

引用格式:陈悦,赵健.基于层级解构与分相递归策略的三相不平衡低压配电网线路阻抗辨识[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):131-140.

Citation: CHEN Yue, ZHAO Jian. Line impedance identification of three-phase unbalanced low-voltage distribution network based on hierarchical deconstruction and phase recursion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 131-140.

# 基于层级解构与分相递归策略的三相不平衡低压配电网线路阻抗辨识

陈悦, 赵健

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 分布式光伏、电动汽车的大规模接入加剧了低压配电网(low-voltage distribution network, LVDN)的三相不平衡, 这种三相不平衡会产生中性线电流并导致电压波动等问题, 造成三相线路的阻抗辨识问题无法简化至潮流统一的 3 个相同单相网络中进行独立求解。针对中性线不平衡电流的存在, 根据子节点电压相关性原理, 提出一套基于层级解构与分相递归策略的线路阻抗辨识方法。首先, 通过层级解构划分变层、分支层和用户层, 建立层内节点关联子网络; 其次, 构建相线电压匹配模型, 回溯分支层各相线阻抗, 利用节点功率校验模型, 实现配变层节点相位角估计; 再次, 根据电气矢量关系递推中性线参数, 通过消除递推误差得到线路阻抗辨识结果; 最后, 通过实际系统与负荷数据验证该方法的有效性和准确性。

**关键词:** 三相不平衡; 低压配电网; 阻抗辨识; 层级解构; 分相递归

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.014 中图分类号: TM72 文章编号: 1673-9140(2025)02-0131-10

## Line impedance identification of three-phase unbalanced low-voltage distribution network based on hierarchical deconstruction and phase recursion

CHEN Yue, ZHAO Jian

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The large-scale integration of distributed photovoltaics and electric vehicles exacerbates the three-phase imbalance in low-voltage distribution network (LVDN), which further leads to issues such as current in neutral wire and voltage fluctuations, preventing the simplification of three-phase line impedance identification into three independently solved single-phase networks with unified power flow. For this reason, a set of line impedance identification methods based on hierarchical deconstruction and phase recursion are proposed, addressing the issue of neutral line current imbalance using the principle of child node voltage correlation. Firstly, three layers are obtained through hierarchical deconstruction: the substation layer, branch layer, and user layer, with each layer having its internal node connected to the subnetwork. A voltage matching model is then constructed for the phase line to retrace the branch layer's line. Next, a node power-checking model is used to estimate the node phase angle in the substation layer. The neutral line parameter is recursively derived according to the electrical vector relationship, and errors in the recursion process are minimized to obtain the line impedance identification results. Finally, the effectiveness and accuracy of this method are verified through actual system and load data.

**Key words:** three-phase imbalance; low-voltage distribution network; impedance identification; hierarchical deconstruction; phase recursion

收稿日期: 2024-04-24; 修回日期: 2024-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(51907114)

通信作者: 赵健(1990—), 男, 博士, 教授, 主要从事智能配用电、灵活性资源调度等方面的研究; E-mail: zhaojianee@foxmail.com

随着能源互联网建设的加速推进,低压配电网(low-voltage distribution network, LVVDN)正大规模融入分布式光伏<sup>[1-2]</sup>、电动汽车<sup>[3-4]</sup>、用户储能<sup>[5-6]</sup>等多元化清洁能源,这极大地加剧了LVVDN中的三相负荷不平衡<sup>[7-15]</sup>。具体而言,分布式光伏的输出功率受日照条件制约,其波动性和间歇性给配电网的功率平衡带来了挑战<sup>[16-19]</sup>;电动汽车的充电行为则受汽车用户出行习惯和充电设施布局的影响,在其充电需求的高峰时段,过高的充电需求可能导致局部电网过载<sup>[20]</sup>;而用户储能设备的充、放电策略则直接与用户的电力需求和电价波动关联,而这两者的随机性增加了配电网的复杂性<sup>[21-23]</sup>。在这些因素的综合影响下,LVVDN的三相负荷难以保持平衡,在其中性线中将产生不平衡电流,从而引起额外的电压下降和功率损耗,致使中性点发生电位漂移,造成三相电压的波动<sup>[24]</sup>,导致线路间耦合更复杂,使得三相线路的阻抗辨识无法在变化一致、潮流统一的单相网络中独立求解<sup>[25]</sup>。这对线路阻抗的辨识研究提出了更高要求。

传统的三相线路阻抗辨识方法基于简单的三相解耦和功率平衡假设。文献[26-27]提出一种对三相数据进行解耦的相模变换法。该方法通过建立阻抗参数寻优模型,实现了三相线路阻抗辨识。文献[28]利用量测数据,构建线路压降广义方程,求解了两级优化问题。该方法对总线的本地和全局结构分别建模,实现了对LVVDN各网格分层并行计算。文献[29]基于节点多时段负荷与电压量测数据,提出一种自下而上的非线性参数估计模型,实现了LVVDN参数和拓扑的联合辨识。然而,在当前的复杂LVVDN环境下,这些研究的假设均已不再成立。因此,如何针对当前LVVDN三相负荷不平衡的复杂特性,研究出一种精确、可靠的三相线路阻抗辨识方法,成为了亟待解决的关键问题。

目前,三相负荷不平衡的线路阻抗辨识研究尚不够完善。文献[30-31]通过对相关性进行评估,调整相序与网络拓扑,提出了改进型Newton-Raphson法,实现了对线路阻抗的精确辨识。该方法的本质是对三相负荷进行平衡化后,再进行线路阻抗辨识。在实际中,LVVDN规模庞大,用电负荷种类多样,无法实现相序的实时调节,这将导致其仍处于三相不平衡状态。文献[32]提出了一种三相静态估计法来估计线路初始值,并结合Kalman滤波器进行动态跟踪和迭代参数。该方法必须使用相位角数据。但在实际中,LVVDN的相位量测设备价格昂

贵,该方法投资成本高昂,这也在一定程度上限制了其在实际工程中的推广与应用。

因此,为解决三相不平衡情况下中性线阻抗的精确辨识的问题,有效降低辨识误差与投入成本,本文提出一种基于层级解构与分相递归策略的线路阻抗辨识方法。首先,基于用户末端智能电表量测数据与已知LVVDN拓扑结构,采用层级解构方法将其分为配变层、分支层和用户层,形成层内父子节点关联的子网络结构;其次,通过分相递归策略,依次实施用户层负荷数据计算、分支层相线阻抗回溯、配变层电流相角估计与全网中性线参数递推;再次,根据三相线路参数辨识结果估计配电网各层节点相位角,并整合中性线节点参数,构建节点电压匹配模型,估计中性线路阻抗值,从而实现三相不平衡下低压配电网线路阻抗的精确辨识;最后,在浙江省某地区的实际配网系统中进行该算法的实际验证,通过对比分析,验证该方法的准确性和有效性。

## 1 LVVDN线路结构及辨识框架

### 1.1 低压配电网线路结构

在典型的LVVDN中,中压配电系统通过10 kV电缆线路向低压配电变压器供电,电能通过三相低压输电线路,先经由分接箱输送到表箱,再由表箱输送至终端用户,以此方式实现每台低压配电变压器为其供电区域内终端用户供电。其输电线路主要采用三相四线制,即电源通过3条相线供电,变压器中性点直接接地,中性线和地线共用一条导线。LVVDN以这种方式提供电流返回路径,确保电线安全接地。该三相四线制线路原理如图1所示。

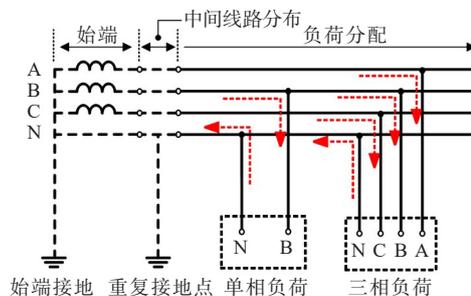


图1 三相四线制线路原理

Figure 1 Principle of three-phase four-wire line

在该连接方式下,当LVVDN仅有单相负荷时,电流从该相线路流向中性线路,形成一个完整的回路。当LVVDN存在三相负荷时,若该负荷处于平衡状态,则其中性线中无电流流过;若该负荷失衡,则

电流将同时经 A、B、C 相线流出,在中性线汇合,以此保持电路中的电流平衡,确保 LVDN 的稳定与安全。

在实际的 LVDN 中,负荷种类繁多,且负荷来源覆盖工业、商业和居民用电不同领域。不同负载类型和用电习惯均可导致三相负荷不平衡,造成各相电流大小和相位之间的差异。这种不平衡直接造成了三相四线制中性线路的电压下降和功率损耗,改变了 LVDN 的潮流分布,增加了线路阻抗辨识的难度。

### 1.2 低压配电网线路阻抗辨识框架

本文旨在利用 LVDN 末端用户处与配电变压器二次侧出口处智能电表提供的测量数据,对三相四线制线路阻抗参数进行精确辨识。其线路阻抗辨识框架如图 2 所示。

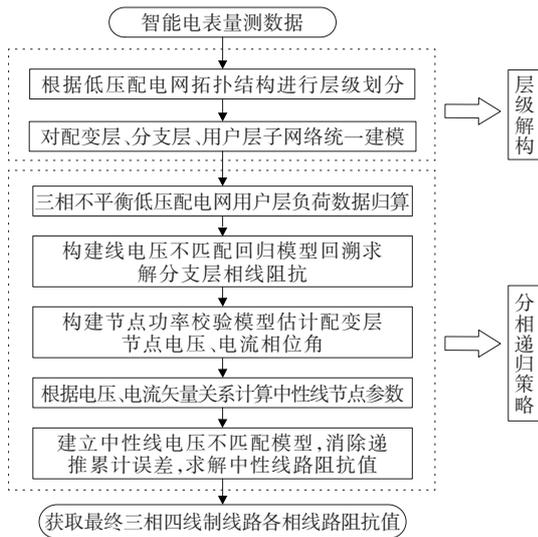


图 2 线路阻抗辨识框架

Figure 2 Framework for line impedance identification

## 2 层级解构和分相递归策略

本文提出一种层级解构和分相递归策略,在保留 LVDN 基本特征的前提下,简化其网络结构,解决三相不平衡条件下的线路阻抗辨识问题。

### 2.1 层级解构

配电网复杂的拓扑结构给线路参数的估计带来了挑战。为简化问题、提高计算效率,本文采用了分层解构策略,将 LVDN 的拓扑结构分解为如图 3 所示的由配变层、中间层和负荷接入层构成的 3 层网络结构。在图 3 中,  $Z_{ij}$  为线路  $ij$  间的阻抗值;  $R_{ij}$ 、 $X_{ij}$  分别为线路  $ij$  间的电阻和电抗。

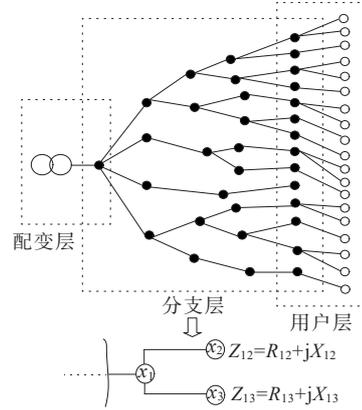


图 3 低压配电网层级解构

Figure 3 Hierarchical structure of a low-voltage distribution network

在该层级解构中,每个层级都被视为一个独立的子网络,每个子网络均由相应的节点和支路构成。其中,配变层作为最上层,涵盖了配电变压器和分支箱的连接;分支层作为中间层,涵盖了 LVDN 中分支箱与各配电表箱的分布关系;用户层作为最底层,涵盖所有终端用户及其接入点。每一层内部节点间均可构成父子节点关系,假设父节点电压为  $U_1$ ,该父节点的 2 个子节点电压分别为  $U_2$ 、 $U_3$ ,依据 2 个子节点回溯至同一父节点的电压必须相等的原则,构建电压相关性模型,即

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_{12}(R_{12} + jX_{12}) + \dot{U}_2 \\ \dot{U}_1 = \dot{I}_{13}(R_{13} + jX_{13}) + \dot{U}_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$  和  $\dot{U}_3$  分别为节点  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  电压的相量形式,  $\dot{I}_{12}$  和  $\dot{I}_{13}$  分别为支路  $x_1-x_2$  和支路  $x_1-x_3$  上流过电流的相量形式;  $R_{12}$ 、 $X_{12}$  分别为支路  $x_1-x_2$  的电阻与电抗;  $R_{13}$ 、 $X_{13}$  分别为支路  $x_1-x_3$  的电阻与电抗。

这种层级解构不仅能精确捕捉 LVDN 线路阻抗参数的空间分布特征,还能有效地将大规模的配电网问题分解为多个小规模子问题,便于后续的参数辨识。

### 2.2 分相递归策略

为更好地解决三相四线制线路的阻抗辨识问题,在层级解构的基础上,本文进一步提出分相递归策略,即从线路末端向源头递归回溯,利用智能电表量测数据,逐相求解线路上各节点的电气量,直至获得完整线路的阻抗参数。按照 A、B、C 与 N 相的顺序,依次展开每一层的线路,其三相四线制线路分相如图 4 所示。该分相递归策略的具体步骤可分为 4 步。

1) 利用安装在终端用户的智能电表所测得的数

据,根据节点电压关系方程和功率平衡原理,通过式(1)逐步回溯计算,直至LVDN起始端的配电变压器处。此步骤旨在确定LVDN中A、B、C这3条相线上各个节点的电压、电流、有功和无功功率幅值。

2) 基于相线上各节点参数,选取任意2个子节点,回溯其共同的父节点。利用子节点的共同父节点电压必须相等的原则,求解该父节点的电压与其他相关参数。基于这些参数,采用最小二乘法,计算得到3条相线的线路阻抗值。

3) 以最小化配变处实际测量功率与回溯计算功率之间差值为目标,估计从配变至用户线路上各节点的电流相位角,从而获取准确的相位信息,进一步完善节点参数的计算。

4) 在确定3条相线各节点的电流幅值和相角后,先计算中性线上各节点的电流、功率和电压;再利用由2个子节点回溯到同一父节点的电压必须相等的原则,建立中性线阻抗求解方程,得到中性线阻抗值。

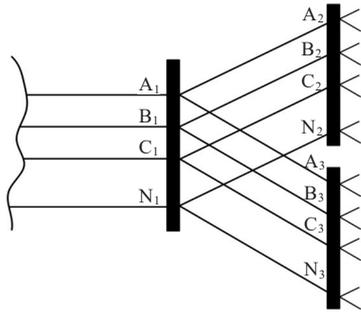


图4 三相四线制线路分相

Figure 4 Phases in three-phase four-wire line

### 3 三相不平衡配电网线路阻抗估计

本节将具体阐述层级解构和分相递归策略下的三相不平衡LVDN线路阻抗的估计方法。

#### 3.1 用户层负荷数据归算

在三相不平衡LVDN中,智能电表量测装置一般安装在配电变压器二次出口侧和末端用户处,以获取不同时刻下的电压、电流、有功、无功幅值等数据。但末端用户的负荷种类多、相数大小不一、接线长度不等,故无法构建统一的辨识模型来计算阻抗。在实际中,LVDN的入户线通常较短,故可忽略其阻抗,将负荷数据统一归算至用户层内的负荷接入点处,从而获取分支层末端节点参数值,其具体计算式为

$$\begin{cases} U_{L1-t}^{\beta} = \frac{1}{m} \sum_{i=2}^m U_{Li-t}^{\beta} \\ \Gamma_{L1-t}^{\beta} = \sum_{i=2}^m \Gamma_{Li-t}^{\beta} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $U_{Li-t}^{\beta}$ 为用户层L层相线路节点 $x_{Li}$ 在 $t$ 时刻的电压值(当 $i=1$ 时, $x_{Li}$ 为父节点;当 $i=2,3,\dots,m$ 时, $x_{Li}$ 为连接至父节点 $x_{L1}$ 的所有子节点); $\Gamma_{Li-t}^{\beta}$ 为用户层L中第 $\beta$ 相线路节点 $x_{Li}$ 在 $t$ 时刻的电流 $I_{Li-t}^{\beta}$ 、有功功率 $P_{Li-t}^{\beta}$ 、无功功率 $Q_{Li-t}^{\beta}$ 的集合,即 $\Gamma_{Li-t}^{\beta} = \{I_{Li-t}^{\beta}, P_{Li-t}^{\beta}, Q_{Li-t}^{\beta}\}, \beta=A, B, C, t=1, 2, \dots, 96$ 。

#### 3.2 分支层相线阻抗回溯

根据分支层末端节点数据,利用节点电压关系,构建相线电压匹配回归模型,从末端节点逐层回溯计算各相线节点参数,直至分支层首端(即配变层末端)节点,从而获取分支层内各相线段的阻抗值。

根据电压下降关系,展开式(1),得到各相线父节点的电压幅值计算式,即

$$(U_{B1-t}^{\beta})^2 = (U_{B2-t}^{\beta} + \Delta U_{B1B2-t}^{\beta})^2 + (\delta U_{B1B2-t}^{\beta})^2 \quad (3)$$

式中, $U_{B1-t}^{\beta}$ 为分支层B中第 $\beta$ 相线路父节点 $x_{B1}$ 在 $t$ 时刻的电压; $U_{B2-t}^{\beta}$ 为子节点 $x_{B2}$ 在 $t$ 时刻的电压; $\Delta U_{B1B2-t}^{\beta}$ 和 $\delta U_{B1B2-t}^{\beta}$ 分别为节点 $x_{B1}$ 至 $x_{B2}$ 在 $t$ 时刻的电压下降相量的纵分量和横分量值, $\beta=A, B, C$ ;  $\delta$ 为系数。

由于电压的下降相量的纵、横分量均可通过电阻、电抗与其夹角正余弦的乘积来表示,故功率表示为电压与电流的乘积,故式(3)可进一步展开为

$$(U_{B1-t}^{\beta})^2 = (U_{B2-t}^{\beta})^2 + (I_{B2-t}^{\beta})^2 [(R_{B1B2}^{\beta})^2 + (X_{B1B2}^{\beta})^2] + 2(P_{B2-t}^{\beta} R_{B1B2}^{\beta} + Q_{B2-t}^{\beta} X_{B1B2}^{\beta}) \quad (4)$$

式中, $I_{B2-t}^{\beta}$ 为分支层B中第 $\beta$ 相线路子节点 $x_{B2}$ 在 $t$ 时刻的电流值; $R_{B1B2}^{\beta}$ 、 $X_{B1B2}^{\beta}$ 分别为分支层内线路 $x_{B1}$ - $x_{B2}$ 的电阻、电抗; $P_{B2-t}^{\beta}$ 、 $Q_{B2-t}^{\beta}$ 分别为分支层B中 $\beta$ 相线路节点 $x_{B2}$ 在 $t$ 时刻的有功、无功功率, $\beta=A, B, C$ 。

当子节点为 $x_{B3}$ 时,也可建立类似的式子。按照由2个子节点回溯到同一父节点的电压必须相等的原则,建立相线电压匹配模型,得到仅含有节点间线路电阻、电抗为变量的等式方程,即

$$(U_{B2-t}^{\beta})^2 - (U_{B3-t}^{\beta})^2 = (I_{B3-t}^{\beta})^2 [(R_{B1B3}^{\beta})^2 + (X_{B1B3}^{\beta})^2] - (I_{B2-t}^{\beta})^2 \cdot [(R_{B1B2}^{\beta})^2 + (X_{B1B2}^{\beta})^2] + 2(P_{B3-t}^{\beta} R_{B1B3}^{\beta} + Q_{B3-t}^{\beta} X_{B1B3}^{\beta}) - 2(P_{B2-t}^{\beta} R_{B1B2}^{\beta} + Q_{B2-t}^{\beta} X_{B1B2}^{\beta}) \quad (5)$$

式中, $U_{B3-t}^{\beta}$ 、 $I_{B3-t}^{\beta}$ 、 $P_{B3-t}^{\beta}$ 、 $Q_{B3-t}^{\beta}$ 分别为分支层B中第 $\beta$ 相线路节点 $x_{B3}$ 在 $t$ 时刻的电压、电流、有功、无功

值; $R_{B1B3}^\beta$ 、 $X_{B1B3}^\beta$ 分别为分支层内节点 $x_{B1}$ 至 $x_{B3}$ 间线路电阻、电抗, $\beta=A,B,C$ 。

式(5)包含 $R_{B1B2}^\beta$ 、 $X_{B1B2}^\beta$ 、 $R_{B1B3}^\beta$ 、 $X_{B1B3}^\beta$ 共4个未知量,故可构建包含4个任意时刻等式的方程组,以此求解分支层内线路 $x_{B1}$ - $x_{B2}$ 、 $x_{B1}$ - $x_{B3}$ 的相线阻抗值。

该方程组为多元二次方程组,其所得到的阻抗结果可能会因选择不同时刻的数据而不同。因此,以同时刻从不同的2个子节点回溯至父节点的电压平方差最小为目标,以阻抗解集的上、下限为约束,进一步精确计算相线阻抗值,即

$$\begin{cases} \min \sum_{t=1}^{96} \sum_{\substack{i=2, j=3 \\ (i \neq j)}}^m \left| (U_{Bi-t}^\beta)^2 - (U_{Bj-t}^\beta)^2 \right| \\ \text{s.t.} \begin{cases} R_{BtBj}^\beta \leq R_{BtBj}^\beta \leq R_{BtBj, \max}^\beta, \beta = A, B, C \\ X_{BtBj}^\beta \leq X_{BtBj}^\beta \leq X_{BtBj, \max}^\beta, \beta = A, B, C \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $U_{Bi-t}^\beta$ 为分支层B中第 $\beta$ 相线路子节点 $x_{Bi}$ 在 $t$ 时刻的电压; $R_{BtBj}^\beta$ 与 $X_{BtBj}^\beta$ 分别为分支内线路 $x_{Bi}$ - $x_{Bj}$ 的电阻与电抗; $R_{BtBj, \min}^\beta$ 与 $R_{BtBj, \max}^\beta$ 分别为 $R_{BtBj}^\beta$ 的最小值与最大值; $X_{BtBj, \min}^\beta$ 与 $X_{BtBj, \max}^\beta$ 分别为 $X_{BtBj}^\beta$ 的最小值与最大值; $m$ 为分支节点总数。

将式(6)得到的相线阻抗估计结果代回至式(4)中,计算分支层内各父节点参数值,即

$$U_{B1-t}^{\beta'} = \frac{1}{m} \sum_{i=2}^m \sqrt{\frac{(U_{Bi-t}^\beta)^2 + (I_{Bi-t}^\beta)^2 (R_{B1Bi}^\beta + X_{B1Bi}^\beta)^2}{2(P_{Bi-t}^\beta R_{B1Bi}^\beta + Q_{Bi-t}^\beta X_{B1Bi}^\beta)}} \quad (7)$$

$$I_{B1-t}^{\beta'} = \sum_{i=2}^m I_{Bi-t}^\beta \quad (8)$$

$$P_{B1-t}^{\beta'} = \sum_{i=2}^m P_{Bi-t}^\beta + \sum_{i=2}^m P_{B1Bi-t}^{\beta, \text{Loss}} \quad (9)$$

$$Q_{B1-t}^{\beta'} = \sum_{i=2}^m Q_{Bi-t}^\beta + \sum_{i=2}^m Q_{B1Bi-t}^{\beta, \text{Loss}} \quad (10)$$

式(7)~(10)中, $U_{B1-t}^{\beta'}$ 、 $I_{B1-t}^{\beta'}$ 、 $P_{B1-t}^{\beta'}$ 、 $Q_{B1-t}^{\beta'}$ 分别为将相线阻抗估计值回代到式(4)中,计算得到的分支层B中第 $\beta$ 相线路节点 $x_{B1}$ 在 $t$ 时刻的新电压、电流、有功、无功值; $R_{B1Bi}^\beta$ 与 $X_{B1Bi}^\beta$ 分别为分支内线路 $x_{B1}$ - $x_{Bi}$ 的电阻与电抗; $P_{B1Bi-t}^{\beta, \text{Loss}}$ 、 $Q_{B1Bi-t}^{\beta, \text{Loss}}$ 分别为 $t$ 时刻的分支层B中第 $\beta$ 相线路 $x_{B1}$ - $x_{Bi}$ 上的有功与无功损耗, $\beta=A,B,C$ 。

在得到分支层中各父节点参数值后,将该节点作为其上一级节点的子节点,继续回溯计算,得到连接其上一级节点与该子节点间的线路阻抗值及相应节点参数;直至回溯至分支层首端(即配变层末端)节点,即可得到分支层内各条相线段的线路阻抗值。

### 3.3 配变层电流相角估计

基于该计算方法,得到线路阻抗及分支层首端(即配变层末端)节点的电压、电流、有功、无功值,构建节点功率校验模型,估计各节点电压、电流相位角,进一步完善节点参数。

基于系统设计标准和电力传输的要求,配变二次侧相位差一般设定为 $120^\circ$ 。因此,可假设配变层首端节点A相电压相位角 $\phi_{D1-t}^A$ 为 $0^\circ$ ,B相电压相位角 $\phi_{D1-t}^B$ 为 $120^\circ$ ,C相电压相位角 $\phi_{D1-t}^C$ 为 $-120^\circ$ 。通过最小化配变处实际测量功率与回溯计算功率的差值,建立节点功率校验模型,以获取配变层末端节点处的电压相位角,即

$$\min \left| P_{D1-t}^{\beta, \text{mea}} - U_{D1-t}^\beta \sum_{i=2}^m U_{Di-t}^\beta \left( \frac{\cos \varphi_{D1Di-t}^\beta}{R_{D1Di}^\beta} + \frac{\sin \varphi_{D1Di-t}^\beta}{X_{D1Di}^\beta} \right) \right| \quad (11)$$

式中, $P_{D1-t}^{\beta, \text{mea}}$ 、 $U_{D1-t}^\beta$ 分别为配变层父节点 $x_{D1}$ 在 $t$ 时刻的有功功率和电压测量值; $\varphi_{D1Di-t}^\beta$ 为配变层内节点 $x_{D1}$ 与 $x_{Di}$ 在 $t$ 时刻的电压相角差; $R_{D1Di}^\beta$ 、 $X_{D1Di}^\beta$ 分别为配变层内线路 $x_{D1}$ - $x_{Di}$ 电阻和电抗, $\beta=A,B,C$ 。

则配变层末端节点 $x_{Di}$ 电压相位角为

$$\varphi_{Di-t}^\beta = \varphi_{D1-t}^\beta - \varphi_{D1Di-t}^\beta \quad (12)$$

式中, $\varphi_{Di-t}^\beta$ 为配变层末端节点 $x_{Di}$ 在 $t$ 时刻的电压相位角; $\varphi_{D1-t}^\beta$ 为配变层首端节点 $x_{D1}$ 在 $t$ 时刻的电压相位角, $\beta=A,B,C$ 。

以配变层末端节点 $x_{Di}$ 电压相位角作为分支层首端节点 $x_{B1}$ 电压相位角,依据式(11)逐一求解,得到分支层内各节点的电压相位角,从而获得用户层首端节点 $x_{L1}$ 在 $t$ 时刻的电压相位角 $\varphi_{L1-t}^\beta$ ,则用户层首端节点 $x_{L1}$ 的电流相位角为

$$\alpha_{L1-t}^\beta = \varphi_{L1-t}^\beta - \arctan(Q_{L1-t}^\beta / P_{L1-t}^\beta) \quad (13)$$

式中, $\alpha_{L1-t}^\beta$ 为用户层首端节点 $x_{L1}$ 的电流相位角; $Q_{L1-t}^\beta$ 为用户层首端节点 $x_{L1}$ 在 $t$ 时刻的无功功率; $P_{L1-t}^\beta$ 为用户层首端节点 $x_{L1}$ 在 $t$ 时刻的有功功率, $\beta=A,B,C$ 。

### 3.4 全网中性线参数递推

由于本文A,B,C三相电流幅值和方向均不相等,故基于该求解过程得到的用户层首端节点电流相位角与文3.1负荷归算得到的用户层首端节点电流幅值,可计算出该点的电流矢量值,以用于准确计算得到中性线的电流参数值。根据中性线电流等于三相电流矢量和的原则,求解用户层首端中性点的电压与电流,即

$$\dot{I}_{L1-t}^N = \dot{I}_{L1-t}^A \angle \alpha_{L1-t}^A + \dot{I}_{L1-t}^B \angle \alpha_{L1-t}^B + \dot{I}_{L1-t}^C \angle \alpha_{L1-t}^C \quad (14)$$

$$\dot{U}_{L1-t}^N = \frac{1}{(\dot{I}_{L1-t}^N)^*} \sum_{\beta=A,B,C} (S_{D1-t}^\beta - \Delta S_{D1L1-t}^\beta - S_{L1-t}^\beta) \quad (15)$$

式(14)、(15)中,  $S_{D1-t}^\beta$  为配变层首端节点处的在  $t$  时刻的视在功率;  $\Delta S_{D1L1-t}^\beta$  为配变层首端节点至用户层首端节点间线路在  $t$  时刻的功率损耗;  $S_{D1-t}^\beta$  与  $S_{L1-t}^\beta$  分别为配变层首端节点处与用户层首端节点在  $t$  时刻的功率损耗;  $(\dot{I}_{L1-t}^N)^*$  为配变层首端节点处在  $t$  时刻的中性线电流  $\dot{I}_{L1-t}^N$  的共轭;  $\dot{I}_{L1-t}^N$  为用户层首端中性点的在  $t$  时刻的电流;  $\dot{I}_{L1-t}^A, \dot{I}_{L1-t}^B, \dot{I}_{L1-t}^C$  分别为用户层首端节点在  $t$  时刻的 A, B, C 相电流幅值;  $\angle \alpha_{L1-t}^A, \angle \alpha_{L1-t}^B, \angle \alpha_{L1-t}^C$  分别为用户层首端节点在  $t$  时刻的 A, B, C 相电流相位角;  $\dot{U}_{L1-t}^N$  为用户层首端中性点的在  $t$  时刻的电压矢量。

用户层的首端即为分支层的末端, 在获得中性线上该点的电流、电压和功率值后, 建立中性线电压匹配模型。以任意 4 个时刻的节点参数值递推中性线上各节点之间的线路电阻和电抗值, 即

$$\begin{aligned} (U_{Bi-t}^N)^2 - (U_{Bj-t}^N)^2 = & \\ (I_{Bj-t}^N)^2 [(R_{B1Bj}^N)^2 + (X_{B1Bj}^N)^2] - (I_{Bi-t}^N)^2 \cdot & \\ [(R_{B1Bi}^N)^2 + (X_{B1Bi}^N)^2] + 2(P_{Bj-t}^N R_{B1Bj}^N + & \\ Q_{Bj-t}^N X_{B1Bj}^N) - 2(P_{Bi-t}^N R_{B1Bi}^N + Q_{Bi-t}^N X_{B1Bi}^N) & \end{aligned} \quad (16)$$

式中,  $U_{Bi-t}^N, I_{Bi-t}^N, P_{Bi-t}^N, Q_{Bi-t}^N$  分别为分支层中性线上子节点  $x_{Bi}$  在  $t$  时刻的电压、电流、有功、无功值;

$U_{Bj-t}^N, I_{Bj-t}^N, P_{Bj-t}^N, Q_{Bj-t}^N$  分别为分支层中性线上子节点  $x_{Bj}$  在  $t$  时刻的电压、电流、有功、无功值;  $R_{B1Bj}^N, X_{B1Bj}^N$  分别为分支层中性线父节点  $x_{B1}$  与子节点  $x_{Bj}$  间线路电阻和电抗值;  $R_{B1Bi}^N, X_{B1Bi}^N$  分别为分支层中性线父节点  $x_{B1}$  与子节点  $x_{Bi}$  间线路电阻和电抗值。

式(6)~(10)亦可计算递推过程中的累计误差。因此, 在得到全网各线路段的相线阻抗与中性线阻抗值后, 本文就解决了三相不平衡下 LVDN 线路阻抗辨识困难的问题。

## 4 算例分析

本文采用浙江省某地区的实际 LVDN 系统对所提方法进行验证, 并设置不同情形验证该方法的有效性和局限性。

### 4.1 实例

本文使用浙江省某区域的 LVDN 系统实际采集的智能电表电压、电流、有功和无功数据作为实例, 共对 15 d 中的 1 140 个时间点进行样本采集, 每隔 15 min 采集一次, 数据相对误差范围为  $[-0.5\%, 0.5\%]$ 。该区域 LVDN 共有 24 条主干线, 每条主干线均由三相四线制线路组成。将该 LVDN 划分为配变层、分支层和用户层。其层级结构如图 5 所示。在该算例中, 仅在配变层末端节点与用户层末端用户处装设智能电表。在该实例中, 用户负荷由 30 个单相负荷和 9 个三相负荷构成, 其整体三相不平衡度范围为  $[0.211\%, 1.578\%]$ , 符合《电能质量 三相电压不平衡》(GB/T 15543—2008) 的规定。

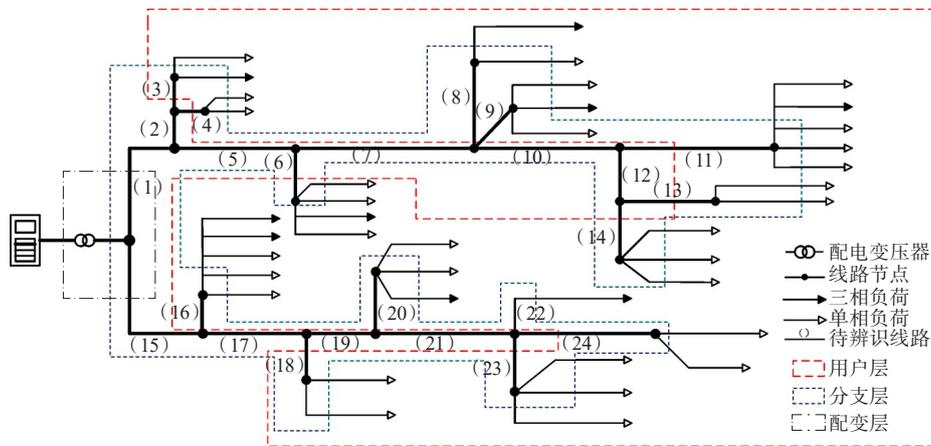


图 5 实际低压配电系统层级解构示意

Figure 5 Hierarchical structure of an actual low-voltage distribution system

本文选用相对误差  $\sigma_{Ki}^\alpha$  作为评估第  $i$  条主干线阻抗辨识结果的指标, 并采用平均相对误差  $\bar{\sigma}$  来评价整个 LVDN 区域内的整体辨识效果。其计算公式为

$$\begin{cases} \sigma_{Ki}^\alpha = |(K_{i,cal}^\alpha - K_{i,real}^\alpha) / K_{i,real}^\alpha| \\ \bar{\sigma} = \frac{1}{96} \sum_{\alpha=A}^N |(K_{i,cal}^\alpha - K_{i,real}^\alpha) / K_{i,real}^\alpha| \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $K_{i,cal}^\alpha$  为  $\alpha$  相第  $i$  条线路的阻抗估计值;  $K_{i,real}^\alpha$  为

$\alpha$ 相第  $i$  条线路的阻抗真实值;  $K$  为电阻或电抗,  $\alpha = A, B, C, N$ 。

#### 4.2 辨识结果分析

本文以 LVDN 末端用户负荷处与台区配变处智能电表所测得的 A、B、C 相电压、电流、有功以及无功量测幅值作为本研究计算方法的输入, 以人工记录的线路阻抗值作为阻抗真值参考, 对本文提出的三相不平衡下线路阻抗辨识方法的准确性和有效性进行比较分析。其三相负荷不平衡度为 0.311%, 不计负荷接入线阻抗及分布式电容对线路阻抗估计的影响的阻抗辨识结果相对误差如图 6 所示。

从图 6 中可以看出, 三相四线制线路中 A、B、C、N 相线路辨识误差范围分别为  $[-5.78\%, 5.64\%]$ 、 $[-7.40\%, 5.31\%]$ 、 $[-4.36\%, 5.45\%]$ 、 $[-6.52\%, 5.05\%]$ 。由式(17)计算得到的该 LVDN 区域内线路阻抗辨识平均相对误差为 1.27%。这表明辨识结果非常接近阻抗真实值, 体现了本文所提计算方法的有效性和准确性。

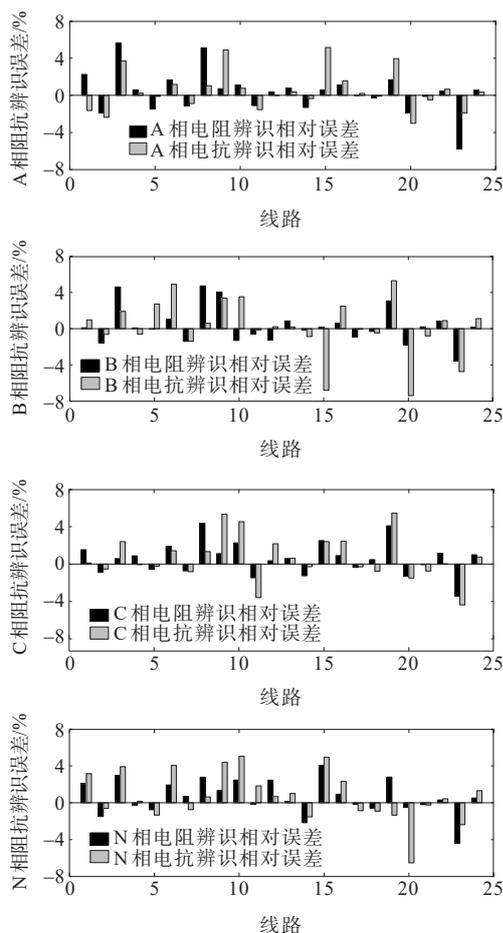


图6 阻抗辨识结果相对误差

Figure 6 Relative error of impedance identification results

#### 4.3 测量误差的影响

本文所采用的数据均来自于智能电表。但受外部电磁干扰、数据传输误差以及数据采集精度的不确定性等因素的影响, 智能电表的实际测量结果存在误差。作为阻抗辨识的基础, 需要对测量数据的不确定度进行评估, 以便量化测量不确定性对辨识结果的影响。标准不确定度计算公式为

$$u_{B,i} = b/k, i = 1, 2, 3 \quad (18)$$

式中,  $u_{B,i}$  为不同测量误差来源的 B 类标准不确定度;  $b$  为标准偏差;  $k$  为包含因子。

根据测量不确定度的评定指南<sup>[23]</sup>, 由于外部电磁干扰引入的误差来源属于 B 类标准不确定度, 且其误差小于电表测量误差的 5%, 可假设其服从均匀分布, 包含因子  $k$  为  $\sqrt{3}$ , 则相应的标准测量不确定度  $u_{B,1}$  为

$$u_{B,1} = (0.0250\% / \sqrt{3}) \approx 0.0144\% \quad (19)$$

数据传输误差源自智能电表的校验装置, 根据所用电表规定的校验装置校验误差, 可得该传输标准在 三相四线制线路下的测量不确定度为 0.0080%, 符合正态分布。因此, 根据正态分布包含因子取值规定可取  $k=3$ , 则相应的标准测量不确定度  $u_{B,2}$  为

$$u_{B,2} = (0.0080\% / 3) \times 100\% \approx 0.0027\% \quad (20)$$

数据采集精度引起的示值误差服从均匀分布, 其半宽定义  $a=b/2$ , 数据精度  $b=0.0100\%$ , 包含因子  $k=\sqrt{3}$ , 则相应的标准不确定度  $u_{B,3}$  为

$$u_{B,3} = (0.0100\% / \sqrt{3}) \approx 0.0058\% \quad (21)$$

该智能电表标准测量不确定度分量间相互独立, 可根据式(22)计算得到合成标准不确定度  $u_s$ , 即

$$u_s = \sqrt{u_{B,1}^2 + u_{B,2}^2 + u_{B,3}^2} \approx 0.0158\% \quad (22)$$

则取  $k=2$ , 测量误差的扩展不确定度  $U$  为

$$U = ku_s = 0.0316\% \quad (23)$$

根据测量不确定性的来源所产生的误差, 可得出本文所提出的阻抗辨识方法对于误差等级为 0.5 的三相四线制系统智能电表的测量不确定度为 0.0316%。这表明测量误差对于智能电表量测数据的影响较小, 可忽略其对阻抗辨识结果的影响。

#### 4.4 三相不平衡程度的影响

基于负荷用电时间和大小的差异导致三相负荷的不平衡性, 选择不同三相不平衡度区间内的量测值作为输入, 以分析所提计算方法对三相负荷不平衡程度的鲁棒性。通过计算, 得到整体三相四线制线路阻抗结果的平均相对误差, 结果如图 7 所示。

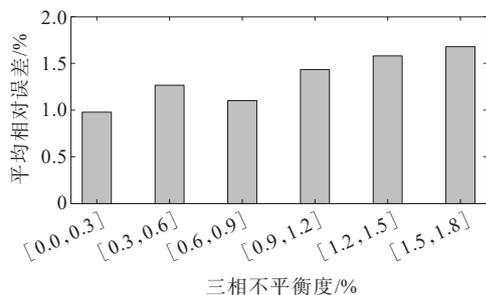


图7 不同三相不平衡度下的平均相对误差

Figure 7 Average relative error under different degrees of three-phase imbalance

从图7中可以看出,该法在不同三相不平衡度下的平均相对误差 $\bar{\sigma}$ 皆不超过1.68%,这表明在不同三相不平衡程度下,该方法的阻抗辨识效果良好。从图7中还可以看出,当三相不平衡度大于0.90%时, $\bar{\sigma}$ 值呈递增趋势。在本文采集的数据中,三相不平衡度符合标准IEC 61000-4-30,即LVND三相不平衡度不超过2.00%。因此,对于三相不平衡度超过2.00%的辨识结果, $\bar{\sigma}$ 值是否会继续递增,有待进一步研究和讨论。

#### 4.5 不同方法下的辨识对比

为验证本文所提计算方法在三相负荷不平衡条件下的优势,分别在三相不平衡度为0.211%、0.478%和0.933%的低压配电系统中测试三相线路相模变换法<sup>[26]</sup>、静态参数估计法<sup>[32]</sup>及本文所提方法的平均相对误差( $\bar{\sigma}$ 值),结果见表1。由表1可知,三相线路相模变换法虽涉及三相不平衡下的解耦以求解线路阻抗,但其本质仍是先将三相不平衡负荷平衡化。该简化步骤对其辨识精度有影响,导致其无法有效辨识中性线路阻抗值,但该方法在对抗三相不平衡度方面具有较好的鲁棒性,其在不同平衡度下的辨识平均相对误差相差不大。而静态参数估计法虽然能够辨识中性线路的阻抗值,但其数据输入须包含微相量测单元的相位角测量值,这增加了算法复杂度和成本。此外,该方法的辨识平均误差会随着不平衡度的增加而增加,且其增加幅度高于本文方法的。相比之下,本文提出的方法在无相角参数的情况下,仍能精确辨识三相不平衡低压配电网的线路阻抗值,具有显著优势。

表1 3种方法结果比较

Table 1 Comparison of results from three methods %

方法	$\bar{\sigma}_1$	$\bar{\sigma}_2$	$\bar{\sigma}_3$
三相线路相模变换法	2.02	1.99	2.03
静态参数估计法	1.19	1.24	1.33
层级解构与分相递归法	1.27	1.29	1.30

## 5 结语

本文提出一种三相不平衡低压配电网线路阻抗辨识方法,以末端用户的智能电表量测数据为输入,通过构建层级解构和分相递归策略,实现线路阻抗值的精确估计。通过理论推导与实例分析,得出如下结论:

1) 在三相不平衡的LVND中,采用层级解构和分相递归策略能够有效地精确辨识三相四线制线路的阻抗值,而无需相位角量测信息。

2) 本文所选用的方法对智能电表在测量误差方面具有良好的鲁棒性。

3) 在三相不平衡度满足国标要求(即低压配电网三相不平衡度不超过2%)时,所提方法的线路阻抗辨识结果较为精确,但当三相不平衡度超过国家标准要求时,其对辨识结果的影响尚需进一步研究和验证。

#### 参考文献:

- [1] 韦明杰,王聪博,余越,等.适用高比例分布式光伏接入的配电网多级保护优化配置方案[J].电力系统自动化,2023,47(22):55-65.  
WEI Mingjie, WANG Congbo, YU Yue, et al. Optimal configuration scheme of multi-staged protection in distribution network for integration of high proportion of distributed photovoltaic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 55-65.
- [2] 段瑶,高崇,程苒,等.考虑5G基站可调度潜力的配电网分布式光伏最大准入容量评估[J].中国电力,2023,56(12):80-85+99.  
DUAN Yao, GAO Chong, CHENG Ran, et al. Evaluation of distributed photovoltaic maximum hosting capacity for distribution network considering dispatchable potential of 5G base station[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 80-85+99.
- [3] 黄晶,王秀丽,邵成成,等.考虑新能源配网三相不平衡治理的电动汽车充电策略[J].电网技术,2024,48(9):3663-3672.  
HUANG Jing, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, et al. Charging strategy of electric vehicles considering three-phase unbalance mitigation of distribution network with new energy[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3663-3672.
- [4] 李英量,白博旭,朱琦,等.基于电动汽车充电站的不平衡配电网自愈及优化运行[J].电力建设,2024,45(6):37-46.  
LI Yingliang, BAI Boxu, ZHU Qi, et al. Self-healing and optimal operation of unbalanced distribution network

- based on electric vehicle charging station[J]. *Electric Power Construction*,2024,45(6):37-46.
- [6] 赵宇,李谦,张云晓,等.含分布式能源配电网中考虑供电可靠性的混合储能优化配置[J].*智慧电力*,2024,52(8):25-32+49.  
ZHAO Yu, LI Qian, ZHANG Yunxiao, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage considering power supply reliability in distribution network with distributed energy[J]. *Smart Power*,2024,52(8):25-32+49.
- [7] 江昇,文书礼,朱森,等.基于场景线性化重塑的用户侧储能容量高效规划方法[J].*电力系统自动化*,2024,48(5):30-37.  
JIANG Sheng, WEN Shuli, ZHU Miao, et al. Efficient capacity planning method for demand-side energy storage based on scenario linearization reconfiguration[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2024,48(5):30-37.
- [8] 郝思鹏,蔡欣灵,张仰飞,等.三相不平衡与线损的量化分析[J].*电网技术*,2021,45(4):1547-1552.  
HAO Sipeng, CAI Xinling, ZHANG Yangfei, et al. Quantitative analysis between three-phase unbalance and line losses[J]. *Power System Technology*,2021,45(4):1547-1552.
- [9] 林志雄,陈岩,蔡金锭,等.低压配电网三相不平衡运行的影响及治理措施[J].*电力科学与技术学报*,2009,24(3):63-67.  
LIN Zhixiong, CHEN Yan, CAI Jinding, et al. Impact and countermeasure of three-phase unbalanced operation for low voltage distribution systems[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2009,24(3):63-67.
- [10] 姚伟,刘彦彦,张玉良.基于序电流的三相负荷不平衡度数学建模与度量分析[J].*电力系统保护与控制*,2023,51(14):34-42.  
YAO Wei, LIU Yanyan, ZHANG Yuliang. Mathematical modeling and measurement analysis of three-phase load imbalance degree based on sequence current[J]. *Power System Protection and Control*,2023,51(14):34-42.
- [11] 何月军,郝思鹏,刘思亦,等.基于序分量和量测值的三相不平衡度量研究[J].*电力系统保护与控制*,2020,48(24):44-51.  
HE Yuejun, HAO Sipeng, LIU Siyi, et al. Research on three phase unbalanced ratio measurement based on sequence components and measured values[J]. *Power System Protection and Control*,2020,48(24):44-51.
- [12] 谢荣斌,杜帆,程湘,等.三相不平衡及谐波对三相四线低压配电网线损的影响[J].*电力系统保护与控制*,2020,48(21):22-30.  
XIE Rongbin, DU Fan, CHENG Xiang, et al. Influence of three-phase imbalance and harmonic on line loss of three-phase four-wire low-voltage distribution network[J]. *Power System Protection and Control*,2020,48(21):22-30.
- [13] 郑在涛,叶保璇,钟康骅,等.基于预测滚动的有源低压配电网三相不平衡治理方法[J].*电网与清洁能源*,2023,39(1):29-36.  
ZHENG Zaitao, YE Baoxuan, ZHONG Kanghua, et al. A predictive rolling-based three-phase unbalance management method of low-voltage active distribution network[J]. *Power System and Clean Energy*,2023,39(1):29-36.
- [14] 方仍存,雷何,杨东俊,等.变流器辅助换流的柔性切换开关拓扑与控制[J].*电力工程技术*,2023,42(1):43-49+123.  
FANG Rengcun, LEI He, YANG Dongjun, et al. A converter-assisting flexible switch topology and its control strategy[J]. *Electric Power Engineering Technology*,2023,42(1):43-49+123.
- [15] 姚伟,刘彦彦,张玉良.基于序电流的三相负荷不平衡度数学建模与度量分析[J].*电力系统保护与控制*,2023,51(14):34-42.  
YAO Wei, LIU Yanyan, ZHANG Yuliang. Mathematical modeling and measurement analysis of three-phase load imbalance degree based on sequence current[J]. *Power System Protection and Control*,2023,51(14):34-42.
- [16] 刘科研,贾东梨,王薇嘉,等.考虑分布式光伏电源接入模式的低压配电网不平衡线损计算方法[J].*电力建设*,2021,42(10):129-138.  
LIU Keyan, JIA Dongli, WANG Weijia, et al. Calculation method of unbalanced line loss in low-voltage distribution network considering the access mode of distributed photovoltaic generation[J]. *Electric Power Construction*,2021,42(10):129-138.
- [17] 刘文霞,白亚玲,吕笑影,等.考虑调控和交易模式影响的中低压分布式光伏协调配置方法[J].*电网技术*,2024,48(2):577-590.  
LIU Wenxia, BAI Yaling, LYU Xiaoying, et al. Coordinated configuration method of medium-and low-voltage distributed network with distributed PV considering influence of regulation and trading modes[J]. *Power System Technology*,2024,48(2):577-590.
- [18] 张伟骏,李智诚,陈大玮,等.配网侧分布式储能系统的随机优化配置和选址方法[J].*高压电器*,2023,59(7):125-135.  
ZHANG Weijun, LI Zhicheng, CHEN Dawei, et al. Stochastic optimal configuration and site selection method of grid-side distributed energy storage system[J]. *High Voltage Apparatus*,2023,59(7):125-135.
- [19] 印欣,张锋,阿地利·巴拉提,等.新型电力系统背景下电热负荷参与实时调度研究[J].*发电技术*,2023,44(1):115-124.  
YIN Xin, ZHANG Feng, ADILI Balati, et al. Study on participation of electricity-driven thermal load in real-time scheduling of new power system[J]. *Power*

- Generation Technology,2023,44(1):115-124.
- [20] 张高,王旭,蒋传文.基于主从博弈的含电动汽车虚拟电厂协调调度[J].电力系统自动化,2018,42(11):48-55.  
ZHANG Gao,WANG Xu,JIANG Chuanwen.Stackelberg game based coordinated dispatch of virtual power plant considering electric vehicle management[J].Automation of Electric Power Systems,2018,42(11):48-55.
- [21] 肖峻,李承晋,屈玉清,等.含储能有源配电网的运行域模型、求解及机理分析[J].电网技术,2023,47(12):5181-5199.  
XIAO Jun,LI Chengjin,QU Yuqing,et al.Dispatchable region model and its solution and mechanism for active distribution network with energy storage[J].Power System Technology,2023,47(12):5181-5199.
- [22] 闫群民,董新洲,穆佳豪,等.基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J].电力系统保护与控制,2022,50(10):11-19.  
YAN Qunmin,DONG Xinzhou,MU Jiahao,et al.Optimal configuration of energy storage in an active distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimization[J].Power System Protection and Control,2022,50(10):11-19.
- [23] 唐巍,李天锐,张璐,等.基于三相四线制最优潮流的低压配电网光伏-储能协同控制[J].电力系统自动化,2020,44(12):31-40.  
TANG Wei,LI Tianrui,ZHANG Lu,et al.Coordinated control of photovoltaic and energy storage system in low-voltage distribution networks based on three-phase four-wire optimal power flow[J].Automation of Electric Power Systems,2020,44(12):31-40.
- [24] 廖思源.配电网三相不平衡产生原因及治理技术研究[J].电力设备管理,2020(9):172+181.  
LIAO Siyuan.Research on causes and treatment technology of three-phase unbalance in distribution network[J].Electric Power Equipment Management,2020(9):172+181.
- [25] 戴雪婷,李辉,何柏娜,等.配电网拓扑分析与线路参数辨识研究[J].电力科学与技术学报,2023,38(4):46-56.  
DAI Xueting,LI Hui,HE Baina,et al.Research on topology analysis and line parameter identification of distribution network[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(4):46-56.
- [26] 刘奕炫,夏向阳,刘雄.基于功率平衡的配电线路节点阻抗在线量测方法[J].电力学报,2021,36(3):219-227.  
LIU Yixuan,XIA Xiangyang,LIU Xiong.On-line measurement of distribution network based on phase-mode transformation and power balance[J].Journal of Electric Power,2021,36(3):219-227.
- [27] 王凯亮,曾远方,李家淇,等.基于希尔伯特-黄变换的新型配电系统行波故障定位仿真研究[J].供用电,2023,40(9):43-49.  
WANG Kailiang,ZENG Yuanfang,LI Jiaqi,et al.Simulation study on traveling wave fault location of new distribution network system based on Hilbert-Huang transform[J].Distribution & Utilization,2023,40(9):43-49.
- [28] BAN J,PARK J Y,KIM Y J,et al.AMI data-driven strategy for hierarchical estimation of distribution line impedances[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2023,38(1):513-527.
- [29] 梁栋,张煜堃,王守相,等.基于非线性回归的含隐节点低压配电网参数和拓扑联合辨识[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(11):28-36.  
LIANG Dong,ZHANG Yukun,WANG Shouxiang,et al.Nonlinear regression-based combined parameter and topology identification for low-voltage distribution network with latent nodes[J].Proceedings of the CSU-EPSA,2021,33(11):28-36.
- [30] 宁家鑫,刘羽霄,章家维,等.数据驱动的三相配电网拓扑与线路参数辨识[J].中国电机工程学报,2021,41(8):2615-2628.  
NING Jiaxin,LIU Yuxiao,ZHANG Jiawei,et al.Data-driven topology and line parameter identification of three-phase distribution grid[J].Proceedings of the CSEE,2021,41(8):2615-2628.
- [31] 顾大德,肖健,韦梦立,等.含逆变型分布式电源的花瓣型配电网故障定位策略研究[J].电测与仪表,2023,60(11):53-59.  
GU Dade,XIAO Jian,WEI Mengli,et al.Research on fault location strategy for petal-shaped distribution network with inverter-interfaced distributed generation[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(11):53-59.
- [32] REN P X,LEV-ARI H,ABUR A.Tracking three-phase untransposed transmission line parameters using synchronized measurements[J].IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(4):4155-4163.
- [33] BIPM,IEC,IFCC,ISO,IUPAC,IUPAP and OIML.Guide to the expression of uncertainty in measurement[S].1995, Geneva:ISO,Switzerland.