

考虑系统完全可观测性的 PMU 最优配置方法

彭疆南¹, 孙元章¹, 王海风²

(1. 清华大学电机系, 北京市 100084; 2. Dept. of E. E., Bath University, Bath, UK)

摘要: 基于电力系统线性量测模型, 研究了引入相量测量单元(PMU)相关量测集后的增广关联矩阵的电力系统可观测性拓扑分析方法, 以保证系统结构完全可观测性和最大量测数据冗余度为约束, 以配置 PMU 数目最小为目标, 形成了 PMU 最优配置问题, 并应用禁忌搜索(TS)方法求解该问题, 保证了全局寻优。算例表明, 该方法准确可靠、有效可行。

关键词: 可观测性分析; 相量测量单元最优配置; 禁忌搜索; 状态估计

中图分类号: TM73; P228.4

0 引言

电力系统运行状态为各母线电压相量(幅值和相角), 由网络元件参数、表征网络拓扑连接特性的开关状态和边界条件(发电和负荷水平)决定^[1]。在电力工业市场化改革和环保等约束日益加强的条件下, 实现电力系统广域实时监控的要求也日益迫切。要实现对系统有效闭环的实时监控, 首要条件是建立一套完备的量测系统, 以达到系统完全可观测。可观测分析是全网状态估计必备的功能。传统状态估计认为电压相角很难直接测量, 所以普遍采用非线性最小二乘估计方法, 但当系统规模庞大时显得力不从心。而且, 现有 SCADA 设计及状态估计都基于系统准稳态运行条件, 对于暂态监控基本无能为力。

自从基于 GPS 技术的同步相量测量单元(PMU)在电力系统得到应用后^[2], 由于 PMU 能够高精度地直接测量测点的电压幅值和相角, 已有很多学者在研究如何充分利用 PMU 提供的相角信息进行电力系统分析和控制^[3~5]。Phadke 博士在其先驱性的工作^[5]中探讨了在测量全部节点电压相量并测量全部或部分支路电流相量条件下的状态估计问题, 在线性观测方程基础上建立了线性状态估计模型。如果全网所有母线都配置了 PMU, 则全系统就是完全可观测的, 不需进行任何计算。但限于经济等因素, 现阶段还不可能完全配置 PMU。文献^[6]提出了在传统 SCADA 的基础上部分地安装 PMU 后的混合量测系统的状态估计模型, 并基于模型定量分析了引入 PMU 后对状态估计精度的改善程

度, 讨论了以提高状态估计精度为目标的 PMU 配置方案。

在基于 PMU 的新一代全网量测和监控系统对传统 SCADA 全面升级改造的规划设计中, 本文研究了系统的可观测分析方法, 并讨论了使成本最低(即配置 PMU 数最小), 同时保证系统结构完全可观测的 PMU 最优配置(OPP——optimal PMU placement)问题。文献^[7]最早考虑这个问题, 并提出用模拟退火(SA)法求解, 但由于其可观测性判断采用了常规数值方法, 需要大量矩阵计算, 速度慢, 结果受数值运算精度的影响; 此外, SA 收敛速度过慢, 影响了其在大系统中的实用性。文献^[8]提出了通过关联矩阵判别系统可观测性的概念, 但没有给出具体的观测性分析算法。在前人成果的基础上, 本文提出基于状态增广关联矩阵的可观测性拓扑分析方法, 并采用禁忌搜索(TS——tabu search)方法求解 OPP 问题, 为考虑配置 PMU 将现有 SCADA 升级为新一代广域量测系统, 以及在实现基于 PMU 广域量测的新一代快速状态估计方面进行了一些探索。

1 基于 PMU 的可观测分析与状态估计

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。一般而言, 即使系统量测有冗余(量测方程的维数大于未知数个数), 电力系统状态估计也未必能够求解各节点的电压幅值和相角。需要通过系统可观测性分析进行测点布置, 以使状态估计能够在各种条件下顺利进行。确定网络可观测性的算法主要有 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三角分解是否出现零主元来判断可观测性; 拓扑分析方法的核心思想是检查根据配置的量测集能否建

立一个满秩的支撑树以覆盖全网所有节点。数值方法运算量巨大,且精度易受累积误差影响,所以我们希望通过快速的拓扑方法进行系统的可观测分析。

引入 PMU 后,对系统的可观测分析和状态估计都带来显著影响。以下首先给出基于 PMU 的线性状态估计模型,然后详细讨论系统可观测增广关联矩阵分析方法。

1.1 基于 PMU 量测的系统线性量测模型

考虑一个 n 母线系统,其状态估计输出结果为 $2n-1$ 维,状态变量 $X=[V_1, V_2, \dots, V_n, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}]^T$ 。系统量测方程为:

$$Z = h(x) + v \quad (1)$$

式中: m 维量测量 $Z=[Z_1, Z_2, \dots, Z_m]^T$ 分量可能是节点电压幅值、支路潮流和节点注入功率等; $h(x)$ 为 m 维量测函数; v 为 m 维量测误差。

考虑到 PMU 能够直接量测状态量的优点,为建立快速状态估计模型,选择量测集为设置 PMU 母线的电压相量及其关联支路电流相量,可定义 PMU 量测相关集 Z_{cor} 为:

$$Z_{cor} = \{Z_i\}$$

$$Z_i = [\dot{V}_{i_0}, \dot{I}_{i_1}, \dots, \dot{I}_{i_{l_i}}]^T \quad i = 1, 2, \dots, n_p \quad (2)$$

式中: n_p 为 PMU 配置数目; i_l 为第 i 节点关联支路总数。

从 n_p 条母线 PMU 电压测量量可直接得到 $2n_p$ 个状态量,另有与各量测节点 i 相关联的 l 条线路电流测量量,即量测量 $Z=[Z_V \quad Z_I]^T$ 。 Z_V, Z_I 分别为电压相量和电流相量的量测量,其中电压相量的量测量维数 $m_V = n_p$, 电流相量的量测量维数

$$m_I = \sum_{i=1}^{n_p} i_{l_i}。$$

如果基于 GPS 同步采样的 PMU 测量结果较常规 SCADA 测量精度高,则可忽略其量测误差而直接取 PMU 测量值为估计值,从而得到一种简单的系统线性量测模型。即当配置 PMU 相关量测集量测后,对于安装了 PMU 的量测母线电压 V_M 及非量测母线电压 V_C 有如下线性表达式^[5]:

$$\begin{bmatrix} Z_V \\ Z_I \end{bmatrix} = Hx = \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{PM} & Y_{IC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_M \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: Y_{PM} 和 Y_{IC} 为由 2 种母线间相连支路对应的串联和并联导纳构成的子阵。

忽略各支路并联导纳后,得 H 的具体形式为:

$$H = \begin{bmatrix} I & 0 \\ M_{IB} Y_{BB} A_{MB}^T & M_{IB} Y_{BB} A_{CB}^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: M_{IB} 为 $m_I \times b$ 维量测支路关联矩阵; Y_{BB} 为 $b \times b$ 维支路导纳对角阵; A_{MB} 和 A_{CB} 分别为量测母线及非

量测母线对应的节点-支路关联矩阵; b 为支路数。

常规拓扑可观测分析方法可通过检验下式来判断:

$$\text{rank}(H) = 2n - 1 \quad (5)$$

式(5)意味着量测矩阵满秩,使得状态估计可以进行。但由于高维 H 直接检验的计算量巨大,实际应用困难。一般地,对应任一配置方案,式(5)不能保证成立,而且也不能提供不同母线配置 PMU 对系统可观测性的定量影响。我们希望通过定量分析配置不同位置 PMU 对系统可观测性的影响程度,来指导 PMU 配置方案的选择。

首先注意到以下可观测性条件:

条件 1 如果支路一端电压和电流相量已知,则由支路约束方程可以求出另一端电压相量。

条件 2 如果一条支路两端电压都已知,则该支路电流可计算出来。

条件 3 如果无配置 PMU 量测的零注入节点其相关支路电流仅一个未知,则由基尔霍夫电流(KCL)方程可求出该支路电流。

条件 4 未知零注入节点的所有相邻节点电压相量全部已知时,可由节点方程求出该零注入节点电压相量。

由此定义直接量测量为 PMU 量测相关集,即各 PMU 节点电压和关联支路电流;伪量测量为可通过直接量测量经欧姆定律(条件 1、条件 2)计算出的电压、电流;扩展量测量为含零注入节点经电路拓朴定律(条件 3、条件 4)计算出的电压、电流。

按照这种量测量分层思想,可将式(3)分别按量测、伪量测和扩展量测改写。对于安装了 PMU 的(量测)母线及其相关联(伪量测)母线存在下式:

$$\begin{bmatrix} Z_V \\ Z_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_M \\ V_{NC} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: Y_{IM} 和 Y_{IN} 分别为 PMU 和与其相关联母线对应的导纳子阵; V_{NC} 为待求的伪量测电压。

当没有指定参考节点时, H 阵奇异,由广义逆计算可得:

$$\begin{bmatrix} V_M \\ V_{NC} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IN} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IN} \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} Z_V \\ Z_I \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IN} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IN} \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IN} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} V_M \\ V_{NC} \end{bmatrix} \quad (7)$$

如果既无负荷也无发电的零注入母线的的所有相关联母线电压都已知时,可将该零注入母线作为扩展量测量计算如下:

量测, $V_V(j)=1$ 。再应用可观测性条件 2, 按行搜索所有伪量测节点 ($V_V(i)=1$), 对与这些节点相关联的支路电流, 设置伪量测量状态 $V_I(k)=1, k$ 为伪量测节点 i 与节点 j 之间支路; 并计算当前系统(量测量和伪量测量)可观测状态指标:

$$S_V(i) = U_V(i) + V_V(i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$S_I(k) = U_I(k) + V_I(k) \quad k = 1, 2, \dots, b \quad (11)$$

c. 扩展量测量确定规则: 经零注入母线计算的电压和电流为扩展量测量。应用可观测性条件 3, 对非 PMU 量测 ($U_V(i)=0$) 且已可观测 ($S_V(i) \neq 0$) 的零注入节点 Z 检验其相关支路电流, 当其满足仅 1 个不可观测时, 将该支路电流设置为扩展量测状态 $W_I(k)=1$ 。如果能够得到扩展电流量测, 重复上述步骤, 应用可观测性条件 2 和条件 3, 检查是否能够得到新的扩展量测量 W_V, W_I , 直到不能得到新的量测量为止。应用可观测性条件 4, 对未知零注入节点搜索其所有相邻节点电压全部可观测时, 即可求出该零注入节点电压, 则设置该零注入节点为扩展量测状态 $W_V(i)=1$, 相应的各关联支路电流亦为扩展量测状态 $W_I(k)=1$ 。

至此, 可得设置该 PMU 后的网络可观测性状态指标:

$$S_V(i) = U_V(i) + V_V(i) + W_V(i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$S_I(k) = U_I(k) + V_I(k) + W_I(k) \quad k = 1, 2, \dots, b \quad (13)$$

总结以上状态量搜索顺序如下:

$$U_V \rightarrow U_I \rightarrow V_V \rightarrow V_I \rightarrow W_I \rightarrow W_V$$

以上讨论了在 A 阵中增加 1 个 PMU 配置的状态搜索算法。当考虑在 A 阵中减少 1 个 PMU 配置时, 搜索过程相同, 只需将所有搜索到的状态量减 1 即可。按 A 阵搜索时, 利用 A 阵的高度稀疏特性, 采用稀疏矩阵编程技术, 可大大加快计算速度。当所有 n_p 个 PMU 设置完成后, 系统节点可观测状态量 $\bar{S}_V$ 和支路可观测状态量 $\bar{S}_I$ 可通过对各 PMU 状态量求和累加得到:

$$\bar{S}_V = \sum_m S_V(m) \quad \bar{S}_I = \sum_m S_I(m) \quad (14)$$

式中: $m=1, 2, \dots, n_p$ 。

由此可检验网络可观测性。当节点可观测状态量 $\bar{S}_V$ 各分量都不小于 1 时, 表明系统达到完全可观测性条件, 定义完全可观测性评价逻辑函数:

$$f_{\text{obs}}(n_p, S(n_p)) = 1 \Leftrightarrow \bar{S}_V(i) \geq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

否则:

$$f_{\text{obs}}(n_p, S(n_p)) = 0 \Leftrightarrow$$

$$\text{至少有 1 个 } \bar{S}_V(i) = 0 \quad \forall i \in n \quad (16)$$

此时, $\bar{S}_V$ 分量小于 1 的个数即为不可观测节点数目 n_n 。其中 $S(n_p)$ 为量测位置集, 文中即为 PMU 配置向量 U_V 的取值。

又定义量测量冗余度指标为:

$$R(n_p, S(n_p)) = \bar{S}_V + \bar{S}_I - (n + b) \quad (17)$$

需要指明, 此处所提出的最大量测数据冗余度, 是指在优化配置问题中, 在相同 PMU 配置数目条件下, 何种配置方案具有“最大”数据冗余度。

与常规可观测性分析方法相比, 本文算法具有简单、快速、明显和定量化的优点。

2 PMU 优化配置问题及求解方法

2.1 PMU 优化配置问题的形成

PMU 配置最优问题是指决定配置 PMU 的最小数目 n_p 和最合适的位置 $S(n_p)$, 以达到最大的网络结构可观测性和较大的数据冗余度。问题表达如下:

$$\begin{cases} J = \min \{ \max_{n_p} R(n_p, S(n_p)) \} \\ \text{s. t. } f_{\text{obs}}(n_p, S(n_p)) = 1 \end{cases} \quad (18)$$

从优化角度看, 系统可观测性问题取决于两个变量, 其一为设置 PMU 的数目 n_p , 其二为量测位置集 $S(n_p)$ 。由于至今还无法直接得出满足系统可观测性的最小 PMU 配置数目 $n_{p,\min}$, 对这类问题都是依靠迭代试探方法求解。 n_p 的搜索空间为 $[0, b]$, 而 $S(n_p)$ 的搜索空间大小为组合数 $C_n^{n_p}$ 。显然, 式(18)在数学上是一类不连续的高维非线性组合优化问题, 通常具有大量的局部极值点, 用常规的优化方法求解全局最优解一般不可能。对这类复杂非线性组合优化问题的解法可采用搜索不依赖于梯度等信息的具有全局优化能力的现代优化方法, 尤其是禁忌搜索(TS)、遗传算法(GA)和模拟退火(SM)算法。

2.2 初始 PMU 配置算法

为得到一种达到完全可观测性的 PMU 初始配置方案, 通常采用如下规则进行:

- 选择出线度最高的母线首先设置 PMU;
- 按第 1 节方法搜索找出并识别根据设定的 PMU 的量测量、伪量测量和扩展量测量, 判断系统的可观测程度;
- 如果没有达到系统全部可观测性要求, 对不可观测部分继续步骤 a, b, 直到系统达到完全可观测为止。

显然, 对任何系统按这种规则总能够得出一个满足完全可观测性的 PMU 配置方案, 但这个方案

通常不是最优方案。按此方法可得 IEEE 14 母线系统的 PMU 初始配置数目 $n_{p,ini}=5$, 其对应的状态增广关联矩阵运算结果见图 1。由图 1 可知, 此时满足可观测性评价函数 $f_{obs}(n_p, S(n_p))=1$, 量测冗余度指标为 8。

2.3 PMU 配置优化算法

本文提出的优化算法如图 3 所示。

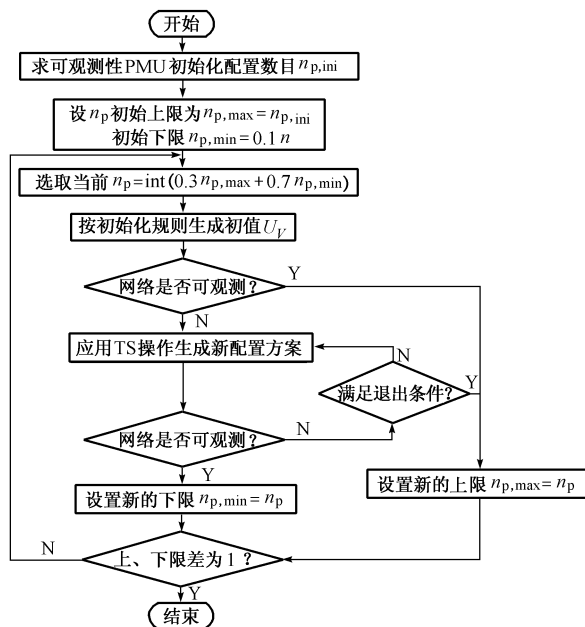


图 3 最优配置算法流程图

Fig. 3 Flow chart of OPP algorithm

对 PMU 配置数目 n_p 为一维搜索, 可采用改进二分法, 变量更新采用下式:

$$n_p = \text{int}(0.7 n_{p,min} + 0.3 n_{p,max}) \quad (19)$$

大量研究和经验表明, 只需量测网络节点总数的 $1/4 \sim 1/3$ 状态量, 就可以达到全网可观测性。所以可取初始值 $n_{p,min}=2, n_{p,max}=n_{p,ini}$ 。对于配置状态变量 $S(n_p)$ 或 U_V 的求解为组合优化问题, 需借助 TS 方法寻优。

20 世纪 70 年代初, Glover 提出了 TS 算法^[9,10], 由于其解决组合优化问题非常有效, 而迅速得到了应用。现在, TS 与 GA, SA 已经被视为最具前途的现代优化方法。文献[8]和文献[11]分析了应用 TS, GA 和 SA 方法求解 OPP 问题, 认为 TS 最有效。笔者认为这是合理的, 主要原因是它对解的搜索变换采用确定性的方式, 而不像 GA 和 SA 用随机搜索方式, 因而可避免大量无关计算, 往往能够以较少的计算代价获得较优的解。

TS 的基本思想就是采用一个变化的搜索历史记忆器(称之为禁忌表), 来指导寻优过程, 克服局部最优解。对进入禁忌表的搜索路径加以禁忌, 可避免搜

索的反复和重复, 从而在一定程度上使搜索过程避开局部极值点, 开辟新的搜索区域, 最终达到全局最优解。TS 算法基本流程可归纳如下:

步骤 1: 选择初值 x_0 及长度为 L_T 的禁忌表记录 $H=\emptyset$;

步骤 2: 在初值 x_0 邻域搜索并挑选满足禁忌要求的候选集 $C(x)$, 在其中选一个评价最优值 x_{best} , 定义当前值 $x_{now}=x_{best}$, 并更新禁忌表的 H 记录;

步骤 3: 若满足终止规则, 停止计算; 否则, 以当前值 x_{now} 继续步骤 2、步骤 3。

具体应用在本文流程图 3 中, TS 算法可归纳如下:

步骤 1: 选择当前配置 $S(n_p)$ (并置初值), 迭代计数器 k 为某一常数, 禁忌表长度为 L_T ; 按关联矩阵拓扑方法分析网络可观测性程度, 按评价函数评价当前配置;

步骤 2: 在当前配置 $S(n_p)$ 邻域, 按偏移规则产生新的配置方案组 $C(S(n_p))$, 按关联矩阵拓扑方法分析网络可观测性程度, 按评价函数评价当前配置; 挑选最优值记录到禁忌表, 置 $k=k+1$;

步骤 3: 分析是否终止规则, 否则继续步骤 2。

TS 主要有偏移、禁忌表和解禁 3 种操作, 以下对算法实现的关键技术问题分别予以讨论。

a. 偏移实现了 TS 的局部搜索功能, 即在每次迭代中对当前解进行一些指定或随机偏移, 这是在解的邻域中按指定规则或随机采样搜索其他可行解; 本文局部搜索采用解分量简单变化方式, 每次只选取一个 PMU 位置进行变化, 即只取当前解分量的 2 个元素变化, 例如解 $S(n_p)$ 从 (01011) $\rightarrow$ (00111), (10011) 等; 对邻域中产生的候选集对象可为 3~4 个。在解的变化过程中应用如下规则: 对出线度最小的节点优先考虑移出 PMU; 对出线度最大的节点优先考虑设置 PMU。实践证明, 采用这样的经验启发规则, 能够加快搜索速度, 提高解的质量。

b. 为防止对已搜索到的局部最优解进行反复搜索而陷入局部最优解, 用禁忌表存储已搜索的历史路径, 在迭代时对表中已存在的历史搜索偏移将不再进行, 一般对表中最近几次偏移操作禁止进行; TS 算法最主要的参数就是禁忌表的长度 L_T , 它决定了算法收敛速度和解的质量。 L_T 过短难以得到较好的解, 太长则加大计算时间。根据待求问题的规模, 本文取变化的 L_T , 即 $L_T \in [L_{T,min}, L_{T,max}]$, 变化的依据是被禁对象的目标值和解的邻域结构。

c. 解禁准则决定何时一个历史的 TS 偏移可以重新进行(重载)。本文使用的 TS 解禁准则是在整

个计算过程中,当前 TS 偏移得到了目前总体最优解时可以被重载使用。

用 TS 方法求解最优配置问题,可通过最小化如下罚函数来评价:

$$\min J(n_p, S(n_p)) = \sigma n_u(n_p, S(n_p)) + n_p - R_n(n_p, S(n_p)) \quad (20)$$

式中: σ 为一大正数; $n_u(n_p, S(n_p))$ 为对应某一 $S(n_p)$ 的不可观测节点数。

式(20)分别包含了对系统可观测性、PMU 数目和量测冗余度 3 个指标的评价。显然,只有当系统满足完全可观测($n_u=0$)、PMU 数目 n_p 最小且冗余度指标 $R(n_p, S(n_p))$ 最大时,评价函数才能达到最小值。

搜索超过设定迭代限值而仍不能达到系统可观测,则认为需增加 PMU 配置数目 n_p ; 当搜索到 PMU 配置数目 n_p 不能再减小且冗余度指标不能再增大时,就中止搜索。

系统搜索初值的设定对优化求解的收敛性和解的质量具有重要的影响。经验表明,在出线度大的节点设置 PMU,对增加系统可观测性程度帮助最大,因此,保留 PMU 初始配置中出线度最大的前 n_p 个 PMU 为 TS 优化算法初值,将比按随机方法选择初值更好。

3 算例

本文算法应用于研究 IEEE 14 母线系统、新英格兰 39 母线系统和 IEEE 57 母线系统的 PMU 最优配置问题中。

3.1 IEEE 14 母线系统

该系统只有 1 个零注入节点,其初始配置需要 5 个 PMU,最优 PMU 配置需要 3 个 PMU,如图 4 所示,配置结果如图 2 所示。

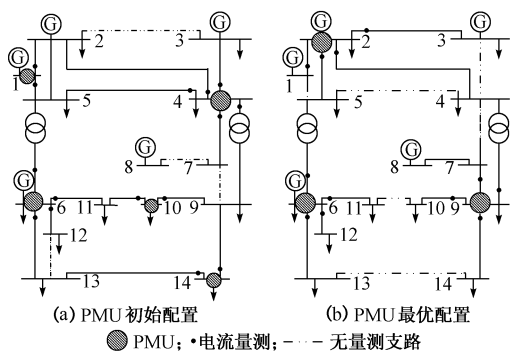


图 4 IEEE 14 母线系统 PMU 配置方案

Fig. 4 Initial and optimal PMU placement scheme of IEEE 14-bus system

3.2 新英格兰 39 母线系统

该系统有 12 个零注入母线,PMU 配置结果如图 5 所示。初始配置需 15 个 PMU,量测冗余度指标

为 23。优化后 PMU 减少到 10 个,量测冗余度指标为 17。

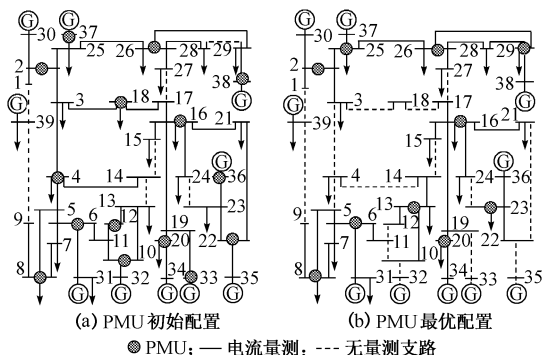


图 5 新英格兰 39 母线系统配置结果

Fig. 5 Initial and optimal PMU allocation of New England (NE) 39-bus system

3.3 IEEE 57 母线系统

该系统有 15 个零注入母线,PMU 配置结果如图 6 所示。初始配置需 16 个 PMU,量测冗余度指标为 37。优化后 PMU 减少到 13 个,量测冗余度指标为 14。

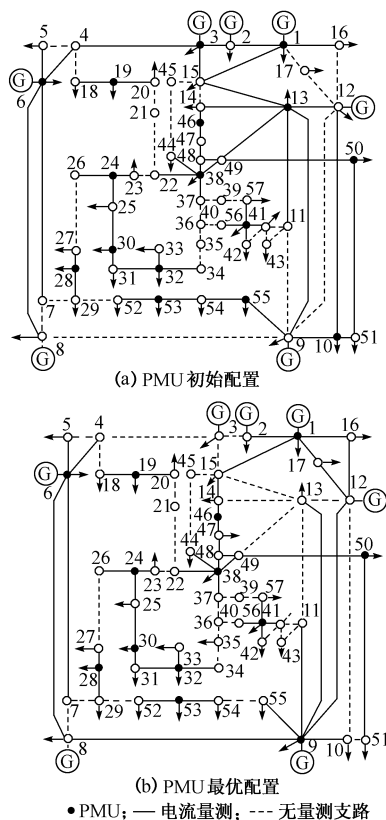


图 6 IEEE 57 母线系统配置结果

Fig. 6 Initial and optimal PMU allocation in IEEE 57-bus system

上述仿真结果列于表 1,表明本文方法是有效、可行的。

表 1 测试系统 PMU 配置结果
Table 1 Simulation results

测试系统	n	$n_{p,ini}$	R_{ini}	$n_{p,min}$	$\frac{n_{p,min}}{n}$	R_{min}
IEEE 14	14	5	8	3	0.214	2
NE 39	39	15	23	10	0.250	17
IEEE 57	57	16	37	13	0.228	14

4 结论与展望

当考虑配置 PMU 将现有 SCADA 系统升级为新一代广域量测系统,并基于 PMU 广域量测进行快速状态估计时,应用本文的可观测性分析方法指导 PMU 的配置,可以达到较好的经济性能。本文方法的特点是直接对关联矩阵进行处理,考虑量测配置简洁、清晰,结果不受数值运算精度的影响;速度快,分析结果直观,不仅可判断电网是否整体可观测,还可在分析过程中考虑所定义的最大量测数据冗余度,使状态估计能够保证较高的精度。由于关联矩阵的高度稀疏特性,本文算法运算快速,可用于可观测性和状态估计的在线实时分析。

本文采用 TS 优化方法,保证了全局寻优。但应该注意到,可观测分析依赖于系统拓扑结构,如果系统拓扑结构发生较大变化,必须重新搜索;而且应考虑到量测数据因某种原因(如故障等)而无法得到情况下的系统可观测性分析和状态估计。这是我们的下一个研究方向。

参 考 文 献

1 Monticelli A, Wu F F. Network Observability Theory. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 4(5): 1042~1048
2 Phadke A G. Synchronized Phasor Measurements in Power Systems. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(2): 10~15
3 闵 勇,丁仁杰,韩英铎,等(MinYong, Ding RenJie, Han Yingduo, et al). 一次系统事故的同步相量测量结果分析

(Analysis of Synchronized Phasor Measurement Result of a Fault in Heilongjiang Eastern Power System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1998,22(7):10~13
4 Bttrnell J R O, Butts M M, Sterlirm P S. Power System Applications for Phasor Measurement Units. IEEE Computer Applications in Power, 1994, 7(1): 8~13
5 Phadke A G. State Estimation with Phasor Measurements. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(1): 233~241
6 王克英,穆 钢,陈学允(Wang Keying, Mu Gang, Chen Xueyun). 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置研究(Precision Improvement and PMU Placement Studies on State Estimation of a Hybrid Measurement System with PMUs). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE),2001(8)
7 卢志刚,许世范,史增洪,等(Lu Zhigang, Xu Zhifan, Shi Zenghong, et al). 部分电压和电流相量可测量时电压相量的状态估计(State Estimation of Voltage Phasors Based on Part of Voltage and Current Phasors Measurement). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2000,24(1):42~44
8 Cho K S, Shin J R, Hyun S H. Optimal Placement of Phasor Measurement Units with GPS Receiver. In: Fifth International Conference on Power System Control. Seoul (South Korean): 2001
9 Glover F, Laguna M. Tabu Search. Boston Hardbound; Kluwer Academic Publishers, 1997
10 Mori H, Sone Y. Tabu Search Based Meter Placement for Topological Observability in Power System State Estimation. In: Proceedings of the 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference. Rio de Janeiro (Brazil): 1999
11 Baldwin T L, Mili L, Boisen M B, et al. Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(5): 707~715

彭疆南(1974—),男,博士研究生,研究方向为电力系统分析控制和优化方法。E-mail: pengjn@ps.tsinghua.edu.cn
孙元章(1954—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统分析和非线性控制。
王海风(1958—),男,讲师,研究方向为电力系统控制和 FACTS 应用。

AN OPTIMAL PMU PLACEMENT ALGORITHM FOR FULL NETWORK OBSERVABILITY

Peng Jiangnan¹, Sun Yuanzhang¹, Wang Haifeng²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Bath University, Bath, UK)

Abstract: A novel topology method of network observability using augmented incidence matrix is studied in this paper based on linear measurement model of power system. The optimal PMU placement problem is formulated as guaranteeing full network observability, maximizing the redundancy measurement and having minimum number of PMU. And TS method is proposed to solve the combinatorial optimization problem. The effectiveness and flexibility of the proposed algorithms are illustrated with numerical simulation using IEEE 39-bus system, IEEE 57-bus system and NE 39-bus system.

This project is supported by National Key Basic Research Special Fund of China (No. G1998020315) and the National Outstanding Young Investigator Grant (No. 59825104).

Key words: network observability analysis; phasor measurement unit (PMU); optimal PMU placement (OPP); tabu search (TS); state estimating