

外网扩展电压源支路 Ward 等值模型及其在 状态估计中的应用

李世明¹, 卢建刚¹, 王茜², 王彬¹, 张超², 颜伟²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 随着互联电网建设的加强, 各区域网络之间的联系日益紧密, 在内网状态估计时考虑外部电网的影响已成为一种趋势。现有的基于外网扩展 Ward 等值的状态估计方法, 不仅需要外网提供等值阻抗参数, 还需要等值状态信息, 同时要求等值状态和内网状态在采样时间上保持一致。在实际系统中, 互联电网一体化的计算周期和内网独立状态估计的计算周期难以保持一致, 从而易因采样时间的不同步而使外网等值状态和内网不匹配, 给内网状态估计带来较大误差。鉴于此, 在已有的外网扩展电压源支路 Ward 等值模型的基础上, 提出了等值阻抗参数和状态参数的计算方法。该模型与扩展 Ward 等值相比, 相同之处是等值阻抗支路的结构及其参数, 不同之处是等值注入功率。后者在边界节点, 前者在等值电源节点。相应所提模型的等值状态信息只有等值电源节点的电压和功率, 该状态量可以基于节点功率平衡方程仅通过边界节点的内网电压和支路功率来确定。因此, 所提模型的状态量与内网的状态量完全匹配, 不存在扩展 Ward 等值的状态不匹配问题, 从而可以大幅度提高含外网等值独立内网状态估计的精度。同时, 所提模型继承了扩展 Ward 等值的阻抗支路结构与参数, 因而在全网信息已知时具有与扩展 Ward 等值相当的等值精度。IEEE39 节点系统的仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 外网静态等值; 状态估计; 扩展 Ward 等值; 节点功率平衡; 静态安全分析

Extended voltage-source-branch ward-equivalent-circuit model of external network and its application in state estimation

LI Shiming¹, LU Jiangang¹, WANG Qian², WANG Bin¹, ZHANG Chao², YAN Wei²

(1. Electric Power Dispatching Control Center, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510600, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology

(Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: With the strengthening of interconnection power grid construction, the connection between the regional networks is becoming increasingly close, and it's becoming a trend to consider the influence of external power grid in the internal network state estimation. The existing state estimation method based on the extended Ward equivalence of external grid, needs both the impedance parameters and state parameters of the external network equivalent model, and requires that the equivalence state and the internal network state remain consistent in the sampling time. In the actual power system, the calculation cycles of interconnected power grid and internal network independent state estimation are difficult to maintain consistency, and it's easy to lead to large errors due to the mismatch of the state information of the internal network and external network. Based on the existing extended voltage-source-branch Ward-equivalent-circuit model, this paper presents the calculation method of equivalent impedance parameters and state parameters. Compared with the extended Ward equivalent model, the same is the structure and parameters of the equivalent impedance branch, the difference is the equivalent injection power. The latter is at the boundary node and the former is equivalent to the power node. And the equivalent state information of the proposed model only has the voltage and power of the equivalent power node, which can be calculated from the voltage and power information of the boundary nodes based on the node

power balance. Accordingly, the state information of the proposed model is completely matched with the state information of the internal network, and there is no state mismatching problem of the extended Ward equivalence, which can greatly improve the accuracy of the independent internal network state estimation with the external network equivalent. At the same time, the proposed model inherits the impedance branch structure and parameters of extended Ward equivalence, so that when the whole network information is known, it has the similar equivalent accuracy with the extended Ward equivalent model. The simulation result on IEEE 39 bus system verifies the correctness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477017).

Key words: external network static equivalence; state estimation; extended Ward equivalence; node power balance; static security analysis

0 引言

随着电网规模的不断扩大^[1-2], 互联电网中外部网络如何处理将对内网的状态估计和静态安全分析产生很大影响。在实际电力系统中, 由于技术原因或行业机密等^[3-4]问题, 各互联子系统间完备数据的实时交换难以进行, 国内 EMS(Energy Management System)系统常采用简单挂等值机^[5-6]的外网等值模型, 将内网与外网之间的联络线作为恒定注入功率来处理。但该模型在内网模拟开断操作时计算误差很大。同时, 由于没有考虑外网拓扑结构的影响, 在内网含有不良数据^[7-10], 特别是当不良数据距离边界节点较近时, 会给内网独立状态估计的精度带来很大误差。

针对内网独立状态估计时外部网络如何等值的问题, 目前国内外已有的相关研究较少。文献[11]提出了一种基于模型拼接与外网等值的网省在线模型协调方法, 把外网处理为扩展 Ward 等值模型, 但在应用于内网独立状态估计时, 为满足量测的可观性^[12], 该模型不仅需要外网提供等值阻抗参数, 还需要等值状态信息, 同时要求等值状态和内网状态在采样时间上保持一致。而在实际电力系统中, 内网独立状态估计的计算周期约每 1 分钟一次, 互联电网一体化的计算周期约每 5 min 一次, 即约每 5 min 向内网发送一次外网等值模型参数, 考虑到在这 5 min 内外网的状态可能发生较大变化, 从而易因计算周期的不同步而使外网等值状态和内网的状态不匹配, 给内网状态估计结果带来较大误差^[13]。

针对上述在状态估计时由于计算周期不同步而导致内、外网的状态不匹配的问题, 文献[14]提出了外网扩展电压源支路 Ward 等值模型, 但其将外网处理为黑箱, 即在外网信息完全未知的情况下基于内网实测信息对外网等值模型的阻抗和状态参数进行计算, 从而存在非线性方程迭代求解的初值设置问题和计算收敛问题。鉴于此, 本文在已有外网扩展电压源支路 Ward 等值模型基础上, 提出了等

值阻抗参数和状态参数的计算方法。该模型的等值阻抗参数和扩展 Ward 等值模型相同, 保证了两者具有类似的等值精度。该模型的外网注入功率等值在电源节点而非边界节点, 且电源节点的状态参数可由边界节点的电压和功率信息再基于支路功率平衡关系计算得到, 从而在应用于内网独立状态估计时, 其不需要提供任何外网状态信息, 避免了外网等值状态和内网的不匹配问题, 大幅度提高了内网的状态估计精度。最后, 以 IEEE39 节点系统为例, 仿真验证了本文所提方法的有效性。

1 外网扩展电压源支路 Ward 等值模型的建立

本文所提外网扩展电压源支路 Ward 模型的等值参数是在外网扩展 Ward 等值模型的基础上进行计算的, 因此下面首先对扩展 Ward 等值参数的计算进行简要介绍。

1.1 外网扩展 Ward 等值模型

外网扩展 Ward 等值模型^[15]的示意图如图 1 所示, b_i 和 b_j 为边界节点的节点编号, Y_{ij} 为边界节点间的等值导纳。

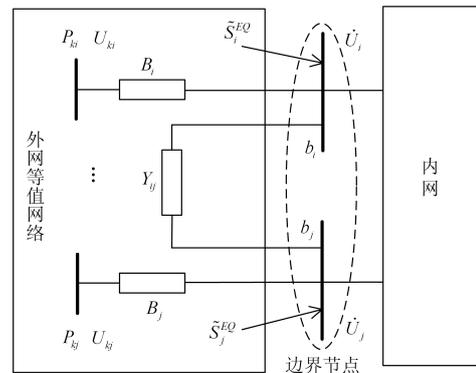


图 1 外网扩展 Ward 等值模型

Fig. 1 Extended Ward equivalent model of external network

对于边界节点 b_i , P_{ki} 和 U_{ki} 为等值发电机的有功输出和电压幅值, B_i 为扩展支路上的等值电纳,

\dot{U}_i 为边界节点的电压相量, \tilde{S}_i^{EQ} 为外网在边界节点处的等值注入功率, 其他变量的含义与之类似。

1.1.1 等值模型阻抗参数的计算

将网络节点划分为内网节点 I 、边界节点 B 和外网节点 E , 其中外网节点又可分为外网 PQ 节点和外网 PV 节点, 分别用 Q 和 V 表示。在不计外部电网对地支路的情况下, 可由式(1)得到扩展支路上的等值电纳值。

$$\mathbf{Y}_{BV}^{EQ} = \mathbf{Y}_{BV} - \mathbf{Y}_{QV} \mathbf{Y}_{QQ}^{-1} \mathbf{Y}_{BQ} \quad (1)$$

式中: \mathbf{Y}_{BV} 代表原网络中边界节点和外网 PV 节点之间的节点导纳矩阵, 其它子阵具有类似意义; \mathbf{Y}_{BV}^{EQ} 代表根据高斯消元法^[16]消去外网 PQ 节点后, 边界节点和外网 PV 节点之间的等值节点导纳矩阵, 扩展支路上的等值电纳值 B_i 为相应边界节点 b_i 与外网 PV 节点之间的支路导纳之和(即 \mathbf{Y}_{BV}^{EQ} 中对应边界节点 b_i 所在行的所有元素相加), 再取相反数后的电纳部分。

可由式(2)得到边界节点之间的等值导纳值。

$$\mathbf{Y}_{BB}^{EQ} = \mathbf{Y}_{BB} - \mathbf{Y}_{BE} \mathbf{Y}_{EE}^{-1} \mathbf{Y}_{EB} \quad (2)$$

式中: \mathbf{Y}_{BB}^{EQ} 代表根据高斯消元法消去所有外网 PQ 节点和 PV 节点后, 边界节点间的等值节点导纳矩阵; \mathbf{Y}_{EB} 代表原网络中外网节点和边界节点之间的节点导纳矩阵, 其他子阵具有类似意义。

至此, 该模型中所有阻抗参数均已求得。

1.1.2 等值模型状态参数的计算

边界节点上的外网等值注入功率可由式(3)^[17]计算得到。

$$\tilde{\mathbf{S}}_B^{EQ} = \tilde{\mathbf{S}}_B^{0*} - [\text{diag}(\mathbf{U}_B^{0*}) \mathbf{Y}_{BE} \mathbf{Y}_{EE}^{-1} (\tilde{\mathbf{S}}_E^0 / \dot{\mathbf{U}}_E^0)^*] \quad (3)$$

式中: $\tilde{\mathbf{S}}_B^{EQ}$ 代表外网在边界节点上的等值注入功率; $\tilde{\mathbf{S}}_E^0$ 、 $\dot{\mathbf{U}}_E^0$ 分别代表基态下外网节点的注入功率和电压相量, 其他子阵具有类似意义。

边界节点 b_i 所对应外网等值发电机的有功出力 and 电压幅值为

$$\begin{cases} P_{ki} = 0 \\ U_{ki} = U_i^0 \end{cases} \quad (4)$$

即等值发电机的有功出力为 0, 电压幅值和基态运行方式下与之相联的边界节点电压幅值相同。

至此, 该模型中所有状态参数均已求得。

1.1.3 扩展 Ward 等值模型应用于状态估计的问题

由式(3)可知, 在扩展 Ward 等值模型中, 边界节点上等值注入功率的计算需要已知基态运行方式下外网的潮流状态。若外网信息未知, 则不能得到外网在边界节点上的等值注入功率值。

因此, 在将该扩展 Ward 等值模型应用于内网独立状态估计时, 若外网状态信息未知, 则会因不能得到边界节点上的等值注入功率而造成状态估计不可观。若外网状态信息已知, 则同时要求外网等值状态和内网状态在采样时间上保持一致。考虑到在实际电力系统中, 内网独立状态估计的计算周期约每 1 min 一次, 互联电网一体化的计算周期约每 5 min 一次, 而在这 5 min 内外网的状态可能发生较大变化, 从而易因计算周期的不同步而使外网等值状态和内网的状态不匹配, 给内网状态估计结果带来较大误差。

1.2 外网扩展电压源支路 Ward 等值模型

外网扩展电压源支路 Ward 等值模型的示意图如图 2 所示。 P_{Ei} 、 P_{Ej} 和 U_{Ei} 、 U_{Ej} 为等值发电机的有功输出和电压幅值, \tilde{S}_{Li} 和 \tilde{S}_{Lj} 是内网在边界节点处的等值注入功率, \tilde{S}_i 和 \tilde{S}_j 是扩展支路上靠近边界节点处的支路功率, 其他相同变量代表的含义和图 1 类似。

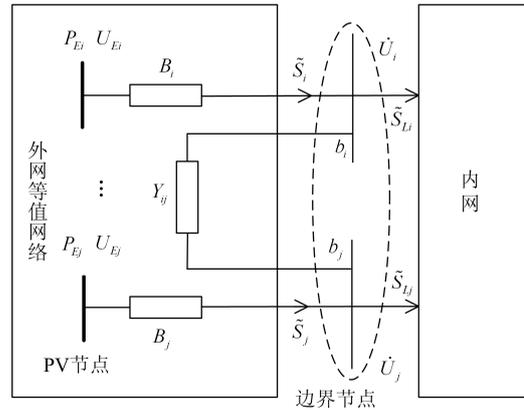


图 2 外网扩展电压源支路 Ward 等值模型

Fig. 2 Extended voltage-source-branch Ward-equivalent-circuit model of external network

在该模型中, 其阻抗参数和扩展 Ward 等值的阻抗参数相同, 可由式(1)和式(2)计算得到。对于状态参数, 可由边界节点 b_i 的电压和功率信息得到扩展支路上靠近边界节点处的支路功率 \tilde{S}_i 为

$$\begin{cases} P_i = P_{Li} + U_i^2 g_{ij} - U_i U_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = Q_{Li} - U_i^2 b_{ij} + U_i U_j (b_{ij} \cos \theta_{ij} - g_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: g_{ij} 和 b_{ij} 为边界节点间的等值电导和电纳; P_{Li} 和 Q_{Li} 是内网在边界节点的等值注入有功功率和无功功率; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$, 为两边界节点的电压相角差。

再基于支路功率平衡关系, 可以得到边界节点 b_i 所对应等值发电机的有功输出和电压幅值为

$$\begin{cases} P_{Ei} = P_i \\ U_{Ei} = \sqrt{\left(U_i + \frac{Q_i}{U_i B_i}\right)^2 + \left(\frac{P_i}{U_i B_i}\right)^2} \end{cases} \quad (6)$$

其它边界节点所对应等值发电机的有功输出和电压幅值的计算公式与之类似。至此, 该模型中所有参数均已求得。

由式(5)和式(6)可知, 在扩展电压源支路 Ward 等值模型中, 外网等值状态参数可由边界节点的电压和功率信息再基于支路功率平衡关系计算得到, 从而不需要已知外网的实际潮流信息, 仍可对外网等值状态进行计算。

因此, 在将该扩展电压源支路 Ward 等值模型应用于内网独立状态估计时, 不需要提供任何外网状态信息, 仍可满足状态估计的可观性, 从而避免了外网等值状态和内网的不匹配问题, 大幅度提高了内网的状态估计精度。下面将对其进行详细阐述。

2 考虑外网扩展电压源支路 Ward 等值模型的状态估计方法

2.1 指数加权最小二乘抗差估计方法

对于具有 n 个节点和 b 条支路的内网系统, 若有 f 个边界节点, 可建立非线性量测方程^[13]如式(7)所示。

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{r} \quad (7)$$

式中: \mathbf{z} 是 m 维的量测向量; \mathbf{x} 是 $(2n + 4f - 1)$ 维的状态量; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 是 m 维的量测方程; \mathbf{r} 是 m 维的量测残差。

在进行状态估计时, 考虑零注入量测特点^[18]和不同量测的残差对权函数的影响, 借助标准化残差的指数型权函数^[9-20], 可建立目标函数如式(8)所示^[21]。

$$\begin{cases} \min J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{W} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \\ \text{s.t. } \mathbf{c}(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{c}(\mathbf{x})$ 是零注入功率等式约束方程; \mathbf{W} 是指数量型权函数对角阵, 即

$$\mathbf{W} = \text{diag}\{w_1(r_1), w_2(r_2), \dots, w_m(r_m)\} \quad (9)$$

其元素可表达为

$$w_i(r_i) = R_i^{-1} \exp\left(-\frac{1}{2} r_{Ni}^2\right) \quad (10)$$

式中: R_i^{-1} 是固定权重矩阵 \mathbf{R}^{-1} 中量测 i 的权重值; r_{Ni}^2 是量测 i 的标准化残差^[12,22]。

用拉格朗日乘子法对式(8)进行计算, 可以得到状态修正量的计算式如式(11)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}^k \\ \lambda^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{H}^T \mathbf{W} (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^k)) \\ -\mathbf{c}(\mathbf{x}^k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{H} = \partial \mathbf{h}(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x}$, 是 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 的雅克比矩阵;

$\mathbf{C} = \partial \mathbf{c}(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x}$, 是 $\mathbf{c}(\mathbf{x})$ 的雅克比矩阵。

令 $\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x}^k$, 得到修正后的状态值, 并以此为初值进行下一次的迭代计算, 直至满足收敛条件为止。

2.2 量测方程的构造

在对一个电力网络进行状态估计时, 若收集到的量测量通过量测方程能够覆盖该网络所有母线的电压幅值和相角, 则可以通过状态估计得到这些母线的电压幅值和相角估计值, 也即是称该网络是可以观测^[12]的。

针对考虑外网扩展电压源支路 Ward 等值模型的状态估计方法, 其外网等值模型的状态参数未知, 因此量测方程中不包含外网信息。由于内网量测信息可以实时获取, 因此量测方程可以覆盖内网所有节点。此时若边界节点处的注入功率量测值已知, 则其节点功率平衡方程可表示如式(12)所示。

$$\begin{aligned} \hat{P}_{Gi} - \hat{P}_{Di} &= -U_i U_{Ei} B_i \sin(\theta_i - \theta_{Ei}) + \\ &U_i \sum_{k \in \varphi_i} U_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \\ \hat{Q}_{Gi} - \hat{Q}_{Di} &= U_i U_{Ei} B_i \cos(\theta_i - \theta_{Ei}) + \\ &U_i \sum_{k \in \varphi_i} U_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: \hat{P}_{Gi} 和 \hat{P}_{Di} 为边界节点 b_i 处发电机输出有功功率量测值和负荷有功功率量测值; \hat{Q}_{Gi} 和 \hat{Q}_{Di} 为边界节点 b_i 处发电机输出无功功率量测值和负荷无功功率量测值; U_{Ei} 和 θ_{Ei} 为外网等值发电机的电压幅值和相角; U_i 和 θ_i 为边界节点的电压幅值和相角; B_i 为扩展支路上的等值电纳; φ_i 表示与边界节点 b_i 直接相连的内网节点集合(含节点 b_i 本身); G_{ik} 和 B_{ik} 为网络节点导纳矩阵中节点 b_i 和节点 k 之间的互电导和互电纳。

由式(12)可知, 边界节点的节点功率平衡方程可以覆盖边界节点和与边界节点直接相连节点(包括外网等值发电机)的电压幅值和相角, 且由 2 个边界节点的有功、无功注入功率量测值可以建立 4 个量测方程, 考虑到 2 个外网等值发电机的电压幅值和相角未知, 即需要求解 4 个状态变量, 因此恰好满足量测可观性, 能够进行内网状态估计计算。通过状态估计得到外网等值发电机的电压幅值和相角后, 即可基于节点功率平衡方程得到其有功输出。

至此，可以估计出外网等值模型的所有状态参数。

综上，考虑外网扩展电压源支路 Ward 等值模型的状态估计方法，不需要提供外网等值模型的任何状态参数，只需内网和边界节点的量测信息，即可满足网络的可观性，从而进行状态估计计算。

3 算例分析

3.1 仿真方案

以 IEEE 39 节点系统^[23]为例，其节点 3 和 17 作为边界节点，节点 1、2、25~30 和 37~39 作为外网节点，其余节点为内网节点，同时断开支路 9-39，并将节点 17 的负荷设为 10-j20 MVA，形成两端口互联电网的仿真系统。

3.1.1 静态安全分析

为验证所提外网扩展电压源支路 Ward 等值模型的正确性，结合外网扩展 Ward 等值模型，分别利用这两种等值模型计算内网有、无合解环操作时的潮流分布，并通过与全网潮流计算结果的对比如来对比这两种等值模型的精度。

3.1.2 状态估计误差分析

为验证所提外网扩展电压源支路 Ward 等值模型是否能提高状态估计的计算精度，在进行仿真分析时，先对算例系统进行全网潮流计算，再在潮流真值的基础上叠加随机量测误差构成内网量测值，在此可取注入功率、支路功率、电压幅值的量测误差的标准差^[24]分别为 0.01、0.008 和 0.004。再基于量测信息对内网进行独立状态估计时，由外网等值模型的不同可有以下方案：

方案① 将外网处理为扩展 Ward 等值模型，此时它的阻抗参数可通过外网拓扑结构直接得到。在对内网进行状态估计时，取外网全部量测信息(即边界节点的电压幅值、注入有功功率、无功功率，等值发电机的有功输出和电压幅值)、再结合内网量测信息进行计算。

方案② 将外网处理为扩展电压源支路 Ward 等值模型，其等值阻抗参数可通过外网拓扑结构、即扩展 Ward 等值直接得到，且不需要提供外网状态参数、只需内网量测信息即可进行状态估计计算。

考虑到内网在进行状态估计时，外网状态与构造等值模型时相比可能发生了较大变化，因此为模拟这种变化，假设外网电源电压幅值提高了 1%，负荷水平分别提高了 2%、5%、10%，此时不平衡有功和无功功率由外网 PV 节点承担，再将内网进行状态估计后的结果、与潮流计算的真值相减得到误差，最后比较上述两种方案的误差大小。

3.2 仿真结果

3.2.1 静态安全分析

无量测误差的情况下，本文所提扩展电压源支路 Ward 等值模型、与扩展 Ward 等值模型，这两种等值模型的参数如表 1 所示。表 2 为静态安全分析时开断内网支路分别为 3-4、5-6 和 36 节点的发电机的误差， e_{r,V_m} 、 $e_{r,P}$ 、 $e_{r,Q}$ 、 $e_{s,P}$ 、 $e_{s,Q}$ 分别表示电压幅值相对误差最大值、有功功率相对误差最大值、无功功率相对误差最大值、有功功率安全误差最大值、以及无功功率安全误差最大值。

由表 1 和表 2 可知：

(1) 两种等值模型的阻抗参数是完全相同的。

(2) 当内网线路或者发电机发生开断时，两种等值模型的误差相近且均较小，表明这两种等值模型均能正确反映外网运行状态，且等值精度相近。

表 1 两种等值模型的参数估计结果

Table 1 Parameter estimation results of the two equivalence methods

扩展 Ward 等值模型		本文所提模型	
等值参数	估计值/p.u.	等值参数	估计值/p.u.
P_{E1}	0	P_{E1}	3.547
E_1	1.028	E_1	1.066
P_{E2}	0	P_{E2}	0.121
E_2	1.034	E_2	1.061
Y_{12}	1.787-11.075j	Y_{12}	1.787-11.075j
Y_{10}	3.083-37.910j	Y_{10}	3.083-37.910j
Y_{20}	0.828-15.626j	Y_{20}	0.828-15.626j
\tilde{S}_1	3.520+1.045j	\tilde{S}_1	—
\tilde{S}_2	0.120+0.439j	\tilde{S}_2	—

表 2 两种等值模型在内网支路开断的等值误差

Table 2 Equivalent errors with internal network branch break-off of the two equivalence methods

开断条件	误差指标	等值模型	
		扩展 Ward 等值模型	本文所提模型
开断线路 3-4	e_{r,V_m}	0.15	0.12
	$e_{r,P}$	3.58	0.08
	$e_{r,Q}$	24.33	22.18
	$e_{s,P}$	0.13	0.01
	$e_{s,Q}$	2.71	2.47
开断线路 5-6	e_{r,V_m}	0.03	0.02
	$e_{r,P}$	1.56	0.35
	$e_{r,Q}$	3.55	3.08
	$e_{s,P}$	0.05	0.05
	$e_{s,Q}$	0.34	0.30
开断机组 36	e_{r,V_m}	0.01	0.02
	$e_{r,P}$	5.50	4.90
	$e_{r,Q}$	1.50	1.88
	$e_{s,P}$	0.35	0.40
	$e_{s,Q}$	0.21	0.27

3.2.2 状态估计误差分析

在内网量测量中没有不良数据的情况下, 本文所提扩展电压源支路 Ward 等值模型和扩展 Ward 等值模型在状态估计后与潮流真值误差的最大值和平均值如图 3 和图 4 所示, 图中 $\max V_m$ 、 $\max P_i$ 、 $\max Q_i$ 、 $\max P_{ij}$ 、 $\max Q_{ij}$ 分别表示电压幅值、注入有功功率、注入无功功率、支路有功功率、支路无功功率的误差最大值, $\text{avr } V_m$ 、 $\text{avr } P_i$ 、 $\text{avr } Q_i$ 、 $\text{avr } P_{ij}$ 、 $\text{avr } Q_{ij}$ 分别表示电压幅值、注入有功功率、注入无功功率、支路有功功率、支路无功功率的误差平均值, 纵坐标表示误差标幺值, 基准功率为 100 MVA。

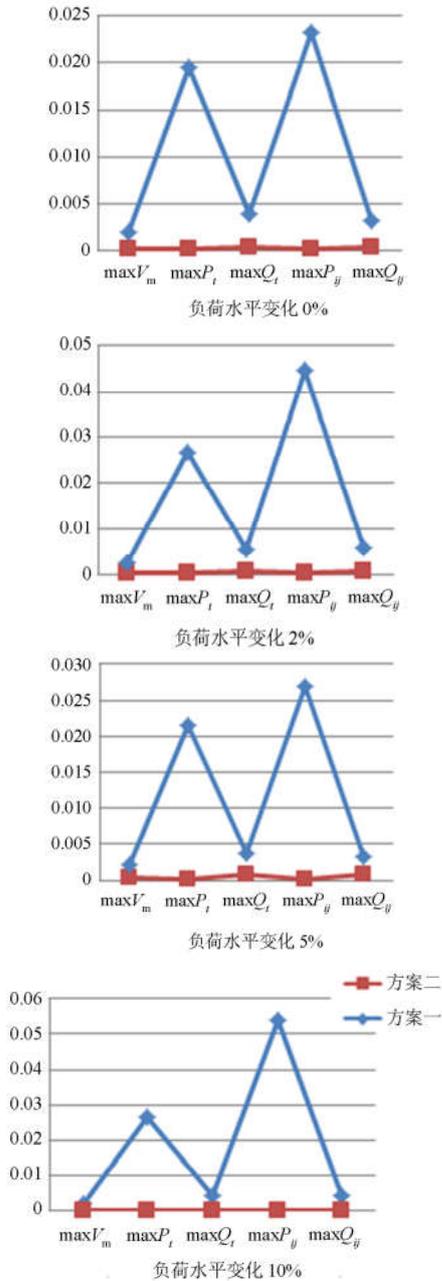


图 3 无不良数据时不同负荷水平下的最大误差

Fig. 3 Maximum error at different load levels without bad data

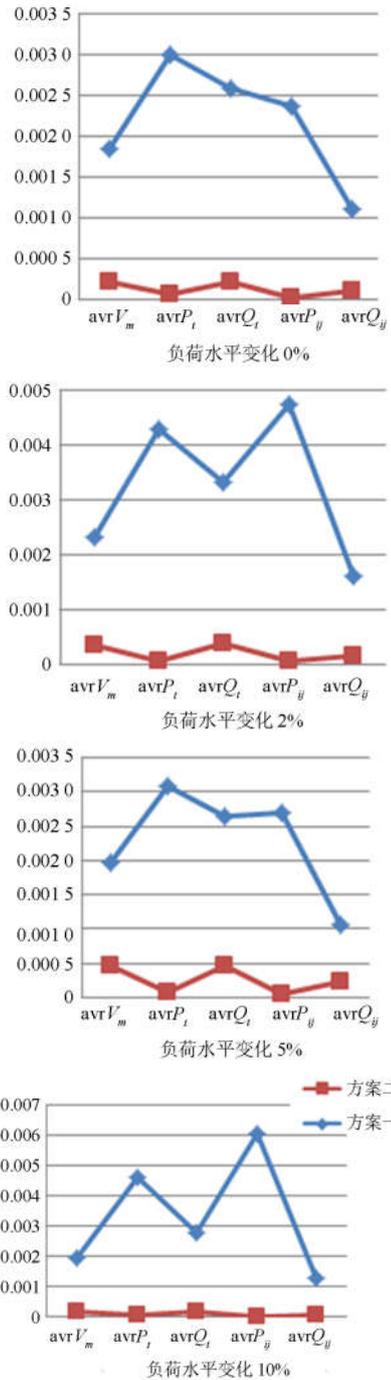


图 4 无不良数据时不同负荷水平下的平均误差

Fig. 4 Average error at different load levels without bad data

由图 3 和图 4 可以发现, 无论是最大误差还是平均误差指标, 扩展电压源支路 Ward 等值模型均处在扩展 Ward 等值模型下方, 说明内网无不良数据情况下, 外网采用扩展 Ward 等值进行内网状态估计比采用扩展电压源支路 Ward 等值计算误差要大。从而更进一步凸显了外网采用扩展电压源支路 Ward 等值模型时等值准确的优点。

在内网量测量中含有少量不良数据的情况下，若假设支路 7-8 的首端无功功率量测为 0，即传感器没有取到对应的量测值或量测值发生了丢失，可以得到在外网电源电压和负荷水平发生变化的情况下，本文所提扩展电压源支路 Ward 等值模型和扩展 Ward 等值模型在状态估计后与潮流真值误差的最大值和平均值如图 5 和图 6 所示。

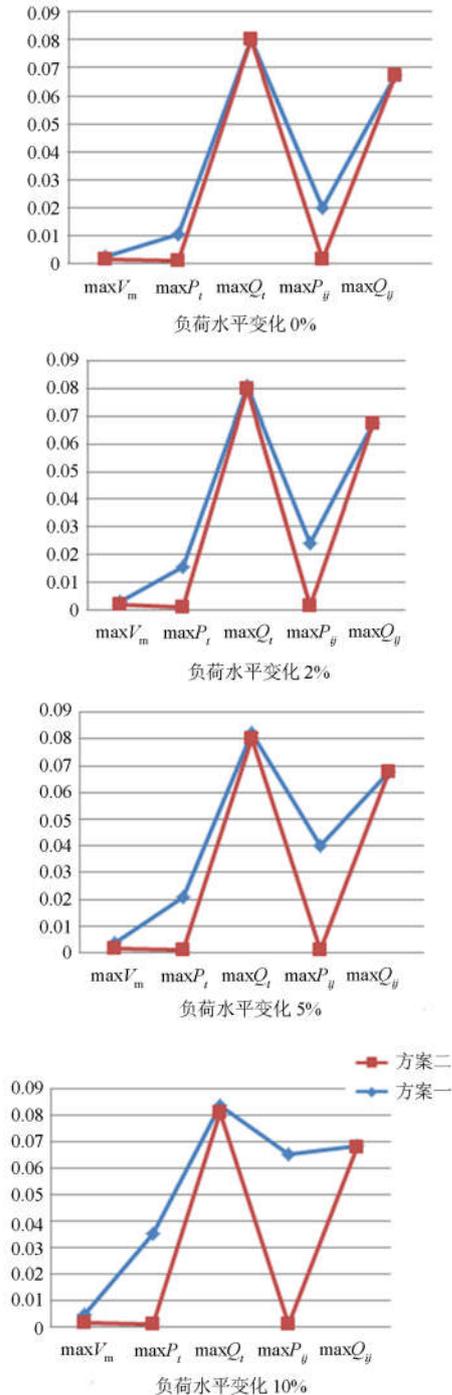


图 5 有不良数据时不同负荷水平下的最大误差
Fig. 5 Maximum error at different load levels with bad data

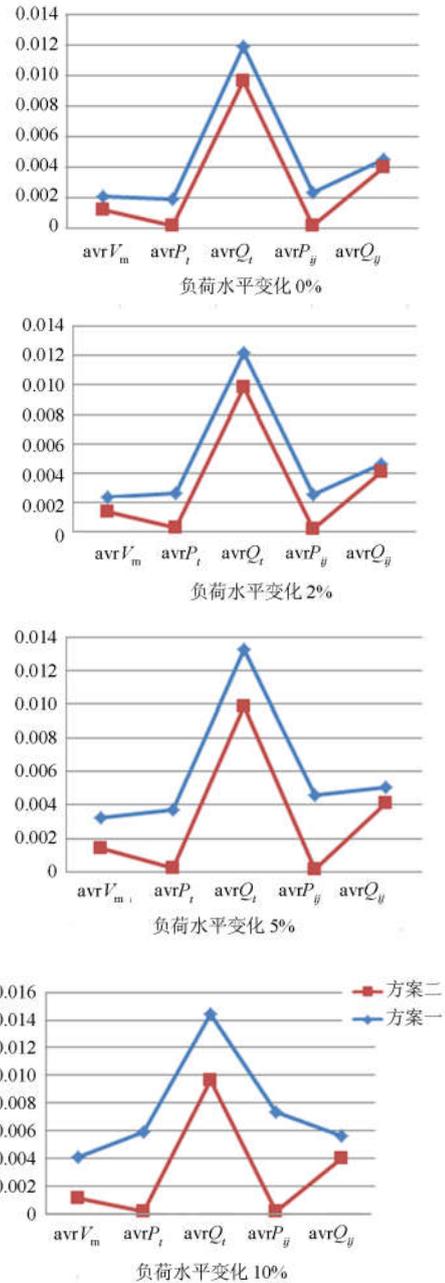


图 6 有不良数据时不同负荷水平下的平均误差
Fig. 6 Average error at different load levels with bad data

由图 5 和图 6 可以发现，当内网含有少量不良数据时，随着外网状态变化的增大，两种等值模型在状态估计时的精度均有所下降。但各指标中，本文所提模型的误差均位于扩展 Ward 等值模型的下方，说明外网采用扩展电压源支路 Ward 等值模型时的内网状态估计精度高于外网采用扩展 Ward 等值模型的内网状态估计在含有不良数据情况下的优越性。

4 结论

本文提出了一种外网扩展电压源支路 Ward 等值模型, 并将其应用于内网独立状态估计中。该模型具有如下特点:

(1) 该模型的等值阻抗参数和扩展 Ward 等值模型相同, 保证了两者具有类似的等值精度。

(2) 与扩展 Ward 等值模型相比, 该模型的外网注入功率等值在电源节点而非边界节点, 且电源节点的状态参数可由边界节点的电压和功率信息再基于支路功率平衡关系计算得到。

(3) 该模型在应用于内网独立状态估计时, 不需要提供任何外网状态信息, 避免了外网等值状态和内网状态的不匹配问题。

(4) 无论内网量测是否存在不良数据, 基于该模型的状态估计方法均具有较高的估计精度。

参考文献

- [1] 侯玉婷, 李晓博, 刘畅, 等. 火电机组灵活性改造形势及技术应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 8-13.
HOU Yuting, LI Xiaobo, LIU Chang, et al. Flexibility reform situation and technical application of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 8-13.
- [2] 侯玉婷, 周俊波, 高林, 等. 超超临界二次再热机组凝结水节流变负荷技术分析[J]. 热力发电, 2017, 46(8): 82-85.
HOU Yuting, ZHOU Junbo, GAO Lin, et al. Analysis on condensate throttling technology for ultra supercritical double-reheat thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8): 82-85.
- [3] 谢仕炜, 胡志坚, 吴方劫, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 26-34.
XIE Shiwei, HU Zhijian, WU Fangjie, et al. Static equivalent parameter identification method of multi-port external network based on recursive least squares algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 26-34.
- [4] 李世明, 卢建刚, 郭文鑫, 等. 基于内网常规 Ward 等值电路的外网静态等值法[J]. 电力与能源, 2013, 34(6): 575-579.
LI Shiming, LU Jiangan, GUO Wenxin, et al. External network static equivalent on the basis of internal general Ward equivalent circuit[J]. Power and Energy, 2013, 34(6): 575-579.
- [5] 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 modes on EMS application[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 1-6.
- [6] 张海波, 张伯明. 外网等值自动生成系统中地调侧外网估计误差的阻断[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(7): 24-27.
ZHANG Haibo, ZHANG Boming. Method to isolate estimation error from external network in external network real-time equivalent system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(7): 24-27.
- [7] 李虹, 李卫国, 熊浩清. WAMS 中计及量测函数非线性项的电力系统自适应动态状态估计[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 155-161.
LI Hong, LI Weiguo, XIONG Haoqing. Adaptive dynamic state estimation including nonlinearities of measurement function in WAMS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 155-161.
- [8] 孟建良, 刘德超. 一种基于 Spark 和聚类分析的辨识电力系统不良数据新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 85-91.
MENG Jianliang, LIU Dechao. A new method for identifying bad data of power system based on Spark and clustering analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 85-91.
- [9] 杨慧霞, 邓迎君, 刘志斌, 等. 含有历史不良数据的电力负荷预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 62-68.
YANG Huixia, DENG Yingjun, LIU Zhibin, et al. Study on electric load forecasting with historical bad data[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 62-68.
- [10] 韩力, 韩学山, 陈芳. 基于综合预测和自适应滤波器的电力系统动态状态估计[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 107-113.
HAN Li, HAN Xueshan, CHEN Fang. Dynamic state estimation in power system based on integrated forecasting model and adaptive filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 107-113.
- [11] 冯永青, 李鹏, 陈刚, 等. 基于模型拼接与外网等值的南方电网在线模型协调方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 101-104.
FENG Yongqing, LI Peng, CHEN Gang, et al. Online model cooperation based on model merging and equivalence technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 101-104.

- [12] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985: 61-65.
- [13] 周念成, 谭桂华, 何建森, 等. 基于统计方法的电网谐波状态估计误差分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 109-114.
ZHOU Niancheng, TAN Guihua, HE Jiansen, et al. Error analysis in harmonic state estimation of power system based on the statistical approach[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 109-114.
- [14] 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.
- [15] 廖龙飞. 基于等值参数物理约束与等值元件全面性的非拓扑法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
LIAO Longfei. Research on non-topological method based on equivalent parameters physical constraints and equivalent components comprehensiveness[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [16] AREFIFAR S A, XU W. Online tracking of power system impedance parameters and field experiences[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 1781-1788.
- [17] 吴际舜. 电力系统静态安全分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985: 87-133.
- [18] 郑明忠, 张道农, 张小易, 等. 基于节点集合的 PMU 优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 138-142.
ZHENG Mingzhong, ZHANG Daonong, ZHANG Xiaoyi, et al. PMU optimal placement based on node set[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 138-142.
- [19] 余娟, 廖龙飞, 朱黎丽, 等. 抗不良杠杆量测的稳定收敛状态估计方法[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(4): 552-556.
YU Juan, LIAO Longfei, ZHU Lili, et al. Stable convergence state estimation method for bad leverage measurements[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(4): 552-556.
- [20] 赵雪骞. 电力系统抗差状态估计与参数估计方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHAO Xueqian. Research on robust state estimation and parameter estimation methods of electric power systems[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [21] KHODAPARAST J, KHEDERZADEH M. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [22] 丁宏恩, 戴则梅, 霍雪松, 等. 基于混合量测的二次线性状态估计方法及其工程应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 163-170.
DING Hongen, DAI Zemei, HUO Xuesong, et al. Hybrid measurement based secondary linear state estimation method and its engineering application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 163-170.
- [23] GALIANA F D. Bound estimates of the severity of line outages in power system contingency analysis and ranking[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(9): 2612-2624.
- [24] ZHAO L, ABUR A. Multiarea state estimation using synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 611-617.

收稿日期: 2017-07-25; 修回日期: 2017-09-20

作者简介:

李世明(1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统调度自动化工作; E-mail: 365419377@qq.com

卢建刚(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事调度自动化系统的开发、运行、管理工作。

(编辑 张爱琴)