基于源网协同的分布式光伏逆变器电压稳定控制策略研究

钟宇杰[1],韩平平[1],徐在德[2],汪硕承[2],戈田平[2]

(1.新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学),安徽 合肥 230009;2.国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096)

摘　要:文中研究分布式光伏电站的源网协调电压控制策略,旨在解决分布式光伏并网规模扩大带来的电压稳定性问题。分析了分布式光伏逆变器电压波动机理,探讨了光伏逆变器的无功调节容量,提出了一种源网协同的电压控制方案,利用AVC系统收集数据并快速计算出无功电压指令,以确保逆变器端口电压与公共连接点(PCC)电压的稳定调控。通过算例仿真验证,该方案能够实现并网母线电压与逆变器端口电压的稳定协同控制,有效应对电压波动问题,确保分布式光伏系统与电网之间实现高效的闭环电压控制。

关键词:源网协同;分布式光伏;电压稳定控制;电压扰动

中图分类号:TM 615　TM 712.2　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1006-348X(2025)01-0033-05

0　引言

光照强度的变化会直接导致分布式光伏输出功率的波动,进而引发电压的不稳定现象,尤其对于地处偏远、远离负荷中心的分布式光伏电源而言,由于其产生的电力需经过长距离传输才能送达用户端,因此在并网过程中,电压稳定性问题变得尤为显著和突出[1-2]。

当前,光伏等新能源普遍借助逆变器直接或经由其他方式并入电网,借助恰当的控制手段能够达成电压调节的目的。分布式光伏机组分布范围广、容量小、数量多,大规模并网会影响并网点电压稳定以及电网电压品质[2]。基于这一现状,大规模分布式光伏并网亟需引入自动电压控制(AVC)系统。该系统能够综合调控电站内的逆变器、电容器以及静止无功补偿装置(SVG)等无功设备,实现对无功电压的协同管理,确保并网点的电压处于稳定的工作范围内,进而实现分布式光伏与电网的顺畅并联运行。针对分布式光伏逆变器内部的无功功率分配,当前主要存在以下几种策略:第一种策略是基于预测信息,提前投切电容器进行初步调节,随后利用光伏逆变器和静止无功发生器(SVG)进行更为精细的电压调节;第二种策略则优先考虑SVG的使用,凭借其快速响应的能力,即时有效地遏制外部干扰引发的电压剧烈波动,随后,响应相对迟缓的无功源如电容器和光伏逆变器,将循序渐进地接替SVG所承载的无功功率输出任务;第三种策略则是优先调度光伏逆变器进行无功输出,当光伏逆变器无法满足需求时,再由电容器和SVG承担剩余的无功需求[3-4]。

针对分布式光伏新能源系统复杂的设置方式,文中借助AVC系统的无功电压协调控制功能,对分布式光伏电源的PCC电压以及分布式光伏各个节点的电压稳定性加以优化。AVC系统采纳分布式光伏电源的逆变器作为无功调节手段,通过实时追踪PCC电压动态,全面收集分布式光伏电源的运行参数,精确地为每台逆变器生成电压调控指令。

收稿日期:2025-02-12

作者简介:钟宇杰(2002),男,硕士研究生,研究方向为分布式光伏并网发电技术。

1 分布式光伏逆变器电压波动机理

图1呈现了分布式光伏逆变器并网等效阻抗模型。

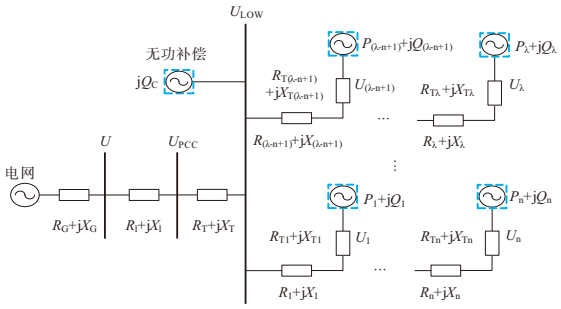

图1 分布式光伏阻抗模型

1.1 分布式光伏逆变器并网点电压稳定性分析

参照图1,将电网电压的固定值U设定为基准值,依据电压降落公式,并且不考虑横向电压降落,能够大致计算出PCC电压,具体如下:

$$U_{PCC} \approx U + \frac{P_1R_1 + Q_1X_1}{U} \tag{1}$$

$$P_l = \sum P_i - \Delta P_i - \Delta P_{Ti} - \Delta P_T \tag{2}$$

$$Q_l = \sum Q_i - \Delta Q_i - \Delta Q_{Ti} - \Delta Q_T + Q_C \tag{3}$$

式中:ΔP_i、ΔQ_i分别指分布式光伏电源并网点之间集电线路的有功损耗和无功损耗;T表示变压器;C表示无功补偿设备。

把式(2)、式(3)中的功率损耗用电流通过阻抗产生的损耗来表示,具体如式(4)、式(5):

$$P_l = \sum P_i - \left(\frac{\sum P_i}{U}\right)^2 R_{eq} \tag{4}$$

$$Q_l = \sum Q_i - \left(\frac{\sum P_i}{U}\right)^2 X_{eq} + Q_C \tag{5}$$

将式(4)、式(5)代入式(1),得到式(6):

$$U_{PCC} \approx U + \frac{\left[\sum P_i - \left(\frac{\sum P_i}{U}\right)^2 R_{eq}\right] R_1 + \left[\sum Q_i - \left(\frac{\sum P_i}{U}\right)^2 X_{eq} + Q_C\right] X_l}{U} \tag{6}$$

从式(6)可以推导出,在逆变器采取单位功率因数控制策略,且分布式光伏系统的无功补偿装置处于非工作状态的情况下,提升分布式光伏电源的有功功率输出将会引起并网点电压的上升。当分布式光伏电源的有功输出功率达到某个特定阈值(具体如式(7)所述)时,并网点电压会攀升至其最大值。此后,若继续增大有功功率的输出,并网点电压则会呈现出逐渐下降的趋势。

$$\sum P_i = P_0 = \frac{R_l U^2}{2(R_{eq}R_l + X_{eq}X_l)} \tag{7}$$

为降低并网点电压的波动幅度,可对分布式光伏电源进行无功调节,向电网输送无功功率,使并网点电压保持稳定。

1.2 光伏逆变器端口电压稳定性分析

图1中,编号为i的光伏逆变器端口电压U_i可表示为:

$$U_i \approx U_{i2} + \frac{P_iR_{Ti} + Q_iX_{Ti}}{U_{i2}} \tag{8}$$

$$U_{i2} \approx U_{(i-1)2} + \frac{\left(\sum_{h=1}^{n} P_h\right)R_i + \left(\sum_{h=1}^{n} Q_h\right)X_i}{U_{(i-1)2}} \tag{9}$$

$$U_{12} \approx U_{LOW} + \frac{\left(\sum_{h=1}^{n} P_h\right)R_1 + \left(\sum_{h=1}^{n} Q_h\right)X_{i1}}{U_{LOW}} \tag{10}$$

式中:U_{LOW}是分布式光伏汇集母线的电压,经过主变压器升压后达到U_{PCC}。

根据上述公式分析,光伏逆变器的端口电压受到多种因素的共同作用,包括分布式光伏并网点的电压水平、各逆变器输出功率的大小以及集电线路的具体参数。这种综合影响导致了光伏逆变器端口电压呈现出复杂的时空分布特性,特别是在线路末端,逆变器端口电压容易变得不稳定,甚至超出安全范围,从而引发逆变器与电网的解列。鉴于此,为确保逆变器端口电压的稳定并减轻线路阻抗及光照强度变化带来的不利影响,有必要对各光伏逆变器的无功功率输出实施精细调控,采取站内无功优化策略。

2 光伏逆变器的无功调节容量分析

分布式光伏系统通过配备无功调节能力的逆变器与电网相连,能够灵活地输出或吸收无功功率。这种无功调节能力的大小与逆变器的容量之间存在一定的关联,具体表现为以下所述的关系:

$$Q_{PV}^{MAX} = \pm\sqrt{S_{INV}^2 - P_{PV}^2} \tag{11}$$

式中:P_{PV}是分布式光伏电源输出的有功功率;Q_{PV}^{MAX}表示光伏逆变器的无功输出容量上限。

3 基于源网协同的分布式光伏逆变器电压稳定控制策略

3.1 AVC工作方式

AVC主要包含以下算法：

1）估算系统无功：根据目标电压，估算系统目标无功；

2）无功功率分配：根据目标系统无功，进行无功功率分配；

3）安全约束条件：利用安全约束条件，对分配策略进行约束。

分布式光伏点多面广，不能如集中式场站采取点对点控制，将AVC系统应用到分布式光伏，存在通信延迟、数据量大、经济性差这几个难点[5]。针对这些难点，对分布式光伏进行分层控制，将分布式光伏机组分为本地层（每个机组独立运行，基于本地测量数据执行控制）、区域层（多个相邻机组组成一个区域，区域控制器负责协调区域内机组的控制，优化整体性能）、中央层（场站控制器负责全局优化和协调，下发电压指令，但不直接参与实时控制）[6-7]。有效解决不能对分布式光伏点对点控制等这几个难点。

分布式光伏电源通过安装AVC系统来实现无功电压控制。图2展示了分布式光伏AVC系统所依赖的通信系统的架构。依托这一通信架构，AVC系统能够汇集站内逆变器及线路的相关参数与状态信息。随后，根据接收到的目标指令，AVC执行无功优化算法，计算出相应的控制指令，并将这些指令发送给各个单元控制器；逆变器接收到这些指令后，能够迅速执行电压调节操作，并将实时的运行数据回传给AVC系统，形成闭环反馈机制。

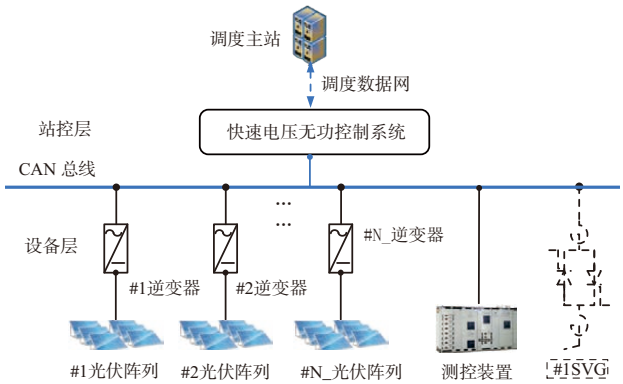

图2 通信系统拓扑结构

文中所设计的源网协同分布式光伏逆变器电压稳定控制方案，全面纳入了并网点电压、集电线路的具体长度与型号信息、各变压器的详细参数、实时的发电功率数据以及电压损耗情况等多个维度，旨在实现高渗透率分布式光伏电源对电网电压波动的有效应对与迅速支撑。

3.2 基于源网协同的分布式光伏逆变器电压稳定控制流程

为方便分析，以一个含有高比例分布式光伏电源的区域为参考，构建了分布式光伏电源接入系统的等值电路，如图3所示。

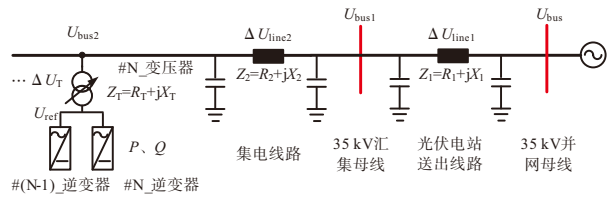

图3 分布式光伏电源接入系统等值电路图

在源网协同的分布式光伏逆变器电压稳定控制框架下，基于等值电路模型，逆变器端口指令电压的计算流程及自动电压控制系统的运作程序简述如下：

1）数据采集：实时收集分布式光伏逆变器各项运行数据。

2）数据预处理与电压目标设定：对分布式光伏电源的数据进行筛选，剔除无效或异常数据。AVC主站根据当前的实际运行状况，设定一个合理的并网点目标电压U_{bus}，并将此目标值传达给二级AVC子站。

3）电压损耗计算与目标电压推导：AVC子站利用分布式光伏电源的运行数据和输电线路的阻抗信息，计算出输电线路上的电压损耗。基于这一计算，可以进一步推导出35 kV汇集母线的目标电压U_{bus1}，具体的计算公式参见式（12）：

$$\begin{cases}\Delta U_{line1}=\dfrac{PR_1+QX_1}{U_{bus}}\\ U_{bus1}=U_{bus}+\Delta U_{line1}\end{cases}\tag{12}$$

4）评估连接各单元变压器至汇集母线之间线路的电压降落，并基于这些评估结果，为变压器的高压侧设定目标电压U_{bus2}，具体计算方法见式（13）：

$$\begin{cases}\Delta U_{line2}=\dfrac{PR_2+QX_2}{U_{bus}}\\ U_{bus2}=U_{bus}+\Delta U_{line2}\end{cases}\tag{13}$$

5）AVC子站通过分析单元变压器的电压损耗及其变比，推算应当达到的目标电压，详细计算公式参见式（14）：

$$\begin{cases} \Delta U_{\mathrm{T}} = \dfrac{PR_{\mathrm{T}} + QX_{\mathrm{T}}}{U_{\mathrm{bus2}}} \\ U_{\mathrm{ref}} = \dfrac{U_{\mathrm{bus2}} + \Delta U_{\mathrm{T}}}{K_{\mathrm{T}}} \end{cases} \tag{14}$$

6）将精确计算的电压指令发送至逆变器控制单元，指导其进行无功功率调节以稳定电压，同时，逆变器将调节后的电压状态反馈给AVC主站，形成闭环控制流程。

图4详细展示了分布式光伏电源无功电压控制策略的整体框架。

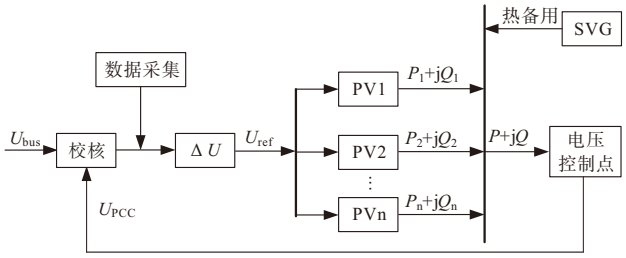

图4　分布式光伏无功电压控制策略示意图

4　算例仿真与验证

4.1　分布式光伏逆变器电压波动规律验证

为验证文中提出的源网协调电压控制策略在减轻系统电压扰动、保持并网点及逆变器端口电压稳定方面的效能，选择位于江西省抚州市220 kV甘竹变供区的立新村联村分布式光伏电站作为测试对象。分布式光伏的相关参数详见表1。

表1　分布式光伏相关参数

机组信息	机组类型	光伏
	光伏单元数量（台）	80
	单台光伏单元容量（kW）	50
箱变信息	额定容量（MVA）	0.5
	额定电压（高压侧，kV）	35
	额定电压（低压侧，V）	315
	接线组别	Dy11
	短路阻抗（%）	7（±10）
	负载损耗（kW）	11.14
	空载电流（%）	0.5
	空载损耗（kW）	2.4
集电线路信息	型号	YJV-35 kV/3*120
	#1线路长度（m）	1 100
	#2线路长度（m）	1 400
	#3线路长度（m）	1 200
	#4线路长度（m）	2 800

4.2　基于源网协同的分布式光伏逆变器电压稳定控制效果分析

为了验证相关控制策略，采用实际分布式光伏的有功输出数据作为案例分析的基础，进行仿真测试，以检验其对暂态电压扰动的应对能力。图5详细记录了各等值机的出力数据和电压指令数据。通过观察图6，可以清晰地看到，这些输出的容性无功功率有效地对逆变器端口电压和并网母线电压进行了调节。

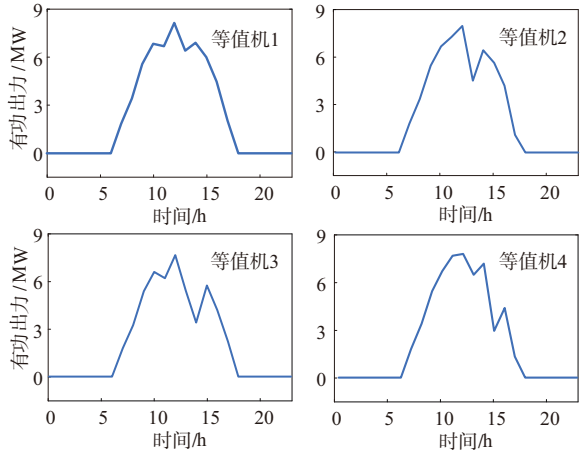

图5　分布式光伏电源24 h有功出力数据

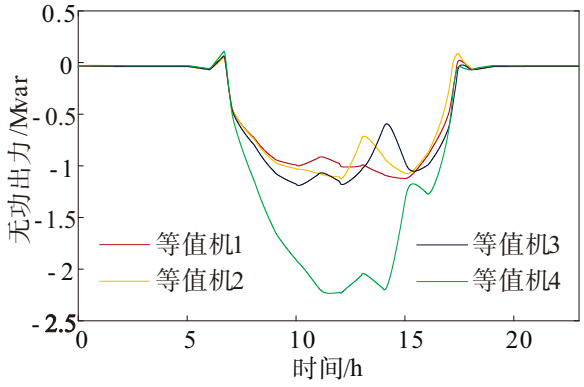

图6　分布式光伏等值机组逆变器无功出力

为了验证所设计的源网协同电压控制策略在缓解暂态电压波动方面的效果，设定所有光伏逆变器均采用恒定的无功功率控制模式。在此模式下，借助并网点PI调节器，将目标电压转换成所需的无功功率值，然后均匀地将这些无功功率分配给各个逆变器。通过仿真实验，获取四台等值机组逆变器端口的电压水平，以及分布式光伏35 kV并网母线的电压数据。图7和图8分别直观地展示了这些电压数据的对比情况。

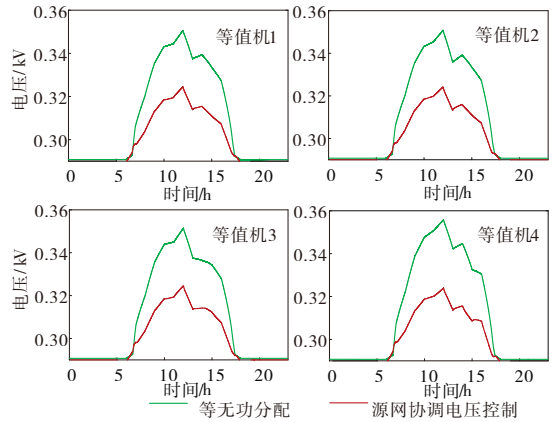

图7　分布式光伏等值机组逆变器端口电压变化水平

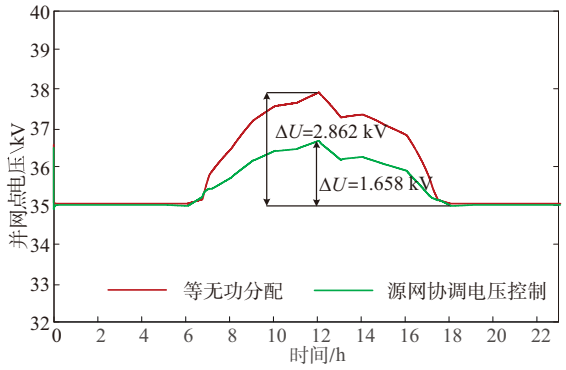

图8　35 kV并网母线日电压变化范围(7月26日)

根据图示信息,光照强度的波动导致了并网点电压发生显著变化。相较于逆变器在定无功控制模式下采用的等无功分配策略,文中所设计的源网协同电压控制策略表现出了显著的优势。该策略能够综合考虑线路阻抗和实时出力变化,通过定电压控制精确调整逆变器的无功输出,极大地提升了并网点电压的稳定性。

与之相比,传统的无功分配电压控制方法因未全面考虑分布式光伏的阻抗分布及实时出力变化,在实际应用中面临诸多挑战,难以满足并网电压稳定控制的标准。

4.3　分布式光伏低压接入场景分析

对于分布式光伏逆变器低压接入场景,文中方法依然适用。具体方法是:考虑故障特性差异,对分布式光伏机组进行分群分区,根据低压配电系统内分布式光伏逆变器的故障穿越特性,以故障期间控制参数、分布式电源型号、距并网点的电气距离作为分群指标,采用CS-PSO算法,对分布式电源集群完成机群划分,并由低电压等级向高电压等级对分布式光伏机组进行逐步分层等值。将分布式光伏低压接入机组聚类分群等值到35 kV、110 kV、甚至220 kV的高压侧,实现由低压接入场景分析转变为中高压接入场景分析,分析过程同4.1节、4.2节。

5　结语

光伏发电固有的随机性和波动性,加之分布式光伏网架结构的复杂性以及远距离输电的挑战,共同对其并网电压的稳定性构成了影响。鉴于此,文中提出了分布式光伏并网及电站内部各节点电压的稳定控制方法。经过研究,得出以下结论:

1) 光伏逆变器的无功调节能力受到P-Q曲线的制约,但仍具备一定的无功调节裕量。作为场站内的核心无功源,逆变器应充分发挥其无功调节潜能,主动参与到系统电压的调节中,以实现电压的稳定控制目标。

2) 文中提出的分布式光伏源网协调电压管控方案,能够依据分布式光伏的即时出力状况与线路阻抗布局,精确计算出各逆变器所需的无功电压指令,从而为系统提供恰当的无功补偿。

3) 该策略所集成的无功电压指令快速计算手段,相较于繁琐的智能优化算法,展现出更优的收敛性能,从而确保了无功电压调整的时效性需求。

本文致力于探索分布式光伏的无功电压调控策略,以期促进分布式光伏与电网间闭环电压控制的构建,同时提高对并网点电压波动的自适应调节能力。

参考文献:

[1] 孙永辉,赵树野,张秀路,等.考虑分布式光伏与储能联合的区域电网电压稳定性控制方法[J].可再生能源,2022,40(8):1115-1122.

[2] 翟燕飞.分布式光伏接入对农村台区电能质量的影响[J].农村电工,2024,32(6):31-32.

[3] 王伟.分布式光伏在配电网中的优化配置方法研究[J].电力设备管理,2024,(22):174-176.

[4] 吴福保,孙文文,何国庆,等.基于电压灵敏度的分布式光伏电压控制方法[J].太阳能学报,2024,45(11):313-319.

[5] 裘友晖,秦江超,靳鹏宇,等.基于汇集接入与分区治理的分布式光伏接入配电网优化策略[J].电气自动化,2024,46(6):18-21.

[6] 杨明,李玉龙,杨倬,等.基于电容电压全前馈的并网逆变器高鲁棒性稳定控制策略[J].高电压技术,2024,50(9):4171-4183.

[7] 赵雨昕.基于分布式光伏集群协同优化的配电网电压控制策略[J].光源与照明,2023,(11):117-119.