

# 基于计量数据的新能源汇集升压电网线损计量新方法

任彦辉<sup>1</sup>, 许星煜<sup>1</sup>, 陶海洋<sup>1</sup>, 车博鑫<sup>2</sup>, 宋景龙<sup>1</sup>, 葛鹏举<sup>1</sup>

(1. 国网甘肃省电力公司酒泉供电公司, 甘肃 酒泉 735000;

2. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 新能源汇集升压电网作为新型电力系统的重要组成部分, 因其存在交叉互供现象, 导致现有线损计算不准确。文章以存在交叉互供的新能源汇集升压电网为研究对象, 提出了一种线损精确计算方法。对新能源汇集升压电网的计量数据进行预处理, 通过分析线损和计量数据的关系, 依据光伏出力特性和新能源汇集升压电网的功率方向, 按时间尺度和功率流向对计量数据进行分类, 并在此基础上按时间尺度提出考虑交叉互供的线损计算新方法。根据代表日计量数据分别对现有线损计量方法和新方法线损计算结果进行对比。结果表明, 考虑交叉互供的线损计算新方法能更加准确反映新能源汇集升压电网的线损, 为西北高比例新能源集中接入地区的线损准确计量提供新的方法。

**关键词:** 新能源汇集升压电网; 线损计量新方法; 交叉互供; 时间尺度; 功率流向

**DOI:** 10.19753/j.issn1001-1390.2026.03.010

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)03-0095-09

## A new method of line loss measurement for renewable energy pooled booster power grid based on measurement data

REN Yanhui<sup>1</sup>, XU Xingyu<sup>1</sup>, TAO Haiyang<sup>1</sup>, CHE Boxin<sup>2</sup>, SONG Jinglong<sup>1</sup>, GE Pengju<sup>1</sup>

(1. Jiuquan Power Supply Company, State Grid Gansu Electric Power Co., Ltd., Jiuquan 735000, Gansu, China.

2. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** As an important part of the novel power system, the renewable energy converging and boosting power grid has the phenomenon of cross and mutual supply, which leads to the inaccurate calculation of the existing line loss. In this paper, an accurate calculation method of line loss is proposed for the renewable energy converging and boosting power grid with cross and mutual supply. The measurement data of the renewable energy pooled booster grid is preprocessed. By analyzing the relationship between the line loss and the measurement data, the measurement data are classified according to the time scale and power flow direction based on the photovoltaic output characteristics and the power direction of the renewable energy pooled booster grid. On this basis, a new calculation method of line loss considering cross and mutual supply is proposed according to the time scale. The calculation results of the existing line loss measurement method and the new method are compared according to the representative day measurement data. The results show that the new calculation method considering cross and mutual supply can reflect the line loss more accurately, and provide a new method for the accurate measurement of line loss in the high proportion of renewable energy distribution network in Northwest China.

**Keywords:** renewable energy converging and boosting power grid, new method of line loss measurement, cross and mutual supply, time scale, power flow direction

### 0 引言

近年来,随着光伏、风力等多种分布式电源的大规模接入,传统的配电网正经历着演进,向主动

配电网(administration data network, ADN)迈出关键一步<sup>[1-3]</sup>。主动配电网通过协调控制和管理分布式电源,优化能源供应和需求,提高能源利用效率。而新能源汇集升压电网作为主动配电网的重要组成部分,整合和管理大规模的新能源发电装置,解决新能源并网带来的电网安全性和运行调度

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(62066024); 国网酒泉供电公司科技项目(52270623000D)

等问题。然而,分布式电源的接入也带来了新的挑战,如用户之间交叉互供现象的出现,进一步增加了线损问题的复杂性。

现阶段,国内外关于新能源汇集升压电网的线损计算研究主要聚焦于利用潮流数据计算线损以及线损计算方法的改进。均方根电流法<sup>[4-7]</sup>是线损计算的基本方法,以这种方法为基础产生了平均电流法、最大电流法和等值电阻法<sup>[8]</sup>等计算方法。文献[9]运用了均方根电流法来深入探索并优化了抄表列日的选定时间,这种做法显著减少了负荷变化带来的干扰,进而提高了线损计算结果的精准度。文献[10]在对配网线损误差进行计算设计,运用了等值电阻法,旨在通过简化计算流程来提高最终结果的精确度。文献[11]将分布式电源发电与负荷波动合并为净负荷,结合线路参数不均定义等效负荷分布并通过等面积法求取曲线,再以其为核心输入训练 BP 神经网络模型,精度较高,可很好适配工程应用。文献[12]研究发现传统的潮流计算方法虽然能够确定电网节点瞬时潮流值,但其应用范围有限。因此,研究者们对这一方法进行了改进,提出了基于区间的潮流算法,并利用适当的组合构建了三相区间模型。这种模型在实际应用中能够精确地预测出一定时间范围内电网状态的变化趋势。

然而,尽管这些研究取得了一定进展,但针对计量数据来计算线损的研究相对较少。文献[13]

研究了一种新的线损计算方法,以电量数据为基础,划分日负荷有无功率曲线,然后前推回代法计算日线损值。文献[14]研究表明统计线损率会受到抄表日的影响,抄表日时间选择时需要基于电量数据和“浮动抄表”相关要求,可据此确定出线损率变化情况。新能源汇集升压电网现有的线损计算方法主要通过计算电网首端总电表读数与尾端各光伏电表读数的差值来得到线损。这种方法虽然简单易行,但却忽略了电网功率的实际流向,特别是交叉互供现象的存在。在新能源汇集升压电网中,交叉互供现象尤为常见,它使得电能流动变得复杂,现有的计算方法难以准确反映实际的线损情况。

文章旨在基于交叉互供现象,深入探究并改进新能源汇集升压电网中线损计算的方法。交叉互供现象不仅增加了电网管理的复杂性,还带来了一定的困难,使得当前的线损计算存在不准确性问题,进而影响了线路运行的效率与安全性。通过文章的深入研究,预期能够为新能源汇集升压电网的线损分析提供一套更为精确和有效的解决方案,解决区域共同存在的问题,推动电网的健康发展,为新能源行业的持续进步贡献力量。

### 1 某区域新能源汇集升压电网

文章以某区域新能源汇集升压电网为例,主接线图如图 1 所示。

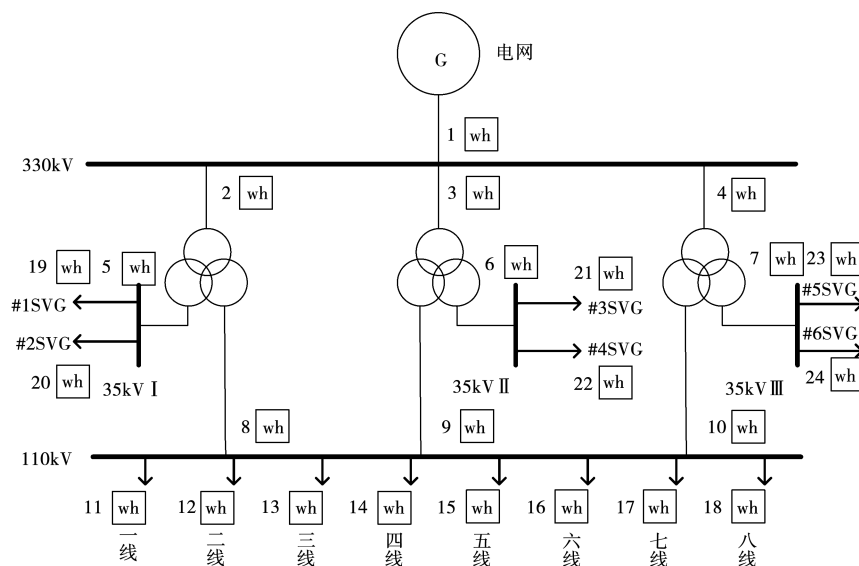


图 1 新能源汇集升压电网主接线图

Fig. 1 Main wiring diagram of renewable energy converging booster grid

该升压电网已接入了八条分布式电源,经 110 kV 母线升压到 330 kV 母线后,送至电网,形成了一个

多层次的电力传输和分配网络。  
计量点分布说明:1 是总电能表,倍率为  $7.92 \times$

$10^6$ ; 2、3、4 分别是 1、2、3 主变高电能表, 倍率为  $7.92 \times 10^6$ ; 5、6、7 分别是 1、2、3 主变低电能表, 倍率为  $1.4 \times 10^6$ ; 8、9、10 分别是 1、2、3 主变中电能表, 倍率为  $2.2 \times 10^6$ ; 11 ~ 18 分别是一线 ~ 八线出线侧电能表, 倍率为  $1.32 \times 10^6$ ; 19 ~ 24 分别是 1 静止无功发生器 (SVG), 2SVG, 3SVG, 4SVG, 5SVG, 6SVG 电能表, 倍率为  $4.2 \times 10^5$ 。

## 2 计量数据预处理

为了对新能源汇集升压电网的线损进行分析, 从数据采集与监控系统 (Supervisory control and data acquisition, SCADA) 数据库收集了新能源汇集升压电网在 2023 年春夏秋冬四个季节的最大负荷数据作为代表日, 分别是 2023 年 3 月 21 日、7 月 16 日、9 月 16 日和 12 月 17 日。每天的计量数据包括电网中各计量点的正向有功和反向有功数据, 每 15 min 为一个单位, 共计 25 856 条数据供分析使用。

历史负荷数据一般来源于 SCADA 数据库。因为一些随机的小干扰或特殊事件的发生, 影响了 SCADA 中的数据的准确性, 使 SCADA 数据库中出现不良数据<sup>[15]</sup>。不良负荷数据一般分为缺失值和异常值两种<sup>[16]</sup>。缺失值一般是由于切负荷、线路检修停电或 SCADA 系统故障产生; 异常值则通常是因为一些突发性的重大事件对电力负荷造成了冲击, 导致负荷异于平常。为了处理这些不良数据, 采用了两种策略: 数据剔除、数据填充。

### 2.1 数据剔除

在数据处理过程中, 副表数据与主表数据具有较高的相似度。基于数据一致性和准确性的考量, 制定了以下规则: 当副表数据与主表数据的差异在主表数据的上下百分之五以内时, 即认为这种差异处于合理误差范围内。在此情况下, 副表数据对整体数据集的贡献相对较小, 因为微小差异可由主表数据覆盖。

为减少数据集的冗余, 提高数据的简洁性和紧凑性, 在合理误差范围内剔除副表数据。合理误差范围的计算公式为:

$$e_n = A \times (1 \pm 0.05) \quad (1)$$

式中:  $A$  为主表数据。

### 2.2 数据填充

当电量数据存在缺失时, 对于其所构建的数据矩阵  $M \in R^{m \times n}$ , 该矩阵因存在数据缺失而不完整。如何从这个不完整的矩阵中推测出其中缺失元素的值, 恢复出原本完整的电量数据, 即为电量数据矩阵补全问题<sup>[17]</sup>。电量数据的补全问题可以总结

为如下优化模型:

$$\begin{cases} \min \|X\| \\ \text{s. t. } X_{i,j} = M_{i,j}, \quad (i,j) \in \Omega \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $X$  是数据补齐之后的矩阵, 其秩为  $\text{rank}(X)$ ;  $\Omega$  为对应于  $M$  中被观测到元素的位置集合, 即若  $M_{i,j}$  非空, 则有  $(i,j) \in \Omega$ ;  $\|X\|$  为  $X$  的核范数, 即矩阵  $X$  的所有奇异值之和:

$$\|X\| = \sum_{k=1}^n \sigma_k(X) \quad (3)$$

采用奇异值阈值算法<sup>[18]</sup> 求解电量数据矩阵补全模型。算法具体步骤如下:

定义矩阵  $X$  的奇异值收缩算子  $D_\tau$ <sup>[19]</sup>

$$D_\tau(X) = U D_\tau(\Sigma) V^T \quad (4)$$

式中:  $D_\tau(\Sigma)$  表示将所有奇异值减去  $\tau$  后, 取其中仍为正数者:

$$D_\tau(\Sigma) = \text{diag}(\{\sigma_i - \tau\}_+) \quad (5)$$

式中:  $\{t\}_+ = \max(0, t)$ ;  $\tau$  为奇异值收缩算子的收缩步长。

显然, 对于矩阵  $X$ , 其奇异值收缩算子  $D_\tau$  的作用是将矩阵  $X$  的所有奇异值减小相同的值  $\tau$  以后, 恢复得到新的矩阵。从而, 可以得到求解低秩矩阵补全问题的迭代序列:

$$\begin{cases} X^k = D_\tau(Y^{k-1}) \\ Y^k = Y^{k-1} + \delta_k P_\Omega(M - X^k) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Y$  为迭代过程中的中间矩阵;  $Y^k$  和  $Y^{k-1}$  为第  $k$  次和第  $k-1$  次迭代中矩阵  $Y$  的估计值;  $\delta_k$  为权重系数, 用于调整迭代过程中的变化量;  $P_\Omega$  用于标识未缺失的数据集合。

当数据中存在零值时, 设定规则来自动填充这些零值。填充的方法结合了最小二乘法。最小二乘法是最常用的参数估计方法<sup>[20]</sup>。下面利用最小二乘法进行参数估计。

指定数据  $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, n)_m$ , 设  $\Phi_i(x) (i = 0, 1, \dots, m)$  线性独立, 求  $p(x) = \sum_{i=0}^m \alpha_i \Phi_i(x)$ , 使误差  $r_i = p(x_j) - y_i (i = 1, 2, \dots, n)$  的平方和最小, 即

$$\sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n [p(x_i) - y_i]^2 = \min。$$

在几何上, 曲线拟合的最小二乘法是一种求取与给定点  $(x_i, y_i)$  的距离平方和最小的曲线  $y = p(x)$  的方法, 该方法可以获得拟合函数或最小二乘解  $p(x)$ 。设  $F(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = \sum_{i=0}^n [p(x_j) - y_i]^2$ , 当  $\partial F / \partial \alpha_i = 0 (i = 1, 2, \dots, m)$  时, 误差  $r_i = p(x_i) -$

$y_i (i = 1, 2, \dots, m)$  有最小的平方和, 假定  $(\phi_i, \phi_j) = \sum_{k=1}^n \phi_i(x_k)\phi_j(x_k)$ ,  $(i, j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n)$  满足  $\partial F / \partial \alpha_i = 0 (i = 1, 2, \dots, m)$  的线性方程组如下:

$$\begin{bmatrix} (\phi_0, \phi_0) & (\phi_0, \phi_1) & \cdots & (\phi_0, \phi_m) \\ (\phi_1, \phi_0) & (\phi_1, \phi_1) & \cdots & (\phi_1, \phi_m) \\ (\phi_2, \phi_0) & (\phi_2, \phi_1) & \cdots & (\phi_2, \phi_m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\phi_m, \phi_0) & (\phi_m, \phi_1) & \cdots & (\phi_m, \phi_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \phi_0(x_i) \\ \sum_{i=1}^n y_i \phi_1(x_i) \\ \sum_{i=1}^n y_i \phi_2(x_i) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n y_i \phi_m(x_i) \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3 新能源汇集升压电网线损计算

#### 3.1 代表日线损

下面将采用现有的新能源汇集升压电网线损计算方法, 计算出四个代表日的线损。通过对这些代表日的线损数据进行分析, 可以全面了解电网中线损的情况。

总损耗公式:

$$\Delta A_{\text{总损耗}} = \sum_{i=1}^{n=8} (A1i_2 - A1i_1) - \sum_{i=5}^{n=8} Ai_2 + (A1_2 - A1_1) \quad (8)$$

式中:  $A1i_1$  按序从 1 ~ 8 分别为一线 ~ 八线正向有功;  $A1i_2$  按序从 1 ~ 8 分别为一线 ~ 八线反向有功;  $A5_2, A6_2, A7_2$  分别为 1, 2, 3 主变低电能表反向有功;  $A1_1, A1_2$  分别为总电能表正向、反向有功。

线损率<sup>[21]</sup>计算公式:

$$\Delta A \% = (L/A) * 100\% \quad (9)$$

式中:  $L$  为线损电量;  $A$  为供电量。

把四个代表日的数据带入到上面的公式中可以得到线损以及线损率的计算结果如表 1 所示。

表 1 代表日计算结果

Tab. 1 Representing daily calculation results

代表日	供电量	线损	线损率/%
春季(3.21)	4 429 656	21 636	0.48
夏季(7.16)	4 682 304	26 033	0.54
秋季(9.16)	4 668 048	24 216	0.51
冬季(12.17)	3 041 280	17 472	0.56

#### 3.2 线损结果分析

通过对四个代表日的线损数据进行详细分析, 发现现有的新能源汇集升压电网线损计算方法存在一定的局限性。主要表现在:

1) 现有的线损计算方法通过对电网的首端总电表读数与尾端各光伏电表读数的差值来得到线损;

2) 由于新能源汇集升压电网中存在交叉互供现象, 即部分电能由光伏发电设备直接提供给其他用户, 而非全部通过线路传输给电网。利用该方法计算的线损无法准确反映实际的线损情况。

因此, 需要对电网功率的实际流向进行深入分析, 以找出适合电网特点的线损计算方法。

### 4 考虑交叉互供的新能源汇集升压电网线损计算

在考虑交叉互供现象对新能源汇集升压电网线损计算的影响后, 首先, 依据光伏出力特性对计量数据进行分类, 为线损计算提供了坚实的数据基础; 然后, 在不同时间尺度下进行线损计算, 揭示电网不同运行状态下的线损规律; 最后, 根据代表日计量数据分别对现有线损计量方法和新方法线损计算结果进行对比, 这不仅验证了新的线损计算方法的有效性, 而且提高了对现有线损计算准确性的评估。

#### 4.1 基于光伏出力特性下计量数据的分类

在新能源汇集升压电网中, 分布式电源和用户负荷的随机性导致电力流动数据呈现出显著的时序特征。为了精准分析线损, 对计量数据的分类处理显得尤为重要。

首先, 应以 15 min 为时间单位, 对每日的功率流动数据进行细致的分类, 深入分析不同时间段的功率流动情况, 以便更精确地捕捉功率流动的动态变化, 为后续线损计算提供坚实的数据基础。其次, 考虑到交叉互供现象对线损计算的影响, 需要特别关注分布式光伏直接供应给其他用户的功率流动情况, 这种特殊的功率流动模式需要从常规的功率流动数据中予以区分。此外, 通过对二线、三线、四线、五线、六线和七线的光伏出力特性进行分析, 可以确定光伏发电的具体时段, 进而判断一线和八线是否存在交叉互供现象。为了更直观地展示光伏出力的动态变化和规律, 将依据计量数据绘制四个代表日的光伏出力曲线图, 这些曲线图将在不同时间尺度下清晰地呈现光伏出力的变化情况, 为线损分析提供有力的支持。

通过对计量数据的分析,发现一年四季的代表日中,光伏发电时间存在明显的差异。在四季代表日中,由图2可知光伏发电时间分别为:8:00-19:45、7:00-20:45、7:30-19:30、9:15-18:15。此外,由于一线下设有热发电厂,八线配备了储能设备,这两条线不仅在白天发电,还在晚上发电,其中一部分电能未通过电网输送,而是直接给其他线上的光伏供电。

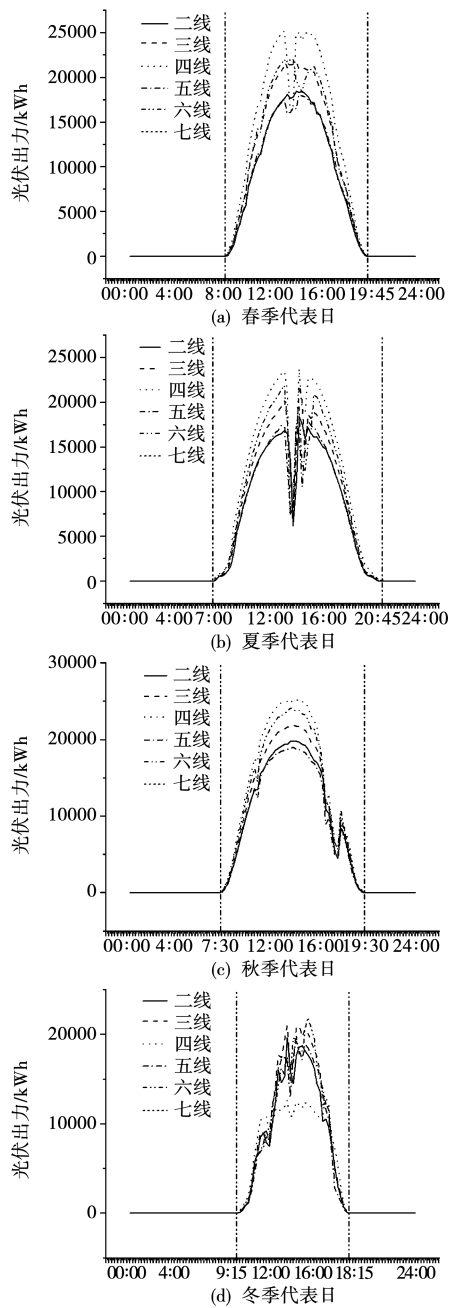


图2 四季代表日光伏出力曲线  
Fig. 2 Four seasons representing the daily photovoltaic output curve

#### 4.2 不同时间尺度下的线损计算

基于光伏特性对计量数据进行分类,并对一年四季的代表日中光伏发电时间进行了详细分析。在此基础上,结合交叉互供现象,探讨不同时间尺度下的线损计算方法。对于常规的功率流动,可以采用现有的线损计算方法,即通过计算总电表和各光伏电表的差值得到线损。然而,对于交叉互供现象,需要采用更为复杂的计算方法。

在考虑交叉供电的计算方法中,准确识别和判断各电网元件之间的双向供电关系是关键。如何区分不同类型的交叉互供情况。通过对这些供电关系的精确分析,可以更准确地描述电网功率实际流向。图3是判断交叉互供的流程图。

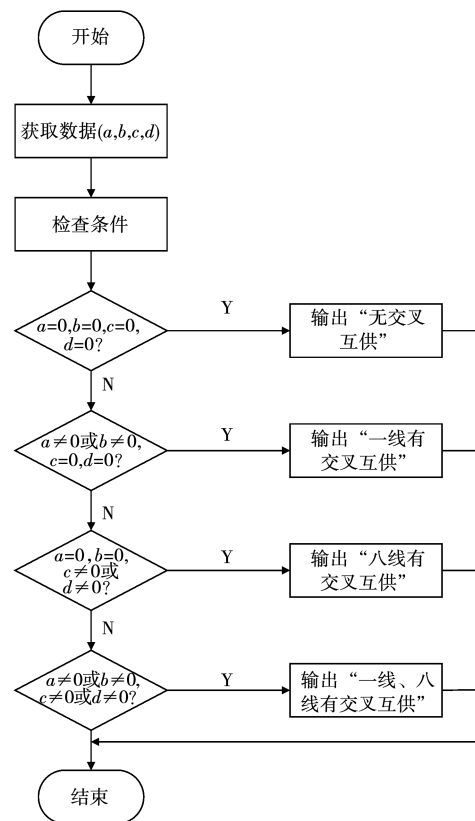


图3 判断交叉互供流程图

Fig. 3 Flow chart of judging cross and mutual supply  
图3的四季中,a、c分别代表一线、八线在0:00—8:00、0:00—7:00、0:00—7:30、0:00—9:15四个时段中产生的电量;b、d分别代表一线、八线在19:45—24:00、20:45—24:00、19:30—24:00、18:15—24:00四个时段中产生的电量。通过交叉互供的判定,我们可以将其分为四种情况:无交叉互供、一线交叉互供、八线交叉互供和一线、八线交叉互供。每种情况对应着不同的计算方法。

1) 无交叉互供

在无交叉互供的情况下,电网功率流动沿着传统的配电网结构进行,是单向供电方式,不存在交叉互供关系。此种情况下,线损计算方法较为简单。

总损耗公式:

$$\Delta A_{\text{总LOSS}} = \Delta A_{330 \text{ kV-LOSS}} + \Delta A_{1\text{-LOSS}} + \Delta A_{2\text{-LOSS}} + \Delta A_{3\text{-LOSS}} + \Delta A_{110 \text{ kV-LOSS}} \quad (10)$$

330 kV 母线损耗:

$$\Delta A_{330 \text{ kV-LOSS}} = \sum_{i=2}^{n=4} (Ai_2 - Ai_1) + (A1_2 - A1_1) \quad (11)$$

式中: $Ai_2$  按序从 2~4 分别为 1、2、3 主变高电能表反向有功; $Ai_1$  按序从 2~4 分别为 1、2、3 主变高电能表正向有功。

其中:

a) 主变损耗:

$$\Delta A_{1\text{-LOSS}} = (A8_1 - A8_2) + (A2_1 - A2_2) + (A19_2 + A20_2) - 1.4 \times 10^6 \times B \quad (12)$$

$$B = \sum_{i=1}^{n=3} (A5_{2xi+1} - A5_{2xi}) \quad (13)$$

式中: $A8_1$ 、 $A8_2$  分别为 1 主变中电能表正向、反向有功; $A19_2$ 、 $A20_2$  分别为 1SVG、2SVG 电能表反向有功; $A5_{2x1}$  为 1 主变低电能表反向有功 0:00 的值; $A5_{2x2}$  四季中分别为 1 主变低电能表反向有功 8:00、7:00、7:30、9:00 的值; $A5_{2x3}$  四季中分别为 1 主变低电能表反向有功 19:45、20:45、19:30、18:15 的值; $A5_{2x4}$  为 1 主变低电能表反向有功 24:00 的值。

b) 主变损耗:

$$\Delta A_{2\text{-LOSS}} = (A9_1 - A9_2) + (A3_1 - A3_2) + (A21_2 + A22_2) - 1.4 \times 10^6 \times C \quad (14)$$

$$C = \sum_{i=1}^{n=3} (A6_{2xi+1} - A6_{2xi}) \quad (15)$$

式中: $A9_1$ 、 $A9_2$  分别为 2 主变中电能表正向、反向有功; $A21_2$ 、 $A22_2$  分别为 3SVG、4SVG 电能表反向有功; $A6_{2x1}$  为 2 主变低电能表反向有功 0:00 的值; $A6_{2x2}$  四季中分别为 2 主变低电能表反向有功 8:00、7:00、7:30、9:00 的值; $A6_{2x3}$  四季中分别为 2 主变低电能表反向有功 19:45、20:45、19:30、18:15 的值; $A6_{2x4}$  为 2 主变低电能表反向有功 24:00 的值。

c) 主变损耗:

$$\Delta A_{3\text{-LOSS}} = (A10_1 - A10_2) + (A4_1 - A4_2) + (A23_2 + A24_2) - 1.4 \times 10^6 \times D \quad (16)$$

$$D = \sum_{i=1}^{n=3} (A7_{2xi+1} - A7_{2xi}) \quad (17)$$

式中: $A10_1$ 、 $A10_2$  分别为 3 主变中电能表正向、反向有功; $A23_2$ 、 $A24_2$  分别为 5SVG、6SVG 电能表反向有功; $A7_{2x1}$  为 2 主变低电能表反向有功 0:00 的值; $A7_{2x2}$  四季中分别为 3 主变低电能表反向有功 8:00、7:00、7:30、9:00 的值; $A7_{2x3}$  四季中分别为 3 主变低电能表反向有功 19:45、20:45、19:30、18:15 的值; $A7_{2x4}$  为 3 主变低电能表反向有功 24:00 的值。

110 kV 母线损耗:

$$\Delta A_{110 \text{ kV-LOSS}} = \sum_{i=1}^{n=8} (Ai_2 - Ai_1) + \sum_{i=8}^{n=10} (Ai_2 - Ai_1) \quad (18)$$

2) 一线交叉互供

当一线交叉互供时,功率传输的路径增多。这种情况下说明一线的光热电厂在晚上也发电给其他光伏电站,因此产生了交叉互供,需要重新制定新的规则来进行线损的计算。

总损耗公式:

$$\Delta A_{\text{总LOSS}} = \Delta A_{330 \text{ kV-LOSS}} + \Delta A_{1\text{-LOSS}} + \Delta A_{2\text{-LOSS}} + \Delta A_{3\text{-LOSS}} + \Delta A_{110 \text{ kV-LOSS}} \quad (19)$$

330 kV 母线损耗:

$$\Delta A_{330 \text{ kV-LOSS}} = 7.92 \times 10^6 \times \left[ \sum_{i=1}^{n=3} (A2_{2xi+1} - A2_{2xi}) + \sum_{i=3}^{n=4} (Ai_{2x3} - Ai_{2x2}) - \sum_{i=1}^{n=3} (A1_{1xi+1} - A1_{1xi}) \right] - \sum_{i=2}^{n=4} Ai_1 + A1_2 \quad (20)$$

式中: $A2_{2x1}$ 、 $A1_{1x1}$  分别为 1 主变高电能表反向有功、总电能表正向有功 0:00 的值; $A2_{2x2}$ 、 $A1_{1x2}$ 、 $A3_{2x2}$ 、 $A4_{2x2}$  四季中分别为 1、2、3 主变高电能表反向有功、总电能表正向有功 8:00、7:00、7:30、9:00 的值; $A2_{2x3}$ 、 $A1_{1x3}$ 、 $A3_{2x3}$ 、 $A4_{2x3}$  四季中分别为 1、2、3 主变高电能表反向有功、总电能表正向有功 19:45、20:45、19:30、18:15 的值; $A2_{2x4}$ 、 $A1_{1x4}$  为 1 主变高电能表反向有功、总电能表正向有功 24:00 的值。

一线交叉互供 1、2、3 主变损耗的计算方法与无交叉互供计算方法一致。

110 kV 母线损耗:

$$\Delta A_{110 \text{ kV-LOSS}} = \sum_{i=2}^{n=8} (Ai_2 - Ai_1) + \sum_{i=8}^{n=10} Ai_2 - A11_1 - \left[ \sum_{i=1}^{n=3} (A8_{1xi+1} - A8_{1xi}) + \sum_{i=9}^{n=10} (Ai_{1x3} - Ai_{1x2}) \right] \times 2.2 \times 10^6 + \left[ \sum_{i=1}^{n=3} (A11_{2xi+1} - A11_{2xi}) \right] \times 1.32 \times 10^6 \quad (21)$$

式中: $A8_{1x1}$ 、 $A11_{2x1}$  分别为 1 主变中电能表正向有功、一线反向有功 0:00 的值; $A8_{1x2}$ 、 $A9_{1x2}$ 、 $A10_{1x2}$ 、 $A11_{2x2}$

四季中分别为 1、2、3 主变中电能表正向有功、一线反向有功 8:00、7:00、7:30、9:00 的值;  $A_{8_{1x3}}$ 、 $A_{9_{1x3}}$ 、 $A_{10_{1x3}}$ 、 $A_{11_{2x3}}$  四季中分别为 1、2、3 主变中电能表正向有功、一线反向有功 19:45、20:45、19:30、18:15 的值;  $A_{8_{1x4}}$ 、 $A_{11_{2x4}}$  分别为 1 主变中电能表正向有功、一线反向有功 24:00 的值。

### 3) 八线交叉互供

当八线交叉互供时,说明八线的储能能在晚上也发电送给其他光伏电站,因此产生了交叉互供,需要重新制定新的规则来进行线损的计算。

总损耗公式:

$$\Delta A_{\text{总LOSS}} = \Delta A_{330 \text{ kV-LOSS}} + \Delta A_{1\text{-LOSS}} + \Delta A_{2\text{-LOSS}} + \Delta A_{3\text{-LOSS}} + \Delta A_{110 \text{ kV-LOSS}} \quad (22)$$

330 kV 母线损耗:

$$\Delta A_{330 \text{ kV-LOSS}} = 7.92 \times 10^6 \times \left[ \sum_{i=1}^{n=3} (A_{3_{2x_{i+1}}} - A_{3_{2x_i}}) + (A_{2_{2x3}} - A_{2_{2x2}}) + (A_{4_{2x3}} - A_{4_{2x2}}) - \sum_{i=1}^{n=3} (A_{1_{1x_{i+1}}} - A_{1_{1x_i}}) \right] - \sum_{i=2}^{n=4} A_{i_1} + A_{1_2} \quad (23)$$

式中:  $A_{3_{2x_i}}$  为 2 主变高电能表反向有功 0:00 的值;  $A_{3_{2x4}}$  为 2 主变高电能表反向有功 24:00 的值。

八线交叉互供 1、2、3 主变损耗的计算方法与无交叉互供计算方法一致。

110 kV 母线损耗:

$$\Delta A_{110 \text{ kV-LOSS}} = \sum_{i=1}^{n=7} (A_{1i_2} - A_{1i_1}) + \sum_{i=8}^{n=10} A_{i_2} - A_{18_1} - \left[ \sum_{i=1}^{n=3} (A_{9_{1x_{i+1}}} - A_{9_{1x_i}}) + (A_{8_{1x3}} - A_{8_{1x2}}) + (A_{10_{1x3}} - A_{10_{1x2}}) \right] \times 2.2 \times 10^6 + \left[ \sum_{i=1}^{n=3} (A_{18_{2x_{i+1}}} - A_{18_{2x_i}}) \right] \times 1.32 \times 10^6 \quad (24)$$

式中:  $A_{18_{1x1}}$ 、 $A_{9_{1x1}}$  为八线正向有功 0:00 的值;  $A_{18_{1x2}}$  四季中分别为八线正向有功 8:00、7:00、7:30、9:00 的值;  $A_{18_{1x3}}$  四季中分别为八线正向有功 19:45、20:45、19:30、18:15 的值;  $A_{18_{1x4}}$ 、 $A_{9_{1x4}}$  为八线正向有功 24:00 的值。

### 4) 一线、八线交叉互供

当一线和八线同时交叉互供时,功率传输的路径最为复杂,交叉供电的影响也最为显著。说明一线的热发电厂和八线的储能能在晚上同时发电给其他光伏电站,因此也需要更加精确的计算方法,来得到线路的损耗。

总损耗公式:

$$\Delta A_{\text{总LOSS}} = \Delta A_{330 \text{ kV-LOSS}} + \Delta A_{1\text{-LOSS}} + \Delta A_{2\text{-LOSS}} + \Delta A_{3\text{-LOSS}} + \Delta A_{110 \text{ kV-LOSS}} \quad (25)$$

330 kV 母线损耗:

$$\Delta A_{330 \text{ kV-LOSS}} = 7.92 \times 10^6 \times \left[ \sum_{i=1}^{n=3} (A_{2_{2x_{i+1}}} - A_{2_{2x_i}}) + (A_{4_{2x3}} - A_{4_{2x2}}) + \sum_{i=1}^{n=3} (A_{3_{2x_{i+1}}} - A_{3_{2x_i}}) - \sum_{i=1}^{n=3} (A_{1_{1x_{i+1}}} - A_{1_{1x_i}}) \right] - \sum_{i=2}^{n=4} A_{i_1} + A_{1_2} \quad (26)$$

一线、八线交叉互供 1、2、3 主变损耗的计算方法与无交叉互供计算方法一致。

110 kV 母线损耗:

$$\Delta A_{110 \text{ kV-LOSS}} = \sum_{i=2}^{n=7} (A_{1i_2} - A_{1i_1}) + \sum_{i=8}^{n=10} A_{i_2} - A_{11_1} - A_{18_1} - \left[ \sum_{i=1}^{n=3} (A_{8_{1x_{i+1}}} - A_{8_{1x_i}}) + \sum_{i=1}^{n=3} (A_{9_{1x_{i+1}}} - A_{9_{1x_i}}) + (A_{10_{1x3}} - A_{10_{1x2}}) \right] \times 2.2 \times 10^6 + \left[ \sum_{i=1}^{n=3} (A_{11_{2x_{i+1}}} - A_{11_{2x_i}}) + \sum_{i=1}^{n=3} (A_{18_{2x_{i+1}}} - A_{18_{2x_i}}) \right] \times 1.32 \times 10^6 \quad (27)$$

## 4.3 代表日计算对比分析

表 2 是对四个代表日实际线损值、现有的线损计算和考虑交叉互供线损计算新方法得到的线损以及线损率对比。

表 2 代表日数据对比

Tab. 2 Representing daily data comparison

计算方法	春季(3.21)		夏季(7.16)	
	线损	线损率/%	线损	线损率/%
实际线损值	39 423	0.89	47 291	1.01
现有的线损计算方法	21 636	0.48	26 033	0.54
考虑交叉互供线损计算新方法	39 372	0.88	46 340	0.98
计算方法	秋季(9.16)		冬季(12.17)	
	线损	线损率/%	线损	线损率/%
实际线损值	41 545	0.89	31 800	1.02
现有的线损计算方法	24 216	0.51	17 472	0.56
考虑交叉互供线损计算新方法	41 352	0.87	31 800	1.02

通过对以上四个代表日数据的计算与分析可以得出考虑交叉供电的线损新方法相较于现有的线损方法,能够更准确地计算出线损和线损率,因为前者考虑了电网功率实际运行情况,避免了遗漏部分线路损耗的情况,从而使得线损量增大,更接近与实际线损值。

## 5 结 论

1) 根据光伏出力特性和新能源汇集升压电网的功率流动方向,对计量数据按时间尺度分类计算线损数据,提出一种考虑交叉互供的新能源汇集升压电网线损计算新方法;

2) 通过对四个典型代表日的计量数据进行对比分析,考虑交叉互供的线损计算结果更接近实际线损值,相较于现有线损计算结果更加准确。

文章所提出的方法能更精确地反映新能源汇集升压电网的线损情况,为西北地区的新能源汇集升压电网线损计算提供了新的计量方法,为高比例新能源电网运行和管理带来重要的改进和提升,进一步推动新能源的可持续发展与利用。

## 参 考 文 献

[1] 宇晗,朱利鹏,李佳勇,等.融合深度误差反馈学习和注意力机制的短期风电功率预测[J].电力系统保护与控制,2024,52(4):100-108.  
HU Yuhan, ZHU Lipeng, LI Jiayong, et al. Short-term wind power forecasting with the integration of a deep error feedback learning and attention mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 100-108.

[2] 杜晓东,李晓明,韩思宁,等.基于线性化潮流模型的配电网电压无功控制策略[J].电测与仪表,2024,61(4):41-47.  
DU Xiaodong, LI Xiaoming, HAN Sining, et al. Volt/Var control strategy of distribution network based on linearized power flow model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 41-47.

[3] 胡治国,李永杰,张磊冲.基于混合储能荷电状态的光伏直流微网系统能量分配策略[J].电源技术,2024,48(2):337-344.  
HU Zhiguo, LI Yongjie, ZHANG Leichong. Energy allocation strategy for photovoltaic DC microgrid system based on hybrid energy storage state of charge[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(2): 337-344.

[4] 廖学琦,郑大方.城乡电网线损计算分析与管理[M].北京:中国电力出版社,2011:8-16.  
LIAO Xueqi, ZHENG Dafang. Urban and rural power grid line loss calculation analysis and management[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011: 8-16.

[5] 蒋骁,徐文聪,胡岳,等.局部放电定向超声阵列 Dir-MUSIC 测向算法仿真[J].南方电网技术,2024,18(4):71-79.  
JIANG Xiao, XU Wencong, HU Yue, et al. Simulation of dir-music direction-finding algorithm for partial discharge direction-finding ultrasonic array[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 71-79.

[6] 马喜平,李亚昕,梁琛,等.考虑高比例多元调节资源互动的配电网无功优化降损方法[J].中国电力,2024,57(1):123-132.  
MA Xiping, LI Yaxin, LIANG Chen, et al. Reactive power optimization for loss reduction of distribution network considering interactions of high penetration level of multiple regulating energy resources[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 123-132.

[7] 生西奎,付强,于洋,等.基于深度学习GRU网络的配电网理论线损计算方法[J].电测与仪表,2021,58(3):54-59.  
SHENG Xikui, FU Qiang, YU Yang, et al. Distribution network line loss calculation method based on deep learning GRU network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 54-59.

[8] 周成吉.专变用户电能计量装置抄表运维管理措施分析与优化[J].机电信息,2019(32):85,87.  
ZHOU Chengji. Analysis and optimization of meter reading operation and maintenance management measures for customized user electric energy metering device[J]. Mechanical and Electrical Information, 2019(32): 85, 87.

[9] 吴静,刘轩宇,李响,等.考虑网损的电力系统节点边际碳势理论研究与建模[J].中国电力,2024,57(6):215-224.  
WU Jing, LIU Xuanyu, LI Xiang, et al. Research and modelling of bus marginal carbon intensity for power systems considering network losses[J]. Electric Power, 2024, 57(6): 215-224.

[10] 马喜平,董晓阳,李亚昕,等.考虑新能源接入的电网有功无功协调双层优化策略研究[J].电网与清洁能源,2024,40(1):137-142,149.  
MA Xiping, DONG Xiaoyang, LI Yaxin, et al. Research on the two-layer optimal strategy of active power and reactive power coordination considering integration of new energy[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 137-142, 149.

[11] MANUEL MARIN, FEDERICO MILANO, DAVID DE-FOUR. Midpoint-radius interval-based method to deal with uncertainty in power flow analysis[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 147: 81-87.

[12] 吴倩红,高军,侯广松,等.实现影响因素多源异构融合的短期负荷预测支持向量机算法[J].电力系统自动化,2016,40(15):67-72,92.  
WU Qianhong, GAO Jun, HOU Guangsong, et al. Short-term load forecasting support vector machine algorithm based on multi-source heterogeneous fusion of load factors [J]. Automation of Electric power Systems, 2016, 40(15): 67-72, 92.

[13] GABRIEL SALOMON, INF. UFPR. BR, RAYSON LA-ROCA, et al. Deep learning for image-based automatic di-

- al meter reading: dataset and baselines[C]//In 2020 International Joint Conference on Neural Networks, 2020: 1-8.
- [14] 高雪寒, 高原, 赵健, 等. 基于数据潮流模型的高比例光伏配电网三相不平衡优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 77-87.  
GAO Xuehan, GAO Yuan, ZHAO Jian, et al. Three-phase unbalanced optimization of a distribution network with a high proportion of distributed photovoltaic energy based on a data-driven power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 77-87.
- [15] 王婷, 张震宇, 任腾云, 等. 基于聚类算法的多维数据库一致性检测与恢复方法研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(3): 108-111, 119.  
WANG Ting, ZHANG Zhenyu, REN Tengyun, et al. Research on consistency detection and recovery of multidimensional database based on clustering algorithm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2024, 43(3): 108-111, 119.
- [16] 冉启武, 张宇航. 基于模态分解及 GRU-XGBoost 短期电力负荷预测[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(4): 18-27, 34.  
RAN Qiwu, ZHANG Yuhang. Short-term power load forecasting based on modal decomposition and GRU-XGBoost [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(4): 18-27, 34.
- [17] 黄代雄, 汪志军, 袁俑斌, 等. 考虑多源协同的主动配电网故障恢复策略[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 210-215, 222.  
HUANG Daixiong, WANG Zhijun YUAN Yongbin. Fault recovery strategy considering multi source collaborative activedistribution network [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 210-215, 222.
- [18] CAI J F, EMMANUEL J CANDÈ S, SHEN Z W. A singular value thresholding algorithm for matrix completion [J]. Society for Industrial & Applied Mathematics ( si-am), 2010, 20(4): 1956-1982.
- [19] 颜炯, 卢生炜, 张涛, 等. 高比例新能源接入下电网输配电成本多主体分摊模型[J]. 电力建设, 2024, 45(1): 138-146.  
YAN Jiong, LU Shengwei, ZHANG Tao, et al. A Multi-stakeholder allocation model for transmission and distribution costs of power grid with high renewables[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 138-146.
- [20] 叶清泉, 倪佳华, 吴旭光, 等. 直流网光伏系统多时间尺度调度算法[J]. 电力建设, 2024, 45(1): 125-137.  
YE Qingquan, NI Jiahua, WU Xuguang, et al. Multi-timescale dispatching algorithm of PV systems in DC grid [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 125-137.
- [21] 王超, 陈云, 肖佳朋, 等. 配电电缆试验方法的研究现状和发展趋势[J]. 高压电器, 2024, 60(4): 173-184, 220.  
WANG Chao, CHEN Yun, XIAO Jiapeng, et al. Research status and development trend of distribution cable test methods[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 173-184, 220.

收稿日期: 2024-05-11; 修回日期: 2024-07-31

作者简介:

任彦辉(1989—),男,通信作者,高级工程师,研究方向为电网规划、市场营销和电力交易。

E-mail:1960235071@qq.com

许星煜(1985—),男,高级工程师,研究方向为电能计量、电网损耗和市场化交易。E-mail:xxycom@qq.com

陶海洋(1991—),男,工程师,研究方向为电网损耗和电力交易。E-mail:690930408@qq.com

车博鑫(1999—),男,硕士研究生,研究方向为配电网线损计量。E-mail:1960235071@qq.com

宋景龙(1989—),男,高级工程师,研究方向为线损降损。E-mail:2730490791@qq.com

葛鹏举(1998—),男,助理工程师,研究方向为电力交易。E-mail:874315560@qq.com

(编辑 杜景飞)