低效通信配电网的分布式电压控制

冯壮壮[1,2]，谷廷坤[1]

(1. 山东大学电气工程学院，山东 济南 250061；

2. 国网江苏省电力公司徐州分公司，江苏 徐州 221000)

摘要：针对低效通信配电网的电压问题，结合模型预测控制(Model Predictive Control，MPC)方法提出了一种不依赖于高效通信的分布式电压控制系统，主要包括灵敏度计算、关键节点选取和指令分配三个模块。首先通过扰动分析法实现连续变量和离散变量电压灵敏度的精确计算，进而根据电压灵敏度计算结果定义节点的可观性、可控性和鲁棒性指标，综合评估后选出关键节点。然后以分布式电源容量利用比和慢速设备动作次数利用比为一致性变量实现指令分配。最后建立 MPC 模型并抽象为非线性混合整数规划问题求解，通过江苏某实际配电网验证了所提控制系统的有效性。

关键词：模型预测；低效通信配电网；电压灵敏度；扰动分析法；分布式电源容量利用比

Distributed voltage control of low efficient communication distribution network

FENG Zhuangzhuang[1,2], GU Tingkun[1]

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Xuzhou Power Supply Company of State Grid Electric Power Company, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Aiming at the voltage problem of low-efficiency communication distribution network, a distributed voltage control system based on Model Predictive Control (MPC) is introduced. It mainly includes three modules of sensitivity calculation, key node selection and command distribution. First, the accurate calculation of the voltage sensitivity of continuous and discrete variables is realized by the disturbance analysis method. Then the observability, controllability and robustness indexes of the nodes are defined according to the voltage sensitivity calculation results, and the key nodes are selected after comprehensive evaluation. Then, the distributed power capacity utilization ratio and the slow equipment operation frequency utilization ratio are used as consistent variables to realize the command distribution. Finally, the MPC model is established and abstracted as a nonlinear mixed integer programming problem. The effectiveness of the proposed control system is verified through an actual distribution network in Jiangsu.

Key words: model predictive control; low-efficiency communication distribution network; voltage sensitivity; disturbance analysis method; distributed power capacity utilization ratio

0 引言

分布式电源并网比例日益增大，电网电压控制对通信条件的依赖也随之增大，在实际应用中，监测和通信条件不完备的低效通信配电网的电压控制问题亟待解决，国内外学者对此进行了大量研究[1-4]。

低效通信配电网的电压问题通常采用分布式控制[5]。文献[6]基于部分量测量将网络化简，进而提出了一种集群电压协调控制策略，以解决不

山东自然科学基金面上项目（ZR2014AM004）

完全量测系统的电压越限问题。文献[7]基于分布式协同控制方法，采用分布式电源分组模式设计了配电网多目标分布式优化控制策略。上述分布式控制方法都是在某一时间断面上对电压进行优化控制，许多学者将模型预测控制(Model Predictive Control，MPC)应用在配电网电压控制中，仅借助历史信息对控制时域进行延伸。文献[8-9]基于 MPC 实现主动配电网日前调度、日内滚动调度以及实时反馈校正，减少可再生能源间歇性以及负荷预测误差对配电网运行的影响。文献[10-11]提出了 DG、储能和可中断负荷协调的模型预测控制策略，能有效缓解一定控制时域内的电压问题。上述 MPC 相关研究虽然实现了电压连续控制，但仍然建立在一定的通信基础上。文献[12]提出了一、二次无通信模块的无线充电系统的控制策略。文献[13]为降低通信故障场景下的电网运行风险，提出一种失联分布式电源差异化就地控制策略的优化方法。上述方法对模型可靠性要求较高。

针对实际工程中配电网通信压力大、信息传输效率低下的问题，本文结合 MPC 思想提出了一种不依赖高效通信的分布式电压控制系统。该系统首先利用扰动分析法实现了低运算量电压灵敏度计算，然后结合配电网拓扑结构和电压灵敏度计算结果提出了关键节点综合评估指标，进而通过定义一致性变量实现对关键节点控制变量的指令分配。进一步建立 MPC 模型，在有限控制时域实现闭环优化。最后，通过江苏某实际配电网验证了该控制系统的有效性。

1 控制系统简述

控制系统主要由灵敏度计算、指令分配和关键节点选取三个模块组成，控制系统架构如图 1 所示。首先依据配电网数据进行灵敏度计算，计算结果既是控制器指令分配的数据支撑，也是关键节点评估指标的数据基础。控制指令仅作用于所选的关键节点，按照一致性协议[14]对 OLTC、CB 和逆变器等控制设备进行指令分配。在一定控制时域内，输出指令需要返回灵敏度计算模块和指令分配模块，并对控制结果进行校正，各模块功能简述如下。

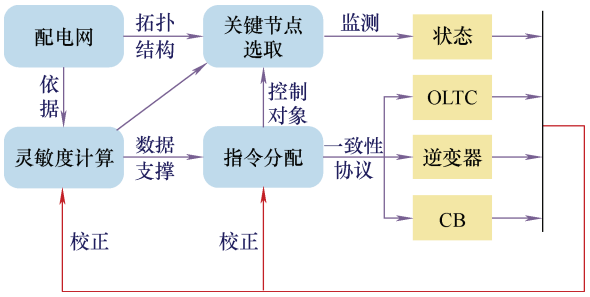

图 1 控制系统架构

Fig. 1 The architecture of control system

(1) 灵敏度计算模块

获得受控节点电压对有功功率、无功功率、OLTC 和 CB 动作次数的敏感度，并用式(1)更新受控节点电压。

$$V(t)=V(0)+\frac{\partial V}{\partial Q_{\mathrm{DG}}}\Delta Q_{\mathrm{DG}}(t)+\frac{\partial V}{\partial P_{\mathrm{DG}}}\Delta P_{\mathrm{DG}}(t)+\frac{\partial V}{\partial n_{\mathrm{CB}}}\Delta n_{\mathrm{CB}}(t)+\frac{\partial V}{\partial n_{\mathrm{OLTC}}}\Delta n_{\mathrm{OLTC}}(t) \tag{1}$$

式中，$V(t)$为 t 控制时刻电压幅值；$V(0)$为初始状态电压幅值；$\frac{\partial V}{\partial Q_{\mathrm{DG}}}$、$\frac{\partial V}{\partial P_{\mathrm{DG}}}$、$\frac{\partial V}{\partial n_{\mathrm{CB}}}$和$\frac{\partial V}{\partial n_{\mathrm{OLTC}}}$分别为 DG 注入无功、有功、CB 和 OLTC 的电压灵敏度算子；$\Delta Q_{\mathrm{DG}}(t)$、$\Delta P_{\mathrm{DG}}(t)$分别为 t 控制时刻 DG 的无功和有功注入量；$\Delta n_{\mathrm{CB}}(t)$、$\Delta n_{\mathrm{OLTC}}(t)$为 t 控制时刻 CB 和 OLTC 动作量。

(2) 关键节点选取模块

进行关键节点评估指标计算，评估指标用来衡量关键节点的可观性、可控性和鲁棒性[15]。

(3) 指令分配模块

以分布式电源容量利用比和慢速设备动作次数利用比为一致性变量，实现控制变量的协调分配，并对各控制设备下达控制指令。

2 系统模块实现

2.1 电压灵敏度计算

电压灵敏度是求取关键节点评估指标和一致

性变量的数据基础。N节点配电网中含N_C个监测、通信条件好的节点(关键节点)和N_s个监测、通信条件差的节点，节点集合分别为π和Γ，且满足$N_C+N_s=N$。假设任意节点 i 的电压相量表示为$\overline{V}_i=V_i e^{j\theta}$，则节点 i 注入功率$\overline{S}_i$满足

$$\overline{S}_i=P_i+jQ_i=\overline{V}_i\sum_{j\in\pi\cup\Gamma}\underline{G}_{ij}\underline{V}_j \tag{2}$$

式中，P_i和Q_i分别为i节点的注入有功和无功；$\underline{G}_{ij}$为ij节点间导纳的共轭；$\underline{V}_j$为j节点电压相量的共轭。

2.1.1 连续变量灵敏度

采用扰动观察法求取连续变量的电压灵敏度，折中考虑动态电压灵敏度求取和系统运算量间的矛盾。用任意通路 m 注入 i 节点的功率 P_m 和 Q_m，分别对$\overline{S}_i$求偏导可得

$$\frac{\partial\overline{S}_i}{\partial P_m}=\frac{\partial(P_i+jQ_i)}{\partial P_m}=\frac{\partial\overline{V}_i}{\partial P_m}\sum_{j\in\pi\cup\Gamma}\underline{G}_{ij}\underline{V}_j+\overline{V}_i\sum_{j\in\pi}\underline{G}_{ij}\frac{\partial\underline{V}_j}{\partial P_m} \tag{3}$$

$$\frac{\partial\overline{S}_i}{\partial Q_m}=\frac{\partial(P_i+jQ_i)}{\partial Q_m}=\frac{\partial\overline{V}_i}{\partial Q_m}\sum_{j\in\pi\cup\Gamma}\underline{G}_{ij}\underline{V}_j+\overline{V}_i\sum_{j\in\pi}\underline{G}_{ij}\frac{\partial\underline{V}_j}{\partial Q_m} \tag{4}$$

式中，若节点 i 包含在通路 m 中，则$\frac{\partial\overline{S}_i}{\partial P_m}+\frac{\partial\overline{S}_i}{\partial Q_m}$为1+$j$，反之为0。

如果不考虑线路参数的变化，显然式(3)、式(4)可统一表示为式(5)的类线性系统，即

$$\boldsymbol{Z}=A\boldsymbol{X}+B\boldsymbol{Y} \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{Z}=[\frac{\partial\overline{S}_i}{\partial P_m}\ ,\ \frac{\partial\overline{S}_i}{\partial Q_m}]^T$；$\boldsymbol{X}=[\frac{\partial\overline{V}_i}{\partial P_m}\ ,\ \frac{\partial\overline{V}_i}{\partial Q_m}]^T$；$\boldsymbol{Y}=[\sum_{j\in\pi}\underline{G}_{ij}\frac{\partial\underline{V}_j}{\partial P_m}\ ,\ \sum_{j\in\pi}\underline{G}_{ij}\frac{\partial\underline{V}_j}{\partial Q_m}]^T$；$A$ 和 B 分别为$\sum_{j\in\pi\cup\Gamma}\underline{G}_{ij}\underline{V}_j$和$\overline{V}_i$。

因此，只要维持 π 内节点的可观测性，确保 A 和 B 准确可求，即可通过扰动观察法求得 $\boldsymbol{X}$ 和 $\boldsymbol{Y}$，进而求得$\frac{\partial V_i}{\partial P_m}$和$\frac{\partial V_i}{\partial Q_m}$。

$$\frac{\partial V_i}{\partial P_m}=\frac{1}{V_i}\mathrm{Re}[\underline{V}_i\frac{\partial\overline{V}_i}{\partial P_m}] \tag{6}$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial Q_m}=\frac{1}{V_i}\mathrm{Re}[\underline{V}_i\frac{\partial\overline{V}_i}{\partial Q_m}] \tag{7}$$

2.1.2 离散变量灵敏度

离散变量灵敏度包括 CB 的电压灵敏度$\frac{\Delta V_i}{\Delta n_{CB}}$和 OLTC 的电压灵敏度$\frac{\Delta V_i}{\Delta n_{OLTC}}$，求取如下

$$\frac{\Delta V_i}{\Delta n_{CB}}=\frac{\partial V_i}{\partial Q_{CB}}\frac{\Delta Q_{CB}}{\Delta n_{CB}}=\frac{\partial V_i}{\partial Q_{CB}}q_{CB} \tag{8}$$

式中，$\frac{\Delta Q_{CB}}{\Delta n_{CB}}$为 CB 单位动作产生的无功变化，其值为$q_{CB}$。

图 2 为 OLTC 模型，k 为电压比，V_M和 V_L 分别为中压侧和低压侧电压幅值，一般难以直接求出$\frac{\Delta V_i}{\Delta n_{OLTC}}$，需要先求$\frac{\partial V_i}{\partial V_L}$。

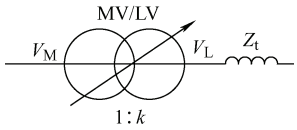

图 2 OLTC 模型

Fig. 2 Modeling of OLTC

$$\frac{\partial\overline{V}_i}{\partial V_L}=\left(\frac{1}{V_i}\frac{\partial V_i}{\partial V_L}+j\frac{\partial\theta_i}{\partial V_L}\right)\overline{V}_i \tag{9}$$

由式(9)可得

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_L}=V_i\mathrm{Re}[\overline{V}_i\frac{\partial\overline{V}_i}{\partial V_L}] \tag{10}$$

图 2 中，中低压侧电压关系可表示为

$$\frac{V_L}{V_M}=(1+k)\frac{V_{MN}}{V_{LN}}=(1+n_{OLTC}\Delta V_{OLTC})\frac{V_{MN}}{V_{LN}} \tag{11}$$

式中，V_{MN} 和 V_{LN} 分别为中低压侧的标称电压；ΔV_{OLTC} 为 OLTC 每动作一次的电压变化；n_{OLTC} 为 OLTC 的档位。

由式(9)～式(11)可以求得

$$\frac{\Delta V_i}{\Delta n_{OLTC}}=\frac{\partial V_i}{\partial V_L}\frac{\Delta V_L}{\Delta n_{OLTC}}=\frac{\partial V_i}{\partial V_L}V_M\Delta V_{OLTC}\frac{V_{MN}}{V_{LN}} \tag{12}$$

对于式(6)～式(8)、式(12)，若 $i\in\pi$，则节点 i 采用自身观测数据；若 $i\notin\pi$，则节点 i 采用所在区域关键节点数据。

2.2 关键节点选取

针对配电网通信效率低的问题，本文提出用关键节点数据代替其监测区域内其他节点数据的策略。保证关键节点的可观性、可控性和鲁棒性至关重要。

2.2.1 可观性指标

关键节点的数据变化可以反映区域内其他节点的数据变化，即关键节点的可观性。定义区域内任意节点 g 的可观性指标 α_g 为

$$\alpha_g = \ln\left|\alpha_{gh}^P\right| + \ln\left|\alpha_{gh}^Q\right| \tag{13}$$

其中

$$\begin{aligned}\alpha_g^P &= \frac{1}{N_{\mathrm{L}}}\sum_{h=1}^{N_{\mathrm{L}}}\left(\frac{\partial V_g}{\partial P_h}/\frac{\partial V_h}{\partial P_h}\right)\\ \alpha_g^Q &= \frac{1}{N_{\mathrm{L}}}\sum_{h=1}^{N_{\mathrm{L}}}\left(\frac{\partial V_g}{\partial Q_h}/\frac{\partial V_h}{\partial Q_h}\right)\end{aligned} \tag{14}$$

式中，α_g^P 和 α_g^Q 分别为节点 g 有功和无功的可观性指标；h 为区域内除 g 外任一节点；N_{L} 为其他节点数量。

2.2.2 可控性指标

可控性指标反映关键节点的受控程度。定义区域内任意节点 g 的可观性指标 β_g 为

$$\beta_g = \beta_g^P + \beta_g^Q + \beta_g^{n_{\mathrm{CB}}} + \beta_g^{n_{\mathrm{OLTC}}} \tag{15}$$

其中

$$\begin{aligned}&\beta_g^P = \frac{1}{N_{\mathrm{DG}}}\sum_{a=1}^{N_{\mathrm{DG}}}\frac{\partial V_g}{\partial P_a},\beta_g^Q = \frac{1}{N_{\mathrm{DG}}}\sum_{a=1}^{N_{\mathrm{DG}}}\frac{\partial V_g}{\partial Q_a}\\ &\beta_g^{n_{\mathrm{CB}}} = \frac{1}{N_{\mathrm{CB}}}\sum_{b=1}^{N_{\mathrm{CB}}}\frac{\partial V_g}{\partial n_{\mathrm{CB}}^b},\ \beta_g^{n_{\mathrm{OLTC}}} = \frac{1}{N_{\mathrm{OLTC}}}\sum_{c=1}^{N_{\mathrm{OLTC}}}\frac{\partial V_g}{\partial n_{\mathrm{OLTC}}^c}\end{aligned} \tag{16}$$

式中，β_g^P、β_g^Q、$\beta_g^{n_{\mathrm{CB}}}$ 和 $\beta_g^{n_{\mathrm{OLTC}}}$ 分别为节点 g 有功、无功、CB 和 OLTC 的可控性指标；N_{DG}、N_{CB} 和 N_{OLTC} 分别为区域内 DG、CB 和 OLTC 的数量。

2.2.3 鲁棒性指标

区域外其他节点对本区域关键节点的影响，即关键节点的鲁棒性。定义区域内任意节点 g 的可观性指标 χ_g 为

$$\chi_g = \ln\left|\chi_{gd}^P\right| + \ln\left|\chi_{gd}^Q\right| \tag{17}$$

$$\begin{aligned}\chi_d^P &= \frac{1}{N_{\mathrm{W}}}\sum_{d=1}^{N_{\mathrm{W}}}\left(\frac{\partial V_g}{\partial P_d}/\frac{\partial V_d}{\partial P_d}\right)\\ \chi_d^Q &= \frac{1}{N_{\mathrm{W}}}\sum_{d=1}^{N_{\mathrm{W}}}\left(\frac{\partial V_g}{\partial Q_d}/\frac{\partial V_d}{\partial Q_d}\right)\end{aligned} \tag{18}$$

式中，χ_d^P 和 χ_d^Q 分别为节点 g 有功和无功鲁棒性指标；d 为区域外任一节点；N_{W} 为区域外节点数量。

式(14)、式(16)和式(18)中的灵敏度算子均可由 2.1 节方法求取。结合式(13)、式(15)和式(17)可得节点 g 的综合评估指标 μ_g 为

$$\mu_g = \alpha_g + \frac{1}{\mu_g} + \frac{1}{\chi_g} \tag{19}$$

关键节点集合 π 中的任意元素 e 应满足

$$\mu_e = \min \mu_g \tag{20}$$

2.3 指令分配

低效通信配电网难以及时准确地完成控制变量的指令分配，如果采用一致性协议实现对各关键节点的分布式控制，便能有效降低对配电网整体监测和通信条件的要求。本文采用分布式电源容量利用比和慢速设备动作次数利用比为一致性变量，并采用文献[16]中定义的分布式电源容量利用比更新方法。

$$\gamma_e^S(t+1) = \sum_{a=1}^{N_{\mathrm{DG}}}\omega_{ea}\gamma_a^S(t) + \omega_e\delta\Delta\gamma_{e,\mathrm{ref}}^S(t) \tag{21}$$

$$\omega_{ea} = E_{ea}/\sum_{a=1}^{N_{\mathrm{DG}}}\omega_{ea} \tag{22}$$

式中，$\gamma_e^S(t+1)$ 为任意关键节点 e 在第 t 次迭代后的容量利用比；ω_{ea} 为 e 收到其他分布式电源信息而设置的权重；δ 为迭代步长；若 ea 之间有通信线路，则 E_{ea} 为 1，否则为 0。

定义任意关键节点 e 的电压性能评估函数 f_e^V 为

$$f_e^V = \frac{1}{2}(V_e^* - 1)^2 \tag{23}$$

式中，V_e^* 为节点 e 电压幅值的标幺值。

取 $\Delta\gamma_{e,\mathrm{ref}}^S(t) = -\dfrac{\partial f_e^V}{\partial \gamma_e^S}$，则有

$$\begin{aligned}\Delta\gamma_{e,\mathrm{ref}}^{S}(t)&=-\frac{\partial f_e^V}{\partial V_e^*}\frac{\partial V_e^*}{\partial P_e}\frac{\partial P_e}{\partial \gamma_e^S}\\&=-(V_e^*-1)\frac{\partial V_e^*}{\partial P_e}S_e\cos\varphi_e\\\Delta\gamma_{e,\mathrm{ref}}^{S}(t)&=-\frac{\partial f_e^V}{\partial V_e^*}\frac{\partial V_e^*}{\partial Q_e}\frac{\partial Q_e}{\partial \gamma_e^S}\\&=-(V_e^*-1)\frac{\partial V_e^*}{\partial Q_e}Q_e\sqrt{1-\cos^2\varphi_e}\end{aligned}\tag{24}$$

式中，S_e为节点 e DG 的容量；$\cos\varphi_e$ 为节点 e DG 的功率因数；$\dfrac{\partial V_e^*}{\partial P_e}$ 可由 2.2 方法求得。

定义慢速设备动作次数利用比更新方法为

$$\gamma_e^{\mathrm{CB}}(t+1)=\sum_{b=1}^{N_{\mathrm{CB}}}\kappa_{eb}\gamma_b^{\mathrm{CB}}(t)+\kappa_e\delta\Delta\gamma_{e,\mathrm{ref}}^{\mathrm{CB}}(t)$$

$$\gamma_e^{\mathrm{OLTC}}(t+1)=\sum_{c=1}^{N_{\mathrm{OLTC}}}\kappa_{ec}\gamma_c^{\mathrm{OLTC}}(t)+\kappa_e\delta\Delta\gamma_{e,\mathrm{ref}}^{\mathrm{OLTC}}(t)\tag{25}$$

$$\kappa_{eb}=E_{eb}/\sum_{a=1}^{N_{\mathrm{DG}}}\kappa_{eb},\kappa_{eb}=E_{ec}/\sum_{a=1}^{N_{\mathrm{DG}}}\kappa_{ec}\tag{26}$$

同理可得

$$\Delta\gamma_{e,\mathrm{ref}}^{\mathrm{CB}}(t)=-(V_e^*-1)\frac{\Delta V_e^*}{\Delta n_{\mathrm{CB}}}\frac{\Delta n_{\mathrm{CB}}}{K_{\mathrm{CB}}^{\mathrm{real}}}N_{\mathrm{CB}}^e\tag{27}$$

$$\Delta\gamma_{e,\mathrm{ref}}^{\mathrm{OLTC}}(t)=-(V_e^*-1)\frac{\Delta V_e^*}{\Delta n_{\mathrm{OLTC}}}\frac{\Delta n_{\mathrm{OLTC}}}{K_{\mathrm{OLTC}}^{\mathrm{real}}}N_{\mathrm{OLTC}}^e\tag{28}$$

式中，$K_{\mathrm{CB}}^{\mathrm{real}}$ 和 $K_{\mathrm{OLTC}}^{\mathrm{real}}$ 分别为参与控制节点 e 的 CB 和 OLTC 的实际档位；N_{CB}^e 和 N_{OLTC}^e 分别为对应 CB 和 OLTC 的档位总数。

3 数学模型及求解

考虑到低效通信配电网只能在关键节点和控制设备间实现有限信息交换，需建立 MPC 模型，在有限控制时域实现闭环优化。

目标函数为

$$\begin{aligned}\min\sum_{e\in\pi}\sum_{t=1}^{T}(&\|n_{\mathrm{CB}}^e(t)-n_{\mathrm{CB}}^e(t-1)\|_{\lambda_{\mathrm{CB}}}^2+\|n_{\mathrm{OLTC}}^e(t)-\\&n_{\mathrm{OLTC}}^e(t-1)\|_{\lambda_{\mathrm{OLTC}}}^2+\|P_{\mathrm{DG}}^e(t)-P_{\mathrm{DG}}^e(t-1)\|_{\lambda_P}^2\\&\|Q_{\mathrm{DG}}^e(t)-Q_{\mathrm{DG}}^e(t-1)\|_{\lambda_Q}^2+\|V_e(t)-V_{\mathrm{ref}}(t-1)\|_{\lambda_V}^2)\end{aligned}\tag{29}$$

约束条件为

$$\begin{aligned}&V_e(t)=V_e(0)+\frac{\partial V_e}{\partial Q_{\mathrm{DG}}^e}\Delta Q_{\mathrm{DG}}^e(t)+\frac{\partial V}{\partial P_{\mathrm{DG}}^e}\Delta P_{\mathrm{DG}}^e(t)+\\&\frac{\Delta V}{\Delta n_{\mathrm{CB}}^e}\Delta n_{\mathrm{CB}}^e(t)+\frac{\Delta V}{\Delta n_{\mathrm{OLTC}}^e}\Delta n_{\mathrm{OLTC}}^e(t)\\&\Delta\underline{n}_{\mathrm{CB}}^e\leqslant\Delta n_{\mathrm{CB}}^e(t)\leqslant\Delta\overline{n}_{\mathrm{CB}}^e,\forall t\\&0\leqslant n_{\mathrm{CB}}^e(t)\leqslant\overline{n}_{\mathrm{CB}}^e,\forall t\\&\sum_{t=1}^{T}\Delta n_{\mathrm{CB}}^e(t)\leqslant H_{\mathrm{CB}}^e\\&\Delta\underline{n}_{\mathrm{OLTC}}^e\leqslant\Delta n_{\mathrm{OLTC}}^e(t)\leqslant\Delta\overline{n}_{\mathrm{OLTC}}^e,\forall t\\&\underline{n}_{\mathrm{OLTC}}^e\leqslant n_{\mathrm{OLTC}}^e(t)\leqslant\overline{n}_{\mathrm{OLTC}}^e,\forall t\\&\sum_{t=1}^{T}\Delta n_{\mathrm{OLTC}}^e(t)\leqslant H_{\mathrm{OLTC}}^e\\&\underline{Q}_{\mathrm{DG}}^e\leqslant Q_{\mathrm{DG}}^e(t)\leqslant\overline{Q}_{\mathrm{DG}}^e,\forall t\\&0\leqslant P_{\mathrm{DG}}^e(t)\leqslant\overline{P}_{\mathrm{DG}}^e,\forall t\end{aligned}\tag{30}$$

式中，λ_{CB}、λ_{OLTC}、λ_P、λ_Q 和 λ_V 分别为目标函数中 CB、OLTC、有功、无功及节点 e 电压自身的权重因子；H_{CB}^e 和 H_{OLTC}^e 分别为参与节点 e 调节的 CB 和 OLTC 动作次数的上限；$\Delta\overline{n}_{\mathrm{CB}}^e$ 和 $\Delta\underline{n}_{\mathrm{CB}}^e$ 分别为参与节点 e 调节的 CB 在第 k 次迭代的动作次数上下限；$\Delta\overline{n}_{\mathrm{OLTC}}^e$ 和 $\Delta\underline{n}_{\mathrm{OLTC}}^e$ 分别为参与节点 e 调节的 OLTC 在第 k 次调节的动作次数上下限；$\overline{n}_{\mathrm{CB}}^e$ 为参与节点 e 调节的 CB 档位的上限；$\overline{n}_{\mathrm{OLTC}}^e$ 和 $\underline{n}_{\mathrm{OLTC}}^e$ 分别为参与节点 e 调节的 OLTC 档位的上下限；$n_{\mathrm{CB}}^e(t)$ 和 $n_{\mathrm{OLTC}}^e(t)$ 分别为参与节点 e 调节的 CB 和 OLTC 在第 k 次迭代的档位；$\Delta n_{\mathrm{CB}}^e(t)$ 和 $\Delta n_{\mathrm{OLTC}}^e(t)$ 分别为参与节点 e 调节的 CB 和 OLTC 在第 k 次迭代的动作量；$\overline{Q}_{\mathrm{DG}}^e$ 和 $\underline{Q}_{\mathrm{DG}}^e$ 分别为节点 e 注入 DG 无功的上下限；$\overline{P}_{\mathrm{DG}}^e$ 为节点 e 注入 DG 有功的上限。

式(29)、式(30)描述的是一个典型的非线性混合整数规划(Nonlinear Mixed Integer Programming，NMIP)问题，可采用非常成熟的商业软件进行求解。

4 算例分析

采用江苏某实际低压配电网进行仿真分析，拓扑图如图 3 所示，配电网络被划分为 6 个控制区域，对应 LCZ1～LCZ6。系统中 DG 和 CB 详细参数如表 1 所示。

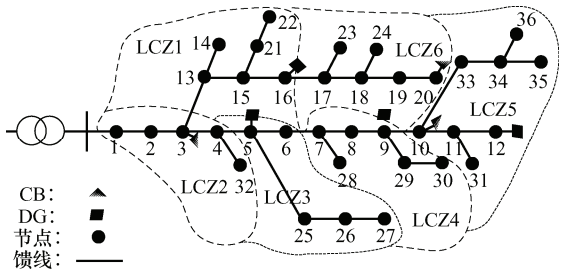

图 3 配电网拓扑图

Fig. 3 Distribution network topology diagram

表 1 DG 和 CB 参数表

Tab. 1 Parameters DG and CB

设备	位置	参数
DG1～DG4	节点 16、5、9、12	4×1.5 MW
CB1	3	8×50 kvar
CB2	10	4×50 kvar
CB3	20	6×50 kvar

4.1 关键节点选取有效性分析

用式(19)对图 3 中所有节点进行评估，各节点综合评估指标值分布如图 4 所示。

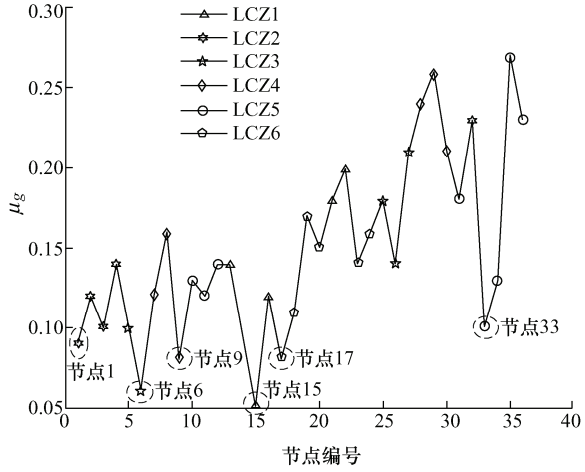

图 4 μ_g 计算结果

Fig. 4 The calculation results of μ_g

由图 4 可知，LCZ1～LCZ6 对应的关键节点分别为 15、1、6、9、33 和 17。为验证所选关键节点能有效实现低效通信配电网的电压控制，设置两种场景进行对比分析。

1) 场景一：图 3 配电网中仅关键节点数据可观测。

2) 场景二：图 3 配电网中所有节点数据均可观测。

图 5 为两种场景设置的电压控制结果对比。配电网中，节点 1、2、9 和 28 电压越限严重，根据场景一和场景二的控制结果可得如下结论：

1) 场景一和场景二均能将越限电压控制在安全范围，场景一和场景二相比，累计误差仅为 0.27(pu)。

2) 由于场景一的监测和通信条件不足，场景一控制的电压幅值波动比场景二大，场景一的电压方差为 0.023，而场景二电压方差为 0.017。

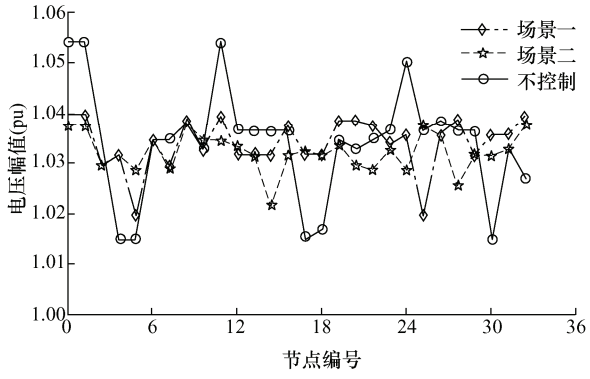

图 5 电压控制结果

Fig. 5 The results of voltage controling

为进一步证明所选关键节点的有效性，设置三种场景分析关键节点选取的影响因素。

1) 场景一：采用 2.2 中定义的综合评估指标。

2) 场景二：不考虑离散变量的电压灵敏度。

3) 场景三：不考虑有功功率的电压灵敏度。

关键节点选取结果如表 2 所示。

表 2 关键节点选取结果

Tab. 2 Key node selection results

场景	场景一	场景二	场景三
关键节点	15、1、6、9、33、17	16、3、5、9、10、17	13、3、5、9、10、20
指标值	0.05、0.09、0.06、0.08、0.1、0.08	0.03、0.02、0.04、0.05、0.07、0.06	0.05、0.07、0.06、0.07、0.08、0.07

由表 2 可知，当评估指标中不考虑离散变量或有功功率的影响时，指标计算值偏小。不考虑离散变量的电压灵敏度时，所选关键节点远离 OLTC 和 CB 接入点而靠近 DG 接入点。不考虑有功功率的电压灵敏度时，所选关键节点靠近支路连接点、线路末端或 CB 接入点。

三种场景下的电压控制结果如图 6 所示。

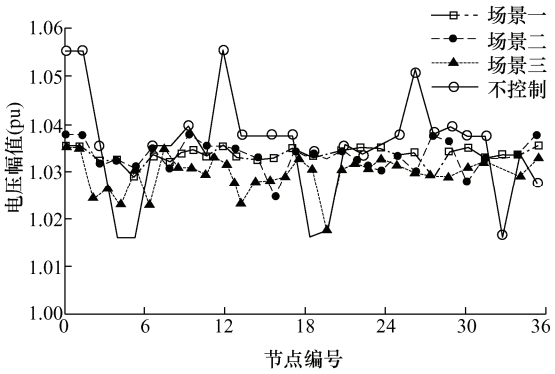

图 6　不同关键节点选取对应控制结果

Fig. 6 The control results of different key nodes select

由图 6 可得如下结论：

1) 场景三的控制结果最差，这是因为评估指标中忽略了有功功率电压灵敏度的影响，不能充分发挥有功功率对电压的调节作用，使关键节点选取出现偏差，影响控制效果。

2) 场景一的控制结果略优于场景二，虽然关键节点评估指标中忽略了离散变量的电压灵敏度，但场景二关键节点位置很接近场景一，因此对场景二的控制结果影响相对较小。

3) 综合评估指标考虑得越全面，所选的关键节点越准确，控制结果越优良。

4.2　指令分配有效性分析

为验证指令分配的有效性，对表 2 中的场景一分别用两种策略进行电压控制。

1) 策略一：采用全局一致性协议进行指令分配。

2) 策略二：根据本区域信息进行指令分配。

目标函数值变化趋势如图 7 所示。由图 7 可见，策略一收敛比策略二少迭代 5 次，相当于早收敛了 0.024 s。一方面，策略一根据全局一致性协议分配指令不需要频繁作出决策，在一定程度上提高了控制系统运算效率；另一方面，全局一致性协议可以避免不同关键节点和区域之间的信息交换。指令分配对比如表 3 所示。

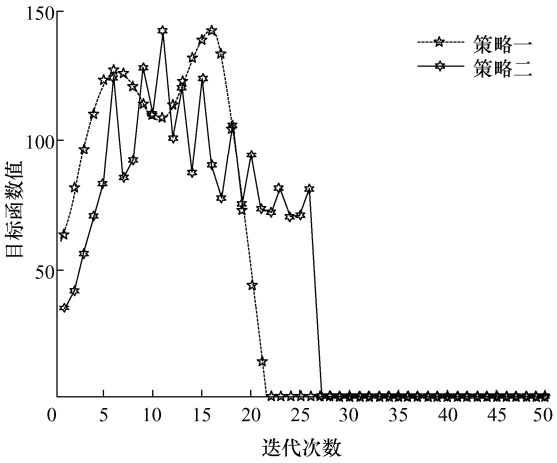

图 7　目标函数值变化趋势

Fig. 7 Change trend of objective function value

表 3　指令分配对比

Tab. 3 Instruction allocation comparison

策略	策略一	策略二
收敛速度	21	26
累计目标	2 061.5	2 283.7

5　结束语

针对低效通信配电网的电压控制问题，提出了一种不依赖完备通信条件的分布式电压控制系统，并在实际算例系统中进行了有效性验证。主要得到如下结论：

1) 根据关键节点的有限信息可以进行有效的电压控制，累计误差仅为 0.27(pu)。

2) 关键节点的选取主要受其所在控制区域内各可控变量的电压灵敏度算子影响。

3) 不同控制区域间可能会出现信息交换频繁、耦合度过高及控制系统频繁决策的问题，采用一致性协议定义全局一致性变量可以缓解决策压力，提高 25%收敛速度。EA

参考文献

[1]　窦晓波，葛浦东，全相军，等. 计及不确定时滞的有

源配电网无功电压鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报，2019，39(5)：1290-1300.

[2] 温东翰，徐敏. 基于改进型蚁狮算法的主动配电网优化重构[J]. 电气应用，2020，39(7)：31-35.

[3] 王会超，秦昊，周昶，等. 计及新能源预测不确定性的跨区域日前-日内调度模型[J]. 电力系统自动化，2019，43(19)：60-72.

[4] 陈怀毅，胡英坤，杨毅，等. 二阶锥松弛在配电网最优潮流计算中的应用[J].电气应用，2020，39(1)：49-54.

[5] ABESSI A，VAHIDINASAB V，GHAZIZADEH M S. Centralized support distributed voltage control by using end-users as reactive power support[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2016，7(1)：178-188.

[6] 柴园园，刘一欣，王成山，等. 含不完全量测的分布式光伏发电集群电压协调控制[J]. 中国电机工程学报，2019，39(8)：2202-2212，2215.

[7] 乐健，周谦，王曹，等. 基于分布式协同的配电网电压和功率优化控制方法研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(4)：1249-1257，1415.

[8] 周成，芮涛，王群京. 基于模型预测控制的微电网多目标协调优化[J]. 电测与仪表，2019，56(22)：44-50.

[9] 任佳依，顾伟，王勇，等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程学报，2018，38(5)：1397-1407.

[10] Surya Chandan Dhulipala ， Raul Vitor Arantes Monteiro ， Raoni Florentino da Silva Teixeira ， et al. Distributed model-predictive control strategy for distribution network volt/var control ： a smart-building-based approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2019，55(6)：7041-7051.

[11] GUO Yifei， WU Qiuwei， GAO Houlei， et al. MPC-based coordinated voltage regulation for distribution networks with distributed generation and energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy，2019，10(4)：1731-1739.

[12] 杨鹏，杨世春. 无通讯模块无线充电系统的控制策略研究[J]. 电测与仪表，2019，56(1)：115-120.

[13] 刘文霞，杨梦瑶，马铁，等. 主动配电系统中失联分布式电源差异化就地控制策略优化[J]. 电力系统自动化，2020，44(11)：32-42.

[14] XIN H，QU Z，SEUSS J，et al. A self-organizing strategy for power flow control of photovoltaic generators in a distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Systems， 2011， 26(3)：1462-1473.

[15] 颜湘武，李若瑾，徐韵. 考虑无功裕度的电压自适应分区方法及主导节点的选择[J]. 现代电力，2020，37(2)：117-124.

[16] ZHANG B，LAM A Y S，Dominguez-Garcia A D，et al. An optimal and distributed method for voltage regulation in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems， 2015， 30(4)：1714-1726.

作者简介：

冯壮壮

冯壮壮（1996—），男，硕士研究生，从事光伏发电并网技术研究。

(收稿日期：2020-11-11)