

文章编号:1671-6833(2011)03-0085-05

电力系统状态估计算法的模糊综合评价与分析

王克文, 蒋德琰, 孙 栗

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 状态估计算法是电力系统状态估计的核心部分, 目前已经有许多模型, 特点各异, 且性能评价具有模糊特征。为此, 提出将模糊数学理论引入状态估计算法评价中, 针对算法构建模糊综合评价模型, 来实现各种状态估计算法性能的客观评价和比较, 并从中找出适合具体系统的最优算法。通过在不同系统下对几种常用状态估计算法进行评价分析选出最优算法, 验证了该评价系统的正确性, 实现了算法评价的定量化, 为实际系统的算法选择提供有效参考。

关键词: 电力系统; 状态估计; 算法评价; 模糊综合评价

中图分类号: TM744

文献标志码: A

0 引言

状态估计算法是指在给定网络结线、支路参数和量测系统的条件下, 根据量测值求取最优状态估计值的计算方法, 它是状态估计程序的核心部分, 也是现代电力系统能量管理系统(EMS)的重要组成部分。因此状态估计算法的选择, 对状态估计程序的性能和实际系统滤波的效果有很大的影响^[1-2]。近年来, 许多学者尝试用数学、控制理论和其他新理论的方法进行状态估计问题的研究, 并结合电力系统的特点, 在理论研究与工程应用方面取得了大量的成果, 进一步丰富和发展了电力系统状态估计算法^[3-13]。随着状态估计技术的发展, 状态估计算法的评价与比较也开始受到重视^[14-15], 建立一套算法性能评估模型, 不仅可以客观公正地评价各种算法的性能, 而且可以针对不同的实际系统从已知的状态估计算法中选择出最优算法。自 L. A. Zadeh 教授于 1965 年建立模糊集理论, 模糊数学已在实践中证明是处理不确定性问题的有效方法^[16-17]。而对算法进行综合评价是一项复杂且伴随着模糊性的系统工程, 故采用模糊综合评价这种定性分析和定量分析综合集成的模糊数学应用方法, 处理算法评价问题具有其先天的优势^[18]。

笔者提出将模糊综合评价法用于电力系统状态估计算法的综合评价分析, 结合算法特点建立评价指标体系和隶属度函数, 形成较为完整的模

糊综合评价模型, 来实现对各种状态估计算法性能的客观评价和比较, 并从中找出适合具体电力系统的最优算法。

1 常用的状态估计算法

1.1 基本加权最小二乘法

由 F. C. Schweppe 等人最早提出的基本加权最小二乘法状态估计算法(WLS), 是电力系统状态估计的最基本算法, 是以量测值 z 和量测估计值 \hat{z} 之差的平方和最小为目标侧的估计方法^[3]。它假设量测量严格服从正态分布, 对于理想正态分布的量测量, 估计具有最优一致且无偏等优良特性, 是目前电力系统状态估计中应用最为广泛的方法之一^[4]。

该方法将电力系统的量测方程表示为:

$$z = h(x) + v \quad (1)$$

式中: z 是量测矢量、 $h(x)$ 是量测矢量函数、 v 是量测误差矢量, 且 v 服从均值为零、方差为 σ^2 的正态分布。在给定 z 后, 状态估计矢量 \hat{x} 是使目标函数:

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

达到最小的 x 的值。其迭代算式为:

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

式中: $H(x) = \partial h(x) / \partial x$ 是量测矢量的雅可比矩

收稿日期: 2010-12-30; 修订日期: 2011-03-20

作者简介: 王克文(1964-), 男, 山西运城人, 郑州大学教授, 硕士生导师, 研究方向: 电力系统稳定分析与控制、电力系统自动化, E-mail: kwwang@zzu.edu.cn.

阵, R^{-1} 起权重作用, l 表示迭代序号。

1.2 快速分解法

快速分解法^[5]是在基本加权最小二乘法的基础上,结合电力系统的物理特性,通过有功和无功分解以及雅可比矩阵常数化两种简化方式,推导出快速分解法状态估计的迭代修正公式:

$$[H^T(x^{(l)})R^{-1}H(x^{(l)})]\Delta x^{(l)} = H^T(x^{(l)})R^{-1}[z - h(x^{(l)})] \quad (4)$$

将状态量 x 分为电压相角 θ 和幅值 v ,将量测矢量 z 分为有功和无功,同时将雅可比矩阵对相角、幅值进行分解并简化。此方法吸收了潮流计算的经,降低了问题的阶次,减少了内存的使用量,仅需一次雅可比矩阵计算,显著提高了状态估计计算速度,是公认的优良实用算法。

1.3 量测变换法

美国电力公司(AEP)道帕兹恩等^[6]提出了量测变换状态估计算法,将支路潮流流量测量变换为对支路两端电压的“量测”,并假设运行电压变化不大,得到与基本加权最小二乘法相类似的迭代修正公式,但其信息矩阵是常实数、对称且实虚部统一的稀疏矩阵。该算法计算速度快又节省内存,但难以处理结点注入型量测量。文献[7-8]提出等效电流量测的思想,将各种量测等效变换为结点注入电流量测或支路电流量测,从而使状态估计迭代方程中的雅可比矩阵变成常数矩阵,在迭代过程中仅利用恒因子表对不同的自由矢量前推和回代便可求出对应的状态修正量。

1.4 逐次型算法

拉森等^[9]在七十年代初应用卡尔曼算法做实时潮流的静态估计,属于同一时间断面上不同量测量的逐次估计问题,即为最早的逐次型状态估计算法。由于电力系统状态量的维数较高,不得不采用对角化的状态估计误差协方差矩阵,因此虽然节省了内存、提高了计算速度,却降低了收敛性能和估计质量。经过改善收敛性,其在美国、挪威、日本等多国的电力公司相继得到了研究和应用^[10]。

除了上述介绍的几种状态估计算法,还有抗差状态估计算法^[11]、计及相量测量单元(PMU)的状态估计算法^[12]和分区协调算法^[13]等。

2 模糊综合评价模型

模糊综合评价就是应用模糊变换原理和最大隶属度原则,考虑与被评价事物相关的各个因素,对其所作的综合评价^[16]。

2.1 基本原理

设评价因素集为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, 评价等级集为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 则对单因素 u_i 作单因素评价,即可得到从因素 u_i 着眼确定该事物对评价等级 v_j 的隶属度 r_{ij} , 这样 m 个因素的评价集就构造出一个总的评价矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: R 表示从论域 U 到论域 V 的一个模糊关系, $u_R(u_i, v_j) = r_{ij}$ 为因素 u_i 对评价等级 v_j 的隶属度。

不同的评价因素 u_i 在总体评价中的影响程度一般也有所不同,为此,引入评价因素重要程度模糊子集 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$, 其中 $a_i (0 \leq a_i \leq 1)$ 为 u_i 对 A 的隶属度,称为评价因素 u_i 的重要程度系数。

当模糊向量 A 和模糊关系矩阵 R 已知时,即可做模糊变换来进行综合评价,公式如下:

$$B = A \circ R = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (6)$$

式中:“ \circ ”为模糊算子, B 是 V 上的一个模糊子集。

对于二级模糊综合评价,可以先对每个因素子集 u_i 按一级模型进行评价,将所得评价结果再进行一次一级评价,即得到二级模糊综合评价结果。多级模糊综合评价以此类推即可。

2.2 评价指标体系

评价指标体系是由一系列相互联系,能够敏感反映算法综合性能的指标构成的有机整体,在设计过程中遵循以下一些基本原则:

(1)全面性原则,评价指标体系应全面,尽可能反映状态估计算法的性能;

(2)指导性原则,评价指标体系应能够指导对状态估计算法的修正,找出算法的优缺点;

(3)可行性原则,评价指标应能通过实验数据、统计等方法得到具体的结果或数值。

依据上述原则,结合文献[1]中算法评价的经验,建立状态估计算法评价指标体系,见图1。其中,“估计质量”、“内存情况”和“计算速度”均由模拟试验直接得到统计结果,“适应能力”则由不同系统下迭代次数的对比,结合专家评定情况综合得出。各级指标的权重,则根据不同系统的侧重和要求,采用德尔菲(Delphi)法^[17]进行确定。因一级指标的权重由实际系统的计算要求确定,故此处只列出本文所采用的二级指标权重,详见表1。

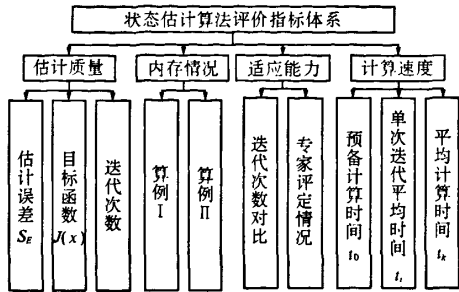


图 1 状态估计算法评价指标体系
Fig.1 Evaluation index system
of state estimation algorithm

3 算法的评价与分析

3.1 试验系统

采用遥测系统的数学模拟进行统计性试验,选取 3 种不同规模的电力系统:

(1)4 结点系统:4 支路的 220 kV 网;(2)18 结点系统:19 支路的 220 kV 网;(3)114 结点系统:135 支路的 110 和 220 kV 混合网.

试验系统负荷按锯齿形曲线变化,每步变化

基准负荷的 1%,峰值是基准负荷的 120%,低谷是基准负荷的 80%;量测系统采用量测各支路两端的功率,每个系统中取 1 个参考电压测点的支路型配置.

3.2 算法性能数据

利用试验系统对前述介绍的四种状态估计算法,基本加权最小二乘法、快速分解法、量测变换法和逐次型算法进行测试,得到各项试验数据详见表 2~4.

表 2 的数据,由 18 结点电力系统模拟试验得出,其测量系统的测点数 $m=77$,采样数 $s=20$,量测类型为支路量测,量测误差 $S_M=1.00$,量测系统的冗余度 $K=40$, S_M 和 S_E 是正规化标准差的平均值, $J(x)$ 是多次估计的平均值.其中预备计算时间 t_0 是指数据的初始化时间,平均计算时间 t_k 为平均迭代时间乘以平均迭代次数.表 3 中内存使用情况数据为标准内存 c_0 的倍数, $c_0=13l+12N+8m$,基本加权最小二乘法使用的内存量是由快速分解法推算得到的.表 4 中仅给出不同系统下各算法的迭代次数.

表 1 状态估计算法评价体系二级指标权重表

Tab.1 Secondary evaluation index weight of state estimation algorithm											
二级指标	估计质量			内存情况		适应能力		计算速度			
	估计误差 S_E	目标函数 $J(x)$	迭代次数	算例 I	算例 II	迭代次数对比	专家评定情况	预备计算时间 t_0	单次迭代平均时间 t_i	平均计算时间 t_k	
权重	0.4	0.3	0.3	0.5	0.5	0.4	0.6	0.3	0.4	0.3	

表 2 状态估计算法的估计质量和计算时间

Tab.2 Estimation quality and computation time of state estimation algorithm							
指标		权重	基本加权最小二乘法		快速分解法	量测变换法	逐次型算法
质量评价	估计误差 S_E	0.4	0.65		0.66	0.67	0.67
	目标函数 $J(x)$	0.3	44.51		44.60	42.18	47.27
	迭代次数	0.3	2.05		2.95	2.95	9.60
时间评价	预备计算时间 t_0	0.3	0.15		1.10	0.35	0.15
	单次迭代平均时间 t_i	0.4	2.66		0.38	0.30	0.56
	平均计算时间 t_k	0.3	5.45		1.12	0.89	5.38

表 3 状态估计算法的内存需求情况

Tab.3 Memory requirement of state estimation algorithm							
算例系统				状态估计算法			
	结点数 N	支路数 l	测点数 m	基本加权最小二乘法	快速分解法	量测变换法	逐次型算法
算例 I	22	22	89	2.395	1.697	1.349	1
算例 II	114	135	541	2.536	1.768	1.384	1

表 4 状态估计算法的适应能力数据

Tab.4 Adaptability of state estimation algorithm							
电力系统		测量系统		状态估计算法的迭代次数			
结点数 N	支路数 l	测点数 m	量测类型	基本加权最小二乘法	快速分解法	量测变换法	逐次型算法
4	4	17	支路	2.01	2.01	2.86	8.86
18	19	77	支路	2.05	2.95	2.95	9.60
114	135	541	支路	4.00	5.90	4.20	—

3.3 综合评价

对上述算法性能数据进行加权处理,其中,计算算法“计算速度”时,由于同一算法在不同的计算机上运行的时间不同,故采用相对计算速度,即在同一计算机上各算法的计算时间除以最快算法的计算时间,然后再进行加权计算;“适应能力”的分值为参考不同系统下算法迭代次数变化与专家评定情况的综合打分结果.得到数据的预处理结果,详见表5.

表5 算法性能数据的预处理结果

Tab.5 Preprocessing result of algorithm performance data

评价因素	状态估计算法			
	基本加权最	快速分	量测变	逐次型
	小二乘法	解法	换法	算法
估计质量	1.209	1.484	1.470	3.503
计算速度	2.744	0.818	0.482	1.883
内存情况	2.466	1.733	1.367	1.000
适应能力	0.921	0.864	0.311	0.637

确定评价集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$, 其中 v_1 为基本加权最小二乘法、 v_2 为快速分解法、 v_3 为量测

变换法、 v_4 为逐次型算法. 采用参考函数法, 利用降半柯西分布函数构造隶属度函数:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & (x \leq a) \\ \frac{1}{1 + \alpha(x-a)^\beta} & (x > a, \alpha > 0, \beta > 0) \end{cases} \quad (7)$$

为便于计算,令 $a = \alpha = \beta = 1$, 由式(7)算出各算法相应指标的隶属度,建立算法的单因素评价矩阵 R :

$$R = \begin{pmatrix} 0.827 & 0.674 & 0.680 & 0.285 \\ 0.179 & 0.601 & 1.000 & 0.261 \\ 0.406 & 0.577 & 0.732 & 1.000 \\ 0.921 & 0.864 & 0.311 & 0.637 \end{pmatrix}$$

针对不同电力系统状态估计计算的侧重和需求,由 Delphi 法确定各系统需求的权重 $A = (A_1, A_2, \dots, A_s)$, 其中 $s=3$, 采用加权平均模型:

$$\begin{cases} B = A \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T \\ b_j = \sum_{i=1}^s a_i \cdot b_{ij}, (j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

进行模糊综合评价,得到综合评价结果,见表6.

表6 状态估计算法在各类系统下的表现

Tab.6 Performance of state estimation algorithm in different power system

系统类型	因素权重				状态估计算法			
	估计质量	计算速度	内存情况	适应能力	基本加权最小二乘法	快速分解法	量测变换法	逐次型算法
大型电力系统	0.2	0.4	0.1	0.3	0.554	0.703	0.692	0.453
支路量测冗余度高的系统	0.2	0.4	0.15	0.25	0.528	0.678	0.724	0.471
小型电力系统	0.4	0.1	0.1	0.4	0.758	0.733	0.570	0.495

3.4 评价分析

由上述数据,对几种状态估计算法进行综合分析可得到如下结论:

(1)基本加权最小二乘法的估计质量和适应能力最好,作为状态估计的经典解法和理论基础,应用范围较广,但其占用内存多、计算速度慢,故不适用于大型电力系统的实时状态估计.

(2)快速分解法的表现较为中规中矩,在保证估计质量和适应能力较好的情况下,能够有效地提高计算速度、减少内存占用数量,较基本加权最小二乘法有显著提高,是一种很实用的算法.

(3)量测变换法在计算速度方面表现出色,内存占用较少,算法效率高,虽然因难以处理结点注入型量测量,适应性欠佳,但在支路量测量有足够冗余度的条件下,其还是具有显著的优越性.

(4)逐次型算法占用内存较少,适应能力较好,但估计质量差、计算速度慢,明显不适应当前电力系统规模越来越大的计算要求,算法存在很

大的局限性.

综上所述,对于大型电力系统状态估计计算,选取快速分解法最为理想,量测变换法次之,基本加权最小二乘法和逐次型算法较差;在支路量测量有足够冗余度的条件下,量测变换法则具有较为优越的性能;而在小型电力系统的场合,经典的基本加权最小二乘法为最优算法.

4 结论

电力系统状态估计算法能够采用模糊综合评价模型进行综合评价分析,并且可以通过改变评价系统指标的权重值,找出适合具体电力系统要求的最优算法.利用该评价系统在不同的电力系统条件下,对四种常用状态估计算法进行评价分析,选取最优算法,取得了满意的效果,说明其能够为实际系统的算法选择提供参考,具有一定的现实意义.如何扩展该评价系统的适用范围、找出更客观的计算指标权重方法将是下一步工作的主

要内容.

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.
- [2] 刘浩. 电力系统状态估计、检测及辨识[J]. 电力系统及其自动化学报,1999,11(4):36-38.
- [3] SCHWEPPE F C, WILDES J, ROM D B. Power system static state estimation parts I, II and III [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1):120-135.
- [4] 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.
- [5] HORISBERGER H P, RICHARD L C, ROSSIER C. A fast decoupled static-state estimation for electric power system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(1):208-215.
- [6] DOPAZO J F, KLITIN O A. State calculation of power system from line flow measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1970, 89(7):1698-1708.
- [7] LU C N, TENG J H, LIU W H E. Distribution system state estimation[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1995, 10(1):229-236.
- [8] 孙宏斌,张伯明,相年德. 基于支路功率的配电状态估计方法[J]. 电力系统自动化,1998,22(8):2-17.
- [9] LARSON R E, TINNEY W F, PEACHON J, et al. State estimation in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1):345-363.
- [10] 王珍意. 电力系统状态估计[D]. 武汉:华中科技大学电气与电子工程学院,2005.
- [11] 董树峰,何光宇,孙英云,等. 以合格率最大为目标的电力系统状态估计新方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(16):40-43.
- [12] 李大路,李蕊,孙元章. WAMS/SCADA 混合测量状态估计数据兼容性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):60-66.
- [13] FALCAO D M, WU F F, MUPHY L. Parallel and distributed state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2):724-730.
- [14] 何光宇,董树峰. 基于测量不确定度的电力系统状态估计(三)算法比较[J]. 电力系统自动化,2009,33(21):28-31,71.
- [15] 刘国林,郝华东,陶秋香. 卡尔曼滤波相位解缠及其与其他方法的对比分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2010,35(10):1174-1178.
- [16] 罗承忠. 模糊集引论[M]. 北京:北京师范大学出版社,2005.
- [17] 陈水利,李敬功,王向公. 模糊集理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [18] 张伟,郭捷,陈克非. 隐写分析算法的模糊综合评价[J]. 计算机工程,2006,32(21):141-144.

Fuzzy Synthetic Evaluation and Analysis for Power System State Estimation Algorithm

WANG Ke-wen, JIANG De-long, SUN Li

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Algorithm of state estimation is the core of power system state estimation. Many algorithms have been proposed with different advantages. Fuzzy mathematics theory is introduced to evaluate state estimation. Fuzzy synthetic evaluation model is built for state estimation, which will be used to evaluate and compare objectively those algorithms. And then the best algorithm of state estimation will be found for a specific power system. In different power systems, the proposed evaluation system is used to evaluate some common algorithms of state estimation and found the best one. The calculation results show that the evaluation system is correct and can quantify the qualitative-analysis of algorithm evaluation. It can give effective reference to choose algorithm for actual power system.

Key words: power system; state estimation; algorithm evaluation; fuzzy synthetic evaluation