

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.03.012

考虑电压-无功调节的台区互联装置规划方法

王书征, 赵洋, 李沛林, 单婷婷, 张金华
(南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 伴随分布式能源广泛接入低压配电网, 其对配电网运行灵活性和消纳能力的要求不断提高。利用低压柔性互联装置将独立运行的低压配电台区分区互联, 避免传统电压调节和无功补偿装置频繁动作。考虑到柔性互联装置造价昂贵, 协同传统电压-无功调节装置, 文中提出低压柔性互联装置的选址定容规划方法。首先, 分析低压柔性互联装置拓扑和运行方式, 建立其潮流模型。其次, 建立低压柔性互联装置优化配置的双层规划模型, 上层规划以年综合费用最小为目标, 下层规划考虑电压-无功协调控制时间序列模型, 以运行成本和电压偏差最小为目标, 基于粒子群优化算法和混合整数二阶锥规划算法交替求解, 得出配电系统最优柔性互联方案和最优运行方式。最后, 在 IEEE 33 节点系统上进行实例分析, 验证该双层规划算法的有效性。结果表明, 所提方法能有效减少柔性互联装置的过度布置, 同时减少由分布式能源频繁波动造成的运行成本。将模型凸化并线性化的方法明显提高了求解效率。

关键词: 分布式能源; 低压柔性互联; 电压-无功控制; 双层规划; 选址定容; 粒子群优化; 混合整数二阶锥规划算法
中图分类号: TM726 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3203(2024)03-0111-10

0 引言

分布式能源大规模接入低压配电网, 加剧了用电不平衡, 也影响配电网设备的安全运行。光伏发电高峰与低压配电网中电动汽车等新型负荷的用电高峰在时间上的错配, 使得台区变压器更容易出现光伏功率倒送和瞬时重载甚至是过载的双重风险^[1]。这些风险增加了配电网电压、无功的控制难度^[2-3], 也增加了配电网的运行损耗^[4-7]。

传统配电网治理电压违规问题主要通过有载调压装置(the on-load tap changer, OLTC)、可切换电容组(switchable capacitor banks, SCB)和联络开关等。但是这些传统调压手段存在响应速度慢、调压不连续等问题, 在光伏等分布式能源出力和负荷频繁波动时, 难以满足电压和无功补偿的实时高精度调控的要求^[8-9]。

电力电子技术的飞速发展对上述问题提供了新的解决思路。基于全控型电力电子器件的柔性互联装置(flexible interconnection device, FID)的出现可以实现低压配电网的功率快速转移, 其通过电压源型变流器(voltage source converter, VSC)使光伏出力过剩台区将功率转移至距离相近的重载或者过载台区^[10-13]。相较于传统调压和无功补偿手段, FID能够发挥联络开关的作用, 实现台区互联, 还可以实现连续调压以及快速响应, 且能在一定程度上调节无功。但是FID由于价格昂贵且无功调节能力

有限, 在短时间内还不能完全取代传统调压装置和无功补偿装置^[14]。

目前针对传统调压装置和低压互联装置均有相关研究。在 OLTC 和 SCB 方面, 文献[15]以网络损耗和电压越限最小为优化目标, 提出一种 OLTC 和 SCB 电压无功协调优化方法; 文献[16]基于电压灵敏度分析, 运用深度学习算法确定电容器组补偿位置与补偿容量。在低压柔性互联技术方面, 通过低压柔性互联端口可以实现能量互济, 分区协调^[17-19], 文献[20]着重研究基于 FID 的经济性调度策略, 从三相不平衡度、运行经济性和变压器负载率角度确定低压柔性互联最优运行模式。而当前研究并未综合考虑传统调压装置和 FID 各自优缺点, 提出两者的协同规划策略。

该协同规划问题不仅需要考虑 FID 的有功和无功输出, 还需要考虑 OLTC 和 SCB 等可切换开关的离散调节步骤。这些装置在不同时间尺度上的协调规划需要建立时间序列优化模型, 但是考虑到 OLTC 和 SCB 的开关状态在时间上是离散的, 传统调压装置和 FID 协同规划模型本质上属于混合整数非线性规划问题, 难以直接求解。

因此, 文中建立了 FID 和多个电压调节装置之间的协同规划时间序列优化模型, 并采用线性化和二阶锥松弛的方法将原问题转化为混合整数线性规划问题。在此基础上, 建立基于粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法和混合整数二阶锥规划算法的低压 FID 双层规划模型, 上层考虑 FID 的投资, 以年综合运行费用最小为目标, 确定

收稿日期: 2023-11-28; 修回日期: 2024-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52107098)

FID 配置的位置和容量;下层以 OLTC 和 SCB 运行成本以及电压偏差最小为目标,确定系统最优的运行方式。

1 基于 FID 的低压柔性互联组网系统

1.1 基于 FID 的低压柔性互联组网结构

FID 依托于电力电子器件,具有灵活可靠的特点,能够实现台区之间功率的快速转移。基于 FID 的低压柔性互联组网如图 1 所示,对多个距离相近的台区通过 VSC 和 $\pm 375\text{ V}$ 直流线路进行柔性互联,台区既能从上级 10 kV 交流电网取电,也能通过直流线路实现台区之间的功率互济。并且由于通过直流线路互联,台区中存在的如电动汽车充电桩等直流负荷和分布式能源能够直接接入直流电网,大大减少了低压配电网中由直流设备接入带来的 AC/DC 换流器。

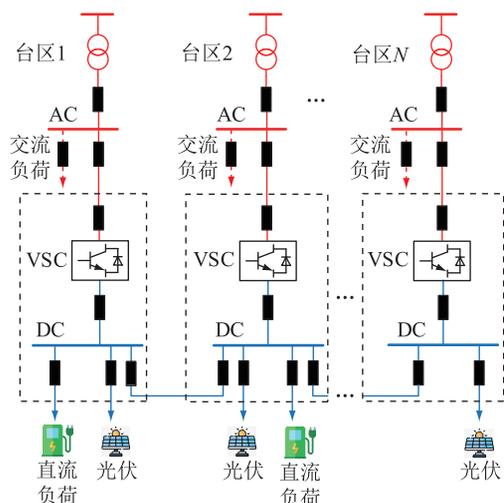


图 1 低压台区柔性互联组网结构

Fig.1 Flexible interconnection network structure of low-voltage station areas

1.2 低压 FID 功率流动模型

FID 主要是由 2 个或 2 个以上 VSC 组成的全控型电力电子设备,虽然绝大多数情况下 VSC 的传输效率很高,但是在台区出现分布式能源和负荷不平衡、有功功率需要大范围转供的情况下,仍然会产生一定的有功损耗。VSC 端口功率流动模型如图 2 所示,假定 FID 向电网流入功率为正方向,而多个 VSC 通过直流线路相连接,输出的无功由于直流环节的隔离而互不干扰,因此 VSC 仅须满足各自的容量约束即可。图 2 中, P_{t,VSC_v}^{FID} 、 $P_{t,VSC_v'}^{FID}$ 分别为 t 时刻 VSC 端口 v 和端口 v' 传输的有功功率; P_t^{dc} 为 t 时刻直流线路上传输的有功功率。

(1) FID 有功约束。FID 有功约束应考虑多个 VSC 端口的功率平衡,具体如式(1)、式(2)所示。

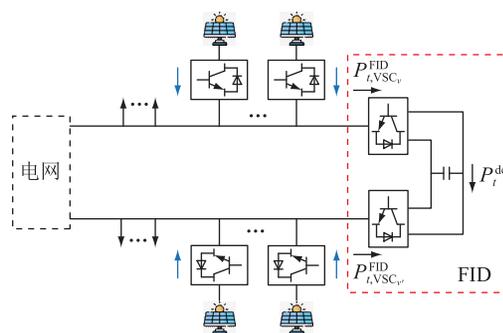


图 2 VSC 端口功率流动模型

Fig.2 VSC port power flow model

$$\sum_{v=1}^M (P_{t,VSC_v}^{FID} + P_{t,VSC_v'}^{FID}) = 0 \quad (1)$$

$$P_{t,VSC_v}^{FID,loss} = A_v^{VSC} \sqrt{(P_{t,VSC_v}^{FID})^2 + (Q_{t,VSC_v}^{FID})^2} \quad (2)$$

式中: $P_{t,VSC_v}^{FID,loss}$ 为 t 时刻 VSC 端口 v 传输有功功率损耗; M 为 FID 的 VSC 端口数; Q_{t,VSC_v}^{FID} 为 t 时刻 VSC 端口 v 的无功功率; A_v^{VSC} 为 VSC 端口 v 的损耗系数。

(2) FID 无功约束。

$$Q_{VSC_v,min}^{FID} \leq Q_{t,VSC_v}^{FID} \leq Q_{VSC_v,max}^{FID} \quad (3)$$

式中: $Q_{VSC_v,min}^{FID}$ 、 $Q_{VSC_v,max}^{FID}$ 分别为 VSC 端口 v 传输的无功功率最小值和最大值。

(3) FID 容量约束。

$$\sqrt{(P_{t,VSC_v}^{FID})^2 + (Q_{t,VSC_v}^{FID})^2} \leq S_{VSC_v}^{FID} \quad (4)$$

式中: $S_{VSC_v}^{FID}$ 为 VSC 端口 v 的安装容量。

1.3 直流网络主要运行约束

文中研究低压 FID 通过直流线路互联,故选择直流线路电压为 $\pm 375\text{ V}$,极间电压为 700 V。节点 i 和节点 j 之间的直流线路电压方程约束和功率流动约束可表示为:

$$\begin{cases} U_{t,i}^{dc} - U_{t,j}^{dc} = I_{t,ij}^{dc} R^{dc} \\ P_{t,+}^{dc} = -P_{t,-}^{dc} = P_t^{dc} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $U_{t,i}^{dc}$ 、 $U_{t,j}^{dc}$ 分别为 t 时刻直流线路节点 i 和节点 j 的电压; $I_{t,ij}^{dc}$ 为 t 时刻直流线路 ij 流过的电流; R^{dc} 为直流线路电阻; $P_{t,+}^{dc}$ 、 $P_{t,-}^{dc}$ 分别为 t 时刻直流正、负线路传输的有功功率。

2 低压 FID 的双层规划模型

考虑电压-无功调节的 FID 选址规划需要从 2 个角度出发。一方面,通过布置 FID 来实现台区之间的负荷转移,快速响应分布式能源引起的电压波动,提高分布式能源就地消纳率。另一方面,由于 FID 昂贵的造价,考虑由 OLTC 和 SCB 组成的切换装置在长时间尺度上进行调节,避免开关频繁动作,也避免了 FID 的过度布置。协调多个无功调节装置和 FID,维持电压水平不越限,可以提高低压配

电网的运行效率。

2.1 上层柔性互联方案规划模型

2.1.1 上层规划模型目标函数

台区柔性互联规划方案从 FID 的投资运行经济性角度出发,设定目标函数为配电网年综合费用 C 最小^[20-21]。该目标函数由 FID 年投资建设成本 C_1 、FID 年运行维护成本 C_{MA} 、台区配电网从上级主网购电的成本 C_B 和弃光惩罚 C_P 四部分构成,其中台区配电网从上级主网购电的成本和弃光惩罚的计算方法为日运行成本与年运行天数相乘^[22-23]。目标函数具体可表示为:

$$\min C = C_1 + C_{MA} + C_B + C_P \quad (6)$$

各部分含义及计算公式如下。

(1) FID 年投资建设成本。

$$C_1 = \frac{s(1+s)^{t_{VSC}}}{(1+s)^{t_{VSC}} - 1} \sum_{v=1}^M C_1^{VSC} S_{VSC_v}^{FID} + \frac{s(1+s)^{t_{line}}}{(1+s)^{t_{line}} - 1} \sum_{m \in \Omega} 2x_m l_m C_1^{line} \quad (7)$$

式中: s 为贴现率; t_{VSC} 、 t_{line} 分别为 VSC 装置和直流线缆的最佳经济使用年限; C_1^{VSC} 为安装 VSC 单位容量的投资额; Ω 为配电网中所有可柔性互联台区的组合; x_m 为 0-1 变量,表示集合 Ω 中可进行柔性互联的第 m 个组合是否进行柔性互联; l_m 为柔性互联中直流线缆的长度; C_1^{line} 为单位长度直流线缆的安装成本。

(2) FID 年运行维护成本。在低压配电网中,电压等级低,线路距离短,线路维护费用可忽略不计,FID 年运行维护成本主要由 VSC 运行成本构成。

$$C_{MA} = \sum_{v=1}^M C_v^{VSC} S_{VSC_v}^{FID} \quad (8)$$

式中: C_v^{VSC} 为在端口 v 中,单位容量 VSC 的年运维成本。

(3) 台区配电网从上级主网购电的成本。台区配电网从上级主网购电的成本主要由购电成本 C_{buy} 和传输损耗成本 C_{loss} 组成。

$$C_B = C_{buy} + C_{loss} \quad (9)$$

$$C_{buy} = 365 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \xi_t P_{t,i} \Delta t \quad (10)$$

$$C_{loss} = 365 \sum_{t=1}^T \xi_t P_{t,loss} \Delta t \quad (11)$$

式中: ξ_t 为分时电价; $P_{t,i}$ 为 t 时刻注入节点 i 的有功功率; Δt 为规划最小时间,取 1 h; T 为规划周期,取 24 h; n 为节点数; $P_{t,loss}$ 为 t 时刻线路传输有功功率损耗。

(4) 弃光惩罚。

$$C_P = 365 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \xi_{PV} (P_{t,i}^{PV,max} - P_{t,i}^{PV}) \Delta t \quad (12)$$

式中: ξ_{PV} 为弃光惩罚价格,文中取 2.5 元/(kW·h); $P_{t,i}^{PV,max}$ 为 t 时刻节点 i 的光伏有功出力上限; $P_{t,i}^{PV}$ 为 t 时刻节点 i 的光伏实际有功出力。

2.1.2 上层规划模型约束条件

上层台区柔性互联规划方案约束条件主要考虑台区 VSC 接入容量约束:

$$\begin{cases} 0 \leq S_{VSC_i}^{FID} \leq S_{i,max}^{VSC} \\ S_{VSC_i}^{FID} = e S_{VSC} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $S_{i,max}^{VSC}$ 为节点 i 的 FID 安装容量最大值; e 为非负的整数变量; S_{VSC} 为 VSC 最小优化安装容量。

2.2 下层协同优化运行模型

下层协同优化模型基于上层决策的柔性互联方案,考虑 OLTC 分接头和 SCB 开关单元约束,形成了协同无功补偿优化模型。在满足各类约束条件的前提下实现系统总运行成本最小的目标。

2.2.1 下层运行模型目标函数

考虑低压柔性互联配电网的运行效率和电压水平,文中提出以运行总成本和电压偏差的加权和 F 最小为目标函数:

$$\min F = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 \quad (14)$$

式中: f_1 、 f_2 分别为系统运行成本和电压偏差的目标函数值; α_1 、 α_2 为权重系数,可参考文献[15]分别设置为 0.798 和 0.202。

(1) 系统运行成本 f_1 。

$$f_1 = f_{loss} + f_{switch} \quad (15)$$

式中: f_{loss} 、 f_{switch} 分别为网络损耗成本和开关切换成本,具体计算分别如式(16)和式(17)所示。

$$f_{loss} = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \Omega_b} \xi_t r_{ij} I_{t,ij}^2 \Delta t + \sum_{t=1}^T \sum_{v=1}^M \xi_t P_{t,VSC_v}^{FID,loss} \Delta t \quad (16)$$

式中: r_{ij} 为支路 ij 的等值电阻; $I_{t,ij}$ 为 t 时刻支路 ij 上流过的电流; Ω_b 为所有支路的集合。

$$f_{switch} = \sum_{ij \in \Omega_o, t=1}^T \xi_K |K_{t,ij} - K_{t-1,ij}| + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \xi_N |N_{t,i}^{CB} - N_{t-1,i}^{CB}| \quad (17)$$

式中: ξ_K 、 ξ_N 分别为 OLTC 和 SCB 切换成本,文中分别设置为 1.4 元/次和 0.24 元/次; $K_{t,ij}$ 、 $N_{t,i}^{CB}$ 分别为 t 时刻支路 ij 上 OLTC 和节点 i 上 SCB 的状态,均为整数变量; Ω_o 为所有布置 OLTC 的支路的集合。

(2) 电压偏差 f_2 。

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n |U_{t,i}^2 - U_N^2| \quad (18)$$

式中： $U_{t,i}$ 为 t 时刻节点 i 的电压； U_N 为系统额定电压。

2.2.2 下层运行模型约束条件

下层运行模型除了需要满足交直流系统运行约束条件外,还需要满足 OLTC 和 SCB 的运行约束。

(1) OLTC 运行约束。

$$\begin{cases} U_{t,i} = (k_{ij,0} + K_{t,ij}\Delta k_{ij})U_{t,j} \\ \sum_{i=1}^T |K_{t,ij} - K_{t-1,ij}| \leq \Delta K_0^{\max} \\ -K_{ij,\min} \leq K_{t,ij} \leq K_{ij,\max} \quad K_{t,ij} \in \mathbf{Z} \end{cases} \quad (19)$$

式中： $k_{ij,0}$ 为支路 ij 上 OLTC 抽头初始档位； Δk_{ij} 为支路 ij 上抽头档位变化范围； $U_{t,j}$ 为 t 时刻节点 j 的电压； ΔK_0^{\max} 为抽头档位变化最大范围； $K_{ij,\max}$ 、 $K_{ij,\min}$ 分别为支路 ij 上抽头最大档位和最小档位； \mathbf{Z} 为整数集合。

(2) SCB 运行约束。

$$\begin{cases} Q_{t,i}^{\text{CB}} = q_i^{\text{CB}} N_{t,i}^{\text{CB}} \\ \sum_{i=1}^T |N_{t,i}^{\text{CB}} - N_{t-1,i}^{\text{CB}}| \leq \Delta K_{\text{CB}}^{\max} \\ 0 \leq N_{t,i}^{\text{CB}} \leq N_{\text{CB,max}} \end{cases} \quad (20)$$

式中： $Q_{t,i}^{\text{CB}}$ 为 t 时刻节点 i 补偿的无功功率； q_i^{CB} 为节点 i 的 SCB 最小单元无功容量； $\Delta K_{\text{CB}}^{\max}$ 为 SCB 档位变化最大范围； $N_{\text{CB,max}}$ 为最大投入 SCB 单元个数。

3 双层规划模型求解

基于交替迭代的思想,考虑上文阐述的低压柔性互联的双层规划模型所涉及的目标函数和变量类型,文中采用基于 PSO 算法^[24]和锥规划^[25]的混合优化算法进行双层规划模型的求解。上层基于 PSO 算法为系统整体规划框架,确定低压台区的柔性互联方案以及 FID 的容量;下层基于混合整数二阶锥规划算法考虑电压-无功协同调控,嵌入 PSO 的算法流程中,用于求解给定规划方案下的最优运行方式。在得到该规划方案下的最优运行方式后,进一步计算出当前规划方案中粒子个体的适应度。经过交替迭代求解,得到 FID 的最优选址方案和系统最优运行方式。

3.1 PSO 算法

PSO 算法是通过模拟鸟群捕食行为而设计的一种智能算法^[26],迭代公式如下:

$$\begin{cases} x_{w,d,a+1} = x_{w,d,a} + v_{w,d,a} \\ v_{w,d,a+1} = \omega v_{w,d,a} + c_1 R_{1,a} (B_{w,d,a} - x_{w,d,a}) + c_2 R_{2,a} (G_{d,a} - x_{w,d,a}) \end{cases} \quad (21)$$

式中： $x_{w,d,a}$ 、 $x_{w,d,a+1}$ 分别为第 w 个粒子第 d 维在第 a 、 $a+1$ 次迭代中的位置； $v_{w,d,a}$ 、 $v_{w,d,a+1}$ 分别为第 w 个粒子第 d 维在第 a 、 $a+1$ 次迭代中的搜索速度； ω 为惯性因子； $R_{1,a}$ 、 $R_{2,a}$ 为第 a 次迭代过程中在 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机系数； c_1 、 c_2 为学习因子； $B_{w,d,a}$ 为第 w 个粒子第 d 维在经过 a 次迭代后迭代过程中最优值的位置； $G_{d,a}$ 为粒子在经过 a 次迭代后全局最优值的位置。

最初迭代取惯性因子 ω 较大值作为初值,使得粒子具有较大的搜索空间,并在接下来的迭代中逐渐缩小,以此增加寻找的速度与结果的精度,其计算如下:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{h_{\max}} h \quad (22)$$

式中： ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为惯性因子的上、下限； h_{\max} 、 h 分别为最大迭代次数与当前迭代次数。经过多次实验,当 $\omega_{\max} = 0.9$ 、 $\omega_{\min} = 0.4$ 时,搜索范围和搜索精度较好,且由于此算法能快速收敛,设置 h_{\max} 为 200 次,以避免不必要的算力负担。

PSO 算法用于 FID 选址定容的求解思路具体可以概括为:将一组 FID 安装位置与容量组合看作是粒子当前所处的状态,求解在该状态下的最小年综合运行费用。随着惯性因子 ω 的逐渐缩小,在多次改变 FID 的位置和容量后,目标函数仍不能取得更小值或者已达到最大迭代次数,则认为已经求解到该状态下的最优值。

3.2 混合整数二阶锥规划模型转换

锥规划是非线性规划中的一类,其目标函数是线性的,但约束是关于锥的^[27-28],本质是通过引入非空尖凸锥,将其导入偏序、线性等式、线性不等式等约束条件来求解一个线性目标函数的最小值。

式(23)一式(26)中用电压和电流的平方 $U_{t,i}^2$ 、 $I_{t,ij}^2$ 表示交流网络中的主要等式约束和不等式约束。通过引入变量 $X_{t,i}$ 、 $X_{t,j}$ 和 $Y_{t,ij}$ 分别替代 $U_{t,i}^2$ 、 $U_{t,j}^2$ 和 $I_{t,ij}^2$,将其线性化为:

$$\sum_{ji \in \Omega_b} (P_{t,ji} - r_{ij} Y_{t,ij}) + P_{t,i} + \sum_{ji \in \Omega_o} P_{t,ji}^{\text{OLTC}} = \sum_{ik \in \Omega_b} P_{t,ik} + \sum_{ik \in \Omega_o} P_{t,ik}^{\text{OLTC}} \quad (23)$$

$$\sum_{ji \in \Omega_b} (Q_{t,ji} - x_{ij} Y_{t,ji}) + Q_{t,i} + \sum_{ji \in \Omega_o} Q_{t,ji}^{\text{OLTC}} = \sum_{ik \in \Omega_b} Q_{t,ik} + \sum_{ik \in \Omega_o} Q_{t,ik}^{\text{OLTC}} \quad (24)$$

$$X_{t,i} - X_{t,j} - 2(r_{ij} P_{t,ij} + x_{ij} Q_{t,ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) Y_{t,ij} = 0 \quad (25)$$

$$Y_{t,ij} X_{t,i} = P_{t,ij}^2 + Q_{t,ij}^2 \quad (26)$$

式中: $P_{t,ji}$ 、 $Q_{t,ji}$ 分别为 t 时刻节点 j 流向节点 i 的有功和无功功率; $P_{t,ik}$ 、 $Q_{t,ik}$ 分别为 t 时刻节点 i 流向节点 k 的有功和无功功率; $Q_{t,i}$ 为 t 时刻节点 i 的无功负荷; $P_{t,ji}^{\text{OLTC}}$ 、 $Q_{t,ji}^{\text{OLTC}}$ 分别为 t 时刻 OLTC 支路上节点 j 流向节点 i 的有功和无功功率; $P_{t,ik}^{\text{OLTC}}$ 、 $Q_{t,ik}^{\text{OLTC}}$ 分别为 t 时刻 OLTC 支路上节点 i 流向节点 k 的有功和无功功率; x_{ij} 为支路 ij 的等值电抗。

式(2)和式(4)的 FID 运行约束为非线性约束,可改写为以下形式:

$$\begin{cases} (P_{t,\text{VSC}_v}^{\text{FID}})^2 + (Q_{t,\text{VSC}_v}^{\text{FID}})^2 \leq 2 \frac{P_{t,\text{VSC}_v}^{\text{FID,loss}}}{\sqrt{2}A_v^{\text{VSC}}} \times \frac{P_{t,\text{VSC}_v}^{\text{FID,loss}}}{\sqrt{2}A_v^{\text{VSC}}} \\ (P_{t,\text{VSC}_v}^{\text{FID}})^2 + (Q_{t,\text{VSC}_v}^{\text{FID}})^2 \leq 2 \frac{P_{t,\text{VSC}_v}^{\text{FID}}}{\sqrt{2}} \times \frac{P_{t,\text{VSC}_v}^{\text{FID}}}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (27)$$

对于式(18)的非线性目标函数,引入 t 时刻节点 i 电压偏差变量 $X_{t,i}^{\Delta U}$ 使其线性化为:

$$f_2 = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^n X_{t,i}^{\Delta U} \quad (28)$$

同时通过添加等价约束,保证其线性化的准确性^[29]:

$$\begin{cases} X_{t,i}^{\Delta U} \geq X_{t,i} - U_{i\max}^2 \\ X_{t,i}^{\Delta U} \leq U_{i\min}^2 - X_{t,i} \\ X_{t,i}^{\Delta U} \geq 0 \end{cases} \quad (29)$$

式中: $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 分别为节点 i 允许电压最大值与最小值。

同理,可将 OLTC、SCB 运行约束、网络损耗成本 f_{loss} 、开关切换成本 f_{switch} 线性化^[15],具体过程文中不再赘述。

经过上述二阶锥规划处理后,即可通过商用求解器快速求解线性化后的模型。

3.3 FID 双层规划模型求解流程

上层规划将一组 FID 安装位置与容量组合看作是粒子当前所处的状态,根据目标函数求解,将安装位置和容量等变量传递给下层。下层规划根据上层规划方案,考虑电压-无功的协同优化,确定系统最优的运行方式,并将优化后的结果传递给上层。通过交替迭代求解得到 FID 最优规划方案,规划算法流程如图 3 所示。

4 算例分析

文中采用 IEEE 33 节点系统进行实例分析,验证文中所提双层规划算法的有效性。IEEE 33 节点系统结构如图 4 所示,其中电压等级为 12.66 kV,电压运行波动范围为 $0.95U_N \sim 1.05U_N$,功率基准值 S_B

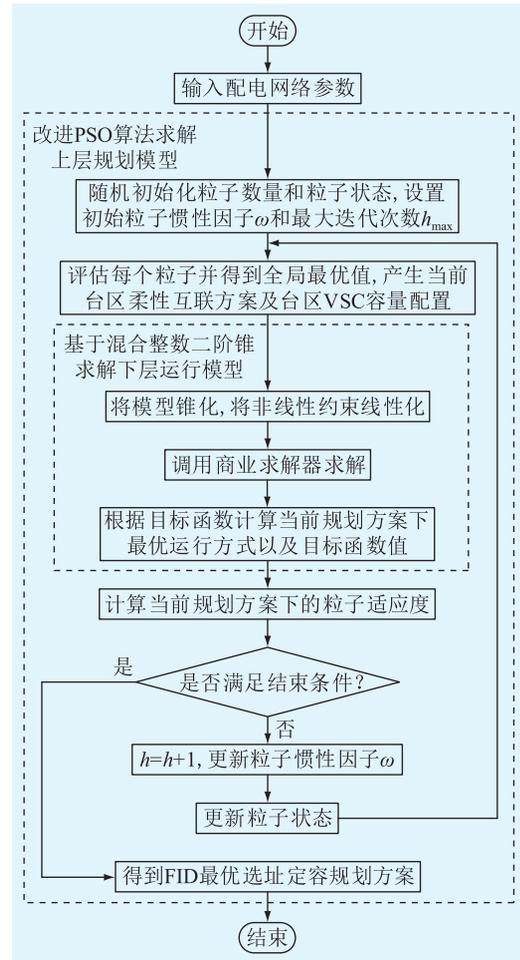


图 3 FID 双层规划模型求解流程

Fig.3 Flow chart of FID dual-level planning model solution

为 100 MW。

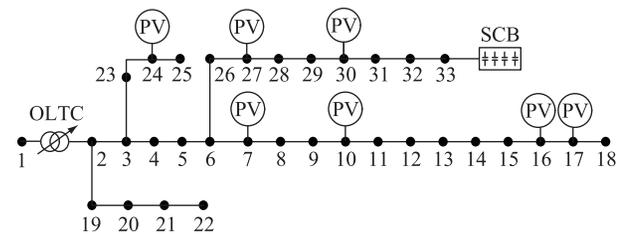


图 4 IEEE 33 节点系统

Fig.4 IEEE 33-node system

文中所提方法通过 MATLAB 程序脚本实现 PSO 算法,再调用 IBM ILOG CPLEX 12.10 求解锥规划算法,测试系统的硬件环境为 Intel i5-8300H,主频为 2.3 GHz,内存为 16 GB,操作系统为 win10 64 bit,开发环境为 MATLAB R2020a。

4.1 算例基础数据

为充分考虑高比例分布式能源接入低压配电网,在算例中接入分布式能源,其具体的参数配置如表 1 所示,分布式能源与负荷的日运行曲线如图

5 所示, FID 相关成本参数^[21,25]如表 2 所示, 分时电价如表 3 所示。交流负荷功率因数取 0.9。在节点 1 与节点 2 之间布置 OLTC, 该 OLTC 在±5%之间共有 10 个调节档位, 每次可调节 1%。在 33 节点布置容量为 300 kvar 的 SCB, 含有 5 个可调节单元。为进一步简化求解问题的复杂性, 文中仅考虑双端 FID 的情况。

表 1 分布式能源参数配置

Table 1 Configuration parameters of distributed energy sources

接入节点	容量/kW	接入节点	容量/kW
7	500	24	300
10	500	27	400
16	300	30	300
17	200		

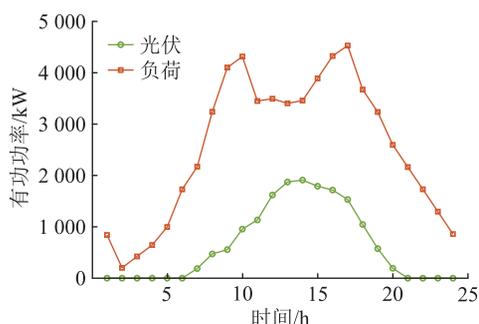


图 5 分布式能源与负荷日运行曲线

Fig.5 Daily operation curves of distributed energy source and load

表 2 成本参数

Table 2 Cost parameters

参数	数值
贴现率	0.06
VSC 经济使用年限/a	20
直流线路经济使用年限/a	20
VSC 损耗系数	0.02
VSC 最小优化容量/kW	100
VSC 单位容量投资成本/(元·kW ⁻¹)	1 000
直流线路单位投资成本/(元·m ⁻¹)	50
VSC 年单位运行维护成本/(元·kW ⁻¹)	5

表 3 分时电价

Table 3 Time-of-use electricity price

时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
00:00—07:00、 23:00—24:00	0.30
07:00—10:00、 14:00—18:00、 21:00—23:00	0.50
10:00—14:00、 18:00—21:00	0.75

4.2 规划结果分析

为充分比较不同规划方法对规划结果的影响, 文中考虑以下 3 种场景来验证文中所提综合规划方法的最优性。

场景一: 考虑电压-无功协调控制的 FID 选址定容规划;

场景二: 不考虑电压-无功协调控制的 FID 选址定容规划;

场景三: 不采用柔性互联规划, 仅考虑传统电压-无功调控手段。

规划结果如表 4 所示, 可看出, 相对于场景二, 场景一仅需在节点 12—22 和节点 25—29 处安装 FID, 且安装容量减少了 700 kW。

表 4 FID 选址定容方案

Table 4 FID location and capacity sizing scheme

场景	编号	安装节点	安装容量/kW
场景一	FID1	12—22	300
	FID2	25—29	400
场景二	FID1	12—22	400
	FID2	25—29	500
	FID3	8—21	500

表 5 为配电系统年综合成本, 可知场景一和场景二在经过柔性互联后, 配电系统年综合成本相较于柔性互联前分别减少 130.28 万元和 74.90 万元。经过柔性互联后, 系统可完全消纳光伏出力, 减少弃光成本, 同时场景一和场景二的购电成本也分别下降了 11.89% 和 7.33%。在传统电压-无功调节装置的协同作用下, 可减少 FID 和直流线路额外的布置, 相较于场景二, 场景一的 FID 投资建设成本和运维成本分别减少 48.4% 和 50%。

表 5 配电系统年综合成本

Table 5 Annual comprehensive costs of the distribution system 万元

场景	C	C _I	C _{MA}	C _B	C _p
场景一	945.19	6.97	0.35	937.87	0
场景二	1 000.57	13.51	0.70	986.36	0
场景三	1 075.47			1 064.41	11.06

综合表 4 和表 5 不难看出, 布置 FID 可大大减少配电系统年综合运行成本, 而考虑到基于电力电子器件的 FID 造价和运行成本, 过度布置 FID 显然会影响配电系统年综合成本的经济性。

表 6 为各场景优化运行成本。由表 6 可以看出, 场景一考虑传统电压-无功调节装置和 FID 协同规划不仅能有效减少 FID 的过度布置, 减少系统网络损耗, 还能显著减少传统电压-无功调节装置的切

换成成本。相较于场景二和场景三,场景一分别减少网络损耗 20.79 元/d 和 41.49 元/d,分别减少了 18.64%和 31.38%。场景一相较于场景三,OLTC 和 SCB 切换成本减少了 11.68 元/d。

表 6 各场景优化运行成本

Table 6 Optimized operational costs for each scenario

优化结果	场景一	场景二	场景三
网络损耗/(元·d ⁻¹)	90.74	111.53	132.23
开关切换成本/(元·d ⁻¹)	1.64		13.32
系统运行成本/(元·d ⁻¹)	92.38	111.53	145.55
电压偏差程度/p.u.	0.02	0.81	1.14

图 6 和图 7 分别为场景一和场景二的 FID 传输有功功率。由图 6 可以看出,在场景一中,由于分布式能源的高渗透率,系统潮流波动较大,在 6 时—9 时、17 时—22 时,节点 12 和节点 29 重载,2 组 FID 迅速输送节点 22 和节点 25 多余的有功功率以缓解系统功率需求。场景二中,如图 7 所示,在没有传统电压-无功调节装置的辅助下,想要实现功率及时转供需要增加 FID 的数量和容量,不利于系统总体经济性运行。图 8 和图 9 分别为场景一和场景二中 FID 各端口向系统补偿的无功功率。对比图 8 和图 9 可以看出,场景一中 FID 向系统补偿的无功功率明显少于场景二,相对减少了 FID 的容量需求。

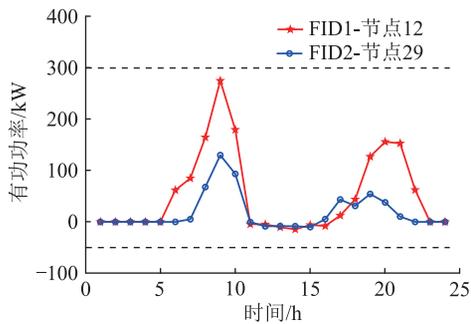


图 6 场景一 FID 传输有功功率

Fig.6 Active power transmission of FID in scenario one

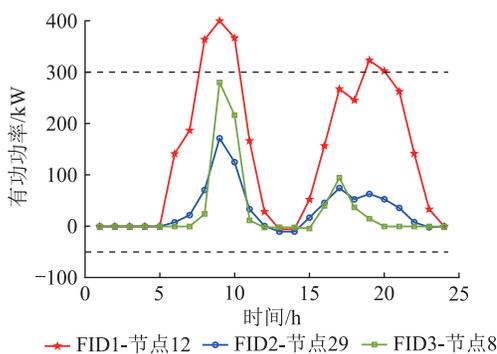


图 7 场景二 FID 传输有功功率

Fig.7 Active power transmission of FID in scenario two

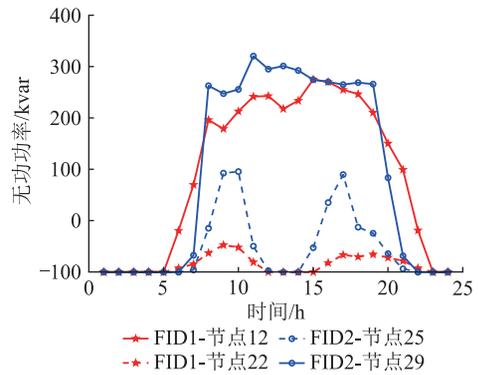


图 8 场景一各 VSC 端口无功补偿

Fig.8 Reactive power compensation at each VSC port in scenario one

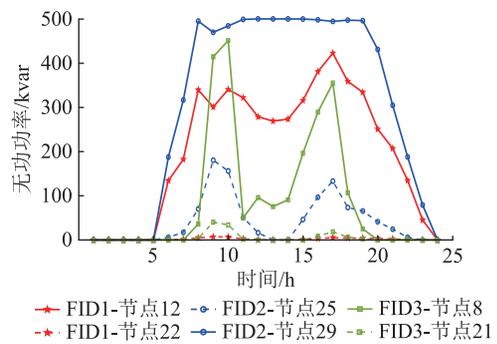


图 9 场景二各 VSC 端口无功补偿

Fig.9 Reactive power compensation at each VSC port in scenario two

在场景一中,FID 和 OLTC、SCB 相互配合,及时响应分布式能源引起的电压波动,如图 10 和图 11 所示,与场景三相比,OLTC 和 SCB 在相对较长的时间尺度上调节系统电压和无功补偿,避免切换装置的频繁动作,有效降低了系统运行风险,也相对延长了传统电压-无功调节装置的寿命。

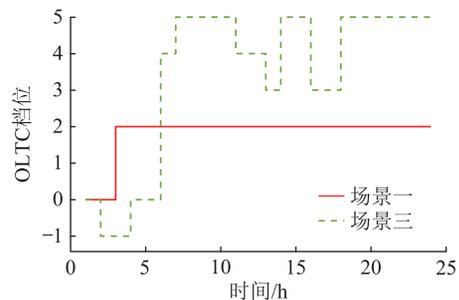


图 10 场景一和场景三中 OLTC 切换

Fig.10 OLTC switching in scenario one and scenario three

系统电压最大值和最小值如图 12 所示,由图可知场景中 FID 与传统电压-无功调节装置相互配合,有效缓解了系统节点电压越限问题,将电压控制在 0.97~1.03 p.u.之间。

为验证文中所提双层规划模型中线性化和二

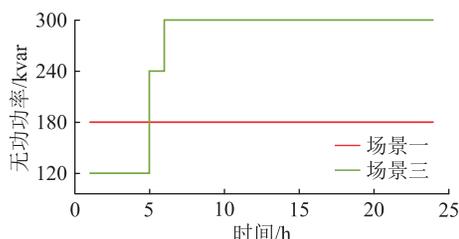


图 11 场景一和场景三中 SCB 无功补偿
Fig.11 Reactive power compensation of SCB in scenario one and scenario three

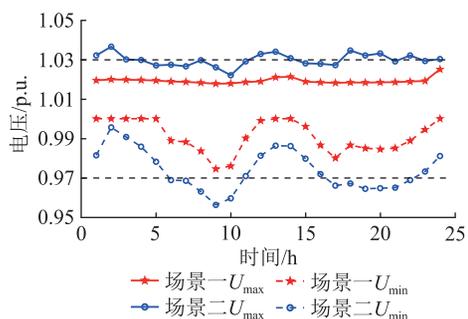


图 12 场景一和场景二中系统电压最大值和最小值
Fig.12 Maximum and minimum system voltages in scenario one and scenario two

阶锥松弛方法的有效性,在迭代求解过程中分别对不同场景下约束凸化前、凸化后、凸化并线性化后的模型求解,结果如表 7 所示。凸化前模型求解困难,其中 INF 表示无法寻得可行解。凸化后求解时间大幅缩短并能求得可行解。将模型凸化并线性化后明显提高了求解效率,求解时间均大幅缩减。

表 7 求解时间比较

场景	凸化前	凸化后	凸化并线性化后
场景一	INF	389	49
场景二	INF	462	58
场景三	1 071	115	35

5 结论

文中充分考虑 FID 与传统电压-无功调节装置的优缺点,建立了 FID 和多个电压调节装置之间的协同规划时间序列优化模型,并将原有含整数非线性规划问题转化为混合整数线性规划问题,同时对求解效率进行对比验证,证明了方法的有效性。在此基础上建立了基于 PSO 算法和混合整数锥规划算法的低压 FID 双层规划模型,并在 33 节点配电系统上进行验证,结果表明:

(1) 基于 VSC 的 FID 能够实现分布式能源的跨台区消纳,对系统进行一定程度上的电压调节和无功补偿。

(2) 考虑传统电压-无功调节装置协同控制可以有效减少 FID 的过度布置,减少配电网的改造成本和优化运行成本。

(3) 通过合理布置 FID,可以有效缓解由高比例分布式能源频繁波动引起的传统电压-无功调节装置开关频繁切换的问题,降低系统运行成本。

致谢

本文得到江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJ CX23_1210)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 曾强,谢善益,周刚,等. 倒送功率约束下的分布式电源最大接入容量分析[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(10):16-22.
ZENG Qiang, XIE Shanyi, ZHOU Gang, et al. Maximum capacity analysis for distributed generation considering reverse power constraint[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10):16-22.

[2] 佟曦,侯朗博,孙昊,等. 高比例光伏和电动汽车接入配电网的无功优化[J]. 智慧电力,2023,51(10):31-37,102.
TONG Xi, HOU Langbo, SUN Hao, et al. Reactive power optimization of distribution networks with high proportion of PV and EVs[J]. Smart Power, 2023, 51(10):31-37, 102.

[3] 刘华志,李永刚,王优胤,等. 无功电压优化对新能源消纳的影响[J]. 电工技术学报,2019,34(S2):646-653.
LIU Huazhi, LI Yonggang, WANG Youyin, et al. Influence about reactive power voltage optimization on the dissipation of new energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2):646-653.

[4] 李世辉,王琪,贾晓卜,等. 考虑热泵负荷和分布式光伏的配微网协调调度[J]. 中国电力,2022,55(9):29-37.
LI Shihui, WANG Qi, JIA Xiaobo, et al. Coordinated scheduling of distribution networks and microgrids considering heat pump load and distributed photovoltaic[J]. Electric Power, 2022, 55(9):29-37.

[5] 李铁成,杨少波,傅本栋,等. 主动负荷参与的含高比例分布式光伏台区经济自治运行[J]. 南方电网技术,2022,16(8):12-21.
LI Tiecheng, YANG Shaobo, FU Bendong, et al. Economic autonomous operation of high proportion distributed photovoltaic station area with active load participation[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(8):12-21.

[6] 李蒙赞,霍成军,王玮茹,等. 基于改进 MLC 的含 DG 配电网损耗分摊研究[J]. 电力工程技术,2022,41(1):180-184.
LI Mengzan, HUO Chengjun, WANG Weiru, et al. Loss allocation of distribution network with distributed generations based on improved marginal loss coefficients method[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1):180-184.

[7] 陈斌,李昀宸,马仲坤,等. 低压配电网台区多端口能量路由器优化配置研究[J]. 供用电,2023,40(2):32-38.
CHEN Bin, LI Yunchen, MA Zhongkun, et al. Research on opti-

- mal configuration of multi-port energy router in low voltage distribution network[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(2): 32-38.
- [8] 刘嘉彦,李勇,曹一家,等. 考虑光伏利用效率的中低压配电网电压抬升抑制方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(15): 171-177.
- LIU Jiayan, LI Yong, CAO Yijia, et al. Suppression method of voltage rise in medium and low distribution networks considering utilization efficiency of photovoltaic power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(15): 171-177.
- [9] 王志强,郭晨阳,刘文霞,等. 计及负荷特性的配电网多时间尺度电压控制及协调修正[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(15): 51-57.
- WANG Zhiqiang, GUO Chenyang, LIU Wenxia, et al. Multi-time scale voltage control and coordinated correction for distribution networks considering load characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(15): 51-57.
- [10] 祁琪,姜齐荣,许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. *电网技术*, 2020, 44(12): 4664-4676.
- QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(12): 4664-4676.
- [11] 张真,欧阳森,杨墨缘,等. 基于组合变权的柔性互联配电网运行能效评估[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2023, 44(1): 65-80.
- ZHANG Zhen, OUYANG Sen, YANG Moyuan, et al. Energy efficiency assessment of flexible interconnected distribution network based on combined variable weight[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2023, 44(1): 65-80.
- [12] 张勇军,刘子文,邓丰强. 柔性互联配电网研究现状综述及其发展探索[J]. *广东电力*, 2020, 33(12): 3-13.
- ZHANG Yongjun, LIU Ziwen, DENG Fengqiang. Review on research status and development of flexible interconnected distribution networks[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(12): 3-13.
- [13] 霍群海,李梦菲,粟梦涵,等. 柔性多状态开关应用场景分析[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 13-21.
- HUO Qunhai, LI Mengfei, SU Menghan, et al. Analysis on application scenarios of flexible multi-state switch[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 13-21.
- [14] 王绍武,李鹏,李金忠,等. 变压器真空有载分接开关研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(18): 6893-6907.
- WANG Shaowu, LI Peng, LI Jinzhong, et al. Overview of transformer vacuum-type on-load tap changers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(18): 6893-6907.
- [15] LI P, JI H R, WANG C S, et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(4): 1430-1442.
- [16] 刘思琪. 基于深度强化学习的配电网分布式电压控制研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2022.
- LIU Siqi. Research on distributed voltage control of distribution network based on deep reinforcement learning[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [17] 徐旖旎,刘海涛,熊雄,等. 低压配电台区柔性互联关键技术与发展模式[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(11): 3986-4001.
- XU Yini, LIU Haitao, XIONG Xiong, et al. Key technologies and development modes of flexible interconnection of low-voltage distribution station area[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(11): 3986-4001.
- [18] 毛森茂,王若愚,谢岩,等. 一种基于频率的柔性直流分区互联系统协调控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(1): 137-141.
- MAO Senmao, WANG Ruoyu, XIE Yan, et al. Frequency-based coordinated control strategy for VSC-DC segmented system[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(1): 137-141.
- [19] 严建海,张保,黄刚,等. 台区柔直互联系统在农村地区的应用研究[J]. *供用电*, 2022, 39(8): 58-66.
- YAN Jianhai, ZHANG Bao, HUANG Gang, et al. Application research on distribution stations DC flexible interconnection system in rural areas[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(8): 58-66.
- [20] 谢敏,张世平,李弋升,等. 基于多模式柔性互联的交直流低压配电网优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 79-89.
- XIE Min, ZHANG Shiping, LI Yisheng, et al. Optimal dispatch of AC/DC hybrid low-voltage distribution network based on multi-mode flexible interconnection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 79-89.
- [21] 曹昉,郑金钊,郑怡馨. 基于VSC的优质光伏资源区配电网台区柔性互联规划方法[J]. *南方电网技术*, 2023, 17(1): 14-25.
- CAO Fang, ZHENG Jinzhao, ZHENG Yixin. VSC-based flexible interconnection planning method for distribution station areas of high-quality photovoltaic resource[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(1): 14-25.
- [22] 黄子桐,徐永海,叶兴杰. 考虑有源配电网运行灵活性的智能储能软开关优化规划[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(1): 143-153.
- HUANG Zitong, XU Yonghai, YE Xingjie. Optimal planning of soft open point integrated with energy storage system considering operation flexibility of active distribution network[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(1): 143-153.
- [23] 薛飞,马丽,朱昊,等. 柔性配电网中考虑SOP优化的分布式电源双层规划[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(8): 109-115.
- XUE Fei, MA Li, ZHU Hao, et al. Bi-level programming of distributed generations in flexible distribution network with SOP optimization[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(8): 109-115.
- [24] 于文山,黎明,由蓁. 含储能的三端SOP对主动配电网的潮

- 流优化研究[J]. 太阳能学报,2022,43(3):101-110.
YU Wenshan, LI Ming, YOU Rui. Power flow optimization study on active distribution network based on three-terminal sop with energy storage system[J]. Acta Energaie Solaris Sinica,2022,43(3):101-110.
- [25] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关 SOP 规划方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(7):1889-1896.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Optimal configuration of soft open point for active distribution network considering the characteristics of distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(7):1889-1896.
- [26] REZAEE JORDEHI A. Particle swarm optimisation with opposition learning-based strategy: an efficient optimisation algorithm for day-ahead scheduling and reconfiguration in active distribution systems[J]. Soft Computing, 2020, 24(24):18573-18590.
- [27] JABR R A, SINGH R, PAL B C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(2):1106-1115.
- [28] 梁琳艳. 混合整数二阶锥优化及析取割方法[D]. 北京:北京交通大学,2022.
LIANG Linyan. Optimization and disjunctive cutting method of mixed integer second-order cone[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2022.
- [29] NICK M, CHERKAOUI R, PAOLONE M. 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.

作者简介:



王书征

王书征(1983),男,博士,副教授,研究方向为新型电力系统的新能源发电及并网技术、电能变换技术及在配用电系统中的应用等(E-mail:wsz310@126.com);

赵洋(1999),男,硕士在读,研究方向为低压柔性互联配电网运行与规划;

李沛林(1998),男,硕士在读,研究方向为混合直流输电技术继电保护。

Planning method of station area interconnection device considering voltage-reactive power regulation

WANG Shuzheng, ZHAO Yang, LI Peilin, SHAN Tingting, ZHANG Jinhua

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: With the widespread integration of distributed energy sources into low-voltage distribution networks, the demands for operational flexibility and absorptive capacity of distribution grids have been continuously increasing. The use of low-voltage flexible interconnection devices to interconnect independently operated low-voltage distribution substations helps to avoid frequent operations of traditional voltage regulation and reactive power compensation devices. Considering the high cost of flexible interconnection devices, a method is proposed to plan the siting and capacity of low-voltage flexible interconnection devices in coordination with traditional voltage-reactive power regulation devices. Firstly, the topology and operational mode of the low-voltage flexible interconnection devices are analyzed, and their power flow model is established. Subsequently, a dual-layer planning model is formulated for optimizing the configuration of low-voltage flexible interconnection devices. The upper-layer planning aims to minimize the annual comprehensive cost, while the lower-layer planning takes into account a time-series model for voltage-reactive power coordination control. The objectives of the lower-layer planning are to minimize operation costs and voltage deviations. The optimal solution for the distribution network system's flexible interconnection scheme and operational mode is obtained through alternating iterations of particle swarm optimization and mixed-integer second-order cone programming algorithms. Finally, a case study is conducted on the IEEE 33-node test system to validate the effectiveness of the proposed dual-layer planning algorithm. The results indicate that the proposed method can effectively reduce the excessive deployment of flexible interconnection devices while simultaneously decreasing the operational costs caused by frequent fluctuations in distributed energy sources. The method of convexifying and linearizing the model significantly enhances the solution efficiency.

Keywords: distributed energy sources; low-voltage flexible interconnection; voltage-reactive power control; dual-level planning; siting and sizing; particle swarm optimization; mixed-integer second-order cone programming algorithm

(编辑 陆海霞)