

基于下垂控制的微电网DG选址和功率分配方法研究

赵长军, 周丽, 司晓峰, 张龙基, 牛威如, 董浩男
(国网甘肃省电力公司, 兰州 730030)

摘要: 在基于下垂控制的微电网运行中, 分布式发电机(distributed generators, DG)之间的无功功率共享是一个关键问题。造成无功功率共享不平等的原因包括馈电阻抗差异、负载差异以及DG在尺寸和位置上的不均匀分布。因此, 提出一个适用于微电网的混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)问题, 旨在实现微电网之间的比例无功功率共享。首先, 研究了DG的最佳尺寸和放置位置, 对涉及的各种非线性项进行了线性化的详细讨论; 之后, 针对给定的负荷曲线, 在这些DG上生成一天的提前调度; 然后, 为了更准确地建模负载, 采用了实际的恒定阻抗-电流-功率(ZIP)负荷模型; 最后, 用所提方法在一个经过修改的33总线网络上进行测试, 实验结果验证了所提出的规划和调度方法的准确性。

关键词: 下垂控制; 微电网; 损耗最小化; MILP优化; 无功功率共享; 重新配置

Research on DG location selection and power sharing method of sag control microgrid based on MILP

ZHAO Changjun, ZHOU Li, SI Xiaofeng, ZHANG Longji, NIU Weiru, DONG Haonan
(State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030)

Abstract: Reactive power sharing among distributed generators (DG) is a key problem in droop control based microgrid operation. The causes of unequal reactive power sharing include feed impedance differences, load differences, and uneven distribution of DG in size and position. Therefore, a mixed-integer linear programming (MILP) problem for microgrids is presented to achieve proportional reactive power sharing among microgrids. Firstly, the optimum size and position of DG are studied, and various nonlinear terms involved are linearized in detail. Then a one-day advance schedule is generated on these DGs for a given load profile. After that, an actual ZIP load model is used to model the load more accurately. Finally, the proposed method is tested on a modified 33-bus network. The experimental results verify the accuracy of the proposed planning and scheduling methods.

Key words: droop control; microgrid; loss minimization; MILP optimization; reactive power sharing; reconfiguration

0 引言

近年来, 分布式发电机(distributed generators, DG)以光伏、风力等方式在电网的渗透率不断增加^[1-2]。这种有源配电网可以作为微电网运行, 在电网或天气突发事件期间以自主模式运行。

在孤岛运行模式下, DG的主要目标是为网络内的负荷提供电力。为了实现这一目标, DG间需要共享有功功率和无功功率, 通常通过下垂控制来实现功率的比例共享^[3]。比例无功功率共享是指在微电网中的多个DG之间分配无功功率需求, 目标是根据某些标准(例如每个DG的额定值或容量)按比例分配总无功功率负载, 这确保了每台发电机能其能力进行无功功率补偿。然而, 由于线路阻抗不同、负载分布不均匀以及DG的大小和放置差异, 实现

比例无功功率共享存在困难, 可能造成较小的DG由于无功功率输出较大而达到电流极限。一旦达到限制, 这些DG会跳闸自保, 从而降低整个微电网的发电能力。为了避免这种情况, 实现比例无功功率共享对于防止DG过载非常重要。

当负载或网络拓扑结构发生变化时, 无功功率流向及其比例分配也会发生改变。无功功率共享的问题已经在文献中得到了广泛的探讨。控制策略可以分为3种方法: ①调整 $Q-V$ 下垂系数 n_q ^[4-5]; ②调整标称电压 V_n ^[6]; ③调整虚拟阻抗 Z_v ^[7-8]。然而, 这些控制策略并没有明确考虑远程节点/分支的电压和电流限制。

分布式发电机组的大小和位置同时影响无功功率共享、线路损耗和电压分布, 应合理规划DG的大小和位置。然而, 在有关建立微电网的DG分配研究中, 还未探索过网络重新配置以改善无功功率共享。此外, 与无功功率共享相关的工作都没有考虑到恒定阻抗-电流-功率(ZIP)模型, 这也影响了

无功功率。因此,本文提出了一种基于混合整数线性规划的下垂控制微电网DG选址和功率均分方法,以实现比例无功功率分配和极低的线路损耗。

1 MILP方程

1.1 目标函数

下垂引起的电压偏差用 δV^q 表示。因此,优化的目的为最小化所有DG的 δV^q 项之间的差异。目标函数的表示如下

$$S = \min \sum \Delta V_{ij}^q \quad (1)$$

式中: i 和 j 为微电网的不同总线,范围为 $1 \sim N_b$; N_b 为网络中的总线的总数; ΔV_{ij}^q 为由 $N_b \times N_b$ 项的和组成的标量。 ΔV_{ij}^q 的约束如下

$$\Delta V_{ij}^q \geq \delta V_i^q - \delta V_j^q + V_\epsilon^q \quad (2)$$

只考虑 ΔV_{ij}^q 的绝对值,设置 ΔV_{ij}^q 的下限如下

$$\Delta V_{ij}^q \geq 0 \quad (3)$$

在式(2)中引入修正项 V_ϵ^q 。如果DG被同时放置在总线 i 和 j 上,则 V_ϵ^q 需要精确地设置为0。用以下两个不等式来实现这个条件

$$V_\epsilon^q \geq (\lambda_i + \lambda_j - 2)(V_{\max} - V_{\min}) \quad (4)$$

$$V_\epsilon^q \leq 0 \quad (5)$$

式中: λ 为二进制变量,表示在特定总线上DG的存在, $\lambda_i = 1$ 表示总线 i 上存在DG, $\lambda_i = 0$ 表示不存在; V_{\min} 和 V_{\max} 为整个微电网相电压允许的最小和最大幅值。

令 $\lambda_i = 1$ 以及 $\lambda_j = 1$,根据以上公式可知 $\Delta V_{ij}^q = \delta V_i^q - \delta V_j^q$ 。

1.2 约束条件

(1) KCL方程:第 i 条总线的KCL方程可以用笛卡尔坐标如下

$$I_i^{\text{re}} + I_{f1-i}^{\text{re}} = I_{l-i}^{\text{re}} + I_{f2-i}^{\text{re}} \quad (6)$$

$$I_i^{\text{im}} + I_{f1-i}^{\text{im}} = I_{l-i}^{\text{im}} + I_{f2-i}^{\text{im}} \quad (7)$$

式中: I_i 为总线 i 上DG提供的电流,是流向母线 i 的线路电流; I_{l-i} 为负载电流; I_{f1-i} 、 I_{f2-i} 分别为从母线流出、流出的线路电流;上标re和im分别为实部和虚部。分支电流 I_{ij} 的约束如下

$$-I_{\max}^{\text{re}} \leq I_{ij}^{\text{re}} \leq I_{\max}^{\text{re}} \quad (8)$$

$$-I_{\max}^{\text{im}} \leq I_{ij}^{\text{im}} \leq I_{\max}^{\text{im}} \quad (9)$$

其中, I_{\max}^{re} 和 I_{\max}^{im} 被确定如下

$$I_{\max}^{\text{re}} = \frac{P^{\max}}{1.5V_{\min}} \quad (10)$$

$$I_{\max}^{\text{im}} = \frac{Q^{\max}}{1.5V_{\min}} \quad (11)$$

式中: P^{\max} 和 Q^{\max} 分别为 P_i 和 Q_i 的上限。

(2) KVL方程:连接总线 i 和 j 的分支的KVL方程如下

$$V_i^{\text{re}} = V_j^{\text{re}} + R_{ij} I_{ij}^{\text{re}} - X_{ij} I_{ij}^{\text{im}} \quad (12)$$

$$V_i^{\text{im}} = V_j^{\text{im}} + X_{ij} I_{ij}^{\text{re}} + R_{ij} I_{ij}^{\text{im}} \quad (13)$$

式中: V_i 和 V_j 分别为总线 i 和 j 处的相位电压; R_{ij} 和 X_{ij} 为连接母线 i 到 j 的电阻和电抗。母线电压的大小计算如下

$$V_i = \sqrt{(V_i^{\text{re}})^2 + (V_i^{\text{im}})^2} \quad (14)$$

此外, V_i 的约束如下

$$V_{\min}^2 \leq (V_i^{\text{re}})^2 + (V_i^{\text{im}})^2 \leq V_{\max}^2$$

$$V_i = V_{\max} \sin \theta_{\max} Q_{l-i} \quad (15)$$

$$= Q_{l-i} \left[P_q + I_q \frac{V_i}{V_0} + Z_q \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^2 \right]$$

θ_{\max} 和 θ_{\min} 表示电压相量允许的最大和最小相位角,相角被认为限定在 θ_{\min} 和 θ_{\max} 的范围内。母线电压的大小和相角限制如图1所示。

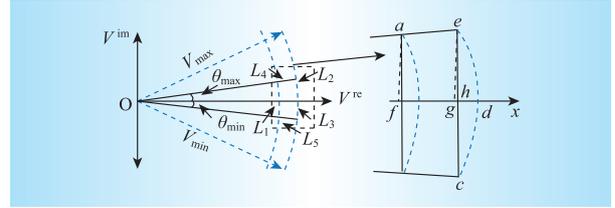


图1 母线电压的大小和角度限制

Fig. 1 Magnitude and angle limit for the bus voltage

根据图1,可得线路 L_1 至 L_5 的定义方程如下

$$L_1: V_i^{\text{im}} \leq \frac{\sin \theta_{\max} - \sin \theta_{\min}}{\cos \theta_{\max} - \cos \theta_{\min}} (V_i^{\text{re}} + V_{\min} \cos \theta_{\min}) + V_{\min} \sin \theta_{\min} \quad (16)$$

$$L_2: V_i^{\text{im}} \leq \frac{\sin \theta_{\max}}{\cos \theta_{\max} - 1} (V_i^{\text{re}} - V_{\max}) \quad (17)$$

$$L_3: V_i^{\text{im}} \leq \frac{\sin \theta_{\min}}{\cos \theta_{\min} - 1} (V_i^{\text{re}} - V_{\max}) \quad (18)$$

$$L_4: V_i^{\text{im}} \leq V_i^{\text{re}} \tan \theta_{\max} \quad (19)$$

$$L_5: V_i^{\text{im}} \leq V_i^{\text{re}} \tan \theta_{\min} \quad (20)$$

从图1的放大部分可以看出,从 a 点作垂线与 x 轴的交点 f 与原点 O 的连线的长度是 V_i^{re} 的有效下界,被标记为 V_{\min}^{re} ,计算方法如下

$$V_{\min}^{\text{re}} = V_{\min} \cos \beta \quad (21)$$

类似的, V_{\min}^{im} 的上界和下界分别被标记为 V_{\max}^{re} 和 V_{\min}^{im} 。计算方式如下

$$V_{\max}^{\text{im}} = V_{\max} \sin \theta_{\max} \quad (22)$$

$$V_{\min}^{\text{im}} = -V_{\max} \sin \theta_{\min} \quad (23)$$

(3) 负载建模:负载的主动和无功分量 P_{l-i} 和 Q_{l-i} 随电压大小的变化如下

$$P_{l-i} = P_{0l-i} \left[P_p + I_p \frac{V_i}{V_0} + Z_p \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^2 \right] \quad (24)$$

$$Q_{l-i} = Q_{0l-i} \left[P_p + I_p \frac{V_i}{V_0} + Z_p \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^2 \right] \quad (25)$$

$$Z_p + I_p + P_p = 1 \quad (26)$$

$$Z_q + I_q + P_q = 1 \quad (27)$$

式中： P_{0l-i} 和 Q_{0l-i} 为负载的标称功率； V_0 为相位电压的标称值的大小； V_i 为总线*i*处的实际电压； Z_p 、 I_p 、 P_p 、 Z_q 、 I_q 和 P_q 均为负载ZIP的系数。

负载电流 I_l 可以表示如下

$$I_{l-i}^{\text{re}} = \frac{P_{l-i} V_i^{\text{re}} + Q_{l-i} V_i^{\text{im}}}{1.5[(V_i^{\text{re}})^2 + (V_i^{\text{im}})^2]} \quad (28)$$

$$I_{l-i}^{\text{im}} = \frac{P_{l-i} V_i^{\text{im}} - Q_{l-i} V_i^{\text{re}}}{1.5[(V_i^{\text{re}})^2 + (V_i^{\text{im}})^2]} \quad (29)$$

式(28)和式(29)是非线性的,近似为 V_i^{re} 和 V_i^{im} 的线性组合,表示如下

$$I_{l-i}^{\text{re}} = a_{l-i} V_i^{\text{re}} + b_{l-i} V_i^{\text{im}} + c_{l-i} \quad (30)$$

$$I_{l-i}^{\text{im}} = d_{l-i} V_i^{\text{re}} + e_{l-i} V_i^{\text{im}} + f_{l-i} \quad (31)$$

(4) 下垂模型

$$P_i = \frac{\omega_n}{m_{psi}} - \frac{\omega_s}{m_{psi}} + \Delta P_i \quad (32)$$

$$Q_i = \frac{V_i^n}{n_{qsi}} - \frac{V_i^{\text{re}}}{n_{qsi}} + \Delta Q_i \quad (33)$$

式中： ω_n 为rad/s中的额定频率； ω_s 、 m_{psi} 和 n_{qsi} 为放置在第*i*条总线上第*s*个DG的参考频率、 $P-\omega$ 下垂斜率以及 $Q-V$ 下垂斜率； P_i 和 Q_i 为DG的有功和无功功率输出； V_i^n 和 V_i^{re} 为DG相位电压峰值的额定值和参考值； ΔP_i 和 ΔQ_i 事先被引入,若DG被放置在总线*i*上,则 ΔP_i 和 ΔQ_i 应该被设置为0。实现如下

$$0 \leq \Delta P_i \leq M_{\text{DG}}(1 - \lambda_i) \quad (34)$$

$$-M_{\text{DG}}(1 - \lambda_i) \leq \Delta Q_i \leq M_{\text{DG}}(1 - \lambda_i) \quad (35)$$

M_{DG} 定义如下

$$M_{\text{DG}} = \max\{|P_s^{\text{max}}|, |Q_s^{\text{min}}|, |Q_s^{\text{max}}|\} \quad (36)$$

DG的最大数量限制如下

$$\sum \lambda_{si} \leq N_{\text{max}} \quad (37)$$

式中： N_{max} 为计划放置在网络中的DG的最大数量。

m_p 和 n_q 两个变量需要通过优化计算得到,式(32)和式(33)中的 ω_s/m_{psi} 、 V_{si}/n_{qsi} 和 V_i^{re}/n_{qsi} 的比率是非线性的。按照如下步骤,式(34)和式(35)的非线性比率可以近似为线性的。

离散化 $1/m_p$ 和 $1/n_q$ ： $1/m_p$ 可以被离散如下。设 $1/m_p$ 是一个 b_{mp} 因子的倍数,表示如下

$$b_{mp} = \frac{1}{S_m m_{p-st}} \quad (38)$$

式中： m_{p-st} 为 m_p 的下界。因此 $1/m_{p-st}$ 可以被表示如下

$$\frac{1}{m_{psi}} = b_{mp} \sum_{p=1}^{S_m} \gamma_{mp} \quad (39)$$

式中： γ_{mp} 为二进制变量； S_m 为决定 b_{mp} 宽度的常数。式(32)中侧的第一个比率如下

$$\frac{\omega_n}{m_{psi}} = \omega_n b_{mp} \sum_{p=1}^{S_m} \gamma_{mp} \quad (40)$$

同样,式(32)中的第二个比率计算如下

$$\frac{\omega_s}{m_{psi}} = \omega_s b_{mp} \sum_{p=1}^{S_m} C_{\omega} \quad (41)$$

式中： C_{ω} 为 ω_s 和 b_{mp} 的乘积,当 $\gamma_{mp} = 1$ 时,它被设置为0。实现如下

$$0 \leq \omega_s b_{mp} - C_{\omega} \leq \omega_{\text{max}} b_{mp} (1 - \gamma_{mp}) \quad (42)$$

$$0 \leq C_{\omega} \leq \omega_{\text{max}} b_{mp} \gamma_{mp} \quad (43)$$

式中： ω_{max} 为微电网中的最大允许频率。

$$P_{\omega} \sum_{p=1}^{S_m} \gamma_{mp} \leq P_i \leq P_{\omega} \left(1 + \sum_{p=1}^{S_m} \gamma_{mp} \right) \quad (44)$$

式中： P_{ω} 为最低的评级。

以下条件需要在 γ_{mp} 上强制执行

$$\gamma_{mp} \leq \gamma_{m(p-1)} \quad (45)$$

(5) DG功率计算:DG的有功和无功功率输出计算如下

$$P_i = 1.5(V_i^{\text{re}} I_{si}^{\text{re}} + V_i^{\text{im}} I_{si}^{\text{im}}) \quad (46)$$

$$Q_i = 1.5(V_i^{\text{im}} I_{si}^{\text{re}} - V_i^{\text{re}} I_{si}^{\text{im}}) \quad (47)$$

DG的功率限制定义如下

$$0 \leq P_i \leq P_s^{\text{max}} \quad (48)$$

$$Q_s^{\text{min}} \leq Q_i \leq Q_s^{\text{max}} \quad (49)$$

每个DG的功率因数限制如下

$$pf_{si} \geq pf_{\text{min}} \quad (50)$$

各DG的输出电流限制如下

$$0 \leq I_{si}^{\text{re}} \leq I_{\text{max}}^{\text{re}} \lambda_{si} \quad (51)$$

$$-I_{\text{max}}^{\text{im}} \lambda_{si} \leq I_{si}^{\text{im}} \leq I_{\text{max}}^{\text{im}} \lambda_{si} \quad (52)$$

(6) 重新配置:式(12)一式(13)中提出的KVL方程应进行如下修改

$$V_i^{\text{re}} = V_j^{\text{re}} + R_{ij} I_{ij}^{\text{re}} - X_{ij} I_{ij}^{\text{im}} + \Delta V_{ij}^{\text{re}} \quad (53)$$

$$V_i^{\text{im}} = V_j^{\text{im}} + X_{ij} I_{ij}^{\text{re}} + R_{ij} I_{ij}^{\text{im}} + \Delta V_{ij}^{\text{im}} (1 - Y_{ij}) \leq \Delta V_{ij}^{\text{im}} \leq \Delta V_{\text{max}}^{\text{im}} (1 - Y_{ij}) \quad (54)$$

当开关闭合时, $\Delta V_{ij}^{\text{re}}$ 和 $\Delta V_{ij}^{\text{im}}$ 应该被设置为0。当开关打开时, ΔV_{ij} 应该等于 $V_i - V_j$ 。该逻辑可以实现如下

$$-\Delta V_{\text{max}}^{\text{re}} (1 - Y_{ij}) \leq \Delta V_{ij}^{\text{re}} \leq \Delta V_{\text{max}}^{\text{re}} (1 - Y_{ij}) \quad (55)$$

$$-\Delta V_{\text{max}}^{\text{im}} (1 - Y_{ij}) \leq \Delta V_{ij}^{\text{im}} \leq \Delta V_{\text{max}}^{\text{im}} (1 - Y_{ij}) \quad (56)$$

式中： Y_{ij} 为二进制变量,表示分支*ij*中存在的重新配置开关和连接线开关的状态。 $Y_{ij} = 1$ 表示开关闭合, $Y_{ij} = 0$ 表示开关开启。

从式(55)一式(56)可知,当 $Y_{ij}=1$ 时, ΔV_{\max}^{re} 和 ΔV_{\max}^{im} 等于0。 ΔV_{\max}^{re} 指一对没有直接连接的母线之间可能出现的最大电压差。 ΔV_{\max}^{re} 可以被计算如下

$$\Delta V_{\max}^{re} = V_{\max}^{re} - V_{\min}^{re} \quad (57)$$

同样, ΔV_{\max}^{im} 可以被设置为2倍的 ΔV_{\max}^{re} ,公式如下

$$\Delta V_{\max}^{im} = 2V_{\max}^{re} \sin\beta \quad (58)$$

分支电流的方向可能会逆转。因此,对式(8)一式(9)支路电流的限制需要修改如下

$$-I_{\max}^{re} Y_{ij} \leq I_{ij}^{re} \leq I_{\max}^{re} Y_{ij} \quad (59)$$

$$-I_{\max}^{im} Y_{ij} \leq I_{ij}^{im} \leq I_{\max}^{im} Y_{ij} \quad (60)$$

保持径向结构可以大大简化继电器协调,因此,增加了以下约束条件,以确保微电网的径向结构

$$\sum_1^{N_{br}} Y_{ij} = N_b - 1 \quad (61)$$

式中: N_{br} 为给定网络中分支(包括重新配置分支)的总数。

(7) 建模功率损耗限制:分支的实际功率损失(P_{loss})需要保持在最小。需要将 P_{loss} 作为一个非常低的约束值。

P_{loss} 可以被定义如下

$$P_{loss} = \sum_0^{N_{br}} 3(I_{ij}^{rms})^2 P_{ij} \quad (62)$$

P_{loss} 的界限如下

$$P_{loss} \leq P_{loss-max} \quad (63)$$

I_{ij}^{rms} 作为一个平方项是非线性的,需要用等价的线性表达式来近似。线性化 I_{ij}^{rms} 的步骤如下

$$(I_{ij}^{rms})^2 = \left(\frac{|I_{ij}|}{\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{(I_{ij}^{re})^2 + (I_{ij}^{im})^2}{2} \quad (64)$$

由于

$$I_{ij} = I_{ij}^{re} + jI_{ij}^{im} \quad (65)$$

$(I_{ij}^{re})^2$ 和 $(I_{ij}^{im})^2$ 可以用抛物线表示,如图2所示。

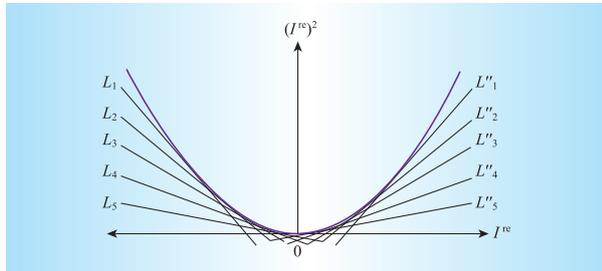


图2 切线近似 $(I_{re} ij)^2$

Fig. 2 Approximating $(I_{re} ij)^2$ with tangents

这个抛物线可以用 N_{li} 个切线分段线性化近似,如下所示

$$(I_{ij}^{re})^2 \geq a^{re} I_{ij}^{re} + b^{re} \quad (66)$$

式中: a^{re} 和 b^{re} 为切线的坡度和截距。同样, $(I_{ij}^{im})^2$ 的

近似值如下

$$(I_{ij}^{im})^2 \geq a^{im} I_{ij}^{im} + b^{im} \quad (67)$$

2 算例分析

如图3所示,在改进的33总线分配网络上验证了所提出的最优分配和调度的MILP公式。网络的额定电压与频率分别为12.66 kV、50 Hz,总额定负载为3.7 MW^[9]。

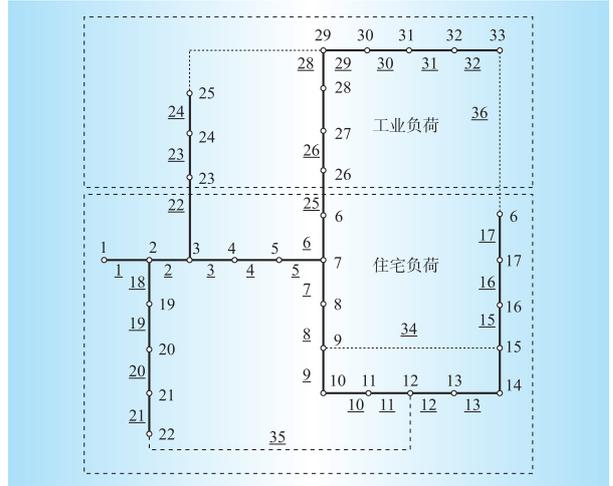


图3 调整后的33总线微电网

Fig. 3 Modified 33 bus microgrid

图3是通过考虑这些类型负载的适当的ZIP系数数值来实现的。这些值如表1所示。分别用 V_i^{re} 和 V_i^{im} 对 I_i^{re} 和 I_i^{im} 进行线性拟合。利用MATLAB的回归函数得到了每个负载的 a_i-f_i 系数。

表1 住宅和工业负荷的ZIP系数

Table 1 ZIP coefficients for residential and industrial loads

负荷类型	Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
住宅	1.31	-1.94	1.63	9.20	-15.27	7.07
工业	1.21	-1.61	1.40	4.36	-7.08	3.72

所有相关参数列见表2。

表2 用于案例研究的参数

Table 2 Parameters used for case studies

参数	数值	参数	数值
$\omega_n / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	314.16	N_{\max}	10
$\omega_{\min} / \text{p.u.}$	0.99	K	15
$P_{\max s} / \text{MW}$	1	S_m	10
$Q_{\min s}, Q_{\max s} / \text{Mvar}$	-1.1	N_{li}	40
pf_{\min}	0.7	$P_{loss-max} / \text{kW}$	37.15
$\theta_{\min}, \theta_{\max}$	$-5^\circ, 4^\circ$	$m_{p-st} / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{w}^{-1})$	e^{-7}
$V_{\min s}, V_{\max s} / \text{p.u.}$	0.95, 1.05	$n_{q-st} / (\text{V} \cdot \text{var}^{-1})$	e^{-5}
I_{\max} / A	400		

2.1 将损失最小化作为目标效果

将线路损耗最小化作为一个目标(如式(62)所示)来获得DG的最优分配,对无功功率共享性能进行评估。功率输出和无功功率共享误差如表3所示。

表3 仅考虑损失最小化目标的DG之间的功率共享
Table 3 Power sharing among DGs considering loss minimization objective only

DG线	7	10	14	17	21	24	25	30	32
P_s/kW	552	245	245	184	306	429	429	490	306
$Q_s/kvar$	266	105	111	75	143	251	161	500	294
$Q_{s-exp}/kvar$	322	143	143	107	179	250	250	286	179
$Q_{s-err}/\%$	-17	-26	-22	-30	-20	0	-36	75	65

每个DG的预期比例无功功率计算如下

$$Q_{s,exp} = \frac{\sum Q_s P_s}{\sum P_s} \quad (68)$$

每个DG的无功功率共享误差表示如下

$$Q_{s,err} = \frac{Q_s - Q_{s,exp}}{Q_{s,exp}} \times 100\% \quad (69)$$

对所有DG而言, $Q_{s,err}$ 误差接近于0,代表完美的无功功率共享。从表3可以看出, $Q_{s,err}$ 的误差远非0。因此,这些DG会超载并可能跳闸,继而导致剩余DG的级联跳闸。因此,在执行最优DG分配时,考虑DG之间的无功功率共享以及线路损耗非常重要。

2.2 DG的最优分配与负荷建模的影响

考虑一个适当的负荷模型(ZIP)与考虑一个简单的常数Z负荷模型对最优分配结果的影响。所得结果见表4,从表4的 $Q_{s,err}$ 可以看出,所提出的公式能够在所有测试案例中可以实现几乎完美的无功功率共享。

表4 DG最优分配的输出:位置和大小

Table 4 Output of optimal allocation of DGs: locations and sizes

(a) 不带重构Z	DG母线	3	7	9	13	16	18	23	24	31	32
	DG大小/kVA	1 000	200	500	200	200	300	500	600	800	300
	P_s/kW	851	95	378	95	95	189	378	473	662	189
	$Q_s/kvar$	522	58	232	58	58	116	232	290	406	116
	$Q_{s-err}/\%$	0.03	-0.44	0.09	-0.44	-0.44	0.09	0.09	-0.02	0.01	0.09
	$M_p/(rad \cdot s^{-1} \cdot W^{-1})$	1.11e ⁻⁷	1.00e ⁻⁶	2.50e ⁻⁷	1.00e ⁻⁶	1.00e ⁻⁶	5.00e ⁻⁷	2.50e ⁻⁷	2.00e ⁻⁷	1.43e ⁻⁷	5.00e ⁻⁷
	$N_q/(V \cdot var^{-1})$	1.11e ⁻⁵	1.00e ⁻⁴	2.50e ⁻⁵	1.00e ⁻⁴	1.00e ⁻⁴	5.00e ⁻⁵	2.50e ⁻⁵	2.00e ⁻⁵	1.43e ⁻⁵	5.00e ⁻⁵
(b) 不带重构ZIP	DG母线	4	8	10	18	19	24	25	29	32	
	DG大小/kVA	200	300	600	300	200	800	1 100	800	400	
	P_s/kW	98	197	492	197	98	689	886	689	295	
	$Q_s/kvar$	57	114	286	114	57	401	515	401	172	
	$Q_{s-err}/\%$	0.03	-0.47	-0.02	-0.47	0.03	0.10	-0.03	0.10	0.28	
	$M_p/(rad \cdot s^{-1} \cdot W^{-1})$	1.00e ⁻⁶	5.00e ⁻⁷	2.00e ⁻⁷	5.00e ⁻⁷	1.00e ⁻⁶	1.43e ⁻⁷	1.11e ⁻⁷	1.43e ⁻⁷	3.33e ⁻⁷	
	$N_q/(V \cdot var^{-1})$	1.00e ⁻⁴	5.00e ⁻⁵	2.00e ⁻⁵	5.00e ⁻⁵	1.00e ⁻⁴	1.43e ⁻⁵	1.11e ⁻⁵	1.43e ⁻⁵	3.33e ⁻⁵	
(c) 带重构ZIP	DG母线	3	11	13	20	23	25	32			
	DG大小/kVA	1 100	300	400	500	200	1 200	1 000			
	P_s/kW	879	195	293	391	98	977	782			
	$Q_s/kvar$	517	115	172	230	57	575	460			
	$Q_{s-err}/\%$	0.01	0.28	-0.18	0.02	-1.10	0.07	0.02			
	$M_p/(rad \cdot s^{-1} \cdot W^{-1})$	1.11e ⁻⁷	5.00e ⁻⁷	3.33e ⁻⁷	2.50e ⁻⁷	1.00e ⁻⁶	1.00e ⁻⁷	1.25e ⁻⁷			
	$N_q/(V \cdot var^{-1})$	1.11e ⁻⁵	5.00e ⁻⁵	3.33e ⁻⁵	2.50e ⁻⁵	1.00e ⁻⁵	1.00e ⁻⁵	1.25e ⁻⁵			
(d) 不带重构Z(无损耗限制)	DG母线	2	6	18	24	27	32	33			
	DG大小/kVA	400	1000	300	600	100	1 000	900			
	P_s/kW	305	839	229	458	76	839	763			
	$Q_s/kvar$	190	523	143	285	47	529	475			
	$Q_{s-err}/\%$	0.00	0.06	0.24	-0.11	-0.73	0.06	-0.07			
	$M_p/(rad \cdot s^{-1} \cdot W^{-1})$	2.50e ⁻⁷	9.09e ⁻⁸	3.33e ⁻⁷	1.67e ⁻⁷	1.00e ⁻⁶	9.09e ⁻⁸	1.00e ⁻⁷			
	$N_q/(V \cdot var^{-1})$	2.50e ⁻⁵	9.09e ⁻⁶	3.33e ⁻⁵	1.67e ⁻⁵	1.00e ⁻⁴	9.09e ⁻⁶	1.00e ⁻⁵			
(e) 不带重构Z(分段容量约束)	DG母线	4	7	12	13	18	19	22	23	30	33
	DG大小/kVA	500	500	400	100	600	600	300	1 000	900	400
	P_s/kW	424	424	283	71	495	495	212	778	707	283
	$Q_s/kvar$	264	264	176	44	308	308	132	484	440	176
	$Q_{s-err}/\%$	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.10
	$M_p/(rad \cdot s^{-1} \cdot W^{-1})$	1.67e ⁻⁷	1.67e ⁻⁷	2.50e ⁻⁷	1.00e ⁻⁶	1.43e ⁻⁷	1.43e ⁻⁷	3.33e ⁻⁷	9.09e ⁻⁸	1.00e ⁻⁷	2.50e ⁻⁷
	$N_q/(V \cdot var^{-1})$	1.67e ⁻⁵	1.67e ⁻⁵	2.50e ⁻⁵	1.00e ⁻⁴	1.43e ⁻⁵	1.43e ⁻⁵	3.33e ⁻⁵	9.09e ⁻⁶	1.00e ⁻⁵	2.50e ⁻⁵

表5所示为各案例的关键参数。使用恒定阻抗负载模型而不是ZIP模型(案例(a)和(b))会导致以下问题。首先,这会导致安装过多的DG。其次,DG的总装机容量将低于实际要求。此外,实际的线路损失将超过预期。因此,必须使用ZIP模型而不是恒定阻抗模型来获得一个现实的解决方案。

2.3 考虑损失约束的重要性

为了解损失约束的影响,重复案例(a)的DG分配研究,并且对 P_{loss} 不设上限。从表5可以看出,在没有损耗约束的情况下, $I_{ij,\text{max}}$ 达到了72 A,比案例(a)更为恶化。因此,在优化无功功率共享时,考虑线路损耗约束是很重要的。

此外,投资成本和经济因素在DG项目的规划和决策中是非常重要的考虑因素。由表6可知,案例(c)在网供损耗、DG建设运行总费用是最低的。

表5 案例的关键参数比较

Table 5 Comparison of all cases on key parameters

案例	DGs数量	$\sum P_s/\text{MW}$	$\sum Q_s/\text{Mvar}$	$\sum S_s/\text{MVA}$	$\sum \text{额定} D_G / \text{MVA}$	$P_{\text{loss}}/\text{kW}$	$I_{ij-\text{max}}/\text{A}$	$V_{i-\text{min}}/\text{p.u.}$	$V_{i-\text{max}}/\text{p.u.}$
(a) 不带重构Z	10	3.41	2.09	4.00	4.6	10.6	27	0.951	0.958
(b) 不带重构ZIP	9	3.64	2.12	4.21	4.7	17.2	43	0.952	0.972
(c) 带重构ZIP	7	3.62	2.13	4.20	4.7	10.7	39	0.950	0.964
(d) 不带重构Z (无损耗限制)	7	3.51	2.18	4.13	4.3	46.8	72	0.952	1.003
(e) 不带重构Z (分段容量约束)	10	4.03	2.51	4.75	5.2	12.4	44	1.034	1.049

表7 日前调度:DGs的全天误差 $Q_{s,\text{err}}$

Table 7 Day-ahead dispatch: $Q_{s,\text{err}}$ of all DGs over the whole day

时刻	$Q_{s,\text{err}}/\%$						
	DG ₁	DG ₂	DG ₃	DG ₄	DG ₅	DG ₆	DG ₇
01:00	0.19	0.84	0.75	-0.56	0.56	0.22	0.07
02:00	0.00	0.63	0.63	0.79	0.63	0.06	-0.08
03:00	-0.27	-1.20	-0.20	0.30	1.80	0.00	0.30
04:00	0.00	1.01	-0.51	-0.13	1.01	0.10	-0.13
05:00	-0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
06:00	-0.03	-0.14	0.28	-0.21	1.12	0.11	0.18
07:00	0.02	-0.40	0.27	0.10	-0.40	-0.02	0.07
08:00	-0.08	0.38	-0.32	-0.14	0.38	-0.04	0.12
09:00	-0.06	0.27	-0.06	-0.18	-0.72	0.07	0.02
10:00	0.10	-0.18	0.12	-0.18	0.71	-0.02	0.02
11:00	0.07	-0.53	-0.14	0.00	0.64	-0.09	0.03
12:00	-0.09	-0.39	-0.06	0.10	0.58	-0.02	0.07
13:00	-0.02	0.11	-0.30	0.11	-1.12	0.09	0.08
14:00	-0.07	0.51	0.14	0.00	-0.61	0.10	0.00
15:00	0.00	-0.21	-0.21	-0.21	-0.21	-0.02	0.03
16:00	0.03	0.11	-0.23	0.17	-0.90	-0.07	-0.11
17:00	0.06	-0.39	0.09	0.26	1.04	-0.10	-0.03
18:00	0.11	0.48	0.08	-0.06	-0.73	0.02	-0.09
19:00	0.00	0.60	-0.24	-0.06	0.48	0.07	-0.06
20:00	-0.15	-0.13	-0.18	-0.13	-0.26	0.13	-0.13
21:00	-0.06	-0.73	0.29	0.00	-0.58	-0.12	0.00
22:00	-0.08	-0.85	0.34	0.00	-0.68	-0.14	0.04
23:00	0.18	-0.83	0.69	0.31	-0.83	0.08	-0.21
24:00	0.11	-0.76	0.17	0.51	2.04	-0.20	-0.06

表6 案例的投资成本对比

Table 6 Comparison of investment cost

案例	网损费用	万元	
		DG建设运行总费用	总费用
(a) 不带重构Z	42.07	18.33	60.4
(b) 不带重构ZIP	35.25	18.13	53.38
(c) 带重构ZIP	30.20	15.25	45.45
(d) 不带重构Z (无损耗限制)	45.28	20.82	66.10
(e) 不带重构Z (分段容量约束)	34.27	20.72	54.99

2.4 使用最优分配结果进行最优日一提前调度

DG的最优分配结果可用于执行DG的前一天最优电压无功调度和调度重新配置开关。

利用最优结果做住宅和工业的每小时负荷预测,如图7所示。目前调度中DGs的全天误差如表7所示。

从表7中的 $Q_{s, \text{err}}$ 值可以看出, DG之间已经实现了几乎完美的无功功率共享。观察到的最大 $Q_{s, \text{err}}$ 为2.04%。全天观测到的线路损耗为201 kWh。

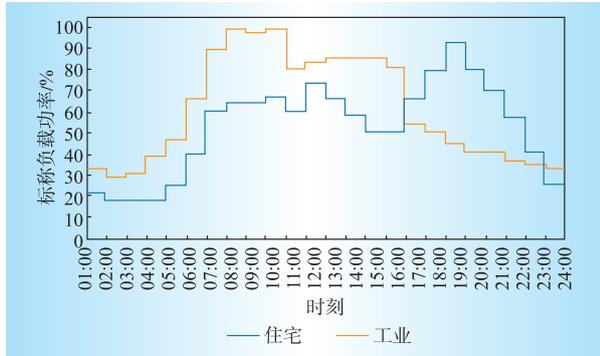


图7 24 h 负荷概况:住宅和工业负荷

Fig. 7 24 hour load profile: residential and industrial loads

3 结束语

本文提出了一种 MILP 公式, 以获得最优的 DG 分配和调度, 实现 DG 之间的比例无功功率共享, 同时产生极低的线路损耗, 具体如下:

(1) 提出了一个关于 DG 分配和调度的混合整数线性规划(MILP)问题, 并对线性化过程进行了详细的讨论。

(2) 实现了最优的无功功率共享, 同时确保了接近最优的线路损耗。D

参考文献:

- [1] 郁家麟, 肖龙海, 胡舟, 等. 基于一致性理论的微电网快速无功均分控制研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 11-21.
YU Jialin, XIAO Longhai, HU Zhou, et al. Research on fast reactive power equalization control of microgrid based on consistency theory [J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 11-21.
- [2] 李燕平, 敖健永, 黎带珍, 等. 配电网中分布式发电机容量计算[J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44(6): 620-624.
LI Yanping, AO Jianyong, LI Daizhen, et al. Capacity calculation of distributed generator in distribution network [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2022, 44(6): 620-624.
- [3] 梁馨予, 娄柯, 张艳, 等. 改进的孤岛微电网自适应下垂控制策略[J]. 湖北理工学院学报, 2023, 39(1): 6-10.
LIANG Xinyu, LOU Ke, ZHANG Yan, et al. Improved adaptive sag control strategy for isolated island microgrid [J]. Journal of Hubei Institute of Technology, 2023, 39

(1): 6-10.

- [4] 周林, 吕智林, 刘斌. 基于无功电流自适应下垂系数控制的多微网调度与控制协调运行[J]. 智慧电力, 2022, 50(11): 41-47.
ZHOU Lin, LYU Zhilin, LIU Bin. Coordinated operation of multi-microgrid scheduling and control based on reactive current adaptive sag coefficient control [J]. Smart Power, 2022, 50(11): 41-47.
- [5] 李生虎, 章怡帆, 于新钰, 等. 采用改进下垂控制和双层无功优化的风电场无功均衡分配研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 1-7.
LI Shenghu, ZHANG Yifan, YU Xinyu, et al. Research on balanced reactive power distribution in wind farm using improved sag control and double-layer reactive power optimization [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 1-7.
- [6] 原凯, 孙充勃, 冀浩然, 等. 基于凸差规划的有源配电网电压无功协调控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 108-113, 150.
YUAN Kai, SUN Chongbo, JI Haoran, et al. Voltage and reactive power coordination control method of active distribution network based on convex difference programming [J]. Journal of Power systems and Automation, 2018, 30(9): 108-113, 150.
- [7] 朱一听, 卓放, 王丰, 等. 用于微电网无功均衡控制的虚拟阻抗优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4 552-4 564.
ZHU Yixin, ZHUO Fang, WANG Feng, et al. Virtual impedance optimization method for reactive power balance control in microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4 552-4 564.
- [8] 高生凯, 曹炜, 张旭航. 应用动态虚拟阻抗的光伏微网新型下垂无功补偿控制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(3): 176-181.
GAO Shengkai, CAO Wei, ZHANG Xuhang. A new type of sag reactive power compensation control for photovoltaic microgrid using dynamic virtual impedance [J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2021, 42(3): 176-181.
- [9] ZHU Y, FAN Q, LIU B, et al. "An enhanced virtual impedance optimization method for reactive power sharing in microgrids" [J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2018, 33(12): 10 390-10 402.

作者简介:

赵长军(1974), 男, 甘肃兰州人, 高级工程师, 研究方向为电力市场与电力经济。

(责任编辑 水 鹤)