

电力系统运行可靠性评估与优化调度技术研究

商强强

(无棣县鑫苑热力有限公司, 山东 滨州 251900)

摘 要 本文围绕电力系统运行可靠性评估与优化调度两个核心问题展开研究。构建以 LOLP、EENS、SAIDI 等为核心的可靠性指标体系, 建立负荷波动正态分布模型与新能源出力 Weibull、Beta 概率模型, 采用蒙特卡洛模拟与解析法混合框架进行量化评估。在此基础上, 建立计及功率平衡、爬坡、备用约束的机组组合与经济调度模型, 构建运行成本与可靠性的多目标协调优化框架, 引入储能与柔性负荷提升调度灵活性。采用改进 PSO 算法求解, 并在 IEEE RTS-24 系统上进行仿真验证。结果表明, 所提方法可将 LOLP 与 EENS 降低约 70%, 效果显著。

关键词 可靠性评估; 优化调度; 蒙特卡洛模拟; 机组组合; 多目标优化

中图分类号: TM732

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.027

0 引言

随着电网规模持续扩大与新能源大规模并网, 电力系统运行的不确定性显著增加, 可靠性问题日益突出。传统调度方法主要以经济性为目标, 对系统可靠性约束考虑不足, 难以应对复杂运行场景下的潜在风险。因此, 如何科学评估系统可靠性、准确定位薄弱环节, 并在此基础上制定兼顾经济性与可靠性的优化调度策略, 已成为电力系统领域的重要研究方向, 已有研究对可靠性评估方法进行了系统梳理^[1], 但针对高比例新能源场景下评估与调度的协同优化仍有待深入。本文针对上述问题, 系统开展可靠性评估方法与优化调度模型的研究, 以期为电网安全运行提供理论支撑与方法参考。

1 电力系统运行可靠性评估

1.1 可靠性指标体系构建

电力系统可靠性评估的前提是建立一套科学、完整的指标体系, 依据评估对象的差异, 可靠性指标一般分为充裕度指标和安全性指标两类。充裕度指标能

反映系统在稳态条件下满足负荷需求的能力; 安全性指标则可衡量系统在扰动发生后维持运行的能力。两类指标相互补充, 共同构成对系统可靠性的立体化描述, 缺一不可, 实际工程中常用的核心指标如表 1 所示。

1.2 概率化建模与不确定性处理

电力系统在运行过程中存在两类主要不确定性来源, 分别是负荷侧的随机波动以及新能源出力的间歇性。随着风电和光伏装机容量持续不断地扩大, 新能源出力的随机性对系统可靠性的影响愈发显著, 必须通过建立精确的概率模型进行量化描述, 这样才能为后续评估提供可靠的输入基础。对于负荷波动情况, 鉴于实际负荷在预测值附近呈现出对称分布的状态, 通常采用正态分布模型来加以描述, 假设系统在时段 t 的负荷预测值为 μ_t , 预测误差标准差为 σ_t , 那么实际负荷 L_t 的概率密度函数为:

$$f(L_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left(-\frac{(L_t - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right) \quad (1)$$

式 (1) 中, μ_t 为 t 时段负荷预测均值, σ_t 为对应标准差, 反映预测不确定性的, 对于风电出力,

表 1 常用电力系统可靠性评估指标

指标	全称	含义	单位
LOLE	电力不足期望值	系统日均供电不足的期望小时数	h/年
EENS	电量不足期望值	单位时间内系统期望缺供电量	MWh/年
SAIDI	系统平均停电持续时间	用户年均停电持续时间	h/户·年
LOLP	电力不足概率	系统出现供电不足状态的概率	—

作者简介: 商强强 (1979-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电力工程。

风速通常服从 Weibull 分布, 其概率密度函数为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

式(2)中, k 为形状参数, 反映风速分布的集中程度; c 为尺度参数, 反映该地区的平均风速水平, 对于光伏出力, 辐照度在 $[0, 1]$ 区间内通常服从 Beta 分布, 其形状参数 α 与 β 能够通过历史数据拟合来确定, 上述概率模型通常假设各时段独立, 未考虑时序相关性; 可通过通过卷积理论和高斯 Copula 对净负荷相关性进行刻画^[2], 可进一步减少灵活性需求量化误差。

1.3 蒙特卡洛模拟与解析混合评估

采用蒙特卡洛模拟与解析法相结合的混合评估框架对系统可靠性做量化计算, 蒙特卡洛模拟通过对系统状态进行大量随机抽样, 统计各类故障场景的发生频率, 从而估计可靠性指标的期望值。经过 N 次抽样后, LOLP 的估计值为:

$$\hat{P}_{LOLP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 1(G^{(i)} < L^{(i)}) \quad (3)$$

式(3)中, 条件表达式 $G^{(i)} < L^{(i)}$ 成立时取 1, 否则取 0; N 为总抽样次数。针对网络拓扑相对简单的局部子系统, 配合解析法直接计算状态概率, 以此避免蒙特卡洛模拟在小概率事件下收敛慢的不足, 进而在保证计算精度的同时提升整体计算效率。

2 面向可靠性提升的优化调度建模

2.1 机组组合与经济调度模型

机组组合决定各个发电机组在每个时段的启停状态, 经济调度在这个基础上确定各机组的具体出力水平, 机组组合和经济调度共同构成一个混合整数优化问题, 该问题需要在满足系统运行约束的前提下实现运行成本最小化。

以 T 个调度时段、 N 台机组为研究对象, 系统运行的总成本由燃料成本和启停成本这两部分构成, 目标函数如下:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [u_{i,t} \cdot C_i(P_{i,t}) + S_{i,t}(1 - u_{i,t-1})u_{i,t}] \quad (4)$$

式(4)中, $u_{i,t} \in \{0, 1\}$ 为机组 i 在时段 t 的启停状态变量; $P_{i,t}$ 为机组 i 的有功出力; $C_i(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i$ 为燃料成本函数; $S_{i,t}$ 为启动成本。

上述目标函数须满足以下约束条件。功率平衡约束要求系统在每个时段内总发电出力与总负荷需求相等:

$$\sum_{i=1}^N u_{i,t} P_{i,t} = D_t, \forall t \quad (5)$$

式(5)中, D_t 为 t 时段的系统总负荷需求, 机组出力同时受上下限约束 $u_{i,t} P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq u_{i,t} P_i^{\max}$ 与爬坡约束 $|P_{i,t} - P_{i,t-1}| \leq \Delta P_{i \max}$ 的共同限制, 为了确保机组能够在额定范围内平稳运行, 为了应对负荷预测误差以及机组突发故障情况, 系统必须保留一定的旋转备用容量, 备用约束如下:

$$\sum_{i=1}^N u_{i,t} (P_i^{\max} - P_{i,t}) \geq R_t^{\min}, \forall t \quad (6)$$

式(6)中, $R_t^{\min}$ 为 t 时段所需的最小旋转备用容量, 通常取系统最大负荷的一定比例, 上述约束体系从功率平衡、设备能力与运行安全三个层面共同保障了调度方案的可行性。

2.2 运行成本与可靠性的多目标协调

单纯以经济性为目标的调度方案往往以牺牲可靠性为代价, 而片面追求可靠性则会导致运行成本大幅攀升, 因此, 需要在两者之间寻求合理的协调平衡, 构建为多目标优化问题加以求解。

以系统运行总成本 f_1 与电量不足期望值 EENS 作为可靠性目标 f_2 , 建立双目标优化模型, 考虑到工程实践中决策者通常对两目标有明确偏好权重, 采用线性加权求和法将双目标转化为单目标:

$$\min F = \omega_1 \cdot \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \omega_2 \cdot \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (7)$$

式(7)中, ω_1 与 ω_2 分别为经济性与可靠性的权重系数, 满足 $\omega_1 + \omega_2 = 1$; 分式部分为各目标的归一化处理, 确保两个量纲不同的目标具有可比性。进一步引入 Pareto 多目标优化框架, 通过求解 Pareto 前沿揭示成本与可靠性之间完整的权衡曲线。若不存在任何可行方案能同时改善 f_1 与 f_2 , 则该方案为 Pareto 最优解, 全体 Pareto 最优解构成的前沿为决策者提供了一组非劣调度方案集合。

2.3 储能与柔性负荷的灵活性建模

随着储能系统与柔性负荷资源的规模化应用, 调度灵活性得到显著提升, 储能系统可在新能源出力充裕时段吸收多余电量、在出力不足时段释放电量, 有效平抑功率缺口; 柔性负荷则通过需求响应机制主动调整用电时序, 从需求侧为系统提供调节能力, 需求响应机制包括价格型和激励型两类, 其在降低峰值负荷、提升资源配置效率方面的有效性已在 IEEE 39 节点系统中得到验证^[3]。两类资源协同作用, 能够从供需两侧同时缓解薄弱时段的可靠性压力。

对于储能系统, 其荷电状态的动态变化是建模核心, 相邻时段间的能量平衡关系为:

$$E_t = E_{t-1} + \eta_c P_t^c \Delta t - \frac{P_t^d}{\eta_d} \Delta t \quad (8)$$

式(8)中, E_t 为 t 时段末的储能能量; P_t^c 与 P_t^d 分别为充电与放电功率; η_c 与 η_d 分别为充放电效率; Δt 为时段长度, 储能系统同时须满足容量上下限约束与充放电不同时约束, 避免同一时段内同时充放电造成能量损耗。

3 调度优化求解与仿真验证

3.1 智能优化算法设计与改进

优化调度模型包含整数变量与非线性约束, 属于混合整数非线性规划问题, 传统梯度类方法难以有效求解。为此, 本文采用粒子群优化算法(PSO)作为主体求解框架, 并针对机组组合问题的特点进行改进, 标准 PSO 通过模拟粒子在解空间中的群体协作搜索行为寻找最优解, 每个粒子代表一组调度方案。除粒子群算法外, 其他启发式算法如鲸鱼优化算法也被用于电力系统调度寻优^[4]。本文侧重对 PSO 的离散化与自适应惯性权重改进, 依据个体历史最优与群体全局最优位置更新自身速度与位置, 然而标准 PSO 在处理整数变量时容易陷入局部最优。为此, 引入两项改进: 一是对启停变量采用离散化处理, 通过 sigmoid 函数映射至 $\{0, 1\}$ 空间; 二是引入自适应惯性权重机制, 在迭代初期增强全局探索, 后期加强局部开发, 从而在搜索广度与收敛速度之间取得平衡。

3.2 仿真测试系统搭建

采用 IEEE 可靠性测试系统(IEEE RTS-24)作为仿真验证平台, 该系统包含 24 个母线节点、38 条输电线路、32 台发电机组, 总装机容量 3 405 MW, 峰值负荷 2 850 MW, 是电力系统可靠性研究的标准测试基准。在此基础上接入风电与光伏机组以模拟高比例新能源场景, 风电与光伏出力分别依据 Weibull 模型与 Beta 分布模型生成, 储能系统的充放电策略及可靠性评估中基于序贯蒙特卡罗的方法^[5], 充放电效率取 0.95, 容量配置为峰值负荷的 5%; 柔性负荷比例设定为总负荷的 10%, 最大响应系数 ρ 取 0.15, 调度周期为 24 小时, 时间分辨率为 1 小时。

3.3 调度策略对比与结果分析

为验证本文所提方法的有效性, 设置三种调度策略进行对比: 策略一为仅考虑经济性的传统调度(基准方案); 策略二为涉及可靠性约束但不含储能与柔性负荷的优化调度; 策略三为本文所提含储能与柔性负荷的完整优化方案。三种策略均在 IEEE RTS-24 系

统上运行, 采用相同的负荷曲线与新能源出力场景, 仿真结果如表 2 所示。

表 2 三种调度策略可靠性与经济性指标对比表

指标	策略一 (基准)	策略二(含可 靠性约束)	策略三(本 文方法)
LOLP	0.0 312	0.0 187	0.0 093
EENS (MWh/ 年)	856.4	512.3	241.7
运行总成本(万元)	184.2	197.6	205.8
旋转备用裕度(MW)	142.5	198.3	267.4

由表 2 可见, 与基准策略相比, 策略二引入可靠性约束后 LOLP 降低 40.1%、EENS 降低 40.2%, 运行成本上升 7.3%; 策略三进一步引入储能与柔性负荷, LOLP 较基准降低 70.2%、EENS 降低 71.8%, 运行成本仅上升 11.7%, 可靠性提升幅度远大于成本增加幅度, 体现出储能与柔性负荷在提升系统灵活性方面的显著优势, 体现出储能与柔性负荷在提升系统灵活性方面的显著优势, 可靠性提升效果与第 1 章评估所识别的高风险时段高度吻合。

4 结束语

本文构建了电力系统可靠性评估与优化调度的完整研究框架。基于概率化建模与蒙特卡洛混合评估实现了可靠性有效量化, 所建多目标优化模型兼顾经济性与可靠性, 储能与柔性负荷的引入进一步拓展了调度灵活性。IEEE RTS-24 仿真结果表明, 本文方法可在成本增幅约 12% 的条件下实现 LOLP 与 EENS 降低 70% 以上, 后续可进一步研究极端天气场景下的鲁棒调度优化与大规模电网的算法效率提升问题。

参考文献:

- [1] 刘波. 电力系统运行可靠性与关键技术综述[J]. 工业自动化, 2023, 49(S2): 135-138.
- [2] 杨帆, 彭浩, 邓一帆, 等. 基于时序-卷积概率模型的电力系统灵活性优化调度[J/OL]. 高电压技术, 1-18[2026-03-17]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20251308>.
- [3] 杨硕, 杨宇荃. 基于需求响应的电力系统优化调度模型研究[J]. 中国高新科技, 2025(21): 89-91.
- [4] 左雅, 王华春, 周金双, 等. 基于神经网络模型的新型电力系统优化调度方法仿真[J]. 电气技术与经济, 2025(11): 110-113.
- [5] 张黎明, 李浩, 吴亚雄, 等. 基于运行优化的含储能电力系统可靠性评估方法[J]. 中国电力, 2022, 55(09): 23-28.