

文献标识码: B 文章编号: 1003-0492 (2024) 10-084-04 中图分类号: TP274

基于最小特征轨迹的新型电力系统调度技术研究

Research on New Power System Scheduling Technology based on Minimum Characteristic Trajectory

★ 胡星, 李亚, 沈欣 (国网河南省电力公司信阳供电公司, 河南 信阳 464000)

摘要: 本文针对传统电力系统调度技术存在的一些问题, 提出了一种基于最小特征轨迹的新型电力系统调度技术。首先, 本文对最小特征轨迹进行了深入分析, 探讨了其在电力系统调度中的应用潜力。其次, 本文建立了基于最小特征轨迹的电力系统调度模型, 并结合实际场景数据进行了仿真实验, 验证了该技术在提高电力系统调度效率和降低系统运行风险方面的显著优势。结果表明, 基于最小特征轨迹的新型电力系统调度技术相比传统方法具有更高的准确性和稳定性, 能够更好地适应电力系统复杂多变的运行环境。

关键词: 最小特征轨迹; 新型电力系统; 电力系统调度; 改进Minty算法

Abstract: In view of some problems existing in traditional power system scheduling technology, a new power system scheduling technology based on minimum feature trajectory is proposed. First, the minimum characteristic trajectory is deeply analyzed, and its application potential in power system scheduling is explored. Through establishing the power system scheduling model based on the minimum feature trajectory and combining with the actual scene data, the significant advantages of this technology in improving the efficiency of power system scheduling and reducing the operating risk of the system are verified. The results indicate that the new power system scheduling technology based on minimum feature trajectory has higher accuracy and stability than the traditional method, and can better adapt to the complex and changeable operating environment of power system.

Key words: Minimal characteristic trajectory; New power system; Power system dispatching; Improved minty algorithm

传统的调度方法在应对电力系统运行中的不确定性和复杂性时表现出局限性, 容易导致效率低下和系统运行风险增加^[1]。这就需要引入新的技术和方法来提升电力系统调度的效率和可靠性。基于最小特征轨迹的新

型电力系统调度技术, 作为一种创新性的方法, 具有潜力解决传统调度方法的局限性。通过对最小特征轨迹进行研究和应用, 可以更好地捕捉电力系统运行规律和特征, 并且能够更准确地进行调度决策。因此, 将最小特征轨迹技术引入电力系统调度领域, 有望有效提高系统运行效率, 降低系统运行成本, 并且增强系统的稳定性和可靠性。在现代社会中, 电力系统调度不仅仅关乎经济效益和系统运行安全性, 还涉及到资源利用效率和环境保护等方面^[2]。因此, 研究和开发基于最小特征轨迹的新型电力系统调度技术, 对推动电力系统行业的技术进步、提升能源利用效率、实现可持续发展等方面都具有重要意义。

1 最小特征轨迹分析

在电力系统调度技术中, 最小特征轨迹是一个重要的概念。最小特征轨迹是指在系统状态空间中, 系统在给定期望状态下的最小轨迹, 通常用于描述系统的稳定性和动态特性。最小特征轨迹可以帮助我们更好地理解系统的运行情况, 从而指导调度策略的制定^[3]。

最小特征轨迹的定义与理论基础主要包括两个方面: 一是系统状态空间的描述, 二是系统在不同状态下的演化规律。系统状态空间通常由状态变量和控制变量构成, 通过这些变量的演化来描述系统的动态过程。在电力系统中, 状态变量可以包括功率、电压、频率等,

控制变量可以包括发电机输出功率、线路开关状态等。在这个基础上，最小特征轨迹则是描述系统在给定条件下达到期望状态的最短路径。

2 分布式电力系统调度模型

2.1 配电网灵活性

电力系统的灵活性特点主要体现在三方面，即灵活性的固有特征、灵活性的时间尺度和灵活性的方向性。灵活性的固有特征表现为配电网自身受到扰动且未有各类灵活性资源参与调度时，能够不丧失稳定运行的能力。两条虚线的固有容忍度分别表示配电网自身调节的上下限，即上调区间和下调区间内能够保持配电网持续安全稳定运行。灵活性的时间尺度表现为能源供给与用户需求能够保持实时平衡。可再生能源接入配电网所引起的不确定性和需求侧用电的非同时性，使得配电网中的净负荷功率波动更加复杂，并且各类灵活性资源在不同时间尺度上的响应能力也不同。因此，需要对不同的灵活性资源定义合理的时间尺度进行研究。灵活性的方向性表现为各类灵活性资源响应可再生能源出力突变，致使各时刻净负荷功率的大小和变化方向不同，从而对能源供给侧进行大小和方向的调整，使得各时刻需要一定的上调灵活性或下调灵活性。因此，不同场景会有不同的响应结果。通过以上分析，为应对高渗透率接入配电网引起的净负荷功率剧烈波动，本文计及储能、智能软开关、可控负荷和网络重构四种灵活性调度资源参与系统的优化调度，保证其运行时的高效、安全、可靠和灵活，使其成为能源消费的高度电气化枢纽平台。

2.2 电力系统调度模型

分布式电力系统具有不同的电路模型，例如电压源、电流源和功率源模型等，本文主要研究分布式电力在主动配电网经济调度中的功率输出。在考虑分布式电力系统接入主动配电网的功率特性时，重点在于其具有输出电能也能吸收电能的双向性，可以将分布式电力系统视作一个同步发电机，依据其功率流动特性构建相应的功率模型。通常，分布式电力系统的外部功率输出用来表示，本文将分布式电力系统的工作模式划分为三种

不同的类型，有利于优化其运行策略、提升其配电网的整体性能。当分布式电力系统小于0时，表明系统正在进行充电操作，从电网吸收能量；当 P_{ESS} 为0时，分布式电力系统进入了浮充模式，在此状态下，系统既不向电网提供能量，也不从电网中获取能量；当 P_{ESS} 大于0时，分布式电力系统则进入放电模式，开始向电网输送能量，可参考图1的模型^[4]。

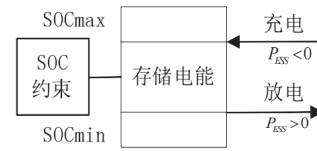


图1 分布式电力系统充放电模型

在实际工程应用中，通常利用荷电状态（SOC，即State of Charge）来反映分布式电力系统的能量状态。如式（1）所示，定义为分布式电力设备当前的剩余能量与其总设计容量之比的百分数，这反映了分布式电力系统随时间变化的能量动态性和连续性。虽然分布式电力系统能够同时扮演电源和负载的角色，但其本质上不产生电能，而是限量存储和释放电能，这一点在进行分布式电力系统优化调度时尤为重要，需要考虑其能量在不同时间段的互动和变化特性^[5]。

$$SOC = \frac{E}{E_{ESS}} \times 100\% \quad (1)$$

式中， E 为分布式电力系统内部储存的能量； E_{ESS} 为分布式电力系统的额定容量。

考虑分布式电力系统在多时间断面耦合特点，得到SOC的不同时段的求取过程，如式（2）所示。

$$SOC(t+1) = \begin{cases} SOC(t) - \frac{\eta_c P_{ESS}}{E_{ESS}}, & P_{ESS} < 0 \\ SOC(t), & P_{ESS} = 0 \\ SOC(t) - \frac{P_{ESS}}{\eta_d E_{ESS}}, & P_{ESS} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中， $SOC(t)$ 为分布式电力荷电状态； η_c 为分布式电力充电效率； η_d 为分布式电力放电效率。

为确保分布式电力系统的寿命不受过度充放电的影响，在参与调度过程中，维持其剩余能量处于合理范围内，以此实现分布式电力系统的有效管理和可持续利用，如式（3）所示。

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (3)$$

式中, $SOC_{\min}$ 为荷电状态的最小值, $SOC_{\max}$ 为荷电状态的最大值^[6]。

3 新型电力系统调度优化方法

3.1 目标函数

本文计及分布式电力、智能软开关、可控负荷和网络重构四种灵活性调度资源, 基于典型场景, 建立以经济性和灵活性两目标的随机优化调度模型, 并对其赋予权重系数, 把多个目标函数整合为单个目标函数求解, 目标函数如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} \min f = \varepsilon_1 J_1 + \varepsilon_2 J_2 \\ s.t. \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, 目标函数 J_1 与 J_2 分别为日期望费用最小和净负荷波动率最小; ε_1 和 ε_2 为权重系数, 本文取 0.75 和 0.25。在实际应用中, 可以根据不同地区的具体情况灵活调节目标函数的权重系数, 以使其更加贴合不同地域的实际需求, 从而最大程度地提高配电网的整体性能和适应性。

3.2 基于改进Minty算法的调度优化方法

Step1: 假设配电网为包含多个环路的理想网络, 以确保网络结构中的每一个环路上都具有无穷大功率电源进行调节, 各环路中的电流按照电阻值的倒数为比例流动, 并且需满足式 (5)。

$$\begin{cases} A' I_{opt}^{\&} = J_{opt}^{\&} \\ B' R I_{opt}^{\&} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, A' 为节点与支路关系的降阶关联矩阵; $I_{opt}^{\&}$ 为按照电阻值倒数比例流动的电流, 为节点注入电流向量; B' 为独立回路与支路关系的独立回路矩阵; R 为支路与支路关系的支路电阻矩阵。其中, 节点注入电流 $J_{opt}^{\&}$ 是基于将各节点的电压视为根节点电压的前提, 通过考虑节点注入电流和各节点电压之间的关系, 实现对节点电流的准确估算; 图每一步生成树的理想网络损耗是以式确定的计算所得, 这里保留环中的电阻并忽略电抗, 而其余辐射状支路保持不变。

Step2: 定义 $Y_i = \{y_{ij}, j=1, 2, \dots, k\}$, $P_i = \{p_{ij}, j=$

$1, 2, \dots, k\}$ 。其中, y_{ij} 表示子图的第 j 个辐射状网络结构, P_{ij} 表示各辐射状网络结构所对应的网损, k 表示子图的辐射状网络结构 (树状结构) 总数。

Step3: 比较规则: 如果子图的集合中任意辐射状网络结构的网损 P_{ij} 均大于 P_{loss} , 那么子图一定不含有最优解。因此, 可以根据子图的理想网络损耗满足 $P_{opt, G_e} > P_{loss}$, 则在生成树的过程中, 子图可不必处理, 即含有描红边的图不必生成树, 转换到实际配电网结构中即支路开关需要断开。具体计算流程如图2所示。

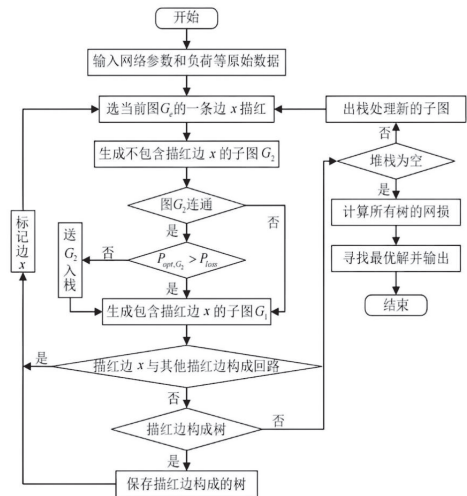


图2 改进Minty算法流程图

4 实验结果分析

由表1可知, 各典型场景的调度方案适应聚类前原始场景的电压均未发生越限, 则均能适应365个原始场景, 这是因为方案计及的灵活性资源较多, 能够更好地调控配电系统的运行状态。经计算, 生成的典型场景共获取了4种调度方案, 而典型场景4下的目标结果为本文求解出的最优值。因此, 方案是针对典型场景4的调度方案及目标结果进行详细分析。这里虽然并未出现电压越限所引发的不保留调度方案及目标结果的情况, 但是在综合调度策略中仍需考虑发生越限的情况, 以防出现不合理的调度方案及目标结果。

表1 不同典型场景下的目标结果及概率

典型场景	概率	原始场景/个数	电压偏差/p.u.	日期望费用/元
1	0.2462	90	0.00508	69.249
2	0.2238	81	0.00445	68.274
3	0.1479	54	0.00453	68.114
4	0.1415	52	0.00526	67.890

5 结论

基于最小特征轨迹的新型电力系统调度技术具有重要的研究意义和应用前景。未来的研究工作将继续深化算法优化和实验验证，进一步完善技术体系，推动该技术在电力领域的广泛应用和推广，为电力系统的发展和智能化建设做出更大贡献。**AP**

作者简介：
胡 星（1991-），男，河南信阳人，工程师，学士，现就职于国网河南省电力公司信阳供电公司，研究方向为电力系统调度、储能、负荷预测、算法等。
李 亚（1994-），女，河南信阳人，工程师，硕士，现就职于国网河南省电力公司信阳供电公司，研究方向为电力系统调度、储能、负荷预测、算法等。
沈 欣（1992-），男，河南信阳人，工程师，学士，现就职于国网河南省电力公司信阳供电公司，研究方向为新能源、储能、负荷管控等。

参考文献：

[1] 聂春芳, 郝正航, 陈卓, 等. 新型电力系统电磁暂态加速仿真技术[J]. 电子科技, 2024, 37 (3) : 18 - 25.

[2] 可寅. 新型电力系统调度优化与功率智能控制关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.

[3] 李树雷. 区域多能源体框架下电力系统低碳调度模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.

[4] 马成元, 陈皓勇, 肖东亮. 考虑碳约束的新型电力系统跨区域优化调度研究[J]. 智慧电力, 2024, 52 (6) : 38 - 45.

[5] 吴任博, 刘淑琴. 基于一致性算法的新型电力系统边缘集群分布式经济调度模型[J]. 可再生能源, 2024, 42 (4) : 553 - 560.

[6] 李更丰, 孙少华, 别朝红, 等. 面向新型电力系统弹性提升的分布式电力优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49 (10) : 4084 - 4095.