribution network bypass and bus. The model adopts Monte Carlo simulation technology and divide network configuration planning into two nested optimization problems to find the optimal solution: in the major problem, the system construction cost and operation cost are taken as the objective functions, and genetic algorithm is used to solve the optimal AC/DC hybrid configuration; in the sub-problem, the economic dispatch is used to refine the calculation of the operation cost in the main problem, and determine the optimal power flow solution for each configuration obtained by the genetic algorithm. The example uses a 13-node to-be-planned network containing photovoltaic, wind power, energy storage, and electric vehicles. At the same time, the AC and DC hybrid configuration and the traditional AC configuration are used to plan the examples to compare the model effectiveness and related cost savings. The results show that the AC/DC hybrid distribution network is superior to the traditional AC distribution network in all aspects.

Keywords: AC/DC hybrid distribution network; distributed generation; electric vehicle; distribution network planning; economic dispatch

0 引言

近年来, 人们对绿色技术的兴趣显著增加,

例如 EV(电动汽车)、PV(光伏)能源和其他可再生 DG(分布式电源)广受关注。预计到 2019 年, 全球 PV 能源增长将超过 376 GW。2014—2015 年, EV 的全球市场销售额增长了 70%, 预计到 2020 年将达到 2 000 万辆。未来的 DS(配电系统)

除了需要适应这些新型技术之外,还需要支持将额外的电池存储系统与可再生 DG 整合,合理消纳大量并网的 DG。近年来,国家发布了大量政策来促进光伏发电和风力发电等可再生能源的应用,同时对 EV 有许多优惠政策,可以预见未来的配电网一定会出现大量的直流负载和输出直流电的 DG。因此,如果要为所有类型(交流和直流)的负载提供最佳调节,未来电网应该实现交直流混合配电。混合 DS 可以最佳地管理未来智能电网的组件和资源,包括可再生 DG, EV 和储能系统。

关于在 DS 中结合 DC(直流)和 AC(交流)功率的技术经济效益已有不少研究成果。如在 DS 中使用 DC 电源可以改善馈线的功率处理能力和电压分布^[1],同时可以获得更高的传输容量和更低的功率损耗^[3];采用交直流混合系统,可以有效降低与可再生 DG 一起使用的电池存储设备的成本^[2]并可避免配电变压器过载^[4];在住宅和商业建筑中使用直流电源的诸多利益也在文献[5-7]中得到证明。

关于 DS 的规划问题国内外也有了许多研究成果。多数研究都是采用多目标优化算法来解决混合 DS 的扩展规划问题^[8],即以最小化投资成本和最大化系统可靠性为目标函数构建数学模型并进行求解^[9]。如前所述,未来的 DS 应该成为 AC-DC 混合型,以解决直流负载和直流 DG 高穿透性的问题。因此,配电网规划人员需要考虑 AC/DC 负载馈线的最佳路径、尺寸和类型。然而,AC-DC 混合 DS 领域的研究依然处于起步阶段,仍然缺乏有效的混合 DS 规划方法。

文献[12-16]研究了 AC-DC 混合电力系统的最佳规划,其中多数都集中在 HVDC(高压直流)系统上。例如,文献[12]提出用于 AC-DC 混合传输系统的扩展规划算法,该算法从预定义的一组候选中选择 AC-DC 传输线路的最佳组合。文献[13]引入智能目标规划算法用以提高包含 VSC(电压源换流器)的 HVDC 输电系统的经济调度效率,该算法优先考虑现有传输系统中的潜在 DC 线路位置,以便确定为哪些场景提供最佳解决方案。文献[14]提出一种多目标优化算法来解决传输扩展规划问题,考虑 AC/DC 线路以最小化总投资成本和有功功率损耗。文献[15]提出一种 OPF(最佳功率流)方法,该方法基于 VSC 的 VSC-MTDC

(多终端直流输电)模型,可用于解决在现有交流电网中安装直流输电线路的相关场景。但是上述文献均是对特定预定义场景进行的求解,这就导致了候选 DC 线路的数量是有限的,不包含所有可能的 AC-DC 配置,且不适用于复杂的混合 DS。这些方法不能考虑到所有可能的 AC-DC 配置方案并缺少灵活性。针对这些问题,本文提出了一种新型规划模型,该模型具有灵活通用的特点,适用于确定混合 DS 的最佳配置。

本文提出的规划模型考虑了负荷需求和基于可再生 DG 的随机行为。将描述混合 DS 的 AC-DC 配置的 3 个二进制矩阵作为规划模型的决策变量;且模型中所有母线和支路选择都是可互换的,可根据需要使用 AC 或 DC,以最大限度地降低 DS 安装和运行成本,并将 VSC 用于 AC-DC 功率转换;模型通过使用 MCS(蒙特卡罗模拟)技术来实现对随机变化的考虑。使用该模型对混合 DS 进行测试,算例混合 DS 包括 PV、风力 DG 和 EV 充电站。同时使用传统 AC 计划技术对该算例进行求解,并与混合规划模型求解进行对比。结果表明:在负荷相同、分布式电源大小和分布相同的前提下,交直流配电网在运行成本、线路建设费用、VSC 安装费用和电源安装成本等方面都比传统交流配电网更为经济。

1 配电网模型设计

图 1 显示了一个多区 DS,它包括不同类型的 AC 和 DC 负载、发电机。目标是规划一个 AC-DC 混合系统,使该系统能够最佳地适应包括负载和发电机在内的所有系统资源。系统混合规划方案基于 3 个主要决策变量:系统母线的类型(AC 或 DC);母线之间是否有支路连接;支线类型(AC 或 DC)。

网络配置由 3 个二进制矩阵(W , U 和 D)描述,这些矩阵用以表示规划模型中的二元决策变量:

(1)母线类型矩阵 $W(N_b \times 1)$ 。该矩阵描述混合 DS 中每条母线的类型(AC 或 DC),其中, N_b 为节点数。如果母线 n 是 AC,则 $W(n)=0$;如果母线 n 是 DC,则 $W(n)=1$ 。

(2)连接矩阵 $U(N_b \times N_b)$ 。该矩阵描述混合分配网络的连接,如果没有线路连接母线 n 和 m ,

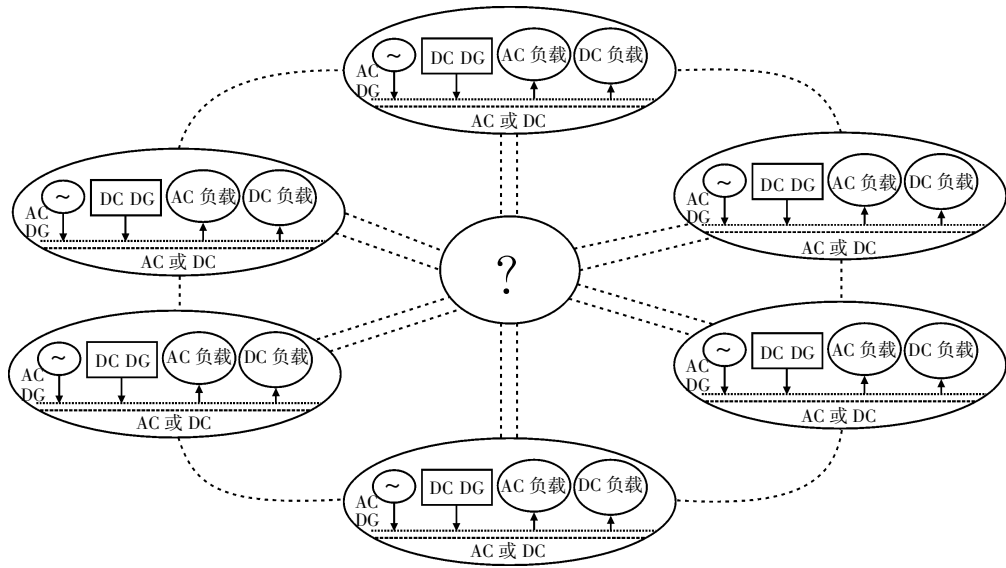


图1 多区DS规划问题

则 $U(n, m)=0$; 如果有线路连接母线 n 和 m , 则 $U(n, m)=1$ 。

(3) 线型矩阵 $D(N_b \times N_b)$: 该矩阵描述混合 DS 中每条支线的类型 (AC 或 DC), 如果连接母线 n 和 m 的线是 AC, 则 $D(n, m)=0$; 如果连接母线 n 和 m 的线是 DC, 则 $D(n, m)=1$ 。

混合 DS 中的每条母线都可以是交流或直流, 如图 2 和图 3 所示。

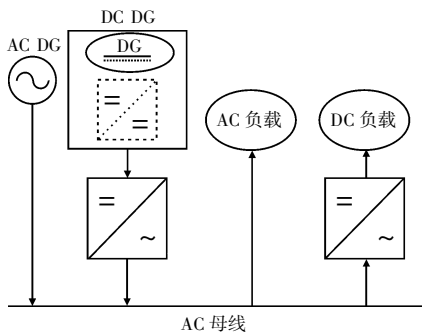


图2 交流母线结构

除了传统的交流负载和交流发电机外, 混合 DS 还可以包括 EV、直流发电机及 PV 电池板等直流负载。

2 规划模型设计

规划目标是找到实现最小规划成本的最佳系统配置, 下面重点讨论目标函数和约束条件。

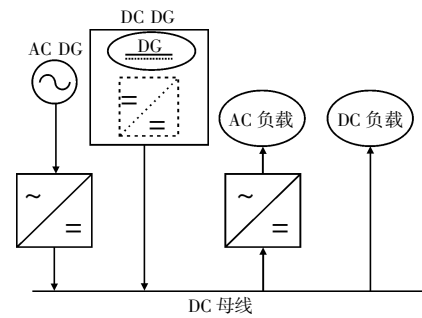


图3 直流母线结构

2.1 目标函数

建立主优化问题的目标函数 Z_{\min} 为最小化总成本 PCV, 如式(1)所示:

$$\min Z_{\min} = PCV \quad (1)$$

其中:

$$PCV = IC + RC \quad (2)$$

$$RC = \sum_{t=1}^{T_p} \frac{AOMC_t}{(1+d)^t} \quad (3)$$

$$AOMC_t = 8760 \times E(C_{\text{OPF},t}) + \beta \cdot IC \quad (4)$$

式中: IC 为电源安装成本; RC 为电源运行成本; d 为折现率; $AOMC_t$ 为第 t 年内的运行成本; T_p 为电源使用年限; $E(C_{\text{OPF},t})$ 为经济调度后每小时电源运行成本; β 为货币每年贬值的比率。

为了得到 OPF 的解, 建立子优化问题的目标函数, Z_{sub} 为最小化交流电源和直流电源所用的总成本, 如式(2)所示:

$$\min Z_{\text{sub}} = \sum_{i=1}^{I_{\text{ac}}} C_{G_i}^{\text{ac}} P_{G_i}^{\text{ac}} + \sum_{j=1}^{J_{\text{dc}}} C_{G_j}^{\text{dc}} P_{G_j}^{\text{dc}}, \quad (5)$$

式中: $P_{G_i}^{\text{ac}}$ 表示交流电源 i 的功率; $P_{G_j}^{\text{dc}}$ 表示直流电源 j 的功率; $C_{G_i}^{\text{ac}}$ 表示交流电源 i 的成本系数; $C_{G_j}^{\text{dc}}$ 表示直流电源 j 的成本系数; I_{ac} 表示交流电源的数量; J_{dc} 表示直流电源的数量。

2.2 约束条件

(1) 配置矩阵变量约束

配置矩阵二进制变量的整数约束表示如下:

$$W(n) \in \{0, 1\}, \quad \forall n \in N_b, \quad (6)$$

$$U(n, m) \in \{0, 1\}, \quad \forall n, m \in N_b, \quad (7)$$

$$D(n, m) \in \{0, 1\}, \quad \forall n, m \in N_b, \quad (8)$$

(2) 母线连接约束

为避免系统中母线被隔离或过度连接, 约束如下:

$$\sum_{m=1}^{N_b} U(n, m) \leq L^{\text{max}}, \quad L^{\text{min}} \leq L^{\text{max}} \leq N-1, \quad \forall n \in N_b, \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^{N_b} U(n, m) \geq L^{\text{min}}, \quad 1 \leq L^{\text{min}} \leq L^{\text{max}}, \quad \forall n \in N_b, \quad (10)$$

式中: L^{min} 和 L^{max} 分别表示母线支路数的上、下限。

(3) 有功和无功功率限制

有功和无功功率限制如式(11)–(13)所示:

$$P_{G_i}^{\text{ac-min}} \leq P_{G_i}^{\text{ac}} \leq P_{G_i}^{\text{ac-max}}, \quad \forall i \in I_{\text{ac}}, \quad (11)$$

$$P_{G_j}^{\text{dc-min}} \leq P_{G_j}^{\text{dc}} \leq P_{G_j}^{\text{dc-max}}, \quad \forall j \in J_{\text{dc}}, \quad (12)$$

$$Q_{G_i}^{\text{ac-min}} \leq Q_{G_i}^{\text{ac}} \leq Q_{G_i}^{\text{ac-max}}, \quad \forall i \in I_{\text{ac}}, \quad (13)$$

式中: $P_{G_i}^{\text{ac}}$, $Q_{G_i}^{\text{ac}}$, $P_{G_j}^{\text{dc}}$ 分别为交流电源的有功出力、无功出力和直流电源的有功出力; $P_{G_i}^{\text{ac-min}}$, $P_{G_i}^{\text{ac-max}}$, $Q_{G_i}^{\text{ac-min}}$, $Q_{G_i}^{\text{ac-max}}$, $P_{G_j}^{\text{dc-min}}$, $P_{G_j}^{\text{dc-max}}$ 分别为其上、下限。

(4) 功率平衡约束

每条总线的有功和无功功率平衡约束由式(14)–(15)给出:

$$P_n^{\text{inj}} = P_n^{\text{cal}}, \quad \forall n \in N_b, \quad (14)$$

$$Q_n^{\text{inj}} = Q_n^{\text{cal}}, \quad \forall n \in N_b, \quad (15)$$

式中: P_n^{inj} , Q_n^{inj} 分别为节点实际注入有功、无功功率; P_n^{cal} , Q_n^{cal} 分别为其潮流计算结果。

P_n^{inj} , P_n^{cal} , Q_n^{inj} 和 Q_n^{cal} 的等式分别如式(16)–(19)所示:

$$P_n^{\text{inj}} = \overline{W}_n \left(P_{G_n}^{\text{ac}} - P_{L_n}^{\text{ac}} + \eta_{c-n-i} P_{G_n}^{\text{dc}} - \frac{P_{L_n}^{\text{dc}}}{\eta_{c-n-r}} \right) + W_n \left(P_{G_n}^{\text{ac}} - P_{L_n}^{\text{ac}} + \eta_{c-n-i} P_{G_n}^{\text{dc}} - \frac{P_{L_n}^{\text{dc}}}{\eta_{c-n-r}} \right), \quad \forall n \in N_b, \quad (16)$$

式中: $P_{G_n}^{\text{ac}}$ 表示母线 n 上的交流发电机的有功功率; $P_{G_n}^{\text{dc}}$ 表示母线 n 上直流发电机的输出功率; $P_{L_n}^{\text{ac}}$ 表示母线 n 上交流负载的有功需求; $P_{L_n}^{\text{dc}}$ 表示母线 n 上直流负载的功率需求; η_{c-n-i} 表示母线 n 上作为逆变器的变换器的效率; η_{c-n-r} 表示母线 n 上作为整流器的变换器的效率; $\overline{W}_n = (1 - W_n)$ 。

$$P_n^{\text{cal}} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{N_b} U_{nm} [\overline{W}_n \overline{W}_m D_{nm} (V_n^2 G_{nm} - V_n V_m (G_{nm} \cos \theta_{nm} + B_{nm} \sin \theta_{nm}))] + \overline{W}_n \overline{W}_m D_{nm} [G_{nm}^{\text{dc}} (M_{nm}^{-2} V_n^2 - M_{nm}^{-1} V_n V_m)] + \left(\frac{a_1}{\eta_{c-n-r}} + b_1 \eta_{c-n-i} \right) + \overline{W}_n \overline{W}_m D_{nm} [G_{nm}^{\text{dc}} (M_{nm}^2 V_n^2 - M_{nm}^{-1} V_n V_m)] + \left(\frac{a_1}{\eta_{c-n-r}} + b_2 \eta_{c-n-i} \right) + \overline{W}_n \overline{W}_m D_{nm} [G_{nm}^{\text{dc}} (V_n^2 - M_{nm}^{-1} V_n V_m)] + W_n W_m D_{nm} [G_{nm}^{\text{dc}} (V_n^2 - V_n V_m)], \quad (17)$$

式中: V_n 和 V_m 分别表示母线 n 和 m 上的电压大小; G_{nm} 表示母线 n 和母线 m 之间的交流线路的电导率; G_{nm}^{dc} 表示母线 n 和母线 m 之间直流线路的电导率; θ_{nm} 表示母线 n 和母线 m 的电压相角差; M_{nm} 表示母线 m 上母线 m 和 n 之间连接的 VSC 的调制指数; M_{nm} 表示母线 n 上母线 n 和 m 之间连接的 VSC 的调制指数; $\overline{D}_{nm} = (1 - D_{nm})$; $\overline{W}_m = (1 - W_m)$ 。

$$Q_n^{\text{inj}} = \overline{W}_n (Q_{G_n}^{\text{ac}} - Q_{L_n}^{\text{ac}} + Q_{G_n}^{\text{dc}} - Q_{L_n}^{\text{dc}}), \quad \forall n \in N_b, \quad (18)$$

式中: $Q_{G_n}^{\text{ac}}$ 表示母线 n 上交流发电机的无功功率; $Q_{L_n}^{\text{ac}}$ 表示母线 n 上交流负载的无功需求; $Q_{G_n}^{\text{dc}}$ 表示交流母线 n 上直流发电机的转换器注入的无功功率; $Q_{L_n}^{\text{dc}}$ 表示交流母线 n 从直流负载的转换器吸收的无功功率。

$$Q_n^{\text{cal}} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{N_b} U_{nm} \{ \overline{W}_n \overline{W}_m D_{nm} [-V_n^2 B_{nm} - V_n V_m (G_{nm} \sin \theta_{nm} - B_{nm} \cos \theta_{nm})] + \overline{W}_n \overline{W}_m D_{nm} Q_{c-n} + \overline{W}_n \overline{W}_m D_{nm} Q_{c-n} \}, \quad (19)$$

式中: B_{nm} 表示母线 n 和母线 m 之间的交流线路的导纳; Q_{c-n} 表示母线 n 和母线 m 之间 VCS 交流侧的无功功率。

a_1 , b_1 , a_2 和 b_2 的值取决于功率流的方向, 并由式(20)–(23)给出:

$$a_1 = 0.5 [1 + \text{sign}(M_{nm}^{-1} V_n - M_{nm}^{-1} V_m)], \quad (20)$$

$$b_1 = 0.5 [1 - \text{sign}(M_{nm}^{-1} V_n - M_{nm}^{-1} V_m)], \quad (21)$$

$$a_2 = 0.5 [1 + \text{sign}(M_{nm}^{-1} V_n - V_m)], \quad (22)$$

$$b_2 = 0.5 [1 - \text{sign}(M_{nm}^{-1} V_n - V_m)], \quad (23)$$

其中:

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \end{cases} \quad (24)$$

(5) 电源安全限制

电源安全限制包括每条总线的电压幅度限制和电压角限制以及每条线路的容量限制, 表示如下:

$$V_n^{\min} \leq V_n \leq V_n^{\max}, \forall n \in N_b, \quad (25)$$

$$\theta_n^{\min} \leq \theta_n \leq \theta_n^{\max}, \forall n \in N_b, \quad (26)$$

$$S_{nm} \leq S_{nm}^{\max}, \forall n, m \in N_b, \quad (27)$$

其中:

$$S_{nm} = \sqrt{P_{nm}^2 + Q_{nm}^2}, \quad (28)$$

式中: S_{nm} 为支路 nm 上流过的复功率; θ_n 为母线 n 的电压角; P_{nm} 表示从母线 n 流入母线 m 的有功功率; Q_{nm} 表示从母线 n 流入母线 m 的无功功率。

(6) 逆变器限制

AC-DC 转换器约束包括系统中每个转换器的容量限制和调制指数限制, 表示为:

$$S_c \leq S_c^{\max}, \forall c \in N_c, \quad (29)$$

$$M_{nm}^{\min} \leq M_{nm} \leq M_{nm}^{\max}, \forall n, m \in N_b, \quad (30)$$

其中:

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2}, \quad (31)$$

式中: S_c 为逆变器传输功率; S_c^{\max} 为其上限; M_{nm} 为逆变器调制比; M_{nm}^{\max} 和 M_{nm}^{\min} 分别为其上、下限; N_c 为逆变器数目; P_c 为 VSC 交流侧的有功功率; Q_c 为 VSC 交流侧的无功功率。

3 规划方法

规划程序的输入为系统中的 AC/DC 负载和 DG 模型, 输出为系统二进制配置矩阵 (\mathbf{W} , \mathbf{U} 和 \mathbf{D}), 它们可以确定最佳混合配置方案。使用 MCS 技术模拟可再生 DG 和负载需求相关的随机变化。

3.1 规划模型程序

规划模型程序的流程如图 4 所示, 具体步骤如下。

步骤 1: 初始化 GA 群体, 每个 GA 染色体代表一种可能的 AC-DC 配置。对当前 GA 生成中的每个染色体执行步骤 2—步骤 6。

步骤 2: 采用 MCS 技术模拟场景, 选择包含随机变量随机值的 MCS 场景, 即负载需求和可再生 DG。

步骤 3: 解决子优化问题, 找到所选 MCS 场

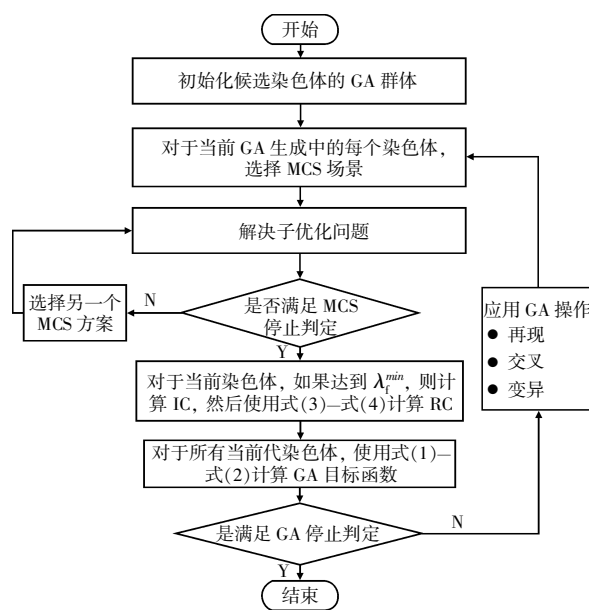


图 4 随机规划模型流程

景的最优运行成本。

步骤 4: 检查 MCS 停止标准。针对不同 MCS 场景的 OPF 解决方案由随机变量 C_{OPF} 表示。可以使用固定数量的迭代^[16, 19-22]或文献[17]中描述的停止标准来终止 MCS 过程。重复步骤 2—步骤 4, 直到满足 MCS 停止标准。

$$\frac{\sigma(C_{\text{OPF}})}{E(C_{\text{OPF}})} \leq \varepsilon, \quad (32)$$

式中: $\sigma(C_{\text{OPF}})$ 表示 C_{OPF} 的标准差; $E(C_{\text{OPF}})$ 表示 C_{OPF} 的期望值; ε 为实数因子, 可根据场景情况选择。

步骤 5: 可行 OPF 解决方案的数量占解决方案总数的百分比定义为 λ_f 。为了保持可接受的随机风险水平, λ_f 的最小允许值 (即 λ_f^{\min}) 选择为 95%。 λ_f^{\min} 的值越高, 随机风险水平就越低。如果当前的网络配置不满足随机风险水平要求则丢弃此配置。

步骤 6: 对于当前配置, 计算网络线路和转换器的安装成本 IC, 然后使用式(3)和式(4)计算运行成本 RC。

对于当前 GA 生成中的所有染色体, 使用式(1)和式(2)计算 GA 成本函数。

步骤 7: 检查 GA 停止标准, 如果不满足要求, 则通过应用 GA 操作 (再现、交叉和变异) 更新 GA 生成。然后重复步骤 2—步骤 8, 直到满足

GA 停止标准。

3.2 优化技术

拟议的规划策略使用 2 个优化平台，即 GA 和 GAMS(一般代数建模系统)。首先，GA 生成所有可能的 AC-DC 配置。对于每种配置，GA 染色体描述出基于二进制矩阵(W , U 和 D)的配置方案。GAMS 用于解决由 GA 生成的每个配置的 OPF 问题。OPF 问题由 CONOPT 求解器解决，采用广义简化梯度方法。

4 案例分析

案例所采用的系统包括 13 条母线，每条母线包括不同类型的元件。根据系统中每条母线的地理位置对母线进行排列，如图 5 所示。

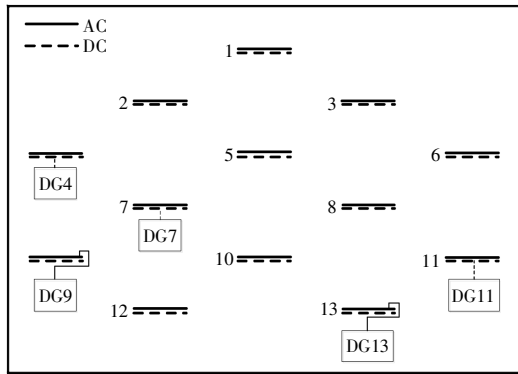


图 5 案例中 13 条母线排列情况

DSS(配电变电站)连接在母线 1 上，目标是确定一个合适的配电网络，它可以最佳地适应案例研究中表示的所有负载和 DG。

4.1 系统参数

在案例系统中有不同类型的负载和发电机。表 1 列出了发电机数据，包括有功功率限制、无功功率限制。假设所有基于可再生能源的 DG 都由私人拥有，这些可再生能源的运营成本代表公用事业公司向 DG 持有者支付的数额。

表 2 给出了每条母线上交流和直流负载的峰值限值。本案例中能源需求年增长率采用 0.7%。

确定网络中每条母线与其相邻母线之间的地理距离是一个关键的规划因素。以下矩阵 X 表示系统母线之间的距离(以 km 为单位)，即矩阵的第 i 行第 j 列数据为母线 i 和母线 j 之间的距离，并用作规划模型的输入。

表 1 系统内发电机的数据

电源编号	电源类型	P_G^{\max} /MW	P_G^{\min} /MW	Q_G^{\max} /MW	Q_G^{\min} /Mvar	成本 /($\text{元}\cdot\text{MWh}^{-1}$)
G1	DSS, AC	10.0	1.0	4.80	0.80	92.20
DG4	PV, DC	1.50	—	—	—	209.0
DG7	PV, DC	1.50	—	—	—	209.0
DG9	DG, AC	1.00	—	—	—	128.0
DG11	PV, DC	1.50	—	—	—	209.0
DG13	DG, AC	2.00	—	—	—	92.20

表 2 系统母线负载需求

母线	AC 负载		DC 负载
	P_L/kW	Q_L/kvar	P_L/kW
1	—	—	—
2	1.00	0.45	—
3	—	—	1.25
4	0.50	0.25	—
5	0.50	0.25	0.50
6	0.75	0.35	0.75
7	0.50	0.25	—
8	0.50	0.25	1.25
9	—	—	0.85
10	0.50	0.25	0.50
11	—	—	—
12	—	—	1.25
13	0.75	0.35	—

$$X = \begin{bmatrix} 0.0 & 1.0 & 1.0 & 2.0 & 1.4 & 2.0 & 2.4 & 2.4 & 3.4 & 2.8 & 3.4 & 3.8 & 3.8 \\ 1.0 & 0.0 & 1.4 & 1.0 & 1.0 & 2.4 & 1.4 & 2.0 & 2.4 & 2.4 & 3.0 & 2.8 & 3.4 \\ 1.0 & 1.4 & 0.0 & 2.4 & 1.0 & 1.0 & 2.0 & 1.4 & 3.0 & 2.4 & 2.4 & 3.4 & 2.8 \\ 2.0 & 1.0 & 2.4 & 0.0 & 1.4 & 2.8 & 1.0 & 2.8 & 1.4 & 2.0 & 3.4 & 2.4 & 3.0 \\ 1.4 & 1.0 & 1.0 & 1.4 & 0.0 & 1.4 & 1.0 & 1.0 & 2.0 & 1.4 & 2.0 & 2.4 & 2.4 \\ 2.0 & 2.4 & 1.0 & 2.8 & 1.4 & 0.0 & 2.4 & 1.0 & 3.4 & 2.0 & 1.4 & 3.0 & 2.4 \\ 2.4 & 1.4 & 2.0 & 1.0 & 1.0 & 2.4 & 0.0 & 1.4 & 1.0 & 1.0 & 2.4 & 1.4 & 2.0 \\ 2.4 & 2.0 & 1.4 & 2.4 & 1.0 & 1.0 & 1.4 & 0.0 & 2.4 & 1.0 & 1.0 & 2.0 & 1.4 \\ 3.4 & 2.4 & 3.0 & 1.4 & 2.0 & 3.4 & 1.0 & 2.4 & 0.0 & 1.4 & 2.8 & 1.0 & 2.4 \\ 2.8 & 2.4 & 2.4 & 2.0 & 1.4 & 2.0 & 1.0 & 1.0 & 1.4 & 0.0 & 1.4 & 1.0 & 1.0 \\ 3.4 & 3.0 & 2.4 & 3.4 & 2.0 & 1.4 & 2.4 & 1.0 & 2.8 & 1.4 & 0.0 & 2.4 & 1.0 \\ 3.8 & 2.8 & 3.4 & 2.4 & 2.4 & 3.0 & 1.4 & 2.0 & 1.0 & 1.0 & 2.4 & 0.0 & 1.4 \\ 3.8 & 3.4 & 2.8 & 3.0 & 2.4 & 2.4 & 2.0 & 1.4 & 2.4 & 1.0 & 1.0 & 1.4 & 0.0 \end{bmatrix}$$

表 3 列出了案例研究中使用的其他输入参数。交直流线路采用的是型号为 AWG 4/0 的钢芯铝绞线，这类电缆单位长度(以 km 为单位)的直流电阻为 0.7105Ω ，单位长度(以 km 为单位)交流阻抗为 $(0.7137 + j1.1684 \Omega)$ 。

表3 规划模型的输入参数

参数	参数值和限制
系统功率基值/MVA	10
交流电压基值/kV	4.16
直流电压基值/kV	6.8
电压大小限制/p.u.	0.95~1.05
电压角限制	$-\pi/4 \sim \pi/4$
线路容量/MVA	2
AC-DC转换器效率/%	95
母线连接支路数量限制	1~4
MCS场景数量	10 000
DC系统类型	单极
线路成本/(元·km ⁻¹)	28 000
转换器成本/(元·kVA ⁻¹)	170
年度维护费用(β)	设备成本(IC)的5%
规划周期(T_p)/a	15
折扣率(d)/%	7.5

4.2 仿真结果

为评估所提规划模型的有效性,同时使用2种规划方法求解案例并进行对比。第一种采用传统AC规划,母线和支线假定为AC,因此母线和支线类型矩阵(W 和 D)的所有二进制元素都是零,而连接矩阵(U)的二进制元素是变量。第二种方法,采用所提出的混合规划模型,所有总线 and 线路可以为AC或DC,因此所有配置矩阵(W , U 和 D)的二进制元素都是变量。传统AC规划和混合规划模型提供的解决方案分别如图6和图7所示。

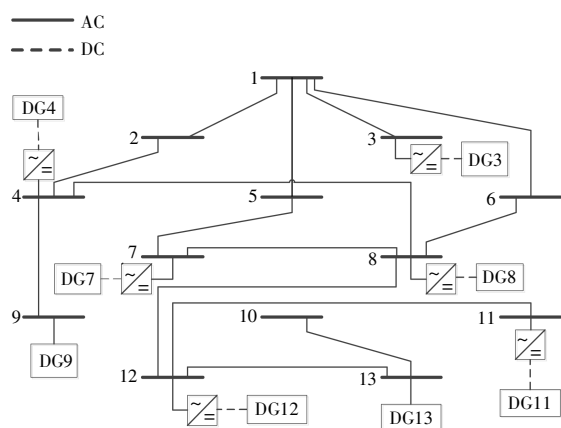


图6 AC规划解决方案

表4对比了AC规划方案和混合规划方案的成本,可以看出:混合规划现金流量,其中现值成本为404.689万元;AC规划现金流量,其中现

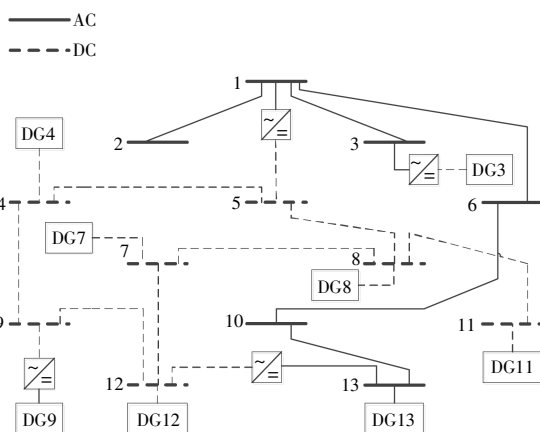


图7 混合规划解决方案

表4 AC方案与混合方案的成本比较

成本	AC方案	混合方案
第15年的年度运营成本	34.318 2	43.548 8
网络线路成本	11.760 6	10.869 7
系统转换器成本	14.059 1	15.594 6
总体安装成本	25.819 7	26.464 3
成本现值总额	419.756 0	404.689 0

值成本为419.756万元;2个方案的现金流量差额为15.067万元。可见,对于算例采用的13节点配电网,混合规划方案可以节约3.6%的成本。

5 结语

针对配电网的交直流混合配置规划问题,本文提出了一种基于遗传算法的配置规划模型,并采用13节点配电网作为算例进行了模型计算。经对比得出,所提交直流混合规划模型相对于传统的交流规划实现了一定的成本节约,这符合了本设计的目标,具有良好的适用性。该模型也为今后交直流混合配电网规划问题提供了解决思路。

参考文献:

- [1] 尹忠东,冯寅,闫凤琴,等.交直流混合配电网能效综合评价方法[J].电力建设,2016,37(5):100-108.
- [2] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等.直流配电网研究现状与发展[J].电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
- [3] 韩永霞,何秋萍,赵宇明,等.采用柔性直流技术的智能配电网接入交流电网方式[J].电力系统自动化,2016,40(13):141-146.
- [4] 杨增社,李宏,石宏.浅谈大电流直流电源的发展和能耗问题[J].电力电子技术,2014,48(9):44-47.

- [5] 张尧,代元军,晁勤.新能源接入直流电网关键技术方案分析[J].电器与能效管理技术,2018(17):1-4.
- [6] 凌卫家,孙维真,叶琳,等.浙江交直流混联电网特性分析及运行控制[J].浙江电力,2016,35(9):8-14.
- [7] GITIZADEH M,VAHED A A,AGHAEI J.Multistage distribution system expansion planning considering distributed generation using hybrid evolutionary algorithms[J].Applied Energy,2013,101:655-666.
- [8] NAZAR M S,HAGHIFAM M R.Multiobjective electric distribution system expansion planning using hybrid energy hub concept[J].Elect.Power Syst.Res,2009,6(79):899-911.
- [9] 袁博,邵华,贺春光,等.智能配电系统规划关键问题与研究展望[J].电力自动化设备,2017,37(1):65-73.
- [10] 张帆,徐鹏,贾秀芳,等.混联式直流电网的协调控制策略[J].电力自动化设备,2017,37(1):137-143.
- [11] 倪明,单渊达.多端交直流混合网扩展规划的综合法[J].电力系统自动化,1999,23(1):15-19.
- [12] 马为民,高理迎,李亚男,等.特高压直流输电系统可靠性和可用率研究[J].中国电力,2017,40(12):14-18.
- [13] FENG W,LE TUAN A,TJERNBERG L B,et al.A new approach for benefit evaluation of multiterminal VSC-HVDC using a proposed mixed AC/DC optimal power flow[J].IEEE Transactions.Power Delivery,2014,29(1):432-443.
- [14] 张国荣,徐宏.直流微网中的关键技术综述[J].低压电器,2012(15):1-5.
- [15] HOLMES D G,LIPO T A.Pulse width modulation for power converters[M].[S.l.:s.n.],2003.
- [16] NASSAR M E,SALAMA M M A.Adaptive self-adequate microgrids using dynamic boundaries[J].IEEE Transactions.Smart Grid,2016,7(1):105-113.
- [17] MOSTAFA H A,EL SHATSHAT R,SALAMA M M A.Optimal distribution systems operation using smart matching scheme(SMS) for smart grid applications[J].IEEE Transactions.Smart Grid,2014,5(4):1938-1948.
- [18] 冯刚,刘明康,王栋.交直流混联电网与风电场适应性稳态分析研究[J].浙江电力,2015,34(6):16-19.
- [19] 赵琦,管霖,吕耀棠,等.储能电站在含光伏电源配电网中的优化配置[J].广东电力,2018,31(7):1-7.
- [20] 程杉,苏高参.基于 CAPSO 的含分布式电源的配电网动态重构[J].电网与清洁能源,2018,34(12):27-33.
- [21] 孙亮,张秀琦,吕凌虹,等.含分布式电源的配电网电压控制策略研究[J].电网与清洁能源,2018,34(10):1-5.
- [22] 李文汗,赵冬梅,王心,等.考虑分布式电源并网的配电网适应性评价方法[J].电网与清洁能源,2017,33(2):117-123.

收稿日期:2019-06-14

作者简介:许 烽(1988),男,高级工程师,主要研究方向为高压直流输电和柔性直流输电及大功率电力电子技术。

(本文编辑:方明霞)