

基于 DRNN 的超导磁储能装置自适应 PD 控制

姚涛, 石晶, 唐跃进, 李敬东, 程时杰

(华中科技大学超导电力科学技术研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出使用自适应 PD 控制的方法进行超导磁储能装置控制器的设计, 这种控制方法由 DRNN (对角回归神经网络) 在线辨识系统特定参数, 不需要建立系统参考模型, 而使得闭环系统的误差信号趋于最小。仿真表明 DRNN 能够通过梯度下降法自学习, 辨识系统的特定参数, 速度较快。与传统的控制方法相比, 其控制效果好, 且结构简单, 较易实现。

关键词: 超导磁储能; 自适应 PD 控制; DRNN

中图分类号: TM762; TM917

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897 (2005) 17-0027-04

0 引言

随着超导技术和电力电子技术的发展, 超导电力磁储能装置的技术越来越成熟。同时其优越的特性有助于解决电力系统中存在的一些暂时不能解决的问题^[1], 例如电力系统中的低频振荡, 也可以改善系统的动态和暂态稳定性, 平衡尖峰负荷, 提高电能质量。

SMES 的一个主要特性就是其快速的响应特性, 其不仅取决于变流器开关器件的开关时间, 也和控制策略有关。因此选择和设计优良的控制策略是研究 SMES 的一个重要的课题。但诸多经典控制方法对系统数学模型精度的要求较高, 适应性差。因此, 在实际动模实验中较少使用, 仍使用传统的 PD 控制。

本文设计了基于 DRNN 的自适应 PD 控制方法, 其兼有传统 PD 控制和现代自适应控制的优点, 设计中不依赖系统的模型, 使用 DRNN 映射系统动态特性, 在线辨识系统的特定参数, 同时也为 PD 参数的选定提供了一定裕度。在发电机组控制系统的可辨识性的基础下^[2], 仿真表明这种控制方法具有较强的鲁棒性, 不受工作点变化的影响, 在实际工程中具有一定应用前景。

1 含 SMES 的单机无穷大系统

考虑图 1 所示的单机无穷大系统, 同步发电机和励磁系统采用较为精确的六阶模型, SMES 采用文献 [3] 中的二阶动态模型 (1):

$$\begin{cases} \dot{P}_{sm} = -\frac{1}{T} P_{sm} + \frac{1}{T} u_1 \\ \dot{Q}_{sm} = -\frac{1}{T} Q_{sm} + \frac{1}{T} u_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中: u_1, u_2 为 SMES 的控制量; T 为 SMES 的惯性时间常数; P_{sm} 和 Q_{sm} 分别为 SMES 向系统注入的有功和无功功率。

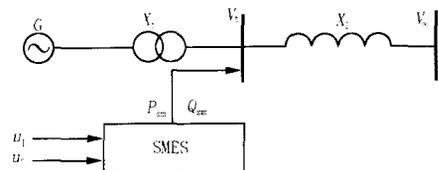


图 1 含 SMES 的单机无穷大系统

Fig 1 Single-machine-infinite-bus system including SMES

2 基于 DRNN 的自适应 PD 控制器

自适应 PD 控制是通过特征参数的识别, 去整定 PD 控制的三个参数, 其控制结构框图如图 2。自适应 PD 控制算法如下:

$$u = k_p(n) x_1(n) + k_i(n) x_2(n) + k_d(n) x_3(n) \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_1(n) = error(n) \\ x_2(n) = \sum_{i=1}^n (error(n) \times T) \\ x_3(n) = \frac{error(n) - error(n-1)}{T} \end{cases} \quad (3)$$

$$error(n) = r(n) - y(n) \quad (4)$$

式中: $r(n)$ 为系统输入指令, $y(n)$ 为系统输出值。 T 为采样时间。 PD 三项系数 $k_p(n), k_i(n), k_d(n)$ 采用 DRNN 神经网络进行整定。

定义指标则 $E(n) = \frac{1}{2} (r(n) - y(n))^2$ 则

$$k_p(n) = k_p(n-1) - \rho \frac{\partial E}{\partial k_p} = k_p(n-1) +$$

$$p(r(n) - y(n)) \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_p} = k_p(n-1) + p(r(n) - y(n)) \frac{\partial y}{\partial u} x_1(n) \quad (5)$$

$$k_i(n) = k_i(n-1) + i(r(n) - y(n)) \frac{\partial y}{\partial u} x_3(n)$$

同理: l

$$k_d(n) = k_d(n-1) + d(r(n) - y(n)) \frac{\partial y}{\partial u} x_2(n) \quad (6)$$

式中: $\frac{\partial y}{\partial u}$ 为对象的 Jacobian 信息, 该信息可以由 DRNN 进行辨识。

3 DRNN

DRNN 是一种回归神经网络, 应用动态 BP 算法或梯度下降法对网络进行训练, 能够动态映射, 短时间收敛, 适合动态系统的控制问题。网络结构共有三层, 隐层为回归层。DRNN 的结构如图 2 所示^[4]。

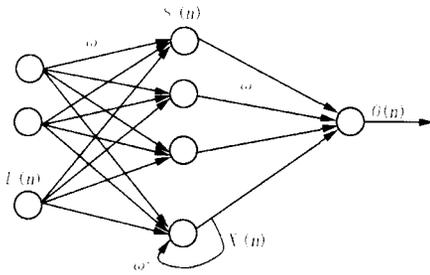


图 2 DRNN 的结构

Fig 2 Schematic diagram of DRNN

其中: $I_j(n)$ 为输入层第 j 个神经元的输入; $X_j(n)$ 为网络回归层第 j 个神经元的输出; $S_j(n)$ 为第 j 个回归神经元输入总和; $f(\cdot)$ 为 S 函数; $O(n)$ 为 DRNN 网络的输出。

DRNN 的算法为

$$O(n) = \sum_j W_j^O X_j(n) \quad (7)$$

$$X_j(n) = f(S_j(n)) \quad (8)$$

$$S_j(n) = W_j^D X_j(n-1) + \sum_i W_{ij}^I I_i(n) \quad (9)$$

式中: W^D 和 W^O 为网络回归层和输出层的权值向量; W^I 为网络输入层的权值向量。

由 DRNN 进行辨识的原理结构如图 3, u, y 为辨识对象的输入和输出, 将 y 和 u 的值作为辨识器 DRNN 的输入, ym 为 DRNN 的输出, 系统输出与网络输出的误差作为辨识器的调整信号。

辨识指标取辨识误差的均方根

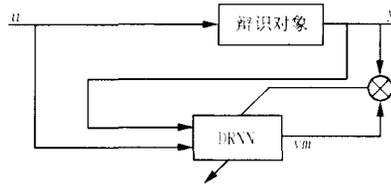


图 3 DRNN 辨识结构图

Fig 3 Schematic diagram of the identification with DRNN

$$Em(n) = \frac{1}{2} en(n)^2 = \frac{1}{2} (y(n) - ym(n))^2 \quad (10)$$

为减少计算量, 学习算法采用梯度下降法

$$w_j^O = - \frac{\partial Em(n)}{\partial w_j^O} = en(n) \frac{\partial ym}{\partial w_j^O} = en(n) X_j(n)$$

$$w_j^O(n) = w_j^O(n-1) + o_w w_j^O(n) + (w_j^O(n-1) - w_j^O(n-2))$$

$$w_{ij}^I = - \frac{\partial Em(n)}{\partial w_{ij}^I} = en(n) w_j^O Q_{ij}(n)$$

$$w_{ij}^I(n) = w_{ij}^I(n-1) + i_w w_{ij}^I(n) + (w_{ij}^I(n-1) - w_{ij}^I(n-2))$$

$$w_j^D = - \frac{\partial Em(n)}{\partial w_j^D} = en(n) w_j^O p_j(n)$$

$$w_j^D(n) = w_j^D(n-1) + d_w w_j^D(n) + (w_j^D(n-1) - w_j^D(n-2)) \quad (11)$$

其中: 回归层神经元取双 S 函数为:

$$f(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} \quad (12)$$

$$P_j(n) = \frac{\partial X_j}{\partial w_j^D} = f(S_j) X_j(n-1) \quad (13)$$

$$Q_{ij}(n) = \frac{\partial X_j}{\partial w_{ij}^I} = f(S_j) I_i(n) \quad (14)$$

式中: i_w, d_w, o_w 分别为输入层、回归层和输出层的学习速率; ω 为惯性系数。

对象的 Jacobian 信息为:

$$\frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial ym}{\partial u} = \sum_j w_j^O f(S_j) w_{ij}^I \quad (15)$$

4 控制器设计和仿真结果

根据图 1 建立的含 SMES 的单机无穷大系统, 选择发电机转子的角速度 ω 、端电压 V_t 作为系统输出量, 设计一个双输入双输出的自适应 PD 控制器, 框图如图 4。在对这样一个双输入双输出的系统参数进行辨识时, 为了简化 DRNN 的结构, 减少计算量, 设计两个辨识网络分别对发电机转子的角速度 ω 、端电压 V_t 进行辨识, 从而得出 u_1 与 u_2 与 V_t

的解耦关系。

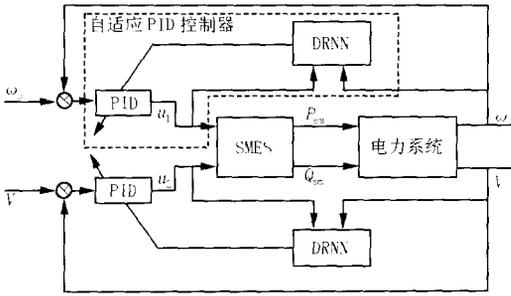


图 4 多变量自适应控制系统框图

Fig 4 Diagram of the multi-variable adaptive PD control system

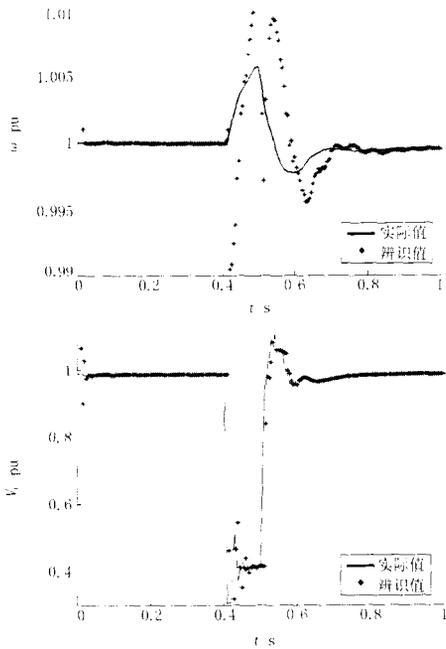


图 5 系统的实际值和 DRNN 输出的辨识值 ($P_0 = 0.85$)

Fig 5 Response of the system under small disturbance ($P_0 = 0.85$)

在第 1 节建立的模型平台上加入设计的控制器,进行时域仿真。发电机参数见文献 [3], SMES 惯性时间常数 $T=0.025$ s。考虑到系统模型的阶数和仿真的计算量,仿真中 DRNN 神经网络的输入层、回归层和输出层的神经元数分别设为 3, 6, 1。权值向量的初值选用随机值,也可选用训练后的值,因神经网络的收敛速度较快,两种选择差别不大。

仿真表明,DRNN 神经网络对不加控制器的开环系统辨识,效果非常好。无论系统受到何种扰动,DRNN 输出的辨识值都能和系统实际输出值基本吻合。针对闭环系统在短路故障情况下,神经网络的辨识值和系统实际输出值如图 5,其中发电机的转

子辨识值在短路和重合闸瞬时误差相对较大,但重合闸后辨识值和系统输出值误差保持在 10^{-3} 数量级上,同时辨识值变化基本可以反映实际值的变化。

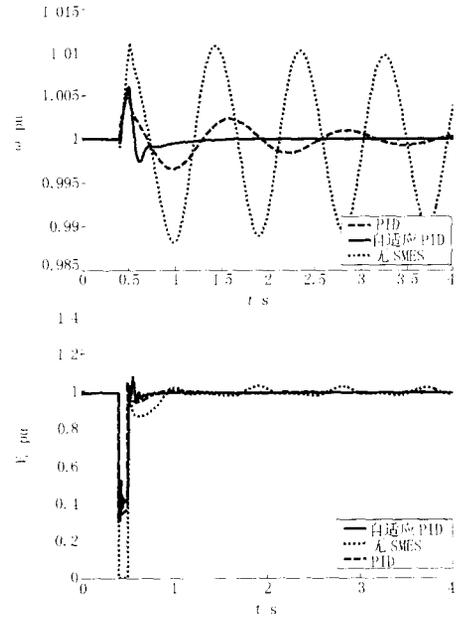


图 6 系统受大扰动后的响应 ($P_0 = 0.85$)

Fig 6 Response of the system under small disturbance ($P_0 = 0.85$)

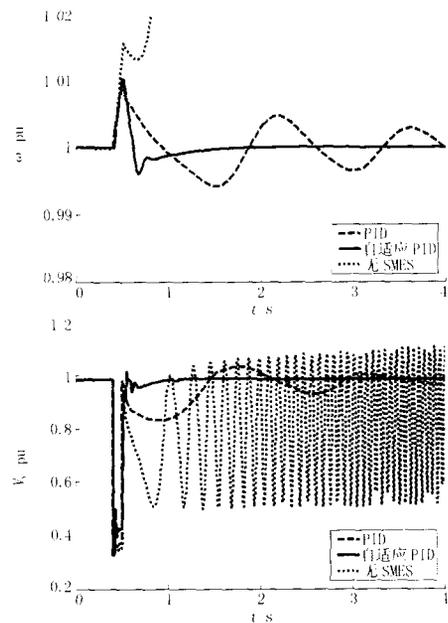


图 7 系统受大扰动后的响应 ($P_0 = 1.2$)

Fig 7 Response of the system under small disturbance ($P_0 = 1.2$)

仿真表明,该控制器能迅速抑制系统受到大小扰动后的振荡,并维持端电压稳定。图 6~图 7 所

示为系统在不同运行工况下的响应曲线,对比了无 SMES, PD 控制和自适应 PD 控制时的波形,自适应 PD 的比例、积分、微分三个参数的初始设置和 PD 的一样。图 8 是 SMES 输出有功和无功的波形。通过与 PD 控制的对比,可以看出在该控制器下系统角速度的波动小, SMES 有功和无功的波动也随之变小,经过 2~3 次摆动就可稳定下来。这样就减少 SMES 的变流器在四象限工作状态之间的转换,从而减少 SMES 磁体的充放电次数,降低磁体的交流损耗。

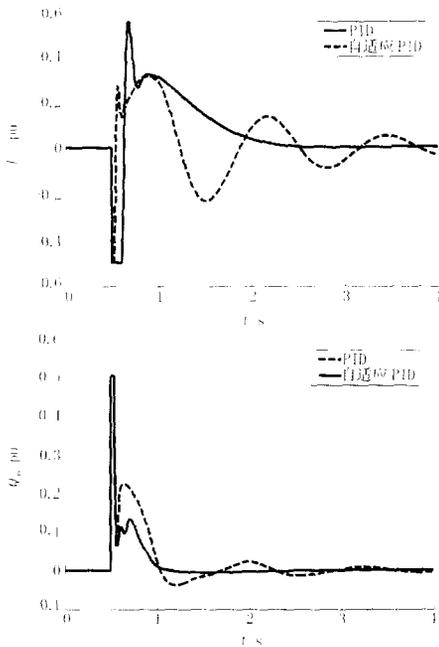


图 8 自适应 PD 控制 SMES 的有功与无功功率输出 ($P_0 = 0.85$)

Fig 8 Output of real and reactive power of the SMES controlled by adaptive PD controller ($P_0 = 0.85$)

5 结论

本文设计的自适应 PD 控制器利用对角回归神经网络对非线性系统的映射能力,进一步减少控制器对系统模型的依赖。通过对建立模型进行时域仿真,结果表明该控制器能够较快地平息系统受到的不同扰动,鲁棒性强,且结构简单,同时有利于降低 SMES 磁体的交流损耗。

参考文献:

- [1] 韩翀,李艳,余江,等. 超导电力磁储能系统研究进展(一)——超导储能装置[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 63-68.
HAN Chong, LI Yan, YU Jiang, et al. Application Development of SMES in Electric Power System, Part One: General Review [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 63-68.
- [2] 徐枋同,李永华. 系统辨识理论与实践[M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
XU Fang-tong, LI Yong-hua. Theory and Practice of System Identification [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [3] 关天祺,梅生伟,卢强,等. 超导储能装置非线性鲁棒控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(17): 1-6.
GUAN Tian-qi, MEI Sheng-wei, LU Qiang, et al. Non-linear Robust Control Design for Power System including Superconducting Magnetic Energy Storage Devices [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(17): 1-6.
- [4] 刘金琨. 先进 PD 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
LIU Jin-kun. Advance PD Control and MATLAB Simulation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [5] 江全元,程时杰,曹一家,等. 基于遗传算法的超导磁储能装置 H2/H 鲁棒控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(12): 14-18.
JIANG Quan-yuan, CHENG Shi-jie, CAO Yi-jia, et al. A Genetic Approach to Mixed Robust Control Design for SMES H2/H [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(12): 14-18.

收稿日期: 2004-12-28

作者简介:

姚涛(1980-),男,硕士研究生,从事超导电力系统特性分析的研究; E-mail: ytao522@163.net

石晶(1980-),女,硕士研究生,从事超导电力系统特性分析的研究;

唐跃进(1958-),男,教授,博士生导师,主要从事超导电力、电力系统和高电压应用技术研究。

Adaptive PD control based on DRNN for SMES

YAO Tao, SHI Jing, TANG Yue-jin, LI Jing-dong, CHENG Shi-jie

(下转第 73 页 continued on page 73)

控中心报告其 IP地址,并保持和维护链路的连接,随时监测链路的连接情况,一旦发生异常则自动重新建立链路。车载移动终端程序流程图如图 5。

4 结语

上述基于 GPRS/GPS/GIS的电力抢修实时调度系统已在国内多个城市供电企业投入使用,且运行状况良好,实践表明,该方案具有建设成本少、运行维护费用低、功能完备、结构合理等优势,在技术和实现上完全可行。与基于 GSM通信的定位调度系统相比较,该系统的技术革新主要体现在本地通信机制的改变。采用 GPRS通信方式较 GSM通信方式在实时性、可靠性、稳定性、扩展性和运行费用上有更大的优越性。整个系统能极大地优化工作流程,更加合理地调度抢修任务,从而显著地缩短事故处理的响应时间,提高抢修效率。

参考文献:

- [1] Derenaris G, Garofalakis J, Makris C, et al Integrating GIS, GPS and GSM Technologies for the Effective Management of Ambulance[J]. Computers, Environment and Urban System, 2001, 25(2): 267-278
- [2] Rappaport T S, Reed J H, Woerner B D. Position Loca-

tion Using Wireless Communication on Highways of the Future[J]. IEEE Communications Magazine, 1996: 396-417.

- [3] 崔巍,王本德,贾文亭. 电力抢修监控调度系统中的通讯方式[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(5): 643-645
CUI Wei, WANG Ben-de, JIA Wen-ting Research on Communication Way in Supervising and Scheduling System of Electrical Repairs[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(5): 643-645.
- [4] 李宁. 供电企业配电网 AM/FM/GIS系统常见问题探讨[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(2): 53-55.
LI Ning Some Question of AM/FM/GIS in Power Supplying Corporations[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(2): 53-55.

收稿日期: 2004-12-15; 修回日期: 2005-02-26
作者简介:

吴 强(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化; E-mail: Wuqiang826@163.com

滕 欢(1965-),女,高级工程师,长期从事电力系统自动化科研、教学及工程实践工作;

王凯富(1962-),男,高级工程师,长期从事工业控制工程实践工作。

Structure of electrical repairs real-time scheduling system based on GPRS/GPS/GIS

WU Qiang¹, TENG Huan¹, WANG Kai-fu²

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

2. Shenzhen GREAT Electronic Co., Ltd, Shenzhen 518052, China)

Abstract: This paper introduces a whole design schema of electrical repairs real-time scheduling system which using GPS to acquire data, GIS to process data and GPRS to transmit data. Based on this, the system's communicating principle, working principle and software design are researched. This system can not only discover and position the electrical contingency in time, but also can reasonably allocate and schedule the repairing resources, intelligently make and deliver the repairing policy. This system is valuable and promising.

Key words: GPRS; GPS; GIS; repairs scheduling

(上接第 30页 continued from page 30)

(Superconducting Power Science and Technology R & D Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Adaptive PD controller is designed for Superconducting Magnetic Energy Storage System (SMES), which can identify the system's special parameter with Diagonal Recurrent Neural Network (DRNN). The proposed controller can minimize the error of the closed-loop system without the system's model. The simulation results show that the controller with the gradient studying-self algorithm makes the system better compared with PD controller in parameter identifying, response speed, control capacity, structure simplifying and process realizing.

Key words: SMES; adaptive PD control; DRNN