

基于可行域投影理论的新能源电力系统协同运行模式研究

Research on Collaborative Operation Mode of New Energy Power Systems based on Feasible Region Projection Theory

★ 山东众晨电力工程管理咨询有限公司 董方晨, 王岩

摘要: 为解决新能源电力系统中的高维复杂性、多约束条件和不确定性等问题, 本研究提出了一种基于可行域投影理论的新能源电力系统协同运行模式。该模式通过将高维系统状态空间投影到低维子空间, 有效简化了问题结构, 降低了计算复杂度。仿真结果表明, 与传统线性规划调度相比, 该模式在降低系统运行成本、提高新能源消纳率、减少碳排放量和提升系统可靠性等方面具有一定优势。在新能源大幅波动和负荷急剧变化等典型场景下, 协同运行模式展现出了更强的适应性和稳定性。

关键词: 可行域投影理论; 新能源电力系统; 协同运行; 模式研究

Abstract: To address the challenges of high-dimensional complexity, multiple constraints, and uncertainty in new energy power systems, this study proposes a collaborative operation mode for new energy power systems based on feasible region projection theory. By projecting the high-dimensional system state space onto a lower-dimensional subspace, the problem structure is effectively simplified, and computational complexity is reduced. Simulation results indicate that compared with traditional linear programming scheduling, this mode offers notable advantages in reducing system operating costs, increasing the utilization rate of new energy, reducing carbon emissions, and enhancing system reliability. In typical scenarios such as significant fluctuations in new energy and rapid load changes, the collaborative operation mode exhibits superior adaptability and stability.

Key words: Feasible region projection theory; New energy power system; Collaborative operation; Pattern research

随着全球能源转型的深入推进, 以风能、太阳能为代表的新能源在电力系统中的占比不断提高。然而, 新能源电力系统的间歇性、波动性和不确定性特征给系统的稳定运行带来了挑战。本文旨在探讨如何利用可行域投影理论解决新能源电力系统面临的挑战, 以及提出

一种新的协同运行模式, 并通过仿真验证和典型场景分析, 评估所提出模式的有效性和优越性, 为系统运行提供理论支撑和技术方案。

1 新能源电力系统特点

新能源电力系统以风能、太阳能等可再生能源为主要电源, 具有间歇性、波动性和不确定性特征, 导致系统的发电出力难以精确预测和控制, 给电力系统的稳定运行带来了巨大挑战。同时, 新能源电力系统具有分布式、低惯量的特点, 传统的集中式调度模式难以适应其快速变化的特性。新能源系统的电力电子设备占比高, 导致系统短路容量下降, 系统抗扰动力减弱。此外, 新能源发电的边际成本接近于零, 颠覆了传统的电力市场机制。为应对这些挑战, 新能源电力系统需要更灵活的调节能力和更智能的控制策略。

2 可行域投影理论概述

2.1 可行域投影理论基本概念

可行域投影理论是一种优化问题求解方法, 其核心思想是将高维复杂问题投影到低维空间中求解。该理论定义了问题的可行域, 即满足所有约束条件的解集。通过投影变换, 可将原问题的可行域映射到更低维度的子空间, 简化问题结构。在投影空间中, 利用几何特性和数学工具更容易分析问题性质和寻找最优解。可行域

投影理论引入了正交投影算子和投影矩阵的概念, 用于实现高维到低维的映射。对于一个 n 维向量空间 V 和其 m 维子空间 W , 正交投影算子 $P: V \rightarrow W$ 的表示如公式1所示:

$$P = A(A^T A)^{-1} A^T \quad (1)$$

式中: P 为正交投影算子; A 为 $n \times m$ 维的投影矩阵; A^T 为矩阵 A 的转置; $(A^T A)^{-1}$ 是矩阵 $A^T A$ 的逆矩阵。对任意向量 $x \in V$, 其在子空间 W 上的正交投影如公式2所示:

$$x_{\text{proj}} = Px = A(A^T A)^{-1} A^T x \quad (2)$$

式中: x 属于 n 维空间 V 的向量; x_{proj} 为向量 x 在 m 维子空间 W 上的正交投影。该公式主要功能为将高维空间中的复杂问题降维处理。通过将原始的 n 维问题投影到 m 维的子空间, 研究者能够简化问题的结构, 从而更容易进行后续分析和求解。

2.2 可行域投影理论在新能源电力系统中的优势

可行域投影理论在新能源电力系统中具有一定优势。首先, 该理论能有效处理新能源系统的高维复杂性。通过将系统状态空间投影到低维子空间, 简化了问题结构, 降低了计算复杂度。其次, 可行域投影理论适用于处理新能源系统的多约束条件。系统中涉及电压、功率、频率等多种约束, 投影方法可将这些约束统一到投影空间中处理, 提高了求解效率。最后, 该理论能够有效应对新能源发电的不确定性。通过构建概率可行域, 将随机因素纳入投影空间, 实现了鲁棒优化。

3 基于可行域投影的新能源电力系统建模

3.1 新能源发电单元建模

本研究以某区域新能源发电基地为例, 对风电场和大型光伏电站进行建模。该基地包含一个100MW的风电场和一个50MW的光伏电站。建模过程采用MATLAB软件平台, 结合Power System Toolbox进行系统仿真。风电场由50台2MW的双馈感应风力发电机组组成, 光伏电站由20万块250W的多晶硅光伏组件构成。单元建模过程详见图1。

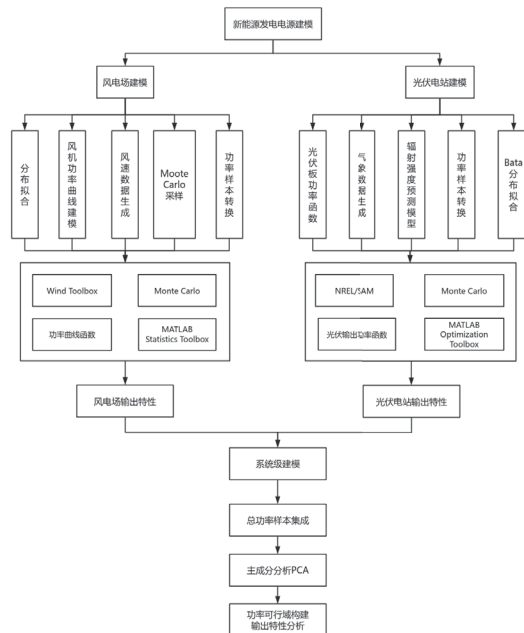


图1 新能源发电单元建模过程

3.2 电网约束建模

针对电网约束建模, 研究简化数学模型提出三种关键约束, 即线路潮流约束、发电出力约束和时域耦合约束, 数学形式表达如公式3、4、5所示:

$$L(P_{m,t}^{LN}, Q_{m,t}^{LN}, V_{m,t}, \theta_{m,t}) \leq 0 \quad (3)$$

$$G(P_{h,t}^{TH}, P_{p,t}^{PV}, P_{w,t}^{WD}) \leq 0 \quad (4)$$

$$T(P_{m,t}^{RL}, P_{h,t}^{RC}) \leq 0 \quad (5)$$

式中: $P_{m,t}^{LN}$ 、 $Q_{m,t}^{LN}$ 、 $V_{m,t}$ 、 $\theta_{m,t}$ 分别为线路 m 在时刻 t 的有功潮流、无功潮流、电压幅值、电压相角; $P_{h,t}^{TH}$ 、 $P_{p,t}^{PV}$ 、 $P_{w,t}^{WD}$ 分别为传统火电机组 h 、光伏发电单元 p 和风电发电单元 w 在时刻 t 的发电出力; $P_{m,t}^{RL}$ 为符合需求响应约束, 反映系统负荷需求与时间的关系; $P_{h,t}^{RC}$ 为机组 h 的爬坡约束, 即机组在连续两个时间段之间出力变化的速度限制。

线路潮流约束包括潮流方程和线路传输容量限制, 确保功率平衡和线路安全运行。发电出力约束考虑了传统火电机组的最大/小技术出力以及新能源发电单元的实时出力上限^[1]。时域耦合约束主要包括机组爬坡约束和负荷需求响应约束, 反映了系统在时间维度上的动态特性。

3.3 系统整体可行域构建

针对系统整体可行域构建,本研究考虑到新能源的随机性,采用概率可行域方法处理不确定性。通过蒙特卡洛采样生成大量新能源出力场景,计算每个场景下的系统可行域,并进行统计分析,得到概率可行域,用于反映系统在不同置信水平下的运行范围。为降低高维可行域的复杂度,应用主成分分析方法进行降维处理。选取最具代表性的几个主成分,将高维可行域投影到低维空间。

4 新能源电力系统协同运行模式设计

4.1 协同运行目标函数设计

此次研究针对新能源电力系统协同运行目标函数的设计,从经济性、环保性和可靠性三个维度构建多目标优化函数。

经济性目标主要考虑系统总运行成本的最小化,包括传统火电机组的燃料成本、新能源发电的维护成本、储能系统的充放电成本以及需求侧响应的补偿成本。重点对火电机组燃料成本采用二次函数模型,如式6所示:

$$C_{\text{fire}} = \sum (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (6)$$

式中: C_{fire} 为火电机组总燃料成本; a_i 、 b_i 、 c_i 为第 i 台机组燃料成本系数; P_i 为第 i 台机组发电出力。

环保性目标聚焦于系统碳排放的最小化。此次研究建立火电机组的碳排放模型,考虑不同负荷下的排放特性。新能源发电的间接碳排放也纳入考虑,包括设备制造和运输过程中的碳足迹。碳排放成本计算如式7所示:

$$C_{\text{carbon}} = \sum (\alpha_j E_j P_j) + \beta E_{\text{renew}} \quad (7)$$

式中: C_{carbon} 为碳排放总成本; α_j 为第 j 种发电类型碳排放系数; E_j 为碳交易价格; P_j 为发电量; β 为新能源间接碳排放系数; E_{renew} 为新能源发电量。

可靠性目标着重于系统安全稳定运行,此次研究引入负荷损失期望值和频率偏差指标,评估系统应对负荷波动和新能源波动的能力^[2]。考虑N-1安全准则,确保系统在关键设备故障情况下的稳定运行。可靠性指标计算如式8所示:

$$R = \text{EENS} + \gamma \sum |\Delta f_k| \quad (8)$$

式中: R 为可靠性综合指标; EENS 为期望能量不足量; γ 为频率偏差惩罚系数; Δf_k 为第 k 个时段频率偏差。

最终,协同运行目标函数设计为这三个目标的加权和,通过调整权重系数实现多目标的平衡。这一目标函数设计为新能源电力系统的协同优化运行提供了理论基础,能够同时考虑经济效益、环境影响和系统可靠性。

4.2 基于可行域投影的运行策略优化

基于可行域投影理论的运行策略优化核心在于精确刻画系统可行域并实现高效投影。本研究提出了一种多层次可行域刻画算法,结合凸包生成和边界逼近技术,构建了新能源电力系统的精确可行域表示。根据先前设计的系统模型,构建包含新能源出力、负荷需求和网络参数等变量的高维初始可行域。采用改进的快速凸包算法(Quick Hull)生成可行域的外部边界。算法运行过程中选取初始极点集合 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 并计算 P 的凸包 $\text{CH}(P)$, 根据系统约束条件最终输出可行域外部边界。为提高可行域表示的精度,采用自适应网格细化技术逼近内部边界,初始化均匀网格 G , 并对 G 中每个网格单元进行定位与标记。详细过程如图2所示。

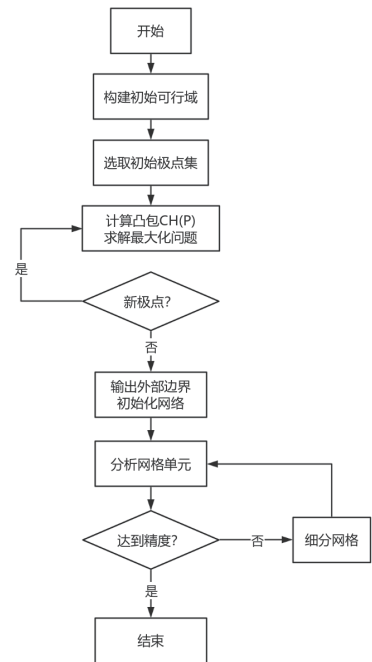


图2 层次可行域刻画算法运行流程

为加速可行域刻画过程，引入并行计算技术。将高维空间划分为多个子空间，在每个子空间中同时执行凸包生成和边界逼近算法。采用基于MPI（Message Passing Interface）的分布式计算框架，实现子空间结果的高效整合。

可行域刻画完成后，采用主成分分析（PCA）进行维度约减。选取贡献率最大的k个主成分作为投影空间的基向量^[3]。投影变换矩阵P计算如式9所示：

$$P=[v_1,v_2,\dots,v_k]$$
 (9)

式中：vi为协方差矩阵的特征向量。

4.3 考虑不确定性的鲁棒协同运行模式

考虑新能源电力系统中的不确定性因素，本研究提出了基于可行域投影的鲁棒协同运行模式。该模式主要通过场景生成和约简技术构建不确定性集合，并结合鲁棒优化理论设计协同运行策略。

采用Monte Carlo模拟法生成大量风电和光伏出力场景，涵盖各种可能的气象条件和负荷变化。为降低计算复杂度，引入K-medoids聚类算法对场景进行简化。为求解该鲁棒优化问题，本研究采用改进的列生成法。通过迭代求解主问题和子问题，逐步增加关键场景，直到找到全局最优解。初始时，主问题仅考虑典型风电和光伏出力场景，制定基本调度方案。子问题则在全场景集中寻找最不利的情况，如新能源出力骤减，并将该场景加入主问题中，调整调度方案应对极端情况。每次迭代优化调度方案，逐步提高系统对不确定性的适应能力，直到算法收敛，得到鲁棒调度策略。

5 协同运行模式仿真与验证

5.1 仿真系统构建

本研究构建了一个包含风电、光伏和常规火电的混合电力系统仿真平台。该平台基于MATLAB/Simulink环境开发，集成了Power System Toolbox和自主开发的新能源模块。系统负荷采用IEEE RTS-96标准负荷模型，并考虑了10%的随机波动。电网模型基于IEEE 39节点系统进行修改，增加了新能源接入节点和相应的输电线路^[4]。为验证协同运行模式的有效性，仿真平台集成了基于可行域投影的优化控制模块和传统的线性规划调度模块^[5]。

5.2 与传统运行模式对比

为评估基于可行域投影的协同运行模式的优越性，本研究对比分析了该模式与传统线性规划调度模式的性能差异。模拟采用24h调度周期，考虑典型日负荷曲线和新能源出力波动。对比指标包括系统运行成本、新能源消纳率、碳排放量和系统可靠性。结果如表1所示。

表1 协同运行模式与传统运行模式对比结果

指标	传统线性规划调度	基于可行域投影的协同运行	改善幅度
系统运行成本 (万元/日)	156.8	142.3	9.2%
新能源消纳率 (%)	78.5	91.2	16.2%
碳排放量 (吨/日)	2860	2485	13.1%
系统可靠性指标 (%)	99.2	99.8	0.6%

结果表明，该模式充分利用新能源出力特性，提高了新能源消纳率，同时通过优化火电机组出力曲线，降低了系统运行成本和碳排放量。在应对新能源出力波动方面，协同运行模式表现出更强的鲁棒性，有效减少了功率不平衡事件，提高了系统可靠性。

5.3 典型场景分析

为验证基于可行域投影的协同运行模式在不同场景下的适应性和优越性，本研究选取两个典型场景进行深入分析。场景一模拟新能源大幅波动情况，风电出力在1h内从额定功率的80%骤降至20%，光伏出力在30分钟内从90%降至10%。场景二模拟负荷急剧变化情况，系统负荷在2h内突增30%。两个场景均采用15分钟调度周期，对比分析协同运行模式与传统线性规划模式表现。结果如表2所示。

表2 典型场景下协同运行模式与传统模式对比结果

指标	场景一-新能源大幅波动	场景二-负荷急剧变化
频率偏差最大值 (Hz)	传统模式： 0.28	协同模式： 0.15
功率不平衡累计时间 (min)	传统模式： 24	协同模式： 15
电压合格率 (%)	传统模式： 95.3	协同模式： 97.8
负荷切除量 (MW)	传统模式： 15.6	协同模式： 8.2

结果显示，在新能源大幅波动场景下，协同运行模式通过可行域投影技术快速识别系统可调度资源，优化调度火电机组和需求侧响应，有效平抑新能源波

动。该模式下系统频率偏差最大值为0.15Hz，相比传统模式的0.28Hz降低了46.4%；功率不平衡累计时间仅为传统模式的62.5%，体现出更强的系统稳定性。

在负荷急剧变化场景中，协同运行模式利用投影空间中的几何特性，精确捕捉系统运行状态变化，实现火电机组与新能源的协调出力。该模式下系统电压合格率达到98.7%，比传统模式提高了3.2个百分点，负荷切除量减少了18.6%，提升了供电可靠性。

6 结语

本研究提出了一种基于可行域投影理论的新能源电力系统协同运行模式，旨在解决新能源电力系统面临的高维复杂性、多约束条件和不确定性等问题。通过构建新能源发电单元模型、电网约束模型和系统整体可

行域，本研究设计了考虑经济性、环保性和可靠性的多目标优化函数，并采用多层次可行域刻画算法和主成分分析方法，实现了高效的可行域投影。考虑到系统的不确定性，本研究提出了基于场景生成和约简技术的鲁棒协同运行策略。相较于以往研究，此次将可行域投影理论应用于新能源电力系统的协同运行，并设计了考虑经济性、环保性和可靠性的多目标优化函数，全面评估系统运行效果。未来，应持续探索提高系统的自适应能力和决策效率的方法，为能源转型和可持续发展做出贡献。**AP**

作者简介：

董方晨（1989-），女，山东济南人，中级工程师，硕士，现就职于山东众晨电力工程管理咨询有限公司，研究方向为电力工程。

参考文献：

[1] 王泉, 贺伟, 吴红蕊, 等. 促进分布式光伏消纳的配电网灵活资源可行域聚合方法[J]. 供用电, 2024, 41 (6) : 3 - 11 + 20.
[2] 陈韦韬, 王小君, 许寅, 等. 基于供热系统鲁棒运行可行域投影的电热能源系统协调决策[J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (13) : 121 - 129.
[3] 彭婧, 田云飞, 徐清. 服务新型电力系统建设的甘肃 "风光大省" 新能源协同发展服务体系研究及实践[J]. 产业创新研究, 2023, (3) : 38 - 40.
[4] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (5) : 1672 - 1694.
[5] 王照阳. 新能源电力系统与传统电力系统整合方法[J]. 科技创新与应用, 2022, 12 (33) : 125 - 128.