

基于最小方差基准的励磁系统性能评估

张虹¹, 徐滨¹, 高健¹, 庞健²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012;

2. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 对同步发电机励磁系统性能评价一般通过阶跃响应方法, 但该方法无法在线进行, 为此提出了最小方差控制基准的性能评估方法。对系统设计最小方差控制器并作为系统控制性能上限, 与系统实际性能进行比较而得到性能指标, 并对该方法进行系统滤波和相关性分析 FCOR(Filtering and Correlation Analysis)算法的改进, 避免了 Diophantine 方程的展开运算。分析表明该评估方法只需利用同步发电机输出端电压数据, 结合系统时滞 d 就可以得到励磁系统的性能指标。仿真结果表明该方法简化了计算过程, 能够及时准确地在线评估励磁系统的控制性能。

关键词: 励磁系统; 最小方差; FCOR 算法; 在线评估; 控制性能

Performance assessment of excitation system based on minimum variance benchmark

ZHANG Hong¹, XU Bin¹, GAO Jian¹, PANG Jian²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company Limited, Hohhot 010020, China)

Abstract: Step response test methods are generally used to evaluate synchronous generator excitation system performance, but this method can not be implemented online. A method for evaluating the excitation system performance of the minimum variance control benchmark is proposed. Performance of the system under the action of the minimum variance controller output is considered as the upper bound of performance. The ratio of this output performance and actual output performance of the system is defined as the performance index. To avoid expanding the Diophantine equation, filtering and correlation analysis (FCOR) algorithm is introduced. The analysis results show that this method only requires synchronous generator output voltage data and a priori knowledge of the system dead time. Simulation results show that this method simplifies the calculation process, and evaluates the performance of excitation control system timely and accurately.

Key words: excitation system; minimum variance; FCOR algorithm; online evaluation; control performance

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0054-05

0 引言

同步发电机的励磁控制是改善电力系统稳定性的有效措施, 励磁系统性能的优劣直接影响到同步发电机的运行状态。目前, 对励磁系统的性能评价主要是通过确定性指标, 即典型阶跃信号激励下系统响应的超调量、调节时间、稳态偏差、振荡次数等^[1-4]。这些评价方式能够客观反映励磁系统的性能品质, 当然也存在一定局限性。首先, 在实际工业过程施加阶跃、脉冲等确定性测试信号可能导致生产过程的中断或系统的破坏, 所以指标获取必须离线进行^[5]。其次, 获知励磁系统准确时的模型参数是对励磁系统性能评价的前提^[6]。这些评价方

法不易应用于像励磁系统这样结构复杂, 模型辨识难度大的工业过程。怎样在不干扰励磁系统正常运行的情况下判断它的控制性能; 能否从日常输出数据中获得更多关于励磁系统运行情况信息, 这些问题近几年引起了越来越多的关注^[7]。

基于最小方差基准的性能评估方法可以在知道过程时滞的前提下根据过程的输出序列得到工业过程的性能指标, 不需要进行模型辨识, 易于实现对工业过程的实时评估。该方法是以最小方差控制器作用下的工业过程的性能作为待评估系统的性能上限, 比较过程输出方差与可达最小方差的差距得到性能指标。利用该方法将发电机端电压的实测值作为过程输出数据, 对励磁系统的性能进行评估,

能够实时获得励磁系统的性能指标, 及时发现了设备内部的故障隐患。

1 基于最小方差基准的性能评估方法

1.1 基于最小方差基准的性能指标

1989年, Harris提出了基于最小方差控制的性能评估方法, 他指出: 当一个过程有 d 个采样周期的时滞, 则过程的输出方差中含有与控制器无关的成分, 并将其定义为反馈不变项, 其方差就是过程在最小方差控制器作用下输出方差^[8-9]。

一个单输入单输出控制过程可以表示为

$$Na_t + z^{-d}\tilde{T}u_t = y_t \quad (1)$$

式中: $z^{-d}\tilde{T}$ 为含时滞 d 的过程传递函数; N 为扰动传递函数; a_t 为均值为零的白噪声序列; u_t 为控制器输出序列; y_t 为过程输出序列。

设参考输入 $r=0$, 用 Q 表示控制器传递函数, 则: $u_t = -Qy_t$ 。运用 Diophantine 方程将式(1)中的扰动传递函数展开为 $N = F + Rz^{-d}$ 。

则输出序列 y_t 可表示为

$$y_t = \frac{F + Rz^{-d}}{1 + z^{-d}\tilde{T}} a_t = \left[F + \frac{R - F\tilde{T}_0}{1 + z^{-d}\tilde{T}_0} z^{-d} \right] a_t = Fa_t + Ga_{t-d} \quad (2)$$

式中: $F = f_0 + f_1q^{-1} + \dots + f_{d-1}q^{-(d-1)}$, f_i ($i=1, 2, \dots, d-1$)为常系数; R 为正则有理传递函数; Fa_t 是不可控的, 因此右边两项不相关, 输出 y_t 的方差可表示为

$$\text{Var}(y_t) = \text{Var}(Fa_t) + \text{Var}(Ga_{t-d}) \quad (3)$$

当 $G=0$, 即 $R - F\tilde{T}Q=0$ 时, 上式变为

$$\text{Var}(y_t) = \text{Var}(Fa_t) = (f_0^2 + f_1^2 + \dots + f_{d-1}^2)\sigma_a^2 = \sigma_{MV}^2 \quad (4)$$

控制器传递函数 $Q = R/(F\tilde{T})$ 即为最小方差控制器。 Fa_t 即为最小方差控制下的过程输出。

由于最小方差控制器确定的控制律太过激进, 实际工业过程中很少使用它, 但可以将其看作性能评估的基准。定义性能指标为输出可达最小方差与工业过程实际输出方差的比值。即

$$\eta = \frac{\text{Var}(Fa_t)}{\text{Var}(y_t)} = \frac{\sigma_{MV}^2}{\sigma_y^2} \quad (5)$$

性能指标的物理意义是: 与控制器无关的可达最小方差在过程输出方差中所占的比重。其中, $\eta \in [0, 1]$, 如果控制系统的性能较好, 则它的值越接近1。

1.2 最小方差性能指标的 FCOR 算法

为避免展开 Diophantine 方程运算, 介绍一种 FCOR 算法对最小方差性能评估过程进行改进。

稳定的闭环过程输出序列可以建立一个无限阶滑动平均模型(MA), 如式(6)。

$$y_t = (f_0 + f_1z^{-1} + \dots + f_{d-1}z^{-(d-1)} + f_dz^{-d} + \dots)a_t \quad (6)$$

式中: y_t 是去除均值后的过程输出序列; a_t 是均值为零的白噪声序列。等号两边分别乘以 $a_t, a_{t-1}, \dots, a_{t-(d-1)}$ 并取其数学期望, 得

$$\begin{aligned} r_0 &= E(y_t a_t) = f_0 \sigma_a^2 \\ r_1 &= E(y_t a_{t-1}) = f_1 \sigma_a^2 \\ &\vdots \\ r_{d-1} &= E(y_t a_{t-d+1}) = f_{d-1} \sigma_a^2 \end{aligned}$$

结合式(4)和式(5), 得到最小方差基准的性能指标为

$$\eta = \frac{\sigma_{MV}^2}{\sigma_y^2} = \frac{(r_0^2 + r_1^2 + \dots + r_{d-1}^2)}{\sigma_y^2 \sigma_a^2} = \frac{\rho_{ya}^2(0) + \rho_{ya}^2(1) + \dots + \rho_{ya}^2(d-1)}{\sigma_y^2 \sigma_a^2} \quad (7)$$

其中,

$$\rho_{ya}(k) = \frac{\frac{1}{M} \sum_{t=1}^M y_t a_{t-k}}{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{t=1}^M y_t^2 \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M a_t^2}}$$

由式(7)看出, 性能指标可结合过程输出数据与过程时滞得到。

注意到, 式(7)中的 a_t 是过程输出数据 y_t 经过白化滤波后的输出, 是未知的, 计算中可以用经过自相关验证的对 y_t 进行时间序列分析得到的残差序列 \hat{a}_t 来代替^[10]。从工业过程来看, 造成励磁系统性能下降的原因有运行中的某个或某些环节参数发生漂移和扰动模型发生变化。为避免扰动模型的变化造成对性能的误判, 每个性能指标的获取都进行一次白化滤波计算, 并对得到的 \hat{a}_t 进行自相关验证^[11]。

2 同步发电机励磁系统模型

2.1 同步发电机模型

单机无穷大系统三阶状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{T_J} (P_m - P_e - D(\omega - 1)) \\ \dot{E}_q' = -\frac{x_{d\Sigma}}{T_{d0}'x_{d\Sigma}} E_q' + \frac{(x_d - x_d')U_0 \cos \delta}{T_{d0}'x_{d\Sigma}} + \frac{1}{T_{d0}'} U_f \end{cases} \quad (8)$$

式中: δ 、 ω 、 E_q' 分别表示发电机的功角、角速度、暂态电势; U_f 是控制量, 表示发电机励磁电压; P_m 是输入发电机的机械功率, 仅考虑发电机的励磁控

制时将其看作恒定不变。系统工作于稳定状态，采用小干扰静态稳定分析方法在平衡点处线性化，得到系统的状态变量偏移量的线性微分方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega \\ \Delta\dot{\omega} = \frac{1}{T_J} (-\Delta P_e - D\Delta\omega) \\ \Delta\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (\Delta U_f - k_4 \Delta\delta - \frac{\Delta E'_q}{k_3}) \end{cases} \quad (9)$$

式中，输出变量和中间变量的偏移量与三个状态变量的关系为

$$\begin{cases} \Delta P_e = k_1 \Delta\delta + k_2 \Delta E'_q \\ \Delta U_t = k_5 \Delta\delta + k_6 \Delta E'_q \end{cases} \quad (10)$$

式(9)、式(10)中系数 $k_1 \sim k_6$ 的计算见参考文献 [12]。

2.2 励磁系统模型

本文针对国内广泛使用的三机无刷励磁系统进行研究，参考 GB/T 7409.2-1997 《同步电机励磁系统研究用模型》，根据 IEEE 同步发电机励磁系统定义标准，建立 DC1 标准模型^[12-13]。系统工作于稳定状态，采用线性小干扰静态稳定分析方法时，励磁系统中的过励限制、低励限制、瞬时强励限制及各种限幅环节均可以忽略，可将其简化为如图 1 所示的模型^[13]。图中： U_t 为同步发电机定子输出电压， T_E 、 S_E 与 K_E 分别为励磁机等效时间常数、饱和系数与自励系数，励磁机自励系数一般取值 1； K_A 、 T_A 分别为放大器增益系数与时间常数； K_F 、 T_F 分别为转子电压软负反馈增益系数与时间常数； K_r 、 T_r 为测量和调差环节的增益系数与时间常数。

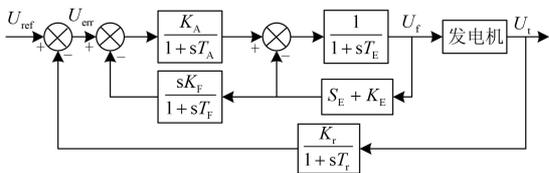


图 1 线性化发电机励磁系统模型

Fig. 1 Linearized model of excitation system

3 励磁系统性能仿真分析

本文利用 Matlab 软件对含励磁的单机无穷大系统进行仿真分析。同步发电机参数： $S_N=842$ MVA； $U_N=19$ kV； $P_N=0.9$ ； $T_J=6.417$ s； $x_f=0.1$ ； $X_d=1.8$ ； $X_q=1.74$ ； $X'_d=0.245$ ； $X'_q=0.436$ ； $X''_d=0.194$ ； $T'_d=1.089$ s； $T'_q=0.551$ ； $T''_d=0.027$ s； $T''_q=0.025$ s； $R_a=0.003$ 。

系统所受的外界干扰等效为一种由 Gauss 白噪

声经线性滤波器 $N = 0.13/(1 - 0.3z^{-1})$ 得到的有色噪声，并将其叠加在励磁电压输入端。分别在励磁系统参数两次不同的情况下采集两组同步发电机端电压数据如图 2 所示。其中：图(a)对应于励磁系统正常情况下同步发电机端电压输出数据，输出电压值在设定值附近振荡幅值较小；图(b)对应于励磁系统某些参数变动后的同步发电机端电压输出数据，输出电压值在设定值附近的振荡幅值较大。

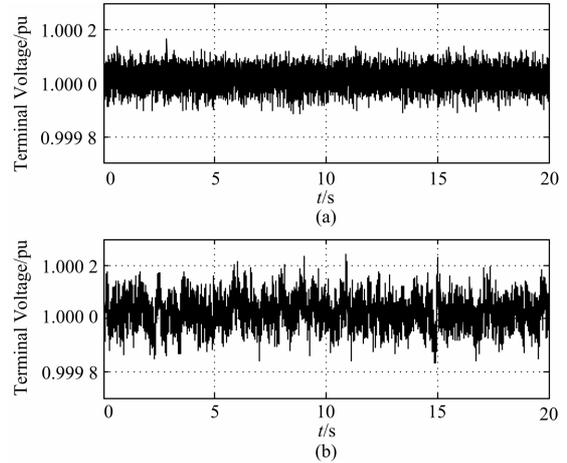


图 2 同步发电机输出端电压

Fig. 2 Synchronous generator terminal voltage

将每一组同步发电机端电压输出数据均分为 20 段，每一段都分别采用最小方差基准和最小方差的 FCOR 算法计算一次性能指标，得到的结果如图 3 所示。从图中可以看出，在励磁系统参数未发生变动时，基于最小方差控制基准的性能指标值(星号图标)和改进的 FCOR 算法性能指标值(菱形图标)最大差距为 0.014 6，为性能指标值的 1.56% 左右；在励磁控制器参数发生变动时，两种方法得到的性能指标值最大差距为 0.013 6，为性能指标值的 2.78% 左右。可以认为两种方法得出的性能指标结果一致。并且，从图中还可以看出励磁系统参数未发生变动时，两种方法得出的性能指标大部分分布在 [0.92,0.96] 区间，指标数值接近于 1，可以认为其控制性能良好；在励磁系统参数发生变动时，两种方法得出的性能指标大部分分布在 [0.40,0.60] 区间，指标数值较低，可以认为其控制性能较差。综上可以得出，两种方法都能准确反映励磁系统的运行情况变化，而改进的 FCOR 算法避免了对每段过程输出数据建立的白化模型进行 Diophantine 方程展开运算，简化了计算过程，提高了运算速度。

励磁系统在运行过程中，由于系统设备老化或者实际工况变化等原因，控制性能会相应发生变化。设定仿真时间为 500 s，将输出数据分为 500 段，每

段利用最小方差的 FCOR 法获得一次性能指标。系

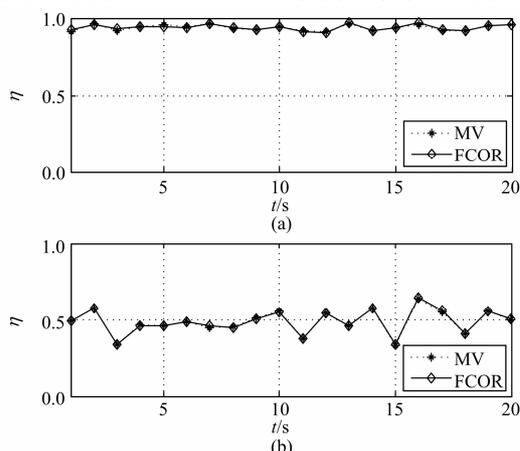


图3 励磁系统性能指标

Fig. 3 Performance index of excitation system

统在 300 s 至 350 s 时间段励磁系统电压测量和无功补偿环节增益系数减小 5 倍, 350 s 后经检修恢复正常; 400 s 至 450 s 时间段放大器时间常数减小 10 倍, 450 s 后经检修恢复正常。励磁系统的在线性能指标如图 4 所示。从图中可以看出在控制器在前 300 s 时间段, 性能指标是一个随机波动值, 大部分落在 [0.92, 0.96] 区间内。在 300 s 至 350 s 时间段和 400 s 至 450 s 时间段由于励磁控制器参数的变化, 致使性能指标明显低于正常情况, 指标值大部分落在 [0.40, 0.60] 和 [0.43, 0.70] 区间内, 且波动幅度范围较大, 显示控制器性能下降, 提醒工程师对其进行检修。可见, 上述方法能够正确计算回路性能指标, 并能及时反映控制器的性能变化。

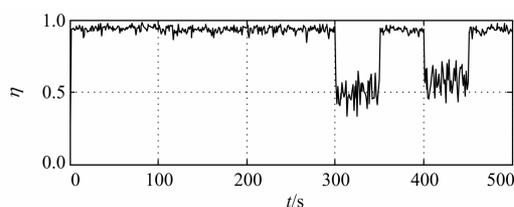


图4 励磁系统控制性能的在线评估结果

Fig. 4 Performance index of excitation system is evaluated online

4 结论

(1) 分析了系统输出方差中与控制器无关的成分, 将其与过程输出方差进行比较, 得到了基于最小方差基准的性能指标, 并对其进行了 FCOR 算法的改进, 避免了展开 Diophantine 方程, 简化了计算过程。

(2) 利用本文的性能评估算法对同步发电机励

磁系统的性能进行评估, 评估指标的计算只需要过程的输出数据, 而不需要对励磁系统的模型进行辨识。

(3) 本文方法克服了确定性指标无法通过在线监测获得之不足, 能够及时发现并排除设备内部的故障隐患, 为工程师提供准确的工业过程运行情况信息, 具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] 方思立. 发电机励磁控制系统性能的评价[J]. 电网技术, 1990, 42(1): 44-48.
FANG Si-li. Evaluation of the performance of generator excitation control system[J]. Power System Technology, 1990, 42(1): 44-48.
- [2] 周德佳, 庄亚平, 冀路明, 等. 具有电流反馈的中频无刷励磁控制系统及其实现[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 102-107.
ZHOU De-jia, ZHANG Ya-ping, JI Lu-ming, et al. Implementation of a brushless excitation system with current feed-forward control for medium frequency electrical system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 102-107.
- [3] 荀吉辉, 熊尚峰. 稳定计算用发电机励磁系统模型参数测试及校核分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 20-25.
XUN Ji-hui, XIONG Shang-feng. Test and analysis of excitation system model for power system stability studies[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 20-25.
- [4] 阮阳, 袁荣湘, 万黎, 等. 同步发电机的非线性鲁棒电压控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 9-16.
RUAN Yang, YUAN Rong-xiang, WAN Li, et al. Nonlinear robust voltage control for synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 9-16.
- [5] 向宝录, 刘冠环. 电力系统稳定器(PSS)整定试验过程中机组跳闸的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 121-125.
XIANG Bao-lu, LIU Guan-huan. Analysis of generator set tripping during the PSS test[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 121-125.
- [6] 王兴贵, 王言徐, 智勇. 辨识理论在发电机励磁系统建模中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 52-55.
WANG Xing-gui, WANG Yan-xu, ZHI Yong. Application

- of parameters identification theory in generator excitation system modeling[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 52-55.
- [7] 郝亮亮, 王善铭, 邱阿瑞, 等. 多相无刷励磁系统旋转整流器故障的仿真与识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 138-144.
HAO Liang-liang, WANG Shan-ming, QIU A-rui, et al. Simulation and recognition for rotary rectifier fault of multi-phase brushless excitation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 138-144.
- [8] 胡柏青, 王伯雄, 陈尔明, 等. 基于最小方差控制的惯导系统稳定回路性能评估[J]. 清华大学学报, 2009, 49(11): 1791-1794.
HU Bai-qing, WANG Bo-xiong, CHEN Er-ming, et al. Performance assessment for stabilized loop of inertial navigation system based on minimum variance control[J]. Journal of Tsinghua University, 2009, 49(11): 1791-1794.
- [9] HUANG Qi-zhen, ZHANG Quan-ling. Research on multivariable control performance assessment techniques[C] // Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2011 International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, May 23-26, 2011, Hangzhou. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
- [10] ORDYS A W, UDUEHI D, JOHNSON M A. Process control performance assessment: from theory to implementation[M]. London: Springer, 2007.
- [11] 刘芳, 刘玉杰, 胡立生. 核电站除氧器控制性能评估与故障诊断[J]. 微计算机信息, 2007, 23(12-1): 13-15.
LIU Fang, LIU Yu-jie, HU Li-sheng. Performance assessment and fault detection of deaerator control system for nuclear[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(12-1): 13-15.
- [12] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Companies Inc, 1994.
- [13] 李玉梅, 贺季华. 现代高起始响应励磁控制系统模型和考核试验[J]. 大电机技术, 1995, 25(3): 57-64.
LI Yu-mei, HE Ji-hua. Model and accessing test of modern high initial response excitation system[J]. Large Electric Machine Technology, 1995, 25(3): 57-64.

收稿日期: 2013-07-18; 修回日期: 2013-09-15

作者简介:

张虹(1973-), 女, 博士, 副教授, 从事电力系统稳定与控制、数字信号处理等方面的研究工作; E-mail: jdlzh2000@126.com

徐滨(1989-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统稳定与控制方面的研究;

高健(1990-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统电压稳定方面的研究。