

柔性互联配电系统 SNOP 选址与运行优化策略

陈继明, 于馨玮, 仇志华, 陈文淙, 徐乾

(中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

摘要:智能软开关(soft normally open point, SNOP)凭借其灵活的功率调节能力逐渐应用于配电网中。但由于大量分布式电源(distributed generation, DG)接入, SNOP 受到线路容量的限制, 调节能力有限。为发挥其最大调节能力, 文中提出适用于配电系统的 SNOP 对线路有功功率裕度调节灵敏度的定义, 将其作为 SNOP 调节能力的评价指标, 由此建立 SNOP 的选址优化模型。在此基础上, 引入系统节点电压裕度以及线路功率裕度 2 个安全评价指标, 构建以综合运行裕度最大为目标函数的配电网运行优化模型。将上述模型转化为二阶锥模型, 通过 MATLAB 工具实现该问题的有效求解。最后, 通过改进的 IEEE 33 节点算例对所提模型与求解方法进行验证, 进一步表明了所提选址方法能够发挥 SNOP 的最大调节作用, 优化控制策略可以实现配电网安全经济运行。

关键词:柔性互联配电网; 分布式电源(DG); 灵敏度系数; 智能软开关(SNOP)选址; 运行裕度; 二阶锥规划

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)04-0071-09

0 引言

近年来, 分布式电源(distributed generation, DG)凭借其环境友好性以及运行方式灵活性的特点得到了迅速发展, 目前呈现高比例接入电网的趋势^[1]。随着 DG 的高比例渗透, 电力系统中出现馈线功率波动、不平衡以及电压波动越限等问题^[2-4]。网络重构优化手段受到断路器有限开关次数的制约^[5], 且断路器开断时的冲击电流对电网运行的安全性和可靠性造成了威胁。

智能软开关(soft normally open point, SNOP)的出现为配电网灵活多变的拓扑提供了一定的技术支撑, 改变了配电网传统运行方式^[6-9]。SNOP 能够实时控制其与连接节点之间传输的有功和无功功率, 实现馈线两侧负载均衡^[10], 同时有效提升系统对 DG 的消纳水平^[11]。SNOP 的调节能力与其安装位置有密切关系, 且影响着系统的运行状态, 因此 SNOP 的选址策略十分重要。

目前关于背靠背电压源型变流器(voltage source converter, VSC)SNOP 的控制方式及其在配电网中的优化作用的研究已经较为成熟, 但是其选址和配置方式仍处于起步阶段。文献[12]以配电网损耗和 SNOP 损耗为目标函数确定 SNOP 的最优接入位置和容量, 在此基础上优化各时段 SNOP 的有功和无功出力。文献[13]计及重要用户失负荷风险, 将 SNOP 配置在可靠性需求较高的重要用户区域。以上文献将运行经济性和可靠性作为目

标函数建立 SNOP 选址规划模型, 但未涉及 SNOP 具体的选址方法。文献[14]提出可以量化系统每条线路潮流传输分量的配电潮流系数定义, 能够有效甄别系统的关键线路, 且考虑了潮流波动所带来的影响。文献[15]从 SNOP 对潮流调节灵敏性的角度提出一种基于有功潮流灵敏度的选址方法, 进而建立 SNOP 定容双层规划模型, 上层优化 SNOP 安装容量, 下层优化配电网系统运行。现有文献提出的选址方法并未考虑系统线路传输容量的约束, 以及 SNOP 在安全性角度对系统的调节作用。

目前含 SNOP 的配电网运行优化研究大多以网络损耗^[8,16]、电压偏移量^[14,16]、负载率^[17-18]等为评价指标, 从电能质量与运行经济性方面反映系统运行的优劣。文献[16]考虑了电压水平偏移与网络损耗 2 个指标, 在保证电压质量的同时力求运行的经济性。文献[17]提出一种新的削峰填谷技术, SNOP 配备储能装置以实现多馈线的调峰作用, 并建立以日负荷最小方差为目标的调峰填谷优化模型。以上文献均在现有评价指标上基础进行优化, 而在目前配电网的发展趋势下, 需要考虑实际需求, 提高系统应对不确定性扰动的灵活性^[19], 同时量化整个系统的运行状态到安全边界的距离, 制定合适的 SNOP 选址方法与系统运行优化策略。

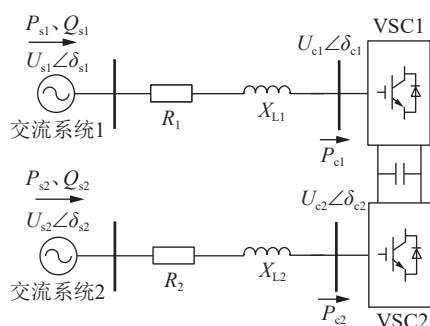
大量 DG 接入的情况下, SNOP 受线路传输容量限制, 在重荷条件下的调节能力有限。为发挥出 SNOP 的最大调节能力, 文中提出一种基于 SNOP 对线路有功功率裕度调节灵敏度的选址方法, 并且考虑了 DG 和负荷波动性的影响, 实现了多个 SNOP 选址。在此基础上引入线路功率裕度和电压裕度

2个评价指标,建立以综合运行裕度最大为目标函数的配电网运行优化模型。采用凸松弛技术将模型转换为二阶锥模型,以改进的 IEEE 33 节点系统为算例,通过 MATLAB 验证了所提模型和方法的有效性。对比分析 SNOP 接入电网前后的优化结果,选择合适的位置安装 SNOP,合理配置系统的综合运行裕度,从而可以有效规避由潮流波动引起的故障风险。

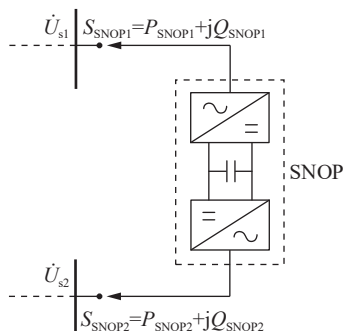
1 SNOP 的等效模型及控制

SNOP 代替传统的联络开关,不仅可以调节 2 条线路之间有功功率的传输,还可以为交流电网无功功率提供一定的支撑,实时控制整个系统中的潮流分布,实现配电网“柔性”运行^[20]。

在进行潮流计算时,背靠背柔性直流变换器能够单独控制有功和无功功率,因此只须关注两侧变流器对电网的注入功率。参考多端 VSC 连接构成的新型高压直流输电网络的稳态物理模型^[21],形成如图 1 所示的 SNOP 稳态模型。交流系统 1、2 的电压相量分别为 $\dot{U}_{s1}=U_{s1}\angle\delta_{s1}$ 、 $\dot{U}_{s2}=U_{s2}\angle\delta_{s2}$; 阀组的输入电压相量分别为 $\dot{U}_{c1}=U_{c1}\angle\delta_{c1}$ 、 $\dot{U}_{c2}=U_{c2}\angle\delta_{c2}$; X_{L1} 、 X_{L2} 为换流电抗; R_1 、 R_2 为换流器内部损耗等效电阻; P_{s1} 、 P_{s2} 分别为 VSC1、VSC2 的注入有功功率; Q_{s1} 、 Q_{s2} 分别为 VSC1、VSC2 的注入无功功率; P_{c1} 、 P_{c2} 为流入阀组的有功功率。



(a) 背靠背VSC稳态物理模型



(b) SNOP注入功率模型

图 1 SNOP 在配电网中的等值模型

Fig.1 Equivalent model of SNOP in distribution networks

一个变流器能同时实现 2 个状态量的控制,并且能在故障状态下切换控制模式^[22]。在配电网正常运行状态下,SNOP 的一侧变流器控制模式选择 PQ 控制,另一侧选择 VQ 控制。 S_{SNOP1} 、 S_{SNOP2} 为 SNOP 向馈线两侧输入的功率; P_{SNOP1} 、 Q_{SNOP1} 分别为 VSC1 与电网之间传输的有功、无功功率,该输出功率与另一侧 VSC2 输出功率 P_{SNOP2} 、 Q_{SNOP2} 的约束^[23]满足式(1)和式(2)。

$$P_{SNOP1}(t) + P_{SNOP2}(t) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sqrt{P_{SNOP1}^2(t) + Q_{SNOP1}^2(t)} \leq S_{s1max} \\ \sqrt{P_{SNOP2}^2(t) + Q_{SNOP2}^2(t)} \leq S_{s2max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_{s1max} 、 S_{s2max} 分别为 VSC1、VSC2 接入的最大容量。

2 含 SNOP 的配电网优化模型

2.1 基于灵敏度系数的 SNOP 选址原则

为量化分析线路与安全运行边界的距离,定义线路有功功率裕度为线路的最小可调节功率,具体表达如下:

$$l_{LAPM} = \min \sum_{l=1}^N (\tilde{P}_l - P_l(t)) = \sum_{l=1}^N (\tilde{P}_l - P_l(t_1)) \quad (3)$$

式中: l_{LAPM} 为某条线路能够进行调节的最大有功功率裕度,裕度大小表征线路的灵活状态,反映了线路的负载状况; $\tilde{P}_l$ 为线路 l 所能承载的极限有功功率; $P_l(t)$ 为 t 时刻线路 l 流过的有功功率; N 为总支路数; t_1 为 l_{LAPM} 取得最小值的时刻。

根据第 1 章对 SNOP 的运行特性分析可知,SNOP 通过控制馈线两端之间的交换功率改变两侧馈线出力,配电系统环网的潮流分布发生变化, l_{LAPM} 也会随之改变。在 DG 高度渗透的配电网中,由于线路传输容量的限制,在重负荷条件下的 l_{LAPM} 会相应减小,SNOP 作为柔性可调节设备,能够调节系统功率的分配,提高线路功率裕度。为充分发挥 SNOP 的调节作用,防止线路过载,以 l_{LAPM} 对 SNOP 与网络有功功率交换量的偏导数为 SNOP 选址依据,定义 l_p 为 SNOP 对线路有功功率裕度调节的灵敏度系数,如式(4)所示。 l_p 值越大,表明 SNOP 对调节线路功率裕度的能力越强,可根据此原理对 SNOP 进行选址。

$$l_p = \left| \frac{\partial l_{LAPM}}{\partial P_{SNOP}} \right|_{\Delta P_{SNOP}=0} \quad (4)$$

式中: P_{SNOP} 为 SNOP 一侧变流器流入配电网的有功功率; ΔP_{SNOP} 为 P_{SNOP} 的变化量。

将式(3)代入式(4)可得:

$$\frac{\partial l_{\text{LAPM}}}{\partial P_{\text{SNOP}}} = \sum_{l=1}^N \frac{\partial (\tilde{P}_l - P_l(t_1))}{\partial P_{\text{SNOP}}} \quad (5)$$

结合图2所示含SNOP的有源配电环网潮流模型进行分析,假设SNOP接在系统节点*i*和节点*i+1*之间,开关左侧各支路的实际有功功率 $P_l(t)$ 如式(6)所示。图2中, x_{i-1} 为节点*i*与节点*i-1*之间的支路电抗。

$$P_l(t) = \begin{cases} P_{L,i}(t) - P_{\text{SNOP}1} + \frac{r_{i-1}}{|U_i(t)|^2} [(P_{L,i}(t) + P_{\text{SNOP}1})^2 + (Q_{L,i}(t) + Q_{\text{SNOP}1})^2] & l = i-1 \\ P_{L,i-1}(t) + P_{i-1}(t) + \frac{r_{i-2}}{|U_{i-1}(t)|^2} [(P_{L,i-1}(t) + P_{i-1}(t))^2 + (Q_{L,i-1}(t) + Q_{i-1}(t))^2] & l = 1, 2, \dots, i-2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $U_i(t)$ 为*t*时刻节点*i*的电压; r_{i-1} 为节点*i*与节点*i-1*之间的支路电阻; $P_{L,i}(t)$ 、 $Q_{L,i}(t)$ 分别为*t*时刻节点*i*的负荷有功、无功功率; $P_{i-1}(t)$ 、 $Q_{i-1}(t)$ 分别为*t*时刻向节点*i-1*注入的有功、无功功率。

同时,考虑一天中负荷、DG的波动对SNOP调节作用的影响,某一时间断面的灵敏度系数对其调节能力的反映较为片面,因此在制定配电系统SNOP的选址策略时,应综合考虑在整个优化时间内各个时间点的瞬时灵敏度系数。定义综合灵敏度系数 L_p 为:

$$L_p = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T l_p(t) \quad (7)$$

式中: T 为优化总时间。

将式(5)代入式(7)中,在2个时间点之间可认为 l_{LAPM} 与 P_{SNOP} 是线性的,将式(7)的灵敏度系数线性化可得:

$$L_p = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^N \frac{\partial (\tilde{P}_l - P_l(t_1))}{\partial P_{\text{SNOP}}} \approx \frac{1}{T} \sum_{l=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{\Delta P_l(t)}{\Delta P_{\text{SNOP}}} \quad (8)$$

式中: $\Delta P_l(t)$ 为 $P_l(t)$ 的变化量。

结合式(5)—式(8)可求得在多时间尺度下SNOP对 l_{LAPM} 的综合灵敏度系数 L_p , L_p 的大小量化了SNOP对线路有功功率裕度调节能力的强弱,其值越大,表明SNOP的调节能力越强,因此,选择使

得 L_p 值最大时的安装位置。

2.2 含SNOP的配电网模型搭建

2.2.1 目标函数

确定SNOP的安装位置后,需要根据系统自身需求来确定目标函数,常见的优化目标有考虑经济性的网络损耗^[24]、考虑供电可靠性的电压偏移量^[16]以及多种目标函数的综合效益^[25]等。DG的高渗透率以及有限的线路容量进一步加重了系统运行压力,为此,文中在有功功率裕度的基础上引入综合运行裕度^[26]作为优化目标,在保证线路不过载的情况下最大程度地发挥SNOP的调节作用。

(1) 线路功率裕度。与有功功率裕度相似,线路功率裕度 l_{LPM} 表示系统所有线路能够进行调节的容量裕度,其定义为某一时间段流经系统所有线路的功率与线路最大容量之间的最小差值。

$$l_{\text{LPM}} = \min \sum_{l=1}^N (\tilde{S}_l - S_l(t)) \quad (9)$$

式中: $\tilde{S}_l$ 为线路*l*的最大容量; $S_l(t)$ 为*t*时刻流经线路*l*的功率。

(2) 节点电压裕度。节点电压裕度 b_{NVM} 反映某个节点的电压运行状态,其定义为某一时间段内系统所有节点的电压距离上、下限边界的最小值。

$$b_{\text{NVM}} = \min \sum_{i=1}^M \min \{U_i(t) - \underline{U}, \tilde{U} - U_i(t)\} \quad (10)$$

式中: $\tilde{U}$ 为节点电压上限边界; $\underline{U}$ 为节点电压下限边界; M 为网络节点总数。

以上2个指标综合反映了系统到安全运行边界的距离,对2个指标进行归一化处理,可得:

$$\begin{cases} l'_{\text{LPM}} = \min \sum_{l=1}^N (1 - S_l(t)/S_{l,\max}) \\ b'_{\text{NVM}} = \min \sum_{i=1}^M \min \left\{ (U_i(t) - \underline{U})/U_{\text{base}}, (\tilde{U} - U_i(t))/U_{\text{base}} \right\} \end{cases} \quad (11)$$

式中: l'_{LPM} 、 b'_{NVM} 分别为归一化后的线路功率裕度和节点电压裕度指标; $S_{l,\max}$ 为配电网线路*l*容量最大值; U_{base} 为网络节点电压基准值。

综合考虑以上2个指标,可得综合运行裕度 f_{com} 目标函数表达式如式(12)所示。

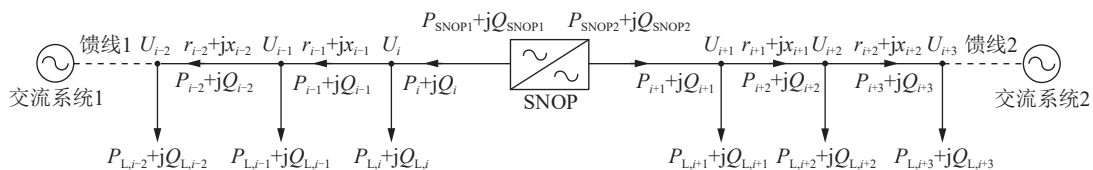


图2 含SNOP的有源配电环网潮流模型

Fig.2 Power flow model of active distribution ring network with SNOP

$$f_{\text{com}} = \max(\alpha l'_{\text{LPM}} + \beta b'_{\text{NVM}}) \quad (12)$$

式中: α 、 β 分别为线路功率裕度和节点电压裕度的权重系数。应用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)^[27]确定 α 、 β 的取值, 根据文献[27]中重要性标度含义表构造判断矩阵, 对每一列进行归一化操作, 可得一致性判断矩阵权重系数 $\alpha=0.86$, $\beta=0.14$, 且由于只有 2 个指标, 不需要验证一致性。

2.2.2 约束条件

约束条件主要包含配电网自身的约束条件以及 SNOP 运行约束条件。SNOP 运行约束条件见式(1)和式(2)。

(1) 配电网自身需要满足的等式约束条件^[28]如下:

$$\begin{cases} \sum_{j \in \varphi} P_{ij}(t) = P_i(t) - \sum_{j \in \varphi} R_{ij} I_{ij}^2(t) \\ \sum_{j \in \varphi} Q_{ij}(t) = Q_i(t) - \sum_{j \in \varphi} X_{ij} I_{ij}^2(t) \end{cases} \quad (13)$$

$$I_{ij}^2(t) U_i^2(t) = P_{ij}^2(t) + Q_{ij}^2(t) \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_i(t) = P_{\text{DG},i}(t) + P_{\text{SNOP},i}(t) - P_{\text{LD},i}(t) \\ Q_i(t) = Q_{\text{DG},i}(t) + Q_{\text{SNOP},i}(t) - Q_{\text{LD},i}(t) \end{cases} \quad (15)$$

$$U_i^2(t) = U_i^2(t) - 2(P_{ij}(t)R_{ij} + Q_{ij}(t)X_{ij}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)I_{ij}^2(t) \quad (16)$$

式中: φ 为所有与节点 i 相连的节点集合; $P_{ij}(t)$ 、 $Q_{ij}(t)$ 分别为 t 时刻由节点 i 流向节点 j 的有功、无功功率; $I_{ij}(t)$ 为 t 时刻节点 i 流向节点 j 的支路电流; R_{ij} 、 X_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的支路电阻、电抗; $U_j(t)$ 为 t 时刻节点 j 的电压; $P_{\text{DG},i}(t)$ 、 $Q_{\text{DG},i}(t)$ 分别为 t 时刻节点 i 连接的 DG 发出的有功、无功功率; $P_{\text{SNOP},i}(t)$ 、 $Q_{\text{SNOP},i}(t)$ 分别为 t 时刻节点 i 连接的 SNOP 注入电网的有功、无功功率; $P_{\text{LD},i}(t)$ 、 $Q_{\text{LD},i}(t)$ 分别为 t 时刻节点 i 的有功、无功负荷。

(2) 不等式约束如下:

$$\underline{U} \leq U_i(t) \leq \bar{U} \quad (17)$$

$$0 \leq I_{ij}^2(t) \leq I_{ij\text{max}}^2 \quad (18)$$

式中: $I_{ij\text{max}}$ 为节点 i 流向节点 j 的支路电流幅值上限。

3 二阶锥模型转化

目前二阶锥规划在电力系统中的应用已经十分广泛, 包括潮流计算^[28]、无功优化^[16]、电压控制^[29]、网络重构^[30]等方面, 且相比内点法, 其在求解效率以及精确度方面有更好的优势。锥优化方法对于需要求解的优化问题模型有严格要求, 因此应对模型进行相应的转化。

前述模型中的目标函数在实际计算时为线性

函数, 无须进行转化。针对约束条件中的二次项 $I_{ij}^2(t)$ 、 $U_i^2(t)$ 等, 采用变量替换的方法, 用 $I_{ij,2}(t)$ 、 $U_{i,2}(t)$ 、 $U_{j,2}(t)$ 替换 $I_{ij}^2(t)$ 、 $U_i^2(t)$ 、 $U_j^2(t)$ 进行线性化处理^[16], 可得:

$$\begin{cases} \sum_{j \in \varphi} P_{ij}(t) = P_i(t) - \sum_{j \in \varphi} R_{ij} I_{ij,2}(t) \\ \sum_{j \in \varphi} Q_{ij}(t) = Q_i(t) - \sum_{j \in \varphi} X_{ij} I_{ij,2}(t) \end{cases} \quad (19)$$

$$U_{j,2}(t) = U_{i,2}(t) - 2(P_{ij}(t)R_{ij} + Q_{ij}(t)X_{ij}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)I_{ij,2}(t) \quad (20)$$

$$I_{ij,2}(t)U_{i,2}(t) = P_{ij}^2(t) + Q_{ij}^2(t) \quad (21)$$

$$0 \leq I_{ij,2}(t) \leq I_{ij\text{max}}^2 \quad (22)$$

对式(21)做进一步松弛, 转化为标准的二阶锥形式, 如式(23)所示。

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij}(t) \\ 2Q_{ij}(t) \\ I_{ij,2}(t) - U_{i,2}(t) \end{matrix} \right\|_2 \leq I_{ij,2}(t) + U_{i,2}(t) \quad (23)$$

将 SNOP 约束式(2)转化为旋转锥约束, 如式(24)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{SNOP1}}^2(t) + Q_{\text{SNOP1}}^2(t) \leq S_{s1\text{max}}^2 \\ P_{\text{SNOP2}}^2(t) + Q_{\text{SNOP2}}^2(t) \leq S_{s2\text{max}}^2 \end{cases} \quad (24)$$

经过以上处理, 所提优化模型已经符合锥优化方法的要求, 可直接调用 MATLAB 中的 CPLEX 求解器进行求解。

4 算例分析

为充分考虑 DG 的影响, 文中对 IEEE 33 节点系统^[31]进行改进, 在系统中接入 4 台风电机组(WT)和 3 台光伏机组(PV), 如图 3 所示。

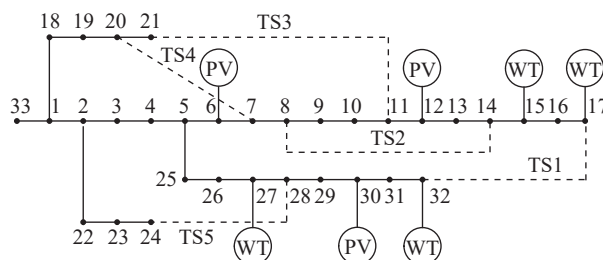


图 3 改进的 IEEE 33 节点模型

Fig.3 The improved IEEE 33-node system model

IEEE 33 节点系统包含 37 条支路和 33 个节点, 其电压等级为 12.66 kV, 基准功率为 1 MV·A。4 台风电机组与 3 台光伏机组的容量均为 500 kW·A, 功率因数为 0.9, SNOP 的接入容量为 1 MV·A, 限制有载调压变压器日调节次数为 5, 电压幅值优化区间限制在 0.95~1.05 p.u. 之间, 目标函数中线路功率裕度的权重系数 α 和节点电压裕度的权重系数 β 分别取 0.86 和 0.14。

4.1 SNOP 选址结果

一般 SNOP 的安装位置选择在联络开关处,即图 3 中 TS1、TS2、TS3、TS4、TS5 处。将联络开关单独闭合,分别计算安装在各处时 SNOP 与电网之间传输的有功功率 P_{SNOP} 。将 P_{SNOP} 代入式(4),同时根据式(6)计算线路传输有功功率 $P_l(t)$,进而求得 SNOP 对线路有功功率裕度的灵敏度系数 l_p 。设 $T=24\text{ h}$,假设在每个小时的时间段内,负荷、DG 功率保持不变,间隔 1 h 取一个点计算瞬时灵敏度系数 $l_p(t)$,根据式(7)计算得出综合灵敏度系数 L_p 。假设每条线路最大容量为 $50\text{ MV}\cdot\text{A}$,SNOP 各个位置的灵敏度系数计算结果如表 1 所示。

表 1 SNOP 各个位置的灵敏度系数
Table 1 Sensitivity parameters of SNOP at different switches

SNOP位置	L_p	SNOP位置	L_p
TS1	1.625	TS4	0.736
TS2	1.810	TS5	0.367
TS3	0.568		

根据 2.1 节中的选址原则, L_p 值越大, SNOP 在该位置的调节能力越强。从表 1 中可以看出,当 SNOP 处于 TS2 时 L_p 最大,因此选择该位置作为第一个 SNOP 的安装位置。固定 SNOP1 的位置,将 SNOP1 的灵敏度系数下限值 L_{plow} 设置为表 1 中 L_p 的平均值 1.021。将第二个 SNOP 分别安装在 TS1、TS3、TS4 以及 TS5 处,其灵敏度系数计算结果如表 2 所示。表 2 中, L_{p1} 为在各个位置分别接入第二个 SNOP 时 SNOP1 的调节灵敏度系数。

表 2 SNOP 在 4 个开关位置的灵敏度系数
Table 2 Sensitivity parameters of SNOP at four switches

SNOP位置	L_p	L_{p1}
TS1	1.734	1.307
TS3	0.617	0.827
TS4	0.481	0.654
TS5	0.166	0.272

从表 2 中可见,当 SNOP2 安装在 TS1 处时,所对应的 SNOP1 和 SNOP2 的综合灵敏度系数值均最大,且此时 SNOP1 的综合灵敏度系数 $L_{p1}>L_{\text{plow}}$ 。依据文中所提方法,选择 TS2 为 SNOP1 的安装位置,TS1 为 SNOP2 的安装位置,若需要增加第三个 SNOP,可用该方法依次类推。

为验证文中所提方法的有效性,在某一时间断面对系统进行静态优化,同时设置 SNOP 与电网之间传输的有功功率恒为 0.1 MW,无功功率恒为 0.1 Mvar。分别计算 SNOP 在 5 个位置下系统的优

化结果,如表 3 所示。从表 3 中可以看出,在每个接入位置 SNOP 以相同的功率注入电网时,处于 TS2 时的线路功率裕度和目标函数的优化结果均最大,表明此场景下的系统运行状态最为灵活,SNOP 的调节效果最佳,与前文 SNOP 选址方法的结果一致,证明了文中所提基于灵敏度系数的 SNOP 选址方法的有效性。

表 3 静态优化结果
Table 3 Static optimization results

SNOP位置	$l_{\text{LPM}}/\text{p.u.}$	$f_{\text{com}}/\text{p.u.}$
TS1	30.428	5.488
TS2	30.429	5.521
TS3	30.421	5.517
TS4	30.253	5.514
TS5	30.263	5.498

4.2 SNOP 实时优化结果

根据前文基于灵敏度系数的选址原则,确定 SNOP 的安装位置为 TS2 和 TS1,即分别在节点 8 和节点 14 之间、节点 17 和节点 32 之间接入一组 SNOP。考虑时序的影响,通过预测方法获得风电、光伏以及负荷运行曲线。取 1 h 为一个点,以系统综合运行裕度 f_{com} 为目标进行优化,分别采用内点法和文中方法进行求解,求解结果如表 4 所示。系统 DG 出力以及负荷功率变化如图 4 所示,SNOP 有功、无功实时出力如图 5 所示。

表 4 非线性模型与二阶锥模型优化结果对比
Table 4 Comparison of results between nonlinear programming model and second-order conic programming model

方法	$b_{\text{NVM}}/\text{p.u.}$	$l_{\text{LPM}}/\text{p.u.}$	$f_{\text{com}}/\text{p.u.}$	求解时间/s
内点法	1.083	28.773	4.960	320.6
文中方法	1.143	30.273	5.220	50.5

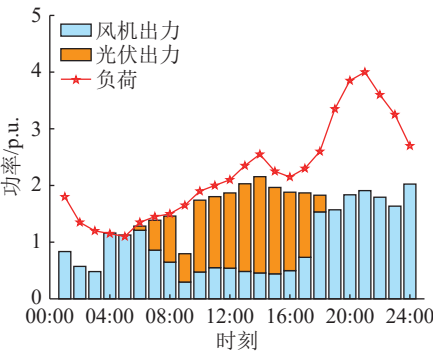


图 4 负荷与 DG 日运行曲线

Fig.4 Daily operation curves of the DG and load

从表 4 中可以看出,2 种方法得到的结果基本一致,证明了文中二阶锥优化方法的有效性。此

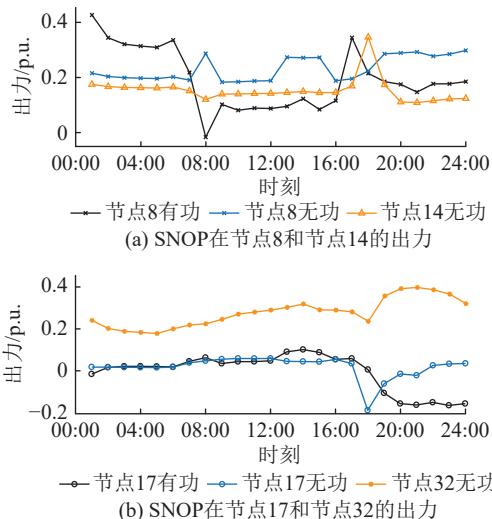


图5 SNOP有功、无功出力曲线

Fig.5 Active and reactive power curves of SNOP

外,相较于内点法,文中方法的求解时间大大减少,说明文中方法有更高的求解效率,且优化效果也更优。由图4和图5可知,在19:00—24:00,用电负荷较大、光伏出力较小,SNOP向系统提供无功补偿量以维持电压水平,降低网损;在00:00—07:00,负荷较小,SNOP主要提供有功功率以改善系统运行状态。算例中,负荷在一天内的波动以及DG的接入使得该系统电压产生较大波动,如图6所示。图7为图6的剖面图,能更加直观地展示电压的变化。由图7可知,由于SNOP的接入,系统电压波动性得到了一定程度的抑制。

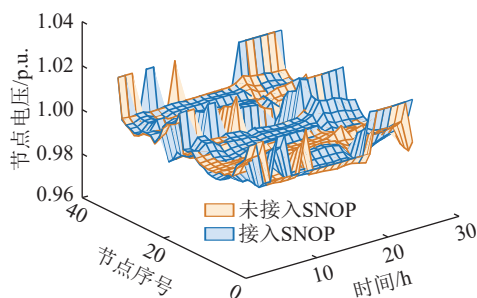


图6 SNOP优化前、后节点电压变化

Fig.6 Node voltage variation before and after SNOP optimization

4.3 运行指标对比

DG的高渗透率加剧了系统功率不平衡的状况,调节能力下降,使得系统节点电压裕度 b_{NVM} 、线路功率裕度 l_{LPM} 普遍较低,如图8和图9所示。对于整个系统而言,节点电压裕度与线路功率裕度指标体现了在各个时刻系统最恶劣的运行状态。在19:00—21:00,由于负荷需求较高,系统运行裕度偏低,此时系统运行状态较为脆弱,易出现过压、过载等情况,因此可以在相应的薄弱节点、线路处安装

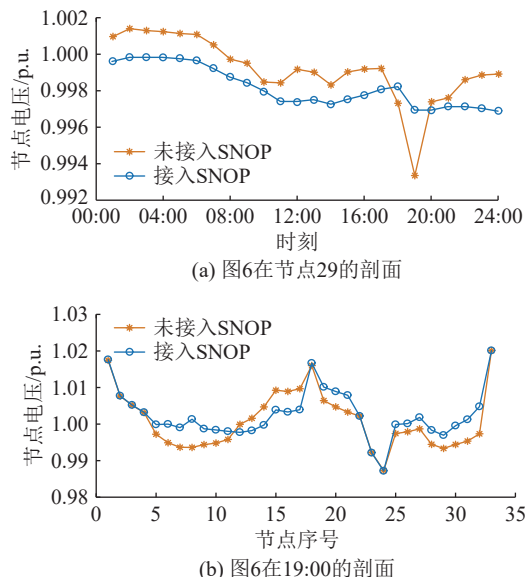


图7 图6在节点29和19:00的剖面

Fig.7 Section views of figure 6 at node 29 and at 19:00

可控设备以及备用线路等,保障系统运行的可靠性。

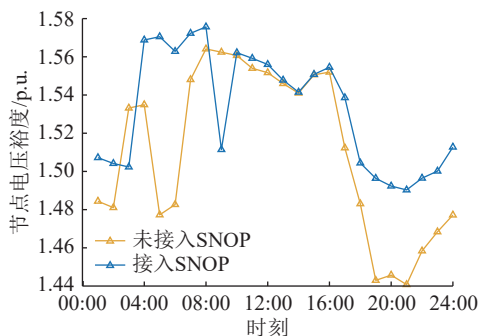


图8 SNOP优化前、后 b_{NVM} 对比

Fig.8 Comparison of b_{NVM} before and after SNOP optimization

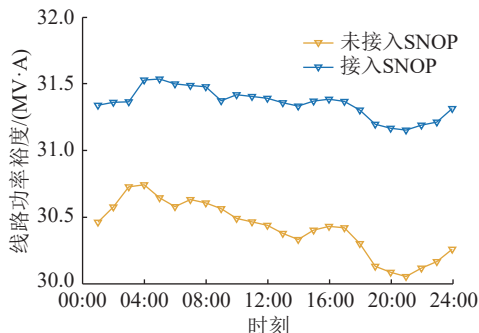


图9 SNOP优化前、后 l_{LPM} 对比

Fig.9 Comparison of l_{LPM} before and after SNOP optimization

通过对比SNOP接入前、后的节点电压裕度与线路功率裕度变化可以看出,随着SNOP的接入,系统的调节能力得到了有效提升,其运行裕度也有所增加。从图8中可以看出,接入SNOP后,除09:00以及03:00之外,其他时刻的节点电压裕度都

有所提升,其原因为优化目标只针对一天之中最低的裕度指标,裕度指标较低时刻对应的电压裕度都得到了提升。总体来看,系统在一天之中得到了优化。

当系统未接入 SNOP 时,电压裕度和功率裕度最低值均出现于 21:00,其中节点 24 与 1 号线路运行状况最为恶劣,其详细数据如表 5 所示。在接入相同容量的 DG 的情况下,接入 SNOP 柔性装置后,对应节点的电压裕度以及对应线路处的功率裕度、综合运行裕度都有相应提升。这说明 SNOP 的接入不仅改善了系统的运行状态,还从侧面提高了配电网对 DG 的消纳能力。

表 5 系统在 21:00 的裕度指标
Table 5 Margin indexes of the system at 21:00

SNOP 状态	节点 24 的 电压裕度/p.u.	1 号线路的 功率裕度/p.u.	$f_{\text{com}}/\text{p.u.}$
未接入 SNOP	0.032 4	0.721 9	5.447
接入 SNOP	0.032 5	0.880 7	5.643

为进一步验证文中所提系统优化评价指标的适用性与有效性,增加 SNOP 优化前、后其他运行评价指标的变化。常用运行指标有网络损耗、节点电压偏差等,构建 2 种典型运行场景,分析在 SNOP 优化前、后网损与节点电压偏差情况。表 6 展示了系统在 2 种运行场景下以综合运行裕度为目标函数进行优化的节点电压偏差与网络损耗变化情况。可以看出,接入 SNOP 后,系统综合运行裕度增加,节点电压偏差与网络损耗随之减小,说明系统的运行状态得到了优化,证明了文中所提优化控制策略可以兼顾系统运行安全性和经济性。

表 6 SNOP 对系统运行状态的改善
Table 6 Improvement of system operation
status by SNOP

场景	SNOP 状态	$f_{\text{com}}/\text{p.u.}$	节点电压 偏差/p.u.	系统网络 损耗/p.u.
I	未接入 SNOP	4.300	3.288 2	25.656 2
II	接入 SNOP	5.220	2.748 6	18.373 9

5 结论

文中针对目前 SNOP 的选址方法,提出了一种关于有功功率裕度综合灵敏度系数的 SNOP 选址方法,在此基础上引入节点电压裕度和线路功率裕度 2 个指标,建立了以综合运行裕度为目标函数的 SNOP 配电网优化模型,并采用锥优化的算法对其进行求解。采用改进的 IEEE 33 节点算例对所提方法的有效性进行了验证,得到以下结论:

(1) 根据 SNOP 对有功功率裕度的综合灵敏度

系数 L_p 对 SNOP 进行选址,能够有效甄别 SNOP 最能改善系统灵活运行状态的安装位置,最大化地增加系统运行裕度。

(2) 以系统综合运行裕度为目标函数的优化模型能够有效量化系统到运行安全边界的距离,筛选出系统最薄弱的环节,并且接入 SNOP 能够有效提升系统运行裕度,提高配电网对 DG 的消纳能力,改善系统运行状态。

由于目前 SNOP 的投资和运行成本较高,同时考虑系统运行经济性和安全性的 SNOP 定容规划问题仍须进一步进行研究。此外,如何定量分析 DG 出力不确定性对 SNOP 调节灵敏度的影响,也值得进一步研究。

参考文献:

[1] 谭显东,刘俊,徐志成,等. “双碳”目标下“十四五”电力供需形势[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 1-6.
TAN Xiandong, LIU Jun, XU Zhicheng, et al. Power supply and demand balance during the 14th Five-Year Plan period under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 1-6.

[2] 杨鹏,刘锋,姜齐荣,等. “双高”电力系统大扰动稳定性: 问题、挑战与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 403-414.
YANG Peng, LIU Feng, JIANG Qirong, et al. Large-disturbance stability of power systems with high penetration of renewables and inverters phenomena, challenges and perspectives[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(5): 403-414.

[3] 陈倩,王维庆,王海云. 基于含分布式电源的配电网优化运行研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 19-28.
CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Research on optimal operation of distribution network with distributed generation integration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 19-28.

[4] 季玉琦,王涛,史少彧,等. 含分布式电源的配电网功率优化模式影响因素分析[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(1): 97-107.
JI Yuqi, WANG Tao, SHI Shaoyu, et al. Analysis of influencing factors of power optimization modes in distribution network containing distributed generations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 97-107.

[5] 高闰国,匡洪海,周宇健,等. 直流配电网电压控制策略研究综述[J]. 供用电, 2020, 37(8): 54-59, 75.
GAO Runguo, KUANG Honghai, ZHOU Yujian, et al. An overview of research on voltage control strategies of DC distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(8): 54-59, 75.

[6] 夏周武,马文祚,杨德昌. 考虑三端智能软开关与孤岛划分结合的主动配电网故障恢复研究[J]. 电力科学与技术学报,

- 2024, 39(2): 124-133.
- XIA Zhouwu, MA Wenzuo, YANG Dechang. Fault recovery strategy of active distribution network considering the coordination between islanding partition and three-terminal intelligent soft open point[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 124-133.
- [7] 霍群海, 李梦菲, 栗梦涵, 等. 柔性多状态开关应用场景分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 13-21.
- HUO Qunhai, LI Mengfei, SU Menghan, et al. Analysis on application scenarios of flexible multi-state switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 13-21.
- [8] 任辰, 刘浪, 周健, 等. 基于柔性软开关的主动配电网两阶段鲁棒优化运行[J]. 现代电力, 2021, 38(6): 610-619.
- REN Chen, LIU Lang, ZHOU Jian, et al. Two-stage robust optimization operation for active distribution network based on soft open point[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(6): 610-619.
- [9] 赵晶晶, 李梓博, 刘帅, 等. 考虑智能软开关电压支撑的城市配电网弹性提升方法[J]. 电力建设, 2023, 44(7): 77-86.
- ZHAO Jingjing, LI Zibo, LIU Shuai, et al. Resilience lifting method of urban distribution network considering soft open point voltage support[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(7): 77-86.
- [10] CAO W Y, WU J Z, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 164: 245-257.
- [11] 王瀚樟, 赵倩宇, 王守相, 等. 考虑分时电价和 SOP 协同的交直流配电网光伏消纳能力提升[J]. 供用电, 2023, 40(7): 1-9.
- WANG Hanzhang, ZHAO Qianyu, WANG Shouxiang, et al. Improvement method of photovoltaic consumption capacity of AC/DC hybrid distribution network considering the time-of-use electricity price and SOP collaboration[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(7): 1-9.
- [12] 邢金, 王婧, 叶辛, 等. 考虑电动汽车不确定性的配电网软联络开关优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 46-54.
- XING Jin, WANG Jing, YE Xin, et al. SNOP allocation based on consideration of the uncertainty in active distribution systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 46-54.
- [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] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] TAN Z K, XU Y T, YUAN X F, et al. Research on the peak load shifting technology of flexible interconnected distribution network based on SNOP[C]//8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019). Shanghai, China. London: IET, 2019: 1-6.
- [18] 熊正勇, 苗虹, 曾成碧. 基于智能软开关与储能系统联合的有源配电网运行优化[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 33-39.
- XIONG Zhengyong, MIAO Hong, ZENG Chengbi. Operation optimization of active distribution network based on smart soft open point and energy storage system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 33-39.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 徐永海, 何志轩, 董旭, 等. 基于 DG 和多端 VSC 协调控制的交直流配电网优化运行[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 116-123.
- XU Yonghai, HE Zhixuan, DONG Xu, et al. Optimal operation of AC/DC distribution network based on DG and multi-terminal VSC coordinated control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 116-123.
- [22] 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研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4749-4759.
- 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 intercon-

- tion switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4749-4759.
- [23] 张今, 耿光超, 江全元, 等. 含柔性多状态开关的配电网多目标随机运行优化方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3140-3148.
- ZHANG Jin, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Multi-objective stochastic operation optimization for distribution network with flexible multi-state switches[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3140-3148.
- [24] LONG C, WU J Z, THOMAS L, et al. Optimal operation of soft open points in medium voltage electrical distribution networks with distributed generation[J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 427-437.
- [25] QI Q, WU J Z, LONG C. Multi-objective operation optimization of an electrical distribution network with soft open point[J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 734-744.
- [26] 李婷. 含分布式电源的柔性配电网优化运行[D]. 保定: 华北电力大学, 2021.
- LI Ting. Optimal operation of flexible distribution network with distributed generation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021.
- [27] 董如良, 杨强, 颜文俊. 多智能体协同寻优的主动配网动态拓扑重构[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(10): 1982-1989.
- DONG Ruliang, YANG Qiang, YAN Wenjun. MAS-based cooperative optimization of reconfiguration in active power distribution networks[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(10): 1982-1989.
- [28] 高红均, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1634-1645.
- GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1645.
- [29] XU M, ZHANG R F, DAI M D, et al. New energy reactive power optimization based on second-order cone programming [C]//2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Nanjing, China. IEEE, 2021: 102-106.
- [30] 张俊潇, 高崇, 李京平, 等. 考虑低碳和柔性负荷的有源配电网混合整数二阶锥规划[J]. 电力建设, 2022, 43(12): 66-73.
- ZHANG Junxiao, GAO Chong, LI Jingping, et al. Mixed-integer second-order cone programming for active distribution networks considering low-carbon and flexible loads[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(12): 66-73.
- [31] 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(2): 1401-1407.

作者简介:



陈继明

陈继明(1970), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail: jiming.chen@126.com);

于馨玮(2000), 女, 硕士在读, 研究方向为柔性互联配电网运行优化;

仇志华(1977), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能配电网保护与控制。

SNOP allocation and operation optimization strategy for flexible interconnected distribution systems

CHEN Jiming, YU Xinwei, ZHANG Zhihua, CHEN Wencong, XU Qian

(College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: The soft normally open point (SNOP) is gradually applied in distribution networks due to its flexible power regulation ability. However, owing to the access of a large number of distributed generations (DG), the regulation ability of SNOP is limited by line capacity constraints. A definition of the sensitivity of SNOP to the line active power margin regulation for distribution systems is proposed in this paper as an evaluation indicator for SNOP's regulation ability, and the allocation optimization model for SNOP is established accordingly. On this basis, two evaluation indicators, namely node voltage margin and line power margin, are introduced to construct a distribution network operation optimization model with the objective of maximizing comprehensive operation margin. The model is converted to a second-order cone programming model, which is efficiently solved using MATLAB. Finally, the proposed model and solution method are validated on modified IEEE 33-node system, further indicating that the proposed method can maximize the regulating ability of SNOP, and the optimized control strategy can achieve operational safety and economy of the distribution network.

Keywords: flexible interconnected distribution network; distributed generation (DG); sensitivity coefficient; soft normally open point (SNOP) allocation; operating margin; second-order cone programming

(编辑 陆海霞)