

文章编号: 1000-5862(2017)02-0122-05

# 基于 BPSO 算法电力系统故障可观的 PMU 配置

李金灿<sup>1</sup>, 邹 恩<sup>2\*</sup>

(1. 华南农业大学珠江学院, 广东 广州 510900; 2. 华南农业大学工程学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** 针对电力系统故障可观状态下的 PMU 最优配置, 提出了使用二进制粒子群优化算法(BPSO)进行处理。为了使用最少的 PMU 数目找到电力系统网络任一支路的故障, 首先使用线性整数规划(ILP)对系统进行建模, 再将 BPSO 算法引入进行优化, 最后将该算法应用到 IEEE-14、30 和 57 节点标准测试系统, 其优化过程亦考虑了零注入节点的影响。结果表明: 该算法快速有效, 适应电力系统各种问题的优化。

**关键词:** PMU 最优配置; 电力系统; 故障可观; 线性整数规划; 二进制粒子群优化算法

**中图分类号:** TP 311 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2017.02.03

## 0 引言

安全可靠的电力系统需要依赖监测基础设备提供的精确控制数据。近年来电力系统的大力发展, 很多学者逐渐意识到同步测量技术(Synchronized Measurement Technology, SMT)可以达到预期的测量精度。而 PMU 因使用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)而获得统一的时间标签, 同步性极高, 所以成为最适合的 SMT 设备和广域监测、保护及控制系统(Wide-Area Monitoring, Protection and Controls systems, WAMPAC)的重要组成部分<sup>[1]</sup>。配置在某一节点的 PMU 可以提供 2 种量测数据, 分别是节点电压相量和所有与该节点相连的支路电流相量<sup>[2]</sup>。易知, 当节点电压相量已知, 该节点则可以被观测。所以某节点配置了 PMU, 该节点即可观。而通过已知的支路电流相量和线路参数, 可以计算出相邻节点的电压相量, 即该 PMU 亦可以使这些相邻节点都可观<sup>[3]</sup>。考虑到经济要求, 不可能在电力系统的所有节点都安装 PMU, 因此就引出了 PMU 优化配置问题, 即用最少的 PMU, 使整个电力系统完全可观<sup>[4]</sup>。

近来较多新的技术和算法应用到电力系统完全可观情况下的 PMU 优化配置中<sup>[5]</sup>, 并取得了较好的效果。文献[6]提出了一种基于整数规则(Linear

Programming, LP)的配置方法, 它亦考虑了零注入节点和常规潮流存在时的处理。该方法涉及非线性整数规则问题, 计算比较麻烦。针对此问题, 文献[7]提出了一种广义线性整数规划(Integer Linear Programming, ILP)改进方法, 并在电力系统完全可观、部分可观和 PMU 配置冗余率 3 个实例中验证了其通用性。文献[8]讨论了 PMU 多阶段配置问题及其相应的实现策略。文献[9]讨论了电力系统在各种突发情况下, 如某个 PMU 丢失数据、某条支路停止运行等, 要使系统仍完全可观的 PMU 配置问题。其它一些启发式算法可以参考文献[10-13]。

然而鲜有文献探讨电力系统在故障可观情形下的 PMU 优化配置问题。文献[14]讨论了一节点间隔故障定位策略, 并提出了相应的故障定位技术。文献[15-16]分别使用遗传算法和差分进化算法来处理该问题, 都提供了多种优化方案供选择。文献[17]讨论了用 PMU 结合常规潮流来达到故障可观的优化配置方法。

故障可观或故障定位技术, 在电力系统的稳定性发挥着重要的作用, 其 PMU 优化配置技术仍需不断改进和发展。为此本文提出了一种基于二进制粒子群算法(Binary Particle Swarm Optimization, BPSO)<sup>[18]</sup>的故障可观的 PMU 配置方法。该方法运算快速, 易于实现, 并具有较强的全局或局部搜索能力。

收稿日期: 2016-12-21

基金项目: 广东省自然科学基金(S2013040016144)资助项目。

作者简介: 李金灿(1983-), 男, 广东清远人, 讲师, 主要从事电力系统优化和自动化控制系统的研究。E-mail: 8525434@qq.com

通信作者: 邹 恩(1956-), 女, 湖南株洲人, 教授, 博士, 主要从事复杂控制系统的优化研究。E-mail: 309083693@qq.com

## 1 电力系统故障可观

若一组量测数据能将一电力系统的任意故障位置准确定位,说明该系统是故障可观的.若用电路网络元素来定义故障可观,则可以定义为:若一条支路两端的电压相量,及支路任一端的电流相量已知,则该支路若在故障状态下仍然可被观测;若某系统的所有支路在故障状态下都可观,则系统是故障可观的<sup>[9]</sup>.后续内容分述均是以这个定义为前提.故障状态下和正常状态下的系统可观是不同的概念,因为传输线路的故障可使网络结构发生变化.为了使电力系统发生故障后快速恢复,必须要尽快将传输线路上的故障精确定位.同样考虑到成本约束,电力系统故障可观的PMU配置也需优化.

## 2 问题描述

为了使建立的数学模型更具通用性,本文考虑了电力系统网络中零注入节点的影响,下面将详细介绍使用线性整数规划(ILP)导出模型的数学表达式的过程.

### 2.1 不考虑零注入节点的PMU配置

为了更好地阐述本文提出的配置方法,使用了一个7节点电力系统模型来进行分析,如图1所示.

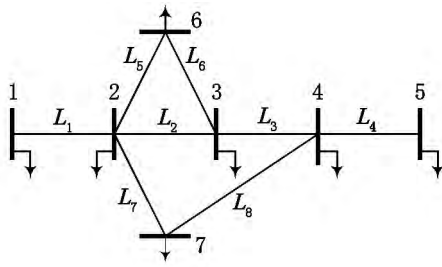


图1 7节点电力系统模型

现定义一个二进制变量 $x_i$ ,当有PMU配置在节点 $i$ 时, $x_i$ 为1,否则为0.则该电力系统故障可观下的PMU配置目标函数应为

$$\min f(x) = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7. \quad (1)$$

需找出该目标函数的约束条件.根据电力网络的拓扑结构,可将网络分成两部分来分析.

1) 对于网络中的终端支路,如支路 $L_1$ .根据第1节故障可观的定义,要使支路 $L_1$ 故障可观,节点1和节点2的电压相量,及支路 $L_1$ 其中一端的电流相量都能被测量到.当支路 $L_1$ 产生故障时,配置在节

点2的PMU是不可能测量到节点1的电压相量的,因此必须有一PMU配置在节点1.同理,支路 $L_4$ 中节点5亦须配置一个PMU.把节点1、5这种只有单独一条支路连接到网络中的节点称为“终端节点”,其约束方程可以写为

$$\text{终端节点1: } x_1 = 1, \quad (2)$$

$$\text{终端节点5: } x_5 = 1. \quad (3)$$

2) 对于网络中的其它支路,应将PMU配置在支路的其中一个节点来测量该节点的电压和电流相量.而该支路的另一个节点,可以配置一个PMU,或者是由其它量测量计算而来的电压相量.此种一般支路的约束方程写为

$$L_1: x_1 + x_2 \geq 1, \quad (4)$$

$$L_2: x_2 + x_3 \geq 1, \quad (5)$$

$$L_3: x_3 + x_4 \geq 1, \quad (6)$$

$$L_4: x_4 + x_5 \geq 1, \quad (7)$$

$$L_5: x_2 + x_6 \geq 1, \quad (8)$$

$$L_6: x_3 + x_6 \geq 1, \quad (9)$$

$$L_7: x_2 + x_7 \geq 1, \quad (10)$$

$$L_8: x_3 + x_7 \geq 1. \quad (11)$$

根据(1)~(11)式,可以推导出 $n$ 节点电力系统故障可观的PMU配置表达式为

$$\begin{aligned} \min f &= \sum_{i=1}^n w_i x_i, \\ \text{s. t. } &x_{\text{from\_bus}} + x_{\text{to\_bus}} \geq 1, \\ &x_{\text{terminal\_bus}} \geq 1, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $w_i$ 是指配置在节点 $i$ 上的PMU的费用,一般取 $w_i = 1$ .亦可根据节点的连接支路数来选择不同的权值.(12)式可以保证在 $n$ 节点电力系统的任意支路发生故障,都能测量出故障支路两端的电压相量和其中一端的电流相量.

使用BPSO算法对(1)~(11)式进行求解,可得PMU的配置位置为{1 2 4 5 6}.假设支路 $L_7$ 发生故障,节点2的电压和电流相量可以直接测量,而节点7的电压相量可以通过节点4的电压相量和支路 $L_8$ 的线路参数计算得到.

### 2.2 考虑零注入节点的PMU配置

零注入节点是没有任何负荷、发电机和补偿器件与之相连的.根据基尔霍夫电流定律,流过零注入节点的电流的代数和恒为零.在电力系统故障可观下的PMU配置若考虑零注入节点,其配置数目不同于之前讨论的情况.而PMU配置数目的多少是与零注入节点接入网络的方式紧密相关的.根据文献

[19]提出的方法,故障可观情形下 PMU 配置的数目应该等于通过辐射支路与零注入节点相连的节点数减去这些节点间(不含零注入节点)的横跨支路数.但应注意,如果横跨支路的两节点之前已被其它横跨支路使用,则该横跨支路对 PMU 配置数目不产生影响.

仍以图 1 模型来分析,假设节点 2 为零注入节点.通过辐射支路与零注入节点 2 相连的节点为 {1, 3, 6, 7}, 节点 3、6 之前的支路  $L_6$  为横跨支路.根据上面所提方法,可以列出其方程

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 \geq 3, \quad (13)$$

对于其它与零注入节点 2 不相连的一般支路和终端支路的约束条件则保持不变:

$$L_3: x_3 + x_4 \geq 1, \quad (14)$$

$$L_4: x_4 + x_5 \geq 1, \quad (15)$$

$$L_6: x_3 + x_6 \geq 1, \quad (16)$$

$$L_8: x_4 + x_7 \geq 1, \quad (17)$$

$$x_1 = 1, \quad (18)$$

$$x_5 = 1. \quad (19)$$

使用 BPSO 算法对(1)式和(13)~(19)式进行求解,可得配置结果为{1, 3, 5, 7},比之前不考虑零注入节点时少了一个 PMU.但如果令节点 3 为零注入节点时,其配置结果却为{1, 3, 4, 5, 6}.可见零注入节点接入网络的方式对 PMU 配置的是有影响的.

### 3 二进制粒子群算法

基于粒子群优化算法(PSO)的技术已成功应用到电力系统的各个方面<sup>[20-23]</sup>,而二进制的粒子群优化算法(BPSO)将在本文中作为解决 PMU 配置问题的数学工具. PSO 算法是由 R. C. Eberhart 和 J. Kennedy 在 1995 年提出的一种基于种群搜索的算法,一般应用于非线性和多峰值的复杂问题中<sup>[24]</sup>,本文将将其引入到电力系统优化问题中.

#### 3.1 标准 PSO 算法

种群在 PSO 中被称为群,个体被称为粒子. PSO 基于的思想:通过群中粒子的相互合作和信息共享可以获得最优解.设在一个  $n$  维目标搜索空间中,有  $m$  个粒子组成的群,该群可表示为  $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ , 群中第  $i$  个粒子的位置为  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T$ , 而粒子的速度为  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})^T$ . PSO 是随机粒子通过多维空间域中不断调整移动位置来达到解空间中的最优值.粒子的位置和速度更新

是通过

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1 \text{rand}(1)(p_{bestid}^t - x_{id}^t) + c_2 \text{rand}(1)(g_{bestid}^t - x_{id}^t), \quad (20)$$

$$x_{id}^{t+1} = v_{id}^t + x_{id}^t \quad (21)$$

来更新,其中  $d = 1, 2, \dots, n$ ,  $w$  是惯性权重,  $c_1$  和  $c_2$  是加速度系数,  $\text{rand}(1)$  是介于  $[0, 1]$  之间的随机数,  $p_{bestid}$  是第  $i$  个粒子位置的最优值,而  $g_{best}$  则是全体粒子群在解空间的全局最优值.为了使粒子的飞行速度在设定的范围,需根据实际需要对速度进行上下限设定,即  $v_{id} \in [v_{id(\min)}, v_{id(\max)}]$ .

决定(20)式的粒子速度有:(i)  $wv_{id}^t$  是粒子先前的加权速度;(ii)  $c_1 \text{rand}(1)(p_{bestid}^t - x_{id}^t)$  是粒子的“认知项”,表示粒子之间的竞争关系;(iii)  $c_2 \text{rand}(1)(g_{bestid}^t - x_{id}^t)$  是“社会项”,表示粒子之间的合作关系.正是这 2 种关系的共同作用,使粒子群向最优方向进化.

#### 3.2 BPSO 算法

R. C. Eberhart 和 J. Kennedy 在 1997 年成功将 PSO 算法应用于二进制离散搜索空间,便产生了 BPSO.在 BPSO 中,粒子位置变量  $x$  只能取 0 或 1,它是通过引入阈值函数  $\text{sigmoid}()$  来实现的,该函数定义为

$$\text{sigmoid}(v_{id}^t) = 1 / (1 + e^{-v_{id}^t}), \quad (22)$$

则可将(21)式的粒子位置更新公式变为

$$x_{id}^t = \begin{cases} 1 & \text{rand} < \text{sigmoid}(v_{id}^t) \\ 0 & \text{rand} \geq \text{sigmoid}(v_{id}^t) \end{cases}, \quad (23)$$

其中  $\text{rand}$  是介于  $[0, 1]$  的随机数.(23)式表示粒子是根据其速度的大小来选择对应位置上 0 或 1.速度越大,  $\text{sigmoid}()$  值趋向 1,反之趋向 0,可以把  $\text{sigmoid}()$  看成一个概率函数.为了使粒子的速度在较大的概率范围内变化,一般取  $v_{id(\max)} = 4$ ,这样可使  $\text{sigmoid}()$  函数的概率范围为 0.018 ~ 0.982.

### 4 基于 BPSO 故障可观的 PMU 配置

根据电力系统网络结构建立故障可观状态下的 PMU 配置目标函数,及是否考虑零注入节点的约束,接下来将应用 BPSO 算法对其进行优化,其步骤如下:

(i) 初始化,令迭代计数器  $t = 0$ ,并随机产生  $m$  个粒子,  $X^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)$ ,每个粒子的维数,即电力系统网络的节点数为  $n$ .粒子的初始位置和速

度分别为:  $\mathbf{x}_1^0 = (x_{i1}^0, x_{i2}^0, \dots, x_{in}^0)^T$ ,  $\mathbf{p}_1^0 = (v_{i1}^0, v_{i2}^0, \dots, v_{in}^0)^T$ .

(ii) 计算适应值函数  $f = \sum_{i=1}^n x_i$ , 用来评估在每次迭代过程中粒子群找到的解是否合适.

(iii) 更新迭代计数器  $t = t + 1$ .

(iv) 更新粒子位置个体最优值, 若  $f(t + 1) < f(t)$ , 则令  $p_{best}^{t+1} = x_i^{t+1}$ , 否则  $p_{best}^{t+1} = p_{best}^t$ .

(v) 更新粒子位置全局最优值: 若  $g_{best}^{t+1} > \min(p_{best}^{t+1})$ , 则令  $g_{best}^{t+1} = \min(p_{best}^{t+1})$ , 否则  $g_{best}^{t+1} = g_{best}^t$ .

(vi) 根据(20)式和(23)式来更新粒子的速度和位置, 便产生了进化的粒子群  $\mathbf{X}^{t+1}$ .

(vii) 如果  $t$  没达到最大迭代数  $T_{max}$ , 则返回第

(iii) 步继续进行寻优, 否则结束程序, 输出最优结果.

### 5 案例仿真与分析

本节将使用 Matlab 软件对本文提出的优化方法进行验证. 测试系统为 IEEE-14、30 和 57 节点标准测试系统. 在使用 BPSO 时, 需要对几个参数进行设定, 以使结果最短时间内达到最优. 首先是设定惯性权重  $w$ , 它反映了前一时间的速度对当前速度的影响, 其值的大小会影响粒子的全局搜索能力. 在本文中,  $w = 0.7298$ ; 其次是加速度系数  $c_1$  和  $c_2$ , 表示粒子间的作用关系, 一般取值范围为  $0 \sim 4$ , 在本文中  $c_1 = c_2 = 1.5$ ; 最后令粒子最大飞行速度  $v_{id(max)} = 4$ , 粒子数取为 40, 迭代次数为 100.

对 3 种测试系统均按零注入节点不考虑和考虑 2 种情况来计算. 当考虑零注入节点时, 对于 IEEE-14 节点系统, 零注入节点个数有 1 个, 其节点位置在  $B_7$ ; 对于 IEEE-30 节点系统, 则有 6 个, 分别在  $B_6, B_9, B_{22}, B_{25}, B_{27}$  和  $B_{28}$ ; 对于 IEEE-57 节点系统, 有 10 个, 分别在  $B_4, B_8, B_{10}, B_{14}, B_{22}, B_{24}, B_{41}, B_{43}, B_{48}$  和  $B_{52}$ . 其仿真结果见表 1 和表 2. 从表 1 和表 2 可以看出, 使用 BPSO 算法, 可以快速计算出故障可观下的最小 PMU 数目, 以及 PMU 在网络节点中的具体配置位置. 当考虑零注入节点时, PMU 配置的数目会相应减少. 尽管 IEEE-57 节点系统有 10 个零注入节点, 但作为约束条件考虑后, 优化结果减少的 PMU 数目却只有 3, 和 IEEE-30 节点系统 6 个零注入节点优化后减少的数目是一样. 这主要与两系统网络的结构有关, 在 IEEE-57 节点系统中, 节点间的横跨线较少, 所以 PMU 数目配置就比较多.

表 1 不考虑零注入节点的故障可观下的 PMU 配置

IEEE 标准 测试系统	PMU 配 置个数	PMU 配置节点位置
14 节点	8	2, 4, 5, 8, 9, 11, 12, 13
30 节点	17	2, 3, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 19, 22, 24, 26, 27, 28, 29
57 节点	30	1, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 18, 20, 22, 24, 27, 29, 30, 32, 35, 36, 38, 39, 41, 45, 47, 49, 51, 53, 55, 56

表 2 考虑零注入节点的故障可观下的 PMU 配置

IEEE 标准 测试系统	PMU 配 置个数	PMU 配置节点位置
14 节点	8	2, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14
30 节点	14	2, 3, 5, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 19, 24, 26, 28, 29
57 节点	27	1, 3, 6, 9, 11, 12, 15, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 29, 31, 33, 34, 36, 38, 39, 44, 46, 49, 50, 53, 54, 56

### 6 结束语

本文讨论了电力系统故障可观状态下的 PMU 优化配置, 并使用了 BPSO 算法进行优化, 可以快速达到最优结果. 其最优结果可使系统网络的任一支路发生故障都能准确定位出来. 该算法在 3 个 IEEE 标准测试系统进行了验证, 并考虑了零注入节点的影响, 它能有效的减少 PMU 配置的数目. 综上所述, 在处理故障可观问题, BPSO 算法是一个较好选择.

### 7 参考文献

[1] Novosel D. Phasor measure application study: final project repor [EB/OL]. [2016-09-17]. [http://uc-ciee.org/imag-es/downloadable\\_content/electric\\_grid/PMTA\\_Final\\_Report.pdf](http://uc-ciee.org/imag-es/downloadable_content/electric_grid/PMTA_Final_Report.pdf).

[2] Martin K, Carroll J. Phasing in the Technology [J]. Power and Energy Magazine 2008, 6(5): 24-33.

[3] 杨明海, 王成山. 电力系统 PMU 优化配置方法综述 [J]. 电力系统及其自动化学报 2007, 19(2): 86-92.

[4] 彭疆南, 孙元章, 王海风, 等. 考虑系统完全可观测性的 PMU 最优配置方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 10-16.

[5] Manousakis N M, Korres G N, Georgilakis P S. Taxonomy of PMU placement methodologies [J]. IEEE Transactions on Power Systems 2012, 27(2): 1070-1077.

[6] Xu Bei, Abur A. Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs [J]. Power Systems Conference and Exposition 2004(2): 943-946.

[7] Gou Bei. Generalized integer linear programming formula-

- tion for optimal PMU placement [J]. IEEE Transactions on Power Systems 2008 23(3): 1099-1104.
- [8] Dua D ,Damphare S ,Gajbhiye R ,et al. Optimal multistage scheduling of PMU placement: an ILP approach [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2008 23(4): 1812-1820.
- [9] Enshaee A ,Hooshmand R A ,Fesharaki F H. A new method for optimal placement of phasor measurement units to maintain full network observability under various contingencies [J]. Electric Power Systems Research 2012 89: 1-10.
- [10] 程涛,黄彦全,申铁,等. 遗传算法在 PMU 优化配置中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报 2009 21(1): 48-51.
- [11] 刘斌,黄纯,李波,等. 改进二进制粒子群算法在 PMU 优化配置中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010 22(2): 5-10.
- [12] 兰华,万旺经,王韵然,等. 基于模拟退火混合遗传算法的电力系统相量测量装置优化配置 [J]. 电网技术, 2007 31(S2): 114-117.
- [13] 袁澎,艾芊,赵媛媛,等. 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.
- [14] Lien K P ,Liu C W ,Yu C S ,et al. Transmission network fault location observability with minimal PMU placement [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2006 21(3): 1128-1136.
- [15] Geramian S S ,Abayne H A ,Mazlumi K. Determination of optimal PMU placement for fault location using genetic algorithm [J]. 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power 2008: 1-5.
- [16] Batchu Rajasekhar ,Ashwani Kumar Chandel ,Basetti Vedit. Differential evolution based optimal PMU placement for fault observability of power system [J]. Engineering and Systems( SCES) 2013: 1-5.
- [17] Kavasseri R ,Srinivasan S K. Joint placement of phasor and conventional power flow measurements for fault observability of power systems [J]. Generation ,Transmission & Distribution IET 2011 5(10): 1019-1024.
- [18] Kennedy J ,Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm [J]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems ,Man and Cybernetics. Orlando ,1997 5: 4104-4108.
- [19] Pokharel S S ,Brahma S. Optimal PMU placement for fault location in a power system [J]. North American Power Symposium( NAPS) 2009(1): 1-5.
- [20] del Valle Y ,Venayagamoorthy G ,Mohagheghi K S ,et al. Particle swarm optimization: basic concepts ,variants and applications in power systems [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 2008 12(2): 171-195.
- [21] 陈建华,李先允,邓东华,等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用综述 [J]. 继电器 2007 35(23): 77-84.
- [22] 彭春华. 基于免疫 BPSO 算法与拓扑可观性的 PMU 最优配置 [J]. 电工技术学报 2008 23(6): 119-124.
- [23] 方伟,孙俊,须文波,等. 基于微分进化算子的量子粒子群优化算法及应用 [J]. 系统仿真学报 2008 20(24): 6740-6744.
- [24] Kennedy J ,Eberhart R C. Particle swarm optimization [J]. Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks ,1995 4: 1942-1948.

## Optimal PMU Placement for Fault Observability of Power System Based on BPSO

LI Jincan<sup>1</sup> ZOU En<sup>2\*</sup>

(1. Zhujiang College ,South China Agricultural University ,Guangzhou Guangdong 510900 ,China;

2. College of Engineering ,South China Agricultural University ,Guangzhou Guangdong 510642 ,China)

**Abstract:** The paper proposed the Binary Particle Swarm Optimization( BPSO) algorithm for optimal placement of phasor measurement units( PMU) to ensure observability under faulted conditions in power systems. The problem is to minimize the number of PMUs in order to locate any fault in a power system. Integer linear programming procedure is used for problem formulation. And then the BPSO algorithm is introduced to solve the problem. The algorithm is implemented on the IEEE-14bus ,30-bus and 57-bus standard test systems with and without considering of zero injection buses. The simulation results show that the BPSO algorithm is fast and efficient. It is suitable for optimization problems of power systems.

**Key words:** optimal PMU placement; power system; fault observability; integer linear programming( ILP) ; binary particle swarm optimization( BPSO)

(责任编辑: 冉小晓)