

基于 Prony与遗传算法优化的 PD励磁附加控制器

刘剑¹, 刘天琪¹, 侯荆州²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 西北电网有限公司, 陕西 西安 710048)

摘要: 提出一种附加励磁控制器, 首先利用 Prony分析方法辨识和简化发电机模型, 并以此简化模型为评价环节的 PD型励磁附加控制器, 然后用遗传算法整定控制器参数。由于 Prony辨识和简化的系统模型主要包括阻尼较小, 留数较大的振荡模态, 因此针对这样的模型优化后的 PD控制器对实际系统的阻尼情况改善较好。从仿真结果可以看出其不仅可以在小扰动下改善系统阻尼, 而且在系统发生较大扰动的情况下改善系统阻尼效果依然十分明显, 有比较好的鲁棒性。

关键词: Prony; 遗传算法; 系统辨识; 稳定控制; 参数优化

中图分类号: TM761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)08-0045-05

0 引言

近年来随着电力系统规模的不断扩大和电力系统的普遍互联, 使得电力系统稳定性问题比较突出。利用发电机励磁附加控制器对系统振荡进行阻尼是一种比较经济和有效的方法。但一般来说发电机的模型比较复杂, 特别是当发电机中含有调速器和励磁装置后模型就更加复杂。为了设计和验证控制器必须对复杂的系统进行辨识和简化, 因此如何对复杂发电机系统进行准确、快速的辨识和简化成为励磁附加控制器设计的首要问题。

对于复杂系统的分析, Prony分析方法有较强的优势, 此方法不需要列写复杂的系统方程和大量矩阵计算就可以得到系统的基本模型和系统振荡信息^[1]。本文提出了一种如图1所示的励磁附加控制器, 就是利用 Prony分析方法对发电机进行辨识和简化。在此模型基础上设计了一种基于遗传算法优化的 PD型的励磁附加控制器, 并在 Matlab下对一单极无穷大系统进行仿真分析, 验证其控制的可行性及有效性。

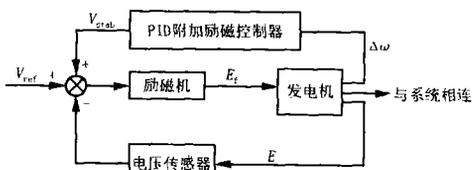


图1 励磁系统

Fig 1 Excitation system

1 附加控制器的结构

1.1 控制器的构成及特点

本文基于 Prony和 GA 算法给出了如图2所示的控制器, 其中包括辨识环节, 评价环节, 寻优整定等环节以及实际 PD控制环节。其特点是评价环节所需的简化模型可以通过现场数据辨识得到, 然后在给定的参数范围内自动得到 PD控制器的最优参数。且参数整定过程是通过简化模型完成的, 不会对实际运行的发电机稳定运行造成影响。

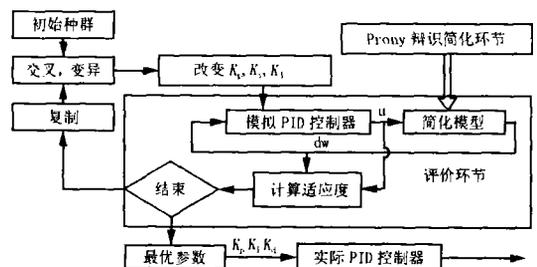


图2 控制器结构

Fig 2 Construction of controller

1.2 控制器 Prony辨识环节

由于发电机的结构比较复杂, 特别是当发电机模型中含有调速器和励磁电压控制器后模型就更加复杂。而且由于发电机参数是事先给定的, 当安装到实际系统中时参数可能发生改变, 此时如果依然利用给定参数进行控制器整定的话会出现偏差。Prony分析方法有便捷和可以根据现场测量信号进行分析的特点^[2], 可以克服系统模型复杂和实际参数与给定参数不符等困难, 因此控制器的辨识环节是通过 Prony分析法完成的。Prony方法是 1975年由 Gaspard Riche, Baron de Prony提出的, 它是用多个指数函数对目标函数进行线性拟和。Prony方法

不仅是一种信号分析方法还是一种系统辨识方法。其公式简单表示如下^[31]:

假设一个函数 $f(x)$ 可以用指数函数线性表达为如下式:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n C_i e^{a_i x} \quad (1)$$

当令 $\mu_k = e^{a_k}$ 时, 得到如下方程

$$C_1 + C_2 + \dots + C_n = f(0) \quad (2)$$

$$C_1 \mu_1 + C_2 \mu_2 + \dots + C_n \mu_n = f(1)$$

...

$$C_1 \mu_1^n + C_2 \mu_2^n + \dots + C_n \mu_n^n = f(n)$$

...

$$C_1 \mu_1^{N-1} + C_2 \mu_2^{N-1} + \dots + C_n \mu_n^{N-1} = f(N-1)$$

其中为了解除 μ_1, \dots, μ_n , 令其为如下方程的根

$$a_1 \mu^{n-1} + a_2 \mu^{n-1} + \dots + a_{n-1} \mu^{n-1} + a_n = \mu^n \quad (3)$$

是根据采样得到的数据构造的如下方程:

$$\begin{bmatrix} f(n-1) & f(n-2) & \dots & f(0) \\ f(n) & f(n-1) & \dots & f(1) \\ f(n+1) & f(n) & \dots & f(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(N-2) & f(N-3) & \dots & f(N-n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(n) \\ y(n-1) \\ y(n-2) \\ \dots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

当 $N > 2^n$ 时可以得到此方程的最小二乘解 a_1, a_2, \dots, a_n , 然后通过解方程 (3) 可以得到 μ_1, \dots, μ_n , 并通过这些解再次对方程 (2) 进行最小二乘计算, 从而解出 C_1, \dots, C_n , 最终得到对 $f(x)$ 的线性拟合。

上面介绍了如何用 Prony 方法进行信号拟合并得到相关信息, 下面介绍如何用此算法通过输入输出直接得到系统的传递函数^[4], 从上面的介绍可以看出当系统如图 3 表示时:

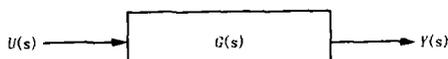


图 3 传递函数辨识

Fig 3 Transfer function identification

可以通过特定的激励得到输出信号 $y(t)$ 后, 通过 Prony 分析后表达为如下形式:

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^n B_i e^{t} \quad (t \geq 0, i = 1, 2, \dots, n)$$

$$Y(s) = \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{s - a_i} \quad (5)$$

此时可以直接得到系统的传递函数。通过前面算法介绍可以看出 Prony 分析方法可以通过系统的输入和输出得到系统的传递函数, 以及系统振荡的频率、留数和阻尼比信息。然后依据各个频率的留数的相对大小对系统模型进行简化^[5], 省略了系统中留数可以忽略不计的相。通过这种方法的简化, 既减少了模型的阶数又可以反映被控对象的基本动态特性, 为控制器快速准确找到最优解提供了前提。

1.3 参数辨识与优化的遗传算法环节

当整定控制器参数时, 人们一般只知道其大致范围, 而如何得到控制器最优参数比较困难。遗传算法在最优参数求解上是一种并行度高, 对初值依赖小的算法。在本控制器中利用遗传算法对 PD 附加励磁控制器参数在给定范围内进行自动寻优。

遗传算法 (简称 GA) 是 1962 年由美国密西根州大学的荷兰教授提出的模拟自然界遗传机制和生物进化论的一种并行随机搜索最优化方法。其特点是对参数的编码进行操作, 而非参数本身, 是从问题解的编码组开始而非从单个解开始搜索, 可以利用目标函数的适应度这一信息而非利用导数或其他辅助信息来指导搜索, 利用选择、交叉、变异等算子而不是利用确定性规则进行随机操作。遗传算法的构成^[6]:

1) 编码和解码。把许多应用问题转化为简单的位串形式的编码表示, 即编码; 而相反的过程为解码。遗传算法用到的编码形式有二进制和十进制编码。

2) 适度函数。基本遗传算法与个体适应度成正比的概率决定当前群体中每个个体遗传到下一代群体中的概率多少, 为了正确计算这个概率, 要求所有个体的适应度必须为正数或零。其适应度函数为如下形式:

$$f(1, 2, \dots, n) = \frac{1}{\sum_{j=1}^n d(j, j+1)} \quad (6)$$

3) 遗传操作。遗传算法用到的遗传操作有三种, 选择 (选择), 交叉 (转线路), 变异 (变化)。

4) 遗传算法的运行参数。M 为群体大小, 即群体中所含个体的数量, 一般为 20 ~ 100; G 为遗传算法的终止进化代数, 一般取 100 ~ 500; P_c 为个人计算机交叉概率, 一般取为 0.49 ~ 0.99; P_m 为变异概率, 一般取为 0.0001 ~ 0.1。

1.4 评价环节

评价环节是判断在 N 代后最优适度值是否发生变化,当未发生变化时停止遗传算法计算得到 PD 参数,当适度值保持变化时,评价环节将适度值传给遗传计算环节继续寻优。当评价环节认可参数后将参数传给实际 PD 控制器。在适度条件的选取上,一般来说是如果单单追求系统的动态性能的话,会引起控制信号过大,在实际应用中会引起系统的不稳定,为了防止此现象,就要求在评价指标中加入控制量。因此为了得到更好的控制效果,适度函数包含有控制量、误差和上升时间在内^[17]。

$$J = \int_0^{t_0} (0.99 \cdot |e(t)| + 0.01 \cdot u^2(t)) dt + 2 \cdot t_0 \quad (7)$$

其中: $e(t)$ 为发电机简化模型转速输出和给定参考值之间的偏差, $u(t)$ 为 PD 控制器输出, t_0 为上升时间。本文参数优化的目标是使评价指标最小。

对于评价环节来说,由于群体中各基因型都是平等的并行关系,如果直接通过实际对象的输出来评价这些基因型,对应的参数可能会导致系统失稳。而且每一代所花的时间很长,特别是当系统的动态响应较慢时。因此对遗传算法群体中的各个串的评价都通过辨识出的模型进行。将群体中适应度最高的基因型所对应的参数值送入控制器。由于评价是通过模型进行的,不会对发电机的正常运行造成不良影响。

1.5 PD附加励磁控制环节

本控制器的控制量是由 PD 控制器产生的,其传递函数为^[18]:

$$G_{PD}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (8)$$

其中比例环节:可以成比例地反映控制系统的偏差信号,当有偏差时控制器马上动作减小偏差。

积分环节:用于消除静差,提高系统的无差度。

微分环节:可以反映系统误差的变化趋势,提前修正控制信号,加快系统动作。

其主要优点有结构简单,易于实现,特别是其比例环节在系统产生误差时可以马上动作,速度较快,其微分环节可以加快系统动作减少调节时间,其次 PD 控制器的鲁棒性较好。

2 附加控制器的实现

2.1 辨识和简化过程

本文对一个单机无穷大系统在 Matlab 下仿真

结果进行辨识。首先对励磁信号加入一个冲击扰动^[9],并对发电机的响应转速变化信号输出进行 Prony 辨识,采样间隔为 0.01,得到如图 4 所示的辨识结果,从图中可以看出拟和曲线和测量信号基本上是一致的。实线为系统冲击响应实测波形,虚线为 Prony 拟和波形。

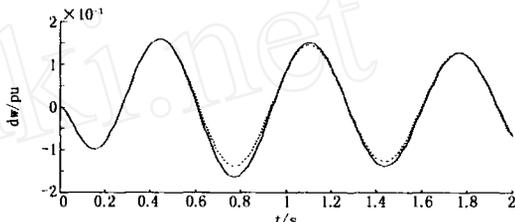


图 4 辨识结果

Fig 4 Identification result

在此辨识结果的基础上,对留数较小可以忽略的模式进行了省略,然后得到了一个六阶系统模型^[10]。为了验证简化后模型的准确性,对此模型的冲击响应与系统真实输出进行了比较(图 5)。实线为系统冲击响应实测波形,虚线为简化模型冲击响应。

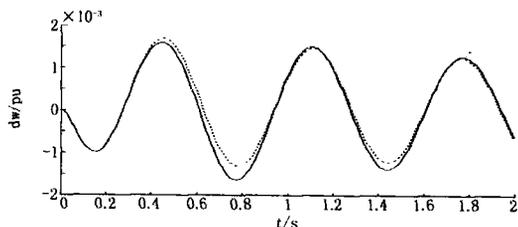


图 5 输出比较

Fig 5 Output comparison

从图中可以看到,简化后的模型的冲击响应与系统输出的差别不大,基本上可以反映系统的动态特性,从而验证了 Prony 对系统识别和简化的有效性。

2.2 参数的计算结果

遗传算法参数寻优计算中的样本为 30 个,交叉概率和变异概率为 $P_c = 0.95$, $P_m = 0.04$ 。PD 参数范围为 $K_p: 0 \sim 100$, K_i 和 $K_d: 0 \sim 3$, PD 控制器的输出限幅为 $[-0.15, 0.15]$ 。为了简化算法,对这三个数进行实数编码。评价环节设定为当进化 30 代后适度值不发生变化停止计算。经过计算后 $K_p = 40.2419$, $K_i = 1.45$, $K_d = 2.6218$ 。

3 算例仿真

为了验证该附加控制器抑制系统振荡控制的有效性,对上述单机无穷大系统进行如下仿真,并与采用 IEEE Std 421.5 多段式 PSS 仿真结果进行了比较。

先对励磁电压加入幅值为 0.2 时间持续 0.4 s 的阶跃扰动进行仿真。仿真结果如图 6 所示,其中实线表示加入附加控制器,虚线为加入多段式 PSS 的控制效果。

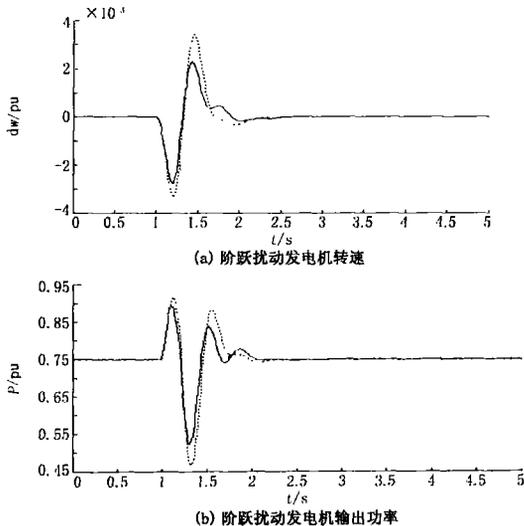


图 6 小扰动仿真曲线对比

Fig 6 Small disturbance simulation curve

随后进一步对大扰动进行仿真。设单机无穷大系统高压线路靠近发电机侧 0.1 s 时发生三相接地短路,0.2 s 后故障切除。仿真结果如图 7,其中实线表示加入附加控制器,虚线为加入多段式 PSS 的控制效果。

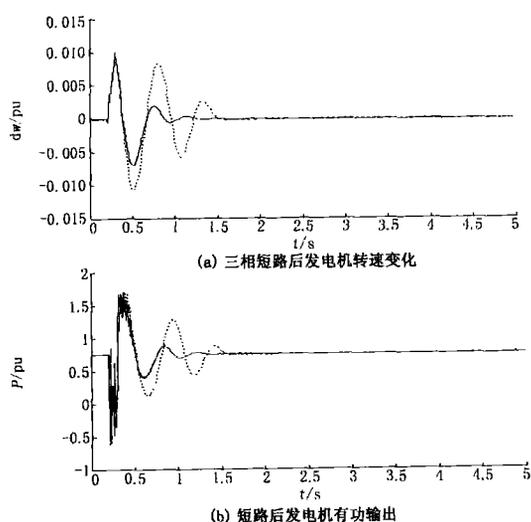


图 7 三相接地短路仿真曲线

Fig 7 Triphase earthing short circuit simulation curve

从上面的仿真的曲线对比可以看出,由于 Prony 辨识和简化的系统模型主要包括阻尼比较小,留数较大的振荡模态,因此针对这样的模型优化后的 PD 控制器对实际系统的阻尼改善情况较好。其不

仅可以在小扰动下改善系统阻尼,而且可以在系统发生较大扰动的情况下依然有明显的改进系统阻尼的作用,有比较好的鲁棒性。

4 结论

本文提出的控制器以 Prony 方法和遗传算法为基础。首先对发电机进行预先辨识和简化,然后再以简化的发电机模型为评价环节,以遗传算法对 PD 型励磁附加控制器参数进行优化。其特点是可以测量信号进行整定,减小了设计和实际应用中的误差,在简化模型上寻优,不会对发电机组运行造成不良影响,以及可以在给定范围内自动进行参数优化整定。从上面算例仿真中发电机转速和有功振荡仿真曲线的对比来看,不仅验证了 Prony 方法在系统辨识和简化中的作用和准确性,也验证了本文提出的励磁附加控制器是可行和有效的。

参考文献:

- [1] Crund C E, Paserba J J, Hauer J F, et al Comparison of Prony and Eigenanalysis for Power System Control Design [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8 (3): 964-971.
- [2] 刘红超,李兴源. 基于 Prony 算法的 HVDC 输电系统模型辨识 [J]. 四川大学学报, 2004, 36 (2): 86-89. L U Hong-chao, L I Xing-yuan. A Model Identification Method of HVDC Transmission Systems Based on Prony Analysis [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2004, 36 (2): 86-89.
- [3] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004. XU Zheng Dynamic Behavior Analysis of the AC/DC Power System [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [4] Pierre D A, Smith J R, Trudnowski D J, et al Prony Based Methods for Simultaneous Identification of Transfer Functions and Initial Conditions [J]. Computer Elect Engineering, 1995, 21 (2): 89-100.
- [5] Trudnowski D J, Smith R, Short A, et al An Application of Prony Method in PSS Design for Multimachine System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6 (1): 118-126.
- [6] 蔡自兴. 智能控制 [M]. 北京:电子工业出版社, 2004. CAI Zi-xing Intelligent Control [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [7] 饶洪德. 基于遗传算法的水轮机调节系统 PD 参数优化整定 [J]. 水利水电技术, 2005, 36 (1): 66-69. RAO Hong-de Optimal PD Parameters Setting Based on

- Genetic Algorithm for Hydropower Governing System [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(1): 66-69.
- [8] 刘金琨. 先进 PD控制及其 Matlab仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- LU Jin-kun. Advanced PD Control and Its Matlab Simulation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [9] 刘红超, 李兴源. 基于 PRONY辨识的交直流并联输电系统直流阻尼控制的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 54-57.
- LU Hong-chao, LI Xing-yuan. Study of DC Damping Control in AC/DC Transmission System Based on Prony Method [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 54-57.
- [10] Trudnowski. Order Reduction of Large Scale Linear Oscillatory System Models, 1994, 9(1): 451-458.

收稿日期: 2005-09-28; 修回日期: 2005-11-10

作者简介:

刘剑(1977-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统稳定与控制方面研究; E-mail: liujian1@sohu.com

刘天琪(1962-), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、调度自动化。

Additional PD excitation control based on Prony and Genetic Algorithm

LU Jian¹, LU Tian-qi¹, HOU Jing-zhou²

(1. College of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Northwest Power Grid Corporation, Xi'an 710048, China)

Abstract: This paper presents a new additional excitation controller. The generator model is identified and simplified by the controller with Prony method. The estimate part of the controller is based on this simplified model. Then parameter of the controller is set with Genetic Algorithm. Because the system model gotten by controller's identification part includes the smaller damping ratio and the larger residue oscillation mode state, the optimized PD controller has effective damping ability in real systems, aimed at such model. The simulation results show that the system damping can be improved not only at small disturbance, but also at large disturbance, and the controller's robustness is stronger.

Key words: Prony; Genetic Algorithm; system identification; stability control; parameter optimization

(上接第 16 页 continued from page 16)

- ZHU Sheng-shi. Principle and Technology of Protective Relaying for High Voltage Transmission System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [2] XNG Yi-bao, SU I Feng-hai, ZHU Sheng-shi. Fault Component Reactance Relay [A]. International Conference on Power System Technology, CSEE 1991. 678-682.
- [3] ZHANG Zhi-zhe, CHEN De-shu. An Adaptive Approach in Digital Distance Protection [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(1): 135-141.
- [4] LI Yan, CHEN De-shu, YN Xiang-gen. Research of One New Adaptive Mho Relay [A]. IEEE/PES International Conference on Power System Technology 2002.
- [5] Ye P, Li K K, Chen D S, et al. A Novel Algorithm for High Resistance Earth Fault Distance Protection [A]. IEEE PES Conference on Power System Technique 1996 475-480.
- 收稿日期: 2005-10-08; 修回日期: 2005-12-26
- 作者简介:
- 魏佩瑜(1960-), 女, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护;
- 于桂音(1953-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统控制与保护;
- 张铭新(1970-), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护;
- 哈恒旭(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与安全自动装置。E-mail: hxharr@163.com

A novel algorithm of reactance type distance relay based on phasor comparison

WEI Pei-yu¹, YU Gui-yin¹, ZHANG Ming-xin², HA Heng-xu¹

(1. Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Longkou Electric Power Corp, Longkou 265701, China)

Abstract: The principle and algorithm of reactance-type distance relay can be classified into two categories: the measuring fault reactance type and phasor comparing type. The capability of resisting the stable overreach and underreach caused by bad and "in phase problem" is analyzed for the two types of reactance relay. At the same time, a new algorithm of reactance-type distance relay is proposed. The EMTP simulation tests show that the new algorithm has the property of directionality as well as does not lead to overreach and underreach caused by the former factors.

Key words: EHV transmission lines; reactance type distance relay; stable overreach