

基于 Kalman 滤波原理的电力系统动态状态估计的研究综述

刘辉乐, 刘天琪, 黄志华

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 湖州电力局, 浙江 湖州 313000)

摘要: 状态估计是现代 EMS 的重要组成部分, 特别是动态状态估计, 能实现实时运行状态的估计和预报功能。通过对动态估计算法 Kalman 滤波算法和国内外学者的一些改进算法的现状研究, 分析了这些算法目前存在的主要问题。并基于此提出了 Kalman 滤波算法的新的改进措施, 研究了方向和发展趋势。

关键词: 能量管理系统; 电力系统; 动态状态估计; Kalman 滤波

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)20-0062-05

0 前言

状态估计是现代电力系统能量管理系统中的重要组成部分, 尤其在电力市场环境发挥更重要的作用。状态估计分为静态状态估计和动态状态估计。当然, 若要对系统当前运行状况的安全监视, 电网数据的可靠、准确、完整和兼容, 则只需静态状态估计器提供的系统当前运行状态的估计值即可^[1]。但若还要实现经济分配、安全预估和预防控制等在线功能, 则还需系统未来时刻运行状态的预报信息。动态状态估计器能同时提供系统的估计值和预报值, 因此近年来受到国际学术界的重视^[2]。

目前, 动态状态估计主要基于 Kalman 滤波算法。早在 20 世纪 70 年代初, Debs 等就提出了用 Kalman 滤波算法, 并用最简单的系统模型建立动态状态估计^[3]。Masiello 等也提出了跟踪状态估计器^[4]。随后, Nishiya 等又在系统模型中引入倾斜因子^[5]。Leite da Silva 等用常参数指数平滑法建立系统模型, 以提高精度。但由于系统负荷模式的动态特性, 固定参数模型已经难以满足不同负荷模式的要求。因此, 上述方法的预报精度已不能令人满意。另外, 以上所提的 Kalman 滤波方法对一些特定情况, 如负荷突变、发电机输出功率突变、不良数据、网络拓扑错误等情况, 预测误差较大, 难以满足实时在线应用的要求。

为了获得更好的估计和预报性能, 本文作者对目前动态状态估计存在的主要问题作了认真的研究和总结。提出了一系列国内外学者的算法改进模型, 分析比较其改进模型的优缺点, 基于此提出了新的改进措施, 并对它的发展趋势进行了探讨。

1 Kalman 滤波算法的数学模型

在正常情况下, 电力系统状态随着负荷的变化, 遵循着一种慢变化过程。因此, 电力系统的准稳态模型具有如下形式^[6,7]:

$$X_{k+1} = f(X_k) + W_k \quad (1)$$

$$Z_{k+1} = h(X_{k+1}) + V_{k+1} \quad (2)$$

式中: X_k 是 k 时刻 ($n \times 1$) 维状态矢量; $f(X_k)$ 是 ($n \times 1$) 维状态转移函数; Z_k 是 k 时刻 ($m \times 1$) 维观测向量; $h(X_k)$ 是 ($m \times 1$) 维非线性量测函数, W_k 和 V_k 分别为 ($n \times 1$) 维和 ($m \times 1$) 维均值为 0 的白噪声。

将式(1)模型线性化, 可得:

$$X_{k+1} = F_k X_k + U_k + \quad (3)$$

已知 Z_k, Z_{k-1}, \dots 则动态估计器可以给出 k 时刻的状态估计值 \hat{X}_k , 以及状态估计的一步向前预报值 \tilde{X}_{k+1} 。利用式(2)、(3), 可推得扩展 Kalman (EKF) 滤波公式:

$$\text{预报步} \begin{cases} \tilde{X}_{k+1} = F_k \hat{X}_k + U_k \\ M_{k+1} = F_k \quad {}_k F_k^T + Q_k \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{滤波步} \begin{cases} \hat{X}_{k+1} = \tilde{X}_{k+1} + K_{k+1} (Z_{k+1} - h(\tilde{X}_{k+1})) \\ K_{k+1} = \quad {}_{k+1} H_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} \\ \quad {}_{k+1} = (H_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} H_{k+1} + M_{k+1}^{-1})^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: M_{k+1} 和 Σ_{k+1} 分别是 $k+1$ 步预报误差和估计误差的协方差矩阵。给定 k 时刻系统状态的估计值 \hat{X}_k , 便可用上述公式递推计算出 $k+1$ 时刻的状态预报值 \tilde{X}_{k+1} 和状态估计值 \hat{X}_{k+1} 。

2 算法的改进模型

Kalman 滤波算法适用于线性系统, 而电力系统

是非线性系统,在正常运行情况下可近似为线性系统。因此用 Kalman 滤波算法预测较准确。但在特定的情况,如负荷或发电机输出功率突变、存在不良数据时,Kalman 算法的性能急剧下降。为改善其预测和滤波的准确性,中外学者提出了算法的一系列改进模型^[7~11]。

2.1 计入非线性的 Kalman 滤波法

考虑到电力系统为二次系统,因此,其泰勒展开式中最高只含二次项,将二次项引入到 Kalman 算法中,能大大改善其滤波性能及对电力系统各种情况的预测能力。文献[8]基于此理论提出了计入非线性的 Kalman 滤波法(Incorporating Nonlinearities of Measurement Function - INEKF)

将量测函数在 \tilde{X} 处展开:

$$h(\hat{X}) = h(\tilde{X}) + H(\tilde{X}) \cdot X + S \quad (6)$$

其中: H 为雅可比矩阵; S 为二阶项。

$$S = \frac{\partial^2 h(X)}{\partial X^2} (X)^2 \quad (7)$$

改进后的算法预测步同简单模型(4),滤波步的递推公式修正为:

$$\begin{cases} X_{i+1} = K(Z - h(\tilde{X}) - S_i) \\ K = \sum H^T(\tilde{X}) R^{-1} \\ = (H^T R^{-1} H + M^{-1})^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

$$\hat{X}(k+1) = \tilde{X}(k+1) + X_i \quad (9)$$

式(8)中, K 和 H 为常量,因此只需迭代 S_i ,得到收敛的 X_i ,利用式(9)就可得到估计结果。

2.2 基于负荷预测的动态估计法

基于负荷预测的动态估计算法(Based Bus Load Prediction-BLPEKF),考虑到 EKF 算法 Holt 两参数预测法在预测上的误差,采用负荷预测模型。通过对负荷的预测,了解负荷变化的趋势。由于负荷预测更具有现实意义和物理意义,它能真正预测负荷变化的趋势。随着负荷预测算法精度的提高,此算法将可能成为动态状态估计发展的方向。文献[9]对此模型进行了描述。

负荷预测模型:

$$\tilde{P}_{Gi}(k+1) = \hat{P}_{Gi}(k) + \sum_{j \text{ loads}} P_{Lj}(k+1) \quad (10)$$

其中: $\tilde{P}_{Gi}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻第 i 节点有功注入的预测值; $\hat{P}_{Gi}(k)$ 为 k 时刻第 i 节点有功注入的估

计值; i 为发电机的参与因子($\sum i = 1$)。

动态负荷预测基于功率 P 、 Q ,得到下一时刻的 P 、 Q 值,但表征电力系统的特征用电压 V ,作为状态变量更适合。因此,引入 $2N - 1$ 个非线性方程:

$$S = g(X) \quad (11)$$

得到负荷预测值后,经负荷潮流公式得到预测值 $\tilde{X}(k+1)$,再采用 Kalman 算法滤波步,即得到估计值 $X(k+1)$ 。在进行下一步负荷预测时,只需经网络方程将估计值转化为 $P_{Gi}(k+1)$ 即可。

2.3 自适应 Kalman 滤波法

采用自适应 Kalman 滤波法(Adaptive Kalman Filter Method-AKF)是考虑到电力系统的模型(3)过于简单,包含了动态方程的模型误差和线性化误差。因此,采用自适应技术,不断由滤波本身在线估计模型参数和噪声统计特性,以提高滤波精度,减少估计误差^[10]。该问题的数学模型描述如下。

用指数加权法估计时变噪声:

$$\hat{Q}_{k+1} = (1 - d_k) \hat{Q}_k + d_k \cdot [\hat{X}_{k+1} - \hat{F} \hat{X}_k] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{k+1} = & (1 - d_k) \hat{Q}_k + d_k \cdot [K_{k+1} (Z_{k+1} - \hat{F}_{k+1} \hat{X}_{k+1}) \cdot K_{k+1}^T \\ & + \hat{F}_{k+1} \hat{F}_k] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\hat{R}_{k+1} = (1 - d_k) \hat{R}_k + d_k \cdot [Z_{k+1} - h(\tilde{X}_{k+1})] \quad (14)$$

$$\hat{R}_{k+1} = (1 - d_k) \hat{R}_k + d_k \cdot [\hat{R}_{k+1} - H_{k+1} M_{k+1} H_{k+1}^T] \quad (15)$$

其中: $d_k = (1 - b) / (1 - b_{k+1})$; b 称为遗忘因子,取值范围为 $0.75 \sim 0.987$ 。

用递推增广最小二乘法估计模型参数:

$$\hat{F}_{k+1} = \hat{F}_k + P_{k+1} \cdot e_{k+1}^T \quad (16)$$

$$e_{k+1} = \hat{X}_{k+1} - \hat{F}_k \cdot \hat{X}_k \quad (17)$$

$$P_{k+1} = \frac{M_{k+1} \cdot \hat{X}_k}{\hat{X}_k^T M_{k+1} \hat{X}_k} \quad (18)$$

式中: b 为遗忘因子, $0 < b < 1$ 。

结合在线估计的模型参数和噪声统计特性,便可利用简单模型对状态变量进行预测和估计。

2.4 自适应预报动态状态估计算法

Kalman 滤波算法包括预测和滤波两部分,预测的性能主要取决于式(3)的系统模型,文献[6]采用两参数平滑预报模型:

$$\begin{cases} \hat{X}_k = a \hat{X}_{k-1} + (1 - a) \tilde{X}_k \\ b_k = (a - b_{k-1}) + (1 - a) b_{k-1} \\ \tilde{X}_{k+1} = \hat{X}_k + b_k \end{cases} \quad (19)$$

式中: a_k 是水平分量; b_k 是倾斜分量; a , 是平滑参数, 在 0 和 1 之间。由于 a , 是常数, 当负荷模式突变时, 模型 (19) 会产生较大的预报误差。因此提出了自适应预报动态状态估计算法 (Adaptive Forecasting Method-AFEKF), 采用变参数模型。根据预报误差的大小调整系统模型中的可变参数:

$$\begin{cases} k = a_k \hat{X}_k + (1 - a_k) \tilde{X}_k \\ b_k = k (k - k - 1) + (1 - k) b_{k-1} \\ \tilde{X}_{k+1} = k + b_k \end{cases} \quad (20)$$

式中: a_k 、 k 为时变参数, 由两参数因子设计的方法确定。

参数 a_k 、 k 在第 k 步时选取 3 组值: 中心值 a_0 、 0 , 低值 a_L 、 L , 高值 a_H 、 H 。使用这三组参数可得到 5 种组合, 相应的设计 $d_1 \sim d_5$, 分别为:

$$\begin{aligned} d_1 &= (a_0, 0) & d_2 &= (a_L, L) & d_3 &= (a_H, H) \\ d_4 &= (a_H, L) & d_5 &= (a_L, H) \end{aligned}$$

对每组设计参数, 用模型 (20) 可以做出各自的一步预报, 取其中预报误差最小的为参数值, 用于状态预测。

2.5 动态估计的鲁棒算法

Kalman 滤波动态状态估计算法的性能受不良数据的影响很大, 若有一种算法能免疫不良数据, 其估计能力将得到极大的改善。动态估计的鲁棒算法 (Robust Algorithm-REKF) 在预测和滤波间引入指数函数, 减少因预测值偏离过大或不良数据造成的误差, 以此修改权重, 符合权重选取的原则, 提高模型的精度, 实现免疫不良数据的功能。

鲁棒算法的数学模型中, 预测步和滤波步还是采用 Kalman 预报模型和滤波模型 (4)、(5), 但在预测后, 引入指数函数改变权重:

$$\begin{cases} W_k = W_k \exp(-|Z_k - h(\tilde{X}_k)|) \\ R_k = W_k^{-1} \end{cases} \quad (21)$$

由于 Kalman 滤波算法加入了式 (21), 算法的权重随着量测和预测的精度变化而变化, 精度高, 权重高, 反之亦然。其结果大大去掉了不良数据对其估计结果的影响。

3 各种算法存在的问题

针对原动态状态估计算法在负荷/发电机功率突变、状态预测、系统模型、不良数据污染等方面的缺点, 提出了改进算法。分析这些改进算法, 我们可以发现, 各算法的确不同程度地提高了状态估计的预测或滤波性能, 以及对电力系统各种情况的适应

能力。特别值得一提的是动态状态估计的鲁棒算法, 在存在不良数据时, 其滤波效果相当好, 而且对原模型仅做了微小的改动, 实现非常方便。然而, 通过认真的分析、研究, 并对算法进行仿真, 发现现有的改进算法仍存在以下几方面的缺点, 有待改进。

基于 Kalman 滤波的动态状态估计的预测, 如 INEKF 算法、REKF 算法的预测, 采用 Holt 两参数指数平滑法, 但该方法依然存在两个方面的问题: 平滑初值如何确定; 平滑参数如何选取。平滑初值选取不当, 有可能导致模型与指数平滑的出发点相违背, 导致很大的预测误差。自适应预报动态状态估计算法采用同时取若干值进行计算, 比较其预测误差, 选择误差小的使用。该方法显然是建立在逐步试探和大量的计算上, 难以满足在线应用要求。

BLPEKF 算法虽然避免了平滑参数的自适应问题, 但其引入了负荷预测模型, 一是其负荷模型的选取对状态值的影响很大; 二是预测的方法变化引入了 M 迭代式的变化, 不能用原 Kalman 滤波模型进行处理。

同时, 通过仿真分析和研究后, 我们也能发现现有的算法有一个共同的缺点, 那就是电压相角的估计精度远远不及幅值 v 的精度。

应该指出, 评价一种算法的主要指标是其计算精度与计算量。我们提出一种算法必须满足其计算速度要求, 而 AEKF 算法, 在线估计模型参数和噪声统计特性, 增加 7 个迭代式, 其计算量过大, 同样难以满足在线应用要求。

以上提出的问题, 若不能妥善解决, 会大大限制 Kalman 动态状态估计的实际应用。

4 改进措施和研究展望

电力系统动态状态估计的研究已有 30 多年的历史, 取得了一些研究和应用成果^[12]。动态状态估计能预测未来时刻的状态信息, 实现经济分配和预防控制。然而, 作为动态状态估计的主要算法 Kalman 滤波算法及其改进算法, 其在应用上仍有不少问题未得到妥善解决。为此, 针对过去算法的不足, 特别是本文所讨论的缺点, 提出改进措施:

首先, 针对 Holt 两参数指数平滑法用于动态状态估计时的参数选取问题, 提出利用最优化原理确定平滑系数。该原理应用于很多领域, 得到很好的预测结果^[13]。因此, 可将该原理用于电力系统 Kalman 算法, 解决参数选取问题。

其次,考虑到 PMU 同步相量量测单元在电力系统中的应用已成为现实^[14~17],并应用于静态状态估计^[15~17]。采用 PMU 采集到的相角量测信息,并结合原 SCADA 系统中的量测信息,定能改进原动态状态估计在相角预测和估计精度上的不足。

同时为满足在线应用要求,提高算法的计算速度,我们可采用快速解耦 P-Q 算法、稀疏矩阵技术,并行计算矩阵技术^[18],这些技术用于潮流计算获得成功,适于在状态估计算法中推广。

当然,随着监控电力系统规模的不断扩大,电力工业管理体制向市场化迈进,状态估计作为 EMS 中的重要应用软件,在电力市场环境中越显重要。各种新理论、新技术的不断涌现,为推动动态状态估计的发展和进一步的研究提供了可能。

参考文献:

- [1] 于尔铿(YU Er-keng). 电力系统状态估计(State Estimation of Electric Power System) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing:Hydraulic and Electric Power Press),1985.
- [2] 张伯明,王世纛,等(ZHANG Bo-ming, WANG Shi-yuan, et al). 电力系统实时运行的状态估计和预报(Estimation and Forecasting of Real-time Power System Operation States) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1991, 11(s):68-74.
- [3] Debs A, Larson R. A Dynamic Estimator for Tracking the State of a Power System[J]. IEEE Trans on PAS, 1970, 89(7):1670-1678.
- [4] Masiello R D, Schweppe F C. A Tracking Static State Estimator[J]. IEEE Trans on PAS, 1971, 90(8):1028-1033.
- [5] Nishiya K. Dynamic State Estimation for Electric Power Systems—Introduction of a Trend Factor and Detection of Innovation Processes[J]. Electrical Engineering in Japan, 1976, 96(5).
- [6] Leite da Silva A M, et al. State Forecasting in Electric Power Systems[J]. IEE Proc on 130, PtC, 130(5):237-244.
- [7] Leita da Silva A M, et al. An Efficient Dynamic State Estimation Algorithm Including Bad Data Processing [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(4):1050-1058.
- [8] Mandal J K, Sinha A K, et al. Incorporating Nonlinearities of Measurement Function in Power System Dynamic State Estimation[J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 1995, 142(3):289-296.
- [9] Sinha A K, Mandal J K. Dynamic State Estimation Using ANN based Bus Load Prediction[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(11):1219-1225.
- [10] 毛玉华,等(MAO Yu-hua, et al). 电力系统自适应卡尔曼滤波状态估计(Adaptive Kalman Filter Method for State Estimation in Power System) [J]. 东北电力学院学报(Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering), 1995, 15(2):20-26.
- [11] Shih K R, Huang S J. Application of a Robust Algorithm for Dynamic State Estimation of a Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(1):141-147.
- [12] 李碧君,薛禹胜,韩祯祥,等(LI Bi-jun, XUE Yu-sheng, HAN Zhen-xiang, et al). 电力系统状态估计问题的研究现状和展望(Status Quo and Prospect of Power System State Estimation) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(11):53-60.
- [13] 王卫星,薛海君(WANG Wei-xing, XUE Hai-jun). 利用最优化原理确定指数平滑法中的值和初始值(The Definition of the Value and the Starting Values in the Exponential Weighted Method with the Optimizing Principle) [J]. 焦作矿业学院学报(Journal of Jiaozuo Mining Institute), 1993, 30(1):105-111.
- [14] 韩英铎,王仲鸿,等(HAN Ying-duo, WANG Zhong-hong, et al). 电力系统中的三项前沿课题—柔性输电技术,智能控制,基于 GPS 的动态安全分析与监测系统(Three New Front Subjects in Power Systems—FACTS, Intelligent Control and Dynamic Security Analysis and Monitor System Based on GPS) [J]. 清华大学学报(自然科学版)(Journal of Tsinghua University, Sci & Tech), 1997, 37(7):1-6.
- [15] Phadke A G, et al. State Estimation with Phasor Measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, (1):233-241.
- [16] 王克英,穆刚,等(WANG Ke-ying, MU Gang, et al). 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置问题(Precision Improvement and PMU Placements Studies on State Estimation of a Hybrid Measurement System with PMUS) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2001, 21(8):29-33.
- [17] 卢志刚,许世范,等(LU Zhi-gang, XU Shi-fan, et al). 部分电压和电流相量可测量时电压相量的状态估计(State Estimation of Voltage Phasors Based on Parts of Voltage and Current Phasors Measurements) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(1):42-44.
- [18] 汪芳宗(WANG Fang-zong). 电力系统并行计算(Parallel Computer in Power System) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1998.

收稿日期: 2004-01-04; 修回日期: 2004-03-26

作者简介:

刘辉乐(1979 -),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统调度自动化,电力系统继电保护; E-mail: marylh1@163.com

刘天琪(1962-),女,博士,教授,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制,电力系统调度自动化,高压直流输电等;

黄志华(1979-),男,助理工程师,从事电力系统继电保护工作。

Research on dynamic state estimation based on Kalman theory in power system

LIU Hui-le¹, LIU Tianqi¹, HUANG Zhi-hua²

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Huzhou Power Supply Bureau, Huzhou 313000, China)

Abstract: State estimation, especially dynamic state estimation (DSE), which is one of the most important parts of the energy management system (EMS), can forecast the state vector one step ahead. This paper studies the Kalman algorithm of the DSE and some improved models presented by domestic and foreign scholars, then analyzes the main drawbacks of these algorithms in present applications of power system, finally proposes its new improvements and developments in future.

Key words: energy management system; power system; dynamic state estimation; Kalman filter

(上接第 39 页 continued from page 39)

[5] 孙雅明(SUN Ya-ming). 人工智能基础(Basis of Artificial Intelligence) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing:Hydraulic and Electric Power Press),1995.5-7.

许琦(1980-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统仿真及计算机技术在电力系统中的应用; E-mail: ki-ki-cat@eyou.com;

王磊(1963-),女,副教授,从事配电网自动化、人工智能、决策支持系统在电力系统中的应用等研究;

徐青山(1979-),男,硕士研究生,主要从事电力系统安全与控制方面的研究。

收稿日期: 2004-02-24; 修回日期: 2004-04-07

作者简介:

Operation ticket expert system based on real-time information of rural power network

XU Qi, WANG Lei, XU Qing shan

(Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Operation ticket of rural power network is always used for dispatching operation order. A set of dispatching order operation tickets can dispatch several power substations. The state and the logic connection of devices in dispatching order operation ticket are more complex than the scheduled operation ticket which is used for operating a single power station. So it is more difficult to work out an intelligent software for dispatching order operation ticket system. Based on realtime topology information and the power flow of rural network, this paper has developed a general cognitive model and a delaminate inference construction for operation ticket expert system. So the ability of universality and intelligence of this system is verified.

Key words: operation ticket; dispatch; reasoning structure

(上接第 61 页 continued from page 61)

5 结论

由于广州电网新一代调度集控一体化系统对广州电网的正常运行非常重要,因此,从数据、应用系统、通信系统等诸多方面详细考虑其容灾能力,将使

得这一系统达到较高的可持续运行水平。

收稿日期: 2004-03-25; 修回日期: 2004-06-16

作者简介:

熊文(1973-),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统自动化。E-mail: Xiongwen@gzpsc.com

Research of disaster recovery and backup of Guangzhou power network SCADA system

XIONG Wen

(Guangzhou Power Supply Branch of Dispatch Center, Guangdong Power Grid Group Co., Ltd, Guangzhou 510620, China)

Abstract: The requirement of the operational reliability and data security of SCADA system is increased quickly and the project for disaster recovery and backup is described from its application, data security and communication security. The technology of multi-server redundancy, data backup and disaster recovery of communication system are mainly introduced. The system is still available even if there are defaults in some part of the servers, storage device and communication device, which has highly improved its operational reliability.

Key words: SCADA; disaster recovery; backup