

配电网设施可靠性评估的推广与应用研究

杨金涛¹ 倪威中¹ 黄佳晨² 吴倩³

(1. 国网浙江省电力有限公司杭州市钱塘区供电公司 2. 天地电研(北京)科技有限公司杭州分公司 3. 天地电研(北京)科技有限公司)

摘要：配电网设施可靠性评估的最终目标是在不降低设施可靠性的情况下寻求最低的全生命周期成本。2022年底，行业标准《配电网设施可靠性评价指标导则》(送审稿)完成待批，填补了国内空白。识别设施全生命周期各阶段成本与可靠性指标之间的关系，并在此基础上合理优化各阶段成本，既是行业标准编制的初衷，也是实施该导则的必由路径。推广应用要结合企业设施可靠性管理的现状综合考虑，要有先进性，不能太超前——如果企业实施的条件还不成熟，就会失去对实际工作的推动作用。因此，本文首先梳理了配电网设施可靠性管理现状，并将生命周期每个阶段的成本与导则中定义的可靠性评价指标相关联。然后，提出了设施可靠性评估信息系统的建设方案，给出了评价实例的应用示例，并提出下一步的工作和未来的趋势。

关键词：全生命周期成本；可靠性指标；可靠性评价；信息系统

0 引言

根据2019年中国各供电企业的运营统计，在全国电力可靠性分析中，设备导致停电的占比超过18%，其中，中压配电网设施故障占总数的一半。由此可见，研究有效提高中压配电网设施的可靠性，降低停电影响，已成为保障我国电力可靠性水平发展的重要任务之一。目前，我国电力可靠性评价标准体系已涵盖发电设备、直流设施及其系统、输变电设施和电路、供电系统等各个领域，但尚未涉及配电网设施。正是由于缺乏统一的评价标准和评价体系，国内供电企业对配电网设施的可靠性缺乏足够的定量分

析。直到2021年10月，《国家能源局综合司关于印发2021年能源行业标准制定修订计划和外语翻译计划的通知》(国能综通科技〔2021〕92号)发布了2021年能源产业标准制定计划项目汇总表，第312项为《配电网设施可靠性评价指标导则》的制定(项目编号：Energy 20210312)，此后，配电网设施的可靠性评价才得到足够的重视。目前，项目组已经完成了行业标准批准草案的制定和提交，但如何顺利实施和应用仍需进一步研究。

我国的输变电设施有一个专门的信息管理系统^[1]，负责收集、计算、分析和报告设施可靠性数据。输变

基金项目：中国电力企业联合会行标编制项目(项目编号：Energy 20210312)。

电设施可靠性评估^[2]在全国范围内开展多年，取得了显著成效，推动了输变电设施从状态检修向以可靠性为中心的维修过渡。然而，配电网设施数量庞大，与输电网设施相比，其自身价值不高，故障的影响也不那么显著。在我国大部分地区，配电网设施的维护和管理仍主要依靠定期维护和直接更换，导致设施维护过度或不足。输电网设施可靠性评估的统一推广模式和专用信息管理系统的一体化实施路径不能完全适用于配电网设施^[3]，且鲜有文献研究配电网设施可靠性评估的推广应用。

针对此现状，本文探讨了配电网设施可靠性评价的推广和应用路径。在简述配电网设施可靠性评价现状的基础上，介绍了《配电网设施可靠度评价指标导则》（送审稿）的主要指标。然后，将生命周期各阶段的成本与可靠性指标相关联，并根据我国信息系统的现状，提出了设施可靠性评估信息系统应具备的功能和实施方案。最后，结合某供电企业 10kV 架空绝缘线各阶段成本进行计算分析。

1 配电网设施可靠性评价现状

我国配电网设施的可靠性管理一直与用户供电的可靠性管理相结合。电力企业对配电网设施可靠性的评价源于《供电系统供电可靠性评价规定》（DL/T 836—2016）中与设施可靠性有关的几个指标。然而，DL/T836—2016 并不是配电网设施可靠性评估的具体标准，设施可靠性分析仅涉及计算设施停运次数和时间，对设施停运原因的分析不够充分，不足以指导实际工作^[4-7]。

可见，缺乏相关标准的指导，导致指标计算不完整，指标分析深度不足，无法探索设施可靠性不高的深层次问题。同时，也反映出供电企业普遍重视输电网、轻视配电网。

项目组在《配电网设施可靠性评价指标导则》中

统一了配电网设施分类和设施状态分类，并根据设施状态计算各种可靠性指标^[8-10]。

2 成本和可靠性指标之间的相关性

运维成本包括正常运行时的损耗成本、维护成本和故障成本三部分。配网设施 PLCC 计算公式为：

$$PLCC=CI+EC+CM+CF+CD \quad (1)$$

式中，PLCC 为配网设施全寿命周期成本（Power Life Cycle Cost, PLCC）；CI 为投入成本（Investment Cost, CI）；EC 为损耗成本（Energy Cost, EC）；CM 为维护成本（Maintenance Cost, CM）；CF 为故障成本（Outage of Failure Cost, CF）；CD 为退役成本（Disposal Cost, CD）。

配网设施的故障成本由故障损失电量成本和故障修复成本两部分构成：

$$CF_i=W_iT_i+FT_i \times RC_i \times MTTR_i \quad (2)$$

式中， W_i 为设施故障平均损失负荷，即设施 i 正常运行时所带负荷功率； T_i 为设施 i 故障平均停运停电时间； FT_i 为设施 i 平均故障停运次数； RC_i 为设施 i 平均故障修复单位成本； $MTTR_i$ 为设施 i 平均故障修复时间。

建立 PLCC 与可靠性指标关系模型：

$$PLCC=CI+EC+CM+CF+CD \\ =R_i \times U + R_c \times U \times N + R_m \times T_p \times U_p / 100 + R_f \times T_f \times U_f / 100 + CD \quad (3)$$

式中， R_i 为单位投入成本，万元 / km 或万元 / kVA； U 为设施长度或容量，km 或 kVA； R_c 为平均每年单位运行成本，万元 / km·年或万元 / kVA·年； R_m 为平均每年单位维护成本，万元·年 / km·h 或万元·年 / 台·h； T_p 为平均每年预安排停运时间，h / 百台·年或 h / 百 km·年； U_p 为预安排停运长度或容量，km 或 kVA； R_f 为平均每年单位故障成本，万元·年 / km·h 或万元·年 / 台·h； T_f 为平均每年强迫停运时间，h / 百台·年或 h / 百 km·年； U_f 为故障停运长度或容量，km

或 kVA；CD 为设施退役成本；N 为使用年限。

后续随着数据积累的不断细化和分析工作的逐步深入， T_p 可进一步细化至检修预安排停运时间、施工预安排停运时间； T_f 可进一步分解至产品质量、设计施工、设施损耗、环境影响和外力因素五个方面。

3 设施可靠性信息管理系统建设

离开信息系统的支撑，配网设施可靠性评价工作难以开展。国家电网公司和南方电网公司均没有专门的配网设施的信息管理系统，而是依托其他系统生成所需的设施可靠性数据，如图 1 所示。

国家电网公司依托生产管理系统完成配网设施信息化管理工作。其中，“用户信息采集系统”采集高、中、低压用户台账，用户设备与台账关联信息、台区台账、台区用户对应表中的数据。生产管理系统中的“设备基础台账数据”模块采集配网设施基础台账数据并实时更新。“供电可靠性运行数据”模块采集高、中、低压用户停电事件数据。

南方电网公司统一使用“6+1”系统—资产管理业务应用系统开展配网设施管理工作。配网公用 / 专用设施台账信息通过资产管理业务应用子系统—配网设备台账管理模块获取，配网设施按照“站-线-设备（干线、支线、配电房、台变、箱变、户外开关箱）”进行关联，台账更新周期为每天；还具备同步中压运行事件、低压运行事件、停电馈线数据、停电用户数据、不停电事件等功能。

目前，国网公司和南网公司使用的配网设施管理系统都能够采集、更新、维护设施可靠性评价所需要的基础数据，在此基础上以微应用的形式开发配网设施可靠性评价指标功能模块，能够充分利用原有信息管理系统资源，在此基础上以大数据和智能算法支撑配网设施可靠性评价工作的落地，是切实可行的。

4 可靠性评估应用示例

4.1 设施改进前的生命周期成本

以 2017 年至 2020 年 LH 地区 10kV 架空线路为

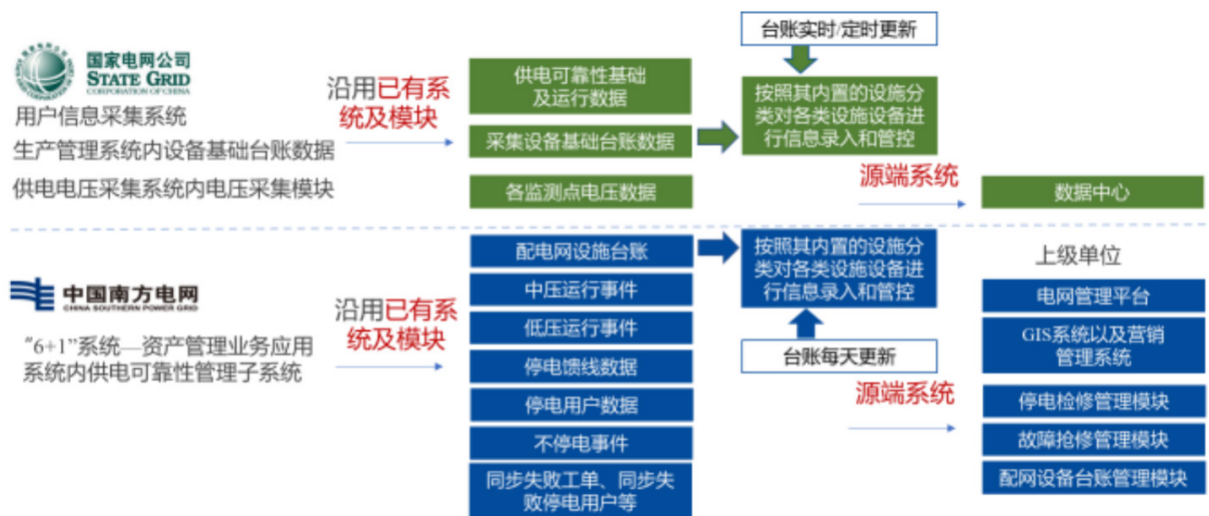


图 1 配网设施信息管理系统

例，该地区的工程造价计算标准在电力工程造价与定额管理总站发布的《20kV及以下配电网工程设备材料价格信息（2017年7月）》的基础上考虑资金时间价值，得到10kV架空输电线路的投入成本统计，如表1所示。10kV架空线路的平均单位投资成本为21.52万元/km。

表1 10kV架空线路投资成本统计表

序号	项目名称	成本金额 (万元)	各项目总比例 (%)	单位投资 (万元/km)
1	本体工程	34966.97	63.56%	13.41
2	辅助设施工程	484.37	0.90%	0.22
	小计	34851.34	64.46%	13.60
3	编制年度价差	3400.82	6.29%	1.44
4	其他费用	14575.75	26.96%	5.98
	其中，1.建筑工地区征地清理费	8381.83	15.50%	3.46
	2.基本预备费	1557.26	2.88%	0.67
	项目静态总投资	4636.66	8.58%	1.85
5	动态成本	52827.90	97.71%	21.02
(1)	价差预备费	1238.24	2.29%	0.50
(2)	建设期贷款利息	0	0.00%	0
	工程动态总投资	1238.24	2.29%	21.52

维修成本与公司的维修模式、资产规模、设备运营水平等因素密切相关。提取与成本相关的各种成本，对2017~2020年该地区架空线路的维护成本进行综合统计，如表2所示。10kV架空线路平均单位维护费用为5.38万元/km·h。

表2 10kV架空线路平均维护费用统计表

架空线路	2017年	2018年	2019年	2020年
运输及大型设备费(万元)	4495.15	6145.77	4871.01	4918.39
材料费A(万元)	2868.12	3244.85	2573.03	2598.07
材料费B(万元)	1206.89	12465.20	9870.17	9966.10
直接人工成本(万元)	30628.50	31214.72	30382.37	29262.72
维护持续时间(小时)	6.80	6.36	6.90	7.06
总成本(万元)	39198.65	53070.56	47696.63	46745.28
平均成本(万元/km)	46677.78			
平均持续时间(小时)	3.39			
单位平均成本(万元/km·h)	5.38			

利用配电网设施可靠性系统中的故障数据，2017年至2020年该地区的故障统计数据如表3所示，电力损失是根据年平均负荷值计算的。10kV架空线路平均单位故障成本6.61万元/km·h。

表3 10kV架空线路平均故障成本统计表

停运设备	停运时间 (h)	线路长度 (km)	故障元件 类型	维修费用 (万元)	电能损失 (MVA)	电能损失成本 (万元)	故障 总成本 (万元)	故障频次 占比
10kV 架空线路	3.56	3.36	铜芯铝绞线	7.24	2.01	0.10	7.34	76.49%
	2.27	2.42	金属端	1.65	1.27	0.06	1.71	2.94%
	1.55	0.34	伞盘	1.88	0.87	0.04	1.92	11.76%
	1.02	0.78	绝缘子	1.86	0.57	0.03	1.89	5.88%
	7.83	6.98	轴	10.59	14.10	0.71	11.29	2.94%
停运时间加权平均值 (h)	3.26	线路停运长度加权平均值 (km)		2.93	故障成本加权平均值 (万元)		6.61	
平均故障成本(万元/km·h)						6.61		

为了使每个阶段的成本可用，使用设施运行时间的统计值来计算其损失成本。

投入成本约占该地区10kV架空线路各阶段总成本的60.36%。运营维护阶段的成本占总成本的37.24%，占总成本三分之一以上，其中，运行成本约占3.60%，维护成本约占15.09%，故障成本约占18.54%。剩余2.41%为设备报废回收残值。

4.2 改进措施后设施的生命周期成本

以上分析表明，配电网设施投资阶段成本和预安排停电费用的占比很大。因此，从2021年到2022年，该地区全面开展了配电网设施状态维护试点工作。

与该地区2017年至2020年的统计数据相比，使用在线监测设备可以将故障停运时间减少到原来的60%，但计划停运时间并没有减少。在线监测设备的采购将导致平均单位投入成本虽增加3.28%，但设备更换的投入成本减少约15.44%，平均单位维护成本增加约18.33%，故障成本减少17.67%，可直接节省 $60.35\% \times 15.44\% - 15.09\% \times 15.44\% + 18.54\% \times 17.67\% - 60.35\% \times 3.28\% = 8.28\%$ 的成本。由此可见，状态检修所需的在线监测设备将导致投资成本的整体降低、维护成本的增加和故障成本的降低，但总体来说，将导致停运时间的减少和成本的降低。

4.3 可靠性改进措施的有效性评价

从企业的整体效率出发，基于设施历史年份的可靠性指标，分别计算定周期检修阶段和状态检修阶段配电网设施的成本。选择设施可用性系数作为横轴，

选择成本作为纵轴。基于上述各阶段的成本分析，可以得出状态检修实施前该地区配电网设施的全寿命周期成本 PLCC 与可靠性之间的关系曲线。根据实施状态检修带来的成本变化修改 PLCC 与可靠性之间的关系曲线，可得到该地区开展状态检修的设施 PLCC 和可靠性关系曲线。对比两者，可得到状态检修的实施效果，如图 2 所示。

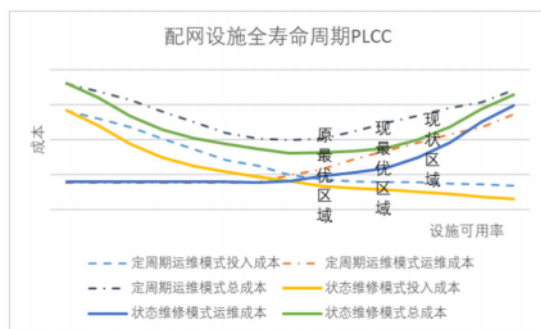


图 2 定周期运维模式和状态检修模式下配电网设施全寿命周期 PLCC 对比

由此可知，将定期运维模式改为状态检修模式后，状态检修的总成本比定期运维模式低。现状配电网设施整体的最优区域与原最优区域相比，向右侧稍有移动。

5 结束语

未来配电网设施可靠性评价指标的应用将从简单的指标管理向标准化的统计方法和深化指标应用方向转变。随着配电网设施可靠性的发展，统计方法的选择和评价指标体系的深化应用将逐步改进，使其在辅助决策方面发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 纪莹. 输变电设施可靠性在线管理系统的开发与应用 [J]. 黑龙江科技信息, 2013 (30): 39.
- [2] GB/T 40862—2021 输变电设施运行可靠性评价导则 [S]. 2021.
- [3] 张择策, 沈天时, 侯雨伸, 等. 我国输变电设施可靠性评价与管理研究 [J]. 电工电气, 2015 (8): 1-4.
- [4] 沈浩豪, 李忠勤, 褚洁平, 等. 基于全寿命周期成本的可靠性设施改造经济效益分析 [J]. 自动化技术与应用, 2018, 37 (4): 89-93.
- [5] 刘苑红, 王卓, 苏剑. 基于支持向量机的配电网设施可靠性参数预测方法 [J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16 (6): 36-42.
- [6] 王茂根. 输变电设施可靠性评估中设备故障率的预测措施 [J]. 低碳世界, 2017 (35): 62-63.
- [7] 李晴. 可靠性分配理论在设备设施维修工程重要度分析中的应用. 科技创新导报 [J]. 2016, 13 (18): 27-28, 30.
- [8] 张增照. 以可靠性为中心的质量设计、分析和控制 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [9] EBELING C E. 可靠性与维修性工程概论 [M]. 康锐, 李瑞莹, 王乃超, 等, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [10] 曾声奎. 可靠性设计与分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

(收稿日期: 2023-08-07)