

主动配电网无功补偿设备配置及电压优化策略

李双伟¹, 徐勇², 杨川², 孙新程², 胡雪曼², 张从越³

- (1. 国网江苏省电力有限公司, 南京 210000;
2. 国网江苏省电力有限公司扬州供电分公司, 江苏 扬州 225001;
3. 东南大学 电气工程学院, 南京 210096)

摘要: 当前无功补偿设备配置时未考虑无功补偿设备与主动配电网可调资源协同运行带来的综合经济性, 因此, 提出主动配电网无功补偿设备配置及电压优化运行策略。构建了配置-运行双层模型, 上层配置模型以无功补偿设备投资维护成本和系统运行总成本为优化目标, 生成无功补偿设备的安装位置和容量, 并将结果传递给下层; 下层运行模型根据上层传递的信息, 考虑无功补偿设备与主动配电网可调资源协同运行下的总成本和电压偏差两个目标, 进行多目标优化求解, 并将运行结果返回给上层来引导迭代优化的方向。在改进的IEEE 33节点系统进行算例验证, 结果表明所提出的无功补偿设备配置方案, 能够保证主动配电网配置和运行的综合经济性以及电压质量。

关键词: 主动配电网; 无功补偿; 优化配置; 电压偏差; 综合经济性

DOI: 10.19585/j.zjdl.202603006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



An optimal strategy for reactive power compensation device allocation and voltage optimization in active distribution networks

LI Shuangwei¹, XU Yong², YANG Chuan², SUN Xincheng², HU Xueman², ZHANG Congyue³

- (1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China;
2. State Grid Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou, Jiangsu 225001, China;
3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Current practices for allocating reactive power compensation devices often neglect the comprehensive economic performance arising from the coordinated operation of these devices with other dispatchable resources in active distribution networks (ADNs). To address this, this paper proposes an optimal strategy for reactive power compensation device allocation and voltage optimization in active distribution networks. A bi-level model integrating allocation and operation is established. The upper-level allocation model aims to minimize the investment and maintenance costs of reactive power compensation devices as well as the total system operating cost. The locations and capacities of the compensation devices are then generated and passed to the lower-level model. The lower-level operation model targets minimizing the total operating cost and voltage deviation under the coordinated operation of reactive power compensation devices and dispatchable resources in ADNs. The multi-objective optimization problem is solved based on the information provided by the upper level. The results were then fed back to the upper level to guide iterative optimization process. Case studies on the modified IEEE 33-node system demonstrates that the proposed allocation scheme for reactive power compensation devices ensures both the overall economic performance in allocation and operation and voltage quality of the active distribution networks.

Keywords: ADNs; reactive power compensation; optimal allocation; voltage deviation; comprehensive economic performance

0 引言

随着用电需求增加, 配电线路的供电半径逐

渐增大, 导致配电线路末端易存在电压偏低、网损增大等问题^[1]。此外, 间歇式分布式新能源在配电网中的渗透率逐步提升, 新能源出力的波动性和不确定性导致配电网电压波动性进一步加大, 电压越限风险增加^[2-3]。在配电网中配置无功补偿设备, 能够应对配电网电压波动和越限问题, 对

于提高配电网功率因数、降低网损、稳定网络节点电压等方面都具有重要作用^[4-5]。因此,对配电网尤其是新能源接入的主动配电网开展无功补偿装置优化配置问题的研究很有必要。

目前,已有较多学者对配电网无功补偿设备优化配置问题进行了研究。在考虑无功补偿设备选址定容问题时,常见的做法是先筛选无功补偿设备的安装位置,再对容量进行优化配置。文献[6]根据电气距离将系统划分为若干电压控制区,而后依据电压支撑能力指标确定各区的无功补偿地点,再以投资成本最低为目标确定补偿容量。文献[7]根据电压无功灵敏度和局部电压稳定指标确定无功补偿地点,再以网损和电压偏差作为优化目标,确定无功补偿设备的最优容量。文献[8]定义了功率损失指数并以此为依据筛选出无功补偿装置安装的候选位置,而后考虑由网损和电容器组的投资运行成本、电压越限惩罚以及网损越限惩罚组成的单目标函数,对电容器组的位置和容量进行优化求解。文献[9]根据能耗敏感度因子筛选补偿设备的候选节点,并以电压合格率和网络损耗为目标,采用遗传算法确定静电电容器的补偿容量。无功补偿优化配置的另一种做法是将无功补偿设备的选址和定容问题一起考虑,将位置和容量均作为待优化变量,构建优化模型进行求解。文献[10]针对含光伏配电网的无功补偿装置配置问题进行了研究,考虑了网络损耗成本、设备投资维护成本、电压偏差以及需求响应后用户的舒适性和经济性,对SVC(静止无功补偿器)和电容器的位置和容量进行了优化配置,优化过程中用加权求和法将多目标问题转化为单目标进行求解。文献[11]考虑无功补偿设备投资成本、有功损耗费、节点电压越限惩罚,以经济性为优化目标,对配电网无功补偿设备的位置和容量进行配置。文献[12]考虑储能和无功补偿装置协同配置问题,以设备投资成本、网损成本等作为优化目标,构建协同规划模型,但该模型未考虑电压优化问题。文献[13]提出了快充电站的储能和静止无功发生器协同优化配置策略,以设备投资成本和配电网电压偏差为目标,建立优化配置模型,针对快充电站不同负荷渗透率,分析了不同配置方案的效果。文献[14]将电压偏移量最小作

为优化目标,提出10 kV农村配电网无功优化配置策略,但没有考虑经济性因素。文献[15]对SVC的优化配置问题进行研究,将网损、电压偏移和SVC投资成本作为目标函数,并用加权求和法,将3个目标函数转化为单目标优化问题进行求解。目前针对配电网无功补偿设备优化配置问题,在经济上都考虑了设备本身的投资维护成本以及无功补偿设备配置带来的网损成本的降低,但没有考虑无功补偿设备配置后与主动配电网中的DG(分布式电源)、ESS(储能系统)、OLTC(有载调压开关)等可调资源协同优化运行带来的综合经济效益。另外,现有研究在无功补偿设备配置和运行时,或将电压安全作为约束条件,或将电压优化目标与其他目标进行加权求和转化为单目标进行求解,难以合理兼顾配电网运行经济性和电压质量提升等多重目标。

针对以上问题,本文提出主动配电网无功补偿设备优化配置及电压优化运行策略。在无功补偿设备优化配置时,综合考虑无功补偿设备的投资维护成本及无功补偿设备与主动配电网中可调设备协同运行的综合经济成本。在无功补偿设备配置运行对配电网电压优化支撑方面,同时考虑配电网运行的综合经济性和电压质量两个目标,建立多目标优化运行模型,并基于NNC(归一化法向约束)法和Yalmip/Cplex求解多目标优化模型,实现在配电网经济运行的同时提高电压质量。构建了配置-运行双层模型,上层配置模型负责计算无功补偿设备的安装位置和容量,下层运行模型负责主动配电网多目标优化运行。通过算例验证表明,所提策略能够提高系统配置和运行的整体经济性以及电压质量。

1 配置-运行双层模型

针对主动配电网无功补偿设备优化配置问题,提出包含无功补偿设备经济性、配电网运行经济性及电压质量的配置-运行双层模型,如图1所示。上层以无功补偿设备的年投资维护成本和配电网年运行总成本之和最小为目标,计算得到无功补偿设备的位置及容量。下层根据上层给出的无功补偿设备位置及容量大小,考虑无功补偿设备与配电网中的其他可调设备协同运行,以综合

运行总成本的经济性和系统电压偏差最小为目标,进行多目标优化求解,并将求得的配电网运行总成本反馈给上层。上下层循环计算,最终得到无功补偿设备的配置方案以及主动配电网的优化运行结果。

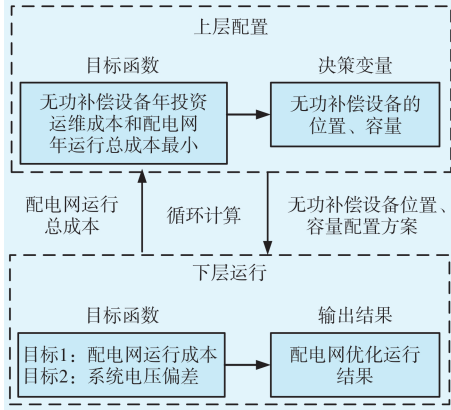


图1 配置-运行双层模型

Fig.1 Configuration-operation integrated bi-level model

1.1 上层配置模型

1.1.1 目标函数

上层配置模型以无功补偿设备的年投资维护成本和配置无功补偿设备后的配电网年运行总成本之和最小为目标,即:

$$F_{\text{total}} = \min(C_{\text{device}} + C_{\text{operation}}) \quad (1)$$

式中: C_{device} 为无功补偿设备的年投资维护成本; $C_{\text{operation}}$ 为配电网年运行总成本。

无功补偿设备的投资成本考虑全生命周期成本,采用等值年法进行计算,而无功补偿设备的维护成本与投资成本现值成比例关系^[16],因此,无功补偿设备的投资成本和维护成本可表示为:

$$C_{\text{device}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{de}} \quad (2)$$

$$C_{\text{inv}} = \sum_{i \in \Omega_Q} \frac{r \cdot (1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \cdot K_c \cdot Q_i^{\text{device}} \quad (3)$$

$$C_{\text{de}} = \sum_{i \in \Omega_Q} \alpha_1 \cdot K_c \cdot Q_i^{\text{device}} \quad (4)$$

式中: C_{inv} 和 C_{de} 分别为无功补偿设备的年投资成本和年维护成本; Ω_Q 为接入无功补偿设备的节点集合; K_c 为无功补偿设备单位容量投资成本; Q_i^{device} 为第 i 个节点的无功补偿容量; r 为折现率; y 为设备使用年限; α_1 为无功补偿设备年运行维护费率,即年运行维护费占投资成本现值的比例。

计算主动配电网的年运行总成本时,考虑到

分布式电源出力具有随机性和波动性,负荷也存在一定波动性,因此需要考虑不同的出力场景,将场景进行聚类,生成典型场景,进而计算主动配电网年运行总成本:

$$C_{\text{operation}} = \sum_{n=1}^K N_{\text{day},n} C_{\text{operation},n} \quad (5)$$

式中: K 为一年中典型场景个数; $N_{\text{day},n}$ 为第 n 个典型场景出现的天数; $C_{\text{operation},n}$ 为配电网在第 n 种典型场景下的日运行总成本,需考虑无功补偿设备配置后与其他可调设备协同运行的综合成本,包括网损成本、OLTC动作成本、主网购电成本等,其值由下层配电网优化计算后返回至上层。在典型场景生成时,可以按照季节划分典型场景,每个季节选取1个典型场景,一年选取4个典型场景分别进行优化计算,典型场景的天数与各季节对应。此时,式(5)中 K 的取值为4。

1.1.2 约束条件

对无功补偿设备配置位置及容量约束如下:

$$\begin{cases} Q_{i,\min}^{\text{device}} \leq Q_i^{\text{device}} \leq Q_{i,\max}^{\text{device}} \\ i \in \Omega_{Q,\text{AVL}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $Q_{i,\max}^{\text{device}}$ 和 $Q_{i,\min}^{\text{device}}$ 分别为接入节点 i 的无功补偿设备容量的上限和下限; $\Omega_{Q,\text{AVL}}$ 为可配置无功补偿设备的节点集合。可配置无功补偿设备节点筛选时主要考虑安装条件限制,所有具备安装条件的节点均可纳入可配置节点集合中。

上层模型在无功补偿设备年投资维护成本与配置无功补偿设备后的配电网年总运行成本最小的目标下,考虑设备的位置及容量约束,搜寻出无功补偿设备的安装位置及容量传递至下层。其中,配置容量 Q_i^{device} 作为下层模型中无功补偿设备参与配电网协调优化运行时发出/吸收无功功率的限值。

1.2 下层运行模型

1.2.1 目标函数

无功补偿设备接入配电网后,与OLTC、ESS、DG等可调资源协调优化运行。下层运行模型以各典型场景下设备协同运行的配电网日运行总成本和系统电压偏差最小为目标,兼顾了运行经济性和安全性。各典型场景优化时,时间尺度上统一以1h为时间颗粒度,以24h为调度周期进行计算。日运行总成本考虑了OLTC动作成本、网损成本、ESS运维成本、主网购电成本和DG运

行成本, 即:

$$\begin{cases} F_1 = \min C_{\text{operation}, n} \\ C_{\text{operation}, n} = C_{\text{loss}} + C_{\text{buy}} + C_{\text{DG}} + C_{\text{op}}^{\text{ESS}} - C_{\text{profit}}^{\text{ESS}} + C_{\text{op}}^{\text{OLTC}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_{loss} 和 C_{buy} 分别为配电网网损成本和配电网向主网购电成本; C_{DG} 为分布式电源运行成本; $C_{\text{op}}^{\text{ESS}}$ 和 $C_{\text{profit}}^{\text{ESS}}$ 分别为储能运行成本和充放电成本差; $C_{\text{op}}^{\text{OLTC}}$ 为 OLTC 动作成本。

各成本可表示为:

$$C_{\text{loss}} = c_{\text{loss}} \sum_{t=1}^T P_t^{\text{loss}} \quad (8)$$

$$C_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^T c_t^{\text{buy}} P_t^{\text{buy}} \quad (9)$$

$$C_{\text{DG}} = c_{\text{DG}} \sum_{i \in \Omega_{\text{DG}}} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{DG}} \quad (10)$$

$$C_{\text{op}}^{\text{ESS}} = c_{\text{op}}^{\text{ESS}} \sum_{i \in \Omega_{\text{ESS}}} \sum_{t=1}^T (P_{i,t}^{\text{ESS,D}} + P_{i,t}^{\text{ESS,C}}) \quad (11)$$

$$C_{\text{profit}}^{\text{ESS}} = \sum_{i \in \Omega_{\text{ESS}}} \sum_{t=1}^T (P_{i,t}^{\text{ESS,D}} c_t^{\text{ESS}} - P_{i,t}^{\text{ESS,C}} c_t^{\text{ESS}}) \quad (12)$$

$$C_{\text{op}}^{\text{OLTC}} = c_{\text{op}}^{\text{OLTC}} N_{\text{sum}}^{\text{OLTC}} \quad (13)$$

式中: c_{loss} 为网损单位成本; P_t^{loss} 为 t 时刻总网损功率; c_t^{buy} 为 t 时刻向主网购电的电价; P_t^{buy} 为 t 时刻向主网购电的总有功功率; c_{DG} 为 DG 的单位运行成本; Ω_{DG} 为主动配电网中接入 DG 的节点集合; $P_{i,t}^{\text{DG}}$ 为接入节点 i 的 DG 在 t 时刻发出的有功功率; $c_{\text{op}}^{\text{ESS}}$ 为储能充放电运行成本; Ω_{ESS} 为接入储能的节点集合; $P_{i,t}^{\text{ESS,D}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{ESS,C}}$ 分别为接入节点 i 的储能在 t 时刻的放电和充电功率; c_t^{ESS} 为 t 时刻储能的售电或购电价格; $c_{\text{op}}^{\text{OLTC}}$ 为 OLTC 单次动作的成本; $N_{\text{sum}}^{\text{OLTC}}$ 为 OLTC 一天内动作次数; T 为调度周期, 取 24 h。

由于分布式电源出力波动、负荷功率波动、线路阻抗等因素, 使网路中各节点电压产生偏差。电压偏差是衡量配电网供电质量与安全运行的关键指标。将节点电压严格控制在合理区间内, 防止电压越限, 对于保障配电网的安全性具有重要意义。无功补偿设备接入后, 可以优化系统的潮流状态, 从而优化各节点电压。因此, 下层优化运行模型在考虑经济性目标的同时, 也考虑节点电压偏差最小的目标函数, 其具体表达式为:

$$F_2 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N |U_{i,t} - U_{\text{ref}}| \quad (14)$$

式中: N 为网络总节点数; $U_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻实际电压; U_{ref} 为电压基准值。

下层运行模型考虑了配电网运行经济性和电压偏差两个目标函数, 为多目标优化问题。

1.2.2 约束条件

1) 线路潮流约束

线路潮流采用基于二阶锥松弛的配电网潮流约束^[17-18], 将非凸模型转变为凸模型以方便求解。首先设:

$$\begin{cases} \tilde{U}_{i,t} = U_{i,t}^2 \\ \tilde{I}_{ij,t} = I_{ij,t}^2 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $I_{ij,t}$ 为线路 ij 在 t 时刻的电流。

二阶锥松弛后网络中的潮流应满足的约束为:

$$\begin{cases} P_{j,t} = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij,t} - \tilde{I}_{ij,t} r_{ij}) \\ Q_{j,t} = \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij,t} - \tilde{I}_{ij,t} x_{ij}) \\ \tilde{U}_{i,t} - \tilde{U}_{j,t} = 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) - \tilde{I}_{ij,t} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \\ \tilde{I}_{ij,t} \geq \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{\tilde{U}_{i,t}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{j,t}$ 和 $Q_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 注入的有功和无功功率; $P_{jk,t}$ 和 $Q_{jk,t}$ 分别为 t 时刻线路 jk 的有功和无功功率; $P_{ij,t}$ 和 $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时刻线路 ij 的有功和无功功率; r_{ij} 和 x_{ij} 分别为线路 ij 的电阻和电抗; $\delta(j)$ 表示以 j 为首端节点的支路末端节点集合; $\pi(j)$ 表示以 j 为末端节点的支路首端节点集合。

在 t 时刻节点 j 注入的有功和无功功率分别为:

$$\begin{cases} P_{j,t} = P_{j,t}^{\text{DG}} + P_{j,t}^{\text{ESS,D}} - P_{j,t}^{\text{ESS,C}} - P_{j,t}^{\text{load}} \\ Q_{j,t} = Q_{j,t}^{\text{device}} - Q_{j,t}^{\text{load}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{j,t}^{\text{DG}}$ 为接在节点 j 的 DG 在 t 时刻的实际出力; $P_{j,t}^{\text{ESS,D}}$ 和 $P_{j,t}^{\text{ESS,C}}$ 分别为接在节点 j 的储能在 t 时刻的放电和充电功率; $P_{j,t}^{\text{load}}$ 和 $Q_{j,t}^{\text{load}}$ 分别为 t 时刻节点 j 的有功和无功负荷; $Q_{j,t}^{\text{device}}$ 为接在节点 j 的无功补偿设备在 t 时刻的出力。

2) 节点电压与支路电流安全约束

网络中各节点电压和支路电流应在安全范围内运行, 因此有:

$$\begin{cases} U_{i,\min}^2 \leq \tilde{U}_{i,t} \leq U_{i,\max}^2 \\ I_{ij,\min}^2 \leq \tilde{I}_{ij,t} \leq I_{ij,\max}^2 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 的电压上限和下

限； $I_{ij,max}$ 和 $I_{ij,min}$ 分别为流过支路 ij 的电流上限和下限。

3) ESS运行约束

储能ESS运行过程中受功率、容量和充放电状态约束，其约束条件可表示为：

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{ESS,C} \leq S_{i,t}^{ESS,C} P_{i,max}^{ESS,C} \\ 0 \leq P_{i,t}^{ESS,D} \leq S_{i,t}^{ESS,D} P_{i,max}^{ESS,D} \\ S_{i,t}^{ESS,C} + S_{i,t}^{ESS,D} \leq 1 \\ E_{i,t+1} = E_{i,t} + (\eta_i^C \cdot P_{i,t}^{ESS,C} - \frac{P_{i,t}^{ESS,D}}{\eta_i^D}) \Delta t \\ E_{i,0} = E_{i,T} \\ E_{i,min} \leq E_{i,t} \leq E_{i,max} \end{cases} \quad (19)$$

式中： $P_{i,max}^{ESS,C}$ 和 $P_{i,max}^{ESS,D}$ 分别为接入节点 i 的ESS充电和放电功率的上限； $S_{i,t}^{ESS,C}$ 和 $S_{i,t}^{ESS,D}$ 分别为节点 i 的ESS在 t 时刻的充、放电状态标识，取0或1； $E_{i,t}$ 和 $E_{i,t+1}$ 分别为节点 i 的ESS在 t 时刻和 $t+1$ 时刻的荷电量； η_i^C 和 η_i^D 分别为ESS的充电和放电效率； Δt 为时间步长，取1h； $E_{i,0}$ 和 $E_{i,T}$ 分别为节点 i 的ESS在起始与截止时刻的荷电量； $E_{i,min}$ 和 $E_{i,max}$ 分别为节点 i 的ESS最小和最大荷电量。

4) DG出力约束

主动配电网内部一般接有大量风电、光伏等分布式电源，其出力约束为：

$$P_{i,min}^{DG} \leq P_{i,t}^{DG} \leq P_{i,max}^{DG} \quad (20)$$

式中： $P_{i,min}^{DG}$ 和 $P_{i,max}^{DG}$ 分别为接入节点 i 的DG出力下限和上限。

5) OLTC约束

OLTC以挡位进行调节，其约束可表示为：

$$\begin{cases} K_{ij,t}^{OLTC} = K_0 + N_{ij,t}^{OLTC} \Delta K_{ij}^{OLTC} \\ N_{ij,min}^{OLTC} \leq N_{ij,t}^{OLTC} \leq N_{ij,max}^{OLTC} \\ |N_{ij,t+1}^{OLTC} - N_{ij,t}^{OLTC}| \leq N_{ij,step}^{OLTC} \\ N_{ij,t}^{OLTC} \in \mathbf{Z} \end{cases} \quad (21)$$

式中： $K_{ij,t}^{OLTC}$ 为接入节点 i 和 j 之间的OLTC在 t 时刻的变比； K_0 为初始变比； ΔK_{ij}^{OLTC} 为调节步长； $N_{ij,t}^{OLTC}$ 和 $N_{ij,t+1}^{OLTC}$ 分别为OLTC在 t 时刻和 $t+1$ 时刻的挡位，且取整数； $N_{ij,max}^{OLTC}$ 和 $N_{ij,min}^{OLTC}$ 分别为OLTC的挡位上、下限； $N_{ij,step}^{OLTC}$ 为OLTC在相邻时刻调节挡位限值； \mathbf{Z} 为整数集。

为保证OLTC安全运行并延长使用寿命，还需对OLTC在一个调度周期内的动作次数进行限制，即：

$$\sum_{t=1}^T |N_{ij,t}^{OLTC} - N_{ij,t-1}^{OLTC}| \leq N_{sum,max}^{OLTC} \quad (22)$$

式中： $N_{sum,max}^{OLTC}$ 为OLTC在调度周期 T 内的最大动作次数。

6) 无功补偿设备约束

本文配置时考虑连续无功补偿装置，可连续改变并网点的无功补偿量值，具备双向无功补偿能力。无功补偿设备的运行约束条件可表示为：

$$-Q_i^{device} \leq Q_{i,t}^{device} \leq Q_i^{device} \quad (23)$$

式中： $Q_{i,t}^{device}$ 为接入节点 i 的无功补偿设备在 t 时刻的出力。节点 i 的无功补偿容量 Q_i^{device} 由上层优化配置的结果传递给下层，作为无功补偿设备优化调度的约束。

2 求解流程

采用MATLAB软件编程，对所提出的双层模型进行求解。上层配置模型利用灰狼算法搜寻无功补偿设备的安装位置及容量的最优值，该算法适应性广，需要调节的参数少，适用于解决复杂的非线性优化问题。下层运行模型为多目标混合整数二阶锥最优潮流问题，采用NNC法结合Yalmip/Cplex求解器求解不同场景下主动配电网多目标优化运行方案^[19]，获得帕累托前沿解集，并采用TOPSIS(优劣解距离法)进行处理^[20-21]，筛选出全局最优解。双层模型的求解流程如图2所示。

求解时，首先给出配电网网络参数及其DG出力和负荷数据等参数；接着，生成无功补偿设备的位置和容量的初始值，并将初始值传递给下层配电网；然后，下层配电网结合上层给出的无功补偿设备的位置和容量，根据配电网优化目标函数和约束条件，基于NNC法和Yalmip/Cplex求解器计算各典型场景下的双目标优化运行方案，获得帕累托前沿解集，基于TOPSIS法筛选出全局最优解，并将各典型场景下的最优运行总成本作为个体最优解反馈至上层；最后，上层根据下层返回的配电网运行总成本，结合无功补偿设备投资维护成本，引导灰狼算法的迭代优化方向，给出新的无功补偿设备配置方案，并判断结果是否收敛：若收敛则结束计算；若仍不收敛，则将新的无功补偿设备的配置方案传递给下层，继续循环计算。其中，结果收敛的判据为上层给出的无

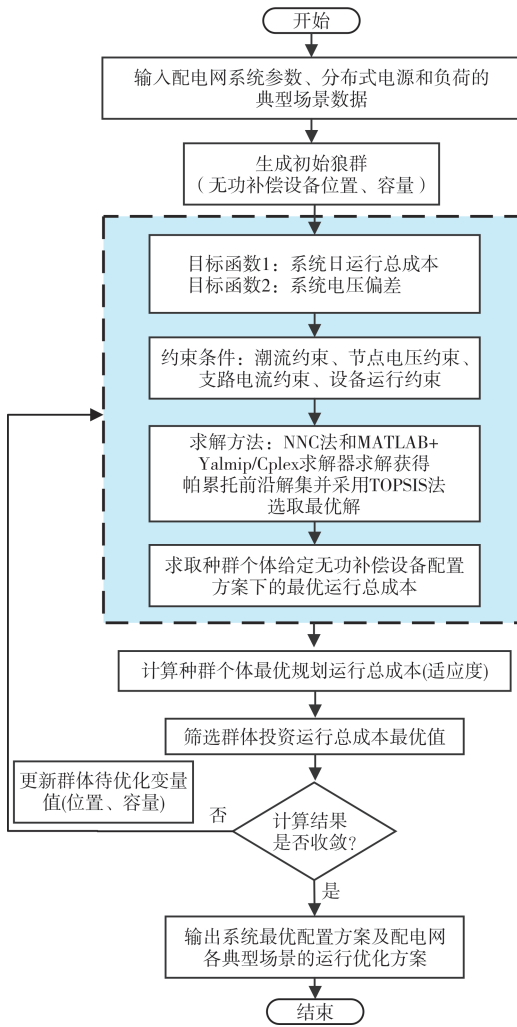


图 2 双层模型求解流程

Fig.2 Solution flowchart of the bi-level model

功补偿设备的配置位置和容量不再发生变化。

对于下层主动配电网优化运行, 为多目标混合整数二阶锥规划问题, 可写成如下的紧凑形式:

$$\begin{cases} \min(F_1, F_2) \\ \text{s.t. } G_c(x^c) \leq 0 \\ H_c(x^c) = 0 \end{cases} \quad (24)$$

式中: $G_c(\cdot)$ 和 $H_c(\cdot)$ 分别为模型中相应的不等式约束和等式约束条件; x^c 为优化模型内各变量的集合。

采用NNC法和Yalmip/Cplex求解器求解下层多目标优化运行问题, 获得帕累托前沿解集, 具体过程如下:

1)将配电网运行成本 F_1 当作唯一优化目标, 约束条件不变, 采用Yalmip/Cplex求解器进行优

化计算, 优化求解后得到的运行成本记作 F_1^{\min} , 根据求解后的变量集合 x^c 中相对应的值计算电压偏差, 求得的电压偏差记作 F_2^{\max} , 得到一组解 $A_1 = (F_1^{\min}, F_2^{\max})$ 。

2)将电压偏差 F_2 当作唯一优化的目标, 约束条件不变, 采用Yalmip/Cplex求解器进行求解, 优化求解后得到的最小电压偏差记作 F_2^{\min} , 根据求解后的变量集合 x^c 中相对应的值计算配电网运行成本, 求得的运行成本记作 F_1^{\max} , 得到一组解 $A_2 = (F_1^{\max}, F_2^{\min})$ 。

3)基于帕累托解集的双目标边界分析: A_1 和 A_2 是双目标问题的两个极值点, 目标 F_1 的取值区间为 $[F_1^{\min}, F_1^{\max}]$, 目标 F_2 的取值区间为 $[F_2^{\min}, F_2^{\max}]$, 按式(25)对初始模型解空间进行归一化处理:

$$F' = [F'_1, F'_2] = \left[\frac{F_1 - F_1^{\min}}{F_1^{\max} - F_1^{\min}}, \frac{F_2 - F_2^{\min}}{F_2^{\max} - F_2^{\min}} \right] \quad (25)$$

构建解空间归一化坐标系, F'_1 和 F'_2 分别为横坐标和纵坐标, 两个极值点对应归一化为 $A'_1(0, 1)$ 和 $A'_2(1, 0)$ 。

4)定义乌托邦线是由点 A'_1 指向点 A'_2 的向量 \vec{A} , 把乌托邦线平均分成 m 段, 则在乌托邦线上会对应产生 $m+1$ 个相同距离的点 $A_i(i=0, 1, 2, \dots, m)$, 在这些相同距离的点 A_i 上作乌托邦线的垂线 T_i , 假设垂线与系统帕累托前沿相交于点 B_i 。将由原点指向点 A_i 的向量定义为 \vec{A}_i , 由原点指向解集内任意点 F' 的向量定义为 \vec{F}' 。

5)结合式(24)的约束, 增加新的约束表达式 $\vec{A} \cdot (\vec{F}' - \vec{A}_i) \leq 0$, 以运行成本 F_1 为目标进行优化求解, 构造的数学模型如下:

$$\begin{cases} \min F_1 \\ \text{s.t. } G_c(x^c) \leq 0 \\ H_c(x^c) = 0 \\ \vec{A} \cdot (\vec{F}' - \vec{A}_i) \leq 0 \end{cases} \quad (26)$$

当求得综合运行成本 F_1 最小时, 由各均匀点 A_i 指向解空间内的点 F' 的向量会逐渐与垂线相重合, 此时垂线 T_i 与系统帕累托前沿的交点 B_i 就是最优解。

将每个分割点 A_i 依次代入式(26)中, 重复步骤5, 可求得式(24)的帕累托前沿解集, 再采用

TOPSIS法进行处理,筛选出折中的全局最优解。

3 算例分析

3.1 算例设置

采用改进的IEEE 33节点网络,验证所提出的配置和运行策略的可行性。算例的系统如图3所示。配电网为10 kV电压等级,节点1为配电网与上级网络连接处,分别在节点12、18、22、33接入容量1.35 MW、1.2 MW、1.1 MW、1 MW的光伏,在节点16、30接入额定容量为2.22 MWh、额定功率为0.48 MW的储能系统1及额定容量为3.45 MWh、额定功率为0.64 MW的储能系统2。待配置的无功补偿设备选择静止无功补偿器SVC,允许接入节点为1~33, SVC容量上限为1 Mvar, SVC单位投资成本为25万元/Mvar,折现率为8%,年运行维护费率2.2%^[16],运行年限15年。特别说明的是,图3中给出的SVC接入位置为采用所提策略优化计算后得到的结果。

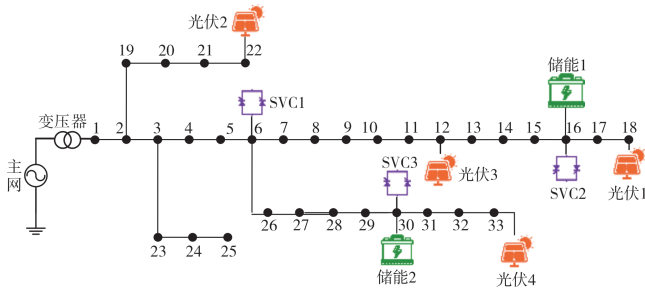


图3 改进IEEE33节点网络

Fig.3 Modified IEEE 33-bus network

针对光伏出力和负荷功率的波动性,采用季节典型场景^[10,22],4个季节典型日光伏出力如图4所示,负荷情况如图5所示,春夏秋冬各季节对应天数分别取87天、125天、81天、72天。

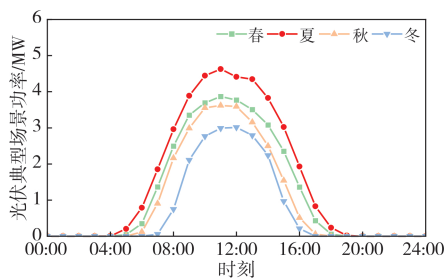


图4 光伏典型场景出力

Fig.4 Output of typical photovoltaic scenarios

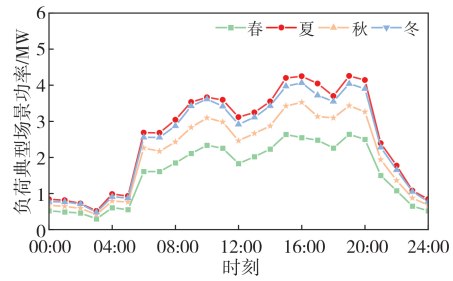


图5 负荷典型场景功率

Fig.5 Power profiles of typical load scenarios

3.2 配置和运行结果分析

3.2.1 配置结果及配置前后对比

求解得到SVC最优配置方案及配电网优化运行结果。SVC最优配置方案为:SVC1的最佳接入位置为节点6,额定容量0.28 Mvar;SVC2的最佳接入位置为节点16,额定容量0.23 Mvar;SVC3的最佳接入位置为节点30,额定容量0.36 Mvar。可见SVC主要配置在线路末端以抬升电压,防止电压越限,提升整体电压水平并达到降低网损的作用。

配置SVC前后系统各成本及电压偏差率对比如表1所示,其中,配置SVC前系统的优化运行同样以运行总成本和电压偏差为优化目标。对比配置前后结果可见,通过SVC的优化配置及其与系统中其他可调设备的协调运行,显著改善了系统运行状态。在成本方面,尽管配置SVC产生3.075万元投资运维费用,但SVC实时补偿线路无功功率,优化了潮流分布,使配电网运行总成本从1 078.717万元降至1 072.194万元,系统整体经济性得以提升。系统运行过程中主网购电成本减少3.687万元,光伏发电总成本也从243.318万元降至242.496万元,其主要原因是配置SVC后,系统的有功网损降低,从配置前的421.850 MWh降低至配置后的320.198 MWh,从而减少了系统的总有功消耗量。在运行性能方面,SVC接入除了使系统网损明显下降外,也使节点平均电压偏差率从配置前的0.97%降至配置后的0.78%,表明配电网的电压质量得到改善。

配置无功补偿设备前后的节点电压分布情况如图6所示,选取夏季典型日节点电压进行对比分析。未配置无功补偿设备时,通过优化运行,各节点电压仍然存在一定波动,部分节点电压较大

程度偏离额定值, 尤其在18:00负荷高峰时段, 节点16和节点30电压跌至0.96 p.u., 存在越下限风险。而配置无功补偿设备后, 通过SVC与其他设备协同运行, 调节功率分布补偿线路压降, 各节点电压大小控制在0.97~1.03 p.u.之间, 节点电压整体波动被有效抑制, 增强了配电网电压稳定性。

仍以夏季场景为例, 观察配置后3处SVC的无功出力特性, 如图7所示。3处SVC动作时序高度一致: 在00:00—05:00负荷低谷时段, SVC1—SVC3持续输出0.1 Mvar左右的无功以维持电网基础电压支撑; 至08:00—20:00负荷高峰时段, SVC1—SVC3分别以额定容量发出0.28 Mvar、0.23 Mvar、0.36 Mvar的无功功率, 通过满发无功补偿线路压降, 显著改善重载区域电压水平; 20:00—24:00随着负荷回落, 各SVC出力逐步降至0.1 Mvar左右。

3.2.2 不同配置策略对比

为了验证所提出的无功补偿设备配置及电压优化策略, 说明在优化配置时考虑可调设备协同运行对配置结果经济性以及对电压优化效果的影响, 考虑将3种策略进行对比:

策略1: 配置和运行时仅考虑SVC投资维护成本和配电网网损成本为优化目标。

策略2: 配置和运行时考虑SVC投资维护成本和配电网运行总成本为优化目标。

策略3: 配置和运行时考虑SVC投资维护成本、配电网运行总成本和电压偏差为优化目标, 即本文所提出的配置运行策略。

3种策略下配置结果、经济性及运行结果对比分别如表2和表3所示。由表2可见, 不同优化目标配置结果也不同。仅以投资维护成本和网损成本为优化目标时, SVC配置于网损较高的网络后段, 容量配置比较保守。引入运行总成本优化后, SVC迁移至电压薄弱点并扩容, 以协调全网经济运行。进一步叠加电压偏差目标, 仅触发节点16容量微调, 表明电压偏差目标主要通过SVC协调

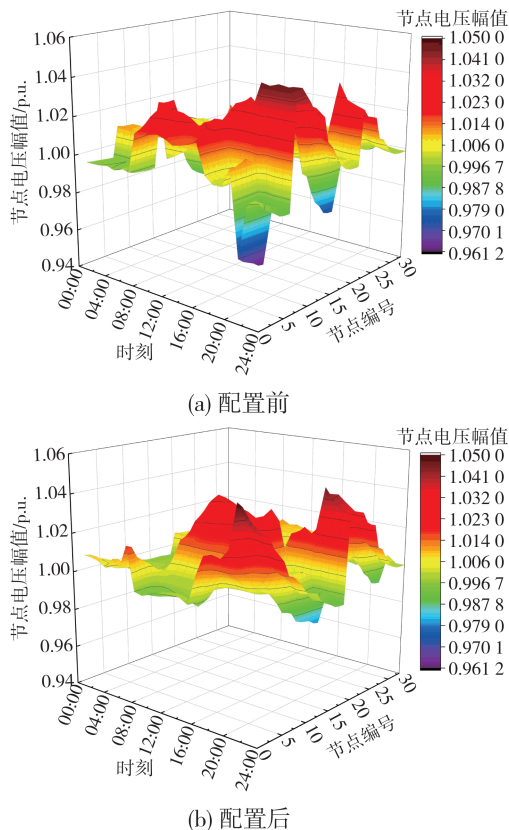


图6 配置SVC前后节点电压分布

Fig.6 Node voltage distributions before and after SVC configuration

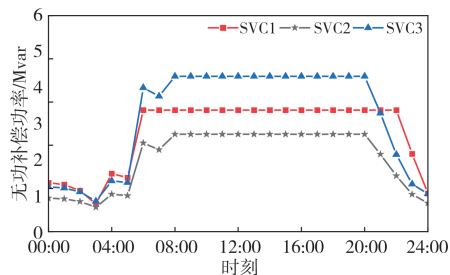


图7 SVC出力情况

Fig.7 SVC output profile

其他可调设备出力实现电压控制, 无需大幅调整配置方案。对比表3的结果可知, 策略1聚焦于SVC投资维护成本和网损成本, 使配置的容量较小, 因此投资维护成本是3种策略中最低的, 系统

表1 SVC配置前后结果对比

Table 1 Comparison of results before and after SVC allocation

场景	SVC投资运维成本 /(万元·年 ⁻¹)	配电网运行总成本 /(万元·年 ⁻¹)	主网购电成本 /(万元·年 ⁻¹)	光伏发电总成本 /(万元·年 ⁻¹)	网损电量 /(MWh·年 ⁻¹)	平均电压偏差率 /%
配置前	0	1 078.717	798.706	243.318	421.850	0.97
配置后	3.075	1 072.194	795.019	242.496	320.198	0.78

网损也是最低的,但由于没有考虑到设备协同运行带来的综合经济效益,策略1的配电网运行总成本明显高于策略2和策略3,整体经济性不佳。策略2考虑了设备协同运行所带来的经济效益,弥补了策略1的不足,虽增加了SVC的投资运维成本,网损也比策略1有所增大,但通过各设备协同优化运行,增加了本地光伏的消纳量,明显减少了主网购电成本,使配电网运行总成本明显下降。策略3在策略2的基础上进一步考虑了运行过程中的电压优化目标,对SVC的配置结果及系统的经济性并未带来明显影响,但电压偏差率比策略1和策略2明显下降,电压质量得到明显提升。由表2和表3的结果可知,配置时考虑SVC与其他设备协同运行后的综合成本,更有利于提高系统整体的经济性。

表2 不同策略下的SVC配置结果对比

Table 2 Comparison of SVC allocation results under different strategies

策略	配置节点	配置容量/Mvar
策略1	8、18、30	0.12、0.14、0.29
策略2	6、16、30	0.28、0.24、0.36
策略3	6、16、30	0.28、0.23、0.36

接下来以夏季场景为例,对比3种策略下的节点电压分布情况。策略1和策略2的节点电压分布分别如图8和图9所示,策略3的节点电压分布见图6(b)。可见,由于策略1和策略2没有考虑电压偏差的优化目标,整体电压处于较高水平,多个节点电压逼近上限1.05 p.u.,而策略3考虑了电压优化目标,大部分节点电压维持在额定值1.0 p.u.附近,电压质量明显改善。结合表3的结果可知,在配电网各设备协调优化运行中,考虑经济性目标的同时也考虑电压偏差目标,可以在不影响系统整体运行经济性的情况下,明显提高各节点的电压质量。

表3 不同策略下的经济性及运行结果对比

Table 3 Comparison of economic performance and operational outcomes under different strategies

策略	SVC投资运维成本 /(万元·年 ⁻¹)	配电网运行总成本 /(万元·年 ⁻¹)	主网购电成本 /(万元·年 ⁻¹)	光伏发电总成本 /(万元·年 ⁻¹)	网损电量 /(MWh·年 ⁻¹)	平均电压偏差率 /%
策略1	1.943	1 360.701	1 168.390	171.209	231.511	3.82
策略2	3.076	1 070.088	793.568	242.450	309.448	3.36
策略3	3.075	1 072.194	795.019	242.496	320.198	0.78

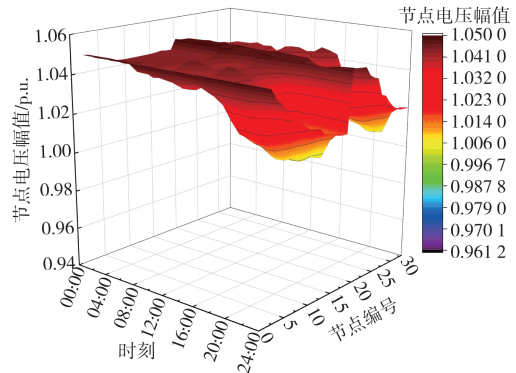


图8 策略1的节点电压

Fig.8 Node voltages under Strategy 1

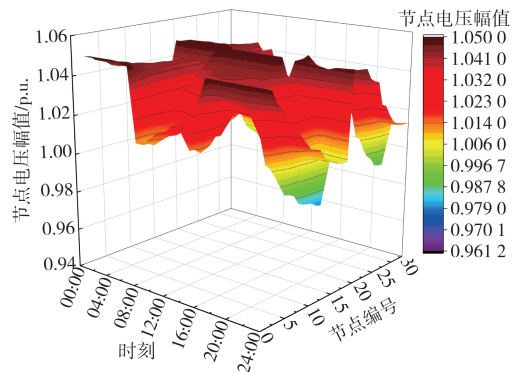


图9 策略2的节点电压

Fig.9 Node voltages under Strategy 2

3.2.3 不同场景下电压优化策略适应性分析

配电网在运行时,光伏出力会出现随机波动,网络拓扑也会因为运行维护、联络开关状态变化等因素发生变化。为验证下层配电网多目标优化运行策略在光伏随机波动及配电网拓扑变化时的适应性,在给定的SVC优化配置方案下,将光伏出力添加随机波动量,并改变网络拓扑。以夏季典型日为例,考虑以下3种场景:

场景一:原始拓扑结构和原始光伏出力场景,即图3所示的网络拓扑和图4所示的夏季光伏典型日出力。

场景二:在场景1的基础上,拓扑结构不变,

光伏出力叠加最大为 15% 的随机波动量, 光伏出力如图 10 所示。

场景三: 在场景 2 的基础上, 进一步考虑网络结构变化的场景, 网络中节点 7 和 8 之间的线路断开, 闭合节点 12 和 22 之间的联络线, 如图 11 所示。

3 种场景下多目标优化运行结果如表 4 所示。对比表 4 的结果可知, 光伏出力波动或网络拓扑变化时, 下层的配电网多目标优化运行策略仍能够保证整体经济运行, 且电压质量没有受到明显影响, 说明所提电压优化运行策略能够适应光伏出力的波动和网络拓扑变化的场景。

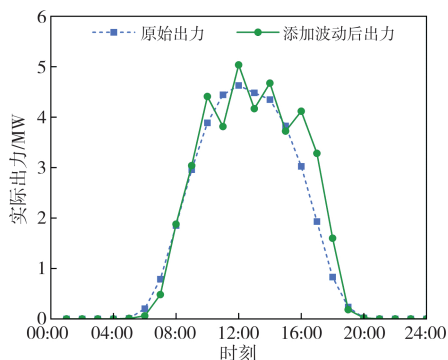


图 10 光伏出力添加随机波动

Fig.10 Photovoltaic output with random fluctuations

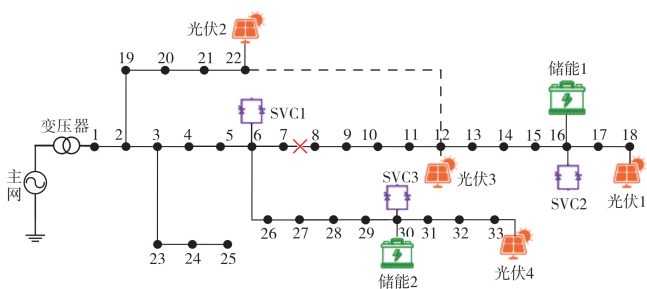


图 11 网络拓扑变化

Fig.11 Changes in network topology

表 4 不同场景下优化运行结果对比

Table 4 Comparison of optimal operational outcomes under different scenarios

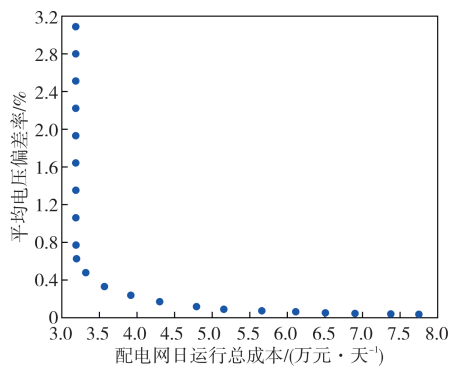
场景	配电网日运行总成本/(万元·天 ⁻¹)	平均电压偏差率/%
场景一	3.136	0.64
场景二	3.157	0.61
场景三	3.149	0.66

3.3 求解算法性能分析

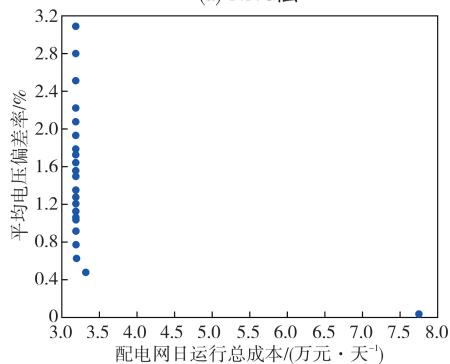
为验证双层模型的求解算法, 对算法性能进

行分析。双层模型求解核心算法主要涉及灰狼算法和 NNC 多目标求解算法。其中灰狼算法在全局最优性和收敛性上的性能在文献中已有验证^[23], 因此, 接下来主要分析 NNC 法的求解性能。NNC 法为标量化的多目标求解算法, 同属标量化多目标求解方法的主要有法线边界交叉法、 ϵ -约束法等。法线边界交叉法增加的约束条件为等式约束, 没有裕度, 容易使新增约束难以满足, 导致收敛困难, 故采用 ϵ -约束法与 NNC 法进行对比。基于图 3 所示的算例系统, 以夏季典型场景为例, NNC 法和 ϵ -约束法均获得了收敛的帕累托前沿解集, 如图 12 所示, 两种算法收敛程度基本一致, 但 NNC 法获得的帕累托前沿点分布较均匀, 两个目标侧均有点均匀分布, 而 ϵ -约束法获得的帕累托前沿点偏向于分布在作为新增约束的电压偏差目标这一侧, 分布不均匀。可见, 相比 ϵ -约束法, NNC 法在具备良好收敛性的同时可使结果分布更均匀, 更有利于科学决策。

需要说明的是, 利用所提配置-运行双层模型进行无功补偿设备配置和电压优化控制时, 求解



(a) NNC法



(b) ϵ -约束法

图 12 多目标求解算法的帕累托前沿分布

Fig.12 Pareto front distribution of the multi-objective optimization algorithm

时长会随着配电网规模增大而迅速增加。比如,在IEEE 33节点系统进行算例验证时,上下层迭代求解需要的时长约为3 h。当网络规模扩大,在IEEE 69节点系统上进行验证时,虽然能够计算出优化配置和运行方案,但上下层迭代求解时长达到约28 h,求解时长大幅增加。网络规模扩大带来求解时长迅速增加的现象,说明了应用在大规模配电网中时,求解算法在收敛速度和求解效率上还需要进一步改进。

4 结语

本文综合考虑无功补偿设备投资维护成本、系统运行总成本和电压偏差目标,建立了主动配电网无功补偿设备配置-运行双层模型,结合灰狼算法、NNC法和Yalmip/Cplex求解器进行求解。算例结果表明:所提出的配置-运行双层模型,能够给出无功补偿设备的优化配置方案,提高配电网运行的整体经济性,并改善电压质量。配置时,在考虑无功补偿设备本身的投资维护成本的同时,考虑无功补偿设备与其他设备协同运行的综合成本,更有利于提高系统配置和运行的整体经济性。而在无功补偿设备配置后,在考虑配电网运行的经济性目标的同时,考虑电压偏差目标,可以在不影响系统运行经济性的情况下,明显提高电压质量。光伏出力波动和网络拓扑变化时,下层多目标优化运行策略仍能保持系统的运行经济性及电压质量。

后续还需要对模型的求解算法进行改进,提高收敛速度和计算效率,以适应大规模配电网无功补偿设备配置运行的需要。

参考文献

- [1] 彭钢,寇启龙,方涛,等.考虑新能源消纳率的主动配电网储能优化配置策略[J].浙江电力,2025,44(1):84-94.
PENG Gang, KOU Qilong, FANG Tao, et al. An optimal strategy for energy storage allocation in active distribution networks considering new energy consumption rates [J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(1): 84-94.
- [2] FENG N, FENG Y Y, SU Y, et al. Dynamic reactive power optimization strategy for AC/DC hybrid power grid considering different wind power penetration levels [J]. IEEE Access, 2024, 12: 187471-187482.
- [3] 王启明,夏坤,焦平洋,等.基于目标级联分析算法的城乡配电网光储协同优化配置[J].浙江电力,2025,44(4):93-102.
WANG Qiming, XIA Kun, JIAO Pingyang, et al. Collaborative optimization of photovoltaic and energy storage devices in urban and rural distribution networks based on the target cascade analysis method [J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(4): 93-102.
- [4] 何松涛,邵振国,郑文迪,等.计及SVG动态调压策略的配电网双层不确定性无功规划配置[J].电网技术,2023,47(12):5158-5170.
HE Songtao, SHAO Zhenguang, ZHENG Wendi, et al. Bi-level uncertain reactive power planning of distribution network considering SVG dynamic voltage regulation strategy [J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5158-5170.
- [5] 熊军华,赵迪迪,刘国庆.基于多目标粒子群算法的配电网无功优化[J].电力电容器与无功补偿,2023,44(3):26-32.
XIONG Junhua, ZHAO Didi, LIU Guoqing. Reactive power optimization of distribution network based on multi-objective particle swarm optimization [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(3): 26-32.
- [6] 麦立响.电压安全约束下动态无功补偿优化配置研究[D].广州:广东工业大学,2019.
MAI Liyun. Optimal allocation of dynamic VAR sources considering voltage safety constraint [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [7] 金伟.城市电网区域化无功配置策略及协调控制方法研究[D].武汉:武汉科技大学,2021.
JIN Wei. Research on regional reactive power allocation strategy and coordinated control method of urban power grid [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021.
- [8] 郭挺,陈中豪,徐良德,等.基于功率损失指数的配电网无功补偿装置两阶段多目标优化配置方法研究[J].电气工程学报,2023,18(4):239-250.
GUO Ting, CHEN Zhonghao, XU Liangde, et al. Research on the two-stage multi-objective optimal configuration method of reactive power compensation devices in power grid based on power loss index [J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(4): 239-250.
- [9] 郭杉,武天宇.基于遗传算法的辐射型配电网无功补偿设备优化配置[J].内蒙古电力技术,2020,38(4):78-82.
GUO Shan, WU Tianyu. Optimal configuration of reactive power compensation equipment for radial distribution network based on genetic algorithm [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2020, 38(4): 78-82.
- [10] 任彦辉,宋景龙,余瑞,等.考虑需求侧响应的配电网无功补偿装置协调优化[J].智慧电力,2024,52(1):79-86.
REN Yanhui, SONG Jinglong, YU Rui, et al. Coordinated optimization of reactive power compensation device in dis-

- tribution network considering on demand-side response[J]. Smart Power, 2024, 52(1): 79-86.
- [11] 李青杉,陈星,郑杰,等.基于鲸鱼算法的配电网无功补偿经济性优化配置方法[J].电工技术, 2024(9): 91-94.
LI Qingshan, CHEN Xing, ZHENG Jie, et al. Whale algorithm-based economic optimal allocation of reactive power compensation in distribution networks [J]. Electric Engineering, 2024(9): 91-94.
- [12] 项恩新,王科,关静恩,等.基于凸松弛的主动配电网储能与无功补偿协同规划[J].电力系统及其自动化学报, 2020, 32(10): 63-69.
XIANG Enxin, WANG Ke, GUAN Jing'en, et al. Collaborative planning for energy storage and reactive power compensation in active distribution network based on convex relaxation method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(10): 63-69.
- [13] 严晓彬,吴庆礼,施念,等.不同负荷渗透率下的快充电站功率补偿设备配置优化策略[J].广东电力, 2021, 34(7): 22-32.
YAN Xiaobin, WU Qingli, SHI Nian, et al. Optimizing allocation strategy of power compensation equipment in fast charging stations under different load permeability [J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(7): 22-32.
- [14] 钱凯.金坛10 kV农村配网无功功率补偿技术研究与应用[D].镇江:江苏大学, 2019.
QIAN Kai. Research and application of reactive power compensation technology in Jintan 10 kV rural distribution network[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [15] 段友莲,戴林东,郑连清.静止无功补偿器的优化配置方法研究[J].电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5): 12-17.
DUAN Youlian, DAI Lindong, ZHENG Lianqing. Study on the optimization configuration method of static var compensator[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5): 12-17.
- [16] 赵冬梅,白俊辉,刘涵枫,等.提高新能源基地电压支撑能力的构网型场站与无功源优化配置方法[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版), 2025: 1-17. (2025-01-23). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HBDL20250122001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
ZHAO Dongmei, BAI Junhui, LIU Hanfeng, et al. Enhancing voltage support capability of new energy bases through grid-forming stations and reactive power source optimization configuration methods[J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2025: 1-17. (2025-01-23). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HBDL20250122001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [17] 高红均,刘俊勇,沈晓东,等.主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J].中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1634-1645.
GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1645.
- [18] CHOWDHURY M M, KAMALASADAN S, PAUDYAL S. A second-order cone programming (SOCP) based optimal power flow (OPF) model with cyclic constraints for power transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1032-1043.
- [19] 张忠会,雷大勇,蒋昌辉,等.基于二阶锥规划和NNC法的交直流混合配电网双层规划模型及其求解方法[J].中国电机工程学报, 2023, 43(1): 70-85.
ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, JIANG Changhui, et al. A bi-level planning model and its solution method of AC/DC hybrid distribution network based on second-order cone programming and NNC method [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 70-85.
- [20] 金璐,何伟,闫华光,等.基于改进TOPSIS的乡镇综合能源系统效益综合评价方法[J].电测与仪表, 2023, 60(2): 1-9.
JIN Lu, HE Wei, YAN Huaguang, et al. Comprehensive evaluation method for benefits of township integrated energy system based on improved TOPSIS [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 1-9.
- [21] 李天格,胡志坚,谈竹奎,等.基于鲁棒增广约束法的综合能源系统多目标多阶段供能优化配置方法[J].电网技术, 2024, 48(7): 2723-2733.
LI Tiange, HU Zhijian, TAN Zhukui, et al. Multi-objective and multi-stage energy supply configuration method for integrated energy system based on AUGMECON-R [J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2723-2733.
- [22] 陈艳梅.基于分布式电源和储能设备选址定容的配电网运行模型与方法研究[D].贵阳:贵州大学, 2025.
CHEN Yanmei. Research on operation model and method of distribution network based on location and constant capacity of distributed power supply and energy storage equipment[D]. Guiyang: Guizhou University, 2025.
- [23] 任振宇,张师.基于灰狼算法的电力系统无功优化控制[J].黑龙江电力, 2021, 43(1): 64-67.
REN Zhenyu, ZHANG Shi. Reactive power optimization control in power system based on gray wolf algorithm [J]. Heilongjiang Electric Power, 2021, 43(1): 64-67.

收稿日期: 2025-07-26; 修回日期: 2025-11-07

作者简介:

李双伟(1984),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统自动化、主动配电网优化运行方面的研究工作。

(本文编辑:孙文文)