

误差准则在负荷模型动态仿真中的应用研究

李红军, 杨 茹

(四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072)

摘 要:提出了以实测数据信号扰动能量为基准的动态变异率 (DVR) 来表征动态仿真的误差水平, 并对一些仿真算例误差评定给出了具体的方案。对某变电站两条出线的负荷数据仿真准确度评定, 证明所提的方法是快捷有效的。

关键词:负荷模型; 动态仿真; 误差评定; 动态变异率

Abstract: The dynamic variation ratio (DVR) based on the measured signal energy is proposed to denote the error level of dynamic simulation, and the detailed error evaluation scheme is also proposed for the vast simulation cases. The evaluation of simulation accuracy for load data of two feed lines at a substation proves that the proposed method is convenient and valid.

Key words: load model; dynamic simulation; error evaluation; dynamic variation ratio (DVR)

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0005-04

0 引 言

大量研究结果表明负荷特性对电力系统仿真结果有重要影响。然而获得相对准确的负荷模型却是长期困扰电力工程界的难题。随着软硬件技术的发展, 从现场数据中得到相对准确的负荷模型成为可能。从 20 世纪 70 年代以来, 国外开展了基于统计和基于测量的负荷建模方法。中国电力学术界也从 20 世纪 80 年代以来开展了基于量测的负荷建模工作。基于量测的负荷建模采用现场电压扰动数据和相应的有功无功响应数据, 根据辨识算法在一定的模型结构基础上进行模型参数辨识。下面对辨识算法的误差准则及其改进措施进行探讨。

1 负荷模型动态仿真误差评定现状

负荷模型动态仿真的过程是模拟实际系统在扰动条件下的响应过程。典型的仿真误差评估是对负荷模型输入图 1 所示的电压, 输出功率响应变量 (虚线), 与实测功率响应变量相比较, 评定出二者的差异。

仿真和实测所得各量值, 如电压、电流以及由此折算出的有功、无功等, 是时变的量, 称为动态变量。假定动态变量的实测值为真值, 误差评定就是衡量仿真值与之偏离的程度。

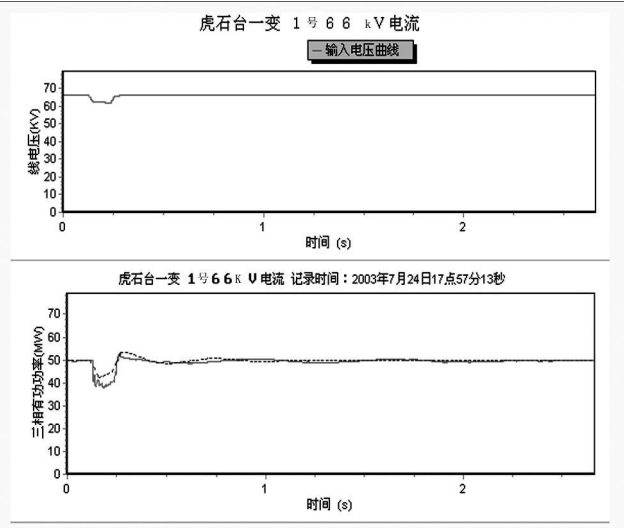


图 1 负荷建模数据

负荷模型动态仿真是负荷模型辨识算法的重要组成部分。辨识算法目标函数的收敛与否, 是基于对仿真变量和实测变量间误差的计算, 即误差准则所得量值的判断。

不同的辨识算法, 其误差准则有所不同。以最小二乘法为基础的辨识算法, 一般采取仿真值和实测值的差方作为目标函数, 如式 (1) 所示^[1]。

$$\min J(\theta) = \sum_k \|\hat{y}(k) - y(k)\|_R^2 \quad (1)$$

其中, $\hat{y}(k)$ 为仿真量时间序列; $y(k)$ 为实测量时间序列。

以直接法为基础的算法, 如单纯形法、遗传算法等, 其目标函数定义可以根据需要采用比较灵活的目标函数形式, 如式 (2) 和式 (3)。

$$E_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [W_M(i) - W_C(i)]^2}{N}} \quad (2)$$

式中, E_w 为辨识算法目标函数; $W_C(i)$ 为仿真量时间序列; $W_M(i)$ 为实测量时间序列; N 为采样数据点数。

$$\begin{cases} W(k) = 0.4 \frac{|U(k) - \bar{U}|}{\sum_{k=1}^n |U(k) - \bar{U}|} + \frac{0.6}{n} \\ J_i = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n W(k) [\hat{y}_i(k) - y_i(k)]^2 \right\}^{1/2} \\ J = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{J(i)}{\bar{a}_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $W(k)$ 为曲线拟合的权重系数; $U(k)$ 为电压采样值; $\bar{U}$ 为平均电压; $J(i)$ 为第 i 条数据曲线目标函数; J 为总目标函数; $\hat{y}_i(k)$ 仿真量时间序列; $y_i(k)$ 为实测量时间序列; m 为扰动数据条数; n 为每条数据的条样点。

式 (1) 采用实测序列点与仿真序列点的误差平方和来表示误差的大小, 只能给出一个量化的累积误差量, 而不能反映误差水平。误差评定中需要给出一个比较的基准来衡量该误差的水平。

式 (2) 反映了仿真误差的均方值, 也是绝对值误差表达式。用该式表示仿真误差除具有式 (1) 的不足外, 还易受时间长度的影响。即当稳态微小误差的时间序列选取较长时, 均值将弱化局部误差较大的时间段, 出现“小数吃大数”的情况。式 (3) 利用对稳态数据和扰动数据加权, 尽量避免长时间稳态微小误差对扰动误差的影响。但对电压稳态时间序列赋小权值可能使仿真出的有功、无功与实测数据在稳态时间段内有差异。以负荷水平的均值为基值对最后误差结果标么化, 以期对整体误差水平有一直观认识, 但负荷水平的高低不同可能使误差与实际不符。

综上所述, 目前辨识算法的目标函数需要进一步研究, 并提取合适的计算式。

2 改进误差准则的提出

基于以上分析, 表征负荷数据间误差水平的计算应解决两个方面的问题: 一是采用合适的计算式计算时变量的各时间序列点误差; 二是选择合适的误差基准值。

以仿真量和实测量的信号误差能量作为绝对误差值, 实测量的扰动能量作为比较基准。整体的误差

水平用动态变异率 (dynamic variation ratio 简称 DVR, 符号为 R_{DV}) 来表示。

$$R_{DV} = \frac{\sum_{k=1}^N |\hat{y}(k) - y(k)|^2}{\sum_{k=1}^N |y(k) - y_0|^2} \quad (4)$$

式中, $\hat{y}(k)$ 为仿真量时间序列; $y(k)$ 为实测量时间序列; y_0 为实测量稳态值; N 为采样时间点数。

此式的意义为: 分母为实测信号的扰动能量, 分子为仿真所得信号偏离实测信号的能量, 其比值反映了动态仿真信号的变异情况。当仿真结果不完全失真于实测结果时, 其比值是在 $0 \sim 1$ 间的任何一个数。当接近于 0 时, 仿真结果最优, 即和实测结果完全一致; 当接近或超过 1 时, 仿真信号的动态性能严重偏离实测信号, 属于完全失真。故在鉴定仿真准确度水平时, 可以将 1 作为误差水平的分界点。

误差计算式 (4) 的数值特点如下。

- 1) 包含两个比较量的所有时间序列点动态信息。
- 2) 具有区分能力, 能区别同一扰动下不同模型参数所得的不同动态仿真结果。
- 3) 采用差方和计算, 对于数据有自动的选择功能。在计算过程中, 可以自动地扬弃残差值较小的影响, 凸显相对误差较大的时间序列点的作用。这减少了动态性能比较中微小误差对整体误差水平的累积效应, 同时也克服了采用均值带来的问题。
- 4) 误差计算结果直观, 符合日常的误差判别标准。由于采用实测量的扰动信息作为比较基准, 误差比较结果直接反映了仿真数据的动态拟合性能。数值的大小能使人直观地判断出误差大小。

3 误差准则应用 (动态仿真准确度的评定)

3.1 应用步骤

负荷模型动态仿真误差评定的应用可采用如下步骤进行。

- 1) 根据误差值对应的误差形式, 确定一个可接受误差水平对应的值作为参考基准, 通常 DVR 值取 1.0 作为可接受水平的临界值。
- 2) 根据可接受水平参考基值确定一定级别的误差水平。
- 3) 根据误差计算式计算出仿真误差值, 找到相应的误差水平。

4)对多次仿真,特别是多曲线辨识的多曲线仿真,可计算多次仿真的数学统计规律。对少数离散程度大的点,可以删除。

5)对多次误差仿真计算值进行统计分析,根据统计结果确定出最终的仿真准确度。

3.2 评定实例

利用上述评定步骤及误差计算式(4),对某变电站 1 号 66 kV 馈线 228 条和 2 号 66 kV 馈线 230 条实测数据及模型辨识后的仿真数据进行误差仿真评定。两条馈线分别采用多曲线辨识各获取一组模型参数,利用该模型参数在每条实测数据的电压扰动输入下进行仿真,获得仿真数据。

1)根据误差计算值情况确定可接受水平。当时,仿真动态性能失真,可选取该值作为可接受水平的分界值,如图 2 所示。

2)1.0 以下分为 5 个等级,见表 1,1 级精度最高,误差最小,往下逐次递增。

3)根据式(4)计算两条馈线的仿真数据和实测数据间误差变异率。

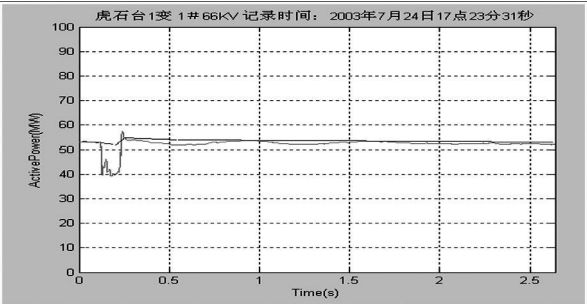


图 2 误差可接受水平分界图示 $R_{bv} = 1.034$

表 1 误差等级

等级	1	2	3	4	5
误差变异范围	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0

4)剔除粗大误差值。粗大误差指仿真结果相对于实测结果严重失真,表现为误差指标计算结果远远大于可接受参考水平值。粗大误差率指粗大误差仿真在整个仿真样本容量中所占的比例。当粗大误差率小于一定值时,认为产生原因是原始数据的不合理造成,可以舍弃,不参与误差均值计算。如果粗大误

差率达到一定水平,则该仿真不能忽略,视为仿真模型不合理。本算例认为粗大误差率小于 10% 可忽略,大于则不能忽略。

5)计算各条数据的误差变异率均值和方差。误差均值反映了整个仿真样本平均误差水平,方差则反映了样本误差的离散程度。

6)根据步骤 2)中等级,确定对两条馈线负荷建模仿真的准确度水平。各仿真输出的误差点状图如图 3 所示。误差评定的最终结果如表 2 所示。

根据最终的误差评定结果,对两条出线负荷模型的仿真都在可接受范围之内。2 号 66 kV 无功仿真精确度最高,1 号 66 kV 最低。由于负荷模型仿真过程同时包含有功和无功的输出,仿真的总体水平应由有功和无功共同的误差水平来表示。故对 2 号 66 kV 线路的仿真精确度水平高于 1 号 66 kV 线路。

4 改进误差准则的应用二 (改进辨识算法)

基于直接搜索法的辨识算法,计算速度是编程计算需要解决的重要问题。直接搜索法尝试在解空间中寻找最优解,当数据序列较长,解空间维数较大时,所需时间比较长。多曲线辨识过程中数据较多时,耗时则很长。改进算法、提高计算速度是辨识算法需要解决的重要问题。

另一方面,原有的辨识计算程序给出的误差值不能建立很好的“误差印象”,即误差水平不能有明确的意义,在此也需要改进。笔者将误差判别准则计算式(4)加入负荷模型的辨识算法中,试图从辨识速度、精度以及最终的意义表达上得到更佳的结果。

将原有的目标函数式(3)替换为现有目标函数式(4),对 100 条原始数据进行了辨识。

更改目标函数前后,辨识时间如表 3 所示。可以看出,改进目标函数提高了辨识速度。

辨识得到 14 个参数,如表 4 所示。其中, R_s 为定子绕组电阻; X_s 为定子漏抗; X_m 为激磁电抗; R_r 为转子电阻; X_r 为转子漏抗; H 为电动机转动惯量; A 、 B 均为转矩系数; K_{pm} 为电动机初始有功比例; M_L 为

表 2 仿真评价信息

评定对象	样本容量	粗差个数	粗差率	误差均值	方差	准确度水平
1号 66 kV 有功	228	19	8.33% (可忽略)	0.446 4	0.186 9	5
1号 66 kV 无功	228	8	3.53% (可忽略)	0.208 1	0.120 9	2
2号 66 kV 有功	230	10	4.33% (可忽略)	0.284 1	0.136 7	2
2号 66 kV 无功	230	17	7.30% (可忽略)	0.099 9	0.167 0	1

表 4 负荷模型参数表

辨识类型	R_s	X_s	X_m	R_r	X_r	H	A
原有目标函数	0.282 4	0.122 0	2.444 7	0.030 9	0.136 0	1.103 9	0.868 2
改进目标函数	0.253 9	0.150 5	2.056 5	0.027 8	0.096 3	1.468 6	0.805 5

表 4 负荷模型参数表 (续)

辨识类型	B	K_{pm}	M_{lf}	P_p	P_z	Q_p	Q_z
原有目标函数	0.584 3	0.597 1	0.424 1	0.166 5	0.484 9	0.392 2	1.262 4
改进目标函数	0.756 9	0.332 4	0.293 5	0.180 2	0.501 4	2.086 3	0.971 8

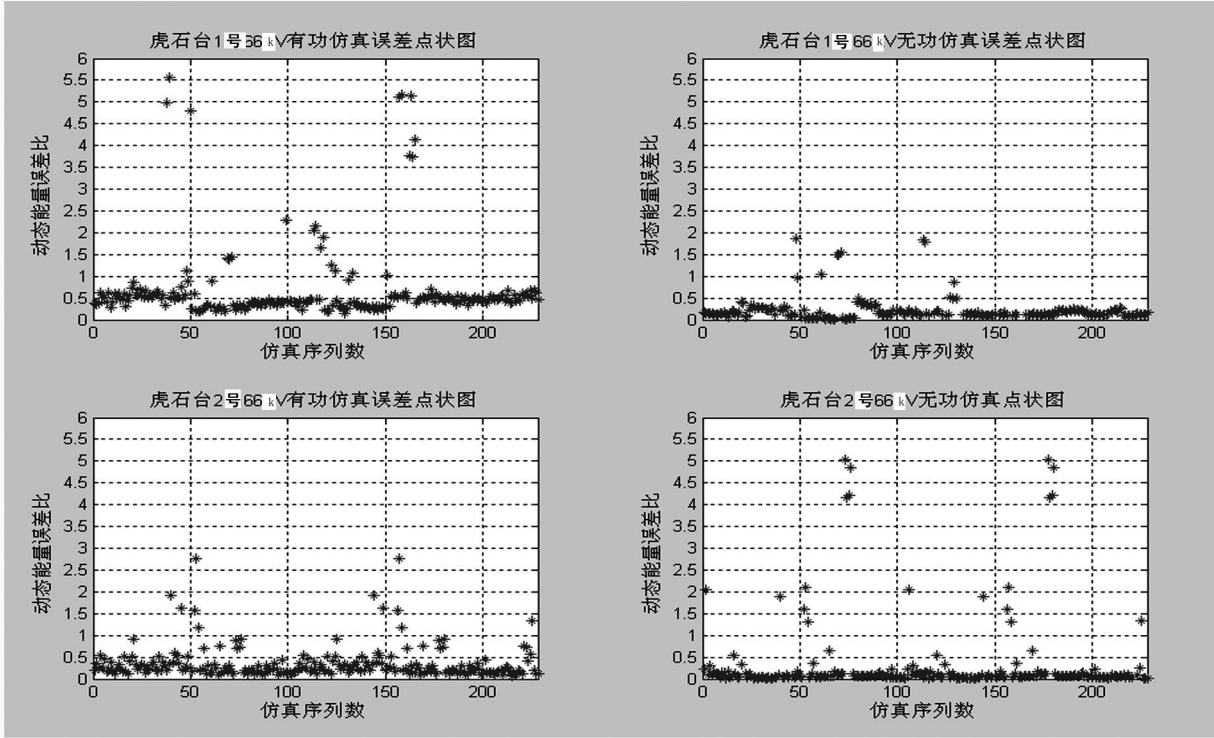


图 3 仿真误差点状图

额定初始负荷率系数; P_p 为恒功率有功负荷; P_z 为恒阻抗负荷; Q_p 为恒功率无功负荷; Q_z 为恒阻抗无功负荷。

表 3 辨识时间

辨识类型	$T/m in$
原有目标函数	138
改进目标函数	133

选取其中一条具有代表性的数据进行仿真对比计算,如图 5 所示。

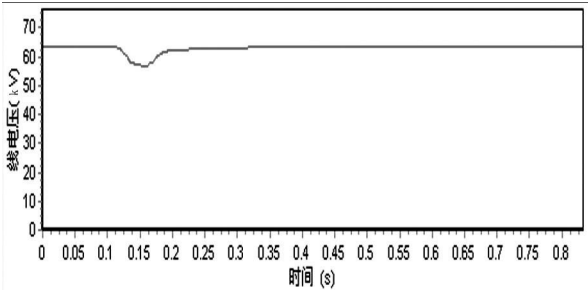


图 4 电压输入曲线

仿真数据与原实测数据结果如图 5 和图 6 所示。

采用所提误差计算指标得到如表 5 所示结果。

表 5 动态变异率计算误差表

目标函数类型	有功动态变异率	无功动态变异率
原目标函数	0.041 3	0.096 5
改进目标函数	0.038 0	0.046 6

从表 5 中可以看出,改进目标函数后误差水平有了较为明显的降低。特别是对于电压恢复至稳定稳态阶段的误差,有了较为明显的改善。

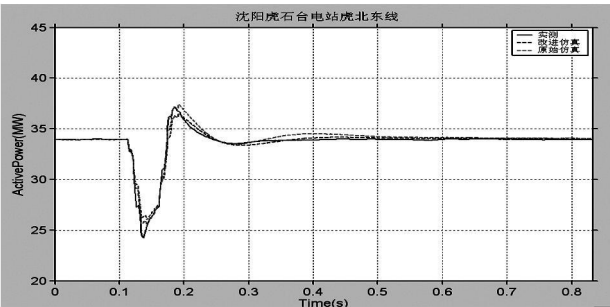


图 5 原目标函数有功曲线

(下转第 55 页)

供较大的选择余地。

4 结 语

传统的输电网规划过于关注经济性要求,而忽略了由于不确定信息带来的未来负荷变化的特点,因而适应能力较差。所建立的计及负荷不确定波动特点的输电网规划模型可以有效解决未来负荷点的长期小幅度波动以及某些区域短期大幅度波动影响,并且利用改进的人工鱼群算法通过 24 节点系统的算例进行了求解,算例分析表明了数学模型的正确性和算法的可行性及有效性。

参考文献

[1] 麻常辉,薛禹胜,鲁庭瑞,等. 输电规划方法的评述 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 97—101.

[2] 叶在福,单渊达. 基于多种群遗传算法的输电系统扩展规划 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 24—27, 35.

[3] 王秀丽,王锡凡. 遗传算法在输电系统规划中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(8): 1—9, 16.

[4] 金义雄,程浩忠,严健勇,等. 基于局优分支优化的粒子群收敛保证算法及其在电网规划中的应用 [J]. 中国电

机工程学报, 2005, 25(23): 12—18.

[5] 翟海保,程浩忠,吕干云,等. 多阶段输电网络最优规划的并行蚁群算法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 37—42.

[6] Leeprechanon N, Moorthy S S, Brooks R D. Transmission Planning in Deregulated Systems: a Model for Developing Countries[C]. 2001 IEEE Porto Power Tech Conference Porto Portugal.

[7] Hugh Rudnick. Planning in a Deregulated Environment in Developing Countries, Bolivia, Chile, and Peru [J]. IEEE Power Engineering Review, 1996, 16(7): 18—19.

[8] 曾庆禹. 电力市场条件下的发输电规划协调与运行模式 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 1—5.

[9] ROMERO R, ROCHA C, MANTOVANI J R S et al. Constructive Heuristic Algorithm for the DC Model in Network Transmission Expansion Planning [J]. IEEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(2): 277—282.

[10] 刘耀年,李迎新,张冰冰,等. 基于人工鱼群算法的最优潮流计算 [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(4): 30—33.

(收稿日期: 2009—08—10)

(上接第 8 页)

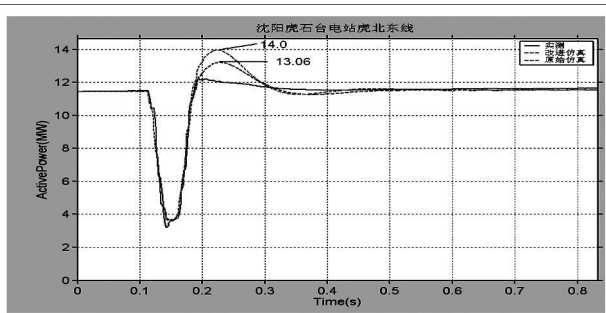


图 6 改进目标函数无功曲线

上述分析表明,将所提出的表征整体误差的动态变异率作为负荷模型的辨识函数,可以在辨识精度上有较为明显的改善,可以克服因权值处理不当而带来的电压稳态阶段超调误差。

5 结 论

1)提出了基于信号能量误差的计算式,对于整体误差具有很好的分辨及评估能力。运用所确定的误差水平评定方案,可解决批量仿真算例的误差计算

及评估。对东北电网主要负荷点的负荷数据及建模仿真数据评估表明,本方法是有效的。

2)所提出的误差计算准则对于现有的辨识算法有改善作用。

3)本方法对评估变化形式相对简单的量有效,对于其他变化形式的动态变量,相应的误差计算式可依据具体的数值特征确定。

参考文献

[1] 章健. 电力系统负荷建模方法的研究 [D]. 北京:华北电力大学, 1997.

[2] 朱守真,沈善德,郑宇辉,等. 负荷建模和参数辨识的遗传进化算法 [J]. 清华大学学报:自然科学版, 1999, 39(3): 37—40.

[3] 石景海. 考虑负荷时变性的大区电网负荷建模研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2004.

[4] 石景海,贺仁睦. 动态负荷模型多曲线拟合参数辨 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 18—22.

(收稿日期: 2009—10—10)