

地区电网技术降损研究现状及展望

陈涵^{1,2}, 徐玲玲³, 杨柳⁴, 金焱⁴, 付慧⁵, 李双伟⁵

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192;

2. 先进输电技术全国重点实验室, 北京市 昌平区 102200;

3. 国家电网有限公司直流技术中心, 北京市 西城区 100032;

4. 国家电网有限公司, 北京市 西城区 100032;

5. 国网江苏省电力有限公司, 江苏省 南京市 210000)

Research Status and Prospects on Technical Loss Reduction of Regional Power Grid

CHEN Han^{1,2}, XU Lingling³, YANG Liu⁴, JIN Yan⁴, FU Hui⁵, LI Shuangwei⁵

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Changping District, Beijing 102200, China;

3. DC Technology Center of State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100032, China;

4. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100032, China;

5. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Energy loss is the main source of energy consumption in the power grid; technical loss reduction is an effective means of reducing power grid energy loss by adjusting the economic operation mode or technical transformation of equipment while ensuring the power grid's reliability. This paper starts with studying the factors affecting power grid loss. It reviews the research status of regional power grid technical loss reduction measures in six aspects and loss reduction potential evaluation methods. It is pointed out that in the specific implementation of technology loss reduction, it is necessary to accurately evaluate the loss reduction potential and optimize and integrate multiple loss reduction measures to obtain the optimal energy-saving benefits. At the same time, the overall architecture and main functions of the technology loss reduction visualization cloud platform are introduced, providing a digital and procedural idea for developing technical loss reduction. Finally, further research directions of regional power grid technical loss reduction are considered and prospected for readers' reference.

KEY WORDS: energy loss; technical loss reduction; regional power grid; loss reduction potential evaluation; visualized cloud platform

摘要: 电能损耗是造成电网能源消耗的主要来源, 技术降损是在保障电网可靠性的前提下, 通过调整经济运行方式或对设备进行技术改造来降低电网电能损耗的有效手段。该文从电网电能损耗影响因素入手, 对6个方面的地区电网技术降损措施以及技术降损潜力评估方法的研究现状进行了综述, 指出技术降损在具体实施时需精准评估降损潜力, 优化整合

多种降损措施, 以获取最优的节能效益; 同时介绍了技术降损可视化云平台的总体架构和主要功能, 为技术降损工作开展提供了数字化和流程化的思路。最后对地区电网技术降损进一步的研究方向进行了思考和展望, 供读者参考。

关键词: 电能损耗; 技术降损; 地区电网; 降损潜力评估; 可视化云平台

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0541

0 引言

国务院发布的《“十四五”节能减排综合工作方案》要求进一步健全节能减排政策机制, 推动能源利用效率大幅提高。对于电网企业来说, 电能损耗是造成电网能源消耗的主要来源, 电网网架结构、运行水平、设备选型、电网管理、负荷变化等因素都会对电网中电能损耗造成影响^[1]。因此, 加强线损管理一直是电网企业提升公司经营效益、服务国家低碳绿色转型的重要手段。国网公司自2018年开始, 采取一系列举措, 组织对220kV及以下地区电网开展技术损耗评价、挖掘降损潜力、优化降损措施, 利用技术手段降低电网损耗, 推动电网提质增效。2022年, 国网公司综合线损率为4.96%, 同比上一年下降0.53%, 取得了较大成效。但相比美国、芬兰、日本等发达国家, 仍然处于中下水平^[2]。且我国人均能耗水平在国际上仍处于较低水平, 能源需求仍然在持续快速增长, 不能完全依靠无限制增加能源供应来解决能量需求问题, 亟需开拓节

能手段, 实现技术降损。

技术降损是指在保障电网可靠性的前提下, 通过采取经济运行方式或对设备进行技术改造来降低电网电能损耗。国内外学者主要围绕以下几个方面对技术降损展开了深入研究: 1) 线损理论计算方法研究。理论线损计算是做好线损管理以及有效实施降损工作的基础^[3]。线损理论计算方法研究经历了从潮流计算方法向人工智能算法、离线损耗计算向实时损耗计算、人工输入基础数据向基于自动化系统搜集数据的发展路线, 现今理论损耗计算方法在计算精度、运算时间、适用范围上都有很大的提升^[4]。2) 技术降损措施优化研究。技术降损措施可从网架结构优化、运行方式优化、节能设备选型等方面开展, 不同的降损方法针对的对象有差异, 同时有各自的优缺点^[3,5]。降损措施优化也逐渐从单一降损措施到基于多种降损措施组合、从针对单一设备降损到电网全局优化降损的研究路线发展。3) 损耗能效水平评估方法研究。损耗能效水平评估旨在诊断能效薄弱环节, 精准挖掘降损潜力, 为技术降损措施的制定和实施提供方向和参考性意见^[6]。损耗能效水平评估研究主要从指标体系、评估模型的建立以及评估方法的改进等方面开展。

本文从电网损耗影响因素入手, 首先从优化电网结构、经济运行、设备选型、无功优化、需求侧管理以及分布式电源(distribution generation, DG)配置和运行 6 个方面梳理了地区电网技术降损措施的研究现状; 其次从线损理论计算和能效指标体系总结了技术降损潜力评估方法; 再对国网公司建设的技术降损可视化云平台进行了介绍; 最后对新型电力系统形势下的地区电网技术降损问题进行了研究展望。

1 电网技术损耗影响因素

电网技术损耗是输、变、配电设备中电流和电压的电磁作用产生的损耗^[7]。主要由两部分组成: 一是固定损耗, 指所有变压器、测量仪表、二次电路等励磁回路的铁耗之和; 二是可变损耗, 指线路与变压器等与电流平方成正比的铜耗^[8]。电网技术损耗可用式(1)表示^[9-10]:

$$\Delta A = \sum \Delta A_0 + 3I^2 R_{eq} T \times 10^{-3} = \sum \Delta A_0 + \frac{P^2}{U^2 (\cos \phi)^2} k^2 R_{eq} T \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: ΔA 表示电网损耗; ΔA_0 表示电网元件固定损耗; I 为计算时间 T 内电网首端平均电流; R_{eq} 为电网负载损耗等值电阻; P 为首端平均有功功率; k

为负荷形状系数; U 为首端电压; $\cos \phi$ 为首端平均功率因数。

其中, 等值电阻 R_{eq} 的计算公式如式(2)所示:

$$R_{eq} = R_{eqL} + R_{eqT} \quad (2)$$

式中: R_{eqL} 为线路等值电阻; R_{eqT} 为变压器绕组等值电阻。

从式(1)~(2)可以看出, 电网技术损耗受到多参数影响, 变压器型号、线路长度、线路截面积、运行电压、功率因数、负荷形状系数、三相不平衡度、谐波等都会影响损耗大小, 归纳起来, 设备及运行参数对损耗的影响可以定性分析如表 1 所示。

表 1 设备及运行参数对电网损耗的影响		
Table 1 Influence of equipment and operating parameters on power grid loss		
影响因素	对应参数	对技术损耗的影响
变压器型号	ΔA_0 、 R_{eqT}	能效等级越高, 损耗越低
线路长度	R_{eqL}	供电半径缩短, 损耗降低
线路截面积	R_{eqL}	线路截面积增大, 损耗降低
运行电压	U	运行电压越高, 可变损耗降低
功率因数	$\cos \phi$	功率因数提升, 损耗降低
负荷形状系数	k	负荷形状系数越小, 损耗降低
三相不平衡度	I_{av}	三相不平衡度降低, 损耗降低
谐波	I_{av}	谐波畸变含量降低, 损耗降低

2 地区电网技术降损措施

国内外学者针对电网技术降损进行了广泛的研究。目前国外主要开展了以降低线损为目标的无功功率优化、无功补偿设备安放位置、配网网络重构等研究工作^[11]。国内的技术降损措施研究可以从技术损耗影响因素出发, 归纳为优化网架结构、经济运行、设备选型、无功优化、需求侧管理以及 DG 配置和运行 6 个方面, 如图 1 所示。

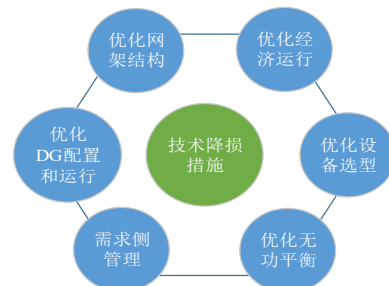


图 1 技术降损措施

Fig. 1 Technical measure to reduce power loss

2.1 优化网架结构

随着地区用电负荷的发展和变化, 电网结构发生了变化, 在原有规划设计不能适应这种变化时, 将导致网损增加、电压合格率低、供电可靠性差等系列问题, 需要对电网结构进行优化^[12]。电网升压改造、增大导线截面、缩短供电半径等都属于优化网架结构的范畴^[13]。

2.1.1 电网升压改造

电网升压改造是指通过简化变电层次,提高中压配电电压的方式降低线损^[14-15]。然而,配电网进行升压改造是一项重大工程,需对升压改造中的关键技术以及新的运行管理模式做深入研究^[16]。

2.1.2 导线截面改造

导线截面改造通过增大导线截面来降低电能损耗,却也增加了有色金属的投资,此外,导线截面的选择还必须满足若干技术约束^[17],因此,建立考虑经济性的目标函数来合理选择导线截面积是该措施的主要研究方向^[18-19]。

2.1.3 供电半径改造

供电半径改造和导线截面改造类似。供电半径减小,线路投资和线损减少,但变电站投资相对增加,所以,供电半径的确定也是一个满足约束条件的综合优化问题^[20-21]。而采用DG来替代变电站,节约投资费用,为缩短供电半径提供了新的思路,但在具体应用时需要考虑DG波动性、随机性的影响^[22]。

通过优化网架结构进行降损需要增加改造投资,且改造周期较长、实施难度较大,具体实施时需要结合电网实际情况进行技术经济性分析。

2.2 优化经济运行

电网经济运行是在确保电网安全运行裕度前提下,充分利用电网中现有输变配电设备,在不需增加投资的前提下通过优化变压器及线路经济运行方式、负荷的经济调配、配电网网络重构等降损措施,最大限度地降低电网消耗^[23]。

2.2.1 变压器及线路运行方式调整

变压器及线路的损耗随着负荷不同而呈现非线性变化^[24],因此,应根据负荷的变化合理调整变压器及线路运行方式,降低变压器及线路损耗。对不同运行方式下的变压器及线路进行负荷-损耗特性分析,寻找临界负荷点,从而给出变压器及线路最佳经济运行方式是该项措施的研究焦点^[25-28]。

2.2.2 负荷经济调配

当变压器或线路运行方式已经固定时,存在着合理的调整负荷,使变压器或线路在经济运行区间运行的问题^[24]。计算变压器或线路间的负荷经济分配系数,使变压器或线路按经济分配系数分担负荷实现经济运行^[29];以及三相负荷不平衡调整^[30]都是典型的通过负荷的经济调配来实现降损的措施。

2.2.3 配电网网络重构

配电网网络重构是指在运行过程中根据负荷的变化情况及时调整网络中联络开关和常闭分段开关的状态以及网络的运行结构,达到降低网损的

目的^[31-32],其本质上是一个大规模非线性整数规划问题,求解较为困难^[32]。关于配电网网络重构的研究大多集中在求解算法优化,以及面对峰值负荷变化和负荷类别多样性问题时的处理^[33-36]。

电网经济运行体现了运行管理的精益化水平,对于电网企业的经营效益具有重要影响。如何在保证电网安全可靠的同时提高运行层面的效率,是该类降损措施需要关注的核心内容。

2.3 优化设备选型

优化设备选型指使用节能型的材料和设备,选择合适的设备型号、容量以及性能,以及应用更高级的技术降低电网能量损耗。

2.3.1 节能变压器

变压器的空载和负载损耗与变压器的技术特性有关,并且随着不同负载的变化而产生非线性变化^[37]。2020年6月,关于电力变压器能效限定值及能效等级的新国标^[38]正式实施,提高了变压器产品的空载损耗或负载损耗指标要求,1级能耗变压器相比3级能耗变压器在空载损耗和负载损耗上均可降低25%左右。除了型号以外,还要考虑变压器容量的选择,传统的容量选择较多关注最大负荷、年用电量等因素,较少考虑负荷变动特征^[39-40]。而煤改电、排灌等负荷季节性变化,光伏、风电等新能源随机性、间歇性变化,都对变压器额定容量的选择提出了新要求。

2.3.2 节能导线

输电线路损耗主要由电晕损耗和电阻损耗组成,在电晕损耗基本相同的情况下,输电损耗主要由导线的直流电阻所决定^[41]。因此,针对高电导率、降低直流电阻的新型导线得到了广泛研究,其中,最为代表性的是铝合金芯铝绞线、中强度铝合金绞线、钢芯高导电率硬铝绞线^[41-43]。然而这3类导线成本较高,目前仅为试点应用,纳入国家发改委《国家重点节能低碳技术推广目录》。

2.3.3 无功补偿设备

针对新型负荷波动特性,对并联电容器组进行精细化改造技术也在近年得到了广泛研究。单间隔多分组并联电容器和紧凑型压控调容集合式电容器是该类技术的代表。前者将整组电容器细分为若干独立分组,分组开关集中布置,相比同容量电容器不扩大占地面积,分组电容可自动独立投切;紧凑型压控调容集合式电容器通过改变自耦变压器的变比实现有载自动调压,以改变装置中电容器组的端电压达到改变装置无功功率输出的目的。目前以上设备已在国网山东、江苏、冀北电力等地试点

应用, 在提高功率因数、降低损耗上有一定成效。

2.4 优化无功平衡

无功补偿设备广泛应用于电网中降低功率损耗、提升功率因数和电压水平, 而其功能的发挥程度取决于无功补偿设备配置和控制方式^[44-47]。

2.4.1 无功设备配置

目前电网优先考虑采用投资省、损耗小的并联电容器作为主要无功补偿设备。随着城市电网电缆化率逐步升高, DG、电动汽车、储能等灵活资源持续快速增长, 无功补偿需求也发生了新的变化。

电缆本身的容性充电功率大, 导致了在低谷负荷时, 容性负荷不足导致电压上升、网损增大^[48]。大型城市如北京、上海等电缆化率较高区域开始尝试在 110kV 变电站安装并联电抗器, 其配置一般按照出线电缆充电功率总和进行估算^[49]。文献[50]提出根据电缆线路自身参数表现出来的无功调节特性作为无功补偿资源参与无功电压调节, 在此基础上确定容、感性无功配置。文献[51]提出了并联电容器和动态无功补偿装置(static var generator, SVG) 组合的补偿方式, 采用 SVG 代替部分并联电容器和并联电抗器。目前对 110kV 及以下地区电网变电站低压侧的电抗器配置研究尚属起步阶段, 在优化配置时还需结合运行可靠性、投资经济性、实际工程要求等方面开展进一步研究。

DG、电动汽车、储能等的接入使配电网的无功电压特性发生了变化, 在无功配置时需要考虑 DG 出力不确定性以及负荷波动。文献[51-53]利用 DG 的无功调节能力, 在考虑光伏出力不确定性基础上, 研究光伏发电与变电站电容器综合配置, 提高资源利用率、减少投资和降低损耗。文献[54]提出了含电动汽车充电站的主动配电网二阶段鲁棒规划模型, 在规划时充分考虑了耦合系统中相关不确定元素以及 DG、静止无功补偿器、有载调压变压器、储能等设备的投资, 有效改善网络的功率和电压分布, 从而降低损耗。可见, 随着新型电力系统的建设, 无功配置不再是传统的仅针对无功补偿容量、分组数量和安装地点的规划。

2.4.2 无功优化控制

无功优化控制是指通过调节发电机电压、变压器分接头、无功补偿设备等优化电网的无功潮流分布降低电网损耗, 是一个复杂的包含离散变量和连续变量的优化问题^[55]。

为了获得最优无功潮流控制, 早前的研究者主要集中在算法改进或控制目标优化方面开展探索。算法改进主要是针对过早收敛、陷入局部优化、复

杂性等问题。粒子群算法^[47]、遗传算法^[56]、模糊算法^[57]、混沌算法^[58]等都是常见的无功优化算法。而在控制目标上, 目标函数和约束条件的优化是主要的研究方向。文献[56]将变压器损耗也纳入考量, 避免出现网损下降, 但变压器损耗升高, 总的系统损耗无法降低的问题。文献[59]则是建立了考虑网损、电压偏差、电压稳定性的无功优化多目标函数。文献[60]和[61]分别针对功率因数、无功电压调节设备动作次数等约束条件进行改进, 以实现网损最小、节点电压不越限的控制目标。

而随着地区电网中 DG 的增多, DG 出力的不确定性导致其接入后地区电网的无功电压控制难度加大^[62]。在传统无功电压调控手段基础上, 充分挖掘 DG 的分布式无功调节能力, 协调运用电网各类无功调压资源, 成为当前无功优化控制关注的焦点^[63-64]。文献[65]通过传统电容器与分布式光伏逆变器的协调控制, 实现网损、电压幅值、不平衡度、电容器动作成本及光伏逆变器出力成本的综合运行优化。文献[66]以 DG、有载调压变压器, 以及电压调节器为协同控制对象, 提出了一种分布式协同控制技术, 同时最大限度地减少有载调压变压器和电压调节器的动作次数。

优化无功平衡贯穿于规划、设计、运行等不同阶段, 也是最为重要的技术降损措施之一。随着新型电力系统的建设, 有必要研究更为主动、综合的配置方案和控制策略。

2.5 需求侧管理

需求侧管理是指通过采取有效措施引导电力用户优化用电方式, 从而降低能耗、提高能源使用效率^[67]。负荷管理和能效管理是需求侧管理的主要内容^[68]。

2.5.1 负荷管理

负荷在电网中传输引起的电能损耗不仅与负荷大小、网络参数有关, 而且与负荷率和最小负荷系数直接相关, 在相同的运行周期内保持用电量不变的情况下, 负荷曲线越平坦引起的电能损耗也就越小^[69-70]。因此, 根据可调节负荷特性, 减少日或季节性的电网峰荷, 可以有效降耗。DG、电动汽车、空调及电热锅炉等海量可调节资源展现出灵活性与可控性^[71-72]。文献[73]提出了一种基于柔性台区场景并考虑规模化电动汽车快充负荷的经济调度方法, 提高配电网对电动汽车负荷的应对能力, 降低负荷峰值。文献[74]考虑在光伏发电高渗透率的场景下, 通过聚合和控制住宅侧的空调负荷群来参与低压配电网电压管理。而虚拟电厂(virtual

power plant, VPP)利用先进通信技术和软件架构可以实现 DG、储能装置、可控负荷、电动汽车等聚合和协调优化^[75-77],更是负荷管理的重要研究方向。

2.5.2 能效管理

能效管理是指采取有效的激励措施改变用户的消费行为,使用先进的节能技术和高效设备,提高终端用电效率,从而降低用电负荷^[68]。先进的电力电子技术、测量装置、控制策略和通讯设备为能效管理提供了良好的基础^[78]。文献[79]基于现场检测相关信息和电气量,对粤北地区的专线用户进行节能诊断分析,提出变压器谐波治理、照明系统、高效电机更改等6项节能改造项目。国网河北、山东、浙江电力等公司也在能效管理上开展探索,通过用电信息采集系统监测、分析用户的电能使用情况,采取对用户老旧无功补偿设备代维、协助小工业用户加装无功补偿设备、主动发送力率电费码等手段,积极开展用户节能诊断,鼓励用户使用无功补偿设备,提高企业用电效率、降低电费成本。

需求侧管理必须依靠建立完善的激励机制、设置峰谷电价、分时电价等具体措施,考虑用户方的电力消费特点和响应,才能调动用户参与积极性。

2.6 优化分布式电源配置和运行

DG 的接入使得地区电网中各支路的潮流不再是单向流动,必然会影响电网损耗,使之不仅与负载等因素有关,同时也与 DG 接入的位置、容量、功率以及网络的拓扑结构等因素密切相关^[80-81]。

2.6.1 分布式电源优化配置

DG 在靠近负荷的地方或负荷端接入,在一定程度上能够减少线损^[82-84],作为配电网和 DG 纽带的微电网,其构造理念就是将 DG 靠近用户侧进行配置供电,缩短供电半径,避免长距离输电产生的较大网损^[85-86]。文献[87]在负荷沿放射状线路均匀分布的简化假设条件下,推导出当单台 DG 在距线路起始位置 2/3 的地点接入配网,注入功率为 2/3 的总负荷功率时,配网的线路损耗取得极小值。文献[88]推导出在网损最小目标下,当 DG 注入容量确定时,其接入位置必然处在“容量分点”之后的某一位置节点。还有部分学者将 DG 的优化配置等效为有约束的最优化问题开展研究。文献[89]综合考虑 DG 的出力不确定性,建立了配电网 DG 双层优化配置模型,提升 DG 消纳水平,有效降低配电网的网损费用。

2.6.2 分布式电源优化运行

DG 的接入为地区电网运行优化提供了新的调节手段^[90]。针对 DG 的出力随机性问题,目前的研究主要集中在基于 DG 输出功率随机概率模型的线

损和电压协调优化。文献[91]对风速和负荷的不确定性行为进行建模,建立了面向间歇性 DG 配电网的多目标无功优化模型。文献[63]引入梯形模糊数来表示光伏发电和风力发电机的出力随机性,以电压合格为约束条件,以降低网损为优化目标来建立地区电网无功电压优化的模糊模型。针对含 DG 的配电网实施优化调度也是 DG 优化运行的研究方向。文献[92]为含分布式光伏配电网构建包含上层主动配电网与下层微电网优化调度模型的双层优化调度模型,从而降低配电网供电损耗。

我国 DG 正呈现出快速发展态势,确保有序接入、高效消纳、并网可控是其主要需求^[93],如何在该需求前提下,优化 DG 配置和运行,利用微电网、虚拟电厂、分布式发电集群等形式开展优化调控,实现损耗最小化目标是下一步研究方向。

综上,国内外学者、电力工作人员提出了多种具有实际应用价值以及可实施性的地区电网技术降损措施,在具体实施时,还需要进一步研究各种措施对损耗降低所发挥作用的大小^[94],以求获得最优的节能效益。

3 地区电网技术降损潜力评估

技术降损开展前提是有效诊断设备或电网降损潜力,尽可能精准定位技术高损设备、高损区域,并针对性采取相应降损措施。目前,相关学者对设备或电网降损潜力评估主要分为3类:1)通过线损理论计算预估设备和电网损耗;2)通过建立能效指标体系,评估设备和电网降损潜力;3)以上两类方法的综合。

3.1 基于线损理论计算的降损潜力评估

线损理论计算主要指根据电网的实际负荷及正常运行方式,计算电网中每一元件的实际有功功率损失和在一定时间段内的电能损失^[95-96]。根据输电网的不同,线损理论计算通常采用不同的方法。在输电网,由于表计安装充足,各种测量设备也十分多,网络结构数据和运行数据采集方便,一般以设备网络参数为基础,通过拓扑分析和潮流计算,得到基于潮流的理论线损值^[97]。而对于配电网,由于其结构复杂、节点数量庞大、缺乏监控设备等原因,导致数据获取困难,因此,实际计算时均要对计算网络和数据进行一些等效和简化。经过长期研究,配电网线损理论计算主要分为两类^[98]:一类是依据网络主要损耗元件的物理特征建立的各种等值模型算法,如均方根电流法^[99]、最大电流法、平均电流法、等值电阻法^[100]等等;另一类是基于

配电线路末端用户的电量，采用潮流分析的前推回代法计算理论线损^[101]。

文献[95]提出利用现场监控单元分段统计出分段内的支路和配变的有功、无功损耗，并按损耗大小进行排序，以便采取相应的降损措施。文献[97]设计了电网线损计算与分析系统，通过对输、配电网采取不同方式进行线损理论计算，统计每一台变压器和每一条线路 24 小时总损耗，对损耗计算结果进行分类统计，找到导致损耗增大的原因。文献[102]研发了基于 J2EE 架构的线损理论计算与诊断分析系统，可根据采集数据的不同选用不同方法对主网、配网、低压网、其他元件进行线损理论计算，并结合无功优化计算分析、线损灵敏度计算分析、配电网经济运行分析、线损对比分析等诊断分析方法，摸清电网薄弱环节。文献[103]提出了结合节能及电压质量改善的综合节能潜力评估方法，通过对调整母线运行电压、增加导线截面、缩小供电半径等六项降损措施改造前后的损耗及电压理论计算结果得到配电线路综合节能潜力排名值。文献[104]在文献[103]基础上，进一步将全网抽象成若干类不同负荷特点和拓扑特点的配电线路，然后选择若干条代表性典型配电线路，结合线路运行环境，分别计算 9 项措施的降损效果，最终根据微观线路评估结果与该类型线路在电网中的比重来定量评估地区配电网综合节能潜力评估。

基于线损理论计算的降损潜力评估，由于能获得设备或电网损耗量，评估结果更为直接，但准确性受制于参与计算的网路结构参数或潮流分布数据，且数据量大、计算复杂；并且仅考虑了损耗因素，未考虑设备改造费用等经济性指标以及可靠性等约束条件。

3.2 基于能效指标体系的降损潜力评估

随着统计综合评价技术的发展，国内外学者开始将该技术应用于降损潜力的挖掘，根据需要围绕各种规范类指标、运行类指标和经济类指标，或加入部分约束条件，建立能效评估体系，并通过综合评价指导降损决策。常见的能效指标如图 2 所示。

文献[105]根据变电站的用能特点，从电气设备性能、系统运行状态、建筑结构性能和运行环境因素四个方面建立变电站能效评估指标体系，从而获得变电站的整体能效水平，为变电站节能改造提供依据。文献[106]提出一种基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价方法，从电网负荷、网架结构、配网设备和电压质量四方面出发，构建基于高耗能变压器占比、导线截面积合格率、电压偏移合

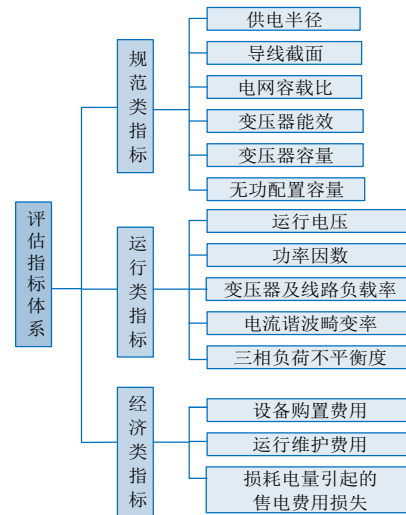


图 2 能效指标

Fig. 2 Energy efficiency evaluation index

格率等反应电网设备组成及运行状态的指标体系，评价每个配电网经济运行状况的等级水平，并得到每个评价对象下的所有单因素的情况，从而找到电网运行的薄弱环节。文献[107]分别从负荷侧、电网侧和电源侧 3 方面综合考虑电网降损的影响因子，建立了一套基于荷-网-源协调控制降损措施的电网降损能效评估指标体系，并对每项指标定义进行了详细阐述。文献[4]依据相关导则和设计规范，以变压器型号、线路长度等电网设备固有属性为静态指标，以功率因数、经济运行设备占比等随电网运行状态而变化的指标为动态指标，构建了中压配电网能效指标体系，并提出了综合无损线损率作为损耗评价指标，消除由于无损电量的计入导致综合线损率的“虚低”，使评估结果更加客观准确。值得一提的是，该文还将储能装置容量列入了指标体系，文献[108-109]均在此基础上，分别构建了输电网和地区电网设备能效统计指标体系。

基于能效指标体系的降损潜力评估，无需考虑网络结构拓扑或复杂的潮流计算，仅需根据参与评价设备或电网特点，结合如可靠性、经济性等目标，有针对性地收集统计数据，参照一定的标准对设备或电网能效进行评价，实现起来更加灵活、简单。然而，评估指标体系是评估分析的基础，由于在建立指标体系时难免会遇到指标全面性不足、结构不太合理的情况，可能会导致评估结果存在偏差。

3.3 综合类的降损潜力评估

以上两类方法各有优缺点，文献[110]根据配网运行数据收集的完善程度不同，综合采用以上两类方法，建立了基于设备层面及配网层面的双视角差异化节能规划模型，进行有差别性的节能潜力分析。当线路单线图、线路节点参数、公变参数、负

荷参数、无功补偿设备参数等相关信息收集完善时,可采用前推回代法进行线路节能潜力计算;而当数据采集受限时,则构建评价指标采用灰色预测模型,确定主干线平均长度、线路电缆化率、综合电压合格率等关联因子与主序列平均网损率的关联程度,从而计算节能潜力。为差异化选择降损潜力评估手段提供了思路。

4 技术降损可视化云平台

随着智能电网建设和数字化技术的不断推进,数据监控、采集、传输和管理系统配置成熟,提供了大量的数据源^[111],如何从中快速挖掘出有价值的信息,指导技术降损有效开展成为当前研究的热点。文献[103]构建了配电网节能潜力评估的系统框架,并开发了配电网节能潜力评估计算软件,对降损措施的节能潜力进行评估。文献[112]利用用电信息采集系统海量数据,分析线损偏高台区,查找引起台区高损的原因。而可视化技术的发展,静态、2维平面、孤立数据的展示方式发展到动态、3维立体、连续图形的展示方式的转变^[113]。文献[114]设计了基于图模库一体化的可视化配电网线损管理系统,将线损理论计算和统计计算、报表管理、指标管理和线损分析集成于一个统一的技术管理平台,并建立与调配 SCADA、GIS、MIS、DMS、营销等管理系统的接口。文献[115]基于调度系统数据建立电网碳流可视化平台,以交互的方式直观呈现碳排放流的变化。

以上研究为提升技术降损管理水平提供了新思路。2020年,国网公司依托电网数据中台,在省公司层面开展技术降损可视化云平台建设,实现区域输变电设备技术线损态势实时掌控,精准开展高损定位和成因分析,深化智能降损决策和落地实施。

4.1 总体架构

技术降损可视化云平台基于调度自动化系统、生产管理系统、用电信息采集系统、营销系统、一体化线损与电量系统等多源数据,依托省公司数据中台,通过“数据集成”和“任务调度”模块,实现跨部门、多系统的多源数据融合和准实时同步。以电网设备拓扑图为基础,基于标准化的准实时数据,结合技术降损业务处理逻辑,绘制“线损一张图”,实现电网设备损耗的在线监测、精准分析、智能决策以及成效跟踪。总体架构如图3所示。

4.2 功能介绍

技术降损可视化云平台可实现主配网有功、无功、电压、功率因数、理论线损率五大类数据在线可视,其主要功能有以下5个方面:

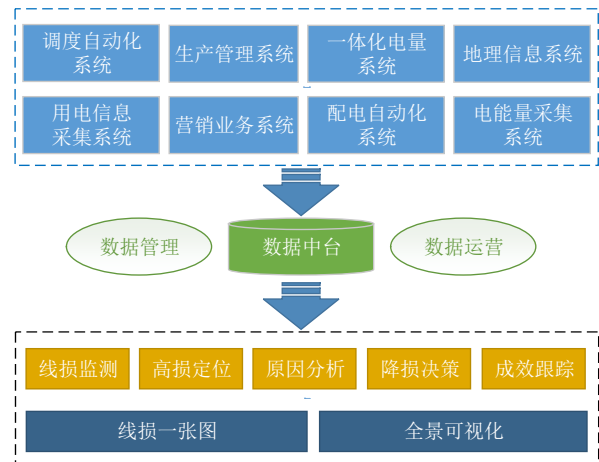


图3 技术降损可视化云平台总体架构

Fig. 3 Framework of technology loss reduction visualization cloud platform

1) 线损数据全面监测。基于电网设备台账、网架拓扑、量测数据等,主网采用牛顿-拉夫逊潮流算法/支路电流法,配网采用前推回代法,实现电网设备线损的在线监测。

2) 高损设备智能定位。根据平台计算的各类设备损耗,即理论线损率,综合铜铁损比、负载率等参数,设置阈值辨识高损设备。

3) 高损原因智能识别。建立高损类型与关联特征量(负载率、设备型号、功率因数、供电半径)之间的映射关系,从设备参数、无功配置、网架结构、运行状态等多个维度智能识别线损原因。

4) 降损策略智慧决策。针对主配网主要设备各类技术高损原因,系统根据治理措施策略进行自动辅助决策,并模拟计算各类降损措施的节电量和回收期,综合分析后进行优先级排序以确定最优降损措施。

5) 降损成效科学评价。对实施降损措施后的设备,以措施完成日期为时间节点,对比实施前后同时间周期内的运行情况,计算其理论线损率和统计线损率,从线损率、损耗电量两个维度跟踪降损成效。

目前,技术降损可视化云平台已在国网公司范围内逐步推广,成为技术降损管理工作的重要技术支撑。

5 结论与展望

电网技术降损涉及电网规划、设计、运行等各个阶段,同时需要用户的积极配合。本文从6个方面分析了地区电网技术降损措施,在具体选用时,可结合总结的3类技术降损潜力评估方法,优化整合多种降损措施,合理分配并充分利用有限的改造资金,获取最优的节能效益;而技术降损可视化云平台的建设,可帮助决策者实时掌握电网损耗的整

体态势，并辅助损耗分析、智能决策甚至改造后评价，为电网技术降损实施提供了一套完整的管理流程。然而，在新型电力系统建设背景下，技术降损仍然面临新形势和新要求，需要在以下方面进一步开展研究工作：

1) 在技术损耗机理研究方面，双向潮流复杂变化和新型负荷特性变化导致原有的线损理论有可能不再适用，如在变电站外送新能源时，地区电网变电站不再是传统的降压型变电站，功率因数不能准确表征无功损耗的大小。因此，有必要开展新型电力系统建设背景下损耗影响机理、损耗计算方法等的研究。

2) 在技术降损措施研究方面，有必要加快 1 级能耗的节能型变压器、新型材料的导线和金具、适用于波动负荷特性的单间隔多分组无功补偿等新型节能设备的研发和推广应用；同时充分挖掘 DG、电动汽车、储能等可调节负荷的调控潜力，利用微电网、虚拟电厂、分布式发电集群等形式开展优化调控，促进需求侧资源参与削峰填谷，提高能源效率。

3) 在技术降损评价和数字化应用研究方面，开展技术降损可视化云平台的持续优化。可视化云平台的构建基于多个源端系统，但电网规模大、设备数量众多，如何合理地利用源端系统数据、对大量监测数据有效筛选与辨识、以及结合新型电力系统元素，开展线损理论计算算法和评估指标体系的改进完善仍然是需要重点研究的方向。

参考文献

- [1] 张安华. 中国电力工业节能降耗影响因素分析[J]. 电力需求侧管理, 2006, 8(6): 1-4.
ZHANG Anhua. An analysis on factors of the energy conservation and consumption reduction in China's power industry[J]. Power Demand Side Management, 2006, 8(6): 1-4(in Chinese).
- [2] 马喜平, 贾嵘, 梁琛, 等. 高比例新能源接入下电力系统降损研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4305-4315.
MA Xiping, JIA Rong, LIANG Chen, et al. Review of researches on loss reduction in context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4305-4315(in Chinese).
- [3] 张恺凯, 杨秀媛, 卜从容, 等. 基于负荷实测的配电网理论线损分析及降损对策[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1): 92-97.
ZHANG Kaikai, YANG Xiuyuan, BU Congrong, et al. Theoretical analysis on distribution network loss based on load measurement and countermeasures to reduce the loss[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(S1): 92-97(in Chinese).
- [4] 王彬宇. 城市中低压配电网损耗分析与降损技术选择方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [5] 杨文锋, 王彬宇, 程卓, 等. 城市中低压配电网降损规划决策方法[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2598-2604.
YANG Wenfeng, WANG Binyu, CHENG Zhuo, et al. Optimized decision approach of loss reduction plan for medium- and low-voltage urban distribution networks[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2598-2604(in Chinese).
- [6] 杨小彬, 李和明, 尹忠东, 等. 基于层次分析法的配电网能效指标体系[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 146-150, 195.
YANG Xiaobin, LI Heming, YIN Zhongdong, et al. Energy efficiency index system for distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 146-150, 195(in Chinese).
- [7] 张利生. 电力网电能损耗管理及降损技术[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [8] 江北, 刘敏, 陈建福, 等. 地区电网降低电能损耗的主要措施分析[J]. 电网技术, 2001, 25(4): 62-65.
JIANG Bei, LIU Min, CHEN Jianfu, et al. Methods to reduce line losses in regional network[J]. Power System Technology, 2001, 25(4): 62-65(in Chinese).
- [9] 管霖, 邱生敏. 配电网规划网架的线损理论评估方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 17-20.
GUAN Lin, QIU Shengmin. Estimation of distribution network loss for planning grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 17-20(in Chinese).
- [10] 国家能源局. 电力网电能损耗计算导则: DL/T 686—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [11] 曹晓辉. 配电网线损分析计算及无功优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [12] 杨勇. 农网改造的技术问题及其常见问题探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 69-72.
YANG Yong. Discussion of technical renovation of rural power network in China and its common problems[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 69-72(in Chinese).
- [13] 余卫国, 熊幼京, 周新风, 等. 电力网技术线损分析及降损对策[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 54-57, 63.
YU Weiguo, XIONG Youjing, ZHOU Xinfeng, et al. Analysis on technical line losses of power grids and countermeasures to reduce line losses[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 54-57, 63(in Chinese).
- [14] 魏庆海, 吕鸣镝, 周莉梅, 等. 配电网采用 20 kV 供电的前景分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 61-66.
WEI Qinghai, LÜ Mingdi, ZHOU Limei, et al. Prospective analysis of adopting 20 kV voltage in distribution system[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 61-66(in Chinese).
- [15] 何健宇. 广州配电网 20kV 升压改造关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [16] 李运钱. 嘉善 20kV 配电网中性点智能切换接地方式的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [17] 宁宏全, 王晓辉, 赵骅, 等. 配电网导线截面优化决策的综合算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1997, 9(2): 35-41.
- [18] 张二飞, 冯林桥, 刘金玲, 等. 配电网规划计算机辅助决策系统[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 56-59.
ZHANG Erfei, FENG Linqiao, LIU Jinling, et al. Computer aided decision-making system of distribution network planning[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 56-59(in Chinese).
- [19] 卢志刚, 秦四娟, 李海涛, 等. 配电网技术线损分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 177-180.
LU Zhigang, QIN Sijuan, LI Haitao, et al. Analysis on technical line loss of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 177-180(in Chinese).
- [20] 柳占杰, 许跃进. 基于电压制式的电网最优供电半径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 87-91, 101.
LIU Zhanjie, XU Yuejin. Research on the optimal grid radius based on standard voltage[J]. Power System Protection and Control, 2010,

- 38(19): 87-91, 101(in Chinese).
- [21] 杨建, 许跃进, 吴昊, 等. 不同配变安装方式下农村低压电网经济供电半径研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 190-195.
YANG Jian, XU Yuejin, WU Hao, et al. Economic power supply radius under different distribution transformer installation in rural low-voltage network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 190-195(in Chinese).
- [22] 谭笑, 王主丁, 舒东胜, 等. 计及分布式电源的变电站个数及馈线条数概率规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 62-70.
TAN Xiao, WANG Zhuding, SHU Dongsheng, et al. Probabilistic planning for the number of substations and feeders considering distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 62-70(in Chinese).
- [23] 胡景生. 电网经济运行节电技术综述[J]. 节能, 2000(4): 23-28.
- [24] 吴玉香. 220kV 变电站变压器经济运行方式计算与效益分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [25] 李超. 变压器动态经济运行与降损分析[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [26] 徐建政, 凌云. 并列运行变压器经济运行模式分析[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(9): 46-48.
XU Jianzheng, LING Yun. Analysis on economic operation mode of parallel transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9): 46-48(in Chinese).
- [27] 王承民, 余楚云. 基于遗传算法的配电变压器最优投切方案[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 43-45.
WANG Chengmin, SHE Chuyun. Optimization of switching plan for distribution transformers based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 43-45(in Chinese).
- [28] 陈举忠, 蒋和中. 两回专用供电线路的经济运行[J]. 节能, 2000(6): 24-28.
- [29] 王英, 曹志平, 韩富春. 变压器负载的经济分配研究[J]. 电力学报, 2004, 19(4): 300-302.
WANG Ying, CAO Zhiping, HAN Fuchun. The economical distribution of Transformer's load and energy saving[J]. Journal of Electric Power, 2004, 19(4): 300-302(in Chinese).
- [30] 韩平平, 潘薇, 张楠, 等. 基于负荷预测和非支配排序遗传算法的人工相序优化方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 71-78.
HAN Pingping, PAN Wei, ZHANG Nan, et al. Optimization method for artificial phase sequence based on load forecasting and non-dominated sorting genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 71-78(in Chinese).
- [31] 张栋, 张刘春, 傅正财. 配电网重构的快速支路交换算法[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 82-85.
ZHANG Dong, ZHANG Liuchun, FU Zhengcai. A quick branch-exchange algorithm for reconfiguration of distribution networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 82-85(in Chinese).
- [32] 汲国强, 吴文传, 张伯明, 等. 以降损和载荷均衡为目标的地区电网网络重构快速算法[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 172-178.
JI Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Regional network reconfiguration algorithm for loss reduction and loading equilibrium[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 172-178(in Chinese).
- [33] WANG Beibei, ZHU Hong, XU Honghua, et al. Distribution network reconfiguration based on NoisyNet deep Q-learning network[J]. IEEE Access, 2021, 9: 90358-90365.
- [34] SITI M W, NICOLAE D V, JIMOH A A, et al. Reconfiguration and load balancing in the LV and MV distribution networks for optimal performance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2534-2540.
- [35] JABR R A, SINGH R, PAL B C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1106-1115.
- [36] RAZAVI S M, MOMENI H R, HAGHIFAM M R, et al. Multi-objective optimization of distribution networks via daily reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 775-785.
- [37] 段浩, 金东, 姬旭东. 基于降损理论的配电变压器选型优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(S1): 43-47.
DUAN Hao, JIN Dong, JI Xudong. Optimization method for selection of distribution transformer based on theory of loss reduction[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2015, 27(S1): 43-47(in Chinese).
- [38] 中国标准化研究院, 特变电工衡阳变压器有限公司, 特变电工股份有限公司, 等. 电力变压器能效限定值及能效等级: GB 20052—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [39] 涂春鸣, 焦典, 姜飞, 等. 基于差异化数据采集的配电变压器优选方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 1000-1007.
TU Chunming, JIAO Dian, JIANG Fei, et al. Optimization method of distribution transformer based on differentiated data acquisition[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 1000-1007(in Chinese).
- [40] 陈磊, 姜飞, 涂春鸣. 考虑负荷最大概率分布与故障风险的配电变压器优选方法[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1109-1116.
CHEN Lei, JIANG Fei, TU Chunming. Optimal selection method of distribution transformer considering maximum probability distribution characteristics and fault risk[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1109-1116(in Chinese).
- [41] 黄彭, 莫娟, 万建成, 等. 架空输电线路节能导线应用技术经济分析[J]. 中国电力, 2013, 46(7): 153-157.
HUANG Peng, MO Juan, WAN Jiancheng, et al. Technical-economic analysis on application of energy-saving conductors in transmission lines[J]. Electric Power, 2013, 46(7): 153-157(in Chinese).
- [42] 谢书鸿, 何仓平, 徐拥军. 输电线路节能增效技术发展[J]. 中国电力, 2012, 45(8): 15-19.
XIE Shuhong, HE Cangping, XU Yongjun. Development of energy saving & efficiency increasing technology for transmission lines[J]. Electric Power, 2012, 45(8): 15-19(in Chinese).
- [43] 丁然, 康重庆, 周天睿, 等. 低碳电网的技术途径分析与展望[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 1-8.
DING Ran, KANG Chongqing, ZHOU Tianrui, et al. Analysis and prospect on technical approaches for low carbon power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 1-8(in Chinese).
- [44] YANG Ning, YU C W, WEN Fushuan, et al. An investigation of reactive power planning based on chance constrained programming[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2007, 29(9): 650-656.
- [45] PAUL S, JEWELL W T. Importance of voltage reduction and optimal voltage setting during reactive power compensation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1999-2007.
- [46] ISMAIL B, WAHAB N I A, OTHMAN M L, et al. A comprehensive review on optimal location and sizing of reactive power compensation using hybrid-based approaches for power loss reduction, voltage stability improvement, voltage profile enhancement and loadability enhancement[J]. IEEE Access, 2020, 8: 222733-222765.
- [47] KHAN N H, WANG Yong, TIAN De, et al. Design of fractional particle swarm optimization gravitational search algorithm for optimal reactive power dispatch problems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 146785-146806.
- [48] 黄晶晶, 王坤, 王蕾, 等. 高电缆化率城市配电网电压问题分析与治理方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(6): 93-98.
HUANG Jingjing, WANG Kun, WANG Lei, et al. Analysis and management of voltage problem in urban distribution network with high cable rate[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 93-98(in Chinese).
- [49] 徐志伟, 吴星仪, 蔡晖. 适应线路电缆化的 220 kV 变电站无功补

- 偿计算研究[J]. 东北电力技术, 2022, 43(5): 6-9.
- XU Zhiwei, WU Xingyi, CAI Hui. Research on reactive power compensation calculation of 220 kV substation adapting to cabled transmission line[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(5): 6-9(in Chinese).
- [50] 胡鑫, 张勇军, 钟红梅. 基于电缆网无功潮流特性的高压配电网无功补偿方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(3): 134-140.
- HU Xin, ZHANG Yongjun, ZHANG Hongmei. Reactive compensation method for high voltage distribution network based on reactive power flow features of cable network[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(3): 134-140(in Chinese).
- [51] 何松涛, 邵振国, 郑文迪. 计及 SVG 动态调压策略的配电网双层不确定性无功规划配置[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5158-5168.
- HE Songtao, SHAO Zhenguo, ZHENG Wendi. Bi-level uncertain reactive power planning of distribution network considering SVG dynamic voltage regulation strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 47(12): 5158-5168. (in Chinese).
- [52] 张璐, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 含光伏发电的配电网有功无功资源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5525-5533.
- ZHANG Lu, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Optimal configuration of active-reactive power sources in distribution network with photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5525-5533(in Chinese).
- [53] 李斌, 吕林, 刘友波, 等. 考虑光伏接入不确定性的主动配电网有功-无功可控资源优化配置[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 355-362.
- LI Bin, LÜ Lin, LIU Youbo, et al. Optimal configuration of controllable active-reactive power resources in active distribution network considering photovoltaic access uncertainty[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 355-362(in Chinese).
- [54] 孔顺飞, 胡志坚, 谢仕炜, 等. 含电动汽车充电站的主动配电网二阶段鲁棒规划模型及其求解方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1093-1105.
- KONG Shunfei, HU Zhijian, XIE Shiwei, et al. Two-stage robust planning model and its solution algorithm of active distribution network containing electric vehicle charging stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 1093-1105(in Chinese).
- [55] BOLOGNANI S, CARLI R, CAVRARO G, et al. Distributed reactive power feedback control for voltage regulation and loss minimization [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(4): 966-981.
- [56] 林广明, 欧阳森, 曾江, 等. 改进灾变遗传算法在无功优化规划中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 128-133.
- LIN Guangming, OUYANG Sen, ZENG Jiang, et al. Application of improved catastrophic genetic algorithms in optimal reactive power planning[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 128-133(in Chinese).
- [57] GAFAR M G, EL-SEHIEMY R A, HASANIEN H M. A novel hybrid fuzzy-Jaya optimization algorithm for efficient ORPD solution[J]. IEEE Access, 2019, 7: 182078-182088.
- [58] MUGEMANYI S, QU Zhaoyang, RUGEMA F X, et al. Optimal reactive power dispatch using chaotic bat algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 65830-65867.
- [59] YU Linlin, ZHANG Lihua, MENG Gaojun, et al. Research on multi-objective reactive power optimization of power grid with high proportion of new energy[J]. IEEE Access, 2022, 10: 116443-116452.
- [60] 张勇军, 张锡填, 苏杰和. 基于 AVC 系统的省地电网关口无功功率协调控制方法[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2771-2777.
- ZHANG Yongjun, ZHANG Xitian, SU Jiehe. An AVC system based coordinated control method for reactive power at gateway between provincial and regional power grids[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2771-2777(in Chinese).
- [61] 王秀丽, 李正文, 胡泽春. 高压配电网无功/电压的日分段综合优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 5-9.
- WANG Xiuli, LI Zhengwen, HU Zechun. Time-interval based comprehensive control strategy for daily voltage/Var optimization in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 5-9(in Chinese).
- [62] 邢海军, 程浩忠, 张逸. 基于多种主动管理策略的配电网综合无功优化[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1504-1510.
- XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Yi. Reactive power comprehensive optimization in distribution network based on multiple active management schemes[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1504-1510(in Chinese).
- [63] 余昆, 曹一家, 陈星莺, 等. 含分布式电源的地区电网无功电压优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 28-32.
- YU Kun, CAO Yijia, CHEN Xingying, et al. Reactive power and voltage optimization of the district grid with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 28-32(in Chinese).
- [64] 王文宾, 靳伟, 李洪涛, 等. 考虑光伏集群无功贡献的配电网无功电压优化调节方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 114-123.
- WANG Wenbin, JIN Wei, LI Hongtao, et al. Reactive voltage optimization regulation method of distribution network considering the reactive power contribution of a photovoltaic cluster[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 114-123(in Chinese).
- [65] 符杨, 周晓鸣, 苏向敬. 多电压等级不平衡主动配电网电压无功自适应多目标协调优化[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2136-2144.
- FU Yang, ZHOU Xiaoming, SU Xiangjing. Adaptive and coordinated Volt/Var optimization for unbalanced active distribution networks of multiple voltage levels[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2136-2144(in Chinese).
- [66] MUTTAQI K M, LE A D T, NEGNEVITSKY M, et al. A coordinated voltage control approach for coordination of OLTC, voltage regulator, and DG to regulate voltage in a distribution feeder[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1239-1248.
- [67] 王蓓蓓, 李扬, 高赐威. 智能电网框架下的需求侧管理展望与思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 17-22.
- WANG Beibei, LI Yang, GAO Ciwei. Demand side management outlook under smart grid infrastructure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 17-22(in Chinese).
- [68] 王梅霖. 电力需求侧管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [69] 汪卫华, 张慧敏, 陈方. 用削峰填谷方法提高供电企业效益的分析[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 79-81.
- WANG Weihua, ZHANG Huimin, CHEN Fang. Analysis of improving profit of power supply enterprises by peak load shifting[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 79-81(in Chinese).
- [70] 胡福年, 汤玉东, 邹云. 需求侧实行峰谷分时电价策略的影响分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 168-174.
- HU Funian, TANG Yudong, ZOU Yun. Analysis of impacts of TOU price strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 168-174(in Chinese).
- [71] 周颖, 龚桃荣, 陈宋宋, 等. 面向新型电力负荷管理的分层分区动态调控架构展望[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(4): 51-58.
- ZHOU Ying, GONG Taorong, CHEN Songsong, et al. Prospect of hierarchical and partitioned dynamic regulation architecture for new power load management[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(4): 51-58(in Chinese).
- [72] 祁琪, 石富岭, 陈宋宋, 等. 居民负荷参与电力系统调控关键技术综述与展望[J]. 电网技术, 2024, 48(02): 809-818.
- QI Qi, SHI Fuling, CHEN Songsong, et al. Review and prospect of key technologies for residential loads participating in power system

- dispatch and control[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2024, 48(02): 809-818(in Chinese).
- [73] 孙国强, 徐广开, 沈培锋, 等. 规模化电动汽车负荷的柔性台区协同经济调度[J]. *电网技术*, 2020, 44(11): 4395-4403.
SUN Guoqiang, XU Guangkai, SHEN Peifeng, et al. Coordinated economic dispatch of flexible district for large-scale electric vehicle load[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(11): 4395-4403(in Chinese).
- [74] 吴润基, 王冬晓, 谢昌鸿, 等. 空调负荷参与配电网电压管理的分布式控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(6): 215-222.
WU Runji, WANG Dongxiao, XIE Changhong, et al. Distributed control method for air-conditioning load participating in voltage management of distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(6): 215-222(in Chinese).
- [75] 赵波, 王财胜, 周金辉, 等. 主动配电网现状与未来发展[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(18): 125-135.
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(18): 125-135(in Chinese).
- [76] 谢敏, 黄莹, 李弋升, 等. 分布式能源动态聚合于虚拟电厂的演化博弈决策方法和机理分析[J]. *电网技术*, 2023, 47(12): 4958-4970.
XIE Min, HUANG Ying, LI Yisheng, et al. Evolutionary game decision and mechanism analysis of dynamical aggregation of distributed energy resources into virtual power plant[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(12): 4958-4970(in Chinese).
- [77] 成雨阳, 高红均, 王仁浚, 等. 虚拟电厂两阶段准线型需求响应优化及收益共享-风险共担决策方法[J]. *电网技术*, 2024, 48(2): 709-808.
CHENG Yuyang, GAO Hongjun, WANG Renjun, et al. Optimal strategy for two stage customer directrix load based demand response and profit sharing-risk sharing decision-making method for virtual power plant[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(2): 709-808(in Chinese).
- [78] 张沈习, 袁加妍, 程浩忠, 等. 主动配电网中考虑需求侧管理和网络重构的分布式电源规划方法[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(S1): 1-9.
ZHANG Shenxi, YUAN Jiayan, CHENG Haozhong, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution network considering demand side management and network reconfiguration [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(S1): 1-9(in Chinese).
- [79] 朱城香. 基于需求侧管理的专线用户节能诊断研究[D]. 广州: 广州工业大学, 2016.
- [80] 唐惠玲. 新能源环境下配电网线损和电压协同管理策略研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [81] 杨龙月, 任烜辰, 蔡智鹏, 等. 高光伏渗透率配电网电压控制策略研究综述[J]. *电网技术*, 2024, 48(12): 5056-5070.
YANG Longyue, REN Xuanchen, CAI Zhipeng, et al. Review on voltage control strategies for high PV penetration distribution networks[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(12): 5056-5070(in Chinese).
- [82] 曾鸣, 田廓, 李娜, 等. 分布式发电经济效益分析及其评估模型[J]. *电网技术*, 2010, 34(8): 129-133.
ZENG Ming, TIAN Kuo, LI Na, et al. Economic benefits analysis of distributed generation and its assessment model[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(8): 129-133(in Chinese).
- [83] GÖZEL T, HOCAOGLU M H. An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2009, 79(6): 912-918.
- [84] GHOSH S, GHOSH S P, GHOSH S. Optimal sizing and placement of distributed generation in a network system[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2010, 32(8): 849-856.
- [85] 马艺玮, 杨莘, 王月武, 等. 微电网典型特征及关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(8): 168-175.
MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Typical characteristics and key technologies of microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(8): 168-175(in Chinese).
- [86] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 57-70(in Chinese).
- [87] 张勇, 吴淳. 分布式发电机在配电网中的优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(11): 33-37, 43.
ZHANG Yong, WU Chun. Optimal placement of DG unit in distribution system[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(11): 33-37, 43(in Chinese).
- [88] 钟嘉庆, 叶治格, 卢志刚. 分布式发电注入容量与接入位置的优化配置分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(7): 50-55.
ZHONG Jiaqing, YE Zhige, LU Zhigang. Analysis of optimal allocation of penetration level and interconnected location of DG[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(7): 50-55(in Chinese).
- [89] 顾洁, 刘书琪, 胡玉, 等. 基于深度卷积生成对抗网络场景生成的间歇式分布式电源优化配置[J]. *电网技术*, 2021, 45(5): 1742-1749.
GU Jie, LIU Shuqi, HU Yu, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation based on deep convolutions generative adversarial network in scenario generation[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(5): 1742-1749(in Chinese).
- [90] 陈星莺, 李刚, 廖迎晨, 等. 考虑环境成本的城市电网最优潮流模型[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(15): 42-46.
CHEN Xingying, LI Gang, LIAO Yingchen, et al. An optimal power flow model for the urban power grid considering environment cost[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(15): 42-46(in Chinese).
- [91] 刘隽楷, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 含功效系数法的电力系统多目标综合优化[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(24): 59-63.
LIU Junkai, ZOU Xiaosong, YUAN Xufeng, et al. Multi-objective comprehensive optimization of power system containing the efficacy coefficient method[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(24): 59-63(in Chinese).
- [92] 梅鹏, 林志贤, 李腾飞. 基于云模型的含分布式光伏配电网双层优化调度方法[J]. *无线电工程*, 2023, 53(9): 2158-2164.
MEI Peng, LIN Zhixian, LI Tengfei. Cloud model-based two-layer optimal scheduling method for distributed photovoltaic power distribution network[J]. *Radio Engineering*, 2023, 53(9): 2158-2164(in Chinese).
- [93] 盛万兴, 吴鸣, 季宇, 等. 分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(8): 2175-2186.
SHENG Wanxing, WU Ming, JI Yu, et al. Key techniques and engineering practice of distributed renewable generation clusters integration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(8): 2175-2186(in Chinese).
- [94] 刘健, 段璟靓. 配电网极线损分析及降损措施优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(12): 27-35.
LIU Jian, DUAN Jingjing. Line loss limitation analysis and optimal planning of loss reduction for distribution grids[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(12): 27-35(in Chinese).
- [95] 朱发国. 基于现场监控终端的配网线损计算[J]. *电网技术*, 2001,

- 25(5): 38-40.
ZHU Faguo. Loss calculation method for distribution network with information from field terminal units[J]. Power System Technology, 2001, 25(5): 38-40(in Chinese).
- [96] 王涛, 张坚敏, 李小平. 计划线损率的计算及其评价[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 40-42, 55.
WANG Tao, ZHANG Jianmin, LI Xiaoping. Calculation of scheduled loss ratio and its assessment[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 40-42, 55(in Chinese).
- [97] 张伏生, 李燕雷, 汪鸿. 电网线损理论计算与分析系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 19-23.
ZHANG Fusheng, LI Yanlei, WANG Hong. The theoretical energy loss calculation & analysis system for electric network[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2002, 14(4): 19-23(in Chinese).
- [98] 谷万明. 配电网理论线损计算方法研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006.
- [99] 郭峰, 姚莉娜, 刘恒, 等. 引入三相不平衡度的低压电网理论线损计算[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 51-54.
GUO Feng, YAO Lina, LIU Heng, et al. Theoretical line loss calculation with three-phase unbalance degree for low-voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 51-54(in Chinese).
- [100] 周维. 霸州市 10kV 配电网节能减损分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [101] 刘庭磊, 王韶, 张知, 等. 采用负荷电量计算低压配台区理论线损的牛拉法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 143-148.
LIU Tinglei, WANG Shao, ZHANG Zhi, et al. Newton-Raphson method for theoretical line loss calculation of low-voltage distribution transformer district by using the load electrical energy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 143-148(in Chinese).
- [102] 吴鸿亮, 门锐, 董楠, 等. 基于 J2EE 架构的线损理论计算与诊断分析系统开发与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 108-116.
WU Hongliang, MEN Kun, DONG Nan, et al. Development and application of theoretical calculation and diagnosis analysis system of line loss based on J2EE framework[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 108-116(in Chinese).
- [103] 曾敏敏, 白先红, 张勇军, 等. 多目标配电网综合节能潜力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 100-105.
ZENG Jianmin, BAI Xianhong, ZHANG Yongjun, et al. Multi-objective comprehensive energy saving potential evaluation of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 100-105(in Chinese).
- [104] 张勇军, 石辉, 许亮. 配电网节能潜力评估系统开发方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 51-55.
ZHANG Yongjun, SHI Hui, XU Liang. Systematic developing program of distribution network energy saving potential evaluation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 51-55(in Chinese).
- [105] 罗志坤, 刘潇潇, 陈星莺, 等. 变电站能效评估指标体系及建模方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 132-138.
LUO Zhikun, LIU Xiaoxiao, CHEN Xingying, et al. Energy efficiency evaluation index system and modeling method for substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 132-138(in Chinese).
- [106] 马丽叶, 卢志刚, 胡华伟. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 163-171.
MA Liye, LU Zhigang, HU Huawei. A fuzzy comprehensive evaluation method for economic operation of urban distribution network based on interval number[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 163-171(in Chinese).
- [107] 陈征, 李长海, 徐杰彦, 等. 荷-网-源协调控制后电网降损能效评估指标体系[J]. 电力需求侧管理, 2016, 18(3): 5-10.
CHEN Zheng, LI Changhai, XU Jieyan, et al. Assessment index system of grid loss reduction and energy efficiency after load-network-source coordinated control[J]. Power Demand Side Management, 2016, 18(3): 5-10(in Chinese).
- [108] 付可欣, 彭澎, 孔静, 等. 基于层次分析法的输电网能效评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(3): 23-26.
FU Kexin, PENG Peng, KONG Jing, et al. Study on the method of transmission efficiency evaluation based on AHP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(3): 23-26(in Chinese).
- [109] 张星星. 电网设备能效评估方法及应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [110] 姜飞, 涂春鸣, 刘子维, 等. 配电网差异化节能规划方法及其应用[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2712-2718.
JIANG Fei, TU Chunming, LIU Ziwei, et al. Differentiated energy-saving planning method of distribution networks and its applications [J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2712-2718(in Chinese).
- [111] 费思源. 大数据技术在配电网中的应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 85-96.
FEI Siyuan. Overview of application of big data technology in power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 85-96(in Chinese).
- [112] 李俊楠, 李伟, 李会君, 等. 基于大数据云平台的电力能源大数据采集与应用研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(12): 104-109.
LI Junnan, LI Wei, LI Huijun, et al. Research on big data acquisition and application of power energy based on big data cloud platform[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(12): 104-109(in Chinese).
- [113] 沈国辉, 余东香, 孙湃, 等. 电力系统可视化技术研究及应用[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 31-36.
SHEN Guohui, SHE Dongxiang, SUN Pai, et al. Research and application of power system visualization technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 31-36(in Chinese).
- [114] 李惠玲, 盛万兴, 孟晓丽. 基于图模库一体化的配电网线损管理系统的研制[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 89-92.
LI Huiling, SHENG Wanxing, MENG Xiaoli. Energy loss management system of distribution network based on integrative graphic model library[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 89-92(in Chinese).
- [115] 吴培肇. 考虑网损的电网碳流分析及其可视化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.



陈涵

在线出版日期: 2024-01-30.

收稿日期: 2023-04-06.

作者简介:

陈涵(1981), 通信作者, 女, 高级工程师, 研究方向为技术降损、无功电压及电能质量, E-mail: brightfay@163.com;

徐玲玲(1975), 女, 教授级高级工程师, 研究方向为输变电设备运维、直流技术等, E-mail: xull1022@sina.com.

(责任编辑 赵梓含)