

含高比例光伏的配电网分组协调电压控制策略

李圣清^{1,2}, 刘博文^{1,2}, 李焕平^{1,2}, 李欣^{1,2}, 周志飞^{1,2}

(1.湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2.湖南省光伏智能电网控制工程研究中心, 湖南 株洲 412007)

摘要: 电压越限成为限制光伏最大接入量的重要因素,为解决大规模光伏并网所导致电压越限问题,文章提出了含高比例光伏的配电网分组协调电压控制策略。首先,根据光伏接入节点对配电网电压灵敏度不同,提出了光伏逆变器分组协调控制思想;然后,光伏逆变器组内以容量利用比和功率因数为一致性变量进行电压控制,组间通过协调控制确保关键节点电压收敛至设定值 1.05 p.u.;最后,通过算例仿真验证所提控制策略能有效地抑制配电网电压越限,避免不必要的有功削减,同时在负荷、光伏波动时具有较强的鲁棒性。

关键词: 电压越限; 光伏并网; 分组协调电压控制; 一致性变量

中图分类号: TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)04-0530-08

0 引言

近年,光伏凭借清洁、灵活、高效等优势高速发展^[1,2]。但大量光伏接入对系统的潮流、电压、网络损耗等均造成重要的影响^[3],其中电压越限成为限制光伏大规模接入的重要因素^[4-6]。因此,对含高比例光伏的配电网,便捷、有效地控制电压是电力系统稳定运行的重要基础^[7,8]。

随着越来越多的光伏(Photovoltaic, PV)逆变器接入配电网,国内外学者根据分布式电源(Distributed Generation, DG)在馈线中不同位置光伏最大接入量和调压能力的不同^[9,10],提出了DG分组的思想,将分散的DG划分成若干个分组进行区域电压管理^[11]。文献[12]提出了分散合作式的微电网电压控制框架,通过DG分散合作抑制孤岛模式下微电网电压和频率波动。但该方法局限于孤岛模式下,适用范围较小。文献[13]提出了分组合作的分布式优化方法,通过无功出力调节控制节点电压的方式实现微网中DG出力的最优调度。但该方法需要同时传递一致性变量和变化率,不符合一致性协议的要求。文献[14]提出了一种基于全纯嵌入法灵敏度分析的光、储参与配电网分层分区电压调节方法,根据电压灵敏度建立上、下两层电压优化模型,该方法可充分挖掘各可调资源的调节能力,提升电压支撑能力。

但该方法所提的以无功匹配程度和节点耦合度为指标的聚类分区法在样本数目较少时,分区结果存在一定的偶然性。文献[15]采用DG分组模式设计了配电网多目标分布式优化控制策略,以容量利用比和功率因数为一致性变量设计了电压控制、功率控制两个分组的分布式控制算法,该算法在光伏、负荷变化时,仍可快速精确地实现多个重要节点电压控制,且具有较强的鲁棒性。但该控制策略中光伏逆变器功率因数较低,且存在较多的有功削减。

考虑上述控制策略的优缺点,针对含高比例光伏接入配电网引起的电压越限问题,本文提出了含高比例光伏的配电网分组协调电压控制策略。根据馈线不同位置电压灵敏度的差异性,将光伏逆变器分组,并设计了组内以容量利用比和功率因数为一致性变量,组间采用协调控制的电压控制框架。当出现电压越限时,优先利用电压灵敏度较大的分组参与电压控制,在该分组无法抑制电压越限之后,再向其他分组发送电压控制指令。最后,在8节点配电网算例中,对比本文所提控制策略与传统电压控制策略的控制效果,验证了本文所提控制策略可有效抑制配电网中电压越限、提高配电网的光伏最大接入量。在光伏和负载波动时,仍具有较强的鲁棒性。

收稿日期: 2023-04-17。

基金项目: 国家自然科学基金(51977072)。

作者简介: 李圣清(1961-),男,博士,教授,研究方向为智能电网运行与控制技术、分布式发电与微电网技术、电能质量调节与控制技术。
E-mail: 2680347720@qq.com

1 电压灵敏度及调压能力分析

1.1 电压灵敏度

简化配电网馈线网络如图 1 所示。

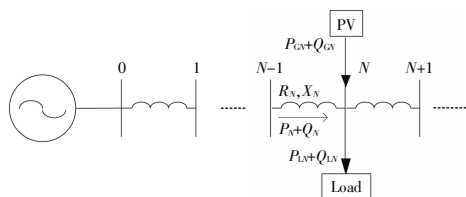


图 1 简化配电网馈线网络

Fig.1 Simplified distribution network feeder network

图中: $P_{N-1} + jQ_{N-1}$ 为从 $N-1$ 节点流向 N 节点的功率; $P_{L_N} + jQ_{L_N}$ 为节点 N 所带负荷; $P_{Gv} + jQ_{Gv}$ 为位于节点 N 处 PV 输出的功率; $R_N + jX_N$ 为节点 $N-1$ 到节点 N 的线路阻抗; V_N 为节点 N 的电压。

根据 DistFlow 潮流算法, 节点电压与线路参数及功率的关系为^[4]

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

若节点 N 或其下游某节点 m 的 PV 输出有功、无功变化量为 ΔP 和 ΔQ , 则节点 N 的电压变化量 ΔV_N 为

$$\Delta V_N = \frac{\Delta P \sum_{n=1}^N R_n + \Delta Q \sum_{n=1}^N X_n}{V_0} \quad (2)$$

若节点 N 上游某节点 i 的 PV 输出功率出现变化, 则节点 N 的电压变化量 ΔV_N 为

$$\Delta V_N = \frac{\Delta P \sum_{n=1}^i R_n + \Delta Q \sum_{n=1}^i X_n}{V_0} \quad (3)$$

结合式(5), (6), 可得电压灵敏度矩阵为

$$\Delta V = S_{ij} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: S_{ij} 为电压灵敏度矩阵, 其计算式为

$$S_{ij} = \begin{cases} \left[\frac{1}{V_0} \sum_{n=1}^i R_n, \frac{1}{V_0} \sum_{n=1}^i X_n \right], & i \leq j \\ \left[\frac{1}{V_0} \sum_{n=1}^j R_n, \frac{1}{V_0} \sum_{n=1}^j X_n \right], & i > j \end{cases} \quad (5)$$

若多个光伏逆变器输出功率均发生变化时, 则节点电压变化为

$$\Delta V_i = S_{i1} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \end{bmatrix} + S_{i2} \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} + \dots + S_{in} \begin{bmatrix} \Delta P_n \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(6)可知, 配电网节点电压受自身或下游

节点的功率变化更加灵敏, 且灵敏度仅与线路阻抗有关。

1.2 光伏分组接入对电压分布的影响

由于电压灵敏度沿着馈线逐渐增大, 越靠后 PV 的有功和无功对节点电压的调节能力越大。通过转移光伏逆变器功率可以降低电压越限风险。本文将对比传统分布式控制策略和分组模式在相同光伏接入时节点电压变化量。传统分布式光伏接入配电网如图 2 所示。

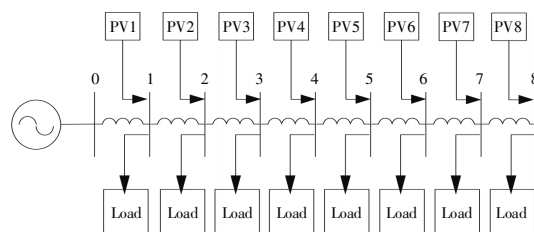


图 2 传统分布式光伏接入配电网

Fig.2 Schematic diagram of traditional distributed photovoltaic access distribution network

当光伏接入时, 各节点电压将升高, 且图 2 中节点 8 更易出现电压越限, 因此将该节点设为关键节点。由式(6)可得, 在光伏接入时节点 8 电压增量为

$$\begin{aligned} \Delta V_8 = & \frac{P_{pv1} \sum_{n=1}^1 R_n - Q_{pv1} \sum_{n=1}^1 X_n}{V_0} + \\ & \frac{P_{pv2} \sum_{n=1}^2 R_n - Q_{pv2} \sum_{n=1}^2 X_n}{V_0} + \dots + \frac{P_{pv8} \sum_{n=1}^8 R_n - Q_{pv8} \sum_{n=1}^8 X_n}{V_0} = \\ & 36 \frac{P_{pw} R - Q_{pw} X}{V_0} \quad (7) \end{aligned}$$

式中: $R_n + jX_n$ 为第 n 段馈线的等值阻抗, 且各段馈线阻抗相同; $P_{pvk} + jQ_{pvk}$ 为第 k 个节点所注入的光伏功率。

本文假设各段馈线阻抗相同, 且每个节点光伏逆变器输出功率和负荷均相同, 令 $P_{pvk} + jQ_{pvk} = P_{pw} + jQ_{pw}$, $R_n + jX_n = R + jX$ 。配电网的光伏分组如图 3 所示。图中虚线框内几个户用光伏逆变器形成具有特定控制目标的分组, GV1 为电压控制组 1、GV2 为电压控制组 2, 在相同光伏输出、负荷和阻抗的情况下, 光伏接入时节点 8 电压增量为

$$\Delta V_8 = \frac{6P_{pw} \sum_{n=1}^3 R_n - 6Q_{pw} \sum_{n=1}^3 X_n}{V_0} +$$

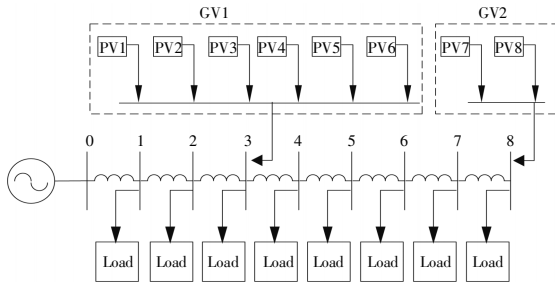


图3 配电网的光伏分组示意图

Fig.3 Schematic diagram of the photovoltaic grouping of the distribution network

$$\frac{2P_{pv} \sum_{n=1}^6 R_n - 2Q_{pv} \sum_{n=1}^6 X_n}{V_0} = 30 \frac{P_{pv} R - Q_{pv} X}{V_0} \quad (8)$$

由式(7),(8)可知,当光伏逆变器输出相同有功时,分组模式下电压变化量与传统分布式相比缩小了5/6。因此,在应对高比例光伏接入配电网时,采用分组模式可以更好地抑制电压越限问题。

2 分组协调电压控制策略

2.1 分组一致性算法

在一致性协议中,多智能体需通过通信线路实现信息互换,多智能体的通信线路可视作有向网络拓扑图。拓扑图可用图 $G=(V,E,A)$ 表示,其中: $V=(v_1, v_2 \dots v_n)$ 表示智能体; E 表示各智能体之间的通信线路; A 表示图 G 的邻接矩阵节点间的关系,若节点 i 与节点 j 之间有通讯链路,则 $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$ 。

对于电压控制组 $GV_i(i=1, 2, \dots, n)$, 设其将要控制的节点电压为 V_x , 且该电压可由该组内某个 PV 实时测量得到。该组内第 j 个 PV 的容量利用率迭代方法为

$$\begin{aligned} \partial_{GV_i,j}(k+1) = & \sum_{m=1}^{N_i} \beta_{GV_i,jm} \partial_{GV_i,m}(k) + \\ & \lambda \sum_{m=1}^{N_i} a_{im} [\partial_{GV_i,m}(k) - \partial_{GV_i,j}(k)] \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\partial_{GV_i,j}(k+1)$ 为第 i 个电压控制组中第 j 个 PV 第 k 次迭代后得到的容量利用率; N_i 为该组内 PV 的数量; 迭代步长 λ 的取值为 0~1, 迭代步长越大收敛速度越快, 但精度越低; a_{im} 为邻接矩阵 A 中的元素; $\sum_{m=1}^{N_i} \beta_{GV_i,jm} \partial_{GV_i,m}(k)$ 为节点 j 受该组内其他节点的综合影响; $\beta_{GV_i,jm}$ 为该组内第 j 个 PV

接收到的同组内第 m 个 PV 信息 $\partial_{GV_i,m}(k)$ 而设置的权重。

接收到的同组内第 m 个 PV 信息 $\partial_{GV_i,m}(k)$ 而设置的权重。

$$\beta_{GV_i,jm} = l_{jm} / \sum_{m=1}^{N_i} l_{jm} \quad (10)$$

式中: $l_{jm}=1(j \neq m)$ 为第 j 个 PV 和第 m 个 PV 存在双向通信线路, 若分布式电源 j 和 m 之间存在通信链接, 则 $l_{jm}=0$ 为两者之间无通讯线路。

对于电压控制组 $GV_i(i=1, 2, \dots, n)$, 组内各 PV 的功率因数迭代计算式为

$$\begin{aligned} \partial_{GV_i,j}^{\text{cosp}}(k+1) = & \sum_{m=1}^{N_i} \beta_{GV_i,jm}^{\text{cosp}} \partial_{GV_i,j}^{\text{cosp}}(k) + \\ & \lambda \sum_{m=1}^{N_i} a_{im} [\partial_{GV_i,m}^{\text{cosp}}(k) - \partial_{GV_i,j}^{\text{cosp}}(k)] \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\partial_{GV_i,j}^{\text{cosp}}(k+1)$ 为第 i 个电压控制组中第 j 个 PV 第 k 次迭代后得到的功率因数; 迭代步长 λ 的取值为 0~1, 迭代步长越大收敛速度越快, 但精度越低;

a_{im} 为邻接矩阵 A 中的元素; $\sum_{m=1}^{N_i} \beta_{GV_i,jm}^{\text{cosp}} \partial_{GV_i,j}^{\text{cosp}}(k)$ 为节点 j 受该组内其他节点的综合影响; $\beta_{GV_i,jm}^{\text{cosp}}$ 为该组内第 j 个 PV 接收到的同组内第 m 个 PV 信息 $\partial_{GV_i,m}^{\text{cosp}}(k)$ 而设置的权重。

在确定各组内的容量利用比和功率因数之后, 即可确定组内各 PV 的有功功率和无功功率输出。

2.2 组间协调控制策略

本文通过一致性算法确保分组内部 PV 的容量利用比和功率因数均收敛到相同值。为了更好地利用 PV 有限的无功容量控制节点电压, 避免不必要的有功削减, 降低系统中的无功流动量。本文利用各组光伏电源输出功率对各节点电压的灵敏度不同, 在分组的基础上加入组间协调控制策略。

在图 3 的分组模式下, 节点 3, 8 更容易出现电压越限。因此, 只要确保节点 3, 8 的电压不越限, 则系统中其他节点就不会出现电压越限问题。为了在电压控制过程中尽可能降低 PV 的无功输出和有功削减, 比较 GV1, GV2 对这两个节点的无功调压和有功调压能力十分必要。

2.2.1 无功电压控制阶段

无功电压控制阶段, 当节点 3 电压下降量为

ΔV_3 时,对比 GV1 单独动作和 GV2 单独动作时无功吸收量。GV1 单独动作进行无功电压控制时,其无功吸收量为

$$Q_{cv1} = \frac{\Delta V_3 V_0}{3X} \quad (12)$$

GV2 单独动作进行无功电压控制时,其无功吸收量为

$$Q_{cv2} = \frac{\Delta V_3 V_0}{3X} \quad (13)$$

同理,针对节点 8 电压越限,当其电压下降量为 ΔV_8 时,GV1 单独动作进行无功电压控制时,其无功吸收量为

$$Q'_{cv1} = \frac{\Delta V_8 V_0}{3X} \quad (14)$$

GV2 单独动作进行无功电压控制时,其无功吸收量为

$$Q'_{cv2} = \frac{\Delta V_8 V_0}{3X} \quad (15)$$

由式(12),(13)可知,针对 V_3 越限,若单独利用 GV1 和 GV2 进行无功电压控制,两组中 PV 的无功吸收量相同,但 GV1 中有 6 个 PV,每个 PV 的无功吸收量为 $Q_{cp}/6$;GV2 中有 2 个 PV,每个 PV 的无功吸收量为 $Q_{cv}/2$ 。如果通过 GV2 控制电压 U_3 ,可能导致 GV2 组内的 PV 的无功裕度不足。由式(14),(15)可知,针对 V_8 越限,单独利用 GV1 和 GV2 进行无功电压控制,在相同的电压下降量时,GV2 单独动作时吸收的无功功率更少,可以减小系统中无功流动量。

2.2.2 有功削减阶段

有功削减电压控制阶段,当节点 3 的电压下降量为 $\Delta V'_3$ 时,对比 GV1 单独动作和 GV2 单独动作时有功削减量。GV1 单独动作进行有功削减时,其有功削减量为

$$P_{cv1} = \frac{\Delta V'_3 V_0}{3R} \quad (16)$$

GV2 单独动作进行有功削减时,其有功削减量为

$$P_{cv2} = \frac{\Delta V'_3 V_0}{3R} \quad (17)$$

同理,处理节点 8 电压越限,当节点 8 的电压下降量为 $\Delta V'_8$ 时,如 GV1 单独动作进行有功削减时,其有功削减量为

$$P'_{cv1} = \frac{\Delta V'_8 V_0}{3R} \quad (18)$$

GV2 单独动作进行有功削减时,其有功削减量为

$$P'_{cv2} = \frac{\Delta V'_8 V_0}{8R} \quad (19)$$

由式(16),(17)可知,针对 V_3 越限,若单独利用 GV1 和 GV2 进行有功削减控制电压,两组中 PV 有功削减量相同。但 GV1 有 6 个 PV,每个 PV 的有功削减量为 $P_{cp}/6$;GV2 有 2 个 PV,每个 PV 的有功削减量为 $P_{cv}/2$ 。这可能导致 GV2 组内 PV 的有功输出过低。由式(18),(19)可知,针对 V_8 越限,单独利用 GV1 和 GV2 进行有功削减控制电压,GV2 单独动作时削减的有功功率更小,可以避免不必要的有功削减。

综上所述,分组协调电压控制策略流程如图 4 所示。

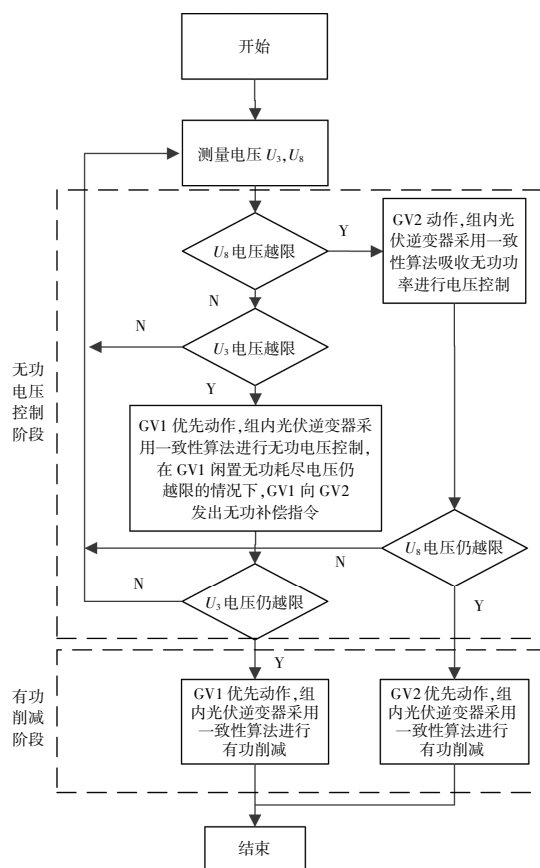


图 4 分组协调电压控制策略流程图

Fig.4 Group coordination voltage control strategy flowchart

图中,电压控制组 GV1 主要负责控制节点 3 的电压 U_3 ,电压控制组 GV2 主要负责控制节点 8 的电压 U_8 。但由于 GV1 的无功调压能力较差,可能存在无功容量不足的情况。若 GV1 中所有 PV

的无功容量耗尽之后, U_3 仍越限, 则 GV1 向 GV2 发送无功补偿指令。若两组内的所有 PV 无功容量均耗尽时仍出现电压越限问题, 则进入有功削减模式。在有功削减模式下, 若 U_3 仍越限, 则 GV1 内的 PV 进行有功削减; 若 U_8 仍越限, 则 GV2 内的 PV 进行有功削减。

3 仿真算例

3.1 仿真模型设置

本文以图 3 作为算例模型进行分析, 该系统基本参数如表 1 所示。

表 1 配电网基本参数
Table 1 Basic parameters of the distribution network

参数	数值
单位线路阻抗/ $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$	$0.602 + j0.232$
节点间距/km	0.06
逆变器容量/ $\text{kV} \cdot \text{A}$	15
安全电压/p.u.	0.95~1.05
额定电压/V	380

由于各个光伏逆变器地理位置、温度、光照和负荷状况接近, 本文假设每个负荷状况、光伏逆变器容量和光伏输出情况一致。电压控制组 GV1 中含有 1~6 号光伏逆变器所接入的节点为 3 号节点; 电压控制组 GV2 中含有 7, 8 号光伏逆变器所接入的节点为 8 号节点。各组内部以容量利用比和功率因数为一致性变量, 组间采用协调控制。

3.2 仿真算例 1

在 PV 输出功率相同的情况下, 仿真过程中, 每个负荷恒为 7.5 kW, 每个 PV 的输出功率为 11.5 kW+0 kvar。采用传统分布式和分组模式接入电压分布情况如图 5 所示。

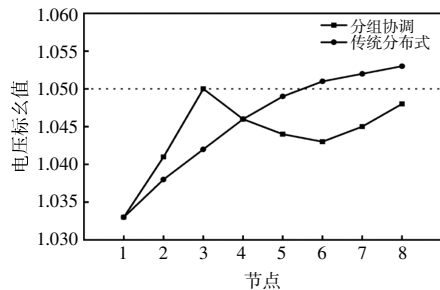


图 5 无控制时采用传统分布式和分组模式接入电压分布情况

Fig.5 When there is no control, the traditional distributed and packet modes are used to access the voltage distribution situation

由图 5 可知, 在仅有有功接入, 且接入量相同时, 传统分布式光伏系统中 6, 7, 8 共 3 个节点均

出现不同程度的电压越限, 而分组模式下光伏系统中所有节点未出现电压越限问题。为确保电压不越限, 传统分布式光伏系统必须进行无功电压控制或削减有功避免电压越限, 这将增加系统中无功流动, 降低配电网的光伏消纳能力。

3.3 仿真算例 2

在配电网中分别采用传统分布式 $Q(U)$ 控制策略、传统分布式 $\cos\varphi(P)$ 控制策略和分组协调控制策略。在保证电压不越限的前提下, 采用试探法对比 3 种控制策略的光伏最大接入量。光伏最大接入量时各节点的电压分布情况如图 6 所示。3 种控制策略最大光伏接入量如表 2 所示。

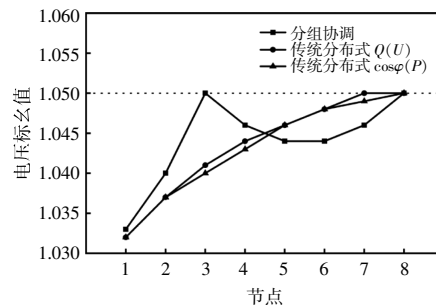


图 6 光伏最大接入量时各节点电压分布情况

Fig.6 The voltage distribution of each node at the maximum access of photovoltaics

表 2 3 种控制策略的光伏最大接入量
Table 2 Maximum PV access for three control strategies

控制策略	最大接入量/kW
传统分布式 $Q(U)$ 控制	109.6
传统分布式 $\cos\varphi(P)$ 控制	103.2
分组协调控制	111.2

由图 6, 表 2 可知, 3 种控制策略的光伏最大接入量分别为 109.6, 103.2, 111.2 kW。因此, 与传统分布式 $Q(U)$ 和 $\cos\varphi(P)$ 控制相比, 采用分组协调控制在确保关键节点电压收敛至设定值的前提下, 还能提高低压配电网对光伏的消纳能力。

为对比 3 种控制策略的经济性, 在相同光伏出力的情况下对比 3 种控制策略的有功削减量和光伏逆变器的无功吸收量。假设各光伏出力为 14 kW, 仿真时间为 1 h, 3 种控制策略的有功削减量和光伏逆变器无功吸收量如表 3 所示。

由表 3 可知, 对比传统分布式 $Q(U)$ 和 $\cos\varphi(P)$ 控制策略, 本文所提控制策略在高比例光伏接入时不仅减少了有功削减量, 提高了配电网的消纳能力, 还降低了光伏逆变器的无功吸收量。由于有

表 3 3种控制策略的有功削减量和光伏逆变器无功吸收量

Table 3 The amount of active reduction and reactive absorption of the photovoltaic inverter of the three control strategies

控制策略	有功削减量/kW·h	无功吸收量/kVar·h
$Q(U)$ 控制	2.4	45.20
$\cos\varphi(P)$ 控制	8.8	32.64
分组协调控制	0.8	41.24

功削减和过大的光伏逆变器无功吸收都会影响系统的经济性,因此,本文所提控制策略对系统的经济性也有一定的改善。

3.4 仿真算例 3

本文以前文仿真为基础,在 1 h 时每个负荷从 7.5 kW 降低到 5.5 kW,经过分组协调控制策略之后,关键节点 3,8 的电压如图 7 所示。

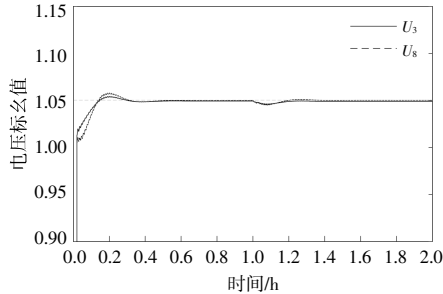
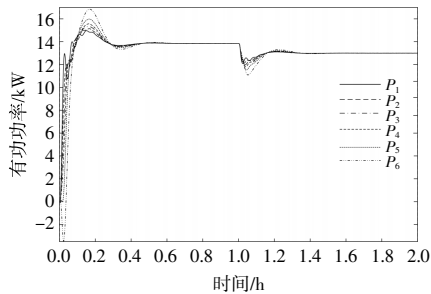


图 7 负荷突变时关键节点 3 和 8 的电压
Fig.7 Voltages at critical nodes 3 and 8 when the load is abrupt

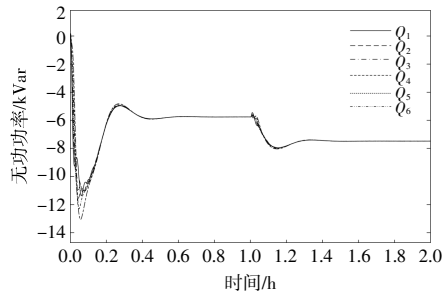
由图 7 可知,在负荷突变时节点电压偏离设定值,但在分组协调控制下迅速收敛至设定值 1.05 p.u.。表明该策略可有效应对负荷突变。

GV1, GV2 中各 PV 有功和无功输出情况如图 8,9 所示。

由图 8,9 可知:在负荷突变时,GV1 中各光伏逆变器输出从 13.9 kW-5.64 kVar 削减到 13.0 kW-7.48 kVar;GV2 中各光伏逆变器输出从 13.9 kW-3.7 kVar 削减到 12.8 kW-7.8 kVar。上述仿真

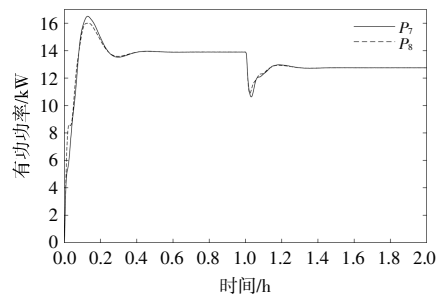


(a)GV1 中各 PV 有功输出情况

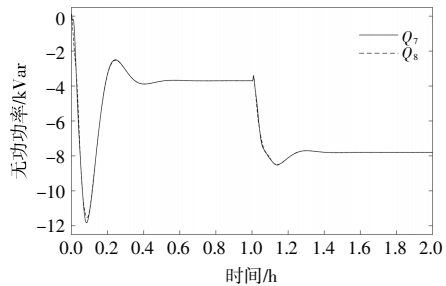


(b)GV1 中各 PV 无功输出情况

图 8 负荷突变时 GV1 中 PV 有功和无功输出情况
Fig.8 The active and reactive output of each PV in GV1 when the load changes abruptly



(a)GV2 中各 PV 有功输出情况



(b)GV2 中各 PV 无功输出情况

图 9 负荷突变时 GV2 中各 PV 有功和无功输出情况
Fig.9 The active and reactive output of each PV in GV2 when the load changes abruptly

表明,在负荷突变时,关键节点电压仍可快速收敛至设定值 1.05 p.u.,且组内各 PV 的容量利用比和功率因数仍符合一致性算法。这表明在负荷突变时,该算法具有较好的控制鲁棒性。

3.5 仿真算例 4

本仿真以 3.2 节中仿真为基础,在 1 h 时光伏逆变器输出功率突增,从 11.5 kW 增加到 12.5 kW,模拟光伏出力的波动。经过分组协调控制策略之后,关键节点 3,8 的电压如图 10 所示。

由图 10 可知,在光伏出力突变时节点电压偏离设定值,但分组协调控制下迅速恢复至设定值 1.05 p.u.。表明该策略可有效应对光伏突变。

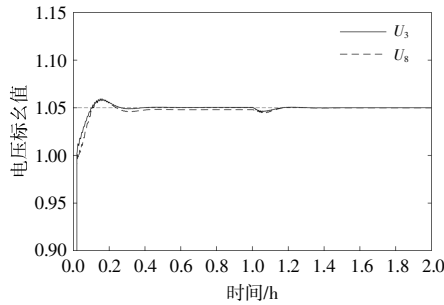
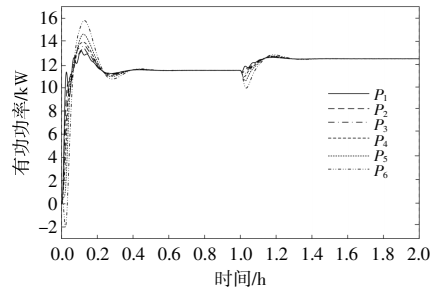


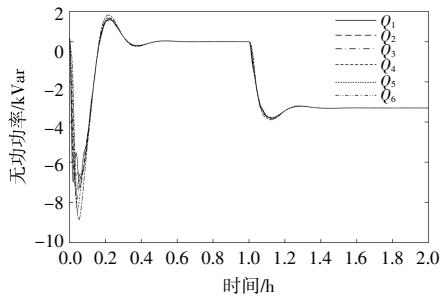
图 10 光伏突变时关键节点 3 和 8 的电压分布情况
Fig.10 Voltage distribution of key nodes 3 and 8 during PV mutations

GV1, GV2 中各 PV 有功和无功输出情况如图 11, 12 所示。

由图 11, 12 可知, 光伏波动时, GV1 中各光伏逆变器输出从 11.5 kW-0kVar 变为 12.5 kW-3.32 kVar; GV2 中各光伏逆变器输出从 11.5

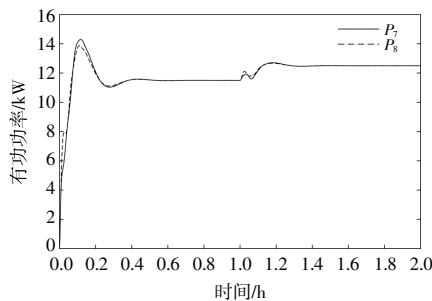


(a) GV1 中各 PV 有功输出情况

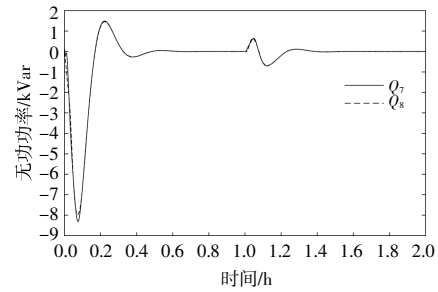


(b) GV1 中各 PV 无功输出情况

图 11 光伏突变时 GV1 中各 PV 有功和无功输出情况
Fig.11 The active and reactive output of each PV in GV1 during the photovoltaic mutation



(a) GV2 中各 PV 有功输出情况



(b) GV2 中各 PV 无功输出情况

图 12 光伏突变时 GV2 中各 PV 有功和无功输出情况
Fig.12 The active and reactive output of each PV in GV2 during the photovoltaic mutation

kW-0 kVar 变为 12.5 kW-0 kVar。上述仿真表明, 在光伏突变时, 关键节点电压仍可快速收敛至设定值 1.05 p.u., 且组内各 PV 的容量利用比和功率因数仍符合一致性算法。这表明在光伏突变时, 该算法具有较好的控制鲁棒性。

4 结束语

本文利用 PV 在馈线不同位置的调压能力不同, 提出分组协调电压控制策略, 该策略可在确保关键节点电压收敛至 1.05 p.u.的前提下, 尽可能减小光伏弃光量。仿真算例结果表明: 与传统分布式 $Q(U)$ 控制和传统分布式 $\cos\varphi(P)$ 控制对比, 本文所提控制策略可提高系统的光伏最大接入量, 光伏最大接入量分别提高了 1.46%, 7.75%。另外, 所提控制策略优先利用电压灵敏度较高的分组参与电压控制, 可降低有功削减量和光伏逆变器无功吸收量, 从而改善系统的经济性。在负荷和光伏出现波动时, 本文所提控制策略仍能准确控制关键节点电压收敛至设定值, 表明该策略具有较强的鲁棒性。

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): 2806-2818.
- [2] Sun H B, Guo Q L, Qi J J, et al. Review of challenges and research opportunities for voltage control in smart grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2790-2801.
- [3] 张斌, 于力, 白浩, 等. 基于一致性算法的农村中压配电网光储系统与通信网络协调规划[J]. 可再生能源, 2021, 39(10): 1371-1379.
- [4] 刘星, 陈众, 陈李杰, 等. 含高渗透率光伏的配电网就

- 地-分布式电压控制 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 268-275.
- [5] 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.
- [6] Procopiou A T, Ochoa L F. Voltage control in PV-rich LV networks without remote monitoring [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1224-1236.
- [7] 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.
- [8] 郑晓莹, 陈政轩, 曾琮. 含分布式电源的配电网双层分区调压策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 90-97.
- [9] Injeti S K, Thunuguntla V K. Optimal integration of DGs into radial distribution network in the presence of plug-in electric vehicles to minimize daily active power losses and to improve the voltage profile of the system using bioinspired optimization algorithms [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 21-35.
- [10] 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.
- [11] 李鹏飞, 白星振, 李盛伟, 等. 考虑光伏不确定性的双层协同优化机组组合[J]. 可再生能源, 2018, 36(12): 1812-1817.
- [12] Vaccaro A, Velloso G, Zobaa A F. A decentralized and cooperative architecture for optimal voltage regulation in smart grids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4593-4602.
- [13] Maknouninejad A, Qu Z, Enslin J, et al. Clustering and cooperative control of distributed generators for maintaining microgrid unified voltage profile and complex power control[A]. Transmission and Distribution Conference and Exposition[C]. Orlando: IEEE, 2012. 1-8.
- [14] 陈文进, 甘雯, 张俊, 等. 基于 HEM 灵敏度的配电网分层分区电压调节策略[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 42-52.
- [15] 乐健, 周谦, 王曹, 等. 基于分布式协同的配电网电压和功率优化控制方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1249-1257.

Distribution network groups with high proportion photovoltaics coordinate voltage control strategies

Li Shengqing^{1,2}, Liu Bowen^{1,2}, Li Huanping^{1,2}, Li Xin^{1,2}, Zhou Zhifei^{1,2}

(1.School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 2.Hunan Province Photovoltaic Smart Grid Control Engineering Research Center, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Voltage violation has become an important factor limiting the maximum integration capacity of photovoltaics. To address the issue of voltage violation caused by large-scale photovoltaic grid connection, the article proposes a grouped coordinated voltage control strategy for distribution networks with high proportions of photovoltaics. Firstly, based on the different voltage sensitivities of photovoltaic connection nodes in the distribution network, the concept of grouped coordinated control for photovoltaic inverters is introduced. Then, within each group of photovoltaic inverters, voltage control is carried out using capacity utilization ratio and power factor as consistent variables, while inter-group coordination control ensures that the voltage at key nodes converges to the set value of 1.05 p.u.. Finally, through case simulations, the proposed control strategy is verified to effectively suppress voltage violations in distribution networks, avoid unnecessary active power reduction, and demonstrate strong robustness during load and photovoltaic fluctuations.

Keywords: voltage violation; photovoltaic power generation; group coordination control; consensus algorithm