

基于自动微分技术的电力系统状态估计算法

叶芳¹, 卫志农¹, 孙国强¹, 刘兵²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 华东电网有限公司培训中心, 上海 200438)

摘要: 在常规状态估计模型的基础上, 结合自动微分(Automatic Differentiation, AD)技术讨论了一种应用AD技术的状态估计算法。该算法将AD技术分别应用于加权最小二乘状态估计和非线性加权最小二乘状态估计中, 利用AD自动生成量测函数的雅可比矩阵和海森矩阵。与传统的手工推导微分解析表达式再编写相应的微分代码方法相比, 该方法有效避免了截断误差, 显著提高了计算效率。结合IEEE三个标准算例进行了仿真, 分别对运行时间和目标函数值进行了比较, 验证了算法的有效性。

关键词: 电力系统; 状态估计; 自动微分; 非线性最小二乘; ADOL-C

State estimation of power systems with automatic differentiation technology

YE Fang¹, WEI Zhi-nong¹, SUN Guo-qiang¹, LIU Bing²

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Training Center, East China Grid Company Limited, Shanghai 200438, China)

Abstract: A state estimation algorithm of power system is discussed combining with automatic differentiation(AD) technology. The AD technology is applied to weighted least squares state estimation and nonlinear weighted least squares state estimation respectively. Comparing with traditional method which needs to deduce differentiation expression before writing computer codes, the truncation error is avoided effectively and the computation efficiency is improved observably when Jacobian and Hessian matrix of measurement function are built automatically using AD. The results of three IEEE test systems demonstrate the effectiveness of the proposed approach in terms of comparisons of computing time and the value of objective function.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50877024).

Key words: power system; state estimation; automatic differentiation; nonlinear least square method; ADOL-C

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0091-05

0 引言

随着电网规模的不断扩大, 电力系统的结构和运行方式日趋复杂, 电力系统调度中心的自动化水平也需要逐步由低级向高级发展, 因此能量管理系统(Energy Management System, EMS)得到了广泛的应用。状态估计软件是EMS的核心软件, 基于电网的结构、参数以及实时量测, 为其他高级应用软件提供一个可靠而完整的电力系统实时数据库, 是电力系统运行、控制和安全评估等方面的基础, 因此研究实用的状态估计算法具有重要的现实意义^[1-2]。

状态估计中量测函数是状态矢量的非线性矢量函数, 过去往往采取将非线性函数泰勒级数展开并取至一次项, 即化为线性模型来处理, 从而忽略了模型的非线性程度。文献[3]采用双一次项展开方法, 保留了泰勒级数的二阶项, 提出了非线性最小二乘法, 并将其应用到状态估计中, 表明了该方法的可行性。

在状态估计中, 形成雅可比(Jacobian)矩阵和海森(Hessian)矩阵最直接的方法是手工对量测函数的解析表达式进行微分, 然后编写微分代码。手工编写微分代码的工作过于繁琐且容易出错, 自动微分(Automatic Differentiation, AD)技术的出现克服了这个缺点, 它是计算机数值计算和分析领域内的一项完全崭新的技术。AD将微分定义为代数

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877024)

运算, 与其他微分方法 (如数值微分、符号微分) 相比, 它可以自动计算函数的任意阶导数, 而且避免了截断误差。目前 AD 技术已经在电力系统潮流计算、灵敏度分析及最优潮流计算等方面得到了应用^[4-8]。

本文旨在研究基于 AD 技术的电力系统状态估计算法, 在经典加权最小二乘法的基础上, 结合 AD 技术, 将基于运算符重载的 ADOL-C 自动微分工具分别应用于加权最小二乘 (Weighted Least Squares, WLS) 状态估计和非线性 WLS 状态估计中。算例仿真表明, 这两种算法用 AD 技术替代传统的手工编写微分代码计算 Jacobian 矩阵和 Hessian 矩阵, 简单易行, 具有更高的计算效率。

1 AD 技术^[9-11]

1.1 基本原理

微分运算是目标优化、非线性系统求解、灵敏度分析等热点课题中的关键技术之一。1961 年 A. Robinson 引入“无穷大量”和“无穷小量”, 建立了“非标准分析”理论, 提出在实数的延拓空间中, 微分可以定义为代数运算。这种思想同计算机技术相结合就形成了“自动微分”技术。

AD 技术依赖于以下事实, 无论函数多么复杂, 总是由一系列基本操作序列组成, 如四则运算 (加、减、乘、除), 基本函数 (三角函数、指数函数等)。下面举例说明:

$$f(x) = x_1 \sin x_2 + e^{x_1 x_2} \quad (1)$$

将式 (1) 所示的函数通过引入独立变量和中间变量分解成一系列的基本运算, 如表 1 所示。

表 1 独立变量和中间变量

Tab.1 Independent and intermediate variables

独立变量	中间变量
x_1	$x_3 = \sin x_2$
x_2	$x_4 = x_1 x_3$
	$x_5 = x_1 x_2$
	$x_6 = e^{x_5}$
	$x_7 = x_4 + x_6$
	$y = x_7$

由此在已知独立变量的值之后, 自顶而下就可以得到函数的精确值 y 。

给定 \dot{x}_1 、 \dot{x}_2 , 通过使用微分计算的链式法则, AD 技术可以以完全机械的方式得到函数的微分, 而且不含截断误差。目前 AD 技术有两种模式: 正模式和逆模式, 它们的区别在于怎样运用链式法则

计算传递函数。

正模式传递中间变量关于独立变量的导数, 直接按照表 2 左栏自上而下求得函数的导数 \dot{y} 。

逆模式传递最终结果关于中间变量的导数, 先求得函数值 y , 再按照表 2 右栏自下而上计算函数的导数 \dot{y} 。

表 2 正模式和逆模式

Tab.2 Forward and reverse phases

正模式	逆模式
$\dot{x}_3 = \cos(x_2) \cdot \dot{x}_2$	$p_2 = p_2 + x_{3,2} \cdot p_3$
$\dot{x}_4 = \dot{x}_1 x_3 + x_1 \dot{x}_3$	$p_1 = p_1 + x_{4,1} \cdot p_4$ $p_3 = p_3 + x_{4,3} \cdot p_4$
$\dot{x}_5 = \dot{x}_1 x_2 + x_1 \dot{x}_2$	$p_1 = p_1 + x_{5,1} \cdot p_5$ $p_2 = p_2 + x_{5,2} \cdot p_5$
$\dot{x}_6 = x_6 \cdot \dot{x}_5$	$p_5 = p_5 + x_{6,5} \cdot p_6$
$\dot{x}_7 = \dot{x}_4 + \dot{x}_6$	$p_4 = p_4 + x_{7,4} \cdot p_7$ $p_6 = p_6 + x_{7,6} \cdot p_7$
$\dot{y} = \dot{x}_7$	$p_7 = 1$

表 2 中, $x_{i,j} = \frac{\partial x_i}{\partial x_j}$, $p_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}$ 。

1.2 AD 工具

现在存在两种自动微分的实现方法: 源代码变换方法和运算符重载方法。源代码变换是显式的重写源代码以得到导数代码的方法, 代表软件有 ADIC 和 ADIFOR。运算符重载利用了 C++ 等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, 代表软件有 ADC 和 ADOL-C。基于运算符重载的 AD 工具没有代码生成, 很容易保留源程序的语义和原语言的语法, 避免了源代码变换 AD 中复杂的宏指令, 使用方便灵活。

ADOL-C 是由 Dresden 技术大学科学计算学院开发的自动微分系统, 使用运算符重载的方法对 C++ 程序进行自动微分, 能够以正模式和逆模式计算任意阶导数。基于以上优点, 本文选择 ADOL-C 工具进行微分计算。

2 电力系统状态估计模型

状态估计是 EMS 的重要组成部分, 在电力系统运行控制中起着举足轻重的作用。目前状态估计算法可以分为两大类^[1,12]: 一种是高斯型最小二乘的总体算法, 如 WLS 法, 快速分解法, 量测量变

换法等; 另一种是卡尔曼型逐次估计算法。其中 WLS 法是状态估计的最基本算法, 该算法模型简单, 收敛性能好, 估计质量高, 是目前应用最广泛的算法之一, 因此本文在 WLS 法的基础上进行算法研究。

2.1 WLS 状态估计的数学模型

在给定网络接线、支路参数和量测系统的条件下, 电力系统状态估计的非线性量测方程为:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{v} \quad (2)$$

式中: \mathbf{z} 为量测量, 一般为节点电压幅值、节点注入功率和支路功率; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为量测函数, 由满足电路基本定律, 如基尔霍夫定律、功率方程所组成; \mathbf{x} 为 n 维系统状态变量, 一般取各节点的复电压, 用直角坐标表示为电压的实部和虚部; \mathbf{v} 为量测随机误差, 假设其服从均值为零、方差为 σ^2 的正态分布。

设 \mathbf{R} 是以 σ_i^2 为对角元素的量测误差方差阵, 状态估计问题就是求使目标函数

$$J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (3)$$

达到最小时 \mathbf{x} 的值。

通过对量测函数 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 进行线性化假设, 即对 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 进行泰勒级数展开并忽略二次以上非线性项, 可以得到 WLS 状态估计的迭代公式如式 (4):

$$\begin{cases} \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} = [\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)})]^{-1} \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} \times \\ \quad [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)})] \\ \hat{\mathbf{x}}^{(k+1)} = \hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} \end{cases} \quad (4)$$

式中: (k) 表示迭代序号; \mathbf{H} 为量测函数的 Jacobian 矩阵。

2.2 非线性 WLS 状态估计的数学模型

文献[3]对量测函数采用双一次项展开的方法取至泰勒级数的二阶项, 建立非线性状态估计的数学模型。

式 (3) 由极值函数有

$$\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})] = 0 \quad (5)$$

令 \mathbf{x}_0 是 \mathbf{x} 的某一近似值, 将 $\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}})$ 和 $\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$ 在 \mathbf{x}_0 附近泰勒级数展开并取至一次项, 得

$$\begin{cases} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{H}(\mathbf{x}_0) + \mathbf{W}(\mathbf{x}_0) \Delta \mathbf{x} \\ \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{h}(\mathbf{x}_0) + \mathbf{H}(\mathbf{x}_0) \Delta \mathbf{x} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$; $\mathbf{W} = \frac{\partial^2 \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}_i \partial \mathbf{x}_j}$, ($i, j = 1, 2, L, n$)。

将式 (6) 代入式 (5), 可得:

$$[\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}] \Delta \mathbf{x} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z} + [\mathbf{W} \Delta \mathbf{x}]^T \mathbf{R}^{-1} [\Delta \mathbf{z} - \mathbf{H} \Delta \mathbf{x}] \quad (7)$$

式中, $\Delta \mathbf{z} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}_0)$ 。

式 (7) 等号右边 $\Delta \mathbf{x}$ 仍然存在, 无法直接求解, 这里将等式右边的 $\Delta \mathbf{x}$ 用 $[\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z}$ 代替, 由此得到非线性 WLS 状态估计的迭代公式:

$$\begin{cases} \Delta \hat{\mathbf{x}}_1^{(k)} = [\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)})]^{-1} \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} \times \\ \quad [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)})] \\ \Delta \hat{\mathbf{x}}_2^{(k)} = [\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)})]^{-1} [\mathbf{W}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \Delta \hat{\mathbf{x}}_1^{(k)}]^T \times \\ \quad [\mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)})] - \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \Delta \hat{\mathbf{x}}_1^{(k)}] \\ \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} = \Delta \hat{\mathbf{x}}_1^{(k)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}_2^{(k)} \\ \hat{\mathbf{x}}^{(k+1)} = \hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} \end{cases} \quad (8)$$

由式 (8) 可以看出, 若 $\Delta \hat{\mathbf{x}}_2^{(k)}$ 为零, 则式 (8) 即为 WLS 状态估计的迭代公式。

3 AD 技术在状态估计中的应用

在电力系统状态估计中, 需要形成量测函数的 Jacobian 矩阵和 Hessian 矩阵。传统的处理方法是手工推导出 Jacobian 矩阵和 Hessian 矩阵各元素的解析表达式, 然后根据表达式编制出计算机程序。

下面以节点电压幅值量测 V_i 、节点注入有功功率量测 P_i 以及支路始端有功功率量测 P_{ij} 为例, 手工推导其 Jacobian 矩阵和 Hessian 矩阵各元素的解析表达式。

3.1 Jacobian 矩阵

$$\frac{\partial V_i^2}{\partial e_i} = 2e_i \quad (9)$$

$$\frac{\partial V_i^2}{\partial f_i} = 2f_i \quad (10)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial e_i} = \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + G_{ii} e_i + B_{ii} f_i \quad (11)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial f_i} = \sum_{j=1}^n (B_{ij} e_j + G_{ij} f_j) - B_{ii} e_i + G_{ii} f_i \quad (12)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial e_j} = G_{ij} e_i + B_{ij} f_i \quad (13)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial f_j} = G_{ij} f_i - B_{ij} e_i \quad (14)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial e_i} = 2g e_i - g e_j + b f_j \quad (15)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial f_i} = 2g f_i - g f_j - b e_j \quad (16)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial e_j} = -ge_i - bf_i \quad (17)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial f_j} = -gf_i + be_i \quad (18)$$

式中： e_i, e_j 为节点 i, j 的电压实部； f_i, f_j 为节点 i, j 的电压虚部； G, B 为导纳矩阵的实部、虚部； g, b 为线路电导、电纳。

由此可见，在直角坐标系下，Jacobian 矩阵的元素均是可变元素。

3.2 Hessian 矩阵

$$\frac{\partial^2 V_i^2}{\partial e_i^2} = \frac{\partial^2 V_i^2}{\partial f_i^2} = 2 \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial e_i^2} = \frac{\partial^2 P_i}{\partial f_i^2} = 2G_{ii} \quad (20)$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial e_i \partial e_j} = \frac{\partial^2 P_i}{\partial f_i \partial f_j} = G_{ij} \quad (21)$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial e_i \partial f_j} = -\frac{\partial^2 P_i}{\partial f_i \partial e_j} = -B_{ij} \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 P_{ij}}{\partial e_i^2} = \frac{\partial^2 P_{ij}}{\partial f_i^2} = 2g \quad (23)$$

$$\frac{\partial^2 P_{ij}}{\partial e_i \partial e_j} = \frac{\partial^2 P_{ij}}{\partial f_i \partial f_j} = -g \quad (24)$$

$$\frac{\partial^2 P_{ij}}{\partial e_i \partial f_j} = -\frac{\partial^2 P_{ij}}{\partial f_i \partial e_j} = b \quad (25)$$

由此可见，在直角坐标系下，Hessian 矩阵的所有元素均为常数，在迭代中保持不变。

3.3 在非线性 WLS 状态估计中采用 AD 技术的算法实现

本文采用 AD 技术不需要推导导数解析式，直接替代 WLS 状态估计和 nonlinear WLS 状态估计程序中计算 Jacobian 矩阵和 Hessian 矩阵的代码，自动生成相应矩阵。通过 3.2 节的分析，发现 Hessian 矩阵的所有元素均为常数，在迭代过程中不随自变量的变化而变化。而 AD 工具在生成相应矩阵时，处理可变元素和不变元素的过程是相同的，因此其对 Hessian 矩阵的元素应用链式法则求导是在重复运算，降低了程序的性能。

针对这个问题，本文参考文献[8]进行如下处理：对于矩阵中的不变元素，在迭代前先将其各自的位置和数值存储在一个链表中；对于矩阵的可变元素，在迭代中运用 AD 技术自动求导。

算法的程序流程如图 1 所示。

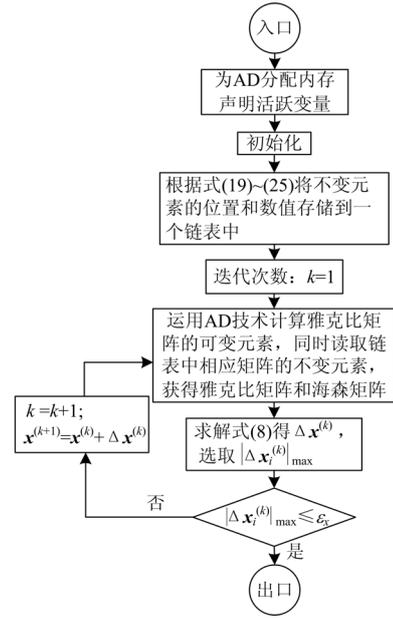


图 1 运用 AD 技术的非线性 WLS 状态估计算法的程序框图
Fig.1 Flowchart of nonlinear WLS state estimation algorithm with AD technology

4 算例仿真

本文分别对 IEEE-14 节点、IEEE-30 节点和 IEEE-57 节点的标准算例进行了仿真计算，其中量测数据是在测试系统潮流结果的基础上叠加相应的正态分布的随机量测误差所生成的。

4.1 WLS 状态估计仿真结果的统计分析

在 WLS 状态估计中分别采用手工方法和 AD 技术计算 Jacobian 矩阵，对这两种方法下的状态估计性能进行分析比较，结果如表 3 所示。表中：

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

$$S_B = \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{h_i(\hat{x}) - s_i}{\sigma_i} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

其中， J 为目标函数值； S_M 为量测误差统计值； S_B 为估计误差统计值； m 为量测量数目； s_i 为量测量 i 的真值； z_i, h_i, s_i 均为标么值。

由文献[1]可知， S_M 应接近 1， S_B 应小于 1， S_B/S_M 可以说明滤波效果。

表 3 结果表明：(1) 由运行时间 t 可以看出，相对于手动编写 Jacobian 矩阵代码，使用 AD 技术的计算速度明显加快，且系统规模越大效果越明显；(2) 由目标函数值 J 可以看出，使用 AD 技术避免

了截断误差, 精度有所提高。

表 3 不同方法下 WLS 状态估计的性能比较

算例	手工编写微分代码				AD 技术			
	t/s	J	S_M	S_B	t/s	J	S_M	S_B
IEEE-14	0.016	28.927	1.007	0.717	0.016	28.342	1.007	0.716
IEEE-30	0.110	63.645	0.888	0.564	0.062	63.127	0.888	0.564
IEEE-57	1.110	128.280	0.978	0.671	0.594	128.254	0.978	0.668

4.2 非线性 WLS 状态估计仿真结果的统计分析

在非线性 WLS 状态估计中, 运用手工编写微分代码的方法计算 Jacobian 矩阵和 Hessian 矩阵, 算法复杂程度明显增大。表 4 列出了 IEEE 三个标准算例的运行时间和目标函数值, 分别对手工编写微分代码和采用 AD 技术这两种方法进行了比较。结果表明, 采用 AD 技术大大降低了应用难度, 提高了计算速度, 且随着系统规模增大, 速度成倍提高。由此可见, 在非线性 WLS 状态估计中, AD 技术的应用有其优越性。

表 4 不同方法下非线性 WLS 状态估计的性能对比

Tab.4 Performance contrast of nonlinear WLS state estimation between different methods

算例	手工编写微分代码		AD 技术	
	t/s	J	t/s	J
IEEE-14	0.016	28.923	0.016	28.342
IEEE-30	0.218	63.645	0.109	63.127
IEEE-57	1.813	128.273	0.828	128.253

5 结论

本文在常规状态估计模型的基础上, 结合 AD 技术, 提出了基于 AD 技术的电力系统状态估计算法。利用 AD 求解量测函数的 Jacobian 矩阵和 Hessian 矩阵, 有效避免了截断误差, 在保证准确性的同时提高了计算效率, 弥补了手工编写微分代码的不足, 具有较强的实用性。

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.
YU Er-keng. Power system state estimation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [2] 兰华, 李积捷. 电力系统状态估计算法的研究现状和展望[J]. 继电器, 2007, 35 (10): 78-82.
LAN Hua, LI Ji-jie. Status quo and prospect of algorithm of power system state estimation[J]. Relay, 2007, 35 (10): 78-82.
- [3] 孙英君, 陶华学. 非线性最小二乘法在电力系统状态

- 估计中的应用[J]. 勘察科学技术, 2001 (4): 45-48.
SUN Ying-jun, TAO Hua-xue. Application of non-linear least square method in the state estimation of electric power system[J]. Site Investigation Science and Technology, 2001 (4): 45-48.
- [4] Bacher R. Computer aided power flow software engineering and code generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (1): 490-496.
- [5] Orfanogianni T, Bacher R. Using automatic code differentiation in power flow algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14 (1): 138-144.
- [6] Ibsais A, Ajarapu V. The role of automatic differentiation in power systems analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (2): 592-597.
- [7] Jerolimski 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.
- [8] 耿光超, 江全元. 基于自动微分技术的内点法最潮流算法[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 Systems, 2008, 32 (23): 41-45.
- [9] 程彬杰, 王莉萍, 邵志标, 等. 数据拟合中自动微分技术的应用[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33 (7): 19-22.
CHENG Bin-jie, WANG Li-ping, SHAO Zhi-biao, et al. Automatic differentiation technique for data fitting[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33 (7): 19-22.
- [10] 王莉萍, 程彬杰, 唐天同, 等. 用于电子光学系统像差分析的自动微分技术及其在 Visual C++ 平台上的软件实现[J]. 电子显微学报, 1999, 18 (6): 644-651.
WANG Li-ping, CHENG Bin-jie, TANG Tian-tong, et al. Automatic differentiation technique for aberration analysis of electronic optic systems with implementation in Visual C++ environment[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 1999, 18 (6): 644-651.
- [11] 李萍. 自动微分工具实现技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002.

(下转第 100 页 continued on page 100)

Delivery, 1996, 11 (2): 924-930.

[4] Robertson D C, Camps O I, Mayer J S, et al. Wavelets and electromagnetic power system transients[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (2): 1050-1058.

[5] Karimi M, Mokhtari H, Reza M. Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(4): 1212-1220.

[6] Sakis Meliopoulos A P, Lee Chien-Hsing. An alternative method for transient analysis via wavelets[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (1): 114-121.

[7] 胡铭, 陈珩. 基于小波变换模极大值的电能质量扰动检测与定位[J]. 电网技术, 2001, 25 (3): 12-16.
HU Ming, CHEN Heng. Detection and location of power quality disturbances using wavelet transform modulus maxima[J]. Power System Technology, 2001, 25 (3): 12-16.

[8] 薛惠, 杨仁刚. 基于小波包除噪的电能质量扰动检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (3): 85-90.
XUE Hui, YANG Ren-gang. Power quality disturbance detection method using wavelet package transform based de-noising scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (3): 85-90.

[9] 陈祥训. 采用小波技术的几种电能质量扰动的测量与分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (10): 1-6.
CHENG Xiang-xun. Wavelet-based measurements and classification of short duration power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (10): 1-6.

[10] 朱韬析, 江道灼. 一种简单实用的电能质量扰动检测方法[J]. 继电器, 2005, 33 (7): 46-49.
ZHU Tao-xi, JIANG Dao-shuo. A simple and practical method of measuring short duration power quality disturbances[J]. Relay, 2005, 33 (7): 46-49.

[11] 文继峰, 刘沛. 一种电能质量扰动检测的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (12): 17-20.
WEN Ji-feng, LIU Pei. A new method for detection of power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (12): 17-20.

[12] 魏磊, 张伏生, 耿中行, 等. 基于瞬时无功功率理论的电能质量扰动检测、定位与分类方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (6): 53-58.
WEI Lei, ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, et al. Detection, localization and identification of power quality disturbance based on instantaneous reactive power theory[J]. Power System Technology, 2004, 28 (6): 53-58.

[13] 王波. 基于 AR 谱估计和插值 FFT 的间谐波检测方法[J]. 继电器, 2006, 34 (4): 49-52, 56.
WANG Bo. A method for interharmonic measurement based on AR model spectral estimation and interpolation FFT algorithm[J]. Relay, 2006, 34 (4): 49-52, 56.

[14] 朱灿焰, 何佩馄. 相关杂波的 AR 谱模型及其研究[J]. 现代雷达, 1998, 20 (5): 36-43.
ZHU Can-yan, HE Pei-kun. Research of correlated clutter AR model[J]. Modern Radar, 1998, 20 (5): 36-43.

[15] 李义红, 韩富春. 基于数学形态学的电能质量扰动检测方法研究[J]. 水电能源科学, 2008, 36(3):179-181.
LI Yi-hong, HAN Fu-chun. Study on power quality detection method based on mathematical morphology[J]. Water Resources and Power, 2008, 36 (3): 179-181.

[16] 曾纪勇. 基于数学形态学的电能质量检测方法及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
ZENG Ji-yong. Power quality detection method based on mathematical morphology and application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.

收稿日期: 2009-09-21; 修回日期: 2009-11-25

作者简介:

李加升 (1965-), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为电能质量检测、信号处理、应用电子技术; E-mail: lijiaosheng@163.com

戴瑜兴 (1956-), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要研究方向: 数字化系统设计理论与应用现代网络通信理论及应用;

柴世杰 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电能质量检测、信号处理。

(上接第95页 continued from page 95)

LI Ping. The research on implement technique of automatic differentiation tools[D]. Changsha: National University of Defense, 2002.

[12] Schweppe F C, Wildes J, Rom D B. Power system static state estimation parts I, II, and III[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 9 (1): 120-135.

作者简介:

叶芳 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制; E-mail: yefang87@126.com

卫志农 (1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化等;

孙国强 (1978-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统运行分析与控制。

收稿日期: 2010-01-19; 修回日期: 2010-02-24