

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.02.021

基于自动微分技术的多平衡机状态估计算法

叶 芳¹,卫志农¹,孙国强¹,王 超²

(1.河海大学能源与电气学院,江苏 南京 210098 ; 2.浙江电力调度通信中心,浙江 杭州 310007)

摘要 :在电力系统状态估计中引入多平衡机的思想,将其影响计入状态估计模型中,采用加权最小二乘法进行求解.同时,针对常规方法求导繁琐、微分代码灵活性差的问题,结合自动微分技术,实现了求导的自动化.对 IEEE 4 个标准算例的仿真计算表明:该方法能够完整地计及多平衡机对系统的影响,且采用 AD 技术方便了算法的实现,提高了算法的运行效率.

关键词 :电力系统 ;状态估计 ;多平衡机 ;自动微分 ;ADOL-C

中图分类号 :TM744 文献标志码 :A 文章编号 :1000-1980(2012)02-0233-05

State estimation algorithm for multi-balancing machines based on automatic differentiation technology

YE Fang¹, WEI Zhi-nong¹, SUN Guo-qiang¹, WANG Chao²

(1. College of Energy and Electrical Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Zhejiang Electric Power Dispatch and Communication Center , Hangzhou 310007 , China)

Abstract : A concept of multi-balancing machines is introduced and its influence on an electric power system is taken into consideration in the state estimation model. The weighted least squares method was used to solve the model. In order to solve the problems of complexity of differentiation and inflexibility of computer programming of traditional methods for state estimation , the automatic differentiation (AD) technology was applied to the proposed algorithm , realizing the automation of differentiation. The simulation results from four IEEE test systems show that the algorithm can take into full consideration the impact of multi-balancing machines on the electric power system , and the AD technology can facilitate the computation and improve the efficiency of the algorithm.

Key words : electric power system ; state estimation ; multi-balancing machine ; automatic differentiation ; ADOL-C

EMS 中许多高级应用软件都以可靠的电网数据为基础.电力系统状态估计^[1-5]能够基于电网结构、参数以及实时量测,为 EMS 提供精度高、完整而可靠的电网数据,因此,电力系统状态估计的精度将影响 EMS 的实用化水平.电力系统传统的状态估计通常只选择 1 台具有较大调节余量的发电机作为平衡机,按照单平衡机的设置进行程序开发和计算分析.但是随着电力系统规模的逐步增大,单平衡机已经难以满足系统功率平衡的要求,因此目前各省电网大多数设置 1 组平衡机,这样势必给传统的状态估计程序带来新的挑战.如果可以根据电力系统的实际情况引入多平衡机的思想,那么状态估计的结果必然会更接近实际状态,从而为 EMS 的后续分析,如静态安全、电压稳定等分析,以及采用相应的保护控制措施提供重要的数据支持.目前多平衡机在电力系统潮流计算中的应用已得到了广泛的关注^[6-10],但在电力系统状态估计中的应用还较鲜见.

自动微分(automatic differentiation ,AD)技术^[11-12]是计算机数值计算和分析领域内一项崭新的技术,与其他微分方法(如除法微分、符号微分)不同,它将微分定义为代数运算,基于链式法则自动计算函数的任意阶导数,且无论采用正模式还是逆模式^[13]均避免了截断误差.特别是在获得雅可比矩阵上,AD 技术具有很大的优势.文献[14-17]分别将 AD 技术应用于电力系统潮流计算、最优潮流以及灵敏度分析,表明 AD 技术在

收稿日期 :2010-12-02

基金项目 :国家自然科学基金(50877024) ;河海大学自然科学基金(2009421411) ;中央高校基本科研业务费(2010B05914)

作者简介 :叶芳(1985—),女,江苏昆山人,硕士研究生,主要从事电力系统运行分析与控制. E-mail : yefang87@126.com.

电力系统中的应用是可行、优越的。

笔者在经典加权最小二乘法的基础上,将多平衡机的影响计入状态估计模型中,通过基于运算符重载的 ADOL-C^[18] 工具获得量测函数的雅可比矩阵,实现了求导的自动化。IEEE14、IEEE30、IEEE57、IEEE118 节点测试系统的仿真结果验证了所提算法的有效性。

1 计及多平衡机的状态估计模型

计算机已经成为现代电力系统调度中心很重要的部分,保证计算机在线应用水平的关键是数据库的质量,而由远动装置传送过来的实时数据,由于远动装置本身的误差以及传送过程中各个环节造成的误差,导致存在不同程度的精度和可靠性问题。电力系统状态估计的功能相当于滤波,利用实时量测系统的冗余度来提高数据精度,自动排除随机干扰所引起的错误信息,估计系统的运行状态。

状态估计的已知条件是电力系统的实时量测 z ,一般是节点电压幅值、节点注入或支路的有功功率和无功功率。设系统有 n 个节点,有

$$z = [U_i, P_i, Q_i, P_{ij}, Q_{ij}, P_{ji}, Q_{ji}]^T \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: U_i ——第 i 个节点的电压幅值; P_i, Q_i ——第 i 个节点的注入有功功率、无功功率; $P_{ij}, Q_{ij}, P_{ji}, Q_{ji}$ ——支路 $i-j$ 的首、末端有功功率和无功功率。

状态估计的未知条件即状态量 x 一般为节点电压的实部和虚部,假设系统有 $m+1$ 个平衡节点(具有较大调节余量的发电机节点),则 $x = [e_1, f_1, \dots, e_{n-m-1}, f_{n-m-1}]^T$ 。

由于量测量数 l 大于状态量数 $(n-m-1)$,以及量测误差的存在,不可能找到一个 $\hat{x}$,使得残差矢量 $r(\hat{x}) = z - h(\hat{x})$ 各分量均为 0,但可以找到一个 $\hat{x}$,使得加权残差平方和为最小,为此,建立目标函数

$$J(\hat{x}) = [z - h(\hat{x})]^T R^{-1} [z - h(\hat{x})] \quad (2)$$

式中: h ——由基尔霍夫定律、功率平衡等基本电路定律所建立的量测函数; R ——以 $\sigma_i^2 (i = 1, 2, \dots, l)$ 为对角元素的量测误差方差阵, R^{-1} 起权重的作用。

经典加权最小二乘状态估计就是求使目标函数达到最小时 x 的值,对 h 进行线性化假设,即对 h 进行泰勒级数展开并忽略二次以上非线性项,可以得到

$$\begin{cases} \Delta \hat{x}^{(k)} = [H^T(\hat{x}^{(k)})R^{-1}(\hat{x}^{(k)})H(\hat{x}^{(k)})]^{-1}H^T(\hat{x}^{(k)})R^{-1}(\hat{x}^{(k)})[z - h(\hat{x}^{(k)})] \\ \hat{x}^{(k+1)} = \hat{x}^{(k)} + \Delta \hat{x}^{(k)} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\Delta \hat{x} = [\Delta e_1, \Delta f_1, \dots, \Delta e_{n-m-1}, \Delta f_{n-m-1}]^T$

式中: $\Delta \hat{x}$ ——修正量; k ——迭代序号; H ——量测函数的雅可比矩阵。

2 AD 技术

2.1 基本原理

运用计算机进行目标优化、灵敏度分析、大规模数值模拟等已成为各领域学者广泛关注的问题,微分运算是这些热点课题的基本运算之一。目前利用计算机生成函数微分代码的方法主要有 4 种^[13]:常规方法、除法微分、符号微分和自动微分。常规方法就是先推导出导数的解析表达式,然后再编制计算机程序。该方法很容易得到效率最高的代码,在状态估计中经常被使用。除法微分可以得到函数在某个特殊点处的微分,但得到的是微分的近似,精度很难估计。符号微分具有操作代数表达式的功能,但通常不能处理如分支、循环或子程序这样的计算机代码,应用中受到限制。

无论函数多么复杂,总是由一系列基本元函数(如 $\sin, \cos, \exp$ 等)和四则运算符($+, -, \times, \div$)经过有限次组合而成。AD 技术基于该事实,根据微分计算的链式法则,不需要推导导数计算公式就可以自动计算函数的微分,且不含截断误差。

ADOL-C^[18]是由 Dresden 技术大学科学计算学院开发的自动微分系统,利用 C++ 高级语言中操作符重载的机理,通过重载每个操作以达到计算偏导数和根据链式法则传递导数的目的,而且能够以正模式和逆模式计算任意阶导数。基于以上优点,笔者选择 ADOL-C 工具进行微分计算。

2.2 AD 技术在多平衡机状态估计中的应用

由式(3)可知,在多平衡机状态估计中,需要求取量测函数的雅可比矩阵 H 。常规方法在已知量测函数表达式的基础上,先推导出 H 各元素的解析表达式,然后根据具体的表达式编写计算机代码。该方法繁琐且容易出错,且随着电力系统结构越来越复杂,如果采用常规方法进行软件更新,不仅需要修改量测函数的代码,更繁杂的是要修改相应的雅可比矩阵的代码,这必然导致更新速度慢、难度大等问题。

AD 技术能够直接根据量测函数表达式,通过微分计算的链式法则,在正模式和逆模式下自动生成 H 。在软件更新的过程中只需要修改量测函数的代码,因此可以大幅度降低工作量,提高更新速度。

以支路 1-2 上的始端有功功率量测 P_{12} 为例,说明 AD 技术分别在正模式和逆模式下计算函数微分的原理。 P_{12} 的解析表达式为

$$P_{12} = (e_1^2 + f_1^2)g - (e_1e_2 + f_1f_2)g + (e_1f_2 - e_2f_1)b$$

式中: g ——支路电导; b ——支路电纳。

引入独立变量 $x_1 \sim x_4$ 和中间变量 $x_5 \sim x_{14}$,将 P_{12} 分解成一系列基本运算。独立变量 $x_1 = e_1, x_2 = f_1, x_3 = e_2, x_4 = f_2$; 中间变量 $x_5 = x_1^2, x_6 = x_2^2, x_7 = x_1x_3, x_8 = x_2x_4, x_9 = x_1x_4, x_{10} = x_3x_2, x_{11} = (x_5 + x_6)g, x_{12} = (x_7 + x_8)g, x_{13} = (x_9 - x_{10})b, x_{14} = x_{11} - x_{12}, P_{12} = x_{14} + x_{13}$ 。在已知独立变量值之后,自顶而下就可以得到 P_{12} 的精确值。

2.2.1 运用正模式进行求解

$$dx_5 = 2x_1dx_1, dx_6 = 2x_2dx_2, dx_7 = x_1dx_3 + x_3dx_1, dx_8 = x_2dx_4 + x_4dx_2, dx_9 = x_1dx_4 + x_4dx_1, dx_{10} = x_3dx_2 + x_2dx_3, dx_{11} = (dx_5 + dx_6)g, dx_{12} = (dx_7 + dx_8)g, dx_{13} = (dx_9 - dx_{10})b, dx_{14} = dx_{11} - dx_{12}, dP_{12} = dx_{14} + dx_{13}.$$

通过微分计算的链式法则,自顶而下就可以求得 dP_{12} :

$$dP_{12} = (2gx_1 - gx_3 + bx_4)dx_1 + (2gx_2 - gx_4 - bx_3)dx_2 + (-gx_1 - bx_2)dx_3 + (-gx_2 + bx_1)dx_4 = (2ge_1 - ge_2 + bf_2)de_1 + (2gf_1 - gf_2 - be_2)df_1 + (-ge_1 - bf_1)de_2 + (-gf_1 + be_1)df_2$$

从而得到

$$\nabla P_{12} = \left\{ \frac{dP_{12}}{de_1}, \frac{dP_{12}}{df_1}, \frac{dP_{12}}{de_2}, \frac{dP_{12}}{df_2} \right\} = \{ 2ge_1 - ge_2 + bf_2, 2gf_1 - gf_2 - be_2, -ge_1 - bf_1, -gf_1 + be_1 \}$$

2.2.2 运用逆模式进行求解

令 $dx_i = \alpha (i = 1, 2, \dots, 14)$,有

$dx_{14} = dx_{14} + dP_{12} = dP_{12}, dx_{13} = dx_{13} + dP_{12} = dP_{12}, dx_{12} = dx_{12} - dx_{14} = -dP_{12}, dx_{11} = dx_{11} + dx_{14} = dP_{12}, dx_{10} = dx_{10} - bdx_{13} = -bdP_{12}, dx_9 = dx_9 + bdx_{13} = bdP_{12}, dx_8 = dx_8 + gdx_{12} = -gdP_{12}, dx_7 = dx_7 + gdx_{12} = -gdP_{12}, dx_6 = dx_6 + gdx_{11} = gdP_{12}, dx_5 = dx_5 + gdx_{11} = gdP_{12}, dx_3 = dx_3 + x_2dx_{10} = -bx_2dP_{12}, dx_2 = dx_2 + x_3dx_{10} = -bx_3dP_{12}, dx_4 = dx_4 + x_1dx_9 = bx_1dP_{12}, dx_1 = dx_1 + x_4dx_9 = bx_4dP_{12}, dx_4 = dx_4 + x_2dx_8 = (bx_1 - gx_2)dP_{12}, dx_2 = dx_2 + x_4dx_8 = (-bx_3 - gx_4)dP_{12}, dx_1 = dx_1 + x_3dx_7 = (bx_4 - gx_3)dP_{12}, dx_3 = dx_3 + x_1dx_7 = (-bx_2 - gx_1)dP_{12}, dx_2 = dx_2 + 2x_2dx_6 = (-bx_3 - gx_4 + 2gx_2)dP_{12}, dx_1 = dx_1 + 2x_1dx_5 = (bx_4 - gx_3 + 2gx_1)dP_{12}$ 。由此得到

$$\nabla P_{12} = \{ 2ge_1 - ge_2 + bf_2, 2gf_1 - gf_2 - be_2, -ge_1 - bf_1, -gf_1 + be_1 \}$$

算法的流程如图 1 所示。

3 算例分析

分别对 IEEE 14 节点、IEEE 30 节点、IEEE 57 节点和 IEEE 118 节点的标准算例进行仿真计算。算例数据见表 1。仿真中,在潮流计算结果的基础上叠加相应的随机量测误差形成量测数据,以潮流计算得到的电压模拟平衡节点电压。

表征状态估计程序性能的主要指标是目标函数值 J_1 、量测误差统计值 S_M 以及估计误差统计值 $S_B^{[1]}$:

表 1 IEEE 算例数据
Table 1 Data of IEEE test systems

节点	节点数	支路数	量测量数
IEEE 14	14	20	56
IEEE 30	30	38	134
IEEE 57	57	69	252
IEEE 118	118	186	498

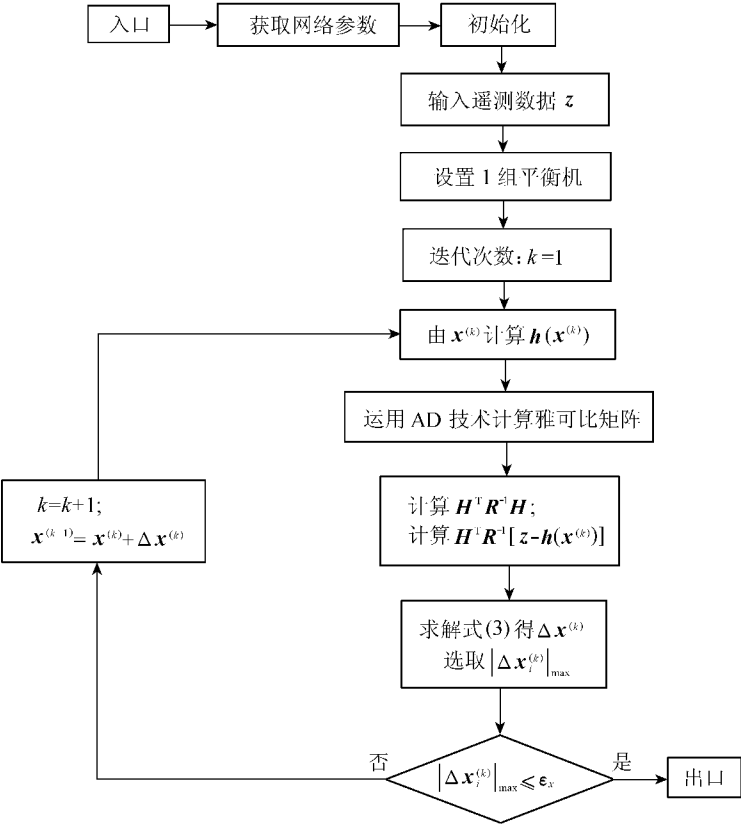


图 1 运用 AD 技术的多平衡机状态估计算法程序框图

Fig. 1 Flowchart of state estimation algorithm for multi-balancing machines with AD technology

$$J_1 = \sum_{i=1}^l \left(\frac{z_i - h_i(\hat{x})}{\sigma_i} \right)^2 \quad S_M = \left[\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \left(\frac{z_i - s_i}{\sigma_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad S_B = \left[\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \left(\frac{h_i(\hat{x}) - s_i}{\sigma_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中： l ——量测量数； s_i ——量测量 i 的真值。

据此通过算例仿真对结合 AD 技术的多平衡机状态估计模型的性能进行验证,结果如表 2 所示。从表 2 结果可见:相对于传统的状态估计,基于 AD 技术的多平衡机状态估计的精度得到了提高,由此可见,在多平衡机下状态估计的结果更符合实际状态。同时, J_1 基本都接近量测冗余, S_M 接近 1, S_B 小于 1,滤波效果明显,进一步说明了本文算法是有效的。

4 结 语

本文引入多平衡机思想,在经典加权最小二乘法的基础上提出了计及多平衡机的状态估计算法,它能完整地计及多平衡机对电力系统的影响,提出运用 ADOL-C 工具获得量测函数的雅可比矩阵,减少了算法的计算量,提高了计算效率。通过对 IEEE 14 节点等 4 个标准系统的仿真验证了算法的有效性。结果表明,基于 AD 技术的多平衡机状态估计算法在电力系统运行与控制中具有一定的应用价值。

表 2 结合 AD 技术的多平衡机状态估计的性能参数

Table 2 Performance parameters in state estimation for multi-balancing machines with AD technology

节点	平衡机节点	J_1	S_M	S_B
IEEE 14	1	28.342	1.007	0.716
	1 2	29.555	1.007	0.700
	1 2 6	34.631	1.007	0.621
IEEE 30	1	63.127	0.888	0.564
	1 2	64.524	0.888	0.553
	1 2 5 8	65.548	0.888	0.547
IEEE 57	1	128.254	0.978	0.668
	1 2 3	130.438	0.978	0.663
	1 2 3 6 12	134.499	0.978	0.650
IEEE 118	1	249.313	0.998	0.526
	1 4 6	256.495	0.998	0.518
	1 4 6 8 12 15	266.283	0.998	0.508

参考文献:

- [1] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 61-104.
- [2] 贾嵘, 蔡振华, 刘晶, 等. 基于主成分分析和最小二乘支持向量机的电力系统状态估计[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 75-77, 98. (JIA Rong, CAI Zhen-hua, LIU Jing, et al. Power system state estimation based on principle component analysis and least square support vector machines[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 75-77, 98. (in Chinese)).
- [3] 李碧君, 薛禹胜, 顾景汶, 等. 电力系统状态估计问题的研究现状和展望[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 53-60. (LI Bi-jun, XUE Yu-sheng, GU Jing-wen, et al. Status quo and prospect of power system state estimation[J]. Automation of Electric Power System, 1998, 22(11): 53-60. (in Chinese)).
- [4] 任江波, 于尔铿, 郭志忠, 等. 基于灵敏度分析的逐次追踪状态估计[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 64-68. (REN Jiang-bo, YU Er-keng, GUO Zhi-zhong, et al. Sequential tracking state estimation based on sensitivity analysis[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 64-68. (in Chinese)).
- [5] 庞博, 卫志农, 孙国强. 基于风力发电机简化RX模型的电力系统状态估计[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 159-163. (PANG Bo, WEI Zhi-nong, SUN Guo-qiang. Power system state estimation based on simplified RX model of wind power generator[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 159-163. (in Chinese)).
- [6] 崔丽华, 陈根军. 多平衡机潮流计算在调度员潮流中的应用[J]. 广东电力, 2006, 19(9): 13-17. (CUI Li-hua, CHEN Gen-jun. Application of multi-slack load flow calculation in dispatcher power flow[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(9): 13-17. (in Chinese)).
- [7] 杭乃善, 姚元玺, 龚婷婷, 等. 基于直角坐标注入电流形式的多平衡节点潮流算法研究[J]. 继电器, 2005, 33(4): 9-16. (HANG Nai-shan, YAO Yuan-xi, DOU Ting-ting, et al. An algorithm of multi-balance bus based on rectangular coordinate current influx[J]. Relay, 2005, 33(4): 9-16. (in Chinese)).
- [8] 罗纯坚. 多调频厂下的电力系统潮流计算[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- [9] 许继红, 陈亚宁, 林莉, 等. 一种改进的配电网牛顿潮流算法[J]. 广东电力, 2008, 21(5): 15-18. (XU Ji-hong, CHEN Ya-ning, LIN Li, et al. An improved Newton power flow algorithm for distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(5): 15-18. (in Chinese)).
- [10] 姚元玺, 杭乃善. 基于联络线功率等值约束条件的潮流算法研究[J]. 继电器, 2006, 34(1): 31-33. (YAO Yuan-xi, HANG Nai-shan. Power flow studies of multi-swing bus based on tie-line power equivalence constraints[J]. Relay, 2006, 34(1): 31-33. (in Chinese)).
- [11] BARTHOLOMEW-BIGGS M C, BROWN S, CHRISTIANSON B, et al. Automatic differentiation of algorithms[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2000, 124: 171-190.
- [12] 张海斌, 薛毅. 自动微分的基本思想与实现[J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(3): 332-336. (ZHANG Hai-bin, XUE Yi. On automatic differentiation[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2005, 31(3): 332-336. (in Chinese)).
- [13] 李萍. 自动微分工具实现技术研究[D]. 长沙: 中国人民解放军国防科学技术大学, 2002.
- [14] ORFANOIANNI T, BACHER R. Using automatic code differentiation in power flow algorithms[J]. IEEE Trans on Power System, 1999, 14(1): 138-144.
- [15] 耿光超, 江全元. 基于自动微分技术的内点法最优潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(23): 41-45. (GENG Guang-chao, JIANG Quan-yuan. An automatic differentiation based interior-point method for optimal power flow[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(23): 41-45. (in Chinese)).
- [16] IBSAIS A, AJJARAPU V. The role of automatic differentiation in power systems analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 592-597.
- [17] JEROSOLIMSKI M, LEVACHER L. A new method for fast calculation of Jacobian matrices: automatic differentiation for power system simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 700-706.
- [18] WALTHER A, GRIEWANK A. A package for the automatic differentiation of algorithms written in C/C++ [CP/OL]. (2010-11-18). <http://www.coin-or.org/projects/ADOL-C.xml>.