

Optimization of substation voltage and reactive power coordination control strategy under the background of new energy grid connection

Chen Zhao

State Grid Tianjin Electric Power Company High Voltage Branch, Tianjin, 300143, China

Abstract

With the integration of large-scale, intermittent, and fluctuating renewable energy sources (e.g., wind power and photovoltaic systems) into the grid, significant changes have occurred in the power flow distribution and voltage characteristics of power systems, posing severe challenges to traditional substation voltage and reactive power control. This paper aims to explore the optimization of substation voltage-reactive coordination control strategies under new energy grid integration. The study first analyzes emerging challenges in substation voltage-reactive control caused by renewable energy integration, then elaborates on three core optimization strategies, and finally discusses key technical support for strategy optimization. By establishing a more intelligent, coordinated, and adaptive control system, this approach seeks to enhance substation capacity for renewable energy integration while ensuring the safety, stability, and economic efficiency of power grid operations.

Keywords

new energy grid connection; substation; voltage control; reactive power optimization; coordinated control

新能源并网背景下变电站电压无功协调控制策略优化

赵宸

国网天津市电力公司高压分公司, 中国·天津 300143

摘要

随着大规模、间歇性、波动性的新能源(如风电、光伏)并网,电力系统的潮流分布与电压特性发生深刻变化,对传统变电站的电压与无功控制带来了严峻挑战。本文旨在探讨新能源并网背景下,变电站电压无功协调控制策略的优化问题。文章首先分析了新能源并网对变电站电压无功控制带来的新问题,随后详细阐述了三种核心的优化控制策略,最后探讨了策略优化的关键技术支撑。通过构建更加智能、协调和自适应的控制体系,旨在提升变电站对新能源的消纳能力,保障电网的安全、稳定与经济运行。

关键词

新能源并网; 变电站; 电压控制; 无功优化; 协调控制

1 引言

电网电能汇集转换以及分配的关键节点在于变电站,保障电网电压稳定,降低网损提升电能质量的核心手段是对变电站实施电压与无功控制。传统变电站的电压无功控制(VVC)依靠有载调压变压器的分接头(OLTC)以及并联电容器或者电抗器来进行就地控制,其策略固定响应也有限。在“双碳”目标这一大背景之下,新能源发电以大规模的态势接入到电网当中,由于其出力具备随机波动的特性,这就导致变电站母线电压频繁且剧烈地出现波动情况。而传统的控制模式,在这样的状况下很难满足实际的调节需求,

因此,研究对构建新型电力系统有重要意义。

2 新能源并网对变电站电压无功控制的影响分析

2.1 电压波动性与不确定性加剧

风电与光伏作为新能源发电的重要组成部分,其出力特性在极大程度上依赖气象条件,呈现出极为显著的强波动性与间歇性。新能源场站并网点的有功功率输出在风速突变或云层遮挡引发光照强度剧烈变化时,会于短时间内出现快速且大幅度的改变。这种剧烈的有功功率波动会直接对电网中的潮流分布做出改变,从而致使变电站母线电压频繁且快速地出现升降情况。传统的电压控制方法像基于固定上下限的继电器策略,或者定时巡检的调整策略这种快速随机的电压波动,传统方法很难及时做出响应。在缺乏对波动趋势予

【作者简介】赵宸(1993-),男,中国山西阳泉人,硕士,工程师,从事电力变电研究。

以预测以及实时跟踪能力的情况下,实际系统状态已然发生变化可控制指令常滞后,这极易导致调节效果欠佳甚至出现反向调节的状况,进而对电网的电能质量以及安全稳定运行产生严重影响。因此,必须发展高效自适应电压控制技术,该技术要能实时感知快速响应并做出预测,以此应对新能源规模化接入所带来的严峻挑战^[1]。

2.2 系统无功需求与分布复杂化

新能源机组接入电网普遍借助电力电子变流器,而传统同步发电机的无功功率输出特性与之相比有着根本区别。在实际运行中,尽管当前主流的变流器拥有一定的四象限运行能力,能够实现无功功率的独立调节然而其控制策略一般会优先保障有功功率的输出。在单位功率因数运行模式下尤为明显,变流器几乎不发出无功功率也不吸收无功功率,致使在系统需要无功支撑之际它处于“静默”状态。在新能源大量发电的时段,线路所输送的有功功率出现显著的增长,由于线路自身的无功损耗和电流平方成正比关系,无功损耗也跟着大幅增大,这进而使得系统的无功需求被进一步提高。若在此时缺乏就地无功补偿,变电站就不得不承担更为繁重的无功调节任务,需从远端供应大量无功功率,如此一来网络损耗有增加的可能,电压质量也会出现恶化情况。这种无功需求因新能源接入位置出力水平,以及运行模式的不同而产生动态变化,让系统无功的时空分布特性变得极为复杂,对无功电压的协调管理与优化配置提出了更高的要求。

2.3 传统控制设备动作频繁与寿命问题

为有效平抑因新能源并网所引发的电压波动情况,变电站内传统的电压无功控制设备比如带有载调压变压器分接头、并联电容器组或者电抗器组等,必须开展更为频繁的投切操作。OLTC的分接头属于机械部件,对于其切换次数有着明确设计寿命限制,触头和传动机构的机械磨损与电蚀会因过于频繁的动作而急剧加速,这不但显著缩短设备的使用寿命,还会带来高昂的维护成本以及更高的故障风险。同样持续的涌流和操作过电压,会因并联电容器组的频繁投切而产生,这不仅对电容器本身的绝缘性能形成威胁,还会严重侵蚀投切开关(如真空断路器)的触头,对其电气寿命产生影响。电网的暂态过电压也可能被频繁的冲击引发,对其他相连设备的绝缘安全构成威胁,在新能源呈现高渗透率态势的电网上,怎样借助优化控制策略在确保电压质量得以保障的情况下,切实有效地降低关键离散设备的动作频次,这已然成为一个对电网经济性和运行可靠性有着重大关联亟待加以解决的关键问题^[2]。

3 面向新能源并网的变电站电压无功优化控制策略

3.1 基于预测与前瞻的协调控制策略

新能源出力以及负荷的短期/超短期预测数据被引入,这正是该策略的核心所在。在借助高精度预测的情形下,控

制系统能够对母线电压以及无功需求在某段时间中的变化趋势展开预判。基于上述情况“被动响应”式的控制策略转变为“主动预防”策略,预先规划OLTC分接头与电容器组的最优动作顺序,午间光伏大发若预测可能致使电压越限时,预先适度上调变压器分接头或者切除部分电容器以此防止电压过高。在预测到傍晚光伏出力会出现骤降的情况下,要提前开展反向操作,相反地能有效对电压波动进行平抑,并且让设备的频繁与无效动作显著减少。

3.2 多设备协同与分层分区控制策略

该策略着重于变电站与上级电网之间以及站内控制设备之间的协调配合,在站内将电压偏差和功率因数当作综合目标来构建优化模型,对OLTC电容器组、电抗器以及SVG等动态无功补偿装置的动作时机与次序进行协调,达成优势互补。在系统层面,实施分层分区控制:变电站身为区域控制中心,在本区域负责电压无功的平衡工作和调度中心以及其他变电站展开信息交互的工作。接受上级给出的电压指令或者协调信号,防止相邻变电站之间或者不同电压等级之间的控制行为出现冲突,达成全局的优化。

3.3 自适应与智能优化控制策略

采用自适应与人工智能算法针对新能源的不确定性开展工作,这是重要的优化方向。在不同工况下自适应控制皆可维持系统优良控制性能,其能够依据电网实时运行状态,如短路容量、新能源渗透率等自动对控制参数予以调整。此外,更进一步应用人工智能算法如模糊逻辑控制、深度强化学习等,通过持续学习运行经验和历史数据形成非线性的最优控制策略。这类策略能实现更精细更智能的控制,可更好地处理系统的不确定性与非线性问题,且并不依赖于精确的数学模型^[3]。

4 支撑优化策略实施的关键技术

4.1 高精度状态感知与预测技术

对系统运行状态予以全面精准且及时地感知,是实现电网优化控制的根本前提。高比例新能源接入的现代电力系统电网,其运行特性正变得日益复杂,传统局部且滞后的监测手段已很难满足精细化管理的需求。对所有高级分析与控制指令生成的物理基础而言,全域同步掌握电网频率、电压相位、角功率潮流等关键参数的毫秒级变化,是重要构成。任何优化算法倘若缺乏这一坚实的数据根基,便如同空中楼阁难以在真实且复杂的电网环境中有效应用。

高级量测体系的全面建设以及技术进步,对于这一目标的达成有着高度的依赖性。同步相量测量单元广泛部署于发电侧输电环节以及用户终端,能够凭借极高的时间精度实现对广域网动态行为的跟踪,为系统稳定分析给予核心数据支撑。智能电表渗透至千家万户,构成了感知负荷细节与分布式能源运行的神经末梢,海量的用户侧数据由此形成,然而,仅仅采集当前状态是远远不够的。大力发展高精度的

超短期与短期新能源功率预测技术,以及负荷预测技术是应对风光出力间歇性与负荷波动性的必要举措,力求准确预判未来数分钟乃至数小时内的发电与用电变化。这些预测模型需要不断提升其时间与空间分辨率,以此为控制决策赢得宝贵的前置时间。

高精度预测技术与广域同步采集系统深度融合,为电网的优化控制带来了前所未有的可能性,可靠的预测数据如同为系统提供了窥见未来的“水晶球”,海量实时数据勾勒出电网运行的精确“体检报告”。基于可靠数据输入,控制中心才得以从被动响应转为主动干预,制定出具备安全性经济性以及清洁性的前瞻性控制策略。在坚实的信息基础上是启动需求侧响应还是投切无功补偿装置、调整发电计划,都要建立在科学预测与实时状态联动上,以此引导电网最终运行在最优的轨迹之中^[4]。

4.2 快速通信与信息交互技术

从根本上而言,协调控制的有效性依赖于信息流快速,且可靠地传输。在电网运行这瞬息万变的环境中,任何控制决策的执行与生成有着极为严格的时效性要求。测量数据出现延迟丢包错误,或者控制指令出现此类状况都极有可能致使系统产生误判抑或响应滞后,情况较轻时会对控制效果造成影响,严重的话甚至可能让局部故障范围扩大。因此,协调控制策略能否从理论模型顺利转化成现场的安全精准操作,信息通信的质量起着直接决定性作用。

此外,必须规划与建设覆盖全域电网的高速低延时通信网络基础设施,以满足这一严苛要求,三个关键环节需如同高度敏感的神经网络一般,被这一网络无缝连接起来。例如,在变电站内部保障智能开关保护装置,以及监控系统与这些设备彼此间实现瞬时数据的互通;在纵向维度上确保变电站和区域调度中心之间海量运行数据,以及控制指令能够实现双向的可靠传输,在横向维度上,达成相邻变电站间有关潮流电压这类边界信息的实时共享。为分布在不同地理位置的控制主体,提供一个统一的近乎实时的态势感知与协同操作平台,唯有构建起这种立体化高可靠的通信架构才行。

由此通信的实时性与可靠性,构成了实现复杂分层分区协调控制策略必不可少的物理基础。各个控制节点若没有稳定高速的通信链路来支撑,便如同信息孤岛,一般只能依据局部有限的信息做出独立决策,难以形成系统级的协同效应。预先设计的协调控制逻辑要真正发挥作用,需要状态信息能毫无阻碍地汇集,控制指令近乎瞬时地抵达执行终端才行。

4.3 高级分析与决策支持技术

在成功把电网运行的广域海量数据获取后,要将其转化成有效的控制指令这得依靠强大后台分析系统具备的处理与决策能力。若这些数据仅仅停留在采集和展示的层面,那么它们的价值将会大打折扣。先进的计算模型与算法是必须借助的,要开展数据深度挖掘融合及分析工作借此将系统运行的内在规律与发展趋势洞察到最终把精准的控制策略生成出来。现代电网智能化的核心体现在于这一从数据到决策的转化过程,此过程亦是达成优化运行的关键环节^[5]。

为实现这一目标,专门的在线分析与决策支持软件需要被部署在电网的关键节点,在线电压无功优化计算程序部署在变电站或区域控制主站,是此类系统的典型代表。在秒级甚至毫秒级的时间尺度内,该软件基于内嵌的电网物理模型与优化算法,能够持续接收来自量测系统与预测模块的实时及前瞻性数据。对于当前及未来短时间内它能快速求解出最优的控制策略,如无功补偿设备、投切变压器、分接头调整等,传统依赖人工经验周期较长的离线计算方式,被这种在线闭环控制模式彻底改变,控制的精准性与响应速度由此得到极大提升。

5 结语

在新能源并网已然成为必然趋势的大背景下,对传统变电站电压无功控制策略展开优化升级工作,这无疑是保障电网能够安全稳定运行推动新能源实现高效消纳的必然要求所在。本文剖析了新能源接入引发的诸多问题,比如电压波动愈发剧烈、无功需求繁杂、设备动作频繁等,进而提出了三大核心控制策略。未来在推进新型电力系统建设时,变电站电压无功控制会朝着智能化自适应化以及全局协同化方向发展,以此为构建清洁低碳安全且高效的能源体系筑牢根基。

参考文献

- [1] 谢琳.配电网无功电压协同控制架构的研究[D].广东工业大学,2024.
- [2] 张智鹏.含分布式电源的主动配电网电压无功协调控制研究[D].西安理工大学,2021.
- [3] 宋明刚.主动配电网下的电压无功自律-协同控制[D].安徽大学,2022.
- [4] 胡平,吴斌,郭力,胡诗尧,杨书强.基于虚拟变电站的末端配电网光储协调控制方法[J].储能科学与技术,2019,8(04):629-636.
- [5] 刘明,管红梅.智能变电站高压无功补偿器协调控制仿真[J].计算机仿真,2018,35(10):162-165+225.