

DOI: 10.7667/PSPC160911

基于 0-1 整数规划算法的 PMU 量测点优化配置新方法

闫玲玲¹, 刘中印^{2,3}, 艾永乐², 雒春林¹, 陈本周¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000;
3. 河南周口供电公司, 河南 周口 466000)

摘要: 为了提高同步相量测量装置的优化配置速度, 提出了基于 0-1 整数规划算法的 PMU 量测点优化配置方法。在 0-1 整数规划算法的基础上, 根据节点的可观性建立数学模型, 考虑节点间的相互关系构建邻接矩阵并进行分析, 求解量测点模型获得量测配置优化位置。对 IEEE-14 和 IEEE-18 节点系统进行实验仿真, 并利用 Lingo 工具验证所提 0-1 整数规划算法, 获取 PMU 优化位置和速度。该算法与未改进的 0-1 整数规划算法相对比, 结果表明, 该方法减少了变量数目, 简化了约束条件, 减少了迭代次数, 提高了收敛速度, 验证了所提方法的有效性和实用性。

关键词: 优化配置; 同步相量测量装置; 邻接矩阵; 0-1 整数规划

A new method of the optimal placement PMU based on 0-1 integer program

YAN Lingling¹, LIU Zhongyin^{2,3}, AI Yongle², LUO Chunlin¹, CHEN Benzhou¹

(1. XJ Electric CO., LTD, Xuchang 461000, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. Zhoukou Power Supply Company, Zhoukou 466000, China)

Abstract: To increase the speed of the optimal placement of phasor measurement unit (PMU), an optimal placement scheme for PMU measuring point based on 0-1 integer programming algorithm is proposed. Based on 0-1 integer programming algorithm, the mathematic model is established according to node's observability. The connectivity matrix is obtained by the connection relation between nodes and the matrix is analyzed. Mathematical model is solved to get the PMU optimal configuration position. The simulation is conducted on IEEE-14, IEEE-18 bus system, and the proposed 0-1 integer program model is verified by the Lingo software, and then PMU optimal position and speed are got. Comparing the 0-1 integer program model before improvement, the result indicates that the proposed method simplifies the number of variables, reduces the constrained conditions and iterations, and improves the convergence of calculation process. The simulations verify the effectiveness and practicality of the proposed method.

Key words: optimal placement; phasor measurement unit; connectivity matrix; 0-1 integer program

0 引言

同步相量测量装置(Phasor Measurement Unit, PMU)是基于 GPS 卫星同步时钟实现同步测量电网母线电压和线路电流相量的装置, 应用于配电网全网运行监测控制、区域保护控制和电力系统谐波状态估计等^[1-4]。谐波状态估计(Harmonic State Estimation, HSE)是利用特定位置上 PMU 提供的测量值估计配电网的谐波状态, 从而进行主谐波源定位, 为谐波治理提供依据^[5-6]。如果配电网所有节点都配置 PMU 量测设备, 系统是完全可观测的, 但是会产生大量冗余数据, 另外从技术经济性角度出

发, 所有节点安装 PMU 不经济且非必要。因此, 合理安排 PMU 装置的数量和位置以实现网络可观性, 是最优 PMU 配置(Optimal PMU Placement, OPP)的核心问题。

国内外学者针对 OPP 问题已经进行了大量研究^[7-15]。文献[7]首次提出利用系数矩阵最小条件数法进行谐波状态估计, 但没有明确说明实现最优配置具体步骤; 文献[8]以系统完全可观和最大冗余度为约束条件, 但 PMU 测量冗余度最大时, 估算精度不能提高; 文献[9]应用粒子群算法进行量测点综合最优配置, 把协方差矩阵的平均迹值变化作为目标函数, 以最大估计精度变化率为约束条件, 具有

一定的实用性和经济性,但 $P-\sigma$ 曲线获取困难,谐波权重取值具有随机性,结果不确定;文献[10-11]利用遗传算法进行PMU最优配置,考虑了PMU的成本投资和状态估计误差,此法虽然可以得到优化解,但是迭代次数多,计算量大,收敛速度受到影响;文献[12]提出利用蚁群算法求解PMU配置方案,综合考虑节点的观测度和测量冗余度建立数学模型,从实验结果来看,不能保证全网处于可观性状态;文献[13-15]证明了0-1整数规划算法能够解决PMU优化配置问题,应用于实际电力系统中,适应性较好,但是从实际结果来看,PMU配置数目过多(接近节点总数目的50%),经济型较差,且算法复杂。文献[16]提出了一种基于0-1整数规划算法的改进PMU配置模型,在该模型的基础上提出了PMU模拟通道数最小化的处理方法,但并未约束条件及收敛速度进行研究。

本文提出基于改进的0-1整数规划算法实现配电网PMU优化配置,与未改进的0-1整数算法相对比,该方法能够减少变量数和简化约束条件,减少了迭代次数,提高了收敛速度。本文利用Lingo软件分别对IEEE-14节点系统和IEEE-18节点系统进行实验仿真,与未改进的0-1整数规划算法实验进行了对比,验证了所提方法的有效性和适用性。

1 PMU量测点配置原则

OPP核心问题在于如何在满足在可观性的前提下找到最少的PMU配置数量并合理安装。配电网只在部分PCC节点安装量测装置,所选配电网可观,即意味着每个节点的量测值可直接或间接得到,PMU配置原则如下所述。

安装在某节点上的PMU除了可测量该节点的电压,也可量测与该节点相邻接的所有支路电流数据。

如果支路一侧的节点电压和支路电流已知,则另一侧的节点电压通过欧姆定律得到。

如果支路两侧的节点电压都已知,则支路电流通过欧姆定律得到。

如果节点的关联支路电流仅有一个未知量,则未知支路电流通过KCL得到。

2 改进的0-1整数规划算法

电力系统的全网可观且量测点最少,可以等效为配电网安装的PMU装置数目最少,则配置模型可以表示为

$$\min \sum_{j=1}^n x_j \quad (1)$$

式中: n 表示电力系统中总的节点数目; $x_j=1$ 表示在节点 j 安装PMU装置, $x_j=0$ 表示未安装PMU装置。

约束条件为

$$F(i) = \sum_{j \in i} a_{ij} x_j \geq 1 \quad (2)$$

式中: $F(i) \geq 1$ 表示节点 i 可以直接或间接可观测; a_{ij} 为邻接矩阵 A 中元素。

邻接矩阵 A 表示电力系统中节点之间的连接关系,且矩阵 A 为 $n \times n$ 阶矩阵,当节点 i 与节点 j 连接时, $a_{ij}=1$;当节点 i 与节点 j 不连接时, $a_{ij}=0$;即

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 1 & i \text{与} j \text{相连接} \\ 0 & i \text{与} j \text{不连接} \end{cases} \quad (3)$$

则,邻接矩阵 A 可以表示为

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1i} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2i} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & \cdots & a_{ii} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于节点较多的实际电力系统,节点间的连接关系较为复杂,邻接矩阵 A 中的元素较多,求解配置模型时变量过多、约束条件多,影响求解速度。针对以上问题,本文通过分析邻接矩阵 A 来改进0-1整数规划算法。

首先找出系统仅有一条支路与节点连接的末端节点,如果将PMU装置安装在末端节点上,则最多只能观察到节点本身和与其相连接的节点。为了使更多的节点可观,将与末端节点相连接的节点选为特定节点,作为优化位置。

在邻接矩阵 A 中, A_i 可以表示节点 i 与配电网中其他节点的连接关系, A_i 中所有元素的和减1为与节点 i 相连接的节点总数目。用 M 表示与节点 i 相连接的节点总数目,则

$$M = \sum_{j=1}^n a_{ij} - 1 \quad (5)$$

M 值越大,则表示与节点 i 相连接的节点数目越多,安装在第 i 节点的PMU装置可以观察到越多的节点,因此优先选择具有最大 M 值的某个节点为优化位置。

选出优化位置后,更新邻接矩阵 A 。如果节点 i

被选为优化位置, 找出由于在节点 i 安装 PMU 装置后由不可测变为可测的节点, 如果节点 j 可直接或间接可观测, 则令邻接矩阵 A 中 A_i 所有元素为 0, 更新邻接矩阵 A 。

在计算节点的 M 值时, 可能出现几个节点具有相同最大 M 值的情况, 这时由变量 N 选择优化位置。当已选定的 PMU 装置安装位置不变时, 在节点 j 上额外放置 PMU 装置后, 找出可测节点后更新矩阵 A , 计算出矩阵 A 所有元素的和, 并用 N 表示, 则

$$N = \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^n a_{ij}) \quad (6)$$

在某些节点具有相同 M 值的情况下, 因在节点 k 安装 PMU 装置后所对应矩阵 A 的 N 值越大, 则表示节点 k 和与节点 k 相连接的节点与系统有很少联系。因此, 优先选择 N 值较大的节点为优化位置。

更新邻接矩阵 A 的流程图如图 1 所示, 具体步骤如下:

1) 首先找出与末端节点连接的节点作为优化位置, 逐次内推。若找出可测节点为 i , 可使该节点 i 对应邻接矩阵 A 中 A_i 所有元素为零, 更新矩阵 A 后检测是否为零矩阵。若 A 为零矩阵, 则配电网全网可观测; 若 A 不为零矩阵, 则继续选择优化位置。

2) 计算最大 M 值的节点。根据式(5)计算最大 M 值的节点。若几个节点具有相同最大 M 值, 则根据式(6)计算这些节点的 N 值, 找出具有最大 N 值的节点选为优化位置, 否则将退出计算。

更新矩阵 A 后, 若 A 为零矩阵, 则配电网全网可观测, 所选节点为 PMU 全部优化位置; 若矩阵 A 不为零矩阵, 保留已选优化位置并使得所选优化位置对应的 $x_j = 1$, 再根据 0-1 整数规划算法模型计算出其余优化位置。

若配电网中已安装有 PMU 量测设备, 则在已有量测点的基础上进行优化配置。假如配电网中节点 i 位置上已有 PMU 装置, 则 $x_i = 1$, 找出可由节点 i 上的 PMU 装置量测的可观节点, 并使可观节点相对应邻接矩阵 A 中 A_i 的元素为零, 更新矩阵 A 。更新矩阵 A 后, 根据图 1 流程图继续更新 A 。选出优化位置后, 若矩阵 A 为零矩阵, 则所选位置为使配电网全网可观的最佳配置方案; 若矩阵 A 不是零矩阵, 保留已选优化位置, 根据 0-1 整数规划算法模型计算出其余优化位置。矩阵 A 更新流程图如图 1 所示。

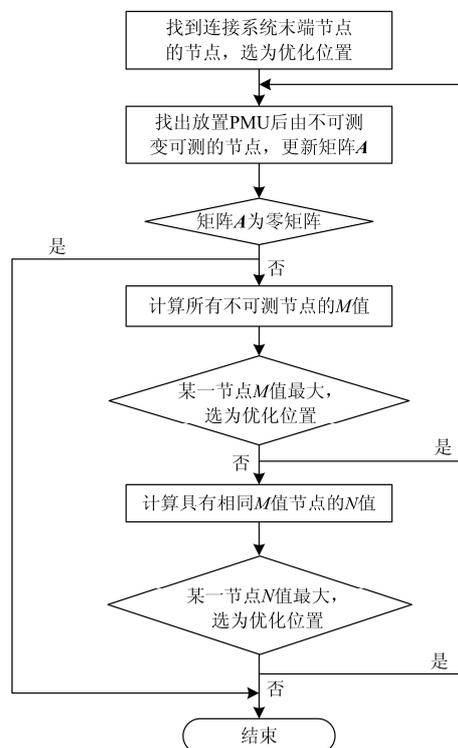


图 1 矩阵 A 更新流程图

Fig. 1 Matrix A update flow chart

3 实验验证

本文通过 Lingo 软件编程对 0-1 整数规划模型进行求解, 对 IEEE-14 节点和 IEEE-18 节点系统分别进行仿真实验验证。

3.1 IEEE-14 节点系统仿真

图 2 为 IEEE-14 节点系统, 对节点进行编号并标出了非线性负荷的位置。

图 2 中, 节点 8 为末端节点, 将与之连接的节

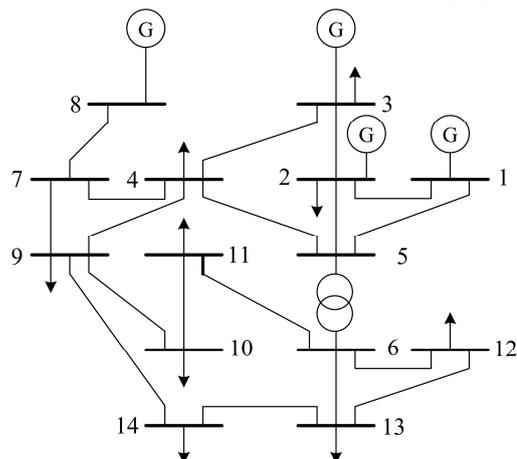


图 2 IEEE-14 节点系统

Fig. 2 IEEE-14 node system

点7定位优化位置,则节点4、7、8、9可观;将邻接矩阵 A 中 A_4 、 A_7 、 A_8 和 A_9 中所有元素置0,更新矩阵 A ,经检测矩阵 A 不是零矩阵;分别计算不可测节点的连接指数 M ,选出具有最大 M 值的节点6为优化位置,则节点5、6、11、12、13可观,更新矩阵 A ,矩阵 A 不是零矩阵;计算其余不可测节点的连接指数 M ,选出最大 M 值节点2为可测节点,剩余不可测节点10、14;更新矩阵 A 后,经计算,节点10和14的 M 与 N 都相等,因此,利用0-1整数规划算法进一步解决优化配置问题。

更新矩阵 A 后,利用 lingo 软件对0-1整数算法模型进行求解,IEEE-14 节点的模型为

目标函数:

$$\min \sum_{j=1}^{14} x_j \quad (7)$$

可观性约束:

$$\begin{cases} F(10) = x_9 + x_{10} + x_{11} \geq 1 \\ F(14) = x_9 + x_{13} + x_{14} \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

令 x_2 、 x_6 、 x_7 为1, x_8 为0,求解模型得: $x_9 = 1$ 。

为使 IEEE-14 节点系统全网可观,在节点2、6、7、9配置 PMU 装置。

若不更新邻接矩阵 A ,直接利用 Lingo 求解 IEEE-14 节点的0-1整数规划算法模型,则

目标函数:

$$\min \sum_{j=1}^{14} x_j \quad (9)$$

可观性约束条件:

$$\begin{cases} F(1) = x_1 + x_2 + x_5 \geq 1 \\ F(2) = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \geq 1 \\ F(3) = x_2 + x_3 + x_4 \geq 1 \\ \vdots \\ F(14) = x_9 + x_{13} + x_{14} \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

利用 Lingo 软件编程,求解模型得: $x_2 = 1$, $x_6 = 1$, $x_7 = 1$, $x_9 = 1$ 。PMU 优化位置为:2、6、7、9节点。表1为本文所提方法与直接利用0-1整数模型算法的对比结果。

表1 实验结果对比

Table 1 Comparison of experimental results

| 14 节点系统 | 变量数目 | 约束方程数目 | PMU 优化位置 |
|----------|------|--------|----------|
| 本文方法 | 10 | 3 | 2、6、7、9 |
| 0-1 整数算法 | 14 | 15 | 2、6、7、9 |

经对比,本文所提方法变量数目减少了4个,约束方程数目简化了12个,减小了计算量,并减少了迭代次数,提高了收敛速度,验证了本文所提方法的有效性。

3.2 IEEE-18 节点系统仿真

图3为 IEEE-18 节点系统,系统节点参数参见文献[14]。

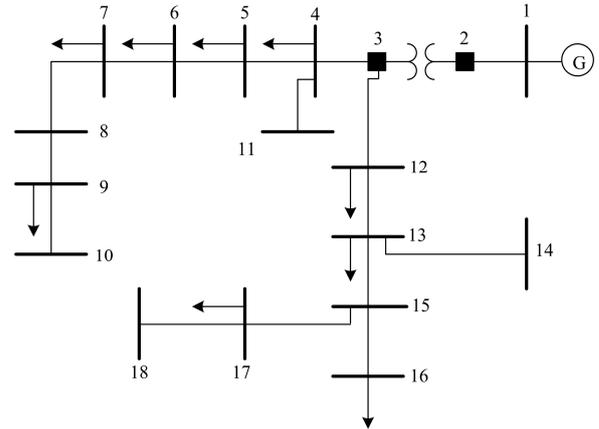


图3 IEEE-18 节点系统

Fig. 3 IEEE-18 node system

图3中,末端节点有1、10、11、14、16、18,选择与末端节点连接的节点2、4、9、13、15、17为优化位置,则节点1、2、3、4、5、8、9、10、11、12、13、14、15、16、17、18可观;将可观节点相对应邻接矩阵 A 中 A_i 所有元素置0,更新矩阵 A ;经计算,不可测节点6、7的连接指数 M 值相等,演化指数 N 值相等,利用0-1整数规划算法进一步解决优化配置问题。

目标函数:

$$\min \sum_{j=1}^{18} x_j \quad (11)$$

可观性约束条件:

$$\begin{cases} F(6) = x_5 + x_6 + x_7 \geq 1 \\ F(7) = x_6 + x_7 + x_8 \geq 1 \end{cases} \quad (12)$$

节点2、4、9、13、15、17已选为优化位置,置 x_2 、 x_4 、 x_9 、 x_{13} 、 x_{15} 、 x_{17} 为1,置 x_1 、 x_{10} 、 x_{11} 、 x_{14} 、 x_{16} 、 x_{18} 为0,求解模型得: $x_6 = 1$ 。为使 IEEE-18 节点系统全网可观,在节点2、4、6、9、13、15、17配置 PMU 装置。

若直接利用0-1整数规划模型求取优化位置,则优化模型为

目标函数:

$$\min \sum_{j=1}^{18} x_j \quad (13)$$

可观性约束条件:

$$\begin{cases} F(1) = x_1 + x_2 \geq 1 \\ F(2) = x_1 + x_2 + x_3 \geq 1 \\ F(3) = x_2 + x_3 + x_4 + x_{12} \geq 1 \\ \vdots \\ F(18) = x_{17} + x_{18} \geq 1 \end{cases} \quad (14)$$

利用 Lingo 软件编程, 求解模型得: $x_2 = 1$, $x_4 = 1$, $x_6 = 1$, $x_9 = 1$, $x_{13} = 1$, $x_{15} = 1$, $x_{17} = 1$ 。PMU 装置优化位置为: 2、4、6、9、13、15、17 节点。表 2 为实验结果对比。

表 2 实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results

| 18 节点系统 | 变量数目 | 约束方程数目 | PMU 优化位置 |
|----------|------|--------|------------------|
| 本文方法 | 6 | 3 | 2、4、6、9、13、15、17 |
| 0-1 整数算法 | 18 | 19 | 2、4、6、9、13、15、17 |

通过对比, 验证了本文所提方法能够准确解决量测点优化配置问题, 与 0-1 整数算法相比, 改进的 0-1 整数算法减少了变量数目, 简化了约束方程数目。在复杂系统中应用本文所提方法, 可以减少迭代次数, 提高运算速度。

4 结束语

针对 PMU 量测点优化配置使得配电网全网可观问题, 本文提出改进的 0-1 整数规划算法。通过仿真实验可知, 对于量测点减少的简单系统, 仅通过更新邻接矩阵 A 即可得到 PMU 的优化位置; 对于量测点较多的复杂系统, 首先通过更新邻接矩阵 A , 再计算 0-1 整数规划模型确定优化位置, 该方法减少了变量数目, 简化了约束条件数目, 减少了迭代次数, 提高了收敛速度。

参考文献

[1] 张晓莉, 许勇, 刘慧海, 等. 一种提高同步相量测量装置动态性能的新算法及其测试研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 48-54.
ZHANG Xiaoli, XU Yong, LIU Huihai, et al. Research of a new algorithm to improve dynamic performance for phasor measurement unit and test verification[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 48-54.

[2] 沈健, 周斌, 汪响, 等. 提升 PMU 动态测量性能的若

干方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 89-94.
SHEN Jian, ZHOU Bin, WANG Yun, et al. Methods for improvement of dynamic performance of PMU[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 89-94.

[3] 段刚, 王茂海, 陈程, 等. 基于瞬时值比较的 PMU 动态性能在线评测方法及系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 22-27.
DUAN Gang, WANG Maohai, CHEN Cheng, et al. Instantaneous value comparison based PMU dynamic characteristics evaluation method and system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 22-27.

[4] 樊海锋. 电力系统 PMU 优化配置研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
FAN Haifeng. Optimal allocation of power system - PMU-2 studies[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[5] 梁志瑞, 叶慧强, 赵飞. 电力系统谐波状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 157-160.
LIANG Zhirui, YE Huiqiang, ZHAO Fei. Power system harmonic state estimation research review[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 157-160.

[6] 吴笃贵, 徐政. 电力系统谐波状态估计技术的发展与展望[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 75-77.
WU Dugui, XU Zheng. Development and outlook of the power system harmonic state estimation technology[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 75-77.

[7] HEYDT G T. Identification of harmonic sources by a state estimation technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 569-576.

[8] 郭佩英, 郝红艳, 邓颖, 等. 考虑测量冗余度最大的电力系统 PMU 最优配置[J]. 东北电力大学学报, 2010, 30(2): 31-35.
GUO Peiying, HAO Hongyan, DENG Ying, et al. Consider measurement redundancy of the largest power system-PMU-2 optimal configuration[J]. Journal of northeast electric power university, 2010, 30(2): 31-35.

[9] 吴杰, 杨阳, 卢志刚. 应用粒子群算法的谐波状态估计量测点综合最优配置[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 115-121.
WU Jie, YANG Yang, LU Zhigang. Using particle swarm algorithm of harmonic state estimation gauge point comprehensive optimal configuration[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 115-121.

[10] KUMAR A, DAS B, SHARMA J. Genetic algorithm-based meter placement for static estimation of harmonic

sources[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1088-1096.

[11] 王艳松, 韩美玉, 谭志勇. 基于遗传算法的 PMU 配置对谐波状态估计质量影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 233-236.
WANG Yansong, HAN Meiyu, TAN Zhiyong. Based on the genetic algorithm - PMU - 2 configuration to research on the effects of harmonic state estimation quality[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 233-236.

[12] 王艳松, 孙桂龙. 基于蚁群算法的配电网谐波量测点优化配置[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(1): 167-171.
WANG Yansong, SUN Guilong. Harmonics content distribution network based on ant colony algorithm optimal sensor configuration[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2014, 38(1): 167-171.

[13] YUILL W, EDWARDS A, CHOWDHURY S. Optimal PMU placement: a comprehensive literature review[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2011: 1-8.

[14] 蒋正威, 曹一家, 孙维真. 基于 0-1 整数规划的多目标最优 PMU 配置算法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(21): 12-17.
JIANG Zhengwei, CAO Yijia, SUN Weizhen. 0-1 integer programming based multi-objective optimal-PMU-2 configuration algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(21): 12-17.

[15] 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. Under the conditions of N - 1 don't lose the observability - PMU - 2 optimization configuration method[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 47-51.

[16] 何昆仑, 张庆超, 郑明忠. 模拟通道数最小的 PMU 优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 14-18.
HE Kunlun, ZHANG Qingchao, ZHENG Mingzhong. Optimal PMU placement with minimum analog channels[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 14-18.

收稿日期: 2016-06-20; 修回日期: 2016-09-14

作者简介:

闫玲玲(1985—), 女, 通信作者, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: 360494683@qq.com

刘中印(1981—), 男, 本科, 工程师, 主要从事电力系统运维工作; E-mail: liuzhongyin9899@126.com

艾永乐(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事交流多相电机新颖控制策略研究和电能质量检测与提高。

(编辑 张爱琴)