

基于参数辨识精度的配电网同步量测装置优化配置

宋卓然,李剑峰,姜涛,邓鑫阳,刘宇

(国网辽宁省电力有限公司,辽宁 沈阳 110006)

摘要:配电网同步量测配置过程中存在参数辨识误差,现提出一种基于参数辨识精度的配电网同步量测装置优化配置方法。基于同步量测装置量测数据,由配电网末节点开始分步估计整个配电网的支路参数,采用最小二乘算法确定配电网运行过程中不同时刻下的线路参数;根据量测噪声的敏感度,确定离散度指标,以辨识精度与配置数量综合最优为目标构建同步量测装置配置算法内的指标函数;依照配电网参数辨识精度与配置数量标准迭代,获取令目标函数最小的同步量测装置优化配置方案。实验结果表明,节点电压均值辨识误差较小,控制在0.10%~0.26%,可显著降低研究对象参数辨识误差。

关键词:参数;辨识精度;配电网;同步量测装置;优化配置

中图分类号:TM72 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23299

Optimal Configuration of Synchronous Measurement Device in Distribution Network Based on Parameter Identification Accuracy

SONG Zhuoran, LI Jianfeng, JIANG Tao, DENG Xinyang, LIU Yu

(State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110006, Liaoning, China)

Abstract: There are parameter identification errors in the process of distribution network synchronous measurement configuration. The optimal configuration method of distribution network synchronous measurement device based on parameter identification accuracy was studied. Based on the measurement data of the synchronous measurement device, the branch parameters of the whole distribution network were estimated step by step from the end node of the distribution network, and the line parameters at different times in the operation process of the distribution network were determined by using the least square algorithm. According to the sensitivity of the measurement noise, the dispersion index was determined, and the internal parameters of the synchronous measurement device configuration algorithm were constructed with the comprehensive optimization of the identification accuracy and configuration quantity as the goal. According to the standard of parameter identification accuracy and configuration quantity of distribution network, the optimal configuration scheme of synchronous measurement device with the minimum objective function was obtained. The experimental results show that the identification mean error of node voltage is small, which is controlled between 0.10% and 0.26%, which can significantly reduce the parameter identification error of the research object.

Key words: parameter; identification accuracy; distribution network; synchronous measurement device; optimal configuration

配电网动态运行过程中,故障电流多元与电子化装置的提升会造成配电网振荡现象^[1-2],为避免振荡现象发生需监测配电网运行,而配电网线路参数的辨识是监测配电网运行的基础^[3]。同步量测装置的主要功能是为配电网运行提供高精

度、高密度、大规模的同步量测数据^[4],这些数据为配电网动态运行参数辨识提供可靠途径。

针对配电网参数辨识研究,在检测控制与数据采集的基础上,结合同步量测装置数据构建复杂配电网形态下配电网参数辨识模型,科学优化

基金项目:国网辽宁省电力有限公司科技项目(20210200X)

作者简介:宋卓然(1985—),男,硕士,高级工程师,Email:sz_sz2010@163.com

同步量测装置配置,降低配电网参数辨识误差是当前电力系统领域专家研究的热点。张黎元等^[5]人提出一种基于配电网同步相量测量单元(distributed phasor measurement unit, DPMU)的有源配电网故障诊断方法,通过引入故障可疑元件库及故障诊断模型,进行网络简化,并利用多点的DPMU高频全采样及特征数据进行系统特征分析,从而进行故障诊断。李伟光等^[6]人提出了一种基于免疫离散粒子群算法(immune discrete particle swarm optimization, IDPSO)的主动配电网PMU测量位置优化,通过结合实时状态估计方法来建立量测配置优化模型,通过IDPSO算法来进行模型求解,最后验证该方法的有效性和实用性。邢光正等^[7]人提出了一种基于最优滤波算法的配电网PMU及其性能测试方法,通过应用PMU最优滤波原理设计出针对配电网的PMU测量算法,提高测量的响应速度。以上方法虽在一定程度上提高了配电网同步量测的效率,但仍存在参数辨识误差,精度还有待进一步提高。为解决以上方法存在的问题,减少参数辨识误差,提高状态估计精度,现提出一种基于参数辨识精度的配电网同步量测装置优化配置方法。通过配电网参数辨识模型的构建,在配电网同步量测装置全配置的基础上,通过选取合理的指标对配电网同步量测装置的配置进行优化,从而显著降低研究对象参数辨识误差。

1 配电网同步量测装置优化配置方法

1.1 配电网参数辨识

配电网实际应用过程中,处于终端用户与配电网变压器上的同步量测装置主要提供电压幅值、有功功率和无功功率的量测结果^[7]。节点 m 和节点 $i_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 分别描述某一配电网根节点和负荷节点,在两个节点处均配置同步量测装置。该配电网可观察性如下:假设节点 $i_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 内最少存在1个无同步量测装置的节点,则此配电网仅配有同步量测装置的局部可估计^[8],无法实现全部支路估计;在 n 值为1的条件下,也就是节点 i_1 处存在同步量测装置,考虑此支路仅包含1个量测,因此也为不可观测。排除上述情况,仅针对可观支路进行分析。

不考虑配电网支路对地电容^[9],针对配电网随机线路 $H(i_j - k)$,其在 t 时刻的关系可通过下式描述:

$$\begin{aligned} Z_{H(i_j - k)} &= \frac{\dot{U}_{k,t} - \dot{U}_{i_j,t}}{\dot{I}_{H(i_j - k),t}} \\ &= R_{H(i_j - k)} + jX_{H(i_j - k)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $Z_{H(i_j - k)}$ 为配电网线路 $H(i_j - k)$ 的线路阻抗, $j = 1, 2, \dots, n$; $\dot{U}_{k,t}$, $\dot{U}_{i_j,t}$ 为 t 时刻下 $H(i_j - k)$ 两端电压; $\dot{I}_{H(i_j - k),t}$ 为 t 时刻流经 $H(i_j - k)$ 的电流; $R_{H(i_j - k)}$ 为 $H(i_j - k)$ 的线路电阻; $X_{H(i_j - k)}$ 为 $H(i_j - k)$ 的线路电抗。

$\dot{U}_{k,t}$ 和 $\dot{U}_{i_j,t}$ 间的向量关系如下描述:以 $\theta_{i_j,t}$ 描述 $\dot{U}_{i,t}$ 和 $\dot{I}_{H(i_j - k),t}$ 的夹角,以 $\delta_{i_j,t}$ 描述 $\dot{U}_{k,t}$ 和 $\dot{U}_{i_j,t}$ 的夹角。将 $\dot{U}_{k,t} - \dot{U}_{i_j,t}$ 分解为同 $\dot{U}_{i_j,t}$ 方向一致的 $\Delta U_{i_j,t}$ 与同 $\dot{U}_{i_j,t}$ 方向垂直的分量 $\delta U_{i_j,t}$,由此可利用下式描述 $\Delta U_{i_j,t}$ 和 $\delta U_{i_j,t}$ 间的向量关系:

$$\Delta U_{i_j,t} = R_{H(i_j - k)} I_{H(i_j - k),t} \cos \theta_{i_j,t} + X_{H(i_j - k)} I_{H(i_j - k),t} \sin \theta_{i_j,t} \quad (2)$$

$$\delta U_{i_j,t} = -R_{H(i_j - k)} I_{H(i_j - k),t} \sin \theta_{i_j,t} + X_{H(i_j - k)} I_{H(i_j - k),t} \cos \theta_{i_j,t} \quad (3)$$

同时节点 i_j 的功率可利用下式描述:

$$P_{i_j,t} = U_{i_j,t} I_{H(i_j - k),t} \cos \theta_{i_j,t} \quad (4)$$

$$Q_{i_j,t} = U_{i_j,t} I_{H(i_j - k),t} \sin \theta_{i_j,t} \quad (5)$$

由此得到 $\dot{U}_{k,t}$, $\dot{U}_{i_j,t}$, $\Delta U_{i_j,t}$ 和 $\delta U_{i_j,t}$ 间的相关性:

$$U_{k,t}^2 = (U_{i_j,t} + \Delta U_{i_j,t})^2 + \delta U_{i_j,t}^2 \quad (6)$$

基于以上描述,考虑配电网节点 k 下游全部配电线路,得到 $U_{k,t}$ 关于下游随机线路 $H(i_j - k)$ 参数的函数方程:

$$U_{k,t} = f_{i_j,t}(R_{H(i_j - k)}, X_{H(i_j - k)}) \quad (7)$$

基于式(7)确定 t 时刻断面下的 $n - 1$ 个独立方程组:

$$\begin{cases} \Delta f_{i_j, i_{j+1}, t} = f_{i_j,t}(R_{H(i_j - k)}, X_{H(i_j - k)}) - \\ \quad f_{i_{j+1}, t}(R_{H(i_{j+1} - k)}, X_{H(i_{j+1} - k)}) \\ j = 1, 2, \dots, n - 1 \end{cases} \quad (8)$$

考虑整体时间断面 T ,对式(8)进行转换,得到:

$$\begin{cases} \Delta f_{i_j, i_{j+1}, t}(x_t) = f_{i_j,t}(R_{H(i_j - k)}, X_{H(i_j - k)}) - \\ \quad f_{i_{j+1}, t}(R_{H(i_{j+1} - k)}, X_{H(i_{j+1} - k)}) \\ j = 1, 2, \dots, n - 1 \text{ 且 } t = 1, 2, \dots, T \end{cases} \quad (9)$$

式(9)描述节点 k 全部下游出线线路 $H(i_j - k)$ 阻抗参数 $x_t = [R_{H(i_j - k)}, X_{H(i_j - k)}]$ 所符合的方程。利用最小二乘法辨识参数 $R_{H(i_j - k)}$, $X_{H(i_j - k)}$,对应实现支路参数的一次判断^[10]。为确定同步量测装置不

同量测时间的不同步量测误差,采用 $n \cdot T$ 个断面实现全部线路的 n 次判断,得到 n 组参数,基于此确定各支路参数的均值与标准差。

得到线路 $H(i_j - k)$ 阻抗参数后,以节点 i_j 的断面量测数据与线路 $H(i_j - k)$ 阻抗参数均值,确定节点 k 不同时刻下断面的有功功率、无功功率与节点电压^[11]。

假设设置同步量测装置量测的节点 m 同节点间存在其它节点及相应的出线,可利用上述描述获取其下游出线的参数,直至节点 m 。

假设节点 m 为节点 k 的上游节点,设 m 节点下游仅有一条出线,利用上述过程思路能够得到:

$$U_{m,t} = f_{k,t}(R_{H(i_j - k)}, X_{H(i_j - k)}) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (10)$$

式中: $U_{m,t}$, $f_{k,t}$ 分别为节点 m 在 t 时刻的节点电压和节点 m 下游配电线路不同时间断面 t 下构建的同节点 m 相关的电压方程。

转化式(10)得到:

$$\begin{cases} \Delta f_{m,k,t}(x_t) = U_{m,t} - f_{k,t}(R_{H(i_j - k)}, X_{H(i_j - k)}) \\ t = 1, 2, \dots, T \end{cases} \quad (11)$$

式(11)所描述的是线路 $H(k - m)$ 阻抗参数 $x_t = [R_{H(k - m)}, X_{H(k - m)}]$ 所需符合的方程,利用最小二乘法确定参数 $R_{H(k - m)}$ 和 $X_{H(k - m)}$ 。同样采样 $n \cdot T$ 个断面完成线路 $H(k - m)$ 的 n 次判断,得到此支路的均值与标准差。

1.2 参数主导性评估

以主导性指标作为配电网同步量测装置优化配置的主要选取指标,根据主导参数对于量测噪声的敏感度差异,优先配置辨识误差显著的非主导参数,并确保主导参数的辨识精度^[12]。参数主导性由其应用目标函数决定,并且配电网不同运行状态与量测配置下,参数主导性也有所差异。

基于最小二乘法辨识的参数结果,在确定线路主导性时主要依据量测数据噪声对线路参数辨识结果的影响。在配电网稳定运行的条件下,多量测断面的线路辨识结果差异并不显著。

主导性评估过程如下:基于当前配置方案添加量测噪声^[13],确定支路参数(电阻 $R_{H(i_j - k)}$ 、电抗 $X_{H(i_j - k)}$ 和电流 $I_{H(i_j - k),t}$ 辨识结果),依照参数辨识结果确定参数估计结果的离散度。由此利用以下式来表示配电网 N 阶量测断面的参数辨识期望值 $\bar{Y}_p$ 与标准方差 δ_{sp} :

$$\bar{Y}_p = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Y_{pt} \quad (12)$$

$$\delta_{sp} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Y_{pt} - \bar{Y}_p)^2} \quad (13)$$

在配电网内,支路电阻、电抗、阻抗单位与数字差异较为显著,因此需对支路参数(主导性)评估指标实施归一化处理,利用下式表示配电网支路参数的离散度指标 d_{sp} :

$$d_{sp} = \frac{\delta_{sp}}{\bar{Y}_p} \times 100\% \quad (14)$$

根据式(14)得到,在 d_{sp} 值较小的条件下,辨识参数越稳定集中,参数辨识结果精确度较高,线路为主导参数;在 d_{sp} 值较大的条件下,辨识参数离散度较大,参数辨识结果精度较差,线路为非主导参数。离散度指标既可以体现配电网线路参数辨识结果的精度,同时也可以描述线路参数的主导性。

1.3 配电网同步量测装置优化配置

配电网线路量测数据类型对于参数辨识结果产生显著影响,科学的同步量测装置配置方法对于确保配电网参数辨识结果与经济成本的综合最优产生关键影响^[14]。基于配电网线路参数主导性评估结果,在配电网同步量测装置全配置的基础上,通过选指标对配电网同步量测装置的配置进行优化,具体优化流程如图1所示。

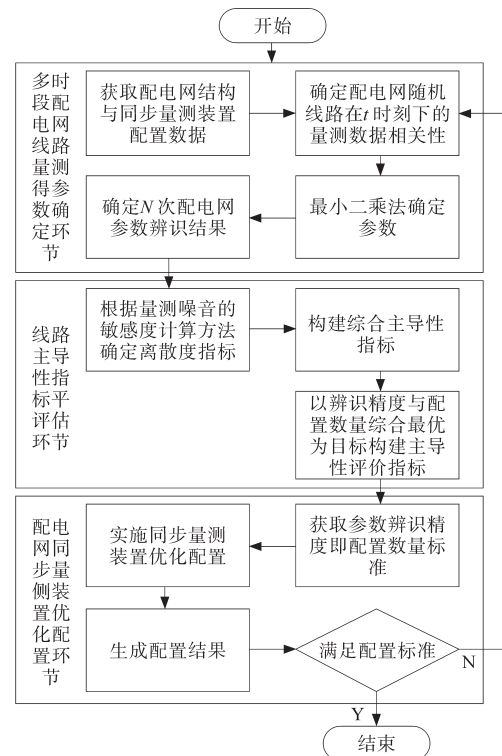


图1 配电网同步量测装置优化配置流程

Fig.1 Optimization configuration process of synchronization measurement device in distribution network

配电网同步量测装置优化配置过程主要分为三个环节,分别是多时段配电网线路量测的参数确定环节、线路主导性指标评估环节和配电网同步量测装置优化配置环节。其中,多时段配电网线路量测参数确定环节中采用最小二乘算法确定配电网运行过程中不同时刻下的线路参数;线路主导性指标水平评估环节根据量测噪声的敏感度计算方法确定离散度指标,以辨识精度与配置数量综合最优为目标构建同步量测装置配置算法内的指标函数;配电网同步量测装置优化配置环节中,依照配电网参数辨识精度与配置数量标准迭代获取令目标函数最小的同步量测装置优化配置方案。

在实际配电网同步量测装置优化配置过程中,配置数量与设备成本之间存在明显相关性,设备装置地点与参数辨识精度之间存在明显相关性,由此依照同步量测装置配置总量、地点与辨识误差三者构造多目标数学函数模型^[15-16]:

$$\begin{cases} \min f(x) = \min \{ b_1 \sum_{i=1}^n P_i + b_2 \sum_{i=1}^n [|\bar{v}_{R_i} - r| + |\bar{v}_{X_i} - x| + |\bar{v}_{I_i} - i|] \} \\ \text{s.t. } z = h(v) + \varepsilon \end{cases} \quad (15)$$

式中: P_i, b_1, b_2 为节点*i*处同步量测装置的配置状况与加权参数; $\bar{v}_{R_i}, \bar{v}_{X_i}$ 和 $\bar{v}_{I_i}$ 分别为电阻、电抗与电流的辨识结果; R_i, X_i 和 I_i 分别为电阻、电抗与电流的实际参数。

上面构建的多目标数学函数模型在数学上可定义为高维非线性优化问题,为防止出现求解过程中出现局部最优解问题,可采用遗传算法进行求解,通过配置方案编码、初始群体设定、适应度函数设计、改进遗传算子设计等过程求解同步量测装置优化配置问题。

2 实验分析

实验为验证本文所提出的基于参数辨识精度的配电网同步量测装置优化配置方法的实际应用性能,选取某台区 10 kV 小型配电网为研究对象,其拓扑结构如图2所示。

图2中,研究对象内包含 12 个配有同步检测装置的节点(黑色点状)和 18 条支路。其中,节点 1 为研究对象变压器根节点,配置总表;除节点 1 外剩余配有同步检测装置的节点表示终端用户,各终端用户均配有智能电表。用于支路参数辨

识的量测数据总时间断面数量为 48 个。

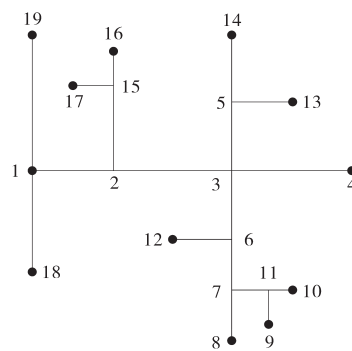


图2 研究对象拓扑结构

Fig.2 Topological structure of research object

利用本文方法辨识研究对象参数,进行同步量测装置优化配置,下文对所得结果进行描述。

2.1 参数辨识测试

利用本文方法辨识研究对象线路参数,所得结果如表1所示。

表1 研究对象线路电阻辨识结果

Tab.1 Identification results of the line resistance of the research object

节点 <i>i, j</i>	电阻(标么值)均值	电阻(标么值)标准差
1,2	0.030 00	0.000 60
3,2	0.081 78	0.000 86
4,3	0.084 02	0.000 70
5,3	0.020 54	0.001 02
6,3	0.085 83	0.002 36
7,6	0.090 31	0.000 54
8,7	0.033 68	0.000 64
12,6	0.039 01	0.000 83
11,7	0.036 55	0.000 21
13,5	0.021 02	0.000 46
14,5	0.048 80	0.000 92
15,2	0.012 62	0.000 22
9,11	0.050 09	0.000 53
10,11	0.072 83	0.000 57
16,15	0.260 80	0.000 14
17,15	0.031 26	0.000 50
18,1	0.073 34	0.000 71
19,1	0.074 13	0.000 87

针对研究对象而言,为验证本文方法的参数辨识精度,以辨识出的线路电阻均值(表1所示)为真值,结合同步量测装置提供的不同时间断面的量测数据(变压器二次侧不同负荷的有功/无功功率、总有功/无功功率)。对研究对象实施潮流计算,分析不同时间断面条件下,本文方法获取的负荷节点电压值同相同时间断面下对应负荷节点的电压量测值间的误差,图3为误差结果均值。

由图3可知,采用本文方法进行参数辨识后,研究对象节点电压均值辨识误差较小,误差率可

控制在0.10%~0.26%。由此说明采用本文方法辨识研究对象线路参数具有较高精度。

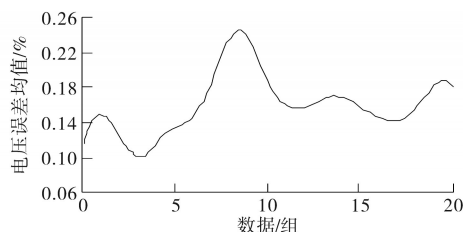
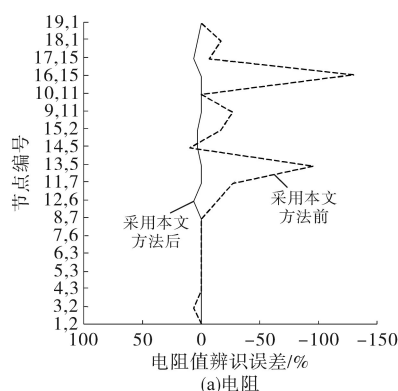


图3 节点电压误差均值

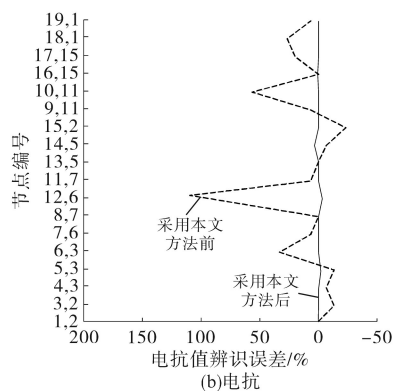
Fig.3 Mean value of nodal voltage error

2.2 优化配置测试

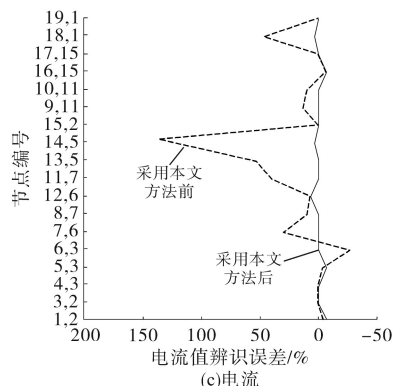
在配置数量基本一致的条件下,对比本文方法优化配置前和本文方法优化配置后研究对象参数辨识精度,配置10次后辨识结果的误差均值如图4所示。



(a)电阻



(b)电抗



(c)电流

图4 参数辨识误差

Fig.4 Parameter identification error

分析图4可得,在配置数量基本一致的条件下,采用本文方法进行同步量测装置优化配置后,所得的配置结果与采用本文方法之前相比,均匀度更高,辨识误差更低,由此说明采用本文方法进行同步量测装置优化配置可显著降低研究对象参数辨识误差,具有较高的实用性与推广价值。

3 结论

本文提出了一种基于参数辨识精度的配电网同步量测装置优化配置方法,基于配电网动态运行过程中线路量测多时段量测信息,以主导性为参数指标,依照同步量测装置配置总量、地点与辨识误差三者构造多目标数学函数模型,利用遗传算法求解该模型获取配电网同步量测装置优化配置方案。实验结果表明,本文方法应用于配电网同步量测装置中的节点电压均值辨识误差较小,误差率可控制在0.10%~0.26%,可显著降低研究对象参数辨识误差,实用性与推广性较高。

参考文献

- [1] 郭岫,王鹏,林佳颖,等. 基于PMU量测的配电网模型等值与就地电压控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(3): 61-68.
Guo Di, Wang Peng, Lin Jiaying, *et al.* Distribution network model equivalence and local voltage control based on PMU measurement[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(3): 61-68.
- [2] 贾宇乔,徐箭,廖思阳,等. 基于DPMU量测信息的配电网馈线级快速电压控制[J]. 南方电网技术, 2019, 13(4): 100-106.
Jia Yuqiao, Xu Jian, Liao Siyang, *et al.* Feeder-level fast voltage control of distribution network based on DPMU measurement information[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(4): 100-106.
- [3] 朱鹏程,柳劲松,范士雄,等. 考虑混合量测的配电网二次约束二次估计方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 841-847.
Zhu Pengcheng, Liu Jinsong, Fan Shixiong, *et al.* The secondary estimation method of the secondary constraint of distribution network considering hybrid measurement[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 841-847.
- [4] 赵铁军,王秀斌,虞跃. 基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 83-91.
Zhao Tiejun, Wang Xiubin, Yu Yue. Single-ended cable single-phase fault location method based on parameter identification of metal sheath model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 83-91.

- [5] 张黎元,黄潇潇,张杰,等. 基于D-PMU量测信息的有源配电网故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10):145-150.
Zhang Liyuan, Huang Xiaoxiao, Zhang Jie, *et al.* Active distribution network fault diagnosis method based on D-PMU measurement information[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10):145-150.
- [6] 李伟光,卢锦玲. 基于免疫离散粒子群算法的主动配电网PMU测量位置优化[J]. 电测与仪表, 2018, 55(21):14-18.
Li Weiguang, Lu Jinling. PMU measurement location optimization in active distribution network based on immune discrete particle swarm optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(21):14-18.
- [7] 邢光正,汪芙平,黄松岭,等. 基于最优滤波算法的配电网PMU及其性能测试[J]. 电网技术, 2019, 43(3):25-32.
Xing Guangzheng, Wang Fuping, Huang Songling, *et al.* Distribution network PMU and its performance test based on optimal filtering algorithm[J]. Power System Technology, 2019, 43(3):769-776.
- [8] 徐箭,廖思阳,魏聪颖,等. 基于广域量测信息的配电网协调控制技术展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18):12-22.
Xu Jian, Liao Siyang, Wei Congying, *et al.* Prospects of distribution network coordinated control technology based on wide-area measurement information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18):12-22.
- [9] 王澍,徐潇源,孔祥瑞,等. 考虑节点脆弱性的配电网多阶段PMU最优配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(7):8-14.
Wang Shu, Xu Xiaoyuan, Kong Xiangrui, *et al.* Optimal configuration of multi-stage PMU in distribution network considering node vulnerability[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(7):8-14.
- [10] 孔祥玉,王玉婷,袁泉泉,等. 基于定制遗传算法考虑配电网多种拓扑可观性的PMU优化配置[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1):66-72.
Kong Xiangyu, Wang Yuting, Yuan Xiaoxiao, *et al.* PMU optimization configuration based on customized genetic algorithm considering the observability of multiple topologies in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1):66-72.
- [11] 迟福建,李桂鑫,孙阔. 配电网信息物理系统恶性数据链检测与识别[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(1):174-178.
Chi Fujian, Li Guixin, Sun Kuo. Detection and identification of vicious data links in information physics system of distribution networks[J]. Computing Technology and Automation, 2021, 40(1):174-178.
- [12] 薛安成,徐飞阳,游宏宇,等. 基于微型PMU的配电线路抗差参数辨识[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2):1-7, 43.
Xue Ancheng, Xu Feiyang, You Hongyu, *et al.* Identification of robustness parameters of distribution lines based on micro PMU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2):1-7, 43.
- [13] 林佳圆,陈睿,李依琳,等. 基于参数辨识的配电网故障测距方法[J]. 南方电网技术, 2019, 13(4):80-87.
Lin Jiayuan, Chen Rui, Li Yilin, *et al.* Distribution network fault location method based on parameter identification[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(4):80-87.
- [14] 谢林枫,王红星,刘军成,等. 基于电能质量约束的智能配电网分布式电源消纳能力研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4):41-47.
Xie Linfeng, Wang Hongxing, Liu Juncheng, *et al.* Research on distributed power consumption ability of smart distribution network based on power quality constraint[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4):41-47.
- [15] 杨帆. 基于有源工频电流注入的配电网对地参数精确测量[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1):81-87.
Yang Fan. Accurate measurement of ground parameters of distribution network based on active power frequency current injection[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1):81-87.
- [16] 荆禄宗,吴钦木. 基于递归神经网络的永磁同步电机参数辨识研究[J]. 电气传动, 2020, 50(3):87-91, 101.
Jing Luzong, Wu Qinmu. Research on parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on recurrent neural network[J]. Electrical Drive, 2020, 50(3):87-91, 101.

收稿日期:2021-04-01

修改稿日期:2021-05-11