

# 高光伏渗透率配电系统电压协同控制研究综述

杨宇<sup>1</sup>,文福拴<sup>1</sup>,周星龙<sup>2</sup>,王力成<sup>3</sup>,吴聪<sup>4</sup>,龚一莼<sup>4</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院,浙江杭州 310027;2. 国能经济技术研究院有限责任公司,北京 102211;  
3. 浙江工业大学信息工程学院,浙江杭州 310023;4. 国网能源研究院有限公司,北京 102209)

**摘要:**未来新能源电力系统的典型特征之一是具备高渗透率的光伏发电,新能源电力系统将面临光伏出力频繁波动和通信性能不良的挑战。此外,新并网的光伏逆变器与现有的配电系统电压管理体系不尽匹配,需要对二者进行协同控制。在此背景下,对高光伏渗透率配电系统的电压协同控制方面的研究进行全面而系统的综述。对高光伏渗透率配电系统的内涵、定义以及电压协同控制亟需解决的矛盾进行概述;围绕分布式光伏逆变器的协同控制策略、逆变器与传统电压控制设备的协同这2个电压协同控制难题,对高光伏渗透率配电系统的相关研究现状进行综述;对这一领域尚待解决的理论和进行展望。

**关键词:**配电系统;运行控制;电压管理;光伏发电;通信性能;分布式控制

**中图分类号:**TM732;TM615

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202309012

## 0 引言

随着我国经济由高速增长向高质量发展的推进,能源生产方式和能源体系结构逐步发生变化。《新时代的中国能源发展》白皮书指出,为了促进经济社会发展全面绿色转型,我国提出了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的国家能源战略<sup>[1]</sup>。为了贯彻落实碳达峰与碳中和的战略目标,能源电力行业的低碳转型迫在眉睫。国家能源局最新发布的数据显示,截至2023年6月底,全国可再生能源发电累计装机容量为 $1.322 \times 10^9$  kW,同比增长约18.2%,占全部电力装机容量的48.8%,其中光伏发电装机容量高达 $4.71 \times 10^8$  kW<sup>[2]</sup>。由此可见,以化石燃料为主的能源结构正逐步被以清洁可再生能源为主的能源体系所取代,而光伏发电作为目前最具大规模应用前景的新能源发电方式之一,受到了工业界和学术界的广泛关注。

虽然集中式光伏发电在我国仍占据主导地位,但是由于土地资源的短缺和远程输电的局限,越来越多的中小型光伏系统正在以分布式发电机的形式馈入中低压配电系统中,以实现本地用户的消纳。目前,发达国家在分布式光伏发电的工业应用方面已经走在了世界前列,例如:澳大利亚约55%的光伏发电装机容量均由14 kW以下的小容量分布式光伏发电系统组成,其中布里斯班市居民住户的个体光伏普及率已突破41%<sup>[3]</sup>;德国在2021年上半年新

增光伏发电装机容量 $2.75 \times 10^6$  kW,其中小型分布式光伏发电累计装机容量为 $2.00 \times 10^6$  kW,约占新增光伏发电总装机容量的73%。可以预见,随着集中式光伏发电装机容量的日趋饱和,作为一种灵活的需求侧资源,分布式光伏发电系统将深度融入未来的智能配电系统中。

然而,逐年攀升的需求侧光伏渗透率正使得传统配电系统中电压控制的难度加大。分布式并网的光伏发电系统会改变配电馈线中的潮流流向,继而诱发反向潮流和过电压问题。由于配电网的电阻-电抗比通常较大<sup>[4]</sup>,这使得电压-无功功率响应不如输电网灵敏,进一步加剧了配电系统电压管理的难度。单相小容量光伏发电系统的随机并网还可能导致三相光伏容量的不平衡<sup>[5]</sup>,且这种不平衡在低压配电系统中尤为显著。在相间不平衡的情形下,一些基于传统无功功率补偿策略的过电压抑制方法(如下垂控制、恒定功率因数控制等)的作用将明显削弱<sup>[6]</sup>。同时,面对数量庞大、分布式配置的小容量光伏发电系统,现有算法的控制效果在较大程度上受制于其所依赖的通信系统。在实际应用中,不可避免的通信时延、丢包使得高光伏渗透率配电系统难以实现可靠的电压实时协同控制。此外,由光伏功率波动引起的电压波动还会导致配电系统中有载调压变压器或步进电压管理器分接头的来回反复切换,从而使设备加速老化甚至损坏<sup>[7]</sup>。

为应对高渗透率光伏发电并网给传统电压管理体系带来的挑战,国内外已经进行了相当多的研究工作。在此背景下,本文力图对高光伏渗透率配电系统电压协同控制问题的研究情况进行全面而系统的综述。首先,对高光伏渗透率配电系统的内涵与电压协同控制技术亟需解决的矛盾进行概述;然后,从分布式逆变器间的协同、逆变器与传统电压管理

收稿日期:2023-08-27;修回日期:2023-09-09

在线出版日期:2023-09-12

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB2403100)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2022YFB2403100)

设备的协同这 2 个方面阐释高光伏渗透率配电系统电压协同控制技术的研究现状;最后,从算法的快速追踪与响应能力、分布式控制与通信系统的耦合、异构电压管理设备的同网运行 3 个角度对未来高光伏渗透率配电系统电压协同控制研究中需要解决的问题进行展望。

## 1 高光伏渗透率配电系统电压协同控制概述

近年来,越来越多的光伏系统正在以分布式发电机的形式接入电力系统中,并将成为未来智能配电系统中重要的需求侧电源之一。在光伏发展初期,电网中的光伏渗透率相对较低,分布式小容量光伏逆变器通常以单位功率因数运行,以最大化资源的利用率。然而,随着全球光伏市场规模的扩大,光伏发电间歇性所引起的快速电压波动与电能质量问题不容忽视<sup>[8]</sup>。

### 1.1 高光伏渗透率配电系统的内涵与定义

对于特定的配电系统而言,高光伏渗透率意味着光伏发电在该地区占据了较高的比例。高光伏渗透率通常是一个定量百分比的概念,可采用以下几种形式表示:光伏发电装机容量占总装机容量或峰值负荷的比例;光伏发电量占总发电量的比例;光伏功率占负荷功率的比例;配置有光伏的用户数占总用户数的比例(常用于户用光伏并网研究);光伏发电装机容量占上游变压器容量的比例(澳洲配电公司 Energex 所采用的专用于配电网的光伏渗透率定义)。若以光伏发电装机容量占总装机容量的比例表示光伏渗透率,则本文初步将光伏渗透率划分为以下 3 个阶段:较低的渗透率,光伏发电装机容量占比较低,光伏渗透率阈值低于 10% 或 20%;中等的渗透率,光伏发电装机容量占比相对均衡,光伏渗透率阈值为 20%~50%;高渗透率,光伏发电装机容量占比较高,且对电力供应产生显著影响(例如,引起反向潮流,使输出功率剧烈波动,频繁触发过电压故障),光伏渗透率阈值可达 50% 以上,具体的高光伏渗透率阈值需要根据特定情况和标准而定,因地区、系统容量、输配电网等因素而有所不同。

对于不同的配电系统而言,由于网架结构、线路参数、光伏渗透率、三相不平衡度等因素均会对系统的电压管理产生影响,因此安全光伏渗透率水平也有所区别。文献[9]对 IEEE 13 节点标准测试系统开展研究,指出当光伏渗透率(光伏功率/负荷功率)超过 40% 时将显著影响配电网节点的电压稳定。文献[10]报道澳大利亚昆士兰大学装机容量为 3.275 MW 的校属并网光伏电站的运行情况,在高光伏、低负荷的运行场景下该校园配电系统的瞬时光伏渗透率可高达 200%。文献[6, 11]以低压配电网为研究对象,指出三相光伏功率的不平衡程度对配

电系统中的过电压问题有显著影响。事实上,仅采用现行的逆变器本地无功功率控制,光伏渗透率低且三相不平衡的情形比光伏渗透率较高且三相平衡的情形更易引起配电系统的过电压故障,因此,并不能将光伏渗透率作为唯一的指标来衡量配电系统发生过电压风险的可能性。

2018 年, *IEEE Transactions on Power Systems* 关于“高渗透率可再生能源接入对电力系统的影响”的主题专刊<sup>[12]</sup>收录了众多关于高光伏渗透率配电系统的研究。虽然目前的文献对高光伏渗透率配电系统并没有形成一个统一的定义,但现有定义拥有一个共同的特征,即高光伏渗透率配电系统不同于传统配电系统潮流从上游网络单向流向负荷的特性,其反向潮流问题将引起节点电压升高,给配电系统的运行与控制带来困难。

因此,本文将高光伏渗透率配电系统描述为具有光伏集成度高、出力剧烈波动、易引起过电压故障特征的配电系统。在当前我国配电系统光伏渗透率日益攀升、系统向高光伏渗透率配电系统转变的大背景下,本文着重于探索高光伏渗透率配电系统的潜在运行难题及其解决方案,旨在为未来间歇性可再生能源的大规模并网提供可靠的理论参考。

### 1.2 电压协同控制技术亟需解决的矛盾

光伏发电系统的输出功率与周围的环境密切相关。由于中低压配电系统地域范围小,在多云有风的气象条件下极易造成域内光伏电板在短时间内被云层全部覆盖,继而诱发光伏功率的剧烈波动,典型日光伏功率曲线如图 1 所示(图中光伏功率为标幺值)。数据研究表明,快速移动的云层覆盖会使光伏发电系统在几分钟内丧失高达 80% 的有功功率<sup>[11]</sup>,

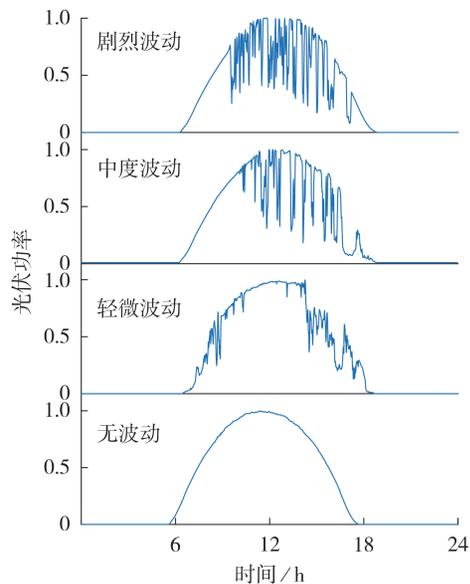


图 1 典型日光伏功率曲线

Fig.1 Typical daily photovoltaic power curves

因此,光伏功率的快速波动是高光伏渗透率配电系统无法回避的问题。

传统的逆变器无功功率控制算法因仅依靠本地量测而可以迅速响应光伏功率或者本地电压的变化,但这些缺少协同的算法在应对无功功率分配、网损控制、系统不平衡等方面的问题时存在缺陷,因此,在有效可靠的光伏逆变器协同控制算法推广应用之前,供电公司不得不通过限制光伏渗透率的方式维持系统的电压稳定<sup>[13]</sup>。针对高光伏渗透率配电系统电压协同控制技术的迫切需求,本文将当前阶段亟需解决的主要矛盾归纳为以下2个方面。

1)逆变器的实时协同控制需求与所依赖的非完美通信系统间的内部矛盾。传统的协同控制算法往往需要在多次迭代收敛后才能更新分布式光伏逆变器的运行点,因而在计及光伏功率快速波动和通信延迟的情形下,传统的协同控制算法给出的逆变器最优运行点总是滞后于光伏功率的变化。因此,在实际应用中,若采用传统的协同控制算法,则不仅无法保证最优运行,而且可能恶化配电系统的电压状况。此外,传统的协同控制算法通常假设所依赖的通信系统完全可靠,而在实际应用中,一旦出现数据丢包,甚至个别通信链路中断的情况,传统协同控制算法就会失效,从而导致配电系统的电压管理体系完全崩溃。

2)逆变器的连续优化运行需求与现有的传统离散电压管理体系间的外部矛盾。在网运行的有载调压变压器是通过动作延时、死区范围、参考电压等指标的离散控制规则调节其分接头位置的,然而,新增入网的光伏逆变器与传统调压体系下运行的现有电压管理设备在控制逻辑及响应速度上存在较大的差异,在缺乏有效协同机制的情况下,遵循不同规则的新旧电压管理设备在同一配电系统中运行极有可能产生不良的交互影响,这使电压控制效果相互抵消,过电压及电压剧烈波动无法消除,同时使调压设备负担陡增(如储能反复充放电、变压器分接头频繁切换、逆变器无功功率补偿长期过饱和等),进而导致设备的加速老化甚至损坏。

## 2 分布式光伏逆变器的协同控制策略

为应对日益升高的光伏渗透率所带来的过电压挑战,IEEE 1547标准<sup>[14]</sup>首次允许分布式小容量光伏逆变器通过输出无功功率的方式参与配电系统的电压管理,并给出了诸如恒定功率因数策略、功率因数下垂控制策略等本地电压控制方法。然而,这类本地电压控制方法由于缺乏设备间的协调,可能会导致位于馈线末端的逆变器无功功率输出过饱和,进而使光伏逆变器丧失参与系统电压调节的能力,因此,在这些缺少必要协同的逆变器无功功率控制

模式下,配电系统可安全容纳的光伏功率十分有限。为显著提高配电系统对光伏发电的消纳能力,必须对分布式光伏逆变器进行精细化的协同控制。

### 2.1 基于集中式优化的协同控制策略

早期设计的逆变器协同控制策略依赖于最优潮流问题的集中式求解,如图2(a)所示,配电系统中的控制中心需先从所有节点采集必要的电气信息,集中求解优化问题,再将控制命令分发给各逆变器来执行。例如:文献[15]利用序列二次规划算法来优化协同控制三相四线配电系统中分布式光伏逆变器的无功功率输出和有功功率削减;文献[16-17]分别采用序列凸规划算法和线性规划算法来对优化问题进行集中式求解。典型的优化算法还包括二阶锥规划<sup>[18]</sup>、半正定规划<sup>[19]</sup>、原对偶梯度法<sup>[20]</sup>等。此外,文献[21-22]分别采用概率潮流与模型预测控制来处理光伏出力的不确定性。

集中式优化算法需要控制中心预先建立精确的配电网架构,并实时采集全网各分布式电源的运行工况,这对于结构复杂多变的配电系统而言,难以实现且侵犯了用户隐私。此外,集中式优化算法高度依赖于完美可靠的通信系统,大量数据传输所造成的通信时延与计算时延使其难以实现对配电系统电压的实时监测与管理。

### 2.2 基于分布式优化的协同控制策略

相较于集中式优化算法,去中心化的分布式优化算法对系统的单点故障具有较强的鲁棒性,且极大程度上保障了用户信息的隐私性。同时,分布式优化算法可将集中于控制中心的计算压力分配到各个具有独立运算功能的节点上,因而比集中式优化算法具有更好的可扩展性<sup>[23-24]</sup>。

分布式协同控制策略依赖于对原始集中式问题的分布式求解,各终端用户(或配电网运营商)根据预先制定的控制目标共同合作进行集体决策,以达到全局最优。在该控制策略下,各控制器仅需与相邻节点进行通信便可确定系统的整体控制决策,如图2(b)所示。分布式协同架构的最终目的是使区域电网能够通过相邻节点间的交互实现对本地突发问题的解决。常见的分布式优化算法主要包括梯度上升法<sup>[19]</sup>、对偶上升法<sup>[25]</sup>、交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)<sup>[26-28]</sup>等。例如:文献[25]基于对偶上升法推导出一种分布式在线电压控制方法,该方法通过实时更新光伏逆变器的无功功率补偿量和有功功率削减量保证在母线电压稳定的前提下最小化网络损耗;文献[26]基于ADMM构建多区域电压分布式协同优化控制框架,该框架可通过调整优化目标的权重系数实现配电网电压协同控制目标的灵活转变;文献[27]面向规模化储能系统,基于改进ADMM提出一种完全分布式

的储能系统充放电管理与配电网电压快速支撑方案,相较于集中式优化方法,该控制方案在新增并网储能设备时表现出更强的扩展能力。梯度上升法、对偶上升法、ADMM 的优缺点如表 1 所示。

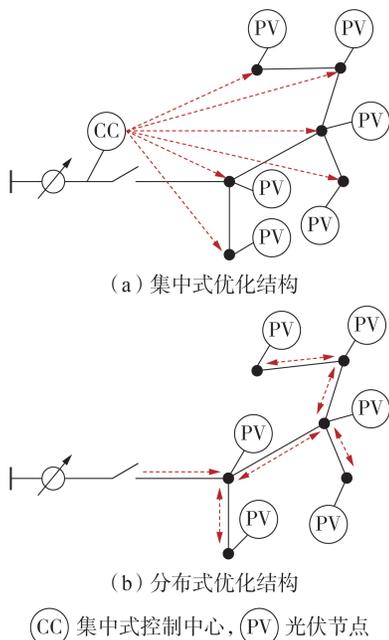


图 2 集中式优化与分布式优化结构

Fig.2 Centralized and distributed optimization structures

以上分布式优化算法可处理有限通信和低带宽下的控制问题,并提供“即插即用”的灵活拓扑结构,这种灵活多变的特性使其在应对智能配电系统电压协同控制问题时既能充分发挥全网需求侧资源的潜力,又能积极发挥区域电网的自治能力,因此,近年来分布式优化算法受到国内外专家学者的广泛关注。

### 2.3 基于一致性算法的协同控制策略

除了 2.2 节的分布式优化算法外,还可以通过其他分布式控制方案实现逆变器的协同。不同于分布式优化算法通过求解局部优化问题找到全局最优解,分布式控制方案更侧重于根据局部信息来操控系统运行的实时性行为,以满足系统的某些性能要求或约束,例如:文献[29]采用极限搜索控制算法来调节逆变器的无功功率输出,从而使逆变器参与配

电系统电压管理;文献[30]利用李雅普诺夫优化算法在线分配分布式储能系统的充放电功率,同时保证配电系统的电压始终在允许的范围内。

一致性算法是一种新兴的分布式协同控制算法,因具有计算复杂度低、运算量小、不依赖于电网物理模型等特点而被广泛应用于微电网或配电网的电压协同控制中。本地控制算法由于缺少必要的协同容易使无功功率在不同光伏逆变器间的分配非常不平衡,一种极端的情形是,位于配电馈线末端的光伏逆变器已不堪重负,而位于配电馈线上游的光伏逆变器则因较为健康的本地电压而完全没有参与配电系统的电压管理。对此,一致性算法可以依靠有限的通信,在分布式光伏逆变器间重新分配过电压抑制所需的有功/无功功率调节资源。

图 3 以 3 节点低压配电系统为例,展示了离散一致性算法的效果。在初始状态下,仅节点 3 上的光伏逆变器为抑制本地过电压风险而提供了 0.8 kvar 的无功功率补偿,而在采用离散一致性算法后,经过几次迭代后,0.8 kvar 的无功功率补偿量根据安装容量比例(1:2:1)重新分布在所有的光伏逆变器上,达到了协同运行的效果,避免了个别逆变器在电压管理中的无功功率补偿过饱和。因此,一致性算法本质上是一种按照一定的权重比例分布式求平均的算法。

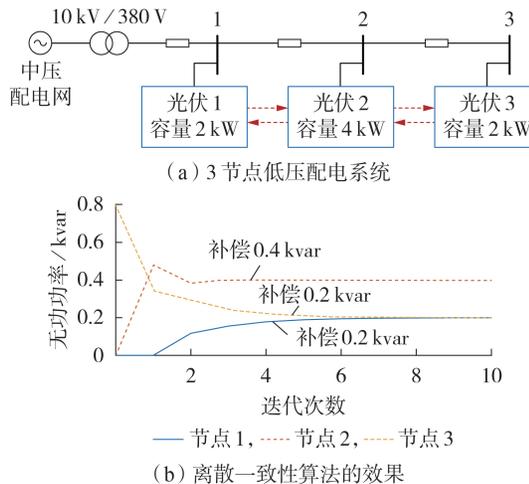


图 3 离散一致性算法在 3 节点低压配电系统中的效果  
Fig.3 Effect of discrete consensus algorithm in 3-bus low-voltage distribution system

表 1 分布式优化算法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of distributed optimization algorithms

算法	优点	缺点
梯度上升法	简单易实现,可并行化,具有实时性	易陷入局部最优解,对初始参数值的选择较敏感,仅适用于可微问题
对偶上升法	适用于非凸问题,在特定条件下具有全局收敛性,对偶变量可为优化问题提供直观的解释	收敛速度较慢(尤其在非凸问题中),难以确定收敛性
ADMM	适用于非凸问题,具有较好的数值稳定性,适用于带有约束的优化问题	需要仔细调整超参数(如乘子的更新步长等),收敛速度依赖于对优化问题的分解方式

一致性算法因其实用性被广泛应用于逆变器无功功率调节、储能有功功率控制等领域中,例如:文献[31]基于一致性算法提出一种将光伏逆变器无功功率本地控制与分布式协同控制相结合的电压控制架构;文献[32]以有功功率一致为目标,提出将电动汽车储能电池能量管理与光伏削减相结合的配电系统电压控制方法;文献[33]制定先调节逆变器无功功率后调节储能有功功率的两阶段分布式一致性控制策略;文献[34]也将一致性算法应用于配电系统电压管理。此外,一致性算法还可应用于配电系统在线资源的优化分配,例如:文献[35]利用一致性算法使得全网分布式发电的增量成本趋于一致,从而提高系统运行的经济性;文献[36]基于所建立的随机通信延时模型,利用增益调整函数均方差一致性算法实现配电系统源-荷-储的协调运行。

然而,上述一致性算法由于将静态参考信号作为算法的初始化条件,难以有效地追踪时变的输入目标,因此,早期的一致性算法仅适用于追踪目标较为稳定的静态系统,当应用于含多移动智能体的动态系统时,无法进行准确可靠的实时决策。为克服上述缺陷,文献[37]首次提出持续地将时变输入信号注入动态系统中,从而使系统无须重新初始化便可自动响应外界参考信号的变化,然而,该动态一致性算法存在2个隐患:第一个是强初始化条件需求,即初始化参数必须准确无误,若初始量测信号存在扰动误差,则该误差将伴随整个控制过程;第二个是不允许任何分布式控制器永久离网,否则算法始终存在稳态误差。对此,文献[38-39]分别基于无向图与有向图提出能够对抗初始化扰动误差以及控制器永久离网的鲁棒动态一致性算法,并推导出算法收敛误差与通信系统连通性和参考信号变化率的代数关系。此外,有研究分别从可控收敛速度<sup>[40]</sup>、事件触发机制<sup>[41]</sup>、时变通信拓扑<sup>[42]</sup>、用户隐私保护<sup>[43]</sup>等方面对动态一致性算法进行改进。改进后的动态一致性算法可适用于实际系统的动态控制中,例如多机器人协调、传感器融合、分布式跟踪、智能电网等。

#### 2.4 基于规则动作的协同控制策略

目前,大多在网运行的传统电压控制设备是基于给定规则进行动作的,例如,有载调压变压器通过电压降补偿(line drop compensation, LDC)法或者远程监测获得目标节点的实时电压值;若该电压持续超过设定的上限值一定时间,则变压器分接头向下动作;若该电压持续超过设定的下限值一定时间,则变压器分接头向上动作。类似地,目前大多在网运行的电容器投切(如目标-死区-时延控制)、电池充放电(滑动平均法)等是依据事先制定的规则动作的。

基于规则的运行策略同样适用于光伏逆变器的

协同控制,例如:文献[44]设计5种不同的光伏逆变器运行模式来分别应对不同的场景,在一定的规则下,仅需少量的广播通信便可协调控制分布式光伏逆变器运行模式的切换;文献[45-46]也提出类似的多模式光伏逆变器协同控制方案;文献[6]推导不平衡配电系统中三相电压/无功功率的响应规律,并在此基础上设计无功功率相间协同控制策略,以应对低压配电系统中光伏功率接入的不平衡所带来的电压管理挑战。

#### 2.5 基于多层结构的协同控制策略

由于计算与通信时延,现有大多仅基于集中式或分布式的优化算法无法较好地跟踪快速波动的光伏功率,双(多)层控制策略可在一定程度上解决该矛盾。通常这类控制策略的上层算法用于系统层面的协同,因此需要以较低频率获取整个电网的全局信息;而这类控制策略的下层算法负责实时电压管理,仅需实时更新本地量测值以及定时更新全局协同指令,因而可以十分迅速地响应本地光伏功率的快速变化<sup>[47]</sup>。多层控制策略的一个特例是通过离线计算拟定控制策略的参数,以适应所有可能的光伏功率变化值,例如,文献[48-49]为分布式光伏逆变器设计不同的无功功率输出对有功功率变化的响应曲线,通过离线优化给不同的光伏逆变器分配合适的响应曲线参数,从而兼顾实时快速响应与全局协同控制。

#### 2.6 非完美通信系统对协同控制策略的影响

在设计传统的协同控制算法时都是以无延时、无丢包的完美通信系统为前提的,当将其应用于实际通信系统中时,由于不可避免的时延、丢包,甚至个别通信链路故障,算法的控制性能都将严重下降。为抑制非完美通信系统对分布式协同控制的影响,已有研究对此进行了初步探索。文献[50]考虑通信带宽和网络容量的限制,提出一种分布式在线电压控制算法,通过采用“冻结”策略(即每个变量的值保持不变,直至收到来自相邻节点的新信息)应对更新迭代过程中可能出现的随机链路故障问题。文献[36,51]通过引入一致性增益函数有效抑制了遥测过程中传输时延带来的影响以及量测误差和信道噪声导致的数据畸变。此外,传统分布式算法中的独立计算单元通常是遵循同步接受信息、同步更新计算、同步发出信息的原则推进算法迭代收敛的,然而,当个别通信链路出现高延迟、数据丢包等事件时,所有分布式智能体必须等待故障单元被处理并恢复数据传输后,才可延续迭代进程。文献[52]提出一种全分布式异步迭代算法,并设计4种不同的控制策略,以提高算法在高延迟环境下的收敛速度。虽然以上算法均能较好地处理通信系统的极端时延问题,但仅定性分析时延的时滞影响,而未对随机时

延进行数学建模,因此难以准确描述通信时延对算法收敛性能的量化影响。对此,文献[53]建立随机时延的离散时间模型,该模型允许接收端同时接收来自发送端不同时刻发出的多个信息,从而刻画信息传输在时序上的差异。文献[54]设计一种对数据丢包具有鲁棒性的双动态一致性算法,并利用遍历性理论证明所提算法的收敛性。文献[55]基于非完美通信网络发展一种异步通信机制,在该机制作用下的一致性算法呈指数收敛于预期的控制目标。为进一步解析随机时延和数据丢包对协同控制策略的双重影响,文献[56]通过制定虚拟节点及其随机状态转移矩阵以离散化的形式实现对分布式光伏节点之间信息传递过程的数学建模,进而针对性地设计一种基于异步迭代规则以及信息校验补偿机制的新型一致性算法。文献[57]在文献[56]的基础上将静态一致性算法扩展至动态一致性算法,以实现依赖于通信网络的分布式算法对快速波动光伏功率的实时追踪,并理论推导所提算法实时跟踪的误差上限。文献[58-59]基于ADMM提出考虑通信时延的异步迭代算法,但该算法需要一个控制中心来收集网络信息,并不是真正意义上的分布式算法。

### 3 逆变器与传统电压管理设备的协同

随着小容量光伏发电系统的持续并网,逆变器不同运行方式对配电系统电压的影响以及新旧异构电压管理设备间的交互作用逐渐变得不可忽视。不同设备间的良性交互运行能够显著降低配电系统的整体电压管理成本以及延缓设备的老化过程。因此,亟需探索配电系统中遵循完全异构动作规则的新旧调压设备间的协同运行机理,以期设计出既符合工业实践惯例又满足技术先进性的多设备同网运行协同控制架构,从而解决高光伏渗透率配电系统的异构设备电压管理问题。

#### 3.1 光伏并网下的配电系统电压管理体系

有载调压变压器、步进电压管理器等传统调压设备在当前的配电系统电压管理体系中起着关键性作用。图4为多电压等级的典型配电系统结构。图中,高压配电系统通过一座35 kV/10 kV变电站与数

条中压配电馈线相连,通常情况下,变电站中的有载调压变压器能通过合理调节分接头位置使变电站下游所有中压配电馈线的电压始终处于允许范围之内。然而,若一条馈线负荷较重,沿线电压降较大,同时另一条馈线中注入大量的光伏功率,产生的反向潮流显著提高了该馈线的电压水平,则由于不同馈线间存在巨大的电压差,仅靠变电站中的有载调压变压器无法有效地控制所有中压配电系统的电压,因此在实际配电系统中,对于较长的馈线(沿线的电压变化也较大),通常会在其中部加装步进电压管理器(一般为自耦变压器),从而加强对长馈线的电压管理。通过设定不同的动作延时来使上下游变压器进行协同调压,一般而言,电压等级越高的有载调压变压器的分接头动作时延越短。低压配电系统通过10 kV/380 V变压器与中压配电系统相连,这类变压器的分接头通常是固定的,因而这类变压器不参与配电系统的实时电压管理。

#### 3.2 基于下垂控制的逆变器与传统离散调压体系的协同

不断并网运行的分布式光伏逆变器的电压管理行为不可避免地会与配电系统原有的电压管理体系产生交互影响。图5展示了光伏逆变器某一典型无功功率下垂控制曲线示意图,图中 $V_1$ — $V_4$ 为下垂控制曲线中的转折点。光伏逆变器可根据测得的本地电压自适应地调整输出功率的功率因数,从而参与对并网点电压的调节。通常配电系统对并网设备会有最低功率因数的限制,因此该下垂控制曲线的两端分别为0.9的容性滞后功率因数和0.9的感性超前功率因数。下垂控制是一种典型的基于规则动作的控制方法,转折点 $V_1$ — $V_4$ 刻画了光伏逆变器的功率因数随并网点电压变化而变化的响应规律,以及该光伏逆变器可高效平抑电压波动的工作电压范围。

若仅依赖于逆变器下垂控制,则当系统电压因日内负荷的缓慢变化而产生较大范围的偏移时,光伏逆变器将偏离预设的工作电压范围。此时,光伏逆变器的无功功率补偿电压控制效率将显著降低,甚至出现无功功率饱和、电压管理失效等问题。此外,相对较大的配电馈线电阻-电抗比以及并网设备

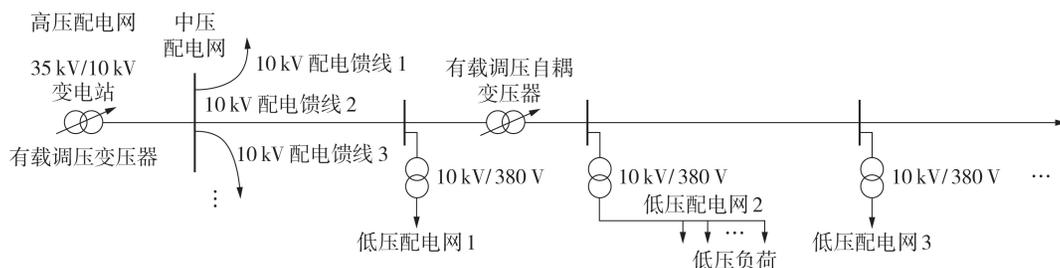


图4 多电压等级的典型配电系统

Fig.4 Typical distribution system with multiple voltage levels

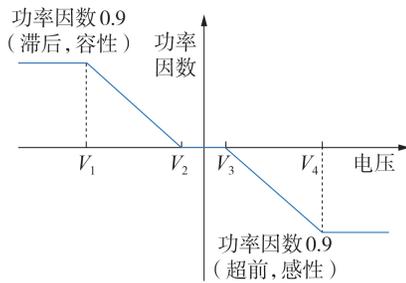


图5 典型无功功率下垂控制曲线示意图  
Fig.5 Schematic diagram of typical droop control curve of reactive power

最低功率因数的限制共同削弱了中低压配电系统中逆变器无功功率补偿的电压控制效果。因此,分布式光伏逆变器的整体电压管理行为应与现有传统电压管理设备的运行规则相协调,以解决高光伏渗透率配电系统的实时电压协同控制难题。传统电压管理设备(如有载调压变压器)的响应速度慢,电压管理范围大,调压成本低,这使其适用于调节大范围缓慢发展的电压变化趋势(如由日内峰谷负荷引起的电压变化)。而光伏逆变器的响应速度快,电压管理范围小,调压成本高,这使其适用于调节由光伏功率快速波动引起的电压变化。然而,由光伏、负荷或上游电压波动引起的下游电压变化都将耦合在一起,共同作用于配电系统中所有的电压管理设备。文献[60]通过修改有载调压变压器的设置参数(参考电压、动作时延、死区范围等)实现有载调压变压器与光伏逆变器的协同运行。文献[10]通过合理设计光伏电站有功/无功功率控制算法的参数主动协同(无需通信)配电馈线上游步进电压管理器的分接头动作。文献[7]通过绘制电压-光伏功率曲线的方法近似解耦上游步进电压管理器与光伏逆变器无功功率补偿对公共耦合点电压的影响,在此基础上离线优化功率因数-电压下垂控制曲线的参数,从而极大提高受最小功率因数限制的有限无功功率补偿对公共耦合点电压剧烈波动的缓解作用。

因此,在分布式逆变器与传统电压管理设备间合理地分配调压任务可提高配电系统的运行效率。目前,基于下垂控制的逆变器与传统离散调压体系的协同主要依赖于逆变器下垂控制参数的合理设计,并使得有载调压变压器与分布式光伏逆变器“自发”有选择地响应不同类型的系统电压波动,从而实现下游光伏逆变器与上游有载调压变压器的协同运行。

### 3.3 基于优化控制的逆变器与传统离散调压体系的协同

为处理分布式光伏逆变器的整体电压管理行为与配电系统中现有电压管理设备(如有载调压变压器)的协同运行问题,另一种比较常见的做法是将光

伏逆变器的运行点与现有电压管理设备的动作指令放在同一个优化问题中进行求解,例如:文献[61]基于场景削减技术和模型预测控制算法来求解最优的有载调压变压器分接头位置、电容器投切状态以及逆变器运行点;文献[47]提出一种3层优化调度策略来协同光伏逆变器与其他电压管理设备的运行;文献[62]根据小时级的负荷与光伏预测信息确定有载调压变压器分接头的位置,再利用功率因数控制策略调节分布式光伏逆变器的无功功率输出。借助优化算法,分布式逆变器可以通过合理调节其有功/无功功率的输出将并网点电压精确地控制在允许范围之内,同时还能实现网损最小、光伏功率削减最小等最优控制目标。

然而,基于连续实时优化的协同控制方案不符合现有配电系统基于离散规则控制的电压管理体系,若未加协同的异构调压设备同网运行,则可能会导致系统出现电压紊乱等问题。中压配电馈线上的有载调压自耦变压器通常采用LDC法估算远端受控点的电压,并以此触发分接头动作。通过调整LDC参数可相应改变有载调压自耦变压器对配电系统下游区域电压的容差度及控制范围。异构调压设备同网运行示意图如图6所示,有载调压变压器会在测量值连续越过电压死区上界一定时间(即动作延时)后通过触发分接头动作消除潜在的过电压风险。然而,在有载调压变压器分接头动作之前,该过电压风险同样也会被分布式光伏逆变器监测到,进而激发逆变器的实时电压-有功/无功功率控制响应。若来自逆变器的电压矫正过于强烈,则测量值会很快地跌落到触发分接头动作的电压死区上界以下,进而使有载调压变压器根据LDC规则判断过电压风险已消除同时使计时器清零。在该情形下,有载调压变压器的调压作用无法发挥,配电系统的过电压抑制负担将长时间完全由分布式逆变器承担,从而导致光伏逆变器无功功率补偿过载,最终使得逆变器失去对配电系统电压的控制能力。因此,亟需建立具有通用性的协同控制框架,以将同网运行的、遵循完全异构动作规则的不同电压管理设备有机地融入统一的电压控制体系中。

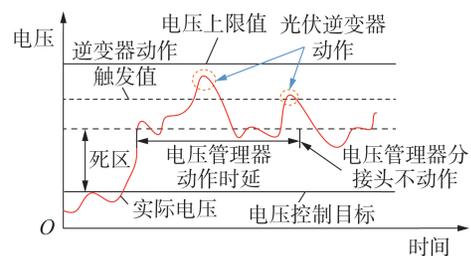


图6 异构调压设备同网运行示意图  
Fig.6 Schematic diagram of different voltage regulation devices operating in one network

以一致性算法为代表的分布式协同控制策略具有解决与传统调压设备协同问题的潜力,通过对一致性算法设计合适的事件触发机制侦听系统状态变化或控制需求,当电压短时间内连续超出某个阈值时,触发事件通知,从而使传统电压管理设备能够有效地应对较大范围的电压波动,以减轻逆变器负担。此外,还可以按照电气距离远近以及电压耦合关系的强弱将含多个电压等级的配电系统以不同的调压设备为中心划分成不同的电压控制区域。各调压设备主要负责其自身控制区域内的实时电压控制任务,同时也可对相邻控制区域进行辅助调压。根据区域电压控制规则,设计控制目标,优化控制参数,合理划分控制任务,使得各种电压管理设备在面对不同电压波动类型时“有所为,有所不为”,从而充分发挥各自优势,实现良性协同,最终彻底解决高光伏渗透率配电系统的实时电压协同控制难题。

#### 4 尚待解决的主要问题

为加强对清洁可再生光伏能源的利用以及提升高光伏渗透率配电系统运行的可靠性和经济性,将目前亟待解决的关键性问题总结如下。

1)对光伏功率的快速追踪与响应能力亟待加强。现有的大多分布式协同算法需要经过大量的通信以及迭代运算收敛后才能用于调节逆变器的运行点,因而无法有效地实时跟踪光伏功率的快速波动,其实用性有待加强。因此,目前在网运行的光伏逆变器仍以本地控制为主要手段来响应光伏功率的快速变化,而缺少协同的分布式逆变器在抵御由三相不平衡、反向潮流所引起的过电压问题时十分脆弱。

2)非完美通信系统下算法的鲁棒性亟待加强。在设计现有的分布式协同算法时大多以无时延、无丢包的完全可靠通信系统为前提,因此,在每步迭代中,现有的分布式协同算法要求所有的计算单元(分布式逆变器)同步获取信息、同步处理信息以及同步发出信息,从而迭代推进算法的全局收敛。而在实际非完美的通信系统中,一旦出现时延、丢包,甚至个别通信链路故障的情况,现有分布式协同算法的性能将严重下降,乃至整体崩溃。

3)同网异构电压管理设备的协同运行亟待加强。现有配电系统所依赖的传统电压管理设备大多遵循包含控制目标、死区、动作时延等指标的离散规则体系来进行调压动作,而新兴的分布式光伏逆变器协同运行的发展方向是算法与通信相融合的实时控制模式。由于缺乏有效的协同设计,这2种迥异的电压管理体系在同一配电系统中极有可能产生不良的交互影响,使得电压控制效果相互抵消,电压管理设备负担陡增,从而导致相应设备的加速老化甚至损坏。

#### 5 结论

光伏能源因其分布式接入、不稳定出力等特点而日益挑战传统配电系统的电压管理模式,并频繁诱发过电压故障、电压剧烈波动、有载调压变压器过动作等问题。现有的大多分布式光伏逆变器协同控制算法以绝对可靠的通信系统为前提,并假设光伏功率在算法收敛之前不会有较大的变化,因此,现实中的非完美通信以及光伏功率的快速波动都会显著降低这类算法的有效性。对此,本文认为高光伏渗透率配电系统电压协同控制技术还存在诸多问题亟待解决,可从包括但不限于以下几个方面进行突破:

1)设计具有快速响应特性的分布式算法,使逆变器可以动态追踪因系统状态实时变化(如光伏功率波动)而改变的整体运行目标,即无须等待算法收敛便可实时更新各逆变器的控制变量;

2)制定实际非完美通信环境下的协同策略,控制算法需对应用中存在的通信时延、丢包,甚至个别通信链路中断具有一定的鲁棒性,并具有异步迭代收敛的特性;

3)提出异构设备间的协同控制架构,通过合理设置逆变器的控制参数使得实时电压控制算法能够有机地融入现有依照离散规则运行的配电系统电压管理体系中。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展[EB/OL]. (2020-12-21)[2020-12-21]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1695117/1695117.htm>.
- [2] 国家能源局. 我国可再生能源发电总装机突破13亿千瓦[EB/OL]. (2023-07-19)[2023-07-19]. [http://www.nea.gov.cn/2023-07/19/c\\_1310733273.htm](http://www.nea.gov.cn/2023-07/19/c_1310733273.htm).
- [3] Australian PV Institute. PV postcode data[EB/OL]. (2021-06-30)[2021-06-30]. <https://pv-map.apvi.org.au/postcode>.
- [4] 祖文静,李勇,谭益,等. 高渗透率可再生能源配电网测试系统建模与有效性分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):45-50. ZU Wenjing, LI Yong, TAN Yi, et al. Modeling and effectiveness analysis on test system for distribution networks with high penetration of renewable resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 45-50.
- [5] SCHWANZ D, MÖLLER F, RÖNNBERG S K, et al. Stochastic assessment of voltage unbalance due to single-phase-connected solar power[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 852-861.
- [6] WANG L C, YAN R F, BAI F F, et al. A distributed inter-phase coordination algorithm for voltage control with unbalanced PV integration in LV systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2687-2697.
- [7] WANG L C, YAN R F, SAHA T K. Voltage management for large scale PV integration into weak distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4128-4139.
- [8] 杨宇. 高光伏渗透率配电网实时电压协同控制研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2022. YANG Yu. Research on real-time voltage cooperative control in high PV penetration distribution networks[D]. Hangzhou:

- Zhejiang University of Technology, 2022.
- [9] YAN R F, SAHA T K. Investigation of voltage stability for residential customers due to high photovoltaic penetrations [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(2): 651-662.
- [10] WANG L C, BAI F F, YAN R F, et al. Real-time coordinated voltage control of PV inverters and energy storage for weak networks with high PV penetration [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(3): 3383-3395.
- [11] WANG L C, YAN R F, SAHA T K. Voltage regulation challenges with unbalanced PV integration in low voltage distribution systems and the corresponding solution [J]. *Applied Energy*, 2019, 256: 113927.
- [12] KANG C Q, CHEN Z, ZHANG N, et al. Guest editorial for the special section on enabling very high penetration renewable energy integration into future power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(3): 3223-3226.
- [13] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规定: Q/GDW 617—2011 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [14] IEEE Standards Association. IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces: IEEE Std 1547-2018 [S]. New York, USA: IEEE, 2018.
- [15] SU X J, MASOUM M A S, WOLFS P J. Optimal PV inverter reactive power control and real power curtailment to improve performance of unbalanced four-wire LV distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, 5(3): 967-977.
- [16] DESHMUKH S, NATARAJAN B, PAHWA A. Voltage/var control in distribution networks via reactive power injection through distributed generators [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(3): 1226-1234.
- [17] WANG Z Y, CHEN H, WANG J H, et al. Inverter-less hybrid voltage/var control for distribution circuits with photovoltaic generators [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(6): 2718-2728.
- [18] LI Y, XIAO J X, CHEN C, et al. Service restoration model with mixed-integer second-order cone programming for distribution network with distributed generations [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 4138-4150.
- [19] ZHANG B S, LAM A Y S, DOMÍNGUEZ-GARCÍA A D, et al. An optimal and distributed method for voltage regulation in power distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(4): 1714-1726.
- [20] DALL'ANESE E. Optimal power flow pursuit [C]//2016 American Control Conference (ACC). Boston, MA, USA: IEEE, 2016: 1767.
- [21] 王洪涛, 李晓刚, 邹斌. 基于贝叶斯网络刻画风-光-荷相关性的配电网概率潮流计算 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(16): 4753-4763, 4977.
- WANG Hongtao, LI Xiaogang, ZOU Bin. Probabilistic load flow calculation of distribution system based on Bayesian network to depict wind-photovoltaic-load correlation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(16): 4753-4763, 4977.
- [22] 张颖, 季宇, 唐云峰. 基于MPC含分布式光伏配电网有功功率-无功功率协调控制 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(21): 140-146.
- ZHANG Ying, JI Yu, TANG Yunfeng. Coordinated control of active and reactive power for distribution network with distributed photovoltaic based on model predictive control [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(21): 140-146.
- [23] 朱星旭, 韩学山, 杨明, 等. 含分布式光伏与储能配电网时变最优潮流追踪的分布式算法 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(9): 2644-2658.
- ZHU Xingxu, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. A distributed algorithm for time-varying optimal power flow tracking in distribution networks with photovoltaics and energy storage [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2644-2658.
- [24] 吴润基, 王冬晓, 谢昌鸿, 等. 空调负荷参与配电网电压管理的分布式控制方法 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(6): 215-222.
- WU Runji, WANG Dongxiao, XIE Changhong, et al. Distributed control method for air-conditioning load participating in voltage management of distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(6): 215-222.
- [25] LI J Y, XU Z, ZHAO J, et al. Distributed online voltage control in active distribution networks considering PV curtailment [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(10): 5519-5530.
- [26] 姜涛, 张东辉, 李雪, 等. 含分布式光伏的主动配电网电压分布式优化控制 [J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(9): 102-109, 125.
- JIANG Tao, ZHANG Donghui, LI Xue, et al. Distributed optimal control of voltage in active distribution network with distributed photovoltaic [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(9): 102-109, 125.
- [27] 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.
- [28] 吴毓峰, 杨胜春, 潘振宁, 等. 无协调主体的多产消者完全端到端交易机制 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(3): 96-103.
- WU Yufeng, YANG Shengchun, PAN Zhenning, et al. Complete peer-to-peer transaction mechanism for multiple prosumers without coordination entity [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(3): 96-103.
- [29] ARNOLD D B, NEGRETE-PINCETIC M, SANKUR M D, et al. Model-free optimal control of VAR resources in distribution systems: an extremum seeking approach [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(5): 3583-3593.
- [30] GUPTA S, KEKATOS V, SAAD W. Optimal real-time coordination of energy storage units as a voltage-constrained game [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 3883-3894.
- [31] ROBBINS B A, HADJICOSTIS C N, DOMÍNGUEZ-GARCÍA A D. A two-stage distributed architecture for voltage control in power distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 1470-1482.
- [32] ZERAATI M, HAMEDANI GOLSHAN M E, 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*, 2019, 10(1): 670-680.
- [33] 张博, 唐巍, 蔡永翔, 等. 基于一致性算法的户用光伏逆变器和储能分布式控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2): 86-94.
- ZHANG Bo, TANG Wei, CAI Yongxiang, et al. Distributed control strategy of residential photovoltaic inverter and energy storage based on consensus algorithm [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2): 86-94.
- [34] WANG Y, TAN K T, PENG X Y, et al. Coordinated control of distributed energy-storage systems for voltage regulation in distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(3): 1132-1141.

- [35] 蒲天骄,刘威,陈乃仕,等. 基于一致性算法的主动配电网分布式优化调度[J]. 中国电机工程学报,2017,37(6):1579-1590.  
PU Tianjiao, LIU Wei, CHEN Naishi, et al. Distributed optimal dispatching of active distribution network based on consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1579-1590.
- [36] 徐熙林,宋依群,姚良忠,等. 主动配电网源-荷-储分布式协调优化运行(二):考虑非理想遥测环境的一致性算法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(11):3244-3254.  
XU Xilin, SONG Yiqun, YAO Liangzhong, et al. Source-load-storage distributed coordinative optimization of ADN(part II): consensus algorithm considering non-ideal telemetering network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11):3244-3254.
- [37] SPANOS D P, OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Dynamic consensus for mobile networks[C]//16th IFAC World Congress. Prague, Czech Republic:IFAC, 2005:1-6.
- [38] FREEMAN R A, YANG P, LYNCH K M. Stability and convergence properties of dynamic average consensus estimators[C]//Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, CA, USA:IEEE, 2007:338-343.
- [39] KIA S S, CORTÉS J, MARTÍNEZ S. Dynamic average consensus under limited control authority and privacy requirements[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2015, 25(13):1941-1966.
- [40] KIA S S, CORTÉS J, MARTÍNEZ S. Singularly perturbed algorithms for dynamic average consensus[C]//2013 European Control Conference(ECC). Zurich, Switzerland:IEEE, 2013:1758-1763.
- [41] XING L T, XU Q W, WEN C Y, et al. Robust event-triggered dynamic average consensus against communication link failures with application to battery control[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2020, 7(3):1559-1570.
- [42] KIA S S, CORTÉS J, MARTÍNEZ S. Distributed event-triggered communication for dynamic average consensus in networked systems[J]. Automatica, 2015, 59:112-119.
- [43] DU Y H, TU H, LU X N, et al. Privacy-preserving distributed average observers in distribution systems with grid-forming inverters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6):5000-5010.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 蔡永翔,唐巍,张璐,等. 基于光伏逆变器无功调节的低压配电网多模式电压控制[J]. 电力系统自动化,2017,41(13):133-141.  
CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multi-mode voltage control in low distribution networks based on reactive power regulation of photovoltaic inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13):133-141.
- [47] ZHANG C, XU Y, DONG Z Y, et al. Three-stage robust inverter-based voltage/var control for distribution networks with high-level PV[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1):782-793.
- [48] JABR R A. Linear decision rules for control of reactive power by distributed photovoltaic generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2):2165-2174.
- [49] 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.
- [50] LIU H J, SHI W, ZHU H. Distributed voltage control in distribution networks: online and robust implementations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):6106-6117.
- [51] 徐豪,张孝顺,余涛. 非理想通信网络条件下的经济调度鲁棒协同一致性算法[J]. 电力系统自动化,2016,40(14):15-24,57.  
XU Hao, ZHANG Xiaoshun, YU Tao. Robust collaborative consensus algorithm for economic dispatch under non-ideal communication network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14):15-24, 57.
- [52] XU J J, SUN H J, DENT C J. ADMM-based distributed OPF problem meets stochastic communication delay[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5):5046-5056.
- [53] TSANOS K I, RABBAT M G. Distributed consensus and optimization under communication delays[C]//2011 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing(Allerton). Monticello, IL, USA:IEEE, 2012:974-982.
- [54] VAIDYA N H, HADJICOSTIS C N, DOMINGUEZ-GARCIA A D. Distributed algorithms for consensus and coordination in the presence of packet-dropping communication links—part II: coefficients of ergodicity analysis approach[J/OL]. (2011-09-28)[2011-09-28]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011arXiv1109.6>.
- [55] BOF N, CARLI R, SCHENATO L. Average consensus with asynchronous updates and unreliable communication[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1):601-606.
- [56] 王力成,杨宇,杨晓东,等. 考虑非完美通讯的高光伏渗透率配电网实时电压协同控制[J]. 中国电机工程学报,2022,42(11):4027-4040.  
WANG Licheng, YANG Yu, YANG Xiaodong, et al. Real-time voltage cooperative control in distribution networks with high photovoltaic penetration considering imperfect communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11):4027-4040.
- [57] WANG L C, XIE L C, YANG Y, et al. Distributed online voltage control with fast PV power fluctuations and imperfect communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(5):3681-3695.
- [58] ZHANG J H, NABAVI S, CHAKRABORTTY A, et al. ADMM optimization strategies for wide-area oscillation monitoring in power systems under asynchronous communication delays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4):2123-2133.
- [59] CHANG T H, HONG M Y, LIAO W C, et al. Asynchronous distributed ADMM for large-scale optimization—part I: algorithm and convergence analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(12):3118-3130.
- [60] MUTTAQI K M, LE A D T, NEGNEVITSKY M, et al. A coordinated voltage control approach for coordination of OLTC, voltage regulator, and DG to regulate voltage in a distribution feeder[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2):1239-1248.
- [61] WANG Z Y, WANG J H, CHEN B K, et al. MPC-based voltage/var optimization for distribution circuits with distributed generators and exponential load models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5):2412-2420.
- [62] KU T T, LIN C H, CHEN C S, et al. Coordination of transformer on-load tap changer and PV smart inverters for voltage control of distribution feeders[C]//2018 IEEE/IAS

54th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). Niagara Falls, ON, Canada: IEEE, 2018: 1-8.

配电网运行与优化、分布式控制算法、电力市场等(E-mail: yang.yu@zju.edu.cn);

文福拴(1965—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划与运行优化、电力经济与电力市场等(E-mail: wenfs@hotmail.com)。

作者简介:

杨宇(1996—),男,博士研究生,主要研究方向为主动

(编辑 王锦秀)

## Research review of voltage cooperative control in distribution system with high photovoltaic penetration

YANG Yu<sup>1</sup>, WEN Fushuan<sup>1</sup>, ZHOU Xinglong<sup>2</sup>, WANG Licheng<sup>3</sup>, WU Cong<sup>4</sup>, GONG Yichun<sup>4</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. China Energy Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China;

3. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

4. State Grid Energy Research Institute, Beijing 102209, China)

**Abstract:** High photovoltaic penetration is one of the typical features of future renewable energy power system, which will face the challenges of frequent fluctuation of photovoltaic output and poor communication performance. Furthermore, the newly integrated photovoltaic inverters do not well align with the existing voltage management system of distribution system, it is necessary to cooperate the control of the two. Under this background, a comprehensive and systematic review of voltage cooperative control of distribution system with high photovoltaic penetration is carried out. The intension and definition of distribution system with high photovoltaic penetration and the urgent contradiction to be solved in voltage cooperative control are outlined. Focusing on the voltage cooperative control issues of cooperative control strategy of distributed photovoltaic inverters and the coordination of inverters and traditional voltage control devices, the related research status of distribution system with high photovoltaic penetration is reviewed. The theoretical and technical issues to be solved in the field are prospected.

**Key words:** distribution system; operation and control; voltage management; photovoltaic generation; communication performance; distributed control