

DOI: 10.7667/PSPC170668

一种分布式光伏选线定容的二阶锥规划方法

李滨¹, 梁宇帆¹, 祝靖², 舒晴川¹, 陈碧云¹

(1. 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室(广西大学电气工程学院), 广西 南宁 530004;

2. 广西电网公司南宁供电局, 广西 南宁 530031)

摘要: 在满足大容量分布式电源多馈线接入并被全部吸纳的前提下, 协调好各接入点位置与用户需求之间的关系对于智能电网规划是十分必要的。协同考虑分布式光伏的规划设计要求以及含分布式电源的配电网重构方法, 提出一种分布式光伏选线定容的新方法。在分布式光伏总容量确定而接入馈线、各馈线接入位置及容量不确定的情况下, 构建基于 Distflow 潮流方程约束的规划模型, 并采用二阶锥松弛技术转化为可解的混合整数二阶锥规划模型, 以优化得到分布式光伏接入的最优规划方案以及该接入方案下配网的最优重构结果。通过多个算例进行分析比较, 验证所提方法的正确性和有效性。

关键词: 重构; 选线定容; 混合整数二阶锥规划; 分布式电源

A second-order cone programming method of feeder-selecting and sizing for distributed photovoltaic

LI Bin¹, LIANG Yufan¹, ZHU Jing², SHU Qingchuan¹, CHEN Biyun¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology (College of Electrical Engineering, Guangxi University), Nanning 530004, China; 2. Guangxi Power Grid Nanning Power Supply Bureau, Nanning 530031, China)

Abstract: Under the precondition that large capacity Distributed Generation (DG) allows multi-feeder access system and all the DGs are absorbed, it is very necessary for the planning of the smart grid to coordinate the relationship between the position of each access point and the users' demand. This paper coordinately considers the planning and design requirements of the distributed photovoltaic (PV) power generation as well as the reconfiguration of power distribution systems with DG and proposes a novel method for feeder-selecting and sizing of the distributed PV power generation. Under the condition in which the total capacity of the distributed PV power generation has been determined and the feeder and capacity of each access point haven't yet been determined, a second-order cone programming planning model with the constraint of the Distflow equations is developed to get the optimal planning program for the distributed PV power generation access. And at the same time the optimal reconfiguration results of the power distribution system under the effect of the new DG are also obtained. Finally the correctness and validity of the proposed method are verified by results of calculation example.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51541707) and National Key Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228205).

Key words: reconfiguration; feeder-selecting and sizing; mixed integer second-order cone programming (SOCP); distributed generations

0 引言

分布式能源作为抬升馈线电压的有效手段, 在重负荷区大力发展分布式光伏具有极其深远的意义。随着电力体制改革的不断深入和电力市场的有

序放开, 更多投资主体涌入新能源领域, 促使分布式光伏接入配电网的容量迅速增加。光伏发电作为可再生能源的重要组成部分, 在能源结构调整中发挥着十分关键的作用。智能电网要求配电网能够自由吸纳分布式电源, 但随着渗透率的不断提升, 分布式光伏接入配电网后将给配电网带来更多的问題, 其对配电网的影响也将越来越严重, 且影响程度与网架结构、分布式光伏接入位置及容量关系密

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51541707), 国家重点基础研究发展规划项目(973项目)(2013CB228205)

切^[1-5]。因此,合理调整网架结构,适当选择分布式电源的接入馈线、接入节点以及容量分配比例对于配电网的安全稳定、经济效益都具有极其重要的意义。

国内外文献对分布式电源优化配置问题进行了大量的研究^[6-10]。目前研究主要涉及针对特定约束条件下的单网架全局最优模型。模型主要可分为两类,一类是针对电源或负荷本身特性进行的优化:文献[6]考虑了分布式电源的间歇性特点,建立含相关性约束的IDG选址定容规划模型;文献[7]考虑分布式电源及负荷的时序特征,并建立包括电能损耗和可靠性的多目标优化模型;文献[8]在考虑分布式电源及负荷时序特征的同时,也考虑了分布式电源的环境成本。这类模型的优点在于新增的约束条件可以使模型更接近于实际情况,但由于约束的复杂性,这类模型往往不能直接采用数学工具求解。另一类是针对电源组合进行的优化:文献[9]考虑了不同类型的分布式电源间的优化组合并构建以最小网损为目标的混合整数非线性规划(MINLP);文献[10]提出含分布式电源以及变电站的多级配电网规划模型,选取总的安装成本最小为目标函数。

上述文献从不同方向对分布式电源的选址定容问题进行了探索。然而,在以上关于分布式电源规划的文献中,并没有考虑分布式电源在实际规划中的三个问题:

1) 分布式电源建设地点附近往往会存在多条馈线。分布式电站应当接入一条还是多条馈线,需要考虑经济性、均衡化等方面的问题。

2) 当接入的分布式电源容量高于配电容量或线路老旧、热容限制等原因导致分布式电源无法被完全吸纳时,需考虑多馈线下的分布式电源接入优化问题。

3) 分布式电源的接入将直接改变线路潮流,高渗透的分布式电源接入对配电网潮流的影响很大,因此需考虑对配电网拓扑结构的优化问题。

为此,本文提出分布式光伏选线定容的综合优化模型,分析比较大容量分布式光伏在电网中的各种馈线接入方式,并协同考虑配电网重构,对新设计的分布式光伏电站进行选线定容规划,以充分利用电站周边的馈线资源,发挥重构对配电网架的优化作用。在模型中,采用二阶锥松弛技术将含非线性Distflow潮流等式方程约束的模型转化为可解的混合整数二阶锥规划模型,并在一个多馈线的配电网算例上对所提出的模型进行仿真分析。

1 影响分布式光伏的配置因素

1.1 分布式光伏规划

分布式电源规划设计的决策变量一般可分为两类:①与分布式电源本身相关的变量,如电源类型、安装容量;②与配电网相关的变量,如接入馈线的集合,公共连接点,即PCC(point of common coupling)点的集合及各PCC点相应的允许接入容量。

在分布式电源规划设计中,尤其是分布式光伏的规划设计,可能出现如下几个方面的情况:

1) 分布式光伏的设计安装容量直接受到规划用地的制约。结合环境条件、租赁费用以及分布式电源设备成本等因素考虑,分布式电站设计总容量、建设地点的选择弹性较差。

2) 由于分布式光伏选址紧邻配电网,新建支线走廊的难度很大,一般以就近接入配电网为宜。此外,也应考虑供电管辖区域及用户的需求来选择允许接入的馈线和PCC点。

3) 分布式光伏一般不允许向上级输送功率,但允许同级间馈线的功率传输。由于配电网馈线容量较低,较大设计容量的分布式光伏无法被一条馈线完全吸纳时,应采取分散接入的办法。

4) 考虑光伏特性对于电能质量的影响,并考虑变压器的成本以及功率的均衡化,单个PCC点的接入容量不应过大。对电能质量要求较高的用户负荷节点,接入的分布式电源容量应进行更严格的限制。

结合以上因素考虑,通常在电源类型、安装位置及安装容量已知的前提下,做选线、选点及接入容量的规划。同时,分布式光伏电站规划应至少满足以下几点约束:

1) 分布式光伏以太阳光板为单位,并以数个太阳光板作为一组进行投运。

2) PCC点选择限制,线路热容量限制以及配变容量限制。

3) 所安装的光伏容量应尽可能满足就地吸纳,有最大接入容量限制。

故分布式光伏的规划模型实质上是一个混合整数规划模型。对分布式光伏各点接入容量的规划即为各接入点投入太阳光伏板组数的规划。

1.2 配电网架规划

对于新规划建设配电网线路,一般会结合当地可能出现的分布式电源水平进行规划,限制分布式电源接入的主要因素是线路的配电容量水平。

而对于目前大多数中压配电网,其网架格局已

基本形成。这些线路在早期的网架规划过程中, 并没有考虑分布式能源在中压配电网的接入问题。已有的配电网线路的允许载流量较低, 在规划期间内往往只考虑了当地负荷的发展水平, 同时由于线路和设备老旧等问题, 导致馈线无法支持较大的功率传输, 这进一步限制了分布式电源的接入。因此, 应适时地对这类线路进行网架结构的优化调整。

网架结构对配电网的安全经济运行以及分布式电源的吸纳能力有较大的影响。配电网架规划的决策变量对于现有配电网一般仅取线路开关为变量, 做线路规划, 即配电网重构。

高渗透下的分布式电源对于配网潮流的影响很大, 而配电网重构是实现配电网优化运行最直接且最有效的一个控制手段。此外, 由于分布式电源在正常运行时不允许进入孤岛运行的状态, 故需要对含分布式电源的线路规划增加约束进行限制, 使配电网在严格的开环拓扑结构下运行^[11-12]。结合配电网重构的分布式电站规划, 能够充分发挥重构对于配网潮流、电压等的优化作用, 提高系统对分布式电源的吸纳能力, 增强配电网稳定性, 使配电网更为安全经济运行。

2 分布式光伏选线定容的数学模型

选线定容规划, 即对规划的分布式电源在安装位置及安装容量已知的前提下进行接入馈线、各馈线接入节点及接入容量的规划。本模型采用成本效益分析的投资方式, 在满足系统可靠性约束的基础上, 由系统规划部门与电场所有者协商, 并支付额外的投资费用, 最终确定经济性最优的投资方案。

2.1 目标函数

以等年值法对某一水平年进行电场规划及电场并网线路规划, 目标函数选取为电场并网后电场业主与电力公司的综合效益最大。

此外, 为使目标函数表达更清晰明了, 效益中所占比重较小的部分不在本模型中讨论, 目标函数表示如下

$$\text{Max } Z = C_p + C_g + C_s - C_0 - C_M - C_T \quad (1)$$

式中: C_p 为接入光伏后的年度网损收益; C_0 为新建支路走廊的总投资等年值; C_T 为加装专用变压器的投资等年值; C_M 为电场年度维护成本。

1) 接入光伏后的年度网损收益

$$C_p = \beta_1 \cdot (P_L - P_1) \cdot \tau_{\max} \quad (2)$$

式中: P_L 为未接入电场前的损耗; P_1 为线路损耗; τ_{\max} 为线路年最大损耗小时数; β_1 为网损折算系数。

2) 电力公司的过网费收益

$$C_g = K P_{\text{DG}} \cdot \tau_{\text{p,max}} \quad (3)$$

式中: $\tau_{\text{p,max}}$ 为最大光伏发电利用小时数; P_{DG} 为光伏规划总容量; K 为单位电量过网费。

3) 电场售电及国家光伏补贴收益

$$C_s = (\varepsilon + w) \cdot P_{\text{DG}} \cdot \tau_{\text{p,max}} \quad (4)$$

式中: ε 为单位光伏售电价格; w 为国家对单位光伏的补贴额度。

4) 新建支路走廊的总投资等年值

$$C_0 = \sum_{i=1}^n C_{0,i} \frac{\lambda(1+\lambda)^{N_i}}{(1+\lambda)^{N_i} - 1} y_i = \sum_{i=1}^n \omega L_i \frac{\lambda(1+\lambda)^{N_i}}{(1+\lambda)^{N_i} - 1} y_i \quad (5)$$

式中: n 为拟新建的支路走廊总数; $C_{0,i}$ 为第 i 条拟新建支路走廊的实际投资成本; L_i 为第 i 条拟新建支路走廊距离电站的距离; ω 为单位支路线路造价; y_i 为是否新建第 i 条支路走廊的决策变量, 1 表示新建, 0 表示不新建; λ 为折现率; N_i 为相应线路或变压器的经济寿命。

5) 加装专用变压器的投资等年值

$$\begin{cases} C_T = \sum_{i=1}^m (C_{T,i} + C_{S,T,i}) \frac{\lambda(1+\lambda)^{N_i}}{(1+\lambda)^{N_i} - 1} y_{T,i} \\ C_{S,T,i} = C_{b,i} - C_{s,b,i} = \nu f_i - C_{s,b,i} \\ C_{T,i} = \text{price}_k, \text{ if } P_{S_i} \subset (\underline{P}_k, \overline{P}_k] \end{cases} \quad (6)$$

式中: m 为拟接入的系统 PCC 节点总数; $C_{T,i}$ 为第 i 条拟加装变压器的实际投资成本; $C_{S,T,i}$ 为第 i 个拟加装变压器的实际废弃成本; $y_{T,i}$ 为是否加装第 i 个变压器的决策变量, 1 表示加装, 0 表示不加装; $C_{b,i}$ 为第 i 个变压器的实际报废处置成本; $C_{s,b,i}$ 为第 i 个变压器的残值收入; ν 为变压器拆除成本折算系数; f_i 为第 i 个变压器的购置费用; P_{S_i} 为光伏在节点 i 所接入的容量; price_k 为第 k 种变压器的成本; $(\underline{P}_k, \overline{P}_k]$ 表示当 P_{S_i} 在该范围下安装第 k 种变压器。

6) 电场年度维护成本

$$C_M = \delta \cdot a_{\text{pv}} P_{\text{DG}} \frac{\lambda(1+\lambda)^N}{(1+\lambda)^N - 1} \quad (7)$$

式中: δ 为维护成本折算系数; a_{pv} 为单位光伏造价。

2.2 配电网运行约束及安全约束

2.2.1 配电网辐射状拓扑结构约束

配电网一般遵循“闭环设计, 开环运行”的原

则。因此,模型优化前后,配电网都应为开环运行的状态,并且所有负荷节点以及分布式电源接入节点都与变电站相连接。由图论可知,配电网的拓扑结构为不带闭环的树。文献[13]证明了用树表征配电网辐射状确定性方法的两个约束:

1) 重构后网络支路数为 $N-N_{\text{bus}}$ (N 为系统节点数, N_{bus} 为系统内电源变电站数)。

2) 重构前后网络中所有节点必须与某个变电站相连接,网络不形成孤立区域。

基于以上两个条件,建立辐射状约束的解析性表达,对于条件 1),有

$$\sum K_{ij} = N - N_G \quad \forall ij \in M_1 \quad (8)$$

式中: K_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的开关状态变量; N 为配电网节点数; N_G 为配电网变电站数; M_1 为系统线路的集合。

对于条件 2),当线路各节点满足 Distflow 支路潮流方程时,即可满足条件。特别地,除变电站节点外,其他节点都应是负荷节点。

2.2.2 辐射状配电网的 Distflow 支路潮流形式

对于配电网中的任意节点 j ,有

$$\begin{cases} \sum_{i \in u(j)} [P_{ij} - r_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2}] = \sum_{k \in v(j)} P_{jk} + P_j \\ \sum_{i \in u(j)} [Q_{ij} - x_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2}] = \sum_{k \in v(j)} Q_{jk} + Q_j \\ P_j = P_{j,\text{DG}} + P_{j,\text{d}} \\ Q_j = Q_{j,\text{DG}} + Q_{j,\text{d}} \end{cases} \quad (9)$$

对于任意支路 ij ,有

$$U_j^2 = U_i^2 - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \quad (10)$$

式中:集合 $u(j)$ 为电网中以 j 为末端节点的支路的首端节点集合;集合 $v(j)$ 为电网中以 j 为首端节点的支路的末端节点集合; U_j 为电压幅值; P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为支路 ij 首端有功功率和无功功率; P_j 和 Q_j 分别为节点 j 的有功功率和无功功率净注入值; $P_{j,\text{DG}}$ 、 $P_{j,\text{d}}$ 、 $Q_{j,\text{DG}}$ 和 $Q_{j,\text{d}}$ 分别为节点 j 上所连接的 DG 有功功率、负荷有功功率、DG 无功功率以及负荷无功功率; r_{ij} 、 x_{ij} 分别为三相支路的支路电阻和电抗。

2.2.3 馈线支路开断约束

$$K_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in M_1 \quad (11)$$

式中, K_{ij} 取值为 0 表示开关打开,取值为 1 表示开关闭合。

2.2.4 馈线支路传输功率约束

$$\begin{cases} |P_{ij}| \leq \overline{P}_{ij} \\ |Q_{ij}| \leq \overline{Q}_{ij} \end{cases} \quad (12)$$

式中, \overline{P}_{ij} 、 \overline{Q}_{ij} 分别为馈线支路有功功率和无功功率的上限。

2.2.5 系统运行安全性约束

$$\begin{cases} U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \\ I_{ij} \leq I_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: U_{\max} 、 U_{\min} 分别为节点电压幅值的上下限; I_{\max} 为支路电流的上限值。

2.2.6 变电站输出功率约束

$$-P_{g_i} \leq P_{g_i} \leq \overline{P}_{g_i} \quad \forall i \in M_G \quad (14)$$

式中: \overline{P}_{g_i} 为变电站节点 i 的出力上限; $-P_{g_i}$ 为变电站节点 i 的倒送功率上限。

2.2.7 线路损耗约束

$$P_l = \sum P_{S_v} + \sum P_{g_i} - \sum P_j \quad (15)$$

2.2.8 新建线路及新增变压器的 0-1 变量约束

$$\begin{cases} y_i = 1, & \text{if } P_{S_i} > 0 \quad i \in M_{\text{bdg}} \\ y_{T,i} = 1, & \text{if } P_{S_i} > 0 \quad i \in M_{\text{bdg}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: M_{bdg} 为允许接入分布式光伏的节点集合; P_{S_i} 为光伏在节点 i 所接入的容量。

2.3 分布式光伏规划设计约束

2.3.1 节点光伏接入容量限制

$$0 \leq P_{S_v} \leq \overline{P}_{S_v} \quad (17)$$

式中: P_{S_v} 为节点 v 接入分布式光伏额定容量; \overline{P}_{S_v} 为节点 v 允许接入的最大分布式光伏容量。

2.3.2 光伏板将以组为单位接入配电网

分布式光伏是以太阳能板为单位,并以数个太阳能板作为一组进行投运。分布式光伏的容量规划实质上是一个整数规划问题。

$$\begin{cases} P_{S_v} = e_v \cdot P_{\text{pv}} \quad \forall v \in M_{\text{bdg}} \\ \sum_{v \in M_{\text{bdg}}} e_v = N_{\text{dg}} \\ 0 \leq e_v \leq N_{\text{dg}} \quad e_v \in N \\ \sum_{v \in M_{\text{bdg}}} P_{S_v} = P_{\text{DG}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: N_{dg} 为总光伏组数; e_v 为光伏在节点 v 接入的组数; P_{pv} 为每组光伏电池的容量大小。

2.4 引入开关变量的 Distflow 潮流方程

重构模型约束中含有线路的 0-1 开关状态变量集合 K ,配电网架结构随 K 集合的取值不同而发生

变化, 线路潮流也因此发生改变。即 Distflow 潮流方程需引入线路开关变量 K 进行约束, K 对潮流方程的作用主要有两个方面^[14]:

1) K 取值为 1, 支路线路为导通状态, 有功功率、无功功率以及支路两侧电压不受影响。

2) K 取值为 0, 支路线路为断开状态, 有功功率、无功功率为零, 支路两侧电压不存在联系。

对于节点 j , 加入 0-1 变量约束, 修改后的含线路开关变量的 Distflow 潮流方程增加如下约束:

$$\begin{cases} |P_{ij}| \leq K_{ij} \cdot M \\ |Q_{ij}| \leq K_{ij} \cdot M \end{cases} \quad (19)$$

对于支路 ij , 有

$$(U_i^2 - U_j^2) \cdot K_{ij} = 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \cdot \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \quad (20)$$

其中, M 为一个足够大的数。注意到, 对于公式(14), 当 $K_{ij} = 0$ 时, $P_{ij} = 0$ 且 $Q_{ij} = 0$, 则该约束不会对 $(U_i^2 - U_j^2)$ 取值产生影响。

由于模型包含了非线性的 Distflow 潮流方程组以及整数的线路 0-1 开关变量和光伏投运组数变量, 因此该模型在数学上实质为一个大规模的混合整数非凸非线性规划问题, 这类规划问题在使用目前主流的优化软件很难甚至不能进行求解, 有必要对该模型做凸松弛变形。

3 潮流方程的二阶锥等价变形

3.1 二阶锥规划

二阶锥规划是凸规划问题的一个子集, 它是在满足一组二阶锥约束和线性等式约束的条件下使线性函数最小化。在模型中, Distflow 潮流方程为非线性形式, 这一强非凸源使得模型难以用一般软件求解。故需对模型进行二阶锥等价变形。

二阶锥规划^[15-16](second-order cone programming) 的 SOCP 标准形式如下:

$$\min_x \{C^T x \mid Ax = b, x_i \in K, i = 1, 2, \dots, N\} \quad (21)$$

式中: 变量 $x \in R_N$; 系数常量 $b \in R_M$ 、 $c \in R_N$ 、 $A_{M \times N} \in R_{M \times N}$; K 为如下形式的二阶锥或旋转二阶锥。

二阶锥:

$$K = \{x_i \in R_N \mid y^2 \geq \sum_{i=1}^N x_i^2, y \geq 0\} \quad (22)$$

旋转二阶锥:

$$K = \{x_i \in R_N \mid yz \geq \sum_{i=1}^N x_i^2, y, z \geq 0\} \quad (23)$$

式(16)、式(17)中的二次不等式也称为二阶锥不等式约束及旋转二阶锥不等式约束。

SOCP 本质上是一种凸规划, 解的最优性和计算高效性都有优良特征。利用现有的二阶锥规划算法包可以轻易求取最优结果, 求解过程可以在多项式时间内完成^[17-18]。

3.2 二阶锥等价变形

结合本模型的特点, 对 Distflow 潮流方程约束进行 SOCP 松弛, 定义

$$I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \quad (24)$$

并对平方项进行替换, 令 $\tilde{U}_i = U_i^2$, $\tilde{I}_{ij} = I_{ij}^2$,

则式(9)、式(10)修改为

$$\begin{cases} \sum_{i \in u(j)} [P_{ij} - r_{ij} \tilde{I}_{ij}] = \sum_{k \in u(j)} P_{jk} + P_j \\ \sum_{i \in v(j)} [Q_{ij} - x_{ij} \tilde{I}_{ij}] = \sum_{k \in v(j)} Q_{jk} + Q_j \\ P_j = P_{j,DG} + P_{j,d} \\ Q_j = Q_{j,DG} + Q_{j,d} \\ |P_{ij}| \leq K_{ij} \cdot M \\ |Q_{ij}| \leq K_{ij} \cdot M \end{cases} \quad (25)$$

$$(\tilde{U}_i - \tilde{U}_j) \cdot K_{ij} = 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \tilde{I}_{ij} \quad (26)$$

$$\tilde{I}_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{\tilde{U}_i} \quad (27)$$

Distflow 潮流方程经过上述转化后已经线性化。对式(27)做进一步松弛, 得

$$\tilde{I}_{ij} \geq \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{\tilde{U}_i} \quad (28)$$

对式(28)做进一步变形, 得

$$\tilde{I}_{ij} \cdot \tilde{U}_i \geq P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad (29)$$

注意到式(29)即为标准形式的旋转二阶锥不等式约束。

经过二阶锥等价变形后, 上述优化模型松弛为如下的二阶锥规划模型:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z &= C_p + C_g + C_s - C_0 - C_M - C_T \\ \text{s.t. } &\text{式(8), 式(11) - 式(19), 式(25) - 式(26)} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\tilde{I}_{ij} \geq \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{\tilde{U}_i}, \quad ij \in M_1$$

文献[19-20]对该松弛进行了严格的论证, 并证明对于以树状拓扑结构描述的辐射状配电网, 在负

荷不受约束的条件下, 最优潮流的二阶锥规划所得到的最优解就是原问题下的最优解。

4 算例分析

在 SPYDER 编程环境下编写模型代码并调用 GUROBI7.0.2 解算器求解模型。其中, SPYDER 为 PHYTHON 的集成开发环境(IDE), 对数学编程及工具包支持友好。GUROBI 为目前性能较高的大规模数学规划优化器。测试系统的硬件环境为英特尔双核 i5-3470 CPU 3.20 GHz, 4 GB 内存, 操作系统为 Win10 64bit。

本文的计算程序流程如图 1 所示。

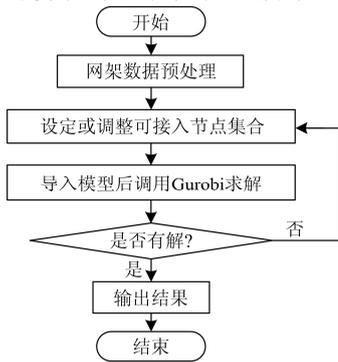


图 1 计算程序流程

Fig. 1 Flow chart of calculation program

4.1 配电网馈线结构及接入方案

构建如图 2 所示 3 馈线配电网系统对所提出的优化模型进行计算分析, 主要分以下两部分进行分析讨论:

- 1) 单线并网可能出现的问题, 以分布式光伏只接入馈线 I 的限定节点这一情况进行分析。
- 2) 对多馈线下不同并网方式进行分析比较, 讨论分布式光伏接入该配电网系统的接入方案, 最后在负荷最小容量下对各接入方案进行校核。

该配电网系统拓扑结构如图 1 所示, 各节点所带负荷以及各条支路的相关参数如表 1 所示。该系统包含 3 条 12.66 kV 馈线, 总计 61 个节点共 69 条支路, 其中 8 条为联络开关支路, 以辐射状运行。首端基准电压选取为 12.66 kV, 三相功率基准值取为 10 MVA。系统的总有功负荷为 13.62 MW, 总无功负荷为 6.97 Mvar。其中, 馈线 I 的有功负荷为 5.92 MW, 馈线 II 的有功负荷为 4.39 MW, 馈线 III 的有功负荷为 3.31 MW。该系统已建成 2 座 2 MW 的分布式光伏电站, 分别接入至 10、34 号节点。为使系统更接近于实际情况, 假设各开关站及电站的相对地理位置如图 2 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

节点 i	节点 j	线路阻抗	j 点负荷	节点 i	节点 j	线路阻抗	j 点负荷	节点 i	节点 j	线路阻抗	j 点负荷
1	2	0.092 2+j0.047	165+j110	24	25	1.059+j0.933 7	125+j70	49	50	1.03+j0.34	195+j100
2	3	0.493+j0.251 1	155+j90	25	26	0.804 2+j0.700 6	185+j120	50	51	1.044+j0.345	195+j100
3	4	0.366+j0.186 4	185+j130	26	27	0.974 4+j0.963	265+j650	51	52	1.058+j0.3496	195+j100
4	5	0.381 1+j0.194 1	75+j80	27	28	0.507 5+j0.258 5	215+j120	52	53	0.196 6+j0.065	160+j80
5	6	0.819+j0.707	75+j70	29	30	0.366+j0.186 4	175+j60	53	54	0.374 4+j0.123 8	175+j85
6	7	0.187 2+j0.618 8	65+j150	30	31	0.381 1+j0.194 1	155+j80	54	55	0.0047+j0.001 6	265+j110
7	8	0.711 4+j0.235 1	65+j150	31	32	0.092 2+j0.047	190+j104	55	56	0.327 6+j0.108 3	265+j110
8	9	1.03+j0.74	80+j70	32	33	0.049 3+j0.025 1	145+j72	56	57	0.210 6+j0.069 6	315+j131
9	10	1.044+j0.74	80+j70	33	34	0.819+j0.270 7	165+j80	49	58	0.341 6+j0.112 9	229+j131
10	11	0.196 6+j0.065	110+j80	34	35	0.187 2+j0.069 1	315+j154	58	59	0.014+j0.004 6	165+j85
11	12	0.374 4+j0.123 8	125+j85	35	36	0.711 4+j0.235 1	315+j154	59	60	0.159 1+j0.052 6	165+j85
12	13	1.468+j1.155	125+j85	36	37	1.03+j0.34	205+j70	60	61	0.819+j0.707	160+j80
13	14	0.541 6+j0.712 9	185+j130	37	38	1.044+j0.345	205+j70	61	62	0.196 6+j0.065	175+j85
14	15	0.591+j0.526	125+j60	31	42	0.004 4+j0.010 8	141+j70	62	63	0.187 2+j0.618 8	265+j110
2	16	0.164+j0.1565	185+j90	42	43	0.064+j0.156 5	141+j70	9	15	2+j2	
16	17	1.504 2+j1.355 4	155+j90	43	44	0.397 8+j0.131 5	141+j70	12	19	2+j2	
17	18	0.409 5+j0.478 4	155+j90	44	45	0.0702+j0.023 2	141+j70	22	26	0.5+j0.5	
18	19	0.708 9+j0.937 3	155+j90	45	46	0.351+j0.116	129+j60	8	18	2+j2	
3	20	0.451 2+j0.308 3	155+j100	46	47	0.839+j0.281 6	129+j60	33	41	0.5+j0.5	联络支路
20	21	0.898+j0.709 1	485+j250	32	39	0.003 4+j0.008 4	194+j106	36	47	0.5+j0.5	
21	22	0.896+j0.701 1	485+j250	39	40	0.085 1+j0.208 3	499+j320	35	44	0.5+j0.5	
6	23	0.203+j0.103 4	125+j75	40	41	0.289 8+j0.709 1	499+j320	53	60	1+j1	
23	24	0.284 2+j0.144 7	125+j75	48	49	0.711 4+j0.235 1	260+j154	57	63	1+j1	

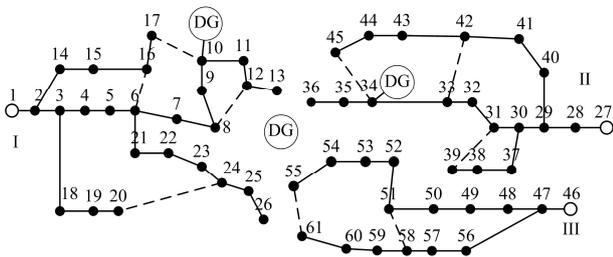


图 2 3-馈线配电网系统及各节点相对地理位置

Fig. 2 3-feeders' distribution network system and the relative location of each node

该配电网系统全线型号为 LGJ-150/35, 持续载流量设定为 325 A。

4.2 新规划的分布式光伏

现假设在图 2 所示位置新规划设计分布式光伏电站一座, 为了尽可能的利用资源, 最大设计容量定为 8 MW, 以每组设计功率大小为 40 kW 计算, 总共有 200 组太阳能光伏板需接入到配电网中。假设系统中的节点均为公共连接点, 考虑到实际情况下新建支线走廊的难度较大, 假定电站在该区域只能就近选取以下节点作为 PCC 点:

馈线 I 为 8、14、15、26、27;

馈线 II 为 36、37、38;

馈线 III 为 55、56、57;

各待接入点距离规划电站的距离如表 2 所示。

并且假设接入点可选专用变压器容量最大为 2.5 MVA, 则各待接入点的节点最大限制容量为 2.5 MVA, 并规定, 当接入容量小于 630 kW 时, 允许直接接入原有变压器, 否则需加装专用变压器, 相关变压器参数如表 3 所示。

在考虑地理因素条件下, 分布式电站应当就近接入一条或多条馈线, 这取决于临近的馈线是否允许接入, 就近接入可以较大程度上降低线路及设备投入, 及后期的运行维护费用。

模型所需的其他计算参数见表 4。

表 2 待接入节点距离电站的长度

Table 2 Distance to the station from the access nodes

节点号	8	9	25	26	27	36	37	38	47	55	56	57
距离/km	2	1.5	1.5	1	1	2.5	2	1.5	3	1.5	1	1

表 3 变压器参数

Table 3 Transformer parameters

容量/kW	630	1 250	2 000	2 500
造价/万元	15	30	55	70

表 4 其他参数

Table 4 Other parameters

参数	名称	值	参数	名称	值
τ_{max}	线路年最大	2 500	ν	变压器拆除	0.01
	损耗小时数			成本折算系数	
β_1	网损折算系数	0.65	δ	维护成本折	0.3
				算系数	
$\tau_{p,max}$	最大光伏发电	1 200	α_{pv}	单位光伏造价	1 万元/ kW
	利用小时数				
K	单位过网费用	0.014 元	ω	单位输电	30 万元/ km
				线路造价	
λ	折现率	0.05	ϵ	光伏售电单价	0.65 元
W	光伏补贴单价	0.42 元			

4.3 不同并网方式及其测试结果

分布式光伏电站并网根据接入馈线数量的不同主要有两种类型, 分为单馈线并网和多馈线并网。目前, 常用的并网方式主要为就近直接并网方式和按负荷等比例并网方式。就近直接并网方式, 即将分布式光伏在满足约束的条件下就近直接接入临近馈线的节点; 按负荷等比例并网方式, 即按相同的配电容量比例分配容量并接入到不同馈线的节点。以下对各类并网方式以及本文选线定容并网方式进行测试, 并对结果进行比较分析。

4.3.1 单馈线并网对配电网的影响

对于容量较小的分布式电源, 一般以单馈线直接并网较为常见。但是这种接入形式并不适用于大中型分布式电源, 以下就大容量分布式光伏直接并入单馈线可能出现的问题进行分析。

限制待接入分布式光伏电站只允许接入馈线 I, 变电站节点电压设置为 1.05, 电压偏差上限设为 7%。

以就近直接并网方式将电站接入馈线 I, 在节点 8、12、25 各接入 2.48 MW, 剩余 0.56 MW 接入 24 号节点。对该方案进行仿真计算后得到馈线 I 各节点电压和各线路有功潮流如图 3 所示。

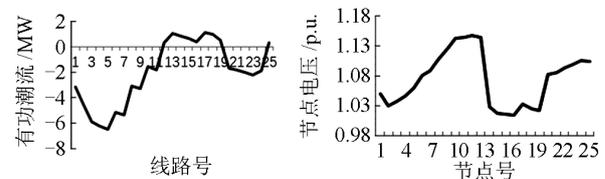


图 3 就近直接并网方式下馈线 I 各节点的电压和有功潮流

Fig. 3 Each node's voltage and active power flow of

feeder I under direct grid connected mode

可以发现: (1) 光伏接入点附近电压越限严重; (2) 接入节点与母线之间的线路出现较大的反向潮流。为满足电网电能质量的要求以及配电网线路热容量的限制, 光伏电站在实际运行时, 将受限切除

部分光伏输出，导致光伏在直接并网时无法被配电网完全吸纳，直接影响到业主的利益。

因此，目前高渗透分布式电源或大容量分布式电源接入单条线路存在若干问题，并且这一情况并不能通过对单一线路采用优化的方式有效地解决。

4.3.2 多馈线并网

当单线并网导致无法完全吸纳分布式光伏容量时，应采取多线并网方式。此时，待接入分布式光伏电站允许接入馈线 I、II、III 三条馈线。以下讨论不考虑负荷重载的情况。

(1) 就近直接接入：依次将容量投入到距离最近的 8、25、36、54 号节点。

(2) 等负荷比例接入：按相等配电容量比例分配容量投入三条馈线，并选取距离最近的节点投入，分配容量如表 5 所示。

表 5 多馈线下不同并网方式的节点光伏接入组数

Table 5 The number of each node's connected PV in different access modes with multiple feeders

节点号	8	12	13	24	25	34	35	36	53	54	55
直接并网	62	0	14	0	0	0	0	62	0	62	0
等比例并网	40	0	40	0	0	0	0	47	0	36	37
本模型并网	0	0	0	57	0	0	50	0	62	0	31

(3) 选线定容接入：采用本文所述模型对分布式光伏接入该配电网进行仿真计算，得到分配方案如表 5 所示，相应地打开开关改变情况如表 6 所示。

表 6 本模型并网方式打开开关变化对比

Table 6 Comparison with the opened switches of different access modes

	原始网架	本模型多馈线接入
打开开关集合	6-16,10-17,8-12, 31-39,34-45,33-42, 51-58,55-61	7-8,8-12,6-16, 30-31,43-44,31-39, 47-48,54-55

表 7 显示了各种并网方式下的效益以及其对配电网产生的影响，可以看出，即使在多馈线并网的

方式下，接入的不合理仍然可能导致电网的电能质量不满足要求，在这种情况下，电站在运行的过程中由于电压越限等问题切除一部分出力，光伏无法被电网完全吸纳，从而影响业主的利益。

分布式光伏的选线定容方法得到的配电网线损相较于其他两种分布式光伏接入方式大幅度降低，并且在进行选线定容规划下协同考虑网架重构，能够充分发挥重构对于配电网的优化作用，如图 4、图 5 所示，全线路有功潮流均衡化效果明显，逆向有功潮流得到有效减少，相较于其他两类方法，有功潮流的减少幅度超过 40%，并且全线电压也得到有效优化，没有出现电压越限的情况。

4.4 负荷低谷下的极限校核

考虑配电网负荷的峰谷差，以下分析负荷为低谷时光伏满发的极端情况。在极端情况下，分布式光伏电源接入电网后其电能质量及线路约束仍不能超越限制。假设峰谷差率为 25%，对以上各并网方式结果进行校核，得到结果如表 7 所示。可以看出，直接并网方式或等比例并网方式都存在线路越限以及节点电压过低的情况，因此，这类以经验为主的方式，由于缺乏相关的技术支撑，其在整个发电周期内可能造成不同程度的光伏舍弃量，同时也会对配电网线损产生不良效果，直接影响电网公司的线损指标，进而影响业主及电网公司双方的利益。

4.5 小结

综上所述，对于大容量分布式电源接入配电网，仅考虑对单条馈线进行接入优化下，会出现因为容量、电压等约束无法满足而造成分布式电源无法完全投运的情况。按本文方法对分布式光伏进行接入优化，把容量分配至与电源临近的线路上，达到分布式光伏容量能够被电网完全吸纳，线路资源充分利用的目的。在选线定容的过程中，协同考虑配电网架的优化，有效地对线损进行了优化，进而提高了整体的经济性。

表 7 各接入方式的效益及对系统的影响比较

Table 7 Comparison of the influence of each access mode on the system

	规划条件下				负荷最小下校核					
	效益等年 值/万元	线损/ kW	负荷节点最 高电压/p.u.	最大支路 潮流/kW	负荷节点最 高电压/p.u.	线损/ kW	最大支路 潮流/kW	线路电流 越限条数	节点电压 合格率/%	满足约束所需 切除光伏/%
原始网架	/	449.29	1.016 9	/	/	/	/	/	/	/
直接并网	1 115.64	528.29	1.075 8	3 546.4	1.086 4	607.91	3 881.6	3	90	14.5
等比例并网	1 104.10	567.25	1.078 9	3 646.2	1.097 7	655.00	3 974.3	2	92	20.5
本模型并网	1 164.58	271.71	1.032 5	1 947.5	1.041 3	319.00	2 364.1	0	100	0

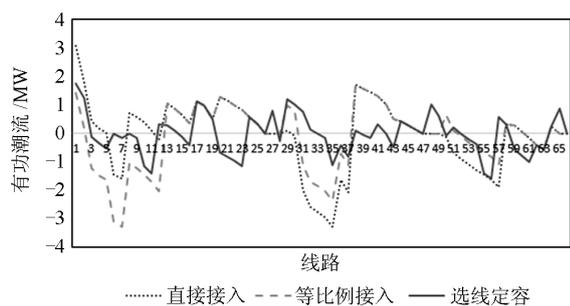


图4 配电网各节点有功潮流对比

Fig. 4 Comparison with active power flow of each node in distribution network

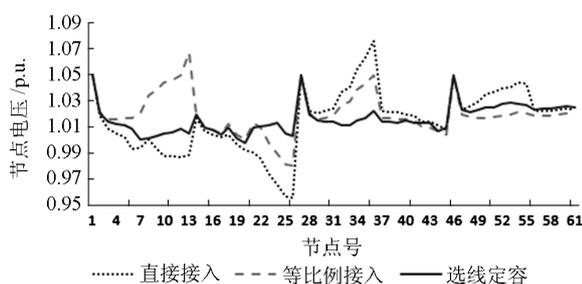


图5 配电网各节点电压对比

Fig. 5 Comparison with voltage of each node in distribution network

5 结语

本文协同考虑分布式光伏规划设计要求以及配电网重构, 构建了分布式光伏的规划模型。讨论了单馈线下大容量分布式光伏接入可能出现的问题, 以及大容量分布式光伏选线定容规划的必要性。在模型中, 采用二阶锥松弛技术将含非线性 Distflow 潮流等式方程约束的模型转化为可解的混合整数二阶锥规划模型, 并在一个多馈线的配电网算例上对所提出的模型进行仿真分析。算例结果验证了本文所建模型充分结合了配电网重构的优势, 有效降低了大容量分布式光伏接入对配电网造成的影响。

参考文献

- [1] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 2-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 2-14.
- [2] 赵争鸣, 雷一, 贺凡波, 等. 大容量并网光伏电站技术综述[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 101-107.

ZHAO Zhengming, LEI Yi, HE Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 101-107.

- [3] 钱科军, 袁越. 分布式发电技术及其对电力系统的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(13): 25-29.
QIAN Kejun, YUAN Yue. Distributed generation technology and its impact on power systems[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(13): 25-29.
- [4] 康成功, 李献伟, 张国军. 分布式电源参与的配电网电能质量控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 99-105.
KANG Chenggong, LI Xianwei, ZHANG Guojun. Research on power quality control strategy in incorporating distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 99-105.
- [5] 张曦, 张宁, 龙飞, 等. 分布式电源接入配电网对其静态电压稳定性影响多角度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 120-125.
ZHANG Xi, ZHANG Ning, LONG Fei, et al. Research of the impacts on static voltage stability of distribution networks with distributed generation from different aspects[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 120-125.
- [6] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 53-58, 140.
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. optimal siting and sizing of intermittent distributed generator considering correlations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 53-58, 140.
- [7] 马麟, 刘建鹏. 考虑时序特性和环境效益的多目标多类型分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 32-40.
MA Lin, LIU Jianpeng. Multi-objective planning of multi-type distributed generation considering timing characteristics and environmental benefits[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 32-40.
- [8] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 58-63.
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 58-63.

- [9] ATWA Y M, EL-SAADANY E F, SALAMA M M A, et al. Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 360-370.
- [10] HAFFNER S, PEREIRA L F A, PEREIRA L A, et al. Multistage model for distribution expansion planning with distributed generation—part I: problem formulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 915-923.
- [11] 陈春, 汪枫. 一种避免不可行解的配电网快速重构方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 34-43.
CHEN Chun, WANG Feng. A fast network reconfiguration method avoiding infeasible solutions for distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 34-43.
- [12] 焦洁, 刘艳. 基于鲁棒优化的网架重构机组恢复顺序优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 77-86.
JIAO Jie, LIU Yan. Optimization of units' restoration sequence during network reconfiguration process based on robust optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 77-86.
- [13] LAVORATO M, FRANCO J F, RIDER M J, et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 172-180.
- [14] 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.
- [15] ANDERSEN E D, ROOS C, TERLAKY T. On implementing a primal-dual interior-point method for conic quadratic optimization[J]. Mathematical Programming, 2003, 95(2): 249-277.
- [16] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [17] ALIZADEH F, GOLDFARB D. Second-order cone programming[J]. Mathematical Programming, 2003, 95(1): 3-51.
- [18] LOBO M S, VANDENBERGHE L, BOYD S, et al. Applications of second-order cone programming[J]. Linear Algebra and Its Applications, 1998, 284(1): 193-228.
- [19] LI N, CHEN L, LOW S H. Exact convex relaxation of OPF for radial networks using branch flow model[C] // 2012 Smart Grid Communications (SmartGridComm), IEEE Third International Conference on, November 5-8, 2012, Taiwan, China: 7-12.
- [20] FARIVAR M, CLARKE C R, LOW S H, et al. Inverter VAR control for distribution systems with renewables[C] // IEEE International Conference on Smart Grid Communications, October 17-20, Brussels, Belgium, 457-462.

收稿日期: 2017-05-05; 修回日期: 2017-07-10

作者简介:

李 滨(1975—), 女, 博士, 研究生导师, 主要研究方向为电力系统最优化; E-mail: lizhen@gxu.edu.cn

梁宇帆(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统最优化; E-mail: yuf_Liang@163.com

祝 靖(1989—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统最优化。E-mail: jameszhu01@163.com

(编辑 张爱琴)