

考虑合理弃光的配电网光伏最大接入容量研究

张嘉澍¹, 吕 泉¹, 郭雪丽², 张 忠¹, 周 玮¹

(1. 大连理工大学电气工程学院, 大连 116024; 2. 国网南阳供电公司, 南阳 473005)

摘要: 考虑光伏可通过逆变器以弃光形式参与配电网调节, 提出以合理弃光率为约束的配电网光伏多点接入最大容量评估模型, 将传统评估模型中配电网接入光伏后运行状态指标不越限或越限概率不超标的约束转化为越限后果不超标的约束。针对海量场景, 根据问题自身技术特性和电网运行规律, 对模型本身和考虑的场景进行简化, 最终使用遗传算法实现了求解。基于 IEEE 33 节点的算例验证了评估模型和求解算法的有效性, 且表明, 允许 5% 的弃光率可提升 40% 的光伏接入容量, 提升效果显著。

关键词: 光伏发电; 配电网; 分布式电源; 接纳容量; 弃光

中图分类号: TM715

文献标志码: A

0 引言

为实现双碳目标, 中国正在市县级配电网中大力发展战略性分布式光伏^[1]。在配电网层面发展分布式发电具有接近用户侧、降低输电损耗、与传统电网互为备用、提高电网运行安全性等^[2]多种优势。然而, 分布式光伏接入配电网后, 也会对电网运行产生多方面的影响^[3-6]。而这些影响反过来又会成为制约分布式光伏进一步接入的限制因素, 包括节点电压^[7-9]、线路功率^[10-12]、供电可靠性^[13]、短路电流^[14]等。其中, 节点电压包括电压越限^[7-9]和电压波动^[7,14]。随着分布式光伏越来越多地接入配电网, 如何合理、有效确定配电网可接纳的最大接入容量就成为规划决策部门亟待明确的问题, 也逐渐成为近些年研究热点^[1,15-16]。

分布式光伏最大接入容量问题本质上是以光伏接入后未来各运行场景下电网电压、线路功率等运行状态变量不越限为约束, 以各规划节点接入容量总和最大为目标的优化问题。已有模型主要差异在于考虑的运行状态变量约束不同以及对配电网运行进行主动控制手段的不同。在约束方面, 基本约束为节点电压约束^[17-26]、线路功率约束^[23,26], 也有文献进一步考虑了短路电流约束^[14]、电压波动约束^[14]等。在考虑对配电网运行主动控制方面, 主要考虑的措施包括调压变压器分接头调节^[20-21]、逆变器功率控制^[21-22]、无功补偿^[20-22]、配置储能电池^[24-25]等。配电网对运行状态的主动控制能力越强, 其对光伏接入后负面影响的控制能力就越强, 接入光伏的能力也就越强。但在对实际电网评估时, 并不是所有电网都具有主动控制能力, 需根据电网实际情况合理选择考虑的控制

方式。

分布式光伏最大接入容量问题属于长期容量规划问题。理论上讲, 在所确定的容量配置方案下, 应使得未来所有可能运行场景下的运行状态指标均不越限, 以保证电网运行的安全性要求。因此, 现有研究中, 部分文献针对单一极端场景^[18,20-22]或选取典型日^[23], 以严格满足运行约束为条件, 研究分布式电源的最大功率, 进而推出分布式电源的最大接入容量。例如, 文献[18]在考虑了电压与线路功率约束的基础上, 建立考虑负荷不确定性的分布式电源接入配电网最大准入容量的双层规划模型, 通过对负荷与光伏的不确定性进行分析, 针对最易出现约束越限的极端场景进行光伏容量的求解, 保证了最大接入容量下电网运行的安全性; 文献[20]额外考虑了变压器分接头和无功补偿设备调节电压的控制手段, 运用了鲁棒性优化算法, 针对光伏出力最大而负荷最小的极端场景进行了求解; 文献[21]对鲁棒优化模型进行改进, 并通过蒙特卡洛随机生成了 10000 种场景, 选择其中最易出现约束越限的场景进行计算, 得到最终结果; 文献[22]通过遗传算法, 针对 IEEE33 节点系统基本参数, 对单时刻分布式光伏多点接入的最大功率进行了研究; 文献[23]通过二阶锥规划对包含静态安全约束与变压器分接头调节的模型进行了化简, 选取春、夏、秋、冬中 4 个典型日进行算例分析, 验证了控制手段对光伏消纳能力的提升作用。

然而, 如果以满足极端场景(如负荷最小而光伏最大的场景)为前提, 则由于光伏和负荷的波动性和随机性, 最大接入容量就会被极端场景所限制。为此, 一些文献采用机会约束规划方法, 允许在一定概率的场景下运行状态变量值越

限,以提高允许的接入水平^[27-28]。然而,该类方法未考虑未来运行时这些状态变量越限后所引起的后果及如何处理以保证运行安全性,与实际决策心理不符。

事实上,在现有传统配电网规划和运行控制手段已成熟的前提下,可认为电网在接入光伏前在未来可能负荷场景下不会存在运行状态变量越限的问题。则光伏接入后引起的运行状态变量越限问题,主要是由于光伏注入电网有功功率和无功功率从而造成电网轻载甚至潮流逆向导致的。而考虑到光伏逆变器自身具有的控制能力^[26, 29], 在某个发电负荷场景下,当配电网运行状态指标越限后,可通过光伏逆变器控制消减有功功率和调节无功功率从而将运行状态指标控制在限值,但会造成一定程度的弃电。这意味着,当考虑光伏可通过逆变器以弃光形式参与电网调节之后,光伏并网系统在实际运行时就不会存在运行状态指标越限的问题,而只会存在越限后果处理代价(即弃光大小)的问题。因此,在分析最大容量接入问题时,也就无需再以运行状态指标不越限为约束,而是应转化为以合理弃光率为约束。

基于上述认识,本文提出以弃光率作为约束的配电网光伏最大接入容量模型。考虑电压越上限问题是当前影响光

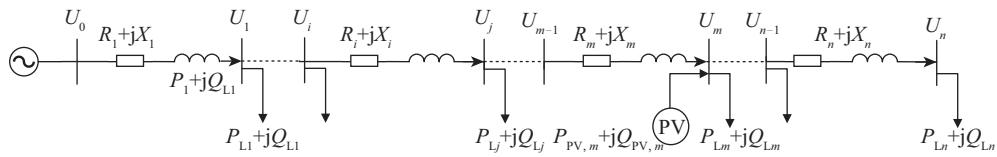


图1 典型含分布式光伏的配电网模型

Fig. 1 Typical distribution network model with distributed photovoltaic

在PV接入之前,正常运行时,节点电压会随潮流流向由首端到末端逐步降低。而在PV接入后,任意节点*i*的电压为:

$$U_{i'} = U_0 - \sum_{k=1}^i \frac{\left(P_k - \sum_{j=k}^n P_{PV,j} \right) R_k + \left(Q_k - \sum_{j=k}^n Q_{PV,k} \right) X_k}{U_{k-1}} \quad (1)$$

由式(1)可看出,光伏的接入由于减少了首端节点到光伏接入点节点输送的有功与无功功率,导致电压降落减小,从而对光伏并网点的电压起到了提升作用。特别是当光伏功率大于节点负荷功率时,式(1)中后一项括号中的值为负值,此时潮流逆向流动,导致并网点电压进一步抬高,从而越限。在分布式光伏存在的低压配电网中,线路的阻抗比R/X通常较大,因此当光伏电源的有功出力较大时,易造成接入光伏的节点电压越上限。

同理可知,通过对光伏输出的有功功率与无功功率进行控制,就可实现对节点电压的调节,从而避免越限。

1.2 光伏逆变器运行控制模型

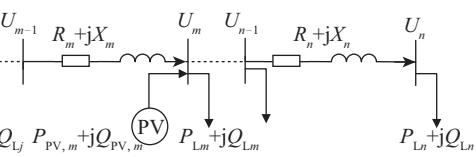
对光伏而言,其可通过逆变器控制来实现在一定范围内的调节^[21, 26, 29-30],从而避免

弃并网容量的主要因素^[1-2],该模型以电压不越上限为边界,考虑了变压器分接头、电容投切、光伏逆变器控制作为电压调节的控制手段,以电压越上限后通过控制调节到运行边界确定光伏弃电功率,进而以弃电率低于某个给定值为约束确定最大接入容量。考虑到评估时需考虑未来海量运行场景,根据问题的自身技术特性和电网运行规律对模型本身和考虑的场景进行简化,最终使用遗传算法实现模型的求解。

1 基于弃光的节点电压控制方法

1.1 光伏接入对电压的影响

典型的光伏电源接入配电网的模型如图1所示。图1中:PV为分布式光伏电源; $P_{PV,m}$ 与 $Q_{PV,m}$ 分别为接于 m 节点的分布式光伏发出的有功与无功功率,正常情况下,分布式光伏工作在固定的功率因数; U_0 为配电网母线电压; $U_{i(i=1,2,\dots,n)}$ 为各节点电压; $P_i + jQ_i$ 为光伏接入前,由上游支路流向节点 i 的复功率,kVA; $R_i + jX_i$ 为上游相邻节点与节点 i 之间的线路阻抗,Ω; $P_{Li} + jQ_{Li}$ 为并网点本地的有功负荷和无功负荷,kVA。



电压越上限。调节控制时,光伏有功/无功功率和逆变器容量满足:

$$P_{PV} \leq \bar{P}_{PV} \quad (2)$$

$$\sqrt{(P_{PV})^2 + (Q_{PV})^2} \leq S_{PV}^{inv} \quad (3)$$

式中: \bar{P}_{PV} ——光伏的额定有功功率,kW; S_{PV}^{inv} ——光伏逆变器的容量,kW,通常是额定有功容量的1.0~1.1倍。

此外,逆变器的有功/无功控制还受功率因数的影响,可描述为:

$$P_{PV} \cdot \tan \phi_{min} \leq Q_{PV} \leq P_{PV} \cdot \tan \phi_{max} \quad (4)$$

式中: ϕ ——功率因数角; ϕ_{min} 、 ϕ_{max} ——允许的功率因数角的下限和上限, $\cos \phi$ 表示功率因数,范围一般为-0.95~0.95。

考虑上述因素后,逆变器有功功率、无功功率、容量、功率因数之间的关系如图2所示,图中阴影部分代表逆变器的可调范围空间。

1.3 光伏弃光调压策略

根据式(2)和图2所示的逆变器功率调节区间,当节点电压越上限时,逆变器可首先减少甚至吸收无功功率,以在不弃光的条件下缓解或消除电压越限,如图2中从运行点A

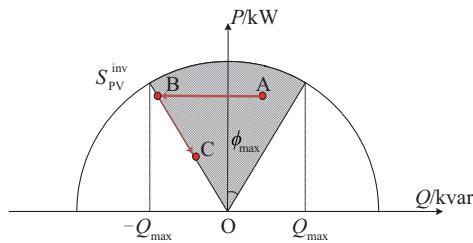


图2 逆变器P-Q控制运行区间

Fig. 2 P-Q operation area of PV inverter

转移到运行点B。但若此后电压还越限，则必须减少有功功率，同时保证无功功率尽可能小(或尽可能负的最大)，这意味着此时运行点沿BO线由B向O消减有功功率。尽管无功功率增大会提高电压，但低压配电网中线路的阻抗比通常较大，有功减少带来的电压降低分量大于无功增加带来的电压增加分量，因此节点电压就会降低。

2 考虑合理弃光的最大接入容量模型

2.1 基本原理

在现有传统配电网规划已成熟的前提下，可认为电网在接入光伏前在未来可能负荷场景下不会存在运行状态变量越限的问题。则光伏接入后引起的电压越上限问题主要是由于光伏注入电网有功功率和无功功率从而造成电网轻载甚至潮流逆向。

如第1节所述，利用光伏逆变器弃光调压，可将越限电压拉回到正常限值范围内；同理，对于其他由于光伏接入导致越限的运行状态指标(如线路功率越限)，通过弃光也可将其拉回到正常限值范围内。因此，当考虑弃光调节的控制手段时，光伏并网系统在实际运行时并不会存在行状态指标越限的问题，而只会存在弃光大小的问题。

如引言中所述，传统上将分布式光伏最大接入容量问题，描述为以光伏接入后未来各运行场景下电网电压、功率等运行状态变量不越限(或越限概率不超过规定值)为约束、以各规划节点接入容量总和最大为目标的优化数学问题。在考虑弃光调节手段后，上述模型将不再适用。需将状态变量不越限(或越限概率不超限)的约束转化为对越限后果(即弃光)的约束。

理论上讲，光伏接入容量越大，电网运行状态指标越限所引起的弃光时段和弃光电量就越多，光伏项目的经济性就越差，因此，规划时为了保证光伏项目的投资经济性，应设置一个合理的允许弃光率水平。

基于上述分析，本文将考虑弃光调节手段后的分布式光伏最大接入容量问题描述为以光伏接入后未来各运行场景下的弃光率统计值不超过给定限值为约束、以各规划节点接入容量总和最大为目标的优化问题。

2.2 优化数学模型

除了弃光调压外，传统变压器分接头控制和无功补偿均

可实现对电压的调整。本文考虑上述3种控制方式，同时为保证经济性，将弃光调压作为最后手段。

这样，考虑电网静态安全约束及3种控制方式的分布式光伏最大接入容量数学模型描述如下。

目标函数为规划节点接入的分布式光伏的总容量最大：

$$\max \sum_{i \in n} C_{PV,i} \quad (5)$$

式中： i ——电网中任一节点； n ——系统中所有节点的集合； $C_{PV,i}$ ——接入的光伏电源的容量，kW。

约束条件包括：

1)电网运行状态约束

表征光伏接入后配电网在未来各运行场景下需满足的电网静态安全约束主要有：

①电压越限约束

$$U_{\min} \leq U_i^t \leq U_{\max} \quad (6)$$

②线路功率约束

$$0 < \sqrt{P_{ij}^{t2} + Q_{ij}^{t2}} \leq S_{\max} \quad (7)$$

式中： t ——光伏接入后未来可能面临的第 t 个运行场景($t \in T$)， T 表示未来运行场景集合； i ($i=1, 2, \dots, n$)——配电网中的任一节点； j —— i 节点的相邻下游节点； U_i^t ——配电网的所有节点每一场景的节点电压； U_{\min} 和 U_{\max} ——节点电压所允许的标么值上限及下限； P_{ij}^t 和 Q_{ij}^t ——各节点之间每一场景的有功、无功功率值，kW与kvar； S_{\max} ——线路复功率允许的极限值，kVA。

2)电网运行状态变量和控制变量的函数关系

模型中，控制变量是光伏在各场景下注入电网的有功和无功功率。控制变量与电网运行状态变量之间的关系需通过潮流模型来表示：

$$P_{G,i}^t + P_{PV,i}^t - P_{L,i}^t = U_i^t \sum_{j=1}^n U_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (8)$$

$$Q_{G,i}^t + Q_{PV,i}^t - Q_{L,i}^t = U_i^t \sum_{j=1}^n U_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t + B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (9)$$

式中： P 、 Q ——有功功率和无功功率，kW与kvar；下标PV、C——光伏、并联的无功补偿设备；下标G、L——常规发电和负荷； θ_{ij} ——节点 i 、 j 之间的功角； G_{ij} 和 B_{ij} ——支路电导和电纳，S。

通过如下关系式将光伏容量与场景 t 的控制变量相关联：

$$P_{PV,i}^t \leq C_{PV,i} \times S_{PV}^t \quad (10)$$

式中： S_{PV}^t ——光伏系统在场景 t 下未考虑弃光时的有功输出标么值。

3)控制方式的约束条件

目前针对配电网的调压手段主要有调变压器分接头、并联无功补偿设备、光伏逆变器有功/无功调节，本文基于这3种控制方法建立了模型：

①变压器分接头调节

$$U_0^t = U_h^t(1 + 0.025k^t) \quad (11)$$

$$k_{\min} \leq k^t \leq k_{\max} \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^{24} |\text{sign}(k^t - k^{t-1})| \leq 6 \quad (13)$$

②并联无功补偿设备

$$Q_{\min} \leq Q_{C,i}^t \leq Q_{\max} \quad (14)$$

式中: U_0^t —— 始节点变电站出口侧电压; U_h^t —— 变压器高压侧电压; k^t —— 此时变压器分接头的位置; k_{\min} 和 k_{\max} —— 变压器分接头的档位调节下限和上限; 式(13) —— 变压器分接头一天内的调节次数限制, 一般不超过 6 次; $Q_{C,i}^t$ —— 接入的电容器发出的无功功率, kvar; Q_{\min} 和 Q_{\max} —— 电容器发出的无功功率下限和上限, kvar。

③光伏逆变器有功/无功调节

如 1.2 节所述, 逆变器的有功/无功调节需满足式(2)~式(4)表示的运行范围约束。

4) 弃光率约束

如 2.1 节所述, 以光伏接入后未来各运行场景下的弃光率不超过给定限值为约束。

$$\sum_{i \in n} \sum_{t=1}^T P_{PV,i}^t = (1 - l_{PV}) \sum_{i \in n} C_{PV,i} \sum_{t=1}^T S_{PV}^t \quad (15)$$

$$l_{PV} \leq l_{\max} \quad (16)$$

式中: l_{PV} —— 弃光率; l_{\max} —— 弃光率限值, 当前国家能源局的要求为不超过 5%^[31]。

2.3 模型分析与简化

2.3.1 模型复杂度分析

上述数学模型是以光伏接入容量最大为目标, 以接入后在一定控制手段下配电网弃光率不超过给定值为约束的优化数学模型。

该优化模型有 2 个特点: 1) 存在海量约束场景。弃光率是个统计值, 理论上讲, 模型应考虑光伏接入后寿命周期内所有可能的场景才能统计计算出准确的弃光率。例如, 若以小时为时间颗粒度, 假设光伏寿命为 20 a, 则需考虑 $20 \times 365 \times 24$ 个时段场景, 通过统计这些场景中配网运行状态越限后的弃光量进而计算得到弃光率。2) 模型约束中存在潮流方程以描述控制变量与状态变量的关系。该方程具有强烈非线性。

上述 2 个特点导致 2.2 节所建立的优化模型难以求解, 需对模型及场景进行简化。

2.3.2 模型的简化

为了进行求解, 本文根据问题的自身技术特性和电网运行规律对问题进行简化。具体如下:

1) 电压仅考虑越上限。如 1.1 节所述, 光伏接入电网后, 会造成潮流轻载甚至反向, 因此, 带来的电压问题主要是越上限。为此, 在式(6)中只考虑越上限的约束。

2) 首端降压变压器二次电压取较小的固定值。考虑弃光时一定是电压越上限, 此时为了调压, 首端降压变压器可

通过分接头调整调低二次电压。但同时为了保障电压的稳定性, 以防某个光伏脱网造成电压偏低的情况, 本文假设馈线首端电压取标幺值为 1, 则约束式(11)~式(13)可忽略。

3) 无功补偿装置运行状态固定。对于某个时段场景, 本文只是评估控制手段调用后若电压依旧越限而不得不弃光的大小, 因此对于容性无功补偿设备, 本文假设全部切除(不投入); 对于感性无功补偿设备, 本文假设全部投入。这样, 配电网电压应处于最低状态, 弃光量最小。基于该假设, 则约束式(14)可忽略。

4) 光伏逆变器功率因数固定。如图 2 和 1.3 节所示, 当电压越限需缩减有功功率时, 运行点由 BO 线从 B 向 O 减消有功功率, 因此此时逆变器功率因素为固定值。基于该假设, 则约束式(2)~式(4)可忽略。

通过上述假设, 可简化模型, 降低复杂度。

2.3.3 场景的缩减

如 2.3.1 节所述, 理论上讲, 要得到准确的弃光率, 需考虑光伏接入后较长一段时间内(如寿命周期内)的运行场景, 这会导致约束场景规模巨大, 优化模型难以求解。为此, 需对场景进行缩减。本文采用如下方法对场景进行缩减。

1) 以年为周期。考虑到负荷和光伏的波动性均是以年为周期, 而负荷与光伏具有相关性, 本文以年为时间尺度、考虑年内 8760 个时段计算弃光率。每个时段代表未来可能面临的一个场景。

2) 不考虑夜间光伏出力为零或凌晨和傍晚光伏出力较小的场景, 可缩减约一半多的场景。

3 模型的求解

3.1 问题的分步求解

尽管通过上述场景缩减技术已缩减了很多场景, 但剩余的备选场景仍多达上千个, 直接进行求解仍很困难。因此, 本文采用分步求解、动态添加场景的方式。具体如下:

1) 考虑电压最可能越限的一个或数个极端场景(如负荷最小、光伏最大的场景), 以不允许弃光为约束进行模型求解, 可得到不允许弃光下的多点光伏容量配置结果。

2) 基于上述配置结果进行一次备选场景(经 2.3.3 节场景缩减后的场景集)下的时序潮流计算, 得到这些场景下的电压分布, 并进行排序。

3) 根据弃光率估计可能弃光的场景, 并将之纳入到优化模型进行求解。由于光伏容量增大时, 之前电压接近于上限的场景一般会先越限, 因此可根据步骤 2) 中的电压排序结果从前到后选取一定的场景纳入到优化模型。

4) 在步骤 3) 求解之后, 若所有节点均弃光, 则可认为步骤 3) 计及的场景不足, 可按顺序增加场景, 重复步骤 3)。

3.2 优化模型求解方法

在实际配电网系统中, 系统通常是一个辐射网, 且各节点的负荷数据及各线路的阻抗参数不同, 根据式(1)可知, 各

节点接入不同容量的光伏对系统其他节点电压产生的影响也不同。理论上来说,在约束条件的可行域内各点接入容量的组合有无数种。尽管进行了模型简化和场景缩减,但2.2节所述模型仍由于潮流约束的存在而呈现强非线性,故而传统优化算法难于求解。

因此,需借助智能算法,用于考虑复杂场景集中的非线性约束,优化得到一种容量组合,使得接入分布式光伏后,系统运行在安全约束内,且光伏接入的总容量最大。为此,本文根据遗传算法的原理构建算法流程,如图3所示。

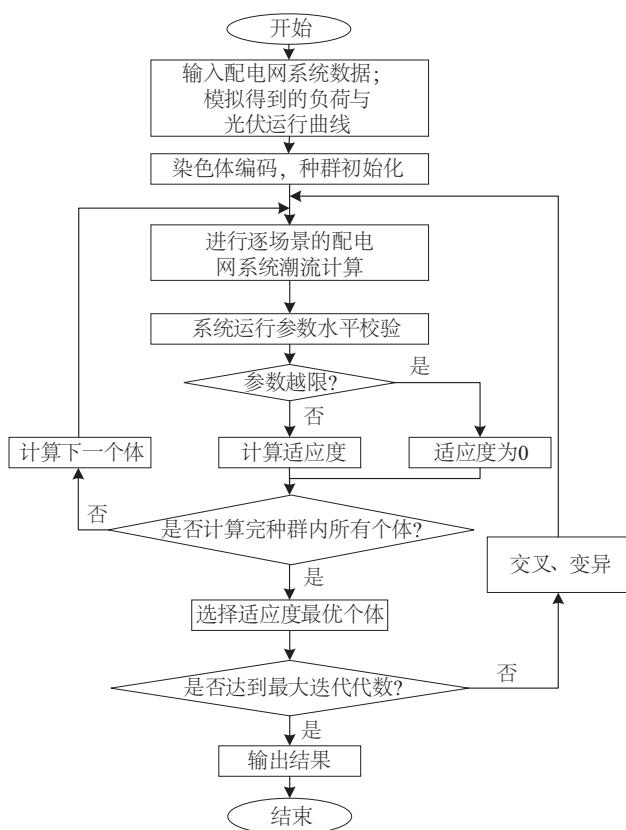


图3 考虑弃光的光伏接入容量求解流程

Fig. 3 Flow chart of PV access capacity
considering power curtailment

求解方法包括以下步骤:

1) 输入配电网系统参数,并根据系统参数,基于光伏出力与负荷年运行模拟数据。

2) 初始化。设定种群,每个种群内有若干个体,每个个体内有N段基因,分别代表接入N个不同节点的光伏容量。个体内的每段基因都是随机生成的一定范围内的数。这个范围是根据接入光伏的N个节点分别单点接入时的最大接入容量确定的合理范围。

3) 考虑分布式光伏接入配电网后,进行潮流计算,得到初始潮流结果。

4) 计算适应度。针对每个个体潮流计算的结果,如果超出模型的约束条件限制,则适应度为0,反之个体的适应度为自身3段基因的值之和,即代表各点接入分布式光伏的总容量。计算后,选出种群中的最优个体。

5) 交叉和变异。筛选出种群中最优个体后进入到交叉和变异操作,产生下一代种群。

6) 终止条件。当遗传代数已达到所设定的最大遗传代数时,迭代终止,输出结果。

4 算例分析

本文以 IEEE 33 节点标准系统为例,分析合理弃光条件下配电网中分布式光伏接入水平,验证本文算法的有效性。

4.1 测试系统

IEEE 33 节点标准系统结构如图4所示,系统参数如文献[32]所示。

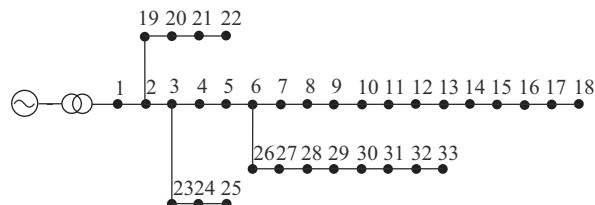


图4 IEEE 33 节点标准系统结构

Fig. 4 Standard structure of IEEE 33-bus system

以某地区实际年负荷数据构建标幺负荷曲线,如图5所示。以文献[32]中各节点负荷值乘以标幺值作为该节点年内各时段的负荷值。以某实际光伏电站年发电数据构建标幺发电曲线,如图6所示。选取节点17、23、32作为分布式光伏接入的节点。

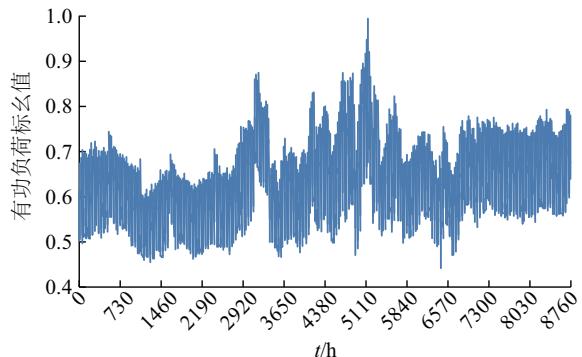


图5 有功负荷标幺值曲线

Fig. 5 Active power profile of load

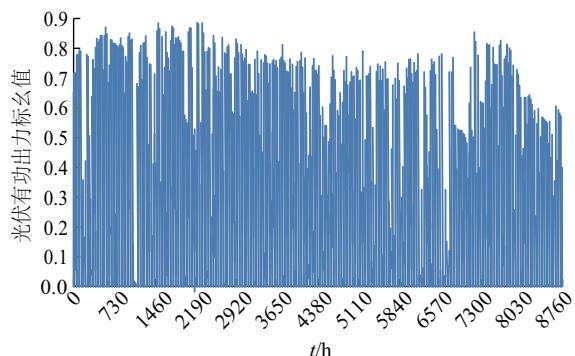


图6 光伏有功出力标幺值曲线

Fig. 6 Active power output profile of PV

如 1.3 节和 2.3.2 节所述, 考虑逆变器调节的情况下弃光时逆变器运行在 BO 线上, 取逆变器功率因数为 -0.95。如 2.3.2 节所述, 弃光时为了利用首端降压变压器分接头调压且保障一定可靠性, 取馈线首端节点电压为 1。配电网电压偏差的限值为 ± 0.05 ^[22], 各视在功率限值为 5 MVA^[23]。

设定本算例中算法参数时, 为了使计算结果更加准确, 本文设定每个种群内个体数量为 60。个体内的 3 段基因分别表示 17、23 和 32 节点接入的分布式光伏容量。初始化时, 各节点的光伏接入容量均为随机生成的介于 100~2000 kW 范围内的数。本算例交叉概率设为 0.9, 变异的概率较小, 设为 0.1。本算例迭代代数为 100 代, 算法循环迭代到达限制时, 计算终止, 输出结果。

4.2 光伏多点接入的最大容量

分别计算不同弃光率约束下各点接入光伏容量以及总容量, 结果如图 7 所示。可看出, 首先, 允许弃光对光伏的最大接入容量有非常明显的提升作用, 允许光伏弃光率 5% 时的接入容量提升了 39.3%; 其次, 各接入光伏的节点所接入的光伏容量并不相同, 距离受端主变越近, 最优接入容量越大。



图 7 不同弃光率下光伏最大接入容量

Fig. 7 Maximum PV access capacity under different PV curtailment rates

各节点接入容量不同的原因在于, 不同接入点对于节点电压等约束条件的影响力不同, 对于给定的总容量, 各点接入的光伏容量组合有无数种, 每一种组合对应的各约束条件参数的计算结果, 尤其是弃光率也不相同, 而本文的计算结果是算法综合考虑了各组合对约束条件参数的影响后得到的给定约束条件下总接入容量最大的组合。

取接入容量为 3505 MW, 将 3 月 5 日作为典型日, 图 8 为日内各时段各节点光伏出力、弃光与节点电压变化曲线。由图 8 可见, 光伏出力越大, 各节点电压越高, 但并无节点电压超过 1.05 的边界值。在光伏出力大的 09:00—14:00 时段, 通过合理弃光, 将电压控制在了 1.05 的边界, 同时也未产生过度弃光的现象。这验证了本文模型通过合理弃光控制电压策略的有效性。

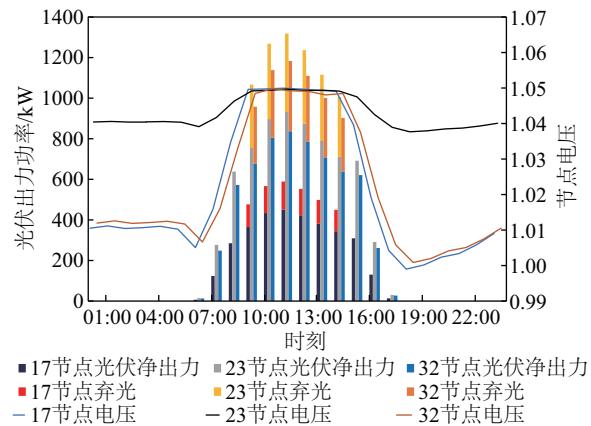


图 8 5% 弃光率下典型日实际运行曲线

Fig. 8 Typical daily actual power curve under 5% PV curtailment rate

各接入节点的全年各时刻弃光量分布如图 9 所示。由图中可见, 弃光多集中在春秋季节, 而冬季与夏季弃光较少。这是由于夏季空调等负荷较重, 因此极少出现电压越限的情况, 而冬季光伏出力受温度影响, 出力相对较小, 也不易出现电压越限。而在春秋季节, 负荷较为平常, 而光伏出力在中午时段较大, 因此需通过弃光以消除电压越限的场景出现较多。

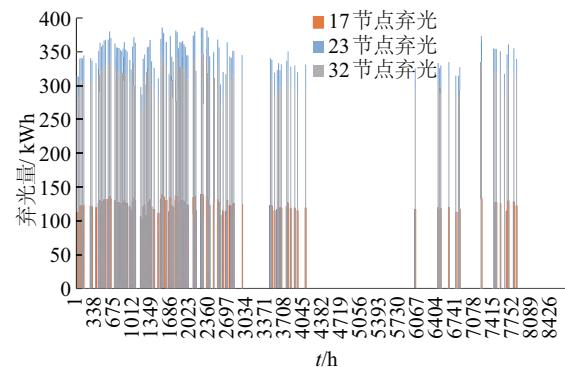


图 9 5% 弃光率下各点弃光量的分配

Fig. 9 Distribution of amount of power curtailment at each point with 5% PV curtailment rate

当弃光率达到设定上限 5% 时, 求解过程中的收敛速度如图 10 所示。

4.3 算法的有效性分析

为验证遗传算法的有效性, 本文通过对比分布式光伏单点接入时试探法与遗传算法的计算结果, 分析误差, 验证本文算法的合理性。试探法通过从零开始逐渐增加分布式光伏的接入容量, 计算其是否满足约束条件, 循环迭代, 得到单点接入下的最大容量。算例以 23 节点为例接入分布式光伏, 2 种算法的计算结果对比如图 11 所示。由图 11 可见, 试探法与遗传算法的计算结果曲线几乎完全重合, 验证了本文所提算法的有效性。

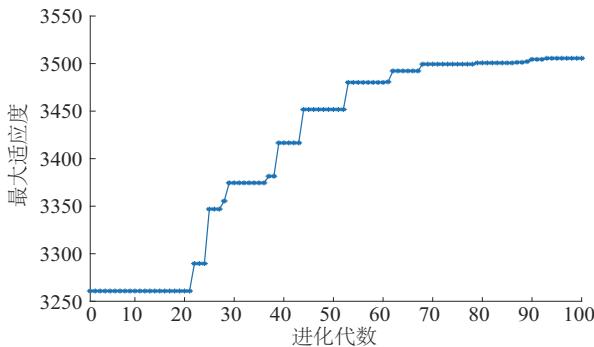


图10 5%弃光率下光伏多点接入容量计算的求解速度

Fig. 10 Solution speed of calculating multi-point access capacity of PV under 5% PV curtailment rate

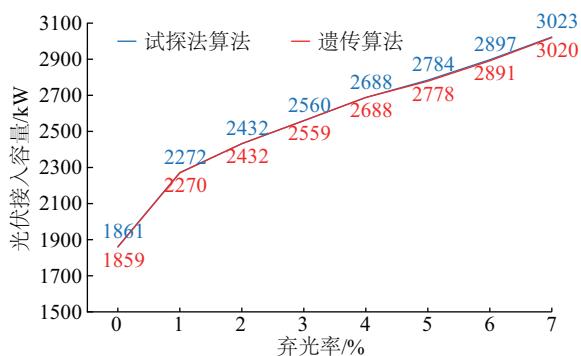


图11 不同弃光率下的光伏单点最大接入容量

Fig. 11 Maximum single-point access capacity of PV under different PV curtailment rates

5 结 论

本文提出以合理弃光率为约束的配电网光伏多点接入最大容量评估模型，并针对海量场景，对模型本身和考虑的场景进行了简化与缩减，最终使用遗传算法实现了求解。基于 IEEE33 节点算例验证了本文模型的有效性。主要结论如下：

1) 允许合理弃光可有效提升配电网光伏水平，在本文算例系统中，允许 5% 的弃光率提升了近 40% 的接入容量，提升效果显著。

2) 弃光主要出现在光照条件好但电负荷低的春秋两季，光照条件好的夏季弃光率并不高。

3) 在最优接入容量下，各节点接入的光伏容量并不同，距离受端主变越近接入容量越大。

[参考文献]

- [1] 董逸超, 王守相, 闫秉科. 配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2258-2266.
- [2] MEJBA L H M, PETER W. A review of high PV penetrations in LV distribution networks: present status, impacts and mitigation measures [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 62: 1195-1208.
- [3] 常佳蕾. 分布式光伏电源接入对配电网影响及并网规划研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2016.
- [4] CHANG J L. Research on the influence of distributed photovoltaic power access to the distributed network and grid-connected planning [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016.
- [5] 许正梅. 分布式光伏电源接入配电网对电能质量的影响及对策[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
- [6] XU Z M. Impact and improvement of distributed photovoltaic power access to the distributed network on power quality [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [7] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 27-30.
- [8] CHEN H Y, DUAN X Z, CHEN J F. Impacts of distributed generation on steady state voltage stability of distribution system [J]. Power system technology, 2006, 30(19): 27-30.
- [9] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32.
- [10] CHEN W, AI X, WU T, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network [J]. Electric power automation equipment, 2013, 33(2): 26-32.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] OLIVIER F, ARISTIDOU P, ERNST D, et al. Active management of low-voltage networks for mitigating overvoltages due to photovoltaic units [J]. IEEE transactions on smart grid, 2016, 7(2): 926-936.
- [14] ALYAMI S, WANG Y, WANG C S, et al. Adaptive real power capping method for fair overvoltage regulation of distribution networks with high penetration of PV systems [J]. IEEE transactions on smart grid, 2014, 5(6): 2729-2738.
- [15] 文升, 顾洁, 程浩忠, 等. 分布式电源的准入容量与优化布置的实用方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 109-114.
- [16] WEN S, GU J, CHENG H Z, et al. Maximum penetration level and optimal placement of distributed generation [J]. Electric power automation equipment, 2012, 32(10):

- 109-114.
- [11] ANDRESEN M, BUTICCHI G, LISERRE M. Thermal stress analysis and MPPT optimization of photovoltaic systems [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2016, 63(8): 4889-4898.
- [12] 孟宇红, 毕猛强, 史梓男, 等. 分布式光伏扶贫多点接入配电网最大容量分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10): 110-116.
- MENG Y H, BI M Q, SHI Z N, et al. Analysis of maximum capacity of distributed PV poverty alleviation with multiple access points to distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10): 110-116.
- [13] 方鑫, 郭强, 张东霞, 等. 并网光伏电站置信容量评估[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 31-35.
- FANG X, GUO Q, ZHANG D X, et al. Capacity credit evaluation of grid-connected photovoltaic generation [J]. Power system technology, 2012, 36(9): 31-35.
- [14] 邹宏亮, 韩翔宇, 廖清芬, 等. 考虑电压质量与短路容量约束的分布式电源准入容量分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2273-2280.
- ZOU H L, HAN X Y, LIAO Q F, et al. Penetration capacity calculation for distributed generation considering voltage quality and short circuit capacity constraints [J]. Power system technology, 2016, 40(8): 2273-2280.
- [15] CHAUDHARY P, RIZWAN M. Voltage regulation mitigation techniques in distribution system with high PV penetration: a review[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2018, 82: 3279-3287.
- [16] FATIMA S, PÜVI V, LEHTONEN M. Review on the PV hosting capacity in distribution networks[J]. Energies, 2020, 13(18): 4756.
- [17] 杨晓萍, 王李瑾. 基于概率潮流的含分布式电源配电网优化[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 71-76.
- YANG X P, WANG L J. Optimization of distributed power distribution network based on probabilistic load flow [J]. Acta energiae solaris sinica, 2021, 42(8): 71-76.
- [18] 刘科研, 盛万兴, 马晓晨, 等. 基于多种群遗传算法的分布式光伏接入配电网规划研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 146-155.
- LIU K Y, SHENG W X, MA X C, et al. Planning research of distributed photovoltaic source access distribution network based on multi-population genetic algorithm [J]. Acta energiae solaris sinica, 2021, 42(6): 146-155.
- [19] AYRES H M, FREITAS W, DE ALMEIDA M C, et al. Method for determining the maximum allowable penetration level of distributed generation without steady-state voltage violations [J]. IET generation, transmission & distribution, 2010, 4(4): 495-508.
- [20] WANG S X, CHEN S J, GE L J, et al. Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC [J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2016, 7(3): 1111-1123.
- [21] CHEN X, WU W C, ZHANG B M. Robust capacity assessment of distributed generation in unbalanced distribution networks incorporating ANM techniques [J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2018, 9(2): 651-663.
- [22] 丁明, 刘盛. 基于遗传算法的多个光伏电源极限功率计算[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 922-926.
- DING M, LIU S. Calculation of maximum penetration level of multi PV generation systems based on genetic algorithm [J]. Power system technology, 2013, 37(4): 922-926.
- [23] 邢海军, 程浩忠, 曾平良, 等. 基于二阶锥规划的间歇性分布式电源消纳研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 74-80.
- XING H J, CHENG H Z, ZENG P L, et al. IDG accommodation based on second-order cone programming [J]. Electric power automation equipment, 2016, 36(6): 74-80.
- [24] 赵波, 韦立坤, 徐志成, 等. 计及储能系统的馈线光伏消纳能力随机场景分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 34-40.
- ZHAO B, WEI L K, XU Z C, et al. Photovoltaic accommodation capacity determination of actual feeder based on stochastic scenarios analysis with storage system considered [J]. Automation of electric power systems, 2015, 39(9): 34-40.
- [25] HASHEMI S, OSTERGAARD J. Efficient control of energy storage for increasing the PV hosting capacity of LV grids [J]. IEEE transactions on smart grid, 2018, 9(3): 2295-2303.
- [26] 姚宏民, 杜欣慧, 李廷钧, 等. 光伏高渗透率下配网消纳能力模拟及电压控制策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 462-469.
- YAO H M, DU X H, LI T J, et al. Simulation of consumption capacity and voltage control strategy of distribution network with high penetration of photovoltaics [J]. Power system technology, 2019, 43(2): 462-469.
- [27] 孙玲玲, 赵美超, 王宁, 等. 基于电压偏差机会约束的分布式光伏发电准入容量研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(7): 1560-1569.
- SUN L L, ZHAO M C, WANG N, et al. Research of permitted capacity of distributed photovoltaic generation based on voltage deviation chance constrained [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(7): 1560-1569.
- [28] 王一波, 许洪华. 基于机会约束规划的并网光伏电站极限容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 22-28.

- WANG Y B, XU H H. Research of capacity limit of grid-connected photovoltaic power station on the basis of chance-constrained programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 22-28.
- [29] 蔡永翔, 唐巍, 徐鸿洋, 等. 含高比例户用光伏的低压配电网电压控制研究综述 [J]. 电网技术, 2018, 42 (1): 220-229.
- CAI Y X, TANG W, XU O Y, et al. A voltage control strategy for LV distribution network with high proportion residential PVs considering reactive power adequacy of PV inverters [J]. Power system technology, 2018, 42 (1) : 220-229.
- [30] DING F, MATHER B. On distributed PV hosting capacity estimation, sensitivity study and improvement [J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2017, 8 (3) : 1010-1020.
- [31] 国家能源局. 国家能源局综合司关于调查落实光伏发电相关建设条件的通知[Z]. 北京: 国家能源局, 2016. National Energy Administration. Notice of comprehensive department of National Energy Administration on investigation and implementation of construction conditions related to photovoltaic power generation [Z]. Beijing: National Energy Administration, 2016.
- [32] KERSTING W H. Radial distribution test feeders [C]// IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, OH, USA, IEEE, 2002.

RESEARCH ON MAXIMUM PV ACCESS CAPACITY IN DISTRIBUTION NETWORK CONSIDERING PROPER POWER CURTAILMENT

Zhang Jiashu¹, Lyu Quan¹, Guo Xueli², Zhang Zhong¹, Zhou Wei¹

(1. College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Grid Nanyang Power Supply Company, Nanyang 473005, China)

Abstract: In the distribution network, photovoltaic (PV) can participate in the voltage regulation through proper power curtailment. In this background, an evaluation model of the maximum PV access capacity in the distribution network is proposed considering multi-point access and the constraint of reasonable power curtailment. The conventional constraint after the distribution network being connected to PV that the operation state index does not exceed the limit or the probability of exceeding the limit does not exceed the limit is replaced by the constraint that the consequences of exceeding the limits is within an acceptable value. For massive scenarios, the model and the application scenarios are simplified according to the technical characteristics and the operation laws of the distribution network system. Finally, the problem is solved by genetic algorithm. The effectiveness of the evaluation model and algorithm is verified on the IEEE 33-bus. Results show that 5% of PV power curtailment can increase PV access capacity about 40%. The improvement effect is significant.

Keywords: PV power; distribution network; distributed generation; access capacity; PV power curtailment