

DOI: 10.7667/PSPC170140

基于递推最小二乘法的多端口外网静态等值参数辨识方法

谢仕炜¹, 胡志坚¹, 吴方劼², 宁月¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209)

摘要: 为了能够在外部网络信息不足的情况下在线等值系统网络, 提出了利用递推最小二乘法实时辨识多端口外网静态等值参数的方法。该方法利用阻断外网后内网的一步式状态估计, 在不要求内网支路开断情况下获取优化后的实测边界信息。基于该边界信息, 选取多端口扩展电压源网络模型和 π 型等值支路分别对外部网络建模, 并采用含有数据纠错功能的两步式递推最小二乘法辨识外网等值参数。IEEE30节点系统和湖南528节点系统的仿真结果验证了该方法的准确性, 以及该方法可应用于在线外部网络的静态等值。

关键词: 外网静态等值; 递推最小二乘法; 参数辨识; 状态估计; 多端口网络

Static equivalent parameter identification method of multi-port external network based on recursive least squares algorithm

XIE Shiwei¹, HU Zhijian¹, WU Fangjie², NING Yue¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Grid Beijing Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: In order to estimate the equivalent parameters of the external network online when its external network information is insufficient, this paper proposes a method to real-timely identify the static equivalent parameters of multi-port external network using recursive least squares algorithm. This method utilizes the one-step state estimation of the internal network after blocking the external network, and obtains the actual measurements of optimized boundary information of the internal network branches without outage the branches. Based on the boundary information, the multi-port extended voltage source network model and the π -type equivalent branches are selected to model the external network respectively. The two-step recursive least square method with data correction function is adopted to identify the equivalent parameters of the external network. The simulation results of the IEEE30 system and Hunan 528-node system verify the accuracy of the algorithm and it can be applied to the static equivalence of the online external network.

This work is supported by Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20110141110032).

Key words: static equivalent of external network; recursive least square algorithm; parameter identification; state estimation; multi-port network

0 引言

当前电力市场竞争机制的不断发展加剧了电力系统网络信息的分散性。在电网潮流计算和电压稳定性分析中, 由于信息交换存在安全性和保密性, 外部网络的变化不能总是及时被内部控制中心所掌握。因此, 研究如何通过内部网络的量测数据对外

部系统建模和参数辨识^[1-2], 并利用参数对系统进行电压稳定分析^[3-4]和保护控制研究^[5]有着重要作用。

现有对外部系统静态等值的方法主要包括拓扑法和非拓扑法。拓扑法主要有 Ward 等值^[6]、REI 等值^[7]及其改进方法。由于上述方法一般只用于离线状态, 并建立在已知完整的外网拓扑结构和潮流信息的前提下, 不能用于在外部网络信息未知情况下的在线等值。

非拓扑法只需通过内部系统的量测数据, 就能估计外部网络的等值模型。在单端口外网的等值应

用中, 广泛采用戴维宁模型的等值方法^[8-9], 通过边界量测数据进行迭代求解。该方法模型简单, 不能反映更加复杂的外部网络, 主要应用于电压静态稳定性分析领域。在我国的大规模电力互联网络中, 通常等值所面临的边界节点数量较多, 因此需要研究适用于多端口互联情形下的外网等值方法。文献[10]建立了两端口扩展网络的多时段最小二乘估计模型, 但多时段的假设前提是等值参数在一定时间内不变, 而实际外部等值参数是变化的, 不利于在线估计, 且外网等值阻抗可能存在数值不稳定的情况。针对上述问题, 文献[11]提出增加外网等值参数的无理约束模型, 提高迭代过程的稳定性。文献[12]在两端口基础上, 将其扩展到多端口情形。上述基于内网实测信息对外网参数估计时都采用了最小二乘模型建立迭代方程。仿真结果表明, 当边界端口数量大、系统互联方式复杂的情形下, 最小二乘法计算量增大, 在线进行连续参数估计时, 可能存在数值发散问题, 不利于实时监测系统状态。为此, 本文提出利用递推最小二乘估计方法, 对多端口外网模型进行参数辨识。该方法利用递推过程以跟踪参数的缓慢变化, 计算量小, 实时性好, 可对参数进行连续监测。

1 阻断外部的内网状态估计理论分析

设网络(包含边界)有 N 个节点, 给定 m 组量测数据和各支路参数后, 则状态参数 $x = [U^T \varphi^T]^T$ 有 $2N-1$ 个待估计量, $U_i (i=1, 2, \dots, N)$ 和 $\varphi_i (i=2, 3, \dots, N)$ 分别代表第 i 个节点的电压幅值和相位。可得到量测方程和目标函数如式(1)。

$$\begin{cases} z = h(x) + v \\ J_0(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: z 为量测数据; $h(\cdot)$ 为非线性量测矢量函数; v 为误差向量; R^{-1} 为权重对角阵。使目标函数 $J_0(x)$ 最小的解 x 为所得状态估计量。

为了单独研究内网状态估计, 需要对网络进行划分处理。将量测方程改写为

$$\begin{cases} z_I = h(x_I) + v_I \\ z_B = h(x_B) + v_B \\ z_E = h(x_E) + v_E \end{cases} \quad (2)$$

式中, 变量下标 I、B、E 分别代表内部、边界和外部网络集合。

则状态估计方程的矩阵表达式为

$$H^T R^{-1} H \Delta x = H^T R^{-1} \Delta z \quad (3)$$

量测方程的雅可比矩阵分块如式(4)。

$$H = \begin{bmatrix} H_{II} & H_{IB} & 0 \\ H_{BI} & H_{BB} & H_{BE} \\ 0 & H_{EB} & H_{EE} \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此可获得量测方程的矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} \Delta z_I \\ \Delta z_B \\ \Delta z_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{II} & H_{IB} & 0 \\ H_{BI} & H_{BB} & H_{BE} \\ 0 & H_{EB} & H_{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_I \\ \Delta x_B \\ \Delta x_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_I \\ v_B \\ v_E \end{bmatrix} \quad (5)$$

为消去外网的变量参数 Δx_E , 令

$$\hat{H} = H_{BE} \Delta x_E / \Delta x_B$$

将 $H_{BE} \Delta x_E$ 近似表示为 $\hat{H} \Delta x_B$, 可通过式

$$\hat{H} \Delta x_B = H_{BE} \Delta x_E = \Delta z_B - H_{BI} \Delta x_I - H_{BB} \Delta x_B$$

获得 $H_{BI} \Delta x_I$ 和 $H_{BB} \Delta x_B$ 的计算值。

将式(5)改写为

$$\begin{bmatrix} \Delta z_I \\ \Delta z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{II} & H_{IB} \\ H_{BI} & H_{BB}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_I \\ \Delta x_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_I \\ v_B \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $H_{BB}^* = H_{BB} + \hat{H}$ 。

将矩阵两边同乘以 $H_{IB}^T R_{IB}$, 可得

$$\begin{bmatrix} H_{II}^T & H_{BI}^T \\ H_{IB}^T & H_{BB}^{*T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_I^{-1} & \\ & R_B^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{II} & H_{IB} \\ H_{BI} & H_{BB}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_I \\ \Delta x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z_I \\ \Delta z_B \end{bmatrix} \quad (7)$$

即得到对应阻断外网的状态估计迭代表达式:

$$H_{IB}^T B_{IB} H_{IB} \Delta x_{IB}^k = H_{IB}^T R_{IB} \Delta z_{IB}^k \quad (8)$$

通过阻断外部网络, 并给定 $m(m > 2N-1)$ 组量测数据使得待估计的系统全为可观测区域, 即形成了可独立的观测岛^[13]。通过加权最小二乘法的潮流迭代, 能获得各节点电压幅值和相位的状态估计量和各支路潮流量测值, 并将边界状态估计的结果作为辨识外部等值网络的依据。

2 外网等值模型

基于上述估计方法所获得的边界估计量, 可利用递推的最小二乘法辨识外部网络参数。传统的简单挂机等值模型^[14]和常规 Ward 等值均不能反映外部变化对内部网络的影响。为保证外网参数辨识的有效性, 需要建立能够准确反映内外网络功率变化对内部网络影响的等值模型, 本文综合考虑多端口的两种外部连接情形, 并做出如下假设:

1) 边界节点集合通过输电线路与外部网络集合互联并有较大电气距离。由于互联等效阻抗随着线路距离的增大而增大, 在距离较大情况下可认为互联阻抗趋近无穷大。故假设各互联支路之间彼此不存在耦合关系。

2) 内外系统互连节点数量多, 网络分布较为集

中。假设边界节点之间的影响不能忽略,即线路之间存在强相关性。

2.1 多端口π型支路等值模型

当内网与外网通过输电线路互联时,可建立多端口π型支路模型等值外部网络,如图1所示。

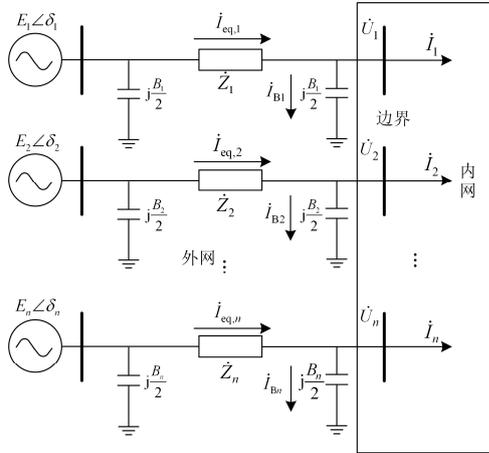


图1 互联电网多端口π型支路等值模型

Fig. 1 π type equivalent branch model of multi-port interconnected power grid

图1中,实线方框内为可观测的内部网络,设系统共有n个边界节点, \dot{U}_i 和 \dot{i}_i 分别为通过上述状态估计所获得的边界节点电压和注入电流, \dot{i}_{Bi} 为边界节点流过对地充电电容的无功电流, $\dot{i}_{eq,i}$ 为边界处对应外网等值支路流过的等效电流, E_i 和 δ_i 分别为外部等值虚拟发电机电动势和相位角, $Z_i = R_i + jX_i$ 为等值支路阻抗, B_i 为联络输电线路对地充电电容电纳, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

由于π型支路模型等值方式计及边界对地电容,即考虑了外部无功功率对内部潮流的影响和对边界电压的支撑作用,使得模型在无功响应方面有更高的精度。

2.2 多端口扩展电压源支路模型

考虑边界节点之间互联的影响,将外部网络等值为多端口扩展电压支路模型(Extended voltage-source branch equivalent model, EVM),如图2所示。

图2中,实线方框内为可观测的内部网络,设系统共有n个边界节点, \dot{U}_i 和 \dot{i}_i 分别为通过上述状态估计所获得的边界节点电压和注入电流; $\dot{Z}_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$ ($i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j$)为边界节点集合之间的互联等效阻抗, $\dot{Z}_{eqi} = R_{eqi} + jX_{eqi}$ 为外网等值支路等效阻抗; \dot{i}_{ij} 为边界节点i和j之间流过的电

流; $\dot{i}_{eq,i}$ 为流过外部支路等值阻抗的电流。

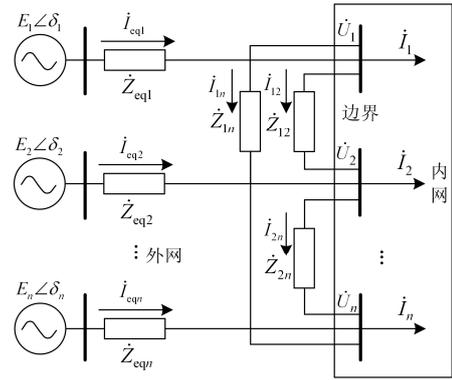


图2 互联电网多端扩展电压源支路等值模型

Fig. 2 Extended voltage-source branch equivalent model of multi-port interconnected power grid

3 递推最小二乘法辨识外网等值模型

3.1 含遗忘因子的递推最小二乘法

递推的最小二乘法^[15-18]根据不断更新的采样数据对原估计量进行修正,将前一时刻的参数估计值作为后一时刻的初值进行递推计算,减少系统辨识时间的同时保证了初值计算的稳定性。为了消除随时间推移引发的数据饱和现象,在原有递推最小二乘法基础上引入遗忘因子,递推公式如式(9)。

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + \mathbf{G}_k [\mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\theta}_{k+1}] \\ \mathbf{G}_k = \mathbf{P}_k \mathbf{H}_{k+1}^T [\lambda + \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_k \mathbf{H}_{k+1}^T]^{-1} \\ \mathbf{P}_{k+1} = [\mathbf{P}_k - \mathbf{G}_k \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_k] / \lambda \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\hat{\theta}_k$ 为第k时刻的估计参数; \mathbf{G}_k 为第k时刻的增益系数矩阵; \mathbf{H}_k 和 \mathbf{z}_k 分别为第k时刻观测方程的输入和输出; \mathbf{P}_k 为第k时刻的估计值方差矩阵; λ 为遗忘因子。

3.2 多端口π型支路参数辨识

为考虑充电电容对等值电路无功特性的影响,采用π型支路模型。需要获得的参数包括对地支路和联络支路,因此需要进行两步式辨识。

由图1可得

$$\dot{i}_i = \dot{i}_{eq,i} - j \frac{B_i}{2} \dot{U}_i \quad (10)$$

$$U_i \angle \varphi_i = E_i \angle \delta_i - \dot{i}_{eq,i} (R_i + jX_i) \quad (11)$$

从上式可知,首先应对边界处的电流和对地电纳参数进行辨识。为了避免递推获得的对地充电电容参数 B_i 含有虚部,将边界节点电流关系方程按照实部和虚部展开为直角坐标形式如式(12)。

$$\begin{cases} I_{iR} = I_{eq,iR} + \frac{B_i}{2} U_{iI} \\ I_{iI} = I_{eq,iI} - \frac{B_i}{2} U_{iR} \end{cases} \quad (12)$$

式中, 各变量下标中的 R 和 I 分别表示该变量的实部和虚部。

可获得线性量测方程及其矩阵形式如式(13)。

$$\mathbf{Z}_i = \mathbf{H}_i \hat{\boldsymbol{\theta}}_i + \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (13)$$

其中:

$$\mathbf{Z}_i = [I_{iR} \ I_{iI}]^T$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_i = [I_{eq,iR} \ I_{eq,iI} \ B_i]^T$$

$$\mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{U_{iI}}{2} \\ 0 & 1 & -\frac{U_{iR}}{2} \end{bmatrix}$$

将上述量测方程代入式(9)进行第一步参数辨识, 可获得支路等效电流参数 $I_{eq,i}$ 和对地充电电容参数 B_i 。利用所得参数可进行第二步参数辨识, 其电压关系的量测方程与式(11)类似, 写成如下的矩阵形式。

$$\begin{bmatrix} U_{iR} \\ U_{iI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{eq,iR} & I_{eq,iI} \\ 0 & 1 & -I_{eq,iI} & -I_{eq,iR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{iR} \\ E_{iI} \\ R_i \\ X_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

同理, 可通过递推最小二乘迭代公式获得辨识的等值参数。

3.2 多端口扩展电压源支路参数辨识

由于边界节点之间存在互联阻抗, 节点 KCL 电流关系方程中包含多个待辨识参量, 对于电流的递推同样需要进行两步式辨识以获得参数辨识结果。其方程为

$$\begin{cases} \dot{I}_i = \dot{I}_{eq,i} - \sum_{j=1, j \neq i}^n \dot{Y}_{ij} (\dot{U}_i - \dot{U}_j) \\ U_i \angle \varphi_i = E_i \angle \delta_i - \dot{I}_{eq,i} (R_i + jX_i) \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\dot{Y}_{ij} = 1/\dot{Z}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ 为边界节点互联阻抗。

则可获得对应的量测方程为

$$\mathbf{Z}'_i = \mathbf{H}'_i \hat{\boldsymbol{\theta}}'_i + \boldsymbol{\varepsilon}'_i \quad (16)$$

其中:

$$\mathbf{Z}'_i = [I_{iR} \ I_{iI}]^T$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}'_i = [I_{eq,iR} \ I_{eq,iI} \ G_{i1} \ B_{i1} \ G_{i2} \ B_{i2} \ \cdots \ G_{in} \ B_{in}]^T$$

$$\mathbf{H}'_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -U_{i1R} & U_{i1I} & -U_{i2R} & U_{i2I} & \cdots & -U_{inR} & U_{inI} \\ 0 & 1 & -U_{i1I} & -U_{i1R} & -U_{i2I} & -U_{i2R} & \cdots & -U_{inI} & -U_{inR} \end{bmatrix}$$

变量的下标 R 和 I 分别表示对应参数直角坐标系下的实部和虚部。通过第一步的递推最小二乘法迭代可以获得扩展外部等值支路的电流参数 $\dot{I}_{eq,i}$ 。第二步递推的情形与上述式(14)相同, 故不再赘述。

3.3 参数辨识递推过程纠错

电力系统的状态具有随机性。在投切负荷、系统短路或断线故障等情况下都将引起暂态过程, 使得参数辨识的准确程度受到严重影响。为了保证参数辨识的准确性, 提高算法的容错能力, 在递推过程中需要排除奇异数据的影响。本文提出了一种判别奇异数据的方法。

在 π 型支路模型中, 进行第一步递推时, 需保证对地电纳 B_i 的解为实数根。选取第 k 和第 $k+1$ 次递推的数据为例进行定性分析。在开始第 $k+1$ 次递推时, 可利用第 k 次辨识获得的参数及第 $k+1$ 次获得的内网量测数据代入计算。对式(12)的第 k 次和第 $k+1$ 次方程两边取平方可得到

$$\begin{cases} I_{eq,ik}^2 = (I_{iR}^k - \frac{B_{ik}}{2} U_{iI}^k)^2 + (I_{iI}^k + \frac{B_{ik}}{2} U_{iR}^k)^2 \\ I_{eq,ik}^2 = (I_{iR}^{k+1} - \frac{B_{ik}}{2} U_{iI}^{k+1})^2 + (I_{iI}^{k+1} + \frac{B_{ik}}{2} U_{iR}^{k+1})^2 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $I_{eq,ik}$ 为第 k 次等效支路电流参数的幅值; B_{ik} 为第 k 次对地充电电纳; U_{iR}^k 、 U_{iI}^k 、 I_{iR}^k 、 I_{iI}^k 代表第 k 次递推时边界节点的电压电流量测值; U_{iR}^{k+1} 、 U_{iI}^{k+1} 、 I_{iR}^{k+1} 、 I_{iI}^{k+1} 分别代表第 $k+1$ 次递推时刻边界节点电压和电流量测值。

整理并消去 $I_{eq,ik}$ 可得关于 B_i 的二元一次方程为

$$aB_i^2 + bB_i + c = 0 \quad (18)$$

式中:

$$a = [(U_{iR}^k)^2 + (U_{iI}^k)^2 - (U_{iR}^{k+1})^2 - (U_{iI}^{k+1})^2] / 4$$

$$b = (U_{iR}^k I_{iI}^k - U_{iI}^k I_{iR}^k) - (U_{iR}^{k+1} I_{iI}^{k+1} - U_{iI}^{k+1} I_{iR}^{k+1})$$

$$c = (I_{iR}^k)^2 + (I_{iI}^k)^2 - (I_{iR}^{k+1})^2 - (I_{iI}^{k+1})^2$$

通过内网的状态估计容易获得相应的量测值, 即 a 、 b 、 c 均为已知。仅当 $\Delta \geq 0 (\Delta = b^2 - 4ac)$ 时, B_i 存在实数解, 量测数据可用于两步式递推。若 $\Delta < 0$, 则 B_i 的解为复数解, 可能由于系统发生暂态过程或存在过大的量测噪声引起, 因此舍弃该组测量数据重新进行一次测量。

由于扩展电压源模型的第一步递推涉及辨识参数较多, 可利用第二步递推时的数据作为判别奇异数据的依据。由于此时待辨识的未知变量有三个, 需要取三组递推数据。通过第一步递推辨识可得参

数 $\dot{I}_{\text{eq}i}$ 。为方便定性分析, 取 $\dot{I}_{\text{eq}i}$ 为相位参考, 即 $\dot{I}_{\text{eq}i} = I_{\text{eq}i} \angle 0^\circ$ 。将三组递推数据 $(k-1, k, k+1)$ 代入式(11)并对两边平方可得

$$\begin{cases} E_{ik}^2 = (I_{\text{eq}i}^{k-1} R_{ik} + U_{iR}^{k-1})^2 + (I_{\text{eq}i}^{k-1} X_{ik} + U_{iI}^{k-1})^2 \\ E_{ik}^2 = (I_{\text{eq}i}^k R_{ik} + U_{iR}^k)^2 + (I_{\text{eq}i}^k X_{ik} + U_{iI}^k)^2 \\ E_{ik}^2 = (I_{\text{eq}i}^{k+1} R_{ik} + U_{iR}^{k+1})^2 + (I_{\text{eq}i}^{k+1} X_{ik} + U_{iI}^{k+1})^2 \end{cases} \quad (19)$$

展开并消去未知的 E_{ik} 可获得 X_{ik} 和 R_{ik} 关系式为

$$X_{ik} = \alpha R_{ik} + \beta \quad (20)$$

式中:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{BF - AG}{DF - AI}, \quad \beta = \frac{CF - AH - EF + AJ}{DF - AI}, \\ A &= (I_{\text{eq}i}^{k-1})^2 - (I_{\text{eq}i}^k)^2, \quad B = 2(I_{\text{eq}i}^{k-1} U_{iR}^{k-1} - I_{\text{eq}i}^k U_{iR}^k), \\ C &= (U_{iR}^{k-1})^2 - (U_{iR}^k)^2, \quad D = 2(I_{\text{eq}i}^k U_{iI}^k - I_{\text{eq}i}^{k-1} U_{iI}^{k-1}), \\ E &= (U_{iI}^{k-1})^2 - (U_{iI}^k)^2, \quad F = (I_{\text{eq}i}^{k-1})^2 - (I_{\text{eq}i}^k)^2, \\ G &= 2(I_{\text{eq}i}^{k-1} U_{iR}^{k-1} - I_{\text{eq}i}^{k+1} U_{iR}^{k+1}), \quad H = (U_{iR}^{k-1})^2 - (U_{iR}^{k+1})^2, \\ I &= 2(I_{\text{eq}i}^{k+1} U_{iI}^{k+1} - I_{\text{eq}i}^{k-1} U_{iI}^{k-1}), \quad J = (U_{iI}^{k+1})^2 - (U_{iI}^{k-1})^2. \end{aligned}$$

再将式(20)代入原方程组消去 X_{ik} , 可获得关于 R_{ik} 的一元二次方程组如下:

$$\begin{aligned} (1 + \alpha^2) R_{ik}^2 + \left(\frac{B}{A} + 2\alpha\beta + \frac{D}{A} \alpha \right) R_{ik} + \\ \left(\beta^2 + \frac{D}{A} \beta + \frac{E+C}{A} \right) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

同理, 可通过计算并判断 Δ 的正负来对该组数据进行纠错。

4 参数辨识的计算流程

利用递推最小二乘法辨识外网等值参数的算法, 其主要步骤如下所述。

1) 利用阻断外部的内网状态估计实时获取边界的量测数据 (\dot{I}_i, \dot{U}_i) 。

2) 选取外网等值模型。针对不同模型特点, 建立如式(13)或式(16)的递推最小二乘迭代公式。

3) 对参数进行两步式递推最小二乘辨识。

a. 若外网模型为 π 型支路。在第一步辨识之前先进行数据纠错, 通过式(18)判断 Δ 的正负。若 $\Delta < 0$ 则舍弃该组数据, 若 $\Delta \geq 0$ 则开始第一步辨识, 即通过式(13)的递推计算可获得 $\dot{I}_{\text{eq}i}$ 和 B_i ; 将已辨识获得的参数 $\dot{I}_{\text{eq}i}$ 代入式(14)进行第二步辨识, 获得外网等值参数 \dot{E}_i 和 \dot{Z}_i 。

b. 若外网模型为扩展电压源支路。先进行第一步辨识可获得边界互联阻抗 \dot{Z}_{ij} 及 $\dot{I}_{\text{eq},i}$; 利用已辨识

的 $\dot{I}_{\text{eq},i}$ 对数据进行纠错分析, 即判断式(22)的 Δ 正负。若 $\Delta < 0$ 则舍弃该组数据, 若 $\Delta \geq 0$ 则开始第二步辨识, 可获取外网等值参数 \dot{E}_i 和 \dot{Z}_i 。

5 算例仿真分析

本文分别采用了 IEEE30 节点系统和湖南电网的部分节点系统, 对所提方法进行仿真分析。在 IEEE30 节点系统中选取 10、12、28 为边界节点, 1-9、11、13、16、17 为内部系统节点, 其余为外部系统节点。计算等值之前阻断外网情况下的内网状态估计, 取 1 号节点为平衡节点。

湖南电网系统中含有 528 条母线, 101 台发电机和 887 条线路, 发电机总有功功率为 20 743 MW, 总无功功率为 41 133 Mvar。选取系统中编号 163(X20bml)、232(X06zjt)、462(X02zznz)、492(X06hydz) 为系统边界节点, 97、98、417、167、235、249、243、172、174、173、179 为内部节点, 其余为外部节点。取 97(Xzz3s) 为平衡节点。

对于递推最小二乘, 选取 10 组内网量测数据建立迭代公式, 并取遗忘因子 $\lambda=0.6$ 。对每次量测值加入 0.5% 的高斯白噪声。

为了衡量等值误差, 引入最大相对误差^[7]为

$$\begin{cases} \Delta P = \max \left\{ \left| \frac{P_e - \hat{P}_e}{P_e} \right| \times 100\%, e \in \psi_e \right\} \\ \Delta Q = \max \left\{ \left| \frac{Q_e - \hat{Q}_e}{Q_e} \right| \times 100\%, e \in \psi_e \right\} \end{cases} \quad (22)$$

式中: ΔP 和 ΔQ 分别表示有功功率和无功功率的最大相对误差; $P_e(Q_e)$ 和 $\hat{P}_e(\hat{Q}_e)$ 分别表示有功功率(无功功率)的真实值和估计值; ψ_e 为所有可观测线路集合; e 为各支路编号。

同理可以定义最大安全误差如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_p = \max \left\{ \left| \frac{P_e - \hat{P}_e}{S_{\text{base}}} \right| \times 100\%, e \in \psi_e \right\} \\ \varepsilon_q = \max \left\{ \left| \frac{Q_e - \hat{Q}_e}{S_{\text{base}}} \right| \times 100\%, e \in \psi_e \right\} \end{cases} \quad (23)$$

式中, S_{base} 为功率基准值。其余参数同式(22)。

5.1 IEEE30 系统仿真

以 IEEE30 系统^[19-20]为例, 当系统处于稳态, 功率分布平衡时, 三种模型等值参数的辨识结果如表 1 所示。表 1 中, 变量的下标 1 和 2 分别代表节点 10 和 12 的参数。限于篇幅, 本文只列出了部分等值参数的辨识结果。若无特别说明, 表中参数均为标么值, 下同。

表 1 IEEE30 的三种模型的等值参数辨识结果
Table 1 Equivalent parameter identification results from three models of IEEE30 system

等值参数	Ward 等值/p.u.	π 型等值/p.u.	EVM 等值/p.u.
P_{eq1}	-0.333 64	-0.321 78	-0.324 28
Q_{eq1}	-0.024 39	-0.024 396	-0.024 65
P_{eq2}	-0.259 77	-0.257 67	-0.257 27
Q_{eq2}	-0.091 94	-0.091 78	-0.091 85
Z_{eq1}	—	0.295-j0.0103	0.295-j0.022
Z_{eq2}	—	0.244+j0.042	0.240+j0.085
B_1	0.2363	-0.0118	—
B_2	0.0167	0.0433	—
Y_{12}	0.882-j1.6712	—	-0.003+j0.004
E_1	—	0.947 \angle -15.74°	0.955 \angle -15.67°
B_2	—	0.977 \angle -14.96°	0.99 \angle -14.92°
ΔP	0.20%	0.77%	0.25%
ΔQ	0.16%	0.14%	0.90%

从表 1 可知, 在稳态情况下, π 型支路与扩展电压源支路的外网等值参数 (Z_{eq1} 、 Z_{eq2} 、 E_1 、 E_2) 较为接近, 不同之处在于 π 型电路在边界节点处考虑了对地充电电容, 且参数随着辨识过程改变, 起到了更新无功补偿的作用, 对无功变化有更好的响应效果; 而扩展电压源支路考虑边界之间的互联阻抗, 充分考虑边界集合相互之间的影响。Ward 等值方式采用的是拓扑法, 在稳态下有有功功率误差最小, 但其等值的前提是假设外网注入电流不变, 因此对于无功的等值误差较大。本文仿真时对边界并联无功补偿, 以电容的形式给出等值参数(B_1 、 B_2), 故表 1 中 Ward 等值在稳态情况下无功误差较小。以上三种等值结果的功率误差均较小, 说明上述的模型均适用于系统无负荷和功率变化的稳态情况。

为了运用递推最小二乘法跟踪参数变化, 模拟在线辨识过程, 本文假定全网负荷节点的有功和无功功率在每个时刻按 0.8%(或 0.4%)的步长递增, 发电机节点的有功和无功功率按 0.5%(或 0.2%)的步长递增, 不平衡功率由内网的平衡机组分担。分别对上述三种模型进行仿真, 并取边界节点 10 处的等值数据, 仿真结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 随着负荷水平逐渐增大, Ward 等值的有功和无功功率误差逐步增大, 不能真实反映系统实际的功率变化。而使用递推最小二乘法辨识参数获得的边界等值功率能够实时跟踪负荷变化情况, 并且与真实值曲线基本吻合。为进一步说明当系统发生故障时, 采用递推方法的等值参数辨识的有效性, 图 4 给出系统含有故障时的三种模型功

率参数变化曲线。假设负荷水平和发电机出力按照上述方式增长, 且内部网络的 6-10 支路在 $k=6$ 时发生断路故障。

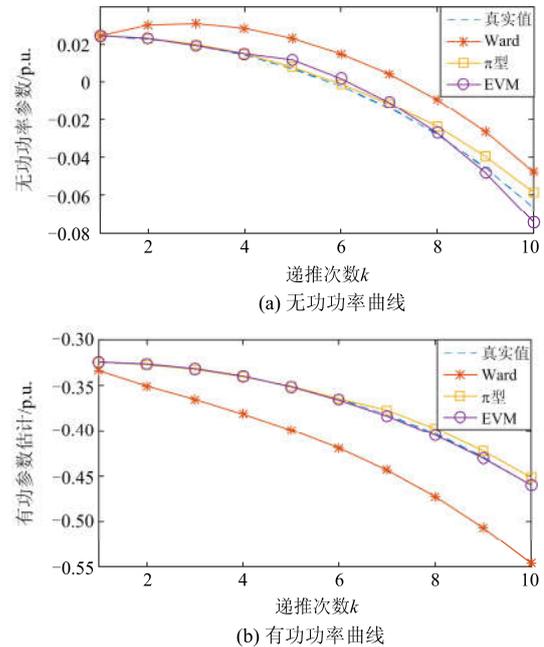


图 3 负荷水平不同的等值参数变化曲线

Fig. 3 Curves of equivalent parameters in different load levels

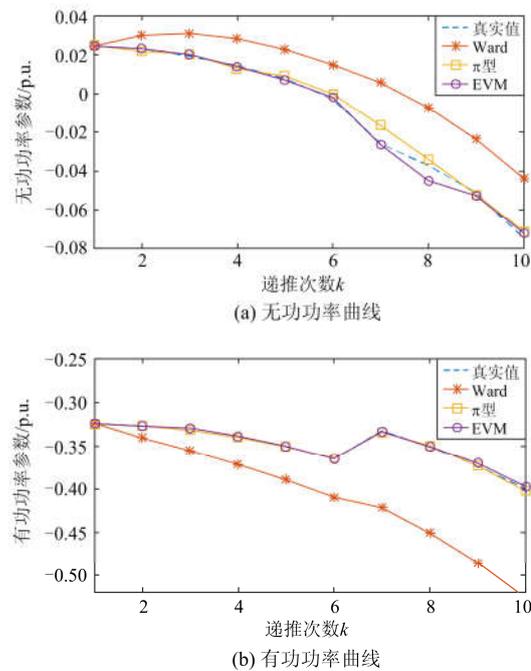


图 4 含有故障情况的等值参数变化曲线

Fig. 4 Curves of equivalent parameters with fault condition

由图 4 可知, 在 $k=6$ 时刻发生断路故障后, 边界节点处的注入有功功率明显减小, 无功功率增大。

Ward 等值模型的功率误差进一步增大,且无法反映故障时刻的功率变化,只能适用于在离线场合进行分析;而递推最小二乘法能够响应故障时刻功率的突变,实时跟踪参数变化。表 2 给出了不同负荷增长水平(0.4%和 0.8%)和有故障发生的部分辨识结果。

表 2 不同时刻的参数辨识结果

负荷	模型	E_1	R_{eq1}	X_{eq1}	ε_p	ε_q
增长	π 型	$1.02\angle -10.8^\circ$	0.092	-0.005	0.02	0.06
4%	EVM	$1.04\angle -16.5^\circ$	0.029	0.054	0.06	0.86
增长	π 型	$1.13\angle 27.9^\circ$	0.731	-0.056	0.83	0.74
8%	EVM	$1.02\angle -18.5^\circ$	0.117	0.208	0.05	0.78
断线	π 型	$1.04\angle -18.8^\circ$	-0.017	0.004	0.18	0.64
时刻	EVM	$1.02\angle -17.9^\circ$	-0.102	0.021	0.29	0.79

由表 2 可知,两种模型的参数辨识结果均能够适应不同负荷水平及故障情形,并且在含量测噪声情况下,功率最大安全误差均不超过 1%,保持较高的辨识精度,保证系统进行稳定性分析的实时性和准确度。

5.2 湖南电网系统仿真结果

为说明该方法适用于工程中的较大系统,使用湖南电网进行仿真测试,并以 429 边界节点作为测量对象,表 3 给出 429 节点部分数据的仿真结果。

表 3 湖南节点 429 的参数辨识结果

负荷	模型	E_{429}	R_{eq1}	X_{eq1}	ε_p	ε_q
增长	π 型	$1.039\angle -15.6^\circ$	0.292	-0.015	0.16%	0.19%
4%	EVM	$1.05\angle -19.5^\circ$	0.229	0.034	0.09%	1.01%
增长	π 型	$1.10\angle -17.8^\circ$	0.623	-0.039	0.41%	0.89%
8%	EVM	$1.04\angle -19.2^\circ$	0.751	0.122	0.15%	0.93%
断线	π 型	$1.04\angle -24.1^\circ$	-0.097	0.073	0.17%	0.64%
时刻	EVM	$1.04\angle -23.0^\circ$	-0.115	0.093	0.23%	0.98%

由表 3 可以看出,该方法适用于工程较大的系统,在负荷的有功功率和无功功率均匀增长的情况下,系统的最大安全误差均不超过 1%。

为进一步说明内部系统在参数辨识后的潮流结果具有较高的精度,本文对湖南电网等值和参数辨识后的内部网络进行校核。表 4 和表 5 给出了参数辨识前后的电压和潮流信息对比。

通过对内部系统辨识前后电压和潮流信息的对比,可以看出:电压前后基本一致,电压相角存在较小误差,且最大相角误差不大于 2.6%,系统有功潮流前后最大安全误差不超过 0.47%,无功潮流误差前后最大安全误差不超过 0.7%,均满足工程需求。

表 4 湖南系统辨识前后电压对比

Table 4 Voltage comparison before and after system identification in Hunan

节点号	节点名	参数辨识前		参数辨识后	
		V/p.u.	δ /p.u.	V/p.u.	δ /p.u.
97	Xzz3S	1.0	0	1.0	0
98	Xzz4S	1.0	0.822	1.00	0.831
167	X02yzc	1.02	-5.346	1.02	-5.339
172	X02wjz	1.015	-6.259	1.015	-6.099
173	X02lds	1.014	-6.259	1.014	-6.250
174	X02kongZ	1.016	-6.002	1.016	-5.992
179	X02zhonx	1.014	-6.243	1.014	-6.231
235	X06jwnc	1.014	-8.192	1.014	-8.181
243	X06xhs	1.013	-8.449	1.013	-8.440
249	X06hengd	1.015	-8.249	1.015	-8.230
417	X02zzzB	1.021	-5.118	1.021	-5.110
163	X20bml	1.019	-5.273	1.019	-5.119
232	X06zjt	1.013	-8.787	1.013	-8.778
461	X02zznz	1.015	-6.165	1.015	-6.155
492	X06hydz	1.021	-7.811	1.021	-7.803

表 5 湖南系统辨识前后潮流对比

Table 5 Power flow comparison before and after system identification in Hunan

首节点	末节点	参数辨识前		参数辨识后	
		有功/ MW	无功/ Mvar	有功/ MW	无功/ Mvar
167	417	-248.44	-63.00	-248.26	-63.44
461	172	-10.85	2.04	-10.79	1.78
172	173	48.33	13.98	48.33	13.98
172	179	43.19	12.27	43.19	12.29
172	174	-69.98	-23.87	-69.98	-23.90
163	167	20.10	-17.99	20.21	-18.12
167	172	189.48	37.41	189.38	38.11
167	235	146.12	-9.55	146.13	-9.71
235	243	80.22	6.64	80.24	6.82
235	249	9.83	-12.97	9.82	-13.22
232	243	-33.97	0.96	-33.92	0.74
492	249	37.39	17.61	37.43	17.84
417	97	-230.14	-65.25	-229.67	-65.67
417	98	-267.00	-61.68	-267.02	-62.03

6 结论

本文提出了基于递推最小二乘的静态等值参数辨识方法,IEEE30 节点和湖南电网系统的仿真结果表明:

1) 利用阻断外部的内网状态估计法可以在不知晓外网信息的情况下获取内部网络和边界的潮流数据和信息,并且所提的数据纠错算法能够避免奇异数据对递推的影响,提高了算法的稳定性。

2) 递推最小二乘法辨识功率参数在负荷水平变化和故障情况下最大安全误差都不超过 1%, 相比传统的 Ward 等值具有更高的精度和更快的响应速度。

3) 随着递推次数增加, 功率参数曲线逐级逼近真实曲线, 说明该方法相比多时段估计方法具有更强的负荷跟踪和实时辨识的能力, 适合应用于在线辨识。

参考文献

- [1] 姬源, 杨欣, 王燕, 等. 基于支路等值的拓扑辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 129-134.
JI Yuan, YANG Xin, WANG Yan, et al. A topology estimation method based on branch equivalence[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 129-134.
- [2] 季文伟, 王茂海, 马平, 等. 基于实测 PMU 数据的风电综合负荷参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 42-47.
JI Wenwei, WANG Maohai, MA Ping, et al. Wind power comprehensive load parameter identification based on PMU data[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 42-47.
- [3] 朱永强, 刘光晔, 廖庭坚, 等. 计及负荷电压静态特性的电力系统最小负荷裕度的快速评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 23-28.
ZHU Yongqiang, LIU Guangye, LIAO Tingjian, et al. Rapid assessment of power system minimum load margin considering load voltage static characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 23-28.
- [4] 李题印, 韩永强, 胡晓琴, 等. 分布式发电接入电网的静态电压稳定特性及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 8-13.
LI Tiyin, HAN Yongqiang, HU Xiaoqin, et al. Characteristics of static voltage stability for distributed generation integrated into power system and its impacts analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 8-13.
- [5] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [6] WARD J B. Equivalent circuits for power-flow studies[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1949, 68(1): 373-382.
- [7] GAVRILAS M, GAVRILAS G, IVANOV O. REI equivalents with synchrophasor measurements[J]. Interdisciplinarity in Engineering, 2009.
- [8] 颜伟, 文一字, 余娟, 等. 基于戴维南等值的静态电压稳定广域切负荷控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 88-92.
YAN Wei, WEN Yiyu, YU Juan, et al. A wide-area load shedding strategy based on Thevenin equivalence and considering static voltage stability[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 88-92.
- [9] 牟善科, 丁涛, 顾伟, 等. 基于偏差校正的戴维南等值参数在线跟踪改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 23-28.
MOU Shanke, DING Tao, GU Wei, et al. An improved algorithm for on-line tracking Thevenin equivalent parameters based on deviation correction[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 23-28.
- [10] 颜伟, 李世明, 陈俊, 等. 基于内网实测信息的两端口外网静态等值参数估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 101-106.
YAN Wei, LI Shiming, CHEN Jun, et al. Parameter estimation for two-port external network static equivalent model on the basis of internal network measured information[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 101-106.
- [11] 郭文鑫, 李世明, 朱柳, 等. 考虑量测误差计及等值参数物理约束的外网静态等值方法[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 216-221.
GUO Wenxin, LI Shiming, ZHU Liu, et al. A method for static equivalence of external network considering measurement error and physical constraints of equivalent parameters[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 216-221.
- [12] 余娟, 朱柳, 颜伟, 等. 基于内网实测信息的多端口外网静态等值方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 32-37.
YU Juan, ZHU Liu, YAN Wei, et al. Static equivalence of external multi-port network based on measured information of internal network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 32-37.
- [13] 张海波, 张伯明, 孙宏斌, 等. 电力系统状态估计可观性分析中关于量测岛合并的理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 46-49.
ZHANG Haibo, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. Theory analysis about measurement islands' combination in observability analysis in power system state estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 46-49.

- [14] 张海波, 张伯明, 王俏文, 等. 不同外网等值模型对 EMS 应用效果影响的试验研究[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 1-6.
ZHANG Haibo, ZHANG Boming, WANG Qiaowen, et al. A test investigation on effect of different external network equivalent models on EMS applications[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 1-6.
- [15] SINGH S K, SINHA N, GOSWAMI A K, et al. Robust estimation of power system harmonics using a hybrid firefly based recursive least square algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 80: 287-296.
- [16] DING F, WANG X, CHEN Q, et al. Recursive least squares parameter estimation for a class of output nonlinear systems based on the model decomposition[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2016, 35(9): 1-16.
- [17] 王旭冉, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 计及电动汽车充放电负荷的分布式电压稳定监控方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 43-49.
WANG Xuran, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Distributed voltage stability assessment and control considering electric vehicle charging and discharging load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 43-49.
- [18] REICHBACH N, KUPERMAN A. Recursive-least-squares-based real-time estimation of supercapacitor parameters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31: 1-3.
- [19] 徐基光. 自适应网格密度改进粒子群算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 21-25.
XU Jiguang. Improved particle swarm optimization algorithm based on adaptive grid density and its application on multi-objective reactive power optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 21-25.
- [20] 舒隽, 刘祥瑞. 考虑风电的电源电网协调规划[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 93-99.
SHU Jun, LIU Xiangrui. Generation and transmission coordinated planning considering wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 93-99.

收稿日期: 2017-02-06; 修回日期: 2017-07-30

作者简介:

谢仕炜(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化; E-mail: 994927636@qq.com

胡志坚(1969—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、新能源接入电网与分布式电力系统; E-mail: zhijian_hu@163.com

吴方劼(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为直流输电及直流系统设计。E-mail: wufangjie@chinasperi.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)