

复杂接线方式下变电运行技术的应用

杨 萌

内蒙古超高压供电公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘要：变电运行技术属于工业生产过程中的关键内容，同时也是推动电力发展的重要核心技术。随着电力系统的快速发展，变电运行技术也得到一定发展，尤其是在面对复杂的接线方式时，变电运行技术的价值得到充分发挥。基于此，也就需要相关变电运行人员能够对复杂接线方式下变电运行技术进行深入研究，并对其进行不断优化和改进，以此推动我国电网技术稳定前行。

关键词：复杂接线方式；变电运行技术；变电站

对变电运行中存在的一些技术问题着手，提出复杂接线方式下变电运行技术的具体应用，主要从双母线分段带旁路复杂接线，以及自耦变压器与三绕变压器并行两方面进行探究。变电运行技术通过电磁转换、多级保护、智能控制三大核心原理，实现电能的可靠传输与精准分配^[1]。

1 复杂接线方式的定义与特点

1.1 复杂接线方式的定义。复杂接线方式是指电力系统或电路中元件之间采用多路径、多节点、多层级的混合连接形式，其结构特征包括：拓扑复杂性：包含多个并联、串联、环形或交叉连接的回路，无法通过简单的串并联等效方法简化分析。功能多样性：通常涉及多电源输入、多级负载分配或集成保护控制装置（如母差保护、自耦变压器等），需协调多种设备运行参数。分析门槛高：需借助基尔霍夫定律、矩阵计算或智能算法（如拓扑优化）进行系统建模，传统欧姆定律难以直接适用。典型应用场景。电力系统：如双母线分段带旁路接线、三绕组变压器并列运行等，需通过动态调整分裂压板或保护装置实现稳定供电。工业控制：包含集成电路、微处理器的多级控制电路，需考虑信号传递路径与电磁兼容性。

1.2 复杂接线方式的特点。结构特点。拓扑结构复杂。采用多回路、多节点布局（如环形、多边形、双母线分段等），形成多路径冗余设计，提升系统容错能力。连接元件数量多，常包含母分开关、旁路母线、自耦变压器等设备，需协调多层次逻辑关系。空间布局紧凑。在有限空间内实现高密度电气连接，例如多角形接线通过模块化设计优化空间利用率。布线路径需规避设备间电磁干扰，对线束布置精度要求极高。功能特点。多电源输入与负载分配。支持多电源并列运行，通过分段母线或环形网络实现动态负荷转移，降低单点故障影

响。集成多级保护装置（如母差保护、失灵保护），需通过压板投退和参数匹配保障协同性。高可靠性与灵活性。冗余设计使故障设备可快速隔离，如双母线分段接线通过旁路母线实现不停电检修。通过拓扑优化算法动态调整接线方式，平衡负载并降低线损（可减少15%~20%）。技术挑战与局限性。运维复杂度高。倒闸操作需严格遵循标准化流程，母分开关分裂压板调整、保护装置投退易引发误操作。设备状态监测要求精细（如变压器油色谱、局部放电数据），需依赖智能监控系统实时预警。成本与设计难度大。设备投资成本高（如双母线需大量断路器、隔离开关），且二次控制逻辑复杂。多角形接线等复杂结构可能因开环运行扩大故障影响范围，需通过数字孪生技术提前模拟风险。

2 变电运行技术的核心原理

2.1 变压原理。电磁感应定律。通过铁芯与绕组构成的闭合磁路，将一次侧交流电转换为交变磁场，并在二次侧绕组中感应出电动势，实现电压升降。铁芯与线圈设计。铁芯采用硅钢片叠压，减少涡流损耗；线圈匝数差异决定变压比，例如升压变压器次级线圈匝数多于初级。

2.2 配电与保护原理。多级电压转换。高压电能经升压变压器（如10kV→220kV）传输至远方，再通过降压变压器（如220kV→380V）适配用户需求。配电网采用分段母线、环形网络等结构，实现负荷动态分配。保护装置协同。配置断路器、继电保护装置（如差动保护、过流保护），快速隔离短路、过载等故障，避免系统崩溃^[2]。

2.3 控制与协调原理。自动化控制逻辑。通过SCADA系统（数据采集与监控系统）实时监测电压、电流、功率因数等参数，并自动调节变压器分接头或投切电容器。数字孪生技术模拟运行状态，优化拓扑结构以减少线损。动态平衡与同步。并列运行的变压器需满足电压比相同、阻抗匹配等条件，防止环流或磁通不平衡。

2.4 温度控制与状态监测。干式变压器采用强制风冷或自然散热设计，油浸式变压器通过油循环散热，确保绕组温度低于安全阈值。结合局部放电检测、油色谱分析等技术，预判绝缘老化或过热风险。

3 变电运行技术在复杂接线方式下的应用

3.1 典型复杂接线场景与技术应用。双母线分段带旁路接线。通过分裂压板调整与母差保护装置投退实现母线故障快速隔离，旁路系统无缝切换保障供电连续性，降低单点故障影响范围。运维中需实时监测母分开关状态，备用母分开关的失灵保护需与运行状态联动，避免误动作。自耦变压器与三绕组变压器并行运行。采用多台自耦变压器（如2台）或三绕组变压器（如3台）并列运行，解决阻抗冲突问题，确保多电源输入的电压稳定。通过动态参数匹配（如变比、阻抗一致性）抑制环流，防止磁通失衡导致设备过热。环形网络与多角形接线。环形接线支持负荷动态分配，通过分段断路器实现故障区域快速隔离，减少停电范围。多角形接线需优化空间布局，规避电磁干扰，依赖高精度布线技术保障信号传输稳定性。

3.2 核心技术支持与管理策略。智能监控与自动化控制。部署SCADA系统实时采集电压、电流、功率因数等参数，结合数字孪生技术模拟运行状态，预判设备老化或过热风险。自动化调节分接头或投切电容器，动态平衡电网负载，降低线损（优化后线损减少15%~20%）。保护装置协同与冗余设计。集成母差保护、失灵保护等多级保护逻辑，通过压板投退参数匹配确保协同性，实现0.1秒级故障切除。冗余路径设计（如旁路母线、备用断路器）支持不停电检修，提升系统可用性。动态拓扑优化与运维标准化。采用矩阵计算或智能算法优化电气拓扑结构，减少复杂接线的电磁干扰与能量损耗。制定标准化倒闸操作流程，规范母分开关分裂压板调整、保护装置投退顺序，降低人为误操作风险。复杂接线方式下的变电运行技术以冗余保护、智能控制、动态优化为核心，显著提升电网可靠性与经济性，但需持续攻克高成本与协同控制难题。

4 变电运行技术的挑战与解决方案

4.1 技术挑战与应对措施。设备复杂性与运维效率。挑战：复杂接线方式（如双母线分段、环形网络）导致设备数量激增，运维操作复杂度高，易因误操作引发事故。解决方案：部署智能监控系统（如SCADA、数字孪生）实时采集设备状态数据，预判故障并生成检修建议。采用自动化倒闸操作技术，规范母分开关分裂压板调整、保护装置投退流程，降低人为失误风险。新能源

接入与电网稳定性。挑战：高比例逆变器接入导致电网惯性降低，电压波动、谐波干扰加剧，影响电能质量。解决方案：应用虚拟同步机技术（VSG），模拟同步发电机特性，增强电网抗扰动能力。部署动态无功补偿装置（如SVG、STATCOM），快速调节无功功率，抑制电压闪变。火灾与设备安全风险。挑战：变压器等设备因过热、绝缘老化引发火灾，传统灭火手段效率低且易导致二次损害。解决方案：采用全氟己酮气体自动灭火系统，结合分布式温度探测技术，实现火情0.1秒级响应与精准喷淋覆盖。强化设备状态监测（如油色谱分析、局部放电检测），提前预警绝缘劣化风险。

4.2 管理挑战与优化策略。人员素质与标准化执行。挑战：变电运维人员技能不足，操作流程执行松散，导致安全隐患累积。解决方案：建立模块化培训体系，结合VR仿真技术模拟复杂接线倒闸操作、故障应急演练，提升实操能力。制定标准化运维手册，明确设备巡检周期、缺陷处理流程，并通过数字化平台跟踪执行情况。多系统协同与通信瓶颈。挑战：二次控制系统逻辑复杂，通信网络延迟或中断影响保护装置协同效率。解决方案：优化通信网络架构，采用光纤冗余环网与5G切片技术，保障关键数据传输实时性。集成母差保护、失灵保护等多级保护逻辑，通过矩阵算法优化协同参数，实现0.1秒级故障切除。变电运行技术需通过智能化监控、标准化管理、多系统协同三大方向突破现有挑战，重点解决设备复杂性、新能源波动、人为操作风险等问题，最终实现电网安全性与经济性的双重提升。

5 变电运行技术中的故障诊断与处理方法

5.1 故障诊断技术。数据驱动诊断。通过实时监测配电网节点负荷、电压电流等参数，结合故障特征样本库比对，快速定位异常区域，故障定位效率提升50%以上。利用智能算法（如矩阵计算）分析电压波动模式，区分接地故障、高压保险熔断等场景，例如：若一相电压为零，另两相电压升高至线电压，判定为单相接地故障；若三相电压持续摆动且超过阈值，则提示谐振风险。模型仿真与虚拟测试。构建配电网数字孪生模型，输入多种故障模拟规则（如线路短路、设备过载），生成故障应对方案库，辅助运维人员快速决策。通过UPS电源监控系统实时校验直流切换逻辑，避免因蓄电池电压越限或线路接触不良导致保护误动。

5.2 典型故障处理方法。线路跳闸故障。诊断流程：检查保护装置、故障录波器是否异常；核实断路器油位（油式开关）或储能状态（弹簧开关）。处理方案：若为瞬时故障，启用重合闸恢复供电；若为永久故障，切

除故障段并通知巡检。母线故障。立即停用故障母线，通过分段断路器隔离故障区域，优先恢复非故障段供电。对差动保护动作的母线，需排查外部设备无异常后试送电，避免扩大停电范围。直流接地故障。采用绝缘监测装置定位接地支路，优先排查二次回路老化、潮湿等隐患，必要时停用非关键负载。对UPS电源切换故障，检查蓄电池组电压及逆变器输入线路，防止因切换失败导致保护装置失电。变压器故障。重瓦斯与差动保护同时动作时，禁止强送电，需通过油色谱分析确认内部无短路。后备过流保护动作时，可切除故障负荷后试送电，若失败则启动备用变压器。

5.3 智能化与标准化提升。自动化控制。部署SCADA系统实现断路器远程分合闸，减少人工操作风险。应用虚拟同步机（VSG）技术增强电网惯性，抑制新能源波动引发的电压闪变。运维标准化。制定设备巡检周期表，规范油色谱分析、局部放电检测等关键项目。建立模块化应急手册，例如：单相接地故障优先拉路检查非关键线路；谐振故障需调整系统参数或投入消谐装置。

6 变电运行技术未来发展趋势

6.1 智能化与数字化深度融合。全站数字化与AI驱动。智能变电站将全面集成物联网、5G通信与数字孪生技术，实现设备状态实时监测、故障预测和自动调节，运维效率提升40%以上。人工智能算法（如深度学习）应用于电网负荷预测与保护逻辑优化，支持0.1秒级故障诊断与隔离。虚拟现实（VR）与远程运维。VR技术用于变电站设计模拟、操作培训及故障演练，培训周期缩短50%，误操作率降低60%。远程监控系统结合边缘计算，实现无人值守变电站的跨区域集中管控。

6.2 模块化与绿色化技术升级。模块化预制舱式变电

站。采用标准化组件设计，建设周期缩短至传统模式的1/3，灵活适配新能源电站、数据中心等场景。移动式箱式变电站满足应急供电需求，2025年市场规模预计突破200亿元。环保材料与低碳技术。六氟化硫（SF₆）替代技术、环保型变压器油应用，碳排放减少30%以上。节能型元器件（如低损耗铁芯）与自然散热设计，能耗降低15%-20%。

6.3 新能源适配与多能协同。光储融合与虚拟电厂。分布式光伏+储能系统深度集成，通过智能逆变器与能量管理系统实现“源网荷储”动态平衡。虚拟电厂聚合分布式资源，参与电力市场交易，提升新能源消纳能力。氢能与电网耦合。绿氢制备与电解制氢装置接入变电站，支持工业热源与重卡充电等场景，2030年绿氢成本有望与灰氢持平。

6.4 政策与产业协同。国内政策驱动：“十四五”智能电网规划要求2025年建成50个智能变电站标杆项目，带动千亿级投资。明确新能源专用变电站技术攻坚，推动环保型高压开关等设备研发。国际供应链重构：中美博弈加速东南亚、拉美等地产能布局，跨国运营能力成企业核心竞争力。

总之，未来变电运行技术将围绕智能化、模块化、绿色化三大主线发展，深度融合新能源与数字化技术，同时需突破成本控制、标准统一及数据安全等瓶颈，以支撑新型电力系统的高效稳定运行。

参考文献

- [1]王东,刘海云,等.复杂接线方式下变电运行技术的应用研究.2020.
- [2]黄浩宇,张慧园,等.复杂接线方式下变电运行技术的应用探索.2023.