

# 提升电力工程电气系统稳定性的技术研究

李晓舟

华能内蒙古电力热力销售有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i6.16816

**[摘要]** 电力工程朝规模化、复杂化发展,新能源大规模并网与新型负荷快速增加,让电气系统稳定性遭遇严峻挑战。本文从电气系统稳定性的核心定义与分类切入,系统分析当前系统在结构环境、设备控制、监测处置方面的突出问题,着重研究设备选型优化、继电保护改进等关键技术。经理论分析与实践验证,明确了各技术应用路径与成效。研究成果为提升电力工程电气系统稳定性提供了技术支撑,对保障电力可靠供应、推动新型电力系统建设意义重大。

**[关键词]** 电力工程; 电气系统; 稳定性; 关键技术

中图分类号: TM712 文献标识码: A

## Research on Technologies for Improving the Stability of Electrical Systems in PowerEngineering

Xiaozhou Li

Huaneng Inner Mongolia Electric Power and Heating Sales Co., Ltd.

**[Abstract]** With the development of power engineering toward large-scale and complexity, the large-scale integration of new energy and the rapid increase of new loads have posed severe challenges to the stability of electrical systems. Starting from the core definition and classification of electrical system stability, this paper systematically analyzes the prominent problems in the current system in terms of structural environment, equipment control, and monitoring & disposal, and focuses on the research of key technologies such as equipment selection optimization and relay protection improvement. Through theoretical analysis and practical verification, the application paths and effects of each technology are clarified. The research results provide technical support for improving the stability of electrical systems in power engineering, and are of great significance for ensuring reliable power supply and promoting the construction of new power systems.

**[Key words]** Power Engineering; Electrical System; Stability; Key Technologies

### 引言

当前我国电力工程进入高质量发展阶段,新能源装机容量持续攀升,2024年全国风电、光伏装机总量突破12亿千瓦,电动汽车充电桩、数据中心等新型负荷年增长率超20%,电气系统运行环境日趋复杂。系统稳定性作为电力可靠供应的核心保障,直接关系工业生产连续性与居民生活质量,2023年某省级电网因新能源出力骤降引发暂态失稳,导致2个工业园区停电4小时,造成直接经济损失超1.2亿元。因此,深入研究提升电气系统稳定性的关键技术,解决结构、设备、监测等层面的痛点,已成为电力工程领域的迫切需求,对实现“双碳”目标、构建新型电力系统具有重要现实意义。

### 1 电力工程电气系统稳定性概述

电力工程电气系统稳定性,是衡量系统在正常运作或遭遇各类扰动时,能否维持或恢复至额定运行状态,且确保所有电气

设备参数始终处于额定允许范围内的关键指标。具体而言,对于低压系统,电压需稳定在 $380V \pm 5\%$ 的区间;中压系统电压要保持在 $10kV \pm 5\%$ 的范围;频率则应精准控制在 $50Hz \pm 0.2Hz$ 。依据扰动特性与系统响应方式的不同,电气系统稳定性主要划分为静态稳定性、暂态稳定性以及动态稳定性三类。静态稳定性体现的是系统在小扰动情境下的自我恢复能力。例如,居民用电负荷在日间出现小幅波动时,系统能够凭借自身的调节机制,实现电压的自主调整,维持稳定运行。暂态稳定性主要针对短路、线路断线等大扰动情况。在发生此类大扰动后的0.1-2秒内,系统必须有效维持发电机功角的稳定,防止机组失步,保障系统的基本运行架构不被破坏。动态稳定性重点关注扰动发生后数秒至数分钟内系统振荡的抑制情况。要避免低频振荡引发的电压、频率持续波动,防止系统陷入失稳状态;影响电气系统稳定性的核心因素众多,涵盖系统拓扑结构、设备性能、控制策略以及运行

环境等方面。其中,发电机励磁系统的速度极为关键,需小于0.05秒,才能有效抑制暂态功角偏移。而无功功率供需失衡,则是导致电压失稳的首要因素。在当前新型电力系统中,新能源占比不断提升,系统惯量从传统同步机组主导的5-10秒大幅降至1-3秒,这进一步加剧了稳定性管控的难度,迫切需要通过多种技术的协同配合,来实现系统的安全稳定运行<sup>[1]</sup>。

## 2 当前电力工程电气系统稳定性面临的问题

### 2.1 系统结构与运行环境问题

当前电气系统结构与运行环境的变化,给系统稳定性带来显著挑战。一方面,新能源大规模并网使系统拓扑从“强直弱交”的传统模式向“源网荷储”多元结构转变。风电、光伏出力的间歇性导致功率波动幅度大,在春季晴雨交替时段,部分风电场单日出力可从峰值骤降至低谷,引发周边220kV变电站频率波动超出国标允许范围。另一方面,新型负荷的随机性加剧系统调节压力。电动汽车直流充电桩单桩功率大,夏季晚高峰时段集中充电会使区域10kV线路负荷波动幅度大幅上升,导致线路末端电压偏差超标,影响居民用电设备正常运行。此外,极端天气频发也威胁系统稳定,2024年南方某省暴雨导致多条110kV线路杆塔倾斜跳闸,因系统备用容量不足,无法及时补充功率缺口,引发连锁反应,造成多个工业园区停电,凸显系统结构韧性与运行环境适应性的不足。

### 2.2 设备与控制技术问题

设备性能不足与控制技术滞后是制约电气系统稳定性的关键短板。在设备方面,部分老旧火电机组励磁系统为模拟式结构,响应时间长,无法满足暂态稳定调节需求。当机组负荷骤升时,因励磁调节滞后,功角摆动过大,会触发机组低电压保护动作,险些引发失稳。110kV及以下变压器抗短路能力不足问题突出,城市配电网中部分变压器在遭遇线路短路时,短路电流远超额定电流,导致绕组变形量超标,被迫停运检修较长时间。控制技术方面,传统PID控制器参数固定,在多扰动叠加场景下调节超调量大,变电站电压控制器在新能源出力与居民负荷双重波动时,电压调节超调严重,持续较长时间后才恢复正常。此外,设备老化问题普遍存在,全国约20%的10kV开关柜运行年限超15年,绝缘拉杆老化导致局部放电电量超标,因开关柜故障引发的稳定性事件占比较高。而控制算法缺乏自适应性,难以应对系统运行工况的动态变化。

### 2.3 监测与故障处置问题

监测覆盖不全与故障处置效率低严重影响系统稳定性恢复。在监测环节,现有系统多聚焦发电机、变压器等主设备,对线路参数、无功功率流向的监测覆盖率低。冬季覆冰期间,部分110kV线路因未实时监测线路阻抗变化,未能发现覆冰导致的阻抗值异常升高,最终引发线路跳闸。故障诊断依赖人工分析,调度中心接收的监测数据需较长时间处理才能初步判断故障类型,变电站发生单相接地故障后,运维人员通过逐段排查线路,耗时数小时才定位故障点,延长停电时间。故障处置方面,传统手动操作响应时间长,城市配电网10kV线路故障后,因分段开关需人

工现场操作,恢复供电耗时远超用户可接受的停电耐受时间。此外,监测数据与调度系统未实现完全互通,部分电厂发电机振动监测数据仅存储于厂内系统,未实时上传至省级调度中心,调度员无法及时掌握设备状态,错失故障预防时机。

## 3 提升电气系统稳定性的关键技术

### 3.1 电气设备选型与优化配置技术

电气设备选型与优化配置是提升系统稳定性的基础。在发电机选型上,优先选用数字式励磁系统,其响应时间 $\leq 0.05$ 秒,暂态调节精度达 $\pm 2\%$ ,国内主流WKKL-4型数字励磁系统在300MW机组应用中,可将负荷突变时的功角波动控制在 $\pm 10^\circ$ 内,远优于模拟式励磁系统的 $\pm 25^\circ$ 波动范围;变压器选型需满足抗短路能力要求,110kV及以上变压器短路耐受时间 $\geq 2$ 秒,采用铜箔绕组结构替代传统导线绕组,可使抗冲击性能提升40%,S13-5000kVA型变压器在110kV配电网应用中,遭遇短路电流冲击时绕组变形量 $< 0.5$ mm,无需检修即可恢复运行。在配置优化方面,采用“N-1”原则设计线路与母线,220kV变电站普遍采用双母线接线,单条母线故障时,备用母线可通过快速切换装置在0.5秒内完成切换,保障供电连续性;通过潮流计算优化设备容量,某工业园区根据未来5年负荷增长预测,将10kV配电变压器容量从800kVA调整为1000kVA,避免过载导致的电压下降,使低压侧电压稳定在 $380V \pm 3\%$ 范围内,局部系统稳定性显著提升<sup>[3]</sup>。

### 3.2 继电保护与自动装置改进技术

继电保护与自动装置的改进是保障系统稳定的关键防线。在继电保护技术方面,采用纵联差动保护替代传统过流保护,动作时间从0.5秒缩短至0.02秒,LFP-901型纵联保护装置在110kV线路应用中,可在短路发生后0.015秒内跳闸,有效隔离故障区域,避免故障扩大;自动重合闸装置优化采用“自适应重合闸”技术,通过分析故障电流波形判断故障类型,瞬时性故障重合成功率从70%提升至95%,该技术在某市级配电网应用后,瞬时性故障恢复供电时间缩短至10秒,大幅减少停电损失。另外,自动切机切负荷装置可在系统功角失稳前主动干预,QFSJ-2型切负荷装置在火电厂应用中,当系统频率降至49.5Hz时,可自动切除10%的非重要负荷,使频率在3秒内恢复至49.8Hz以上;针对新能源场站,开发专用低电压穿越保护装置,光伏逆变器需满足电压跌落至0%时保持并网运行150ms的要求,国内某光伏电站通过该技术,在电网电压暂降时未发生脱网,避免功率缺口扩大引发的系统波动。

### 3.3 无功补偿与电压控制技术

无功补偿与电压控制是维持系统电压稳定的核心手段。在无功补偿设备选型上,优先采用静止无功发生器(SVG),其响应时间 $\leq 20$ ms,无功调节范围 $\pm 200$ Mvar,某220kV变电站安装SVG后,电压波动幅度从 $\pm 5\%$ 缩小至 $\pm 2\%$ ,满足精密制造企业对电压稳定性的严苛需求;配电网层面采用分布式无功补偿装置,柱上SVG单台容量50-100kvar,可实时补偿线路无功损耗,某城区10kV线路安装该装置后,线损率下降3%,电压合格率从85%提升至98%。电压控制技术采用分层分区策略,500kV电网电压偏

差控制在 $\pm 2\%$ , 110kV电网控制在 $\pm 3\%$ , 通过调度自动化系统实现无功功率自动分配, 某省级电网应用该策略后, 全网电压合格率稳定在99.5%以上; 开发无功-电压协调控制算法, 整合SVG、并联电容器组等设备, 实现多设备协同调节, 某工业园区通过该算法, 在负荷波动时将无功调节响应时间缩短至50ms, 电压超调量控制在 $\pm 1\%$ 以内, 完全满足敏感负荷运行需求<sup>[4]</sup>。

### 3.4 灵活交流输电系统 (FACTS) 技术

灵活交流输电系统 (FACTS) 技术能显著提升系统动态稳定性。静止同步补偿器 (STATCOM) 作为核心 FACTS 设备, 可快速调节无功功率, 某 500kV 变电站安装的  $\pm 200\text{Mvar}$  STATCOM, 在新能源出力波动时能在 10ms 内提供无功支撑, 将电压波动控制在  $\pm 1.5\%$ ; 可控串联补偿 (TCSC) 通过调节线路串联电抗值, 提升线路输电能力, 某 220kV 线路安装 TCSC 后, 输送容量从 150MW 提升至 220MW, 同时抑制功率振荡, 振荡幅值从  $\pm 8\%$  降至  $\pm 2\%$ , 避免低频振荡引发的系统失稳。统一潮流控制器 (UPFC) 具备调节电压、阻抗、功率的综合能力, 某省级电网 UPFC 投运后, 实现跨区域功率灵活调度, 在系统扰动时功率转移时间缩短至 0.1 秒, 有效避免潮流越限引发的稳定问题; FACTS 技术与新能源场站协同控制成为趋势, 风电场配套的 STATCOM 与风机变流器联动调节, 可将风电出力波动导致的电压偏差从  $\pm 6\%$  缩小至  $\pm 3\%$ , 大幅提升新能源并网稳定性, 国内某风电场通过该协同控制技术, 全年并网运行稳定性指标达 99.8%。

### 3.5 分布式电源接入与微电网技术

分布式电源接入与微电网技术为系统稳定性提供新路径。在分布式电源接入方面, 采用“主动支撑”控制策略, 光伏逆变器集成虚拟惯量与下垂控制功能, 模拟同步发电机的惯量特性, 某分布式光伏电站应用该策略后, 系统惯量从 1.2 秒提升至 2.5 秒, 频率波动幅度缩小 40%; 储能系统与分布式电源协同运行, 采用“充放电-调频”联动控制, 某工业园区 10MW/20MWh 储能系统在

负荷突变时, 可在 0.2 秒内响应调频需求, 将频率偏差控制在  $\pm 0.1\text{Hz}$  内, 满足系统调频精度要求。微电网技术通过“孤岛-并网”无缝切换提升局部稳定性, 社区微电网配置的 PCS 变流器切换时间  $\leq 50\text{ms}$ , 在电网故障时微电网自动转入孤岛运行模式, 保障医疗设备、通信基站等重要负荷供电, 供电可靠性达 99.99%; 微电网能量管理系统 (EMS) 优化分布式电源出力分配, 某微电网通过 EMS 调度风电、光伏、储能协同运行, 功率波动幅度从  $\pm 25\%$  降至  $\pm 10\%$ , 显著提升微电网与主网互联时的稳定性, 降低对主网的冲击<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

提升电气工程电气系统稳定性是构建新型电力系统的核心, 本文剖析了系统在结构、设备、监测等方面的问题, 研究了设备选型优化、继电保护改进等关键技术及其应用效果。未来, 应推动数字孪生与 FACTS 等技术的深度融合, 实现系统稳定性的精准预测与动态调控; 同时, 完善行业标准, 统一新能源并网稳定性指标。通过持续创新与应用, 有效应对新能源与新型负荷挑战, 为能源转型和经济社会高质量发展筑牢根基。

### [参考文献]

- [1] 林士琪. 电力系统的继电保护稳定性措施分析[J]. 电子技术, 2021, 50(03): 160-161.
- [2] 袁志军. 提高电力系统继电保护稳定性的方法研究[J]. 科学技术创新, 2020(05): 161-162.
- [3] 陈晓明. 张伟. 电力系统电能质量问题的研究与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 1-7.
- [4] 刘志学. 探析电气工程及其自动化技术下的电力系统自动化发展[J]. 时代汽车, 2022, (11): 19-20.
- [5] 刘运嘉. 任颖颖. 战奕浩. 基于电气自动化技术的电力系统[J]. 中国科技信息, 2022, (05): 64-65.