

配电网拓扑分析与线路参数辨识研究

戴雪婷¹, 李 辉², 何柏娜¹, 田 野³, 隗 笑⁴, 侯莉媛⁴, 吕东飞⁵

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074; 3. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006; 4. 国网山东省电力公司枣庄供电公司, 山东 枣庄 277000; 5. 国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

摘 要: 针对部分配网不能采集所有节点电压相角信息的情况, 提出通过分析配电网现有量测设备可获取的功率电压数据, 采用数字化的方式映射物理系统实现配电网拓扑结构和线路参数可视化。为实现这一目标, 首先, 基于多组时间断面下的量测数据, 根据潮流方程建立线性回归的拓扑与线路参数辨识模型, 采用最小二乘法求解模型中导纳参数。其中, 考虑实际数据获取过程中存在不可控因素导致部分数据缺失, 利用最小方差填补缺失数据, 保证信息完整性; 其次建立修正模型, 采用改进的牛拉法迭代修正拓扑和线路参数初值, 对拓扑结构和线路参数精度进行调整; 最后利用 IEEE 33 节点算例验证该方法可行性。

关 键 词: 配电网; 拓扑结构辨识; 线路参数; 改进的牛拉法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.005 中图分类号: TM727 文章编号: 1673-9140(2023)04-0046-11

Research on topology analysis and line parameter identification of distribution network

DAI Xueting¹, LI Hui², HE Baina¹, TIAN Ye³, WEI Xiao⁴, HOU Liyuan⁴, LÜ Dongfei⁵

(1. College of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China; 4. Zaozhuang Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zaozhuang 277100, China; 5. Zibo Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zibo 255000, China)

Abstract: Aiming at the situation that some distribution networks can not collect the voltage phase angle information of all nodes, the visualization of the topology structure and line parameters of the distribution network is realized by mapping the physical system in a digital way through the analysis of the power and voltage data that can be obtained by the existing measurement equipment of the distribution network. To reach this goal, firstly, based on the measured data under multiple groups of time sections, a linear regression topology and line parameter identification model is established according to the power flow equation. The admittance parameters in the model are solved by the least square method. Considering the uncontrollable factors in the actual data acquisition process resulting in the loss of some data, the minimum variance is used to fill the missing data to ensure the integrity of the information. Secondly, a modified model is established, and the initial values of topology and line parameters are iteratively modified by the improved Newton-Raphson method to adjust the accuracy value of the topology structure and line parameters. Finally, the applicability of the approach is demonstrated by IEEE 33 node example.

Key words: distribution network; topology structure identification; line parameter; improved Newton-Raphson method

收稿日期: 2022-08-10; 修回日期: 2023-02-16

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2401104); 山东省研究生教育 quality 提升计划项目(SDYKC19103)

通信作者: 李 辉(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事智能配电网技术、高电压绝缘与试验技术以及输变电设备故障监测与诊断等研究; E-mail: lihui2@epri.sgcc.com.cn

配电网是电力系统重要组成部分,是连接发电侧和用户侧重要枢纽,是实现“碳达峰,碳中和”目标的基础平台。为完成向低碳化能源转型,未来配电网中分布式能源、储能设备占比增加^[1-2],电能由单向传输发展为双向传输,电网形态发生变化,由集中式供电向分布式能源方向发展。随着分布式能源接入,配电网运行时不确定因素增加^[3-4],拓扑结构复杂多变,给配电网拓扑辨识带来挑战^[5]。

为了更好地调控连接发电侧和用电侧的配电网,需要实时正确的网络拓扑为配电网状态估计、潮流计算和网络重构等提供决策依据,用于支撑配电网调度运行、抢修指挥等工作^[6],研究更高效、准确的配电网拓扑辨识方法对配电管理系统相关软硬件设计具有重要意义。

近年来,数据获取与分析技术也在飞速发展,为数据驱动在各领域的应用奠定了坚实基础。大数据思维模式下,采用数据驱动的分析方法在电力系统的研究中掀起热潮^[7]。通过分析数据中蕴含的配电网运行信息^[8],达到辨识配电网拓扑结构和线路参数的目的,为电网安全稳定运行提供辅助支撑成为新的思考方向。

拓扑结构和线路参数是系统模型的关键组成部分,是电力系统运行规划的前提。目前,已有学者对配电网拓扑结构识别开展研究,文献[9]利用历史电压和功率测量数据,基于线性化压降近似和线性回归,逐层判断子节点与母节点的关系,从而估计网络拓扑结构;文献[10]仅利用智能电表的电压数据,提出了基于Lasso算法并通过正则化线性回归重建网络拓扑,使用量测设备采集海量的数据中包含冗余和不相关信息;文献[11-12]采用多组电压幅值数据及相应的拓扑结构形成的数据集,获取最优特征子集和优化模型,实现拓扑在线辨识;文献[13-14]提出了一种基于主成分分析低压配电网拓扑结构的方法,判断节点之间连接关系;文献[15]利用台区用户时间序列计算用户与台区之间的灰色关联度,确定用户所属台区,并根据电压平均值大小确定馈线连接;文献[16]提出采用遗传智能算法分析某时刻电网节点状态量,求解节点进、出线间全局最优组合,得到电网唯一拓扑。目前对

于线路参数辨识的研究,文献[17-21]提出了利用智能电表采集的有功和无功功率、电压幅度及由微型相量量测单元采集的电压相位角数据估计拓扑与参数;文献[22]首先基于支持向量机模型将多个拓扑结构下的量测数据分类,再建立拓扑参数的修正模型。部分配电网由于建设年代久远,受通讯技术和成本投入的限制^[23],不能获取所有节点的相角信息,则该识别方法不能完全适用于量测设备不足的配电网。

首先,在未知原有拓扑结构的前提下,本文基于有限量测装置采集的数据,实现配电网拓扑辨识和线路参数信息的精确辨识,并提出基于智能电表获取的量测数据,利用数据映射物理模型的方法实现对网络拓扑结构和线路参数辨识,通过功率电压数据建立数学模型,填补缺失的量测数据;其次,本文采用线性回归的方法获取拓扑结构和线路初值,将线路初值代入改进的牛拉法中进一步修正拓扑和线路参数,从导纳数据中得到配电网节点的连接关系;最后,通过IEEE 33节点系统进行仿真验证,对比分析辨识结果的准确性,证明所提方法的可行性,并通过加入噪声数据验证该方法的鲁棒性。

1 配电网拓扑结构与参数辨识模型

配电网系统的拓扑结构改变,系统对应潮流方程中的拓扑导纳矩阵也随之改变,通过辨识系统的导纳矩阵可以达到拓扑辨识的目的。如果导纳矩阵元素非零,则表示节点*i*和*j*直接相连。

1.1 数学模型

利用配电网中量测设备获取的历史数据或实时数据,即配电网节点注入的有功功率*P*、无功功率*Q*及电压幅值*V*,根据求解潮流方程得到的电导*g*、电纳*b*数据,反映网络拓扑结构和线路参数。

节点功率方程极坐标形式为

$$\begin{cases} P_i = P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, i, j 为节点编号; P_i, Q_i 分别为注入节点 i 的有功、无功功率; P_{Gi}, Q_{Gi} 分别为节点 i 处电源发出的有功、无功功率; P_{Li}, Q_{Li} 分别为节点 i 处负荷消耗的有功、无功功率; G_{ij}, B_{ij} 分别为节点 i, j 之间对应的 g, b 组成的导纳参数; V_i, V_j 分别为节点 i, j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i, j 之间的电压相角差。

式(1)中配电网中有功、无功功率及电压数据可由智能电表获取, 因此, 求解导纳矩阵问题转化为利用最小二乘法求解 g, b, θ 参数的问题:

$$\begin{cases} \min_{[G_{ij}], [B_{ij}], \theta_{ij}} (P_i - \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}))^2 \\ \min_{[G_{ij}], [B_{ij}], \theta_{ij}} (Q_i - \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}))^2 \end{cases} \quad (2)$$

1.2 辨识框架

配电网中的量测装置有限, 现有的量测装置主要采集节点电压幅值、支路功率等实时量测数据, 在不增加量测装置的前提下利用可获取的数据辨识拓扑和线路参数, 拓扑结构辨识流程如图1所示。

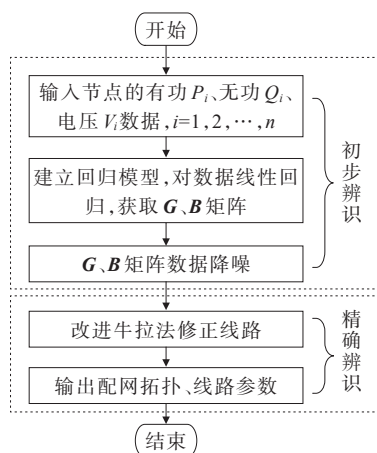


图1 辨识框架

Figure 1 Identification framework

2 配电网拓扑与参数矩阵初步辨识

由图论知识可知: 一个 n 节点网络, 对应的无向图有 $n(n-1)/2$ 条边, 拓扑结构有 $2^{n(n-1)/2}$ 种可能, 拓扑结构逐一列举出来比较费时, 本文通过2步对拓扑结构和线路参数进行辨识。

1) 初步辨识。采用数据驱动方式得到网络大

致拓扑结构, 进一步减小拓扑结构的可能性。首先, 根据配电网系统特性可知任意相邻两节点之间电压相角差很小, 即可忽略未知的电压角, 对电导、电纳矩阵进行线性回归; 然后, 为了获得更准确结果, 初步辨识中线性回归应采用具有一定冗余度的量测值, 即多个时间断面的量测信息, 获取关于拓扑结构和导纳矩阵估计值。

2) 采用数据、模型同时驱动的方法得到线路参数精确估计值, 即为式(2)的最优解。

2.1 目标函数

因为潮流方程中导纳参数蕴含当前网络的拓扑结构和线路参数, 所以目的是得到满足式(1)的 G_{ij}, B_{ij} 值。当配电网系统处于稳态运行时, 相邻两节点间电压相角差很小^[24], 潮流方程中三角函数近似认为 $\sin \theta_{ij} \approx 0, \cos \theta_{ij} \approx 1$, 方程式(1)两边同时除以 V_i , 得到线性化潮流方程:

$$\begin{cases} [P/V] = V\hat{G} \\ [Q/V] = -V\hat{B} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $[P/V] = [p_1/v_1, p_2/v_2, \dots, p_n/v_n], [Q/V] = [q_1/v_1, q_2/v_2, \dots, q_n/v_n], V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$, 均为同一时刻采集的数据信息; \hat{G}, \hat{B} 分别为电导、电纳矩阵的近似值。

目标函数表示为

$$\begin{cases} \min_{\hat{G}} \|[P/V] - V\hat{G}\|_2 \\ \min_{\hat{B}} \|[Q/V] - (-V\hat{B})\|_2 \end{cases} \quad (4)$$

2.2 约束条件

为了满足配电网中导纳矩阵始终为对称矩阵的特征, 近似导纳矩阵应满足约束:

$$\begin{cases} [\hat{G}_{ij}^S] = ([\hat{G}_{ij}] + [\hat{G}_{ij}]^T) / 2 \\ [\hat{B}_{ij}^S] = ([\hat{B}_{ij}] + [\hat{B}_{ij}]^T) / 2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, \hat{G}_{ij}^S 为对称的电导矩阵; \hat{B}_{ij}^S 为对称的电纳矩阵。

2.3 导纳矩阵数据降噪

由于获取的量测数据存在误差或线性回归导纳矩阵时存在偏差, 得到的导纳矩阵中存在噪声数据, 需移除导纳矩阵中存在的噪声元素。设定一个阈值 γ_{TOP} , 如果支路上的 $\gamma_{(i,j)}$ 小于设定值 γ_{TOP} , 认为该支路不存在, 则该支路对应的 G_{ij} 为零, $\gamma_{(i,j)}$ 设为

$$\gamma_{(i,j)} = |G_{ij}| / |G_{ii}| \quad (6)$$

式中, G_{ii} 为节点 i 的自电导; G_{ij} 为节点 i, j 之间的互电导。

由于 n 个节点网络支路数为 $n-1$ 条, 而在辐射网和弱环网中, 节点连接的支路数小于 $n-1$ 条, 因此, 将 γ_{TOP} 值设为 $1/(n-1)$, 增大 γ_{TOP} 的值可删除更多错误支路, 减少迭代时间。如果精确辨识过程中迭代结果不收敛, 表明原来配网中存在的某些支路被错误删除, 应重新调整 γ_{TOP} , 减小 γ_{TOP} 值, 直至迭代结果收敛。初步辨识中一般设置阈值 $\gamma_{TOP} = 0.05$ 。

拓扑与线路参数初步辨识流程如图 2 所示。

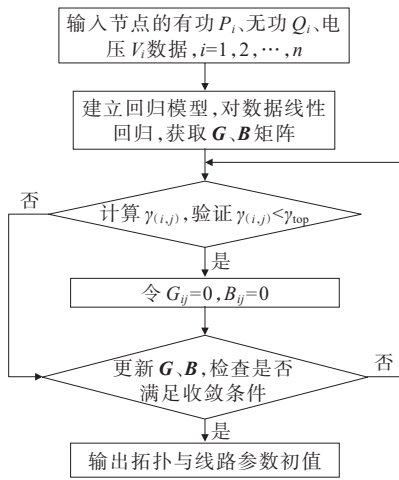


图 2 初步辨识流程

Figure 2 Flow chart of preliminary identification

2.4 数据缺失处理

量测数据中蕴含着配电网运行状态的丰富信息, 但其在传输过程中由于两类原因导致出现部分信息的缺失, 即①人为因素所导致的数据采集或传输数据缺失, 如录入数据失败、工作失误造成数据缺失; ②由于设备故障、设备通讯失败等客观原因所造成的数据缺失, 如数据存储失败、数据传输路线断线等。

配电网同一拓扑结构下采集的量测数据受相同的潮流约束, 节点电压曲线相似, 根据电压分布规律特性, 得到缺失数据预估值, 填补量测样本缺失数据, 电压数据缺失曲线如图 3 所示, 可以看出, t_2, t_3 时刻节点 22 电压数据缺失, 曲线在节点 22 处出现断点。

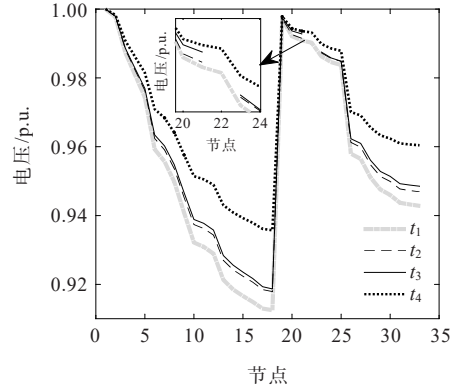


图 3 节点 22 电压数据缺失

Figure 3 Node 22 voltage data missing

设采集的测量样本为 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 每个样本采集 h 维数据, 采集 n 个节点的 h 组数据 $x_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,h}] (i \in 1, 2, \dots, n)$, 若某特征数据 $x_{i,k}$ 缺失, $1 \leq k \leq h$, 则通过以下步骤求解该数据的预估值。

1) 计算除去 k 维的特征样本数据, 并计算训练样本与测试样本数据方差。

$$S_i = [s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,h-1}] = [x_1 - x_{i,1}, \dots, x_{k-1} - x_{i,k-1}, x_{k+1} - x_{i,k+1}, \dots, x_h - x_{i,h}] \quad (7)$$

2) 计算向量差的平均值 \bar{s} 与方差 σ^2 。

$$\begin{cases} \bar{s} = \frac{1}{h-1} \sum_{j=1}^{h-1} s_{i,j} \\ \sigma^2 = \frac{1}{h-1} \sum_{j=1}^{h-1} (s_{i,j} - \bar{s}_i)^2 \end{cases} \quad (8)$$

3) 找到方差最小对应的训练样本数据 x_i , 缺失值 x_k 的预测值为

$$x_k = x_{i,k} + \bar{s}_i \quad (9)$$

通过计算得到 t_2, t_3 时刻节点 22 电压数据的预测值, 生成的电压曲线如图 4 所示, 可以看出该方法对数据中的缺失值能取得很好的填补效果。

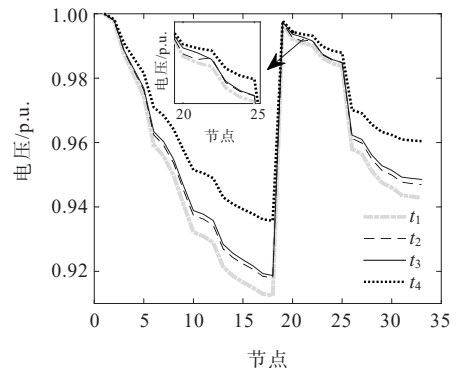


图 4 节点 22 电压缺失数据填补

Figure 4 Node 22 voltage missing data filling

3 线路参数精确辨识

初步辨识拓扑存在误添加支路,线路参数与实际值存在较大误差。为了减小误差,获得更精确的拓扑结构与线路参数,需对初步辨识结果进一步修正,建立拓扑与线路参数修正模型。将初步辨识结果的拓扑和线路的 g 、 b 、 θ 参数作为初始值代入改进的Newton-Raphson法(简称改进的牛拉法)中,计算雅克比矩阵和功率不平衡量,逐次迭代更新拓扑与导纳参数^[25]。移除迭代过程中 g 、 b 较小的分支线路,减小线路参数误差并校正拓扑结构。

3.1 建立改进的牛拉法模型

改进的牛拉法是根据泰勒级数展开的一阶近似表达式,当 x_0 接近于真实值 x 时,真实值 $x = x_0 + \Delta x$,其表达式为

$$f(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y) = f(x_0, y_0) + (\Delta x \frac{\partial}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial}{\partial y}) f(x, y)|_{x=x_0, y=y_0} + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} (k\Delta x \Delta y \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{\partial^{k-1}}{\partial y^{k-1}} + (\Delta y)^k \frac{\partial^k}{\partial y^k}) f(x, y)|_{x=x_0, y=y_0} \quad (10)$$

其中, x 代表 g 和 b , y 代表 θ , f 代表潮流方程对应关系。

改进的牛拉法略去泰勒级数高次项,将非线性复杂问题简化为线性问题。若选取的初值偏离真实值过大,则不可忽略二次及二次以上的高次项,潮流计算的结果也将不准确,会出现迭代次数增多,甚至迭代不收敛的情况。所以相角的选择和每次的迭代结果都会影响收敛程度,选择合理的相角初值可以促进收敛,减少迭代次数。首先根据线路参数初值进行潮流计算,可得初始相位;然后将初始相位带入进行迭代计算,通过逐次迭代更新线路参数,使电导和电纳都逐渐趋于真实值。

改进的牛拉法以参数 g 、 b 、 θ 为求解变量,得到修正方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}_M = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial g} & \frac{\partial \Delta P}{\partial b} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial g} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial b} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} \end{bmatrix}_M \cdot \begin{bmatrix} \Delta g \\ \Delta b \\ \Delta \theta \end{bmatrix}_M \quad (11)$$

式中, ΔP 为迭代过程中的有功偏差; ΔQ 为迭代过程中的无功偏差; Δg 、 Δb 、 $\Delta \theta$ 分别为电导、电纳、相角的修正量; M 为最小样本数。

在配电网模型中,因Jacobian矩阵行数与列数不等,故无法对雅克比矩阵直接求逆运算。通过求雅克比矩阵的广义逆矩阵,得到电导、电纳电压相角的最优解,可减少错误测量带来的误差。

$$\begin{bmatrix} \Delta g \\ \Delta b \\ \Delta \theta \end{bmatrix}_M = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial g} & \frac{\partial \Delta P}{\partial b} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial g} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial b} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} \end{bmatrix}_M^\dagger \cdot \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}_M \quad (12)$$

式中, \dagger 为雅克比矩阵的广义逆运算。

经过式(12)计算得到线路参数不平衡量,将不平衡量代入进行修正,修正公式为

$$\begin{bmatrix} g \\ b \\ \theta \end{bmatrix}_M^{(k+1)} = \begin{bmatrix} g \\ b \\ \theta \end{bmatrix}_M^{(k)} + \begin{bmatrix} \Delta g \\ \Delta b \\ \Delta \theta \end{bmatrix}_M \quad (13)$$

设置满足牛拉法迭代终止条件,需满足修正后的参数误差小于设定值 ϵ ,即

$$\|[\Delta P^T, \Delta Q^T]\|_2 < \epsilon \quad (14)$$

其中, ϵ 为设定的收敛阈值,一般设置为 10^{-10} ,若式(14)满足该精度时停止迭代。

选择合适的样本数据可以减少精确辨识时间,因此需要对最小样本数据 M 进行估计。设配电网中存在 n 个节点、 m 条支路,则待求未知变量个数为 $n + 2m - 1$,保证雅克比矩阵具有唯一逆的条件,需满足方程数量大于变量的数量,即 $2m + M(n - 1) \leq 2M \cdot n$,计算得到所需样本数量为 $M \geq 2m / (n + 1)$ 。

3.2 雅克比矩阵求解

文3.1中推导了一组测量样本 P 、 Q 、 V 对应牛拉法迭代过程中雅克比矩阵的每个元素,与传统潮流计算中的雅克比矩阵相比,改进的雅克比矩阵中存在6个矩阵分区,即

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial g} & \frac{\partial \Delta P}{\partial b} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial g} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial b} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & C \\ B & -A & D \end{bmatrix} \quad (15)$$

1) 支路功率分块矩阵。根据潮流方程有

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - \sum_{i,j} [(v_i^2 - v_j \cos \theta_{ij}) g_{ij} - v_i v_j \sin \theta_{ij} b_{ij}] \\ \Delta Q_i = Q_i - \sum_{i,j} [-v_i v_j \sin \theta_{ij} g_{ij} - (v_i^2 - v_j \cos \theta_{ij}) b_{ij}] \end{cases} \quad (16)$$

分块矩阵 A 、 B 中的参数为

$$A_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial g_{ij}} = v_i^2 - v_i v_j \cos \theta_{ij} \quad (17)$$

$$B_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial b_{ij}} = -v_i v_j \sin \theta_{ij} \quad (18)$$

2) 功角分块矩阵。功角分块矩阵 C 、 D 是 P 、 Q 与 θ 之间的关系, 由于 θ 不能线性表示, 在改进的牛拉法中, 偏导数通常表示为增量的相关性。

$$C_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_{ij}} =$$

$$\begin{cases} v_i \sum_{j,j \neq i} v_j (-G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}), & i = j \\ v_i v_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), & i \neq j \end{cases} \quad (19)$$

$$D_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_{ij}} =$$

$$\begin{cases} v_i \sum_{j,j \neq i} v_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), & i = j \\ -v_i v_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), & i \neq j \end{cases} \quad (20)$$

3.3 迭代修正拓扑和线路参数

为了解决初步辨识得到估计值不准确的问题, 采用改进的牛拉法在迭代过程中修正拓扑及线路参数。将初步辨识拓扑和线路参数代入到牛拉迭代算法中, 逐步收敛逼近实际值, 在迭代过程中逐步接近正确拓扑结构。

在改进的牛拉法迭代过程中, 修正错误的 g 、 b 可能存在模型陷入局部最优点的问题, 导致出现不符合正常配电网中导纳值, 即负 g 或正 b 。支路电导 g 小于设置的阈值时认为是错误分支, 对导纳矩阵扫描找到错误分支并删除, 将该分支的 g 、 b 修改为零。通过这种方式, 在迭代过程中校正辨识的拓扑结构和线路参数。

精确辨识具体流程如图5所示。本文采用平均绝对百分误差为线性回归指标, 评价线性回归拟合程度, MAPE定义如下:

$$e_{\text{MAPE}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (21)$$

式中, y_i 为真实值; \hat{y}_i 为预估值; k 为采样数; MAPE 越小证明预估值越接近真实值。

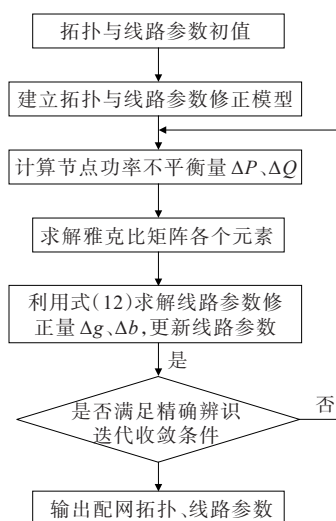


图5 精确辨识流程

Figure 5 Flow chart of accurate identification

4 算例分析

为了证明该方法的可行性, 采用 IEEE 33 节点系统作为测试算例, 通过 Matlab 软件对所提拓扑与线路参数辨识方法进行仿真分析。系统基准电压为 12.66 kV, 存在 32 条支路连接, 具体接线方式如图6所示。

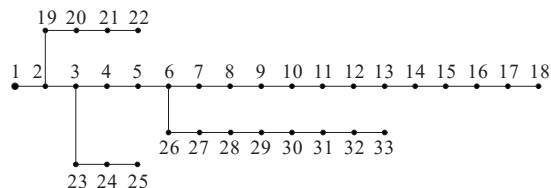


图6 IEEE 33节点运行拓扑结构

Figure 6 IEEE 33 node operating topology structure

4.1 数据获取来源

本文采用居民用户电力负荷数据模拟配电网系统运行状态, 用户节点 24 h 内有功负荷曲线如图7所示。通过分析实际用户负荷特点, 构造符合本

文算例中配电网节点有功、无功负荷数据,由Matpower仿真获得节点注入 P 、 Q 、 V 等量测数据。为验证该方法的鲁棒性,在具体负荷数据的基础上加入噪声数据,且该噪声服从独立同分布。

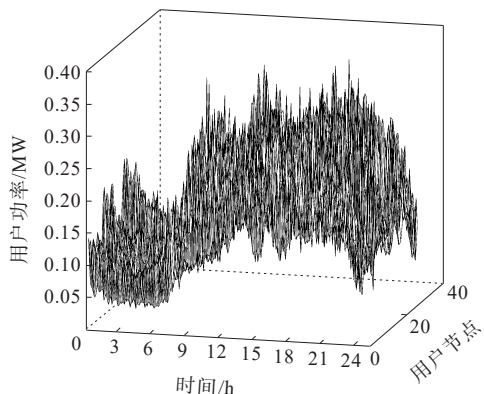


图7 节点24 h有功功率

Figure 7 24-hour active power of nodes

4.2 拓扑结构与线路参数辨识

采用IEEE 33测试所提方法的有效性,该方法通过反复运行潮流计算,生成多个时间断面的 P 、 Q 、 V 量测数据。现代配电网中大部分配备0.2 s级测量设备,其测量的功率电压数据相对误差为 $\pm 0.2\%$ 。由于历史数据可能存在缺失或错误的记录,为了更接近实际情况, P 、 Q 和 V 数据中分别添加0.31%、0.1%的高斯噪声数据,以模拟真实获取的量测数据中含有的误差^[25]。初步辨识拓扑连接方式如图8所示(\times 表示自导纳, \bullet 表示互导纳)。

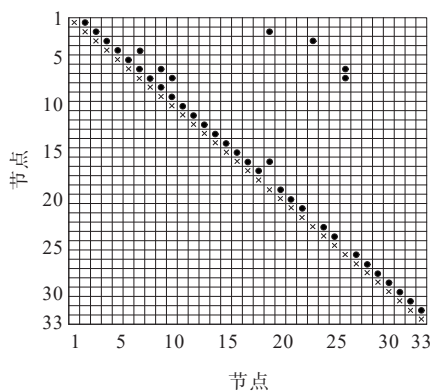


图8 初步辨识拓扑结构

Figure 8 Initial identification of the topology structure

图8中由初步辨识得到的拓扑结构存在37条连接支路,而IEEE 33配电系统中实际投入运行的支路有32条,初步辨识结果中存在5条误添加支

路,如支路4-7、7-26等为误添加支路。初步辨识电导 g 平均误差为44.24%,电纳 b 平均误差为36.53%,初步辨识所用时长为0.134 4 s,线路电导、电纳参数真实值与识别结果对比如图9所示。

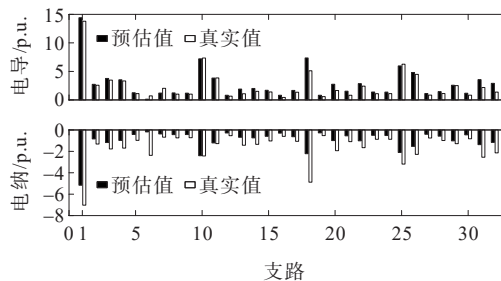


图9 初步辨识线路电导 g 、电纳 b 参数

Figure 9 Preliminary identification of line conductance g and susceptance b

将初步辨识得到的线路参数作为精确辨识的初值进行迭代,设置迭代收敛阈值为 10^{-10} 。精确辨识得到的电导 g 平均误差为0.12%,电纳 b 平均误差为0.09%,精确辨识过程用时14.17 s,精确辨识得到线路电导、电纳参数真实值与识别结果如图10所示。

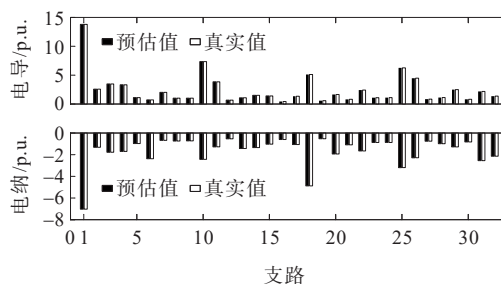


图10 精确辨识线路电导 g 、电纳 b 参数

Figure 10 Accurate identification of line conductance g and susceptance b

由图10可知,随着精确辨识过程中迭代次数增加,线路的 g 、 b 参数误差逐步减小,第4次迭代时误差接近于零,验证使用该方法得到的辨识结果有较高准确性,误差随迭代次数的变化如表1所示。

精确辨识经过7次迭代,修正初步辨识结果中误添加的错误支路,得到正确拓扑结构如图11所示,直观展示了32条支路所连接节点之间的关系,实现拓扑结构可视化要求。为了验证本文方法的辨识性能,将本文方法与其他辨识方法对比,如表2所示,可知本文方法在使用较少的量测数据情况

下,既可以完成拓扑识别又可以实现线路参数的准确辨识,对量测数据不足的配电网进行拓扑分析与线路参数辨识具有优势。

表 1 精确辨识迭代次数与线路误差变化

Table 1 Accurate identification of the number of iterations and line error variations %

迭代次数	b	g	迭代次数	b	g
1	36.175 2	44.106 2	5	0.122 3	0.837 1
2	23.975 0	17.306 6	6	0.104 8	0.717 4
3	0.790 8	3.180 1	7	0.104 8	0.717 4
4	0.147 8	0.110 4			

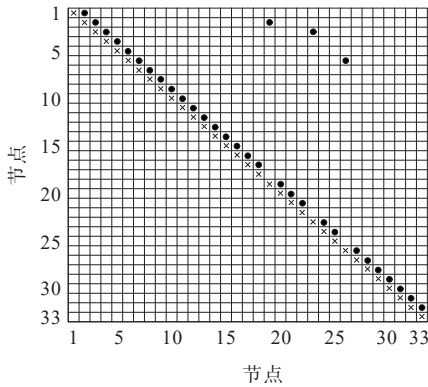


图 11 精确辨识拓扑结构

Figure 11 Accurate identification of the topology structure

表 2 不同方法之间的对比

Table 2 Comparison between different methods

项目	方法			
	文献[10]	文献[16]	文献[21]	本文
拓扑分析	✓	✓	✓	✓
线路参数辨识	×	×	✓	✓
数据来源	智能电表	智能电表	智能电表和相量量测单元	智能电表
方法	Lasso算法	遗传算法	数据驱动	数据驱动

注:✓、×表示该文对拓扑分析或者参数辨识是否进行研究。

4.3 实测算例分析

为了验证所提拓扑与参数辨识方法的实用性,选取某配电区域进行用电信息采集,从配电变压器低压侧和用户监测系统获取相应节点用电数据,时间间隔 15 min 为一个采样点,采集 24 h 的功率电压数据形成样本集,采用本文所提方法对该数据分析,该配网实际拓扑结构如图 12 所示。

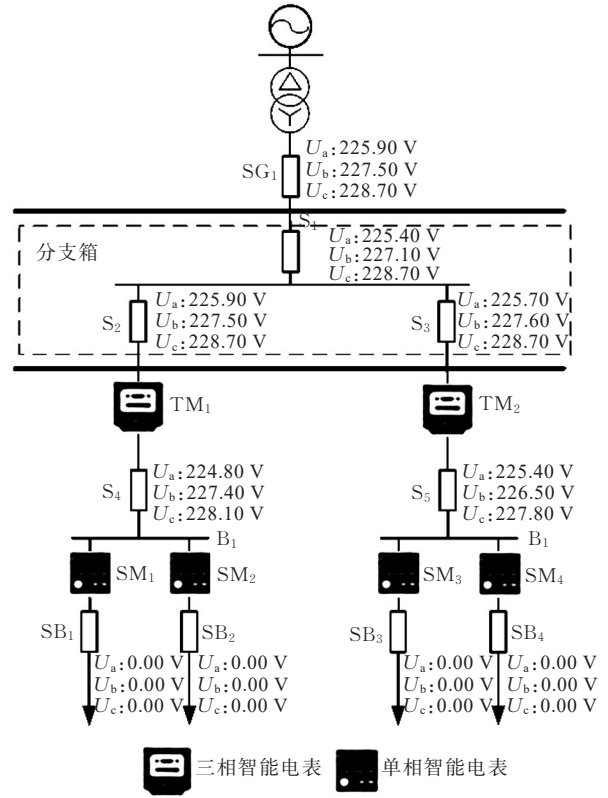


图 12 配电网的拓扑结构

Figure 12 Topology structure of distribution network

拓扑分析之前需将配电网进行简化处理,忽略冗余的电气设备。将该配电网重要分支线路等效为节点,分析节点的连接关系映射该配网的拓扑结构。将智能电表采集得到的功率电压数据代入本文算法,经过运算分析得到节点之间的连接关系,如图 13 所示。

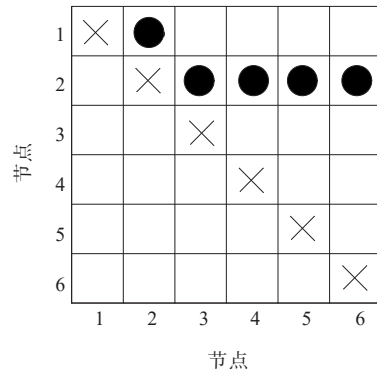


图 13 配网节点连接关系

Figure 13 The connection of the distribution network

将拓扑分析结果呈现在该用电信息主站上,得到拓扑辨识结果,如图 14 所示,展示了该方法在实际工程应用得到配电网拓扑辨识结果,拓扑结构以

拓扑树的形式呈现,图中节点为实际设备连接关系的等效结果。对比实际接线图与利用该方法得到的辨识结果对比可知,辨识结果与实际拓扑一致,证明了方法的有效性。

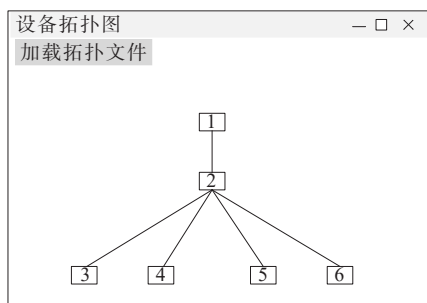


图14 配电网拓扑辨识结果展示

Figure 14 Display of distribution network topology identification results

4.4 鲁棒性分析

为了测试噪声数据对线路参数误差辨识结果的影响,通过辨识添加不同噪声的 P 、 Q 数据,分析线路参数误差。在网络中不存在分布式电源与某节点加入分布式电源的情况下,分别验证为更加真实地模拟实际配电网点加入分布式电源情况时的鲁棒性,使用一天内光伏电站发电作为配电网中分布式电源的实际出力,时间间隔为1h,实际运行中DG出力随时间的波动性较大,假设DG出力服从高斯分布,用于建立DG出力的伪量测模型。在节点7处接入一个光伏发电机,接入容量参数参考文献[26],光伏电源出力预测曲线如图15所示。

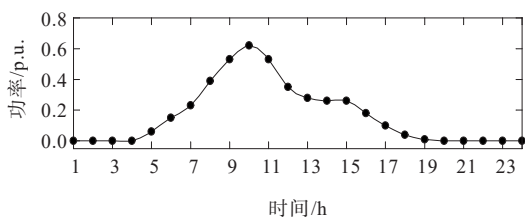


图15 光伏电源出力预测曲线

Figure 15 Solar power output prediction curve

对比算例中存在/不存在分布式电源2种情况,得到线路参数平均误差与噪声数据的关系,如表3所示,可知线路参数误差随着量测数据含有噪声数据的增加而增大。在2种情况对比下,当网络中存在分布式电源时,辨识误差会有所增加,但识别结果中存在的误差仍在允许范围内,该方法在2种情况下仍具有较好的鲁棒性。

表3 噪声数据与线路参数误差的关系

Table 3 Relationship between noise data and line parameter errors %

噪声	电导误差		电纳误差	
	不含分布式电源	含分布式电源	不含分布式电源	含分布式电源
0.00	4.78×10^{-6}	7.01×10^{-6}	6.00×10^{-6}	6.33×10^{-6}
0.10	0.001 0	0.120 2	0.000 7	0.105 0
0.50	0.676 0	0.891 5	0.579 6	0.788 2
1.00	1.225 2	1.255 3	1.508 4	1.183 6
1.50	1.577 6	1.736 8	2.005 4	2.010 1
2.00	4.817 9	5.078 6	3.405 5	3.723 1

5 结语

考虑配电网节点多、拓扑结构变化频繁以及线路参数难以辨识的问题,本文基于配电网量测设备获取功率电压数据,通过求解系统潮流变量获取拓扑参数信息。首先,根据极坐标下的潮流方程建立线性回归的初步辨识模型,得到存在较大误差的拓扑结构和线路参数;其次,建立拓扑与线路参数修正模型,将初步辨识得到的结果带入修正模型,计算雅克比矩阵更新线路参数至迭代收敛,完成辨识获得线路参数预估值与正确的拓扑结构;最后,通过IEEE 33节点配电网算例验证文中所提方法可行性,直观展示配电网拓扑结构和线路参数辨识结果具有较高准确性,并通过实际配网数据验证,证明该方法的实用性,符合配电网实际运行情况。该方法在先验信息不足的配电网中,减少了对物理模型的依赖,辨识结果可为配电网控制和运行规划提供数据支撑,未来可继续研究配电网形成弱环网状态下的拓扑识别问题。

参考文献:

- [1] 董逸超,王守相,闫秉科.配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述[J].电网技术,2019,43(7):2258-2266.
DONG Yichao,WANG Shouxiang,YAN Bingke.Review on evaluation methods and improvement techniques of DG hosting capacity in distribution network[J].Power System Technology,2019,43(7):2258-2266.

- [2] 李勇,姚天宇,乔学博,等.基于联合时序场景和源网荷协同的分布式光伏与储能优化配置[J].电工技术学报,2022,37(13):3289-3303.
LI Yong, YAO Tianyu, QIAO Xuebo, et al. Distributed photovoltaic and energy storage optimization configuration based on joint timing scenarios and source grid load collaboration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(13):3289-3303.
- [3] 曹佳佳,王淳,霍崇辉,等.考虑配电网负荷波动和电压偏移的充电站优化规划[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):12-19.
CAO Jiajia, WANG Chun, HUO Chonghui, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations considering the load fluctuation and voltage offset of distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(4):12-19.
- [4] 张祥文,江星星,王龙,等.配电网接纳电动汽车能力评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(12):14-20.
ZHANG Xiangwen, JIANG Xingxing, WANG Long, et al. Research on assessment methods of distribution network's ability of admitting electric vehicles[J]. Power System Protection and Control,2015,43(12):14-20.
- [5] 余贻鑫.面向21世纪的智能电网[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(6):551-556.
YU Yixin. A brief description of the basics of the smart grid[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2020,53(6):551-556.
- [6] 贺瑜环,杨秀媛,陈麒宇,等.电动汽车智能充放电控制与应用综述[J].发电技术,2021,42(2):180-192.
HE Yuhuan, YANG Xiuyuan, CHEN Qiyu, et al. Overview of intelligent charging and discharging control and application in electric vehicles[J]. Power Generation Technology,2021,42(2):180-192.
- [7] 李长宇,唐文秀.基于数据驱动的多微电网互联系统分布鲁棒运行优化[J].智慧电力,2022,50(5):1-8.
LI Changyu, TANG Wenxiu. Distributed robust operation optimization of multi microgrid interconnected systems based on data-driven approach[J]. Smart Power, 2022, 50(5):1-8.
- [8] 蔡欢,袁旭峰,熊炜,等.柔性互联配电网运行调度研究综述[J].智慧电力,2022,50(6):92-99+106.
CAI Huan, YUAN Xufeng, XIONG Wei, et al. Summary of research on operation and dispatching of flexible interconnected distribution networks[J]. Smart Power,2022, 50(6):92-99+106.
- [9] PEPPANEN J, GRIJALVA S, RENO M J, et al. Distribution system low-voltage circuit topology estimation using smart metering data[C]//EEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Dallas, TX, USA,2016.
- [10] LIAO Y, WENG Y, RAJAGOPAL R. Urban distribution grid topology reconstruction via Lasso[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, USA,2016.
- [11] 裴宇婷,秦超,余贻鑫.基于LightGBM和DNN的智能配电网在线拓扑辨识[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(9):939-950.
PEI Yuting, QIN Chao, YU Yixin, et al. Online topology identification for smart distribution grids based on LightGBM and deep neural networks[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2020,53(9):939-950.
- [12] 叶剑华,罗凤章,杨理.基于改进蝠鲼觅食优化SVM的配电网拓扑辨识[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(10):43-50.
YE Jianhua, LUO Fengzhang, YANG Li, et al. Distribution Network topology identification based on SVM optimized by improved manta ray foraging optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2021,33(10):43-50.
- [13] 冯人海,赵政,谢生,等.基于主成分分析和凸优化的低压配电网拓扑识别方法[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2021,54(7):746-753.
FENG Renhai, ZHAO Zheng, XIE Sheng, et al. Topology identification for low voltage network based on principal component analysis and convex optimization[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2021,54(7):746-753.
- [14] PAPPU S J, BHATT N, PASUMARTHY R, et al. Identifying topology of low voltage distribution networks based on smart meter data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017,9(5):5113-5122.
- [15] 陈招安,黄纯,张志丹,等.基于T型灰色关联度和KNN算法的低压配电网台区拓扑识别方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):163-169.
CHEN Zhaoan, HUANG Chun, ZHANG Zhidan, et al. Topology identification method of low voltage distribution network based on T-type grey correlation degree and KNN algorithm[J]. Power System Protection and Control,2021,49

- (1):163-169.
- [16] 刘道伟,章锐,李柏青,等.基于状态量测的电网拓扑结构反向识别方法研究[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7107-7117.
LIU Daowei,ZHANG Rui,LI Baiqing,et al. Research on reverse recognition method of power system topological structure based on state measurement[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(24):7107-7117.
- [17] YU J, WENG Y, RAJAGOPAL R. PaToPaEM: A data-driven parameter and topology joint estimation framework for time-varying system in distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 34(3): 1682-1692.
- [18] 王贺飞,李洪涛,余昆,等.基于DSCADA和 μ PMU数据融合的配电网运行拓扑辨识[J].电力建设,2019,40(6):123-131.
WANG Hefei,LI Hongtao,YU Kun,et al. Identification of distribution network operation topology based on DSCADA and μ PMU telemetry data fusion[J]. Electric power Construction,2019,40(6):123-131.
- [19] WANG X, BIALEK J W, TURITSYN K. PMU-based estimation of dynamic state Jacobian matrix and dynamic system state matrix in ambient conditions[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,33(1):681-690.
- [20] 王献志,李铁成,郭少飞,等.基于 μ PMU电压相位数据的配电网拓扑辨识[J].电网与清洁能源,2022,38(6):54-63.
WANG Xianzhi, LI Tiecheng, GUO Shaofei, et al. Identification of distribution network topology based on μ PMU voltage phase data[J]. Power System and Clean Energy,2022,38(6):54-63.
- [21] SRINIVAS V L, WU J. Topology and parameter identification of distribution network using smart meter and μ PMU measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2022,71:21762749.
- [22] 杨冬锋,付强,刘晓军,等.配电网动态拓扑与线路参数联合在线辨识方法[J].电力系统自动化,2022,46(2):101-108.
YANG Dongfeng,FU Qiang,LIU Xiaojun,et al. Joint online identification method for dynamic topology and line parameters of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(2):101-108.
- [23] 贾巍,雷才嘉,葛磊蛟,等.城市配电网的国内外发展综述及技术展望[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(1):158-168.
JIA Wei,LEI Caijia,GE Leijiao,et al. Overview on domestic and international development of urban distribution network and technical prospect[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2020,41(1):158-166.
- [24] 刘宽,王淳,伍惠铨,等.一种含PV节点的配电网线性潮流计算方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(3):17-22.
LIU Kuan, WANG Chun, WU Huicheng, et al. A linear power flow calculation method for distribution networks with PV nodes[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(3):17-22.
- [25] ZHANG J, WANG Y, WENG Y, et al. Topology identification and line parameter estimation for non-PMU distribution network: a numerical method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(5):4440-4453.
- [26] DOROSTKAR-GHAMSARI M R, FOTUHI-FIRUZABAD M, LEHTONEN M, et al. Value of distribution network reconfiguration in presence of renewable energy resources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(3): 1879-1888.

(上接第23页 = Continued from page 23)

- [22] 丁明,杨向真,苏建徽.基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(8):89-93.
DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(8):89-93.
- [23] 刘欣,郭志博,贾焦心,等.基于序阻抗的虚拟同步发电机并网稳定性分析及虚拟阻抗设计[J].电工技术学报,2023,38(15):4130-4146.
LIU Xin, GUO Zhibo, JIA Jiaoxin, et al. Stability analysis and virtual impedance design of virtual synchronous generator grid connection based on sequence impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(15):4130-4146.
- [24] 李欣,刘晨凯,郭攀峰,等.考虑拓扑变化的电力系统暂态稳定评估[J].智慧电力,2021,49(12):59-65.
LI Xin, LIU Chenkai, GUO Panfeng, et al. Transient stability assessment of power system considering change in network topology[J]. Smart Power,2021,49(12):59-65.