

9-3-2020

SNOP allocation based on consideration of the uncertainty in active distribution systems

Jin XING

State Grid Jibei Electric Power Co , Ltd , Beijing 100032 , China

Jing WANG

State Grid Jibei Electric Power Co , Ltd , Beijing 100032 , China

Xin YE

State Grid Jibei Electric Power Co , Ltd , Beijing 100032 , China

Xiaohuan SHI

Guodianhuayan(Beijing) Electric Power Consulting Co , Ltd , Beijing 102200 , China

Bingbing LI

Guodianhuayan(Beijing) Electric Power Consulting Co , Ltd , Beijing 102200 , China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

XING, Jin; WANG, Jing; YE, Xin; SHI, Xiaohuan; LI, Bingbing; and SONG, Jidong (2020) "SNOP allocation based on consideration of the uncertainty in active distribution systems," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 2, Article 6.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.02.006

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss2/6>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

SNOP allocation based on consideration of the uncertainty in active distribution systems

Authors

Jin XING, Jing WANG, Xin YE, Xiaohuan SHI, Bingbing LI, and Jidong SONG

考虑电动汽车不确定性的配电网 软联络开关优化配置

邢 金¹, 王 婧¹, 叶 辛¹, 石晓欢², 李冰冰², 宋季冬²

(1. 国网冀北电力有限公司, 北京 100032; 2. 国电华研(北京)电力咨询有限公司, 北京 102200)

摘 要:电动汽车的接入对配电网的安全稳定运行带来了根本性的影响,利用直流软联络(SNOP)代替联络/分段开关,不仅能够提高有源配电网的潮流控制能力和实现双端馈线的电气解耦,而且能够较准确调控两端所连馈线功率和提高有源配电网运行的灵活性。该文首先分析电动汽车及其负荷的不确定性,并基于二者的时序性概率出力模型,综合考虑系统网损和电动汽车的充放电功率特性,构建多目标的 SNOP 最优配置模型,然后提出相应的求解算法。最后,利用 IEEE 33 节点系统验证数学模型和求解算法的可行性和有效性。该文的理论分析结果可为计及电动汽车接入的配电网损耗计算分析提供借鉴作用。

关 键 词:不确定性;软联络;电动汽车;优化配置

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.02.006 中图分类号:TM715 文章编号:1673-9140(2020)02-0046-09

SNOP allocation based on consideration of the uncertainty in active distribution systems

XING Jin¹, WANG Jing¹, YE Xin¹, SHI Xiaohuan², LI Bingbing², SONG Jidong²

(1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100032, China; 2. Guodianhuayan(Beijing)
Electric Power Consulting Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: Large scale integrations of EVs brings challenges on the security operation of the distribution networks. The Soft Normally Open Point (SNOP) is commonly utilized to replace tie-switch. It not only improves the power flow of both two lines, but also provides the accurate controlling for power flows of the feeders connecting to the SNOP and increase the control flexibility of whole systems. In this paper, sequential probability output models of EVs and loads are established based on the considerations of uncertain characteristics. Furthermore, a multi-objective model of the optimal allocation for SNOPs is proposed. Meanwhile, a corresponding solution is also presented by considering the system losses and uncertain outputs of EVs. Simulation results of an IEEE 33 nodes system are presented to verify the feasibility and validity of the proposed model and algorithm.

Key words: uncertainty; soft normally open point (SNOP); distribution generation; optimal allocation

电动汽车并网已成为中国配电网建设发展的必然趋势。考虑到电动汽车的充放电行为具有很强的不确定性,大量电动汽车的接入将会对配电网的安全运行带来极大的影响^[1]。一方面,由于传统配电网缺乏灵活可控的功率控制手段,严重的制约了配电网对电动汽车的接纳能力;另一方面,大量的电动汽车接入到中低压配电网中,造成了三相不平衡、电压波动等一系列的电能质量问题,需要引入新型可控装置,提升配电网的运行和控制水平。

直流软联络 (soft normally open points, SNOP) 是由英国帝国理工学院于 2009 年提出的一种新型的可控电力电子装置^[2],用于替换传统配电网中的联络开关或分段开关,能够准确调控其所连两端的馈线有功功率与无功功率,并通过交直交变换实现双端馈线电气解耦。SNOP 接入配网后,通过其灵活快速的功率控制能力,能够平衡两条馈线上的负载,改善潮流分布,缓解电动汽车出力的不确定性,提升系统对电动汽车的接纳能力^[3]。

近期国内外学者对 SNOP 展开了深入的研究,在模型建立和选址优化等方面取得了一系列的研究成果。文献[4]对背靠背电压源型 SNOP 的控制方式及其对配电网的优化作用进行了总结分析;文献[5]在建立 SNOP 的稳态模型的基础上,分析并量化了 SNOP 接入中压配电网后在负荷平衡和电压分布等方面的优势;文献[6]提出了含 SNOP 的配电网运行优化模型,并将其和网络重构进行了对比分析,算例的结果表明含 SNOP 的配电网具有更好的潮流控制能力和稳定运行特性;文献[7]基于潮流系数提出了一种 SNOP 选址的方法。针对主动配电网中分布式电源和负荷随机波动的特点;文献[8]提出了基于软联络开关的主动配电系统多时间尺度控制策略,在长时间尺度下通过配电网全局优化策略实现对 SNOP 输出进行控制;在短时间尺度下通过引入电压波动迟滞控制实现对 SNOP 输出参考值的动态调整,以维持线路电压平稳,提升分布式电源的消纳能力。

综上所述,现有文献没有在考虑电动汽车和负荷的时序性和随机性情况下对 SNOP 的优化配置研究。事实上,电动汽车充放电行为的不确定性以

及负荷用电需求的时序性对配电网节点电压和网络损耗产生重要影响,基于 SNOP 灵活可控的功率调节能力,通过在配电网中进行优化配置可以显著改善节点电压、有效降低网络损耗和平抑电动汽车充放电功率波动性和负荷用电需求的随机性,因此,考虑电动汽车充放电功率不确定性的 SNOP 优化配置具有重要的理论研究价值。该文基于历史数据,分别建立电动汽车充放电功率和负荷的时序性概率出力模型,得到具有代表性的场景及其权重,以总损耗最小为目标函数建立 SNOP 多目标优化配置模型,并引入遗传算法进行求解,基于 IEEE 33 节点系统仿真模型,验证提出模型的可行性和求解算法的有效性。该文的理论分析成果有助于丰富主动配电网的基础理论体系。

1 含 SNOP 的配电网元件模型

1.1 SNOP 模型

一般而言,SNOP 通常安装在传统的联络开关的位置,能够准确控制其所连接两侧馈线的有功和无功功率,SNOP 的接入改变了传统配电网辐射状接线和开环运行的基本特征,提高了配电网运行控制的灵活性和快速性,典型的含 SNOP 的单联络馈线如图 1 所示。

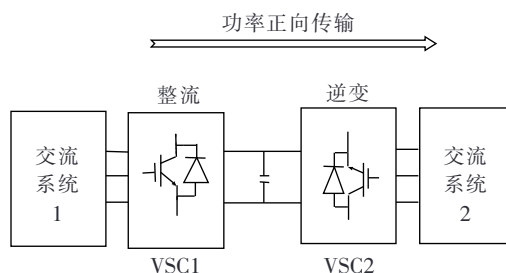


图 1 含 SNOP 的单联络馈线示意

Figure 1 Diagram of single feeder with SNOP

从图 1 可以看出,背靠背的电压源型变流器通过直流侧电容器 C 将 2 个 VSC 相连形成对称结构,其中,C 用于提供直流侧电压支撑和减少直流侧的纹波。通过对两端 VSC 运行状态的控制,实现有功和无功功率的灵活控制,实现能量的双向流动,其中有 2 种运行状态:

1) 当功率正向传输时,交流系统 2 从直流侧吸收能量,VSC2 此时工作于逆变状态,交流系统 1 经

VSC1 的整流向直流侧供电,直流环节的电容一边向 VSC2 提供能量,一边吸收 VSC1 的能量;

2)当功率反向传输时,交流系统 2 向直流环节提供能量,VSC2 在 PWM 控制下转换成整流状态,VSC1 则工作于逆变状态,将直流环节的电能传向交流系统 1,当流入与流出电容的能量保持平衡时,电容电压维持稳定。

因此,SNOP 可通过采用功率控制方式的 VSC 准确控制流过线路两端的有功功率,并且 VSC1 和 VSC2 均可独立实现对两侧交流系统的无功补偿,实现无功功率调节,进而实现 2 条交流线路的连接与功率转供^[9]。此外需要说明的是,交直流系统的功率转换过程中会产生功率损耗,一般假设为传输功率的 5%,在进行线损计算时,需进行相应考虑。SNOP 的等效模型如图 2 所示, P_{s1} 和 P_{s2} 分别为注入 2 条交流线路的有功功率, Q_{s1} 和 Q_{s2} 分别为注入 2 条交流线路的无功功率。其中,两侧注入有功功率存在关系:

$$P_{s1} = P_{s2} + P_{\text{loss}}^{\text{SNOP}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sqrt{P_{s1}^2 + Q_{s1}^2} \leq S_{s1} \\ \sqrt{P_{s2}^2 + Q_{s2}^2} \leq S_{s2} \end{cases} \quad (2)$$

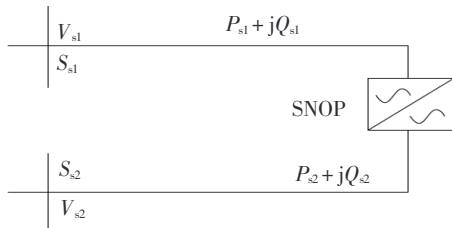


图 2 含 SNOP 的配电网功率注入模型

Figure 2 Power injection model of distribution network with SNOP

1.2 电动汽车充放电功率随机性概率模型

目前,电动汽车的电能供给方式主要有随车充电和更换电池 2 种^[10-11],该文主要考虑随车充电模式。

根据充放电功率的流向,电动汽车又可分为 2 类:①只从电网吸收电能,而不向电网反向充电的纯用电负荷;②受电网调度的电动汽车,在用电高峰时将电池储存的电能释放给电网,在用电低谷时从电网吸收电能,类似于分布式储能的作用,此类电动汽车又称为 V2G(vehicle-to-grid)。一般来说,V2G 型电动汽车只在非用电高峰时段充电,且每天需要

在特定时段连接充电桩,接受电网的统一调度^[12]。

中国常用的电动汽车包括公交车、出租车、公务用车和私家车等,其中,公交车和出租车通常运行时间长,用电高峰时也不停运,因此不宜作为 V2G 电源;公务车在需要执行公务时需随时出发,其他时间闲置,出行规律不易控制;私家车出行时间灵活且具有很强的规律性,通常大部分时间闲置,在政策价格的引导下,部分私家车主注册成为 V2G 电源。

根据电动汽车的分类,电动汽车对系统的充放电功率可以表示为

$$P_v = P_{v1} + P_{v2} \quad (3)$$

式中 P_v 为电动汽车作为负荷从电网吸收的充电功率; P_{v1} 和 P_{v2} 分别为非 V2G 型和 V2G 型电动汽车从电网吸收的充电功率,其中 P_{v2} 的取值可正可负,正值表示非高峰时段的充电功率,负值表示高峰时段对电网的放电功率。

文献[13]通过仿真证明,在一定的前提条件下,电动汽车的充放电功率(包括总负荷水平和总 V2G 输出功率)都近似服从正态分布,文献[14-15]均采用该结论对电动汽车充电站的规划问题进行了进一步研究。因此, P_{v1} 和 P_{v2} 的概率分布可以近似表示为 $P_{v1} : N(m_{v1}, s_{v1}^2)$, $P_{v2} : N(m_{v2}, s_{v2}^2)$ 。

1.3 负荷模型

根据研究表明,负荷可以看作一个随机变量,并采用正态分布近似反映负荷的不确定性,这一点在长期的实践中也得到了验证。则负荷概率密度函数^[16]为

$$f(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(P-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

式中 μ 为数学期望; σ 为方差。

2 配电网中 SNOP 优化配置模型

目前,SNOP 对配电网的潮流控制能提升和降低网络损耗方面的研究已经得到了一定的成果^[17],然而对含分布式电源的配电网的研究较少,该文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,并采用蒙特卡洛模拟方法处理随机变量的不确定性因素。

其中,上层规划确定 SNOP 的最优接入位置和容量,下层规划在给定容量范围内对电动汽车及 SNOP 进行优化调度;上层规划中需要的能量损耗由下层规划的优化调度得到,下层规划的优化调度又必须以上层规划的安装位置和容量为依据,所以 2 层规划相互协调才能得到最优解。

2.1 上层规划数学模型

上层规划以年投资运行费用最小为目标函数,包括设备投资年费用 C_{inv} 、运行维护年费用 C_{om} 以及从主网购电年费用 C_{en} 。已知量为各时段电动汽车充放电功率大小及概率、负荷大小及概率、SNOP 的投资年费用与运行维护年费用,控制变量为 SNOP 的安装位置与容量大小。数学模型如下:

1) 目标函数。

$$\min(C_{\text{inv}} + C_{\text{om}} + C_{\text{en}}) \quad (5)$$

$$C_{\text{inv}} = C(r, l) C_{\text{snop}} S_{\text{snop}} \quad (6)$$

$$C_{\text{om}} = C_o + C_m \quad (7)$$

$$C_o = 365 \sum_{t=1}^{24} a \Delta t \left(\sum_{k=1}^{N_s} P_{\text{snop},t}^k G_{\text{snop},t}^k \right) \quad (8)$$

$$C_m = S_{\text{snop}} b \quad (9)$$

$$C_{\text{en}} = 365 \sum_{t=1}^{24} C_{\text{pu}} \Delta t \left(\sum_{k=1}^{N_L} P_t^k G_t^k + \sum_{k=1}^{N_{\text{EV}}} P_{\text{EV},t}^k G_{\text{EV},t}^k + \sum_{k=1}^{N_{\text{sum}}} P_{\text{loss},t}^k G_{\text{loss},t}^k \right) \quad (10)$$

式(5)~(10)中 $C(r, l)$ 为现值系数,与折现率 r 、SNOP 的使用寿命 l 等有关; C_{snop} 和 S_{snop} 分别为 SNOP 的单位容量投资成本与安装容量; C_o 和 C_m 分别为年运行费用和年维护费用; a 为单位电量运行费用; Δt 为时段长度(通常取 1 h); $P_{\text{snop},t}^k$ 和 $G_{\text{snop},t}^k$ 分别为 SNOP 在第 t 个时段第 k 种状态的有功出力和概率, $k=1, \dots, N_s$; b 为维护费用系数; C_{pu} 为购电电价; P_t^k 、 $P_{\text{EV},t}^k$ 和 $P_{\text{loss},t}^k$ 分别为第 t 个时段第 k 种状态下的负荷、电动汽车充电功率和网损, G_t^k 、 $G_{\text{EV},t}^k$ 和 $G_{\text{loss},t}^k$ 为对应的概率, N_L 、 N_{EV} 和 N_{sum} 分别为对应的状态个数。

2) 约束条件。

上层规划的约束条件主要考虑 SNOP 最大安装容量的约束:

$$0 \leq S_{\text{snop}} \leq S_{\text{snop}}^{\text{max}} \quad (11)$$

式中 $S_{\text{snop}}^{\text{max}}$ 为 SNOP 的最大允许安装容量。

2.2 下层规划数学模型

下层规划以总能量损耗最小为目标函数,已知量为 SNOP 的安装位置与容量、各时段负荷与电动汽车的功率大小及概率,优化各时段 SNOP 的有功和无功出力状态,再将目标函数反馈到上层规划。

1) 目标函数。

$$\min 365 \sum_{t=1}^{24} \sum_{k=1}^{N_{\text{sum}}} P_{\text{loss},t}^k G_{\text{loss},t}^k \quad (12)$$

$$P_{\text{loss},t}^k = P_{\text{branch},t}^k + P_{\text{loss},t}^{\text{SNOP},k} \quad (13)$$

式中 网络损耗 $P_{\text{loss},t}^k$ 由线路损耗 $P_{\text{branch},t}^k$ 和 SNOP 的有功损耗 $P_{\text{loss},t}^{\text{SNOP},k}$ 两部分组成,后者的损耗约为 SNOP 传输功率的 5%^[2]。

2) 约束条件。

下层规划的约束条件包含各时段内的潮流平衡约束、节点电压约束、支路功率约束和 SNOP 的功率出力约束等。

① 功率平衡约束:

$$\begin{cases} P_{\text{Gi}}^t = P_{\text{Li}}^t - U_i^t \sum_{j=1}^{N_{\text{node}}} U_j^t (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{\text{Gi}}^t = Q_{\text{Li}}^t - U_i^t \sum_{j=1}^{N_{\text{node}}} U_j^t (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (14)$$

式中 P_{Gi}^t 、 Q_{Gi}^t 分别为节点处电源在时段 t 的有功、无功出力; P_{Li}^t 、 Q_{Li}^t 分别为节点处时段 t 有功、无功负荷; U_i^t 为节点在时段 t 的电压大小; G_{ij} 、 B_{ij} 为系统导纳; δ_{ij} 为节点电压相角差; j 为节点编号; N_{node} 为节点总数目。

② 节点电压约束:

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, i \in \Omega \quad (15)$$

式中 $U_i^{\min}$ 和 $U_i^{\max}$ 分别是节点电压 U_i 的上、下限。

③ 支路功率约束:

$$|P_l| \leq P_{l\text{max}} \quad (16)$$

式中 P_l 为支路有功功率向量,包括正向和反向有功功率向量; $P_{l\text{max}}$ 为支路有功功率最大传输能力。

④ SNOP 控制变量约束:

$$|P_{s1}| \leq S_{s1}, |P_{s2}| \leq S_{s2}$$

$$|Q_{s1}| \leq S_{s1}, |Q_{s2}| \leq S_{s2}$$

$$\sqrt{P_{s1}^2 + Q_{s1}^2} \leq S_{s1}, \sqrt{P_{s2}^2 + Q_{s2}^2} \leq S_{s2}$$

(17)

式中 P_{s1} 和 P_{s2} 分别为 VSC1 和 VSC2 侧输出的有功功率; Q_{s1} 和 Q_{s2} 分别为 VSC1 和 VSC2 侧输出的无功功率; S_{s1} 和 S_{s2} 分别为 VSC1 和 VSC2 的额定功率。

3 配电网 SNOP 优化配置模型求解算法

为求解所提出的含随机性 SNOP 优化配置问题, 该文采用结合蒙特卡洛和遗传算法的两阶段混合智能方法求解。通过蒙特卡洛模拟方法处理随机性问题, 用遗传算法进行优化求解。

3.1 蒙特卡洛随机抽样法

蒙特卡洛法又称为随机抽样法, 是以统计理论和概率为基础的一种计算方法。它的主要思想是利用计算机上的随机数来表示系统元件的概率参数, 同时在计算机上模拟系统的实际运行情况, 进行一段时间的观察, 给出所求解的近似值即用估计值的标准差来表示^[18-19]。该文依据所得到的电动汽车和负荷的随机状态及其概率, 整合形成系统的状态及其概率并进行抽样, 对于每次抽样, 检查其约束条件并计算目标函数, 根据设定的置信水平, 利用统计的方法得到最终的优化结果。

3.2 遗传算法

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 的基本思路是: 把每个变量的值作为一条基因信息, 这些基因信息合并构成单个个体的染色体, 多个个体构成一个群体, 模仿生物“优胜劣汰”的进化过程, 对群体中的个体进行交叉、变异操作, 并用适应度函数来进行定向的选择操作, 经多次的迭代操作, 最终产生一个最优个体, 即实现目标的最优。遗传算法中主要的遗传操作包括选择、交叉和变异^[20]。编码过程中, 每条染色体被分为 3 部分, 如图 3 所示。

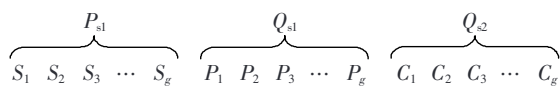


图 3 遗传算法编码方式

Figure 3 The encoding style of GA

每部分采取 3 位二进制数编码, 共 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111 等 8 种情况, 每种情况代表不同的有功或无功出力值。第 1 部分代表

SNOP 的有功出力值, g 为综合考虑季节与时段的状态数; 第 2 部分代表 SNOP 的 1 端无功出力值; 第 3 部分代表 SNOP 的 2 段无功出力值。

3.3 结合蒙特卡洛和遗传算法的 SNOP 规划流程

基于蒙特卡洛随机抽样的原理和传统遗传算法的典型特征, 该文提出的二阶段 SNOP 最优配置方案的求解方法如图 4 所示。

将大量仿真结果按照目标函数由优到劣排序, 然后将每个结果所对应的概率一次累加求和, 概率求和结果及其所对应的目标函数值即为该置信区间下的计算结果。

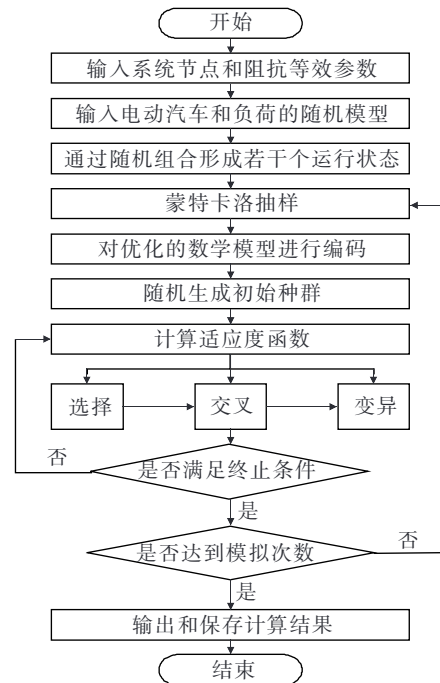


图 4 蒙特卡洛和遗传算法相结合的二阶段求解方法

Figure 4 The two stage method combining Monte-carlo and GA

4 算例分析

4.1 算例描述

以改进的 IEEE 33 节点系统为例对上述规划模型及求解算法进行分析验证。如图 5 所示, 节点 13 处接入电动汽车充电站, 虚线 TS1~TS5 为联络开关; 选择 1 组 SNOP 接入配电网, 代替相应的联络开关, 即 SNOP 的待选位置为 TS1~TS5 中的一个。系统优化运行时, 优化 SNOP 的有功和无功传输功率, 同时其余联络开关参与网络重构; 考虑到开关操作次数限制, 一日内进行 2 次网络重构, SNOP 的优化运行每小时进行 1 次, 共 24 次。

系统的原始总负荷为 $3\,715\text{ kW}+\text{j}2\,300\text{ kVar}$,该文以 4 个季节和周末、工作日等将全年分为 8 个典型场景,8 个典型场景下的负荷曲线如图 6 所示。

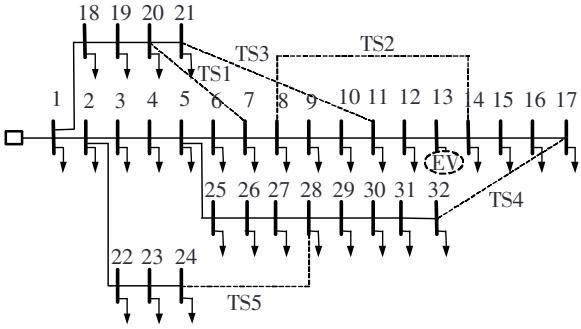


图 5 改进 IEEE 33 节点系统

Figure 5 The diagram of the modified IEEE 33-bus system

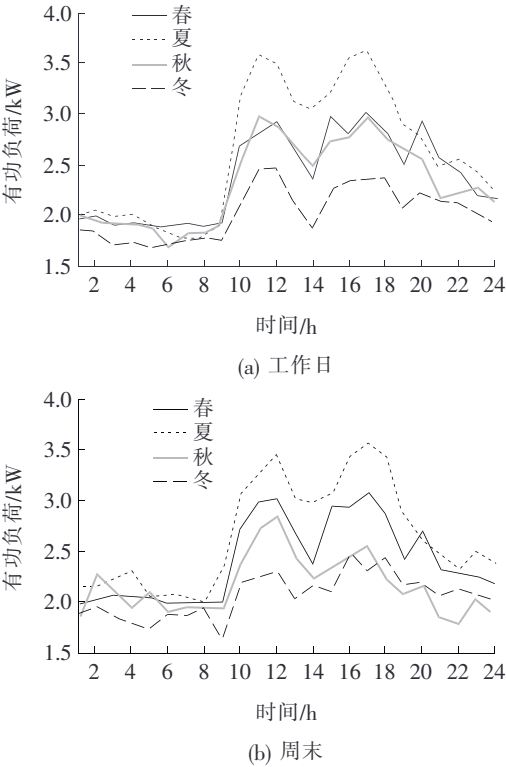


图 6 不同场景下的典型日负荷曲线

Figure 6 Typical daily load curves of different scenarios

根据文献[14]所述方法估算电动汽车的充放电功率。按照图 6 所示典型日负荷曲线,年用电量为 $20\,540.46\text{ MW}\cdot\text{h}$,供电范围内人口数约为 5 100,按照每百人约有 30 辆汽车,其中电动汽车为 40% 推测,该区域共有 611 辆电动汽车。按照文献[13],电动汽车分类占比及充放电时段如表 1 所示。

该文电动汽车的充放电功率均设为 3.6 kW ,所有类型电动汽车充电的同时率为 0.3,可调度型电动汽车在高峰时段对电网放电的可用率为 $0.6^{[14]}$ 。按照文献[21]所述电动汽车充放电负荷计算方法,

可以得出 8 个典型负荷场景下该区域内电动汽车的充放电功率。以夏季工作日为例,叠加电动汽车充放电充电前后的负荷曲线如图 7 所示。

表 1 电动汽车分类占比及充放电时段

Table 1 Comparison of system losses with/without SNOP

电动汽车	市场份 额/%	充电时段	放电时段
公用电 动汽车	20	19:00—07:00	—
私人电 动汽车	60	10:00—16:00 19:00—07:00	—
可调度电 动汽车	20	23:00—07:00	10:00—16:00 19:00—23:00

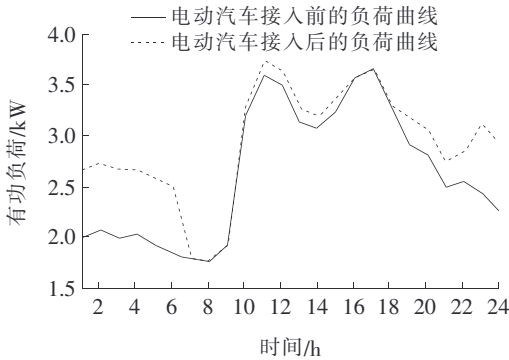


图 7 电动汽车接入前、后的夏季工作日典型负荷曲线

Figure 7 Typical daily load curves of weekday in summer with and without EVs

在仿真计算中,具体参数设置:蒙特卡洛抽样次数取 5 000 次,遗传算法中变异率为 0.2,交叉率为 0.8,种群规模为 100,最大迭代次数为 100。每千瓦时损耗电价取 0.49 元;SNOP 的使用寿命为 20 a,折现率为 0.1,单位容量安装成本为 2 000 元/kW,单位电量的运行费用取单位电价的 5%,维护费用系数^[22]为 0.1。

4.2 规划结果分析

按照该文方法对 SNOP 的安装位置和容量进行优化配置,SNOP 的备选安装位置为 TS1~TS5。规划结果如表 2 所示,最优安装位置为 TS4 处,最优安装容量为 400 kW。

由表 2 可知,对比 TS3 和 TS4 这 2 个安装位置,TS3 处的降损效果最好,但是 SNOP 的规划容量较大,因而总费用较高;TS4 处的降损效果一般,但是 SNOP 的规划容量最小,所以总费用最小。因此,综合考虑设备的投资运行维护费用与降损效果,TS4 为最优安装位置。

表 2 SNOP 的规划方案对比

Table 2 Comparison of planning of SNOP

安装位置	容量/kW	总费用/万元	年费用/万元		
			设备投资	运行维护	从主网购电
TS1	1 000	1 198.26	20	15.66	1 162.60
TS2	900	1 198.84	18	11.45	1 169.39
TS3	900	1 192.63	18	13.57	1 161.06
TS4	400	1 181.79	8	3.85	1 169.94
TS5	600	1 189.05	12	9.29	1 167.76

4.3 随机性对系统网损的影响

以夏季工作日 20:00 时的优化计算为例,在不同的抽样率下,系统的网损情况如图 8 所示。通过图 8 蒙特卡洛方法抽样结果可以看出,随着累计抽样概率的增加,测试系统的网损也在不断增加,在 70% 的抽样结果下,通过 SNOP 的优化全网损耗为 93.14 kW;当累计抽样概率达到 85% 时,全网损耗约 101.39 kW。这说明该方法能够综合考虑负荷、电动汽车的随机状态,提高了计算结果的准确性,体现了随机性对系统损耗的影响。

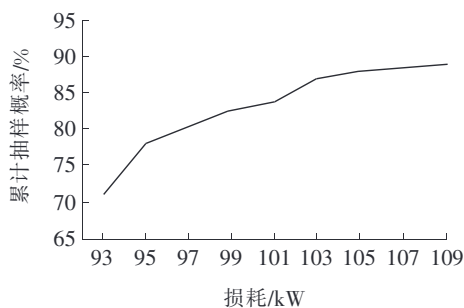


图 8 抽样率对测试系统网损的影响

Figure 8 The effect of different sample rate on system losses

4.4 SNOP 不同安装位置对系统降损节能的影响

由于线路负载率的差异性以及电动汽车充电站安装位置对系统的影响,故 SNOP 不同的安装位置对系统的降损节能以及对负荷、电动汽车随机性的功率平衡能力也有较大的差异。

该文对每个季节分别选取 2 个典型日,一年共 8 个典型日(图 6);并将 1 d 分为 24 个时段,根据 8 个典型日负荷曲线合成全年曲线进行仿真研究,不同安装位置的 SNOP 接入前、后在一年内的降损节能情况对比如表 3 所示,对比分析可以看出,从能量损耗角度来看,在该文的假设条件和负荷水平下,不同位置和容量的 SNOP 接入配电网后可以使年损耗降低

5.31%(TS4,400 kW)至 28.45%(TS3,900 kW)。

以负荷水平较高的夏季工作日和负荷水平较低的冬季周末为例,SNOP 不同安装位置在一天内降低能量损耗的对比情况如图 9 所示,可以看出,安装 SNOP 后配电网全天的损耗均有明显降低。其中 TS3 处安装后降损效果最为显著,这是由于该支路连接于主干线(1~17 号节点)中后端和另一条较短的分支线(18~21 号节点),当主干线负荷较重时 SNOP 可以通过分支线转供,实现负荷平衡;另一方面,主干线(1~17 号节点)的中后段接有电动汽车充电站,通过 SNOP 的灵活功率转移能力,可以加强电网对电动汽车的消纳能力。

表 3 SNOP 不同安装位置对系统降损节能的影响

Table 3 Effect of installation site on system losses

安装位置	安装容量/kW	能量损耗/(MW·h)
TS1	1 000	589.00
TS2	900	730.88
TS3	900	560.03
TS4	400	741.16
TS5	600	695.67
无	0	782.75

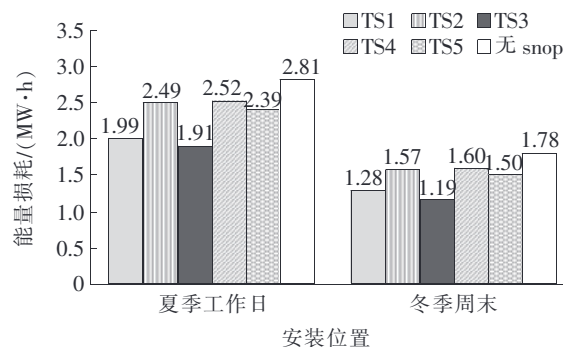


图 9 SNOP 不同安装位置对系统能量损耗的影响

Figure 9 The effect of installation site on energy losses

4.5 SNOP 对系统电压的提升能力分析

基于 IEEE 33 节电系统的负荷分布特征,20:00 时的负荷较重,容易出现电压低于标准的情况,以夏季工作日 20:00 的负荷为例,对比 SNOP 不同安装位置对节点电压分布的影响,结果如图 10 所示,可以看出,未安装 SNOP 之前,由于负荷较大,导致系统节点电压整体偏低,系统处于线路末端的 12~17 节点电压低于 0.93 p.u.,不满足导则的要求;而在安装 SNOP 之后,基于其功率转移能力,将部分位于长线路末端的负荷通过其他线路供给,因而降低了长线路的负荷水平,优化了节点电压,使

全网节点电压均满足要求。如图 10 所示,未安装 SNOP 时的节点电压均值为 0.95 p. u., 标准差为 0.028; 在 TS3 或 TS4 位置安装 SNOP 后, 节点电压均值分别提升为 0.97 和 0.96 p. u., 标准差分别下降到 0.016 和 0.024, 由此可知, SNOP 的安装有利于提升电压水平, 减小线路中的电压降落。

图 10 中未安装 SNOP 前出现了电压越限, 表明此时不能够完全消纳 611 辆电动汽车。在保证电压不越限的情况下, SNOP 安装前后电动汽车的最大消纳数量如表 4 所示, 可知 SNOP 接入前电动汽车的最大消纳量为 150 辆, 在接入 SNOP 后, 消纳数量大大提升。这是因为 SNOP 可以准确的调控其两端所连馈线的有功传输功率, 同时还具备一定的无功补偿能力, 在保证电压不越限的前提下, 大大提升了系统对电动汽车的消纳能力。

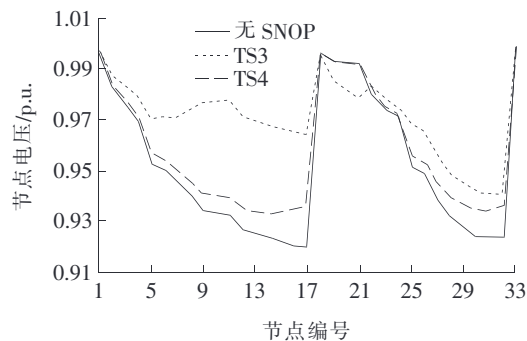


图 10 夏季工作日 20:00 时系统各节点电压分布

Figure 10 The voltage of the IEEE-33 at 8 p. m on weekday in summer

表 4 SNOP 接入前、后电动汽车的最大消纳数量

Table 4 The number of EV consumption before and after the access of SNOP

SNOP 安装位置	SNOP 安装容量/kW	EV 消纳数量/辆
无 SNOP	—	150
TS3	900	1 320
TS4	400	428

5 结语

该文综合考虑了负荷、电动汽车的概率特性, 对配电网中 SNOP 的优化配置问题进行了研究, 以网损最小为目标建立了数学模型, 通过蒙特卡洛抽样的方法考虑了系统的不确定性, 并遗传算法进行了求解。以 IEEE 33 节点系统为研究对象, 分析了

SNOP 不同安装位置对系统损耗的影响, 考虑了负荷及电动汽车随机性对 SNOP 优化配置的影响, 算例结果表明 SNOP 的接入具有较好的降损节能效果, 且能够有效改善线路的电压分布, 该文的理论分析结果对于 SNOP 的实际应用具有一定的参考价值。

目前, SNOP 的研究仍然处于起步阶段, 其价格较贵, 设备投资费用对规划结果影响较大。随着 SNOP 研究的深入, 制造费用下降后, 其降损节能效果将在规划结果中占据更重要的比重。

参考文献:

- [1] 陈丽丹, 张尧. 电动汽车随机充电对配电网影响的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(1): 62-69.
CHEN Lidan, ZHANG Yao. Study on the influence of electric vehicles random charging on distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(1): 62-69.
- [2] Bloemink J M, Green T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting. Providence, RI, USA, 2010.
- [3] 钟海旺, 夏清, 丁茂生, 等. 以直流联络线运行方式优化提升新能源消纳能力的新模式[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 36-42.
ZHONG Haiwang, XIA Qing, DING Maosheng, et al. A new mode of HVDC tie-line operation optimization for maximizing renewable energy accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 36-42.
- [4] Chiandone M, Sulligoi G, Milano F, et al. Back-to-back MVDC link for distribution system active connection: A network study[C]// IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Application, Milwaukee, USA, 2015.
- [5] Cao W, Wu J, Jenkins N. Feeder load balancing in MV distribution networks using soft normally-open points[C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Istanbul, Turkey, 2014.
- [6] 王成山, 孙克勃, 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.
- [7] 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.
- [8] 王岸. SNOP 的研究及其在配电网中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [9] 沈阳武, 彭晓涛, 孙元章. 背靠背双 PWM 变流器的协调控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 146-152.
- SHEN Yangwu, PENG Xiaotao, SUN Yuanzhang, et al. Study on cooperative control strategies of back-to-back dual-PWM converter [J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 146-152.
- [10] ZHENG Z, ZHANG Y, LIU T, et al. Analysis on development trend of electric vehicle charging mode [C]//IEEE International Conference on Electronics and Optoelectronics, Dalian, China, 2011.
- [11] WANG C, YANG J, LIU N, et al. Study on siting and sizing of battery-switch station[C]//IEEE 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Weihai, China, 2011.
- [12] 樊平, 齐凌成, 王庆丰, 等. 考虑电动汽车充放电集成的配电网短期负荷预测[J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 50-55.
- FAN Ping, QI Lingcheng, WANG Qingfeng, et al. Short-term load forecasting for distribution network considering electric vehicles charging and discharging integration[J]. Smart Power, 2018, 46(12): 50-55.
- [13] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 22-29.
- ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 22-29.
- [14] 李振坤, 田源, 董成明, 等. 基于随机潮流的含电动汽车配电网内分布式电源规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 60-66.
- LI Zhenkun, TIAN Yuan, DONG Chengming, et al. Distributed generators programming in distribution network involving vehicle to grid based on probabilistic power flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 60-66.
- [15] 官嘉玉, 江修波, 刘丽军. 考虑电动汽车随机充电行为及低碳效益的充电站规划[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 93-100.
- GUAN Jiayu, JIANG Xiubo, LIU Lijun. Optimal allocation of charging stations considering stochastic charging behavior and low carbon efficiency of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 93-100.
- [16] ZHANG P, LEE S T. Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and Gram-Charlier expansion [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 676-682.
- [17] 祝旭焕, 童宁, 林湘宁, 等. 基于柔性多状态开关的主动配电网负荷在线紧急转供策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 87-101.
- ZHU Xuhuan, TONG Ning, LIN Xiangning, et al. Flexible multi-state switch based online emergency load transferring strategy for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 87-101.
- [18] 高鹏彦, 赵兴勇, 姚方, 等. 考虑电动汽车时空分布的充电负荷建模[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 47-55.
- GAO Pengyan, ZHAO Xingyong, YAO Fang, et al. Modeling of charging loads considering the temporal and spatial distributions of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 47-55.
- [19] Kalos M H. Monte Carlo methods[M]. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- [20] 李猛, 王利利, 刘向实, 等. 基于门当户对遗传算法的配电网多目标主动重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 30-38.
- LI Meng, WANG Lili, LIU Xiangshi, et al. Multi-objective active reconfiguration of distribution network based on the "properly matched marriage" genetic algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 30-38.
- [21] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
- LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [22] 张璐, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 含光伏发电的配电网有功无功资源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5525-5533.
- ZHANG Lu, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Optimal configuration of active-reactive power sources in distribution network with photovoltaic generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5525-5533.