

“双碳”目标下线损控制与能效提升的协同路径研究

刘 莎

宁夏众合智源电力工程咨询有限公司 宁夏 银川 750000

摘要:在“双碳”目标引领下,能源电力系统变革,电网运行效率影响全社会能耗与碳排放。线损是衡量电网运行经济性与绿色化水平的核心指标,能效提升内涵已延伸至系统级综合能源利用效率。本文剖析“双碳”目标对电网线损控制与能效提升的新要求,揭示二者在物理本质、技术手段和管理逻辑上的协同机理。通过构建“规划-运行-市场-用户”协同框架,梳理源网荷储各环节关键技术路径,结合政策、市场与数字化等非技术因素,提出多维度、全链条协同实施策略。研究表明,打破线损控制与能效提升的传统壁垒,推动二者深度融合与协同优化,可降低电网损耗,提升全社会用能效率,为构建现代能源体系提供核心支撑。

关键词:双碳目标;线损控制;能效提升;协同路径;智能电网

引言

2020年9月,中国承诺2030年前碳达峰、2060年前碳中和,标志经济社会全面向绿色低碳转型。能源领域是减排主战场,电力行业碳排放占全国超40%,电网作为发电与用电枢纽,提升运行效率、降低损耗任务紧迫。线损是电网主要能源浪费形式,我国综合线损率虽降至5.5%左右,但仍有优化空间,降低0.5个百分点可节约大量电量,减少能耗与碳排放。同时,能效提升是低成本高效益的减排途径,其内涵已从孤立点状优化转变为全链条系统性效率提升。但线损控制与能效提升长期割裂,导致资源重复投入、效益抵消。因此,需在“双碳”目标下重新审视二者关系,探索协同路径。本文将从理论基础等四个层面展开研究,为构建未来电网提供理论参考与实践指南。

1 “双碳”目标对线损控制与能效提升的新要求

1.1 从“被动降损”到“主动赋能”的范式转变

传统线损管理主要围绕“四分”(分区、分压、分线、分台区)管理模式,通过加强计量、堵塞漏洞、平衡三相负荷等手段进行被动式的损耗治理。这是一种“向内看”的、以电网自身资产为核心的管理模式。而在“双碳”目标下,电网的角色正从单纯的电能“搬运工”向能源“配置平台”和“效率引擎”转变。线损控制的目标也随之升级:不仅要降低自身损耗,更要通过优化电网结构和运行方式,为大规模可再生能源消纳、多元化负荷互动以及多能互补系统提供高效、灵活的物理通道。这意味着线损控制必须具备前瞻性、主动性和系统性,成为赋能全社会能效提升的基础能力。

1.2 能效内涵的系统化与动态化

“双碳”时代的能效提升,其边界已远远超越了终端

设备的效率标签。它呈现出两大新特征:一是系统化。能效评估需要从“设备级”跃升至“系统级”。例如,一个工业园区的能效,不仅取决于其内部电机、空调的效率,更取决于其与电网的互动模式(如参与需求响应)、内部冷热电气的协同优化(综合能源系统),以及屋顶光伏、储能等分布式资源的利用效率。电网的线损水平直接影响着输入该系统的电能质量与成本,进而影响其整体能效表现^[1]。二是动态化。随着高比例可再生能源并网,电力系统的供需平衡呈现强波动性和不确定性。能效不再是静态的年度平均值,而是在不同时间尺度(秒级、小时级、季节级)上动态变化的指标。电网需要通过实时感知、精准预测和快速调控,动态优化潮流分布,确保在任何运行状态下都能维持较低的线损水平,并引导用户在系统效率最优的时段用电,从而实现动态能效的最大化。

1.3 对电网灵活性与智能化的双重挑战

高比例可再生能源和海量分布式资源的接入,使得电网潮流双向流动、随机波动成为常态,这给线损控制带来了巨大挑战。传统的基于固定拓扑和单向潮流的线损计算与控制方法已难以适用。同时,要实现全社会能效的系统性提升,电网必须具备强大的信息交互与协同优化能力,能够深度感知源、网、荷、储的状态,并对其进行精准调度。这要求电网必须加速向数字化、智能化转型,为线损与能效的协同优化提供强大的技术底座。

2 线损控制与能效提升的协同机理分析

2.1 物理层面:能量流的耦合与互馈

电网中的能量流是线损与能效最直接的耦合纽带。一方面,电网的线损水平决定了输送到用户端的有效电能数量,直接影响用户的用能成本和效率。过高的线损

意味着用户需要支付更多的电费来获得同等的服务，这在客观上抑制了用户投资高效设备的积极性。另一方面，用户的用电行为（负荷特性、时空分布）又反作用于电网的潮流分布，从而决定线损的大小。例如，尖峰负荷的出现会导致线路电流剧增，线损呈平方关系增长；而负荷的时空不均衡（如城乡、区域间差异）则会造成部分线路重载、部分轻载，整体效率低下。因此，通过引导用户削峰填谷、优化用电曲线，不仅可以提升用户自身的能效（如利用峰谷电价差），也能有效平抑电网潮流，降低系统总线损，形成物理上的正向互锁。

2.2 信息层面：数据驱动的协同优化

在数字化时代，数据成为连接线损与能效的关键要素。电网侧拥有海量的运行数据（电压、电流、功率、线损等），而用户侧则蕴含着丰富的用能数据（负荷曲线、设备状态、能效水平等）。通过构建贯通“源-网-荷-储”的信息物理系统（CPS），可以实现两类数据的深度融合。基于此，一方面可以利用用户侧的精细用能画像，更精准地预测区域负荷，为电网规划和无功优化提供依据，从而前置性地降低线损；另一方面，电网可以将实时的线损成本、阻塞价格等信号传递给用户或聚合商，激励其调整用能行为，参与到系统级的能效优化中来^[2]。这种信息的双向流动，使得线损控制与能效提升从各自为战走向了协同共治。

2.3 价值层面：成本与效益的共享机制

线损的降低直接减少了电网企业的购电成本和运维成本，而能效的提升则为用户节约了用能开支，并为全社会创造了环境效益。在传统的模式下，这两类效益是割裂的。电网企业投资降损，但效益主要体现在自身报表上；用户投资节能，但无法分享其行为对电网降损带来的收益。要激发协同潜力，必须建立合理的价值共享机制。例如，通过引入“节能量所有权”或“线损节约分成”等市场化机制，让那些通过改变用电行为帮助电网降低线损的用户或负荷聚合商获得经济回报。这样，就能将电网的降损目标内化为用户的经济激励，形成价值共创、风险共担的良性循环。

3 协同路径的关键技术体系

基于上述协同机理，可以从规划、运行、市场、用户四个维度构建一套完整的协同技术路径体系。

3.1 规划协同：构建高效坚强的物理骨架

电网规划是协同的起点。应将能效理念融入电网规划全过程，实现“源-网-荷-储”统筹规划。（1）面向能效的电网规划：在变电站选址、线路走廊选择时，不仅要考虑负荷中心，还应充分考虑区域内分布式能源、电

动车充电站、数据中心等新型高效负荷的布局，缩短电力输送距离，从源头上降低线损。（2）柔性化网架结构设计：推广使用柔性直流配电、智能软开关（SOP）等新技术，增强配电网的潮流灵活调控能力，适应分布式电源和多元负荷的接入，避免因潮流迂回造成的额外损耗。（3）数字孪生赋能规划仿真：利用数字孪生技术，构建包含详细负荷模型和分布式资源模型的电网仿真平台，在规划阶段即可模拟不同方案下的线损水平和区域综合能效，实现方案的多目标优化比选。

3.2 运行协同：实现精益化的实时优化

运行阶段是协同效应最直接的体现环节，核心在于利用先进的信息通信与控制技术，实现电网运行状态的实时感知、分析与优化。（1）基于AI的线损精准感知与预测：利用大数据和人工智能技术，融合SCADA、AMI（高级量测体系）等多源数据，构建高精度的线损在线计算与预测模型，精准定位高损区域和时段。（2）源网荷储协同优化调度：建立涵盖分布式电源出力、储能充放电、可控负荷（如温控负荷、电动汽车）的协同优化模型。在保障电网安全的前提下，以“系统总损耗最小”或“综合能效最高”为目标函数，动态调整各单元的运行状态。例如，在午间光伏大发时段，可引导电动汽车集中充电，既消纳了绿电，又避免了远距离输电损耗^[3]。（3）有源配电网的无功/电压协同控制：针对高渗透率分布式光伏接入导致的电压越限和反向潮流问题，部署基于智能终端的分布式无功/电压协同控制系统，通过就地调节逆变器无功、投切电容器组等方式，维持电压在合理区间，有效降低因电压不合格导致的附加损耗。

3.3 市场协同：激活多元主体的内生动力

有效的市场机制是协同路径可持续运行的保障。需要设计能够反映线损成本和能效价值的价格与交易机制。（1）精细化的输配电价机制：探索引入基于位置边际电价（LMP）或节点电价的输配电价机制，将不同区域、不同时段的线损成本和阻塞成本显性化。高损区域的电价更高，从而自然引导负荷向低损区域转移或错峰用电。（2）辅助服务市场的拓展：将“降低系统损耗”作为一种新的辅助服务产品纳入市场交易。负荷聚合商、虚拟电厂等新兴主体可以通过提供可调节的负荷资源，帮助电网平抑潮流、降低损耗，并从中获得收益。（3）绿电-绿证-碳市场的联动：打通绿电交易、绿证核发与碳市场的壁垒。用户购买绿电不仅能满足其绿色消费需求，其对应的减排量还可以在碳市场中获益。而电网通过降低线损，保障了绿电输送的效率，也间接提升了绿电的价值。

3.4 用户协同：打造互动共赢的用能生态

最终,协同的落脚点在于用户。需要通过技术与服务创新,赋能用户成为能效提升和线损控制的积极参与者。(1)个性化能效服务:基于用户的用电数据,电网企业或能源服务商可以提供定制化的能效诊断报告和优化建议,如推荐最佳的设备更换时机、最优的用电套餐、参与需求响应的策略等^[4]。(2)虚拟电厂(VPP)聚合:将海量分散的、具有调节潜力的用户侧资源(如智能家居、商业楼宇的暖通空调、工业可中断负荷)通过VPP平台进行聚合,形成一个可被电网调度的“巨型电厂”。VPP在响应电网调度指令的同时,实现了用户侧资源的高效利用和电网侧线损的优化。(3)社区级综合能源微网:在园区、社区等尺度,建设集成了分布式光伏、储能、冷热电三联供(CCHP)和智慧能源管理系统的微网。通过内部的多能互补和源荷互动,最大化本地能源的利用效率,大幅减少对外部电网的依赖和长距离输电损耗。

4 协同路径的实施策略与保障措施

要将上述技术路径转化为现实生产力,还需一系列配套的策略与保障。

4.1 强化顶层设计与标准体系建设

国家层面应出台专门的指导意见,明确线损控制与能效提升协同发展的战略地位。加快制定涵盖数据接口、通信协议、评价指标、商业模式等方面的统一标准体系,打破信息孤岛,为跨专业、跨主体的协同奠定基础。

4.2 深化电力体制改革与机制创新

持续推进电力市场化改革,特别是配售侧改革,培育多元化的市场主体。鼓励电网企业从“购销差”模式向“过网费+增值服务”模式转型,使其有动力、有能力去投资和运营能效提升相关的业务。

4.3 加大核心技术研发投入与示范应用

聚焦数字孪生、人工智能、先进电力电子、高效储能等前沿技术,设立国家级重大科技专项。同时,选取典型区域(如高比例新能源示范区、国家级新区)开展

“线损能效协同优化”综合示范工程,验证技术路径的可行性与经济性,并总结可复制、可推广的经验。

4.4 构建多方参与的协同治理格局

建立由政府、电网企业、发电企业、用户、科研机构等共同参与的协同治理平台。通过定期会商、信息共享、联合攻关等方式,共同解决协同发展中遇到的规划、投资、利益分配等难题,形成合力。

5 结语

“双碳”目标的宏伟蓝图,对能源电力系统的效率提出了极致要求。线损控制与能效提升,作为提升系统效率的两个关键抓手,其关系不应再是割裂的、孤立的,而必须走向深度融合与协同共进。本文的研究表明,二者在物理能量流、信息数据流和价值资金流上存在天然的耦合与互馈关系。通过构建“规划-运行-市场-用户”四位一体的协同路径,依托坚强智能电网的物理基础、先进数字技术的信息底座和有效市场机制的价值导向,完全有可能实现电网自身损耗的持续降低与全社会用能效率的整体跃升。未来的电网,将不仅是电能的传输通道,更是能源效率的优化平台。推动线损控制与能效提升的协同发展,不仅是一项技术经济任务,更是一场深刻的能源治理变革。唯有打破传统壁垒,以系统思维和协同理念引领创新,方能在通往“双碳”目标的征程中,走出一条高效、绿色、共赢的中国道路。

参考文献

- [1]牛雨,李欢欢,张建宾,等.“双碳”背景下配电网线损管控研究[J].河南科技,2023,42(6):5-13.
- [2]孙研缤,徐晨阳,陈瑜,等.“双碳”背景下探索构建“1233”降损管理新模式[J].农电管理,2023(2):27-29.
- [3]樊梦露.配电网中基于大数据分析的线损检测与减少策略研究[J].通信电源技术,2024,41(13):103-105.
- [4]石圳武.输配电及用电工程中线损管理技术分析[J].消费电子,2025(1):64-66.