

基于可靠性理论的箱变关键元器件选型与配置优化

李国均

摘要：随着电力系统规模的持续扩大，箱式变电站作为配电网中的关键节点，其运行的可靠性对于保障供电质量具有重要意义。目前，箱变内部关键元器件在选型和配置方面仍存在一定的随意性，缺乏系统化的可靠性理论支撑，这可能对设备的长期稳定运行带来影响。本文以可靠性工程理论为基础，系统地分析箱式变电站关键元器件的故障模式及其影响，构建适用于不同运行环境的选型评价体系。通过建立以可靠性为核心的多目标优化模型，综合考虑成本限制与运行效率，提出一种关键元器件配置方案的优化方法。研究表明，采用本文提出的选型与配置方法，能够有效提升箱式变电站的整体运行可靠性，降低全生命周期的运维成本，同时也为配电设备的标准化设计提供了理论支持。

关键词：箱式变电站；可靠性理论；关键元器件；选型优化；配置优化

一、箱变关键元器件可靠性理论基础与选型分析

（一）可靠性理论及其在电力设备中的应用综述

可靠性理论是研究系统、设备或零部件在特定条件和时间范围内实现预定功能能力的工程学科。这一理论以概率统计方法为支撑，通过分析故障发生的规律，为产品的设计、制造和运行维护提供科学依据。在电力设备领域，可靠性理论的应用目标在于保障电力系统能够长期、稳定且安全地运行，从而降低因设备故障引发的停电损失。电力设备往往需要具备较高的可靠性，因为其故障不仅会影响自身的正常运作，还可能引发连锁反应，对整个电网的安全构成威胁。

在电力设备领域，可靠性理论的应用主要体现在多个关键环节。首先，在设计阶段，通过可靠性预测与分配方法，明确核心元器件的可靠性标准，确保其能够满足整个系统的运行需求。其次，在生产过程中，实施严格的工艺管理与筛选测试，剔除存在早期失效风险的产品，从而提升整批设备的可靠性。此外，在设备运行和维护阶段，依据可靠性理论制定预防性维护方案，例如定期检查、状态监控以及寿命评估等，以有效减少突发故障的可能性。

将可靠性理论引入箱式变电站关键元器件的选型与配置过程中，需要对元器件的故障类型、影响及其潜在危害进行系统分析。常见的故障形式包括绝缘材料的老化、接触点的不稳定、以及因温度过高导致的损坏等，

这些现象通常源于电气、环境或机械方面的应力超过了元器件的承受极限。借助故障模式与影响分析方法，能够识别出对整体系统可靠性影响最为显著的部件，从而在设计初期有针对性地采取改进措施，如降低工作负荷、设置冗余结构或增强防护机制。例如，在选择断路器这类核心组件时，除了需满足额定电流与分断能力的基本要求外，还应综合考量其使用寿命、环境适应能力，以及与其他保护装置之间的协调性能。

随着电力系统规模的不断扩展和智能化程度的持续提高，可靠性理论在电力设备中的应用也日益深入。传统的定期维护方式正逐渐被基于设备实时状态的预测性维护所取代，这种转变依赖于在线监测技术与数据分析手段的不断进步。与此同时，全生命周期成本理念的引入，使得可靠性管理不再仅仅关注技术层面，而是与经济性、可维护性等多个目标相结合，实现综合优化。

可靠性理论为箱变中关键元器件的选型与配置提供了坚实的理论依据。在设计阶段，借助可靠性工程方法，能够有效识别可能发生的故障隐患，优化元器件间的参数匹配，同时在设备运行过程中制定科学的维护方案，从而有效提高箱变整体运行的稳定性，确保配电网的供电质量。展望未来，随着智能传感技术和大数据分析的不断发展，可靠性理论将与设备状态监测、人工智能等技术进一步结合，推动电力设备运维向更加精准和高效的方向演进。

（二）箱变关键元器件失效模式与可靠性指标分析

箱变中的关键组件在长期运行中可能因多种应力影

作者简介：李国均（1985.10-），男，汉族，四川彭州人，本科学历，电气工程师，研究方向：电气自动化方向。

响而出现性能下降甚至彻底失效，这种失效方式会直接影响整个配电系统的运行稳定性。作为箱变的核心部件，变压器常见的故障类型包括绝缘材料老化、绕组温度过高以及铁芯松动等，这些现象往往与长时间过载、散热不畅或制造工艺问题有关。断路器则可能因为机械部件卡滞、触点烧损或绝缘性能减弱而无法正常完成分合闸操作，从而丧失其保护作用。在谐波较多的运行环境下，无功补偿电容器容易出现介质击穿或电容值下降，进而影响功率因数的调节效果。

为科学评估元器件的可靠性，有必要构建一套系统化的量化评价体系。可靠度指的是元器件在特定条件和时间内完成既定功能的概率，这一指标能够全面体现产品的耐用性。平均无故障工作时间则用于衡量元器件连续正常运行的预期时长，是制定维护计划的重要参考。故障率表示单位时间内发生失效的概率，通常呈现出“浴盆曲线”的特征，分为早期失效期、偶然失效期和耗损失效期三个阶段。此外，平均修复时间和可用度等指标，也从维护效率的角度对系统的可恢复性进行了补充说明。

不同元器件的失效模式常常相互影响，形成一系列连锁效应。例如，变压器绕组温度过高不仅会加快绝缘材料的劣化，还可能引起油温上升，从而导致密封部件老化并出现渗漏；而断路器操作机构出现异常，在线路发生短路时可能无法及时切断电流，进一步扩大事故的范围。因此，在分析某一元器件的失效模式时，也应关注其对整体系统可靠性的潜在影响。戴兵的研究指出，“箱式变压器的设计选型、制造工艺及材料选择等因素对其散热效果和绕组绝缘性能有显著影响”^[1]，这凸显出在设计初期就应重视失效风险控制的重要性。这里或许值得进一步探讨的是，如何在实际工程中有效整合这些设计因素，以提升系统的整体安全性。

环境条件和运行状态对设备的失效方式有明显影响。在高温条件下，有机绝缘材料容易发生热老化；潮湿环境下，金属部件可能产生腐蚀；而频繁的投切操作则容易引发机械磨损。面对这些外部应力，应在元器件选型阶段就充分考虑其环境适应能力，如防护等级、温度适应范围以及抗振性能。

可靠性指标的选择应结合箱变的实际运行环境。在城市中心区域，箱变对供电的连续性有较高要求，因此应重点关注平均无故障运行时间和系统可用性；而在偏远地区，设备的平均修复时间以及维护的便利性可能更

为重要。同时，不同指标之间往往存在相互制约的关系，例如使用高可靠性的元器件虽然会提高初期投入成本，但有助于减少长期的运维支出。因此，构建一个考虑成本限制与可靠性需求的多目标优化模型，成为制定合理配置方案的重要依据。通过对故障模式进行系统分析并量化关键参数，可以为后续的设备选型与优化设计提供理论支持，从而有效提升箱变运行的安全水平和经济效益。^[2]

二、基于可靠性的箱变关键元器件配置优化模型构建

（一）多目标优化模型与约束条件设定

在箱式变电站关键元件的配置优化过程中，需要综合考量多个相互关联甚至存在冲突的指标。提升系统可靠性往往需要采用更高性能的元件或增加冗余设计，这通常会导致初期投入成本和后期运维费用的上升。因此，建立多目标优化模型的关键在于找到可靠性、经济性与运行效率之间的合理平衡，而非单纯追求某一目标的最大化。

模型首先需要明确优化的核心目标函数。可靠性目标通常通过系统整体的可靠度或平均无故障工作时间的最大化来体现，这要求配置方案能够有效减少关键元器件的故障概率，并降低其对系统功能的连锁影响。经济性目标则关注全生命周期成本的最小化，该成本不仅涵盖元器件采购、安装等初期投入，还需考虑运行能耗、预防性维护、故障维修以及可能因停电带来的损失等长期支出。

为实现上述多目标的协同优化，必须设定合理的约束条件。技术性能方面的限制是基础，例如所有元器件的电气参数，如额定电压、电流及分断能力，必须满足实际运行的需求，其绝缘等级和防护等级也应与安装环境相适应。结构布局方面的约束则要求所选元器件的物理尺寸和安装方式需符合箱变壳体内部的空间限制以及散热通风的要求。资源预算的约束则对项目的总体投资额度进行了限定，使得优化方案必须在可接受的成本范围内进行选择。

在构建模型时，不同目标函数的重要性并不相同，需结合箱变所处的具体应用场景来分配相应的权重。对于供电连续性要求极高的核心区域箱变，应将可靠性目标的权重设置得更高；而在一些对成本较为敏感的普通应用场景中，经济性目标则可能成为主导因素。优化过程本质上是在由多重约束条件所形成的可行解空间中，

寻找一组非劣解，即在不损害其他至少一个目标的前提下，无法进一步提升任何单一目标的解集。

（二）优化算法求解与配置方案仿真分析

在完成多目标优化模型的搭建后，需要选择合适的优化算法来进行求解，并对最终得到的配置方案进行仿真测试。对于涉及可靠性、经济性以及运行效能等多个目标的优化问题，其解空间往往呈现出非线性、高维数以及约束条件复杂等特性，传统数学规划方法难以直接应对。因此，本文选用了一种改进的多目标遗传算法作为主要求解手段，该算法基于智能优化的理念，通过模拟生物进化过程中的选择、交叉和变异机制，能够在可行区域内并行地搜索出一组分布较为均匀的Pareto最优解，从而为决策者提供多样化的非劣解方案选择。这里或许可以进一步探讨不同算法在具体应用场景下的适用性差异。^[3]

求解过程首先将模型中的决策变量进行编码，例如将变压器的容量等级、断路器的型号、无功补偿装置的分组数量及其容量等参数转换为染色体形式的编码串。初始种群在满足各类技术约束和预算限制的前提下随机生成。在每一代的进化过程中，算法根据个体对应的目标函数值计算其适应度，优先选择在可靠性、全生命周期成本或运行效率等方面表现更优的个体进入下一代。

为验证优化算法所得结果的可靠性，有必要对所提出的配置方案进行仿真分析。借助专业的电力系统仿真工具，建立包含关键元器件的箱式变压器详细模型，并设定典型的运行场景与负荷变化曲线。仿真工作主要涵盖以下几方面内容：在常规长期运行条件下，监测变压器负载率、各出线回路电流、母线电压波动情况以及无功补偿装置的投切状态，以判断方案是否符合稳态性能标准；在设定的故障工况下，如低压侧短路或电容器组故障，验证保护断路器的分断能力与配合是否合理，分析系统在故障时的隔离速度与恢复供电时间；通过调整环境参数，例如模拟高温条件，评估元器件的温升是否在安全范围内，进而判断其热稳定性和使用寿命是否受到显著影响。

仿真分析不仅关注技术性能，还需从可靠性角度进行定量评估。借助蒙特卡洛模拟方法，随机引入元器件故障事件，统计系统在特定运行周期内的停电次数、平均停电时长以及可用性指标，从而对不同配置方案的可靠

性差异进行量化比较。同时，结合全生命周期成本模型，计算各方案从采购、安装、运行到退役处置的总成本，为最终决策提供经济性参考。仿真结果能够直观反映优化方案在实际运行中的表现，有效补充纯理论计算的局限性。

通过对比多个候选配置方案的仿真结果，能够识别出在特定应用场景中综合性能最优的方案。例如，在对供电可靠性有极高要求的城市核心区域，箱变设计可能会优先考虑可靠性权重较高的方案，这通常意味着选用更高规格的变压器、增加关键回路断路器的冗余配置，或是提升无功补偿装置的响应速度与容量；而在对成本较为敏感的一般工业区项目中，设计者更可能选择经济性更优的方案，在确保基本可靠性标准的前提下，对初始投资进行优化。

结语

本文对基于可靠性理论的箱变关键元器件选型与配置优化问题进行了系统研究。在深入探讨关键元器件常见失效模式及其对系统运行带来的影响基础上，构建了一个以可靠性为核心、同时考虑经济性与运行效率的多目标优化模型。研究表明，采用所提出的选型评估体系与配置优化方法，可以有效提升箱变整体运行的可靠性，同时在全生命周期内实现成本的有效控制。经过仿真实验验证，优化后的配置方案在稳态运行和故障处理方面表现出较强的能力，为当前箱变设计中普遍存在的配置随意性问题提供了具有理论依据和实践价值的解决方案。这一研究在一定程度上反映了工程实践中对系统可靠性的重视，也提示我们需在设计阶段更加注重系统性与科学性的结合。

参考文献

- [1] 李祥雄. 风电场箱变设备选型与优化配置研究[J]. 电力系统装备, 2024(11): 43-44.
- [2] 郑丽娟, 郭强, 胡翔, 等. 基于物联网信息集成的箱式变电站运行状态综合监控系统研究[J]. 华电技术, 2021(1): 12-18.
- [3] 戴兵. 箱式变压器散热效能低对绕组绝缘的影响分析[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022(10): 145-148.