DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.10.018

考虑最大可观测通道数和关键故障线路约束的 PMU优化配置研究^{*}

樊海锋¹,徐 凯¹,江全元^{1*},宋军英²,陈跃辉²,张文磊² (1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 湖南省电力公司,湖南 长沙 410007)

摘要:针对目前PMU配置模型中考虑的约束难以满足实际需求的问题,提出了一种基于0-1整数规划的PMU配置模型。该模型一方面可以方便地考虑零注入节点的影响,同时结合最大可观测通道数约束;另一方面采取了线路筛选技术,把线路中断后节点电压和线路潮流的越限程度作为筛选指标,获取了关键故障线路集,从而缩小了传统*N*-1线路校验集合。通过对IEEE-14、30、57、118系统和浙江省电网500 kV(76节点)以及220 kV系统(543节点)的仿真计算,将算例结果和线路*N*-1条件进行了对比。结果表明,该方法能够有效减少PMU的数目,在提高经济性的同时又保证了系统的可靠性。

关键词: 0-1 整数规划;相量测量单元;最大可观测通道数;线路筛选技术
 中图分类号: TM712; TP24
 文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)10-1240-06

Investigation of optimal PMU placement considering limited number of channels constraints and critical line constraints

FAN Hai-feng¹, XV Kai¹, JIANG Quan-yuan¹, SONG Jun-ying²,

CHEN Yue-hui², ZHANG Wen-lei²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China)

Abstract: Aiming at the problem of the constraints involved in the configuration of phasor measurement unit (PMU) in the previous work failing to meet the engineering requirements, a placement model based 0–1 integer programming was investigated. In this model, maximum observable channel constraint and zero injection were considered. Adopting the degree of bus voltage and line power flow constraints violations in the post-contingency as filtering index, the set of key contingencies can be obtained by critical line screening technique. Thus the line set of traditional N-1 checking was narrowed. Numerical simulation was respectively conducted on IEEE 14-bus, 30-bus, 57-bus, 118-bus system, Zhejiang province power grid 500 kV(76-bus) and Zhejiang power grid 220 kV system (543-bus). Comparing with the N-1 condition (line outages), the result indicate that the proposed method reduces effectively the number of PMU configuration, and improves the reliability and economic efficiency of the system.

Key words: 0-1 integer program; phasor measurement unit(PMU); limited number of channels; line screening technique

0 引 言

同步相量测量单元(PMU)能够在统一时标下高

精度地直接测量相角信息,因而其在电力系统状态 估计、故障定位和稳定控制等领域发挥着日益显著 的作用^[1]。

收稿日期: 2013-05-06

基金项目:国家高技术研究发展计划("863"计划)资助项目(2009AA05Z221);国家自然科学基金资助项目(50977082) 作者简介:樊海锋(1987-),男,浙江绍兴人,主要从事PMU优化配置方面的研究. E-mail:fhfxa2006@126.com 通信联系人:江全元,男,博士,教授,博士生导师. E-mail:jqy@zju.edu.cn 电力系统状态估计是实现电网安全稳定运行的 基础。传统状态估计利用SCADA系统获取节点电压 幅值、有功无功潮流等量测数据后,通过迭代计算实 现电力系统状态量的估计。由于PMU能够测量安装 处节点的电压幅值、相角以及与该节点相连的所有支 路电流,在可观测通道数足够多的前提下,某一节点 安装 PMU后,与其相连的节点也将确保可观^[2]。与传 统状态估计不同,研究者利用 PMU 相角信息能够实现 线性状态估计,改善收敛性并能提高估计精度^[3]。

如果全网所有母线都配置了PMU,则系统就是完 全可观测的。但从技术经济性对比角度出发,所有节 点装设PMU既不经济也非必要。因此找到最少的 PMU配置数目及其合适安装位置实现全网的可观性, 就是最优PMU配置(Optimal PMU Placement,OPP)问 题的核心。

确定网络可观性的算法主要有2类:数值方法和 拓扑方法。① 数值方法主要通过检查信息矩阵是否 满秩来确定。② 拓扑方法的核心思想是依据图论系 统可观性原理将全网可观性等效为系统每个节点都 可观。数值方法运算量巨大,且精度易受累积误差影 响,因此本研究将使用拓扑分析方法。

OPP问题本质上是一个NP问题。文献[4]综述了 求解OPP问题的方法,可分为2类:启发式方法和确定 性数学方法。① 启发式方法是基于随机智能搜索过 程,能够处理离散变量,由于最优PMU配置问题变量 是离散的,这种技术被广泛应用,包括模拟退火(SA)、 免疫遗传算法^[5]、禁忌搜索(TS)^[6]、粒子群优化(PSO)^[7] 和最小生成树^[8]等。这些方法最大的不足在于收敛速 度慢,需要很长的执行时间,并且难以获取全局最优 解,限制了它们在实际大型电力系统中的应用。② 确 定性方法主要是基于0-1整数规划算法,文献[9]得出 的结论是基于0-1整数规划算法具有更好的适应性, 可以考虑更为复杂的约束,且计算速度快,适合应用 于实际大电力系统中。

近年来,OPP问题成为一大研究热点,相应的研 究工作也取得了不少的成果。文献[10]提出了一种 基于0-1整数规划的配置模型,考虑了传统线路潮流 和零注入节点影响;文献[11]在观测通道数有限的条 件下实现PMU配置;文献[12]研究了*N*-1条件下(单 条线路中断和PMU失效)的配置问题。以上文献都是 通过建立0-1整数规划模型进行求解,存在如下问题: ①只是从某一个方面进行研究,配置模型约束单一; ②研究*N*-1条件下的OPP问题,从结果上看所需PMU 配置数目过多(接近节点数的50%),经济性较差。

文献[13]结合复杂网络理论,通过N-1故障 模型辨识出系统中的脆弱线路,从而进行线路N-1 条件下的PMU配置,然而算法复杂,难以用于实际 大系统。

针对以上不足,本研究提出一种基于0-1整数 规划的PMU配置模型,一方面考虑PMU最大可观测 通道数约束,同时结合零注入节点的影响,另一方面 通过线路筛选技术,获取关键故障线路集替代线路 *N*-1约束。对IEEE标准系统和实际某省电力系统 进行仿真计算。

1 基于0-1整数规划的PMU配置模型

OPP核心问题是在保证全网可观性的同时确定 最少PMU数目和合适的配置位置。

电力系统可观测性是指系统的量测集(数量和种类)及分布足够用以求解系统当前的状态,本研究将 全网可观等效成系统中每个节点的电压相量均可直 接或间接测得。

从可观性原理出发,基于以下4条规则来确定系 统可观测的范围:

(1)节点安装 PMU后,其节点电压与该节点相关 的支路电流均可测量;

(2)如果线路一侧节点电压和线路电流已知,则 另一端节点电压相量可通过欧姆定律计算得到;

(3)线路两侧的节点电压已知,则该线路的电流 相量可通过欧姆定律计算得到;

(4)除一条线路外,如果与某节点相连的所有线路的电流已知,则该线路上的电流可以通过KCL计算得到。

1.1 基本模型

对于一个n节点系统,PMU配置问题的数学基本 模型描述如下:

$$\operatorname{Min} \sum_{j=1}^{n} c_j x_j \tag{1}$$

$$f_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \ge 1, \quad \forall i \in I$$
(2)

式中: $x_j - 0 - 1$ 变量, $x_j = 1 -$ 节点 j安装 PMU, $x_j = 0$ - 不安装; $c_j -$ 节点 i 安装 PMU 所需的费用, 取为1; f_i - 节点可观测函数,其值取决于该节点是 否安装 PMU 和与它相邻节点是否能让其可观,当 $f_i \ge 1$ 满足时,表示节点 i 可观。

节点关联矩阵A的元素 aij 定义如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, \ i = j \\ 1, \ i = j / H \not E \\ 0, \ i = j / \pi H \not E \end{cases}$$
(3)

在实际电力系统中,往往存在零注入节点(传输 节点,无发电机和负荷)。对系统可观性的影响解释 如图1所示。



图 1 考虑零注入节点影响的 PMU 配置 △一零注入节点; ○一非零注入节点; 黑色一可观测节点; 白色一 不可观测节点

(1)如图1(a)所示,节点5为零注入节点,且可观。当与其相连的节点中只有节点2不可观,其余节点可观时,那么节点2可通过基尔霍夫电流定律(KCL)使其可观;

(2)如图1(b)所示,当与不可观零注入节点5相 连的各节点可观时,那么通过KCL使其不可观的零注 入节点5变得可观。

以上两点可简化成:在零注入节点5和与之相连 的其他节点集合 *M*={1,2,3,4}∪{5},当其余节点均 可观,唯一不可观的节点可通过 KCL使其可观。考虑 零注入节点的影响时,只需对这样的零注入节点集合 进行处理,将约束(2)修改为:

$$f_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + \sum_{j=1}^n a_{ij} y_{ij} \ge 1, \quad \forall \ i \in \ I$$
(4)

$$\sum_{i=1}^{n} a_{ij} \gamma_{ij} = z_j, \quad \forall j \in I$$
(5)

二进制变量 $y_{ij}=1$ 表示节点 i 由相邻的零注入节 点 j 可观。观察等式约束(5)可得到:

 (1) 对于非零注入节点(z_j=0), y_{ij}=0,i∈ I, 如 y₅₁=y₅₂=y₅₃=y₅₄=0;

(2) 对于零注入节点(*z_j*=1),对于每一个零注入节 点集合存在一个等式,如*y*₁₅+*y*₂₅+*y*₃₅+*y*₄₅+*y*₅₅=*z*₅=1。

此时模型的优化变量变为:**X**=[x1...xn, y11...yn, y12...yn, y11...yn, y12...yn], y11...yn]^T, 对于 y_{ij}, 只有那些零注入节点集合中的元素 才可能为1, 而绝大部分的元素值都可以确定为0, 因 而优化变量规模变得很小。

同时模型的约束条件变为不等式约束(6)和等式

约束(7):

$$\boldsymbol{A}_{\text{ineq}}\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 & \dots & B_n \end{bmatrix} \boldsymbol{X} \ge \boldsymbol{b}_{\text{ineq}}$$
(6)

$$\boldsymbol{A}_{\text{eq}}\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0}_{n \times n} & \boldsymbol{C}_1 & \boldsymbol{C}_2 & \dots & \boldsymbol{C}_n \end{bmatrix} \boldsymbol{X} = \boldsymbol{b}_{\text{eq}}$$
(7)

其中:矩阵A为节点关联矩阵,与(3)相同, B_i , C_i , b_{ineq} , b_{eq} 具有如下形式:

$$B_{i} = \begin{bmatrix} a_{1i}z_{i} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_{2i}z_{i} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_{ni}z_{i} \end{bmatrix}_{n \times n}$$
$$C_{i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{1i} & a_{2i} & \cdots & a_{ni} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{n \times n}$$

 $\boldsymbol{b}_{\text{ineq}} = \begin{bmatrix} 1 \ 1 \ \dots \ 1 \end{bmatrix}_{1 \times n}^{\mathsf{T}}, \ \boldsymbol{b}_{\text{eq}} = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & \cdots & z_n \end{bmatrix}^{\mathsf{T}}$

显然,矩阵 B_i , C_i 均可由节点关联矩阵A导出, b_{eq} 可由零注入节点集合可方便获取。

1.2 考虑最大可观测通道约束

前文的讨论建立在这样一个假设基础上,当某个 节点安装 PMU后,与它相连的所有节点将可观,即 PMU拥有足够多的观测通道。然而实际上,PMU 仅有 有限的量测通道。当节点相连的节点数超过最大可 观测通道数时,只能让部分相连节点可观,并且 PMU 出现通信故障时,也将减少可用的量测通道数。由 此,考虑量测通道约束下的 PMU 优化配置将具有重要 现实意义。

为考虑最大可观测通道数约束,本节定义二进制 变量 w_{ij} 。 w_{ij} = 1,表示母线 *i* 安装 PMU 能够使母线 *j* 可观。m为最大可量测通道数。

此时1.1节基本模型的约束将改为以下形式:

$$f_{i} = a_{ii}x_{i} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n} a_{ji}w_{ji} \ge 1, \forall i \in I$$
(8)

$$g_i = mx_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} w_{ij} \ge 0, \forall i \in I$$
(9)

式中: f_i —节点可观测函数, g_i —节点通道数约束函数。

进一步考虑零注入节点后,约束将改变成式(10~12),如下所示:

$$f_{i} = a_{ii}x_{i} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n} a_{ji}w_{ji} + \sum_{j=1}^{n} a_{ij}y_{ij} \ge 1, \forall i \in I \quad (10)$$

$$g_i = mx_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} w_{ij} \ge 0, \forall i \in I$$
 (11)

$$\sum_{i=1}^{n} a_{ij} y_{ij} = z_j, \quad \forall j \in I$$
(12)

1.3 线路筛选技术

电力系统实际运行中,影响电力系统安全的往往 是一些关键线路。当这些线路故障发生时,会对系统 性能产生较大影响,因此研究者必须对这些关键线路 进行重点监测,保证这些线路两端节点在*N*-1下仍 然可观。文献[14]表明系统在运行过程中发生的故 障只有一部分对电力系统安全是有影响的,甚至有些 故障从对系统安全角度出发可以被某些故障包含在 内,从而研究者可以通过寻找关键故障线路集来取代 传统的线路*N*-1校验。

另一方面,文献[12]对于IEEE118节点测试系统 来说,保证系统正常情况下完全可观的PMU配置数目 为28个,而保证系统在线路N-1下可观的PMU最少 数目为53个,其PMU安装费用相差接近一半。故本 研究提出一种配置方案,通过线路筛选技术,把线路 中断后节点电压和线路潮流的越限程度作为筛选指 标,获取关键故障线路集,从而缩小传统线路N-1集 合。线路筛选策略流程图如图2所示。



图2 线路筛选流程图

线路筛选策略如下:

(1)进行故障初选。在故障集 FS 中去掉不能断 开的线路(断开后成为孤立节点),即去掉发电机或是 负荷只作为一条线路的一端的线路,这些故障形成初 选故障集 FS₀;

(2) 在正常运行条件下,计算系统常规 OPF,获 取最佳运行点 P_0 ;

(3)在该运行点下,对故障集 FS 中的线路逐条进行中断,计算系统潮流分布。如果在某个故障下, 所得的潮流结果不满足节点电压约束或者线路潮流 约束,则认为该故障为有效故障。

$$\frac{V_{ki}^{2} \leqslant V_{ki}^{2} \leqslant \overline{V_{ki}^{2}}}{P_{kij} \leqslant P_{kij} \leqslant \overline{P_{kij}}}$$
(13)
$$\overline{P_{kji}} \leqslant P_{kji} \leqslant \overline{P_{kji}}$$

式中: V_{ki} — 第k个故障后节点i的电压, P_{kij} — 第k个故障后线路i的潮流。

(4)对有效故障集中的故障,通过比较节点电压和线路潮流的越限程度,将越限程度更严重的作为关键故障,形成关键故障集。

(5) 初选线路、关键线路即为最终的关键故障线路集 *K*。

1.4 关键故障线路集 N-1 校验模型

在1.3节获取关键故障线路集*K*后,建立线路*N*-1 校验模型,如下所示:

$$f_{i}^{k} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}^{k} x_{j} + \sum_{j \in i} a_{ij}^{k} y_{ij}^{k} \ge 1, \forall i \in I, \forall k \in K (14)$$
$$\sum_{i=1}^{n} a_{ij}^{k} y_{ij}^{k} = z_{j}, \quad \forall j \in I, \forall k \in K (15)$$

关联矩阵A中的元素在线路中断时变成如下形式:

$$a_{ij}^{k} = \begin{cases} 0 , 线路k在节点i和j之间 \\ a_{ij} , 其他情况 \end{cases}$$
(16)

 y_{ii}^{k} 类似。

2 算例分析

2.1 算例介绍

上一节介绍了基于0-1整数规划的PMU配置模型, 这一节将具体应用于IEEE标准系统和浙江省500 kV 和220 kV电力系统。其中IEEE标准系统参数如表1所 示,浙江省电力系统参数如表2、表3所示,某省500 kV 系统网络拓扑图如图3所示。 (1) IEEE标准系统参数如表1所示。

表1 IEEE标准系统参数

测试系统	线路数目	零注入节点编号 (数目)	单节点相连最大线 路数目
IEEE14	20	7(1)	5
IEEE30	41	6,9,22,25,27,28(6)	7
IEEE57	80	4,7,11,21,22,24,26,34, 36,37,39,40,45,46,48 (15)	6
IEEE118	186	5,9,30,37,38,63,6468, 71,81(10)	12

(2) 浙江500 kV系统(76节点)参数如表2所示。

表2 浙江电网500 kV系统参数

测试	线路	零注入节点编号	单节点相连最
系统	数目	(数目)	大线路数目
ZJP76	90	5,6,7,8,9,10,47(7)	5

(3) 浙江220 kV系统(543节点)参数如表3所示。

表3 浙江电网220 kV系统参数



注:方块表示发电厂节点、圆圈表示变电站节点、三角形表示零注入节点。

2.2 考虑最大可观测通道数

本研究所建立的0-1整数规划模型的求解都是通过CPLEX^[15]工具箱编程实现。求解1.2节模型,取不同的最大可观测通道约束变量*m*,得到的配置结果如表4所示。

表4 不同最大可观测通道数下PMU配置结果

通道幼市	IEEE14		IEEE30		IEEE57		IEEE118	
<u>一</u> 但约來	а	b	а	b	а	b	а	b
1	7	7	15	14	29	23	61	56
2	5	5	11	9	19	16	41	38
3	4	4	10	8	17	13	33	31
4	4	3	10	7	17	12	32	28
5	4	3	10	7	17	11	32	28
6	4	3	10	7	17	11	32	28
7	4	3	10	7	17	11	32	28

注:*a表示不考虑零注入节点;*b表示考虑零注入节点。

从表4结果中可看出,m取到一定值(与节点相连 最大线路数目相当)后,配置数目将不再减少,模型将 等价于基本模型。另一方面,考虑零注入节点后,部 分原来不可观的节点将变得可观,从而减少了PMU配 置数目。

2.3 关键线路故障集

前文1.3节中线路筛洗技术按照流程图编程实 现,以IEEE14系统为例进行具体阐述。首先本研究 通过故障初选,得到初选故障集 FS₀为{7-8},这条 线路为单连发电机线路。接着在正常运行条件下, 计算常规 OPF 确定最佳运行点。然后对故障集 FS 中的每一条线路进行逐条中断,分别计算故障后的 潮流分布。根据系统运行安全约束,将有违反约束 的故障列入有效故障集 AFS{1-2,4-7,5-6,6-11,6-12,6-13,7-9,9-10,9-14,10-11,12-13,13-14},共 包含11个有效故障。根据有效故障对应的安全约 束越限程度筛洗出关键故障。其中在这个系统中, 只存在电压越限的情况,线路潮流均满足约束要 求。各个有效故障对应的节点电压平方的越限情 况如表5所示,本研究在所有故障中选出每个节点 对应的越限最大值,然后将其所在的故障洗为关键 故障(行最大值或者行最小值),表5中结果显示, 关键故障集 KFS 为{1-2,5-6}。

表5 IEEE14系统各有效故障对应的电压越限结果

节占纪早.	故障编号						
11日油 2-	1-2	4-7	5-6	9-11		13-14	
1	1.124	1.124	1.124	1.124		1.124	
2	1.969	1.081	1.061	1.083		1.083	
3	2.075	1.028	0.991	1.030		1.031	
4	1.952	1.024	0.972	1.027		1.028	
5	1.842	1.028	1.006	1.034		1.034	
6	2.351	1.130	0.770	1.143		1.134	
7	2.248	1.108	0.958	1.082		1.088	
8	2.239	1.137	0.986	1.111		1.116	
9	2.367	1.090	0.920	1.072		1.079	
10	2.368	1.081	0.878	1.051		1.073	
11	2.361	1.097	0.818	1.039		1.096	
12	2.373	1.099	0.749	1.109		1.107	
13	2.371	1.087	0.755	1.095		1.103	
14	2.400	1.051	0.806	1.044		1.013	

对每个算例进行如上过程的分析,得到的关键线路筛选结果如表6所示。

2.4 基于关键故障集的N-1校验

2.3节基于线路筛选技术,获取了各个算例的关键故障集K。本研究将该集合应用于1.4节线路N-1 校验模型中,对模型进行求解,得到结果如表7所示。

测试系统	初选线路	关键线路
IEEE14	7-8	1-2 5-6
IEEE30	9-11 12-13 25-26	6-8 9-10 2827
IEEE57	13–49 14–46 8–9 39– 57	3-4 8-9 1-17 7- 29 25-30 35-36 37-38 46-47 47- 48 50-51 10-51 9- 55
IEEE118	71–73 86–87 110–111 110–112 68–116 12– 117 9–10	8–9 85–86 89–90 100–103 75–118
ZJP76	4-13 16-62 64-35 66- 40 67-40 76-41 68-41 50-49 69-49 70-51 71-55 72-58 61-46 65-37 60-37 26-27 19-20 59-21	23-36 30-63 35- 34 47-42 51-52 57-58
ZJP543	110条(不再罗列)	12-87 18-145 24- 223 25-243 36- 244 44-365 42- 394 48-427 55- 491 179-181 268- 275 393-394 394- 395 419-420 419- 427 436-440 440- 442 528-529

表6 关键线路筛选结果

表7 基于关键故障集与N-1线路配置结果对比

测试系统	基于关键故障集	N-1线路中断
IEEE14	4	7
IEEE30	10	14
IEEE57	14	19
IEEE118	37	53
ZJP 76	29	41
ZJP 543	182	304

注:*N-1线路中断取的K集合为全部线路。

从结果上看,基于关键故障线路集的模型有效地 降低了PMU配置数目,在不影响系统安全性的前提下 提高了经济性。

3 结束语

本研究针对PMU优化配置问题进行了研究,取得 了以下成果:

(1)建立了基于0-1整数规划模型,同时考虑零注入节点和最大可观测通道数约束;

(2)针对现有文献中对于线路 N-1 校验所需 PMU 数目过多,影响经济性这一问题,本研究从安全 约束的角度出发,把线路中断后节点电压和线路潮流 的越限程度作为筛选指标,获取了关键故障线路集, 从而缩小了传统 N-1线路校验集合。 本研究通过 CPLEX 编程实现对模型的优化求解, 算例结果表明本研究所提方法能够满足在故障条件 下的系统全局可观,同时又能显著提高经济性。

参考文献(References):

- AMICARELLA C, PASERBA J, PRICE W, et al. Assessment of applications and benefits of phasor measurement technology in power systems [M]. Electric Power Research Institute, 1997.
- [2] BALDWIN T L, MIII L. Power system observability with minimal phasor measurement placement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(2):707-715.
- [3] 程 涛. 基于提高状态估计精度的 PMU 优化配置[D].成都:西南交通大学,2008.
- [4] NIKOLAOS M M, GEORGE N K, PAVLOS S G. Taxonomy of PMU placement methodologies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2):1070–1077.
- [5] AMINIFAR F, LUCAS C, KHODAEI A, et al. Optimal placement of phasor measurement units using immunity genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Deliver, 2009, 24(3):1014–1020.
- [6] 彭疆南,孙元章,王海风.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.
- [7] HAJIAN M, RANJBA A M, AMRAEE T, et al. Optimal placement of PMUs to maintain network observability using a modifier BPSO algorithm[J]. Int. J. Elect Power Energy Syst, 2011, 33(1):28-34.
- [8] NUQUI R F, PHADKE A G. Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability [J]. IEEE Trans. Power Del, 2005, 20 (4) : 2381– 2388.
- [9] YUILL W, EDWARDS A. Optimal PMU placement: A comprehensive literature review[C]// Power and Energy Society General Meeting, San Diego: [s.n.], 2001:1-8.
- [10] GOU B. Generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1099–1104.
- [11] KUMAR R, RAO V S. Optimal placement of PMUs with limited number of channels [C]// North American Power Symposium (NAPS), Boston:[s.n.],2011:1-7.
- [12] AMINIFAR F, KHODAEI A. Contingency- constrained PMU placement in power networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1):516-523.
- [13] 刘新东,江全元,曹一家. N-1条件下不失去可观测性的PMU 优化配置方法[J]. 中国电机工程学报,2009(10):47-51.
- [14] CAPITANESCU F, GLAVICI M, EMSTR D, et al. Contingency filtering techniques for preventive security- constrained optimal power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4):1690-1697.
- [15] HOLMSTROM K, GORAN A O, EDVALLI M M. USER'S GUIDE FOR TOMLAB /CPLEX v12.1[M]. 2009.