

基于支路功率灵敏度分析的柔性配电网 智能软开关优化配置

孙嘉,韩顺天,倪良华,吕干云

(南京工程学院 电力工程学院,江苏 南京 211167)

摘要:大量分布式电源(DG)不断接入配电网中,易引发电压越限和网络阻塞等问题;智能软开关(SOP)可以快速实现柔性互联和功率调节,能够有效解决DG接入带来的问题。考虑优先在有功功率受负荷影响大的支路上安装SOP,提出一种基于支路有功功率灵敏度分析的智能软开关选址定容策略。首先在潮流方程中引入负荷增长因子,理论推导反映DG出力及负荷时序变化特性的支路功率灵敏度,按照其值大小进行SOP选址排序;其次建立了SOP选址定容优化模型,采用二阶锥算法求解;最后,在改进的IEEE 33节点配电系统上进行验证。算例结果表明,所提出的方法可有效节省配电网年度综合运行成本,降低系统网络损耗,改善节点电压偏差。

关键词:柔性配电网;支路功率灵敏度;智能软开关;选址定容;二阶锥规划

中图分类号:TM7 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26129

Optimal Configuration of SOP in Flexible Distribution Network Based on Branch Power Sensitivity Analysis

SUN Jia, HAN Shuntian, NI Lianghua, LÜ Ganyun

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

Abstract: While a large number of distributed generator (DG) keep penetrating into distribution networks, the problems such as voltage violation and network power congestion become more and more serious. Soft open point (SOP) can quickly achieve flexible interconnection and accurate power flow control, effectively addressing the challenges caused by the integration of DG. Considering the installation priority of SOP on branches where active power is heavily affected by loads, an intelligent soft switch site selection and capacity determination strategy based on branch active power sensitivity analysis was proposed. Firstly, a load growth factor was introduced into the power flow equations, and the branch power sensitivity, which reflects time series variation of DG output and load, was theoretically derived. The selection of SOP sites was then ranked according to this sensitivity value. Secondly, the model of SOP site selection and capacity optimization was established, which was solved using a second-order cone algorithm. Finally, validation was conducted on the improved IEEE 33 node distribution system. Results show that the proposed method can affectively save annual comprehensive operation cost of distribution networks, reduce system network losses and improve node voltage deviation.

Key words: flexible distribution network; branch power sensitivity; soft open point(SOP); site selection and capacity determination; second-order cone planning

近年来,大量分布式电源(DG)不断渗透到配电网中^[1]。由于其具有明显的随机性和波动性,易引发电压越限、双向潮流、网络阻塞等问题,严重威胁配电网安全稳定运行。新型电力电子器

件智能软开关(SOP)应用到有源的配电网中^[2],能灵活应对分布式电源出力的不确定性,改善系统运行状态。现阶段SOP投资成本高,合理配置SOP并发挥其调节能力具有重要意义^[3]。

基金项目:江苏“六大人才高峰”创新团队项目(2019-TD-XNY004);江苏省高等学校自然科学研究重大项目(2019052)

作者简介:孙嘉(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为柔性配电网运行与控制,Email:254062114@qq.com

就 SOP 选址与定容问题不少专家从不同角度作了研究。文献[4]采用基于机会约束规划方法建立 SOP 选址定容的模型。文献[5]提出含储能的三端 SOP 与需求侧响应的有功无功调节手段,将 DG 与无功补偿设备相结合对配电网进行优化。文献[6]基于快速失负荷风险理论,提出计及重要用户失负荷风险对多端 SOP 优化配置策略。文献[7]基于条件风险价值理论,提出考虑采用多种主动调节措施进行网络重构的 SOP 选址定容方法。以上研究均直接将 SOP 的安装位置容量作为决策变量,没有考虑分布式电源时序出力对系统运行状态产生的影响。

文献[8]考虑分布式电源出力变化影响电压波动,从改善电压分布的角度采用改进灵敏度分析方法优化 SOP 选址,采用二阶锥算法确定配置容量,但其无法全面反映 DG 波动与负荷变化导致系统功率产生的时序性变换。文献[9]提出了一种基于有功潮流调节灵敏度参数的 SOP 选址策略,并考虑投资运维成本建立双层优化模型确定 SOP 容量,不足之处在于计算功率灵敏度方法比较复杂,且对配电网的适用性差。文献[10]基于线路潮流介数的概念,采用潮流介数识别关键线路,避免大量寻优过程,但只确定了 SOP 的位置,没有考虑 SOP 安装容量对配网运行经济性的影响。

本文提出一种基于支路有功功率灵敏度的分析方法进行 SOP 选址定容的策略,充分发挥 SOP 对线路潮流调节能力强的功能^[11]。方法全面考虑 DG 出力及负荷功率变化的时序特性,首先理论推导了待装支路有功功率对负荷增长率的灵敏度计算公式,按照其值由大到小确定 SOP 在配电网中的优先接入顺序,最大程度上避免了配电网受电源及负荷波动的影响;随后,构建了基于支路有功功率灵敏度的 SOP 定容优化数学模型,采用二阶锥规划算法求解;最后采用改进的 IEEE 33 节点配电系统进行分析,验证了所提出 SOP 选址定容策略的有效性。

1 SOP 基本结构与工作原理

本文采用背靠背电压源型换流器 B2B VSC 进行分析^[11]。典型双端 SOP 结构示意图如图 1 所示。

双端 SOP 两端的换流器在结构上完全对称,通过合理的调度指令即可实现功率精准控制与

灵活双向交换。SOP 接入位置如图 2 所示。

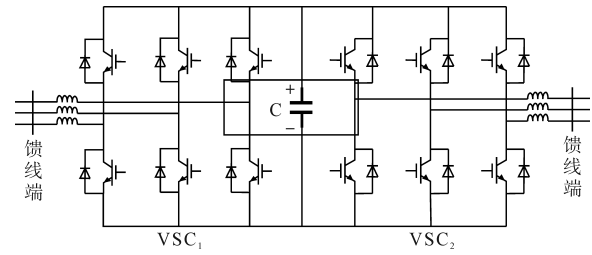


图 1 SOP 结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the SOP structure

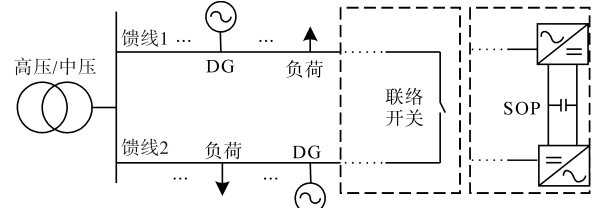


图 2 SOP 接入位置

Fig.2 Access position of SOP

本文采用双端 SOP 接入系统配置定容优化模型,研究 SOP 正常运行状态下的优化策略,控制模式选择 $PQ-V_{dc}Q$ 控制。其中 PQ 控制可实现交直流功率转化, $V_{dc}Q$ 控制可维持恒定的直流电压,得到稳定平衡的有功功率。采用这种控制模式,能够使 SOP 独立控制其两端变流器的有功功率和无功功率传输。

2 基于支路功率灵敏度分析的 SOP 选址策略

DG 出力具有随机性和不确定性,负荷波动亦具有时变特性。为反映节点注入功率时序变化特性对 SOP 选址定容的影响,故文中引入负荷增长参数 λ 。基于此,推导待装 SOP 支路的功率对节点负荷增长因子的灵敏度,其计算过程如下。

2.1 引入负荷增长因子 λ

负荷型连续潮流的数学模型是引入节点负荷增长参数的潮流方程^[12],可以简写为

$$f(x, \lambda) = 0 \tag{1}$$

式中: x 为系统状态变量; λ 为节点负荷增长参数。

在极坐标下建立如下节点功率方程模型:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ i \in \Omega_{PQ+PV} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \\ i \in \Omega_{PQ} \end{cases} \tag{3}$$

式中: P_{Gi}, Q_{Gi} 分别为电力系统发电机节点发出的有功与无功功率; P_{Di}, Q_{Di} 分别为负荷节点消耗的有功与无功功率; V_i, V_j 分别为节点*i, j*的电压幅值; G_{ij}, B_{ij} 分别为节点*i, j*间的互电导与互电纳; δ_{ij} 为节点间相角差值; Ω_{PQ} 为PQ节点集合; Ω_{PQ+PV} 为PQ节点和PV节点的并集。

为简化分析,假设发电机节点与负荷节点功率随负荷增长因子变化,如下式所示:

$$\begin{cases} P_{Gi} = (1 + \lambda) P_{Gi}^0 \\ Q_{Gi} = (1 + \lambda) Q_{Gi}^0 \\ P_{Di} = (1 + \lambda) P_{Di}^0 \\ Q_{Di} = (1 + \lambda) Q_{Di}^0 \\ i \in \Omega_{PQ+PV} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{Gi}^0, Q_{Gi}^0, P_{Di}^0, Q_{Di}^0$ 分别为节点*i*的有功、无功功率的初始潮流值。

节点功率方程式(2)、式(3)两边对 λ 求一阶导数得:

$$\frac{d(P_{Gi} - P_{Di})}{d\lambda} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial(P_{Gi} - P_{Di})}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{d\lambda} + \frac{\partial(P_{Gi} - P_{Di})}{\partial V_i} \frac{dV_i}{d\lambda} \right] \quad (5)$$

$$\frac{d(Q_{Gi} - Q_{Di})}{d\lambda} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial(Q_{Gi} - Q_{Di})}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{d\lambda} + \frac{\partial(Q_{Gi} - Q_{Di})}{\partial V_i} \frac{dV_i}{d\lambda} \right] \quad (6)$$

式中: n 为节点的个数; δ_i 为节点*i*的相角。

求导后的式(5)、式(6)中的 $\partial P/\partial \delta, \partial P/\partial V, \partial Q/\partial \delta, \partial Q/\partial V$ 符合潮流方程中的雅可比矩阵元素形式,为简化计算可将其转换为矩阵形式表示:

$$\begin{bmatrix} \frac{d(P_{Gi} - P_{Di})}{d\lambda} \\ \frac{d(Q_{Gi} - Q_{Di})}{d\lambda} \end{bmatrix} + \mathbf{J} \begin{bmatrix} \frac{d\delta_i}{d\lambda} \\ \frac{dV_i}{d\lambda} \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

式中: \mathbf{J} 为雅可比矩阵。

根据矩阵计算规则,即可求解出电压幅值及相角对负荷增长因子的导数矩阵,如下式所示:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\delta}{d\lambda} \\ \frac{dV}{d\lambda} \end{bmatrix} = -\mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} P_G^0 - P_D^0 \\ Q_G^0 - Q_D^0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: \mathbf{J}^{-1} 为雅可比矩阵逆矩阵。

2.2 支路功率对负荷增长因子的灵敏度

支路有功功率与无功功率对负荷增长因子

的灵敏度可以表示为

$$\begin{bmatrix} \frac{dP_{ij}}{d\lambda} \\ \frac{dQ_{ij}}{d\lambda} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \frac{d\delta_i}{d\lambda} & \frac{dV_i}{d\lambda} & \frac{d\delta_j}{d\lambda} & \frac{dV_j}{d\lambda} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

式中: \mathbf{A} 为灵敏度系数矩阵。

下面推导灵敏度系数矩阵 \mathbf{A} 。

根据电路基本原理,由节点*i*向节点*j*注入的支路复功率可以表示为

$$\bar{S}_{ij} = \bar{V}_i \bar{I}_{ij}^* = \bar{V}_i (\bar{V}_i - \bar{V}_j)^* / Z_{ij}^* \quad (10)$$

式中: \bar{S}_{ij} 为支路*ij*的支路复功率; \bar{I}_{ij}^* 为支路*ij*的支路电流的共轭; \bar{V}_i, \bar{V}_j 分别为节点*i, j*的电压向量; Z_{ij}^* 为待装SOP支路*ij*的支路阻抗的共轭。

将式(10)转换为极坐标形式表示为

$$\bar{S}_{ij} = \frac{V_i \cos \delta_i + j V_i \sin \delta_i}{(R_{ij} + j X_{ij}) / R_{ij}^2 + X_{ij}^2} (V_i \cos \delta_i - j V_i \sin \delta_i) - \frac{V_i \cos \delta_i + j V_i \sin \delta_i}{(R_{ij} + j X_{ij}) / R_{ij}^2 + X_{ij}^2} (V_j \cos \delta_j - j V_j \sin \delta_j) \quad (11)$$

根据输电线路的潮流公式,节点*i, j*间的传输复功率还可以表示为

$$\bar{S}_{ij} = P_{ij} + j Q_{ij} \quad (12)$$

计算化简式(11)后,将实数部分和虚数部分分列,与式(12)联立,即可得:

$$\begin{aligned} P_{ij} = & R_{ij} / (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) [(V_i \cos \delta_i)^2 - V_i V_j \cos \delta_i \cos \delta_j + \\ & (V_i \sin \delta_i)^2 - V_i V_j \sin \delta_i \sin \delta_j] - \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \cdot \\ & [V_i V_j \cos \delta_i \sin \delta_j - V_i^2 \cos \delta_i \sin \delta_i + \\ & V_i^2 \sin \delta_i \cos \delta_i - V_i V_j \sin \delta_i \cos \delta_j] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Q_{ij} = & \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} [V_i V_j \cos \delta_i \sin \delta_j - V_i^2 \cos \delta_i \sin \delta_i + \\ & V_i^2 \sin \delta_i \cos \delta_i - V_i V_j \sin \delta_i \cos \delta_j] + \\ & \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} [(V_i \cos \delta_i)^2 - V_i V_j \cos \delta_i \cos \delta_j + \\ & (V_i \sin \delta_i)^2 - V_i V_j \sin \delta_i \sin \delta_j] \end{aligned} \quad (14)$$

根据数学模型中复合函数的微分计算方法,线路*ij*有功功率、无功功率分别对 λ 求导,得到:

$$\frac{dP_{ij}}{d\lambda} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \frac{dV_i}{d\lambda} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{d\lambda} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \frac{dV_j}{d\lambda} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} \frac{d\delta_j}{d\lambda} \quad (15)$$

$$\frac{dQ_{ij}}{d\lambda} = \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \frac{dV_i}{d\lambda} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} \frac{d\delta_i}{d\lambda} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \frac{dV_j}{d\lambda} + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} \frac{d\delta_j}{d\lambda} \quad (16)$$

由此求得灵敏度系数矩阵 \mathbf{A} 的表达式如下:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式(13)、式(14)两侧对节点*i, j*的电压幅值与相角分别求偏导,即可求解式(17)中的具体灵敏度系数。

配电网中DG与负荷随季节时刻的波动性会影响线路潮流分布,单一时刻的支路有功功率灵敏度并不能全面反映线路的实际情况。定义某一时段内的综合支路有功功率灵敏度 D_{ij} 为

$$D_{ij} = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T \frac{dP_{ij,t}}{d\lambda} dt \quad (18)$$

式中: T 为总时长; $dP_{ij,t}/d\lambda$ 为线路*ij*在*t*时刻的支路有功功率灵敏度。

D_{ij} 值越大,即该支路功率对负荷增长因子灵敏度越大,表明DG出力与负荷发生动态变化时,该支路受到的影响越大。在有功功率灵敏度大的联络支路安装SOP,可以最大程度实现SOP对于配电网的控制优化作用。

3 SOP优化定容配置模型

SOP的调节能力及经济性与其安装容量有着紧密的联系。因此,在确定选址后,需合理规划容量来充分发挥其性能。本文基于二阶锥规划模型提出了SOP优化定容策略。

3.1 目标函数

以年综合成本最低为目标函数,表达式为

$$\min F = C_{\text{sop}}^T + C_{\text{sop}}^W + C_{\text{net}}^{\text{loss}} \quad (19)$$

年综合成本包括以下3个部分:

1) SOP年度投资成本 C_{sop}^T :

$$C_{\text{sop}}^T = \frac{d(1+d)^{y_{\text{sop}}}}{(1+d)^{y_{\text{sop}}} - 1} \sum_{ij \in \Omega_{\text{sop}}} C_{\text{sop}} S_{\text{sop},ij} \quad ij \in \Omega_{\text{sop}} \quad (20)$$

式中: C_{sop}^T 为SOP单位容量投资成本; y_{sop} 为使用年限; $S_{\text{sop},ij}$ 为安装在支路*ij*上SOP的容量; d 为贴现率; Ω_{sop} 为待装SOP支路集合。

2) SOP年度运维成本 C_{sop}^W :

$$C_{\text{sop}}^W = \alpha \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n C_{\text{sop}} S_{\text{sop},ij} \quad ij \in \Omega_{\text{sop}} \quad (21)$$

式中: α 为SOP年度运维成本系数。

3) 配电网年度损耗成本 $C_{\text{net}}^{\text{loss}}$:

$$C_{\text{net}}^{\text{loss}} = \beta \sum_{t=1}^{24} (I_{ij,t}^2 \cdot r_{ij,t} \cdot \Delta t) \times 365 \quad ij \in \Omega_L \quad (22)$$

式中: Ω_L 为配电线路支路集合; β 为实时电价; t 为供电时间; $I_{ij,t}$ 为*t*时刻线路*ij*的电流; $r_{ij,t}$ 为*t*时刻线路*ij*的电阻值; Δt 为每个时刻的持续时间。

3.2 约束条件

1) SOP约束条件分别介绍如下:

SOP有功功率约束:

$$P_{i,t}^{\text{SOP}} + P_{i,t}^{\text{SOP,L}} + P_{j,t}^{\text{SOP}} + P_{j,t}^{\text{SOP,L}} = 0 \quad (23)$$

$$P_{i,t}^{\text{SOP,L}} = \alpha_i^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{i,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{SOP}})^2} \quad (24)$$

$$P_{j,t}^{\text{SOP,L}} = \alpha_j^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{j,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{SOP}})^2} \quad (25)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{SOP,L}}, P_{j,t}^{\text{SOP,L}}$ 为损耗功率; $P_{i,t}^{\text{SOP}}, P_{j,t}^{\text{SOP}}, Q_{i,t}^{\text{SOP}}, Q_{j,t}^{\text{SOP}}$ 分别为SOP在*t*时刻节点*i, j*对应的有功与无功功率; $\alpha_i^{\text{SOP}}, \alpha_j^{\text{SOP}}$ 分别为节点*i, j*处传输过程中的损耗系数。

SOP无功功率约束:

$$-\beta_i S_{i,t}^{\text{SOP}} \leq Q_{i,t}^{\text{SOP}} \leq \beta_i S_{i,t}^{\text{SOP}} \quad (26)$$

$$-\beta_j S_{j,t}^{\text{SOP}} \leq Q_{j,t}^{\text{SOP}} \leq \beta_j S_{j,t}^{\text{SOP}} \quad (27)$$

式中: $S_{i,t}^{\text{SOP}}, S_{j,t}^{\text{SOP}}$ 为SOP配置容量; β_i, β_j 分别为节点*i, j*处的无功约束系数。

SOP容量约束:

$$\sqrt{(P_{i,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{SOP}})^2} \leq S_i^{\text{SOP}} \quad (28)$$

$$\sqrt{(P_{j,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{SOP}})^2} \leq S_j^{\text{SOP}} \quad (29)$$

2) 支路潮流约束^[14]:

$$U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(r_{ij} P_{ij,t}^S + x_{ij} Q_{ij,t}^S) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \cdot (I_{ij,t})^2 \quad (30)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_1} [P_{ij,t}^S - r_{ij} (I_{ij,t})^2] + P_{j,t}^S = \sum_{jk \in \Omega_1} P_{jk,t}^S + \sum_{jk \in \Omega_2} \sigma_j P_{jk,t}^S + P_{j,t}^{\text{S,Load}} \quad ij \in \Omega_1 \quad (31)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_1} [Q_{ij,t}^S - x_{ij} (I_{ij,t})^2] + Q_{j,t}^S = \sum_{jk \in \Omega_2} Q_{jk,t}^S + \sum_{jk \in \Omega_1} \sigma_j Q_{jk,t}^S + Q_{j,t}^{\text{S,Load}} \quad ij \in \Omega_1 \quad (32)$$

$$(I_{ij,t})^2 = \frac{(P_{ij,t}^S)^2 + (Q_{ij,t}^S)^2}{(U_{i,t})^2} \quad ij \in \Omega_1 \quad (33)$$

$$k = \begin{cases} 0 & \text{接入联络开关} \\ 1 & \text{不接入联络开关} \end{cases} \quad (34)$$

式中: Ω_1 为支路集合; Ω_2 为联络开关支路集合; r_{ij}, x_{ij} 分别为支路*ij*对应的电阻、电抗; $U_{i,t}, U_{j,t}$ 分别为*t*时刻节点*i, j*的电压; $P_{j,t}^S, Q_{j,t}^S$ 分别为*t*时刻节点*j*注入的有功、无功功率; $P_{ij,t}^S, Q_{ij,t}^S$ 分别为*t*时刻支路*ij*首端的有功、无功功率; $P_{jk,t}^S, Q_{jk,t}^S$ 分别为*t*时刻支路*jk*的有功与无功功率; $P_{j,t}^{\text{S,Load}}, Q_{j,t}^{\text{S,Load}}$ 分别为*t*时刻节点*j*所接负荷的有功与无功功率; i, j 为节点编号; k 为接入联络开关状态量。

支路潮流模型如图3示。

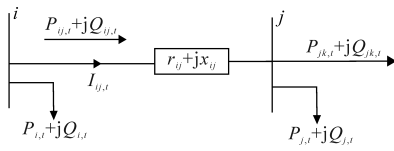


图3 支路潮流模型

Fig.3 Branch flow model

3) 节点电压与支路电流约束:

$$U_{\min} \leq U_{i,t} \leq U_{\max} \quad (35)$$

$$I_{\min} \leq I_{ij,t} \leq I_{\max} \quad (36)$$

式中: U_{\max}, U_{\min} 分别为节点电压运行最大值与最小值; I_{\max}, I_{\min} 分别为支路电流最大值与最小值。

4) DG 出力约束^[15]:

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^M S_{m,i} \leq S_{i,\max} \\ \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M S_{m,i} \leq \eta P_{\max} \end{cases} \quad (37)$$

式中: $S_{m,i}, S_{i,\max}$ 分别为节点 i 安装容量与其最大允许接入的 DG 容量; η 为 DG 的渗透率; P_{\max} 为配电网最大负荷。

4 求解算法与流程

本文基于支路有功功率灵敏度法,对 SOP 待装支路已进行了优化选址。因此,在运用二阶锥规划算法时,SOP 的位置不再作为决策变量。当需要安装 1 个以上 SOP 时,即采用按支路有功灵敏度大小降序将 SOP 逐个接入系统的方法。二阶锥规划层的目的是优化 SOP 安装容量,求解 SOP 选址定容模型的流程如图4所示。

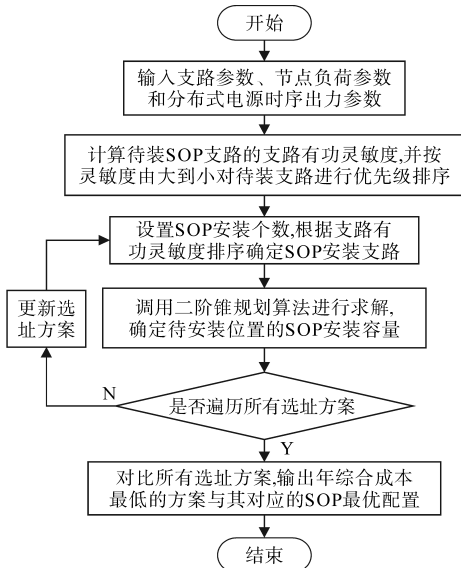


图4 SOP 优化配置流程图

Fig.4 Flowchart of SOP optimization configuration

5 算例分析

为了验证本文所提选址方法的有效性,以实际配电网为模型进行模拟。IEEE 33 节点配电系统主要由 32 条常闭支路和 5 条联络开关支路构成,如图5所示。额定电压为 12.66 kV,有功功率为 5 084.26 kW,无功功率为 2 547.32 kvar。

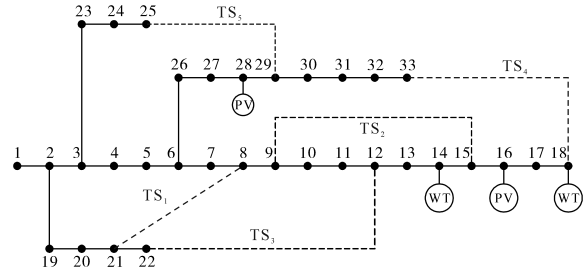


图5 改进的 IEEE 33 节点算例

Fig.5 Improved IEEE 33 node study

为更贴合实际运行状态,考虑 DG 渗透率的影响,采用在原始配电系统中接入两台光伏 PV 电源和两台风机 WT 的改进 IEEE 33 节点算例仿真。

光伏 PV 电源一台安装在 16 节点,容量为 800 kW,另外一台安装在 28 节点,容量为 600 kW;风机 WT 安装在 14 节点和 18 节点,对应容量为 500 kW 和 300 kW。不考虑配电网重构,直接将原接入联络开关的位置作为 SOP 待装支路进行选址。

采用支路功率灵敏度分析法对 4 个季节全天 24 h 进行分析计算^[16],得到 4 个季度每个时刻不同待装支路有功功率灵敏度结果,再计算综合支路有功功率灵敏度。

本文方法、改进节点电压灵敏度法^[8]和潮流介数法^[10]的 SOP 优化配置排序结果如表 1 所示。改进节点电压灵敏度法是首先计算反映 DG 出力时序变化特性的改进节点电压灵敏度,根据电压灵敏度大小先确定 SOP 配置位置,然后以配电网综合运行成本最低为目标确定 SOP 的容量。潮流介数法是计算可反映发电机出力 and 负荷功率变化的线路潮流介数值,选取潮流介数高的关键线路配置 SOP。本文方法指标:支路功率灵敏度 D_{ij} 值;改进节点电压灵敏度法指标:节点改进灵敏度 S_{ij} 值;潮流介数法指标:综合线路潮流介数 K_{ij} 值。

由表 1 的结果可以看出,本文方法待装支路排序为 $TS_3, TS_4, TS_1, TS_3, TS_2$;改进节点电压灵敏度分析法待装支路排序为 $TS_2, TS_4, TS_3, TS_3, TS_1$;

表1 分布式电源接入情况下装设柔性开关筛选结果对比

Tab.1 Comparison of screening results of flexible switches installed with distributed power access

| 方法 | 待接入 SOP 支路排序(支路编号/指标) | | | | |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 本文方法 | TS ₅ /2.67 6043 | TS ₄ /1.487 738 | TS ₁ /0.815 747 | TS ₃ /0.608 716 | TS ₂ /0.163 963 |
| 改进节点电压灵敏度法 ^[8] | TS ₂ /0.474 181 | TS ₄ /0.202 009 | TS ₅ /0.039 078 | TS ₃ /0.008 811 | TS ₁ /0.001 568 |
| 潮流介数法 ^[10] | TS ₃ /0.276 600 | TS ₅ /0.235 200 | TS ₁ /0.145 700 | TS ₄ /0.123 000 | TS ₂ /0.024 300 |

潮流介数分析法待装支路排序为 TS₅, TS₃, TS₁, TS₄, TS₂。由本文方法与潮流介数法结果分析可知,首选 TS₅支路安装 SOP,而改进节点电压灵敏度法首选 TS₂支路安装 SOP。

SOP的经济性能参数和电价等参数为:年度投资成本中的单位安装容量为 50 kV·A;贴现率设为 8%;经济使用年限设为 20 a;单位容量投资成本设为 1 000 元/(kV·A);年度损耗成本中的实时电价定为 0.3 元/(kW·h);年度运维成本系数为 0.02;DG 渗透率为 100%。节点电压约束中设定节点电压范围为额定电压的 90%~105%,即视为不越限^[17]。

基于本文所提 SOP 的选址定容模型,在 Matlab R2021a 平台上利用 YALMIP 优化工具箱进行编程,并调用 IBM ILOG CPLEX 12.9 算法包进行仿真模拟。

本文设置 SOP 最大接入数为 3 个。SOP 的接入方案分为以下 4 种:①不安装 SOP;②一条支路安装 1 个 SOP;③两条支路安装 2 个 SOP;④3 条支路安装 3 个 SOP。采用本文方法,不同接入方案成本对比如表 2 所示。

由表 2 的 4 种方案所对应的年综合最小成本对比可知,方案 3 为最优方案:支路 TS₅ 接入容量

为 350 kV·A 的 SOP,同时支路 TS₄ 上接入 200 kV·A 的 SOP。从成本来看,未安装 SOP 的损耗成本远大于安装 SOP 后的成本,采用方案 3 所节省下的成本,约 5.12 a 就可以收回 SOP 的投资费用。在安装 SOP 的情况下,方案 3 相较于方案 2、方案 4 而言,年度综合最小成本分别可以节省 5.71 万元(14.63%)和 0.48 万元(1.42%)。故合理配置 SOP 可以有效提高配电网经济性。

为进一步对比本文所提方法与其他方法的优劣性,研究改进节点电压灵敏度法和潮流介数法的 SOP 选址策略,采取不同方案进行仿真。3 种方法对应的年综合成本最小的方案进行对比,结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,若安装两个 SOP,采用本文方法进行选址定容,损耗成本与年综合成本均低于改进节点电压灵敏度法与潮流介数法,且年综合最小成本与两种方法相比,分别节省了 3.43% 与 7.14%。

综上所述,采用本文支路功率灵敏度分析方法对 SOP 进行选址定容策略,由于在有功功率受电源出力和负荷波动影响大的支路安装 SOP,有效控制了配网功率分布,降低了配网损耗和年综合运行成本,提高了系统运行的经济性。

表2 不同接入方案成本对比

Tab.2 Cost comparison among various access methods

| 接入方案 | SOP 接入个数 | SOP 接入支路 | SOP 接入容量/(kV·A) | 投资成本 /万元 | 运维成本 /万元 | 损耗成本 /万元 | 年综合最小成本 /万元 |
|------|----------|---|-----------------|----------|----------|------------|-------------|
| 方案 1 | 0 | 无 | 0 | 0 | 0 | 41.410 460 | 41.410 460 |
| 方案 2 | 1 | TS ₅ | 600 | 6.12 | 1.2 | 31.708 225 | 39.028 225 |
| 方案 3 | 2 | TS ₅ , TS ₄ | 350/200 | 5.61 | 1.1 | 26.608 375 | 33.318 375 |
| 方案 4 | 3 | TS ₅ , TS ₄ , TS ₁ | 400/200/100 | 7.14 | 1.4 | 25.259 200 | 33.799 200 |

表3 3种方法最优接入方案成本对比

Tab.3 Cost evaluation of the three optimal access methods for comparison

| 方法 | 接入方案 | SOP 个数 | SOP 接入支路 | SOP 接入容量/(kV·A) | 投资成本/万元 | 运维成本 /万元 | 损耗成本 /万元 | 年综合最小成本/万元 |
|---------------------------|------|--------|---|-----------------|---------|----------|------------|------------|
| 本文方法 | 方案 3 | 2 | TS ₅ , TS ₄ | 350/200 | 5.61 | 1.1 | 26.608 375 | 33.318 375 |
| 改进节点电压灵敏度法 ^[8] | 方案 3 | 3 | TS ₂ , TS ₄ , TS ₅ | 400/200/150 | 7.65 | 1.5 | 25.352 875 | 34.502 875 |
| 潮流介数法 ^[10] | 方案 3 | 2 | TS ₅ , TS ₃ | 350/200 | 5.61 | 1.1 | 29.169 650 | 35.879 650 |

6 结论

本文提出了优先在受电源和负荷影响大的支路安装SOP的选址定容策略;理论推导了待装支路有功功率灵敏度计算方法;建立了以年综合费用最小为目标的SOP容量规划模型,采用二阶锥方法求解。运用改进IEEE 33节点算例进行仿真分析,验证了所提出的选址定容策略的有效性,为SOP的规划应用奠定基础。

参考文献

- [1] 陈玮. 新能源背景下的主动配电网故障恢复关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.
CHEN Wei. Research on service restoration of active distribution networks under the background of renewable energy[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [2] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2315-2321.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. A hybrid optimization method for distribution network operation with SNOP and tie switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2315-2321.
- [3] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化,2016,40(22):168-175.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168-175.
- [4] 武利会,范心明,董镝,等. 基于机会约束的有源配电网SOP优化配置方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(10):18-23,30.
WU Lihui, FAN Xinming, DONG Di, et al. Optimal configuration method for soft open point in active distribution network based on chance-constrained programming[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10): 18-23, 30.
- [5] 米阳,申杰,卢长坤,等. 考虑含储能的三端智能软开关与需求侧响应的主动配电网有功无功协调优化[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(3):104-118.
MI Yang, SHEN Jie, LU Changkun, et al. Active and reactive power coordination optimization of an active distribution network considering a three-terminal soft open point with energy storage and demand response[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 104-118.
- [6] 王志强,方正,徐艺铭,等. 计及重要用户失负荷风险的多端智能软开关优化配置方法[J]. 高电压技术,2020,46(4):1142-1153.
WANG Zhiqiang, FANG Zheng, XU Yiming, et al. Optimization configuration method for multi-terminal soft open point considering the load loss risk of important users[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1142-1153.
- [7] 王杰,王维庆,王海云,等. 主动配电网中考虑条件风险价值的智能软开关的规划方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(2):1-11.
WANG Jie, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Planning method of soft open point for an active distribution network considering conditional value-at-risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 1-11.
- [8] 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.
- [9] 张利,杨洁,仇志华,等. 智能软开关选址定容模型及其求解算法[J]. 电工电能新技术,2021,40(11):9-19.
ZHANG Li, YANG Jie, ZHANG Zhihua, et al. SNOP locating and sizing model and optimization algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(11): 9-19.
- [10] 晏阳,廖清芬,刘涤尘,等. 基于潮流系数的SNOP配置及主动配电系统优化[J]. 南方电网技术,2015,9(11):92-98.
YAN Yang, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Power flow betweenness based SNOP allocation and active distribution network optimization[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(11): 92-98.
- [11] 王成山,孙充勃,李鹏,等. 基于SNOP的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):82-87.
WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SNOP-based operation optimization and analysis of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 82-87.
- [12] 张俊林,倪良华,孙嘉,等. 基于二次型迭代逼近法的电力系统电压鞍结分岔点识别[J]. 电气传动,2024,54(3):68-75.
ZHANG Junlin, NI Lianghua, SUN Jia, et al. Identification of voltage saddle node bifurcation point in power system based on quadratic form approximation method[J]. Electric Drive, 2024, 54(3): 68-75.
- [13] 陈昊. 面向可靠性与经济性的有源配电网智能软开关规划方法[D]. 天津:天津大学,2019.
CHEN Hao. Planning method of soft open point for supply reliability and economic in active distribution networks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [14] 陈骁龙,孙嘉,张俊林,等. 新能源消纳与用户侧响应主从博弈的配电网智能软开关选址策略[J]. 电力自动化设备,2024,44(2):57-63.
CHEN Xiaolong, SUN Jia, ZHANG Junlin, et al. Soft open point siting scheme for distribution network with stackelberg game between new energy accommodation and user-side de-

(下转第55页)

- silicon solar cell devices for efficient utilization of sub-band-gap photons under concentrated solar radiation[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2013, 4(1): 183-189.
- [11] 杨重伟,梁旭,毛岚.基于高比例光伏接入低压系统的电压控制研究[J].电气传动,2022,52(8):60-67.
YANG Chongwei, LIANG Xu, MAO Lan. Research on voltage control of low voltage system based on high-proportion photovoltaic access[J]. Electric Drive, 2022, 52(8): 60-67.
- [12] ERROUSSI R, AL-DURRA A, MUYEEN S M. Design and implementation of a nonlinear PI predictive controller for a grid-tied photovoltaic inverter[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2017, 64(2): 1241-1250.
- [13] YANG F, YANG L, MA X. An advanced control strategy of PV system for low-voltage ride-through capability enhancement[J]. Solar Energy, 2014, 109(11): 24-35.
- [14] HASANIENAND H M, MUYEEN S M. A taguchi approach for optimum design of proportional-integral controllers in cascaded control scheme[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1636-1644.
- [15] KADRI R, GAUBERT J P, CHAMPENOIS G. An improved maximum power point tracking for photovoltaic grid-connected inverter based on voltage-oriented control[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2011, 58(1): 66-75.
- [16] KIM K H, JEUNG Y C, LEE D C, et al. LVRT scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2012, 27(5): 2376-2384.
- [17] MAHMUD M, POTA H, HOSSAIN M, et al. Robust partial feedback linearizing stabilization scheme for three-phase grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(1): 423-431.
- [18] BAO X, ZHUO F, TIAN Y, et al. Simplified feedback linearization control of three-phase photovoltaic inverter with an LCL filter[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2013, 28(6): 2739-2752.
- [19] HU J, ZHU J, DORRELL D G. Model predictive control of grid connected inverters for PV systems with flexible power regulation and switching frequency reduction[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2015, 5(1): 587-594.
- [20] KAKOSIMOS P E, KLADAS A G, MANIAS S N. Fast photovoltaic system voltage-or current-oriented MPPT employing a predictive digital current-controlled converter[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2013, 60(12): 5673-5685.
- [21] WANG Baochao, XU Yongxiang, SHEN Zhaoyuan, et al. Current control of grid-connected inverter with LCL filter based on extended-state observer estimations using single sensor and achieving improved robust observation dynamics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5428-5439.
- [22] ZHANG Yongchang, JIN Jialin, HUANG Lanlan. Model-free predictive current control of PMSM drives based on extended state observer using ultralocal model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 993-1003.
- [23] YANG Haitao, ZHANG Yongchang, LIANG Jiejunyi, et al. Robust deadbeat predictive power control with a discrete-time disturbance observer for PWM rectifiers under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 287-300.
- [24] SONG Zhanfeng, ZHOU Fengjiao, ZHANG Zhen. Parallel-observer-based predictive current control of permanent magnet synchronous machines with reduced switching frequency[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(12): 6457-6467.

收稿日期:2023-10-19

修改稿日期:2024-03-11

(上接第47页)

- mand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(2): 57-63.
- [15] 孙乾,许珊,朱姝豫,等.考虑DG时序特性及EV时空特性的配电网规划[J].电力自动化设备,2020,40(10):30-38.
SUN Qian, XU Shan, ZHU Shuyu, et al. Distribution network planning considering DG timing characteristics and EV spatiotemporal characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 30-38.
- [16] 李亮,唐巍,白牧可,等.考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J].电力系统自动化,2013,37(3):58-63, 128.
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time sequence characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 37(3): 58-63, 128.
- [17] 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.

收稿日期:2024-08-23

修改稿日期:2024-09-29