

基于改进教与学算法的 PMU 优化配置方法

李小东 李嘉辰 王立春 程金元 马磊

国网甘肃省电力公司兰州供电公司,甘肃省兰州市安宁区银滩路 301 号 730070;

Optimal PMU configuration based on improving teaching-learning-based optimization algorithm

Li Xiaodong

State Grid Gansu Electric Power Company Lanzhou Power Supply Company

摘要:本文以教与学优化算法(TLBO)解决在电力系统完全可观的条件下实现相量测量单元(PMU)下的配置问题。 TLBO 算法能够解决包括零注入量测和不包括零注入量测的 PMU 的优化配置。本文提出的算法在标准测试系统比如 IEEE-14 节点,IEEE-30 节点,IEEE-57 节点中测试,测试的结果与其他算法如遗传算法,二进制粒子群算法进行比 较。最后在量测配置使系统完全可观的情况下进行配电网的谐波状态估计,验证谐波状态估计的精度,进而验证本 文算法的有效性。

关键词: 教与学优化算法; 相量量测单元; PMU 优化配置

ABSTRACT: In this paper Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm (TLBO) is presented for solving the problem of placement of phasor measurement units (PMU) optimally in a power system network for complete observability. The TLBO algorithm enables optimal PMU placement by zero injection measurements and also by not including zero injection measurements. The algorithm has been tested on standard test systems such as IEEE 14-bus, IEEE 30-bus, IEEE 57-bus and the results are contrasted with other optimization algorithms like Genetic Algorithm and Binary PSO. Finally, the harmonic state estimation of distribution network is carried out under the condition that the measurement configuration makes the system completely observable. The accuracy of harmonic state estimation is verified, and the validity of the proposed algorithm is verified.

KEY WORD: Phasor measurement units; Observability; Optimal placement; Teaching-Learning-Based Optimization; harmonic state estimation

1 引言

相量测量单元(PMU)产生同步相量、频率和 电压或电流的频率近似变化率和能够帮助提供 电力系统的广域快照的时间匹配信号^[1]。PMU 优化策略的发展可以帮助使电力系统充分可观 的同时并降低成本。本文的目的是确定 PMU 最 少的数量和最优的位置使系统具有拓扑可观性。

近几年有各种确定和正在研究的方法用来 解决最优 PMU 配置 (OPP)问题。博弈演化算法 将寻 ¹找 PMU 最优配置方案的问题映射为理性 主体寻求自身利益最大化的博弈过程,PMU 最优 配置方案即对应于博弈中的纳什均衡解^[2]。此外 还有 0-1 整数规划算法,分段迭代法等^[3-7]。 本文中,以教与学优化算法(TLBO)^[89]为基 础对 IEEE14 节点、30 节点和 57 节点测试系统 PMU 配置进行了优化。对于所有测试系统,完 整的拓扑可观测性下的 PMU 最小数目计算。对 优化算法的实现需要进行了研究,它和计算计算 时间及其提供一致结果的能力有关系。本文第一 节描述了 PMU 的配置问题。构造和如何创建约 束以进行彻底系统的可观测性的分析。TLBO 方 法应用于 PMU 优化配置在第二节。第三节是谐 波状态估计的数学模型,第四节讨论了案列仿真 结果,第五节是本文的最终结论。

2 PMU 配置的数学模型

对于一个n节点系统,定义



$$\min \quad m = \sum_{i=1}^{N} \omega_i x_i \tag{1}$$

$$s.t \quad f(x) \ge 1$$

式中:*m* 表示 *PMU* 的个数; *o*_i 表示在母线*i* 安装 *PMU* 的成本,对于所有节点而言假设安装成本 是一样的; *i* = 1,2,...,*N*; *N* 表示系统母线数。优化 问题解的维数等于电力系统母线数,并对每一维 的取值二进制编码,即每一维的取值只能是 0 或 1。当某一处母线安装了 *PMU* 时,其对应位置上 取 1。即二进制决策变量向量 *X* 可以定义如下:

$$X_{i} = \begin{cases} 1 \quad 如果PMU安装在节点i \\ 0 \quad 其他 \end{cases}$$
(2)

考虑图 4.2 的 14 节点测试系统,节点 7 附 近的黑点表示节点 7 是一个零注入节点。



图 1 14 节点测试系统图

Figure 1 14 node test system diagram.

(1) 不包含零注入量测的情况。为了形成约 束集,二进制联通矩阵必须首先形成:

$$A_{k,m} = \begin{cases} 1 & \text{m} \mathbb{R} k = m \text{m} \vec{a} \text{m} n k \text{m} \vec{a} \\ 0 & \text{j} \text{m} \end{cases}$$
(3)

14 节点构建的联通矩阵 A 如下:



对以上测试系统构建的约束如下:

$$f(X) = AX = \begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 + x_5 \ge 1 \\ f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \ge 1 \\ f_3 = x_2 + x_3 + x_4 \ge 1 \\ f_4 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 \ge 1 \\ f_5 = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 \ge 1 \\ f_6 = x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} \ge 1 \\ f_7 = x_4 + x_7 + x_8 + x_9 \ge 1 \\ f_8 = x_7 + x_8 \ge 1 \\ f_9 = x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14} \ge 1 \\ f_{10} = x_9 + x_{10} + x_{11} \ge 1 \\ f_{11} = x_6 + x_{12} + x_{13} \ge 1 \\ f_{12} = x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14} \ge 1 \\ f_{14} = x_9 + x_{13} + x_{14} \ge 1 \end{cases}$$
(5)

加号表示逻辑或,大于等于号之后的1表示出现 在和式中的变量至少有一个是非零的。

考虑以上案例中节点1和节点2的约束

 $f_1 = x_1 + x_2 + x_5 \ge 1$

 $f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \ge 1$

约束 $f_1 \ge 1$ 表示至少有一个 PMU 应该安装 在节点 1, 2, 和 5 中的任意一个节点所在的位 置以确保节点是可观的。同理, $f_2 \ge 1$ 表示至少 有一个 PMU 应该安装在节点 1,2,3,4,和 5 中的任 意一个节点所在的位置以确保节点 2 是可观的。

(2) 包含零注入量测的情况

考虑图 1 所示的 14 节点标准测试系统,节 点 7 假设是一个零注入节点。如果节点 4,7,8,9 其中三个节点电压已知,第四个节点的电压可以 通过在节点 7 应用 KCL 定律估计出来。因此, 节点 7 各支路电流可以求得。基于这一结论,零 注入量侧节点可以和与它相连的任一节点合并。 节点 7 和节点 8 合并形成节点 8'节点,新形成的 图如下:







3 改进 TLB0 的 PMU 优化配置步骤

(1)"教学"阶段。一位好老师有助于提高 班级的平均分数,并试图使学生的知识达到教师 的水平。实际上,教师只能帮助把班级的平均水 平提高到某一限值,这一限值取决于全班同学的 学习能力。按照下式进行"教":

 $Difference_Mean_i = r_i \times (M_{new} - T_f \times M_i) \quad (6)$

式中表示 M_i 表示第 i 次迭代的平均值, T_i 表示在任意第 i 次迭代中所有学生中适应值最好的,也就是老师。老师 T_i 将会尽力去移动 M_i 使之接近自己的水平,则新的平均值是 M_{new} ,用新的平均值和过去的平均值之间的差去更新学生的成绩。 T_f 是教学因子,它决定平均值如何改变。 r_i 是 0 和 1 之间的随机数, T_f 的值取 1 或 2.

$$T_{f} = round[1 + rand(0,1)]$$
(7)

参考了粒子群算法中的线性递减惯性权重 的概念对教与学优化算法中的教学因子进行改 进,使其能够根据迭代次数进行自适应,既能在 搜索初期快速收敛,又能在搜索后期精确搜索。 改进后按下式生成:

$$T_f = T_{f \max} - \frac{T_{f \max} - T_{f \min}}{iter_{\max}} iter$$
(8)

式中: $T_{f \max}$ 和 $T_{f \min}$ 分别为 T_{f} 的最大值和最小值, *iter*_{max}为最大迭代次数,*iter*为当前迭代次数。 根据下式更新解:

 $X_{new,i} = X_{old,i} + Difference _Mean_i \quad (9)$

(2)"学习"阶段。学生将通过与教师互动 或者与其他学生互动来提高他们的知识。学生可 以任意地与其他学生以小组讨论、示范、正式互 动等方式进行互相学习。一个学生可以从其他知 识更加渊博的学生那里学到一些新的东西。对于 最小化问题,学习阶段更新公式如下:

任意选择两个学生 X_i 和 X_j , 当 $i \neq j$ 时

$$X_{new,i} = \begin{cases} X_{old,i} + r_i \times (X_i - X_j), (fitness(i) < fitness(j)) \\ X_{old,i} + r_i \times (X_j - X_i), (fitness(j) < fitness(i)) \end{cases}$$

(3) 二进制 TLBO。在教学过程和学习过程,每个学生的速度 v_i按如下公式计算。

教学过程:
$$r_i \times (M_{new} - T_f \times M_i)$$

学习过程: $r_i \times (X_j - X_i)$

为了使 TLBO 能解决电力系统谐波量测 点 PMU 配置这种离散优化问题,在二进制 TLBO 算法当中,当更新 PMU 的位置时,让速度方程 从零过渡到 1 或者从 1 过渡到 0,使得速度只能 取 0 或者 1。使用以下双曲正切函数实现:

$$Tanh(v_{id}^{k}) = \frac{\exp(|2v_{id}^{k}|) - 1}{\exp(|2v_{id}^{k}|) + 1}$$
(11)

位置更新方程可以如下公式代替:

$$X_{id}^{k} = \begin{cases} 1 & \text{m} \text{Rrand} < \text{Tanh}(v_{id}^{k}) \\ 0 & \text{I}(0) \end{cases}$$
(12)

4 基于 PMU 优化配置的谐波状态估计

以节点谐波电压相量为状态变量,当量测量 为与节点相连支路的谐波电流相量时,量测方程 为:

$$\dot{I}_{i}(h) = (Y_{i} + 1/Z_{ij}) \dot{U}_{i}(h) - (1/Z_{ij}) \dot{U}_{j}(h) + \eta_{i}(h)$$
(13)

式中: $I_i(h)$ 为由节点i流入节点i、j之间支路 的h次谐波电流量测量, $U_i(h)$ 和 $U_j(h)$ 分别为 节点i、j侧的h次谐波电压状态量, $\eta_i(h)$ 为h次谐波作用下节点i处的量测误差;将节点i、j之间的支路等效为 π 形等值电路, Y_i 为接地支路 导纳, Z_{ij} 为支路阻抗。当量测量为节点注入电 流相量时,量测方程为:

$$\dot{I}_{i}(h) = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij}(h) \dot{U}_{j} + \eta_{i}(h)$$
(14)

式中: *Y_{ij}*为节点导纳矩阵中对应节点*i、j*的分 块导纳矩阵元素,*n*为系统所含节点数。当量测 量为节点谐波电压时,量测方程为:

$$U_i(h) = 1 \times U_i(h) + \eta_i(h) \tag{15}$$

根据量测量列写量测方程,忽略量测误差的 影响,则谐波状态估计的数学模型可表示为:

(10)



的状态向量, H 为表示二者之间关系的量测矩阵。

5 算例分析

仿真分析在 MATLAB (R2014a)当中实现, 将本章提出的教与学优化(TLBO)和遗传算法 (GA)和二进制粒子群(BPSO)算法进行比较。 执行算法的参数分别在表 4.1,.2,4.3 中给出。基 于 TLBO,GA 和 BPSO 的谐波量测点 PMU 优化 配置都分别涉及不包括零注入量测和包括零注 入量测两种情况。对于进行验证的所有测试系 统,量测点的数目和位置的优化结果分别在表 4.4,4.5,中给出。为了验证TLBO算法应用于PMU 优化配置的有效性,和GA,BPSO的比较分析如 图 4.3 所示。对于不包含零注入量测的 14 节点 测试系统,TLBO 只需要 5 次迭代,而 GA 需要 9次,BPSO 需要 20次。TLBO 算法比 GA 和 BPSO 算法收敛更快,是因为 TLBO 不需要参数的调 整,花费更少的时间。及时 PMU 的优化配置是 一个离线过程,收敛时间仍然是一个重要的因 素,尤其是对于大电网。

表 1 遗传算法的参数 Table 1 parameters used for GA

染色体数目(群	40
体)	40
最大迭代次数	200
交叉概率	0.9
亦臣姬귫	0.00
	1

表 2 二进制粒子群算法的参数 Table 2 parameters used for BPSO

粒子数目(群	100
体)	
最大迭代次数	100
	0
C_{1}, C_{2}	2
$V_{ m max}$	6

表 3 教与学优化算法的参数 Table 3 parameters used for TLBO

学生人数(群	70
体)	

最大迭代次数	20
	0
$T_{_f}$	2

表 4 不包含零注入量测的情况

Table 4 excluding zero injection measurements

测试	PMU 的配置数目		【数目	PMU 优化的安装的节点位置
系统	BPS	G	TLB	
	0	А	0	
IEEE14	4	4	4	2, 6, 7, 9
うし しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん し				
IEEE30	10	10	10	2, 4, 6, 9, 10, 12, 19, 23, 26, 30
うし しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん し				
IEEE57	17	17	17	1, 4, 9, 20, 22, 25, 27, 29, 32,
うし しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん し				36, 41, 45, 46, 48, 51, 53, 57

表 5 包含零注入量测的情况

Table 5 including zero injection measurements

测试	PMU 的配置数目		【数目	PMU 优化的安装的节点位
系统	BPS	G	TLB	置
	0	А	0	
IEEE14 节	3	3	3	2, 6, 9
点				
IEEE30节	7	7	7	3, 7, 10, 12, 18, 24,29
点				
IEEE57节	11	11	11	1, 13, 18, 19, 25, 29, 32, 38,
点				51, 54,56



图 3 IEEE14 节点测试系统不包括零注入测量 PMU 优 化配置各种方法的收敛特性的区别

Figure. 3 the difference of the convergent characteristics of the various methods of PMU optimization placement not including zero injection measurement in IEEE14 node test system

由于节点注入量测是完全的冗余量测,在



PMU 的优化配置已使系统完全可观时,便不再 考虑注入量测^[10],因此本文仅以 PMU 所放置节 点的节点谐波电压相量和支路谐波电流相量作 为量测量,形成要进行处理的量测矩阵。表6是 由量测矩阵的秩和条件数确定的 PMU 所需获取 的量测量,由于量测量个数等于状态了个数,称 为基本量测;图5、图7是冗余量测时,各节点 谐波电压幅值与相角的估计误差,图6、图8是 基本量测时,各节点谐波电压幅值与相角的估计 误差。



图 4 冗余量测下节点谐波电压幅值估计误差 Figure.4 Estimated error of the magnitude of the node harmonic voltage under redundant measurements



图 5 基本量测下节点谐波电压幅值估计误差 Figure.5 Estimated error of the magnitude of the node harmonic voltage under basic



measurement

图 6 冗余量测时节点谐波电压相角估计误差 Figure.6 Estimated error of the phase of the node harmonic voltage under redundant measurement



图 7 基本量测时节点谐波电压相角估计误差 Figure.7 Estimated error of the phase of the node harmonic voltage under basic measurements 表 6 PMU 所需获取的量测量

Table.6 The requisite measurements obtained by PMU

节点电压相量量	2, 4, 6, 9, 13, 15, 17		
测			
支路电流相量量	2, 8, 9, 13, 18, 19, 21, 26, 27, 31,		
测	35		

通过比较图 4、图 5 以及图 6、图 7 可知: 冗余量测时节点谐波电压幅值与相角的估计误 差比基本量测时要大,因此依据量测矩阵秩及条 件数所确定的基本量测时的量测量有效的提高 了谐波状态估计的准确性;

6 结论

本文首次将教与学优化算法(TLBO)应用于 满足完全拓扑可观的条件下的电力系统谐波相 量测量单元(PMU)配置数目和安装地点的求解。 本文采用的 TLBO 方法能够确保在包含和不包 含零注入量测两种情况下的电力系统谐波 PMU 最优配置。该方法已在标准测试系统实现,通过 和遗传算法和二进制粒子群算法相比,效率更 高。许多方法需要不同的参数设置, 这将影响算 法的性能。GA 要求为交叉概率、变异率和选择 方法的类型; BPSO 要求权重随机修改和速度最 大值。与其他优化算法相比, TLBO 不需要对参 数进行任何调整。但是本文对教学因子进行随迭 代次数进行自适应调整,发现效果和不用调整时 效率相差无几,并且不用调整就可以满足 PMU 优化配置的要求。因此,TLBO 算法的实现比较 简单,并且已经得到了很好的应用。从本文算例 验证结果中发现 TLBO 收敛速度比遗传算法和 BPSO 更快。最后使用 IEEE-14 节点 TLBO 量测



配置方案进行谐波状态的估计,通过计算谐波电 压的幅值和相角误差发现谐波状态估计精度在 在基本量测的条件下比在冗余量测的条件下更 高。

参考文献

- [1] 赵辉,赵少华,王红君,等.基于 0-1 规划迭代法优化 PMU 配置
 以提高混合状态估计准确度[J].电气应用,2017,36(05):80-84.
 体
- [2] 毛义,吕飞鹏.基于博弈演化算法的 PMU 最优配置方法[J].电 力自动化设备,2017,37(10):184-188.
- [3] 闫玲玲,刘中印,艾永乐,等.基于 0-1 整数规划算法的 PMU 量 测 点 优 化 配 置 新 方 法 [J]. 电 力 系 统 保 护 与 控 制,2017,45(12):101-106.
- [4] 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):6-10..
- [5] 徐岩,应璐曼,王增平.基于最大树理论的分阶段相量测量单元 配置方案[J].电工技术学报,2016,31(04):155-162.
- [6] 赵辉,赵少华,王红君,等.基于分段迭代法的 PMU 的优化配置 研究[J].电测与仪表,2016,53(13):14-18.

- [7] 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):2052-2056.
- [8] RAO R V,SAVSANI V J,VAKHARIA D P.Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems[J].Computer-Aided Design,2011,43 (3):303-315.
- [9] RAO R V,PATEL V.An elitist teaching-learning-based optimization algorithm for solving complex constrained optimization problems[J].International Journal of Industrial Engineering Computations,2012,3(4):535-560.
- [10] 张思为. 基于 PMU 优化配置和测量信息的谐波状态估计 [D].河北:华北电力大学,2013.

作者简介:

李小东 (1992-), 性男, 甘肃秦安, 硕士研究生, 助理工程师, 输 电线路运维、输电线路无人机巡检、输电线路带电作业技术研究