

Research on Distribution Network Automation Control Strategies for Distributed Generation Integration

Qiong He

Urban Power Supply Center, State Grid Jingzhou Power Supply Company, Jingzhou, Hubei, 434000, China

Abstract

High penetration of distributed generation (DG) changes distribution network operation with bidirectional power flows, increased voltage fluctuations, and more complex protection coordination, making traditional control schemes insufficient. This paper proposes a hierarchical and zonal automation framework for DG-integrated distribution networks, including coordinated voltage/VAR control, active power optimization for DG accommodation, and DG-aware FLISR-based self-healing, with security constraints and degraded operation under communication uncertainties. Simulation studies indicate improved voltage compliance, mitigated fluctuations, and reduced service restoration time, enhancing network security and resilience.

Keywords

Distribution automation; Distributed generation; Voltage/VAR coordination; Active power optimization; Self-healing (FLISR)

面向分布式电源接入的配电网自动化控制策略研究

何琼

国网荆州供电公司城区供电中心, 中国·湖北荆州 434000

摘要

分布式电源大规模接入使配电网呈现潮流双向、电压波动加剧、保护配合复杂化等特征,传统运行与控制方式难以满足实时协同需求。本文面向分布式电源接入场景,构建分层分区的配电网自动化控制框架,提出电压/无功协调控制、有功优化与消纳控制以及考虑分布式电源状态的故障自愈(FLISR)策略,并引入安全约束与通信不确定条件下的降级机制。仿真结果表明,该策略可提升电压合格率、抑制波动并缩短故障恢复时间,增强配电网安全性与韧性。

关键词

配电网自动化; 分布式电源; 电压/无功协调; 有功优化调度; 故障自愈(FLISR)

1 引言

随着“双碳”目标推进与能源结构转型,光伏、风电、储能等分布式电源在用户侧和配电侧快速增长,配电网由传统单向供电逐步演变为源网荷多元互动的复杂系统。分布式电源的大规模接入在提升清洁能源消纳能力、降低输电压力的同时,也带来了潮流双向、节点电压波动加剧、短路电流水平变化以及保护配合复杂化等问题,传统以定值和人工干预为主的配电网运行方式难以满足实时性与协调性要求。因此,研究面向分布式电源接入的配电网自动化控制策略,对于提升电能质量、保障运行安全、增强故障恢复能力与提高配电网韧性具有重要工程意义。

国内外在配电自动化、分布式电源逆变器控制、分层

【作者简介】何琼(1984—),女,中国湖北荆州人,本科,助理工程师,从事电力工程,生产运行-电力系统及其自动化研究。

分区协调、故障自愈等方面已开展大量研究与示范应用,但在高渗透率、多类型电源并存以及通信不确定等条件下,仍存在控制目标不统一、跨设备协同不足、控制响应与稳定性难以兼顾等问题。本文以分布式电源接入后的配电网运行特性为基础,围绕电压/无功协调、有功优化调度与故障自愈控制等关键环节,构建兼顾安全约束与可实施性的自动化控制策略框架,并通过典型场景仿真对策略效果进行验证与分析。全文结构包括:绪论、运行特性分析、控制策略设计、案例验证以及结论与展望。

2 分布式电源接入下的配电网运行特性分析

分布式电源(Distributed Generation, DG)通常指接入配电网侧、靠近负荷中心的电源或可控电力资源,主要包括光伏发电、分散式风电、燃气冷热电联供机组以及具备并网逆变接口的储能系统等。按照接入位置可分为台区低压侧接入与10kV/35kV中压侧接入;按并网方式可分为“即插即用”型并网、可调度型并网以及与储能/负荷协同的综合能源型并网。不同类型与规模的DG在控制能力、出力波动特性及

并网影响方面差异明显：例如光伏受辐照影响呈现快速波动与日周期特性，风电受风速随机性影响更强，而储能具备双向调节能力，可在一定程度上抑制波动并支撑电网运行。

DG大量接入后，配电网运行特性首先表现为潮流从“单向由变电站向负荷”转变为“局部双向”。在负荷较轻且DG出力较高的时段，末端节点可能出现反向功率回送，导致主干线电流方向改变，传统基于单向潮流假设的运行分析与保护整定面临偏差。其次，节点电压水平波动显著增强。DG出力增加通常会抬升接入点及其上游节点电压，轻载高发时易出现电压越上限；而云影遮挡、风速骤降等引起的出力快速下降，又可能导致局部电压下跌与闪变问题，进而影响敏感用户与电能质量指标。再次，短路电流水平与故障电流分布发生变化。旋转电机型电源可能提供较大故障电流，提升短路容量；逆变器型DG虽受限于控制策略与电流限制，但仍会改变故障电流的方向和持续特性，使得传统过流保护、分段开关配合以及故障指示逻辑的可靠性下降。

除稳态与短路特性外，DG还引入新的动态与运行风险。一方面，多台逆变器并联运行时会受到控制参数、线路阻抗与电网强弱的影响，可能出现无功分配不均、谐波叠加、低电压穿越过程振荡等现象；另一方面，在馈线失压或开关误动作等情况下，DG可能维持局部电压形成孤岛运行，若检测与解列不及时，将对人员检修安全、重合闸成功率及设备承压造成威胁。与此同时，配电网自动化依赖通信与信息采集，实际工程中不可避免存在时延、丢包、终端离线等情况，进一步增加了控制决策的不确定性与鲁棒性要求。

综合上述变化，关键技术问题可归纳为四类：其一是电压越限与电压波动控制问题，需在有载调压、无功补偿与DG逆变器无功支持之间实现协调；其二是保护与故障处理复杂化，包括故障电流方向变化、保护定值适应性不足以及故障自愈策略需考虑DG运行状态；其三是功率波动与消纳问题，高渗透率场景下可能出现弃光弃风、线路/变压器反向过载等约束；其四是孤岛风险与运行安全约束，需要形成快速识别、稳健解列与恢复并网的闭环机制。

因此，分布式电源接入背景下的配电网控制需求呈现“实时化、协同化、分层化、可落地”的特征：一是需要更细粒度的状态感知与快速调节能力，支撑电压、电流与潮流在秒级到分钟级的动态平衡；二是需要跨设备协同，将调压器、无功补偿装置、分段开关、DG与储能纳入统一目标与约束框架；三是需要分层分区的控制结构，上层负责全局优化与策略下发，下层完成本地快速控制与容错运行；四是需要在通信不确定与设备差异条件下保持安全边界与控制稳定性，为后续自动化控制策略设计提供明确问题定义与工程约束。

3 配电网自动化控制策略设计

面向分布式电源高比例接入的配电网，自动化控制策

略应以“分层分区、就地快速、全局协调、约束优先”为总体思路，兼顾工程可实施性与控制效果。本文构建“主站—馈线/台区控制单元—现场终端（FTU/DTU/TTU）与DG/储能控制器”的三层架构：主站层负责全网状态估计、潮流分析、优化决策与策略管理；馈线/台区层面面向局部区域形成滚动协调控制，承担电压越限处置、功率限额分配与故障恢复方案生成；现场终端与DG控制器执行秒级响应，包括逆变器无功/有功调节、开关分合与保护动作，并在通信异常时维持安全的本地自治控制。

在电压/无功协调方面，采用“慢调+快调”协同机制。慢调由有载调压变压器（OLTC）与线路调压器按分钟级调节，以减少频繁动作并保持主干电压水平；快调由无功补偿装置（SVG/SVC、电容器组分组投切）与DG逆变器无功支撑按秒级响应，抑制电压快速波动。逆变器侧可采用Q-V下垂控制或定电压控制两种模式：在电压偏离阈值时优先提供无功支撑，必要时结合功率因数约束与逆变器容量限制进行动态限幅；当出现多点越限时，台区控制单元按“影响度优先+公平分摊”原则分配无功指令，避免单台DG过度承担导致过载或引发电压振荡。

在有功功率与消纳控制方面，针对DG出力波动与反向潮流问题，提出“预测—协调—执行”的滚动控制流程。主站利用短时预测（负荷、光伏辐照/风速）形成日前/日内参考计划；馈线层在实时测量基础上进行功率校正，优先调用储能进行削峰填谷与出力平滑（限制爬坡率），并在变压器反向过载、线路电流越限或电压上限约束触发时，实施分级有功控制：先调储能充电吸纳，其次调整可控负荷（如柔性负荷、充电桩），最后在必要时对DG进行限发。限发策略按“安全优先、最小弃电、可追溯”原则设置优先级与补偿规则，并明确各类资源的可调范围、响应时间与持续时长。

在故障与恢复控制（自愈）方面，构建面向DG参与的FLISR闭环流程：故障发生后，现场终端完成故障指示与初步隔离；馈线层结合开关状态、故障电流方向与DG运行信息进行故障区段判定，生成最小停电范围的隔离与转供方案；在具备条件时引入“DG支撑下的分区供电”，即在满足反孤岛与保护配合要求的前提下，允许储能或具备并网/离网能力的电源对关键负荷提供短时支撑，同时配合重合闸策略与同期检测，确保恢复并网过程安全可靠。对通信中断、量测缺失等异常情形，系统退化“就地保护+规则库处置”，保证动作确定性与安全边界。

为确保策略可落地，需建立统一的安全与约束机制：包括电压/电流越限硬约束、设备动作次数与最小间隔约束、逆变器容量与温升约束、保护定值与开关分合闸联锁约束，以及通信时延/丢包下的鲁棒控制要求。通过上述分层协同的自动化控制策略，可在高DG渗透率条件下同时提升电压合格率、降低网损、增强故障恢复能力，并为后续仿真验证

与工程部署提供清晰的控制逻辑与接口边界。

4 仿真建模与案例验证

为验证所提出的配电网自动化控制策略在分布式电源高渗透率条件下的有效性与工程适用性,本文建立包含“网络拓扑—分布式电源/储能模型—负荷模型—自动化控制与通信模型”的联合仿真平台,并选取典型配电网作为算例对象。网络侧采用辐射型中压配电网结构,设置主变及母线、干线与支线、分段开关与联络开关等关键设备,具备常见的转供路径与故障隔离条件;参数方面配置线路阻抗、变压器容量及分接范围,保证潮流与电压分布具有代表性。控制与运行过程采用离散时间步长进行滚动计算:慢调控制(如 OLTC)以分钟级更新,快调控制(如逆变器无功、SVG)以秒级更新,以体现不同装置的动态特性与动作约束。

在分布式电源与储能建模方面,光伏与风电采用“出力曲线+随机扰动”的方式生成时序功率,既包含日内变化,也能模拟云影遮挡、阵风等引起的短时波动。逆变器模型考虑有功/无功容量约束、功率因数限制及无功调节响应时间,并实现 Q-V 下垂或定电压控制接口,以便接收台区层下发的无功指令。储能采用双向功率控制模型,包含 SOC 状态更新、充放电效率、最大充放电功率与 SOC 上下限约束,用于执行削峰填谷与出力平滑。负荷模型采用“基础负荷+随机扰动+敏感负荷”组合,分别体现居民/商业日负荷曲线以及电压敏感负荷对电能质量的要求。

为考察策略对不确定因素的适应性,通信模型引入时延与丢包:对关键测量量(节点电压、开关状态、DG 出力)设置不同的延迟分布,并模拟终端短时离线情形,检验分层控制中的降级与容错逻辑。故障模型选择单相接地、两相短路等典型配电网故障类型,设置故障发生时间、持续时间及开关动作时序,用于验证 FLISR 流程与 DG 参与恢复策略的有效性。

案例验证部分设置四类典型场景。场景一为高渗透率 DG 轻载工况:中午光伏出力高、负荷较低,易出现末端电压越上限与反向潮流。对比“无协调控制”“仅靠 OLTC 调压”“本文分层协调控制”三种策略,重点观察电压合格率、OLTC 动作次数、逆变器无功利用率及线路反向过载情况。

场景二为出力快速波动工况:模拟云影造成光伏功率在短时间内大幅变化,检验快调资源对电压闪变的抑制能力以及储能平滑对线路电流波动的改善效果。场景三为通信不确定工况:在存在时延/丢包时评估控制稳定性与越限处置成功率,验证“主站优化+就地自治”机制在信息不完备条件下仍能维持安全运行。场景四为故障与自愈工况:在线路发生故障后,比较传统 FLISR 与“考虑 DG 状态的 FLISR”在隔离准确性、转供成功率、恢复时间以及关键负荷供电连续性方面的差异,并分析 DG 反向馈电对保护配合与重合闸策略的影响。

5 结语

本文围绕“面向分布式电源接入的配电网自动化控制策略”开展研究,针对 DG 高比例接入导致的潮流双向、电压越限、保护配合复杂化与故障恢复难度提升等问题,提出了以分层分区为核心的自动化控制框架,并从电压/无功协调、有功优化与消纳控制、以及考虑 DG 状态的故障自愈 (FLISR) 三个方面给出可实施的控制策略。仿真验证表明:所提策略能够在轻载高发与出力波动等典型场景下有效提升节点电压合格率、抑制电压波动并降低设备频繁动作风险;在故障工况下,通过引入 DG/储能运行信息与转供路径约束,可缩短故障隔离与恢复时间,提高关键负荷供电连续性,整体增强配电网运行韧性与安全边界可控性。

参考文献

- [1] 刘睿. 配电网自愈关键技术[J]. 农村电气化, 2013(7): 12-13. DOI: 10.13882/j.cnki.nedqh.2013.07.023.
- [2] 陈旭, 张勇军, 黄向敏. 主动配电网背景下无功电压控制方法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 143-151.
- [3] 杜珂. 考虑大量分布式电源接入的配电网电压无功控制策略研究[J]. 湖北电力, 2019, 43(5): 53-58.
- [4] 于建成, 迟福建, 徐科, 等. 分布式电源接入对电网的影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 138-141. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8930.2012.01.025.
- [5] 张振伟, 赵晋泉, 韩佳兵, 林昌年, 魏文辉. 考虑大量分布式电源接入的主配网协同优化控制[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(7): 110-115.