

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201014

配电网电压控制的分布式光伏无功仿射可调鲁棒优化方法

李晓明¹, 刘翔宇¹, 李安昌¹, 柳永超²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 上海科梁信息工程股份有限公司, 上海 200233)

摘要: 随着高比例分布式光伏发电并网引发的配电网电压波动越限问题, 提出基于仿射可调鲁棒优化的分布式光伏无功功率调节方法。首先, 通过建立以配电网有功网损和节点电压偏差最小化的综合优化模型, 采用多面体线性化方法将综合优化模型转化为二次规划模型。然后, 在考虑分布式光伏有功出力预算不确定性集的基础上, 通过对偶变换将鲁棒优化模型转化为确定性的二次规划模型。在含高比例分布式光伏的 IEEE-33 和 IEEE-123 节点的配电系统仿真结果表明, 与分布式光伏零无功调节相比, 所提出的仿射可调鲁棒优化方法较传统的鲁棒优化方法能大幅度地改善网损和节点电压优化结果, 具有较低的保守性, 最为接近蒙特卡洛仿真结果。

关键词: 分布式光伏; 配电网; 电压控制; 无功优化; 仿射可调鲁棒

Distributed photovoltaic reactive power affine adjustable robust optimization method for voltage control of a distribution network

LI Xiaoming¹, LIU Xiangyu¹, LI Anchang¹, LIU Yongchao²

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. Shanghai Keliang Information Engineering Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: The high proportion of distributed PV generation connected to a distribution network results in a nodal voltage over limit problem. Thus a distributed PV reactive power regulation method based on affine adjustable robust optimization is proposed in this paper. First, a comprehensive optimization model is established to minimize the active power loss and nodal voltage deviation of the distribution network, and the polyhedral linearization method is used to transform the comprehensive optimization model into a quadratic programming model. Then, considering the budget of uncertainty of active power of distributed PV, the robust optimization model is transformed into a deterministic quadratic programming model through dual transformation. The simulation results on IEEE-33 and IEEE-123 buses distribution systems with high proportion of distributed PV show that, compared with zero reactive power regulation of distributed PV, the proposed affine adjustable robust optimization method can greatly improve the optimization results of network loss and nodal voltage over that of the traditional robust optimization method and has lower conservatism, which is closest to the results of Monte Carlo simulation.

This work is supported by the Science and Technology Plan Project of Hebei Province (No. 19212102D) and the Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. (No. kj2020-049).

Key words: distributed PV; distribution network; voltage control; reactive power optimization; affine adjustable robust optimization

0 引言

分布式光伏由于清洁无污染、灵活、建设周期

短等优点, 已大量分散地接入配电网^[1-5]。随着高比例分布式光伏并网, 配电网的电压控制问题愈发复杂^[6-7], 有两方面原因: 1) 配电网的无功调节能力有限, 主要依靠配置无功补偿设备; 2) 分布式光伏的出力波动性加剧了配电网电压控制的难度。因此, 分布式光伏大量分散接入配电网在有助于提高清洁

基金项目: 河北省重点研发计划项目资助(19212102D); 国网河北省电力有限公司科技项目资助(kj2020-049)

能源高效、规模化利用的同时, 也加剧了含分布式光伏配电网电压控制的难度。

为了抑制高比例分布式光伏并网对配电网电压波动的影响, 国内外大量学者从不同的角度对含分布式光伏配电网电压控制开展了研究^[8]。文献[9]采用局部就地控制方式通过就地补偿实现配电网电压控制, 简单易于实现, 但由于缺乏对全局信息的掌握, 难以获最佳的电压控制效果。文献[10]采用分布式控制方式来实现配电网电压控制, 但其控制效果依赖于通信网络, 这对于分布广泛的配电网来说, 控制实施难度较大。文献[11]通过局部自治、邻域协调来实现无功补偿装置的分散控制。文献[9-11]均是从含分布式光伏配电网电压控制方式的角度开展研究, 文献[12-14]从挖掘分布式光伏逆变器无功控制能力的角度出发来研究配电网电压控制, 文献[12]通过建立任意节点间电压-有功以及电压-无功量化关系的解析表达式, 提出了基于光伏逆变器有功无功的就地电压控制策略。文献[13]利用全网电压灵敏度矩阵建立了不同节点光伏逆变器控制参数的优化模型, 在无通信网络下不仅可以有效地抑制电压越限, 还可以降低网损。文献[14]整体协调优化分布式光伏无功能力和高中低压配电网无功源, 提出了考虑分布式光伏无功调节能力的多电压层级配电网无功电压协调控制策略。但上述文献均是基于确定性负荷需求和分布式光伏出力开展研究的, 并未考虑实际配电网中负荷需求和分布式光伏出力的不确定性, 得到的分布式光伏无功控制方案的鲁棒性较差。

文献[15]考虑量测不足和分布式光伏出力的不确定性, 建立了考虑不确定性的配电网鲁棒电压控制模型, 并采用削减场景法进行求解。文献[16]针对无功调节设备的动作时间快慢不同, 设计了考虑分布式光伏不确定性的双时标鲁棒电压控制方法, 并采用列与约束求解鲁棒电压无功优化模型。文献[17]考虑分布式光伏的安全运行域约束和出力不确定性, 提出了基于自适应鲁棒无功优化控制方法, 并采用半定规划方法求解。文献[15-17]中的无功鲁棒优化模型的结果偏保守, 主要是因为采用了区间描述分布式光伏的出力不确定性, 过宽的区间会导致鲁棒解的保守性。

为了克服上述基于区间模型的鲁棒优化方法的保守性, 本文提出基于预算不确定性集(Budget of Uncertainty)^[18]的仿射可调鲁棒无功优化方法。通过将分布式光伏的有功出力描述为预算不确定性集,

建立了分布式光伏无功调节的配电网无功鲁棒优化模型, 采用二阶锥的多面体近似将有功网损和节点电压偏差约束转化为线性不等式约束; 考虑分布式光伏出力的不确定性, 通过对偶变换将配电网无功鲁棒优化模型转化为二次规划模型求解。通过IEEE 仿真验证了本文所提出的无功优化方法的有效性。

1 含分布式光伏的配电网无功优化模型

1.1 节点功率平衡方程

假设配电网有 m 条支路 n 个节点, 且第一个节点设置为平衡节点, 根据节点注入功率平衡方程(包含平衡节点)^[19], 可得

$$\mathbf{Y}\mathbf{V} = \mathbf{S}^* \quad (1)$$

式中: \mathbf{Y} 为节点导纳矩阵; \mathbf{V} 为节点电压列向量; \mathbf{S} 为注入功率列向量。具体元素为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ Y_{21} & \cdots & Y_{2j} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & Y_{ij} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nj} & \cdots & Y_{nm} \end{bmatrix}; \mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_j \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}; \mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_i \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, V_{sl} 为平衡节点的节点电压, 其注入功率 S_i 的计算公式为式(3)。

$$\begin{cases} S_i = P_i + jQ_i \\ P_i = P_i^{\text{PV}} - P_i^{\text{D}}, i = 1, 2, \dots, n \\ Q_i = Q_i^{\text{PV}} - Q_i^{\text{D}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_i^{PV} 、 Q_i^{PV} 分别表示分布式光伏的有功、无功出力; P_i^{D} 、 Q_i^{D} 分别表示负荷有功、无功功率。

进一步将节点功率平衡方程(1)按节点导纳矩阵 \mathbf{Y} 的实部和虚部分开, 可得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}^{\text{re}} & -\mathbf{Y}^{\text{im}} \\ -\mathbf{Y}^{\text{im}} & -\mathbf{Y}^{\text{re}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^{\text{re}} \\ \mathbf{V}^{\text{im}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:

$$\mathbf{V}^{\text{re}} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ Y_{21}^{\text{re}} & \cdots & Y_{2j}^{\text{re}} & \cdots & Y_{2n}^{\text{re}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1}^{\text{re}} & \cdots & Y_{ij}^{\text{re}} & \cdots & Y_{in}^{\text{re}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1}^{\text{re}} & \cdots & Y_{nj}^{\text{re}} & \cdots & Y_{nm}^{\text{re}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{Y}^{im} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ Y_{21}^{im} & \cdots & Y_{2j}^{im} & \cdots & Y_{2n}^{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1}^{im} & \cdots & Y_{ij}^{im} & \cdots & Y_{in}^{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1}^{im} & \cdots & Y_{nj}^{im} & \cdots & Y_{nn}^{im} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{V}^{re} = \begin{bmatrix} V_1^{re} \\ \vdots \\ V_j^{re} \\ \vdots \\ V_n^{re} \end{bmatrix}; \mathbf{V}^{im} = \begin{bmatrix} V_1^{im} \\ \vdots \\ V_j^{im} \\ \vdots \\ V_n^{im} \end{bmatrix}; \mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix}; \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_i \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.2 配电网无功优化模型

分布式光伏的无功出力优化控制目标使配电网网损和节点电压偏差综合目标^[20]最小, 可用式(8)表达。

$$\min \left[KP_{\text{Loss}} + (1-K) \sum_{i=1}^n \Delta V_i \right] \quad (8)$$

式中: K 为权重系数; P_{Loss} 为配电网网损; ΔV_i 为节点电压偏差。其中, 配电网网损的推导公式见附录, 计算公式为

$$P_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^m (\mu_i^{re})^2 + (\mu_i^{im})^2 \quad (9)$$

而节点电压偏差计算公式为

$$\Delta V_i = \sqrt{(V_i^{re} - V_{sl})^2 + (V_i^{im})^2} \quad (10)$$

其中:

$$V_i^{re} = Z_A^{re}(i,:)\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix}; V_i^{im} = Z_A^{im}(i,:)\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (11)$$

进一步可将网损目标和节点电压偏差松弛为含二阶锥约束的二次规划模型, 即

$$\begin{cases} \min K \sum_{i=1}^m t_i^2 + (1-K) \sum_{i=1}^n \Delta V_i \\ \text{st} \begin{cases} t_i \geq \sqrt{(\mu_i^{re})^2 + (\mu_i^{im})^2} \\ \Delta V_i \geq \sqrt{(V_i^{re} - V_{sl})^2 + (V_i^{im})^2} \\ (S_i^{\text{PV}})^{\max} \geq \sqrt{(P_i^{\text{PV}})^2 + (Q_i^{\text{PV}})^2} \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中考虑了分布光伏调节能力约束。

2 配电网无功优化的仿射可调鲁棒优化方法

2.1 二阶锥约束的多面体近似方法

式(12)中含二阶锥约束的二次规划模型需要将二阶锥约束线性化为线性不等式约束, 以便直接采

用商业求解器求解。本文采用多面体近似方法^[21]来线性化二阶锥约束条件, 对于任意一个复数 $\mathcal{G} = \mathcal{G}^{re} + j\mathcal{G}^{im}$, 其幅值 $|\mathcal{G}|$ 满足式(13)的不等式约束。

$$|\mathcal{G}| \geq \psi_k(\mathcal{G}) \geq \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)|\mathcal{G}| \quad (13)$$

其中:

$$\psi_k(\mathcal{G}) = \max_{l=1,2,\dots,k} |\mathcal{G}^{re} \cos(l\phi) + \mathcal{G}^{im} \sin(l\phi)|, \phi = \frac{\pi}{k} \quad (14)$$

因此, $|\mathcal{G}|$ 可以用多面体 $\psi_k(\mathcal{G})$ 来近似, 相对精度为 $1 - \cos(\pi/2k)$, 例如 $k=16$ 、 32 个顶点的多面体近似 $|\mathcal{G}|$ 的最大误差仅为 0.48% 。

利用式(13)可以将式(12)中的二阶锥约束依次转化为

$$\begin{cases} -t_i \leq \left[\cos(l\phi)D^{re}(i,:) + \sin(l\phi)D^{im}(i,:) \right] \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \leq t_i \\ \phi = \frac{\pi}{k}, l=1, \dots, k \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \Delta V_i \geq \left[\cos(l\phi)Z_A^{re}(i,:) + \sin(l\phi)Z_A^{im}(i,:) \right] \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} - \cos(l\phi)V_{sl} \\ \Delta V_i \geq -\left[\cos(l\phi)Z_A^{re}(i,:) + \sin(l\phi)Z_A^{im}(i,:) \right] \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} + \cos(l\phi)V_{sl} \\ \phi = \frac{\pi}{k}, l=1, \dots, k \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} -(S_i^{\text{PV}})^{\max} \leq \cos(l\phi)P_i^{\text{PV}} + \sin(l\phi)Q_i^{\text{PV}} \leq (S_i^{\text{PV}})^{\max} \\ \phi = \frac{\pi}{k}, l=1, \dots, k \end{cases} \quad (17)$$

因此, 含分布式光伏的配电网无功优化模型可以改写为如下的标准化二次规划模型。

$$\begin{cases} \min_{q,u} \frac{1}{2} \sum_j a_j u_j^2 + \sum_j c_j u_j \\ \text{st} \sum_j A_{ij} u_j + \sum_j B_{ij} q_j \leq \sum_j C_{ij} p_j + b_i, \forall i \end{cases} \quad (18)$$

式中: p_j 、 q_j 分别表示分布式光伏的有功、无功出力; u_j 表二次规划目标中的 t_i 、 ΔV_i 变量; $a_j, c_j, A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, b_j$ 表示相应的系数。

2.2 基于预算不确定性

根据分布式光伏的有功出力 p_j , 分布式光伏的无功出力可以根据式(18)的二次规划模型求解得到。然而分布式光伏的有功出力存在不确定性, 传统的鲁棒优化方法采用区间不确定性集^[22]来描述分布式光伏有功出力, 往往使得优化结果偏保守。为了克服基于区间不确定性集鲁棒优化方法的保守

性, 本文采用基于预算不确定性集来描述分布式光伏有功出力, 即通过构造分布式光伏有功出力偏离期望点的约束条件来描述, 可表示为

$$\begin{cases} U = \{p: p_j = p_{0j} + \Delta p_j z_j, \forall j, z \in Z\} \\ Z = \left\{z: |z_j| \leq 1, \forall j, \sum_j |z_j| \leq \Lambda \right\} \end{cases} \quad (19)$$

式中: p_{0j} 表示分布式光伏的有功出力期望; Δp_j 表示实际出力偏离期望点的最大偏差, 可以定义为 $p_{0j} = \Delta p_j = p_j^{\max} / 2$, p_j^{\max} 为分布式光伏的最大有功出力。

分布式光伏的逆变器通过根据以下线性决策规则来调整无功功率以适应实际有功功率的变化。

$$q_j = q_{0j} + \beta_j p_j \quad (20)$$

式中, q_{0j} 和 β_j 为无功功率调节的决策变量。因此, 分布式光伏无功调节量 q_j 是分布式光伏有功出力 p_j 的仿射线性函数, 因此通过设置线性决策规则来减少寻优空间的鲁棒优化方法称为仿射可调鲁棒优化(Affinely Adjustable Robust Optimization, AARO)^[23]方法。仿射可调鲁棒方法是通过寻找最佳的 q_{0j} 和 β_j , 使得式(18)中的目标函数最小, 并且 p_j 满足式(19), 因此式(18)中的约束条件可转化为

$$\sum_j A_{ij} u_j + \sum_j B_{ij} q_{0j} + \max_{p \in U} \sum_j (B_{ij} \beta_j - C_{ij}) p_j \leq b_i, \forall i \quad (21)$$

进一步可将式(21)中的内部最大化目标等效为

$$\begin{cases} \max \sum_j (B_{ij} \beta_j - C_{ij}) (p_{0j} + \Delta p_j (z_j^+ - z_j^-)) \\ \text{st } 0 \leq z_j^+ \leq 1, 0 \leq z_j^- \leq 1, z_j^+ + z_j^- \leq 1, \forall j \\ \sum_j (z_j^+ + z_j^-) \leq \Lambda \end{cases} \quad (22)$$

通过对式(22)进行对偶变换^[24], 可以进一步将基于预算不确定性的鲁棒优化模型等价转化为二次规划模型, 即

$$\begin{cases} \min_{\beta, \theta^+, \theta^-, \theta^1, \theta^\Lambda, q_{0j}, \mu} \frac{1}{2} \sum_j a_j u_j^2 + \sum_j c_j u_j \\ \text{st } \sum_j A_{ij} u_j + \sum_j B_{ij} q_{0j} + \sum_j (B_{ij} \beta_j - C_{ij}) p_{0j} + \\ \sum_j (\theta_{ij}^+ + \theta_{ij}^- + \theta_{ij}^1) + \Lambda \theta_{ij}^\Lambda \leq b_i, \forall i \\ \theta_{ij}^+ + \theta_{ij}^1 + \theta_{ij}^\Lambda \geq (B_{ij} \beta_j - C_{ij}) \Delta p_j, \forall i, \forall j \\ \theta_{ij}^- + \theta_{ij}^1 + \theta_{ij}^\Lambda \geq (C_{ij} - B_{ij} \beta_j) \Delta p_j, \forall i, \forall j \\ \theta_{ij}^+ \geq 0, \theta_{ij}^- \geq 0, \theta_{ij}^1 \geq 0, \forall i, \forall j \\ \theta_{ij}^\Lambda \geq 0, \forall i \end{cases} \quad (23)$$

式(23)是一个大规模的二次规划模型, 可以基于 Matlab 的工具箱 Yalmip 进行建模^[25]。在 Yalmip 中直接将约束条件和目标函数显式写出, 同时利用 Yalmip 调用商业求解器 Cplex12.7^[26]求得相应的分布式光伏无功优化结果。

3 仿真分析

本节在 IEEE-33、IEEE-123 两个标准配电网算例^[27]的基础上, 分别在这两个系统中接入不同容量的分布式光伏, 接入分布式光伏容量占系统总容量的比例分别设置为 20%、40%、60%, 这样就生成了六个算例系统, 即 33_L、33_M、33_H、123_L、123_M 和 123_H。分别采用本文所提出的仿射可调鲁棒优化(AARO)方法、基于区间集的鲁棒优化(RO)方法、蒙特卡洛方法(MC)求解分布式光伏无功优化模型, 这里认为蒙特卡洛方法采样为 10 000 次, 每次采样从区间不确定集合中抽取一个分布式光伏实际发电量, 然后利用无功功率的线性决策规则, 对无功功率进行求解, 进而得到全网的电压分布和有功功率损耗, 这里可以认为蒙特卡洛方法得到的结果为精确解。33 节点系统 Λ 设置为 5, 而 123 节点系统 Λ 设置为 10; Cplex 求解二次规划问题时为默认设置。

对六个算例系统, 分别对 $K=0$ 、 $K=0.5$ 、 $K=1$ 的三种情况进行了分析, 表 1—表 3 分别给出了采用 AARO、RO、MC 三种方法得到的结果相对分布式光伏零无功调节时 $\max |\Delta V|_\infty$ 、 $\max P_{\text{Loss}}$ 、 $\text{average } P_{\text{Loss}}$ 的提升百分比, 具体计算公式为

$$\text{提升率} \% = \frac{x|_{Q_{\text{pv}}=0} - x|_{\text{AARO,RO,MC}}}{x|_{Q_{\text{pv}}=0}} \times 100 \quad (24)$$

式中, x 分别表示 $\max |\Delta V|_\infty$ 、 $\max P_{\text{Loss}}$ 、 $\text{average } P_{\text{Loss}}$ 三个指标, 因此, 三个指标越大, 表明该方法的优化效果越好。

表 1 三种方法相对分布式光伏零无功调节时 $\max |\Delta V|_\infty$ 提升百分比

Table 1 Comparison of $\max \Delta V _\infty$ improvement percentage obtained by three methods relative to zero reactive power regulation of distributed photovoltaic										
算例系统	K=0			K=0.5			K=1			%
	AARC	RO	MC	AARC	RO	MC	AARC	RO	MC	
33_L	9	8	9	9	5	8	9	3	9	
33_M	15	9	15	15	6	15	15	3	15	
33_H	18	6	19	19	6	20	19	3	19	
123_L	8	4	9	8	3	8	8	3	9	
123_M	15	4	16	15	3	15	15	3	16	
123_H	19	4	19	19	3	18	18	3	18	

表 2 三种方法相对分布式光伏零无功调节时 $\max P_{Loss}$ 提升百分比

Table 2 Comparison of $\max P_{Loss}$ improvement percentage obtained by three methods relative to zero reactive power regulation of distributed photovoltaic

算例 系统	%								
	K=0			K=0.5			K=1		
	AARC	RO	MC	AARC	RO	MC	AARC	RO	MC
33_L	18	16	19	18	12	18	18	7	18
33_M	26	18	26	26	13	28	26	8	26
33_H	27	14	27	28	13	29	29	7	29
123_L	27	23	28	27	21	27	27	18	27
123_M	31	24	32	31	20	32	31	19	32
123_H	32	22	32	32	22	33	32	17	34

表 3 三种方法相对分布式光伏零无功调节时 average P_{Loss} 提升百分比

Table 3 Comparison of average P_{Loss} improvement percentage obtained by three methods relative to zero reactive power regulation of distributed photovoltaic

算例 系统	%								
	K=0			K=0.5			K=1		
	AARC	RO	MC	AARC	RO	MC	AARC	RO	MC
33_L	16	11	18	11	10	18	11	8	18
33_M	30	14	33	22	5	33	22	10	33
33_H	44	13	47	41	19	49	40	12	49
123_L	31	25	31	29	24	31	29	22	31
123_M	39	27	40	38	26	41	38	25	41
123_H	51	22	52	49	27	52	48	30	53

从以上可以看出：本文所提出的 AARO 方法的提升效果明显优化 RO 方法，并且十分接近 MC 方法，因此，AARO 方法较 RO 方法具有更低的保守性。同时，AARC 方法的 $\max |\Delta V|_{\infty}$ 和 $\max P_{Loss}$ 的改善效果对 K 值相对不敏感。这是由于本文优化目标中并没有明确最小化 average P_{Loss} ，而是最小化了有功损耗和电压偏差的上限。此外，对于不同比例的分布式光伏接入，AARO 方法的提升百分比并不敏感，这表明了本文所提出的 AARO 方法能适应高比例分布式光伏并网的配电网无功调节。

进一步，本文研究了预算不确定集 Λ 的大小对优化结果的影响，表 4 和表 5 分别给出了采用 AARO 方法和 RO 方法的 33_H 和 123_H 两个系统的优化结果。从表 4 和表 5 中可以发现：采用 AARO 方法获得的电压偏差和最大/平均有功损耗的提升效果明显优于 RO 方法，反映了 AARO 方法的保守性较低；同时，AARC 方法和 RO 方法的提升百分比在不同的预算不确定集中基本上保持不变，这说明可以适当缩小预算不确定集以加速优化求解时间。

表 4 AARO 和 RO 方法相对分布式光伏零无功调节时的改进效果对比(IEEE-33_H 系统)

Table 4 Comparison of improvement effects obtained by AARO and RO methods related to zero reactive power regulation of distributed photovoltaic (IEEE-33_H system)

K	Λ	$\max \Delta V _{\infty}$		$\max P_{Loss}$		average P_{Loss}	
		AARC	RO	AARC	RO	AARC	RO
		1	4	18	3	29	7
1	3	19	4	32	8	41	13
1	2	21	4	34	9	45	13
1	1	20	3	34	9	45	13
0	4	19	6	27	14	44	23
0	3	21	10	31	17	44	22
0	2	22	15	31	21	44	26
0	1	26	14	33	19	48	27
0.5	4	19	6	28	13	41	19
0.5	3	19	5	31	12	41	19
0.5	2	22	4	34	4	45	20
0.5	1	21	5	34	9	48	21

表 5 AARO 和 RO 方法相对分布式光伏零无功调节时的改进效果对比(IEEE-123_H 系统)

Table 5 Comparison of improvement effects obtained by AARO and RO methods related to zero reactive power regulation of distributed photovoltaic (IEEE-123_H system)

K	Λ	$\max \Delta V _{\infty}$		$\max P_{Loss}$		average P_{Loss}	
		AARC	RO	AARC	RO	AARC	RO
		1	8	18	3	32	19
1	6	19	3	38	22	48	30
1	4	21	3	44	26	49	30
1	2	20	3	48	29	51	31
0	8	19	4	32	24	51	22
0	6	21	4	38	26	51	22
0	4	22	4	44	27	51	22
0	2	26	4	39	25	41	23
0.5	8	19	3	32	22	49	27
0.5	6	19	3	38	24	49	27
0.5	4	22	3	44	27	49	27
0.5	2	21	4	48	27	51	28

AARC方法和RO方法都是从近似于最优潮流公式的凸二次规划模型中求解得到节点电压和有功损耗结果，而构成二次规划模型的基础是多面体近似公式。本文为了量化每个节点处与实际值(MC方法中每次都采用精确的潮流计算获得)之间的电压偏差，分别比较了33_H系统和123_H系统的最大电压偏差结果，如图1和图2所示。从这两幅图中可以看出：本文采用的32($k=16$)顶点的多面体近似方法具有很高的计算精度，33_H系统和123_H系统的最

大电压偏差的计算精度都达到了 10^{-3} 。

表1—表3中的优化结果需要求解18组优化问题得到18组线性决策规则(6个网络实例中分别对应 $K=1$ 、0、0.5的3个问题),其中12个是二次规划问题,6个是线性规划问题(对应 $K=0$)。本文是在Window 10系统下使用Matlab2018b编程实现,CPU型号: Intel i7-8565U; CPU主频: 1.8 GHz; CPU核数: 4核; 内存: 16 G。表6给出了Cplex求解器的计算时间,表明了AARO方法的优化时间不到1 min,能快速地得到分布式光伏无功输出的线性决策规则,从而发出逆变器的控制指令,这对于快速响应的逆变器来说显然是可以接受的。

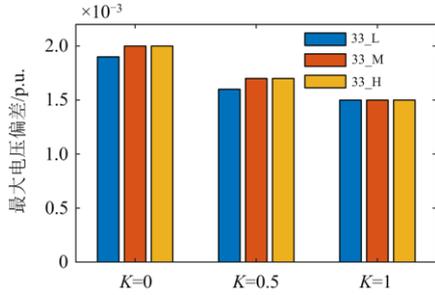


图1 AARO方法相对MC方法的最大电压偏差(33_H系统)

Fig. 1 Comparison of improvement effects obtained by three methods relative to zero reactive power regulation of distributed photovoltaic

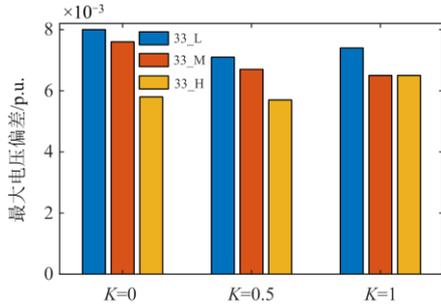


图2 AARO方法相对MC方法的最大电压偏差(123_H系统)

Fig. 2 Maximum voltage deviation between AARO method and MC method (123_H system)

表6 AARO方法的计算时间

Table 6 Computation time of AARO method

系统	$K=0$	$K=0.5$	$K=1$
33_L	2.5	3.3	2.9
33_M	2.8	3.7	2.9
33_H	2.6	3.9	3.1
123_L	26.8	46.9	27.3
123_M	26.2	48.8	26.4
123_H	23.1	42.2	25.7

4 结论

为了抑制高比例分布式光伏并网对配电网电压波动的影响,本文提出了基于分布式光伏无功调节的仿射可调鲁棒优化方法,两个标准IEEE配电系统仿真结果表明:

1) 多面体线性化近似方法将网损和节点电压综合优化模型转化为二次规划模型,具有很高的计算精度,当采用32顶点的多面体近似时,两个系统的最大电压偏差的计算精度都达到了 10^{-3} ;

2) 在考虑分布式光伏有功出力预算不确定性集的情况下,通过对偶变换将鲁棒优化模型转为确定性的二次规划模型,使得分布式光伏的无功调节根据有功出力区间自动调节,与分布式光伏零无功功率调节相比,能大幅度地改善节点电压偏差和有功损耗优化结果,叫传统的鲁棒优化具有更低的保守性;

3) 由于本文采用二次规划求解线性化无功决策规则,能在分钟级获得逆变器的控制指令结果,因此,本文所提出的仿射可调鲁棒优化方法可以适用于高比例分布式光伏并网场景。

附录: 网损推导公式

根据式(4)可求得节点电压的实部和虚部为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}^{re} \\ \mathbf{V}^{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}^{re} & -\mathbf{Y}^{im} \\ -\mathbf{Y}^{im} & -\mathbf{Y}^{re} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_A^{re} \\ \mathbf{Z}_A^{im} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

式(A1)中:节点导纳矩阵的逆矩阵被分为两个子矩阵 \mathbf{Z}_A^{re} 和 \mathbf{Z}_A^{im} ,分别对应着节点电压的实部 \mathbf{V}^{re} 和虚部 \mathbf{V}^{im} 。

令 \mathbf{M} 为节点支路关联矩阵, \mathbf{D}_g 为支路阻抗矩阵的对角矩阵,则有功网损为

$$P_{\text{Loss}} = (\mathbf{M}\mathbf{V}^{re})^T \mathbf{D}_g (\mathbf{M}\mathbf{V}^{re}) + (\mathbf{M}\mathbf{V}^{im})^T \mathbf{D}_g (\mathbf{M}\mathbf{V}^{im}) = (\mathbf{V}^{re})^T \mathbf{L}_A (\mathbf{V}^{re}) + (\mathbf{V}^{im})^T \mathbf{L}_A (\mathbf{V}^{im}) \quad (\text{A2})$$

其中

$$\mathbf{L}_A = \mathbf{M}^T \mathbf{D}_g \mathbf{M} = (\mathbf{D}_g^{0.5} \mathbf{M})^T (\mathbf{D}_g^{0.5} \mathbf{M}) = \mathbf{L}_{Ag}^T \mathbf{L}_{Ag} \quad (\text{A3})$$

定义 $\mathbf{L}_{Ag} = \mathbf{D}_g^{0.5} \mathbf{M}$,则有功网损进一步可转化为

$$P_{\text{Loss}} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}^{re} \\ \mathbf{V}^{im} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{L}_A & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^{re} \\ \mathbf{V}^{im} \end{bmatrix} = \mathbf{P}_A^T \mathbf{P}_A \quad (\text{A4})$$

式中

$$\mathbf{P}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{Ag} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_{Ag} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^{re} \\ \mathbf{V}^{im} \end{bmatrix} \quad (\text{A5})$$

利用式(A1), \mathbf{P}_A 可以进一步改写为

$$\mathbf{P}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{Ag} \mathbf{Z}_A^{re} \\ \mathbf{L}_{Ag} \mathbf{Z}_A^{im} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}^{re} \\ \mathbf{D}^{im} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (\text{A6})$$

式中: $\mathbf{D}^{re} = \mathbf{L}_{Ag} \mathbf{Z}_A^{re}$; $\mathbf{D}^{im} = \mathbf{L}_{Ag} \mathbf{Z}_A^{im}$; 进一步将 \mathbf{P}_A 分割为两个向量如式(A7)。

$$\mathbf{P}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{u}^{re} \\ \mathbf{u}^{im} \end{bmatrix}; \mathbf{u}^{re} = \mathbf{D}^{re} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix}; \mathbf{u}^{im} = \mathbf{D}^{im} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (\text{A7})$$

因此, 式(A4)可以改写平方和形式, 如式(A8)。

$$P_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^m (\mu_i^{re})^2 + (\mu_i^{im})^2 \quad (\text{A8})$$

式中

$$\mu_i^{re} = \mathbf{D}^{re}(i,:) \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix}; \mu_i^{im} = \mathbf{D}^{im}(i,:) \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (\text{A9})$$

参考文献

- [1] 吴斌, 单来支, 王庆, 等. 基于三相不平衡的分布式光伏接入配电网的优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 108-114.
WU Bin, SHAN Laizhi, WANG Qing, et al. Research on optimal configuration of distributed photovoltaic access distribution network based on three-phase unbalance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 108-114.
- [2] 贾健飞, 李博通, 孔祥平, 等. 计及逆变型分布式电源输出特性的配电网自适应电流保护研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 149-155.
JIA Jianfei, LI Botong, KONG Xiangping, et al. Research on adaptive current protection for distribution network considering the output characteristics of inverter-interfaced distributed generator[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 149-155.
- [3] 郑伟, 胡长斌, 丁丽, 等. 基于多智能体系统微电网分布式控制研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 177-184.
ZHENG Wei, HU Changbin, DING Li, et al. Research on distributed control of microgrid based on multi-agent system[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 177-184.
- [4] 程杉, 倪凯旋, 苏高参, 等. 基于 DAPSO 算法的含分布式电源的配电网重构[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 195-202.
CHENG Shan, NI Kaixuan, SU Gaocan, et al. Reconfiguration of distribution network with distributed generations based on DAPSO algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 195-202.
- [5] 郑小宇, 季宇, 张颖, 等. 基于模型预测控制的分布式光伏集群协调优化控制[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(7): 66-74.
ZHENG Xiaoyu, JI Yu, ZHANG Ying, et al. Coordinated optimal control of distributed photovoltaic cluster based on model predictive control[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(7): 66-74.
- [6] 王颖, 文福拴, 赵波, 等. 高密度分布式光伏接入下电压越限问题的分析与对策[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1200-1206.
WANG Ying, WEN Fushuan, ZHAO Bo, et al. Analysis and countermeasures of voltage violation problems caused by high-density distributed photovoltaics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1200-1206.
- [7] 黄祖委, 黄智鹏, 杨夏, 等. 含源配电网的无功电压分段自适应自治控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 10-18.
HUANG Zuwei, HUANG Zhipeng, YANG Xia, et al. Reactive voltage control strategy based on adaptive autonomous segment for distribution network with sources[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 10-18.
- [8] 蔡永翔, 唐巍, 徐鸥洋, 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 Yongxiang, TANG Wei, XU Ouyang, et al. Review of research on voltage control of low voltage distribution network with high proportion of household photovoltaic[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 220-229.
- [9] 方景辉, 温镇. 分布式光伏就地自适应电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 49-55.
FANG Jinghui, WEN Zhen. Research on local adaptive voltage control strategy based on distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 49-55.
- [10] 柴园园, 郭力, 王成山, 等. 含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 738-746.
CHAI Yuanyuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Distributed voltage control in distribution networks with high penetration of PV[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 738-746.
- [11] 张海鹏, 林舜江, 刘明波. 考虑光伏不确定性的低压配电网分散无功补偿鲁棒优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3880-3888.
ZHANG Haipeng, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Robust optimal allocation of reactive power compensation in low voltage distribution networks considering uncertainty of photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3880-3888.
- [12] 蔡永翔, 张璐, 唐巍, 等. 考虑逆变器无功充裕性的含高比例户用光伏低压配电网电压控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2799-2807.

- CAI Yongxiang, ZHANG Lu, TANG Wei, 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*, 2017, 41(9): 2799-2807.
- [13] 蔡永翔, 唐巍, 张璐, 等. 基于光伏逆变器无功调节的低压配电网多模式电压控制[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 133-141.
- CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multi-mode voltage control in low distribution networks based on reactive power regulation of photovoltaic inverters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(13): 133-141.
- [14] 吴晓飞, 戴晖, 黄晓剑, 等. 挖掘光伏无功能力的配电网无功电压协调控制策略[J]. *电力建设*, 2019, 40(5): 78-89.
- WU Xiaofei, DAI Hui, HUANG Xiaojian, et al. Coordinated voltage control strategy of distribution network considering PV's reactive power[J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(5): 78-89.
- [15] 王永杰, 吴文传, 张伯明. 考虑负荷量测和光伏不确定性的主动配电网鲁棒电压控制[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 138-144.
- WANG Yongjie, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Robust voltage control model for active distribution network considering load and photovoltaic uncertainties[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 138-144.
- [16] ZHENG W, WU W, ZHANG B, et al. Robust reactive power optimisation and voltage control method for active distribution networks via dual time-scale coordination[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2017, 11(6): 1461-1471.
- [17] LI Peishuai, WU Zaijun, WANG Yang, et al. Adaptive robust optimal reactive power dispatch in unbalanced distribution networks with high penetration of distributed generation[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(6): 1382-1389.
- [18] DEGHAN S, AMJADY N, CONEJO A J. Adaptive robust transmission expansion planning using linear decision rules[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 4024-4034.
- [19] BOLOGNANI S, ZAMPIERI S. On the existence and linear approximation of the power flow solution in power distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 31(1): 163-172.
- [20] INJETI S K, THUNUGUNTLA V K. Optimal integration of DGs into radial distribution network in the presence of plug-in electric vehicles to minimize daily active power losses and to improve the voltage profile of the system using bioinspired optimization algorithms[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 21-35. DOI: 10.1186/s41601-019-0149-x.
- [21] BENTAL A, NEMIROVSKI A. *Lectures on modern convex optimization: analysis, algorithms and engineering applications*[M]. Philadelphia: SIAM, 2001: 43-137.
- [22] 戴璐平, 吴薇, 黄蓓雯. 考虑不确定性的分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化能量调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(3): 48-55.
- DAI Luping, WU Wei, HUANG Beiwen. Optimal energy scheduling for family grid-connected photovoltaic systems considering uncertainty[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(3): 48-55.
- [23] 吴巍, 汪可友, 李国杰. 考虑风电时空相关性的仿射可调鲁棒机组组合[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(14): 4089-4097.
- WU Wei, WANG Keyou, LI Guojie. Affinely adjustable robust unit commitment considering the spatiotemporal correlation of wind power[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(14): 4089-4097.
- [24] GORISSEN, BRAM L, YANIKOGLU, et al. A practical guide to robust optimization[J]. *Omega: The International Journal of Management Science*, 2015.
- [25] LOFEBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in Matlab[C] // 2004 IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design, September 2-4, 2004, Taipei, China: 284-289.
- [26] 许超, 陈昊, 屠秉慧. 考虑约束集混合筛选的预防安全约束鲁棒最优潮流[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(6): 73-81.
- XU Chao, CHEN Hao, TU Binghui. Preventive security constraint robust optimal power flow considering mixed constraints filtering[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(6): 73-81.
- [27] 袁佩然. 主动配电网分布式鲁棒状态估计[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- YUAN Peiran. Distributed robust state estimation for active distribution network[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
-
- 收稿日期: 2020-08-19; 修回日期: 2020-10-11
- 作者简介:
- 李晓明(1982—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 从事电力系统运行与控制技术研究工作。E-mail: hbdyyilm@163.com
- (编辑 姜新丽)