

# 考虑源荷不确定性的主动配电网两段式电压自动控制方法

吕征宇<sup>1</sup>,周亮<sup>2</sup>

(1.国网上海电力设计有限公司,上海 200002;

2.国网上海市电力公司经济技术研究院,上海 200002)

**摘要:**在对主动配电网电压进行控制过程中存在电压控制效果差和效率低的问题,研究提出考虑负荷量测的主动配电网两段式电压自动控制方法。利用概率密度函数(PDF)曲线离散化方法,考虑负荷量测和光伏的不确定性特征,对负荷和光伏有功功率误差PDF曲线进行离散化处理。利用同步回代削减法对原始场景进行消减处理,达到减少计算量并提高控制效率的目的;通过设置等效电压上下限指标对主动配电网的控制区域进行划分,运用自上而下的方式对电容器、分布式电源和有载调压变压器进行调节,实现了主动配电网两段式电压自动控制。实验结果表明,所提方法的主动配电网两段式电压控制效果较好,能够有效提高电压控制效率。

**关键词:**负荷量测;主动式配电网;两段式电压控制;同步回代削减法;等效电压指标

**中图分类号:**TM727 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24439

## A Two-stage Voltage Automatic Control Method for Active Distribution Networks Considering Source-load Uncertainty

LÜ Zhengyu<sup>1</sup>, ZHOU Liang<sup>2</sup>

(1.State Grid Shanghai Electric Power Design Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 2.Economic and Technological Research Institute of State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200002, China)

**Abstract:** In the process of controlling the voltage of active distribution network, there are problems of poor voltage control effect and low efficiency. A two-stage automatic voltage control method of active distribution network considering load measurement was proposed. Using the probability density function (PDF) curve discretization method, considering the uncertainty characteristics of load measurement and photovoltaics, the PDF curves of load and photovoltaic active power errors were discretized. The original scene was reduced by the synchronous back-reduction method to reduce the amount of calculation and improve the control efficiency; the control area of the active distribution network was divided by setting the upper and lower limits of the equivalent voltage, and the top-down method was used. The capacitors, distributed power sources and on-load voltage regulating transformers were adjusted to realize the two-stage automatic voltage control of the active distribution network. The experimental results show that the proposed method has a better effect on the two-stage voltage control of the active distribution network, and can effectively improve the voltage control efficiency.

**Key words:** load measurement; active distribution network; two-stage voltage control; synchronous back-generation reduction method; equivalent voltage index

电力系统未来的发展目标是减少环境污染,缓解能源危机压力,在此背景下绿色电网成为其发展的主要方向<sup>[1]</sup>。近年来分布式电源的渗透率在不同领域中不断提高,当配电网中潮流变为双向移动状态时容易出现电压升高的现象;而当配

电网中负荷局部过载,出现过负荷现象时,会导致接入点此时的电压大幅度下降。与此同时,配电网电压受电动汽车充电行为随机性、可再生能源发电的随机性和间接性的影响,波动较为频繁。因此,电压控制问题成为电动汽车和可再生

能源接入配电网的主要限制因素,需要对主动配电网电压控制方法进行分析和研究<sup>[2]</sup>。

目前相关领域学者针对主动配电网电压控制方法进行了研究,并取得了一定的研究成果。文献[3]提出了基于分布式资源集群的主动配电网控制方案,构建电网能源管理与运行调控结构,设计相应的系统,分析多级协调的特点,设计相对应的技术,实现主动配电网控制方案的设计,该方法可以有效实现主动配电网的自动控制,但该方法控制后的电压波动幅度较大,易偏离额定值,导致控制效果差的问题。文献[4]提出了计及需求响应的主动配电网日前优化调度,通过构建不确定集,进一步优化调度,实现电网的正常运行,通过机会约束规划构建主动配电网运行模型,对构建的模型进行求解,完成电网的调度。该方法可以保障电压平稳,但该方法控制电压所用的运行时间较长,不能及时处理配电网电压升高或降低的问题,导致控制效率较低。文献[5]提出了基于模型预测控制(model predictive control, MPC)和梯度投影的配电网分布式协调电压控制方法。协调静态同步补偿器、分布式发电装置和有载分接开关,采用梯度投影法对分布式发电机组与静态同步补偿器的协调优化问题进行了分解,并以分散方式实现分布式发电机组和静态同步补偿器的最佳协调。将计算出的分布式发电和静态同步补偿器的无功参考发送给有载分接开关控制器,从而实现分布式协调电压控制。该方法减轻了计算负担,但其电压控制效率较低。文献[6]提出了考虑电动汽车充电的分布式光伏配电网电压控制方法。采用光伏逆变器的分布式控制。通过控制光伏逆变器的有功功率输出和无功功率输出来调节电压。根据电动汽车功率利用率与额定容量比值(state-of-charge, SOC)局部信息的一致性目标控制充放电速率,实现分布式光伏配电网电压控制。该方法有效地解决了该区域的电压超限问题,但仍存在电压控制效果较差的问题。

针对上述问题,提出考虑源荷不确定性的主动配电网两段式电压自动控制方法。通过对PDF曲线划分获得等宽度区间,利用PDF曲线离散化方法建模后进行离散化处理,完成场景削减,提高电压控制效果。经过计算得到配电网中关键节点电压,将区域协调控制和局部自治控制

两种模式相结合,实现混合式优化,减少控制电压的时间成本,提高电压控制效率。

## 1 考虑负荷量测与光伏不确定性的场景生成与消减方法

在实际的配电网中,由于光伏发电出力的频繁波动以及配电网本身的测量配置不合理,使得配电网系统的出力和负荷功率估算不够精确。为此,提出考虑负荷量测与光伏不确定性的场景生成与消减方法。

通过PDF曲线离散化方法构建模型之前,假设光伏三相相对误差此时相同,并对PDF曲线进行划分,获得若干个等宽度区间,在此基础上,获得三相对应的视在功率,通过消减原始场景减少计算量,完成模型的构建。

利用PDF曲线离散化方法进行建模时,需要作出如下假设:

1) 光伏出力之间存在的相关性在主动配电网中主要依赖于两者的距离<sup>[7-9]</sup>,节点之间存在的距离在主动配电网中通常较小,光伏三相相对误差此时相同;

2) 三相负荷的相对估计误差在相同节点中是相同的,且负荷功率因数基本不发生变化,波动范围较小;

3) 每一相光伏无功出力都是可调且独立的。

用 $[P_{-Ln}, \bar{P}_{Ln}]$ 描述节点 $n$ 在主动配电网中的三相有功功率总和, $\tilde{P}_{Ln}$ 为功率期望值。有功功率误差可表示为

$$\begin{cases} P_{Ln} = \tilde{P}_{Ln} + \frac{\bar{P}_{Ln} - P_{-Ln}}{2} \lambda & \lambda \in [-1, 1] \\ P_{Ln} \in [P_{-Ln}, \bar{P}_{Ln}] \end{cases} \quad (1)$$

设 $\tilde{\sigma}_{Ln}$ 为功率对应的标准差, $\sigma_{Ln}$ 为 $\tilde{\sigma}_{Ln}$ 转换后获得的结果,其计算公式如下:

$$\sigma_{Ln} = \frac{\tilde{\sigma}_{Ln}}{(\bar{P}_{Ln} - P_{-Ln})/2} \quad (2)$$

在 $[-1, 1]$ 区间的基础上生成场景的过程如下:

1) 对负荷和光伏有功功率误差PDF曲线进行离散化处理<sup>[10-11]</sup>,选取0为其中心,对PDF曲线进行划分,获得若干个等宽度区间。

2) 有功功率的发生可以用区间值即中间值来描述,一般用区间面积来表示其发生几率。

3) 组合处理负荷区间情况和光伏区间情况,

获得一种场景,出现各部分情况的概率乘积即为该场景的概率值。

用三相在 $[P_{-Ln}, \bar{P}_{Ln}]$ 区间内的总有功率率值描述 $[-1, 1]$ 区间形式对应的场景值,在上述两点假设的基础上获得三相对应的视在功率。

通过上述过程获得的场景数量一般情况下都是不断增长的,因此为了减少计算量,需要消减原始场景<sup>[12-13]</sup>。

在 $[-1, 1]$ 区间的基础上生成场景详细流程图如图1所示。

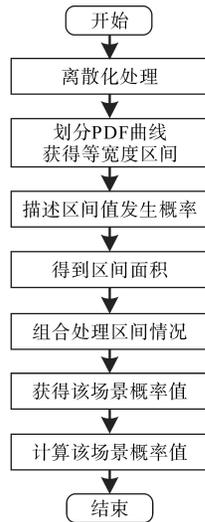


图1 场景详细流程图

Fig.1 Detailed flow chart of the scene

考虑负荷量测的主动配电网两段式电压自动控制方法通过同步回代削减法对节点的三相视在功率模值进行削减处理,具体过程如下:

1)设置集合 $D$ ,由初始模值形式场景构成;用 $J$ 描述从集合 $D$ 中削去的集合。对场景在集合 $D$ 中的场景距离进行计算,根据计算结果建立场景距离矩阵。

设 $T_{KD}(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$ 为场景 $\varepsilon_i$ 与场景 $\varepsilon_j$ 之间存在的场景距离,其计算公式如下:

$$T_{KD}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = \|\varepsilon_i - \varepsilon_j\|_2 \quad i, j = 1, 2, \dots, N_s \quad (3)$$

2)获取场景 $\varepsilon_i$ 与场景 $\varepsilon_j$ 之间存在的场景距离 $\min\{T_{KD}(\varepsilon_i, \varepsilon_j)\}$ 。

3)设置概率距离 $\min\{T_{KD}(\varepsilon_i, \varepsilon_j)\} p_{\varepsilon_i}$ ,由上述过程计算的 $\min\{T_{KD}(\varepsilon_i, \varepsilon_j)\}$ 获取,其中, $p_{\varepsilon_i}$ 为发生场景 $\varepsilon_i$ 的概率。根据计算结果,将其添加到集合 $J$ 中。

4)重复上述过程,完成场景削减,减少方法的计算量。在 $[-1, 1]$ 区间的基础上削减场景详细流程图如图2所示。

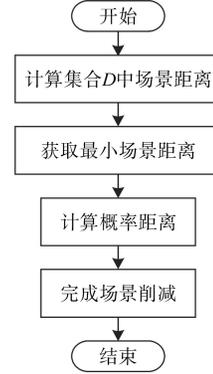


图2 削减场景详细流程图

Fig.2 Detailed flow chart of the reduction scenario

根据上述方法,完成负荷量测与光伏不确定性的场景生成与消减。

## 2 主动配电网两段式电压自动控制方法

基于上述考虑负荷量测与光伏不确定性的场景生成与消减理论,在确保削减后场景近似性的基础上,提出了主动配电网两段式电压自动控制方法。计算主动配电网中所有关键节点电压,通过对比选取指标下限值,调节无功设备在控制区域内全部节点对应的电压值,满足主动配电网两段式电压控制要求。根据管理控制终端,估计电压越限。通过区域协调控制策略,对变压器分接头位置进行调节,应用局部自治控制策略,控制无功调节装置,完成主动配电网两段式电压的自动控制。

### 2.1 控制指标

将等效节点电压上下限指标 $f_{EVL}$ 设定为区域协调控制和局部自治控制<sup>[14-15]</sup>,而 $f_{EVL}$ 的取值范围为封闭区间 $[f_{EVLmin}, f_{EVLmax}]$ 。

通过下式描述节点 $i$ 和节点 $j$ 在配电网中无功设备的无功功率:

$$\Delta U_{ij} = \frac{1}{U_N} \left\{ \sum_{s=i}^{j-1} [P_s \sum_{t=1}^s R_t + (Q_s - Q_{c,s}) \sum_{t=1}^s X_t \cdot T_{KD}(\varepsilon_i, \varepsilon_j)] + \sum_{s=i+1}^j R_s \sum_{t=j}^E P_t + \sum_{s=i+1}^j X_s \sum_{t=j}^E (Q_t - Q_{c,t}) - \sum_{s=1}^i R_s \sum_{t=i}^{j-1} P_t - \sum_{s=1}^i X_s \sum_{t=i}^{j-1} (Q_t - Q_{c,t}) \right\} \quad (4)$$

式中: $U_N$ 为额定电压值; $P_s, P_t$ 分别为节点 $s$ 和节点 $t$ 对应的有功功率; $R_t, R_s, X_t, X_s$ 均为节点之间存在的线路阻抗; $Q_t, Q_s$ 分别为节点 $t$ 和节点 $s$ 对应的无功功率; $Q_{c,s}, Q_{c,t}$ 分别为节点 $s$ 和节点 $t$ 对应

的无功补偿设备出力值; $E$ 为节点总数。

主动配电网的电压具有分布不确定性<sup>[16-17]</sup>,在考虑主动配电网潮流约束时,计算所有关键节点在主动配电网中的电压,通过对比选取 $f_{EVL}$ 指标下限值,当 $\Delta U_{\max} > 0$ 时,通过下式计算 $f_{EVL}$ 指标下限值:

$$f_{EVL\min} = \max_{i \in C} (U_{\text{per},\min}^i + \Delta U_{\max}^i) \quad (5)$$

式中: $C$ 为关键点在自治区域内构成的集合; $U_{\text{per},\min}^i$ 为节点 $i$ 在主动配电网中被允许的电压下限值; $\Delta U_{\max}^i$ 为节点 $i$ 在主动配电网中的 $\Delta U_{\max}$ 取值。

在控制节点对应电压 $U_{\text{eq}} \in [f_{EVL\min}, f_{EVL\max}]$ , $\forall Q_i \leq Q_{\max}^i, \forall P_i \leq P_{\max}^i$ 情况下,节点 $i$ 在区域之间的电压值 $U_i$ 如下式<sup>[18-19]</sup>:

$$U_i = U_{\text{eq}} - \Delta U^i \geq f_{EVL\min} - \Delta U^i \geq U_{\text{per},\min}^i + \Delta U_{\max}^i - \Delta U^i \quad (6)$$

式中: $\Delta U^i$ 为电压下降值。

式(6)在极限情况下两边整式相等,将无功设备在该背景下投入,得到 $\Delta U^i = \Delta U_{\max}^i, U_i = U_{\text{per},\min}^i$ ,根据上述过程对 $f_{EVL}$ 指标的上限值 $f_{EVL\max}$ 进行计算。

通过上述分析,获得指标 $f_{EVL}$ 的取值规则:

$$[f_{EVL\min}, f_{EVL\max}] = \begin{cases} \bigcap_{i \in C} [U_{\text{per},\min}^i + \Delta U_{\max}^i, U_{\text{per},\max}^i] & \Delta U_{\max} > 0, \Delta U_{\min} > 0 \\ \bigcap_{i \in C} [U_{\text{per},\min}^i + \Delta U_{\max}^i, U_{\text{per},\max}^i + \Delta U_{\min}^i] & \Delta U_{\max} > 0, \Delta U_{\min} < 0 \\ \bigcap_{i \in C} [U_{\text{per},\min}^i, U_{\text{per},\max}^i + \Delta U_{\min}^i] & \Delta U_{\max} < 0, \Delta U_{\min} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\bigcap_{i \in C}$ 为不同区域之间的交集。

通过上述分析可知,控制节点对应的电压 $U_{\text{eq}} \in [f_{EVL\min}, f_{EVL\max}]$ 属于充分非必要条件,调节无功设备在控制区域内全部节点对应的电压值,满足主动配电网两段式电压控制要求<sup>[20-21]</sup>。

按照分区划分的原则,选择主动配电网控制单元中的受控无功设备作为区域和局部自治控制区域,根据管理控制终端对电压的越限进行估计,通过调节可控无功设备,恢复配电网电压。

## 2.2 区域协调控制策略

在上述控制指标的基础上,通过对区域协调控制和局部自治控制之间的协作,可实现对主动配电网两段式电压的自动控制。根据时间尺度,可以将主动配电网两段式电压的自动控制分为区域协调控制和局部自治控制两种模式。将上述两种控制模式相结合,可实现混合式

优化。

局部自治控制当区域 $i$ 控制节点电压 $U_{\text{eq}}$ 不在区间 $[f_{EVL\min,i}, f_{EVL\max,i}]$ 内取值时,进行区域协调控制,可以获得多段式的主动配电网最优电压自动控制方案。

如果自治控制区域内发生区域 $k$ 控制节点电压 $U_{\text{eq}}$ 不在区间 $[f_{EVL\min,k}, f_{EVL\max,k}]$ 内取值,且存在电压越限情况,各接收节点将自身的电压信号传送到区域控制器中,区域控制器下发命令,对变压器分接头的位置进行调节<sup>[22-23]</sup>,具体过程如下:

1) 设 $n_{\text{next}} \in [n_{\text{tapmin}}, n_{\text{tapmax}}]$ ,该区间为调压变压器分接头在主动配电网中的调节范围,可通过下式计算得到:

$$\begin{cases} n_{\text{next}} \in [n_{\text{tapmin}}, n_{\text{tapmax}}] = [n_{\text{tapnow}} x_{\text{ratemin}}, n_{\text{tapnow}} x_{\text{ratemax}}] \\ [x_{\text{ratemin}}, x_{\text{ratemax}}] = \bigcap_{i=1,2,\dots,n} \left[ \frac{f_{EVL\min,i}}{U_{\text{eq},i}}, \frac{f_{EVL\max,i}}{U_{\text{eq},i}} \right] \end{cases} \quad (8)$$

式中: $n$ 为区域数量; $n_{\text{tapmin}}, n_{\text{tapmax}}$ 分别为分接头位置在主动配电网中的最小可调值和最大可调值; $n_{\text{tapnow}}$ 为当前有载调压变压器在主动配电网中的分接头位置; $x_{\text{ratemin}}, x_{\text{ratemax}}$ 分别为可调比例最小值和最大值。

2) 通过下式选择动作指令:

$$\text{next} = \begin{cases} \text{ceil}(n_{\text{tapmin}}) & U_{\text{eq},k} < f_{EVL\min,k} \\ \text{floor}(n_{\text{tapmax}}) & U_{\text{eq},k} > f_{EVL\max,k} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\text{ceil}(n_{\text{tapmin}})$ 为对最小可调值 $n_{\text{tapmin}}$ 的向上取整操作; $\text{floor}(n_{\text{tapmax}})$ 为对最大可调值 $n_{\text{tapmax}}$ 的向下取整操作。

如果仍存在一些区域在完成有载调压变压器调节后存在电压越限现象,将节点电压控制在 $f_{EVL}$ 范围内,通过自治控制在不同区域中完成电压的恢复。

## 2.3 局部自治控制策略

基于上述区域协调控制策略,为实现主动配电网有功功率接入最大化,应用局部自治控制策略,控制无功调节装置,完成主动配电网两段式电压自动控制。局部自治控制策略主要通过无功补偿、补偿目标筛选和输入位置选择三个模块组成,局部自治控制流程如图3所示。

在控制区域内,应用局部自治控制策略,控制无功调节装置,利用模块化方式,实施局部自治控制策略流程,使控制电压花费的时间降低。

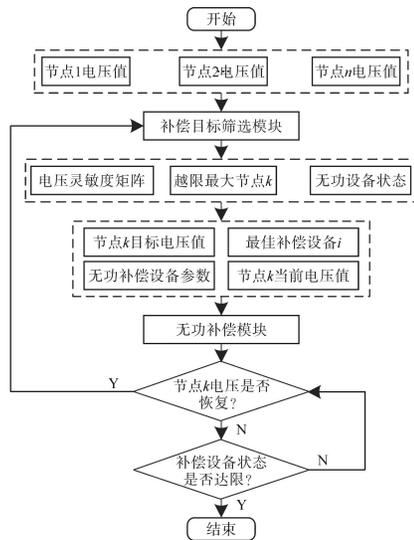


图3 局部自治控制流程

Fig.3 Local autonomous control process

### 3 实验与结果

为了验证考虑负荷量测的主动配电网两段式电压自动控制方法的整体有效性,采用改进后的IEEE 34节点配电系统,在Matlab仿真实验平台中进行相关测试。改进后的IEEE 34节点配电系统结构如图4所示。

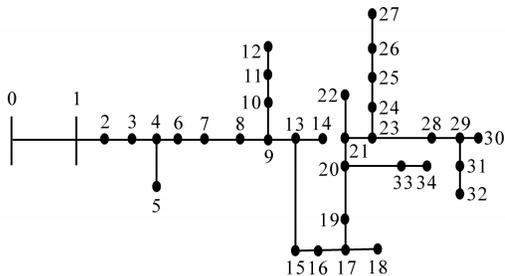


图4 改进后的IEEE 34节点配电系统结构

Fig.4 Improved IEEE 34-node power distribution system structure

该节点配电系统的基准电压设定为23.5 kV,变压器的功率设定为2.4 MV·A,变压器的档位数为5档,其调压步长设定为0.012 6(标么值)。选取两个经典场景对所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法的电压控制结果进行测试。

场景1:11:00—14:00,此时负荷处于平时状态,光伏出力与其他时段相比相对较大,将随机扰动引入该时段的光伏出力预测曲线中,采用上述三种方法对节点电压进行控制,控制结果如图5所示。

场景2:19:00—22:00,负荷在该时段中处于峰时状态,光伏出力为零,将随机扰动引入该时段中,采用上述三种方法对节点电压进行控制,控制结果如图6所示。

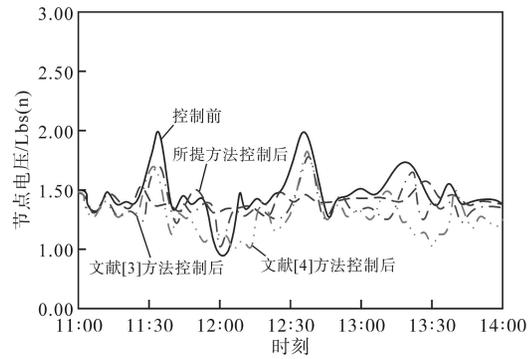


图5 场景1下的电压控制结果

Fig.5 Voltage control results under scenario 1

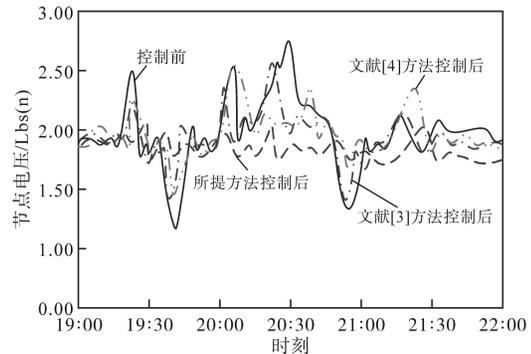


图6 场景2下的电压控制结果

Fig.6 Voltage control results under scenario 2

根据图5和图6中的数据可知,将随机扰动引入场景1和场景2后,节点电压均出现波动现象,与场景1相比,场景2的节点电压波动情况更为剧烈。采用所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法在以上两种场景下对电压进行控制,发现所提方法控制后的节点电压趋于平稳,波动明显变小,而文献[3]方法和文献[4]方法控制后的节点电压波动情况没有得到明显改善。由此可知,所提方法的电压控制效果优于文献[3]方法和文献[4]方法。因为所提方法考虑负荷量,采用区域协调控制和局部自治控制两段式控制方法,对主动配电网电压进行控制,提高了电压控制效果。

在上述测试环境中,对所提方法控制前、后的节点功率进行对比,进一步测试所提方法的电压控制性能。不同场景下的节点功率变化情况如图7所示。

分析图7可知,采用所提方法对主动配电网电压控制后,节点功率与控制前相比得到了提升。由此可知,所提方法的电压控制效果好,验证了所提方法的电压控制性能。

在此基础上,在改进后的IEEE 34节点配电系统中选取14个节点,采用所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法对14个节点的电压进行控制,对比控制所用的时间,测试结果如表1所示。

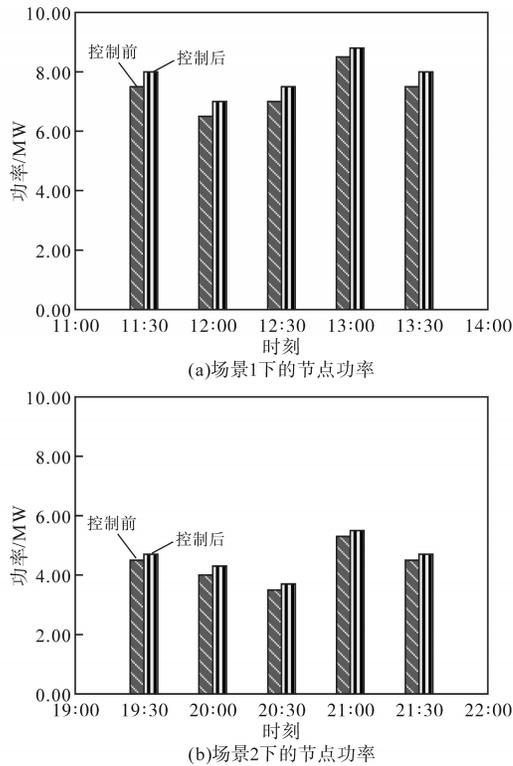


图7 不同场景下的节点功率变化情况

Fig.7 Node power changes in different scenarios

表1 不同方法的控制时间

Tab.1 Control time of different methods

节点	控制时间/ms		
	所提方法	文献[3]方法	文献[4]方法
节点1	33	115	123
节点2	34	116	120
节点3	35	117	125
节点4	33	112	128
节点5	30	116	126
节点6	32	115	124
节点7	34	114	125
节点8	33	116	127
节点9	35	117	126
节点10	36	118	123
节点11	33	119	124
节点12	35	112	127
节点13	38	113	120
节点14	39	117	129

对表1中的数据进行分析可知,对同一个节点电压进行控制时,所提方法所用的时间远低于文献[3]方法和文献[4]方法所用的时间。

为进一步研究三种方法的收敛时间,进行收敛时间测试,测试结果如图8所示。

分析图8可知,三种方法的收敛时间曲线较为稳定,但所提方法收敛时间远低于文献[3]方法和文献[4]方法,由此可知,所提方法可在较短的

时间内,完成主动配电网的电压控制,能够有效提高电压控制效率。

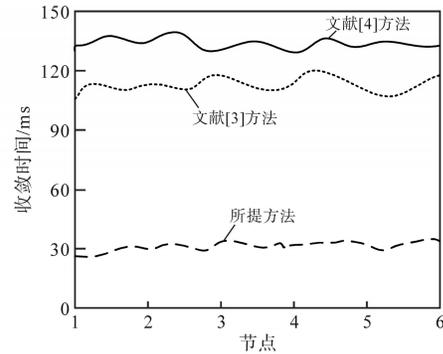


图8 不同方法收敛时间测试

Fig.8 Convergence time testing for different methods

## 4 结论

主动配电网是配电网目前发展的方向,能够实现多能源综合利用,并提升供电品质,可通过协调控制完成可再生能源的大规模并网,电压控制在主动配电网供电过程中属于重要的技术基础。目前电压控制方法存在控制效果差和控制效率低的问题,提出考虑负荷量测的电网两段式电压自动控制方法。

由于光伏发电出力的频繁波动以及配电网本身的测量配置不合理,使得配电网系统的出力 and 负荷功率估算不够精确。为此,考虑负荷量测和光伏的不确定性特征,提出场景生成与消减方法,确保削减后场景近似性,以期减少计算量,提高方法的控制效率。在此基础上,计算主动配电网中所有关键节点电压,通过对比选取指标下限值,调节无功设备在控制区域内全部节点对应的电压值,满足主动配电网两段式电压控制要求。根据管理控制终端,估计电压越限。通过区域协调控制策略,对变压器分接头位置进行调节,应用局部自治控制策略,控制无功调节装置,完成主动配电网两段式电压的自动控制,从而确保主动配电网电压控制效果,为主动配电网的运行和发展提供了保障。

## 参考文献

- [1] 别朝红,林超凡,李更丰,等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735-2745. BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.

- [2] 张宇精, 乔颖, 鲁宗相, 等. 含高比例分布式电源接入的低感知度配电网电压控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1528-1535.  
ZHANG Yujing, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Voltage control for partially visible distribution networks with high DG penetration[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1528-1535.
- [3] 吴文传, 张伯明, 孙宏斌, 等. 主动配电网能量管理与分布式资源集群控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 111-118.  
WU Wenchuan, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. Energy management and distributed energy resources cluster control for active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 111-118.
- [4] 王鹏, 刘敏. 计及需求响应的主动配电网日前优化调度[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(28): 152-158.  
WANG Peng, LIU Min. Day-ahead dispatching optimization of active distribution network considering demand response[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(28): 152-158.
- [5] JIAO W, CHEN J, WU Q, et al. Distributed coordinated voltage control for distribution networks with DG and OLTC based on MPC and gradient projection[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(1): 680-690.
- [6] WANG Z, YU L, JI T, et al. Research on voltage control method of distributed photovoltaic distribution network considering electric vehicle charging[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 651(2): 022007.
- [7] 潘舒扬, 李勇, 贺悝, 等. 考虑微电网参与的主动配电网分区自动电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(21): 4580-4589.  
PAN Shuyang, LI Yong, HE Li, et al. Automatic voltage control strategy based on zone-division for active distribution network with microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(21): 4580-4589.
- [8] 胡鹏, 艾欣, 吴昊辰, 等. 基于节点电价的主动配电网日前-实时阻塞管理[J]. 现代电力, 2020, 37(3): 230-238.  
HU Peng, AI Xin, WU Jiechen, et al. Day-ahead and real-time congestion management of active distribution network based on distribution location marginal price[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(3): 230-238.
- [9] 易灵芝, 李直. 含微电网群的主动配电网双层联合优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(4): 42-50.  
YI Lingzhi, LI Zhi. Bi-level joint optimal dispatch of active distribution network with multi-microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(4): 42-50.
- [10] 范家铭, 夏向阳. 光伏发电并网的有功功率控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 123-128, 147.  
FAN Jiaming, XIA Xiangyang. Active power control strategy for grid connected photovoltaic power generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 123-128, 147.
- [11] 唐一铭, 顾文, 莫菲, 等. 大型并网光伏电站有功功率控制策略与试验分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 148-155.  
TANG Yiming, GU Wen, MO Fei, et al. Active power control strategy of large scale grid-connected photovoltaic plant and experimental analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(11): 148-155.
- [12] 蔡霖霖, 徐青山, 袁晓冬, 等. 基于风电消纳时序场景的电池储能系统配置策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 993-1001.  
CAI Jilin, XU Qingshan, YUAN Xiaodong, et al. Configuration strategy of large-scale battery storage system orienting wind power consumption based on temporal scenarios[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 993-1001.
- [13] 崔承刚, 郝慧玲, 杨宁, 等. 基于优化Kriging代理模型的场景分析法求解机组组合问题[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 49-56.  
CUI Chenggang, HAO Huiling, YANG Ning, et al. Scenario analysis based on the optimization Kriging model for solving unit commitment problems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 49-56.
- [14] 赵建勇, 张震霄, 丁元杰, 等. 基于电力电子调压器的配电网电压协调控制策略[J]. 电气传动, 2022, 52(7): 50-56.  
ZHAO Jianyong, ZHANG Zhenxiao, DING Yuanjie, et al. Voltage coordination control strategy of distribution network based on power electronic voltage regulator[J]. Electric Drive, 2022, 52(7): 50-56.
- [15] 夏世威, 张茜, 余璟, 等. 基于一致性理论的多区域电力系统分布式状态估计[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 140-147.  
XIA Shiwei, ZHANG Qian, YU Jing, et al. Distributed state estimation of multi-area power systems based on consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 140-147.
- [16] 刘洪, 徐正阳, 葛少云, 等. 考虑储能调节的主动配电网有功-无功协调运行与电压控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 51-58.  
LIU Hong, XU Zhengyang, GE Shaoyun, et al. Coordinated operation of active-reactive power and voltage control for active distribution network considering regulation of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 51-58.
- [17] 马瑞, 郭光. 含优先利用风电能量枢纽主动配电网三相不平衡随机模糊动态潮流方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 590-602.  
MA Rui, GUO Guang. Three-phase unbalanced random fuzzy dynamic power flow method for active distribution network containing energy hubs with priority utilization of wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 590-602.
- [18] 吴有明. 等效法和节点电压法在船舶电力系统稳态数学模型建立中的应用[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(10): 88-90.  
WU Youming. Application of equivalent method and node voltage method in establishing steady mathematical model of ship power system[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(10): 88-90.
- [19] 俞骁, 杨洪耕. 兼顾系统侧和用户侧的节点电压暂降严重程

(下转第59页)

- HUANG Weijian, JIA Mengyu, HUANG Liang. Research on MapReduce load balancing of greedy algorithm partitioning based on parallel random sampling[J]. Modern Electronic Technology, 2020, 43(16): 170-173.
- [6] 段翔分, 张华, 高艺文, 等. 基于kNN算法的电力系统设备隐患在线识别方法研究[J]. 电气传动, 2021, 51(22): 69-73.  
DUAN Xiangxi, ZHANG Hua, GAO Yiwen, et al. Research on online identification method of hidden dangers of power system equipment based on kNN algorithm[J]. Electric Drive, 2021, 51(22): 69-73.
- [7] 杨彦波, 朱建军. 电力系统同步向量测量单元测试方法设计[J]. 宁夏电力, 2021(4): 39-43.  
YANG Yanbo, ZHU Jianjun. Design of a test method for synchronized phasor measurement unit in power system[J]. Ningxia Electric Power, 2021(4): 39-43.
- [8] 张作鹏. 同步相量测量单元优化配置算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.  
ZHANG Zuopeng. Research on optimal configuration algorithm of synchronous vector measurement unit[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [9] 曹鹏程, 李培强, 孙培栋, 等. 电池储能提高电网薄弱节点电压稳定性的研究[J]. 电气传动, 2021, 51(24): 67-74.  
CAO Pengcheng, LI Peiqiang, SUN Peidong, et al. Study on battery energy storage to improve voltage stability of weak nodes in power grid[J]. Electric Drive, 2021, 51(24): 67-74.
- [10] 高闰国, 匡洪海, 钟浩, 等. 适用于直流配电网的改进下垂电压控制策略[J]. 电气传动, 2021, 51(21): 53-58.  
GAO Runguo, KUANG Honghai, ZHONG Hao, et al. Improved droop voltage control strategy for DC distribution network[J]. Electric Drive, 2021, 51(21): 53-58.
- [11] 李建斌, 王鹏程, 傅侃, 等. 基于预处理共轭梯度迭代法的电力系统状态估计算法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 90-96.  
LI Jianbin, WANG Pengcheng, FU Kan, et al. State estimation algorithm of power system based on preconditioned conjugate gradient iteration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 90-96.
- [12] 张书瑀. 电力系统电压稳定性分析指标的研究与应用[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2017.  
ZHANG Shuyu. Research and application of voltage stability analysis index of power system[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2017.
- [13] 付冰, 周作建, 张维芯. 贪心算法在智能导检中的应用研究[J]. 软件导刊, 2022, 21(1): 136-140.  
FU Bing, ZHOU Zuojian, ZHANG Weixin. Research on the application of greedy algorithm in intelligent guidance of health examination[J]. Software Guide, 2022, 21(1): 136-140.
- [14] 韩素敏, 郑书晴, 何永盛. 基于粗糙集贪心算法的逆变器开路故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 122-130.  
HAN Sumin, ZHENG Shuqing, HE Yongsheng. Open circuit fault diagnosis for inverters based on a greedy algorithm of a rough set[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 122-130.
- 收稿日期: 2022-06-22  
修改稿日期: 2022-07-25
- ~~~~~
- (上接第 52 页)
- 度综合评估方法[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10): 150-154.  
YU Xiao, YANG Honggeng. Comprehensive evaluation of node voltage sag severity considering system side and user side[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(10): 150-154.
- [20] 龙军, 郑宇琦. 带 Z 源网络的动态电压恢复装置研制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(9): 76-83, 94.  
LONG Jun, ZHENG Yuqi. Development of dynamic voltage recovery device with Z source network[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(9): 76-83, 94.
- [21] 高闰国, 匡洪海, 钟浩, 等. 适用于直流配电网的改进下垂电压控制策略[J]. 电气传动, 2021, 51(21): 53-58.  
GAO Runguo, KUANG Honghai, ZHONG Hao, et al. Improved droop voltage control strategy for DC distribution network[J]. Electric Drive, 2021, 51(21): 53-58.
- [22] 刘志远, 陈海军, 于晓军, 等. 基于振动信号的变压器有载分接开关故障诊断方法研究进展与展望[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 18-25, 33.  
LIU Zhiyuan, CHEN Haijun, YU Xiaojun, et al. Research progress and prospects on fault diagnosis method for transformer on-load tap changer based on vibration signal[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 18-25, 33.
- [23] 胡媛媛, 张杰, 黄勤清, 等. 变压器有载分接开关振动信号特征识别技术研究[J]. 变压器, 2019, 56(10): 32-39.  
HU Yuanyuan, ZHANG Jie, HUANG Qinqing, et al. Research on vibration signal identification technology of on-load tap changer for transformer[J]. Transformer, 2019, 56(10): 32-39.
- 收稿日期: 2022-06-24  
修改稿日期: 2022-07-08