

# 智能软开关选址定容模型及其求解算法

张 利<sup>1</sup>, 杨 洁<sup>2</sup>, 仇志华<sup>3</sup>, 曲泽奇<sup>4</sup>

(1.胜利油田电力分公司, 山东 东营 257087; 2.国网山东省电力公司威海供电公司, 山东 威海 264200; 3.中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580; 4.国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 浙江 杭州 310020)

**摘要:** 基于现代电力电子技术的智能软开关能够实现同区甚至异区馈线互联,进而通过闭环运行提高供电可靠性及分布式电源接纳能力。智能软开关选址与定容策略是决定其潮流调节能力及应用经济性的关键因素。文中提出了一种基于有功潮流灵敏度的智能软开关选址策略;在此基础上,考虑投资和运行成本,建立了确定智能软开关容量的双层规划模型,上层以年综合费用最小为目标函数,下层以系统网络损耗、节点电压偏差以及智能软开关内部损耗综合最优为目标;采用改进的差分进化与二阶锥规划混合算法求解智能软开关优化定容模型。最后基于改进的 33 节点算例,仿真验证了文中提出的选址与定容策略及其优化求解方法的有效性。

**关键词:** 智能软开关; 有功潮流灵敏度; 选址定容; 差分进化算法

DOI: 10.12067/ATEEE2101035      文章编号: 1003-3076(2021)11-0009-11      中图分类号: TM7

## 1 引言

随着社会经济的不断发展,短时停电损失越来越大,电力用户对供电可靠性提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。近年来,分布式电源发展迅速,其大量接入传统配电网会造成短路电流超标、电压波动过大、线间功率分布不均等问题<sup>[2]</sup>。配电网采用闭环运行方式可有效提高供电可靠性及分布式电源接纳能力<sup>[3,4]</sup>,但受环网两侧系统的电压、内阻抗以及馈线负荷分布等因素的影响,可能会出现较大的循环功率,造成两侧出力不均,甚至引起逆功率运行<sup>[5-9]</sup>。基于现代电力电子技术的智能软开关(Soft Normally Open Points, SNOP)具有强大潮流控制能力<sup>[10]</sup>,为同区甚至异区配电线路闭环运行提供有效技术支撑。SNOP 调节能力及应用经济性与其安装位置和容量密切相关,因此,研究用于馈线互联的 SNOP 优化选址与定容方法具有一定的现实意义。

SNOP 选址与定容问题的研究尚处于起步阶段。文献[11]提出了一种考虑分布式电源运行特

性的有源配电网 SNOP 规划方法,上层规划以年综合费用最小为目标,下层规划以每个场景的运行费用最小为目标。文献[12]综合考虑了 SNOP 接入对配电网供电可靠性和运行经济性的影响,以配电系统年综合成本最小为目标函数建立了智能软开关规划模型。上述两文献均采用模拟退火和锥规划的混合优化算法。文献[13,14]基于 Wasserstein 距离的多场景生成技术,建立了以最小年综合费用为目标函数的 SNOP 优化配置模型并采用二阶锥规划方法进行求解。文献[15]提出一种分布式电源(Distributed Generator, DG)与 SNOP 联合优化的三层规划模型,上层规划以 DG 运营商单位容量收益最大化为目标,中层规划以供电公司年综合成本最小为目标,下层规划以场景内运行成本最小为目标,采用并行遗传算法和锥规划的混合算法求解模型。文献[16]提出了适用于配电线路的潮流介数的概念,采用基于潮流介数的 SNOP 选址方法能有效甄别系统的关键线路,避免了大量寻优的过程;该研究确定了 SNOP 最佳安装位置,但没有考虑 SNOP 安装容量

收稿日期: 2021-01-20  
基金项目: 国家自然科学基金(51977220)、山东省自然科学基金(ZR2019MEE057)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(18CX05025A)  
作者简介: 张 利(1973-),男,山东籍,高级工程师,硕士,研究方向为油田电网规划与优化运行技术;  
仇志华(1977-),男,山东籍,副教授,博士,研究方向为交直流混合配电系统保护与控制技术(通信作者)。

对实际优化效果以及应用经济性的影响。文献[17]以风电为研究对象,提出了含 SNOP 的柔性配电网中考虑网侧运行调节的 DG 双层协调规划方法,建立了源侧 DG 规划与网侧 SNOP 运行联合优化、交替迭代的双层模型,上层以 DG 运营商收益最大为目标确定 DG 规划方案,下层以网络运行性能最优为目标实现网络的优化调节,并提出改进帝国主义竞争算法及锥规划混合算法进行求解。文献[18]假设电动汽车在配电网中的接入位置是固定的,考虑配电网的损耗和 SNOP 本身的能量损耗,建立 SNOP 位置优化配置的双层规划数学模型并采用遗传算法进行求解。文献[19]根据 SNOP 及系统运行状态约束,分析不同容量条件下 SNOP 的降损收益,对 SNOP 容量与成本关系进行线性拟合,最终综合考虑 SNOP 的成本收益平衡,提出兼顾网损优化效益与投资成本的 SNOP 容量规划方法。文献[20]提出了考虑重要用户转供优先级的快速失负荷风险计算方法,建立了计及重要用户失负荷风险的 SNOP 位置和容量双层规划模型,提出了多目标进化算法和锥规划相结合的混合优化算法对模型进行求解。

上述研究大多考虑运行经济性建立 SNOP 选址定容的规划模型,且多采用一个整数变量同时表示 SNOP 的位置和容量,若规划后得到的整数变量为 0,则认为该位置不需要安装 SNOP;但当候选位置较多时,原优化问题的候选解个数将呈指数级增长,导致现有算法难以在短时间内求出最优解。SNOP 定容规划问题属于大规模混合整数非线性规划问题,难以依靠单一方法求解。

本文采用灵敏度分析的方法,提出了一种基于有功潮流灵敏度的 SNOP 选址策略,在此基础上,建立了确定 SNOP 容量的双层规划模型,上层以年综合费用最小为目标函数,下层以系统网络损耗、节点电压偏差以及 SNOP 内部损耗综合最优为目标;将改进的差分进化算法(Differential Evolution, DE)与二阶锥规划(Second-Order Cone Programming, SOCP)方法相结合,对上述定容模型进行求解,实现了对 SNOP 选址定容的快速规划。采用改进的 33 节点算例,分析和验证了所提出的用于馈线互联的 SNOP 选址与定容策略及求解方法的有效性。

## 2 基于有功潮流灵敏度的 SNOP 选址策略

### 2.1 含 SNOP 的有源配电环网等效分析模型

本文仅讨论 SNOP 的外特性,并以所连接两端

馈线的接口有功与无功功率为边界条件,不涉及其内部拓扑结构。含 SNOP 的有源配电环网等效分析模型如图 1 所示。其中,  $P_i, Q_i, V_i$  分别为节点  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 处的有功功率、无功功率与电压;  $P_{L,i}, Q_{L,i}$  分别为节点  $i$  处负荷分支的有功功率及无功功率;  $r_i, x_i$  分别为以节点  $i$  为起始节点的支路电阻和电抗;  $P_{\text{SNOP}1}, P_{\text{SNOP}2}, Q_{\text{SNOP}1}, Q_{\text{SNOP}2}$  分别为 SNOP 注入馈线 1 和馈线 2 的有功功率和无功功率,规定 SNOP 输出的方向为功率正方向; DG 为接入节点  $i$  处的分布式电源,假定其输出功率为  $P_{\text{DG}} + jQ_{\text{DG}}$ 。馈线 2 侧与之类似,不再赘述。

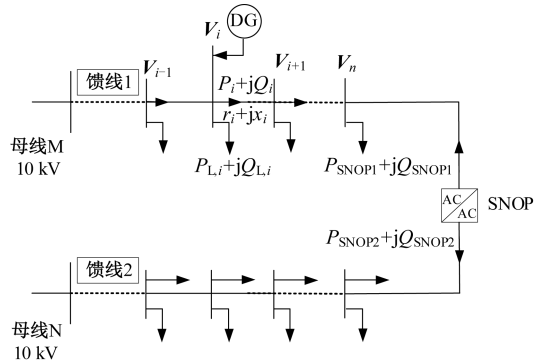


图 1 含 SNOP 的有源配电环网等效分析模型

Fig.1 Equivalent analysis model of active distribution ring network with SNOP

为方便潮流计算与分析,将图 1 所示的含 SNOP 有源配电环网分解为两个开环网络,馈线 1 侧等值电路如图 2 所示。

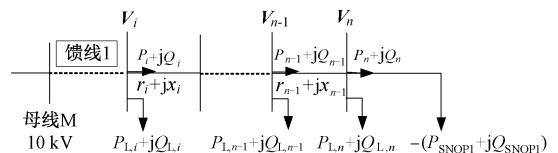


图 2 馈线 1 侧等效分析模型

Fig.2 Equivalent analysis model of feeder 1

### 2.2 基于有功潮流灵敏度的 SNOP 选址策略

线路有功潮流性能指标  $PI$  表示实际潮流与极限潮流之间的裕度,可用来表征负载的严重程度<sup>[21]</sup>,其表达式如下:

$$PI = \sum_{l=1}^{N_l} \frac{w_l}{2\alpha} \left( \frac{P_l}{P_l^{\max}} \right)^{2\alpha} \quad (1)$$

式中,  $P_l, P_l^{\max}$  分别为支路  $l$  的实际与最大有功功率;  $\alpha$  为指数系数;  $w_l$  为支路  $l$  的权重系数,反映该支路重要性;  $N_l$  为系统总支路数。

如图 1 所示, SNOP 可以控制馈线 1 与馈线 2 之

间的交换功率, 配电环网的潮流分布会发生变化,  $PI$  数值也会随之变化。定义  $PI$  对有功功率交换量的偏导数为 SNOP 对于  $PI$  的调节灵敏度参数  $C_p$ , 如式(2)所示, 其值越大, 表明对应位置上的 SNOP 对配网潮流的调节能力越强。

$$C_p = \left| \frac{\partial PI}{\partial \Delta P} \right|_{\Delta P=0} \quad (2)$$

$$P_l = \begin{cases} P_{L,i+1} - P_{\text{SNOP}1} + \frac{r_i}{|V_i|^2} [(P_{L,i+1} + P_{i+1})^2 + (Q_{L,i+1} + Q_{i+1})^2] & l = i = n - 1 \\ P_{L,i+1} + P_{i+1} + \frac{r_i}{|V_i|^2} [(P_{L,i+1} + P_{i+1})^2 + (Q_{L,i+1} + Q_{i+1})^2] & l = i = 1, 2, \dots, n - 2 \end{cases} \quad (4)$$

对式(4)求偏导可得:

$$\frac{\partial P_l}{\partial \Delta P} = \begin{cases} -1 - \frac{2r_i}{|V_i|^2} (P_{L,i+1} + P_{i+1}) & l = i = n - 1 \\ \left[ 1 + \frac{2r_i}{|V_i|^2} (P_{L,i+1} + P_{i+1}) \right] \frac{\partial P_{l-1}}{\partial \Delta P} & l = i = 1, 2, \dots, n - 2 \end{cases} \quad (5)$$

由式(3)、式(5)即可求得 SNOP 对于  $PI$  的调节灵敏度参数  $C_p$ 。  $C_p$  越大, 表明该位置上的 SNOP 对线路调节能力越强, 因此, 选择  $C_p$  值作为 SNOP 选址的依据。

### 3 基于双层规划模型的 SNOP 定容方法

#### 3.1 用于 SNOP 定容的双层规划模型

电力电子设备的应用经济性与其安装容量密切相关。因此, SNOP 位置确定之后, 需对其安装容量进行规划。本文基于双层规划模型提出了 SNOP 优化定容策略。

上层模型以含 SNOP 的配电环网年综合费用最小为目标函数。年综合费用  $F_{\text{up}}$  包括折算到每年的 SNOP 固定投资费用  $f_1$ 、SNOP 年运行维护费用  $f_2$  以及整个配电系统年损耗费用  $f_3$  [22], 如下所示:

$$F_{\text{up}} = \min(f_1 + f_2 + f_3) \quad (6)$$

折算到每年的 SNOP 固定投资费用如下所示:

$$f_1 = \frac{d(1+d)^y}{(1+d)^y - 1} C_{\text{SNOP}} S_{\text{SNOP}} \quad (7)$$

式中,  $d$  为贴现率;  $y$  为 SNOP 的经济使用年限;  $C_{\text{SNOP}}$  为 SNOP 的单位容量投资成本;  $S_{\text{SNOP}}$  为 SNOP 的安装容量。

SNOP 年运行维护费用如下式所示:

$$f_2 = \eta C_{\text{SNOP}} S_{\text{SNOP}} \quad (8)$$

式中,  $\eta$  为年运行维护费用系数。

整个配电系统年损耗费用如下式所示:

$$f_3 = 8760c(P_{\text{loss}} + P_{\text{SNOP,loss}}) \quad (9)$$

式中,  $\Delta P$  为有功功率交换量。

将式(1)代入式(2)可得:

$$\frac{\partial PI}{\partial \Delta P} = \sum_{l=1}^{N_l} w_l P_l^{2\alpha-1} \left( \frac{1}{P_l^{\max}} \right)^{2\alpha} \frac{\partial P_l}{\partial \Delta P} \quad (3)$$

图2中, 各支路的实际有功功率如式(4)所示:

式中,  $c$  为电价;  $P_{\text{loss}}$  为配电系统网络损耗;  $P_{\text{SNOP,loss}}$  为 SNOP 的内部功率损耗。

该优化模型的约束条件为:

$$0 \leq S_{\text{SNOP}} \leq S_{\text{SNOP}}^{\max} \quad (10)$$

式中,  $S_{\text{SNOP}}^{\max}$  为选定位置允许安装的 SNOP 最大容量, 也是定容策略中最终优化的变量。

下层模型综合考虑网络损耗、节点电压偏差及 SNOP 内部损耗, 建立基于 SNOP 的有源配电环网潮流优化控制模型 [23,24]。目标函数如下式所示:

$$F_{\text{down}} = \min \left[ \alpha_1 \sum_{l=1}^{N_l} r_l \cdot \frac{P_l^2 + Q_l^2}{V_l^2} + \beta \sum_{i=1}^N |V_i^2 - 1| + \gamma \sum_{m=1}^2 (A_m + B_m I_{\text{SNOP}m} + C_m I_{\text{SNOP}m}^2) \right] \quad (11)$$

式中,  $\alpha_1, \beta, \gamma$  为权重系数;  $l$  为支路号;  $N_l$  为总支路数;  $r_l, P_l, Q_l, V_l$  分别为支路  $l$  的电阻、有功功率、无功功率以及端电压;  $i$  为节点号;  $N$  为总节点数;  $V_i$  为节点  $i$  的电压;  $m=1, 2$ , 分别为 SNOP 连接馈线 1 侧与连接馈线 2 侧的变流器编号;  $I_{\text{SNOP}m}$  为流过 SNOP  $m$  变流器的电流;  $A_m, B_m, C_m$  为 SNOP 的损耗系数 [25]。

同时, 为了保证含 SNOP 的有源配电环网安全稳定运行, 考虑如下约束条件:

(1) 等式约束条件

$$\begin{cases} P_{\text{SNOP}1} + P_{\text{SNOP}2} + P_{\text{SNOP}1,\text{loss}} + P_{\text{SNOP}2,\text{loss}} = 0 \\ P_{\text{SNOP}1,\text{loss}} = A_1 + B_1 I_{\text{SNOP}1} + C_1 I_{\text{SNOP}1}^2 \\ P_{\text{SNOP}2,\text{loss}} = A_2 + B_2 I_{\text{SNOP}2} + C_2 I_{\text{SNOP}2}^2 \end{cases} \quad (12)$$

$$f(P_i, Q_i, V_i) = 0 \quad (13)$$

$$I_l^2 = \frac{P_l^2 + Q_l^2}{V_l^2} \quad (14)$$

(2) 不等式约束

$$\begin{cases} -Q_{\text{SNOP1,max}} \leq Q_{\text{SNOP1}} \leq Q_{\text{SNOP1,max}} \\ -Q_{\text{SNOP2,max}} \leq Q_{\text{SNOP2}} \leq Q_{\text{SNOP2,max}} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \sqrt{P_{\text{SNOP1}}^2 + Q_{\text{SNOP1}}^2} \leq S_{\text{SNOP}} \\ \sqrt{P_{\text{SNOP2}}^2 + Q_{\text{SNOP2}}^2} \leq S_{\text{SNOP}} \end{cases} \quad (16)$$

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

$$0 \leq I_l \leq I_{l,\max} \quad (18)$$

式中,  $P_{\text{SNOP1,loss}}$ 、 $P_{\text{SNOP2,loss}}$  分别为 SNOP 连接馈线 1 侧与连接馈线 2 侧的变流器损耗,  $P_{\text{SNOP,loss}} = P_{\text{SNOP1,loss}} + P_{\text{SNOP2,loss}}$ ; 式(13)为系统潮流约束, 其中  $P_i$ 、 $Q_i$  为节点注入功率,  $V_i$  为节点电压;  $I_l$  为支路  $l$  的电流;  $Q_{\text{SNOP1,max}}$ 、 $Q_{\text{SNOP2,max}}$  为变流器 VSC1、VSC2 所能输出的无功功率上限;  $V_{i,\max}$ 、 $V_{i,\min}$  分别为节点  $i$  的电压上下限;  $I_{l,\max}$  为支路  $l$  电流幅值上限;  $I_{\text{SNOP1}}$  为 SNOP 连接馈线 1 侧变流器内流过的电流幅值;  $I_{\text{SNOP2}}$  为 SNOP 连接馈线 2 侧变流器内流过的电流幅值, 其是一个关于与交流网交换的有功功率和无功功率的函数, 如下所示:

$$\begin{cases} I_{\text{SNOP1}} = \frac{\sqrt{P_{\text{SNOP1}}^2 + Q_{\text{SNOP1}}^2}}{|V_{\text{sl}}|} \\ I_{\text{SNOP2}} = \frac{\sqrt{P_{\text{SNOP2}}^2 + Q_{\text{SNOP2}}^2}}{|V_{\text{sl}}|} \end{cases}$$

式中,  $V_{\text{sl}}$  为 SNOP 与馈线连接处的电压。

$A_m$ 、 $B_m$ 、 $C_m$  表示损耗系数, 是在 Södra Länken 项目中通过计算得到相应容量下的标幺值<sup>[26]</sup>, 其计算公式如下所示:

$$\begin{cases} A_m = \frac{6.62S_N}{600S_B} \\ B_m = \frac{1.8V_N^d}{600V_B^d} \\ C_m^R = \frac{1.98(V_N^d)^2S_B}{600(V_B^d)^2S_N} \\ C_m^I = \frac{3.0(V_N^d)^2S_B}{600(V_B^d)^2S_N} \end{cases}$$

式中,  $S_N$  为变流器的额定容量;  $S_B$  为系统的基准容量;  $V_N^d$  为直流侧额定电压;  $V_B^d$  为直流网络的基准电压; 上标 R 代表整流器; 上标 I 代表逆变器。

### 3.2 SNOP 双层规划模型优化求解算法

#### 3.2.1 SNOP 双层规划模型求解流程

SNOP 定容规划问题属于大规模混合整数非线性规划问题, 难以依靠单一方法求解。针对本文提出的确定 SNOP 容量双层规划模型, 提出一种基于改进 DE 和二阶锥规划的混合优化算法。上层采用改进的 DE 算法求解, 得到最优的 SNOP 安装容量并传递给下层, 下层规划根据该结果采用二阶锥规划对配电网进行运行优化, 并将优化结果返回上层, 最终得到最优解, 即在一定位置上安装 SNOP 的最佳容量值。

#### 3.2.2 改进的 DE 算法

针对 DE 算法在寻优过程中存在的不足<sup>[27-30]</sup>, 在传统 DE 算法中引入天牛须算法 (Beetle Antennae Search, BAS) 进行改进。天牛须算法是一种不依赖函数形式、梯度等信息即可实现高效寻优的搜索优化算法。BAS 算法与 DE 算法的结合, 可以充分发挥 DE 算法的全局搜索能力, 同时也能够发挥 BAS 算法的局部搜索能力, 优势上进行互补, 既提高算法的搜索能力, 也提高寻优结果的精度。

改进的 DE 算法为内外双层算法的结合, 其流程图如图 3 所示。算法外层使用 DE 算法对整个解空间进行全局搜索; 算法内层, 采用 BAS 算法对外层搜索到的最优结果, 在其一定邻域范围内进行局部搜索, 若搜索到更优的解, 则用该解作为新的全局最优解, 若未搜索到更优的解, 则保留原 DE 算法搜索到的全局最优解, 以此来提高算法的整体精度。

同时, 为了防止陷入局部最优, 引入 Metropolis 准则<sup>[29]</sup>, 即有一定概率接受劣优解。假设 BAS 寻优后的最优位置为  $x'$ , DE 算法寻优后的全局最优位置为  $x$ , 两者函数值差为  $\Delta f = f(x') - f(x)$ , 目标函数最优解为  $F_{\text{best}}$ 。假设  $R \in (0, 1)$  为随机数, 满足以下条件:

$$\begin{cases} \Delta f < 0 & \text{接受此时的 } x' \text{ 作为最优解} \\ \Delta f \geq 0 & \text{若 } P_f > R, \text{以概率 } P_f \text{ 采纳此时解} \end{cases}$$

$$\text{其中, } P_f = \frac{1}{1 + e^{-\Delta f / F_{\text{best}}}}$$

#### 3.2.3 二阶锥规划

二阶锥规划算法是线性空间中凸锥上的数学规划, 因其具有求解速度快、寻优能力强的特点, 被广泛应用于求解大规模非线性优化问题<sup>[31]</sup>。本文根据二阶锥规划算法的基本原理, 对规划模型的目标函数与约束条件进行了锥模型转化, 将原问题转换

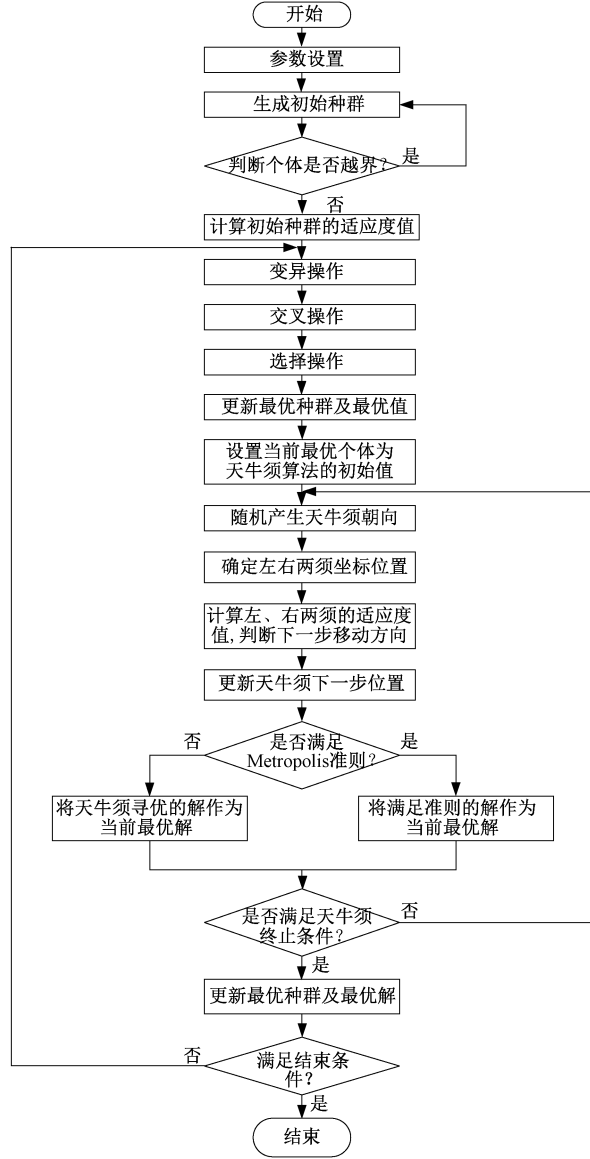


图3 改进的DE算法的流程

Fig.3 Flow chart of improved DE algorithm

为 SOCP 问题,使其不仅能快速实现问题的求解,还能保证所求解的最优性。

SNOP 优化定容目标函数如式(11)所示,由系统的网络损耗、电压偏差以及 SNOP 内部损耗三部分组成,将其进行锥模型转化。

令  $I_{2,l} = I_l^2$ , 令  $V_{2,l} = V_l^2$ , 且引入辅助变量  $M_i = |V_{2,i} - 1|$ , 其中  $V_{2,i} = V_i^2$ , 以及辅助变量  $T_m = I_{SNOPm}^2$ , 将目标函数式线性化,得到式(19):

$$f = \min \left[ \alpha_1 \sum_{l=1}^{N_l} r_l \cdot I_{2,l} + \beta \sum_{i=1}^N M_i + \gamma \sum_{m=1}^2 (A_m + B_m \cdot I_{SNOPm} + C_m T_m) \right] \quad (19)$$

增加约束条件  $I_{SNOPm}^2 - T_m \leq 0$ , 其为旋转二阶锥

约束<sup>[32]</sup>。

将 SNOP 定容优化模型的约束条件进行锥模型转化,可得如下:

$$\begin{cases} P_{SNOP1} + P_{SNOP2} + P_{SNOP1,loss} + P_{SNOP2,loss} = 0 \\ P_{SNOP1,loss} = A_1 + B_1 I_{SNOP1} + C_1 T_1 \\ P_{SNOP2,loss} = A_2 + B_2 I_{SNOP2} + C_2 T_2 \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $A_1, B_1, C_1$  为 SNOP1 的损耗系数;  $A_2, B_2, C_2$  为 SNOP2 的损耗系数;  $T_1 = I_{SNOP1}^2$ ;  $T_2 = I_{SNOP2}^2$ 。

系统潮流约束为:

$$f(P_i, Q_i, V_i) = 0 \quad (21)$$

将目标函数线性化,非线性约束转化为线性约束、二阶锥约束以及旋转锥约束,其约束条件如式(22)~式(26)所示,其中式(22)为等价标准二阶锥形式,通过 CPLEX 算法包可以实现模型的快速求解。

$$\begin{vmatrix} 2P_l \\ 2Q_l \\ I_{2,l} - V_{2,l} \end{vmatrix} \leq I_{2,l} + V_{2,l} \quad (22)$$

$$\begin{cases} -Q_{SNOP1,max} \leq Q_{SNOP1} \leq Q_{SNOP1,max} \\ -Q_{SNOP2,max} \leq Q_{SNOP2} \leq Q_{SNOP2,max} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} P_{SNOP1}^2 + Q_{SNOP1}^2 \leq S_{SNOP,rate}^2 \\ P_{SNOP2}^2 + Q_{SNOP2}^2 \leq S_{SNOP,rate}^2 \end{cases} \quad (24)$$

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max} \quad (25)$$

$$0 \leq I_l \leq I_{l,max} \quad (26)$$

式中,  $S_{SNOP,rate}$  为 SNOP 的额定容量。

## 4 算例分析

基于上述理论分析,本文在标准 33 节点系统<sup>[33]</sup>的基础上进行改进,利用该模型进行仿真和分析。改进的 33 节点系统如图 4 所示,包含 37 条支路,其中有五条为含联络开关支路,电压等级为 12.66 kV。表 1 为系统所接入的分布式电源参数。

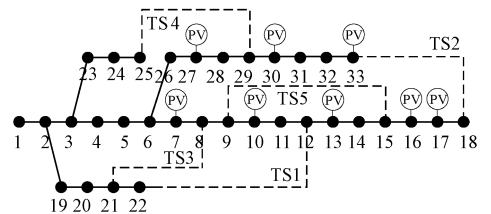


图4 改进的 IEEE 33 节点算例

Fig.4 Improved IEEE 33 distribution system

表 1 分布式电源参数表

Tab.1 DG parameters							
位置	7	10	13	16	17	27	30
容量/(kV·A)	500	300	300	200	200	400	200
功率因数	0.9						

4.1 SNOP 优化选址结果

将改进的 33 节点系统中的联络开关 (TS1、TS2、TS3、TS4、TS5) 位置作为 SNOP 安装位置的备选位置,取  $\alpha_1 = 3$ 、 $w_l = 1^{[21]}$ 。假设各条支路最大潮流为 200 MV·A,得到不同备选位置安装 SNOP 时对  $PI$  的调节灵敏度参数  $C_p$ ,计算结果如表 2 所示。

表 2 各联络开关处安装 SNOP 的  $PI$  调节灵敏度参数

Tab.2 $PI$ adjustment sensitivity parameters of SNOP at switches					
安装位置	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5
$C_p$	0.000 19	0.005 5	0.000 09	0.000 27	0.000 10

SNOP 对  $PI$  的调节灵敏度参数  $C_p$  的值越大,则表明该位置上的 SNOP 对线路的调节能力越强。从表 2 中可以看出,联络开关 TS2 位置处的灵敏度因子值最大,即该位置处 SNOP 对线路功率调节能力最强,宜选择联络开关 TS2 位置作为 SNOP 的最佳安装位置。

为了验证本文提出的优化选址策略的正确性,分别在 5 个安装备选位置处安装 SNOP 装置,同时,规定每一处 SNOP 传输的有功功率均为 100 kV·A,无功功率均为 100 kVar,测得五个场景下的有功潮流性能指标  $PI$  值如表 3 所示。

表 3 各联络开关处安装 SNOP 后的  $PI$  值

Tab.3 $PI$ value after installing SNOP at each interconnection switch					
安装位置	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5
$PI(\times 10^{-9})$	1.814	1.736	1.904	1.760	1.823

从表 3 的结果中可以看出,SNOP 安装在 TS2 处, $PI$  值最小,表明此场景下潮流分布最合理,与前文确定的 SNOP 最优安装位置结论一致,证明了本文所提出的基于有功潮流灵敏度的 SNOP 选址策略的正确性。

4.2 SNOP 优化定容结果

根据前文基于灵敏度的 SNOP 选址策略,在节点 18 和节点 33 之间接入 1 组 SNOP,节点电压幅值的优化区间为 0.93 pu~1.07 pu。

在改进的 DE 算法中,取种群规模为 20,初始缩放因子为 0.6,交叉概率为 0.5,进化代数为 80 次。

采用改进 DE 算法与二阶锥规划结合的混合算法对所提出的确定 SNOP 容量的双层规划模型进行子求解,得到最优规划方案如表 4 所示,规划结果分析如表 5 所示,规划后,系统的节点电压曲线如图 5 所示,改进算法前后最优年综合费用进化结果如图 6 所示。

表 4 SNOP 最优规划方案

Tab.4 Optimal planning scheme of SNOP	
项目	方案
SNOP 安装位置	TS2
SNOP 安装容量/(kV·A)	200.343
年综合费用/万元	16.776
网络损耗/kW	26.365
SNOP 装置损耗/kW	6.819

表 5 规划结果分析

Tab.5 Economic analysis of SNOP installation (单位:万元)				
项目	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$F_{up}$
规划前	0	0	18.396 0	18.396 0
规划后	2.040 5	0.200 3	14.535 1	16.775 9

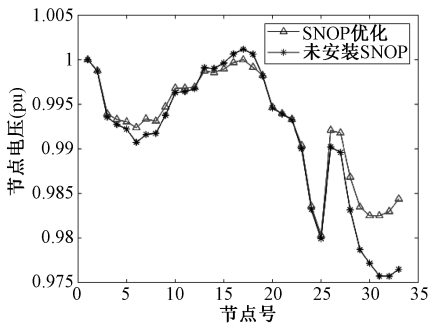


图 5 SNOP 优化前后系统的节点电压曲线对比图  
Fig.5 Comparison of node voltage curves before and after SNOP optimization

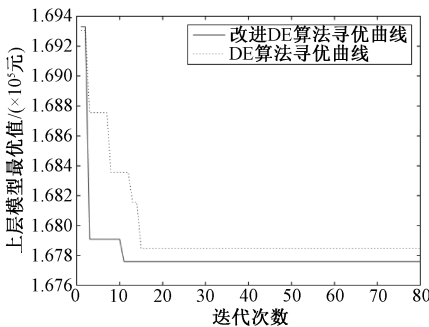


图 6 改进算法前后最优年综合费用进化图  
Fig.6 Optimal annual expense evolution graph after improving algorithm

从表 4 规划结果分析中可以看出规划后比规划前年综合费用减少了 1.62 万元,降低了 8.8%。其中,配电系统年损耗费用减少了 3.860 9 万元,降低了 20.99%,有效地提高了整个配电系统运行的经济性;从图 5 的节点电压曲线图中可以看出,SNOP 优化改善了系统的电压水平;从图 6 中可以看出,改进的 DE 算法提高了寻优结果的精度,也提高了算法的收敛性,具有良好的寻优性能。

4.3 优化算法验证

为了证明本文所述改进的 DE 算法与未改进 DE 算法之间的差别与优势,本文采用了如表 6 所示的基准测试函数来验证算法的性能。

表 6 标准测试函数

Tab.6 Standard test functions

函数	项目	取值
SUMSQ 函数	函数	$F_1 = x_1^2 + x_2^2$
	范围	$-5 \leq x_i \leq 5, i = 1, 2$
	最优值	0
Delong's 函数	函数	$F_2 = 100(x_1^2 - x_2^2)^2 + (1 - x_1)^2$
	范围	$-2.048 \leq x_i \leq 2.048, i = 1, 2$
	最优值	0
Goldstein-price 函数	函数	$F_3 = f_1 f_2$
	范围	$-2 \leq x_i \leq 2, i = 1, 2$
	最优值	3
Sphere 函数	函数	$F_4 = \sum_{i=1}^3 x_i^2$
	范围	$-100 \leq x_i \leq 100, i = 1, 2, 3$
	最优值	0
Schaffer 函数	函数	$F_5 = 0.5 + \frac{\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5}{[1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2}$
	范围	$-100 \leq x_i \leq 100, i = 1, 2$
	最优值	0.5

注: $f_1 = 1 + (x_1 + x_2 + 1)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)$ ;  
 $f_2 = 30 + (2x_1 - 3x_2)^2(18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)$

算法测试中,取种群规模为 30,迭代次数为 50,选择交叉概率为 0.5,初始缩放因子为 0.6。现将改进前和改进后的 DE 算法分别独立运行 20 次,每次运行后所得到的函数最优值曲线如附图 1 所示,分别统计算法改进前后 20 次寻优结果的最优值和平均值,实验结果如表 7 所示。

从测试结果附图 1(e)及表 7 可以看出,改进后的 DE 算法与改进前的 DE 算法相比,在求解精度方

表 7 两种算法寻优结果比较表

Tab.7 Comparison table of optimization results of two algorithms

基准函数	最优值		平均值	
	改进前 DE 算法	改进后 DE 算法	改进前 DE 算法	改进后 DE 算法
$F_1$	9.31E-14	0	5.53E-10	3.59E-16
$F_2$	1.31E-06	1.29E-06	7.89E-04	2.07E-04
$F_3$	3.000 0	3.000 1	3.000 0	3.000 0
$F_4$	2.78E-05	1.15E-41	0.000 4	5.66E-10
$F_5$	0.501 2	0.500 0	0.509 8	0.503 0

面有了较大的提升,其最优值以及平均值均优于改进前的 DE 算法。为了更直观地比较改进后的 DE 算法的寻优能力,本文对算法的收敛曲线进行了对比,如附图 2 所示。从附图 2 各基准函数的收敛曲线中可以看出,改进后的 DE 算法表现出了良好的收敛性。故综合上述寻优结果及收敛性的对比,验证了本文所提出的改进的 DE 算法的有效性。

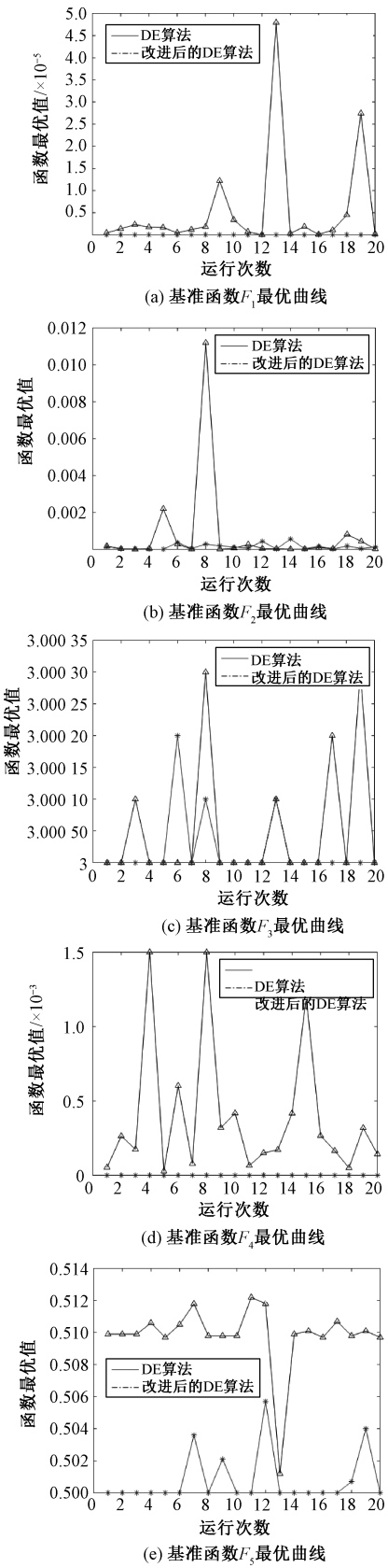
5 结论

本文采用灵敏度分析的方法,提出了一种基于有功潮流灵敏度因子的 SNOP 选址策略,并建立了上层以年综合费用最小为目标函数,下层以系统网络损耗、节点电压偏差以及 SNOP 内部损耗综合最优为目标的确定 SNOP 容量的双层规划模型。采用多个标准测试函数对算法进行测试,分析了本文所述改进 DE 算法与改进前的 DE 算法相比在精度、收敛性上的优势。采用改进的 DE 算法与二阶锥规划的混合算法对 SNOP 定容的双层模型进行求解,提高了算法的寻优精度和收敛性。采用改进的 33 节点算例,分析和验证了所提出的选址定容策略的有效性。

(1)根据有功潮流灵敏度  $C_p$  对 SNOP 进行选址,可以有效地甄别系统中 SNOP 对线路调节能力强的位置,从而充分发挥 SNOP 灵活调节线路潮流的功能。

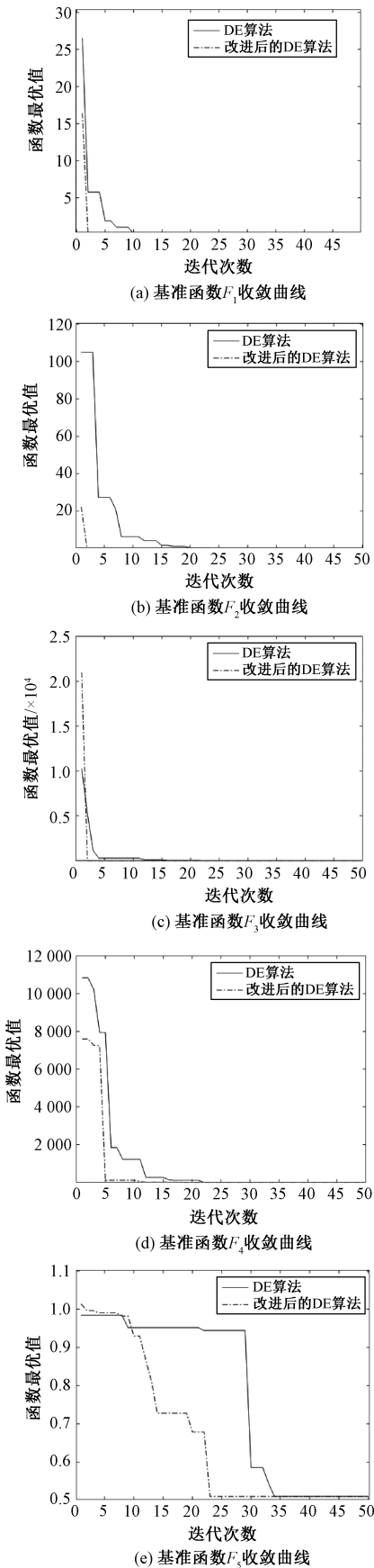
(2)基于双层规划模型的 SNOP 定容策略,有效提高了整个配电系统的经济性,同时考虑未来变流器技术的发展,生产成本将进一步降低,SNOP 的综合效益会得到进一步提升,为 SNOP 装置的广泛应用奠定基础。

附录



附图 1 基准函数  $F_1 \sim F_5$  最优值曲线图

App.Fig.1 The optimal value curve of standard test function  $F_1 \sim F_5$



附图 2 基准函数  $F_1 \sim F_5$  收敛曲线

App.Fig.2 The convergence curve of standard test function  $F_1 \sim F_5$

参考文献 (References):

[ 1 ] 葛乐, 陆文涛, 袁晓冬, 等 (Ge Le, Lu Wentao, Yuan Xiaodong, et al.). 背靠背柔性直流互联的有源配电网合环优化运行 (Back-to-back VSC-HVDC based loop-closed optimal operation for active distribution network) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2017, 41 (6): 135-141.

[ 2 ] 朱永强, 贾利虎, 王银顺 (Zhu Yongqiang, Jia Lihu, Wang Yinshun). 微电网结构设计的基本原则 (Basic principles of microgrid structure design) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (9): 44-49, 63.

[ 3 ] Chen T H, Huang W T, Gu J C, et al. Feasibility study of upgrading primary feeders from radial and open-loop to normally closed-loop arrangement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (3): 1308-1316.

[ 4 ] 叶清华, 唐国庆, 王磊, 等 (Ye Qinghua, Tang Guoqing, Wang Lei, et al.). 配电网合环操作环流分析系统的开发和应用 (Development and application of the analysis system for closed loop operation of distribution network) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26 (22): 66-69.

[ 5 ] 周晓燕, 刘天琪, 沈浩东, 等 (Zhou Xiaoyan, Liu Tianqi, Shen Haodong, et al.). 含多种分布式电源的微电网经济调度研究 (Research on economic dispatching of microgrid with multiple distributed power sources) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2013, 32 (1): 5-8, 18.

[ 6 ] Sayed M A. Line loss minimum control of loop distribution systems using UPFC [A]. Proc. of Power Conversion Conference [C]. Nagoya, Japan, 2007.

[ 7 ] Sayed M A, Takeshita T. All nodes voltage regulation and line loss minimization in loop distribution systems using UPFC [A]. Energy Conversion Congress and Exposition [C]. CA, USA, 2009.

[ 8 ] Yamada K, Takeshita T, Kunii Y, et al. Line loss minimization control in a loop distribution system using circulating current compensation and reactive current suppression by a unified power flow controller [J]. Electrical Engineering in Japan, 2014, 189 (3): 30-40.

[ 9 ] Bloemink J M, Green T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points [A]. Power and Energy Society General Meeting [C]. Minneapolis, USA, 2010.

[ 10 ] Cao Wanyu, Wu Jianzhong, Jenkins Nick, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation [J]. Applied Energy, 2016, 164: 245-257.

[ 11 ] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等 (Wang Chengshan, Song Guanyu, Li Peng, et al.). 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 (Optimal configuration of soft open point for active distribution network considering the characteristics of distributed generation) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (7): 17-25.

[ 12 ] 赵金利, 陈昊, 宋关羽, 等 (Zhao Jinli, Chen Hao, Song Guanyu, et al.). 考虑可靠性收益的配电网智能软开关规划方法 (Planning method of soft open point in distribution network considering reliability benefits) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2020, 44 (10): 22-32.

[ 13 ] Wang C, Song G, Li P, et al. Optimal configuration of soft open point for active distribution network based on mixed-integer second-order cone programming [J]. Energy Procedia, 2016, 103: 70-75.

[ 14 ] 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 (3): 301-309.

[ 15 ] 马丽, 薛飞, 石季英, 等 (Ma Li, Xue Fei, Shi Jiyi, et al.). 有源配电网分布式电源与智能软开关三层协调规划模型 (Tri-level coordinated planning model of distributed generator and intelligent soft open point for active distribution network) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2018, 42 (11): 86-93.

[ 16 ] 晏阳, 廖清芬, 刘涤尘, 等 (Yan Yang, Liao Qingfen, Liu Dichen, et al.). 基于潮流介数的 SNOP 配置及主动配电系统优化 (Power flow betweenness based SNOP allocation and active distribution network optimization) [J]. 南方电网技术 (Southern Power System Technology), 2015, 9 (11): 92-98.

[ 17 ] 薛飞, 马丽, 朱昊, 等 (Xue Fei, Ma Li, Zhu Hao, et al.). 柔性配电网中考虑 SOP 优化的分布式电源双层规划 (Bi-level programming of distributed generation with soft open point regulation optimization in flexible distribution network) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Journal of Power Systems and Automation), 2020, 32 (8): 109-115.

[ 18 ] 邢金, 王婧, 叶辛, 等 (Xing Jin, Wang Jing, Ye Xin, et al.). 考虑电动汽车不确定性的配电网软联络开关优化配置 (SNOP allocation based on consideration of the uncertainty inactive distribution systems) [J]. 电力科学与技术学报 (Journal of Electric Power Science

- and Technology), 2020, 35 (2): 46-54.
- [19] 何英静, 沈舒仪, 何东, 等 (He Yingjing, Shen Shuyi, He Dong, et al.). 兼顾网损优化效益与投资成本的 SNOP 容量规划方法 (A SNOP capacity planning method considering network-loss optimization benefit and investment cost) [J]. 中国电力 (Electric Power), 2020, 53 (4): 32-40.
- [20] 王志强, 方正, 徐艺铭, 等 (Wang Zhiqiang, Fang Zheng, Xu Yiming, et al.). 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 (Optimization configuration method for multi-terminal soft open point considering the load loss risk of important users) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2020, 46 (4): 1142-1151.
- [21] Irisarri G, Levner D, Sasson A M. Automatic contingency selection for on-line security analysis - real-time tests [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98 (5): 1552-1559.
- [22] 陈刚, 黄杨, 丁理杰, 等 (Chen Gang, Huang Yang, Ding Lijie, et al.). 考虑高压配电网转供能力的储能电站双层规划模型 (A two-layer planning model for energy storage power station considering the transfer capacity of high voltage distribution network) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2021, 42 (1): 85-95.
- [23] Zhang Z H, Xu B Y, Chen Q. An overall cost based on optimal power flow control method of dual-source distribution network with closed loop operation using UPFC [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2016, 11 (6): 708-713.
- [24] 仇志华, 徐丙垠, 陈青 (Zhang Zhihua, Xu Bingyin, Chen Qing). 基于统一潮流控制器的配电环网潮流优化控制策略 (Control strategies for UPFC-based optimal power flow of distribution network with normally closed-loop) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2012, 36 (6): 122-126.
- [25] 雷婧婷, 安婷, 杜正春, 等 (Lei Jingting, An Ting, Du Zhengchun, et al.). 含直流配电网的交直流潮流计算 (A unified AC/DC power flow algorithm with DC distribution) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (5): 911-918.
- [26] Daelemans G, Srivastava K, Reza M, et al. Minimization of steady-state losses in meshed networks using VSC HVDC [A]. IEEE Power & Energy Society General Meeting [C]. Calgary, 2009.
- [27] 刘昊, 丁进良, 杨翠娥, 等 (Liu hao, Ding Jinliang, Yang Cuie, et al.). 基于择优学习策略的差分进化算法 (Perferred-learning-based differential evolution algorithm) [J]. 上海交通大学学报 (Journal of Shanghai Jiaotong University), 2017, 51 (6): 704-708.
- [28] 张新明, 涂强, 康强, 等 (Zhang Xinming, Tu Qiang, Kang Qiang, et al.). 灰狼优化与差分进化的混合算法及函数优化 (Hybrid optimization algorithm based on grey wolf optimization and differential evolution for function optimization) [J]. 计算机科学 (Computer Science), 2017, 44 (9): 93-98, 124.
- [29] 张贵军, 王柳静, 周晓根, 等 (Zhang Guijun, Wang Liujing, Zhou Xiaogen, et al.). 基于共轭增强策略的差分进化算法 (Differential evolution algorithm with conjugate enhancement strategy) [J]. 控制与决策 (Control and Decision), 2017, 32 (7): 1313-1318.
- [30] 袁澎, 艾芊, 赵媛媛 (Yuan Peng, Ai Qian, Zhao Yuanyuan). 基于改进的遗传-模拟退火算法和误差度分析原理的 PMU 多目标优化配置 (Research on multi-objective optimal PMU placement based on error analysis theory and improved GASA) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (13): 2178-2187.
- [31] 赵金利, 李雨薇, 李鹏, 等 (Zhao Jinli, Li Yuwei, Li Peng, et al.). 基于二阶锥规划的有源配电网 SNOP 电压无功时序控制方法 (Sequential voltage regulation of soft normally open point in active distribution network based on second-order cone programming) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2016, 42 (7): 2134-2141.
- [32] 全然, 韦化, 简金宝 (Quan Ran, Wei Hua, Jian Jinbao). 求解大规模机组组合问题的二阶锥规划方法 (Solution of large scale unit commitment by second-order con programming) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2010, 30 (25): 101-107.
- [33] Kashem M A, Ganapathy V, Jasmon G B, et al. A novel method for loss minimization in distribution networks [A]. DRPT2000, International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Proceedings (Cat. No. 00EX382) [C]. London, UK, 2000. 251-256.

# SNOP locating and sizing model and optimization algorithm

ZHANG Li<sup>1</sup>, YANG Jie<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-hua<sup>3</sup>, QU Ze-qi<sup>4</sup>

(1.Shengli Oil-Field Electric Power Branch, Dongying 257087, China;2.Weihai Power Supply Company of the State Grid Corporation of China, Weihai 264200, China;3.New Energy College of China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;4.Hangzhou Power Supply Company of the State Grid Corporation of China, Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** Soft Normally Open Points (SNOP) based on modern power electronics technology can realize the inter-connection of feeders in the same area or even different areas, and then improve the reliability of power supply and the capacity of distributed power through closed loop operation. The locating and sizing strategy of SNOP is the key factors that determine its power flow adjustment ability and application economy. This paper proposes a strategy for the locating of SNOP based on active power flow sensitivity. Then, considering the investment and operating costs, a two-stage framework for the sizing of SNOP is presented, where the objective is to minimize the annual expense in the upper stage, and the objective is to minimize the sum of network loss, node voltage deviation, and SNOP internal loss in the lower stage. Then an improved differential evolution algorithm (DE) and a second-order cone programming (SOCP) hybrid algorithm are used to solve this problem. Finally, case studies on improved 33-node system verify the effectiveness of the proposed model for locating and sizing of SNOP and the hybrid optimization algorithm.

**Key words:** soft normally open points; active power flow sensitivity; locating and sizing; differential evolution algorithm