

SNOP 优化配置的多维效用并合模型

马睿, 顾洁, 彭虹桥

(上海交通大学电子信息与电气工程学院大数据工程技术研究中心, 上海 200240)

摘要:智能软开关 SNOP 的优化配置需要考虑配电网运行效益及投资等多个优化指标, 是一个多目标决策问题。因此在多维效用并合法的基础上, 首先根据各个优化指标的内在特性及逻辑联系对 SNOP 的优化配置指标进行效用并合; 随后以综合效用值最大为目标, 建立 SNOP 优化配置的多维效用并合模型; 最后, 以 IEEE 33 节点系统为例, 对所提出的优化模型进行了分析与验证。结果表明, 基于多维效用并合法配置 SNOP, 能够以合理的 SNOP 安装容量实现系统有功损耗下降, 改善系统电压水平及馈线负载平衡度, 并能够提高分布式电源的消纳率, 实现配电网综合优化运行。

关键词:配电网; 分布式电源; SNOP; 多维效用并合; 效用函数

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.009 中图分类号:TM712 文章编号:1673-9140(2020)01-0075-08

Multi-attribute utility mergence model of SNOP optimal allocation

MA Rui, GU Jie, PENG Hongqiao

(Department of Electrical Engineering, Research Center for Big Data Engineering and Technologies, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The optimal allocation of SNOP considering operation efficiency and investment of distribution network is a multi-objective problem. In this paper, a multi-attribute utility mergence method is proposed. Firstly, mergence rules are identified to achieve the aggregate utility according to the internal characteristic and logic relation of optimization indexes. Then, a SNOP allocation optimization model is built with the max aggregate utility value as the object. Finally, a case study of IEEE 33-bus system is included to verify the effectiveness of the proposed model and method. It is shown that the multi-attribute utility method for SNOP allocation can decrease active power losses, improve the system voltage level and load balancing level and increase the distributed generation penetration with a reasonable SNOP capacity.

Key words: distribution network; distributed generation; SNOP; multi-attribute utility mergence method; utility function

在新能源发电技术的进步和全球节能减排战略目标的推动下, 以光伏及风力发电为代表的分布式

电源在配电网中的接入比例不断升高, 光伏发电和风力发电的出力具有间歇性、波动性及不确定性, 会

导致配电网馈线功率大幅波动、馈线负载平衡度下降以及电压波动越限等问题^[1],从而限制了分布式电源消纳水平,使得系统运行经济性下降,甚至危及系统运行的安全稳定。然而变压器分接头调节、电容器无功补偿、网络重构等传统控制策略的调节能力有限,为了进一步改善配电网运行状态并提高分布式电源消纳率,需要引入新型电力电子装置。

智能软开关(soft normally open point, SNOP)是用于替代传统联络开关(tie switch, TS)的电力电子装置,能够较为精确地控制其传输的有功功率和发出的无功功率,改善配电网运行状态^[2]。文献[3]对 SNOP 的控制方式进行了分析,并将 SNOP 对配电网有功损耗及电压波动的优化效果同网络重构进行了对比;文献[4]研究了 SNOP 对配电网有功损耗及馈线负载平衡度的优化作用;文献[5]在 SNOP 优化配置中考虑了 SNOP 对配电网有功损耗与电压水平的影响。上述文献主要研究了单一目标优化的 SNOP 配置问题,而 SNOP 的优化配置包括了配电网运行效益及投资等多个优化指标,是一个多目标决策问题。

该文考虑以 SNOP 接入后的配电网有功损耗、电压偏差、馈线负载平衡度、分布式电源切除量及 SNOP 成本等性能指标的综合效用值最大为优化目标,建立 SNOP 优化配置的多维效用并合模型,并以 IEEE 33 节点系统为例,对 SNOP 的安装位置及容量进行优化配置,实现配电网综合优化运行。

1 多维效用并合法概述

多维效用并合法是一种基于效用理论的用于解决多目标决策问题的综合决策方法,主要应用于经济、工程、教育、医疗等多个领域的评估及规划^[6-8]。多维效用并合法并非简单的把多目标进行加权计算,而是根据各个目标的内在特性及逻辑联系,使用不同的并合函数对各个目标进行并合,建立多维效用并合模型^[9]。

为了实现多维效用并合法,需构建对应的目标准则体系,该体系应满足以下 3 个前提^[10]:

1) 系统性原则。目标准则体系的构建需根据各指标间的相关性,使用逻辑合理的效用并合结构。

2) 可比较性原则。多属性指标应具有客观性,

通过对多属性指标进行量化分析,得到多目标决策问题的综合效用值。

3) 科学性原则。综合效用值应具有代表性,能够反映多目标决策问题的内在特性。

同时,综合效用函数需满足以下准则^[11]:

$$\frac{\partial W(x)}{\partial u_i} \geq 0 \quad (1)$$

$$\lim_{u_1, \dots, u_m \rightarrow 0} W(x) = 0 \quad (2)$$

$$\lim_{u_1, \dots, u_m \rightarrow 1} W(x) = 1 \quad (3)$$

式中 $W(x)$ 为综合效用函数, u_j 为第 j 个指标的基本效用值, m 为优化指标的维数。式(1)表示综合效用函数与基本效用值具有正相关性。式(2)、(3)表示综合效用函数与基本效用值具有趋势一致性:当基本效用值均趋向于 0 时,综合效用值约等于 0;当基本效用值均趋向于 1 时,综合效用值约等于 1。

2 SNOP 优化配置的多维效用并合模型

2.1 SNOP 的功能和模型

SNOP 可以控制其所连接的 2 条馈线之间传输的有功功率,同时具有无功支撑功能,它的典型应用场景如图 1 所示。SNOP 的功能可由背靠背电压源型变流器(back to back voltage source converter, B2B VSC)、静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)和统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)实现^[12]。

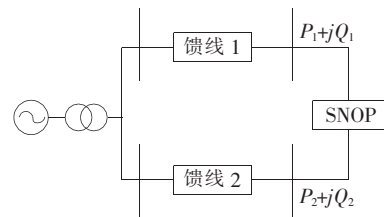


图 1 SNOP 的典型应用场景

Figure 1 The typical scenarios of SNOP

该文以 B2B VSC 型 SNOP 为例,并使用 PQ-VQ 控制模式^[13],研究 SNOP 的优化配置问题。在 PQ-VQ 控制模式中,SNOP 包括变流器输出的有功功率 P 及 2 个变流器各自输出的无功功率 Q_1 、 Q_2 等 3 个可控变量,并具有如下运行约束^[14]:

$$P_1(t) + P_2(t) = 0 \quad (4)$$

$$\sqrt{P_1(t)^2 + Q_1(t)^2} \leq S_{1\max} \quad (5)$$

$$\sqrt{P_2(t)^2 + Q_2(t)^2} \leq S_{2\max} \quad (6)$$

式中 $P_1(t)$ 、 $P_2(t)$ 分别为 SNOP 的 2 个变流器在 t 时刻的有功输出, MW; $Q_1(t)$ 、 $Q_2(t)$ 分别为 SNOP 的 2 个变流器在 t 时刻的无功输出, Mvar; $S_{1\max}$ 、 $S_{2\max}$ 分别为 SNOP 的 2 个变流器的接入容量, MV·A。

由于 SNOP 自身的功率损耗只占其传输功率的 5%^[15], 在该文研究中暂时不计 SNOP 自身的功率损耗, 将其作为理想电力电子器件来处理。

2.2 SNOP 优化配置指标

该文以 T 时段内配电网的有功损耗、电压偏差、馈线负载平衡度、分布式电源切除量以及 SNOP 的成本算作为优化指标, 对 SNOP 进行优化配置。

1) 有功损耗。

$$h_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L I_l(t)^2 r_l \quad (7)$$

式中 h_1 为有功损耗指标, MW·h; T 为总时间集; t 为时段编号; L 为总支路数; l 为支路编号; $I_l(t)$ 为在 t 时刻流过支路 l 的电流, kA; r_l 为支路 l 的电阻, Ω 。

2) 电压偏差。

$$h_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n |V_i^*(t) - 1| \quad (8)$$

$$(V_i^*(t) \leq V_{\text{thr},\min} \parallel V_i^*(t) \geq V_{\text{thr},\max})$$

式中 h_2 为电压偏差指标; i 为节点编号; n 为配电网总节点数; $V_i^*(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的电压标么值, $V_{\text{thr},\min}$ 、 $V_{\text{thr},\max}$ 分别为节点电压优化区间的上下限, p. u.。SNOP 的使用可以减小优化区间 $[V_{\text{thr},\min}, V_{\text{thr},\max}]$ 外的电压偏差。

3) 馈线负载平衡度。

该文采用负载平衡度指标 LBI (load balancing index)^[12] 来表征馈线负载平衡度:

$$h_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \frac{(I_l(t))^2}{(I_{l,\text{rate}})^2} \quad (9)$$

式中 h_3 为负载平衡度指标; $I_{l,\text{rate}}$ 为支路 l 的额定电流, kA。

4) 分布式电源切除量。

当分布式电源的接入容量过大, 会导致系统不

满足运行约束, 运行中可能需要切除部分分布式电源^[16]。分布式电源的切除量越小, 其消纳率就越大, 合理配置 SNOP 可以减少分布式电源的切除量, 提高分布式电源的消纳率。

$$h_4 = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \psi_D} P_i^{\text{DGcur}}(t) \quad (10)$$

$$P_i^{\text{DGcur}}(t) = P_{i\max}^{\text{DG}} - P_i^{\text{DG}}(t) \quad (11)$$

式中 h_4 为分布式电源切除量指标, MW·h; ψ_D 为 DG 安装节点集; $P_i^{\text{DGcur}}(t)$ 为节点 i 处 DG 在 t 时刻的切除量, $P_{i\max}^{\text{DG}}$ 为节点 i 处 DG 的最大出力, $P_i^{\text{DG}}(t)$ 为节点 i 处 DG 在 t 时刻的实际出力, MW。

5) SNOP 的成本。

SNOP 的总成本(包括设备、安装及运维成本)与 SNOP 的安装容量成正比, 因此该文采用 SNOP 的安装容量(2 个变流器的接入容量之和)代替 SNOP 的成本来进行优化。

$$h_5 = S_{1\max} + S_{2\max} \quad (12)$$

式中 h_5 为 SNOP 成本指标, MV·A。

2.3 多维效用并合模型

多维效用并合法分别对各个优化指标进行评估量化, 通过基本效用函数将各优化指标转换为基本效用值, 进而利用综合效用函数将基本效用值进行并合, 建立 SNOP 优化配置多维效用并合模型。

2.3.1 优化指标的基本效用函数

基本效用函数能将各个优化指标转化为 $[0, 1]$ 范围内的无量纲基本效用值, 将各个优化指标进行归一化, 消除各个优化指标间的不可公度性。

由于各个优化指标均是越小越优型, 因此该文采用差值比作为优化指标的基本效用函数, 差值比能有效体现出优化指标当前值与理论最优值间的差异, 可表示为

$$u_j = \frac{h_j^1 - h_j}{h_j^1 - h_j^0} \quad (13)$$

式中 h_j^1 和 h_j^0 分别为 j 个第优化指标的理论最大值和最小值。对于有功损耗、电压偏差、馈线负载平衡度和分布式电源切除量, 这 4 个指标均属于运行指标, 该文将系统未进行优化时的运行指标作为各个运行指标的理论最大值, 并将运行指标的理论最小值取为 0; 对于 SNOP 的成本, 将其理论最大值取为 4 MW, 其理论最小值同样取为 0。

2.3.2 多维效用并合结构

如前所述, 该文采用有功损耗、电压偏差、馈线负载平衡度、分布式电源切除量及 SNOP 的成本等

5个指标从多个角度描述 SNOP 的优化配置问题,分析指标间关系以构建并合模型,将各个指标的基本效用值合并为综合效用。

由于有功损耗、电压偏差、馈线负载平衡度和分布式电源切除量均为系统运行指标,均能体现系统的优化程度,对系统的贡献具有共同作用,且四者之间存在互补特性,因此采用加法函数^[10]进行并合。

$$W(u_1, u_2, u_3, u_4) = \frac{1}{4}u_1 + \frac{1}{4}u_2 + \frac{1}{4}u_3 + \frac{1}{4}u_4 \quad (14)$$

对于 SNOP 的成本与等效运行指标,两者之间具有“此消彼长”的关系:当系统运行指标得到优化,则 SNOP 成本将上升;而当 SNOP 成本下降,运行指标将受到直接影响。同时,运行与成本指标均能直接增加系统整体满意度,因此采用距离函数^[10]对成本与等效运行指标进行并合运算,得到 SNOP 优化配置多维效用并合函数为

$$W = 1 -$$

$$\sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left[1 - \left(\frac{1}{4}u_1 + \frac{1}{4}u_2 + \frac{1}{4}u_3 + \frac{1}{4}u_4 \right) \right]^2 + (1 - u_5)^2 \right\}} \quad (15)$$

式中 W 为 SNOP 优化配置综合效用值。

根据式(15)建立 SNOP 优化配置指标并合结构,如图 2 所示。

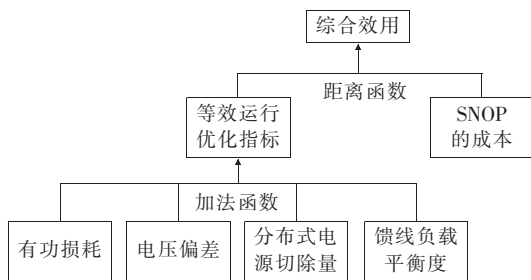


图 2 SNOP 优化配置指标并合结构

Figure 2 The SNOP optimal allocation index merge structure

2.4 SNOP 的优化配置

2.4.1 目标函数

该文以利用多维效用并合法得到的综合效用值最大为目标函数,其数学表达式为

$$f = \max(W) \quad (16)$$

2.4.2 约束条件

SNOP 优化配置问题的约束条件包括 SNOP 的运行约束(式(4)~(6))、电网潮流约束(式(17)、

(18))、电压水平约束(式(19))、支路电流约束(式(20))及分布式电源出力约束(式(21))。

$$P_i(t) = P_i^{\text{DG}}(t) + P_i^{\text{SNOP}}(t) - P_i^{\text{LD}}(t) \quad (17)$$

$$Q_i(t) = Q_i^{\text{DG}}(t) + Q_i^{\text{SNOP}}(t) - Q_i^{\text{LD}}(t) \quad (18)$$

$$V_{i\min} \leq V_i(t) \leq V_{i\max} \quad (19)$$

$$I_l^2(t) \leq I_{l\max}^2 \quad (20)$$

$$P_i^{\text{DG},\min} \leq P_i^{\text{DG}}(t) \leq P_i^{\text{DG},\max} \quad (21)$$

式中 $P_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 注入的有功功率, $P_i^{\text{DG}}(t)$ 为 t 时刻节点 i 处连接的 DG 发出的有功功率, $P_i^{\text{SNOP}}(t)$ 为 t 时刻节点 i 处连接的 SNOP 发出的有功功率, $P_i^{\text{LD}}(t)$ 为 t 时刻节点 i 的有功负荷, MW; $Q_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 注入的无功功率, $Q_i^{\text{DG}}(t)$ 为 t 时刻节点 i 处连接的 DG 发出的无功功率, $Q_i^{\text{SNOP}}(t)$ 为 t 时刻节点 i 处连接的 SNOP 发出的无功功率, $Q_i^{\text{LD}}(t)$ 为 t 时刻节点 i 的无功负荷, Mvar; $V_i(t)$ 为节点 i 处的电压, $V_{i\max}$ 、 $V_{i\min}$ 为节点 i 电压上下限, kV; $I_{l\max}$ 为支路 l 的电流幅值上限, kA; $P_i^{\text{DG},\min}$ 、 $P_i^{\text{DG},\max}$ 分别为节点 i 处分布式电源出力上下限, MW。

2.4.3 求解算法

SNOP 的优化配置属于非线性求解问题,该文将 SNOP 各时刻的有功输出 P 、无功输出 Q_1 、 Q_2 作为粒子群位置,将综合效用值作为适应度,采用粒子群算法进行优化计算,算法流程如图 3 所示。

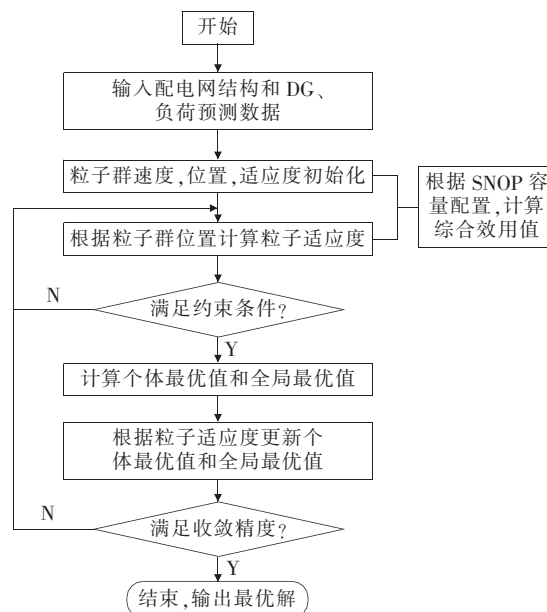


图 3 粒子群算法程序流程

Figure 3 The program flow of PSO

3 算例分析

采用 IEEE 33^[17-19] 节点系统对该文提出的模型进行计算验证分析,网络拓扑如图 4 所示。IEEE 33 节点系统包含 32 条支路、5 条联络开关支路 (TS1-TS5),电压基准值为 12.66 kV,基准功率为 10 MV·A,节点电压约束取 0.95~1.05 p.u.,节点电压的优化区间取 0.98~1.02 p.u.,支路功率约束取 5 MV·A。设定 2 台风机的接入位置为 18、22 节点,接入容量均为 2.4 MW;2 台光伏电源的接入位置为 25、33 节点,接入容量均为 2 MW;负荷和分布式电源出力的变化情况如图 5 所示,假定采样间隔为 1h,并假设在各个采样时段内负荷和分布式电源出力保持不变。

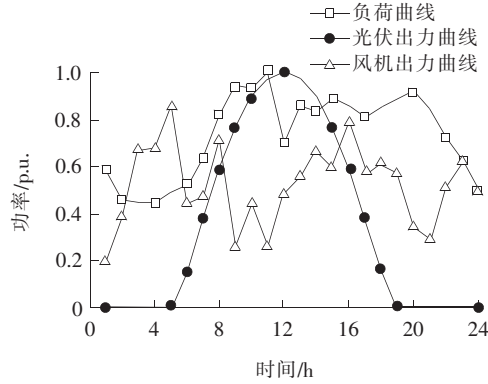


图 5 负荷与分布式电源日运行曲线

Figure 5 Daily operation curve of loads and DGs

3.1 SNOP 安装位置的影响

为了比较 SNOP 安装在不同位置时的优化效果,分别对安装在不同位置的 SNOP 进行以综合效用值最大为目标的优化配置,其结果如表 1 所示。

结果表明,使用 SNOP 能够降低系统有功损耗,减小系统电压偏差,改善系统馈线负载平衡度,并能减小分布式电源的切除量。此外,SNOP 安装在不同位置对系统性能改善作用不同,对应 SNOP 的安装容量也不同。与初始系统相比,在 TS4 处 (即 18 与 33 节点之间)安装 SNOP 能够使网络损耗降低 17.69%,使电压偏差降低 57.77%,使分布式电源切除量减小 19.05%,使馈线负载平衡度降低 14.01%。由于 18 与 33 节点均是馈线末端节点

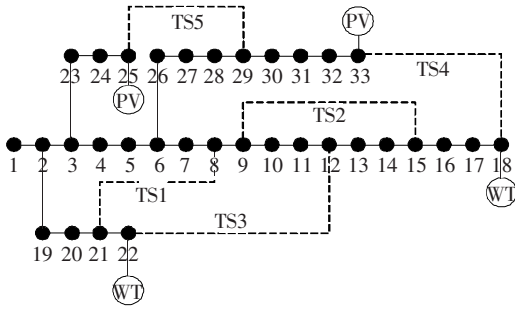


图 4 IEEE 33 节点算例

Figure 4 IEEE 33-bus system

表 1 不同安装位置的 SNOP 优化配置结果

Table 1 SNOP optimal allocation results under different installation positions

安装位置	有功损耗/ (MW·h)	电压偏差	分布式电源切 除量/(MW·h)	馈线负载 平衡度	SNOP 容量/ (MV·A)	综合效 用值
TS1	1.789 6	5.913 5	12.9	89.971 6	1.683 3	0.292 7
TS2	1.679 3	4.860 0	11.1	79.848 7	2.702 5	0.259 8
TS3	1.963 7	5.976 1	10.5	91.042 5	1.849 0	0.287 3
TS4	1.490 6	3.299 6	11.9	76.832 4	2.229 1	0.351 3
TS5	1.742 6	4.706 2	13.1	88.008 7	2.039 6	0.292 9
不安装 SNOP	1.810 9	7.813 8	14.7	89.348 3	—	—

且均有分布式电源接入,在 TS4 处安装 SNOP 对配电网运行状态的改善最为明显,综合效用值最大。下面以 SNOP 安装在 TS4 处为例,对 SNOP 的优化效果进行详细分析。

3.2 SNOP 优化效果分析

安装在 TS4 处的 SNOP 在各个时刻传输的有

功率和发出的无功功率如图 6 所示。由于 18 节点接入风机,33 节点接入光伏电源,结合图 5 可以看出,在一天范围内,光伏出力大幅变化,风机出力相对波动较小。当光伏出力小于风机出力时,SNOP 由 18 节点向 33 节点传输有功功率;当光伏出力大于风机出力时,SNOP 由 33 节点向 18 节点

传输有功功率。即 SNOP 可以平衡系统有功功率的分配情况,改善系统运行。同时,当负荷较大而分布式电源出力较小时,SNOP 向系统提供无功功率,起到无功补偿的作用。

与传统的 TS 相比,SNOP 可以根据分布式电源出力与负荷需求的波动情况而实时调节输出,从而实现动态优化,优化结果如图 7~9 所示。由图可以看出,SNOP 通过动态调节馈线间传输的有功功率及 SNOP 发出的无功功率,对各时刻的功率损耗和负载平衡度进行优化。同时,SNOP 通过电压无功控制,在提高系统消纳率的同时,能够更好地将节

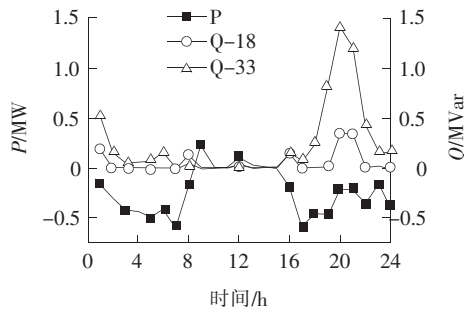


图 6 SNOP 各时刻的出力情况

Figure 6 Active power transmission and reactive power compensation of SNOP

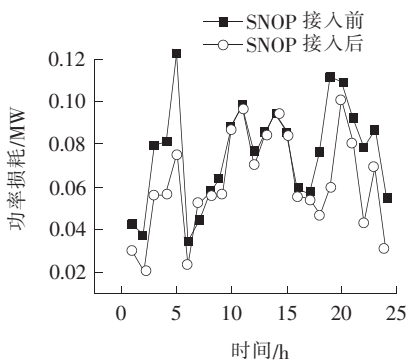


图 7 SNOP 接入前后系统在各时段的功率损耗情况

Figure 7 Active power losses in each time period before and after SNOP installation

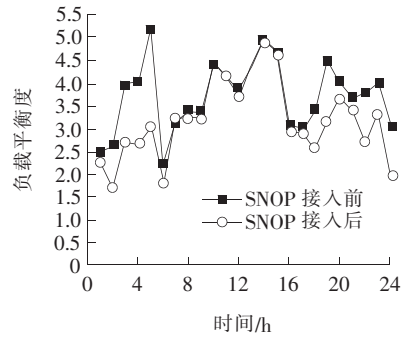


图 8 SNOP 接入前后系统负载平衡度改善情况

Figure 8 Load balancing index in each time period before and after SNOP installation

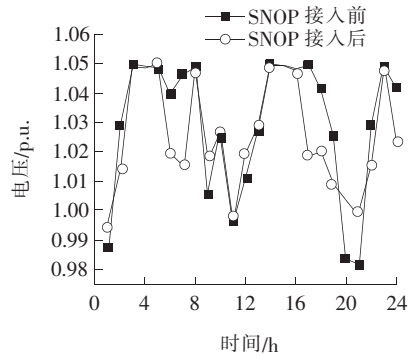


图 9 SNOP 接入前后节点 18 电压水平改善情况

Figure 9 Voltage profile of bus 18 in each time period before and after SNOP installation

点电压标幺值控制在期望水平 0.98~1.02 之间,改善了系统的供电质量。

3.3 方法验证

为了验证该文提出的多维效用并合法的有效性,针对安装在 TS4 处的 SNOP,将 5 个优化指标进行等权重简单加权,并以加权得到的结果最大为优化目标进行优化配置,与多维效用并合法得到的配置结果进行了对比,如表 2 所示。

可以看出,与该文提出的多维效用并合法相比,简单加权法虽然各项系统运行指标均优于多维效用并合法,但以增大 23.5% SNOP 容量的代价,仅使

表 2 多维效用并合法与简单加权法优化配置结果对比

Table 2 Comparison of the SNOP optimal allocation results with the multi-attribute utility emergence method and weighting method

求解方法	有功损耗/ (MW · h)	电压偏差	分布式电源切 除量/(MW · h)	馈线负载 平衡度	SNOP 容量/ (MV · A)	多维效用并 合法适应度	简单加权 法适应度
多维效用并合法	1.490 6	3.299 6	11.9	76.832 40	2.229 1	0.351 3	0.305 6
简单加权法	1.433 3	2.949 33	10.8	75.179 95	2.751 9	0.312 9	0.313 4

系统等效运行指标改善了 14.7%。这是由于成本与运行指标之间不存在线性的互补特性,系统运行指标与 SNOP 的安装容量并不成正比。在简单加权法中,成本与各项系统运行指标所占的比重相同,因此在优化过程中,简单加权法以牺牲成本效用值为代价,增大了各项系统运行指标的效用值,虽然使系统得到了优化,但不够经济。多维效用利用式(15)对成本与等效运行指标进行合并,式(15)能够更好地描述两者间的非线性互补特性,使得优化结果更为合理。由于目前 SNOP 的成本较高,因此在考虑成本的 SNOP 优化配置问题中,该文提出的多维效用并合法的合理性和经济性优于简单加权法。

4 结语

该文基于多维效用并合法,并考虑 SNOP 的功能定位,提出以综合效用值最大为目标函数的 SNOP 优化配置模型。通过算例分析,对所提出的优化模型与求解方法进行验证,得到以下结论:

- 1)通过比较 SNOP 安装在不同位置时的综合效用值,能够得出 TS4 处为 SNOP 最佳安装位置;
- 2)基于多维效用并合法配置 SNOP,能够以合理的 SNOP 安装容量实现系统有功损耗下降,改善系统电压水平及馈线负载平衡度,并能够提高分布式电源的消纳率,综合实现配网投资和运行效益的最大化。

由于目前对 SNOP 的研究才刚刚起步,对 SNOP 的寿命、SNOP 对环境及可靠性的影响研究还不够深入,如何将这些因素纳入评价指标体系,并利用多维效用并合法进行 SNOP 的优化配置是值得进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 杨江涛,刘佳,孙春顺,等. 计及分布式电源的配电网储能配置研究[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(1):110-116.
YANU Jiantao, LIU Jia, SUN Chunshun, et al. Research on energy storage configuration of distribution
- network considering distributed power supply[J]. Journal of Electric Power Science And Technology,2018,33(1):110-116.
- [2] Bloemink J M, Green T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points [C]//IEEE PES General Meeting. Providence, RI, USA:IEEE,2010.
- [3] 王成山,孙充勃,李鹏,等. 基于 SNOP 的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):82-87.
WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SNOP based operation optimization and analysis of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):82-87.
- [4] CAO Wangu, WU Jianzhong, Jenkins N, et al. Benefits analysis of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 165:36-47.
- [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] Golshannavaz S, Nazarpour D. Multi attribute investment planning of a grid-connected Diesel/Wind/PV/Battery hybrid energy system[J]. Journal of Renewable Energy Environment, 2014, 1(1):43-52.
- [7] HE Yin, Zhao Chen, Li Mian, et al. Utility function-based real-time control of a battery ultracapacitor hybrid energy system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(1):220-231.
- [8] Carassus L, Rásonyi M. Maximization of nonconcave utility functions in discrete-time financial market models[J]. Mathematics of Operations Research, 2016, 41(1):146-173.
- [9] Amali C, Jayaprakash D, Ramachandran B. Optimized network selection using aggregate utility function in heterogeneous wireless networks[J]. International Review on Computers & Software, 2014, 9(7):1293-1301.
- [10] 陶长琪. 决策理论与方法[M]. 北京:高等教育出

- 出版社, 2016.
- [11] Pohekar S D, Ramachandran M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning-A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2004, 8(4): 365-381.
- [12] Cao Wanyu, Wu Jianzhong, Jenkins N. Feeder load balancing in MV distribution networks using soft normally-open points [C]// *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*. Istanbul, Turkey: IEEE, 2015.
- [13] 晏阳, 廖清芬, 胡静竹, 等. 基于 SNOP 的主动配电网多时间尺度优化策略[J]. *电力建设*, 2016, 37(2): 125-131.
- YAN Yang, LIAO Qingfen, HU Jingzhu, et al. Multi-time scale optimization strategy of active distribution network based on SNOP[J]. *Electric Power Construction*, 2016, 37(2): 125-131.
- [14] LONG Chao, WU Jianzhong, 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.
- [15] Bloemink J M, Green T C. Increasing photovoltaic penetration with local energy storage and soft normally-open points [C]// *2011 IEEE power and energy society general meeting*. Detroit, MI, USA: IEEE, 2011.
- [16] 邓鋈芑, 郑洁云, 陈旷, 等. 考虑可靠性及电压稳定性的主动配电网多目标分层规划[J]. *电力科学与技术学报*, 2018, 33(4): 5-14.
- DENG Junpeng, ZHENG Jieyun, CHEN Kuang, et al. Multi-objective two-layer planning for active distribution network by considering economics, reliability and voltage stability[J]. *Journal of Electric Power Science And Technology*, 2018, 33(4): 5-14.
- [17] 莫超, 吴杰康, 简俊威. 分布式电源配电网模糊多目标无功优化配置[J]. *智慧电力*, 2018, 46(5): 33-39.
- MO Chao, WU Jiekang, JIAN Junwei. Fuzzy multi-objective reactive power optimization of distribution network with distributed generation[J]. *Smart Power*, 2018, 46(5): 33-39.
- [18] 范闻博, 关石磊, 符金伟, 等. 配电自动化潮流计算测试平台设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(8): 117-122.
- FAN Wenbo, GUAN Shilei, FU Jinwei, et al. Test bench design for distribution automation power flow calculation[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(8): 117-122.
- [19] 孙顺祥, 李晓明, 张繁碧, 等. 基于网络结构重要度和安全隐患脆弱度的配电网脆弱线路辨识[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(14): 113-119.
- SUN Shunxiang, LI Xiaoming, ZFIANG Fanbi, et al. Identification of vulnerable lines in the distribution network based on network structure importance and potential hazard vulnerability [J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(14): 113-119.