

外网等值自动生成系统中地调侧 外网估计误差的阻断

张海波,张伯明

(清华大学 电机工程与应用电子技术系,电力系统国家重点实验室,北京 100084)

摘要: 在外网等值自动生成系统中,外网量测不准确会污染内网的估计结果,为阻断外网的估计误差,提出在缓冲网中设置唯支路量测,在地调侧能量管理系统(EMS)中自动设置边界关键量测,以此阻断外网状态估计的估计误差对内网状态估计的影响。采用一步式状态估计方法对此问题进行了理论分析,并对由于网络传输中断而造成的内、外网量测采样时间不一致时,采用一步式状态估计方法的阻断效果作了数值仿真验证,证明效果明显。该方法已经成功应用于深圳地调 EMS。

关键词: 一步式状态估计; 边界关键量测; 实时等值系统

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)07-0024-04

0 引言

应用实时外网等值自动生成系统^[1]提供的外网模型和实时数据,地调侧可以进行本地的状态估计。此时,如果选用的是缓冲网模型^[2],需要尽量减少外网状态估计误差对内网状态估计的影响。由于缓冲网上的量测数据是由省调实时外网等值系统下发的在线潮流数据,省网模型误差和内、外网量测数据存在采样和网络传送时间的不同步,一般会在边界上出现较大的失配量,使地调侧状态估计在边界量测处的量测残差较大,污染内网状态估计结果,恶化内网状态估计的收敛性。如果边界上估计误差过大,也会严重影响在靠近边界处调度员潮流操作的准确性。实践经验表明^[3,4],当内、外网联合作状态估计时,要取得较好的应用效果,应使内网状态估计尽量不受外网量测数据的影响,还需要保证内网状态估计计算的数值稳定性。文献^[4]验证了边界关键量测在两步式估计中可以很好地阻断外网估计误差的影响。本文总结了前人的经验,结合实时外网等值系统自身的特点,提出一些简单有效的外网估计误差阻断方法,并对在一步式估计中应用边界关键量测对外网估计误差的阻断效果进行了理论分析;还进行了外网量测存在时延的试验,验证本文的量测误差阻断方法的有效性,结果表明本文所采用的阻断措施可以很好地保证内网估计的准确度。

1 阻断外网估计误差措施

在状态估计中注入量测和该节点相邻的节点有

关联。这样,状态估计的信息矩阵中,与该注入节点相邻的节点两两之间都会出现非零元,使信息矩阵条件数增大,由此可能引起数值稳定问题。注入量测也是产生残差污染的主要原因。为了减少残差污染,本文在外网等值自动生成系统中采用缓冲网模型时,禁用了缓冲网中所有注入量测,包括零注入量测和虚拟负荷,并用省调侧能量管理系统(EMS)的在线潮流结果作为缓冲网上的支路潮流量测量实时发送至各地调。这样处理以后,地调侧的缓冲网上就仅有数值合理的支路潮流量测,使状态估计具有更好的收敛性,而外网的估计误差也会散布在缓冲网各节点的注入量中,减小了向边界的误差积累。

为进一步阻断外网量测残差对内网的污染,在地调侧状态估计之前将外网的边界量测做成关键量测,利用关键量测残差为零的特性阻断外网估计误差的传播,采用了将边界量测做成关键量测的做法^[4]。在缓冲网上只有支路潮流量测而没有注入量测时,将边界量测做成关键量测由 3 个步骤组成(这里的边界节点指地调联络线在外网一侧的外边界节点)。

a. 过滤掉外边界节点和外网节点之间的支路潮流量测。由于外边界节点和外网节点上都没有注入量测,此时内网成为一个独立的可观测岛,而外网也会形成若干个可观测岛^[5,6]。

b. 对剩余外网量测进行可观测性分析。因每条外网支路上都有潮流量测,可直接对剩余外网支路作拓扑分析,所得的每个拓扑岛就是一个可观测岛。

c. 在刚刚过滤掉的支路量测集中,对每个外网可观测岛恢复一个与之相连的支路量测,这样就可以在边界处形成关键量测。

在边界处形成关键量测既可以阻断外网估计的残差污染,又可以最大限度利用外网量测信息给出更为合理的外网估计结果,同时,采用更多外网支路

收稿日期:2005-03-07;修回日期:2005-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50595414 和 50323002);
国家重点基础研究发展规划项目(973 项目)
(2004CB217904)

量测,可加大状态估计信息矩阵的对角元优势,改善系统的数值稳定性,有利于实时系统应用。

严格来讲,无论是在整个外网还是只在边界上设置关键量测,都需要两步式状态估计才能保证内网的估计结果完全不受外网的影响^[4]。所谓两步式估计是指首先用内网量测做状态估计,然后再利用估计出的内网状态量与外网量测一起做外网的状态估计。这种两步式估计在实时处理上较为繁琐,且与将内、外网量测放在一起做状态估计的一步式估计比较,结果差异并不大,所以,在实际应用中,仅采用一步式估计方法即可。

2 一步式估计中设置边界关键量测理论分析

内网和外网之间是由输电线分隔开的,联络线两端节点分属内网和外网。内网用 I 表示,外网用 E 表示。系统状态变量可写成分块形式:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_I \\ \mathbf{x}_E \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{II}^T \mathbf{R}_I^{-1} \mathbf{H}_{II} \cdot \Delta \mathbf{x}_I^k + \mathbf{H}_{BI}^T \mathbf{R}_B^{-1} \mathbf{H}_{BI} \cdot \Delta \mathbf{x}_I^k + \mathbf{H}_{BE}^T \mathbf{R}_B^{-1} \mathbf{H}_{BE} \cdot \Delta \mathbf{x}_E^k = \mathbf{H}_{II}^T \mathbf{R}_I^{-1} \Delta \mathbf{z}_I^k + \mathbf{H}_{BI}^T \mathbf{R}_B^{-1} \Delta \mathbf{z}_B^k \\ \mathbf{H}_{BE}^T \mathbf{R}_B^{-1} \mathbf{H}_{BI} \cdot \Delta \mathbf{x}_I^k + \mathbf{H}_{EE}^T \mathbf{R}_E^{-1} \mathbf{H}_{EE} \cdot \Delta \mathbf{x}_E^k + \mathbf{H}_{BE}^T \mathbf{R}_B^{-1} \mathbf{H}_{BE} \cdot \Delta \mathbf{x}_E^k = \mathbf{H}_{BE}^T \mathbf{R}_B^{-1} \Delta \mathbf{z}_B^k + \mathbf{H}_{EE}^T \mathbf{R}_E^{-1} \Delta \mathbf{z}_E^k \end{cases}$$

上式也可以写成

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{II}^T \mathbf{R}_I^{-1} \mathbf{H}_{II} \cdot \Delta \mathbf{x}_I^k = \mathbf{H}_{II}^T \mathbf{R}_I^{-1} \Delta \mathbf{z}_I^k + \mathbf{H}_{BI}^T \mathbf{R}_B^{-1} [\Delta \mathbf{z}_B^k - \mathbf{H}_{BI} \Delta \mathbf{x}_I^k - \mathbf{H}_{BE} \Delta \mathbf{x}_E^k] \\ \mathbf{H}_{EE}^T \mathbf{R}_E^{-1} \mathbf{H}_{EE} \cdot \Delta \mathbf{x}_E^k = \mathbf{H}_{EE}^T \mathbf{R}_E^{-1} \Delta \mathbf{z}_E^k + \mathbf{H}_{BE}^T \mathbf{R}_B^{-1} [\Delta \mathbf{z}_B^k - \mathbf{H}_{BI} \Delta \mathbf{x}_I^k - \mathbf{H}_{BE} \Delta \mathbf{x}_E^k] \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_I^{k+1} \\ \mathbf{x}_E^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_I^k \\ \mathbf{x}_E^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_I^k \\ \Delta \mathbf{x}_E^k \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{式(3)中} \begin{cases} \Delta \mathbf{z}_I^k = \mathbf{z}_I - \mathbf{h}_I(\mathbf{x}_I^k) \\ \Delta \mathbf{z}_B^k = \mathbf{z}_B - \mathbf{h}_B(\mathbf{x}_I^k, \mathbf{x}_E^k) \\ \Delta \mathbf{z}_E^k = \mathbf{z}_E - \mathbf{h}_E(\mathbf{x}_E^k) \end{cases}$$

当边界量测被设置为关键量测时,有

$$\mathbf{r}_B = \mathbf{z}_B - \mathbf{h}_B(\tilde{\mathbf{x}}_I, \tilde{\mathbf{x}}_E) = 0 \quad (5)$$

假设第 k 步迭代点 $\{\mathbf{x}_I^k, \mathbf{x}_E^k\}$ 在解点附近,式(5)线性化后,有

$$\mathbf{z}_B - \mathbf{h}_B(\mathbf{x}_I^k, \mathbf{x}_E^k) - [\mathbf{H}_{BI}, \mathbf{H}_{BE}] \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_I^k \\ \Delta \mathbf{x}_E^k \end{bmatrix} \approx 0 \quad (6)$$

将式(6)展开后,有

$$\Delta \mathbf{z}_B^k - \mathbf{H}_{BI} \Delta \mathbf{x}_I^k - \mathbf{H}_{BE} \Delta \mathbf{x}_E^k \approx 0 \quad (7)$$

上式与式(3)中括号内的项相同,将式(7)代入式(3)后,有关内网的估计方程变为

$$\mathbf{H}_{II}^T \mathbf{R}_I^{-1} \mathbf{H}_{II} \cdot \Delta \mathbf{x}_I^k = \mathbf{H}_{II}^T \mathbf{R}_I^{-1} \Delta \mathbf{z}_I^k \quad (8)$$

式(8)就是内网独立状态估计的迭代方程。可见当边界量测被设置为关键量测后,采用一步式估计时,内网的状态估计也仅由内网量测决定,不受外网量测的影响。由于式(7)在靠近解点处才成立,采用一步式估计时,式(3)等号右端第 2 项始终参与迭代,由于数值原因,其计算结果与内网单独估计结果有微小差别,但不影响阻断效果。

采用两步式估计,第 1 次估计时内网单独计算,

量测方程分成内部量测 $\mathbf{z}_I$, 边界量测 $\mathbf{z}_B$ 和外部量测 $\mathbf{z}_E$ 3 部分,分别表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_I &= \mathbf{h}_I(\mathbf{x}_I) + \mathbf{v}_I \\ \mathbf{z}_B &= \mathbf{h}_B(\mathbf{x}_I, \mathbf{x}_E) + \mathbf{v}_B \\ \mathbf{z}_E &= \mathbf{h}_E(\mathbf{x}_E) + \mathbf{v}_E \end{aligned} \quad (1)$$

量测方程的雅克比矩阵可用如下分块形式表示:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{II} & 0 \\ \mathbf{H}_{BI} & \mathbf{H}_{BE} \\ 0 & \mathbf{H}_{EE} \end{bmatrix}$$

状态估计的法方程可描述为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{II}^T & \mathbf{H}_{BI}^T & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_{BE}^T & \mathbf{H}_{EE}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_I^{-1} & & \\ & \mathbf{R}_B^{-1} & \\ & & \mathbf{R}_E^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{II} & 0 \\ \mathbf{H}_{BI} & \mathbf{H}_{BE} \\ 0 & \mathbf{H}_{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_I \\ \Delta \mathbf{x}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{II}^T & \mathbf{H}_{BI}^T & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_{BE}^T & \mathbf{H}_{EE}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_I^{-1} & & \\ & \mathbf{R}_B^{-1} & \\ & & \mathbf{R}_E^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{z}_I \\ \Delta \mathbf{z}_B \\ \Delta \mathbf{z}_E \end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(2)展开并写成迭代格式有

按式(8)迭代计算出 $\mathbf{x}_I$ (估计值通常用 $\hat{\mathbf{x}}_I$), 此时将 $\mathbf{x}_I$ 作为已知量,将边界量测和外网量测合在一起做第 2 次估计,此时 $\Delta \mathbf{x}_I = 0$, 式(3)中有关外网的方程变为

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{EE}^T \mathbf{R}_E^{-1} \mathbf{H}_{EE} \cdot \Delta \mathbf{x}_E^k + \mathbf{H}_{BE}^T \mathbf{R}_B^{-1} \mathbf{H}_{BE} \cdot \Delta \mathbf{x}_E^k &= \\ \mathbf{H}_{BE}^T \mathbf{R}_B^{-1} \Delta \mathbf{z}_B^k + \mathbf{H}_{EE}^T \mathbf{R}_E^{-1} \Delta \mathbf{z}_E^k \end{aligned} \quad (9)$$

通过式(9)的迭代就可以求 $\tilde{\mathbf{x}}_E$ 。

可见,两步式估计时内网是独立计算的,不会受外网影响,与一步式估计相比需要将内、外网分开计算,处理费时、复杂但效果却并不明显,而一步式估计也可很好地阻断外网估计误差。上述分析都是在假定了边界拓扑状态不会受外网影响的前提下得出的,当外网的拓扑状态变化,而又未能及时反映到与内网联接的联络线开关上时,通过设置关键量测的方法也无法保证内网估计的准确性。

3 测试算例

实际运行中,由于通信延时或者通信中断,内、外网量测量间可能存在较大时差,为测试在这种情况下本文的估计误差阻断措施对保证内网基态潮流和开关操作准确性的效果,设计了以详细外网模型为比较基准的试验。

3.1 试验 1

试验 1 为统计深圳地调所有 500/220 kV 线路的基态潮流平均误差,分别测试内、外网量测时差在 1 min, 7 min 和 60 min 时,本文的限制外网估计误

差传播措施的效果。

图 1 给出了与全网模型进行比较的结果(图中 ε_p 为有功误差, ε_q 为无功误差; $\blacksquare$ C1, $\blacksquare$ C2, $\square$ C3)。图中柱 C1 是未采取任何阻断措施的结果,柱 C2 是仅采用禁用缓冲网注入量测时的结果,柱 C3 代表既禁用缓冲网所有注入量测又设置了边界关键量测时的结果。可以看出,如果不采取任何阻断措施,即使是内、外网量测时差在 1 min 之内也会使 500 kV 线路基态潮流产生较大误差(见 C1),而采用了阻断措施后,即使时差有 1 h 也可以获得与全网模型较为接近的内网估计结果(见 C3)。说明采用本文的阻断措施可以很好地阻断外网估计误差的传播。但是,各图中的柱 C3 并不为零,说明内网基态潮流误差仍然有增加,这是因为当内、外网中量测时差较大时,外网侧联络线上的开关状态与内网量测不匹配,因而造成内网的估计误差,在这种情况下,靠设置关键量测的阻断措施就不能完全消除外网估计误差的影响,但和不采用阻断措施时的估计相比,误差小得多。实践证明,外网量测数据即使有 1 h 的时延,内网估计结果仍然良好。

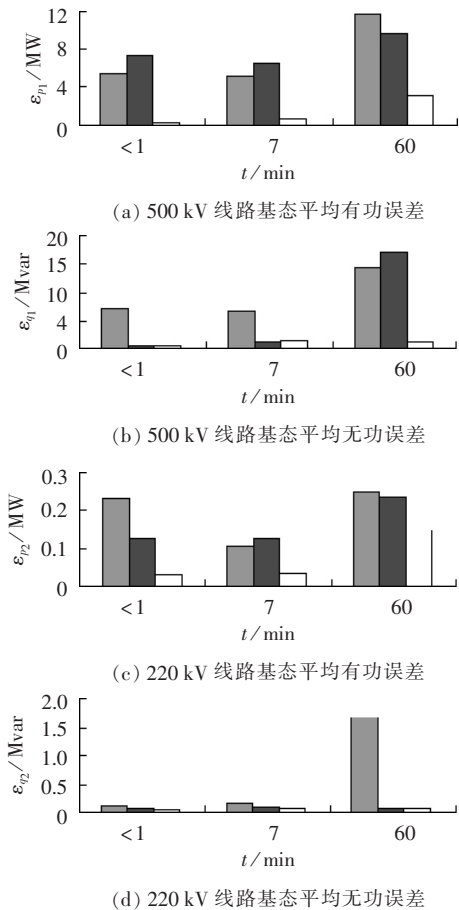


图 1 不同内、外网量测时差下深圳内网线路基态潮流平均误差

Fig.1 The average base case flow errors of Shenzhen internal network for different sampling time differences between internal and external network

3.2 试验 2

试验 2 通过对不同内、外网量测时差下内网合环操作的计算结果比较,测试采用外网估计误差的阻断措施对保证内网合环操作计算精度的作用。取梅水线合环操作为例,结果如图 2 所示。

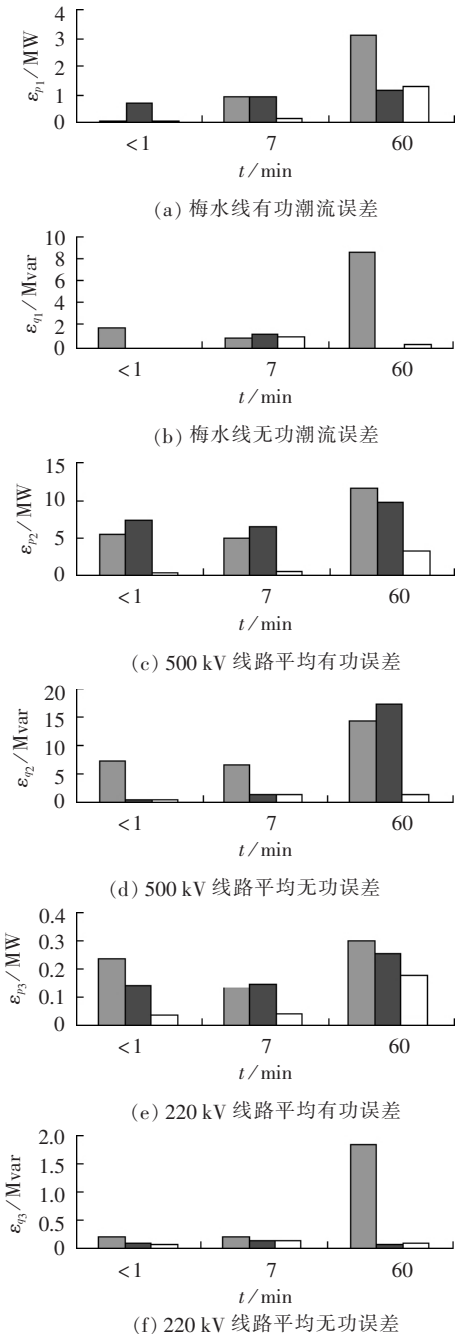


图 2 不同内、外网量测时差下梅水线合环后深圳内网线路潮流误差

Fig.2 The average flow errors of Shenzhen internal network for different sampling time differences between internal and external network after closing Meishui line

图 2 的计算结果也是与全网模型进行比较,柱 C1,C2,C3 的意义与图 1 相同,从图中的计算结果可以看出:诸如梅水线这样的内网线路合环后,采用设置边界关键量测的外网估计误差阻断方法的各项统

计结果与没有采用阻断措施或仅采用增加虚拟负荷方法的计算结果比较,在不同内、外网量测时差下均有明显改善。采用本文介绍的阻断估计误差方法,即使外网数据因故中断较长时间时,内网操作的计算精度仍可满足工程应用要求。

4 结论

本文从理论上证明了一步式估计中采用设置边界关键量测的方法可以很好地阻断外网估计误差的传播。由于外网等值自动生成系统在缓冲网上仅仅设置了支路潮流量测,使地调侧通过设置边界关键量测阻断外网估计误差变得非常容易,只需一些简单的拓扑分析就可以实现,方便了各 EMS 厂家在地调侧的接入。通过对深圳地调电网不同内、外网量测时差下阻断措施作用效果的测试,说明本文采用的外网估计误差阻断方法即使在广域网短时通信中断的情况下仍可以使地调侧保持较高的潮流计算精度。

参考文献:

[1] 温伯坚,张海波,张伯明,等. 广东省地区电网外网等值自动生成系统设计[J]. 电力系统自动化,2004,28(20):77-79,83.
WEN Bo-jian,ZHANG Hai-bo,ZHANG Bo-ming,et al. Design of a real-time external network auto-equivalence system of sub-transmission networks in Guangdong[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(20):77-79,83.
[2] COSTA A J A S,ARZE M T. Critical pseudo-measurement selection for unreduced external system model[J].

Electrical Power & Energy Systems,1996,18(2):73-80.
[3] KATO K. External network modeling-recent practical experience[J]. IEEE Trans. on Power Systems,1994,9(1):216-228.
[4] KORRES G N. A partitioned state estimator for external network modeling[J]. IEEE Trans. on Power Systems,2002,17(3):834-842.
[5] 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 Hai-bo,ZHANG Bo-ming,SUN Hong-bin,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.
[6] 张海波,张伯明,孙宏斌,等. 基于潮流定解条件的电力系统状态估计可观性分析[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):54-58.
ZHANG Hai-bo,ZHANG Bo-ming,SUN Hong-bin,et al. Observability analysis of power system state estimation based on the solvability condition of power flow[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(3):54-58.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

张海波(1975-),男,黑龙江鸡西人,博士研究生,主要从事电力系统分布式计算和分析的研究工作(E-mail:zhb01@mails.tsinghua.edu.cn);
张伯明(1948-),男,重庆人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统分析和调度自动化的教学和科研工作(E-mail:zhangbm@tsinghua.edu.cn)。

Method to isolate estimation error from external network in external network real-time equivalent system

ZHANG Hai-bo,ZHANG Bo-ming

(Department of Electrical Engineering,the State Key Lab of Power System,Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: In order to minimize the effect of external network modeling for area control center EMS application,measures are taken to isolate estimation error from external state estimation. Only branch flow measurement is used in buffer system of external network and critical measurements on the boundary are selected automatically and used in EMS of area control center. One-pass state estimation is applied in theoretic analysis and isolation effect test with digital simulation for asynchronous sampling between internal and external networks caused by net communication block. It is proved that the effect is obvious. The proposed method has been successfully applied in Shenzhen dispatching center.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50595414 and 50323002) and the National Basic Research Program of China(973 Program)(2004CB217904).

Key words: one-pass state estimation; critical boundary measurement; real-time equivalent system

科学技术实力和国民教育水平,始终是衡量综合国力和文明程度的重要标志,也是每个国家走向繁荣富强的两个不可缺少的飞轮。