基于源网荷储协同的配电网优化控制策略

文/张聪　张鹏飞　陈少东　周恩杰　张建平
国网甘肃省电力公司定西供电公司

提出一种基于源网荷储协同控制的配网优化控制策略，旨在解决当前配电网面临的可再生能源接入率低、电网损耗高以及运行稳定性差等问题。通过构建多目标优化模型，从能源成本、电网效率和供电可靠性等维度出发，深入分析包括可再生能源调度、电网无功补偿、负荷平衡优化和储能控制策略在内的关键技术。研究结果表明，源网荷储协同控制策略能够有效缓解传统控制方式下的能源浪费与供电质量问题，为配电网运行效率的提升和可再生能源的高效利用提供重要理论支持和实践指导。

随着全球能源转型的加速，可再生能源的开发利用逐渐成为现代能源系统的重要组成部分。然而，风能和太阳能等可再生能源的间歇性和波动性给传统电网的调度和运行带来了巨大挑战，导致可再生能源的消纳能力受到限制。与此同时，电网负荷的日益复杂化，以及储能技术和智能电网管理手段的快速发展，为电网优化调度和灵活控制提供新的机遇。

源网荷储协同控制作为一种创新的电网调控策略，能够实现发电侧、电网侧、用户侧和储能系统之间的高效协同，通过精准的负荷预测、储能优化调度和智能化管理，提升电网的灵活性、可靠性和可再生能源的消纳能力。在这一背景下，针对配电网复杂性和负荷多样性所带来的实际问题，研究基于源网荷储协同的优化控制策略具有重要的理论意义和实际价值[1]。

本研究以一典型地区配电网台区为研究对象，分析其能源供需现状、电网运行特性及主要面临的挑战，提出一种基于源网荷储协同控制的优化模型，并制定相应的控制策略。通过数学建模、算法设计及仿真分析，验证所提控制策略的有效性，为我国西北地区电力系统管理与能源转型提供理论支持与实践指导。

配电网台区概述

以我国西北地区某典型地区为例，该地区年日照时数为2 114～2 433 h，非常适合大规模发展光伏发电。风能方面，部分地区的有效风速可达7.0 m/s，年际和年内风速变化较小，为风电的稳定利用提供了有利条件。尽管如此，传统煤炭资源仍在一定程度上支撑当地能源供应。在可再生能源开发潜力和传统能源支撑的基础上，该地区具备较大的能源转型空间，未来通过优化资源配置和提升可再生能源消纳能力，有望实现绿色能源的高质量转型。

该地区配电网台区电网架构较为复杂，包括110 kV输电线路1 061.96 km、35 kV输电线路1 274.41 km、10 kV配电网线路1.04万km及0.4 kV线路1.98万km。其中，约40%的110 kV和35 kV输电线路已运行超过20年，约30%的10 kV和0.4 kV配电网线路运行超过10年，部分线路存在老化和过载问题。此外，该地区电网设有14座110 kV变

电站和59座35 kV变电站，但由于变电站分布不均，部分区域供电半径过大，影响了供电质量和稳定性。

在负荷类型方面，该地区工业负荷主要集中在特定工业园区，具有较高的稳定性和连续性，年用电量约为28.6亿kW·h；商业负荷受季节和节假日影响较大，峰谷差明显，最大差值可达45%；居民负荷具有明显的季节性，夏冬季节空调系统和采暖需求较高，早晚用电高峰尤为突出，夏季和冬季的负荷峰值分别达到870 MW和980 MW。

源网荷储协同的控制策略理论基础

1. 概念和原理

源网荷储协同控制是通过综合协调电源、电网、负荷和储能系统，优化能源配置与利用效率，提升电力系统的经济性、稳定性和可靠性。其核心原理是最大化各要素的灵活性与互补性，在确保满足负荷需求的基础上，减少能源成本和环境影响，同时提升电网的安全性与供电质量[2]。当可再生能源（如风能、太阳能）出力过剩时，储能系统会充电并储存多余电能；当可再生能源发电不足时，储能系统则放电补充电力缺口，并调节负荷侧需求，保障电网的稳定运行。通过这种方式，不仅能够提升电力系统对波动性和不确定性的适应能力，还能降低化石能源使用频率，推动电力系统向绿色、低碳、智能化方向发展[3]。

2. 相关技术和方法

源网荷储协同控制策略的实现，涉及到一系列关键技术：智能监测与控制技术是基础，能够实时采集电源、负荷和电网数据，确保系统具备精准的信息支持。数据采集频率高达每秒数百次，结合无线通信技术，保证数据的实时传输与处理。此外，优化调度算法在系统调度决策中也扮演着核心角色。常用算法包括粒子群优化（PSO）、遗传算法（GA）和模拟退火算法（SA）。其中，PSO算法可以高效解决储能系统充放电策略、电网运行参数等优化问题，提升电力系统的经济性与稳定性。最后，能量管理系统（EMS）整合各部分数据，动态调整控制策略，以确保能源的高效利用和系统的稳定性。EMS通过分析实时数据，快速响应电网负荷变化，减少系统故障和能源浪费。

配电网台区源网荷储协同控制策略

1. 电源侧控制策略

针对典型地区的可再生能源发电特点，采用高准确度的功率预测技术，对光伏和风力发电的出力进行精准预测，预测准确度可达90%以上。基于预测结果，优化发电计划，提高电源侧的调度能力和资源利用效率。在阳光充足且负荷较低时段，通过调节光伏发电的输出功率，避免弃光现象，确保电网稳定运行。同时，为应对风光发电的波动性，配备储能设备，通过高效的锂电池储能系统平滑电力输出，在低负荷时储存多余电能，高负荷时释放能量，减轻电网压力，确保电力系统的稳定性和灵活性。

2. 电网侧控制策略

针对典型地区配电网台区的电网现状，优化线路布局是提升电网运行效率的关键措施。通过合理规划输配电线路，减少迂回供电，降低线路损耗，提高电网的整体传输效率。此外，部署无功补偿装置，如静止无功补偿器和静止同步补偿器，可以有效提高功率因数，减少能量浪费，并提升输电能力。同时，建设智能变电站，实现自动化控制和智能化管理，实时监测电网运行状态，快速响应系统异常，通过自动化调度优化功率流动，提升输电效率。智能变电站的应用将显著提高供电可靠性，减少故障处理时间和提高用户体验。

3. 负荷侧控制策略

针对典型地区的工业负荷，实施分时电价政策，通过设置高峰、平段和低谷电价，可以引导企业合理安排生产时间，转移高峰时段的用电需求。以该地区一中医药加工企业为例，实施分时电价后，企业在高峰时段的用电量减少了30%，低谷时段的用电量增加了25%。在商业和居民负荷方面，推行需求响应项目，鼓励用户在高峰时段减少不必要的用电，利用价格激励和节电奖励措施，提高用户参与度。需求响应机制可以有效优化用电结构，减少高峰时段对电网的压力。

4. 储能系统控制策略

根据典型地区负荷特性和可再生能源波动性，合理配置100 MW·h时的储能系统，用于削峰填谷和平滑可再生能源的波动。储能系统在电价低谷时充电，高峰时释放电能，可以平衡电网负荷，减轻

供电压力。储能系统与电源侧和负荷侧协同作用，在可再生能源过剩时储存电能，发电不足或负荷激增时释放电能，确保电网稳定运行。通过合理配置储能容量、采用智能化控制策略以及与电源和负荷侧的协同优化，将提高储能系统的经济性，缩短投资回收期，并为储能技术的大规模应用提供实践依据。

配电网台区源网荷储协同控制模型与算法

1. 协同控制模型的建立

针对典型地区的能源资源、电网架构、负荷需求和储能特性，本研究建立一个多目标优化模型，以实现源网荷储协同控制的最优调度。该模型的目标是优化能源经济性、电网运行效率和供电可靠性，从而达到协同控制的最佳效果。

模型的主要目标包括：通过优化可再生能源、储能系统和电网的运行策略，最大程度地降低能源成本，目标是年能源成本控制在800万元以下。其次，优化电力流动，减少输配电线路的功率损耗，力争电网损耗率降至5%以下。最后，通过冗余设计和储能系统备用功能，提高供电可靠性，减少停电时间，目标是将年平均停电时间控制在5 h以内。

此外，模型还将满足一系列约束条件，包括可再生能源发电的资源和设备容量限制、电网的电压和频率安全运行要求，以及负荷平衡约束，确保电网负荷与电源出力及储能系统的充放电功率相匹配。

2. 优化算法的选择与应用

为求解典型地区配网台区的源网荷储协同控制模型，本研究采用粒子群优化算法作为主要的优化工具。粒子群优化算法因其计算效率高、全局搜索能力强、实现简单等特点，适用于多目标优化问题的求解。该算法模拟群体智能行为，动态调整粒子的状态，通过多次迭代更新，逐步逼近最优解，从而实现能源成本、电网损耗和供电可靠性的协调优化。

在配电网台区的应用中，粒子群优化算法能够有效适应实际的负荷特性和资源条件，优化能源配置和调度方案，提升系统的经济性和可靠性，为源网荷储协同控制提供科学的理论支持。

数据收集与分析

1. 数据来源与收集方法

本研究的数据主要来源于典型地区的电力公司、气象部门、工业企业和居民用户等相关单位。通过智能电表、传感器、监测系统等设备，全面采集电源出力、电网运行、用户负荷以及气象条件等多维度数据，为研究提供详实的基础信息。采集数据来源信息见表1。

表1　数据来源信息

数据类别	数据来源	收集方法	数据类型及描述
电源出力数据	电力公司	与电力公建立数据接口	包括光伏、风力发电的发电曲线，反映不同时间段的发电量变化
电网运行数据	电力公司	实时和历史数据接口	包括输配电功率流动、系统运行状态、线路参数、变压器参数等
用户负荷数据	工业、居民用户、商业区	智能电表采集	包括工业、商业和居民的日负荷曲线，峰谷用电特性，用电行为
气象数据	气象部门	在线平台及历史数据库	包括光照强度、风速、温度等数据，支持可再生能源发电预测
电网监测数据	电力公司、监测系统	传感器和监测系统采集	包括电压、频率等数据，提供电网稳定性与负荷调节的依据

在数据收集过程中，注重数据的完整性和准确性，采用多重校验机制和数据清洗技术，剔除异常值和噪声，确保数据质量和可靠性。

2. 数据分析与处理

为确保数据的准确性和适用性，本研究对收集的多源数据进行清洗与预处理，填补缺失数据，提升数据质量。清洗后的数据通过统计学方法和数据分析工具进行深入分析，提取关键特征和规律，为协同控制模型的建立和优化策略的制定提供科学依据。

首先，针对电源出力数据，进行波动性分析，通过标准差和变异系数来量化光伏和风力发电的波动特性，并结合时间序列分析，捕捉发电的时变特征。其次，对于用户负荷需求数据，采用线性回归分析，探索负荷变化与气温、节假日等外部因素的相关性，揭示负荷动态变化的主要驱动因素。对于电网运行数据，通过聚类分析识别运行中的异常模式，分析可能导致电网运行效率下降的薄弱环节，

为优化运行策略提供参考。

在数据处理过程中，还对多维数据进行特征处理，包括归一化和降维操作，以提高模型计算效率和算法收敛速度。通过全面的分析与处理，研究提取电源、负荷和电网等多维度数据的核心特征，为模型优化和策略制定提供数据支撑。

仿真验证与结果分析

1. 仿真平台搭建

为验证源网荷储协同控制策略的有效性，利用MATLAB和Simulink搭建典型地区的仿真模型，对系统的动态运行情况进行模拟分析，并采用粒子群优化算法求解优化问题。该算法能够在多目标优化问题中有效平衡能源成本、电网损耗和供电可靠性。图1表示的是粒子群优化算法的工作原理。

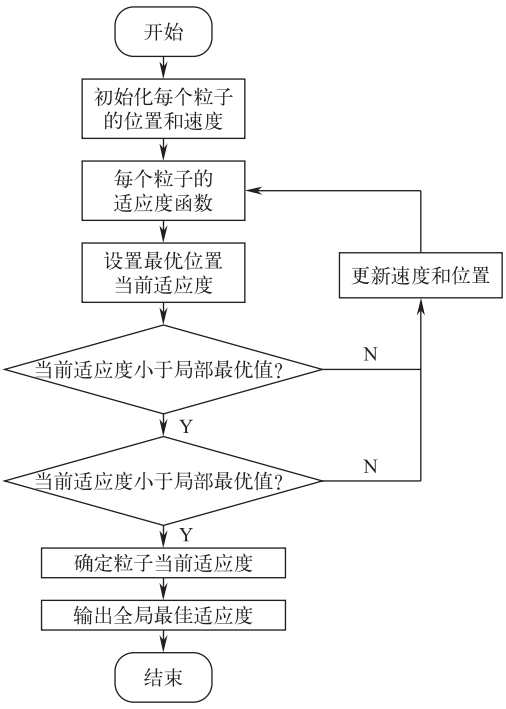

图1　粒子群优化算法原理图

1）电源模型。引入光伏和风力发电的动态特性曲线，考虑太阳辐射、温度变化及风速和风力发电的波动性，以准确反映可再生能源的动态变化特征。

2）电网模型。电网模型基于配电网台区的实际数据构建，包括线路参数、变压器参数和节点电压等，真实再现了电网的运行状态。

3）负荷模型。根据工业、商业和居民的负荷特点，设置日负荷曲线、峰谷用电特性等相应参数，反映负荷对电网的影响。

4）储能模型。考虑储能系统的充放电效率、容量和荷电状态（SOC）特性，并模拟储能系统在不同场景下的动态响应行为。

2. 仿真方案设置

为全面评估协同控制策略的效果，设计多个仿真方案。

1）基准方案与协同控制策略对比。以传统控制策略作为基准，比较其在能源利用率、电网损耗和负荷调节等方面的表现，并与协同控制策略进行对比。

2）不同可再生能源渗透率分析。设置不同的可再生能源渗透率场景，分析协同控制策略在不同可再生能源接入比例下的适应性。

3）负荷变化模拟。设置多种负荷波动场景，比较协同控制策略在不同负荷条件下的响应能力。

4）不同储能配置方案评估。分析不同储能容量对协同控制策略的影响，评估其在削峰填谷、平滑波动和保障供电可靠性方面的表现。

基于设置的仿真方案，设计约束条件见表2。

表2　多元源网荷储约束条件

控制项目	约束项目	计算公式
目标函数	能源成本	$\min C=C_{\text{purchase}}+C_{\text{renewable}}+C_{\text{purchase}}$
	电网损耗	$L_{\text{line}}=\sum_{i=1}^{N}R_i\cdot I_t^2$
	供电可靠性	$T_{\text{outage}}\leqslant 5$ hours/year
约束条件	电源出力	$P_{\min}\leqslant P_{\text{renewable}}\leqslant P_{\max}$
	安全运行	$\lvert f(t)\rvert\leqslant 0.2$ Hz
	负荷平衡	$\sum_{i=1}^{N}P_{\text{load}}=P_{\text{gen}}+P_{\text{storage}}-P_{\text{loss}}$

表2中，C_{purchase}为电力购入成本；$C_{\text{renewable}}$为可再生能源发电成本；C_{purchase}为储能系统运行成本，R_i为线路电阻；I_i为线路电流；T_{outage}为年平均停电时间；$P_{\text{renewable}}$为可再生能源发电出力；$f(t)$为电网频率；P_{gen}为电源出力；$P_{\text{storage}}-P_{\text{loss}}$为储能系统的充放电功率。

3. 结果分析与评价

通过对仿真结果的分析，从多个维度评估源网荷储协同控制策略的有效性，结果表明该策略在多个方面优于传统控制策略。

1）能源利用效率。通过优化可再生能源的调度和储能系统的高效利用，显著提高能源利用效率。

与传统策略相比，能源利用效率提高了15%，有效减少弃风弃光现象。

2）电网损耗。协同控制策略通过优化电力流动和负荷分配，显著降低电网的输配电损耗，尤其在高可再生能源渗透率的场景下，效果更加明显。

3）供电可靠性。在负荷波动和突发故障情况下，协同控制策略能够快速响应，减少供电中断频率和时长。仿真结果显示，停电次数减少4次/年，平均停电时间缩短至2 h/年以内。

4）电能质量。通过储能系统的实时调节和无功功率补偿，改善电压波动和频率偏差等问题，电压合格率提升至98%以上，频率偏差保持在±0.1 Hz以内。

5）经济性。协同控制策略有效降低系统运行成本，年运行成本降低20%，主要得益于减少弃风弃光、电网损耗降低以及储能系统的合理调度。

实际应用案例与效果评估

1. 典型地区的实际应用案例介绍

本研究以典型地区一配电网台区为案例，介绍源网荷储协同控制策略的应用。该台区包含工业、商业和居民用户，面临较高的可再生能源接入需求和系统运行效率低下的问题。实施前，可再生能源消纳率仅为60%，电网损耗为10%，平均停电时间超过8 h。

项目通过安装2 MW光伏发电系统和1.5 MW·h储能系统，并应用智能监控设备，提升可再生能源利用率、降低电网损耗，且提高供电可靠性和经济性。采用的控制策略包括光伏发电功率预测、需求响应机制和储能智能充放电策略。实施后，配电网台区的可再生能源消纳率提升至90%，电网损耗降至6%，平均停电时间缩短至2 h/年，运行成本降低20%。

2. 效果评估与效益分析

对该项目的长期监测结果表明，源网荷储协同控制策略显著提升该地区配电网台区可再生能源消纳、电网稳定性和经济效益。

1）能源节约与可再生能源消纳。可再生能源消纳率由60%提升至90%，光伏发电利用率大幅提高，储能系统有效缓解可再生能源波动对电网运行的影响。

2）电网稳定性提升。电网损耗降低至6%，电压合格率提高到98%，频率偏差保持在±0.1 Hz以内，供电可靠性显著提升，平均停电时间缩短至2 h/年。

3）经济效益增长。年经济效益增长200万元，主要来源于可再生能源利用提升、电网损耗减少、储能效益及电价政策优化。

通过数据验证和实际运行效果分析，源网荷储协同控制策略提升该配电网台区的运行效率和经济性，展示强大的适用性和推广价值。项目成果有效缓解典型地区的能源供需矛盾，并为高比例可再生能源接入和智能化电网管理提供重要的实践经验。

结束语

本研究通过对典型地区配电网台区的深入分析，提出源网荷储协同控制的策略与方法，并结合实际数据建立多目标优化模型。通过仿真验证和实际案例分析，研究证明协同控制策略在提升可再生能源利用效率、降低电网损耗、增强供电可靠性和优化经济效益等方面的有效性和可行性。

研究成果为配电网台区的优化运行和综合能源管理提供理论支持与实践指导，也为高比例可再生能源接入条件下的电网稳定运行和源网荷储一体化管理积累宝贵经验，对其他类似地区具有重要的借鉴意义。

展望未来，随着技术进步和成本降低，源网荷储协同控制将在更广的范围内得到应用。未来将深度融合智能化和数字化技术，通过人工智能、大数据和物联网，实现更精准高效的控制。多能源互补与综合能源系统的发展，也将进一步扩大协同控制的应用空间，提升能源系统的灵活性和低碳化水平。EA

（收稿日期：2025-01-13）

参考文献

[1] 孙惠，翟海保，胡浔惠，等．源网荷储多元协调控制系统的研究及应用[J]．电工技术学报，2021(15)：3264-3271．

[2] 郭佳兴．综合能源系统源—网—荷—储能量协同控制策略研究[D]．银川：宁夏大学，2023．

[3] 魏旭，刘东、高飞，等．双碳目标下考虑源网荷储协同优化运行的新型电力系统发电规划[J]．电网技术，2023．47(9)：3648-3658．