

Design and Empirical Analysis of a Rigid Flexible Collaborative Control System for Distributed Photovoltaic Low Voltage Public Transformers with a Capacity of 30~60kW and above

Yingjie Xiong

State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Shangrao Power Supply Branch, Shangrao, Jiangxi, 334000, China

Abstract

This article proposes a complete rigid flexible collaborative control system design scheme for household and non household users of distributed photovoltaic low-voltage public transformers with a capacity of 30kW-60kW and above in grid connected operation, and verifies the effectiveness of the scheme through empirical analysis. The study first analyzed the technical characteristics and regulation requirements of household and non household users of distributed photovoltaic low-voltage public transformers with a power range of 30kW-60kW and above. Then, a rigid flexible collaborative control system was constructed from four dimensions: system architecture, control strategy, communication protocol, and hardware implementation. Specifically, a hierarchical regulation mechanism based on dynamic thresholds and an adaptive protocol conversion module were designed for the unique transitional characteristics of the photovoltaic system in this power range. In the empirical section, three typical application scenarios were selected for comparative experiments. The results showed that the system could increase the success rate of regulation to 92.3% and reduce 37.8% of power generation losses caused by rigid control. The research results provide theoretical support and technical solutions for the optimization operation of medium power distributed photovoltaic systems.

Keywords

distributed photovoltaics; Rigid flexible collaborative control; Dynamic threshold; Empirical analysis

30~60kW 及 60kW 以上分布式光伏低压公变用户刚柔协同控制体系设计与实证分析

熊颖杰

国网江西省电力有限公司上饶供电分公司, 中国·江西 上饶 334000

摘要

本文针对30kW-60kW及60kW以上分布式光伏低压公变的户用和非户用用户在并网运行中的控制难题, 提出了一套完整的刚柔协同控制体系设计方案, 并以实证分析验证了该方案的有效性。研究首先分析了30~60kW及60kW以上分布式光伏低压公变的户用和非户用用户的技术特征与调控需求, 然后从系统架构、控制策略、通信协议和硬件实现四个维度构建了刚柔协同控制体系, 特别针对该功率段光伏系统特有的过渡性特征设计了基于动态阈值的分层调控机制和自适应规约转换模块。在实证部分, 选取了三个典型的应用场景进行对比试验, 结果显示, 该体系可将调控成功率提升至92.3%, 还可以减少37.8%由刚性控制带来的发电损, 研究结果为中等功率分布式光伏系统的优化运行提供了理论支撑和技术解决方案。

关键词

分布式光伏; 刚柔协同控制; 动态阈值; 实证分析

1 引言

在能源转型与“双碳”目标推动下, 中国分布式光伏装机容量呈现爆发式增长。根据国家能源局最新数据, 2024年全国分布式光伏新增装机已突破50GW, 其中30~60kW及60kW以上分布式光伏低压公变的户用和非户用用户占比达到23.7%, 主要分布于工商业屋顶、农业大棚这类应用场

景。30~60kW及60kW以上分布式光伏低压公变的户用和非户用用户不同于小功率户用系统的简单刚控和大功率系统的专业化管控, 它处于技术过渡带, 控制策略需要兼顾经济性与可靠性, 电网调度方面存在一些难度。现有研究表明分布式光伏控制体系主要分为刚性控制和柔性控制两类^[1]。刚性控制以断路器分合闸为手段, 响应速度快但损失全部发电量, 而柔性控制主要依靠调节逆变器输出功率实现精准调控, 对通信质量和设备性能要求较高。30~60kW及60kW以上分布式光伏低压公变的户用和非户用用户如果单纯采

【作者简介】熊颖杰(1991-), 女, 中国江西高安人, 硕士, 高级工程师, 从事负荷管理研究。

用任一种控制方式都很难达到好的效果：刚性控制会造成发电损失，影响用户收益，纯柔性控制在电网紧急情况下又存在响应延迟风险，所以构建刚柔协同的控制体系是目前该领域的研究热点^[2]。

2 30~60kW 及 60kW 以上分布式光伏低压公变的户用和非户用用户的特征分析

2.1 系统构成

这类光伏阵列一般由 80~120 块标准光伏组件组成，每块光伏组件的功率档位一般在 310~550W，采用组串式逆变器架构，直流电压等级为 600~1000V。与额定装机容量小于等于 30kW 系统相比，其具有更复杂的电气参数，因此要配置微型断路器或塑壳断路器进行保护；与额定装机容量大于 60kW 系统相比，其又不具备独立的监控系统和储能单元，这使得该功率段系统在运行监控和能量调节方面的能力相对有限，无法像大型系统那样实现精细化的自我管理和稳定输出。

2.2 并网特性

30~60kW 分布式光伏低压公变的户用和非户用用户的功率波动模式较为特殊，对某地区 152 个同类系统的运行数据分析后发现，日均功率波动率达 42.7%，高于户用系统但低于大型工商业系统，该波动特性源于典型的“日间单峰”发电曲线，也就是系统在晴天达到峰值功率要等到正午前后，随后呈近似对称下降^[3]。在多云天气时可能出现多次功率骤变，导致了基于固定阈值的控制策略效果不佳。

对额定装机容量大于 60kW 分布式光伏低压公变的户用和非户用用户，其用户类型如下：①公变用户（如居民小区）：通过 380V 公共变压器并网，需配置防逆流装置和动态无功补偿来抑制反向功率对配电网的冲击。②专变用户（如工商业园区）：采用 400V/690V 隔离变压器并网，强制要求 SCADA 监控平台和储能单元以平滑功率波动并参与需求响应。两类系统均需满足 GB/T 19939-2005 的孤岛保护要求（动作时间 $\leq 2s$ ），但专变用户还需额外配置电能质量在线监测装置。

2.3 电网互动需求

30~60kW 及 60kW 以上分布式光伏低压公变的户用和非户用用户这一低压配电网的重要电源点需要参与台区电压调节，特别是在高渗透率区域的午间时段，且系统要能够快速响应，电网频率偏差超过 $\pm 0.2Hz$ 时必须 2 秒内完成功率调整，系统还要能够支持远程调度指令与本地自治控制的协同，因此要具备双向交互能力。

2.4 通信特性

这类系统普遍采用“双模通信”架构，电力线载波负责采集基础数据，4G 无线网络的作用是调控指令传输。实测数据显示，该系统在典型工业园区环境下的指令平均传输延迟为 1.2s（4G）、2.8s（PLC），报文丢失率分别为 0.3%

和 1.7%，还存在一些优化空间。

3 刚柔协同控制体系设计

3.1 总体架构设计

本文针对 30~60kW 及 60kW 以上分布式光伏低压公变的户用和非户用用户的技术特征，提出刚柔协同控制体系采用“云一边一端”三级架构，地区供电公司调度主站部署云端，并负责广域范围的功率平衡计算和调控策略生成，配电变压器侧安装的融合终端构成边缘层以实现台区级的光伏集群控制，光伏逆变器、智能断路器和协议转换器等设备组成终端层来执行具体的调控指令。

提出刚柔控制动态协同机制，系统持续监测电网状态参数，即电压、频率、负载率等，当参数在正常区间时采用柔性控制模式，经调节逆变器输出功率能实现 $\pm 5%$ 的精准调控，检测到频率偏差大于 0.5Hz 或者电压越限大于 10% 这一类紧急状态后会自动切换成刚性控制模式，且 300ms 内完成断路器分闸操作，两种控制模式的切换阈值依台区特性动态调整，这样能够避免模式频繁转换。

3.2 关键技术创新

在通信协议方面，设计了自适应规约转换模块，解决了 30~60kW 及 60kW 以上分布式光伏低压公变的户用和非户用用户常见的多品牌逆变器兼容问题。模块内置了 18 种主流逆变器品牌的通信规约（包括 SMA、华为、阳光电源等），通过机器学习算法自动识别设备类型并匹配相应规约。控制算法上，开发了基于模型预测控制（MPC）的功率分配策略。算法以 15 分钟为周期，综合天气预报、历史发电数据和实时负载信息，预测未来 4 小时的光伏可调容量，并据此优化各节点的调控指令。硬件设计方面，专门开发了适用于该功率段的“协议转换器 + 微型断路器”一体化装置，采用工业级 ARM 处理器，支持同时连接 4 台逆变器和 2 路断路器，具备过流、孤岛保护等功能。其核心创新在于“柔控优先”的电路设计：正常工作时电流流经逆变器控制回路，仅在故障时切换至断路器回路，这种设计既保证了控制灵活性，又确保了系统安全性。

4 实证分析与效果评估

4.1 测试环境与方法

刚柔协同控制体系有效性有待验证，研究团队在某地挑了三个典型测试场景，城市商业园区是场景 A，有 42 个 30~60kW 系统，农村扶贫电站为场景 B，37 个系统被部署在此，工业厂房是场景 C，部署了 28 个系统，2024 年 7 月到 12 月为测试周期，涵盖夏季高负荷、冬季低日照等多种运行条件。

研究采用严谨的对比实验设计方法，在商业园区、农村扶贫电站和工业厂房这三个典型应用场景各挑出 50% 的光伏系统部署新型刚柔协同控制体系作为实验组，剩下的光伏系统保持原有的刚性控制方式作为对照组，以此消除环境

因素的干扰。实验采用高精度专用监测终端,精度等级为0.5S级,实时采集调控成功率(即指令正确执行率)、系统平均响应时间(指令下发到执行完成的时延)、发电损失率(调控造成发电量损失的占比)、电网参数合格率(电压/频率在标准范围内持续时间的占比)这四类关键指标数据,本实验还采用1分钟的高频采样间隔,并运用北斗/GPS双模时钟同步技术,将所有监测终端的时间误差控制在±10ms以内,数据采集系统设有CRC校验、阈值校验、趋势校验三重校验机制,实测数据完整率达99.97%,系统自动触发重

采功能以处理异常数据。

4.2 结果分析

4.2.1 调控性能分析

基于107个测试系统的对比数据(表1),刚柔协同控制体系的工程适用性更为显著,实验组的平均调控成功率较传统刚性控制方案显著提升。分功率段统计显示,30kW-60kW及60kW以上系统的调控成功率高达94.1%,验证了该体系对中等功率光伏的适配优势。该结果表明刚柔协同机制调控具有可靠性。

表1 刚柔协同控制体系测试性能对比

评估指标	实验组	对照组	提升幅度	p 值
调控成功率 (%)	92.3 ± 2.1	72.6 ± 3.8	+19.7pp	<0.01
33~60kW 子系统成功率 (kW)	94.1 ± 1.8	75.2 ± 4.2	+18.9pp	<0.01
柔性控制平均响应时间 (s)	2.3 ± 0.5	-	-	-
刚性控制平均响应时间 (s)	0.3 ± 0.05	0.35 ± 0.08	+14.3%	0.12
发电损失率 (%)	5.2 ± 1.2	8.35 ± 2.1	-37.8%	<0.01
电压合格率 (±7%Un)	99.3 ± 0.5	97.2 ± 1.2	+2.1pp	<0.05
频率合格率 (%)	99.8 ± 0.3	98.5 ± 0.8	+1.3pp	<0.05

注: 1. 数据格式为均值 ± 标准差; 2.pp 表示百分点; 3. 显著性水平 $\alpha=0.05$; 4.P 值: 基于假设检验,反映实验组与对照组差异的统计学显著性 ($\alpha=0.05$) 为检验阈值)。5. 升幅度: 调控成功率、电压合格率、频率合格率以“百分点(pp)”表示绝对差值;发电损失率、响应时间以“百分比(%)”表示相对变化幅度。

4.2.2 动态响应特性

系统的分层响应架构将毫秒级与秒级控制有机融合在一起,测试数据显示,刚性控制平均响应时间0.3秒,最小值0.28秒,满足DB4403标准中135%Un电压越限的0.2秒分间要求。柔性控制的平均响应为2.3秒,但采用MPPT算法可将实际调节延迟压缩至1.5秒内,形成“预测+实时”这一双层控制,午间光伏倒送时段的电压波动降低42%。

4.2.3 发电经济性优化

协同控制带来显著的发电量增益,如下表2:

表2 协同控制的发电量增益

指标	实验组	纯刚性控制	提升幅度
日均发电损失 (%)	5.2%	8.35%	37.8% ↓
年等效利用小时 (h)	1280h	1024h	25% ↑

分析损失率降低的原因,一是柔性控制避免完全断发的“全损”工况,二是动态阈值算法将刚性控制触发次数从日均1.7次降至0.6次。

4.2.4 电网质量提升

电压/频率合格率的提升验证了体系的电网支撑能力,频率合格率为99.8%(49.8~50.2Hz),在模拟电网频率骤升至50.5Hz的测试中,系统能在0.45秒内完成功率削减,响应速度较传统逆变器提升78%。典型场景分析表明,实验组在午间12:00—14:00时段成功将台区电压波动幅度控

制在0.8%以内,而对照组波动达3.2%,光储协同控制策略与DSTATCOM无功补偿的联合应用实现了这一稳定效应。

5 结语

总之,本文针对30~60kW及60kW以上分布式光伏低压公变的户用和非户用用户的控制需求设计了一套完整的刚柔协同控制体系,最后也基于实证验证了这一方案的有效性。研究表明:该功率段光伏需要特殊的控制策略,单纯的刚性或柔性控制均难以满足要求。未来研究可从以下方向深入,一是探索5G通信在控制体系中的应用,使指令传输时延问题得到解决。二是研究分布式储能与光伏系统的协同控制策略,增强系统的调节灵活性。最后是开发基于区块链的分布式调控机制,提高系统的去中心化运行能力。

参考文献

- [1] 钟宇杰,韩平平,徐在德,汪硕承,戈田平.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[J].江西电力,2025,49(01):33-37.
- [2] 潘三博.分布式光伏并网发电与电网无功控制一体化装置及其并网优化控制系统.河南省,安阳师范学院,2014-09-06.
- [3] 邹文斌,韩松,荣娜,陈世威.基于分布式共识协同的光伏逆变器电压控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(01):166-173.