

引用格式:刘紫琦,翟寅,付奎霖,等.基于线间相关性的变电站负荷优化分配方法[J].电力科学与技术学报,2026,41(1):73-84.

Citation: LIU Ziqi, ZHAI Yin, FU Kuilin, et al. Optimal load distribution method for substations based on inter-line correlations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 73-84.

基于线间相关性的变电站负荷优化分配方法

刘紫琦¹, 翟寅¹, 付奎霖², 刘舒然^{1,3}, 李巍², 郗新宇², 詹诗广², 陈丽莉³

(1. 内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司, 内蒙古 呼和浩特 750306; 2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司乌海超高压供电分公司, 内蒙古 乌海 016099; 3. 日立能源(中国)有限公司, 北京 100015)

摘要:随着新型电力系统的建设推进,间歇性新能源出力与多元化负荷的时空不匹配性加剧了电网峰谷差,使变电站主变压器负载率上升,站内各变压器承担的负荷均衡性下降。这一运行趋势不仅加剧设备老化风险,更可能通过电网层级耦合效应威胁电网的安全稳定运行。为此,基于变电站分层分区运行特征以及出线负荷的时空耦合关系,构建了基于负荷相似度、互补性的线间相关性多维评价指标,并综合考虑了主变压器的负载率、负荷平坦度和负荷均衡性,提出了主变压器负荷优化分配的三维判据。在此基础上,构建了一种考虑负荷相关特性的多目标优化模型,并给出枚举法和遗传算法的求解方法,以获取多约束条件下的帕累托最优解集。对华东地区典型110/35 kV变电站的案例实证分析表明,该方法可使主变压器日负载率标准差降低42.7%,峰谷差率减少18.3%,显著提升设备利用效率与系统运行经济性,为智能变电站精益化运维提供了一种创新解决方案。

关键词:配电网;变电站;负荷优化分配;线间相关性;多目标优化;主变压器选线

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.008 **中图分类号:** TM714 **文章编号:** 1673-9140(2026)01-0073-12

Optimal load distribution method for substations based on inter-line correlations

LIU Ziqi¹, ZHAI Yin¹, FU Kuilin², LIU Shuran^{1,3}, LI Wei²,
QIE Xinyu², ZHAN Shiguang², CHEN Lili³

(1. Inner Mongolia Electric Power Research Institute Branch, Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 750306, China;

2. Wuhai Ultra High Voltage Power Supply Branch, Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Wuhai 016099, China;

3. Hitachi Energy (China) Co., Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: As the construction of new power systems advances, the spatio-temporal mismatch between the output of intermittent renewable energy and diversified load exacerbates the peak-valley difference in power grids, leading to an increased load rate of main transformers and a decline in load balance of each transformer within substations. This operational trend accelerates the risk of equipment aging and poses potential threats to the safe and stable operation of the power grid through hierarchical coupling effects. To address this issue, based on the hierarchical partition operation characteristics of substations and the spatio-temporal coupling relationship of outgoing line loads, a multidimensional evaluation index of inter-line correlation is proposed, which incorporates load similarity and complementarity. By comprehensively taking into account the load rate, load flatness, and load balance of the main transformers, a three-dimensional criterion for optimal load distribution of main transformers is proposed. Furthermore, a multi-objective optimization model considering load correlation characteristics is developed, and the solution methods of the enumeration method and genetic algorithm are employed to obtain the Pareto-optimal solution set under multiple constraints. Empirical validation analysis based on typical 110/35 kV substation cases in East China demonstrates that the proposed method reduces the standard deviation of the daily load rate of main transformers by 42.7% and the peak-valley difference rate by 18.3%, effectively enhancing equipment utilization efficiency and operational economy, which

收稿日期:2025-02-13;修回日期:2025-04-24

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB2405900);内蒙古电力集团有限责任公司科技项目(2024-4-40)

通信作者:刘舒然(1992—),男,博士,高级工程师,主要从事电力系统规划、建模仿真等研究;E-mail: shuran.liu@hitachienergy.com

provides an innovative solution for the lean operation and maintenance of intelligent substations.

Key words: distribution network; substation; optimal load distribution; inter-line correlation; multi-objective optimization; main transformer line selection

电力负荷受地理位置、季节气候以及用户用电习惯等因素影响,呈现出显著的峰谷波动。随着新能源的大规模并网,电网负荷的峰谷差持续扩大,“鸭子曲线”效应日益显著^[1-2],导致电力系统运行面临更严峻的平衡性挑战。

变电站作为电能输配的核心节点,其主变压器负载水平直接取决于其所接入的低压侧线路负荷。当前变电站实际运行中普遍存在以下问题:一是负荷峰值接近变电站总容量,存在过载风险;二是低谷时段负载率偏低,设备资源利用率不足。此外,主变压器的负荷不均衡性还可能影响高压进线潮流分布,进而向上级电网传导,导致更大范围的负荷不平衡。

为缓解电力供需不平衡,已有研究提出电价调节机制^[3-5](制定峰谷电价)引导用户和机组参与调峰;采用需求侧响应策略鼓励^[6-10]电动汽车、虚拟电厂、新型储能、空调等柔性负荷参与调节。尽管这些措施在一定程度上改善了电网的负荷均衡性,但短时负荷突增仍需依赖负荷倒闸转供^[11-13],难以从根本上优化变电站的负荷分配。

经过对多座变电站出线负荷的数据分析,变电站内部的出线负荷之间通常存在显著的相关性^[14-15]。这一特性主要源于同一区域用户的生产和生活习惯趋同,使同类型负荷具有较高的相似性;而不同类别的负荷(如工业、商业与居民用电)因用电时段不同则可能存在互补性^[16]。如果能够合理利用这种负荷间的自然相关性,优化主变压器的负荷分配,则无需额外硬件投资,即可改善设备利用率并提升电网运行的经济性。

为此,本文提出一种面向实际电网运行与工程应用的基于线间相关性平衡的变电站负荷优化分配方法,主要贡献如下:

1) 构建负荷相关性评估方法,通过对站内低压侧出线的负荷数据分析,量化各线路间负荷的相似性和互补性关系,提供变电站负荷分配的定量依据;

2) 建立负荷优化分配的多目标模型,综合考虑设备负载率、负荷曲线平坦度以及主变压器间的平衡性,通过互补负荷优化选线策略,提升主变压器

负荷分配的合理性;

3) 采用枚举法和遗传算法,在多约束条件下求解帕累托最优解集,实现变电站负荷的智能化优化分配;

4) 通过实证分析验证方法有效性,基于华东地区典型 110/35 kV 变电站的案例研究,结果表明,通过简便的出线间隔优化,可显著降低个别主变的负载率、平衡主变间的负荷、降低主变的峰谷差。

本文的研究成果为智能变电站的精细化运维提供了一种创新思路,提升了设备利用率和电网运行的经济性,同时具备较强的工程可操作性,可通过分布优化方案逐步实现最优负荷分配。

1 变电站负荷不均衡性分析

配电网中的 35~110 kV 变电站将 110 kV 或 35 kV 电压等级降至 10 kV(或 20 kV),并将电力分配至用户,是最接近用电负荷的变电站^[17]。

根据《配电网规划设计技术导则》^[18],A+、A、B 和 C 类地区,高压配电网均应满足 N-1 供电安全准则。因此,这类地区变电站的主变压器数量按照 2~4 台配置。为限制短路电流、优化负荷管理,采用分层分区供电模式,变电站及其馈线通常采用开环运行方式,其结构如图 1 所示。

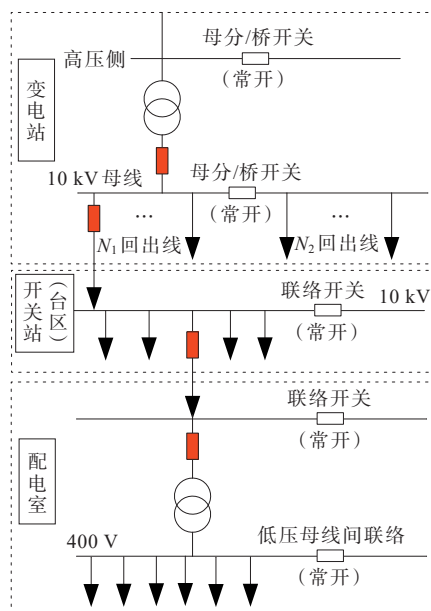


图 1 变电站分层分区运行示意

Figure 1 Hierarchical partition operation of substation

由图 1 可知,这类变电站低压侧通常采用辐射式网络结构,其潮流分布主要受负荷特性影响。变电站的 10 kV 出线经环网柜或馈线柜连接到用户,因用户类型的差异,馈线负荷曲线呈现多样化。这种负荷特性的不均衡性,使得不同主变压器之间的负载水平难以保持一致。

110 kV 和 35 kV 变电站的主变压器负荷不均衡性也会影响 220 kV 变电站。图 2 为某 220 kV 变电站的两台主变压器 2023 年 7 月连续 5 日的负载率曲线:1 号主变的负载率变化区间为 18%~62%,平均负载率为 49.7%;2 号主变的负载率变化区间为 17%~58%,平均负载率为 46.3%;实时负载率差额占比为 6.2%~10.1%,最大值出现在 7 月 13 日的 22:00,两台主变的负载率分别为 45.3% 和 41.1%,负载率差额为 4.2%,是第 2 台主变负载率的 1/10。由此可见,不合理的负荷分配方案可能导致某些主变压器在高峰时段超负荷运行,而在低谷时段负载率偏低,不仅影响设备利用率,还可能加剧潮流分布失衡,影响上级电网的运行稳定性。

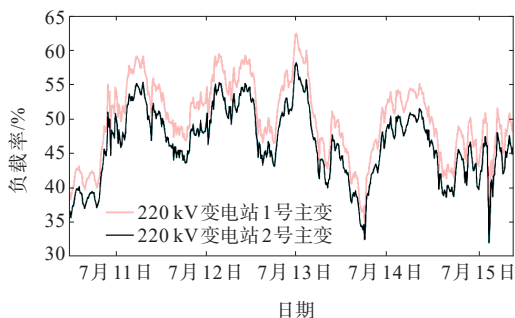


图 2 某 220 kV 变电站的两台主变压器的 5 日内负载率曲线

Figure 2 Load rate curves of two main transformers in a 220 kV substation within five days

如果将相似类型的负荷集中接入同一台主变压器,由于其负荷曲线变化趋势相似,会使得总负荷的高峰负荷更大、低谷负荷更小,更容易使主变压器出现尖峰负荷或深谷负荷。图 3 展示了某 35 kV 变电站两台主变压器 5 日内负荷曲线。可知,这两台主变压器的负荷曲线存在一定互补性:比如 T_1 时刻,1 号主变的负荷处在该日的高峰值,而 2 号主变的负荷则处在低谷值; T_2 时刻则正好相反。这种特性表明,如果能够充分利用负荷的互补性,则可通过优化负荷分配,降低主变压器的峰谷差,提高整体负荷均衡性。

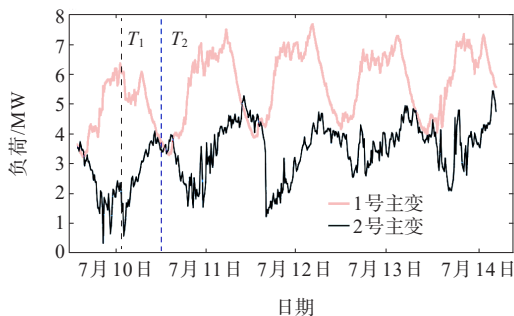


图 3 某 35 kV 变电站的两台主变压器的 5 日内负荷曲线

Figure 3 Load curves of two main transformers in a 35 kV substation within five days

因此,合理的负荷优化分配方法应避免相似性较强的负荷集中接入同一主变压器,并充分利用不同负荷之间的互补性,从而提升主变压器的负荷均衡性,优化设备利用率。110 kV 及以下电网多采用母线分段、主变分列运行,负荷潮流呈辐射型,因此下层电网采用更加均衡的负荷分配方案也能让上层电网的负荷分布更加均衡,有利于提高电网整体运行稳定性。

2 变电站出线负荷的相关性评价指标

变电站出线负荷的分布具有明显的时间和空间特征。受用户用电习惯的影响,不同线路的负荷曲线可能存在较高的相似性(即负荷变化趋势相近),也可能具有互补性(即在不同时间段负荷变化呈现相反趋势)。为了优化变电站主变压器的负荷分配,需要对站内各出线负荷的相关性进行定量分析,识别相似线路和互补线路,从而在优化方案中避免高相似线路集中接入同一主变压器,同时优先考虑互补线路的联合分配。

在分布式电源快速发展后,低压侧可承担的最大负荷容量是分布式电源发电功率 S_D 与主变压器容量 S_T 之和(如图 4 所示),因此可承担更多负荷。目前,110 kV 主变压器的 10 kV 出线多为 8~14 条,35 kV 主变压器的 10 kV 出线多为 4 条以上,未来可承载更多线路。受 10 kV 出线供电范围的限制,这些负荷的地理位置往往不超过 30 km,因此具有很强的相关性。

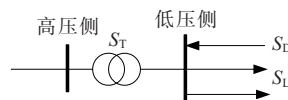


图 4 分布式电源接入主变压器的示意

Figure 4 Distributed power source connected to a main transformer

2.1 负荷相似性-皮尔逊相关系数

皮尔逊相关系数是一个无量纲指数^[19],它不受数列大小的影响,对任何变量的线性转换都是不变的,常被用来评估两个变量间局部对齐特征的相关性^[20]。负荷相似性可以通过皮尔逊相关系数进行评估,其计算公式为

$$P_{(x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_s} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{N_s} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中, $P_{(x,y)}$ 为线路 x 和 y 之间的皮尔逊相关系数; x_i 、 y_i 分别为 i 时刻线路 x 和 y 的负荷值; \bar{x} 、 \bar{y} 为数列期望值(本文分别取其为:在研究范围内的线路 x 和 y 的平均负荷); N_s 为序列长度。

相比较全时间段的线路间负荷的相关性,本文更在意变电站在高峰负荷和尖峰负荷时的线路间负荷的相关性。因此,本文选择研究范围包括但不限于最大负荷日或其所在月份,数据选取考虑变电站总负荷最大的 N_s 个时间点的数据进行分析。

$P_{(x,y)}$ 的值介于 $[-1, +1]$,可用于衡量两线路负荷间的相似关系:当 $P_{(x,y)} \geq 0.8$ 时,两线路的负荷变化具有极强相似性;当 $0.6 \leq P_{(x,y)} < 0.8$ 时,两线路的负荷变化具有强相似性;当 $0.5 \leq P_{(x,y)} < 0.6$ 时,两线路的负荷变化具有中等相似性;当 $0 \leq P_{(x,y)} < 0.5$ 时,两线路的负荷变化是弱相似或极弱相似;当 $P_{(x,y)} < 0$ 时,两线路负荷可能存在一定的互补特性,其互补强弱由负荷互补系数作判断。

2.2 负荷互补性-Kendall相关系数

Kendall相关系数常被用来评估新能源的互补性^[21-22],其能从概率上揭示数据间的趋势变化的互补性,却忽略了数据变化的幅值互补性。文献^[23]提出了归一化的新能源实时出力变化的互补率,并被文献采用^[24]。虽然本文也非常关注线路负荷的变化,但相比数据的实时变化量,本文更加关注数据与期望值的变化量。因此,负荷互补性表示两条线路在不同时间段内负荷变化的互补程度,可采用两线路 x 和 y 间的负荷互补系数 $\beta_{(x,y)}$ 进行量化,其计算公式为

$$\beta_{(x,y)} = 1 - \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \frac{|x_i - \bar{x} + y_i - \bar{y}|}{|x_i - \bar{x}| + |y_i - \bar{y}|} \quad (2)$$

式中, $\beta_{(x,y)}$ 值介于 $[0, 1]$ 之间,其值越大表示两线路间的负荷互补性越好,反之,越差;当 $\beta_{(x,y)} \geq 0.5$ 时,称两线路为互补线路,适合接入同一主变压器。

通过上述皮尔逊相关系数和负荷互补系数的计算,能够准确判断线路间的负荷关系,并可在此基础上发现变电站中存在互补线路和相似线路,这将为后续主变压器负荷分配的进一步优化提供重要的基础和必要条件。

3 基于线间相关性的变电站主变压器负荷优化分配建模与求解

变电站负荷分配方案还应以尽量降低主变压器的峰谷差,减少负荷曲线的波动性,均衡主变压器间的负荷等为目的。本节将以线路间的相似性和互补性为基础,构建基于线间相关性的变电站主变压器负荷优化分配模型,并给出相应的求解方法。

3.1 变电站负荷优化分配的主要衡量指标

为了实现变电站主变压器的合理负荷分配,需要综合考虑以下3个核心指标。

3.1.1 负载率指标

主变压器的负载率指标 k_i 反映主变压器的负载水平,本文综合考虑了主变压器的最大负载率和平均负载率,计算公式为

$$k_{i1} = r_{11} \frac{P_{iMax}}{S_{iN}} + r_{12} \frac{P_{iAvg}}{S_{iN}} \quad (3)$$

式中, k_{i1} 为主变压器 i 的负载率指标; r_{11} 、 r_{12} 均为权重系数,均介于 $[0, 1]$,一般可以取均值0.5,也可以视评价的侧重点取不同的值,且 $r_{11} + r_{12} = 1$; P_{iMax} 为主变压器 i 在观测时间内的最大负荷; P_{iAvg} 为主变压器 i 在观测时间内的平均负荷; S_{iN} 为变压器 i 的变电容。 k_{i1} 值介于 $[0, 1]$, k_{i1} 越大,表明主变压器 i 的负载越重,反之则负载越轻。

对于有 N_T 台主变压器的变电站,其负载率指标 k_1 用其中负载最重的主变压器来衡量,即

$$k_1 = \max_{i=1,2,\dots,N_T} k_{i1} \quad (4)$$

k_1 越大表明变电站的负载越重,或因负载分配不均衡导致个别主变压器负载较重。反之, k_1 越小,表明变电站的负载越轻。各主变压器间的负荷分配越均衡, k_1 也就会越小。

3.1.2 负荷曲线平坦度指标 k_2

主变压器的负荷曲线平坦度指标 k_2 用来衡量主变压器的负荷波动程度,本文采用主变压器的平均负荷率和最小负荷率来衡量负荷曲线的平坦度,计算公式为

$$k_{i2} = r_{21} \frac{P_{iAvg}}{P_{iMax}} + r_{22} \frac{P_{iMin}}{P_{iMax}} \quad (5)$$

式中, k_{i2} 为主变压器 i 的负荷曲线平坦度指标; r_{21} 、 r_{22} 为权重系数, 与 r_{11} 和 r_{12} 的选取方法类似, 均介于 $[0, 1]$, 且 $r_{21} + r_{22} = 1$; P_{iMin} 为观测时间内主变压器 i 的最小负荷。 k_{i2} 越大(越接近 1), 表明主变压器 i 的负荷曲线越平坦; 反之, k_{i2} 越小(越接近 0), 则主变压器 i 的负荷曲线越不均衡。

对于有 N_T 台主变压器的变电站, 其负荷曲线平坦度指标 k_2 用平坦度最小的主变压器来衡量, 即

$$k_2 = \min_{i=1,2,\dots,N_T} k_{i2} \quad (6)$$

k_2 越大, 表明各主变压器的负荷曲线越平坦; 反之, 则表明存在个别主变压器的负荷波动较大, 即可能变电站的负荷分配并不合理。

3.1.3 主变压器间的负荷平衡度指标 k_3

主变压器相互之间的负荷平衡度指标 k_3 评估各主变压器间的负载均衡性, 本文采用主变压器间的瞬时负载率差额与其最大负载率差额来表征, 计算公式为

$$p_{ij} = r_{31} \frac{1}{N_c} \sum_{\tau=1}^{N_c} \left| \frac{P_{i\tau}}{S_{iN}} - \frac{P_{j\tau}}{S_{jN}} \right| + r_{32} \left| \frac{P_{iMax}}{S_{iN}} - \frac{P_{jMax}}{S_{jN}} \right| \quad (7)$$

式中, p_{ij} 为主变压器 i 和 j 之间的平衡度指标; r_{31} 、 r_{32} 为权重系数, 与 r_{11} 和 r_{12} 的选取方法类似, 均介于 $[0, 1]$, 且 $r_{31} + r_{32} = 1$; $P_{i\tau}$ 、 $P_{j\tau}$ 分别为主变压器 i 和 j 在 τ 时刻的负荷; S_{jN} 、 P_{jMax} 分别为主变压器 j 的变电容量和最大负荷; N_c 为总采样次数, 若数据每隔 15 min 采样一次, 则一天的采样次数为 96 次。 p_{ij} 越小, 表明主变压器 i 和 j 越均衡; 反之, 两者的差距越大。

对于有 N_T 台主变压器的变电站, 变电站的负荷平衡度指标 k_3 用差额最大的两台主变压器的平衡度表示, 即

$$k_3 = \max_{\substack{i=1,2,\dots,N_T-1 \\ j=2,3,\dots,N_T}} p_{ij} \quad (8)$$

k_3 越小, 表明变电站的主变压器间的负荷分配越均衡; 反之, 则负荷分配越不均衡。

3.2 变电站负荷分配的选线数学模型

变电站负荷分配问题首先是主变压器选线问题, 本文引入选线矩阵 $H = [H_{it}]_{N_L \times N_L}$ 来描述由 N_T 台主变压器向 N_L 条线路供电的场景, 即

$$\sum_{i=1}^{N_T} H_{it} = 1, \forall l \in \{1, 2, \dots, N_L\} \quad (9)$$

式中, 选线矩阵 H 为 0-1 矩阵, $H_{it} = 1$ 表示线路 l 接入主变压器 t ; $H_{it} = 0$ 表示线路 l 不接入主变压器 t ; 由于每条线路只能分配给一台主变压器, H 的每列之

和均为 1。

该模型的约束条件如下。

1) 重要负荷的双回路供电约束, 即对于重要负荷的双回路应接入不同主变压器:

$$(H_{ix} + H_{iz}) \cdot C_{xz} \leq 1 \quad (10)$$

式中, $C = [C_{xz}]_{N_L \times N_L}$ 为稀疏矩阵。只有当两条不同线路 x 、 z 向同一用户供电时, $C_{xz} = 1$; 否则, $C_{xz} = 0$ 。

2) 间隔优化约束, 即每台主变压器分配的负荷数不能超过它的总间隔数, 即

$$\sum_{l=1}^{N_L} H_{il} \leq N_i, \forall t \in \{1, 2, \dots, N_T\} \quad (11)$$

式中, N_i 为主变压器 t 的负荷出线的总间隔数。

3) 主变压器负载能力约束, 即主变压器的负荷由所选线路的总负荷确定, 即

$$P_{it} = \sum_{l=1}^{N_L} H_{il} P_{lt} \quad (12)$$

式中, P_{it} 为主变压器 t 在 τ 时刻的总负荷; P_{lt} 为线路 l 在 τ 时刻的负荷。

3.3 变电站负荷分配的优化数学模型

变电站负荷优化分配是对各种主变选线问题的优化评价, 因此该问题的决策变量即为上述选线矩阵 H , 需满足式(9)~(12)的约束。此外, 本文设定变电站负荷优化分配的目标是降低变电站总体负载率水平 k_1 和主变压器间的不平衡度 k_3 , 并提升主变压器负荷的平坦度 k_2 , 目标函数为

$$\min F = \frac{\lambda_1 k_1 + \lambda_2 k_3}{k_2} \quad (13)$$

式中, λ_1 、 λ_2 为权重系数, 均介于 $[0, 1]$, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

负荷优化分配时, 各主变压器负荷不超过所规定的最大值约束, 即

$$P_{iMax} \leq K_{iMax} S_{iN} \quad (14)$$

式中, K_{iMax} 为主变压器 i 所允许的最大负载率。

此外, 主变压器载荷的均衡性, 不仅表现在总负荷的平衡性, 其所承担的负荷线路数目也要尽量均衡, 即

$$\left\lfloor \frac{N_L}{N_T} \right\rfloor \leq \sum_{i=1}^{N_L} H_{il} \leq \left\lceil \frac{N_L}{N_T} \right\rceil \quad (15)$$

式中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 、 $\lceil \cdot \rceil$ 分别为向下和向上取整符号。

本文的研究对象为实际运行中的变电站, 通过对其低压侧出线间隔的重组实现对主变负荷的优化分配。由于 110 kV 和 35 kV 变电站是最接近用电负荷的变电站, 因此是本文的重点研究对象。此外, 本文 10 kV 馈线的负荷数据取自主变出线端, 不考虑馈线分支线上的负荷分布。本文方法适用于

含有风光储等新能源接入的变电站,其接入方式可以是 10 kV 专线(按负的负荷处理,如图 4 所示)或者以分布式电源形式接入 10 kV 馈线分支线中(取馈线首端的综合负荷)。

110 kV 及以下电网采用分层分区供电,网络呈辐射型,潮流由负荷决定。此外,在进行电网规划时,主变压器满载运行的可能性就已经被充分考虑。因此,只要主变压器不过载,就不会存在其他运行问题,也无需校核系统的潮流约束。

3.4 变电站间隔优化问题的求解方法

变电站间隔优化问题属于非线性、非凸的整数规划问题,由于变电站的负荷出线数量有限,110 kV 变电站的出线往往在 10~16 条之间,220 kV 以上变电站的低压侧出线数量往往更少。因此,本文分别采用枚举法和遗传算法进行求解。

3.4.1 捆绑降维方法

首先对部分线路进行捆绑降维,具体方法为:依据皮尔逊相关系数 $P_{(x,y)}$,将相似度高的线路捆绑分析,分别接至不同主变压器;依据互补系数 $\beta_{(x,y)}$,将互补度高的线路捆绑,接至同一主变压器。

当线路 x 和线路 y 为相似线路并捆绑分析时,任意主变压器最多只能选择其中一条接入,即

$$H_{ix} + H_{iy} \leq 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, N_T\} \quad (16)$$

对于只有两台主变压器的变电站,式(16)取等式。需要注意的是,式(16)只对相似线路数较少且两条线路负荷大小相近的情况适用。当线路存在 3 条以上强相似线路($P_{(x,y)} \geq 0.8$)时,由于线路聚合后的负荷特性会发生变化,它们之间的相关性也会发生变化,上述方法将不再适用。

当线路 x 和线路 y 为互补线路并捆绑计算时,它们的选择总是保持一致,即

$$H_{ix} = H_{iy}, \forall i \in \{1, 2, \dots, N_T\} \quad (17)$$

同样,式(17)只对互补线路数较少的情况适用。当一条线路存在 3 条以上互补线路($\beta_{(x,y)} \geq 0.5$)时,式(17)将不再适用。

3.4.2 枚举法

对于出线数量较少(如 25 回路以内)的变电站,采用枚举法穷举所有可行方案,确保获得全局最优解。枚举法可以用 MATLAB 程序的 nchoosek 函数生成变压器候选线路的可能组合,逐一判断可行性和计算目标函数,并选出最优的组合。

变电站负荷优化配置模型采用枚举法的求解步骤:

1) 按照式(2)计算负荷出线的皮尔逊相关系数和互补系数,并按照式(16)、(17)对相似线路和互补线路进行捆绑降维;

2) 利用 nchoosek 函数生成可能的线路组合方案,剔除不满足式(9)~(15)的组合,并计算所有可行方案的目标函数;

3) 选出目标函数最小的方案作为主变压器负荷分配的目标方案,并根据目标方案确定候选置换线路,再根据三大指标或目标函数确定线路的置换顺序。

变电站负荷分配优选方案的枚举法求解流程如图 5 所示。

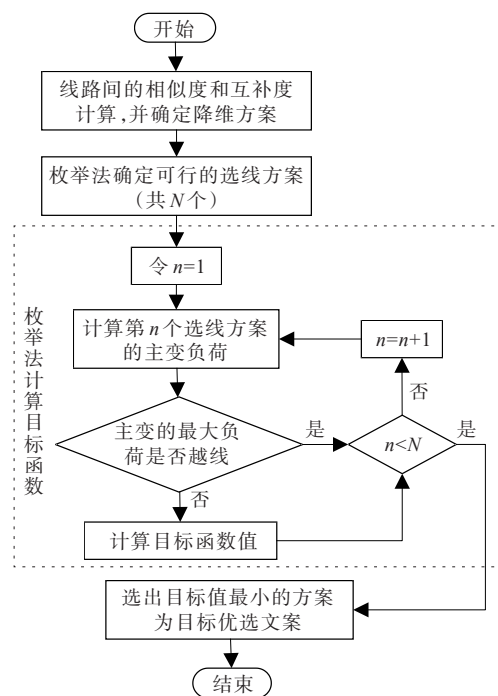


图 5 变电站负荷分配间隔优化方案的枚举法求解流程

Figure 5 Solution process of enumeration method for interval optimization scheme of substation load distribution

3.4.3 遗传算法

对于部分含有 3 台以上主变压器且出线数量较多(如超过 25 回路)的变电站,可采用遗传算法或粒子群算法进行快速搜索以提高计算效率。采用遗传算法进行变电站负荷分配优化方案求解的步骤如下。

1) 染色体编码和初始化。当变压器的台数为 N_T 、线路数为 N_L 时,染色体的编码为 $N_T \times N_L$ 维度的 0-1 矩阵,矩阵中的每一列为一个基因单位,与选线矩阵 H 相对应。对于某条染色体 B ,共有 N_L 个基因,每个基因代表线路接入主变压器的方案。

$B_j = [b_{1j} \ b_{2j} \ \dots \ b_{N_T j}]^T$ 为其第 j 个基因。当 $b_{ij} = 1$ 时,表示第 j 条线路接入第 i 台主变压器;当 $b_{ij} = 0$ 时,表示第 j 条线路不接入第 i 台主变压器。对于任一条线路有且只有一台主变压器可以接入,因此,初始化染色体的每条基因需满足 $\sum_{i=1}^{N_T} b_{ij} = 1$ 。

2) 适应度函数检测。按照染色体编码计算各台主变压器的负载率、负荷曲线平坦度指标和主变压器间的负荷平衡度指标,并按照式(13)计算目标函数。当染色体满足式(14)所要求的主变压器容量限额要求和式(15)要求的线路数目相对均衡约束时,适应度函数取 $F_{it} = 1/F$; 否则, $F_{it} = 0$ 。

3) 选择算子。按照 F_{it} 适应度函数选择染色体,比如这一代染色体的平均适应度为 \bar{F}_{it} ,则染色体 B 被选中的概率为 $\frac{F_{itB}}{\bar{F}_{it}}$, F_{itB} 为染色体 B 的适应度。

4) 交叉算子。按照设定的交叉率进行染色体的交叉计算,交叉算子分为单个基因交叉互换(记为 C1)和双亲样本局部染色体整体互换(记为 C2)。两种交叉方法都由 $1 \sim N_L$ 的随机数确定染色体交叉的位置。比如,染色体 B1 和 B2 采用 C1 方式在位置 l 进行交叉时, B1 染色体的第 l 个基因与 B2 染色体的第 l 个基因进行互换。而采用 C2 方式进行染色体的交叉互换时, B1 的第 $l \sim N_L$ 列基因与 B2 的相应部分进行整体互换。

5) 变异算子。变异算子按照设定的概率进行,只在同一个基因内部进行。由于每条基因需满足 $\sum_{i=1}^{N_T} b_{ij} = 1$, 基因变异可以理解为将被选基因原来编码为 1 的位置设置为 0,而在剩余 $(N_T - 1)$ 个初值为 0 的位置任选一个,将其编码置为 1。

4 算例分析

对华东地区某 110 kV 变电站和某 35 kV 变电站的负荷进行计算分析,并提出其负荷优化分配方案。该地区分布式光伏发展迅速,部分线路负荷曲线在 12:00—14:00 出现下移。

4.1 某 110 kV 变电站

该变电站拥有 2 台 50 MV·A 的主变压器, 24 回 10 kV 负荷出线, 每台主变压器的 10 kV 出线的总间隔数为 14 个。目前, 每台主变压器各承担 12 回负荷出线。2023 年最大负荷日, 变电站共承担 51.9 MW 负荷, 110 kV 主变压器的负荷及负荷差曲线分别如图 6、7 所示。

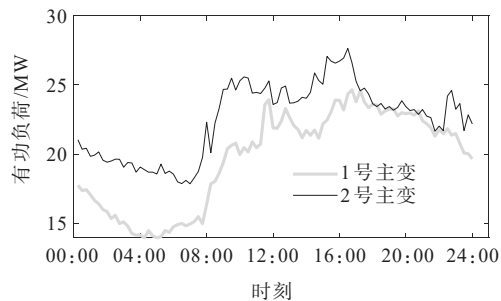


图 6 110 kV 主变压器的负荷曲线(优化前)

Figure 6 Load curves of main transformers with 110 kV (before optimization)

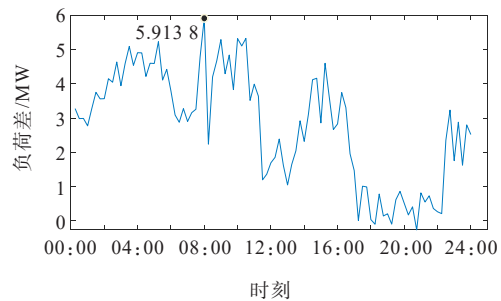


图 7 110 kV 主变压器的负荷差曲线(优化前)

Figure 7 Load difference curves of main transformers with 110 kV (before optimization)

由图 6 可知, 两台主变压器的曲线变化规律基本相似, 局部存在互补, 但两者所承担的负荷明显不均衡: 1 号主变压器的最大负荷为 24.6 MW, 负载率为 49.2%; 2 号主变压器的最大负荷为 27.6 MW, 负载率为 55.2%。由图 7 负荷差曲线可知, 两台主变压器最大负荷差为 5.91 MW, 是主变压器容量的 11.8%。下文将对其 10 kV 负荷出线进行相关性分析, 并判断该变电站的负荷是否具备可优化性。

变电站的主变低压侧负荷线路间的皮尔逊相关系数的热力分布如图 8 所示。其中, 编号前 12 回线路分别接入 1 号主变压器, 后 12 回线路分别接入 2 号主变压器。

线路间的皮尔逊相关系数表明, 变电站所供线路有 19 回存在极强的相似性 ($P_{(x,y)} \geq 0.8$)。因此, 这些线路存在集中接入同一主变压器的趋势。图 9 为部分相似度大于 0.9 的线路, 其中除线路 9 以外, 其他 4 回线路均接至 2 号主变压器, 这显然不合理。

图 10 为线路间的负荷互补系数的热力分布图。由图 10 可知, 本算例存在互补性的线路 ($\beta_{(x,y)} \geq 0.5$) 较少, 一共 5 组, 线间互补系数最大值为 0.64。

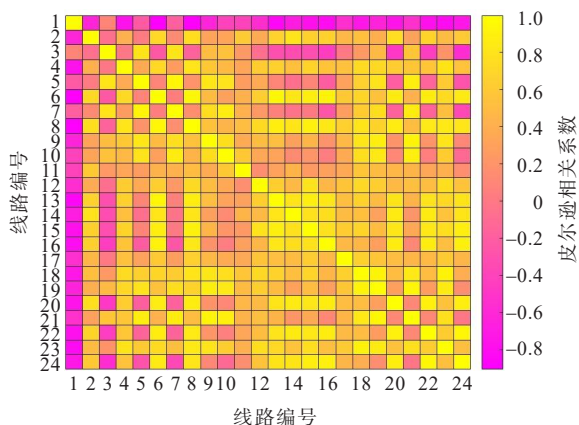


图 8 线路间的皮尔逊相关系数的热力图

Figure 8 Hot map of inter-line Pearson correlation coefficient

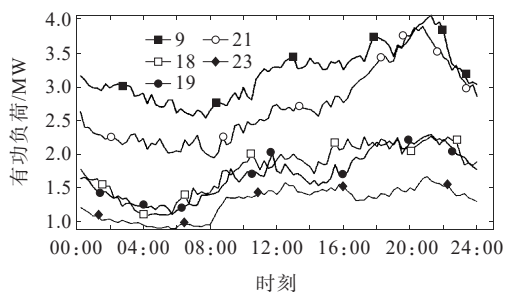


图 9 部分相似度极强线路的负荷曲线

Figure 9 Load curves for partial lines with strong similarity

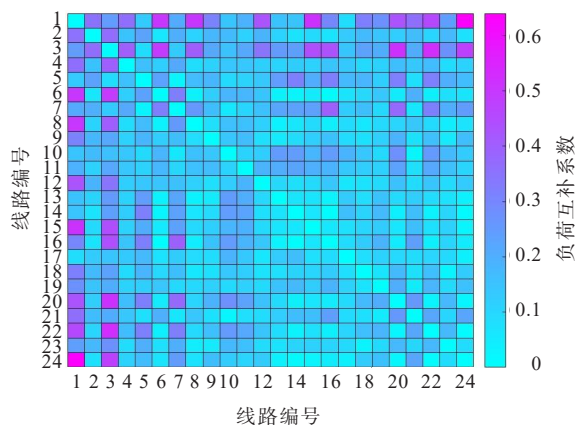


图 10 线路间的负荷互补系数的热力分布

Figure 10 Hot map of inter-line load complementarity coefficient

图 11 为线路 1 和其互补线路的负荷曲线。由图 11 可见, 08:00—18:00 为线路 1 的用电低谷时段, 却为线路 6、15、24 的用电高峰时段; 22:00—次日 08:00 为线路 1 的用电高峰时段, 却是其余 3 回线路的用电低谷时段, 存在互补性。线路 1 和与其互补度最高的两回线路(24 和 15)并未接至同一主变。

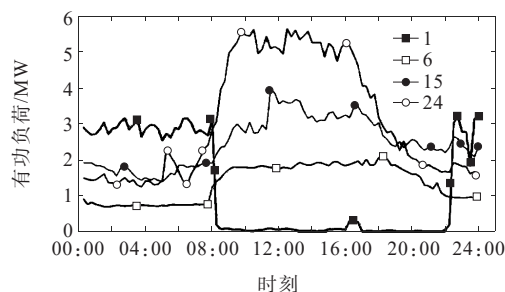


图 11 线路 1 与其互补线路的负荷曲线

Figure 11 Load curves of line 1 and its complementary lines

线路 3 和其互补线路的负荷曲线如图 12 所示。08:00—18:00 为线路 22 和 20 的用电高峰时段, 却为线路 3 的用电低谷时段; 20:00—次日 06:00 为线路 22 和 20 的用电低谷时段, 却为线路 3 的用电高峰时段, 存在互补性。线路 3 和其互补线路 20 和 22 并未接至同一主变。

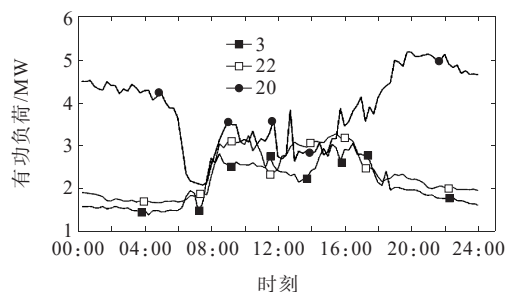


图 12 线路 3 与其互补线路的负荷曲线

Figure 12 Load curves of line 3 and its complementary lines

由上分析可知, 本算例相似线路较多, 但并未均匀分布在两主变压器中。与此同时, 存在互补性较高的线路并未接至同一主变压器。因此, 初步判断本例的负荷分配方案是可以再优化的。

考虑本算例的线路数只有 24 条, 相似性极强的线路却多达 19 条, 而存在互补性的线路相对较少。此外, 多条线路的聚合会改变总负荷的分布, 其相关性也会发生变化。比如, 线路 1 与线路 6、15 的聚合负荷的互补度提升至 0.72, 高于线路 1 与线路 24 的互补度, 如表 1 所示。

表 1 线路 1 与其互补线路的互补度

Table 1 Complementarity between line 1 and its complementary lines

线路	与线路 1 的互补度
24	0.64
6	0.50
15	0.51
6 与 15 的聚合	0.72

综上所述,本算例将不利用线路间的相关性对问题进行降维,直接由枚举法进行求解。

本算例目标函数和各类指标的权重系数均取 0.5。经计算,最优化方案为由 2 号主变压器供电的线路 14、18、19、21 和 24 等 5 条线路,置换由 1 号主变压器供电的线路 5、8、9、10 和 11。优化后的变电站的各主变压器所承担的负荷曲线如图 13 所示。与初始方案(图 6)相比,主变压器最大负荷由 27.6 MW 下降至 26 MW,主变压器所承担的最小负荷由 14 MW 提升至 16.1 MW,主变负荷的平坦度由 0.68 提高至 0.72。两台主变压器间的不平衡度由 0.06 降至 0.007,不平衡度下降 88.3%,所承担的负荷基本平衡。

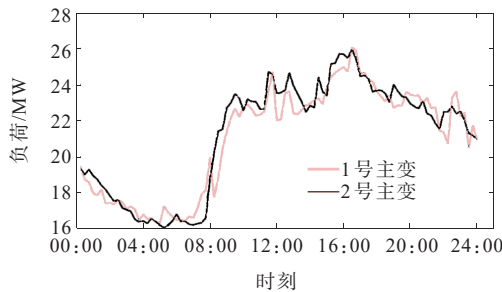


图 13 110 kV 主变压器的负荷曲线图(优化后)
Figure 13 Load curves of main transformers with 110 kV (after optimization)

由于 110 kV 变电站的 10 kV 母线采用单母分段接线,线路间隔的互换除了必要的倒闸操作外,还可能涉及现场施工等问题。因此,有时候难以一步到位实现所有间隔的互换,需要设计一个合理的过渡方案。本算例在过渡方案设计时,考虑线路间的相关性,让互补性强的线路优先互换。

表 2 为候选线路与 1 号主变压器负荷的互补度和相似度。由此可见,线路 24 与之的互补度最高且负荷最大,应优先考虑进行置换。

表 3 为候选线路与 2 号主变压器负荷的相关度分析结果。可知,2 号主变压器与候选线路的互补度均较低,而线路 8 与 2 号主变压器的负荷相似性

极高,不应优先考虑置换。由于初始状态 1 号主变压器的负载相对较轻,而 2 号主变压器的负载较重,可以选择负载较轻的线路进行置换。此外,也可以由目标函数值确定置换的线路次序。

表 2 候选线路与 1 号主变压器负荷的相关性

Table 2 Correlation between candidate lines and No.1 main transformer load

线路	与 1 号主变压器 负荷的互补度	与 1 号主变压器 负荷的相似度	最大负荷/ MW
14	0.060	0.319	0.725
18	0.035	0.819	2.265
19	0.019	0.882	2.289
21	0.016	0.873	3.890
24	0.286	0.057	5.651

表 3 候选线路与 2 号主变压器负荷的相关性

Table 3 Correlation between candidate lines and No.2 main transformer load

线路	与 2 号主变压器 负荷的互补度	与 2 号主变压器 负荷的相似度	最大负荷/ MW
5	0.080	0.113	1.402
8	0.015	0.967	2.726
9	0.065	0.491	4.053
10	0.057	0.300	1.282
11	0.045	0.396	1.988

表 4 给出了过渡时期的 3 种间隔置换方案,相对应的负荷曲线如图 14 所示。其中,方案 1 的综合指标最好,方案 2 的负载率最低,方案 3 两台主变压器的负载最平衡。工程上可以再综合考虑经济性、技术的可行性等进行选择,并决定是否需要继续进行后续的间隔置换。

表 4 过渡时期的负荷线路置换方案

Table 4 Load line replacement scheme during transition period

方案	F	k_1	k_2	k_3
方案 1(互换 9 和 21)	0.363	0.478	0.695	0.026
方案 2(互换 5 和 24)	0.399	0.474	0.641	0.0376
方案 3(互换 9 和 14)	0.374	0.478	0.668	0.021

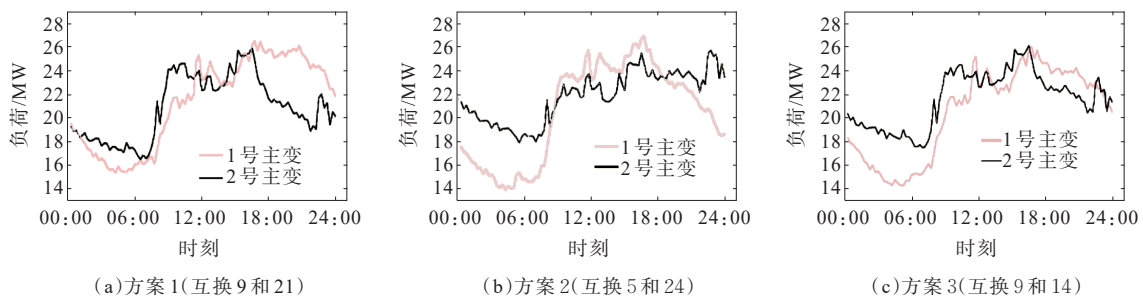


图 14 不同置换方案下的负荷曲线

Figure 14 Load curve under different permutation schemes

4.2 某 35 kV 变电站

该变电站共 2 台主变压器, 5 回 10 kV 负荷出线, 主变的容量为 10 MV·A。其中, 1 号主变向三回负荷线路供电, 但负载率仍低于只供两回线路的 2 号主变。变电站最大日的负荷曲线如图 15 所示。

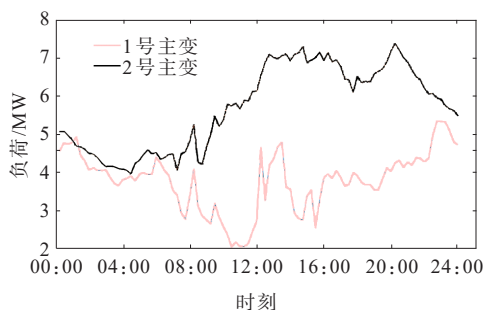


图 15 35 kV 主变的负荷曲线(初始)

Figure 15 Load curves of main transformers with 35 kV (initial stage)

本算例由于线路数量少, 通过枚举法进行求解后可得最优方案是将线路 1 与线路 5 相置换, 置换后的负荷曲线如图 16 所示。

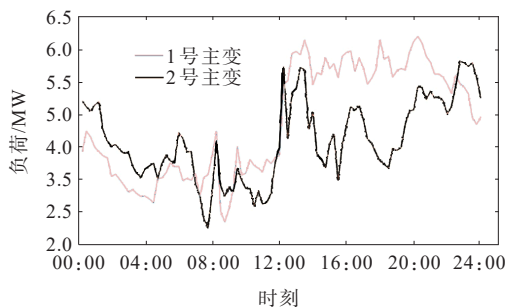


图 16 35 kV 主变的负荷曲线(优化后)

Figure 16 Load curves of main transformers with 35 kV (after optimization)

与初始方案相比, 通过简单的间隔置换, 两台主变所承担的负荷更加均衡, 主变承担的最大负荷负载率由初始的 73.7% 下降至 62.1%, 两个主变的不平衡度由 0.197 下降至 0.05, 不平衡度下降 74.6%, 综合性能得到改善。

优化均衡后主变压器最大负荷下降、最小负荷提升且负荷更加平衡, 这将有效降低主变压器的过载风险, 减少设备损耗, 延长设备使用寿命, 进而提升电网运行的稳定性。同时, 负荷曲线的优化使得电网在不同时段的负荷分配更加合理, 减少了因负荷波动过大导致的能源浪费, 提高了电网运行的经济性。

5 结语

针对配电网部分变电站存在负荷分配不合理、设备利用不均衡的问题, 本文提出了一种基于线间相关性平衡的变电站负荷优化分配方法, 通过研究主要得到以下结论:

1) 利用皮尔逊相关系数与负荷互补系数, 可量化评估变电站主变低压侧出线负荷的相似性与互补性, 精准判断出线相关性及互补潜力, 为负荷优化分配提供依据;

2) 创新性地提出了计及主变压器负载率、负荷平坦度和负荷均衡性的多目标优化模型, 并采用枚举法或遗传算法实现高效求解;

3) 华东地区典型 110/35 kV 变电站实例分析表明: 该方法能使主变压器日负载率标准差降低 42.7%, 峰谷差率缩减 18.3%, 主变间的不平衡指标下降 74.6% 以上, 有效提升了变电站负荷均衡性与设备利用率;

4) 在实际工程里, 可依据候选置换线路与主变负荷数据相关性或优化指标确定置换顺序, 形成过渡方案, 该方案具备较强工程可操作性与应用价值。

在未来研究中, 将结合变电站出线负荷精准预测以及实际应用中可能遇到的线路传输功率限制、设备检修计划等约束进行深入研究。

参考文献:

- [1] 任恒宇, 韩冬, 任曦骏, 等. 基于时变价格弹性矩阵的深谷电价多目标定价策略[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 958-967.
REN Hengyu, HAN Dong, REN Xijun, et al. Multi-objective deep valley electricity pricing model based on time-varying price elasticity matrix[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 958-967.
- [2] 青灿, 行舟, 智勇, 等. 基于 SVM 的变电站母线日净负荷曲线大数据识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 125-131.
QING Can, XING Zhou, ZHI Yong, et al. Big data recognition method for daily net load curve of substation bus based on SVM[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 125-131.
- [3] 王轩, 唐巍, 张志刚, 等. 基于可调节潜力评估的配电网-植物工厂主从博弈协同优化调度[J]. 供用电, 2025, 42(12): 23-32+40.
WANG Xuan, TANG Wei, ZHANG Zhigang, et al.

- Stackelberg game collaborative optimal scheduling of distribution network-plant factory based on adjustable potential assessment[J]. *Distribution & Utilization*, 2025, 42(12): 23-32+40.
- [4] 肖怡康, 牟玉亭, 潘博, 等. 面向电动汽车聚合商参与电能量-备用市场的分色电价设计[J]. *电力工程技术*, 2025, 44(6): 13-24.
XIAO Yikang, MOU Yuting, PAN Bo, et al. Design of color-coded pricing for electric vehicle aggregators participating in energy-reserve markets[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(6): 13-24.
- [5] 朱琛, 王明茜, 张阳, 等. 夏季尖峰电价启动条件优化研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(3): 96-103.
ZHU Chen, WANG Mingxi, ZHANG Yang, et al. Research on optimizing configuration of critical peak pricing based demand response[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(3): 96-103.
- [6] 高明, 曾平良, 冯永朝. 新型电力系统中的虚拟电厂研究综述[J]. *电力工程技术*, 2025, 44(6): 143-154.
GAO Ming, ZENG Pingliang, FENG Yongchao. Review of virtual power plant in new power system[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(6): 143-154.
- [7] 刘海丞, 王旭阳, 李红军, 等. 面向分布式光伏消纳的需求侧灵活资源与输配协同规划[J]. *电力建设*, 2025, 46(10): 58-72.
LIU Haicheng, WANG Xuyang, LI Hongjun, et al. Multiple flexible resources and transmission and distribution collaborative planning for distributed PV consumption[J]. *Electric Power Construction*, 2025, 46(10): 58-72.
- [8] 侯朗博, 孙昊, 陈衡, 等. 基于需求响应与 Stackelberg 博弈的小区综合能源系统优化调度[J]. *发电技术*, 2025, 46(2): 219-230.
HOU Langbo, SUN Hao, CHEN Heng, et al. Optimization scheduling of integrated energy systems in communities based on demand response and Stackelberg game[J]. *Power Generation Technology*, 2025, 46(2): 219-230.
- [9] 于雷, 姚俊伟, 杨金龙. 小样本下风光储耦合系统的新能源消纳能力概率评估方法[J]. *智慧电力*, 2024, 52(10): 9-15.
YU Lei, YAO Junwei, YANG Jinlong. Probabilistic evaluation method for renewable energy integration capability for wind-photovoltaic-storage coupling system with small sample[J]. *Smart Power*, 2024, 52(10): 9-15.
- [10] 陈说, 许议勋, 田雨, 等. 考虑需求响应和废弃物分类处理的微电网多目标优化配置模型[J]. *电力科学与技术学报*, 2025, 40(1): 199-210.
CHEN Shuo, XU Yixun, TIAN Yu, et al. Multi-objective optimal configuration model of microgrid considering demand response and waste classification treatment[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2025, 40(1): 199-210.
- [11] 王强钢, 郭莹霏, 莫复雪, 等. 计及变压器短期急救负载的城市高压配电网负荷优化分配[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(19): 106-115.
WANG Qianggang, GUO Yingfei, MO Fuxue, et al. Optimal load distribution of urban high-voltage distribution network considering short-term emergency loading of transformer[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(19): 106-115.
- [12] 章立宗, 吴磊, 蒋玮, 等. 考虑二次转供的配电网负荷转供方案 多目标优选技术[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2321-2327.
ZHANG Lizong, WU Lei, JIANG Wei, et al. Research on distribution network load transfer scheme based on multi-objective optimization considering secondary resale strategy[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2321-2327.
- [13] 计荣荣, 张淦锋, 王梦芝, 等. 基于数据驱动的智能变电站信息高效校验技术[J]. *中国电力*, 2025, 58(1): 100-106.
JI Rongrong, ZHANG Ganfeng, WANG Mengzhi, et al. Data-driven efficient verification technique for smart substations messages[J]. *Electric Power*, 2025, 58(1): 100-106.
- [14] 汪颖, 肖先勇. 城乡配电网电能质量与优质供电技术[J]. *供用电*, 2024, 41(10): 2+1.
WANG Ying, XIAO Xianyong. Power quality and high-quality power supply technology of urban and rural distribution network[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(10): 2+1.
- [15] 李阳, 徐燕龙, 王沼民, 等. 基于重构分解和误差补偿的短期电力负荷双层协同预测[J]. *电网与清洁能源*, 2025, 41(2): 75-83.
LI Yang, XU Yanlong, WANG Zhaomin, et al. Bi-level collaborative short-term power load forecasting based on reconstruction decomposition and error compensation[J]. *Power System and Clean Energy*, 2025, 41(2): 75-83.
- [16] 王炜, 熊蕴, 赵鹏臻, 等. 基于 Q-learning 的集中-分布式形态配电网分层分区及网架规划方法[J]. *发电技术*, 2025, 46(5): 977-985.
WANG Wei, XIONG Yun, ZHAO Pengzhen, et al. Q-learning-based method for distribution layer partitioning and grid planning in hybrid centralized-distributed networks[J]. *Power Generation Technology*, 2025, 46(5): 977-985.
- [17] 杜佩仁, 文福拴, 刘艳茹, 等. 多元用电需求网格分析

- 与“源网荷储”分层分区平衡模型[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(1): 5-10+42.
- DU Peiren, WEN Fushuan, LIU Yanru, et al. Diversified power demand block analysis and "source-network-load-storage" hierarchical partition balance model[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(1): 5-10+42.
- [18] 国家能源局. 配电网规划设计技术导则: DL/T 5729—2023[S]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- National Energy Bureau of the People's Republic of China. The guide for planning and design of distribution network: DL/T 5729—2023[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2023.
- [19] LEE RODGERS J, NICEWANDER W A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient[J]. The American Statistician, 1988, 42(1): 59-66.
- [20] 叶永盛, 徐燕龙, 李阳, 等. 基于相似周和模态分解的融合模型电动汽车负荷预测[J]. 电网技术, 2025, 49(5): 1910-1919.
- YE Yongsheng, XU Yanlong, LI Yang, et al. Electric vehicle load forecasting with fusion model based on similar weeks and mode decomposition[J]. Power System Technology, 2025, 49(5): 1910-1919.
- [21] XU L J, WANG Z W, LIU Y F. The spatial and temporal variation features of wind-Sun complementarity in China [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 154: 138-148.
- [22] REN G R, LIU J Z, WAN J, et al. Investigating the complementarity characteristics of wind and solar power for load matching based on the typical load demand in China[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 778-790.
- [23] 刘永前, 王函, 韩爽, 等. 考虑风光出力波动性的实时互补性评价方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3211-3218.
- LIU Yongqian, WANG Han, HAN Shuang, et al. Real-time complementarity evaluation method for real-time complementarity of wind and solar power considering their volatility[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3211-3218.
- [24] 孟旭瑶, 付立军, 赖心怡, 等. 计及源荷互补特性的“源网荷储一体化项目”优化配置[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 123-131.
- MENG Xuyao, FU Lijun, LAI Xinyi, et al. Optimal configuration of "source-network-load-storage integrated project" considering source-load complementarity characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 123-131.