

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230648

基于分布式共识协同的光伏逆变器电压控制策略研究

邹文斌, 韩松, 荣娜, 陈世威

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为了解决大规模分布式光伏接入配电网导致光伏并网点出现电压越限问题, 提出了一种基于分布式共识协同(distributed consensus collaboration, DCC)的光伏逆变器电压控制方法。光伏逆变器电压控制采用基于功率调节的下垂控制模式, 利用下垂控制调节光伏的有功功率与无功功率, 实现对光伏并网点电压的控制。分布式协同共识是将接入系统的光伏有功功率输出与光伏最大输出跟踪比作为状态变量, 通过分布式共识协同算法实现下垂控制启动参数的调整和光伏逆变器之间的电压协同控制。通过一个含分布式光伏的真实馈线系统进行算例验证, 基于德国 DIgSILENT 软件进行仿真。结果表明, 所提电压控制方法能有效抑制光伏并网点的电压越限问题, 并在电压调节过程中降低光伏有功功率输出的削减, 提升光伏逆变器的无功功率调节量。

关键词: 分布式光伏; 电压控制; 下垂控制; 分布式共识协同; DIgSILENT

Voltage control strategy for a PV inverter based on distributed consensus collaboration

ZOU Wenbin, HAN Song, RONG Na, CHEN Shiwei

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To solve the voltage limit problem caused by large-scale distributed photovoltaic (PV) connecting to the distribution network, a voltage control method of PV inverter based on distributed consensus collaboration (DCC) is proposed. The PV inverter voltage control adopts a sag control mode based on power regulation, using sag control to regulate the active and reactive power of the PV to achieve the control of the PV grid voltage. Distributed cooperative consensus is to use the active power output of the PV connected to the system and the PV maximum output tracking ratio as state variables, and to implement the adjustment of the sag control start-up parameters and the voltage cooperative control between PV inverters through the distributed consensus cooperative algorithm. Arithmetic verification is carried out with a real feeder system with distributed PV, and simulation is made based on DIgSILENT software. The results show that the proposed voltage control method can effectively suppress the voltage crossing problem of PV parallel networks and reduce the reduction of PV active power output in the voltage regulation process, and improve the reactive power regulation of PV inverters.

This work is supported by the Guizhou Excellent Youth Science and Technology Talents Project (No. [2021]5645).

Key words: distributed photovoltaic; voltage control; sag control; distributed consensus collaboration control; DIgSILENT

0 引言

随着光伏、风电等清洁能源不断接入到配电网, 使得系统的潮流分布由简单的单向流动变为双向流动^[1-2], 影响全网电压的分布, 严重时会造成电压越

限, 将给系统的安全稳定运行以及控制带来重大挑战^[3-4]。

目前针对光伏配电网的过电压问题主要以功率控制手段解决为主, 且系统有功功率的变化对节点电压的影响较大。因此, 控制系统的有功功率是配电网电压管理的有效途径之一^[5-6]。由于光伏逆变器本身具备调节有功功率、无功功率的能力, 且具有可频繁调节、响应速度快以及投资低等特点, 受到了广泛的关注^[7-8]。目前光伏逆变器的功率控制方式主要分为集中式^[9-10]、分布式^[11-12]、就地式^[13-14]3类。

基金项目: 贵州省优秀青年科技人才项目资助(黔科合平台人才[2021]5645); 贵州省科学技术基金项目资助([2021]277); 黔科合支撑[2023]一般 290; 黔科合支撑[2023]一般 329

集中控制通过调控整个网络实现全局优化, 但实现周期较长, 且光伏具有强烈的波动性和间歇性, 会使全局数据传输出现延迟, 导致集中控制对光伏功率的快速变化无法做出响应, 影响了集中控制效果^[15-17]。就地控制仅通过实时测量和极少量的计算就可实现对光伏的功率调节, 具有高效性和快速性^[18]。文献[19]针对分布式光伏采取了本地控制方式, 虽然能够对本地电压进行快速反应, 但缺乏与网络中的其他控制器之间的联系, 无法实现网络的协同控制。而分布式控制具有可协调和较快的响应能力, 更适合分散性与波动性较强的光伏发电系统。

针对当前大规模的光伏接入配电网, 本文提出了一种基于分布式共识协同的光伏逆变器电压控制方法, 将光伏有功功率输出与最大输出跟踪比作为状态变量, 通过分布式协同算法调整逆变器中下垂控制的启动参数, 实现了各逆变器之间的协同控制。该方法在缓解配电网系统中出现过电压问题的同时, 尽可能减少在电压调节过程中的光伏有功功率削减, 提升了光伏逆变器无功功率的调节量。

1 预备知识

1.1 光伏对配电网电压影响机理分析

为了分析光伏发电和负载的功率波动对光伏并网点电压的影响, 简化了含光伏的配电网模型, 其等值电路如图 1 所示。

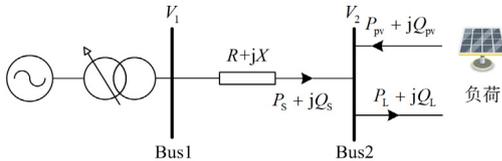


图 1 光伏并网的等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit for grid-connected photovoltaics

从图 1 可知, 光伏并网点母线 Bus2 处的电压值 V_2 为

$$V_2 = V_1 - I_{1,2}(R + jX) \quad (1)$$

式中: V_1 表示母线 Bus1 处的电压; $I_{1,2}$ 表示母线 Bus1 流向母线 Bus2 的线路电流; $R + jX$ 表示该线路上的阻抗。

由于

$$P_s + jQ_s = V_2 I_{1,2}^* \quad (2)$$

式中: P_s 和 Q_s 分别表示母线 Bus1 流向母线 Bus2 的有功功率和无功功率; $I_{1,2}^*$ 表示表示母线 Bus1 流向母线 Bus2 的线路的共轭电流。

则 $I_{1,2}$ 可表示为

$$I_{1,2} = \frac{P_s - jQ_s}{V_2^*} \quad (3)$$

式中, V_2^* 表示光伏并网点母线 Bus2 处的共轭电压。

即线路之间电压差 ΔV 可表示为

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{P_s - jQ_s}{V_2^*}(R + jX) \quad (4)$$

由于两个电压矢量 V_2 和 V_1 之间的夹角很小, 可将 ΔV 的虚部忽略不计, 即

$$\Delta V \approx V_1 - V_2 = \frac{P_s R + Q_s X}{V_2} \quad (5)$$

假设连接到母线 Bus2 上的负载功率为 P_L 和 Q_L , 光伏并入母线 Bus2 输出的有功功率和无功功率分别 P_{pv} 和 Q_{pv} 。则方程式(5)可写为

$$\Delta V = \frac{(P_{pv} - P_L)R + (Q_{pv} - Q_L)X}{V_2} \quad (6)$$

通过方程(6)可推断, 当光伏和负载的有功功率和无功功率不同时, 会导致母线 Bus1 到母线 Bus2 出现不同的电压差值, 如图 2 所示。

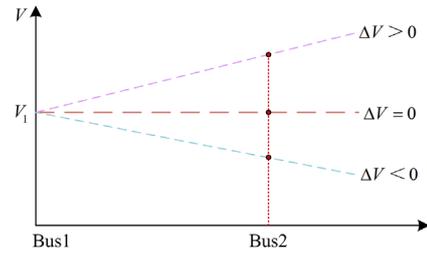


图 2 不同电压差下馈线电压分布

Fig. 2 Feeder voltage distribution at different voltage differences

图 2 为在不同电压差下馈线电压分布图。光伏和负载的有功功率和无功功率不同时导致两个母线之间的电压差。当光伏发出的有功功率和无功功率大于负载消耗的有功功率和无功功率时, 则 ΔV 大于 0, 因此光伏并网点处电压值将升高。当负载消耗的有功功率和无功功率大于光伏发出的有功功率和无功功率时, ΔV 小于 0, 则光伏并网点处电压值将下降。当光伏发出的有功功率和无功功率与负载消耗的有功功率和无功功率相等时, ΔV 等于 0, 则光伏并网点处电压值将为 V_1 。

因此光伏的功率波动可能导致光伏接入系统的节点电压发生变化, 使得线路的电压差 ΔV 远大于 0, 导致线路末端电压上升。如果不对配电网系统进行控制, 当光伏并网点母线 Bus2 处的电压 V_2 超过上限值时, 则会对用电设备造成损害。

为了解决光伏并网节点电压上升问题, 可通过

对光伏发电系统的有功功率和无功功率进行控制来限制反向潮流。而光伏逆变器本身具备调节功率的能力，因此可以用来作为防止电压越限和稳定电压的一种方式。

1.2 光伏逆变器的功率关系

考虑光伏逆变器的容量约束关系，可将逆变器无功控制容量表示^[20]为

$$Q_{pv} = \pm \sqrt{S_{pv}^2 - P_{pv}^2} \quad (7)$$

式中， S_{pv} 表示光伏逆变器的额定容量。

由图 3 的光伏逆变器容量曲线可以看出，当光伏有功功率出力在 a 点时，能够输出的有功功率为最大，无功容量为 0，此时逆变器不具备补偿或吸收无功功率的能力。当光伏有功功率出力在 b 点时，具备一定的补偿和吸收无功的能力，其无功吸收最大值在 c 点，若光伏并网节点电压仍超过安全运行范围内，则需要对光伏的有功功率进行削弱。当光伏有功功率出力下降至 f 点时，若光伏并网点的电压仍出现过高现象，此时光伏逆变器通过不断吸收无功功率，降低光伏并网节点电压直到满足电压安全稳定裕度，当逆变器工作在 e 点时，逆变器达到该时段的最大吸收无功值。

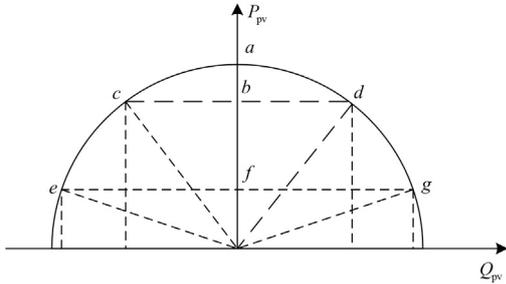


图 3 光伏逆变器容量曲线

Fig. 3 Photovoltaic inverter capacity curve

通过式(7)和图 3 分析可知，光伏逆变器的无功功率调节量与有功功率的输出有关；当光伏的有功功率输出不同时，对应的无功功率调节能力也不同。

1.3 基于 $Q_{pv}(P_{pv})$ 的光伏逆变器控制

根据 $Q_{pv}(P_{pv})$ 下垂控制的特点构建光伏逆变器功率控制。设置 5 个不同电压等级参考点，分别为 V_{max} 、 V_{min} 、 V_{IP} 、 V_{IQ} 和 V_{aQ} 。其控制如图 4 所示。图中： V_{min} 为节点电压的下限值； V_{max} 为节点电压的上限值； V_{aQ} 和 V_{IQ} 分别为无功功率补偿和吸收的启动电压值； V_{IP} 为有功功率控制的启动电压值。

其控制原理为：当光伏并网节点电压值小于有功功率控制的启动电压值 V_{IP} 时，光伏的有功功率出力

保持最大，即 P^{MPPT} 。当光伏并网节点电压值小于 V_{min} ，光伏逆变器无功功率补偿最大，即 Q_{max} 。当光伏并网节点电压值低于 V_{aQ} 或大于 V_{IQ} 时，进行无功功率控制；当光伏并网节点电压值处于 V_{aQ} 和 V_{IQ} 之间时，逆变器不动作。当光伏并网节点电压值大于 V_{IP} 时，逆变器无功功率吸收保持 Q_{max} 不变，进行有功功率控制，当光伏并网节点电压大于最大电压值 V_{max} 时，则光伏有功功率输出为 0。计算式如式(8)所示。

$$(P_{pv}, Q_{pv}) = \begin{cases} (P^{MPPT}, Q_{max}), V \leq V_{min}, V < V_{min} \\ \left(P^{MPPT}, \left(1 + \frac{V - V_{min}}{V_{min} - V_{aQ}} \right) Q_{max} \right), V_{min} < V \leq V_{aQ} \\ (P^{MPPT}, 0), V_{aQ} < V \leq V_{IQ} \\ \left(P^{MPPT}, \frac{V - V_{IQ}}{V_{IP} - V_{IQ}} \cdot (-Q_{max}) \right), V_{IQ} < V \leq V_{IP} \\ \left(P^{MPPT} - \frac{V - V_{IP}}{V_{max} - V_{IP}} \cdot P^{MPPT}, -Q_{max} \right), V_{IP} < V < V_{max} \\ (0, -Q_{max}), V \geq V_{max} \end{cases} \quad (8)$$

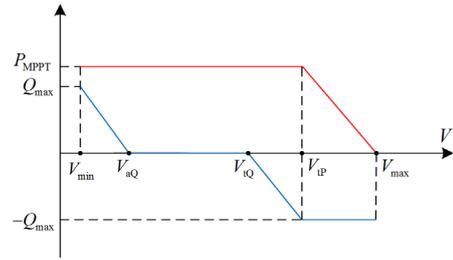


图 4 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制原理图

Fig. 4 $Q_{pv}(P_{pv})$ control schematic diagram

2 基于分布式共识协同的光伏逆变器电压控制

图 5 为本文所提控制方法框图。该方法由两层控制方式组成。上层采用基于 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制的逆变器功率调节，下层采用基于分布式共识协同算法的分布式控制。首先就地控制层通过光伏逆变器调节功率变化对光伏并网节点的电压进行控制。分布式控制层以低于就地控制层的响应速度运行，负责通过定期调整就地控制层的阈值参数。 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制的启动点由本地控制层确定，分布式控制层定期设置 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制的启动参数，即阈值大小(V_{IP})。

2.1 分布式共识协同算法

分布式共识协同理论是将每个节点与相邻节点通信并共享本地测量值作为状态变量，通过迭代过程将各个节点收敛到一个共同的平衡点^[21]。系统中的各节点与其相邻的节点进行信息交换，因而不断

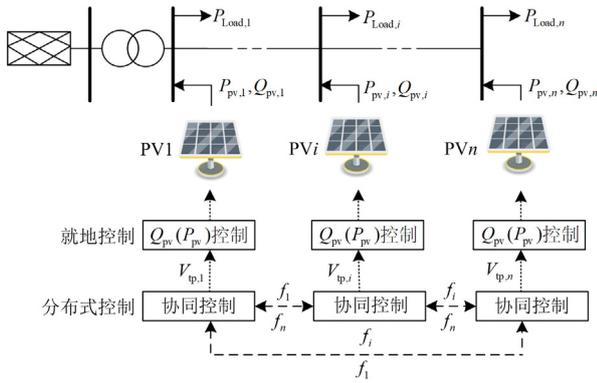


图5 基于分布式共识协同的光伏逆变器网络框图

Fig. 5 Block diagram of distributed consensus collaboration based photovoltaic inverter network

更新自身的状态变量, 使得系统中各个节点的状态变化趋于一致^[22]。

考虑信息交换属于离散型, 可采用一阶一致性控制, 其公式表示为^[23]

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_{j \in N_i} w_{ij}(k)(x_j(k) - x_i(k)) \quad (9)$$

式中: $x_i(k)$ 为节点 i 在第 k 次周期通信后的更新值; N_i 为与节点 i 通信的光伏逆变器的集合; $w_{ij}(k)$ 为第 k 次周期通信时与节点 j 的权重因子。

通过网络拓扑图确定相邻节点的通信关系, 用通信矩阵 W 表示, 系统的信息控制律可表示为

$$X[k+1] = WX[k] \quad (10)$$

$$W = (w_{ij})_{n \times n} \quad (11)$$

$$X[k] = [x_1[k] \cdots x_i[k] \cdots x_n[k]]^T \quad (12)$$

式中: n 为系统的节点数; 当节点 i 与节点 j 相邻, 则 w_{ij} 大于 1, 否则 w_{ij} 为 0。

当 W 中行和列的和等于 1 且 W 的特征值小于 1 时, 系统状态量趋于一致, 则有

$$\lim_{k \rightarrow \infty} X[k] = \lim_{k \rightarrow \infty} W^k X[0] = \frac{I \cdot I^T}{n} X[0] \quad (13)$$

式中: I 表示所有值均为 1 的向量; $X[0]$ 为 X 的初始值矩阵。式中信息交流的速度由 W 决定, 按照文献^[24]构造权重因子, 其规律如式(14)所示。

$$w_{ij} = \begin{cases} 1/[\max(n_i, n_j)], & i \neq j \\ 1 - 1/\sum_{j \in N_i} [\max(n_i, n_j)], & i = j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中: n_i 表示与节点 i 相邻的节点个数; n_j 表示与节点 j 相邻的节点个数。

2.2 基于分布式共识协同的光伏逆变器

为了减少对光伏并网电压调节中光伏有功功率的削减, 提升可调节的光伏逆变器无功功率调节量。将光伏有功功率输出比 f_{pv} 作为状态变量, f_{pv} 为逆变器有功功率输出与光伏最大输出跟踪的比值, 即

$$f_{pv,i} = \frac{P_{pv,i}}{P_{pv,i}^{MPPT}} \quad (15)$$

式中: $f_{pv,i}$ 为节点 i 的状态变量; $P_{pv,i}$ 为节点 i 并入光伏有功功率; $P_{pv,i}^{MPPT}$ 为节点 i 光伏输出的最大有功功率。

通过分布式共识协同算法更新并网点状态变量, 将所有状态变量收敛到相同, 即

$$f_{pv,1} = f_{pv,2} = \cdots = f_{pv,n} \quad (16)$$

当 $k \rightarrow \infty$ 时, 状态变量归于一致, 达成共识。

引入一致性收敛误差 τ , 将第 k 次迭代与 $k+1$ 次迭代误差相比较, 来判断 k 次迭代是否收敛, 即

$$\sum_{i \in N} |f_{pv,i}(k+1) - f_{pv,i}(k)| < \tau \quad (17)$$

式中, $f_{pv,i}(k)$ 为第 k 次迭代中更新 $f_{pv,i}$ 的值。

分布式控制层计算 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制阈值参数, 即 $V_{tp,i}$ 。

$$V_{tp,i}(k+1) = V_{\max} + \frac{V_i(k+1) - V_{\max}}{f_{pv,i}(k+1)} \quad (18)$$

通过修改就地控制层的 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制参数, 当无功功率无法满足电压调节时, 则开始有功功率调节, 通过分布式共识算法协同其他光伏逆变器实现同等削减有功功率, 因而提升无功功率调节量, 实现电压协同控制。

2.3 控制策略流程

本文所提出的基于分布式协同的光伏逆变器电压控制方法, 由于分布式控制层低于就地控制层的响应速度, 因此在描述控制流程前对时间尺度进行说明。设 t_b 表示分布式控制的时间变量, $t_{b\max}$ 表示完成一次分布式控制时间值; 而 t_d 表示就地控制的时间变量; $t_{d\max}$ 表示完成一次就地控制时间值。

图 6 为所提的基于分布式协同的光伏逆变器电压控制方法的流程图。流程主要分为 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制的就地控制层与分布式共识协同算法的分布式控制层。

步骤 1: 设置网络参数、光伏与负荷数据、光伏逆变器参数。

步骤 2: 测量并网节点的电压, 获取 t_d+1 时刻

的光伏输出值, 根据式(18)分布式共识协同控制修改 Q_{pv} (P_{pv}) 控制阈值式(8)。

步骤 3: 光伏逆变器根据式(8)进行 Q_{pv} (P_{pv}) 控制, 调节光伏并网点的电压值。

步骤 4: 当 $t_l = t_{lmax}$, 检查 t_d 是否等于 t_{dmax} , 如果等于则程序结束控制, 否则获取 $t_d + 1$ 时刻的光伏输出值, 再次进行控制。

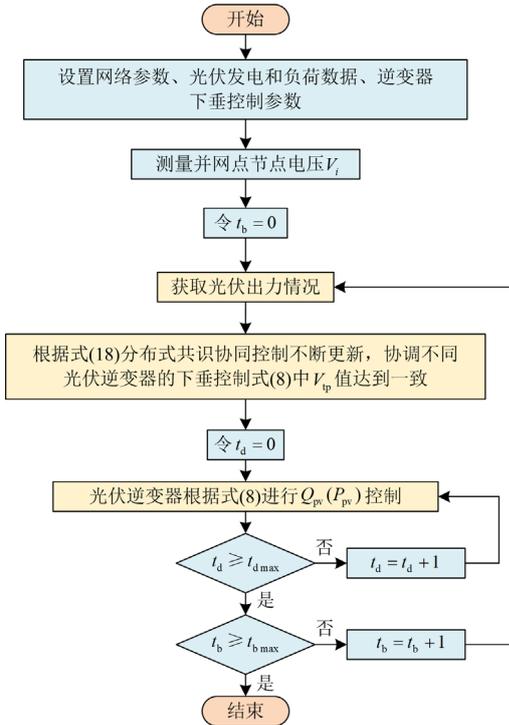


图 6 基于分布式协同的光伏逆变器电压控制流程图

Fig. 6 Photovoltaic grid-connected inverter voltage control flow chart based on distributed collaboration

3 算例与分析

3.1 模型构建与参数设置

本文拟采用 10 kV/0.38 kV 系统作为研究对象, 并在 DIgSILENT 仿真平台上搭建网络系统, 其模型线路参数和网络拓扑结构见图 7, 线路参数见表 1。

实验中使用的光伏数据和负荷数据来自贵州威宁某光伏电站一年中具有代表性的 7 月份的数据集。光伏发电系统出力特性和负荷曲线见图 8。

假设系统中安装的所有光伏出力分布特性一致, 光伏发电接入容量均为 12.7 kW, 其采样时间为 5 min, 系统光伏的总装机容量为 203.2 kW。假设所有接入系统中光伏逆变器的功率因数范围为 $[-0.95, 0.95]$ 。

模拟仿真时长为 24 h, 其中每隔 5 min 进行一次模拟准动态仿真获取采样数据, 并利用

DIgSILENT 内部中的 DPL 自定义语言编写控制脚本, 进行控制实验。

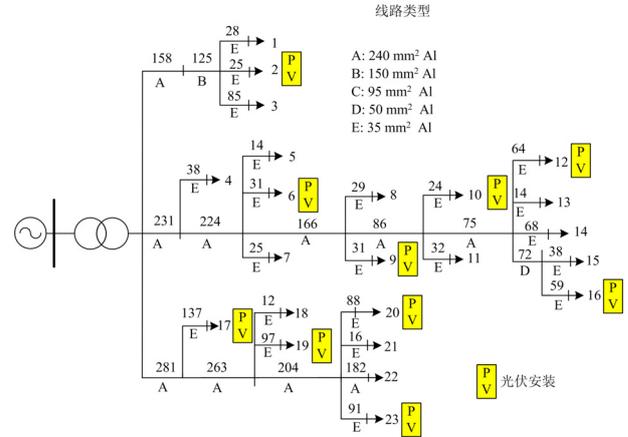


图 7 模型网络拓扑图

Fig. 7 Model network topology diagram

表 1 模型中电缆 R、X 值

Table 1 R and X values for the power cables of the model

线路类型	R/(Ω/km)	X/(Ω/km)	R/X
240 mm ² Al	0.140	0.0818	1.71
150 mm ² Al	0.228	0.0844	2.70
95 mm ² Al	0.353	0.0868	4.07
50 mm ² Al	0.706	0.0924	7.64
35 mm ² Al	0.956	0.0982	9.74

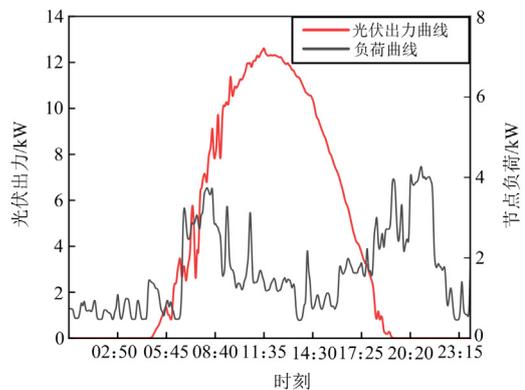


图 8 光伏发电出力曲线和负荷曲线

Fig. 8 Photovoltaic power output curve and load curve

在本文研究中, 以馈线建立通信网络。只有在同一条馈线上的光伏逆变器才有通信联系。其系统中的通信网络见图 9。

在图 9 中, 有编号的圆圈表示系统接入光伏节点的逆变器, 沿着虚线箭头的数字表示由式(14)定义的信息权重因子。

3.2 效果比较

本文对所提方法与两种传统的控制方法的效果

进行比较分析。两种传统控制方法分别为采用 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制和集中式电压控制。

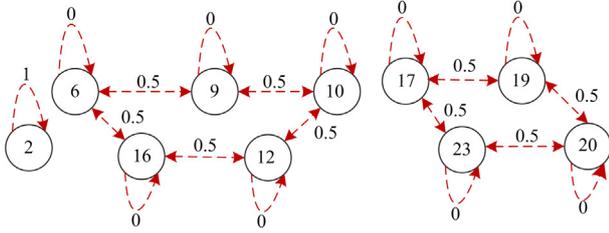


图 9 分布式共识协同控制的通信网络

Fig. 9 Communication networks with distributed consensus cooperative control

图 10 为不加入任何控制以及 3 种不同控制方法下的光伏并网点电压分布情况。

图 10(a) 为不加任何控制下的光伏接入系统后的节点电压分布情况。从图 10(a) 可以看出, 在大部分时间内, 节点电压均处于电压安全允许范围之内。只有中午至下午的少部分时间, 配电网中有些节点出现了过电压, 在电压越限的节点中, 电压上升最高时

为 1.1148 p.u., 已经远超过电压安全允许范围的上限。

图 10(b) 为采用 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制, 光伏并网点电压变化情况。从图 10(b) 可以看出, 与不加控制时相比, 过电压的节点有了明显改善, 光伏并网节点的电压最高值下降到 1.0710 p.u.。在该控制下光伏并网点电压基本都降至电压临界点附近。

图 10(c) 为采用集中式电压控制, 控制后的光伏并网点电压变化情况。光伏并网点电压的最高值下降到 1.0704 p.u., 且电压曲线通过集中调度控制之后变得更加平滑、更加稳定。光伏并网点电压基本都降至电压安全范围内。

图 10(d) 为采用本文所提方法的控制后, 光伏并网点电压变化情况。其电压的最高值下降到 1.0699 p.u., 且越限电压值的电压曲线变得平滑, 体现其控制后的稳定性较好。节点电压在配电网电压安全允许范围之内, 保证配电网能够安全稳定运行。

另外, 从图 10 中可以发现, 节点电压均未出现低于 0.93 p.u. 的时刻, 即未出现低于电网电压安全范围下限的情况。

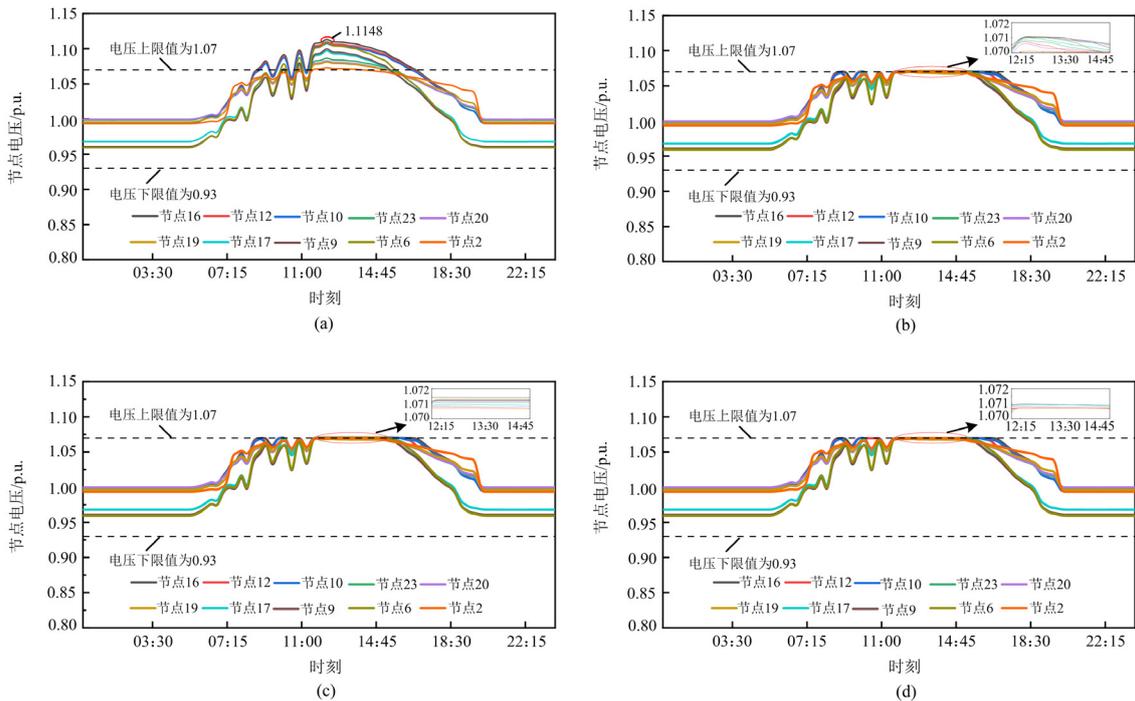


图 10 不同控制方法下光伏并网点电压分布情况

Fig. 10 Voltage distribution of photovoltaic grid-connected junction under different control methods

选取系统网络中电压上升最高的第 16 号节点, 分析 3 种控制方法下对光伏并网点电压控制的影响, 如图 11 所示。

从图 11 可知, 采用本文所提方法后的节点 16 的最高电压值下降至 1.0699 p.u.; 采用集中式控制

节点 16 的最高电压值下降至 1.0704 p.u.; 采用 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制后, 节点 16 的最高电压值下降至 1.0710 p.u.。可以看出, 本文所提控制方式的电压下降效果为最好。

此外, 相比另外两种控制方法, 采取本文所提

方法对光伏并网点进行电压控制，能够最大化使用光伏逆变器调节功率能力。

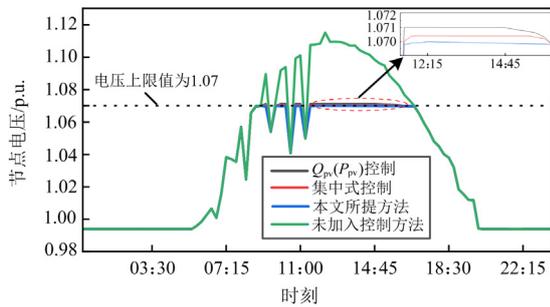


图 11 节点 16 电压调整曲线

Fig. 11 Voltage adjustment curve of node 16

在调节有功功率方面，本文所提方法有功功率削减量要小于另外两种方法。本文所提方法削减有功功率的最大值为 0.559 kW，而集中式控制削减有功功率的最大值为 0.649 kW， $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制削减有功功率的最大值为 0.841 kW。

在调节无功功率方面，本文所提方法吸收最大无功功率为 2.643 kvar，集中式控制吸收的最大无功功率为 2.495 kvar， $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制吸收的最大无功功率为 2.293 kvar。

表 2 为 3 种不同控制方法的效果对比。

表 2 不同控制方法对比

Table 2 Comparison of different control methods

控制方法	$Q_{pv}(P_{pv})$ 控制	集中式控制	所提方法
节点最大电压值/p.u.	1.0710	1.0704	1.0699
逆变器无功功率/kvar	225.284	238.945	249.708
光伏有功削减/kW	55.493	42.697	36.628

从表 2 中不同方法的光伏无功调节量对比来看，本文所提方法一天内吸收的无功总调节量要比 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制多 24.424 kvar，比集中式控制多 10.763 kvar；有功总削减量要比 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制少 18.865 kW，比集中式控制少 6.069 kW。产生上述差异的主要原因是所提方法通过分布式共识协同算法使得馈线上的逆变器实现协同控制。而 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制仅调控自身光伏逆变器的功率，其调节能力有限；集中式控制通过调控整个电网中的逆变器，只能保证整个系统最优，并不能保证局部最优。

综上所述，采用不同的控制方法均能将配电网中的节点电压基本控制到安全运行中。而本文所提控制方法能够尽可能地提升逆变器的功率调节能力，控制效果更好。在降低光伏的有功功率削减程度上能够到达最优，从而减少弃光，提高光伏的利用率。

4 结论

针对大规模分布式光伏接入电网系统导致光伏并网点电压越限问题，本文结合就地控制与分布式控制特点，提出了一种基于分布式共识协同的光伏逆变器电压控制方法，在一个真实简化馈线系统中开展仿真实验，得出结论如下：

1) 本文所提出的电压控制方法能降低电压调节中所需削减的光伏有功功率，提升了光伏逆变器无功功率调节量，充分利用光伏逆变器的功率调节能力。

2) 所提方法相比于就地控制的 $Q_{pv}(P_{pv})$ 控制和集中式控制方法，24 h 的光伏并网点的节点最高电压为 1.0699 p.u.，且曲线变得平滑，电压值较为稳定；光伏逆变器电压调节的有功削减量最多减少了 18.865 kW；无功调节量最多提升了 24.424 kW，这表明利用分布式共识协同的光伏逆变器的电压控制有着更好的稳定性，同时控制效果也达到最优。

参考文献

- [1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819. ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14. DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [3] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191. ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [4] 李振坤, 鲍新雨, 邵宇鹰, 等. 考虑多种调压措施的分布式光伏消纳能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 10-16. LI Zhenkun, BAO Xinyu, SHAO Yuying, et al. Studying accommodation ability of distributed photovoltaic considering various voltage regulation measures[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 10-16.
- [5] VALVERDE G, VAN CUTSEM T. Model predictive control of voltages in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2152-2161.
- [6] DEMIROK E, CASADO G P, FREDERIKSEN K H B, et al. Local reactive power control methods for overvoltage prevention of distributed solar inverters in low-voltage grids[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2011, 1(2): 174-182.
- [7] 王文宾, 靳伟, 李洪涛, 等. 考虑光伏集群无功贡献的

- 配电网无功电压优化调节方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 114-123.
- WANG Wenbin, JIN Wei, LI Hongtao, et al. Reactive voltage optimization regulation method of distribution network considering the reactive power contribution of a photovoltaic cluster[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 114-123.
- [8] 李征, 王文宾, 韩胜峰, 等. 考虑无功支撑的分布式光伏接入配电网电压适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 32-41.
- LI Zheng, WANG Wenbin, HAN Shengfeng, et al. Voltage adaptability of distributed photovoltaic access to a distribution network considering reactive power support[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 32-41.
- [9] 李晓明, 刘翔宇, 李安昌, 等. 配电网电压控制的分布式光伏无功仿射可调鲁棒优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 124-131.
- LI Xiaoming, LIU Xiangyu, LI Anchang, et al. Distributed photovoltaic reactive power affine adjustable robust optimization method for voltage control of a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 124-131.
- [10] ALAM M J E, MUTTAQI K M, SUTANTO D. A multi-mode control strategy for VAr support by solar PV inverters in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1316-1326.
- [11] CHEN C S, LIN C H, HSIEH W L, et al. Enhancement of PV penetration with DSTATCOM in Taipower distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28 (2): 1560-1567.
- [12] GHOSH S, RAHMAN S, PIPATTANASOMPORN M. Distribution voltage regulation through active power curtailment with PV inverters and solar generation forecasts[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 13-22.
- [13] WECKX S, GONZALEZ C, DRIESEN J. Combined central and local active and reactive power control of PV inverters[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 776-784.
- [14] SHI D, CHEN X, WANG Z, et al. A Distributed cooperative control framework for synchronized reconnection of a multi-bus microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6646-6655.
- [15] 方景辉, 温镇. 分布式光伏就地自适应电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 49-55.
- FANG Jinghui, WEN Zhen. Research on local adaptive voltage control strategy based on distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 49-55.
- [16] ALYAMI S, WANG Y, WANG C, et al. Adaptive real power capping method for fair overvoltage regulation of distribution networks with high penetration of PV systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2729-2738.
- [17] OLIVIER F, ARISTIDOU P, ERNST D, et al. Active management of low-voltage networks for mitigating overvoltages due to photovoltaic units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 926-936.
- [18] 习伟, 李鹏, 蔡田田, 等. 基于深度强化学习的分布式电源就地自适应电压控制方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 25-31.
- XI Wei, LI Peng, CAI Tiantian, et al. Adaptive local voltage control method for distributed generator based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 25-31.
- [19] THOMAS S, FANKM, MARTIN B. Improved low voltage grid-integration of photovoltaic systems in Germany[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 534-542.
- [20] 高鹏程, 王蕾, 李立生, 等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 190-196.
- GAO Pengcheng, WANG Lei, LI Lisheng, et al. Voltage control strategy based on adjustment of PV inverters in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 190-196.
- [21] 米阳, 彭建伟, 陈博洋, 等. 基于一致性原理和梯度下降法的微电网完全分布式优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 1-10.
- MI Yang, PENG Jianwei, CHEN Boyang, et al. Fully distributed optimal dispatch of a microgrid based on consensus principle and gradient descent[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 1-10.
- [22] 曾浩, 赵恩盛, 周思宇, 等. 基于电流一致性的直流微电网自适应下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 11-21.
- ZENG Hao, ZHAO Ensheng, ZHOU Siyu, et al. Adaptive droop control of a DC microgrid based on current consistency[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 11-21.
- [23] ZERAATI M, GOLSHAN M E H, GUERRERO J M. A consensus-based cooperative control of PEV battery and PV active power curtailment for voltage regulation in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 10(1): 670-680.
- [24] 杨珺, 侯俊浩, 刘亚威, 等. 分布式协同控制方法及在电力系统中的应用综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4035-4049.
- YANG Jun, HOU Junhao, LIU Yawei, et al. Distributed cooperative control method and application in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4035-4049.

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-07-19

作者简介:

邹文斌(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电力系统运行与控制; E-mail: 790673053@qq.com

韩松(1978—), 男, 通信作者, 博士, 硕士生导师, 研究方向为交直流电力系统动态分析、新型电力电子装备以及配电网规划。E-mail: shan@gzu.edu.cn

(编辑 周金梅)