

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.04.009

考虑储能特性的含 E-SOP 有源配电台区优化控制策略

余炜徐¹, 魏业文^{1,2}, 袁鹏³, 张思佳¹, 周志鹏¹, 张杰¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 智慧能源技术湖北省工程研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学创新创业学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:针对配电网中分布式电源渗透率提高导致的潮流倒送、电压波动和供电能力不足等问题,文中提出一种基于储能特性的三端智能软开关(three-terminal intelligent soft open point, E-SOP)有源配电台区优化控制策略。首先,深入分析 E-SOP 的拓扑,建立其数学模型,为后续优化控制奠定基础。其次,提出一种基于电压-功率灵敏度的 E-SOP 选址规划模型,以确定其最佳安装位置。在此基础上,构建以综合费用和电压偏差最小化为目标的优化模型,实现 E-SOP 容量配置。该模型通过锥松弛技术转换为二阶锥规划模型,并采用粒子群算法求解。最后,通过 IEEE 33 节点柔性互联系统的仿真验证所提策略的有效性,并在 IEEE 69 节点系统中进一步验证其适用性和优越性。结果表明,相比传统无 E-SOP 互联系统,所提策略可使电压偏差降低 2.24%,日均损耗减少 50.41%,综合成本下降 21.74%,适用于不同规模的配电系统。

关键词:储能特性;三端智能软开关(E-SOP);有源配电台区;电压-功率灵敏度;选址规划;二阶锥规划模型

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)04-0080-10

0 引言

随着现代电力系统的不断发展,配电台区作为电力系统的重要组成部分,其运行状态直接影响着地方经济发展和用户日常生活质量。然而,以光伏、风力发电等为代表的高比例分布式电源(distributed generation, DG)以及各类新型用电设备的大量接入,给配电网的安全运行带来新的挑战^[1-4]。近年来,低压配电网的结构日益复杂,负荷类型也愈加多样化,导致配电台区面临潮流倒送、电压波动以及供电能力不足等问题^[5-6]。

传统的有源台区电压调节方法主要依赖于硬件设备的调控,例如变压器分接开关^[7]和电容器组的投切^[8]等。然而,这些方法在响应速度和调节灵活性方面存在一定局限性。随着电力电子技术和智能控制技术的快速发展,智能软开关(soft open point, SOP)因其卓越的功率调控能力和快速功率转移性能,逐渐成为研究热点^[9-11]。相较于传统设备,SOP 不仅能发挥联络开关的作用,实现台区间的互联,还能在有源台区互联中对电压进行精确控制和动态调节,从而实现连续调压的目标^[12-14]。文献^[15]提出一种 SOP 与联络开关并联的配电网互联方案,该方案兼顾 SOP 的经济规划与转供电需求,为低压配电台区的互联互通提供新的解决方案,能有效提升台区的供电水平。

此外,针对含 SOP 的配电网优化规划,已有大量研究。文献^[16]提出一种源-网-荷-储双层协同规划模型,不仅优化 SOP 的位置与容量配置,还考虑网络损耗与电压水平的改善。文献^[17]综合考虑 SOP 接入对配电网网络损耗、可再生能源消纳、供电可靠性以及需求侧响应的影响,基于成本效益分析方法构建优化模型,实现经济效益最大化。文献^[18]提出一种基于 SOP 柔性互联的配电网电能优化策略,在兼顾 SOP 与变压器损耗的基础上,进一步提升系统的经济性与可靠性。然而,以上研究主要聚焦于 SOP 的规划与运行优化,尚未充分考虑 SOP 的能量供给能力。

目前,针对有源配电网 SOP 选址问题的研究仍较为有限。文献^[19]提出一种优化配置 SOP 的方法,该方法综合考虑网络增容与无功支撑的协同作用。文献^[20]则基于规划决策者分析的局限性,提出一种面向配电网的基于储能特性的三端智能软开关(three-terminal intelligent soft open point, E-SOP)的优化规划方法。然而,现有研究仍缺乏对 E-SOP 选址、调控策略及其对有源台区电压和功率稳定性综合影响的系统性分析。

基于前述研究与分析,为解决有源台区电压波动、负荷波动及供电能力不足的问题,文中提出一种考虑储能特性的含 E-SOP 有源配电台区优化控制策略。首先,建立含 E-SOP 的台区互联系统结构模型,并推导 E-SOP 的数学模型。其次,综合考虑台区变压器、线路等设备的损耗特性,结合负荷波

收稿日期:2024-12-30;修回日期:2025-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52377191)

动与 DG 接入对配台区的影响, 提出基于电压-功率灵敏度的 E-SOP 选址规划模型, 以确定 E-SOP 的最佳接入位置。然后, 构建以综合费用与电压偏差最小化为目标的多目标优化模型, 采用锥松弛技术和粒子群算法进行迭代寻优, 实现 E-SOP 优化配置。最后, 通过 IEEE 33 节点柔性互联系统和 IEEE 69 节点系统的仿真算例, 验证所提 E-SOP 选址方案和优化调控策略在改善系统电压、降低网络损耗方面的有效性和准确性。

1 含 E-SOP 台区互联系统的模型

在当前电力系统应用中, SOP 的连接方式、接入位置及其功能存在一定差异^[21], 其主要应用场景为中压和低压配电网。文中通过 SOP 实现不同有源台区的互联, 以调节功率流动, 提升台区运行的灵活性和响应速度。然而, SOP 仅具备功率交换和潮流优化功能, 无法独立提供能量支撑, 因此引入储能系统(energy storage system, ESS)以弥补这一不足。在有源台区互联系统中, E-SOP 能够从空间、能量和功率等多维度提升配电网的灵活性和响应能力, 从而实现电压的优化调节。

现有研究主要集中于双端 SOP, 而文中提出的含 ESS 的三端 SOP, 即 E-SOP, 则是一种全控型电力电子装置。该装置由 3 个背靠背连接的电压源型变流器(voltage source converter, VSC)构成^[22-23]。在此基础上, 进一步在 E-SOP 拓扑的直流侧引入 DC-DC 变换器并联 ESS, 从而构建一种功能更综合、运行更灵活的新型配电装置, 如图 1 所示。其中, E_a 、 E_b 、 E_c 为三相交流电源的电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为 VSC 输出的三相交流电流; R 、 L 、 C_1 分别为 VSC 馈线的电阻、电感和滤波电容; i_1 、 i_2 、 i_3 分别为 VSC1、VSC2、VSC3 向直流侧供电的直流电流; C_2 为直流侧的稳压电容。

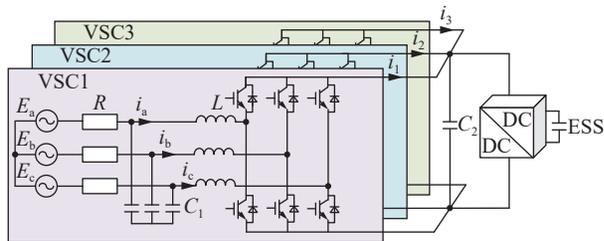


图 1 E-SOP 拓扑

Fig.1 Topology of E-SOP

采用 E-SOP 进行功率调控, 通过台区间的功率交互实现潮流优化与电压优化^[24-25]。在优化运行过程中, 须特别考虑功率交互引起的损耗问题。文中假设 E-SOP 存在一定的有功功率损耗, 且该损耗

受 ESS 的有功与无功功率输出的影响。

根据配台区的实际运行特性, E-SOP 的所有端口功率与 ESS 的有功功率、有功损耗以及充放电功率之和应保持平衡, 即为 0。该端口的功率平衡关系可表述为:

$$\sum_{\gamma=1}^3 P_{\text{sop},\gamma,t} + \sum_{\gamma=1}^3 P_{\text{loss},\gamma,t}^{\text{sop}} + P_{\text{ESS},t}^{\text{ch}} - P_{\text{ESS},t}^{\text{dis}} = 0 \quad (1)$$

$$P_{\text{loss},\gamma,t}^{\text{sop}} = \alpha_{\text{sop},\gamma} \sqrt{P_{\text{sop},\gamma,t}^2 + Q_{\text{sop},\gamma,t}^2} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{sop},\gamma,t}$ 、 $Q_{\text{sop},\gamma,t}$ 分别为 E-SOP 在 t 时刻第 γ 端口输出的有功功率和无功功率; $P_{\text{loss},\gamma,t}^{\text{sop}}$ 为 E-SOP 在 t 时刻第 γ 端口的有功功率损耗; $P_{\text{ESS},t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{\text{ESS},t}^{\text{dis}}$ 分别为 ESS 在 t 时刻的充、放电功率; $\alpha_{\text{sop},\gamma}$ 为 E-SOP 第 γ 端口的有功功率损耗系数。

E-SOP 的容量约束如下:

$$\sqrt{P_{\text{sop},\gamma,t}^2 + Q_{\text{sop},\gamma,t}^2} \leq S_{\text{sop},\gamma,\text{max}} \quad (3)$$

E-SOP 的有功功率、无功功率约束如下:

$$\begin{cases} P_{\text{sop},\gamma,\text{min}} \leq P_{\text{sop},\gamma,t} \leq P_{\text{sop},\gamma,\text{max}} \\ Q_{\text{sop},\gamma,\text{min}} \leq Q_{\text{sop},\gamma,t} \leq Q_{\text{sop},\gamma,\text{max}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $S_{\text{sop},\gamma,\text{max}}$ 为 E-SOP 中第 γ 端口的最大容量; $P_{\text{sop},\gamma,\text{min}}$ 、 $P_{\text{sop},\gamma,\text{max}}$ 分别为 E-SOP 中第 γ 端口有功功率的最小值和最大值; $Q_{\text{sop},\gamma,\text{min}}$ 、 $Q_{\text{sop},\gamma,\text{max}}$ 分别为 E-SOP 中第 γ 端口无功功率的最小值和最大值。

含 E-SOP 台区中的 ESS 模型如下:

$$E_{\text{ESS},t} = E_{\text{ESS},t-1} + \beta_{\text{ch}} P_{\text{ESS},t}^{\text{ch}} \Delta t - \frac{P_{\text{ESS},t}^{\text{dis}}}{\beta_{\text{dis}}} \Delta t \quad (5)$$

$$0 \leq P_{\text{ESS},t}^{\text{ch}} \leq \alpha_{\text{ch}} P_{\text{ESS},\text{max}}^{\text{ch}} \quad (6)$$

$$0 \leq P_{\text{ESS},t}^{\text{dis}} \leq \alpha_{\text{dis}} P_{\text{ESS},\text{max}}^{\text{dis}} \quad (7)$$

$$\alpha_{\text{ch}} + \alpha_{\text{dis}} \leq 1 \quad (8)$$

$$E_{\text{ESS},\text{min}} \leq E_{\text{ESS},t} \leq E_{\text{ESS},\text{max}} \quad (9)$$

式中: $E_{\text{ESS},t}$ 为 t 时刻含 E-SOP 台区中 ESS 的电量; β_{ch} 、 β_{dis} 分别为含 E-SOP 台区中 ESS 的充、放电系数; Δt 为时间间隔; $P_{\text{ESS},\text{max}}^{\text{ch}}$ 、 $P_{\text{ESS},\text{max}}^{\text{dis}}$ 分别为含 E-SOP 台区中 ESS 的充、放电功率的最大值; α_{ch} 、 α_{dis} 分别为 ESS 的充、放电的状态值, 当 α_{ch} 值为 1 时表示 ESS 处于充电状态, 当 α_{dis} 值为 1 时表示 ESS 处于放电状态; $E_{\text{ESS},\text{min}}$ 、 $E_{\text{ESS},\text{max}}$ 分别为含 E-SOP 台区中 ESS 的电量最小值和最大值。

2 含 E-SOP 有源配台区优化控制策略

文中提出的考虑储能特性的含 E-SOP 有源配台区优化控制策略, 如图 2 所示。该策略由上下两层协同实现: 上层通过综合分析各种损耗, 建立电压-功率灵敏度计算模型, 并将负荷波动、DG 出力特性纳入模型, 以确定 E-SOP 的最优接入位置;

下层则构建考虑投资、运维、损耗费用和节点电压偏差的多目标优化模型,优化 E-SOP 容量配置的规划方案。

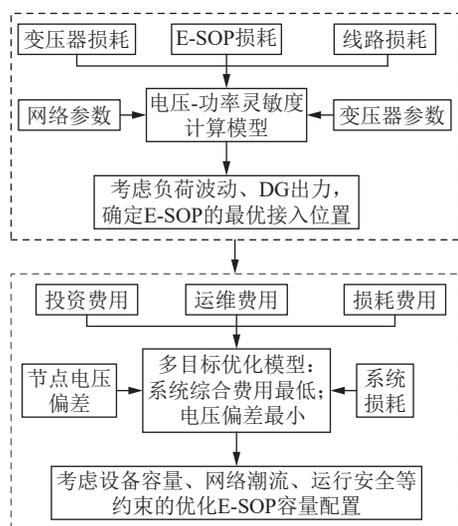


图2 含 E-SOP 有源配电台区优化控制策略
Fig.2 Optimization control strategy for active distribution substations with E-SOP

2.1 基于电压-功率灵敏度的 E-SOP 选址

当 E-SOP 接入有源台区时,会引起互联台区之间的有功功率交互,并提供一定的无功补偿。由于配电网中存在大量 DG,且负荷随时间变化,需要评估节点电压对有功功率变化的敏感程度。电压-功率灵敏度是评估电力系统中节点电压对有功功率变化敏感程度的有效工具^[26]。因此,文中建立基于电压-功率灵敏度的 E-SOP 有源台区互联规划模型,通过计算不同情况下的灵敏度,确定 E-SOP 的最优接入位置。

以图3所示的简化配电线路为例,推导节点电压降落表达式,并计算各节点的电压-功率灵敏度。

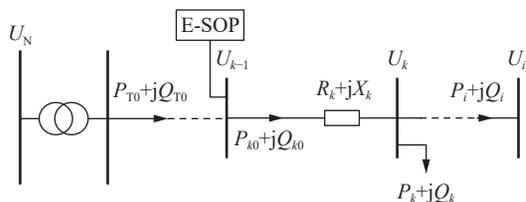


图3 配电线路简化示意
Fig.3 Simplified schematic of a distribution line

图3中, U_i 为节点 i 的电压; U_N 为平衡节点即变压器输出的电压; P_{T0} 、 Q_{T0} 分别为变压器输出的有功、无功功率; P_{k0} 、 Q_{k0} 分别为节点 $k-1$ 和节点 k 之间流过的有功、无功功率; P_k 、 Q_k 分别为节点 k 流过的有功、无功功率; U_k 为节点 k 的电压; P_i 、 Q_i 分别为节点 i 流过的有功、无功功率; R_k 、 X_k 分别为节点 k 的总电阻和电抗; n 为系统节点总数。

任意节点 i 的电压表达式如下:

$$U_i = U_N - \frac{R_i P_i + X_i Q_i}{U_i} = U_N - \frac{\sum_{k=i}^n R_k P_k + \sum_{k=i}^n X_k Q_k}{U_i} \quad (10)$$

式中: R_i 、 X_i 分别为节点 i 的电阻、电抗。

配电系统中任意节点的功率都会受到其他节点功率的影响,因此文中综合考虑变压器、E-SOP 和线路的损耗以及其他节点注入的功率,得到:

$$P_i = P_T + P_{sop} + \sum_{k=i}^n (P_k + P_{loss,k}) \quad (11)$$

$$Q_i = Q_T + \sum_{k=i}^n (Q_k + Q_{loss,k}) \quad (12)$$

式中: P_T 、 Q_T 分别为变压器的总有功、无功损耗; P_{sop} 为 E-SOP 的损耗; $P_{loss,k}$ 、 $Q_{loss,k}$ 分别为节点 k 的有功、无功损耗。

其中,变压器损耗的计算公式为:

$$P_{T,m} = P_{0,m} + P_{k0,m} \frac{P_{T,m,t}^2 + Q_{T,m,t}^2}{S_{r,m}^2} \quad (13)$$

$$Q_{T,m} = Q_{k0,m} \frac{P_{T,m,t}^2 + Q_{T,m,t}^2}{S_{r,m}^2} \quad (14)$$

式中: $P_{T,m}$ 、 $Q_{T,m}$ 、 $P_{0,m}$ 、 $P_{k0,m}$ 、 $Q_{k0,m}$ 分别为变压器 m 的有功损耗、无功损耗、空载有功损耗、节点 k 有功损耗、节点 k 无功损耗; $P_{T,m,t}$ 、 $Q_{T,m,t}$ 分别为变压器 m 在 t 时刻实际输出的有功功率、无功功率; $S_{r,m}$ 为变压器 m 的额定容量。

由于文中所考虑的是三相系统下 3 个有源台区的互联,因此系统损耗的计算公式如下:

$$P_i = \sum_{m=1}^3 P_{T,m} + \sum_{\gamma=1}^3 P_{sop,\gamma,t} + \sum_{k=i}^n \left(P_k + \frac{P_{k0}^2 + Q_{k0}^2}{U_k^2} R_k \right) \quad (15)$$

$$Q_i = \sum_{m=1}^3 Q_{T,m} + \sum_{k=i}^n \left(Q_k + \frac{P_{k0}^2 + Q_{k0}^2}{U_k^2} X_k \right) \quad (16)$$

电压-功率灵敏度描述系统中某节点的功率微小变化对其他节点电压的影响程度。当节点 j 的功率发生变化时,节点 i 的电压也会相应变化,故对节点 i 的电压 U_i 进行求导得到式(17)一式(20)所示方程。

当 $k = j$ 时,得到:

$$\frac{\partial U_i}{\partial P_j} = -\frac{\sum_{k=i}^n R_k}{U_i} \times \frac{\partial}{\partial P_j} \left[\sum_{m=1}^3 \frac{2P_{k0,m} P_{T,m,t}}{S_{r,m}^2} + \sum_{\gamma=1}^3 \alpha_{sop,\gamma} \times \frac{P_{sop,\gamma,t}}{\sqrt{P_{sop,\gamma,t}^2 + Q_{sop,\gamma,t}^2}} + \sum_{k=i}^n \left(1 + \frac{2R_k P_{k0}}{U_k^2} \right) \right] \quad (17)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial Q_j} = -\frac{\sum_{k=i}^n X_k}{U_i} \times \frac{\partial}{\partial Q_j} \left[\sum_{m=1}^3 \frac{2Q_{k0,m}Q_{T,m,t}}{S_{r,m}^2} + \sum_{k=i}^n \left(1 + \frac{2X_k Q_{k0}}{U_k^2} \right) \right] \quad (18)$$

当 $k \neq j$ 时, 得到:

$$\frac{\partial U_i}{\partial P_j} = -\frac{\sum_{k=i}^n R_k}{U_i} \times \frac{\partial}{\partial P_j} \left(\sum_{m=1}^3 \frac{2P_{k0,m}P_{T,m,t}}{S_{r,m}^2} + \sum_{\gamma=1}^3 \alpha_{\text{sop},\gamma} \times \frac{P_{\text{sop},\gamma,t}}{\sqrt{P_{\text{sop},\gamma,t}^2 + Q_{\text{sop},\gamma,t}^2}} + \sum_{k=i}^n \frac{2R_k P_{k0}}{U_k^2} \right) \quad (19)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial Q_j} = -\frac{\sum_{k=i}^n X_k}{U_i} \times \frac{\partial}{\partial Q_j} \left(\sum_{m=1}^3 \frac{2Q_{k0,m}Q_{T,m,t}}{S_{r,m}^2} + \sum_{k=i}^n \frac{2X_k Q_{k0}}{U_k^2} \right) \quad (20)$$

式中: P_j 、 Q_j 分别为节点 j 流过的有功、无功功率。

根据式(17)~式(20), 可以确定互联台区各节点的电压-功率灵敏度。鉴于文中同时考虑有功和无功因素, 建立综合电压-功率灵敏度模型, 并引入权重系数, 以全面评估两者对系统的影响, 从而更精确地确定 E-SOP 的最佳接入位置。

综合电压-功率灵敏度定义如下:

$$S = w_1 \left| \frac{\partial U_i}{\partial P_j} \right| + w_2 \left| \frac{\partial U_i}{\partial Q_j} \right| \quad (21)$$

式中: S 为电压-有功灵敏度和电压-无功灵敏度的综合灵敏度; w_1 、 w_2 分别为电压-有功灵敏度、电压-无功灵敏度的权重系数。

在当前配电网中, DG 的接入和负荷的波动性会导致节点功率的动态变化。在计算电压-功率灵敏度时, 将 DG 和负荷视为节点的注入功率纳入系统模型。当计算得到的 S 越大时, 表示将 E-SOP 接入该节点能够更有效地调节系统功率, 提高配电网的运行灵活性和稳定性。

2.2 含 E-SOP 有源配电台区运行优化

文中以 1 a 内有源台区互联系统的综合费用和电压偏差最低为目标函数, 表达式如下:

$$\min F = w_3 C_{\text{sop}}^{\text{in}} + w_4 C_{\text{sop}}^{\text{om}} + w_5 C_{\text{sop}}^{\text{loss}} + w_6 F_v \quad (22)$$

式中: F_v 为互联台区系统的电压偏差目标函数; w_3 、 w_4 、 w_5 、 w_6 分别为投资费用、运维费用、损耗费用和电压偏差目标函数的权重系数。

$C_{\text{sop}}^{\text{in}}$ 为年投资费用, 计算如下:

$$C_{\text{sop}}^{\text{in}} = \frac{b(1+b)^{y_{\text{sop}}}}{(1+b)^{y_{\text{sop}}} - 1} \left(\sum_{\gamma=1}^3 C_{\text{sop}} S_{\text{sop},\gamma,\text{max}} + C_{\text{ESS}} \right) \quad (23)$$

式中: b 为贴现率; y_{sop} 为 E-SOP 的经济使用年限; C_{sop} 为 E-SOP 的单位容量投资成本; C_{ESS} 为含 E-SOP 台区中的 ESS 投资费用。

$C_{\text{sop}}^{\text{om}}$ 为年运维费用, 计算如下:

$$C_{\text{sop}}^{\text{om}} = \eta_{\text{sop}} \sum_{\gamma=1}^3 C_{\text{sop}}^{\text{a}} S_{\text{sop},\gamma,\text{max}} + 365 \eta_{\text{ESS}} \times \sum_{t=1}^{24} (P_{\text{ESS},t}^{\text{ch}} + P_{\text{ESS},t}^{\text{dis}}) \quad (24)$$

式中: η_{sop} 为 E-SOP 日运行维护费用系数; $C_{\text{sop}}^{\text{a}}$ 为 E-SOP 的单位容量运维成本; η_{ESS} 为含 E-SOP 台区中的 ESS 日运行维护费用系数。

$C_{\text{sop}}^{\text{loss}}$ 为年损耗费用, 计算如下:

$$C_{\text{sop}}^{\text{loss}} = 365 \mu F_{\text{loss}} \quad (25)$$

式中: μ 为互联台区系统的电价; F_{loss} 为互联台区系统的日综合损耗。

含 E-SOP 互联的有源台区系统综合损耗主要由 E-SOP 损耗、变压器损耗和线路损耗三部分组成。

$$F_{\text{loss}} = \sum_{m=1}^3 P_{T,m} + \sum_{\gamma=1}^3 P_{\text{loss},\gamma,t}^{\text{sop}} + \sum_{k=i}^n \frac{P_{k0}^2 + Q_{k0}^2}{U_k^2} R_k \quad (26)$$

F_v 为互联台区的电压偏差目标函数, 计算如下:

$$F_v = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i \in \Omega} (U_{i,t} - U_i) \quad (27)$$

式中: Ω 为互联台区系统的节点集合; $U_{i,t}$ 为节点 i 的 t 时刻电压; U_i 为电压额定值。

2.3 约束条件

E-SOP 相关约束见式(1)~式(9)。

变压器约束如下:

$$\sqrt{P_{T,m}^2 + Q_{T,m}^2} \leq S_{r,m} \quad (28)$$

网络安全运行约束如下:

$$\begin{cases} U_{i,\text{min}} \leq U_{i,t} \leq U_{i,\text{max}} \\ P_{i,\text{min}} \leq P_i \leq P_{i,\text{max}} \\ Q_{i,\text{min}} \leq Q_i \leq Q_{i,\text{max}} \\ S_{\text{sop},\gamma,\text{max}} \leq S_{i,\text{max}} \end{cases} \quad (29)$$

网络潮流约束如下:

$$P_{i,t} = \sum_{j \in \sigma(i)} U_{i,t} U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) + G_{ii} U_{i,t}^2 = \sum_{\gamma=1}^3 P_{\text{sop},\gamma,t} + P_{i,\text{DG}} - P_{i,\text{LD}} \quad (30)$$

$$Q_{i,t} = \sum_{j \in \sigma(i)} U_{i,t} U_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) - B_{ii} U_{i,t}^2 = \sum_{\gamma=1}^3 Q_{\text{sop},\gamma,t} + Q_{i,\text{DG}} - Q_{i,\text{LD}} \quad (31)$$

$$I_{ij}^2 = (G_{ij}^2 + B_{ij}^2)(U_{it}^2 + U_{jt}^2 - 2U_{it}U_{jt} \cos \theta_{ij}) \leq I_{ij,max}^2 \quad (32)$$

式中： $U_{i,min}$ 、 $U_{i,max}$ 分别为节点*i*的电压最小值和最大值； $P_{i,min}$ 、 $P_{i,max}$ 、 $Q_{i,min}$ 、 $Q_{i,max}$ 分别为节点*i*的有功功率、无功功率最小值和最大值； $S_{i,max}$ 为通过节点*i*的容量上限； $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为在*t*时刻节点*i*流过的有功功率和无功功率； $\sigma(i)$ 为节点*i*相邻节点集合； U_{jt} 为节点*j*的*t*时刻电压； G_{ij} 、 B_{ij} 和 G_{ii} 、 B_{ii} 分别为节点导纳矩阵中的互电导、互电纳和自电导、自电纳； $\theta_{ij,t}$ 为在*t*时刻节点*i*、节点*j*之间的相角差； $P_{i,DG}$ 、 $Q_{i,DG}$ 分别为节点*i*处 DG输出的有功功率和无功功率； $P_{i,LD}$ 、 $Q_{i,LD}$ 分别为节点*i*处负载注入的有功功率和无功功率； I_{ij} 、 $I_{ij,max}$ 分别为节点*i*、节点*j*之间的电流和电流最大值。

3 模型求解

文中提出的综合电压-功率灵敏度模型和含 E-SOP 有源配电台区运行优化均涉及多目标函数。为简化求解，将多目标函数通过线性加权转化为单目标函数，其中权重系数的确定至关重要。目前，权重的影响因素主要分为主观因素（如决策偏好、政策导向）和客观因素（如数据变异性、信息熵）两大类。权重确定方法包括单一主观赋权法、单一客观赋权法和主客观耦合赋权法。单一主观赋权法可能受到决策者偏见影响，缺乏数据支撑。单一客观赋权法则可能忽略决策者的意图，导致结果不符合需求。主客观耦合赋权法结合两者优势，既考虑决策者的实际需求，又基于数据特性，增强了权重确定的科学性。

因此，文中利用主客观耦合赋权法进行各目标函数权重系数的优化，通过乘数归一法将主客观权重进行耦合^[27]，避免单一方法的弊端，最终得到综合权重：

$$w'_\xi = h_\xi g_\xi / \sum_{\xi=1}^6 h_\xi g_\xi \quad (33)$$

式中： w'_ξ 为综合权重系数； h_ξ 为主观权重系数； g_ξ 为客观权重系数； ξ 为权重系数序号。

文中采用层次分析法和熵权法分别确定主观和客观权重，求解过程可参考文献^[27]。综合电压-功率灵敏度和含 E-SOP 有源配电台区优化模型的各项权重典型值如表 1 所示。

文中提出的选址定容规划问题本质上是一个混合整数非线性规划问题。为简化求解过程，采用锥松弛技术将其转化为二阶锥规划模型，具体求解过程详见文献^[28]。在此基础上，利用文献^[29]提

表 1 权重典型值

Table 1 Typical weight values

目标函数权重	h_ξ	g_ξ	综合权重
w_1	0.600	0.55	0.182 0
w_2	0.400	0.45	0.081 2
w_3	0.395	0.12	0.128 6
w_4	0.141	0.15	0.608 2
w_5	0.134	0.25	0.647 1
w_6	0.330	0.48	0.352 9

出的粒子群算法进行迭代优化。此外，权重系数的选取采用主客观耦合赋权法，以综合考虑主观经验和客观数据的影响，求解流程如图 4 所示。

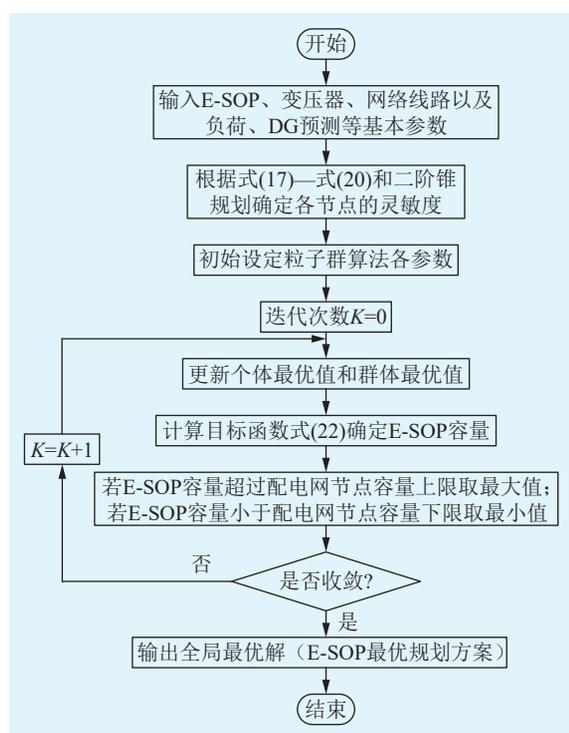


图 4 含 E-SOP 有源配电台区优化控制流程

Fig.4 Optimization control process for active distribution substations with E-SOP

4 算例结果分析

4.1 算例 1

文中采用改进的 IEEE 33 节点配电系统对所提方案进行仿真验证，其结构如图 5 所示。其中，节点 1 为上级电网连接的点，其余节点为变压器的接入节点以及各种设备接入的节点，系统的额定电压为 12.66 kV，所有的台区变压器均为 10 kV/400 V。

考虑到配电系统中 DG 和负荷的波动性，文中在配电系统中接入 3 台光伏 (photovoltaic, PV) 和 3 台风机 (wind turbine, WT)。具体而言，PV 位于节点 14、节点 20 和节点 27，对应的装机容量依次为 0.8、0.6、0.4 MW；WT 位于节点 4、节点 24 和节点

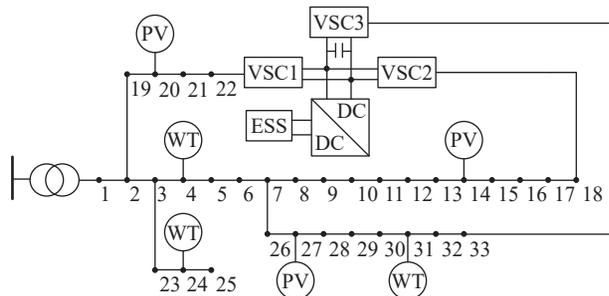


图 5 IEEE 33 节点算例

Fig.5 IEEE 33-node case

31, 对应的装机容量分别为 0.7、0.5、0.3 MW。所有 DG 均在单位功率因数下运行。此外, 文中通过文献[30]获得系统负荷和 DG 的日运行曲线, 如图 6 所示。

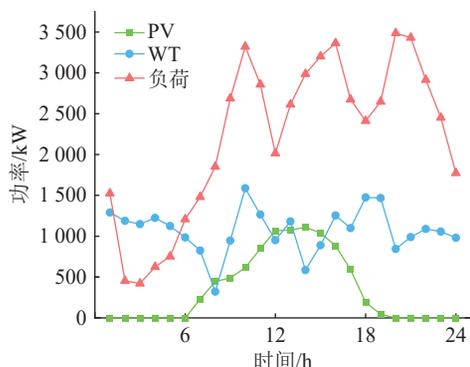


图 6 负荷和 DG 的日运行曲线

Fig.6 Daily operation curves of load and DG

4.1.1 E-SOP 规划结果分析

通过电压-功率灵敏度分析, 可以有效识别关键节点以及电压薄弱区域, 从而优化 E-SOP 的规划与配置。根据文中所提方法对各节点进行计算, 得到各节点的电压-功率灵敏度, 最终部分节点的灵敏度如表 2 所示。根据表 2 计算结果可以得出, 文中提出的选址方法选定节点 7、节点 18 和节点 31 作为 E-SOP 的接入点, 各端口的接入容量分别为 0.30、0.35、0.42 MW。

表 2 待选节点电压-功率灵敏度

Table 2 Voltage-power sensitivity of candidate nodes

节点编号	灵敏度	节点编号	灵敏度
3	0.218	22	0.311
4	0.256	23	0.298
7	0.329	27	0.286
14	0.263	31	0.365
18	0.362	33	0.323

图 7 展示了文中所提策略的 E-SOP 中各 VSC 及 ESS 的有功功率输出情况, 图 8 则展示了 E-SOP 中各 VSC 的无功功率输出。由此可见, E-SOP 不仅

能够在系统中进行有功功率交换, 还可提供无功功率支撑。

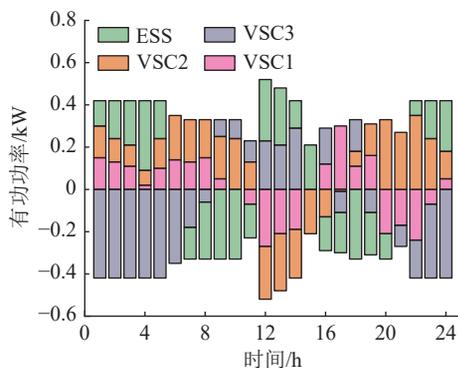


图 7 方案 3 的 E-SOP 各端口的有功功率

Fig.7 Active power at each E-SOP port for scheme 3

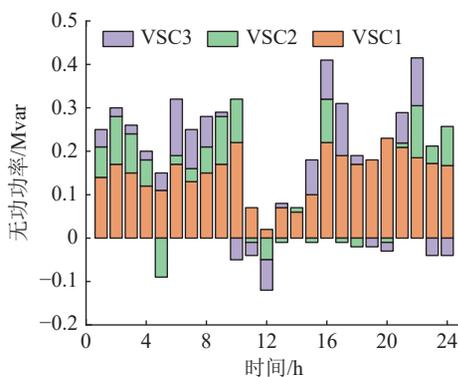


图 8 方案 3 的 E-SOP 各端口的无功功率

Fig.8 Reactive power at each E-SOP port for scheme 3

4.1.2 对比方案分析

为验证文中所提方法的优越性和有效性, 选取以下 6 种方案进行对比分析。

- 方案 1: 文献[30]提出的电压灵敏度选址方法;
- 方案 2: 无 E-SOP 互联的系统;
- 方案 3: 文中所提的电压-功率灵敏度选址方法;
- 方案 4: 仅利用 SOP 互联的系统;
- 方案 5: 不考虑各种损耗的 E-SOP 选址规划方案;
- 方案 6: 文献[18]提出的基于改进损耗灵敏度模型的 SOP 选址规划。

图 9 展示了 6 种方案下的系统综合损耗对比结果。分析表明, 方案 3 在降低有源台区互联系统综合损耗方面具有显著优势。与方案 2 相比, 方案 3 使系统的日均损耗降低了 50.41%, 验证了考虑储能特性的 E-SOP 有源配台区优化控制策略具有显著的节能效果。此外, 方案 3 相较于方案 4, 系统损耗减少了 46.75%, 进一步证明在 SOP 互联的系统中, 充分考虑 ESS 的特性有助于显著降低损耗。同时, 采用 VSC+ESS 的软开关结构能够更有效地优化系统运行性能。与方案 1、方案 5 和方案 6 相比, 方案 3 在损耗方面均有不同程度的降低, 表明

文中提出的选址规划方法在综合性能上具有更高的优越性和实际应用价值。

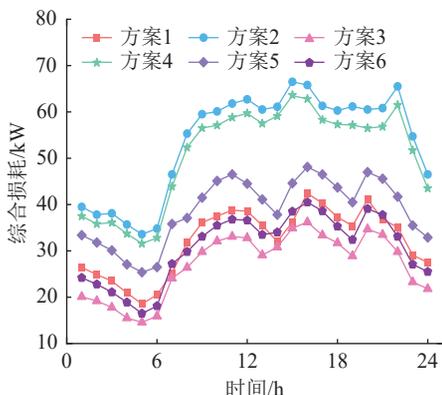


图9 6种方案的系统综合损耗对比
Fig.9 Comparison of total system losses for the six schemes

不同方案下各节点电压偏差的变化情况如图10所示,图中圆环上数字为电压与额定电压的偏差。结果显示,采用E-SOP互联的系统(方案4),相比方案2电压偏差降低了2.24%。进一步比较方案1、方案3、方案5和方案6,发现方案3在减小节点电压偏差方面表现出更优效果。这表明,文中的选址策略在改善系统电压方面具有更高的有效性和实用性,能为系统电压调节提供更优的解决方案。

为进一步验证文中所提技术的优越性和经济性,对比分析6种不同方案的综合成本,如表3所示。

从表3可以看出,虽然未接入E-SOP或SOP的系统不会增加额外的投资和运维成本,但其损耗费用显著高于方案1、方案3、方案4、方案5和方案6。这表明,尽管接入SOP会增加一定的投资和运维成本,但系统的年综合成本显著降低,如方案3的年综合成本相比方案2降低了21.74%。方案3的成本相比方案4降低了18.93%。此外,方案3的成本也相比方案5降低了16.05%。由此可见,

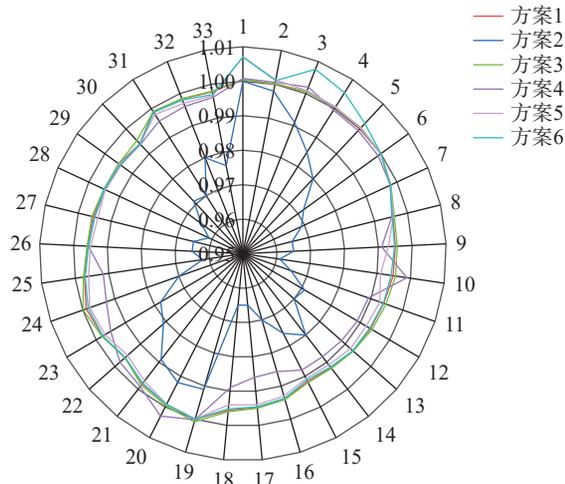


图10 6种方案下各节点电压对比
Fig.10 Comparison of node voltages for the six schemes

表3 6种方案的成本比较
Table 3 Cost comparison of the six schemes 单位: 万元

方案	投资费用	运维费用	损耗费用	年综合成本
1	4.51	1.10	14.17	19.78
2	0	0	24.52	24.52
3	5.40	1.93	11.86	19.19
4	4.51	1.10	18.06	23.67
5	5.40	2.05	15.41	22.86
6	4.56	1.10	14.95	20.61

在有源配电台区系统中引入E-SOP进行互联,并在运行优化中综合考虑SOP、变压器和线路的损耗,能够显著降低系统的年综合成本,体现出其在经济性和效率方面的优势。

4.2 算例2

为进一步验证文中所提策略在其他台区互联中的可行性,文中采用改进的IEEE 69节点系统进行验证分析,其结构如图11所示,参数与算例1相同,并沿用相同的6种对比方案。

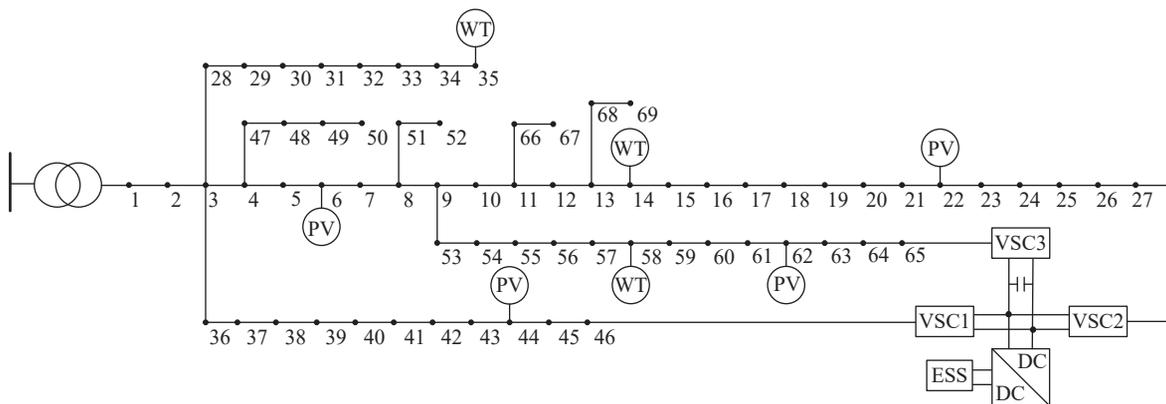


图11 改进的IEEE 69节点算例
Fig.11 Improved IEEE 69-node case

为直观展示所提策略的优越性与实用性,本算例对比不同方案下的电压偏差范围、每日平均损耗和综合成本,具体结果见表4。该结果与算例1中改进的IEEE 33节点配电网结果一致,进一步证明了文中提出的考虑储能特性的E-SOP有源配台区优化控制策略在提升电压质量、减少网络损耗和降低综合成本方面的有效性和优越性。同时,实验结果验证了该策略在不同台区系统结构下的优化效果,表现出良好的适应性与实用性。

表4 算例2的电压偏差、损耗和成本结果对比
Table 4 Comparison of voltage deviation, loss, and cost results for case 2

方案	电压偏差范围/p.u.	每日平均损耗/(MW·h)	综合成本/万元
1	0.974~1.016	1.645	33.69
2	0.931~1.052	2.618	50.12
3	0.983~1.012	1.421	32.06
4	0.966~1.035	2.592	41.35
5	0.978~1.029	1.959	38.39
6	0.969~1.022	1.573	36.56

5 结论

文中提出一种含E-SOP有源配台区优化控制策略,并通过算例验证了其有效性和优越性。研究结果表明:

(1) 所提出的E-SOP不仅能够实现连续、快速的有功功率调节,还能显著提高无功功率调节精度。

(2) 基于电压-功率灵敏度的E-SOP选址规划模型在优化过程中综合考虑了台区变压器、线路等设备的整体损耗,能够充分利用不同台区的功率资源。

(3) 相较于传统的无E-SOP互联系统,所提优化策略使电压偏差降低2.24%,系统日平均损耗降低50.41%,综合成本降低21.74%,且适用于不同规模的配电系统。

参考文献:

- [1] 朱建昆,高红均,贺帅佳,等.考虑供电能力提升的低压配电网柔性互联规划[J].高电压技术,2024,50(8):3545-3559.
ZHU Jiankun, GAO Hongjun, HE Shuaijia, et al. Flexible interconnection planning of low-voltage station area distribution network considering power supply capacity improvement[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3545-3559.
- [2] 田书欣,肖文渊,符杨,等.极端高温灾害下电缆型配电网韧性提升策略研究[J].中国电机工程学报,2025,45(9):3408-3420.
TIAN Shuxin, XIAO Wenyuan, FU Yang, et al. Boosting

resilience of cable distribution networks under extreme high-temperature disaster[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(9): 3408-3420.

- [3] 张彦昌,徐妙风,胡高铭,等.考虑多类型储能系统时空灵活性支撑的配电网日前优化调度策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):104-115.
ZHANG Yanchang, XU Miaofeng, HU Gaoming, et al. A day-ahead optimal scheduling strategy for distribution networks with spatiotemporal flexibility support of multi-type energy storage systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 104-115.
- [4] 明萌,周楠西,高丽媛,等.有源配电网分布式光伏承载力分析评估与应用[J].供用电,2023,40(11):35-44,53.
MING Meng, ZHOU Nanxi, GAO Liyuan, et al. Analysis, evaluation and application of distributed photovoltaic carrying capacity in active distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(11): 35-44,53.
- [5] 杨婧颖,王武林,张明敏,等.考虑分布式光伏和储能参与的配电网电压分层控制方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(5):111-120,215.
YANG Jingying, WANG Wulin, ZHANG Mingmin, et al. Voltage hierarchical control method of distribution network considering distributed photovoltaic and energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 111-120, 215.
- [6] 祁向龙,陈健,赵浩然,等.多时间尺度协同的配电网分层深度强化学习电压控制策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(18):53-64.
QI Xianglong, CHEN Jian, ZHAO Haoran, et al. Multi-time scale cooperative voltage control strategy of a distribution network based on hierarchical deep reinforcement learning[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 53-64.
- [7] 杨鹏,李铁成,邵晨,等.基于双旋转移相变压器的有源配电网多台区同步调压及降损优化策略[J].南方电网技术,2024,18(2):67-76.
YANG Peng, LI Tiecheng, SHAO Chen, et al. Optimization strategy for synchronous voltage regulation and loss reduction in multi-substation areas of active distribution networks based on double rotating phase shift transformers[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 67-76.
- [8] 郭雪丽,胡志勇,王爽,等.考虑大规模风光分层接入的配电网多层协调无功优化方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(12):113-122.
GUO Xueli, HU Zhiyong, WANG Shuang, et al. A multi-layer coordinated reactive power optimization method for a distribution network considering large-scale distributed wind-photovoltaic hierarchical access[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 113-122.
- [9] 王成山,季节,冀浩然,等.配电系统智能软开关技术及应用[J].电力系统自动化,2022,46(4):1-14.
WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and

- application of soft open points in distribution networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(4): 1-14.
- [10] 杨德昌, 吴燕, Pandzic Hrvoje, 等. 考虑可平移负荷和智能软开关的主动配电网故障恢复方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(1): 183-192.
- YANG Dechang, WU Yan, HRVOJE P, et al. Fault recovery of active distribution network considering translatable load and soft open point[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(1): 183-192.
- [11] 王子铮, 陈宇佳, 邵力拓, 等. 考虑移动储能和智能软开关的配电网多时间尺度协同调度[J]. *供用电*, 2024, 41(7): 39-48.
- WANG Zizheng, CHEN Yujia, SHAO Lituo, et al. Multi time scale collaborative scheduling of distribution networks considering mobile energy storage and soft open point[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(7): 39-48.
- [12] HUO Y D, LI P, JI H R, et al. Data-driven adaptive operation of soft open points in active distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(12): 8230-8242.
- [13] 史明明, 刘瑞煌, 张宸宇, 等. 考虑输电网与柔性互联配电网交互影响的可靠性评估方法[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(4): 77-87.
- SHI Mingming, LIU Ruihuang, ZHANG Chenyu, et al. Analytical evaluation method of reliability considering interaction between transmission network and flexible interconnected distribution network[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(4): 77-87.
- [14] LU X J, ZHOU J, OMER S. Two-layer operation optimization of concentrated solar power with thermal energy storage system and soft open point[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 146: 108788.
- [15] 李岩, 陈夏, 李巍巍, 等. 基于智能软开关与联络开关并联的柔性配电网互联结构与控制技术[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(13): 4749-4760.
- LI Yan, CHEN Xia, LI Weiwei, et al. Research on interconnection structure and control technology of flexible distribution network based on soft open point in parallel with interconnection switch[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(13): 4749-4760.
- [16] 张忠会, 雷大勇, 李俊, 等. 基于自适应 ϵ -支配多目标粒子群算法的含 SOP 的主动配电网源-网-荷-储双层协同规划模型[J]. *电网技术*, 2022, 46(6): 2199-2212.
- ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, LI Jun, et al. Source-network-load-storage bi-level collaborative planning model of active distribution network with SOP based on adaptive ϵ -dominating multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(6): 2199-2212.
- [17] DEAKIN M, SARANTAKOS I, GREENWOOD D, et al. Comparative analysis of services from soft open points using cost-benefit analysis[J]. *Applied Energy*, 2023, 333: 120618.
- [18] 魏承志, 李俊豪, 涂春鸣, 等. 计及变压器与 SOP 损耗特性的柔性互联配电网优化调控策略[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 69-78.
- WEI Chengzhi, LI Junhao, TU Chunming, et al. Optimal regulation and control strategy for flexible interconnected distribution network considering loss characteristics of transformers and soft open points[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 69-78.
- [19] 王健, 吴逸凡, 陶安琪, 等. 考虑网络增容与无功支撑的混合型智能软开关优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(12): 18-25.
- WANG Jian, WU Yifan, TAO Anqi, et al. Optimal allocation of hybrid open points considering network capacity increase and reactive power support[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(12): 18-25.
- [20] 刘桂百, 彭飞翔, 周玮, 等. 前景导向的主动配电网智能储能软开关规划方法[J]. *电网技术*, 2024, 48(9): 3822-3833.
- LIU Guibai, PENG Feixiang, ZHOU Wei, et al. Prospect-oriented planning method of soft open points integrated with energy storage system of active distribution network[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(9): 3822-3833.
- [21] 涂春鸣, 王鑫, 杨万里, 等. 考虑台区变压器经济运行区间的智能软开关控制策略[J]. *电网技术*, 2023, 47(2): 848-858.
- TU Chunming, WANG Xin, YANG Wanli, et al. Soft open point control strategy considering economic operation area of distribution transformer[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(2): 848-858.
- [22] 于文山, 黎明, 由蕤. 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 Energetica Sinica*, 2022, 43(3): 101-110.
- [23] WANG Z Q, SHENG L S, HUO Q H, et al. An improved model predictive control method for three-port soft open point[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021(1): 9910451.
- [24] 章博, 刘晟源, 林振智, 等. 高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 86-94.
- ZHANG Bo, LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Distribution network reconfiguration with high penetration of renewable energy considering demand response and soft open point[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 86-94.
- [25] 王杰, 王维庆, 王海云, 等. 考虑越限风险的主动配电网中 DG、SOP 与 ESS 的两阶段协调规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24): 71-82.
- WANG Jie, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Two-stage coordinated planning of DG, SOP and ESS in an active distribution network considering violation risk[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 71-82.
- [26] 张波, 文晓君, 吴璇. 基于电压-功率灵敏度的有源配电网数

- 据驱动电压协调控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(1): 35-42.
- ZHANG Bo, WEN Xiaojun, WU Xuan. Data-driven coordinated voltage control strategy for active distribution network based on voltage-power sensitivity[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2025, 37(1): 35-42.
- [27] 陈普凡. 新型配电网电压优质规划的项目评价与优选方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- CHEN Pufan. Research on evaluation and optimization selection method of voltage quality improvement projects in new distribution network[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [28] 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.
- [29] AZIZI A, VAHIDI B, NEMATOLLAHI A F. Reconfiguration of active distribution networks equipped with soft open points considering protection constraints[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2023, 11(1): 212-222.
- [30] 熊正勇, 陈天华, 杜磊, 等. 基于改进灵敏度分析的有源配电网智能软开关优化配置[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 129-137.
- XIONG Zhengyong, CHEN Tianhua, DU Lei, et al. Optimal allocation of soft open point in active distribution network based on improved sensitivity analysis[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 129-137.

作者简介:



余炜徐

余炜徐(2001), 男, 硕士在读, 研究方向为配电网互联技术(E-mail: ywx5811@163.com); 魏业文(1987), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新能源并网和消纳; 袁鹏(1995), 男, 硕士, 研究方向为自动化控制。

Optimization control strategy for active distribution areas with E-SOP considering energy storage characteristics

YU Weixu¹, WEI Yewen^{1,2}, YUAN Peng³, ZHANG Sijia¹, ZHOU Zhipeng¹, ZHANG Jie¹

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Intelligent Energy Technology (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 3. College of Innovation and Entrepreneurship, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: To address issues such as reverse power flow, voltage fluctuations, and insufficient power supply capacity resulting from the increased penetration of distributed generation in distribution networks, an optimized control strategy for active distribution substations incorporating a three-terminal intelligent soft open point (E-SOP) for energy storage is proposed. Firstly, the topology of E-SOP is thoroughly analyzed, and a corresponding mathematical model is established to lay the foundation for subsequent optimization control. Secondly, a site selection and planning model for the E-SOP based on voltage-power sensitivity is proposed to determine its optimal installation location. On this basis, a multi-objective optimization model is developed, aiming to minimize comprehensive costs and voltage deviations, to configure the capacity of the E-SOP. This model is transformed into a second-order cone programming model using conic relaxation techniques and solved iteratively through a particle swarm optimization algorithm. Finally, simulations on an IEEE 33-node flexible interconnected system validate the effectiveness of the proposed strategy, and further simulations on an IEEE 69-node system confirm its applicability and superiority. The results indicate that, compared to traditional systems without E-SOP interconnection, the proposed strategy reduces voltage deviation by 2.24%, daily average system losses by 50.41%, and overall costs by 21.74%, making it suitable for distribution systems of various scales.

Keywords: energy storage characteristics; three-terminal intelligent soft open point (E-SOP); active distribution substation; voltage-power sensitivity; site selection and planning; second-order cone programming model

(编辑 吴昊)