

考虑时序特性的分布式光伏接入配电网的 选址定容问题研究

张文祺,王琦,徐乾宸,姜宁秋,朱然,陈良耳,陆斌

(南京师范大学电气与自动化工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 针对分布式光伏选址定容问题,根据负荷和分布式光伏的时序特性进行数学建模,在不考虑时序特性和考虑时序特性两种情况下,以网络损耗为优化目标利用蚁群算法分别得到两种不同的分布式光伏选址定容优化配置方案.通过两种方案的对比分析,说明了分布式光伏接入配电网后对网络损耗和节点电压的优化改善情况,并验证了考虑时序特性进行优化配置的必要性.

[关键词] 分布式光伏,时序特性,网络损耗,蚁群算法

[中图分类号] TM715 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2017)03-0022-07

Optimal Locating and Sizing of Distributed Photovoltaic in Distribution Network Considering Timing Characteristics

Zhang Wenqi, Wang Qi, Xu Qianchen, Jiang Ningqiu, Zhu Ran, Chen Lianger, Lu Bin

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The paper makes a mathematical modeling based on timing characteristics of loads and distributed photovoltaic. For two cases that we are considering and not considering the timing characteristics, we obtain two different plans for optimal site selection and capacity determination of distributed photovoltaic. By utilizing ant colony optimization, we order to optimize network loss. By comparing two plans, we show the optimization resulting from distributed photovoltaic access to distribution network on network loss and node voltage. It also verifies the necessity of considering the timing characteristics.

Key words: distributed photovoltaic, timing characteristics, network loss, ant colony optimization

光伏(photovoltaic, PV)发电按规模可以分为两种:一种是直接与输电网相连的容量较大的集中式光伏电站;另一种是装机规模较小并分散布置在用户侧附近为特点的分布式光伏,其为分布式电源(distributed generation, DG)的一种类型.因为分布式光伏的出力与外部光照强度有着直接的关系,所以其出力有着明显的间接性和波动性.在分布式光伏大量接入配电网后,会对配电网产生很大的影响,包括电压水平、网损和可靠性等.其影响程度与分布式光伏的安装位置及其容量有着紧密的联系,合理的安装位置和容量能有效改善电压情况以及减少网损等,但如果配置不合理则会产生较大的负面效果,因此对分布式光伏的选址定容进行科学合理的规划有着重要的意义^[1-2].

DG的选址定容优化问题是一个求解多变量的非线性问题.国内外学者对DG的优化配置已经进行了不少的研究工作.文献[3]采用粒子群算法寻找DG选址定容的最优解,但是其收敛速度较慢且容易陷入局部最优解.文献[4]从负荷点对网损的敏感度来确定安装DG的位置并调整接入的DG容量来达到网损最小的目标,但由于DG出力的波动性以及负荷在一天中的时序性,该方法的结果可能并不准确.文献[5]以DG中的风力发电和光伏发电为优化对象,考虑到两种发电方式出力的时序互补特性,利用遗传算法来确定优化两种发电方式的安装比例以及位置,但其收敛速度较慢.文献[6]提出了一种综合考虑全局

收稿日期:2016-12-27.

基金项目:江苏省智能电网技术与装备重点实验室课题资助.

通讯联系人:王琦,博士,副教授,研究方向:可再生能源发电技术. E-mail: wangqi@njnu.edu.cn

网损和局部网损的优化方法,虽然某些线路网损减少较多,但其全局网损的优化结果并不十分明显. 现今的研究虽然在各自的研究角度都有相应成果,但也均具有各自的局限性,因此针对 DG 的选址定容问题依旧是一个值得深入研究的问题.

针对分布式光伏的选址定容优化问题,本文考虑了分布式光伏的出力特点以及一天中负荷的时序特点,首先建立了分布式光伏以及用电负荷的时序数学模型,以 PG&E33 节点系统为例,将综合网损最小作为优化目标,采用改进的蚁群算法对分布式光伏进行全局最优求解.

1 分布式光伏选址定容的数学模型

1.1 功率负荷时变模型

城市用电负荷大小与时间段有着密切的联系,一般情况下用电负荷曲线往往有着如下的规律:早上 7 点至 9 点为负荷低谷,然后负荷大小缓缓爬升,至中午达到一个高峰,过了下午 3 点过后再逐渐下降. 图 1 为一区域某典型日中的日负荷曲线图,横坐标为一天中所处时间,纵坐标为小时负荷曲线上的各值与日负荷峰值的比值.

将上述日负荷曲线按时间可分为 n 段,建立如下的负荷模型:

$$P_{\text{load}} = \begin{cases} P_1, & t_0 < t \leq t_1, \\ P_2, & t_1 < t \leq t_2, \\ \vdots & \vdots \\ P_{n-1}, & t_{n-2} < t \leq t_{n-1}, \\ P_n, & t_{n-1} < t \leq t_n. \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_n = \int_{t_n}^{t_{n+1}} P_l dt$, P_l 为负荷点的实时负荷大小与日负荷曲线峰值的比值. 通过将负荷的分时段线性处理可以便于后面的优化算法处理.

1.2 分布式光伏出力的数学模型

分布式光伏发电特指采用光伏组件,将太阳能直接转换为电能的分布式发电系统. 它是一种新型的、具有广阔发展潜力的发电和能源综合利用方式,它倡导就近发电、就近并网、就近转换、就近使用的原则,不仅能够有效提高同等规模光伏电站的发电量,同时还有效解决了电力在升压以及长途传输途中的损耗问题.

根据相关文献介绍^[7],光伏电池阵列中单个光伏电池的输出模型为:

$$P = V_m \cdot I_n = mV \cdot nI = mnV \left[I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - (V + IR_s)/R_{sk} \right]. \quad (2)$$

式中,

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i(T - T_r)] \frac{S}{100}. \quad (3)$$

I_{sc} 为电池短路电流, k_i 为短路电流温度系数, T 为电池温度(K), T_r 为基准温度 = 301.18 K, S 为整体日光辐照度 (mW/cm^2).

由式(2)和式(3)可知分布式光伏的出力与光照强度有着直接联系,光照强度越大则光伏出力越大. 一天中早上和傍晚光照强度较弱因此光伏出力较少,而正午与下午一段时间为光照强度最大的时刻,此时光伏出力也较大. 由于光伏板接收到的阳光容易被空中的云朵以及周围树枝阴影遮挡,导致光伏出力有很大的随机性和波动性. 图 2 为某地区的分布式光伏出力曲线,横坐标为一天中所处时间,纵坐标为光伏出力与其一天中出力峰值的比值.

为了减少分布式光伏出力波动对配电网的影响,可以在分布式光伏侧加装一定的储能装置来平缓分布式光伏的出力达到

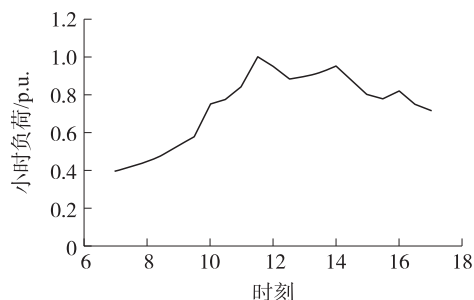


图 1 区域典型日负荷曲线

Fig. 1 Regional typical daily load curve

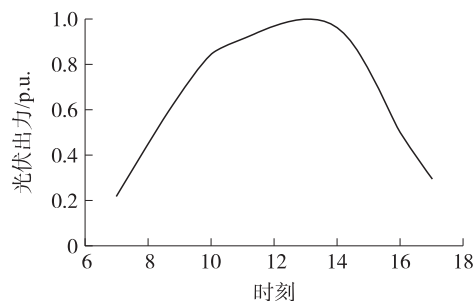


图 2 光伏出力曲线图

Fig. 2 Photovoltaic output curve

与配电网的可靠并网要求. 将上述光伏出力曲线按时间可以分为 m 段, 建立如下的光伏时序出力模型:

$$P_{DG} = \begin{cases} P'_1, & t_0 < t \leq t_1, \\ P'_2, & t_1 < t \leq t_2, \\ \vdots & \vdots \\ P'_{m-1}, & t_{m-2} < t \leq t_{n-1}, \\ P'_m, & t_{m-1} < t \leq t_n. \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P'_m = \int_{t_m}^{t_{m+1}} P_{DG} dt$, P_{DG} 为分布式光伏与配电网并网的输出功率. 将分布式光伏的出力数据进行分段线性处理后可以方便后续算法优化.

1.3 目标函数

本文为了研究分布式光伏接入对配电网网损的影响, 且对于配电网的规划而言其中网络损耗是一项重要的经济指标, 因此评估指标直接选用了系统网损为优化目标函数.

分布式光伏接入配电网能够使配电网网损得到明显的下降, 减少电能传输过程中的损耗从而提高能源利用效率. 文献[8]提出了配电系统的网损评价指标, 定义如下:

$$I_p = \frac{P_{\text{lossDG}}}{P_{\text{loss}}}. \quad (5)$$

式中, I_p 是系统的网损评价指标, P_{lossDG} 和 P_{loss} 分别表示安装分布式光伏和未安装分布式光伏时的某个时段内配电网网损值. I_p 可以有效反映出分布式光伏接入配电网后对网损的影响变化情况^[9]. P_{lossDG} 和 P_{loss} 的计算方法为:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \cdot R_i. \quad (6)$$

式中, P_{loss} 为配电网网损值, P_i 和 Q_i 为支路 i 末端的有功和无功负荷, U_i 为支路 i 的末端电压值, R_i 为支路 i 的电阻值, n 为支路数.

1.4 约束条件

分布式光伏的选址定容问题的约束包括光伏投资安装约束和系统运行约束, 分别为:

(1) 分布式光伏安装节点数约束

$$\sum_{i=1}^N U_i \leq D. \quad (7)$$

式中, N 代表可安装分布式光伏的节点总数, U_i 代表在 i 节点是否安装分布式光伏, 0 代表不安装, 1 代表安装, D 是分布式光伏可安装的最大节点数.

(2) 分布式光伏安装容量约束

由于分布式光伏的出力随机波动性较大且输出中带有大量的谐波, 其如果接入容量较大会对配电网的潮流带来一定的影响, 从而对电力用户的电能质量造成恶化. 根据《分布式电源接入电网技术规定》中第 4 条规定, 分布式电源接入配电网的总容量不应超过上一级变压器供电区域内最大负荷的 25%. 因此, 需要对分布式光伏接入配电网的总容量进行约束, 其约束表达式为:

$$\sum_{i=1}^N P_{DG_i} \leq P_{DG}. \quad (8)$$

式中, P_{DG_i} 为各接入点实际安装的分布式光伏容量, P_{DG} 为配电网中允许接入的分布式光伏总容量.

(3) 节点电压约束

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max}, \quad i \in N_i. \quad (9)$$

式中, $U_{i,\min}$ 和 $U_{i,\max}$ 为节点 i 处电压 U_i 的下限和上限, N_i 为配电系统的节点总数.

(4) 功率平衡约束

$$P_S + \sum_{i=1}^N P_{DG_i} = P_{\text{load}} + P_{\text{loss}}. \quad (10)$$

式中, P_S 为发电机组供电量, P_{load} 为配电网中的用电负荷总量, P_{loss} 为配电网总网损.

1.5 潮流计算时分布式光伏的处理

分布式光伏一般安装在靠近用电负荷侧的母线处,为了简化计算,考虑将分布式光伏作为恒定功率因数的 PQ 节点进行处理^[4]. 因为分布式光伏的安装位置直接靠近负荷侧,则可以直接假设分布式光伏安装在负荷节点处. 假设支路 i 的负荷为 $P_i + jQ_i$, 分布式光伏的输出功率为 $P_{DG_i} + jQ_{DG_i}$, 降压变压器的损耗再次忽略不计,此时在进行潮流计算时,支线 i 的负荷可以等效为:

$$P_L + jQ_L = (P_i - P_{DG_i}) + j(Q_i - Q_{DG_i}). \quad (11)$$

2 蚁群优化算法求解光伏配置

蚁群算法是人们从蚁群觅食行为中受到启发而开发出的一种启发式算法. 它基于对自然界中真实蚁群的觅食行为的研究,利用制造人工蚂蚁来模拟真实的蚁群协作过程. 算法利用若干个蚂蚁共同构造解路径,通过蚂蚁信息素的遗留和挥发来逐渐提高解的质量,最终达到优化目的,求得最优解^[10-11].

假设可安装分布式光伏的节点位置数为 N , 在节点 i 可能安装的分布式光伏容量为 M , 那么分布式光伏的选址定容优化方案搜索可以用图 3 来表示. 在编写优化算法程序时,利用一个二维数组来表示分布式光伏的选址和定容,利用数组的一维代表分布式光伏的安装节点位置,数组的二维则可以代表分布式光伏的安装容量^[12-13].

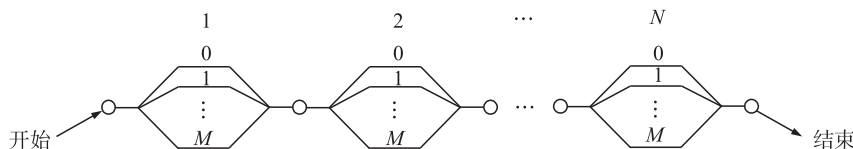


图3 分布式光伏选址定容方案搜索示意图

Fig. 3 Schematic diagram of distributed PV location and capacity

信息素更新公式如下:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1-\rho)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^k. \quad (12)$$

式中, $\Delta\tau_{ij}^k$ 为第 k 只蚂蚁向它所经过的路径上释放的信息素量, τ_{ij}^k 为各路径上的信息素量, 代表着各路径的优良性, 信息素越高的路径则代表其越优, 反之则越差. ρ 为信息素挥发因子, 表示着蚂蚁对之前决策的遗忘程度, 用以控制以前搜索历史的影响, 其取值范围为 $\rho \in [0, 1]$. $\Delta\tau_{ij}^k$ 与 P_{loss}^k 有如下关系:

$$\Delta\tau_{ij}^k \propto \frac{1}{P_{loss}^k}. \quad (13)$$

式中, P_{loss}^k 为在第 k 只蚂蚁所选路径上安装光伏后的网损结果.

蚁群算法中的需要设置的参数对优化结果有着直接的影响, 下面列出它们的经验设置, 信息素挥发因子 ρ 取值一般为 0.1. 蚂蚁数量 m 取 10~20 较好, 如果蚂蚁数量过少, 算法的搜索能力也就较差, 容易得到次优解, 但过多的蚂蚁也会使优化算法难以收敛. 初始信息素浓度 τ_0 一般取一个较小的正值, 在本文中初始信息素浓度取 1 能得到不错的结果. 用蚁群算法以网损最优为目标的分布式光伏配置流程如图 4 所示.

3 算例分析

3.1 算例参数

本文采用在文献[14]中的 PG&E33 节点配电系统作

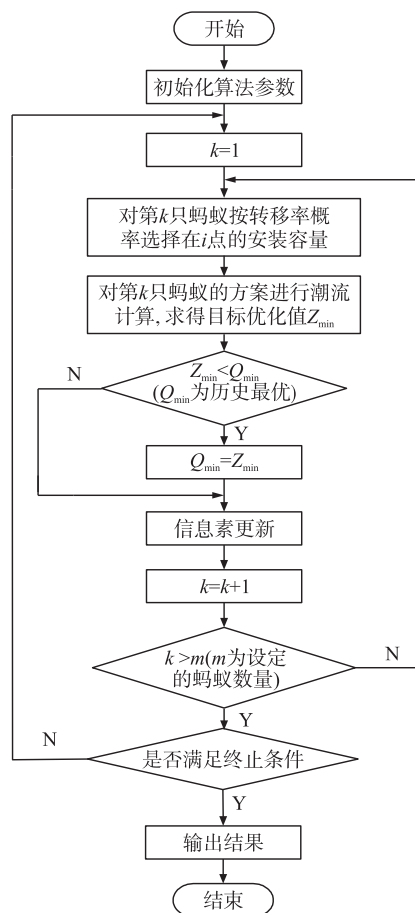


图4 求解网损最优解流程图

Fig. 4 Flow chart of optimal solution for network loss

为算例,如图 5 所示. 系统额定电压 12.66 kV,峰值总负荷为 3 715+j2 300 kVA,系统共有 33 个节点. 规划待选安装分布式光伏的节点有 12 个,图中用黑色圆点表示. 拟接入的分布式光伏数量为 4 个,其容量范围为 10 kW 至 300 kW 之间,且只能取 10 kW 的整数倍,分布式光伏运行时的功率因数 $\cos \varphi=1$,安装的分布式光伏容量总和小于配电网负荷总和的 20%.

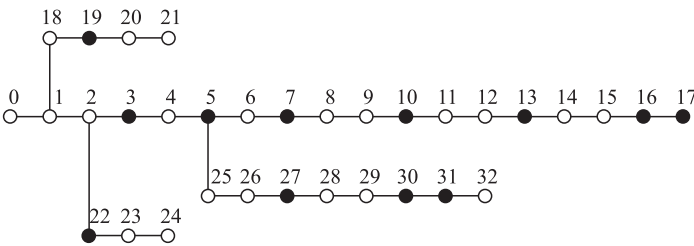


图 5 PG&E33 节点配电系统图

Fig. 5 Diagram of PG&E33 node distribution system

3.2 不考虑时序特性

若不考虑分布式光伏和负荷的时序特性,即分布式光伏出力始终为其额定容量,负荷大小也均处于最高负荷点. 采用本文优化算法得到的分布式光配置方案如表 1 所示.

分布式光伏安装的总容量为 740 kW,小于配电网负荷总和的 20%,即为 742.5 kW,满足要求.

优化前,整个配电网的网损值为 205.50 kW. 选用优化后的分布式光伏配置方案后,网损降为 130.03 kW,比优化前系统网损降低了 36.73%,从而能看出本文的优化算法能取得较好的优化效果. 图 6 为优化前后的各节点电压幅值对比,从中可以发现优化后各节点的电压值都有了一定的提升,电压较低的 17 节点电压从 0.895 4 p.u.提升至 0.939 7 p.u.,32 节点电压从 0.9 p.u.提升至 0.938 8 p.u.,优化后不仅减少了系统网损还大大改善了电网的电压质量.

表 1 分布式光伏的优化安装位置及容量

Table 1 Optimal installation location and capacity of distributed PV					
分布式光伏安装位置	7	13	16	30	总计
分布式光伏容量(kW)	30	120	290	300	740
功率因数	1	1	1	1	—

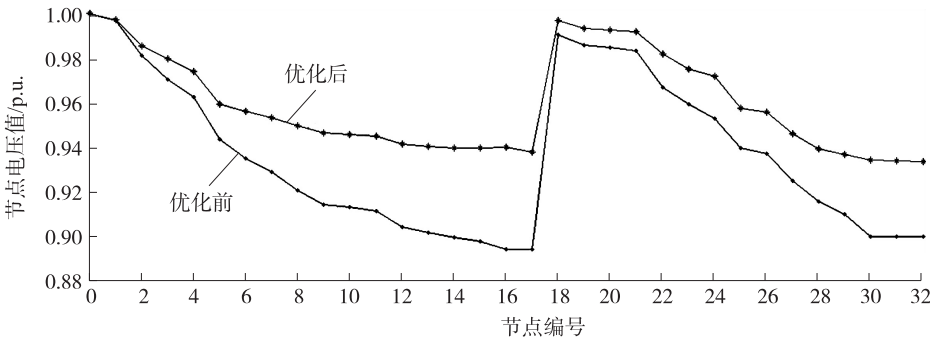


图 6 配电网优化前后电压对比

Fig. 6 Voltage comparison before and after optimization of distribution network

3.3 考虑时序性

本文通过模拟实际中的负荷和分布式光伏出力的时序特性,模拟情景中以中午 11 时的负荷为基准值,建立的负荷的时序模型如下:

$$P_{load} = \begin{cases} 0.75 \text{ p.u.}, & 7 \leq t < 9, \\ 0.9 \text{ p.u.}, & 9 \leq t < 11, \\ 1.0 \text{ p.u.}, & 11 \leq t < 15, \\ 0.85 \text{ p.u.}, & 15 \leq t < 17. \end{cases}$$

(14)

模拟情景中以分布式光伏的额定容量作为基准值,建立的分布式光伏的出力时序模型如下:

$$P_{\text{DG}} = \begin{cases} 0.35 \text{ p.u.}, & 7 \leq t < 9, \\ 0.45 \text{ p.u.}, & 9 \leq t < 11, \\ 0.75 \text{ p.u.}, & 11 \leq t < 13, \\ 1.0 \text{ p.u.}, & 13 \leq t < 15, \\ 0.65 \text{ p.u.}, & 15 \leq t < 17. \end{cases} \quad (15)$$

图 7 为处理后的负荷和分布式光伏出力的时序特性曲线图,从图中可以看出分布式光伏如果配置合理其实是可以起到很好的削峰作用的,大大减少用电峰值时的压力.

在考虑负荷和分布式光伏时序特性情况下,需要根据所分各时段内的分布式光伏出力和负荷值来计算各时段内的网损值,然后再进行求和并求得平均值即为所关注时段中的平均网损值.

在本文模拟负荷和分布式光伏的时序特性情况下,以平均网损最小为优化目标,得到的优化方案如表 2 所示.

表 2 分布式光伏的优化安装位置及容量

Table 2 Optimal installation location and capacity of distributed PV					
分布式光伏安装位置	7	10	16	30	总计
分布式光伏容量/kW	60	130	270	280	740
功率因数	1	1	1	1	—

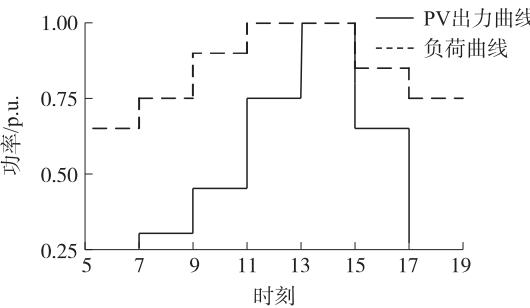


图 7 负荷和分布式光伏出力时序特性曲线图
Fig. 7 Diagram of load and distributed PV output time series characteristic curve

本文在考虑时序特性前后分别对分布式光伏进行选址定容,其方案对比如表 3 所示,其中光伏配置栏中括号外数字代表光伏安装的节点编号,括号内数字为光伏的安装容量(kW).

表 3 不同方案对比

Table 3 Comparison of different schemes

类型		光伏配置	网损/kW	网损减少比例
不考虑时序特性	不含分布式光伏	—	205.50	—
	含分布式光伏	7(30),13(120),16(290),30(300)	130.03	36.73%
考虑时序特性	不含分布式光伏	—	162.42	—
	含分布式光伏	7(60),10(130),16(270),31(280)	114.06	29.77%

由表 3 可见,在是否考虑时序特性前后,即使在未安装分布式光伏前,其网损也是不同的.实际上,用电负荷大小并非永远都是在最大负荷点处,而受到电力用户的生活习惯影响,有着自己的趋势规律的,考虑负荷的时序特性,利用一天中的平均网损来作为网损指标更符合实际情况.考虑时序特性和不考虑时序特性对分布式光伏的方案配置也有着影响,当考虑时序特性时,各时段配电网中的潮流会发生变化,有别于光伏出力和负荷为定值时的情况.因此考虑时序特性时得到的分布式光伏优化配置与未考虑时序特性时是不同的.对比两者网损减少比例会发现考虑时序特性时的减少比例低于不考虑时序特性,这是由于考虑时序特性后,分布式光伏在全天中出力并不总是以额定容量为输出,而是大部分情况中的实际出力是小于额定容量的.在考虑分布式光伏选址定容优化时,考虑时序特性更能满足负荷和光伏出力的实际情况,使得优化配置结果及其实际网损优化期望更符合实际工程需要.

从规划结果来看,在分布式光伏容量与配电系统容量之比较小时,接入越多的光伏对网损的优化越明显,而且在各支路末端接入光伏也比支路前端接入的效果好.在考虑负荷和分布式光伏的时序特性更满足电力系统实际运行情况,在这种情况下产生的优化方案也更能满足实际情况的需要.

4 结语

本文基于负荷和分布式光伏的时序特性,建立了相关数学模型,以配电网网损为优化目标采用蚁群优化算法来得到优化配置方案.通过研究分析证明了分布式光伏的接入不仅能降低配电网的网损情况,在某些线路较长的线路上安装分布式光伏可以提升线路上的电压幅值,从而改善电压分布情况.考虑到分布式光伏的出力特性与用电负荷在一天中的规律曲线具有一定的相互协调性,分布式光伏的并网运行能够在一定程度

上缓解用电负荷高峰的供电紧张. 本文将考虑时序特性的优化配置方案与未考虑时序特性的优化配置方案相比较,发现在考虑时序特性下产生的优化方案在实际场景中具有更好的效果,更符合实际规划需要. 因此各地区可以根据各自的用电规律及其日照情况规律,建立各自的时序模型进行优化,从而得到最符合自身情况的优化方案.

[参考文献] (References)

- [1] 张节潭,程浩忠,姚良忠,等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(16):1-7.
ZHANG J T, CHENG H Z, YAO L Z, et al. Study on siting and sizing of distributed wind generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 1-7. (in Chinese)
- [2] 刘科研,刘永梅,盛万兴,等. 考虑电压约束的分布式电源接入配电网最大准入容量计算方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 81-87.
LIU K Y, LIU Y M, SHENG W X, et al. Maximal allowable DG penetration capacity calculation considering voltage constraints[J]. Electric power automation equipment, 2016, 36(6): 81-87. (in Chinese)
- [3] 刘波,张焰,杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 103-108.
LIU B, ZHANG Y, YANG N. Improved particle swarm optimization method and its application in the siting and sizing of distributed generation planning[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2008, 23(2): 103-108. (in Chinese)
- [4] 庄园,王磊. 分布式电源在配电网中优化选址与定容的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 73-78.
ZHUANG Y, WANG L. Research of distributed generation optimal layout and capacity confirmation in distribution network[J]. Power system protection and control, 2012, 40(20): 73-78. (in Chinese)
- [5] 徐迅,陈楷,龙禹,等. 考虑环境成本和时序特性的微网多类型分布式电源选址定容规划[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 914-921.
XU X, CHEN K, LONG Y, et al. Optimal site selection and capacity determination of multi-types of distributed generation in micro-grid considering environment cost and timing characteristics[J]. Power system technology, 2013, 37(4): 914-921. (in Chinese)
- [6] 王显花,孙鹏,李波,等. 一种综合考虑全网和局部的网损优化方法[J]. 电气传动自动化, 2014, 36(5): 15-20.
WANG X H, SUN P, LI B, et al. A comprehensive consideration of the whole and local network loss optimization method[J]. Electric drive automation, 2014, 36(5): 15-20. (in Chinese)
- [7] 赵争鸣,刘建政,孙晓英. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
ZHAO Z M, LIU J Z, SUN X Y. Solar photovoltaic power generation and its application[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [8] RAU N S, WAN Y. Optimum location of resources in distributed planning[J]. IEEE transactions on power systems, 1994, 9(4): 2 014-2 020.
- [9] 夏澍,周明,李庚银. 分布式电源选址定容的多目标优化算法[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 115-121.
XIA S, ZHOU M, LI G Y. Multi-objective optimization algorithm for distributed generation locating and sizing[J]. Power system technology, 2011, 35(9): 115-121. (in Chinese)
- [10] BULLNHEIMER B, HARTL R F, STRAUSS C. A new rank based version of the ant system—a computational study[J]. Central European journal of operations research, 1997, 7(1): 25-38.
- [11] 段海滨,王道波,朱家强. 蚁群算法理论及应用研究的进展[J]. 控制与决策, 2004, 19(12): 1 321-1 326.
DUAN H B, WANG D B, ZHU J Q. Development on ant colony algorithm theory and its application[J]. Control and decision, 2004, 19(12): 1 321-1 326. (in Chinese)
- [12] 伍春林. 基于改进蚁群算法的微电网 DG 选址与定容[D]. 长沙:中南大学,2010.
WU C L. Siting and sizing of DG for microgrid based on improved ant colony algorithm[D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- [13] 符杨,孟令合,胡荣. 改进多目标蚁群算法在电网规划中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 57-62.
FU Y, MENG L H, HU R. Application of improved multi-objective ant colony algorithm in power network planning[J]. Power system technology, 2009, 33(18): 57-62. (in Chinese)
- [14] 汪兴旺,邱晓燕. 基于改进粒子群算法的配电网分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 16-20.
WANG X W, QIU X Y. Distributed generation planning in distribution system based on modified particle swarm optimization algorithm[J]. Power system protection and control, 2009, 37(14): 16-20. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]