

含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制

柴园园¹, 郭力¹, 王成山¹, 刘娇扬¹, 路畅¹, 金炜², 潘静²

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072;

2. 安徽省电力公司, 安徽省 合肥市 230061)

Distributed Voltage Control in Distribution Networks With High Penetration of PV

CHAI Yuanyuan¹, GUO Li¹, WANG Chengshan¹, LIU Jiaoyang¹, LU Chang¹, JIN Wei², PAN Jing²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230061, Anhui Province, China)

ABSTRACT: With increasing penetration of distributed photovoltaic (PV) in distribution networks, voltage violation problem attracts more and more attention. Imbalance between high PV generation and low load demand is prone to reverse power flow, causing overvoltage. Base on in-depth analysis of voltage regulation capability of distributed PV system, a novel distributed voltage control strategy is proposed for distribution networks in this paper. The strategy combines reactive power coordination compensation and active power optimal reduction of PV system to achieve low-cost high-speed voltage control. The proposed strategy can be self-adjusted to dynamic changes of system topology. Effectiveness of the proposed strategy is verified with simulation of modified IEEE 33-node system.

KEY WORDS: distributed PV; distributed control; voltage quality; active power reduction; distribution automation

摘要: 随着分布式光伏在配电网中渗透率的不断提高, 配电网电压越限问题日益受到关注。高光伏发电功率与低负荷需求间的不平衡易造成潮流倒送, 进而引起线路过电压问题。在深入分析分布式光伏系统电压调节能力的基础上, 提出了配电网分布式电压控制策略, 通过光伏系统的无功协调补偿和有功优化缩减实现了电压的低成本快速控制。所发展的控制方案具备配电网拓扑变化下的自适应能力。通过对改进的IEEE 33节点系统算例进行仿真验证了所提电压控制策略的有效性。

关键词: 分布式光伏; 分布式控制; 电压质量; 有功缩减; 配电自动化

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2271

0 引言

随着配电网中分布式光伏渗透率的提高, 配电网的电压越限问题日益受到关注^[1]。高渗透率光伏

配电网的电压控制策略可分为3大类: 1) 集中控制, 目标是实现系统全局优化, 可统一调配可控资源, 但量测数据量大、通讯负担重且投资成本较高。2) 就地控制, 控制响应速度快, 投资成本低, 但调压能力受限, 可调节资源利用不充分。3) 分布式控制^[2], 具有良好的自治性和适应性, 相对于集中控制, 系统投资少, 通讯数据量降低, 能够充分发掘分布式光伏系统的调压能力。

针对分布式光伏系统的调压手段主要包括无功补偿和有功缩减。在就地无功补偿方面, 德国电气工程师协会提出适用于分布式光伏的四种无功控制策略: 恒无功功率 Q 控制、恒功率因数 $\cos\phi$ 控制、基于光伏有功出力的 $\cos\phi(P)$ 控制和基于并网点电压幅值的 $Q(U)$ 控制^[3]。除这4类控制及其改进策略^[4]外, 文献[5]基于电压灵敏度矩阵和准静态分析, 绘制出光伏的 $P-Q$ 标准特性曲线, 用于确定光伏的就地无功补偿量。在分布式光伏无功协调控制方面, 文献[6]基于一致性理论, 保证系统平均电压等于额定值且将无功补偿量按光伏容量比分摊; 文献[7]采用的分布式电压控制策略中, 过电压节点及其下游和上游节点, 按光伏容量大小先后调整光伏的输出功率因数直至电压恢复正常; 文献[8]假定光伏提供的无功补偿量与其并网点电压呈分段线性关系, 通过优化计算光伏开始提供无功补偿的电压阈值, 使光伏无功补偿总量最小。

当光伏系统的无功容量耗尽而电压依旧越限时, 光伏系统再采用缩减有功输出功率的方式解决过电压^[9-11]。文献[9]采用就地电压控制策略, 首先利用本地光伏的无功功率调节就地电压, 在本地光伏的无功容量用尽后再缩减本地光伏的有功输出功率使并网点电压恢复正常。在文献[10]中, 若所

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900400)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2016YFB0900400).

有光伏系统无功容量全部投入仍未解决过电压问题，则对线路上所有光伏的有功功率均匀缩减。这2种控制方式都会使有功总缩减量过大而不经济。文献[11]通过潮流计算获得所有光伏系统有功功率对过电压点的电压灵敏度系数，按比例缩减光伏系统的有功；但该控制方式计算量较大，且通信负担重。文献[12]基于多代理技术，通过分布式计算实现全局电压控制和光伏出力最大化的优化目标，这种分布式优化算法需要采集系统所有节点的功率信息，各代理通过对有限种组合的成本进行计算和优选求得最优解。

现有的控制策略虽能缓解高渗透率光伏造成的过电压问题，但光伏系统无功补偿和有功缩减方式的优化性不强。本文结合集中控制和分布式控制的各自特点，提出一种新的分布式电压控制策略。该策略可充分利用分布式光伏系统参与电压控制的资源，在解决电压越限问题的同时，尽可能降低因参与电压控制而缩减的光伏系统有功出力总量，同时该策略能很好地适应配电系统网络拓扑的常态化变化。

1 光伏系统的调压原理

图1为一条简化的配电网线路。图1中： V_N 为节点N的电压值； P_N 、 Q_N 表示从上游节点流入节点N的有功和无功功率； P_{GN} 、 Q_{GN} 为节点N光伏输出的有功和无功功率； P_{LN} 、 Q_{LN} 为节点N负荷的有功和无功功率； R_N 、 X_N 表示上游节点与节点N间线路的电阻和电抗值。根据DistFlow潮流方程^[13]，节点N与节点N-1电压的关系可表示为

$$V_{N-1}^2 = V_N^2 + 2(P_N R_N + Q_N X_N) + (R_N^2 + X_N^2) \frac{P_N^2 + Q_N^2}{V_N^2} \quad (1)$$

由于式(1)中的第3项远小于前2项^[14]，可将式(1)简化为

$$V_{N-1}^2 = V_N^2 + 2(P_N R_N + Q_N X_N) \quad (2)$$

对上游所有节点对应的公式进行叠加，可得

$$V_N^2 = V_0^2 - 2 \sum_{n=1}^N (P_n R_n + Q_n X_n) \quad (3)$$

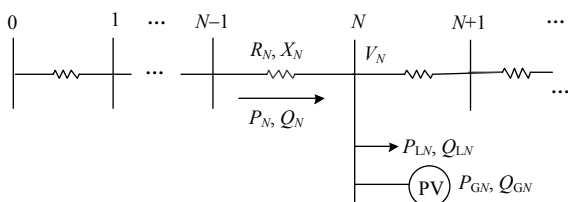


图1 简化的配电网馈线

Fig. 1 A simplified distribution feeder

假设线路首端节点电压 V_0 恒定不变，由式(3)可知，节点N的电压与首节点到该节点所有供电路径上流动的功率有关。当分布式光伏发电功率大于负荷需求时，供电线路上的倒送功率会抬升光伏并网节点的电压，甚至引起过电压。

针对高渗透率光伏引起的线路过电压，光伏系统调节电压主要通过减小线路上有功功率倒送和增大感性无功功率流动2种方式实现，要做到这两点，光伏系统需要缩减有功功率输出，加大无功功率需求，后者可看作是一种无功功率补偿方式。

若保持N节点上游光伏系统有功和无功输出功率不变而改变节点N或其下游某一节点j的光伏输出有功和无功功率，假定有功缩减变化量和无功补偿变化量分别为 ΔP_G 和 ΔQ_G ，则支路1至N流过的功率会相应变化，其变化量为 $\Delta P_1 = \Delta P_2 = \dots = \Delta P_N = \Delta P_G$ 和 $\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = \dots = \Delta Q_N = \Delta Q_G$ ，由式(3)可知，节点N的电压将由初值 V_{N0} 降为 V_{N1} ，满足

$$(V_{N1})^2 = (V_{N0})^2 - 2\Delta P_G \sum_{n=1}^N R_n - 2\Delta Q_G \sum_{n=1}^N X_n \quad (4)$$

若保持N节点及其下游光伏输出有功和无功功率不变而改变上游节点i的光伏输出功率，有功缩减变化量和无功补偿变化量为 ΔP_G 和 ΔQ_G ，则有 $\Delta P_1 = \Delta P_2 = \dots = \Delta P_i = \Delta P_G$ 和 $\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = \dots = \Delta Q_i = \Delta Q_G$ ，节点N的电压将由初值 V_{N0} 降为 V_{N2} ，且满足

$$(V_{N2})^2 = (V_{N0})^2 - 2\Delta P_G \sum_{n=1}^i R_n - 2\Delta Q_G \sum_{n=1}^i X_n \quad (5)$$

令 $C_{j,N} = (V_{N0})^2 - (V_{N1})^2$ 、 $C_{i,N} = (V_{N0})^2 - (V_{N2})^2$ ，则由式(4)和式(5)可知

$$C_{j,N} - C_{i,N} = 2\Delta P_G \sum_{n=i+1}^N R_n + 2\Delta Q_G \sum_{n=i+1}^N X_n \quad (6)$$

若 $\Delta P_G > 0$ 和 $\Delta Q_G > 0$ ，则知

$$C_{j,N} - C_{i,N} > 0 \quad (7)$$

上述推导表明，当N节点的上游某一节点和下游某一节点发生等量的有功缩减 ΔP_G 和无功补偿量变化 ΔQ_G 时，下游节点对N节点电压的调节能力更强。

2 分布式电压控制

本文提出了一种含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制策略，通过控制光伏补偿无功和缩减有功来解决线路过电压问题。所提出的分布式电压控制策略主要由3部分构成：就地预防控制、分布式紧急控制和功率恢复控制。

2.1 就地预防控制

当线路电压处于正常运行范围时，各电压控制

器采用就地预防控制，通过就地无功补偿来预防电压越限。当电压接近上限时，光伏通过吸收感性无功来预防过电压；而当电压接近下限时，光伏通过输出感性无功来避免电压越下限。就地控制策略依据图 2 所示的光伏输出无功功率与本地电压幅值的关系制定^[15]。图 2 中： U_n 为额定电压； U_4 、 U_1 为线路电压的正常运行上、下限； U_3 、 U_2 为电压控制器控制光伏开始进行就地无功补偿的临界电压值； Q_{max} 为光伏的无功容量上限，受光伏容量和功率因数限制。在电压控制器基于本地电压量测值和图 2 所示的 Q_r-u 曲线动态调整光伏无功输出功率的过程中，系统会出现短时间的无功波动，但这属于正常的电压调节过程。

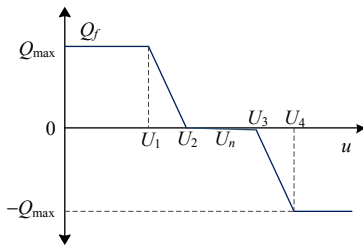


图 2 就地预防控制的无功补偿量
Fig. 2 Function of Q_r for local prevention control

2.2 分布式紧急控制

当线路出现电压越限时，电压控制器进入分布式紧急控制模式。基于经济性的考虑，紧急控制采用先无功协调控制，后有功优化缩减的顺序。

2.2.1 分布式无功协调控制

当线路上某节点电压越限时，因为就地预防控

制的存在，该节点的光伏无功容量必然用尽。由式(7)可知，电压越限点下游光伏的无功补偿对该节点电压的影响强于上游光伏。故电压越限点的电压控制器先向下游控制器请求无功补偿，下游所有光伏的无功容量用尽后若电压越限依旧存在再向上游控制器请求无功补偿。图 3 为节点 $N-1$ 和节点 $N+1$ 电压同时越上限且 $V_{N+1} > V_{N-1}$ 时，分布式紧急控制的无功协调控制过程。图 3 中，Flag_Q 为无功请求信号，表示请求无功补偿或回复无功容量用尽。

根据式(4)和式(5)，节点 N 光伏通过无功补偿降低上游节点 $N-1$ 和下游节点 $N+1$ 的电压时，光伏的有功缩减量 $\Delta P_G=0$ ，无功补偿功率增量 ΔQ_G 可分别由式(8)和式(9)计算。

$$\Delta Q_G = 0.5(V_{N-1}^2 - U_4^2) / \sum_{n=1}^{N-1} X_n \quad (8)$$

$$\Delta Q_G = 0.5(V_{N+1}^2 - U_4^2) / \sum_{n=1}^N X_n \quad (9)$$

分布式无功协调控制利用上下游节点的光伏无功容量对过电压节点提供电压支持，只会使过电压节点附近的光伏系统增加确定量的无功补偿功率而不会引起无功振荡。若在上述无功协调过程中节点电压恢复正常，则分布式电压控制转入功率恢复模式。若线路上所有光伏的无功容量均用尽而线路过电压依旧存在，分布式紧急控制转入有功优化缩减阶段。

2.2.2 分布式有功优化缩减

分布式有功优化缩减策略为：各电压控制器基

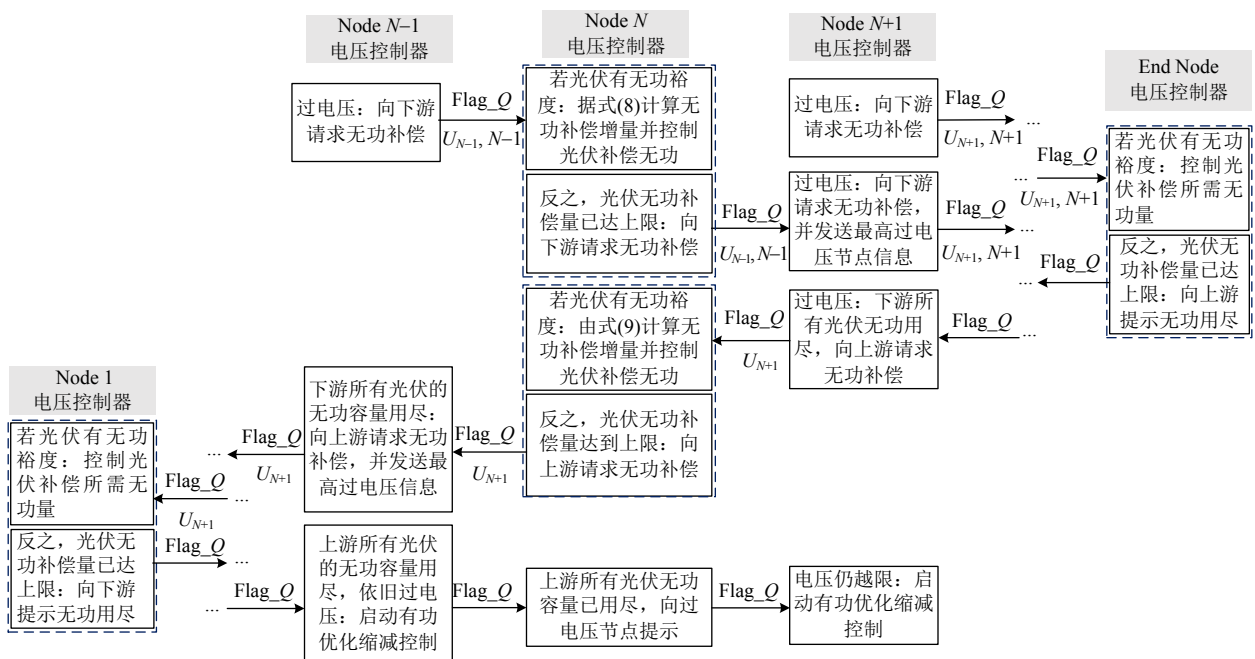


图 3 分布式无功协调控制过程
Fig. 3 Process of distributed reactive power control

于本地量测和分布式通信数据，计算本地光伏定量有功缩减对过电压节点的调压能力指标，并通信交流上下游最大调压能力指标，最后调压能力最强的电压控制器缩减本地光伏的有功功率。

1) 光伏无功容量的增量。

光伏输出无功与有功功率的关系如图 4 所示。图 4 中，在 ab 段光伏有功功率不变，无功补偿量逐渐增大，对应光伏的无功补偿过程；在 bc 段缩减光伏的有功输出会增大光伏的无功补偿容量，对于过电压的恢复是非常有益的；在 cO 段因功率因数的限制，缩减光伏有功输出会降低光伏的无功容量，对过电压的改善效果与线路电阻电抗的比值有关。因此，对光伏有功输出功率的缩减要同时考虑其对光伏无功容量的影响。

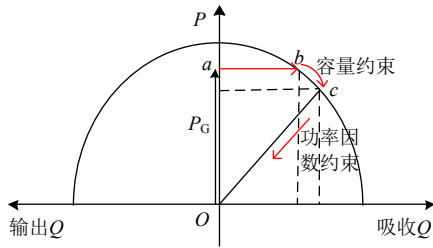


图 4 光伏输出无功和有功功率的关系

Fig.4 Relationship between PV reactive and active power

当缩减光伏的有功输出功率 ΔP_G 时，光伏无功容量的增量 ΔQ_G 与光伏逆变器的参数有关。

$$\Delta Q_G = \begin{cases} \sqrt{S_G^2 - (P_G - \Delta P_G)^2} - \sqrt{S_G^2 - P_G^2}, & P_G - \Delta P_G \geq P_{Fmin} S_G \\ -\Delta P_G \tan(\cos^{-1} P_{Fmin}), & P_{Fmin} S_G \geq P_G \\ (P_G - \Delta P_G) \tan(\cos^{-1} P_{Fmin}) - \sqrt{S_G^2 - P_G^2}, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中： S_G 为光伏逆变器容量； P_G 为光伏输出有功功率； P_{Fmin} 为光伏功率因数下限。

2) 分布式有功优化缩减算法。

根据式(4)，节点 N 及其下游节点 j 缩减本地光伏的有功功率 ΔP_G 对 N 节点电压的调节能力可由式(11)表征，其值越大表明该节点光伏缩减有功 ΔP_G 的调压能力越强。类似地，上游节点 i 缩减本地光伏有功 ΔP_G 对 N 节点的调压能力可由式(5)推导，如式(12)所示。

$$C_{j,N} = (V_{N0})^2 - (V_{N1})^2 = 2\Delta P_G \sum_{n=1}^N R_n + 2\Delta Q_G \sum_{n=1}^N X_n \quad (11)$$

$$C_{i,N} = (V_{N0})^2 - (V_{N2})^2 = 2\Delta P_G \sum_{n=1}^i R_n + 2\Delta Q_G \sum_{n=1}^i X_n \quad (12)$$

分布式有功优化缩减算法主要包含 3 个过程：

1) 启动有功优化缩减。过电压节点的电压控制器向上、下游控制器发送有功缩减信号和本地电压与位置信息；电压正常节点的电压控制器接收上(下)游发送的有功缩减信号和过电压信息，并转发给下(上)游控制器。

2) 计算调压能力 C 并通信。首节点和末节点的电压控制器计算本地光伏缩减有功 ΔP_G 的调压能力 C ，并分别向下游和上游相邻控制器发送 C 值；中间节点的电压控制器在收到上(下)游发送的 C 值后，计算本地调压能力 C 并与上(下)游 C 值比较，然后将较大的 C 发送给下(上)游控制器。

3) 缩减光伏有功功率。各电压控制器比较本地 C 与上、下游 C 值，本地 C 值最大的电压控制器缩减本地光伏的有功功率 ΔP_G 。

以一个简单的五节点线路对分布式光伏有功优化缩减算法的具体过程进行说明。假设节点 2 和节点 4 电压越上限 ($V_4 > V_2$) 且节点 4 光伏调压能力最强，一个控制周期内各电压控制器决策的先后顺序为节点 1 到节点 5，则各电压控制器的决策和信息交互过程如图 5 所示。在第 1 个控制周期内，过电压节点 2 和 4 向相邻上下游节点发送有功缩减信号 $Flag_P$ 和本节点电压、位置信息，节点 3 转发接收到的过电压信息，末节点 5 收到过电压信息后向上游发送本地调压能力 C 。在第 2 个控制周期，首节点 1 接收过电压信息并向下游发送本地调压能力 C ，节点 2 和 3 在收到上游 C 值后计算本地 C 并向下游通信最大 C 值，节点 4 收到上(下)游发送的 C 值后计算本地调压能力 C 并向(上)游通信，同时节点 4 判断本地 C 值大于上、下游 C 值而缩减本节点光伏有功功率 ΔP_G 。

在优化缩减光伏有功 ΔP_G 后，若线路电压恢复正常，则各电压控制器转入功率恢复控制；若线路依旧过电压，则电压控制器依旧处于分布式紧急控制模式。

2.3 功率恢复控制

功率恢复控制是分布式电压控制的最后阶段，用于在电压越限问题解决后，恢复各节点光伏的有功和无功功率以保证光伏发电效益最大化。功率恢复控制与就地预防控制、分布式紧急控制的关系，如图 6 所示。

当分布式电压控制处于功率恢复模式，各电压控制器依次恢复光伏有功缩减量至零和无功补偿量至就地预防控制的参考值。功率恢复控制的顺序

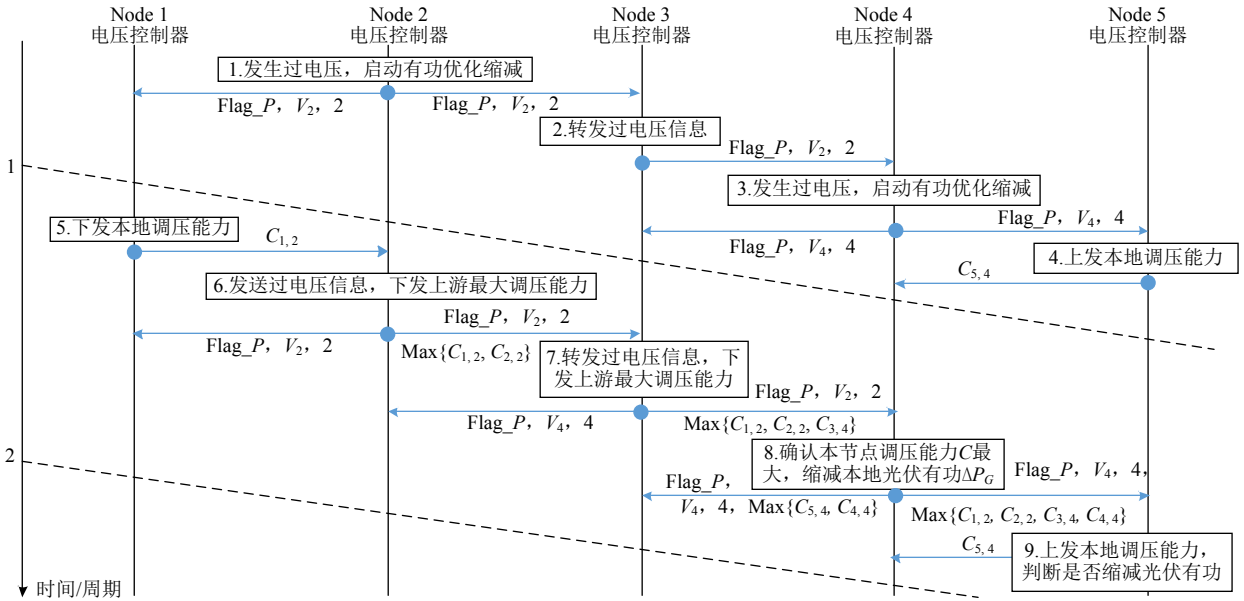


图5 分布式有功优化缩减的控制过程

Fig. 5 Control process of distributed active power optimal reduction

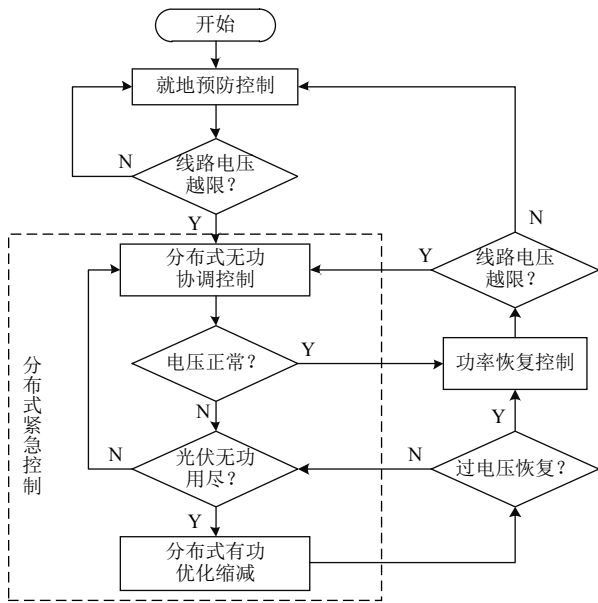


图6 分布式电压控制的3种模式

Fig. 6 Three modes of distributed voltage control

为先有功功率后无功功率, 先上游节点后下游节点。具体过程为: 当线路最高电压低于安全电压限值 $\frac{U_3+U_4}{2}$ 时, 首节点电压控制器降低本地光伏的有功缩减量 ΔP_G , 若本节点光伏有功缩减量已为零, 则通知下游相邻控制器进行有功功率恢复。其他电压控制器在收到上游控制器的光伏有功恢复信号后, 若最高电压幅值低于安全电压限值, 则降低本地光伏的有功缩减量 ΔP_G , 依次类推。当线路上所有光伏的有功功率均恢复至最大值后, 首节点电压控制器再进行无功功率恢复, 恢复过程同理。

3 网络拓扑变化的适应性

各电压控制器能够在网络拓扑动态变化条件下, 基于配电自动化系统发送的联络线开关状态, 确定各控制器节点至供电首节点的电阻电抗值和自身的上、下游控制器, 自组织分布式通信网络。

以调整的 IEEE 33 节点配电系统为例, 对电压控制器的分布式通信网络自适应调整过程进行说明, 如图 7 所示。图 7 中节点 0 和 33 为 2 个变电站的出口母线, 也就是该配电网络的 2 个常规电源点。系统中所有光伏并网节点和重要分支节点均配有电压控制器。各电压控制器预存控制器节点间线路 L1—L15 的电阻电抗值以及控制器节点与这些线路的关联矩阵。

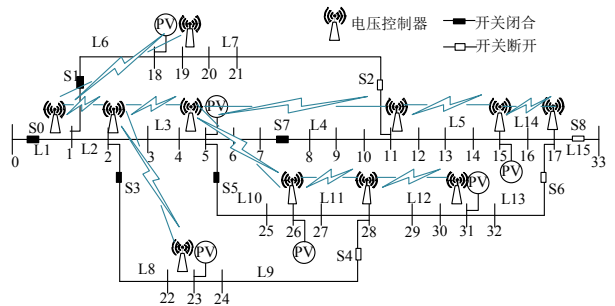


图7 调整的 IEEE 33 节点配电系统分布式通信网络
Fig. 7 Distributed communication network of modified IEEE 33 node distribution system

各电压控制器基于配电自动化系统发送的联络线开关状态, 即可依据控制器节点与线路的关联矩阵得到各电压控制器节点至电源点的供电路径^[16]。根据供电路径和线路 L1—L15 的电阻电抗

值,电压控制器可计算所有控制器节点至供电首节点的电阻电抗值。如节点5至供电首节点的阻抗值为其供电电路径L1、L2和L3的阻抗值之和。

各电压控制器根据关联矩阵和供电电路径可确定自身的上、下游控制器。以节点5为例,节点5的供电电路径中只有L3与节点5相连,故L3为节点5的上游支路,L3的另一关关节点2即为节点5的上游控制器地址;上游支路确定后,与节点5相关联的其他线路L4和L10为节点5的下游支路,两线路的关关节点11和26则为节点5的2个下游控制器地址。

4 算例分析

本文以图7所示调整的IEEE 33节点配电系统为例,对所提出的分布式电压控制策略的有效性进行验证。该系统的基准电压和基准容量分别为 $V_{Base}=12.66\text{ kV}$, $S_{Base}=10\text{ MVA}$ 。系统中含有34个节点,9个联络开关,可由2个变电站供电但不环网运行。光伏安装点为节点5、15、18、23、26和31,光伏安装容量分别为1.2、1.6、1.2、0.8、1.3和1.5 MVA,设定最小功率因数均为0.95^[17]。系统总负荷和光伏总有功输出功率一天24h的变化情况如图8所示。一天24h内光伏的容量渗透率^[18]为215.59%。为验证所提控制策略在不同网络拓扑下的适应性,本文假设中午11:30之后节点0对应变电站进行检修,配电自动化系统通过联络开关动作将系统所有负荷转移为由节点33对应的变电站供电,并于4h后的15:30再次将负荷转移回来。11:30—15:30期间的系统拓扑图及电压控制器的分布式通信网络如图9所示。

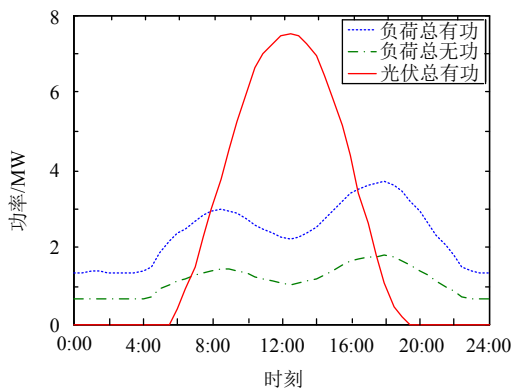


图8 系统内总光伏和负荷日运行曲线

Fig. 8 Daily curves of total PV generation and load

通过仿真计算,在不采用任何控制手段的情况下,系统关键节点24h的电压变化曲线如图10所示。结合图8和图10可以看出,随着线路倒送功率的增加,系统电压抬升效果会越来越明显,且在

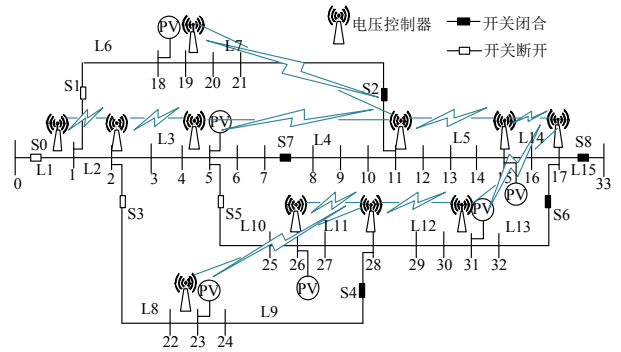


图9 开关动作后的系统拓扑及相应的分布式通信网络
Fig. 9 System topology and distributed communication network after switch action

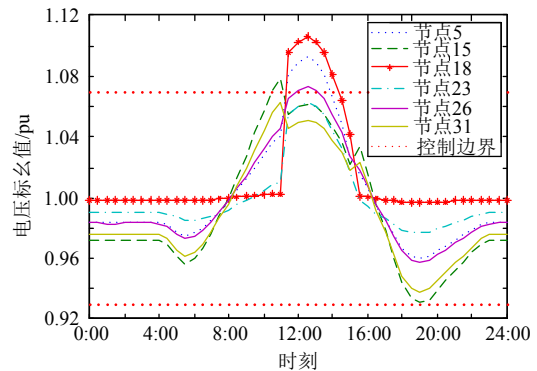


图10 无控制时系统关键节点电压变化曲线

Fig. 10 Voltage curves of critical nodes without control

10:30—14:00期间,光伏安装节点出现不同程度的过电压问题。

设定分布式电压控制范围^[19]为 $[0.93, 1.07]$,就地预防控制的临界电压 $U_3=1.06\text{ pu}$,单次光伏有功缩减量 $\Delta P_G=0.001\text{ MW}$ 。则采用所提出的分布式电压控制策略后,系统关键节点24h的电压变化曲线如图11所示。对比图10和11可以看出,在网络拓扑变化前后,所提出的分布式电压控制策略都能够有效解决高渗透率光伏接入引起的线路过电压,具备网络拓扑动态变化下的适应性。

本文选取12:30的场景对就地预防控制和分布式紧急控制过程进行详细说明。在不采用任何控制

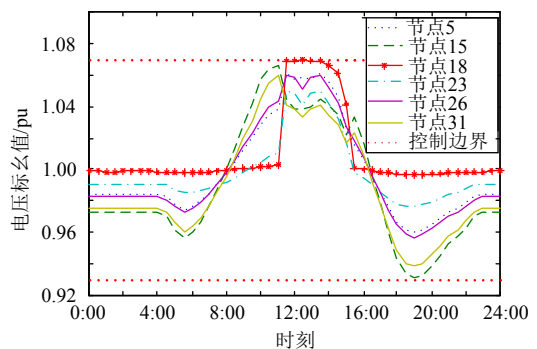


图11 采用所提出控制策略时系统关键节点电压变化曲线

Fig. 11 Voltage curves of several critical nodes with proposed control strategy

手段时,系统电压最高点为节点 18,其电压幅值为 1.107 pu。采用就地预防控制后,各光伏的有功输出功率、无功容量、无功输出功率和电压幅值如表 1 所示。由表 1 可以看出,就地预防控制能够改善线路过电压但不能完全消除过电压。

表 1 12:30 就地控制后光伏的功率和电压信息
Tab. 1 Information about output power and voltage of each PV at 12:30

节点	有功功率/MW	无功容量/Mvar	无功功率/Mvar	电压幅值/pu
5	1.188	0.169	-0.169	1.074
15	1.584	0.225	0	1.051
18	1.188	0.169	-0.169	1.086
23	0.792	0.112	0	1.055
26	1.287	0.183	-0.097	1.065
31	1.485	0.211	0	1.045

分布式电压控制转入紧急控制模式。在一个决策周期内,各电压控制器决策的时间先后顺序分别为节点 1、2、5、11、15、17、18、23、26、28 和 31。在分布式紧急控制过程中,关键节点的电压幅值和光伏输出无功功率的变化曲线如图 12 和 13 所示。就地预防控制后,节点 18 的控制器因本地过电压且无下游控制器,立即向上游节点 11 的控制器发送无功补偿请求。节点 11 不具备无功调节能

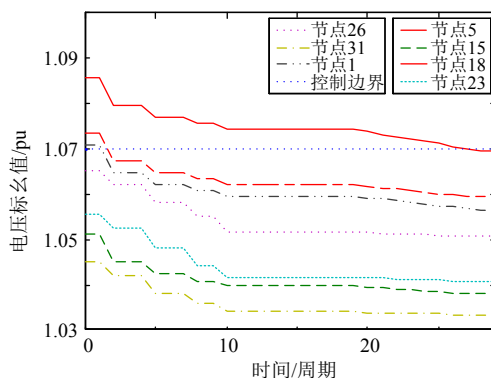


图 12 分布式紧急控制过程中关键节点电压变化曲线

Fig. 12 Voltage curves of critical nodes during emergency control

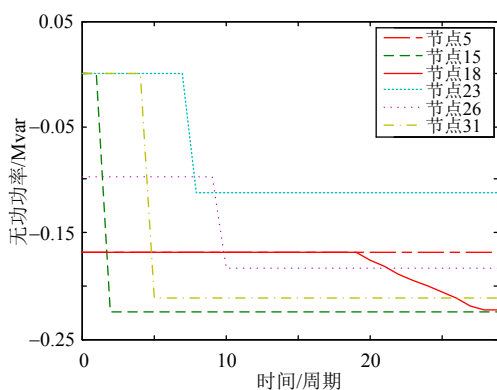


图 13 分布式紧急控制过程中各光伏输出无功功率曲线

Fig. 13 Output reactive power of each PV during emergency control

力且另一下游支路的光伏无功容量也用尽,故向上游节点 15 的控制器发送无功补偿请求。节点 15 的控制器收到下游的无功补偿请求后控制本地光伏吸收无功功率,当无功容量用尽无法消除过电压,又向上游节点 17 的控制器发送无功补偿请求。节点 17 不具备无功调节能力,就向另一下游支路上节点 31 的下游控制器发送无功补偿请求,依次类推。直至第 10 个周期,所有光伏节点的无功容量均用尽。节点 18 的电压控制器在收到上游控制器发来的无功用尽信号后,因本地过电压依旧存在而启动有功优化缩减控制。

在收到有功缩减信号后,各电压控制器基于上、下游传输的过电压信息,计算本地光伏缩减有功 ΔP_G 对过电压节点的电压调节能力 C 如表 2 所示。通过分布式通信,各代理获得上、下游的最大电压调节能力并与本地调压能力指标相比较,最终调压能力最强的节点 18 缩减本地光伏有功功率 0.001 MW。由图 12 可以看出,节点 18 在多次缩减光伏有功功率后,系统所有节点的电压恢复正常,分布式电压控制退出紧急控制模式。由图 13 可以看出,节点 18 在缩减本地光伏的有功功率后无功补偿量进一步增大。

本文进一步选取 12:30 和 13:00 2 个场景,对比所提分布式电压控制策略与集中优化控制、分散就地控制和另一分布式电压控制的调压效果,仿真结果如表 3 所示。调压效果的优劣主要体现在采用四种控制策略后的系统最高电压幅值、光伏有功总缩减量、光伏无功总补偿量和计算时间。

集中优化控制的目标函数是光伏有功总缩减

表 2 各光伏缩减有功的调压能力

Tab. 2 Voltage regulation capability of each PV through active power reduction

光伏节点	5	15	18	23	26	31
调压能力 $C/10^{-4}$	7.11	4.18	11.79	1.96	1.98	1.98

表 3 不同控制方案的调压效果对比

Tab. 3 Comparison of different control schemes

控制方案	时刻	最高电压/ pu	PV 有功 缩减/MW	PV 无功 补偿/Mvar	计算 时间/s
无控制	12:30	1.106 7	0	0	0
	13:00	1.102 9	0	0	0
本文方法	12:30	1.069 8	0.009	1.122	0.736
	13:00	1.069 6	0	0.725	0.490
集中优化控制	12:30	1.070 0	0.008 6	1.120	3.022
	13:00	1.070 0	0	0.675	3.004
分散就地控制	12:30	1.070 0	0.093	0.551	0.028
	13:00	1.070 0	0.054	0.467	0.016
另一分布式控制	12:30	1.070 0	0.028	1.248	0.530
	13:00	1.070 0	0	0.930	0.378

量最小^[20]。约束条件包括潮流等式约束、节点电压安全运行约束[0.93, 1.07]、光伏有功和无功功率约束和光伏输出功率因数约束。优化变量为各节点的光伏有功缩减量和无功补偿量。

分散就地控制^[9]的思路为：当本地电压处于电压期望限值范围[0.934, 1.066]内，光伏有功缩减量和无功补偿量均为零；当本地电压位于期望限值以外，则控制光伏吸收/发出无功功率来降低/提高电压，使得电压维持在期望的最高/最低限值；当光伏无功容量用尽且电压超出正常运行范围[0.93, 1.07]时，则缩减本地光伏的有功功率直至电压恢复到正常运行范围内。

另一分布式电压控制策略^[10]为：当电压正常时，各光伏同样采用 $Q-U$ 就地预防控制；当线路某节点出现过电压时，线路上的其他光伏按逆变器容量比例同时增大无功补偿量，直至消除过电压；当所有光伏的无功容量用尽而过电压依旧存在时，所有光伏按逆变器容量比例共同缩减有功输出功率直至电压恢复正常。

对比四种控制策略的调压效果可以看出：

1) 相较于分散就地控制，分布式电压控制策略利用光伏节点间的无功协调，能够显著降低光伏的有功总缩减量，但计算时间稍长。2) 相较于文献[10]的分布式电压控制策略，本文所提分布式控制策略的计算时间稍长，但光伏的有功总缩减量、无功总补偿量更小，说明本文方法对光伏无功补偿和有功缩减的优化性更强，此外本文方法能够自适应网络拓扑的动态变化。3) 相较于集中优化控制策略，本文所提方法的光伏有功总缩减量和无功总补偿量稍大，但从计算时间和系统投资成本角度综合考虑，本文所提分布式控制策略具有更大优势。

5 结论

本文基于对分布式光伏系统电压调节能力的深入分析，提出了高渗透率光伏情况下的配电网分布式电压控制策略。该策略具体包括就地预防控制、分布式无功协调控制、分布式有功优化缩减和功率恢复控制多个过程。各关键节点的电压控制器，基于本地量测和分布式通信数据通过简单计算，能够实现光伏节点间的无功协调控制和有功优化缩减，且能自适应网络拓扑的动态变化。通过对调整的 IEEE 33 节点配电系统进行仿真分析，验证了所提分布式电压控制方法的有效性，同时对比了所提分布式电压控制策略与集中优化控制、分散就地控制和另一分布式电压控制的调压效果。仿真结

果证明，所提分布式电压控制策略能够有效解决高渗透率光伏造成的过电压问题，控制策略实施简单且控制效果接近集中优化控制策略。

参考文献

- [1] 许晓艳, 黄越辉, 刘纯, 王伟胜. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146. Xu Xiaoyan, Huang Yuehui, Liu Chun, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146(in Chinese).
- [2] 刘科研, 骆晨, 陶顺, 等. 应用多代理技术的主动配电网电压感知控制[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2106-2112. Liu Keyan, Luo Chen, Tao Shun, et al. A new voltage profile perception and control method in active distribution network applying multi-agent technology[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2106-2112(in Chinese).
- [3] Braun M, Stetz T, Reimann T. Optimal reactive power supply in distribution network-technological and economic assessment for PV systems[C]//European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Hamburg, Germany: European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2009: 3872-3881.
- [4] 周林, 晁阳, 廖波, 等. 低压网络中并网光伏逆变器调压策略[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2427-2432. Zhou Lin, Chao Yang, Liao Bo, et al. A voltage regulation strategy by grid-connected PV inverters in low-voltage networks[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2427-2432(in Chinese).
- [5] Samadi A, Eriksson R, Söder L, et al. Coordinated active power-dependent voltage regulation in distribution grids with PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1454-1464.
- [6] Schiffer J, Seel T, Raisch J, et al. Voltage stability and reactive power sharing in inverter-based microgrids with consensus-based distributed voltage control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(1): 96-109.
- [7] Kurisu S, Nagata T. Voltage control for a distributed line feeder by a multi-agent approach[C]//18th International Conference on Intelligent System Application to Power System. Porto, Portugal: 18th International Conference on Intelligent System Application to Power System, 2015: 1-6.
- [8] Calderaro V, Conio G, Galdi V, et al. Optimal decentralized voltage control for distribution systems with inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power System, 2014, 29(1): 230-241.
- [9] 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 (in Chinese).
- [10] 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.
- [11] Ku T T, Lin C H, Chen C S, et al. Coordination of PV inverters to mitigate voltage violation for load transfer between distribution feeders with high penetration of PV installation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(2): 1167-1174.

- [12] 王笑雪, 徐弢, 王成山, 等. 基于 MAS 的主动配电网分布式电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2918-2926.
Wang Xiaoxue, Xu Tao, Wang Chengshan, et al. Distributed voltage control in active distribution networks utilizing multiple agent[J]. Proceeding of the CSEE, 2016, 36(11): 2918-2926(in Chinese).
- [13] Baran M, Wu F. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 735-743.
- [14] Mesut B, Felix W. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1408.
- [15] Bollen M, Sannino A. Voltage control with inverter-based distributed generation[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2005, 20(1): 519-520.
- [16] Bapat R B. 图与矩阵[M]. 吴少川译. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014: 22-23.
- [17] VDE-AR-N 4105 Power generation systems connected to the LV distribution network-technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks[S]. Offenbach: Verband der Elektrotechnik(VDE), 2011.
- [18] Anderson K, Coddington M, Burman K, et al. Interconnecting PV on New York city's secondary network distribution system[R].

Golden, Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2009.

- [19] 国家电网公司. DL/T 1198—2013 电力系统电压质量和无功电力管理规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [20] Liew S, Strbac G. Maximising penetration of wind generation in existing distribution networks[J]. IEE Proceeding Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(3): 256-262.



柴园园

收稿日期: 2017-06-12。

作者简介:

柴园园(1992), 女, 博士研究生, 研究方向为分布式控制、电能质量等, E-mail: yychai@tju.edu.cn;

郭力(1981), 男, 教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为分布式发电及微网、智能配电网等, E-mail: liguo@tju.edu.cn;

王成山(1962), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全性分析、配电系统规划、分布式发电及微网等, E-mail: cswang@tju.edu.cn。

(责任编辑 徐梅)