

DOI: 10.7667/PSPC180462

主动配电网 FTU 配置优化方法探讨

吴国诚¹, 龚向阳¹, 蔡振华¹, 谢宇哲¹, 叶夏明¹, 邱云¹, 王克文²

(1. 国网浙江省电力公司宁波供电公司, 浙江 宁波 315000; 2. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 主动配电网中的自动化配电终端直接影响到状态估计精度和电网可靠性。分析配电网量测配置特点, 利用状态估计灵敏度矩阵确定量测估计方差的表达, 构成平均估计方差指标, 依照新量测对平均估计方差指标贡献系数的大小确定新量测设备的安装次序。以配电终端经济性指标和状态估计方差指标加权形成目标函数, 配电网可靠性和电压合格率为约束条件, 迭代求解最优 FTU 配置。考虑了配电网量测配置的经济性、可靠性和对状态估计误差的影响。通过 118 节点算例, 分析了“三遥”、“二遥”两个优化阶段的优化过程和结果, 说明算法的可行性。
关键词: 主动配电网; 配电自动化; 状态估计; 可靠性; 量测配置

Discussion on optimization method of FTU configuration in active distribution network

WU Guocheng¹, GONG Xiangyang¹, CAI Zhenhua¹, XIE Yuzhe¹, YE Xiaming¹, QIU Yun¹, WANG Kewen²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315000, China;
2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The state estimation accuracy and the power network reliability are directly affected by the automatic distribution terminals in active distribution network. The characteristics of distribution network measurement configuration are analyzed, the expression of measurement estimation variance is determined by the sensitivity matrix of state estimation, and an average estimation variance index is constituted. The installation order of new measurement devices is determined according to the contribution of the new measurements to the contribution coefficient of the average estimation variance index. The optimal FTU configuration is iteratively solved by weighing the distribution terminal investment index and state estimation variance index as the objective function, with the distribution network reliability and voltage qualified rate etc. as constraint conditions. The economic efficiency, reliability and the influence on state estimation error of distribution network measurement configuration are considered comprehensively. Through the 118-bus example, the optimization process and results in two stages of “three remote” and “two remote” are analyzed, and the feasibility of the algorithm is demonstrated.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61473265) and Science and Technology Project of Zhejiang Electric Power Company (No. 5211NB160006).

Key words: active distribution network; distribution automation; state estimation; reliability; measurement configuration

0 引言

主动配电网(Active Distribution Network, ADN)通过使用自动化配电终端可以灵活调整网络拓扑结构和潮流分布, 并对接入的分布式电源(Distributed Generator, DG)进行主动管理, 实现系统的安全经济运行^[1]。已有不少文献从不同侧面对主动配电网进

行了研究^[2-8]。

配电终端的配置不仅涉及到设备投资的经济性和运行的可靠性、电压合格率等因素, 配电终端提供的量测数据同时可用于改善配电网状态估计^[9-19]的计算精度。

从状态估计方面考虑配电网的量测配置, 可以针对配电网完全可观的要求, 构建量测系统布置的算法模型, 选取量测类型、地点和数量^[13-15]; 也可从减小估计误差角度, 分析量测配置, 在估计误差与经济性之间取得协调^[16-18]。文献[16]推导了配

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61473265); 浙江省电力公司科技项目资助(5211NB160006)

电网状态估计误差与量测误差的解析表达, 计算误差影响因子, 经过统计分析和排序确定量测类型和安装位置。文献[17]采用蒙特卡洛法统计分析配电网电流、电压、功率三种量测误差对电压估计值的影响, 进行量测配置。利用估计误差与量测误差的关系, 文献[18]从一组初始量测配置开始, 采用启发式迭代算法进行优化。由于估计误差和经济性指标的纲不同, 文献[20]建立配电网量测配置投资和电压估计误差的多目标优化模型, 并分析分布式发电对状态估计的影响。

在主动配电网配电网终端配置中, 通常包含相对详细的可靠性计算^[20-22]和不同程度的经济性分析^[23-26]。文献[16]分析了在配电网不同网络结构和不同终端类别下的 FTU 最优配置。文献[24-25]将可靠性作为约束条件, 建立了考虑投资费用、运行费用、停电损失费用等因素的终端配置优化模型, 并采用遗传算法^[24]或拉格朗日乘法^[25]求解。文献[26]分别针对最大可靠性和最佳经济性建立优化目标, 利用可靠性和经济性的“最大比效益增量”迭代求解, 确定线路开关和自动化设备的数量和位置。

为综合考虑主动配电网量测配置的经济性、可靠性和对状态估计误差的影响, 本文分析配电网量测配置的特点, 推导量测估计方差的解析表达, 以所有量测的平均估计方差构成估计方差指标, 依照新量测对指标贡献系数的大小确定新量测的安装次序。以配电终端投资指标和状态估计方差指标加权形成目标函数, 配网可靠性和电压合格率为约束条件, 通过故障模式后果分析法计算配电网可靠性, 迭代求解最优 FTU 配置。为配电终端的最优配置提供算法参考。

1 提高状态估计精度的量测配置

主动配电网中, 除与上级电网相联的变电站开关外, 线路分段开关、用户开关、分布电源开关均可配置“二遥”或“三遥”终端, 从而为状态估计提供量测信息。

1.1 状态估计中的灵敏度矩阵

在最小二乘法状态估计^[27]算式中, 设 \mathbf{Z}_r 、 \mathbf{Z}_m 、 \mathbf{Z}_e 分别为量测量的真值、量测值、估计值矢量; \mathbf{X}_r 、 \mathbf{X}_e 分别为状态量(节点电压)的真值、估计值矢量; 存在

$$\mathbf{Z}_r = h(\mathbf{X}_r) \quad (1)$$

以及线性化后的关系

$$\Delta \mathbf{Z}_{mr} = \mathbf{Z}_m - \mathbf{Z}_r = \mathbf{H}_r \Delta \mathbf{X}_m \quad (2)$$

$$\Delta \mathbf{Z}_{er} = \mathbf{Z}_e - \mathbf{Z}_r = \mathbf{H}_r \Delta \mathbf{X}_e \quad (3)$$

式中; \mathbf{H}_r 为真值点处的雅克比矩阵; $\Delta \mathbf{X}_m$ 、 $\Delta \mathbf{X}_e$ 分别为量测误差、估计误差对应的状态变量变化量。由式(2)可得

$$\Delta \mathbf{X}_m = (\mathbf{H}_r^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_r)^{-1} \mathbf{H}_r^T \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{Z}_{mr} \quad (4)$$

式中; \mathbf{R} 为量测误差 $\Delta \mathbf{Z}_{mr}$ 的方差对角阵; \mathbf{R}^{-1} 为代表权重的对角阵。当考虑 $\Delta \mathbf{X}_m = \Delta \mathbf{X}_e$ 时, 将式(4)代入式(3)得到

$$\Delta \mathbf{Z}_{er} = \mathbf{W} \Delta \mathbf{Z}_{mr} \quad (5)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{H}_r (\mathbf{H}_r^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_r)^{-1} \mathbf{H}_r^T \mathbf{R}^{-1} \quad (6)$$

式中: \mathbf{W} 为灵敏度矩阵, 描述测量误差对估计误差的影响关系; \mathbf{H}_r 为真值点处的雅克比矩阵, 实际计算中用迭代收敛后的 \mathbf{H} 阵近似代替, 从而

$$\mathbf{W} = \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \quad (7)$$

在最小二乘法状态估计计算时, 已形成式(6)中的 $\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}$, 需求其逆阵, 进而计算出 \mathbf{W} 。

由式(5), 估计值误差矢量 $\Delta \mathbf{Z}_{er}$ 的协方差阵为

$$C_{\Delta \mathbf{Z}_{er}} = E(\Delta \mathbf{Z}_{er} \Delta \mathbf{Z}_{er}^T) = E(\mathbf{W} \Delta \mathbf{Z}_{mr} \Delta \mathbf{Z}_{mr}^T \mathbf{W}^T) = \mathbf{W} \mathbf{R} \mathbf{W}^T \quad (8)$$

式中: 上标 T 代表转置; $E(\cdot)$ 代表取均值。 $\Delta \mathbf{Z}_{er}$ 中第 i 个元素的自方差为

$$C_{\Delta z_{er,i}, \Delta z_{er,i}} = \sum_{k=1}^N (R_k W_{i,k}^2) \quad (9)$$

式中, N 为量测总数。

1.2 灵敏度矩阵的应用

在 10 kV 配电网中, 常常已知的是线路首端、个别大用户、分布式电源的功率和电压, 按照配变容量等方法把首端功率分配到各负荷节点时, 负荷节点的注入功率为伪测量。准备新装的量测(此处为配电自动化终端)包含部分支路量测和负荷节点量测。可通过 \mathbf{W} 矩阵, 确定新量测的安装位置, 来改善量测的估计精度。

式(5)右侧的 $\Delta \mathbf{Z}_{mr}$ 中, 仅关心新增量测的量测偏差带来的影响。新增量记为 \mathbf{Z}_{new} , 由新增量测的节点功率、节点电压、支路功率等构成。为表达方便, 假定 \mathbf{W} 中新增量测的编号在前, 对 \mathbf{W} 的子阵元素进行如下排列。

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_{1,1} & \cdots & W_{1,j} & \cdots & W_{1,M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ W_{i,1} & \cdots & W_{i,j} & \cdots & W_{i,M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ W_{N,1} & \cdots & W_{N,j} & \cdots & W_{N,M} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: N 为总量测数; M 为可加装的新量测数; $W_{i,j}$ 为估计偏差 $\Delta \mathbf{Z}_{er,i}$ 对新增量测的量测偏差 $\Delta \mathbf{Z}_{new,mr,j}$ 的灵敏度系数。

为计算式(10)的 W 子阵, 需要 Z_{new} 中的新量测预先出现在量测矢量 Z 中, 又不影响状态估计的结果。可以通过对量测权重系数的调整来实现, Z_{new} 元素对应的权重系数初值较小, 例如 $R_i^{-1} = 0.01$, 当某一配电终端被采用时, 将该配电自动化终端对应量测的权重系数提高, 例如 $R_i^{-1} = 1.0$ 。具体处理时, 若 $Z_{\text{new},i}$ 无对应的伪量测, 在 Z 中增加该量测, 相应权重系数取 $R_i^{-1} = 0.01$; 若 $Z_{\text{new},i}$ 对应有伪量测, 用该伪量测代替 $Z_{\text{new},i}$, 意味着 $Z_{\text{new},i}$ 的采用就是将伪量测的权重系数值由 0.01 提高到 1.0。

为考虑最优量测配置, 结合式(9), 用所有量测的平均估计方差构成最小化指标。

$$\min J_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{\Delta z_{\text{er},i}, \Delta z_{\text{er},i}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N (R_k W_{i,k}^2) \quad (11)$$

仅考虑式(9)右侧累加项中新加量测的贡献时, 式(11)中的 k 将仅对应 M 个新量测。式(11)可整理为

$$\min J_1 = \sum_{k=1}^M (R_k \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_{i,k}^2) = \sum_{k=1}^M (R_k F_k^2) \quad (12)$$

其中, $F_k = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_{i,k}^2}$ 代表第 k 个新量测的贡献系数, 也是式(10)中第 k 列的均方根。

对新量测的贡献系数 F 或加装后的 J_1 按数值大小进行排序, 可确定新量测的安装次序。

当单独从状态估计角度考虑量测配置时, 可以选择: (a) 一次性按 F 或 J_1 的大小对所有新量测的加装进行排序; (b) 每加装一个新量测后, 重新进行状态估计计算、 W 阵计算、剩余待装量测的 F 或 J_1 的计算及排序, 选择下一个要加装的量测。本文中采用(a)。

2 配电网可靠性与 FTU 配置的经济性指标

2.1 配电网可靠性指标

常用的配电网可靠性指标有系统平均停电频率(SAIFI)、系统平均停电持续时间(SAIDI)、平均供电可用率(ASAI)等。其中平均供电可用率是一年中用户的不停电小时数与用户要求的总供电小时数之比

$$ASAI = \frac{N_c T - T_1}{N_c T} \quad (13)$$

式中: N_c 为用户数; $T = 8760 \text{ h}$ 、 T_1 为所有用户的年停电总时间(h)。

相应地, 计及故障停电因素的可靠性指标为

$$AFset = 1 - (1 - ASAI)r \quad (14)$$

式中, r 为故障停电户时数占总停电户时数的百分比。

《配电自动化规划设计技术导则》中, 按照负荷重要程度和供电可靠性要求, 将供电区域分为 A+、A、B、C、D、E 六类, 本文的分析针对 C 类。C 类区域的用户年平均停电时间不高于 9 h, $ASAI \geq 99.897\%$, 式(14)中取 $r = 0.4$, $AFset = 99.959\%$ 。

2.2 可靠性指标计算

关于配电网可靠性指标的计算, 已存在多种成熟方法。本文采用故障模式后果分析法(FMEA), 计算过程包括:

(1) 形成辐射性配电网的前向、后向链接关系表, 用于网络搜索; 按元件类别和“二遥”、“三遥”配置情况确定各元件的年故障率、故障隔离时间、故障修复时间。

(2) 对每一元件, 例如年故障率为 λ_i 的元件 i , 确定故障跳闸的停电范围, 故障隔离、负荷转移和供电恢复后的停电范围, 计算对所有停电用户产生的停电次数、停电时间、停电电量, 并用年故障率 λ_i 折算; 用前推回代法计算支路潮流和节点电压, 并用 λ_i 折算(若进行状态估计计算, 可代替潮流计算)。

(3) 计算各用户点的可靠性指标; 计算系统的可靠性指标 SAIDI、ASAI、AFset, 以及年缺供发电量、年缺供用户电量、年电压合格率指标等。

2.3 FTU 配置的经济性指标

FTU 配置的经济性指标包括投资费用、运行费用、停电损失费用等因素^[24]。

按照《配电自动化规划设计技术导则》, “二遥”终端通常采用无线通信, “三遥”终端一般采用光纤通信。对于配合已有开关的配电自动化建设, 其投资费用仅为配电终端费用。配电自动化终端及其附属设施的投资年等值费用为

$$C_1 = \alpha_1 (K_1 L_\Sigma + K_2 N_{\text{FTU}2} + K_3 N_{\text{FTU}3}) \quad (15)$$

式中: α_1 为投资年等值折算系数; L_Σ 为“三遥”终端通信光纤总长度; $N_{\text{FTU}2}$ 、 $N_{\text{FTU}3}$ 分别为“二遥”、“三遥” FTU 台数; K_1 、 K_2 、 K_3 为费用系数。

年运行费用为

$$C_2 = \alpha_2 (K_1 L_\Sigma + K_2 N_{\text{FTU}2} + K_3 N_{\text{FTU}3}) \quad (16)$$

式中, α_2 为年运行费用占投资的比例系数。

年停电造成的损失费用 C_{loss} 为

$$C_{\text{loss}} = \alpha_{\text{loss}} A_{\text{loss}} \quad (17)$$

式中: α_{loss} 为单位停电损失系数; A_{loss} 为系统年缺供用户电量, 由 2.2 节的可靠性评估计算获得。

FTU 配置的经济性指标为

$$J_2 = C_1 + C_2 + C_{\text{loss}} \quad (18)$$

3 考虑可靠性和状态估计精度的 FTU 配置

为同时考虑经济性、可靠性和状态估计精度, 可以建立多目标优化模型。也可在满足可靠性和状态估计精度的要求下, 建立经济性最优的单目标优化模型。鉴于状态估计精度约束的边界值不易确定, 本文采用经济性指标和状态估计精度加权最优的方式。

对于优化算法的选取, 由于在可靠性评估的故障模式后果分析(FMEA)中, 已形成相关的网络联接关系, 所以直接利用图论算法的快速搜索能力, 寻求满足约束的最优配置方案。

3.1 优化模型

在满足供电可靠性、节点电压和支路功率合格率的前提下, 费用指标和状态估计精度综合最优。

$$\min J = aJ_1 + bJ_2 \quad (19)$$

s.t.

$$AFset \geq AFset_0 \quad (20)$$

$$\alpha_v \geq \alpha_{v,0} \quad (21)$$

$$\alpha_{branch} \geq \alpha_{branch,0} \quad (22)$$

$$P_{dis,i,max} \geq P_{dis,i} \geq P_{dis,i,min} \quad (23)$$

$$P_{Load,j,max} \geq P_{Load,j} \geq P_{Load,j,min} \quad (24)$$

式中: J_1 为式(12)中的状态估计指标; J_2 为配电终端的投资费用; a 、 b 为权重系数; α_v 、 α_{branch} 分别为节点电压、支路功率合格率指标; $P_{dis,i}$ 为分布式电源点 i 的有功出力、 $P_{Load,j}$ 为负荷点 j 的有功负荷; 下标 0 表示给定值, 下标 max、min 表示边界值。

式(19)中, 权重系数体现两个不同量纲指标的参与程度, 但不易取值。本文中, 为体现状态估计指标的参与, 但又不过分影响, 经试算, 取 $a=0.1$ 、 $b=1.0$ 。

式(20)为可靠性约束。式(21)、(22)为安全性约束。在 2.2 节的可靠性评估中, 采用潮流计算得到每个元件故障下的所有节点电压和支路功率, 并通过故障率折合为式(21)、(22)的约束条件。式(23)为分布式电源出力约束。式(24)表示甩负荷约束。

3.2 FTU 配置优化

对 C 类供电区域, 配电终端的初始配置为, 对主干线开关、线路联络开关、分段开关、分支线开关, 以及进出线较多的开关站、环网单元和配电室, 配置“三遥”配电自动化终端; 对无联络的末端站室、用户进线分界开关, 配置“二遥”终端。本文主要考虑线路开关的 FTU 配置。

鉴于配电线路的辐射性结构和“三遥”终端对光纤通道的要求, 终端类别的提升(例如“二遥”改为“三遥”)可按从线路首端到末端的次序; 终端类别的降低按照从线路末端到首端的次序。由于分支线的存在, 需要比较在不同分支线上进行终端类别改变的效果。

对 3.1 节的优化模型, 可通过迭代方式处理。假定在配电终端的初始配置下, 可靠性指标 $AFset$ 大于要求值, 先试算“三遥”降为“二遥”, 再试算“二遥”降为不配终端。以“三遥”降“二遥”为例, 计算过程如下所述。

(1) 搜索所有分支线上“三遥”配置的最后节点, 得到 L 个点。

(2) 对节点 $i=1,2,\dots,L$, 分别降低配电终端类别, 进行可靠性计算、状态估计(或潮流计算), 当满足式(20)一式(24)时计算式(15)中的目标函数值, 得到 $L1$ 个。

(3) 若 $L1=0$, 结束, 否则转(4)。

(4) 从 $L1$ 个目标函数值中, 选择最小值对应的点, 降低配电终端类别; 转(1)。

从而得到满足可靠性、安全性要求的配置方案。

需要说明的是, “三遥”降“二遥”时, 对状态估计误差无影响。

4 算例分析

算例改自 IEEE-118 节点配网系统, 增加了开关和相应的节点编号, 如图 1 所示。电源电压 10.5 kV。

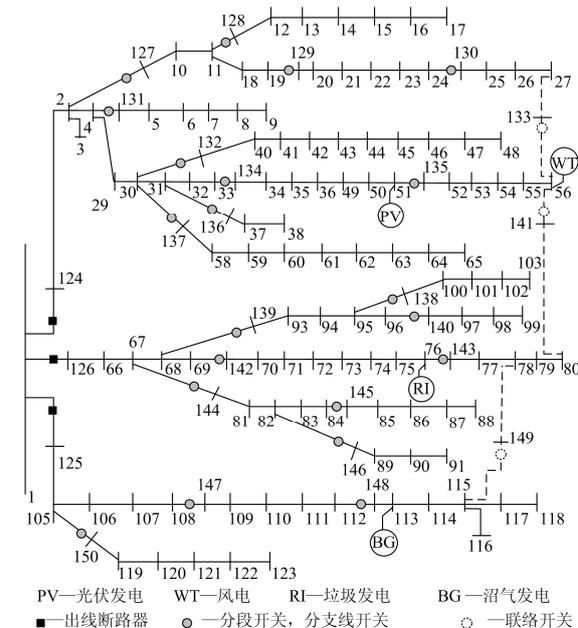


图 1 10 kV 配电网

Fig. 1 10 kV distribution network

含 117 段线路、3 条联络线，21 个分段开关和分支线开关、3 个联络开关。

总负荷功率 22.7 MW。节点 56 接入风电功率 $1.5+j0.73$ MVA；节点 51 接入光伏发电 $1.5+j0.73$ MVA；节点 76 接有垃圾焚烧电厂 $4+j1.94$ MVA；节点 113 接有沼气电厂 $3+j1.45$ MVA。

所有计算在 FORTRAN 6.5 环境下编程实现。状态估计采用最小二乘法，相关计算按第 1 节算式；可靠性指标的计算采用故障模式后果分析法；整体优化按第 3 节所述方法。

4.1 加装配电终端对状态估计精度的影响

图 1 中，除根节点处的 1-124、1-126、1-125 已有支路量测外，表 1 所示的 21 段线路具有分段开关或分支线开关，可加装支路量测。联络线开关正常运行时断开。

已有量测的有功、无功功率可信度取 1，待新加装量测的有功、无功功率可信度取 0.01，增加量测装置后的可信度改为 1。

有名值下，状态估计经 4 次迭代收敛。式(12)的目标函数值为 79.751 1。

表 1 新量测位置

Table 1 Positions of new measurements

分段开关和分支线开关
2-127, 4-131, 11-128, 19-129, 24-130, 30-132, 30-137, 31-136, 33-134, 51-135, 67-144, 68-139, 69-142, 76-143, 82-146, 84-145, 95-138, 96-140, 105-150, 108-147, 112-148

对应于式(12)的新量测的贡献系数示于图 2，量测号 2~118 对应于节点有功量测，119~139 对应于支路有功量测(无功量测未在图中给出)。

为说明加装配电终端对状态估计精度的影响，按 1.2 节方法依次加入量测配置。式(12)中目标函数 J_1 随加装量测的变化过程示于图 3。当加装 126 个量测时，目标函数降到 6.514；加装 138 个量测时，目标函数减小到 0.824 7。

需要说明的是，在加装配电终端时，估计精度应不是唯一指标，还需考虑更多的其他因素，但式(12)的贡献系数和目标函数仍提供了一种计算依据。

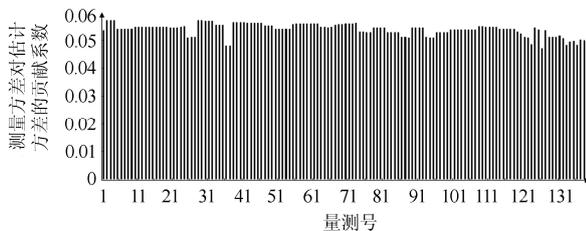


图 2 测量方差对估计方差的贡献系数

Fig. 2 Contribution coefficients of measurement variances to estimated variances

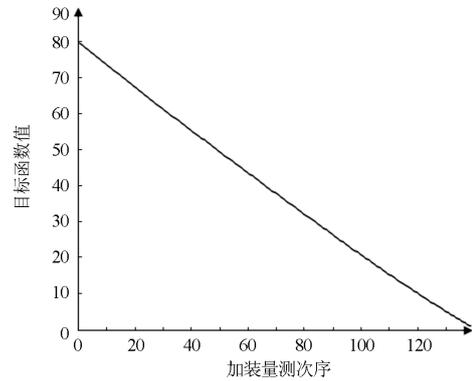


图 3 目标函数随加装量测的变化

Fig. 3 Change of objective function with added measurements

4.2 FTU 优化配置

配电终端的初始配置为，对主干线开关、线路联络开关、分段开关、分支线开关，配置“三遥”，用户配置“二遥”。

架空裸线的故障率取 0.1 次/(km·a)，故障修复时间取 4 h/次；断路器的计算参数见文献[28]。故障定位指引下的人工故障区域隔离时间取 1 h/次，无故障定位时取 2 h/次。“三遥”配置下的故障区域隔离时间取 3 min/次。C 类区域要求的 AFset 取 99.959%。“三遥”通信光缆投资费用取 3 万元/km，“三遥”FTU 取 0.7 万元/台，“二遥”FTU 取 0.68 万元/台。当设备使用年限取 10a、贴现率取 10% 时^[24]，投资年等值折算系数 α_1 近似取值 0.17。年运行费用系数 α_2 取值 0.04；单位停电损失系数 α_3 取值 25 元/(kW·h)。式(19)中权重系数取 $a=0.1$ 、 $b=1.0$ 。

初始配置下的指标详见表 2，三条馈线的 AFset 指标均高于要求的 99.959%。配置优化对三条馈线分别进行。每条馈线的优化分为两个阶段，第一阶段为“三遥”优化，将部分“三遥”降为“二遥”，第二阶段为“二遥”优化，尝试取消部分“二遥”。由于“二遥”、“三遥”均可提供量测数据，第一阶段中的状态估计指标 J_1 无变化。

表 2 初始配置下指标

Table 2 Indices under initial configuration

	馈线 1 (1-124)	馈线 2 (1-126)	馈线 3 (1-125)	汇总
线路长度/km	31.508 4	18.233 1	8.135 5	57.876 9
AFset/%	99.965 4	99.980 7	99.988	99.973 9
ASAI/%	99.913 4	99.951 8	99.970 8	99.934 8
最低电压/kV	9.74	10.13	10.24	9.74
电压合格率/%	100	100	100	100
通讯光纤/km	15.68	12.75	4.15	32.58
三遥 FTU/台	13	9	5	27
二遥 FTU/台	0	0	0	0
年费用/万元	56.133	44.550	15.961	116.644

参照式(12), 式(15)中状态估计指标 J_1 的计算为初始指标 J_{10} 减去配置“二遥”、“三遥”后的变化量, 即 $J_1 = J_{10} - \sum_{k=1}^{M_p} (R_k F_k^2)$, M_p 为配置个数。

优化过程中, 末端接有联络线的三条主干线采用“三遥”配置, 末端接有联络线的线路(节点 2 经 11 到 27)采用“二遥”配置, 不参与优化调整。

以馈线 1 为例, 优化过程的各项变化情况列于表 3, 其中序号 1~7 为针对“三遥”进行优化, 序号 8 针对“二遥”, 由于 AFset 指标已降到要求的最低值 99.595%, 优化过程结束。目标函数 J 由初始的 58.960 1 下降到 31.187 6。表中同时列出状态估计指标和投资指标的变化情况。

表 3 馈线 1 的 FTU 优化过程

Table 3 Optimization process for FTUs in feeder 1

序号	降低配置类别的开关位置	目标函数 J	$a*J_1$	$b*J_2$	AFset/%	优化阶段
		58.960 1	2.827 1	56.133	99.965 4	(初值)
1	24-130	48.087 5	2.827 1	45.2604	99.963 5	“三遥”
2	19-129	42.181 8	2.827 1	39.354 7	99.962 4	“三遥”
3	11-128	38.115 1	2.827 1	35.288	99.962 3	“三遥”
4	31-136	35.423 7	2.827 1	32.596 6	99.962 2	“三遥”
5	30-132	33.832 3	2.827 1	31.005 2	99.96 2	“三遥”
6	30-137	32.523 3	2.827 1	29.696 2	99.961 7	“三遥”
7	2-127	31.396 6	2.827 1	28.569 5	99.959 1	“三遥”
8	31-136	31.187 6	3.298 1	27.889 5	99.959	“二遥”

为说明表 3 中每一行的开关选择, 以序号 8 为例。此时搜索到“二遥”配置的末端开关共有 5 个, 逐一降低各开关配置后的主要指标详见表 4。满足式(20)一式(24)要求的最小目标函数值为 31.187 6, 对应于表 4 中 8(3)行的开关位置 31-136, 即表 3 中的序号为 8 的一行。

三条馈线优化“三遥”配置后的指标详见表 5, 优化“二遥”配置后的指标详见表 6。由于保留主

表 4 馈线 1 “二遥”优化第一次迭代的 FTU 选择

Table 4 FTU selection in the first iteration of “two remote” optimization for feeder 1

序号	降低配置类别的开关位置	目标函数 J	$a*J_1$	$b*J_2$	AFset/%	选择
8(1)	4-131	30.657 1	3.350 1	27.307	99.958 8	
8(2)	11-128	31.227 6	3.338 1	27.889 5	99.958 9	
8(3)	31-136	31.187 6	3.298 1	27.889 5	99.959	选
8(4)	30-132	31.259 6	3.370 1	27.889 5	99.958 8	
8(5)	30-137	31.253 6	3.364 1	27.889 5	99.958 8	

干线的“三遥”配置, 最终有 13 台“三遥”FTU, 6 台“二遥”FTU。位于主干线的分布式电源与分段、联络开关共享“三遥”配置。

表 5 “三遥”阶段优化结果

Table 5 Results of “three remote” optimization stage

	馈线 1	馈线 2	馈线 3	汇总
AFset/%	99.959 1	99.979 6	99.988 1	99.970 2
ASAI/%	99.897 7	99.949 0	99.970 1	99.925 6
通信光纤/km	6.54	7.3	3.48	17.32
三遥 FTU/台	6	3	4	13
二遥 FTU/台	7	6	1	14
年费用/万元	28.569 5	28.086 8	13.9299	70.586 2
目标函数	31.396 6	32.070 9	20.404	

表 6 “二遥”阶段优化结果

Table 6 Results of “two remote” optimization stage

	馈线 1	馈线 2	馈线 3	汇总
AFset/%	99.959 0	99.978 4	99.987 8	99.969 8
ASAI/%	99.897 6	99.946 0	99.969 6	99.924 5
通信光纤/km	6.54	7.3	3.48	17.32
三遥 FTU/台	6	3	4	13
二遥 FTU/台	6	0	0	6
年费用/万元	27.889 5	24.006 8	13.249 9	65.146 2
目标函数	31.187 6	30.961 9	20.223	

因此, 可以在主动配电网的配电终端优化配置时, 综合考虑状态估计精度、经济性、可靠性等因素。

5 结论

本文分析配电网量测配置的特点, 以所有量测的平均估计方差构成估计方差指标, 依照新量测的贡献系数确定新量测的安装次序。尝试将主动配电网状态估计误差和经济性、可靠性指标相结合, 进行 FTU 优化配置。通过算例分析, 说明算法的可行性。更具体地计入 FTU 实际配置中的诸多因素, 以及寻求更为有效的优化建模和求解方法, 尚需进一步的探讨。

参考文献

- [1] 赵波, 王财胜, 周金辉, 等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125-135.
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-135.
- [2] 刘东, 张弘, 王建春. 主动配电网技术研究现状综述[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 2-7, 20.

- LIU Dong, ZHANG Hong, WANG Jianchun. Review on the state of the art of active distribution network technology research[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 2-7, 20.
- [3] 黄素娟, 张晓青, 孙保华, 等. 主动配电网协调控制系统设计及应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 25-30.
HUANG Sujuan, ZHANG Xiaoqing, SUN Baohua, et al. Design and application of coordinated control system in active distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 25-30.
- [4] 刘专, 郭泉辉, 刘娟, 等. 基于统计数据的配网故障修复时长分析[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 84-87.
LIU Zhuan, GUO Quanhui, LIU Juan, et al. Analysis on distribution network fault repair time based on statistical data[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 84-87.
- [5] 张世翔, 邵慧壮. 含分布式电源的配电网优化研究[J]. 中国电力, 2017, 50(3): 147-153.
ZHANG Shixiang, SHAO Huizhuang. Optimization research of distribution network considering distributed generation[J]. Electric Power, 2017, 50(3): 147-153.
- [6] 李昱佳, 董川. 基于两种仿生算法的低碳主动配电网规划[J]. 中国电力, 2017, 50(4): 66-70, 76.
LI Yujia, DONG Chuan. Low-carbon active distribution network planning based on two bionic algorithms[J]. Electric Power, 2017, 50(4): 66-70, 76.
- [7] 闫秉科, 李小平, 舒欣, 等. 多种分布式电源随机性的配电网优化运行研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 14-18, 90.
YAN Bingke, LI Xiaoping, SHU Xin, et al. Research on optimal operation of distribution network considering stochastic nature of different distributed generations[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 14-18, 90.
- [8] 周鹏, 郝伟伟. 基于年负荷持续曲线的配电网分布式电源容量规划双层优化[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 90-95, 102.
ZHOU Peng, HAO Weiwei. Bilevel Optimization for distributed generation capacity planning in distribution network based on annual load duration curve[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 90-95, 102.
- [9] 刘耀年, 尹洪全, 张伟, 等. 基于改进粒子群算法的配电网状态估计[J]. 电测与仪表, 2012, 49(9): 24-27, 51.
LIU Yaonian, YIN Hongquan, ZHANG Wei, et al. Distribution state estimation based on improved particle swarm optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(9): 24-27, 51.
- [10] 刘科研, 盛万兴, 何开元, 等. 基于拉格朗日松弛技术的复杂有源配电网分布式状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 125-132.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, HE Kaiyuan, et al. Distributed state estimation of complex active distribution network based on Lagrange relaxation technique[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 125-132.
- [11] 胡春潮, 何杰, 马凯. 基于信息冗余的电力系统分布式状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 111-115.
HU Chunchao, HE Jie, MA Kai. Power system distributed state estimation based on information redundancy of secondary system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 111-115.
- [12] 孙江山, 刘敏, 邓磊, 等. 电力系统分区和解耦状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 162-169.
SUN Jiangshan, LIU Min, DENG Lei, et al. Review of the research on the partition and decoupled state estimation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 162-169.
- [13] 徐凌逊, 范韩璐, 祁宇, 等. 一种配电网量测系统设计与优化方案[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 143-148.
XU Lingxun, FAN Hanlu, QI Yu, et al. Design and optimization of distribution network measurement system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 143-148.
- [14] 王红. 主动配电网状态估计及鲁棒量测配置研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
WANG Hong. Research on state estimation and robust measurement placement in active distribution network[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [15] 戴桂木, 吴在军, 徐俊俊, 等. 有源配电网FTU优化布置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 86-93.
DAI Guimu, WU Zaijun, XU Junjun, et al. Study of FTU optimal placement in the active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 86-93.
- [16] 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.
- [17] 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, 2004, 47(9): 39-44.
GAO Yajing, ZHANG Zhanlong, WU Wenchuan, et al. Evaluation and optimization of measurement configuration

- in distribution system[J]. *Electric Power*, 2004, 47(9): 39-44.
- [18] JIAO Runhai, LI Yuying, WANG Yi, et al. A fast heuristic optimization algorithm for measurement placement in distribution system state estimation[J]. *Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2017, 12(5): 657-664.
- [19] PRASAD S, VINOD K D M. Optimal allocation of measurement devices for distribution state estimation using multiobjective hybrid PSO-Krill Herd algorithm[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(8): 2022-2035.
- [20] 冯光, 王文博, 胡博, 等. 配电网可靠性薄弱元件辨识模型及应用[J]. *电测与仪表*, 2016, 53(20): 84-92.
FENG Guang, WANG Wenbo, HU Bo, et al. Weak components identification model of electrical distribution network reliability and its application[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2016, 53(20): 84-92.
- [21] 赵航宇, 赵洪山. 微网接入对配电网供电可靠性影响分析[J]. *电测与仪表*, 2016, 53(8): 7-12.
ZHAO Hangyu, ZHAO Hongshan. Analysis on the effect of micro-grid access to the power supply reliability of distribution network[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2016, 53(8): 7-12.
- [22] 徐凌逊, 范韩璐, 祁宇, 等. 一种配电网量测系统设计及优化方案[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(5): 143-148.
XU Lingxun, FAN Hanlu, QI Yu, et al. Design and optimization of distribution network measurement system[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(5): 143-148.
- [23] 郑玲玲, 王铮, 杨丽徙. 不同网络结构及可靠性要求环境下 FTU 的最优配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(24): 69-74.
ZHENG Lingling, WANG Zheng, YANG Lixi. FTU optimal configuration under different distribution network structures and reliability requirement[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(24): 69-74.
- [24] 李子韵, 成乐祥, 王自楨, 等. 配电自动化终端布局规划方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(4): 1271-1276.
LI Ziyun, CHENG Lexiang, WANG Zizhen, et al. A method of layout planning for distribution automation terminal[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(4): 1271-1276.
- [25] 王桂栋, 周从容, 马幼捷, 等. 河北南网配电自动化终端配置应用研究[J]. *天津科技*, 2016, 43(9): 49-52.
WANG Guidong, ZHOU Congrong, MA Youjie, et al. Applied research of distribution automation RTUs configuration[J]. *Tianjin Science & Technology*, 2016, 43(9): 49-52.
- [26] 崔立忠, 张瑞雪, 刘涛, 等. 复杂配电自动化系统可靠性计算及设备布局规划[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(20): 84-91.
CUI Lizhong, ZHANG Ruixue, LIU Tao, et al. Reliability calculation and equipment layout planning for complex distribution system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(20): 84-91.
- [27] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [28] 郭永基. 电力系统可靠性[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
-
- 收稿日期: 2018-04-22; 修回日期: 2018-07-20
作者简介:
吴国诚(1963—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究领域为电网建设运行技术及其管理。E-mail: nbedwu@163.com
张 民(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事直流输电系统二次系统设计、运行与维护等相关方面研究工作。
(编辑 姜新丽)