

基于改进灵敏度分析的有源配电网智能软开关优化配置

熊正勇^{1,2,3}, 陈天华^{1,2,3}, 杜磊^{1,2,3}, 戴则梅^{1,2,3}, 陈建华^{1,2,3}, 徐陆飞^{1,2,3}

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏省南京市 211106;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 211106;

3. 智能电网保护与运行控制国家重点实验室, 江苏省南京市 211106)

摘要: 随着大量间歇性分布式电源(DG)不断渗透到配电网中,电压越限和双向潮流等问题变得越发严重。智能软开关(SOP)是一种柔性电力电子装置,安装在配电网中用来替代传统联络开关,可以实现快速电压调节和准确潮流控制,从而有效解决DG所带来的相应问题。然而,SOP的投资成本较高,使得SOP选址定容问题显得尤为关键。文中提出一种基于改进灵敏度分析的有源配电网SOP优化配置方法。首先,结合DG出力的时序变化特性,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;其次,采用二阶锥规划算法求解在改进灵敏度计算下的SOP选址定容优化模型;最后,在改进的IEEE 33节点配电系统上,对文中提出的优化方法进行分析与验证。算例结果表明,采用文中提出的方法对SOP进行优化配置可有效节省配电网年度综合运行成本和改善系统电压,有利于提高有源配电网运行的经济性和可靠性。

关键词: 有源配电网; 分布式电源; 智能软开关; 选址定容; 改进灵敏度分析; 二阶锥规划

0 引言

近年来,越来越多的分布式电源(distributed generator, DG)整合到配电网中,例如风机(wind turbine, WT)和光伏电源(photovoltaic, PV)。虽然DG的接入有利于降低系统功率损耗、改善供电可靠性和减少环境污染^[1],但同时也给配电网规划与运行带来了新的挑战,如网络阻塞、电压越限和双向潮流等问题^[2]。传统配电网的调节方式有限,不能有效解决间歇式DG高渗透所带来的问题^[3]。

智能软开关(soft open point, SOP)是一种电力电子装置,用于替代传统联络开关,能有效解决配电系统中功率调节能力不足的问题。SOP可在馈线之间实现快速、动态和持续的有功无功潮流控制,起到平衡负载潮流并优化系统电压分布的作用。SOP的应用提高了配电网潮流的可控性,可有效解决高渗透率DG接入配电网带来的一系列问题,从而改善系统运行的经济性、灵活性和可靠性。文献[4]分析了有源配电网中SOP的故障恢复作用。文献[5]对SOP在有源配电网中的电压无功控制进行了研究。文献[6]提出一种SOP与传统调节装置相协调

的有源配电网电压无功协调控制方法。文献[7]提出一种基于SOP的三相不平衡有源配电网运行优化策略。上述文献均未涉及SOP在有源配电网中的优化配置。然而,SOP通常是全控型电力电子设备,其投资成本较高。因此,有必要针对SOP的选址与定容问题进行研究,以最小化其投资成本。

目前,针对有源配电网中SOP选址与定容的研究较少。文献[8-9]均是针对DG运行特性而对SOP进行规划。文献[10-11]不仅计及DG不确定性和波动性,在对SOP进行优化配置的同时亦对DG进行规划。文献[12]采用一种基于机会约束规划的方法对SOP进行选址定容。文献[13]通过快速失负荷风险公式提出一种考虑重要用户失负荷风险的方法对SOP进行配置。文献[14]提出一种与传统无功调节手段相协调的SOP规划方法,在给出SOP配置方案的同时优化变压器分接头档位、电容器投入组数等传统调节变量。

然而,上述文献均是直接将SOP的安装位置和容量作为决策变量,并未考虑DG随机性与不稳定性造成的系统功率变化对系统电压的影响以及SOP对系统电压的调节支撑能力。本文主要通过系统有功和无功变化对电压的影响,即电压灵敏度分析,深入研究SOP的并网点优化。目前的电压灵敏度分析法大多是针对某一时间断面的研究^[15-17],

而DG具有随机性、波动性较强的运行特性,再将该方法应用于有源配电网中,则不再具有实用性。

SOP定容优化问题本质上是一种混合整数非线性规划模型,目前已经提出很多方法来求解这种模型,这些方法主要可以分为2类:一类为人工智能算法^[18-20],包括模拟退火、遗传算法、蚁群算法和禁忌搜索算法等;另一类为传统优化方法^[21-23],包括线性规划、内点法、混合整数规划等。人工智能算法和传统优化方法应用广泛,能较好地适用于很多场合,但是当优化问题涉及高度非线性函数以及随机性、不确定性很强的变量时,其求解难度会大大增加,导致其应用受到很大限制。二阶锥规划在求解含非线性目标函数和约束条件的优化问题上具有显著的优势,使得优化问题变得更简单、线性度更高,其求解时间更短、全局最优性更好^[24-25]。

因此,本文提出一种改进灵敏度分析法来确定SOP的安装位置。该方法考虑了DG出力的时序变化特性,从改善系统电压的角度确定SOP在有源配电网中的最佳并网点,有效提高了SOP电压调节的针对性及其对系统电压的支撑能力。然后,建立在改进灵敏度计算下的SOP定容优化数学模型,采用线性化和锥松弛技术,将原模型转换为混合整数二阶锥规划模型。最后,在改进的IEEE 33节点配电系统上,对本文所提SOP选址定容优化方法进行分析与验证。

1 灵敏度分析

1.1 传统灵敏度分析

将系统节点功率平衡方程按泰勒一阶展开后,令无功变化量 $\Delta Q=0$ 、有功变化量 $\Delta P=0$,可得到电压变化量 ΔV 与 ΔP 、 ΔQ 的关系^[26]。

$$\Delta V = \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial V} - \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} \right)^{-1} \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \right)^{-1} \Delta P \quad (1)$$

$$\Delta V = \left(\frac{\partial \Delta Q}{\partial V} - \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} \right)^{-1} \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \right)^{-1} \Delta Q \quad (2)$$

式中: V 、 θ 分别为电压幅值和相角。

进一步展开式(1)和式(2)可得如下公式。

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 & \cdots & \Delta V_j & \cdots & \Delta V_{(n-1)} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{1i} & \cdots & \lambda_{1(n-1)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \lambda_{j1} & \cdots & \lambda_{ji} & \cdots & \lambda_{j(n-1)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \lambda_{(n-1)1} & \cdots & \lambda_{(n-1)i} & \cdots & \lambda_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \vdots \\ \Delta P_{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 & \cdots & \Delta V_j & \cdots & \Delta V_{(n-1)} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1i} & \cdots & \gamma_{1(n-1)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{j1} & \cdots & \gamma_{ji} & \cdots & \gamma_{j(n-1)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{(n-1)1} & \cdots & \gamma_{(n-1)i} & \cdots & \gamma_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_i \\ \vdots \\ \Delta Q_{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: n 为节点数; ΔV_j 为节点 j 的电压变化量; ΔP_i 、 ΔQ_i 分别为节点 i 的有功功率变化量和无功功率变化量; λ_{ji} 、 γ_{ji} 分别为节点 i 的有功功率变化量和无功功率变化量对节点 j 电压的灵敏度, λ_{ji} 和 γ_{ji} 组成的矩阵分别为有功和无功灵敏度矩阵。

考虑到配电系统中某节点功率变化对各节点电压的影响,则系统中节点 i 的功率变化对节点 j 电压的灵敏度为:

$$\delta_{ji} = \omega_1 \lambda_{ji} + \omega_2 \gamma_{ji} \quad (5)$$

式中: ω_1 、 ω_2 分别为电压有功和无功灵敏度权重系数,且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。采用一种考虑系统功率变化的方法来确定权重系数^[26],求得 $\omega_1 = 0.6$, $\omega_2 = 0.4$ 。该结果是在IEEE 33节点配电系统下计算出来的,若配电网规模发生变化,文献[26]中的权重系数计算方法仍然适用,重新计算即可。

由于传统配电网中不含DG,电压分布有较强的规律性,调节各越限节点电压的要求基本一致,通过式(5)正好可以表示节点功率变化对系统电压的影响。但是,配电网的电压分布规律随着DG的整合发生了变化,各节点对电压调节的要求不再一致,若再以式(5)表示节点电压灵敏度则难以适用。

1.2 改进灵敏度分析

考虑到DG的时序运行特性,针对传统灵敏度分析方法的不足,本文研究了适用于有源配电网特性的改进灵敏度分析法。首先,将全天分为24个时段,每个时段为1h;其次,DG出力和负载功率随时间不断变化的特性会导致系统在各个时段处于不同的运行状态,所以需要分别计算各个时段的灵敏度;然后,考虑到有源配电网中易越限的节点电压会因DG出力的随机性和波动性较强而发生较大偏移,因此本文在计算灵敏度时加入了电压偏移权重因子;最后,对各个时段计算得到的灵敏度值进行累加,得到最终的改进灵敏度值。主要的改进包括,考虑了节点电压偏移量及其调节要求不同的灵敏度计算,以及考虑了包含不同时段的灵敏度计算。

1) t 时段两节点间的灵敏度计算

在有源配电网中,相对于传统配电网,易越限的

节点电压会发生较大偏移。所以,本文在确定 SOP 并网节点时,在传统灵敏度指标的基础上将电压偏移程度作为权重加入灵敏度计算中。 t 时段节点 i 的功率变化对节点 j 电压的灵敏度 $S_{ji,t}$ 表示如下:

$$\begin{cases} S_{ji,t} = \delta_{ji,t} v_{j,t} \\ v_{j,t} = |V_{j,t} - V_{0,j,t}| \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\delta_{ji,t}$ 为 t 时段节点 i 对节点 j 的传统灵敏度; $v_{j,t}$ 为 t 时段节点 j 的电压偏移权重因子; $V_{j,t}$ 为 t 时段节点 j 的电压; $V_{0,j,t}$ 为 t 时段节点 j 的期望电压。

2) 节点改进灵敏度计算

由于 DG 的不稳定性和间歇性,其出力会随时序变化而变化,所以 SOP 在有源配电网中的优化配置需要考虑 DG 时序变化的问题。本文对灵敏度计算进行了进一步改进,得到的节点改进灵敏度如下:

$$\begin{cases} S_{ji} = \sum_{t=1}^{24} S_{ji,t} \tau_t \\ \tau_t = (n_{ex,t} + 1) \max_k |V_{k,t} - V_{0,k,t}| \\ k = 1, 2, \dots, n-1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $S_{ji,t}$ 为 t 时段节点 i 功率变化对节点 j 电压的灵敏度; τ_t 为 t 时段权重因子; $n_{ex,t}$ 为 t 时段系统中电压越限的节点个数; $\max_k |V_{k,t} - V_{0,k,t}|$ 为 t 时段最大节点电压偏移值。

本文提出的改进灵敏度分析法首先根据节点的电压偏移程度,加入权重因子,对传统灵敏度进行修正,以体现节点的电压偏移程度对灵敏度计算的重要性。然后,依据各时段的最大节点电压偏移程度和电压越限节点个数,进一步修正权重,考虑了整个系统的电压偏移程度。经过改进后计算得到的改进灵敏度值越大,说明功率变化对电压的影响越大。而 SOP 具有灵活的功率调节能力,因此将 SOP 接至改进灵敏度值较大的节点上可有效改善其电压分布以及整个系统的电压分布。所以,可根据计算得到的改进灵敏度值对 SOP 并网节点进行优化。

考虑到本文的研究对象为计及 DG 的有源配电网,在改进灵敏度计算中将 DG 作为 PQ(V) 或 PV 节点^[27]加入节点功率平衡方程中进行处理即可。所以,不论 DG 渗透率及其接入位置如何变化,均可通过本文提出的方法计算求得相应的改进灵敏度。

2 SOP 基本原理及优化配置模型

2.1 SOP 基本原理

在配电网中,SOP 安装在相邻馈线之间用于替代联络开关,如图 1 所示^[8]。

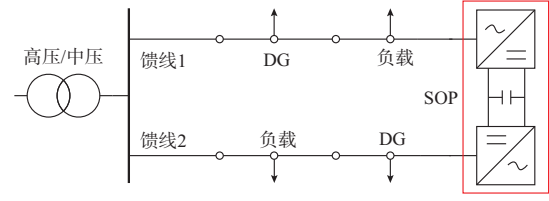


图 1 SOP 安装位置
Fig. 1 Installation position of SOP

SOP 的实现主要基于全控型电力电子器件,针对 SOP 定容优化模型,本文将采用如附录 A 图 A1 所示的背靠背电压源型换流器(back to back voltage source converter, B2B VSC)进行分析^[28]。

SOP 可以准确控制与其所连馈线的有功和无功功率,因而将 2 个换流器的有功和无功功率输出作为决策变量。尽管 B2B VSC 的运行效率很高,但在有功功率发生大规模转移时,2 个换流器不可避免会产生损耗。因此,优化模型中考虑了换流器损耗系数。由于 DC 的隔离作用,2 个换流器的无功功率输出相互独立,只需满足各自的容量约束即可。选择 PQ- V_{dc} Q 控制作为 SOP 的控制模式^[29]。

2.2 SOP 优化配置模型

2.2.1 目标函数

本文以年度综合成本最低为目标函数,表达式如下:

$$\min f = C_{SOP}^{cap} + C_{SOP}^{ope} + C^{loss} \quad (8)$$

年度综合成本包括以下 3 个部分。

1) C_{SOP}^{cap} : SOP 年度投资成本

$$C_{SOP}^{cap} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \in \psi(i)} c_{SOP} S_{SOP,ij}}{y} \quad (9)$$

式中: $\psi(i)$ 为节点 i 的相邻节点集合; c_{SOP} 为 SOP 的单位容量投资成本; $S_{SOP,ij}$ 为在节点 i 和节点 j 之间安装的 SOP 容量; y 为 SOP 的使用年限。

2) C_{SOP}^{ope} : SOP 年度运行维护成本

$$C_{SOP}^{ope} = \beta \sum_{i=1}^n \sum_{j \in \psi(i)} c_{SOP} S_{SOP,ij} \quad (10)$$

式中: β 为 SOP 年度运行维护成本系数。

3) C^{loss} : 配电网年度供电损耗成本

$$C^{loss} = 365\mu \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{n_t} (P_{i,t} + P_{SOP,i,t}^{loss}) \Delta t \quad (11)$$

式中: μ 为配电网年度供电损耗成本系数; n_t 为时间段总数; Δt 为每个时间段的持续时间; $P_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的注入有功功率; $P_{SOP,i,t}^{loss}$ 为 t 时段 SOP 在节点 i

处的有功损耗,其计算公式如式(13)所示。

2.2.2 约束条件

1) SOP运行约束条件

$$P_{SOP,i,t} + P_{SOP,j,t} + P_{SOP,i,t}^{loss} + P_{SOP,j,t}^{loss} = 0 \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_{SOP,i,t}^{loss} = A_{SOP,i} \sqrt{P_{SOP,i,t}^2 + Q_{SOP,i,t}^2} \\ P_{SOP,j,t}^{loss} = A_{SOP,j} \sqrt{P_{SOP,j,t}^2 + Q_{SOP,j,t}^2} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} Q_{SOP,i,min} \leq Q_{SOP,i,t} \leq Q_{SOP,i,max} \\ Q_{SOP,j,min} \leq Q_{SOP,j,t} \leq Q_{SOP,j,max} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \sqrt{P_{SOP,i,t}^2 + Q_{SOP,i,t}^2} \leq S_{SOP,ij} \\ \sqrt{P_{SOP,j,t}^2 + Q_{SOP,j,t}^2} \leq S_{SOP,ij} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{SOP,i,t}$ 、 $P_{SOP,j,t}$ 分别为 t 时段节点 i 和节点 j 处 SOP 注入的有功功率; $P_{SOP,i,t}^{loss}$ 、 $P_{SOP,j,t}^{loss}$ 分别为 t 时段节点 i 和节点 j 处 SOP 中换流器的有功损耗; $A_{SOP,i}$ 、 $A_{SOP,j}$ 分别为节点 i 和节点 j 处的 SOP 中换流器损耗系数; $Q_{SOP,i,t}$ 、 $Q_{SOP,j,t}$ 分别为 t 时段节点 i 和节点 j 处 SOP 注入的无功功率; $Q_{SOP,i,max}$ 、 $Q_{SOP,i,min}$ 和 $Q_{SOP,j,max}$ 、 $Q_{SOP,j,min}$ 分别为节点 i 和节点 j 处 SOP 注入的无功功率上限和下限。

2) 其他约束条件

$$\begin{cases} P_{i,t} = \sum_{j \in \psi(i)} V_{i,t} V_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) + \\ G_{ii} V_{i,t}^2 = P_{SOP,i,t} + P_{DG,i,t} - P_{L,i,t} \\ Q_{i,t} = \sum_{j \in \psi(i)} V_{i,t} V_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) - \\ B_{ii} V_{i,t}^2 = Q_{SOP,i,t} + Q_{DG,i,t} - Q_{L,i,t} \end{cases} \quad (16)$$

$$V_{i,min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,max} \quad (17)$$

$$I_{ij,t}^2 = (G_{ij}^2 + B_{ij}^2)(V_{i,t}^2 + V_{j,t}^2 - 2V_{i,t}V_{j,t}\cos\theta_{ij}) \leq I_{ij,max}^2 \quad (18)$$

$$\begin{cases} P_{DG,i,t} = P_{DG,i,t}^{pre} \\ Q_{DG,i,t} = P_{DG,i,t} \tan \beta_{DG,i,t} \end{cases} \quad (19)$$

$$\sqrt{P_{DG,i,t}^2 + Q_{DG,i,t}^2} \leq S_{DG,i} \quad (20)$$

式中: $Q_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的注入无功功率; $V_{i,t}$ 和 $\theta_{ij,t}$ 分别为 t 时段节点 j 的电压幅值和节点 i 、 j 间的相角差; G_{ii} 、 B_{ii} 和 G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵中的自电导、自电纳和互电导、互电纳; $P_{DG,i,t}^{pre}$ 为 DG 输出的有功功率预测值; $P_{DG,i,t}$ 、 $Q_{DG,i,t}$ 分别为 t 时段节点 i 处 DG 输出的有功功率和无功功率; $P_{L,i,t}$ 、 $Q_{L,i,t}$ 分别为 t 时段节点 i 处负载注入的有功功率和无功功率; $V_{i,max}$ 、 $V_{i,min}$ 分别为节点 i 的电压幅值上限和下限; $I_{ij,t}$ 、 $I_{ij,max}$ 分别为 t 时段支路 ij 的电流幅值和上限; $\beta_{DG,i,t}$ 、 $S_{DG,i}$ 分别为 t 时段节点 i 处 DG 的功率因数角

和接入容量。

SOP 定容优化模型中的优化变量包括 SOP 接入容量(离散变量)、SOP 有功和无功功率输出(连续变量)。所以该模型本质上是一个混合整数非线性规划模型,考虑到该模型的时间序列特征,其维度会随着时段的增加而增加。为简便有效求解该模型,采用锥松弛技术将其转换为二阶锥规划模型,详细转换过程及转换后的二阶锥规划模型可参见文献[6]。

3 求解算法和流程

本文采用改进灵敏度分析法对 SOP 进行选址,确定 SOP 安装位置,因此二阶锥规划算法不以 SOP 位置为决策变量。当 SOP 安装个数不止 1 个时,本文采用将 SOP 逐个接入系统后重新计算改进灵敏度的方法,以优化 SOP 安装位置。本文将求解过程分为 2 层:二阶锥规划层的目的是优化 SOP 安装容量,目标为配电网年度综合成本最低;改进灵敏度运行层则用于判定规划层确定 SOP 配置后能否满足系统电压约束。因此,求解 SOP 选址定容模型的流程如图 2 所示。

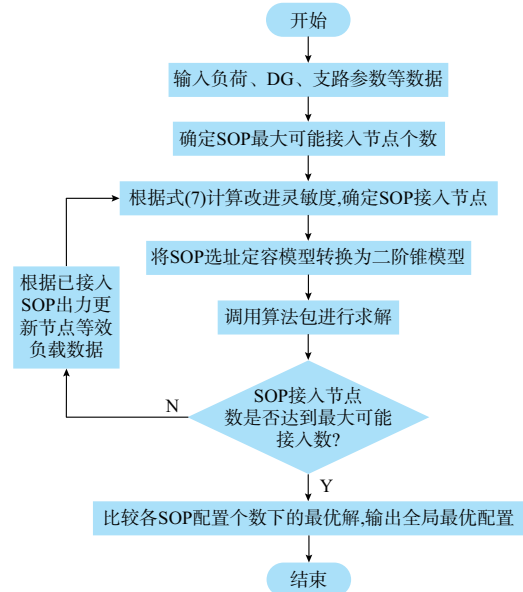


图 2 SOP 优化配置流程图

Fig. 2 Flow chart of SOP optimal allocation

4 算例分析

本文采用改进的 IEEE 33 节点配电系统来验证所提 SOP 选址定容优化方法的有效性,系统结构如附录 A 图 A2 所示。该系统包含 32 条常闭支路和 5 条常开支路,额定电压取 12.66 kV,总负荷有功功率和无功功率分别为 3 715 kW 和 2 300 kvar,节点负荷

和支路阻抗参数详见文献[30]。

为考虑 DG 高渗透率对配电网的影响,将 4 台 PV 电源和 3 台 WT 接入配电系统中。PV 的安装位置为节点 6、19、22、26,对应的安装容量分别为 800、800、500、400 kW;WT 的安装位置为节点 9、12、30,对应的安装容量分别为 800、500、300 kW,总有功出力达到 110%,所有 DG 都在单位功率因数下运行。以小时为单位,通过负荷预测方法得到系统负荷日运行曲线,DG 出力以相同方式处理,详见附录 A 图 A3^[5]。

4.1 SOP 规划结果分析

本文不考虑配电网重构,直接在原接入联络开关的位置(节点 7-23、8-14、11-24、17-32、21-28)对 SOP 进行选址。

设置系统节点电压不越限范围为额定电压的 95%~105%。经潮流计算得到系统各节点在各时段的电压值,进而得到各节点电压越限情况如表 1 所示。

采用本文提出的改进灵敏度分析法对全天 24 h 进行分析计算,通过第 1 次计算得出节点 17-32 的改进灵敏度值最大,应作为 SOP 的首要接入节点。选定节点 17-32 为首要接入节点后,根据图 2 的 SOP 优化配置流程,计算在下一个 SOP 接入时待选 SOP 接入节点的第 2 次改进灵敏度值,根据计算结果得出第 2 个 SOP 最佳并网点为节点 21-28。依次类推,

可计算得到第 3 次改进灵敏度值,确定第 3 个 SOP 的最佳并网点为节点 11-24。由于 SOP 的投资成本较高,本文设定 SOP 最大接入点个数为 3。

表 1 节点电压越限情况
Table 1 Bus voltage violations

节点号	越限次数	偏差最大电压	节点号	越限次数	偏差最大电压
14	1	0.945 8	28	2	1.052 3
15	2	0.938 3	29	2	1.058 4
16	2	0.941 1	30	3	1.066 7
17	3	0.938 1	31	4	1.066 2
21	1	1.050 8	32	4	1.065 6
24	1	1.051 5			

SOP 相关参数如下:SOP 单位待选安装容量为 50 kVA,SOP 使用年限为 20 年,SOP 单位容量投资成本为 1 000 元/kVA,SOP 换流器损耗系数、SOP 年度运行维护成本系数和配电系统年度供电损耗成本系数分别为 0.02、0.01 和 0.08。

本文在 MATLAB R2016a 平台上通过 YALMIP 优化工具箱^[31]编程,并调用 IBM ILOG CPLEX 12.6 算法包求解 SOP 选址定容模型。

将 SOP 的接入方案分为 4 种:方案 1,不接入 SOP;方案 2,接入 1 个 SOP;方案 3,接入 2 个 SOP;方案 4,接入 3 个 SOP。不同 SOP 接入方案对比如表 2 所示。

表 2 不同 SOP 接入方案的成本比较
Table 2 Cost comparison of different SOP access schemes

接入方案	SOP 接入个数	SOP 接入节点号	SOP 接入容量/ kVA	SOP 年度投 资成本/万元	SOP 年度维 护成本/万元	配电网年度供电 损耗成本/万元	年度综合成本/ 万元
方案 1	0	无	0	0	0	34.311	34.311
方案 2	1	17-32	600	3.00	0.60	27.649	31.249
方案 3	2	17-32	300	2.25	0.45	27.527	30.227
		21-28	150				
方案 4	3	17-32	350	2.50	0.50	28.103	31.103
		21-28	100				
		11-24	50				

分析表 2 可知,SOP 最优接入方案为方案 3:在节点 17-32 上接入一个容量为 300 kVA 的 SOP,在节点 21-28 上接入一个容量为 150 kVA 的 SOP,此时年度综合成本为 30.227 万元。方案 3 与方案 1、方案 2 和方案 4 相比,年度综合成本分别节省了 11.9%、3.27% 和 2.82%。另外,采用方案 3 对配电网进行优化,每年可节省 4.084 万元,所以需要约 11.02 年就能收回 SOP 的总投资成本。

在接入 SOP 之前,通过潮流计算可知全天 24 h

内节点 14、15、16、17、21、24、28、29、30、31、32 分别出现了一次或多次电压越限情况。图 3 为接入 SOP 后这些节点在各时段的电压变化曲线,经过本文提出的方法对 SOP 进行优化配置后,各越限节点在接入 SOP 之后全天内均未出现电压越限。

为进一步证实本文所提方法的优越性,研究文献[9]对 SOP 进行优化配置的方法,该方法将 SOP 的安装位置和容量作为决策变量,采用二阶锥规划对其直接求解。将其仿真结果与本文仿真结果进行比较,如图 4 和表 3 所示。

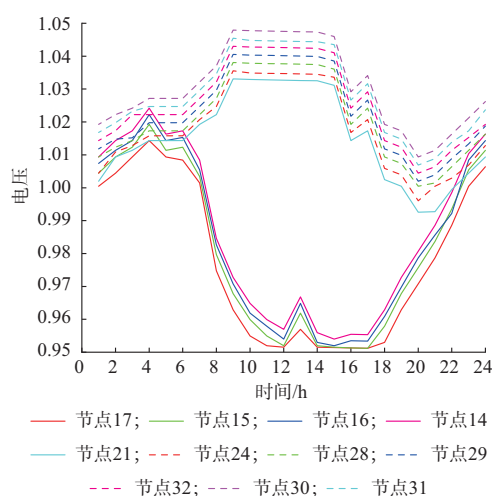


图3 接入SOP后各节点的全天电压变化曲线
Fig. 3 All-day node voltage variation curves with SOP accessed

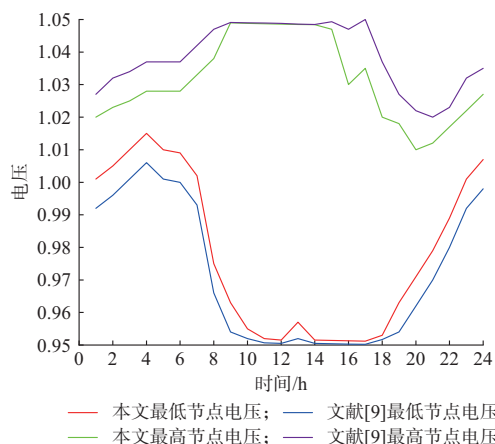


图4 本文与文献[9]的最低和最高节点电压分布
Fig. 4 The minimum and maximum bus voltage profile in this paper and reference [9]

表3 本文与文献[9]接入方案的成本比较
Table 3 Comparison of cost of access schemes in this paper and reference [9]

接入方案	SOP接入节点号	SOP接入容量/kVA	SOP年度投资成本/万元	SOP年度维护成本/万元	配电网年度供电损耗成本/万元	年度综合成本/万元
本文	17-32 21-28	300 150	2.25	0.45	27.527	30.227
文献[9]	7-23 17-32 21-28	100 350 150	3.00	0.60	28.215	31.815

图4比较了本文与文献[9]在各个时段的系统最低和最高节点电压分布情况,表明本文的整体电压分布更为合理,电压质量更高,对电压的控制效果更好。从表3可以看出,本文的各项成本均低于文献[9],年度综合成本与文献[9]相比节省了4.5%。

因此,采用本文提出的方法对SOP进行选址定容更有优势。

4.2 SOP运行优化结果分析

基于上述SOP规划结果,分析SOP以最优配置方式(方案3)接入时对有源配电网运行的优化效果。图5和图6分别为SOP有功和无功出力时序曲线,由图可见,若DG出力较大、负荷功率较小,SOP主要用于传输有功潮流;若DG出力较小、负荷功率较大,SOP主要用于提供无功补偿。

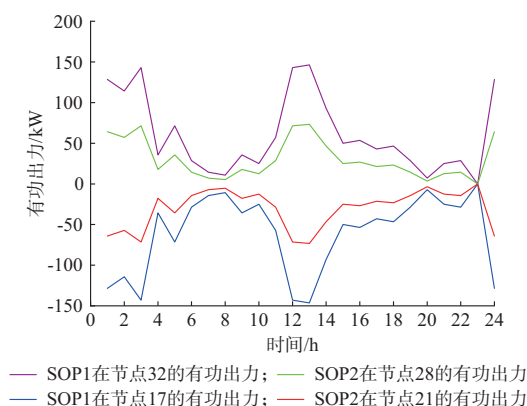


图5 SOP有功出力曲线
Fig. 5 Active output curves of SOP

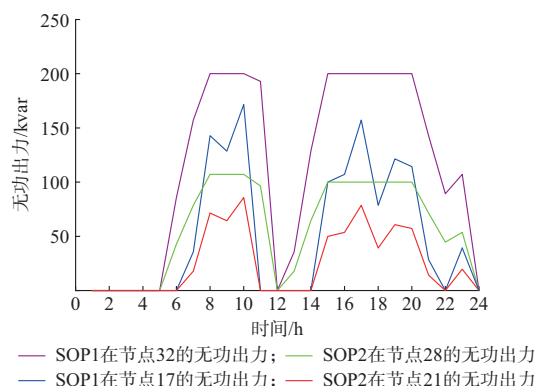


图6 SOP无功出力曲线
Fig. 6 Reactive output curves of SOP

结合表2中的配电网年度供电损耗成本和图3可知,SOP对有功和无功功率的灵活传输和分配,起到提高电压质量和降低功率损耗的作用,有利于改善整个配电网的运行状态。

4.3 考虑系统消纳DG能力的SOP规划结果分析

上述SOP规划方案是基于DG完全消纳,其DG渗透率较高,为110%。考虑到系统消纳DG的能力有限,本文对在DG渗透率为30%和70%两种情况下的SOP规划结果进行分析。

表4和表5所示,为DG渗透率分别为30%和70%的SOP规划结果。与表2对比可知,SOP接入位置均为节点17-32和节点21-28,不随系统DG渗

透率变化;SOP接入总容量分别为300、350、450 kVA,会随着DG渗透率的提高而增加。

表4 DG渗透率为30%时的SOP规划结果
Table 4 SOP planning results with DG permeability of 30%

接入方案	SOP接入节点号	SOP接入容量/kVA	年度综合成本/万元
方案1	无	0	30.872
方案2	17-32	450	29.277
方案3	17-32	200	27.003
	21-28	100	
方案4	17-32	200	28.112
	21-28	50	
	11-24	150	

表5 DG渗透率为70%时的SOP规划结果
Table 5 SOP planning results with DG permeability of 70%

接入方案	SOP接入节点号	SOP接入容量/kVA	年度综合成本/万元
方案1	无	0	31.546
方案2	17-32	500	29.956
方案3	17-32	200	28.115
	21-28	150	
方案4	17-32	250	28.672
	21-28	50	
	11-24	150	

5 结语

本文提出一种基于改进灵敏度分析的有源配电网SOP选址定容优化方法。首先,考虑到DG有功出力会发生时序变化的特征,采用改进灵敏度分析法对SOP进行选址;其次,建立以配电网年度综合运行成本为目标、以SOP接入容量为决策变量的数学优化模型,采用二阶锥规划求解在灵敏度计算下的SOP优化配置模型;最后,以改进的IEEE 33节点为算例,对本文所提方法进行验证与分析,分析了SOP对系统的运行优化效果,并研究了DG渗透率对本文所提SOP规划方法的影响。算例分析表明:接入SOP可显著提高系统运行的经济性和电压质量;采用改进灵敏度分析法对SOP进行选址可有效降低年度综合成本、实时解决电压越限问题。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

[1] CONTI S, NICOLOSI R, RIZZO S A, et al. Optimal dispatching of distributed generators and storage systems for MV

islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1243-1251.

[2] VERZIJLBERGH R A, DE VRIES L J, LUKSZO Z, et al. Renewable energy sources and responsive demand. Do we need congestion management in the distribution grid? [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2119-2128.

[3] 王博,肖峻,周济,等.主动配电网中分布式电源和微网的运行域[J].电网技术,2017,41(2):363-370.

WANG Bo, XIAO Jun, ZHOU Ji, et al. Dispatchable region of distributed generators and microgrids in distribution systems [J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 363-370.

[4] 姜毓伟,张筱慧,丛鹏伟,等.含柔性软开关的有源配电网故障恢复策略[J].电力系统自动化,2018,42(1):23-31.

LOU Chengwei, ZHANG Xiaohui, CONG Pengwei, et al. Service restoration strategy of active distribution network with soft open points [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 23-31.

[5] 赵金利,李雨薇,李鹏,等.基于二阶锥规划的有源配电网SNOP电压无功时序控制方法[J].高电压技术,2016,42(7):2134-2141.

ZHAO Jinli, LI Yuwei, LI Peng, et al. Sequential voltage regulation of soft normally open point in active distribution network based on second-order cone programming [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2134-2141.

[6] LI P, JI H, WANG C, 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, 4(8): 1430-1442.

[7] LI P, JI H, WANG C, et al. Optimal operation of soft open points in active distribution networks under three-phase unbalanced conditions [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 10(1): 380-391.

[8] 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):1889-1897.

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): 1889-1897.

[9] WANG C, SONG G, LI P, et al. Optimal siting and sizing of soft open points in active electrical distribution networks [J]. Applied Energy, 2017, 189: 301-309.

[10] 马丽,薛飞,石季英,等.有源配电网分布式电源与智能软开关三层协调规划模型[J].电力系统自动化,2018,42(11):86-93.

MA Li, XUE Fei, SHI Jiying, et al. Tri-level coordinated planning model of distributed generator and intelligent soft open point for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 86-93.

[11] 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 generation with soft open point regulation optimization in flexible distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(8): 109-115.

- [12] 武利会, 范心明, 董楠, 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.
- 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-EPSC, 2019, 31(10): 18-23.
- [13] 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.
- [14] 陈壹煜, 耿光超, 江全元, 等. 考虑传统调控手段的配电网 SOP 选址定容方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1181-1189.
- CHEN Yaoyu, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Optimal siting and sizing method of soft open point in distribution network combined with traditional regulations [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1181-1189.
- [15] 李松, 吕林, 雷成, 等. 基于电压灵敏度的分布式电源接入规划[J]. 可再生能源, 2014, 32(11): 1644-1649.
- LI Song, LV Lin, LEI Cheng, et al. Planning of distributed generation based on voltage sensitivity [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(11): 1644-1649.
- [16] 徐志成, 赵波, 丁明, 等. 基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1578-1587.
- XU Zhicheng, ZHAO Bo, DING Ming, et al. Photovoltaic hosting capacity evaluation of distribution networks and inverter parameters optimization based on node voltage sensitivity [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1578-1587.
- [17] 高慧敏, 章坚民, 江力. 基于二阶网损无功灵敏度矩阵的配电网无功补偿选点[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1979-1983.
- GAO Huimin, ZHANG Jianmin, JIANG Li. Optimal location of reactive power compensation for distribution network based on second order loss-reactive power sensitivity matrix [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1979-1983.
- [18] 黄俊辉, 汪惟源, 王海潜, 等. 基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化与电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 37-43.
- HUANG Junhui, WANG Weiyan, WANG Haiqian, et al. Study of hybrid genetic algorithm and annealing algorithm on reactive power optimization and voltage control in AC/DC transmission system [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 37-43.
- [19] 阚菲菲, 居荣, 鞠勇. 配电网故障定位蚁群算法研究[J]. 电气技术, 2015, 16(3): 40-44.
- KAN Feifei, JU Rong, JU Yong. The research of ant colony algorithm in distribution network fault location [J]. Electrical Engineering, 2015, 16(3): 40-44.
- [20] 王艳松, 宋阳阳, 吴昊, 等. 基于禁忌搜索算法的微电网源/荷安全经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 21-27.
- WANG Yansong, SONG Yangyang, WU Hao, et al. Security and economic dispatch of source/load for micro-grid based on tabu search algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 21-27.
- [21] ALSAC O, BRIGHT J, PRAIS M, et al. Further developments in LP-based optimal power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 697-711.
- [22] LIU M, TSO S K, YING C. An extended nonlinear primal-dual interior-point algorithm for reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (4): 982-991.
- [23] 李静, 戴文战, 韦巍. 基于混合整数凸规划的含风力发电机组配电网无功补偿优化配置[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 121-129.
- LI Jing, DAI Wenzhan, WEI Wei. A mixed integer convex programming for optimal reactive power compensation in distribution system with wind turbines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 121-129.
- [24] 邢海军, 程浩忠, 曾平良, 等. 基于二阶锥规划的间歇性分布式电源消纳研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 74-80.
- XING Haijun, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. IDG accommodation based on second-order cone programming [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36 (6): 74-80.
- [25] ZHOU Bo, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Mixed-integer second-order cone programming taking appropriate approximation for the unit commitment in hybrid AC-DC grid [C]// 2017 the 6th International Conference on Renewable Power Generation, October 19-20, 2017, Wuhan, China: 1462-1467.
- [26] 李佳, 刘天琪, 陈亮, 等. 基于理想点法的多准则综合灵敏度电压稳定评估指标[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 108-112.
- LI Jia, LIU Tianqi, CHEN Liang, et al. Multi-criterion integrated-sensitivity voltage stability evaluation index based on ideal point method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 108-112.
- [27] 杨雄, 卫志农, 孙国强, 等. 含分布式电源的配电网三相解耦潮流计算方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 99-107.
- YANG Xiong, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Decoupled three-phase power flow calculation for distribution network with DGs [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 99-107.
- [28] CAO W, WU J, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation [J]. Applied Energy, 2016, 164: 245-257.
- [29] FLOURENTZOU N, VASSILIOS G A, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [30] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989(4): 1402-1407.
- [31] LOFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB [C]// 2004 IEEE International

Conference on Robotics and Automation, April 26-May 1, 2004, New Orleans, USA: 284-289.

熊正勇(1993—),男,硕士,工程师,主要研究方向:配电网规划及运行优化。E-mail:xiongzhenyong@163.com

陈天华(1981—),男,通信作者,硕士,高级工程师,主要

研究方向:电力系统及其自动化。E-mail:chentianhua@sgepri.sgcc.com.cn

杜磊(1983—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统及其自动化。

(编辑 吴崇昊)

Optimal Allocation of Soft Open Point in Active Distribution Network Based on Improved Sensitivity Analysis

XIONG Zhengyong^{1,2,3}, CHEN Tianhua^{1,2,3}, DU Lei^{1,2,3}, DAI Zemei^{1,2,3}, CHEN Jianhua^{1,2,3}, XU Lufei^{1,2,3}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: As a large number of intermittent distributed generators (DGs) keep penetrating into distribution networks, the problems such as voltage violation and bidirectional power flow become more and more serious. Soft open point (SOP) is a flexible power electronic device that is installed in distribution networks to replace the traditional tie switch. It can realize fast voltage regulation and accurate power flow control, thus effectively solving the corresponding problems caused by DGs. However, the high investment cost of SOP makes the SOP siting and sizing problem particularly critical. An SOP optimal allocation method in active distribution networks based on improved sensitivity analysis is proposed. Firstly, combined with the timing variation characteristic of DG output, an improved sensitivity analysis method is used to optimize the SOP location from the perspective of improving the voltage distribution. Secondly, the second-order cone programming algorithm is used to solve the SOP siting and sizing optimization model under improved sensitivity calculation. Finally, the proposed optimization method is analyzed and verified on the modified IEEE 33-bus distribution system. The results of the case study show that the SOP optimal allocation method proposed in this paper can effectively save annual comprehensive operation cost of distribution networks and improve system voltage, which is beneficial to improve the economics and reliability of active distribution network operation.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5108-202018028A).

Key words: active distribution network; distributed generator; soft open point (SOP); siting and sizing; improved sensitivity analysis; second-order cone programming

