

变电站电气主接线设计及主变压器的选择

王舒宁¹ 董家源²

1. 天津市津航电力工程有限公司 天津 300450

2. 天津市泰达工程设计有限公司 天津 300450

摘要：变电站是电力系统电能传输与分配的核心枢纽，电气主接线设计与主变压器选择直接决定供电可靠性、经济性与运行灵活性。本文结合相关标准规范，分析不同类型主接线的结构特点与适用场景，探讨主接线选型的核心依据；重点研究主变压器参数选择、容量计算及台数配置方法，阐述负荷特性、环境条件等因素的影响；提出电气主接线与主变压器的协同优化思路，解决两者匹配性问题。研究表明，合理的主接线形式与适配的主变压器选型，可有效降低运行损耗、提升供电可靠性。

关键词：变电站；电气主接线设计；主变压器；选择要素；协同优化

引言：随着电力系统向高电压、大容量、智能化方向发展，变电站作为电网连接电源与负荷的关键节点，其设计合理性直接影响电网安全稳定运行。电气主接线承担电能汇集、分配与故障隔离功能，主变压器则实现电压等级转换，两者的设计与选择是变电站工程的核心环节。当前，不同规模、负荷性质的变电站对供电可靠性与经济性需求差异较大，不合理的设计易导致停电风险增加、能耗上升。因此，深入研究变电站电气主接线设计、主变压器选择及两者协同优化，对提升电网运行效率、保障供电质量具有重要的工程意义与现实价值。

1 变电站电气主接线设计基础

1.1 电气主接线的功能与分类

电气主接线承担着电能汇集、分配、电压变换及系统保护等关键功能。其通过母线、断路器、隔离开关等设备的有序连接，实现多路电源的接入与负荷的灵活供电，同时为变压器提供电压转换接口，满足不同电压等级的传输需求。在故障发生时，主接线需配合继电保护装置快速隔离故障区域，保障非故障部分的持续运行。

根据结构复杂度与适用场景，主接线可分为三类：（1）简单接线（如单母线接线），以低成本、易操作为特点，适用于小容量或非重要负荷变电站；（2）中等复杂接线（如双母线接线），通过两组母线互为备用提升可靠性，广泛用于中高压枢纽变电站；（3）复杂接线（如3/2接线、角形接线），通过多断路器环网结构实现高冗余度，常见于超高压或特高压变电站。分类依据主要围绕供电可靠性、经济性及运维便利性展开，需结合变电站电压等级、负荷性质及未来扩展需求综合选定。

1.2 主接线设计原则

主接线设计需遵循以下四大核心原则：（1）可靠性

为首要目标，通过冗余设备配置与故障快速隔离机制，确保系统在单一故障下仍能维持关键负荷供电；（2）灵活性要求接线形式支持倒闸操作、设备检修及负荷转移，减少非计划停电时间；（3）经济性需平衡初始投资与长期运维成本，避免过度冗余导致资源浪费；（4）可扩展性需预留设备接入空间与电压升级接口，适应未来负荷增长与电网结构调整。此外，设计需严格符合《电力工程电气设计手册》《变电站设计技术规程》等标准规范，确保方案合规性与安全性^[1]。

2 主接线形式分析与选型

2.1 典型主接线形式对比

2.1.1 单母线分段接线

单母线分段接线通过断路器将母线分为两段或多段，核心优势是结构简单、投资成本低，仅需增加1-2台分段断路器，即可实现故障段快速隔离，保障非故障段供电，设备成本较双母线接线降低约30%。该形式适用于中小容量变电站，适配6-10kV出线6-8回、35-66kV出线4-6回的场景，尤其适合二、三级负荷为主、对短时停电容忍度较高的住宅小区、一般工业区。其局限性在于母线故障时停电范围大，某段母线短路后，该段所有回路需停电检修，可靠性受母线本身限制；且双回路架空出线需交叉跨越，增加施工难度，更适用于电缆出线为主的变电站。

2.1.2 双母线接线

双母线接线通过两组独立母线实现冗余供电，可靠性显著优于单母线分段，工作母线故障时，母联断路器可在0.1-0.3秒内切换负荷至备用母线，恢复供电快，适用于医院、数据中心等一级负荷场景。经济性上，其需配置两组母线、多组隔离开关及母联断路器，设备成本较单母线分段高40%-60%，占地面积增加20%-30%，但

高可靠性可减少停电损失，长期运营经济性凸显。该形式适用于35kV出线 > 8回、110-220kV出线 > 5回的城市中心枢纽站、大型工业园区变电站。

2.1.3 3/2接线与角形接线

3/2接线是超高压变电站主流选择，通过3台断路器连接2个元件至两组母线，形成高可靠性环网，任一母线或断路器故障仅影响单个元件短时停电，可靠性接近100%。但该形式需大量断路器及电流互感器，投资较双母线高50%-80%，二次控制复杂，仅适用于跨区域输电枢纽站等特高压场景。角形接线通过断路器首尾相连形成环路，无独立母线，设备少、投资低，但扩展性差，新增回路需改造原有环路，保护配置复杂，需谨慎选用。

2.2 主接线选型依据

2.2.1 变电站规模与电压等级

变电站规模直接决定主接线复杂度：小型变电站（6-10kV、出线 ≤ 4回）优先采用单母线接线降低成本；中型变电站（35-110kV、出线6-12回）选用单母线分段或双母线接线，平衡可靠性与经济性；大型变电站（220kV及以上、出线 > 12回）需采用3/2或角形接线，满足高可靠性需求。电压等级越高，主接线越复杂，如500kV变电站几乎均采用3/2接线，10kV变电站以单母线分段为主。

2.2.2 负荷性质与供电可靠性要求

负荷性质是选型关键，需按负荷等级匹配：一级负荷（医院、交通枢纽）采用双母线或3/2接线，确保零停电；二级负荷（一般工业、商业区）选用单母线分段接线，允许短时停电；三级负荷（农业灌溉、临时用电）采用单母线接线控制成本。某化工园区因含大量一级负荷，选用双母线接线，虽增加初期投资，但有效降低停电风险。

2.2.3 未来扩建需求与运维便利性

选型需预留扩建空间，规划新增出线的变电站，应避免角形接线等扩展性差的形式，优先选择单母线分段或双母线接线，便于后续扩容。运维方面，3/2接线可靠性高但断路器多，巡检排查难度大，需专业团队；单母线分段接线结构简单、运维成本低，适合偏远地区等运维资源有限的场景，可降低长期运营压力^[2]。

3 主变压器选择的关键要素

3.1 主变压器参数分析

3.1.1 额定容量、电压比与联结组别

额定容量是主变压器选型的核心参数，需根据变电站负荷需求及未来5-10年发展规划确定。电压比需与电网电压等级匹配，如110kV/10kV变压器需确保高压

侧与电网电压偏差不超过±5%，低压侧输出电压稳定在10.5kV±2%范围内，以满足用户设备电压要求。联结组别直接影响系统并列运行及谐波抑制效果，110kV及以上变压器普遍采用YNd11联结（高压侧星形、低压侧三角形带中性点接地），可有效消除3次谐波并限制短路电流；10kV配电变压器多采用Dyn11联结，提升单相接地故障耐受能力。

3.1.2 短路阻抗、损耗与效率

短路阻抗是衡量变压器抗短路能力的关键指标，通常以百分比表示（如10%）。阻抗值越高，短路时限流效果越强，但正常运行时电压降增大、损耗增加。损耗分为空载损耗（铁损）与负载损耗（铜损），现代变压器通过采用非晶合金铁芯、超薄硅钢片及低电阻绕组材料，可将空载损耗降低30%-50%，负载损耗降低10%-20%。效率为输出功率与输入功率之比，大型变压器效率通常达99%以上，但轻载时效率显著下降，因此需根据负荷率选择合适容量，避免“大马拉小车”现象。

3.2 选型影响因素

3.2.1 负荷特性

负荷峰谷差大、季节性变化明显的区域（如农业灌溉区、旅游景区），需选择过载能力强的变压器。例如，某农业变电站夏季灌溉负荷是冬季的3倍，选用自然冷却+强油循环双冷却系统变压器，可在夏季高温时通过强油循环提升20%过载能力，满足短时高峰负荷需求。对于冲击负荷（如电弧炉、轧钢机），需配置电抗器或选择动态响应快的变压器，限制电压波动在±5%以内。

3.2.2 系统短路容量与过载能力要求

系统短路容量直接决定变压器短路阻抗选择。若电网短路容量为50kA，变压器短路阻抗需 ≥ 12%，以将短路电流限制在40kA以下，避免设备损坏。过载能力要求高的场景（如数据中心、医院），需选用具有应急过载功能的变压器，如采用Nomex绝缘材料的干式变压器，可在1.5倍额定负荷下持续运行2小时，为备用电源启动争取时间。

3.2.3 环境条件

高海拔地区需修正变压器额定容量，每升高100m容量降低1%，例如海拔3000m地区选用100MVA变压器时，实际容量需按97MVA校核。高温环境（如沙漠地区）需强化散热设计，采用强迫风冷或蒸发冷却技术，确保绕组温升不超过65K。污秽等级高的区域（如化工区、沿海地区）需提升变压器外绝缘水平，如采用防污型套管、增加爬电距离，避免污闪事故^[3]。

4 主变压器容量与台数确定方法

4.1 容量计算模型

主变压器容量需结合最大负荷与负荷增长率综合测算,确保满足当前及未来一段时期的供电需求。首先,结合历史负荷数据及区域发展规划,确定计算期(通常为5-10年)内的最大负荷值,再根据负荷年增长率,通过复利公式计算未来负荷,公式为 $S_{\max} = S_0 \times (1+r)^n$,其中 S_0 为当前负荷, r 为负荷年增长率, n 为计算年数。计算出未来最大负荷后,需叠加1.1-1.2的冗余系数,确定初步容量需求,最终选择不小于该需求的标准容量。备用容量是保障供电可靠性的重要支撑,需根据负荷等级合理配置。一级负荷占比高的区域,备用容量需达到最大负荷的30%-50%;二级负荷区域可按20%-30%配置。需兼顾变压器经济运行区间,避免长期低载运行导致效率下降,通常变压器在负载率60%-80%时运行效率最高,若负荷长期低于合理区间,应优化选择小容量变压器,降低运行损耗。

4.2 台数配置策略

主变压器台数需结合负荷特性、供电可靠性要求及经济性综合确定。单台变压器适用于负荷稳定、可靠性要求较低的场景,其优势在于投资少、占地面积小,但无备用能力,设备故障时会导致全站停电,适用性有限。双台并联运行是中小型变电站的主流配置,可实现N-1冗余设计,即任一变压器故障时,另一台可短时过载运行,保障关键负荷连续供电,兼顾可靠性与经济性。多台并联适用于大型枢纽变电站或负荷波动较大的区域,可通过分列运行调整运行台数,降低空载损耗、提升运行灵活性。在N-1冗余要求下,多台变压器需采用“两运一备”等模式,确保任一故障时,剩余设备总容量不低于最大负荷,保障供电连续性^[4]。

5 电气主接线与主变压器的协同优化

5.1 接线形式对变压器运行的影响

电气主接线形式直接影响变压器运行的经济性与可靠性。例如,双母线接线通过分段断路器实现灵活调度,可均衡各变压器负荷,降低线损。而桥形接线(内桥/外桥)适用于变压器经电缆进线的场景,通过桥断路器切

换可减少变压器操作次数,延长设备寿命。内桥接线在变压器故障时,仅需断开故障侧进线断路器,非故障变压器可继续运行,供电可靠性提升30%。但桥形接线潮流分布受线路阻抗影响较大,若两回线路参数不一致,可能导致变压器负载率偏差达15%,需通过调整分接头或加装电抗器均衡潮流。

5.2 变压器选型对主接线的约束

变压器容量与短路阻抗需与主接线短路电流水平匹配。若选用大容量变压器,其短路阻抗通常较低,可能导致系统短路电流超标,此时需采用高阻抗变压器或加装限流电抗器,但会增加损耗与投资。例如,某110kV变电站原设计采用2台63MVA变压器,短路电流为38kA;扩容至2台80MVA变压器后,短路电流升至45kA,接近设备额定值,最终通过将变压器阻抗提升至12.5%并优化接线形式(将部分线路改为环网运行),将短路电流控制在42kA以内,确保设备安全^[5]。

结束语:本文围绕变电站电气主接线设计与主变压器选择展开系统研究,明确了主接线选型的原则与依据,提出了主变压器容量、台数的确定方法,分析了两者优先优化的关键点。通过对典型主接线形式对比、主变压器参数分析,为变电站设计提供了清晰的思路与方法。后续可结合智能变电站发展趋势,进一步优化主接线与主变压器的协同控制策略,提升变电站运行的智能化水平。

参考文献:

- [1]祁元.变电站电气主接线的优化设计与可靠性分析[J].张江科技评论,2025(10):121-123.
- [2]张馨兮.变电站一次系统的电气主接线设计[J].集成电路应用,2023,40(8):104-105.
- [3]刘明.超大型数据中心专用变电站供电方案与电气主接线设计[J].电力勘测设计,2024(5):51-57.
- [4]王健.500kV变电站主变压器安装施工技术及要点[J].中国设备工程,2025(1):200-202.
- [5]孙雨晴,寇宇峰,李天宁.变电站主变压器前后级间电压解耦控制系统[J].电子设计工程,2025,33(19):183-186+191.