

提高配电网状态估计精度的 智能配电单元优化布点方法

徐航¹, 鞠力², 董树锋¹, 何仲潇¹, 刘丁华², 任雪桂²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027;

2. 北京电力经济研究院, 北京市 西城区 100032)

Optimization of Intelligent Distribution Unit Placement to Improve Accuracy of Distribution Network State Estimation

XU Hang¹, JU Li², DONG Shufeng¹, HE Zhongxiao¹, LIU Dinghua², REN Xuegui²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

2. State Grid Beijing Electric Power Economy Research Institute, Xicheng District, Beijing 100032, China)

ABSTRACT: In active distribution network, optimization of intelligent distribution unit (IDU) can efficiently improve accuracy of state estimation. It is of crucial significance when knowledge of system operation is desired. A method of optimal IDU placement in HV and MV distribution networks is proposed to reduce state estimation error. Firstly, all elements of Jacobian matrix are made constant based on P-Q decomposition. Then discrete particle swarm optimization (DPSO) is utilized to optimize IDU placement so that the sum of diagonal elements in the state covariance matrix are minimized with limited number of IDUs. Analytical results show that IDU optimization can effectively reduce state estimation error in hybrid measurement system.

KEY WORDS: state estimation; optimal placement; intelligent distribution unit (IDU); discrete particle swarm optimization

摘要 :在主动配电网中,智能配电单元(intelligent distribution unit, IDU)的优化布点可有效提升状态估计精度,对掌握系统运行状况有重要意义。为减少状态估计误差,该文提出了一种在中高压配电网中的 IDU 优化布点方法。首先,基于 PQ 分解状态估计思想,实现雅各比矩阵的常数化。然后,在 IDU 配置个数有限的情况下,以最小化状态估计协方差矩阵对角元素之和为目标,利用离散粒子群算法(discrete particle swarm optimization, DPSO)对 IDU 进行优化布点。算例分析结果表明 IDU 优化布点可有效减小混合量测系统的状态估计误差。

关键词 :状态估计;优化布点;智能配电单元;离散粒子群算法

DOI : 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1359

0 引言

主动配电网(active distribution network, ADN)是智能电网技术的高级阶段技术,拓扑结构灵活,可对规模化接入的分布式能源进行主动控制和能量优化管理^[1-4]。状态估计是主动配电网态势感知的基础工具,提高状态估计精度对掌控系统运行状况、提升全网的可观测性具有重要意义^[5-6]。

ADN 中的智能配电单元(intelligent distribution unit, IDU)可实时采集运行参数、设备状态和用能信息^[7-9]。相比于数据采集与监视控制(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统中的远程终端单元(remote terminal unit, RTU), IDU 具有同步性较强,测量数据精度高、种类多、更新周期短等优点。考虑到经济、技术等因素限制,研究混合量测系统中 IDU 优化布点技术对提高主动配电网的状态估计精度,掌握系统运行状况具有重要意义。

以提高状态估计精度为目标的量测优化配置研究,国内外已有一定的成果。文献[10]基于序数寻优策略确定量测配置,但多节点系统策略确定时可能出现组合爆炸问题。文献[11-13]基于各量测对状态估计精度改善程度的定量分析结果,确定最优配置方案,但评估过程较为复杂。此外,一些学者还考虑了拓扑可观测度^[14-16]、N-1 原则^[17-19]、潮流是否可解^[20-21]等情况,但均未充分利用 SCADA 数据。在工程实际中,系统往往已具备一定的可观性,但现有文献较少在此基础上开展量测优化配置的

基金项目 : 国家 863 高技术基金项目(2014AA051901)。

The National High Technology Research and Development of China
(863 Program) (2014AA051901).

研究。

目前,量测优化配置的求解方法主要有整数规划法和人工智能算法。整数规划法虽发展较为成熟,但存在全局搜索能力较差、算法效率低等问题^[22-24]。人工智能算法因其运行速度快、操作灵活等优点,在量测优化配置问题中取得了广泛应用,如遗传算法^[25]、粒子群优化算法^[26]等。

本文以提升状态估计精度为目标,对主动配电网中的新型智能终端设备 IDU 的优化布点问题进行了研究。以最小化状态估计协方差矩阵对角元素之和为目标函数,在 IDU 待安装位置与个数确定的情况下,利用离散粒子群优化算法(discrete particle swarm optimization, DPSO)寻找最佳布点。基于 PQ 分解状态估计思想,本文算法统一处理 IDU 与传统量测数据,常数化雅各比矩阵。通过对不同精度的量测数据赋予不同的权重,解决数据精度的兼容问题,实现混合量测系统数据的有效融合。适应目前绝大部分系统都已配备了一定数目的传统量测的情况,更符合工程实际需求。

1 信息矩阵的计算

1.1 经典状态估计模型

经典电力系统状态估计方程为

$$z=h(x)+v \tag{1}$$

式中: z 为量测矢量; x 为状态变量; $h(x)$ 为非线性函数; v 为量测误差。

采用加权最小二乘法,最优化问题可表示为

$$\min J=[z-h(x)]^T R^{-1}[z-h(x)] \tag{2}$$

式中 R^{-1} 为权值矩阵。

加权最小二乘法的状态估计求解公式为

$$\Delta x^{(k)}=[H^T(x^{(k)})R^{-1}H(x^{(k)})]^{-1}H^T(x^{(k)})R^{-1}\Delta z \tag{3}$$

$$x^{(k+1)}=x^{(k)}+\Delta x^{(k)} \tag{4}$$

式中: $\Delta z=z-h(x^{(k)})$; $x^{(k)}$ 为经过 k 次迭代的系统状态变量; $H=\partial h(x)/\partial x$ 是量测矢量的雅各比矩阵; $D=H^T R^{-1} H$ 称为信息矩阵。协方差矩阵 $\Sigma=D^{-1}$, 其对角和为各个状态(节点电压复相量、支路电流复相量和支路复功率等)的估计结果的方差。

1.2 信息矩阵修正模型

在传统状态估计计算中,每次迭代均需重新形成雅各比矩阵并将其因子化,算法效率较低。文献[27-29]通过各类量测转换技术,线性化处理量测函数,使雅各比矩阵常数化,但引入了转换误差。文献[30]以支路电流幅值和支路功率为待求变量,线性化状态估计,雅各比矩阵无需迭代更新,但仅适用于电流幅值量测配置齐全的辐射状配网。因此,本文提

出一种基于 PQ 分解状态估计思想的雅各比矩阵常数化方法,该方法无需对量测数据与量测权重进行等效处理,且对中高压配电网具有普适性。

本文采用节点电压法,根据文献[31]将支路电流测直接分为实部量测和虚部量测,并进行解耦分析。根据文献[32]中 PQ 分解法的结论,用 b_{ij} 构成的节点电纳矩阵代替无功迭代矩阵,用以 $-(1/x_{ij})$ 为支路电纳构成的节点电纳矩阵代替有功迭代矩阵。雅各比矩阵 $H=(h_{ski})_{m \times (2n-1)}$ 的元素如表 1 所示。

表 1 雅各比矩阵元素 Tab. 1 Elements of Jacobian matrix		
量测类型	状态变量	
	电压幅值 U	电压相角 θ
节点电压幅值	$h_{Uki}=\frac{\partial U_i}{\partial U_i}=1$	0
节点电压相角	0	$h_{\theta k(n+i)}=\frac{\partial \theta_i}{\partial \theta_i}=1$
支路电流实部	$h_{rki}=\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial U_i}=g_{ij}$	$h_{rk(n+i)}=\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \theta_i}=-b_{ij}$
	$h_{rkj}=\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial U_j}=-g_{ij}$	$h_{rk(n+j)}=\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \theta_j}=b_{ij}$
支路电流虚部	$h_{iki}=\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial U_i}=b_{ij}$	$h_{ik(n+i)}=\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \theta_i}=g_{ij}$
	$h_{ikj}=\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial U_j}=-b_{ij}$	$h_{ik(n+j)}=\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \theta_j}=-g_{ij}$
节点注入有功	0	$h_{Pk(n+i)}=\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i}=\sum_{j=1}^n \frac{1}{x_{ij}}$
	0	$h_{Pk(n+j)}=\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j}=-\frac{1}{x_{ij}}$
节点注入无功	$h_{Qki}=\frac{\partial Q_i}{\partial U_i}=-\sum_{j=1}^n b_{ij}$	0
	$h_{Qkj}=\frac{\partial Q_i}{\partial U_j}=b_{ij}$	0
支路有功	0	$h_{P_{ik}(n+i)}=\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i}=\frac{1}{x_{ij}}$
	0	$h_{P_{ik}(n+j)}=\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j}=-\frac{1}{x_{ij}}$
支路无功	$h_{Q_{b,ki}}=\frac{\partial Q_{ij}}{\partial U_i}=b_{ij}$	0
	$h_{Q_{b,kj}}=\frac{\partial Q_{ij}}{\partial U_j}=-b_{ij}$	0

表 1 中,下标 $s、m、k、n$ 分别是量测类型、量测数量、量测序号和状态数量;下标 $i、j$ 为状态序号; U 和 θ 分别是电压幅值和电压相角; $I_{ij,r}$ 和 $I_{ij,i}$ 分别是电流的实部和虚部; P_i 和 Q_i 分别是节点注入有功和无功功率; P_{ij} 和 Q_{ij} 分别是支路有功和无功功率; x_{ij} 、 b_{ij} 和 g_{ij} 分别是支路电抗、支路电纳和支路电导。此外,雅各比矩阵其余元素都为 0。因此,由表 1 可知,雅各比矩阵 H 中的元素均为常数。

通过上述计算,得到常数雅各比矩阵 H ,进一

步计算信息矩阵 $D = H^T R^{-1} H$ 。显然, D 也是常数矩阵。需要指出的是, 本文在推导雅各比矩阵 H 时采用了 PQ 分解状态估计的思想, 文献[32-34]说明了该近似方法在中高压配电网分析中是有效的。

1.3 IDU 对信息矩阵的影响

IDU 具有较强的同步性, 能够更好地监测系统的状态变化。IDU 对信息矩阵的计算主要有以下两方面的影响。

1) IDU 的数据采集量包括节点电压相量、支路电流相量、节点注入功率和支路功率。相比于 RTU, IDU 测量范围更广, 量测种类更多。根据上述计算可知, 配置 IDU 后, 雅各比矩阵相应增加 8 行, 状态估计数据冗余度增大, 有助于提高状态估计解的精度和稳定性。

2) 为充分利用 IDU 的高精度测量信息并解决数据精度兼容问题, 赋予 IDU 较高权重, 一般取测量测量方差的倒数 $1/\sigma^2$ 。

2 基于 DPSO 的 IDU 优化布点

2.1 离散粒子群优化算法

离散粒子群优化算法是一种具有普适性的随机全局优化方法, 具有概念简单、容易实现和所需调整参数较少等优点。其具体描述如下。

首先在空间中随机初始化 P 个粒子, 每个粒

$$D = H^T R^{-1} H = [H_0^T, b_1 h_{11}^T, \dots, b_N h_{N8}^T] \cdot \text{diag}(R_0^{-1}, \frac{1}{\sigma_{11}^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_{N1}^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_{N8}^2}) \cdot [H_0^T, b_1 h_{11}^T, \dots, b_N h_{N8}^T]^T =$$

$$H_0^T R_0^{-1} H_0 + \frac{b_1^2 h_{11}^T h_{11}}{\sigma_{11}^2} + \dots + \frac{b_1^2 h_{18}^T h_{18}}{\sigma_{18}^2} + \dots + \frac{b_N^2 h_{N1}^T h_{N1}}{\sigma_{N1}^2} + \dots + \frac{b_N^2 h_{N8}^T h_{N8}}{\sigma_{N8}^2} \quad (10)$$

式中 $\frac{h_{ij}^T h_{ij}}{\sigma_{ij}^2}$ 为 $(2n-1) \times (2n-1)$ 的常数矩阵, 令

$D_{ij} = \frac{h_{ij}^T h_{ij}}{\sigma_{ij}^2}$ 。又因为 b_i 为 0、1 变量, $b_i^2 = b_i$, 因此,

式(10)可改写为

$$D = D_0 + b_1(D_{11} + \dots + D_{18}) + \dots + b_N(D_{N1} + \dots + D_{N8}) \quad (11)$$

每一个粒子都是一个二进制解, 由 b_i 构成, 则第 i 个粒子的位置可表示为 $x_{iN} = (0, 1, \dots, 0, 1)_{1 \times N}$, 代表一种 IDU 配置方案, 每个粒子都是 N 维的, 其中 1 的个数为 N_0 。通过对比图 1 的粒子编码图, 确

1	2	3	...	N-1	N
0	1	0	...	0	1

图 1 粒子编码示意图

Fig. 1 Diagram for the code of particle

子根据追踪“个体极值 p_{id} ”和“全局极值 p_{gd} ”迭代更新自己, 最终求得最优解。粒子主要根据如下两个方程更新自身的速度:

$$v_{id}(k+1) = \omega v_{id}(k) + c_1 r_1 [p_{id}(k) - x_{id}(k)] + c_2 r_2 [p_{gd}(k) - x_{id}(k)] \quad (5)$$

$$\omega = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2) \cdot [(k_{\max} - k) / k_{\max}] \quad (6)$$

式中: v_{id} 和 x_{id} 分别为第 i 个粒子在第 d 维第 k 次迭代时的速度和位置; ω 为惯性权重; ω_1 表示权重初值; ω_2 表示权重终值; $k_{\max}$ 表示最大迭代次数; r_1 、 r_2 是在区间(0,1)上的随机数; c_1 、 c_2 是学习因子。

在 DPSO 中, 粒子的位置是表示概率的向量, 由 Sigmoid 函数定义位置的更新:

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + v_{id}(k+1) \quad (7)$$

$$x_{id} = \begin{cases} 1, & \rho_{id}(k) < \text{sig}[v_{id}(k)] \\ 0, & \rho_{id}(k) \geq \text{sig}[v_{id}(k)] \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{sig}[v_{id}(k)] = \frac{1}{1 + \exp[-v_{id}(k)]} \quad (9)$$

式中 $\rho_{id}(k)$ 为 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数。

2.2 IDU 优化布点原理

假设配电网有 n 个节点, 其中 N 个节点可安装 IDU, 计划安装 N_0 个 IDU。以下公式中, H_0 、 R_0^{-1} 和 D_0 分标表示初始雅各比矩阵、初始量测权重矩阵和初始信息矩阵。引入 0、1 变量 b_i , 用“1”来表示安装 IDU, “0”来表示不安装 IDU。

信息矩阵可表示为

定 IDU 的安装位置。

在求解问题的过程中, 通过适应值不断引导优化过程, 因此必须选用合适的目标函数来计算适应值。选择协方差矩阵 $\Sigma = D^{-1}$ 对角元素和最小作为适应度函数:

$$F = \min[\text{tr}(\Sigma)] \quad (12)$$

2.3 DPSO 算法流程

1) 假设有 P 个粒子, 初始化粒子群的 x_{id} 、 v_{id} 、 ω 等参数, 设置粒子的维数、最大迭代次数与收敛精度。

2) 根据每个粒子的位置计算该粒子的适应值 $F = [F_1, F_2, \dots, F_p]$ 。

3) 将 F_i 对应的个体极值 p_{id} 与当前的 p_{id} 进行比较, 若更优则更新当前 p_{id} , 并记录粒子的位置。

4) 将 F_i 对应的个体极值 p_{gd} 与当前的 p_{gd} 进行比较, 若更优则更新当前 p_{gd} , 并记录粒子的位置。

5) 根据式(5)和式(7)更新粒子的位置与速度。由于更新过程具有随机性,粒子的二进制编码中 1 的个数有可能大于 IDU 待安装个数。为此,本文通过随机置零的方式对粒子的位置进行修正,保证优化结果满足安装需求。

6) 判断是否达到最大迭代次数或达到精度收敛要求,若达到则停止计算并输出优化结果,若未达到则返回步骤 2)。

3 算例分析

为验证 IDU 优化布点方法的有效性,利用 IEEE 13 节点和 IEEE 34 节点系统进行仿真验证。在仿真计算中,将线路电抗增大 10 倍,保证线路电抗远大于电阻。通过在测试系统潮流结果的基础上叠加相应的正态分布随机误差形成量测数据^[29]。其中,传统量、电流幅值量测、相角量测的标准差分别为 0.02、0.002 和 0.0005。考虑 IDU 的测量精度远高于传统量测,赋予 IDU 更大的权重。设传统量测权重为 1, IDU 各类量测的权重如表 2 所示。本算例中 DPSO 算法的仿真参数如表 3 所示。

表 2 IDU 量测权重系数	
Tab. 2 Weight coefficient of measurement	
量测类型	权重系数
节点电压幅值量测	100
节点电压相角量测	1600
节点注入有功量测	1000
节点注入无功量测	90
支路电流实部量测	90
支路电流虚部量测	85
支路有功量测	1000
支路无功量测	100

表 3 DPSO 仿真参数			
Tab. 3 DPSO simulation parameters			
参数	数值	参数	数值
P	5	ω_1	0.9
c_1	2	ω_2	0.4
c_2	2	$k_{\max}$	100

3.1 IEEE 13 节点系统算例

IEEE 13 节点示意图如图 2 所示,电压等级为 4.16kV,初始量测的安装位置如表 4 所示。采用广度优先搜索方法对配电网支路进行编号,并对该系统做如下简化:1) 忽略调压器等设备,将节点 634 和 633 简化为一个等效负荷点;2) 将节点 692 和 675 合并为一个节点,忽略开关。

因 IEEE 13 节点系统规模较小,可行的 IDU 配置方案通过枚举确定,各方案状态估计精度的比较结果见表 5。由表 5 可知,最优布点方案计划在节点 671、支路 8 配置 IDU,状态估计误差减小了

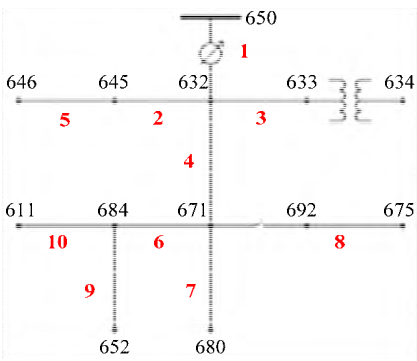


图 2 IEEE 13 节点系统示意图
Fig. 2 Schematic diagram of IEEE 13-bus system

表 4 IEEE 13 系统量测的初始安装位置	
Tab. 4 Initial position of measurements in IEEE 13-bus system	
量测类型	安装位置
节点电压幅值量测	611,652,680
节点注入功率量测	632,646,675
支路功率量测	2,3,4,7,9,10

表 5 多种配置方案的状态估计误差		
Tab. 5 State estimation error of various configuration		
方案编号	IDU 配置方案	状态估计误差
方案 0	未配置 IDU	33.9785
方案 1	节点 645、支路 5	33.3905
方案 2	节点 650、支路 1	29.8923
方案 3	节点 684、支路 6	24.5262
方案 4	节点 671、支路 8	24.5180
DPSO 优化方案	节点 671、支路 8	24.5180

27.8%,与 DPSO 优化配置结果一致,说明了 DPSO 优化布点方法的有效性。

3.2 IEEE 34 节点系统算例

IEEE 34 节点系统示意图如图 3 所示,电压等级为 24.9kV,初始传统量测配置的位置如表 6 所示。用广度优先搜索方法对各条支路进行编号,忽略调压器的影响,将节点 888 和 832 简化为一个等效负荷点。

图 4 展示了 IDU 计划安装数目为 1 时,每 5 次迭代的全局最佳适应值的优化结果,其优化时间为 2149ms,粒子在迭代约 15 次后收敛于 $F=58.6704$,算法计算速度快且收敛性好。全局最优粒子的位置为最优布点方案,即 $x=[000000000010000]$,对照图 1 的粒子编码示意图可知, IDU 的最优配置点为节点 838、支路 31。

对“未配置 IDU”、“随机配置”(随机选取节点 834、支路 24)与“DPSO 优化配置 IDU”后的状态估计精度进行比较,其比较结果见表 7。由表 7 可知,随机配置 IDU 后,状态估计误差减小了 30.4%。同时,经过 DPSO 优化配置,状态估计误差减少了

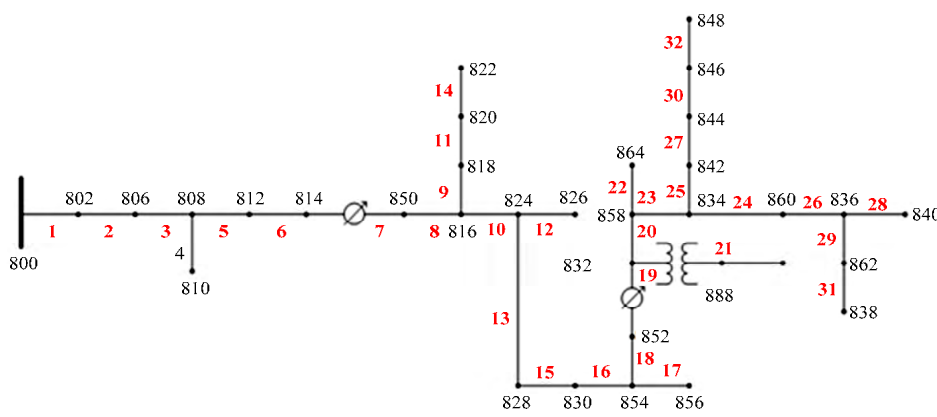


图 3 IEEE 34 节点系统示意图
Fig. 3 Schematic diagram of IEEE 34-bus system

表 6 IEEE 34 系统量测的初始安装位置 Tab. 6 Initial position of measurements in IEEE 34-bus system	
量测类型	安装位置
节点电压幅值量测	802,808,814,822,830,840,818,858
	856,890,862,846
节点注入功率量测	830,846,818,856,858,840,822,826
	824,862,802,890,808
支路功率量测	2,4,5,7,8,9,11,12,16,17,19,21
	23,25,26,30

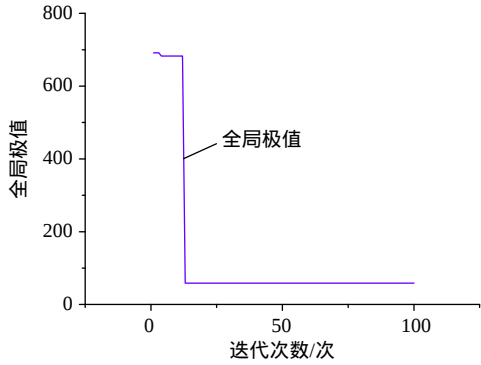


图 4 DPSO 输出结果
Fig. 4 Output results of DPSO

表 7 多种配置方案的状态估计误差 Tab. 7 State estimation error of various configuration	
配置方案	状态估计误差
未配置 IDU	692.8417
随机配置 IDU 于节点 834、支路 24	485.2158
DPSO 优化配置于节点 838、支路 31	58.6704

87.9%。可见，DPSO 对 IDU 布点进行优化，可有效提升状态估计精度。

3.3 最佳安装个数

表 8 展示了 IEEE 13 节点系统中 IDU 待安装个数不同时的优化布点结果。其中，(645,5)表示在节点 645 安装 IDU 用于测量节点 645、支路 5 的电气量。由表 8 可知，当 IDU 安装数目超过 2 时，状态估计误差虽有所减小，但减小幅度并不明显，因此建议 IEEE 13 节点系统 IDU 的最佳安装个数为 1。

表 8 IDU 最优布点 Tab. 8 Optimal position of IDU		
IDU 个数	状态估计误差	最优布点位置
1	24.5180	(671,8)
2	20.4399	(650,1) (684,6)
3	19.8763	(650,1)(684,6) (671,8)
4	19.6137	(650,1)(684,6) (671,8)(645,5)

图 5 展示了 IEEE 34 节点系统 IDU 待安装数目与状态估计误差的变化关系。可见，随着 IDU 安装数目的增加，状态估计误差明显下降。但到达一定安装数目后，IDU 优化效果减弱。从状态估计精度提升效率的角度来说，在 IEEE 34 节点系统中，IDU 的最优安装数目为 7 个。

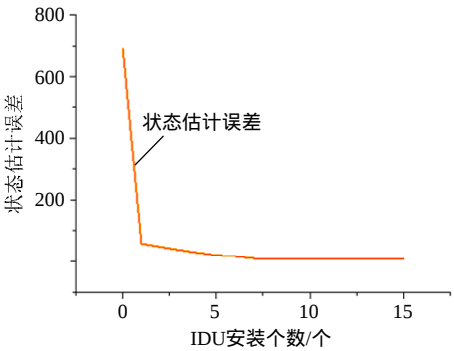


图 5 状态估计误差随 IDU 安装个数变化规律
Fig. 5 Regulation of state estimation error with the number of IDU

4 结论

本文提出了一种提高配电网状态估计精度的 IDU 优化布点方法。首先，基于 PQ 分解状态估计的思想，常数化信息矩阵中的元素；再采用离散粒子群优化算法，以协方差矩阵对角元素之和最小作为评价函数，对 IDU 进行优化布点。算例分析表明，该方法计算速度快，收敛性能好，优化结果切实有效，能够显著提升状态估计精度。此外，本文方法不仅充分利用 IDU 的高精度数据，还实现了混合量

测系统数据的有效融合。所提算法适应目前绝大部分系统都已配备了一定数目的传统量测的情况,在工程应用上有较高的推广价值。

此外,当 IDU 达到一定安装数目后,继续安装 IDU,状态估计精度提升不显著,从状态估计精度提升效率的角度来说,此时为 IDU 的最佳安装数目。本文尚未考虑 IDU 安装成本等经济因素,后续可在此基础上进一步完善 IDU 优化布点模型。

参考文献

- [1] Samuelsson O, Repo S, Jessler R, et al. Active distribution network — Demonstration project ADINE[C]// Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). Gothenberg, Sweden: IEEE, 2010: 1-8.
- [2] 邢海军, 程浩忠, 张沈习, 等. 主动配电网规划研究综述[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2705-2711.
Xing Haijun, Cheng Haozhong, Zhang Shenxi, et al. Review of active distribution network planning[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2705-2711(in Chinese).
- [3] 沈欣炜, 朱守真, 郑竞宏, 等. 考虑分布式电源及储能配合的主动配电网规划-运行联合优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1913-1920.
Shen Xinwei, Zhu Shouzheng, Zheng Jinghong, et al. Active distribution network planning-operation co-optimization considering the coordination of ESS and DG[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1913-1920(in Chinese).
- [4] 钟清, 张文峰, 周佳威, 等. 主动配电网分层分布控制策略及实现[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1511-1517.
Zhong Qing, Zhang Wenfeng, Zhou Jiawei, et al. Hierarchical and distributed control strategy for active distribution network & its implementation[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1511-1517(in Chinese).
- [5] 常鲜戎, 樊瑞. 计及零注入节点约束的混合量测分区状态估计方法[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2253-2257.
Chang Xianrong, Fan Rui. A mixed measurement partition state estimation method taking zero injection node constraint into account [J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2253-2257(in Chinese).
- [6] Sebastian M, Devaux O, Huet O. Description and benefits of a situation awareness tool based on a distribution state estimator and adapted to smart grids[C]//Smart Grids for Distribution. CIRED Seminar Germany: IET Conference Publications, 2008: 1-4.
- [7] 蒲天骄, 刘克文, 陈乃仕, 等. 基于主动配电网的城市能源互联网体系结构及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3512-3521.
Pu Tianjiao, Liu Kewen, Chen Naishi, et al. Design of AND based on urban energy internet architecture and its technological issues[J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(14): 3512-3521(in Chinese).
- [8] 黄仁乐, 程林, 李宏套. 交直流混合主动配电网关键技术研究[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 46-51.
Huang Renle, Cheng Lin, Li Hongtao. Research on key technology of AC/DC hybrid active distribution network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 46-51(in Chinese).
- [9] 黄仁乐, 蒲天骄, 刘克文, 等. 城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 26-40.
Huang Renle, Pu Tianjiao, Liu Kewen, et al. Photovoltaic accommodation capacity determination of actual feeder based on stochastic scenarios analysis with storage system considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 26-40(in Chinese).
- [10] Singh R, Pal B C, Jabr R A, et al. Meter placement for distribution system state estimation: an ordinal optimization approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 26(4): 2328-2335.
- [11] 王克英, 穆钢, 陈学允. 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 29-33.
Wang Keying, Mu Gang, Chen Xueyun. Precision improvement and PMU placement studies on state estimation of a hybrid measurement system with PMUs[J]. Proceeding of the CSEE, 2001, 21(8): 29-33(in Chinese).
- [12] 徐臣, 余贻鑫. 提高配电网状态估计精度的量测配置优化方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 17-21.
Xu Chen, Yu Yixin. Evaluation and optimization of meter placement to enhance distribution state estimation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 17-21(in Chinese).
- [13] 高亚静, 张占龙, 吴文传, 等. 配电网量测配置评估及优化[J]. 中国电力, 2014, 47(7): 39-44.
Gao Yajing, Zhang Zhanlong, Wu Wenchuan, et al. Evaluation and optimization of measurement configuration in distribution system[J]. Electric Power, 2014, 47(7): 39-44(in Chinese).
- [14] 季宇, 孙彦萍, 吴鸣, 等. 基于可观性分析的计及 DG 不确定性配电网表计优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 26-32.
Ji Yu, Sun Yanping, Wu Ming, et al. Optimal meter allocation based on observability analysis with consideration of DG uncertainty for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 26-32(in Chinese).
- [15] 吴星, 刘天琪, 李兴源, 等. 基于 WAMS/SCADA 数据兼容和改进 FCM 聚类算法的 PMU 最优配置[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 756-761.
Wu Xing, Liu Tianqi, Li Xingyuan, et al. Optimal configuration of PMU based on data compatibility of WAMS/SCADA and improved FCM clustering algorithm[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 756-761(in Chinese).
- [16] 袁澎, 艾芊, 赵媛媛. 基于改进的遗传-模拟退火算法和误差度分析原理的 PMU 多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2178-2187.
Yuan Peng, Ai Qian, Zhao Yuanyuan. Research on multi-objective optimal PMU placement based on error analysis theory and improved GASA[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(13): 2178-2187(in Chinese).
- [17] 徐岩, 应璐曼, 刘泽锴. 大电网下基于故障域的 PMU 配置和故障定位新方法[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3199-3204.
Xu Yan, Ying Luman, Liu Zekai. A new fault area based method of PMU configuration and fault location for large power grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3199-3204(in Chinese).
- [18] 刘新东, 江全元, 曹一家. N-1 条件下不失去可观性的 PMU 优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 47-51.
Liu Xindong, Jiang Quanyuan, Cao Yijia. Optimal PMU placement to guarantee observability under N-1 condition[J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(10): 47-51(in Chinese).
- [19] 蒋正威. 基于线性整数规划模型的高适应性 PMU 配置算法[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 42-47.
Jiang Zhengwei. Optimal PMU placement algorithm with high adaptability based on linear integer planning model[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 42-47(in Chinese).
- [20] 邢洁, 韩学山, 武鹏. 使潮流方程直接可解的 PMU 配置方法的改进[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 30-34.
Xing Jie, Han Xueshan, Wu Peng. Improvement of optimal PMU placement for analytical solution of power flow node by node[J].

- Power System Technology, 2006, 30(11): 30-34(in Chinese).
- [21] 王家林, 夏立, 吴正国. 船舶交直流混合系统相量测量单元优化配置方法[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 81-86.
Wang JiaLin, Xia Li, Wu Zhengguo. Optimal PMU allocation of shipboard hybrid AC/DC system[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 81-86(in Chinese).
- [22] Aminifar F, Fotuhi-Firuzabad M, Shahidehpour M, et al. Probabilistic multistage PMU placement in electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 841-849.
- [23] 鲍威, 蒋雪冬, 陈利跃, 等. 考虑观测冗余度最大的 0-1 线性规划电力系统 PMU 最优配置[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2051-2056.
Bao Wei, Jiang Xuedong, Chen Liyue, et al. A 0-1 linear programming approach to optimal phasor measurement units placement[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2051-2056(in Chinese).
- [24] Chen J, Abur A. Placement of PMUs to enable bad data detection in state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1608-1615.
- [25] 赵媛媛, 袁澎, 艾芊, 等. 考虑拓扑约束并采用改进遗传算法的 PMU 优化配置[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2063-2070.
Zhao Yuanyuan, Yuan Peng, Ai Qian, et al. Improved genetic algorithm based optimal configuration of PMUs considering topological constraints[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2063-2070(in Chinese).
- [26] Hajian M, Ranjbar A M, Amraee T, et al. Optimal placement of PMUs to maintain network observability using a modified BPSO algorithm [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(1): 28-34.
- [27] 李卫国, 李虹, 付红军, 等. 基于广域测量系统的电力系统状态估计[J]. 电网技术, 2008, 33(S2): 124-127.
Li Weiguo, Li Hong, Fu Hongjun, et al. Power system state estimation based on wide-area measurement system[J]. Power System Technology, 2008, 33(S2): 124-127(in Chinese).
- [28] 卫志农, 李阳林, 郑玉平. 基于混合量测的电力系统线性动态状态估计算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(6): 39-43.
Wei Zhinong, Li Yanglin, Zheng Yuping. A mixed measurement based linear dynamic state estimation algorithm for power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 39-43(in Chinese).
- [29] 王少芳, 刘广一, 黄仁乐, 等. 多采样周期混合量测环境下的主动配电网状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 30-36.
Wang Shaofang, Liu Guangyi, Huang Renle, et al. State estimation method for active distribution network under environment of hybrid measurement with multiple sampling periods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 30-36(in Chinese).
- [30] 巨云涛, 吴文传, 张伯明. 支持大规模电流量测的配网抗差状态估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 82-89.
Ju Yuntao, Wu Wenchuan, Zhang Boming. A new method for distribution state estimation accommodating current measurements[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(19): 82-89(in Chinese).
- [31] 秦晓辉, 毕天姝, 杨奇逊. 计及 PMU 的混合非线性状态估计新方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 28-32.
Qing Xiaohui, Bi Tianshu, Yang Qixun. A new method for hybrid non-linear state estimation with PMU[J]. Automation of Electric Power System, 2007, 31(4): 28-32(in Chinese).
- [32] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [33] 张伯明, 相年德, 王世纛, 等. 电网计算中广义网络流的回路分析及其在线应用(I)—理论和方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1986, 26(4): 76-85.
Zhang Boming, Xiang Niande, Wang Shiyin, et al. Loop analysis of generalized network flow in electric power systems calculations with on-line applications(I)—Theory and approach[J]. Journal of Tsinghua University, 1986, 26(4): 76-85(in Chinese).
- [34] Monticelli A, Garcia A, Saavedra O R. Fast decoupled load flow: hypothesis, derivations, and testing[J]. Power Systems IEEE Transactions on, 1990, 5(4): 1425-1431.



徐航

收稿日期: 2017-06-08.

作者简介:

徐航(1994), 女, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为主动配电网, E-mail: xuhang_1994@zju.edu.cn;

鞠力(1987), 女, 工程师, 研究方向为配电网规划, E-mail: juli_sgcc@163.com.

(责任编辑 李蕊)