

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.05.015

基于无模型自适应控制的配电网电压控制方案

潘俊迪¹, 陈中¹, 倪纯奕¹, 万玲玲¹, 王毅^{2,3}

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘要:新型电力系统下分布式新能源、分布式发电、电动汽车等新型元素大规模发展,配电网电压控制将面临控制对象特性异构、模型复杂、场景多变等挑战。在此背景下,文中提出一种基于无模型自适应控制的配电网电压控制方案。该方案在配电网电压控制分区及主导节点选取的基础上,利用主导节点电压、分布式电源以及储能装置出力等数据建立实时动态线性化数据滚动池,基于特征模型理论和数据驱动,将复杂系统电压控制特性通过控制器特征参数进行时变修正,在不损失系统模型信息的基础上降低了控制模型复杂程度。最后,通过改进的 IEEE 33 节点配电网系统算例进行仿真分析和对比,结果证明了所提控制方案的有效性。相较于传统的基于模型的控制方法,所提控制方案能够更快速地响应扰动带来的电压波动问题,应用前景良好。

关键词:无模型自适应控制;分布式电源;储能装置;配电网;电压控制;数据驱动

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)05-0128-10

0 引言

近年来,随着分布式发电技术的不断发展,大规模分布式电源(distributed generation, DG)接入配电网^[1]。DG 并网一定程度上缓解了能源紧张以及环境污染的问题,但由于 DG 出力的随机性,其在大规模并网后会引发配电网的电压波动现象^[2-5],从而影响配电网用户的电能质量。此外,由 DG 出力不确定性导致的配电网电压剧烈波动会增加主电网稳定运行的压力^[6]。上述问题对配电网电压控制提出了更高的要求。

目前,多数配电网电压调度和控制方式均沿用了主网的“分层分级式”控制体系^[7-10],文献[11-16]提出了“分层分级式”的电压协同优化控制方法。以上研究均是基于稳态模型,且控制周期均为分钟级。而配电网中由 DG 出力变化导致的电压波动的时间尺度通常是几秒钟,上述方案无法有效应对 DG 功率波动引起的配电网电压波动现象。

为了更好地解决 DG 并网引起的电压波动问题,迫切需要控制周期更短的配电网电压控制方案。现阶段,短控制周期的配电网电压控制方案的研究都聚焦于模型预测控制(model predictive control, MPC)。文献[17-19]提出一种基于 MPC 的 DG 及储能(energy storage, ES)系统的配电网电压控制方案。文献[20]提出一种基于分布式 MPC 的配电网电压控制方案,充分挖掘了分布式光伏以及 ES 的电压调节潜力。文献[21]基于 MPC 提出一种考

虑有功、无功协调快速优化的配电网动态电压控制方法。基于 MPC 的配电网电压控制方案对模型的准确度要求很高。考虑到在新型电力系统配网侧分布式新能源、分布式发电、电动汽车等新型元素大发展的背景下,配网电压控制的模型难以精确建立,基于模型的配电网电压控制方案在控制性能上有一定的不足。

由于无模型自适应控制(model-free adaptive control, MFAC)不需要对被控系统建模,同时具有算法复杂度低、自适应能力强等优点^[22],不少学者将 MFAC 应用在电力系统中,并取得了不错的效果。文献[23]将 MFAC 应用于互联电网自动发电控制中;文献[24]提出一种基于改进的 MFAC 的交直流微电网分布式二次控制方案;文献[25]设计了一种基于 MFAC 的次同步振荡阻尼控制器。

文中提出一种基于 MFAC 的配电网电压控制方案。首先将配电网进行分区,选出主导节点,然后收集主导节点的电压、DG 的无功、ES 的有功及无功出力等数据,利用动态线性化技术将输入输出系统转为等价的紧格式数据模型,从而进行控制算法的设计。在新型电力系统中配电网的电压控制模型难以精确建立的背景下,该控制方案仅利用了配电网电压控制过程中的输入与输出数据,无须建立配电网电压控制模型,对于抑制新型电力系统中的配电网电压波动具有较强的实际应用价值。

1 配电网电压控制分区以及主导节点选取

DG、ES 等分布式资源的大规模接入使得配电

收稿日期:2023-03-20;修回日期:2023-05-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077035)

网传统的集中式电压控制计算量剧增,控制效率下降,控制精度减小,难以精准控制目标。在大规模 DG 与 ES 接入的配电网中,往往利用 DG、ES 出力可灵活调节的能力进行区域自治电压调节,充分发挥其对于配电网电压调节的潜力。因此,有必要对配电网进行分区,进而实现配电网区域内部自治电压调节^[26-31]。为了更好地衡量出一个区域的电压水平,选取该区域的主导节点十分必要。

1.1 电气距离矩阵计算

牛顿拉夫逊潮流计算的修正方程可表达为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ΔP 、 ΔQ 分别为节点注入的有功、无功变化量; $\Delta \theta$ 、 ΔV 分别为节点电压相角、幅值变化量; H 、 N 、 M 、 L 为雅可比矩阵的 4 个子矩阵。

考虑保持节点注入的有功功率恒定,即 $\Delta P=0$,可以得到节点电压变化量 ΔV 与节点注入无功变化量 ΔQ 之间的关系为:

$$\Delta V = (L - HM^{-1}N)^{-1} \Delta Q = A \Delta Q \quad (2)$$

式中:矩阵 A 中的元素 a_{ij} 为节点 i 电压变化量与节点 j 注入无功变化量之比。

定义 $s_{i,j} = |\lg(a_{ij}/a_{ji})|$, 即节点 j 注入的无功发生变化时节点 j 电压的变化量与节点 i 电压变化量比值的对数绝对值。矩阵 S 由 $s_{i,j}$ 组成,表示为:

$$S = \begin{bmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & \cdots & s_{1,n-1} & s_{1,n} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \cdots & s_{2,n-1} & s_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ s_{n,1} & s_{n,2} & \cdots & s_{n,n-1} & s_{n,n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

S 为一个 $n \times n$ 的矩阵, n 为系统节点数。通过 S 矩阵将系统中的节点映射到一个 n 维空间之中,其坐标为 S 矩阵中对应的行向量,即节点 i 在空间的坐标为 $[s_{i,1} \ s_{i,2} \ \cdots \ s_{i,n-1} \ s_{i,n}]$ 。根据欧氏距离计算公式,可得节点 i 与节点 j 的电气距离为:

$$d_{i,j} = \left[(s_{i,1} - s_{j,1})^2 + (s_{i,2} - s_{j,2})^2 + \cdots + (s_{i,n} - s_{j,n})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

由 $d_{i,j}$ 组成电气距离矩阵 D ,可表示为:

$$D = \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \cdots & d_{1,n-1} & d_{1,n} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \cdots & d_{2,n-1} & d_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ d_{n,1} & d_{n,2} & \cdots & d_{n,n-1} & d_{n,n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.2 基于密度峰值聚类的配电网分区及主导节点选择

密度峰值聚类算法是一种原理简单、快速且有

效的聚类算法,能够将高维度的数据映射到二维空间中,并且在二维空间中构建出数据之间的层次关系^[32]。利用密度峰值聚类算法进行配电网分区及主导节点选择的步骤如下。

(1) 根据式(5)得到的电气距离矩阵 D ,得到任意两节点间的电气距离。

(2) 以平均每个节点周围距离小于距离阈值 d_c 的节点数目占总节点数目的 3% 为原则,通过二分法查找来确定 d_c ,用于下面的密度计算。

(3) 利用高斯核来计算密度,可表示为:

$$\rho_i = \sum_{j \neq i} e^{-(d_{ij}/d_c)^2} \quad (6)$$

式中: ρ_i 为节点 i 的密度。

(4) 计算每个节点的中心偏移距离 δ_i ,即:

$$\delta_i = \min_{i:\rho_j > \rho_i} d_{ij} \quad (7)$$

式中: ρ_j 为节点 j 的密度,由步骤(3)计算得到。

(5) 计算每个节点的中心偏移距离与密度的乘积 γ_i ,即:

$$\gamma_i = \delta_i \rho_i \quad (8)$$

确定聚类中心的个数 m ,将 γ_i 从大到小排序后选出前 m 节点作为聚类中心,并将此 m 个节点选为主导节点。

(6) 对剩余的节点进行聚类,形成分区结果。

利用密度峰值聚类算法可以快速地对配电网进行分区并选择出其主导节点。后续的配电网电压控制方案是在基于密度峰值聚类的配电网分区及主导节点选取的基础上进行的。

2 基于 MFAC 的配电网电压控制设计

配电网电压控制设计的目标是将配电网的整体电压水平维持在期望值附近,以配电网分区后该区域的主导节点的电压 V_p 与给定参考值 V_p^{ref} 间的偏差 ΔV_p 作为 MFAC 控制器输入,通过 MFAC 控制器得到 DG 的无功出力变化量 ΔQ_g 、ES 的有功变化量 ΔP_s 以及 ES 的无功变化量 ΔQ_s ,使主导节点电压 V_p 稳定在给定参考值 V_p^{ref} 附近,从而实现控制设计目标。基于 MFAC 的配电网电压控制结构如图 1 所示。

2.1 动态线性化过程

配电网电压控制系统可以看作一个多输入单输出的离散时间非线性系统,可用式(9)的模型来表示。

$$V_p(k+1) = f(V_p(k), \dots, V_p(k-N_y), \mathbf{u}(k), \dots, \mathbf{u}(k-N_u)) \quad (9)$$

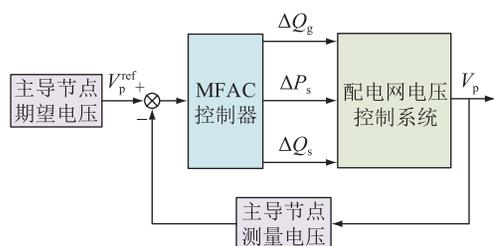


图1 基于MFAC的配电网电压控制结构

Fig.1 Voltage control structure of distribution network based on MFAC

$$\mathbf{u}(k) = [\Delta Q_g^T(k) \quad \Delta P_s^T(k) \quad \Delta Q_s^T(k)]^T \quad (10)$$

式中： $V_p(k)$ 为系统区域 k 时刻的主导节点的电压，为系统的输出量； N_y 、 N_u 为 2 个未知的正整数，分别为系统输出、输入的维数； $\mathbf{u}(k)$ 为 k 时刻的系统输入； $f(\cdot)$ 为表征系统输出与系统输入之间关系的未知的非线性向量函数； $\Delta Q_g(k)$ 为 k 时刻的 DG 无功变化量； $\Delta P_s(k)$ 、 $\Delta Q_s(k)$ 分别为 k 时刻 ES 的有功、无功变化量。

对于配电网电压控制系统，应满足以下 2 个假设：

(1) 除有限时刻点外，函数 $f(\cdot)$ 关于 $\mathbf{u}(k)$ 的偏导数均连续。

(2) 除有限时刻点外，式(9)满足广义 Lipschitz 条件，即：

$$|V_p(k+1) - V_p(k)| \leq b |\mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1)| \quad (11)$$

式中： b 为大于 0 的常数； $|\mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1)| \neq 0$ 。

假设(1)是非线性控制系统设计中的一种典型约束条件，假设(2)是对系统输出变化率上界的一种约束。从能量的角度来看，有界的输入能量变化应产生有界的输出能量变化。由于配电网电压控制系统是一个真实的物理系统，能量守恒，因此在理论上，假设(1)和假设(2)均成立。

根据文献[19]中的定理 3.1，在满足假设(1)、(2)的前提下，当 $|\Delta \mathbf{u}(k)| \neq 0$ 时，一定可以通过一个根据历史采样数据实时修正的伪偏导数(pseudo partial derivative, PPD)来实现配电网电压控制系统的动态线性化，将式(9)中的系统模型转化为紧格式数据模型，如式(12)所示。

$$\Delta V_p(k) = \varphi(k) \Delta \mathbf{u}(k) \quad (12)$$

式中： $\varphi(k)$ 为 k 时刻的 PPD。

2.2 控制算法设计

选择控制输入准则函数如下：

$$J(\mathbf{u}(k)) = \|V_p^{\text{ref}}(k+1) - V_p(k+1)\|^2 + \lambda \|\mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1)\|^2 \quad (13)$$

式中： λ 为一个正的可变系数，用于限制 $\mathbf{u}(k)$ 过大

的变化； $V_p^{\text{ref}}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻主导节点期望电压。

由式(12)可知：

$$V_p(k+1) = V_p(k) + \varphi(k) \Delta \mathbf{u}(k) \quad (14)$$

将式(14)代入式(13)中并对 $\mathbf{u}(k)$ 求导，令其等于 0，得到：

$$\hat{\mathbf{u}}(k) = \mathbf{u}(k-1) + \frac{\rho \varphi^T(k) (V_p^{\text{ref}}(k+1) - V_p(k))}{\lambda + \|\varphi(k)\|^2} \quad (15)$$

式中： $\hat{\mathbf{u}}(k)$ 为 $\mathbf{u}(k)$ 的估计值； ρ 为一个可变的步长因子， $\rho \in (0, 1]$ 。步长因子 ρ 的加入可以使控制算法更加具有一般性。

2.3 PPD 估计

PPD 估计准则函数如下：

$$J(\varphi(k)) = \|\Delta V_p(k+1) - \varphi(k) \Delta \mathbf{u}(k-1)\|^2 + \mu \|\varphi(k) - \hat{\varphi}(k-1)\|^2 \quad (16)$$

式中： μ 为一个大于 0 的可变系数，用于限制 $\varphi(k)$ 出现过大的变化； $\hat{\varphi}(k)$ 为 $\varphi(k)$ 的估计值。

对式(16)中的 $\varphi(k)$ 求极值后得到 PPD 的估计算法：

$$\hat{\varphi}(k) = \hat{\varphi}(k-1) + \frac{\eta (\Delta V_p(k) - \hat{\varphi}(k-1) \Delta \mathbf{u}(k-1) \Delta \mathbf{u}^T(k-1))}{\mu + \|\Delta \mathbf{u}(k-1)\|^2} \quad (17)$$

式中： η 为一个可变的步长因子， $\eta \in (0, 2]$ 。步长因子 η 的加入可以使估计算法更加灵活。

当 $\text{sgn}(\hat{\varphi}(k)) \neq \text{sgn}(\hat{\varphi}(1))$ 或 $|\Delta \mathbf{u}(k-1)| \leq \varepsilon$ 或 $|\hat{\varphi}(k)| \leq \varepsilon$ 时，有：

$$\hat{\varphi}(k) = \hat{\varphi}(1) \quad (18)$$

式(18)为 PPD 的重置算法。通过引入 PPD 的重置算法可以提高 PPD 估计算法对时变参数的跟踪效果。

2.4 控制输入修正

根据式(17)可以看出，PPD 具有实时修正的特性。在控制初期，PPD 的估计可能具有一定的偏差而导致配电网电压出现振荡。对此，引入一个控制输入修正的方法，可表示如下：

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{M} \hat{\mathbf{u}}(k) \quad |V_p(k) - V_p^{\text{ref}}(k)| < \varepsilon \quad (19)$$

式中： \mathbf{M} 为对角矩阵。

对控制输入进行修正，从而达到减小控制前期配电网电压振荡的目的。

2.5 约束条件

(1) DG。

$$\begin{cases} Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max} \\ |\Delta Q_g| \leq \Delta Q_g^{\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中： Q_g 为 DG 的无功出力； Q_g^{\min} 、 Q_g^{\max} 分别为 DG

无功输出的下限和上限; ΔQ_g^{\max} 为 DG 的无功功率变化率的上限。

(2) ES。

$$\begin{cases} W_{\text{SoC}}^{\min} \leq W_{\text{SoC}} \leq W_{\text{SoC}}^{\max} \\ P_s^{\min} \leq P_s \leq P_s^{\max} \\ |\Delta P_s| \leq \Delta P_s^{\max} \\ Q_s^{\min} \leq Q_s \leq Q_s^{\max} \\ |\Delta Q_s| \leq \Delta Q_s^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: W_{SoC} 为 ES 的荷电状态; W_{SoC}^{\min} 、 W_{SoC}^{\max} 分别为 ES 在考虑使用寿命的情况下的最小荷电状态和最大荷电状态; P_s 为 ES 的有功出力; P_s^{\min} 、 P_s^{\max} 分别为 ES 的有功输出的下限和上限; ΔP_s^{\max} 为 ES 的有功功率变化率的上限; Q_s 为 ES 的无功出力; Q_s^{\min} 、 Q_s^{\max} 分别为 ES 的无功输出的下限和上限; ΔQ_s^{\max} 为 ES 的无功功率变化率的上限。

W_{SoC} 经离散化处理后可表示为:

$$\begin{cases} W_{\text{SoC}}(k) = E(k)/E_{\max} \\ E(k+1) = E(k) - \Delta E(k) \\ \Delta E(k) = \begin{cases} P_s(k)\eta_c\Delta t & P_s(k) < 0 \\ \Delta t P_s(k)/\eta_d & P_s(k) > 0 \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $E(k)$ 为 k 时刻 ES 的容量; E_{\max} 为 ES 的最大容量; η_c 、 η_d 分别为充、放电效率; $P_s(k)$ 为 k 时刻 ES 的充/放电功率, $P_s(k) < 0$ 时 ES 处于充电状态, $P_s(k) > 0$ 时 ES 处于放电状态; Δt 为时间间隔。

(3) 配电网潮流约束。

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^N U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = \sum_{j=1}^N U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (23)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 注入的有功、无功功率; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、节点 j 的电压幅值; G_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的互电导; B_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的互电纳; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的相角差; N 为配电网节点总数。

2.6 基于 MFAC 的配电网电压控制方案

在配电网的分区以及主导节点选取的结果下,由上述的动态线性化、控制算法设计、PPD 估计算法以及控制输入的修正,并考虑 DG 以及 ES 的约束条件,可以得到基于 MFAC 的配电网电压控制方案,具体步骤如下。

步骤 1: 利用文中第 1 章提出的方法对配电网进行分区,并选取各区域的主导节点。

步骤 2: 收集量测得到的主导节点电压数据,结合 DG 的无功出力、ES 的有功、无功出力等数据,根

据式(17)对 PPD 进行估计,得到 PPD 的估计值,并判别是否需要进行重置。若需要重置,则执行式(18);若不需要重置,则进行下一步。

步骤 3: 根据式(15)对系统控制输入进行估计,并判别是否需要对控制输入进行修正。若需要修正,则执行式(19);若不需要修正,则进行下一步。

步骤 4: 结合 DG、ES 的约束条件,确定控制输入的大小。

步骤 5: 更新控制输入差分。

步骤 2—步骤 5 循环,当 $|u(k-N)| < \varepsilon$ 且 $|V_p(k-N) - V_p^{\text{ref}}(k-N)| < \varepsilon$ ($N=0,1,2,3,4,5$) 时,认为控制已经完成,控制结束。

由此,通过设计基于 MFAC 的配电网电压控制方案,在不需要建立系统模型的情况下对配电网进行电压控制,实现主导节点电压的快速无差调节,抑制了配电网的电压波动。基于 MFAC 的配电网电压控制流程如图 2 所示。

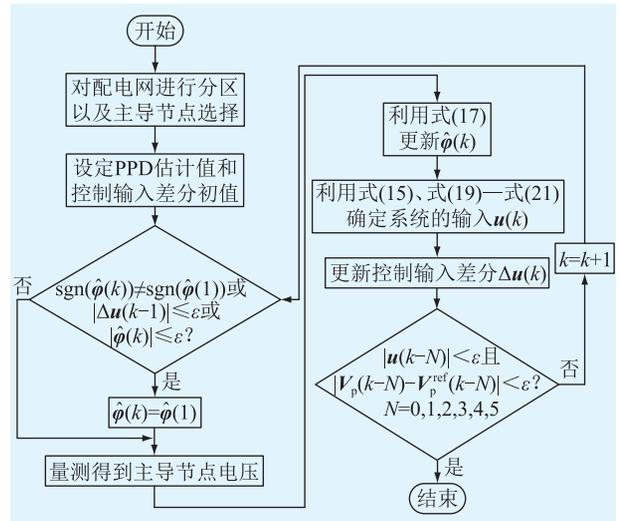


图 2 基于 MFAC 的配电网电压控制流程

Fig.2 Voltage control process of distribution network based on MFAC

3 仿真实验

3.1 仿真参数设置

为了验证文中提出的基于 MFAC 的配电网电压控制方案的有效性,在改进的 11 kV IEEE 33 节点配电网系统中进行了仿真计算,拓扑如图 3 所示。利用第 1 章提出的方法,设置划分的区域个数为 5,对图 3 系统进行分区,并选取其主导节点。配电网的分区以及主导节点的选择结果如表 1 所示。

系统中装设有 6 台分布式光伏,分别位于节点 5、10、16、19、23、31;装设有 6 台 ES,分别位于节点 7、11、18、19、25、27。分布式光伏运行时功率因数不

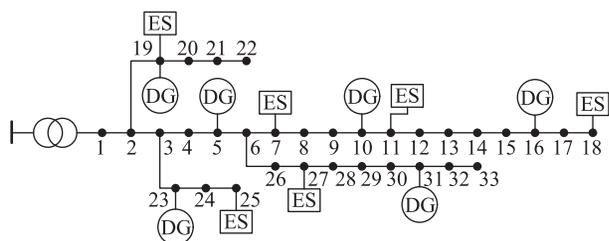


图3 改进的 IEEE 33 节点系统

Fig.3 Modified IEEE 33-node system

表 1 配电网分区及主导节点选取结果

Table 1 Distribution network zoning and dominant nodes selection results

区域	节点	主导节点
1	1,2,19	2
2	8—18	15
3	20—22	21
4	3—7,23—27	26
5	28—33	32

低于 0.95。ES 的容量为 400 kW·h,充/放电功率上限为 400 kW,无功出力上限为 200 kvar, W_{soc} 的范围为 [0.2,0.8],充、放电效率为 0.95。不考虑分布式光伏及 ES 的响应时间以及通信延迟。

为了更好地分析文中提出的电压控制方法的有效性,选择以下 3 种方案进行仿真对比。

方案 1:基于 MFAC 的配电网电压控制方案。

方案 2:基于 MPC 的配电网电压控制方案。

方案 3:不进行配电网电压控制。

基于 MFAC 的配电网电压控制方案的控制参数: $\rho = 0.6, \lambda = \mu = \eta = 1, \hat{\varphi}(1) = [0.5 \ 0.5 \ 1 \ 1]$,控制步长 $T_c = 0.1 \text{ s}$ 。

基于 MPC 的配电网电压控制方案中的模型参数通过求解状态空间方程得到:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{Ax}(k) + \mathbf{Bu}(k) \\ \mathbf{V}_p(k) = \mathbf{Cx}(k) + \mathbf{Du}(k) \end{cases} \quad (24)$$

其中, $\mathbf{A} = [1], \mathbf{B} = [1.6 \ 2.5 \ 2.5 \ 2.5], \mathbf{C} = [1], \mathbf{D} = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。基于 MPC 的配电网电压控制方案的预测步长 $T_p = 0.5 \text{ s}$,控制步长 $T_c = 0.1 \text{ s}$ 。

期望电压 $V_p^{ref} = 0.9632 \text{ p.u.}$,为扰动前的主导节点 15 的电压。

3.2 仿真分析

3.2.1 场景 1——光伏出力大幅度骤减

为了验证文中提出的控制方案的有效性,采用了贴合实际的工况,模拟位于区域 2 中节点 10、节点 16 的分布式光伏因天气由晴转阴导致的有功出力的骤减,有功出力的变化如图 4 所示,即在 $t = 0 \text{ s}$ 以及 $t = 0.8 \text{ s}$ 时,区域 2 中节点 10、节点 16 的光伏

有功出力下降。

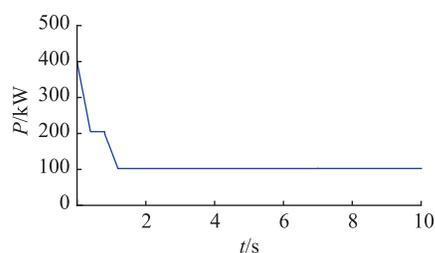


图 4 场景 1 中节点 10、节点 16 分布式光伏有功出力变化

Fig.4 Variation in the distributed PV active output of node 10 and node 16 in case 1

在这种情况下分布式光伏有功出力下降,若不采取任何控制措施,仅依靠 DG 以及 ES 对电压的支撑作用,可能会导致电压波动的幅度过大,容易造成电压越限的问题。因此,通过施加文中提出的基于 MFAC 的配电网电压控制方案,对区域 2 中的分布式光伏以及 ES 的出力进行调节,实现电压的快速恢复,并与基于 MPC 的配电网电压控制方案进行对比,各方案节点电压恢复情况结果如表 2 所示。

表 2 场景 1 各控制方案节点电压恢复情况

Table 2 Node voltage recovery of each control scheme in case 1

节点	扰动前电压	恢复后电压		
		MFAC	MPC	无电压控制
4	0.987 5	0.986 7	0.986 7	0.983 7
8	0.966 3	0.964 0	0.964 0	0.949 6
12	0.964 7	0.961 5	0.961 4	0.938 8
16	0.962 8	0.963 6	0.963 5	0.930 0
20	0.994 8	0.994 7	0.994 7	0.994 4
24	0.982 0	0.981 5	0.981 5	0.979 6
28	0.961 5	0.959 9	0.959 9	0.952 6
32	0.951 2	0.950 0	0.950 2	0.942 2

从表 2 可以看出,当天气由晴转阴导致区域 2 的分布式光伏出力骤减时,多个节点的电压下降至 0.95 p.u.以下,发生电压越下限的情况,影响用户侧的电能质量。采用基于 MFAC 的电压控制方案和基于 MPC 的电压控制方案后,各个节点的电压均恢复到 0.95 p.u.以上,且 2 种控制方案在控制结束时达到的控制效果几乎相同。

图 5 为场景 1 中不同控制方案下区域 2 中的主导节点 15 电压幅值的变化情况。可以看出,基于 MFAC 的电压控制方案面对分布式光伏出力下降导致电压跌落的情况相较于基于 MPC 的电压控制方案有着更加快速的响应。当 $t = 0.8 \text{ s}$ 时,分布式光伏出力进一步下降,此时基于 MPC 的电压控制方案并不能很好地应对分布式光伏出力的继续下降,而

基于 MFAC 的电压控制方案在分布式光伏出力进一步下降的情况下还能够将主导节点的电压水平控制在期望电压的附近。在光伏出力大幅度变化的场景下,基于 MFAC 的配电网电压控制方案相较于基于 MPC 的配电网电压控制方案有着更好的控制性能。

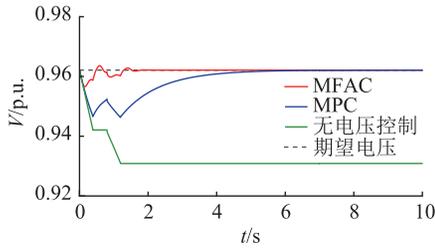
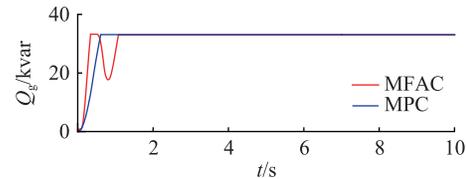


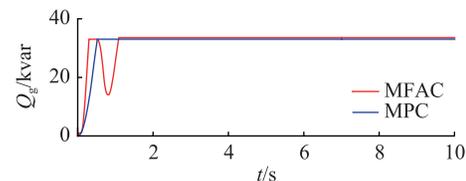
图5 场景1中不同控制方案下主导节点15电压幅值的变化情况

Fig.5 Variation of voltage amplitude of the dominant node 15 under different control schemes in case 1

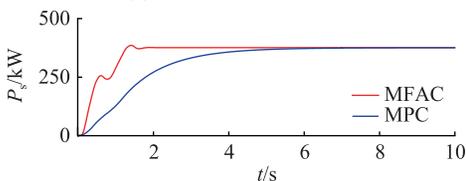
图6为场景1中不同控制方案下控制输入的变化情况。



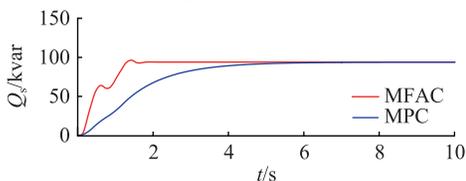
(a) 节点10处DG无功出力变化



(b) 节点16处DG无功出力变化



(c) ES有功出力变化



(d) ES无功出力变化

图6 场景1中不同控制方案下控制输入的变化情况

Fig.6 Variation of control input under different control schemes in case 1

由图6可以看出,相较于基于MPC的电压控制方案,基于MFAC的电压控制方案能够更加快速地响应由分布式光伏有功出力变化带来的电压波动问题。

3.2.2 场景2——光伏出力小幅度骤增

为了进一步验证文中所提控制方案的有效性,模拟分布式光伏出力突然小幅度增加的情况。分布式光伏出力变化如图7所示,即 $t=0\text{ s}$ 、 $t=1.5\text{ s}$ 时区域2中节点10、节点16的分布式光伏有功出力上升。采用文中提出的基于MFAC的配电网电压控制方案对区域2中的分布式光伏以及ES的出力实现电压的快速恢复,并与基于MPC的配电网电压控制方案进行对比,各方案节点电压恢复情况结果如表3所示。

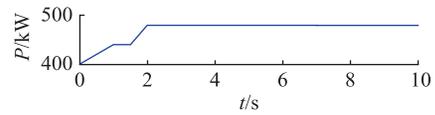


图7 场景2中节点10、节点16分布式光伏有功出力变化

Fig.7 Variation in the distributed PV active output of node 10 and node 16 in case 2

表3 场景2各方案节点电压恢复情况

Table 3 Node voltage recovery of each scheme in case 2 p.u.

节点	扰动前电压	恢复后电压		
		MFAC	MPC	无电压控制
4	0.987 5	0.987 8	0.987 8	0.988 0
8	0.966 3	0.966 8	0.966 8	0.968 4
12	0.964 7	0.965 5	0.965 4	0.968 0
16	0.962 8	0.962 6	0.962 6	0.966 9
20	0.994 8	0.994 8	0.994 8	0.994 9
24	0.982 0	0.982 2	0.982 2	0.982 3
28	0.961 5	0.961 9	0.961 9	0.962 6
32	0.951 2	0.951 6	0.951 6	0.952 3

从表3可以看出,采用基于MFAC的电压控制方案和基于MPC的电压控制方案在控制结束后达到的控制效果几乎相同。

图8为场景2中不同控制方案下区域2的主导节点15电压幅值的变化情况。

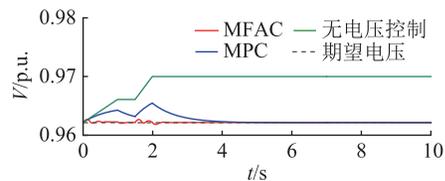


图8 场景2中不同控制方案下主导节点15电压幅值的变化情况

Fig.8 Variation of voltage amplitude of the dominant node 15 under different control schemes in case 2

由图8可以看出,基于MFAC的电压控制方案在面对分布式光伏出力升高时导致电压提升的情况,相较于基于MPC的电压控制方案有着更加快速

的响应。当 $t=1.5$ s 时,分布式光伏出力进一步升高,此时基于 MPC 的电压控制方案并不能很好地应对分布式光伏出力的继续升高,而基于 MFAC 的电压控制方案在分布式光伏出力进一步升高的情况下还能够将主导节点的电压水平控制在期望电压的附近。在光伏出力小幅度变化的场景下,基于 MFAC 的配电网电压控制方案相较于基于 MPC 的配电网电压控制方案有着更好的控制性能。

当分布式光伏出力出现小幅度上升时,系统电压水平降低。实施配电网电压控制方案后各控制设备调节自身的出力,实现主导节点电压的无差跟踪。

图 9 为场景 2 中不同控制方案下控制输入的变化情况。可以看出,相较基于 MPC 的控制方案,基于 MFAC 的电压控制方案虽然对于控制设备的调节不像 MPC 那样平滑,但其能够更加快速地响应由于分布式光伏有功出力变化所带来的电压波动问题。

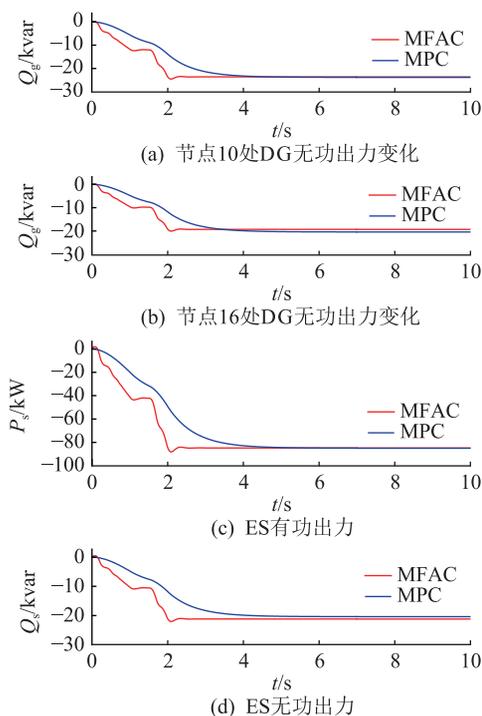


图 9 场景 2 中不同控制方案下控制输入的变化情况

Fig.9 Variation of control input under different control schemes in case 2

3.2.3 场景 3——负荷需求突增

为更好地验证所提出的方法在多场景下的有效性,模拟在 $t=0$ s 时节点 14 的有功、无功负荷需求突增的场景。节点 14 的有功、无功负荷变化情况如图 10 所示,各方案节点电压恢复情况如表 4 所示。

从表 4 可以看出,节点 14 负荷需求变化时采用

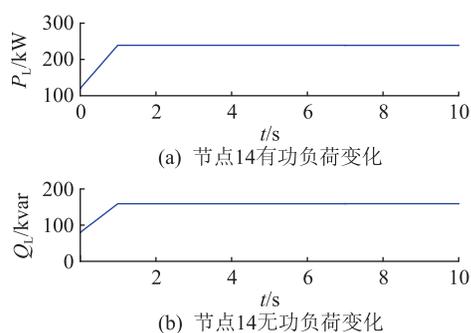


图 10 场景 3 中节点 14 负荷需求变化情况

Fig.10 Variation of node 14 load demand in case 3

表 4 场景 3 各控制方案节点电压恢复情况

Table 4 Node voltage recovery of each control scheme in case 3 p.u.

节点	扰动前电压	恢复后电压		
		MFAC	MPC	无电压控制
4	0.987 5	0.987 5	0.987 5	0.986 5
8	0.966 3	0.966 2	0.966 2	0.961 4
12	0.964 7	0.964 5	0.964 5	0.956 8
16	0.962 8	0.963 5	0.963 5	0.952 3
20	0.994 8	0.994 8	0.994 8	0.994 7
24	0.982 0	0.982 0	0.982 0	0.981 4
28	0.961 5	0.961 4	0.961 4	0.959 0
32	0.951 2	0.951 2	0.951 1	0.948 7

基于 MFAC 的电压控制方案和基于 MPC 的电压控制方案在控制结束后达到的控制效果几乎相同。

图 11 为场景 3 中不同控制方案下区域 2 中的主导节点 15 电压幅值的变化情况。可以看出,基于 MFAC 的电压控制方案面对负荷需求突增导致电压下降的情况相较于基于 MPC 的电压控制方案有着更加快速的响应。

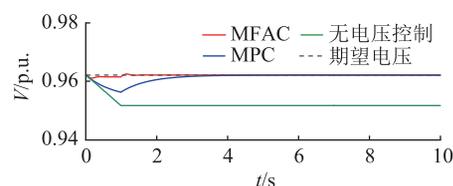


图 11 场景 3 中不同控制方案下主导节点 15 电压幅值的变化情况

Fig.11 Variation of voltage amplitude of the dominant node 15 under different control schemes in case 3

图 12 为场景 3 中不同控制方案下区域 2 中各控制输入的变化情况。由图 12 可以看出,在负荷需求突变的情况下,相较基于 MPC 的电压控制方案,基于 MFAC 的电压控制方案虽然对于控制设备的调节不像 MPC 那样平滑,但其能够更加快速地响应负荷需求变化带来的电压问题。

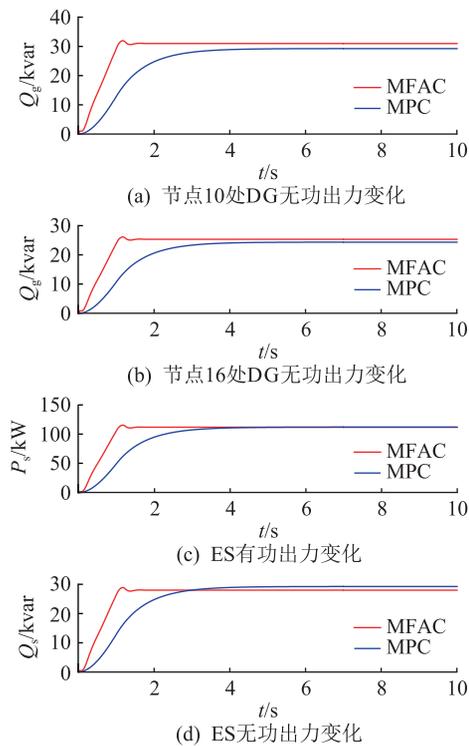


图 12 场景 3 中不同控制方案下控制输入的变化情况

Fig.12 Variation of control input under different control schemes in case 3

4 结语

新型电力系统下配电网电压控制系统难以精确建模,利用传统基于模型的控制方法对配电网进行电压控制的性能难以满足要求。因此,文中基于数据驱动的控制方法,提出一种基于 MFAC 的配电网电压控制方案,在配电网电压控制分区及主导节点选取的基础上,以 DG 的无功出力、ES 的有功、无功出力作为控制输入,在不涉及配电网电压控制模型信息的情况下实现对主导节点的无差调节。在改进的 IEEE 33 节点上进行多场景仿真与对比,验证了该控制方案对配电网进行电压控制的有效性。

文中只考虑了 DG、ES 等新型调压设备,未考虑有载调压变压器等传统调压设备。在后续研究中,将把传统调压设备考虑进算法之中,并对方案进行改进与优化,进一步减少控制前期的电压振荡对系统稳定性造成的影响,使该方案更加具有实际应用价值。

致谢

本文得到智能电网保护和运行控制国家重点实验室开放课题(SGT-YHT/20-JS-221)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 徐永海,何志轩,董旭,等. 基于 DG 和多端 VSC 协调控制的

交直流配电网优化运行[J]. 电力工程技术,2022,41(5): 116-123.

XU Yonghai, HE Zhixuan, DONG Xu, et al. Optimal operation of AC/DC distribution network based on DG and multi-terminal VSC coordinated control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 116-123.

[2] 吕凤仪,曾次玲,叶文浩,等. 含分布式电源并网的配电网电压波动特性分析[J]. 电气自动化,2021,43(1): 81-84.

LYU Fengyi, ZENG Ciling, YE Wenhao, et al. Analysis on voltage fluctuation characteristics of the distribution network with distributed generation connection[J]. Electrical Automation, 2021, 43(1): 81-84.

[3] ANTONIADOU-PLYTARIA K E, KOUVELIOTIS-LYSIKATOS I N, GEORGILAKIS P S, et al. Distributed and decentralized voltage control of smart distribution networks: models, methods, and future research[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2999-3008.

[4] 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 voltage control research in LV distribution network with high proportion of residential PVs[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 220-229.

[5] 钱仲豪,江志辉,吴茜,等. 计及不确定性因素的分布式电源与电动汽车充电站协调优化[J]. 电力工程技术,2021,40(1): 131-137.

QIAN Zhonghao, JIANG Zhihui, WU Xi, et al. Coordinated optimization of distributed power and electric vehicle charging stations considering uncertain factors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 131-137.

[6] 陈岩,靳伟,王文宾,等. 区域储能站参与扰动平抑的配电网多时间尺度自律策略[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(7): 134-143.

CHEN Yan, JIN Wei, WANG Wenbin, et al. Regional energy storage stations participate in disturbance stabilization of a distribution network multi-time-scale self-discipline operation strategy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 134-143.

[7] 刘松喜,杨智奇,黄伟达,等. 基于分布式测量的低压主动配电网中性线断线识别与定位方法[J]. 供用电,2022,39(4): 68-76.

LIU Songxi, YANG Zhiqi, HUANG Weida, et al. Identification and location of neutral line broken in low voltage active distribution network based on distributed measurement[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(4): 68-76.

[8] 张颖,寇凌峰,季宇,等. 计及储能与分布式电源协同的配电网分层分区优化控制[J]. 中国电力,2021,54(2): 104-112.

ZHANG Ying, KOU Lingfeng, JI Yu, et al. Hierarchical and partitioned optimal control of distribution networks considering the coordination between energy storage and distributed generation systems[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 104-112.

[9] 马舒婷. 主动配电网电压分级控制研究[D]. 北京:华北电

- 力大学,2021.
MA Shuting. Research on voltage hierarchical control method of active distribution network [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [10] 倪春花. 基于分布式光伏集群的配电网电压多级协调控制 [D]. 南京:东南大学,2017.
NI Chunhua. Research on distributed photovoltaic cluster based multi-level coordinated voltage control in distribution network [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [11] 王泉,何怡刚,马恒瑞,等. 考虑规模化储能的配电网电压分布式控制[J]. 电力自动化设备,2022,42(2):25-30,55.
WANG Xiao, HE Yigang, MA Hengrui, et al. Distributed voltage control of distribution network considering large-scale energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2):25-30,55.
- [12] 张新民,郭铭海,林亚培,等. 考虑灵活性的含分布式光伏配电网双层优化调度方法[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(3):56-66.
ZHANG Xinmin, GUO Minghai, LIN Yapei, et al. A bilayer optimal dispatch approach for distribution networks with distributed photovoltaic considering the flexibility [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3):56-66.
- [13] 杨贵云,吴倩,曹彦昆,等. 基于分层布局思想的配电网拓扑图自动生成算法[J]. 发电技术,2021,42(5):585-594.
YANG Guiyun, WU Qian, CAO Yankun, et al. Automatic generation algorithm of distribution network topology based on hierarchical layout [J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5):585-594.
- [14] 何勇琪,吴明轩,莫若慧,等. 基于复杂电网的电压分层协调控制方法探讨[J]. 电工技术,2018(23):98-99,101.
HE Yongqi, WU Mingxuan, MO Ruohui, et al. Discussion on voltage hierarchical coordinated control method based on complex power grid [J]. Electric Engineering, 2018(23):98-99,101.
- [15] 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.
- [16] 李培帅,吴在军,张错,等. 主动配电网分布式混合时间尺度无功/电压控制[J]. 电力系统自动化,2021,45(16):160-168.
LI Peishuai, WU Zaijun, ZHANG Cuo, et al. Distributed hybrid-timescale voltage/var control in active distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16):160-168.
- [17] 刘建伟,李学斌,刘晓鸥. 有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J]. 发电技术,2022,43(3):476-484.
LIU Jianwei, LI Xuebin, LIU Xiaoou. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3):476-484.
- [18] 蔡宇,林今,宋永华,等. 基于模型预测控制的主动配电网电压控制[J]. 电工技术学报,2015,30(23):42-49.
CAI Yu, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Voltage control strategy in active distribution network based on model predictive control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23):42-49.
- [19] GUO Y F, WU Q W, GAO H L, 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.
- [20] 李桂鑫,徐科,刘英英,等. 基于分布式模型预测控制的含分布式储能有源配电网动态电压控制[J]. 电力建设,2021,42(6):116-126.
LI Guixin, XU Ke, LIU Yingying, et al. Dynamic voltage control based on DMPC for active distribution network with distributed energy storage systems [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6):116-126.
- [21] 王印峰,李依泽,叶洪波,等. 考虑有功协调优化的配电网动态电压控制[J]. 电力自动化设备,2023,43(2):60-66.
WANG Yinfeng, LI Yize, YE Hongbo, et al. Dynamic voltage control of distribution network considering coordinated optimization of active power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2):60-66.
- [22] 侯忠生,金尚泰. 无模型自适应控制:理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2013.
HOU Zhongsheng, JIN Shangtai. Model-free adaptive control: theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [23] 黄伟峰,姚建刚,韦亦龙,等. 无模型自适应控制算法在互联电网 AGC 中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28(4):78-84.
HUANG Weifeng, YAO Jianguang, WEI Yilong, et al. Application of model-free adaptive control algorithm into AGC control of interconnected power grid [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(4):78-84.
- [24] 杨畅,郑涛,李鹏宇,等. 基于改进 MFAC 的交直流微电网分布式二次控制[J/OL]. 中国电机工程学报:1-14 [2022-11-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20221010.1432.009.html>.
YANG Chang, ZHENG Tao, LI Pengyu, et al. Distributed secondary control of hybrid AC/DC micro-grid based on improved model-free adaptive control (MFAC) [J/OL]. Proceedings of the CSEE; 1-14 [2022-11-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20221010.1432.009.html>.
- [25] 吴熙,王梦婷,施星宇,等. 基于无模型自适应控制的双馈风机次同步振荡附加阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报,2022,42(10):3601-3614.
WU Xi, WANG Mengting, SHI Xingyu, et al. SSO supplementary damping control method for DFIG based on model-free adaptive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10):3601-3614.
- [26] 张玮亚,王紫钰. 智能配电系统分区电压控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(1):146-154.

- ZHANG Weiya, WANG Ziyu. Review of zonal-voltage control techniques of smart distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1):146-154.
- [27] 潘华,姚正,黄玲玲,等. 考虑分布式电源及需求响应不确定性的园区综合能源系统经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2):94-105.
- PAN Hua, YAO Zheng, HUANG Lingling, et al. Economic dispatch of park integrated energy system considering the uncertainty of distribution generation and demand response [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2):94-105.
- [28] 魏亚军,李开灿,董振. 含逆变型分布式电源的配电网故障暂态分析[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3):102-108.
- WEI Yajun, LI Kaican, DONG Zhen. Transient analysis of faults in the distribution networks with inverter interfaced distributed generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3):102-108.
- [29] 王秀茹,刘刚,黄华峰,等. 考虑分布式电源的配电网无功调度和储能优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4):134-142.
- WANG Xiuru, LIU Gang, HUANG Huafeng, et al. Reactive power dispatching and energy storage optimization for distribution network with distributed power resources[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4):134-142.
- [30] 赵龙,杨波,崔灿,等. 基于多种群牵引差分进化算法的含分布式电源配电网规划[J]. 供用电, 2022, 39(5):61-69.
- ZHAO Long, YANG Bo, CUI Can, et al. Distribution network planning with distributed generation based on multi group traction differential evolution algorithm[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5):61-69.
- [31] 李香龙,付晓,朱洁,等. 含分布式电源的配电网分区和主导节点选取方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13):24-29.
- LI Xianglong, FU Xiao, ZHU Jie, et al. Research on partition method and selection of dominant nodes for distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13):24-29.
- [32] 陈叶旺,申莲莲,钟才明,等. 密度峰值聚类算法综述[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(2):378-394.
- CHEN Yewang, SHEN Lianlian, ZHONG Caiming, et al. Survey on density peak clustering algorithm[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(2):378-394.

作者简介:



潘俊迪

潘俊迪(2000),男,硕士在读,研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail: 220222714@seu.edu.cn);

陈中(1975),男,博士,教授,研究方向为电力系统稳定与控制、电动汽车与电网互动;

倪纯奕(2000),女,硕士在读,研究方向为电力系统状态估计。

Distribution network voltage control scheme based on model-free adaptive control

PAN Jundi¹, CHEN Zhong¹, NI Chunyi¹, WAN Lingling¹, WANG Yi^{2,3}

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. State Key Laboratory of

Smart Grid Protection and Operation Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: With the large-scale development of new elements such as distributed new energy, distributed generation and electric vehicles under the new power system, the distribution network voltage control is faced with challenges such as heterogeneous control object characteristics, complex models and variable scenarios. In this context, a distribution network voltage control strategy based on model-free adaptive control is proposed. The data from dominant node voltages, distributed generation, and energy storage device output are used by this strategy to establish a real-time dynamic linearized data rolling pool based on the distribution network voltage control partitioning and dominant node selection. Based on the characteristic model theory and data drive, the complex system voltage control characteristics are time-varyingly modified by the controller characteristic parameters, and the control model complexity is reduced without losing system model information. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is shown in the results by simulating and comparing in the modified IEEE 33-node distribution network system arithmetic. The response of the proposed control strategy is quicker than that of traditional model-based control method, thus reducing the voltage fluctuation caused by disturbances. The proposed control strategy has good application prospects.

Keywords: model-free adaptive control; distributed generation; energy storage device; distribution network; voltage control; data-driven

(编辑 钱悦)