

电网变电运维中的设备维护与更新策略

窦芃艳 吕晓帆 高婷 帕里扎提·帕尔屯

国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆昌吉, 831100;

摘要: 本文针对电网变电设备维护与更新问题, 提出了一套基于全生命周期成本管理和健康状态评估的决策方法。该方法构建了一个优化模型, 考虑了设备的可靠性、维修成本、故障损失及更新效益, 并通过蒙特卡洛模拟处理不确定性, 实现了维护与更新决策的协同优化。通过对变压器的仿真实验分析, 证实了该策略在降低成本和提高供电可靠性方面的有效性, 为电网资产管理提供了科学依据。

关键词: 变电运维; 设备维护; 更新策略; 全生命周期成本; 健康状态评估; 蒙特卡洛模拟

DOI: 10.69979/3060-8767.25.11.008

引言

变电站是电能传输、分配和电压变换的关键节点, 其内部设备的运行状态直接决定了电网的整体可靠性。随着我国电力资产规模的持续扩大, 早期投运的设备已逐步进入故障高发期, 而新能源大规模接入和负荷特性的变化又对设备运行提出了更高要求。在此背景下, 传统的“定期检修”和“事后维修”模式已难以适应现代电网的发展需求, 亟需建立更加科学、经济的设备维护与更新策略^[1]。

设备维护与更新策略的制定, 本质上是如何在设备可靠性、运维成本和技术先进性之间寻求最佳平衡的决策问题。过于保守的策略会导致运维成本激增和资产浪费; 而过于激进的策略则会增加故障风险, 引发更大的停电损失。因此, 需要建立一套系统性的方法论, 能够基于设备的实际状态、运行工况和经济效益, 动态优化维护周期和更新时机^[2]。

本文旨在研究建立一套数据驱动的变电设备维护与更新策略框架。该框架深度融合设备状态监测数据、故障历史记录和成本效益分析, 通过构建量化模型和仿真实验, 为运维决策提供科学依据, 最终实现资产全生命周期价值的最大化^[3]。

1 设备维护与更新策略理论框架

1.1 数据基础层

策略制定的可靠性关键在于获取全面且准确的数据支持。这些数据涵盖了设备的静态和动态信息, 包括但不限于设备的型号、规格、技术参数、投运时间、制造厂商以及购置成本等静态数据, 以及在线监测数据、巡检数据、预防性试验数据、历史缺陷与故障记录和维修历史等动态数据。此外, 运行与环境数据如负荷曲线、短路电流水平、环境温度和湿度等, 也是不可或缺的参考因素。同时, 经济性参数的考量同样重要, 这包括了

维修活动的成本、故障损失成本、新设备购置与安装成本以及贴现率等经济因素。这些数据共同构成了策略制定的基础, 确保了决策的科学性和前瞻性^[4]。

1.2 评估方法层

本层是数据转化为决策信息的关键环节, 其中设备健康状态评估至关重要。我们采用多指标融合的方法, 如熵权-TOPSIS 法和模糊综合评判法, 来计算设备的健康指数, 将设备的综合状态量化为一个 0-1 之间的数值, 从而为状态维修提供科学依据。在故障率模型建模方面, 我们认识到设备的故障率并非恒定不变, 因此运用了多种模型来描述故障率的变化, 包括浴盆曲线模型, 它描绘了早期故障期、偶然故障期和耗损故障期的故障率变化; 威布尔分布模型, 由于其灵活性, 被广泛用于描述设备的寿命分布, 其故障率函数表达式为 $\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} (\frac{t}{\eta})^{\beta-1}$, 其中 β 代表形状参数, η 代表尺度参数; 此外, 还开发了基于状态的故障率模型, 将健康指数 HI 与故障率关联, 表达式为 $\lambda(t) = \lambda_0 \cdot g(HI(t))$, 其中 λ_0 为基础故障率, $g(\cdot)$ 为关联函数, 这种方法能够更精确地反映设备的真实风险^[5]。

在经济性决策方面, 全生命周期成本分析是核心指标, 它涵盖了设备从购置、运行、维护到报废整个生命周期内所有成本的总和。LCC 的基本构成包括初始投资成本、运行成本、维护维修成本、故障处置成本, 其中 CF 包含了维修成本和停电损失, 以及退役处置成本。在计算 LCC 时, 我们还需考虑资金的时间价值, 进行贴现计算, 以确保经济性评估的准确性。

1.3 决策优化层

在此层, 我们的目标是将评估结果转化为具体的维护和更新策略, 以确保设备运行的高效性和经济性。维护策略的优化是关键环节, 涉及确定最优的维护时机和

维护级别，包括小修、大修或更换。我们根据以下决策规则来制定维护策略：首先，基于状态的触发规则，当设备的健康指数低于预设的阈值时，系统将自动触发相应的维护活动，以防止设备性能进一步下降。其次，基于风险的触发规则，通过计算故障风险，当该风险超过可接受水平时，维护活动将被触发，以降低潜在的故障风险。

此外，更新策略的优化也是一个重要的决策过程，它决定了设备是继续维修还是更换。这是一个典型的资产更新问题，通常通过比较继续使用旧设备的年均成本与更换新设备的年均全生命周期成本来做出决策。如果继续使用旧设备的年均成本高于更换新设备的年均 LCC，那么更换新设备将是更经济的选择。这种策略优化过程不仅确保了设备在最佳状态下运行，也最大化了企业的经济效益。

2 维护与更新策略优化模型及实验设计

为了验证所提出框架的有效性，我们以电网中最关键、价值最高的主变压器为对象，构建优化模型并设计仿真实验。

2.1 优化模型构建

目标：确定变压器在特定运行年限下的最优预防性维护周期和最佳更新年限，使得在规划期内的总期望成本现值最小。

决策变量：预防性维护周期、更新年限。

目标函数：

$$\text{\$}\$ \text{Minimize: } LCC(T_{\text{PM}}, T_{\text{Replace}}) = CI + \sum_{t=1}^{T_{\text{Replace}}} [CO(t) + CM(t) + CF(t)] \cdot (1+r)^{-t} \text{\$}\$$$

约束条件：

可靠性约束：系统平均停电时间低于规定值。

$T_{\text{PM}}, T_{\text{Replace}} > 0$ 。

其中， $CF(t)$ 的计算涉及故障率，而故障率又受到维护活动的影响。假设每次预防性维护能使设备的健康状态得到一定程度的恢复，即“修复非新”模型，从而降低其故障率。这是一个复杂的动态过程。

2.2 实验设计与设置

由于在真实电网上进行策略试验成本高昂且不现实，我们采用基于历史数据的离散事件仿真方法进行研究。

仿真对象：一台 110kV 油浸式变压器在未来 30 年的运行历程。

参数设置：

成本参数：新变压器购置安装成本 $CI=200$ 万元；预防性维护平均成本 $C_{\text{PM}}=2$ 万元；故障后小修成本 $C_{\text{CM}}=10$ 万元；故障后大修/更换成本 $C_{\text{FM}}=50$ 万元（若经济寿命末期则直接更换）；平均每次故障停电损失 $C_{\text{Outage}}=50$ 万元。

故障率模型：采用威布尔分布，初始参数基于同类设备故障统计数据设定： $\beta=2.5$ （进入耗损期）， $\eta=35$ 年。假设每次预防性维护可使设备的“等效役龄”减少一定比例，从而降低其当前故障率。

贴现率： $r=5\%$ 。

对比策略：为评估优化策略的效果，我们设计并对比以下四种策略：

策略 A（定期维护+定期更新）：固定每 5 年进行一次预防性维护，运行 25 年后强制更新。这是传统计划的代表。

策略 B（状态维护+定期更新）：基于健康指数 HI 触发维护，当 $HI < 0.7$ 时进行预防性维护，同样 25 年更新。

策略 C（定期维护+经济寿命更新）：固定每 5 年维护，但基于 LCC 计算的经济寿命（使年均 LCC 最小的年限）决定更新时机。

策略 D（优化策略：状态维护+经济寿命更新）：结合状态维护和 LCC 更新决策。维护阈值和更新年限均为优化目标。

我们使用蒙特卡洛模拟对每种策略分别进行 10000 次仿真，以考虑故障发生的随机性，并统计其平均结果。

2.3 实验结果与分析

四种策略在 30 年规划期内的仿真结果对比如下表所示：

表 1 不同维护与更新策略下的仿真结果对比

策略	描述	平均总成本现值	平均故障次数	平均更新年限	平均维护次数
		(万元)	(次)	(年)	(次)
A	定期维护+定期更新	585	2.1	25	5
B	状态维护+定期更新	535	1.5	25	4.2
C	定期维护+经济寿命更新	562	2	28.5	5.6
D	状态维护+经济寿命更新	510	1.3	27.8	3.8

结果分析：

（1）经济性分析：策略 D 取得了最低的平均总成

本现值,比最传统的策略A节省了约12.8%。这表明基于状态和LCC的协同优化能带来显著的经济效益。策略B和策略C的成本介于二者之间,说明状态维护和经济寿命更新各自都能带来一定的成本节约。

(2) 可靠性分析:在可靠性方面,策略D的平均故障次数最低,比策略A减少了38%。这主要是因为状态维护能够在设备健康恶化时及时干预,避免了部分潜在故障的发生。策略B同样展现了良好的可靠性效果。

(3) 策略行为解读:策略D的平均更新年限长于策略A/B的固定25年,但短于策略C的28.5年。这是因为策略D通过更有效的状态维护,在一定程度上延缓了设备的劣化,使其经济寿命得以延长;但同时,LCC模型又会综合权衡维护成本上升和故障风险增加,在整体成本最优的时点建议更新,而非无限期延长。策略D的维护次数也少于固定的定期维护,体现了“按需维修”的效率。

为了更直观地展示优化过程,我们绘制了策略D下,变压器年均LCC随使用年限变化的曲线,曲线呈现先下降后上升的“U型”,最低点所对应的年限即为经济寿命,是理论上的最佳更新时机。

3 策略实施的关键支撑与技术展望

将优化后的策略应用于实践,强有力的技术和管理支撑不可或缺。技术支撑方面,首先需要一个健全的状态监测体系,这是实施状态维护的基础。这要求我们扩大在线监测装置的覆盖范围,并提升数据质量,以确保监测数据的准确性和全面性。同时,应用先进的预测性维护技术,如利用大数据和人工智能算法进行更精准的健康趋势预测和故障预警,可以大大提高维护的效率和效果。此外,建立一个资产全生命周期管理系统,以实现设备台账、运行、维护、成本等信息的集中管理和联动分析,为全生命周期成本的计算提供平台支持。

在管理支撑方面,需要转变运维观念,从传统的“重维修、轻管理”转向“精益化资产管理”,强化管理在设备维护和更新中的作用。同时,制定标准和规范,建立基于状态的维护和LCC分析的决策流程和标准,以确保策略的一致性和可执行性。此外,培养既懂电力设备技术,又掌握数据分析和经济管理知识的专业队伍,对于提升整体运维水平至关重要。

随着数字孪生技术的不断发展,我们可以在虚拟空间中构建与物理设备完全对应的数字模型。通过实时数据驱动和仿真模拟,我们可以实现对设备未来状态的超实时推演和策略的动态优化调整。这一技术的应用将极大地提升设备维护与更新策略的智能化水平,为运维管理带来革命性的变革。

4 结论

本文系统研究了电网变电运维中的设备维护与更新策略问题。通过构建融合设备健康状态评估、故障率建模和全生命周期成本分析的理论框架,建立了维护与更新协同优化的决策模型。针对变压器的仿真实验结果表明,与传统的定期策略相比,基于设备实际状态触发维护、并基于经济寿命决定更新时机的优化策略,能够显著降低全生命周期总成本,同时有效提升供电可靠性。这一研究为电网企业从粗放式运维向精细化资产管理转变提供了科学的决策依据和方法论支持,对保障电网安全、降本增效具有重要的实践意义。

参考文献

- [1] 刘有为,李光范,董明,等. 电力设备全生命周期管理[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1125-1132.
- [2] 王刘芳,王守相,李运甲. 基于状态评估和寿命预测的电力设备维修与更换策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 100-107.
- [3] Jardine AKS, Tsang AHC. Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications[M]. CRC press, 2013.
- [4] 郭创新,张金江,王越,等. 基于风险理论的电力设备状态检修决策研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 14-19.
- [5] Si XS, Wang W, Hu CH, et al. Remaining useful life estimation - A review on the statistical data driven approaches[J]. European Journal of Operational Research, 2011, 213(1): 1-14.

作者简介: 窦芃艳, 出生年月: 1993年5月, 性别: 女, 籍贯到市: 陕西省兴平市, 民族: 汉族, 学历: 大学本科, 职称: 工程师, 研究方向: 输变电运维。