

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.06.012

基于状态势博弈的配电网分布式电压调节方法

潘江超, 胡雄, 廖才波, 李旻, 聂兴
(南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要:近年来,随着可再生能源渗透率的逐步提高,由可再生能源出力固有的间歇性导致的电压波动和电压越限给配电网的安全稳定运行带来了严峻的挑战。针对该问题,文中将配电网中的电压调节问题建模为状态势博弈模型,并设计相应的分布式算法进行求解。首先,对辐射状配电网潮流模型进行线性化,基于线性潮流模型提出以系统电压分布偏差和无功出力成本之和为目标函数的配电网电压调节方法。然后,基于状态势博弈理论,根据仅需本地及邻居节点信息即可求解的原则设计各节点的子问题,并完成分布式电压调节算法的设计。进一步地,在每次迭代中,以冻结当前孤立节点状态的方式对所设计的算法进行改进,增强算法在通信链路随机故障下的韧性。仿真结果表明:即使存在通信链路随机故障,文中所设计的分布式电压调节算法仍可在保护分布式机组隐私的前提下实现配电网电压分布的快速有效调节。同时,与其他分布式电压调节算法相比,文中算法具有更快的收敛速度和更好的电压调节效果。

关键词:配电网;分布式优化;电压调节;纳什均衡;状态势博弈;随机链路故障

中图分类号:TM731

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)06-0123-10

0 引言

近年来,随着新能源机组的大规模并网,由机组出力高峰期的倒送电导致的过电压问题给配电网的安全稳定运行带来了新的挑战^[1-2]。在电力系统实际运行中,考虑到设备的使用寿命,通常设定传统电压调节装置按一定时间间隔动作,因此其动作频率和响应速度难以跟随新能源机组出力间歇性所引起的快速电压波动^[3-4]。另一方面,通过电力电子接口并网的分布式机组也具备快速无功支撑能力,从而为配电网的快速电压调节提供了一个极具前景的解决方案^[5-6]。

当前主要的电压调节算法可分为集中式、分散式和分布式。集中式控制由控制中心对整个配电网进行全局调控,基于全局信息得出最优控制方案^[7]。但在配电网电压调节中,该方式存在容易暴露用户隐私、易遭受攻击、鲁棒性差等缺陷^[8]。而分散式控制无控制中心、鲁棒性强、扩展性佳,各节点基于本地测量信息进行决策即可完成系统电压调节,一定程度上保护了用户隐私,并节省了通信设备的投资成本。文献[9]根据电压优化问题的解对电压-无功下垂控制特性曲线进行修改,实现了配电网的自适应分散式电压调节,但该算法难以充分利用和协调各节点的无功支撑能力。为协调各节点无功出力,文献[10]对电压越限节点与未越限节

点间的电压-无功灵敏度系数进行排序,未越限节点根据排序结果及无功出力依次参与电压调节,该方式简单有效,但在电压调节任务分担的公平性方面有待改进。文献[11]令未越限节点通过通信获得越限节点的电压偏差并据此修改自身电压调节上下限,从而驱使部分未越限节点参与系统电压调节。文献[12]则将多场景下最优电压调节问题的求解结果作为数据集,采用深度卷积神经网络对其进行训练,完成训练的神经网络用于替换各节点的电压-无功下垂控制特性曲线,但由于配电网运行场景的多样化,该方法的普适性有待商榷。总而言之,由于节点之间缺乏通信,分散式电压调节算法难以充分利用和协调各节点的无功支撑能力,因而难以实现电压调节的全局最优化。

近年来,分布式电压调节算法得到越来越多关注,其核心理念为配电网中参与电压调节的各单元仅需本地信息以及少量邻居信息即可实现配电网协同电压调节^[13]。文献[14]基于配电网线性潮流模型,采用交替方向乘子法设计分布式电压调节算法,通过控制分布式机组的无功出力在线调节配电网电压;文献[15]基于对偶上升算法,通过削减分布式机组的有功出力对三相不平衡配电网的过电压进行分布式调节,但文献[14-15]均要选择恰当的步长以保证算法的收敛性。文献[16]基于主-对偶算法,根据对偶乘子与有功-电压灵敏度及无功-电压灵敏度之间的关系,利用配电网各节点之间的多跳通信实现了各节点对偶乘子的非迭代求解,然后通过调节分布式机组的有功与无功出力实现配

收稿日期:2024-03-22;修回日期:2024-06-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62163025);江西省自然科学基金资助项目(20212ACB212007)

网的分布式电压调节。文献[14-16]中均为同步分布式算法,需要各参与个体同步通信和同步更新,但实际运行中,配电网通信链路难免会发生故障和通信延迟,往往难以满足此类算法的要求。针对上述不足,文献[17]考虑配电网通信链路通信延迟及测量噪声,基于主-对偶算法设计分布式电压调节框架;文献[18]针对微网中通信链路的时变通信延迟,基于动态一致性算法设计分布式平均一致估计器实现抗延迟干扰,并设计分布式电压调节算法实现配电网的平均电压调节,但上述文献均须选择适当的步长并要求各参与个体的步长一致,因而鲁棒性不佳。为保证算法在复杂通信环境下的鲁棒性和收敛性,文献[19]基于状态势博弈理论提出了一种配电网分布式电压调节算法,在实现配电网电压调节的同时最小化分布式机组的有功及无功改变量,但并未考虑通信链路的随机故障及分布式机组的无功出力成本。

在势博弈中,每个势博弈都对应着一个势函数,任意有限势博弈都可以保证存在一个纯纳什均衡解^[20]。基于势博弈理论设计的算法具有有限递增属性,能够保证算法在复杂通信环境下的鲁棒性和收敛性,且无须设置统一步长。因此,针对新能源机组大规模并网导致的电压问题,文中以配电网节点电压偏差和分布式机组无功出力成本之和为目标函数,基于状态势博弈理论设计分布式电压调节算法,并针对配电网通信链路的随机故障对算法进行改进,从而保证算法在随机链路故障情形下的收敛性和有效性。最后,利用数值仿真验证了所设计的分布式电压调节算法的有效性。

1 配电网电压调节模型

1.1 配电网模型

辐射状配电网的拓扑可用一个含 $n + 1$ 个节点的树 $T = \{B, L\}$ 表示,其中 B 为节点集合, $B = \{0, 1, \dots, n\}$; L 为线路集合。节点 0 为与主网相连的变电站,令其为参考节点和树的根节点。对于任意节点 i , 设其电压幅值为 V_i , 有功负荷和无功负荷分别为 $p_{c,i}$ 、 $q_{c,i}$, 有功出力和无功出力分别为 $p_{g,i}$ 、 $q_{g,i}$; 对于任意线路 (i, j) , 设从节点 i 流向节点 j 的有功潮流、无功潮流和线路电流分别为 P_{ij} 、 Q_{ij} 、 I_{ij} , 电阻和电抗分别为 r_{ij} 、 x_{ij} 。为方便表示,以上参数皆为标么值。对于任意线路的 2 个端点,定义离根节点较远的节点为另一节点的子节点;对于任意节点 i , 定义其子节点的集合为 B_i 。综上,配电网潮流可由 DistFlow 模型表示^[21]为:

$$P_{ij} - \sum_{k \in B_i} P_{jk} = p_{c,j} - p_{g,j} + r_{ij} I_{ij}^2 \quad (1)$$

$$Q_{ij} - \sum_{k \in B_i} Q_{jk} = q_{c,j} - q_{g,j} + x_{ij} I_{ij}^2 \quad (2)$$

$$V_i^2 - V_j^2 = 2(P_{ij} r_{ij} + Q_{ij} x_{ij}) - I_{ij}^2 (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad (3)$$

式中: P_{jk} 、 Q_{jk} 分别为从节点 j 流向节点 k 的有功潮流、无功潮流; $p_{c,j}$ 、 $q_{c,j}$ 分别为节点 j 的有功负荷和无功负荷; $p_{g,j}$ 、 $q_{g,j}$ 分别为节点 j 的有功出力和无功出力; V_j 为节点 j 的电压幅值。

首先,由于配电网线路的线损远小于通过该线路的潮流,因此可忽略线损对潮流模型的影响,即忽略模型中与线路电流 I_{ij} 相关的项^[22]。其次,由于配电网中存在电压调节设备,各节点电压幅值通常在标么值 1 附近,即 $V_i \approx 1 (\forall i \in B)$, 于是可近似得到式(4)^[23]。

$$V_i^2 - V_j^2 = (V_i + V_j)(V_i - V_j) \approx 2(V_i - V_j) \quad (4)$$

基于上述简化,可将配电网潮流模型式(1)一式(3)线性化为:

$$P_{ij} - \sum_{k \in B_i} P_{jk} = p_{c,j} - p_{g,j} \quad (5)$$

$$Q_{ij} - \sum_{k \in B_i} Q_{jk} = q_{c,j} - q_{g,j} \quad (6)$$

$$V_i - V_j = P_{ij} r_{ij} + Q_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

为使模型表述更加简洁,可将配电网线性潮流模型式(5)一式(7)改写成矩阵形式。对于含 $n + 1$ 个节点的辐射状配电网,其拓扑可用 $(n + 1) \times n$ 阶关联矩阵 M_0 表示。由于关联矩阵 $n + 1$ 个行向量之间线性相关,令节点 0 为参考节点,并将其对应行删去得到满秩关联矩阵 M , 即 $M_0 = [m_0 \ M^T]^T$, 其中 m_0^T 为关联矩阵第一行,即节点 0 所对应的行向量。令节点 0 电压 $V_0 = 1$, 则式(7)可表示为:

$$M_0^T [V_0 \ V^T]^T = m_0 + M^T V = D_r P + D_x Q \quad (8)$$

式中: V 为由节点电压幅值组成的向量(不含节点 0); D_r 、 D_x 为 $n \times n$ 阶对角矩阵,其对角线元素分别对应各线路电阻和电抗; P 、 Q 分别为由线路有功潮流和无功潮流组成的 n 维列向量,则式(5)和式(6)可改写为:

$$MP = p_g - p_c \quad (9)$$

$$MQ = q_g - q_c \quad (10)$$

式中: p_g 、 q_g 分别为节点有功出力和无功出力组成的 n 维列向量; p_c 、 q_c 分别为节点有功负荷和无功负荷组成的 n 维列向量。将式(9)和式(10)代入式(8)可得:

$$V = R(p_g - p_c) + X(q_g - q_c) - (M^{-1})^T m_0 \quad (11)$$

$$\mathbf{R} = (\mathbf{M}^{-1})^T \mathbf{D}_r \mathbf{M}^{-1} \quad (12)$$

$$\mathbf{X} = (\mathbf{M}^{-1})^T \mathbf{D}_x \mathbf{M}^{-1} \quad (13)$$

式中: \mathbf{R} 、 \mathbf{Z} 分别为节点电阻、电抗矩阵。

由此可得配电网电压分布与节点无功出力的关系为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{X} \mathbf{q}_g + \bar{\mathbf{V}} \quad (14)$$

$$\bar{\mathbf{V}} = \mathbf{R}(\mathbf{p}_g - \mathbf{p}_c) - \mathbf{X} \mathbf{q}_c - (\mathbf{M}^{-1})^T \mathbf{m}_0 \quad (15)$$

式中: $\bar{\mathbf{V}}$ 为配电网在分布式机组无功出力为0时的电压分布。为方便表述,下文统一令 $\mathbf{q} = \mathbf{q}_g$ 。

1.2 配电网电压调节问题

在分布式机组大规模接入的配电网中,可通过调节分布式机组的有功和无功出力实现电压调节。但在实际运行过程中,为了最大化可再生能源的利用率,配电网中的分布式机组通常以最大功率点跟踪方式运行,其有功出力一般不作为电压调节的控制变量。因此文中仅考虑利用分布式机组的无功出力实现配电网电压调节。

对于仅考虑电压偏移的配电网电压调节问题,其目标函数 f_v 可以表示为:

$$f_v = \sum_{i=1}^n (V_i - 1)^2 \quad (16)$$

式(16)中,1为各节点电压额定值的标么值,即文中所考虑的目标函数为在满足系统运行约束的条件下最小化配电网节点的电压偏差。

根据式(14)可将式(16)改写为矩阵形式 $f_v(\mathbf{q})$:

$$f_v(\mathbf{q}) = (\mathbf{X} \mathbf{q} - \bar{\mathbf{V}})^T (\mathbf{X} \mathbf{q} - \bar{\mathbf{V}}) \quad (17)$$

式中: $\bar{\mathbf{V}}$ 为各分布式机组无功出力为0时的配电网电压分布偏差, $\bar{\mathbf{V}} = \mathbf{I} - \bar{\mathbf{V}}$, \mathbf{I} 为所有元素均为1的 n 维列向量。考虑到实际运行中,分布式机组提供无功出力会缩减其使用寿命并增加有功损耗,文中引入成本项反映分布式机组参与电压调节所增加的额外成本 $h(\mathbf{q})$,即:

$$h(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n c_i q_i^2 = \mathbf{q}^T \mathbf{C} \mathbf{q} \quad (18)$$

式中: c_i 为节点 i 处分布式机组无功出力的成本系数, $c_i > 0$; q_i 为节点 i 处分布式机组无功出力; \mathbf{C} 为 $n \times n$ 阶对角矩阵,其对角线元素为各节点处分布式机组无功出力的成本系数。

文中所考虑的电压调节问题为:在考虑分布式机组无功出力限制的前提下,通过调节分布式机组无功出力,使得配电网电压分布偏差和分布式机组无功出力成本之和 $g(\mathbf{q})$ 最小,可表述为:

$$\min_{\mathbf{q}} g(\mathbf{q}) = (\mathbf{X} \mathbf{q} - \bar{\mathbf{V}})^T (\mathbf{X} \mathbf{q} - \bar{\mathbf{V}}) + \mathbf{q}^T \mathbf{C} \mathbf{q} \quad (19)$$

$$\text{s.t. } q_{\min,i} \leq q_i \leq q_{\max,i} \quad i \in B \quad (20)$$

式中: $q_{\max,i}$ 、 $q_{\min,i}$ 分别为节点 i 处分布式机组无功出力上限和下限。

目标函数式(19)为各节点电压偏差的平方和与分布式机组无功出力成本之和;约束式(20)为分布式机组无功出力约束。

2 基于状态势博弈的分布式电压优化

2.1 状态势博弈

在势博弈中,纯纳什均衡具有内在鲁棒性,即在势博弈中任何合理的学习算法都能使各参与者的本地最优解达到纯纳什均衡^[24]。状态势博弈是普通势博弈的一个扩展,其在博弈理论的环境中引入状态空间,增加各参与者的可用信息,从而协调整个博弈的群体行为。一个状态势博弈可以表示为 $G = \{N, S, \{A_l(s)\}_{l \in N}, \{J_l(s, a)\}_{l \in N}, f(s, a)\}$,其中, N 为参与者集合; S 为状态空间; $A_l(s)$ 为参与者 l 在状态 $s \in S$ 下的行动集; $J_l(s, a)$ 为参与者 l 的本地目标函数, $a = \{a_l \mid l \in N\}$ 为由各参与者行动 $a_l \in A_l(s)$ 所构成的行动组合,如式(21)所示; $f(s, a) \in S$ 为一组确定性的状态转移函数。

$$a \in A = \prod_{l \in N} A_l(s) \quad (21)$$

如果一个博弈是状态势博弈,则存在一个势函数 $\Phi: S \times A \rightarrow \mathbb{R}$, $A = \{A_l(s)\}_{l \in N}$,其对任意状态 $s \in S$ 满足以下2个特性^[25]。

(1) 对任意参与者 $l \in N$ 、行动组合 $a \in A$ 以及行动 $a'_l \in A_l(s)$ 都有:

$$J_l(s, a'_l, a_{-l}) - J_l(s, a) = \Phi(s, a'_l, a_{-l}) - \Phi(s, a) \quad (22)$$

式中: $a_{-l} = a \setminus \{a_l\}$,即 a_{-l} 为不包含参与者 l 的行动; a'_l 为参与者 l 选择不同动作。

(2) 势函数 Φ 对任意行动组合 $a \in A$ 以及新状态 $\tilde{s} = f(s, a)$ 满足:

$$\Phi(\tilde{s}, \theta) = \Phi(s, a) \quad (23)$$

式中: θ 为空行动。

特性(1)表明每个参与者的本地目标函数与全局势函数的变化保持一致。若参与者改变行动使得本地目标函数值减小,则势函数值相应减小。特性(2)描述了势函数随状态变化的轨迹。

2.2 电压调节问题的博弈设计

根据上文状态势博弈的特性,文中将配电网电压调节设计为如下状态势博弈^[26]。

参与者集合 N :参与者集合 N 为节点集合 B (不含节点0)的子集, $N_i = \{j \in N \mid (i, j) \in L\}$ 为节点 i 的邻居节点所构成的集合。

状态空间 S : 状态 $s (s \in S)$ 可以用元组表示, 即 $s = (\mathbf{q}, \mathbf{e})$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{e} = [e_1 \ e_2 \ \cdots \ e_i \ \cdots \ e_n] \\ \mathbf{e}_i = [e_{i,1} \ e_{i,2} \ \cdots \ e_{i,k} \ \cdots \ e_{i,n}]^T \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (24)$$

式中: $e_{i,k}$ 为节点 i 对节点 k 无功出力的估计值; \mathbf{e}_i 为节点 i 对各节点无功出力的估计值所构成的 n 维行向量, 因此 \mathbf{e} 为 $n \times n$ 阶矩阵。

任意节点 i 的新状态 $\tilde{s}_i = \{\tilde{q}_i, \tilde{e}_{i,1}, \tilde{e}_{i,2}, \dots, \tilde{e}_{i,n}\}$ 可由本地状态转移函数 $(\tilde{q}_i, \tilde{\mathbf{e}}_{i,k})$ 给出。

$$\tilde{q}_i = q_i + \hat{q}_i \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \tilde{e}_{i,k} = e_{i,k} + n\delta_{i,k}\hat{q}_i + \sum_{j \in N_i} (\hat{e}_{j \rightarrow i,k} - \hat{e}_{i \rightarrow j,k}) \\ k = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (26)$$

式中: \tilde{q}_i 为状态更新后节点 i 处分布式机组无功出力; \hat{q}_i 为节点 i 处分布式机组无功出力的改变量; $\tilde{e}_{i,k}$ 为状态更新后节点 i 对节点 k 无功出力的估计值; $\delta_{i,k}$ 为指标函数, 即仅当 $i=k$ 时, $\delta_{i,k}$ 为 1, 否则为 0; $\hat{e}_{j \rightarrow i,k}$ 为节点 j 传递给节点 i 的关于节点 k 无功出力估计值的改变量; $\hat{e}_{i \rightarrow j,k}$ 为节点 i 传递给节点 j 的关于节点 k 无功出力估计值的改变量。

对于任意节点 $i \in N$, 设计其子优化问题如下:

$$\begin{aligned} \min_{(\tilde{s}_i, \{\tilde{\mathbf{e}}_j | j \in N_i\})} J_i(\tilde{s}_i, \{\tilde{\mathbf{e}}_j | j \in N_i\}) = g(\tilde{\mathbf{e}}_i) + \\ \sum_{j \in N_i} g(\tilde{\mathbf{e}}_j) + \alpha \bar{J}_i(\tilde{s}_i, \{\tilde{\mathbf{e}}_j | j \in N_i\}) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{cases} g(\tilde{\mathbf{e}}_i) = (\mathbf{X}\tilde{\mathbf{e}}_i - \tilde{\mathbf{V}})^T (\mathbf{X}\tilde{\mathbf{e}}_i - \tilde{\mathbf{V}}) + \tilde{\mathbf{e}}_i^T \mathbf{C}\tilde{\mathbf{e}}_i \\ g(\tilde{\mathbf{e}}_j) = (\mathbf{X}\tilde{\mathbf{e}}_j - \tilde{\mathbf{V}})^T (\mathbf{X}\tilde{\mathbf{e}}_j - \tilde{\mathbf{V}}) + \tilde{\mathbf{e}}_j^T \mathbf{C}\tilde{\mathbf{e}}_j \end{cases} \quad (28)$$

$$\bar{J}_i(\tilde{s}_i, \{\tilde{\mathbf{e}}_j | j \in N_i\}) = \sum_{i \in N_i} \sum_{k \in N} (\tilde{e}_{i,k} - \tilde{e}_{j,k})^2 \quad (29)$$

$$\text{s.t.} \quad q_{\min,i} \leq \tilde{q}_i \leq q_{\max,i} \quad (30)$$

式中: $J_i(\tilde{s}_i, \{\tilde{\mathbf{e}}_j | j \in N_i\})$ 为节点 i 子优化问题的目标函数; $\tilde{\mathbf{e}}_i$ 、 $\tilde{\mathbf{e}}_j$ 分别为状态更新后节点 i 、节点 j 对各节点无功出力的估计值所构成的 n 维行向量; $g(\tilde{\mathbf{e}}_i)$ 、 $g(\tilde{\mathbf{e}}_j)$ 分别为状态更新后节点 i 、节点 j 对全局目标函数的估计值; α 为权衡系数, $\alpha > 0$; $\bar{J}_i(\tilde{s}_i, \{\tilde{\mathbf{e}}_j | j \in N_i\})$ 为关于节点 i 估计误差及其邻居节点估计误差的函数, \tilde{s}_i 和集合 $\{\tilde{\mathbf{e}}_j | j \in N_i\}$ 由节点 i 与邻居节点之间的本地通信获得; $\tilde{e}_{j,k}$ 为状态更新后节点 j 对节点 k 无功出力的估计值。由式 (27) 可知, 子优化问题的目标函数中, 式 (28) 所对应的前半部分与全局问题目标函数式 (19) 形式一致, 这为各节点利用本地信息求解全局电压优化问题提供了可能性; $\bar{J}_i(\tilde{s}_i, \{\tilde{\mathbf{e}}_j | j \in N_i\})$ 为惩罚项,

其作用为提高子优化问题对复杂通信情况的鲁棒性并驱动各节点无功出力估计值 $\{e_i | i \in N\}$ 向最优无功出力决策 \mathbf{q}^* 靠拢, 从而保证了算法的收敛性。

势函数 Φ : 为满足状态势博弈的特性 (1), 综合各节点子优化问题的目标函数式 (27) 得到如下势函数。

$$\Phi(\tilde{\mathbf{e}}) = \sum_{i \in N} g(\tilde{\mathbf{e}}_i) + \frac{\alpha}{2} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N_i} \sum_{k \in N} (\tilde{e}_{i,k} - \tilde{e}_{j,k})^2 \quad (31)$$

$$\tilde{e}_{i,k} = f_{i,k}(s, a) \quad i \in N; k \in N \quad (32)$$

式中: $a = \{\hat{q}_i, \hat{e}_{i \rightarrow j,k} | i \in N, j \in N_i, k \in N\}$; $\tilde{\mathbf{e}}$ 为状态更新后的估计值矩阵; $f_{i,k}(s, a)$ 为节点 i 对节点 k 的状态转移函数。

由式 (31) 可知, 当节点状态发生变化时, 子优化问题的目标函数与势函数变化显然一致, 即该势函数满足状态势博弈的特性 (1)。同时, 当各节点采取空行动, 即 $\hat{q}_i = 0$ 、 $\hat{e}_{i \rightarrow j,k} = 0$ 、 $i, j, k \in N$ 时, 由式 (32) 可知各节点状态保持不变, 即 $\tilde{e}_{i,k} = f_{i,k}(\tilde{s}, \mathbf{0})$ 。综上可得 $f_{i,k}(\tilde{s}, \mathbf{0}) = f_{i,k}(s, a)$, 该势函数满足状态势博弈的特性 (2)。

2.3 基于状态势博弈的分布式算法

由状态势博弈的特性 (1) 可知, 各博弈参与者的子优化问题目标函数增量与势函数 (即全局优化问题目标函数) 增量保持一致, 因此各博弈参与者在选择行动时只须优化所对应子优化问题即可改善全局优化问题。当各博弈参与者的子优化问题均达到最优时, 其无法再通过行动改善全局优化问题, 此时博弈达到纳什均衡, 即全局最优解。综上所述, 当博弈满足状态势博弈的特性 (1) 时, 各博弈参与者只须不断根据对应子优化问题的解来选择行动即可得到全局优化问题的最优解。

在文中所设计的状态势博弈中, 子优化问题目标函数式 (27) 与势函数式 (31) 满足状态势博弈的特性 (1); 同时, 各节点只需自身及邻居节点的相关信息即可完成子优化问题式 (27) 一式 (30) 的求解并选择相应行动, 因此各节点可对子优化问题序列进行循环求解。由状态势博弈的特性可知, 当子优化问题的循环求解达到收敛时, 所得优化结果为博弈的静态纳什均衡, 即全局最优解, 从而实现配电网的分布式电压调节。

由于子优化问题的目标函数为连续可微函数, 在 $t \geq 0$ 的任意时刻, 当给定状态为 $s(t) = (\mathbf{q}(t), \mathbf{e}(t))$ 时, 任意节点 i 可利用投影梯度算法对式 (27) 一式 (30) 进行求解并选择行动如下:

$$\hat{q}_i(t) = \left[-\epsilon_{q,i} \frac{\partial J_i(\tilde{s}_i, \{\tilde{\mathbf{e}}_j | j \in N_i\})}{\partial \hat{q}_i} \right]^+ =$$

$$\left[-\epsilon_{q,i} \left[n \frac{\partial g}{\partial q_i} \Big|_{e_i(t)} + 2n\alpha \sum_{j \in N_i} (e_{i,i}(t) - e_{j,i}(t)) \right] \right]^+ \quad (33)$$

$$\hat{e}_{i \rightarrow j,k}(t) = -\epsilon_{e,i} \frac{\partial J_i(\tilde{s}_i, \{\tilde{\mathbf{e}}_j | j \in N_i\})}{\partial \hat{e}_{i \rightarrow j,k}} =$$

$$\epsilon_{e,i} \left[\frac{\partial g}{\partial q_k} \Big|_{e_i(t)} - \frac{\partial g}{\partial q_k} \Big|_{e_j(t)} + 2\alpha(e_{i,k}(t) - e_{j,k}(t)) + \right.$$

$$\left. 2\alpha \sum_{b \in N_i} (e_{i,k}(t) - e_{b,k}(t)) \right] \quad (34)$$

式中: $[\cdot]^+$ 表示在闭区间 $[q_{\min,i} - q_i(t), q_{\max,i} - q_i(t)]$ 上的投影; $\epsilon_{q,i}$ 、 $\epsilon_{e,i}$ 分别为节点 i 计算 $\hat{q}_i(t)$ 和 $\hat{e}_{i \rightarrow j,k}(t)$ 的算法步长; $e_{i,i}(t)$ 为节点 i 对自身无功出力的估计值; $e_{j,i}(t)$ 、 $e_{j,k}(t)$ 、 $e_{b,k}(t)$ 为前者节点对后者节点无功出力的估计值; $\mathbf{e}_j(t)$ 为节点 j 对各节点无功出力估计值所构成的向量; q_k 为节点 k 处分布式机组无功出力。

算法行动满足条件式(35)时达到收敛,其中 ε 为算法的收敛精度。

$$\sum_{i \in N} (\hat{q}_i(t))^2 + \sum_{k \in N} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N_i} (\hat{e}_{i \rightarrow j,k}(t))^2 \leq \varepsilon \quad (35)$$

综上,文中所设计的分布式电压调节算法执行步骤如下(假设各节点已知配电网拓扑参数 \mathbf{X})。

步骤1:配电网运营商将配电网电压分布偏差 $\tilde{\mathbf{V}}$ 发送给各节点。

步骤2:各节点通过本地通信获得邻居节点状态。对节点 i 而言,其邻居节点状态的集合为 $\{s_j(t) | j \in N_i\}$ 。然后各节点根据式(33)、式(34)独立并行对自身当前行动进行决策,并将该决策发送给配电网运营商。

步骤3:配电网运营商根据式(35)判断算法是否收敛,若是,则通知各节点终止迭代;若否,则不采取任何行动。

步骤4:各节点通过本地通信获得邻居节点的当前决策信息。对节点 i 而言,其需要的邻居节点决策信息为 $\{\hat{e}_{j \rightarrow i,k}(t) | k \in N, j \in N_i\}$ 。然后各节点根据状态转移函数式(25)、式(26)同步更新自身状态并转步骤2。

2.4 随机链路故障下的分布式优化算法

上文所设计的分布式电压调节算法能够实现电压调节问题的分布式求解,但要求所有节点同步交互信息和更新状态,因此所有参与节点须共用全局时钟。在实际运行中,同步通信容易实现,但电

力系统通信网络中不可避免的通信时延和通信链路故障会使各节点的本地时钟与全局时钟难以保持一致,进而无法完成同步更新。为解决此问题,有必要对该分布式算法进行改进。文中使用冻结策略来实现算法对随机通信链路故障情形下电压调节问题的分布式求解。具体而言,即在算法的每次迭代中,各节点只有在与邻居节点进行信息交互时才进行行动选择和状态更新,否则保持状态不变,即冻结自身状态。

对于 $t \geq 0$ 时的动态网络拓扑,令 $L(t) \in L$ 为当前时刻未发生链路故障的通信线路集合; $N^+(t) \in N$ 为当前时刻能与邻居节点通信的节点集合; $N^-(t) \in N$ 为当前时刻因通信链路故障而无法与系统其他节点通信的节点集合; $N_i(t) \subseteq N_i$ 为当前时刻节点 i 的邻居节点集合。基于上述定义,根据动态通信网络拓扑,搭建通信链路随机故障后的分布式算法框架如下。

(1) 在 t 时刻,对于节点 $i \in N^-(t)$,冻结自身当前状态,即令:

$$s_i(t+1) = s_i(t) \quad (36)$$

(2) 在 t 时刻,对于节点 $i \in N^+(t)$,根据自身状态 $s_i(t)$ 和邻居节点状态集合 $\{s_j(t) | j \in N_i(t)\}$ 选择行动如下:

$$\hat{q}_i(t) = \left[-\epsilon_{q,i} \frac{\partial J_i(\tilde{s}_i, \{\tilde{\mathbf{e}}_j | j \in N_i(t)\})}{\partial \hat{q}_i} \right]^+ =$$

$$\left[-\epsilon_{q,i} \left[n \frac{\partial g}{\partial q_i} \Big|_{e_i(t)} + 2n\alpha \sum_{j \in N_i(t)} (e_{i,i}(t) - e_{j,i}(t)) \right] \right]^+ \quad (37)$$

$$\hat{e}_{i \rightarrow j,k}(t) = -\epsilon_{e,i} \frac{\partial J_i(\tilde{s}_i, \{\tilde{\mathbf{e}}_j | j \in N_i(t)\})}{\partial \hat{e}_{i \rightarrow j,k}} =$$

$$\epsilon_{e,i} \left[\frac{\partial g}{\partial q_k} \Big|_{e_i(t)} - \frac{\partial g}{\partial q_k} \Big|_{e_j(t)} + 2\alpha(e_{i,k}(t) - e_{j,k}(t)) + \right.$$

$$\left. 2\alpha \sum_{b \in N_i(t)} (e_{i,k}(t) - e_{b,k}(t)) \right] \quad (38)$$

综上,通信链路随机故障情形下的分布式电压调节算法执行步骤如下(假设各节点已知配电网拓扑参数 \mathbf{X})。

步骤1:配电网运营商将配电网电压分布偏差 $\tilde{\mathbf{V}}$ 发送给各节点。

步骤2:各节点根据当前与邻居节点的通信情况确定自身属于 $N^-(t)$ 或 $N^+(t)$ 。

步骤3:若节点 $i \in N^-(t)$,则冻结自身当前状态;若节点 $i \in N^+(t)$,则通过信息交互获得邻居节点的当前状态信息。对节点 i 而言,其邻居节点当

前状态的集合为 $\{s_j(t) | j \in N_i(t)\}$ 。根据式(37)、式(38)独立并行对自身当前行动进行决策,并将当前决策发送给配电网运营商。

步骤4:配电网运营商根据式(35)判断算法是否收敛,若是,则通知各节点终止迭代;若否,则不采取任何行动。

步骤5:节点 $i \in N^+(t)$ 通过本地通信获得邻居节点的当前决策信息。对节点 i 而言,其需要的邻居节点决策信息为 $\{\hat{e}_{j \rightarrow i,k}(t) | k \in N, j \in N_i(t)\}$ 。根据状态转移函数式(25)、式(26)同步更新自身状态并转步骤2。

3 数值仿真

3.1 37 节点测试系统

文中基于如图1所示 IEEE 37 节点测试系统对所设计的分布式电压调节算法进行验证,其中基准电压为 4.7 kV,基准功率为 100 MV·A;节点0为参考节点且其电压为 1.0 p.u.。具体线路参数^[27]如表1所示。

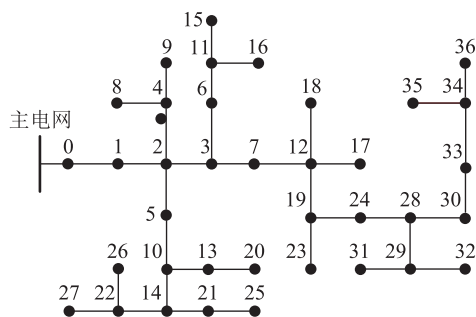


图1 配电网拓扑

Fig.1 Topology of the distribution network

节点 i 处分布式机组无功出力成本系数 c_i 为 1 800, $i \in N$;各节点处分布式机组无功出力上、下限分别为 0.001 p.u.和-0.001 p.u.。设定各节点分布式机组的初始无功出力为 0。

3.2 新能源机组有功出力陡降

当各节点新能源机组有功出力陡降时,主网输入配电网的有功功率需求骤增,过大的线路潮流可能导致部分节点电压越下限。在此情形下,各节点可通过调节分布式机组无功出力对配电网电压分布进行优化。由于新能源机组有功出力陡降可等效为节点净有功负荷突增,因此文中假设配电网各节点净负荷突增为 $80+j40$ kV·A。

当配电网中新能源机组有功出力陡降时,基于文中所设计的分布式电压调节算法分别在无链路故障和随机链路故障(链路故障率为 0.4)2 种工况下对配电网电压分布进行优化。其中,设置权衡系

表1 线路参数

Table 1 Line parameters

首端节点	末端节点	电阻/p.u.	电抗/p.u.	首端节点	末端节点	电阻/p.u.	电抗/p.u.
0	1	0.445	0.300	12	19	0.340	0.177
1	2	0.375	0.235	13	20	0.896	0.332
2	3	0.516	0.323	14	21	0.638	0.331
2	4	0.689	0.255	14	22	1.585	0.587
2	5	0.383	0.199	19	23	0.551	0.204
3	6	0.413	0.153	19	24	0.340	0.177
3	7	0.638	0.331	21	25	0.482	0.179
4	8	0.413	0.153	22	26	0.207	0.077
4	9	0.551	0.204	22	27	1.309	0.485
5	10	0.553	0.287	24	28	0.595	0.309
6	11	0.298	0.155	28	29	0.896	0.332
7	12	0.213	0.110	28	30	0.681	0.353
10	13	0.138	0.051	29	31	0.344	0.128
10	14	0.851	0.441	29	32	2.205	0.816
11	15	0.344	0.128	30	33	0.425	0.221
11	16	0.482	0.179	33	34	0.425	0.221
12	17	0.638	0.331	34	35	0.344	0.128
12	18	0.375	0.235	34	36	0.425	0.221

数 $\alpha = 1$ 。同时,在所设计的算法中,各节点可独立选择步长,但为仿真及陈述方便,算法步长均取相同值,即 $\epsilon_{q,i} = 2 \times 10^{-7}$, $\epsilon_{e,i} = 2.8 \times 10^{-5}$, $i \in N$,具体仿真结果如图2和图3所示。

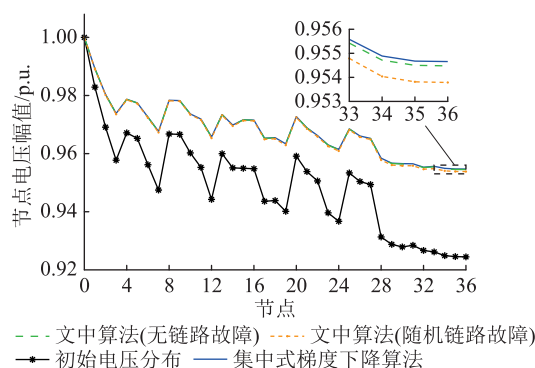


图2 算法的电压调节效果(出力陡降)

Fig.2 Voltage regulation performance of the algorithms (active power output drop)

由图2可知,在无链路故障和随机链路故障下,文中算法得到的电压分布与集中式梯度下降算法得到的电压分布基本重合,仅在配电网末端节点有些许偏差,证明了该算法在新能源机组有功出力陡降情形下的有效性。

图3为新能源机组有功出力陡降情形下,通信网络发生随机链路故障时各节点对节点1无功出力的估计误差变化趋势。可知,由于随机链路故障使各节点缺少部分邻居节点的状态信息,各节点估计

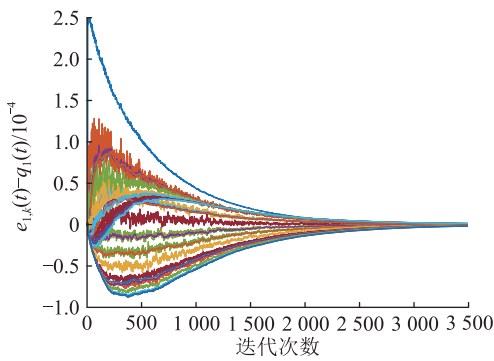


图3 随机链路故障下各节点对节点1 估计误差变化趋势(出力陡降)

Fig.3 Evolution of estimation error of bus 1 made by the other buses under random link failures (active power output drop)

误差在初始阶段波动较大,但随后均迅速收敛至0附近,从而证明了文中算法的收敛性和鲁棒性。

3.3 新能源机组有功出力陡升

当各节点新能源机组有功出力陡升时,配电网向主网倒送有功功率可能导致部分节点电压越上限。在此情形下,各节点可通过调节分布式机组无功出力对配电网电压分布进行优化。由于新能源机组有功出力陡升可等效为节点净有功负荷突降,因此文中假设配电网各节点净负荷突降为 $-120 + j40 \text{ kV}\cdot\text{A}$ 。

当配电网中新能源机组有功出力陡升时,基于文中算法分别在无链路故障和随机链路故障(链路故障率为0.4)2种工况下对配电网电压分布进行优化。设置权衡系数 $\alpha=1$,算法步长 $\epsilon_{q,i}=1.5 \times 10^{-7}$, $\epsilon_{e,i}=3 \times 10^{-5}$, $i \in N$,具体仿真结果见图4和图5。

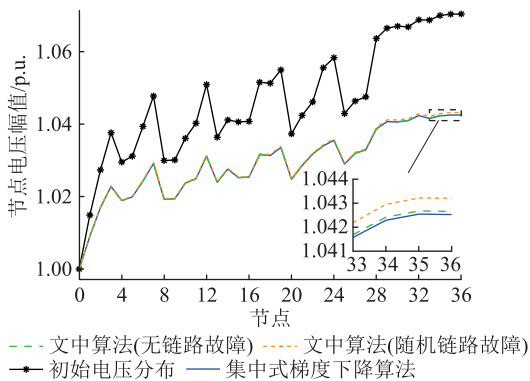


图4 算法的电压调节效果(出力陡升)

Fig.4 Voltage regulation performance of the algorithms (active power output rise)

由图4可知,文中算法在无链路故障和随机链路故障下得到的电压分布与集中式梯度下降算法得到的电压分布基本重合,仅在配电网末端节点存在较小偏差,证明了该算法在新能源机组有功出力

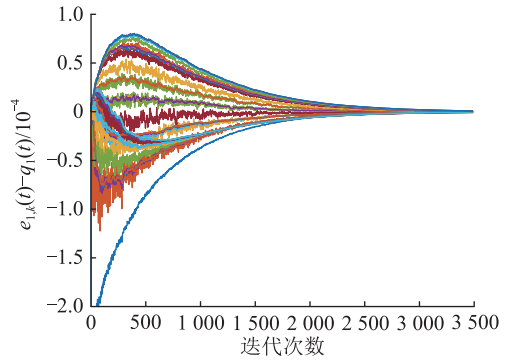


图5 随机链路故障下各节点对节点1 估计误差变化趋势(出力陡升)

Fig.5 Evolution of estimation error of bus 1 made by the other buses under random link failures (active power output rise)

陡升情形下的有效性。

图5为新能源机组有功出力陡升情形下,通信网络发生随机链路故障时各节点对节点1无功出力的估计误差变化趋势。可知,与新能源机组有功出力陡降时类似,各节点对节点1无功出力估计误差在初始阶段波动较大,即随机链路故障导致各节点缺失部分邻居节点状态信息,对算法影响较大,但随后均迅速收敛至0附近,进一步说明了文中算法在通信链路随机故障下仍具有良好的收敛性。

3.4 算法比较

为更好地展示分布式电压调节算法的有效性及其收敛速度,文中将其与集中式梯度下降算法和交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)在相同工况下进行对比(相关仿真参数与前文一致),具体仿真结果如图6—图9所示。

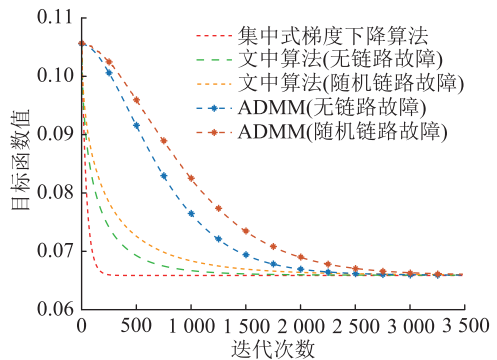


图6 目标函数值随迭代次数的变化趋势(出力陡降)

Fig.6 Evolution of the objective functions versus iterations (active power output drop)

图6为新能源机组有功出力陡降时,各算法目标函数值随迭代次数的变化趋势。可知,在通信网络无链路故障和链路故障率为0.4的2种工况下,文中算法所得最优目标函数值均与集中式梯度下降算法的结果一致,验证了文中算法在随机链路故

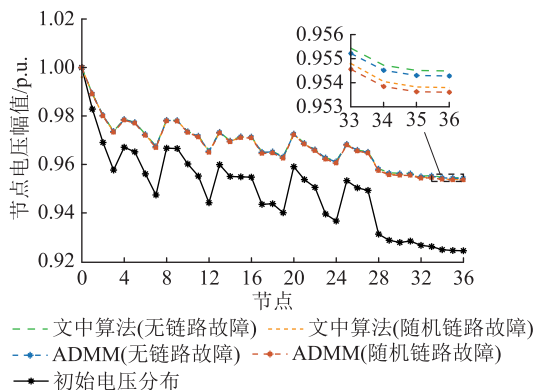


图7 各算法的电压调节效果对比(出力陡降)

Fig.7 Voltage regulation performance comparison of each algorithm (active power output drop)

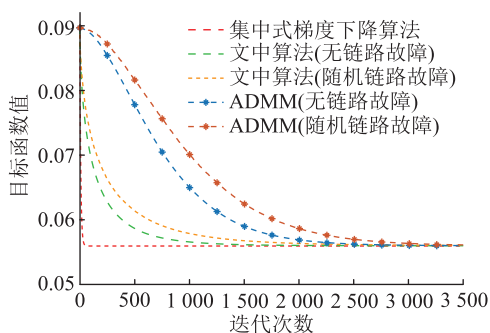


图8 目标函数值随迭代次数的变化趋势(出力陡升)

Fig.8 Evolution of the objective functions versus iterations (active power output rise)

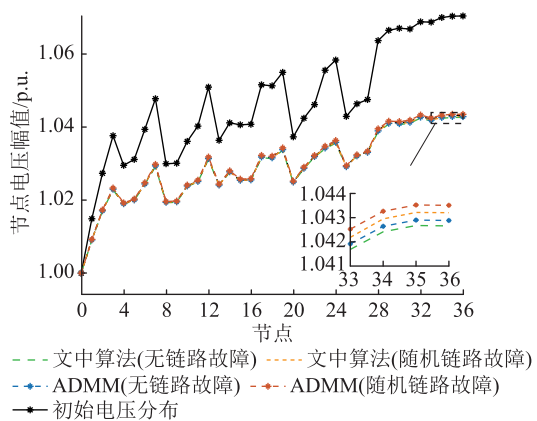


图9 各算法的电压调节效果对比(出力陡升)

Fig.9 Voltage regulation performance comparison of each algorithm (active power output rise)

障下的鲁棒性和有效性。另一方面,虽然文中算法的收敛速度相对于集中式梯度下降算法较慢,但其无须知晓全局信息,各节点仅须根据本地信息进行决策,从而有效保护了各分布式机组的隐私,并降低了电压调节中的通信负担和通信成本。同时,与ADMM对比可知,文中算法在无链路故障和随机链路故障2种工况下的收敛速度均快于ADMM。

图7为新能源机组有功出力陡降时,文中算法

和ADMM分别在通信网络无链路故障和链路故障率为0.4的2种工况下得到的电压调节效果,不难看出,文中算法在上述2种工况下的电压优化效果都略优于ADMM。

图8和图9分别为新能源机组有功出力陡升时,各算法目标函数值随迭代次数的变化趋势和各算法的电压调节效果。可知,文中算法在新能源机组有功出力陡升时的电压调节效果与出力陡降时的效果相似,即在无链路故障和随机链路故障下均具有良好的鲁棒性和有效性,且其在收敛速度和电压调节效果方面也略优于ADMM。

4 结论

针对可再生能源出力间歇性导致的配电网电压问题,文中在考虑配电网通信链路随机故障的前提下,设计了基于状态势博弈理论的分布式电压调节算法,并利用IEEE 37节点测试系统对文中算法进行了仿真验证,得出结论如下:

(1) 文中算法能够快速收敛得到全局问题的最优解。同时,该算法仅要求配电网各节点与邻居节点进行信息交互即可实现对电压分布的调节,有效保护了分布式机组的隐私。

(2) 当配电网中存在通信链路随机故障时,文中算法仍具有良好的鲁棒性和有效性,即该算法可在一定程度上降低配电网电压稳定对通信网络稳定性的要求。

(3) 文中算法在收敛速度和电压调节效果方面均略优于ADMM。

致谢

本文得到江西省“双千”计划项目(jxsq202010-1052)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] WAGLE R, SHARMA P, SHARMA C, et al. Optimal power flow based coordinated reactive and active power control to mitigate voltage violations in smart inverter enriched distribution network [J]. International Journal of Green Energy, 2024, 21 (2): 359-375.

[2] LI H S, LIU W X, YU L. Centralized-local PV voltage control considering opportunity constraint of short-term fluctuation [J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 81-91.

[3] WANG Y, QIU D W, WANG Y, et al. Graph learning-based voltage regulation in distribution networks with multi-microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39 (1): 1881-1895.

[4] 刘杨华, 杨悦荣, 林舜江. 含光伏配电网中储能和无功补偿装置协调的多目标凸优化配置方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 22-33.

- LIU Yanghua, YANG Yuerong, LIN Shunjiang. A multi-object convex optimization method for the coordinated allocation of energy storage and reactive power compensation devices in distribution network integrated with photovoltaics[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(5): 22-33.
- [5] JALALI M, SINGH M K, KEKATOS V, et al. Fast inverter control by learning the OPF mapping using sensitivity-informed Gaussian processes [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(3): 2432-2445.
- [6] 李文竹, 寇汉鹏. 考虑暂态过电压抑制的新能源送出型电网无功优化方法[J]. *电瓷避雷器*, 2023(6): 117-125.
- LI Wenzhu, KOU Hanpeng. Reactive power optimization method of new energy outgoing grid considering transient overvoltage suppression [J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2023(6): 117-125.
- [7] JEON S, CHOI D H. Joint optimization of volt/var control and mobile energy storage system scheduling in active power distribution networks under PV prediction uncertainty [J]. *Applied Energy*, 2022, 310: 118488.
- [8] POUDEL S, MUKHERJEE M, SADNAN R, et al. Fairness-aware distributed energy coordination for voltage regulation in power distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(3): 1866-1880.
- [9] SUN X Z, QIU J, TAO Y C, et al. Coordinated real-time voltage control in active distribution networks: an incentive-based fairness approach [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(4): 2650-2663.
- [10] ZHANG Z Q, DOU C X, YUE D, et al. Voltage sensitivity-related hybrid coordinated power control for voltage regulation in ADNs [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(2): 1388-1398.
- [11] JAFARI M R, PARNIANI M, RAVANJI M H. Decentralized control of OLTC and PV inverters for voltage regulation in radial distribution networks with high PV penetration [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(6): 4827-4837.
- [12] SUN X Z, QIU J, ZHAO J H. Optimal local volt/var control for photovoltaic inverters in active distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(6): 5756-5766.
- [13] HU X, LIU Z W, WEN G H, et al. Voltage control for distribution networks via coordinated regulation of active and reactive power of DGs [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(5): 4017-4031.
- [14] LIU H J, SHI W, ZHU H. Distributed voltage control in distribution networks: online and robust implementations [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 6106-6117.
- [15] SARKER P S, RAFY M F, SRIVASTAVA A K, et al. Cyber anomaly-aware distributed voltage control with active power curtailment and DERs [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2024, 60(1): 1622-1633.
- [16] YU P, WAN C, SUN M Y, et al. Distributed voltage control of active distribution networks with global sensitivity [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(6): 4214-4228.
- [17] PATARI N, SRIVASTAVA A K, LI N. Distributed optimal voltage control considering latency and asynchronous communication for three phase unbalanced distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(2): 1033-1043.
- [18] YANG T, LI H, CAI S T, et al. Distributed voltage control for microgrids against time-varying communication delay interference [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(3): 2410-2423.
- [19] CARO-RUIZ C, PÁVAS A, MOJICA-NAVA E. Voltage distributed control for power networks with DERs [C] // 2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Minneapolis, MN, USA. IEEE, 2016: 1-5.
- [20] 程代展, 刘挺, 王元华. 博弈论中的矩阵方法 [J]. *系统科学与数学*, 2014, 34(11): 1291-1305.
- CHENG Daizhan, LIU Ting, WANG Yuanhua. Matrix approach to game theory [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2014, 34(11): 1291-1305.
- [21] ZHANG K, TROITZSCH S, HANIF S, et al. Coordinated market design for peer-to-peer energy trade and ancillary services in distribution grids [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(4): 2929-2941.
- [22] LIU J H, LONG Q F, LIU R P, et al. Privacy-preserving peer-to-peer energy trading via hybrid secure computations [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(2): 1951-1964.
- [23] TANG Z Y, HILL D J, LIU T. Distributed coordinated reactive power control for voltage regulation in distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(1): 312-323.
- [24] YOUNG H P. *Strategic learning and its limits* [M]. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- [25] MARDEN J R. State based potential games [J]. *Automatica*, 2012, 48(12): 3075-3088.
- [26] LI N, MARDEN J R. Designing games for distributed optimization [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2013, 7(2): 230-242.
- [27] 祁升龙, 王放, 刘海涛, 等. 以激励为导向的配电网分布式电压调节 [J]. *信息与控制*, 2022, 51(4): 456-465.
- QI Shenglong, WANG Fang, LIU Haitao, et al. Incentive-oriented distributed voltage regulation in distribution networks [J]. *Information and Control*, 2022, 51(4): 456-465.

作者简介:



潘江超

潘江超(2000),男,硕士在读,研究方向为智能电网的分布式控制与优化(E-mail: jpan@email.ncu.edu.cn);

胡雄(1985),男,博士,教授,研究方向为智能电网的分布式控制与优化;

廖才波(1989),男,博士,教授,研究方向为输变电设备多物理场仿真分析及状态评估。

A state-based potential game approach for distributed voltage regulation in distribution networks

PAN Jiangchao, HU Xiong, LIAO Caibo, LI Min, NIE Xing

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: With the increasing penetration rate of renewable energy sources over recent years, voltage fluctuations and violations due to the inherent intermittency of renewable energy sources pose a great challenge to the safe and steady operation of distribution networks. To tackle this problem, the voltage regulation problem in distribution networks is formulated as a state-based potential game and then solved in a distributed manner in this paper. Specifically, the power flow model of radial distribution networks is linearized at first. Then, based on the linearized power flow model, a voltage regulation problem in distribution networks is modeled, whose objective function is the sum of voltage profile deviations and reactive power generation costs. Next, the subproblems for each bus is designed based on the state-based potential game theory, in the solving of which only its local and neighbor information are required, facilitating the design of the distributed voltage regulation algorithm. Further, the proposed algorithm is improved by freezing the states of isolated buses during each iteration, increasing its resilience against random link failures. Simulation results show that the proposed distributed voltage regulation algorithm can achieve fast and effective voltage profile regulation in distribution networks while preserving the privacy of distributed generators, even in the presence of random communication link failures. In addition, compared to other distributed voltage regulation algorithms, the proposed algorithm exhibits a faster convergence rate and better voltage regulation performance.

Keywords: distribution networks; distributed optimization; voltage regulation; Nash equilibrium; state-based potential game; random link failures

(编辑 陆海霞)

(上接第 87 页)

Virtual synchronous generator control strategy of M3C converter in fractional frequency offshore wind power system

HAN Huachun¹, NING Lianhui², LI Chenchen², YE Zhibin², YANG Caihong²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Xi'an Jiaotong University (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment), Xi'an 710049, China)

Abstract: In this paper, the control strategy of modular multilevel matrix converter (M3C) is studied in the scenario of fractional frequency offshore wind power. The M3C system is compared with the traditional rotating synchronous generator system in terms of structural parameters and motion equations, and the feasibility of the M3C inverter to simulate the external characteristics of the synchronous generator is analyzed. With the goal of converter participating in system frequency regulation and stabilizing system voltage, based on the control theory of virtual synchronous generator (VSG), the control scheme design of virtual synchronous generator of M3C converter is completed, and a control strategy suitable for fractional frequency offshore wind power M3C converter is established. Finally, using PSCAD/EMTDC simulation platform, the correctness of this control strategy is verified. With the same system structure and parameters, the control strategy is compared with the decoupling control strategy of double dq coordinate transformation. The results show that the VSG control strategy can make the frequency converter have inertia and damping characteristics. The VSG control can participate in the system frequency regulation, and has good control response characteristics.

Keywords: offshore wind power; fractional frequency transmission system (FFTS); modular multilevel matrix converter (M3C); frequency regulation of the system; virtual synchronous generator control; inertial damping characteristics

(编辑 方晶)