

基于滑模变结构的静止无功发生器控制系统

董 密¹, 罗 安²

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083;
2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 研究了先进的静止无功发生器 ASVG(Advanced Static Var Generator)的控制器 PQ 离散时间解耦模型, 可实现有功和瞬时无功的快速解耦控制。在此模型基础上, 设计了 ASVG 双环控制系统。内环为功率控制环, 采用变趋近速度离散滑模变结构控制, 有效地减小了系统抖振, 保证了稳态时系统的渐近稳定性, 并增强了闭环系统的鲁棒性。外环为电压控制环, 采用单神经元自适应比例积分(PI)控制在线调整参数, 可适应系统参数变化、克服扰动, 有效控制了瞬态无功交换时直流电容电压的稳定。通过仿真验证了该控制系统的有效性。
关键词: 滑模变结构; 无功控制; 静止无功发生器; 单神经元自适应 PI
中图分类号: TM 761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)10-0039-03

先进的静止无功发生器 ASVG(Advanced Static Var Generator)是柔性交流输电系统中一种重要控制器, 能补偿系统无功功率或阻尼系统振荡^[1-2], 其建模与控制一直是研究热点。一般 ASVG 均通过接入点的电压反馈, 采用常规比例积分微分(PID)或引入线路功率的电力系统稳定器(PSS)辅助方法完成控制^[3], 但这些方式难以提高系统动态性与稳定性^[4-6]。文献[7]采用状态空间线性多变量方法, 配置闭环系统全部特征值, 实现 PQ 解耦控制。文献[8]则提出基于瞬时有功与瞬时无功理论的空间矢量法设计 ASVG 控制器。但由于直流电压回路与无功控制回路时间常数为同一数量级, 且系统本身具有非线性, 上述解耦方法也难以达到理想效果。本文提出了一种简单易行的 PQ 离散解耦模型, 在此模型的基础上进行 ASVG 双环控制。内环采用变趋近速度法的离散滑模变结构控制^[9]求取控制率, 以减小系统抖振; 外环利用单神经元自适应比例积分(PI)控制在线调整参数, 可适应系统参数变化和克服扰动。仿真研究表明: 此控制器具有良好的动态性能和鲁棒性; 瞬态变化时, 可保持电容侧直流端电压稳定。

1 系统结构与建模

电力系统中的 ASVG 包括逆变器、变压器和连接滤波器, 如图 1 所示。其简化模型中, 它们可分别等效为可控电压源(e)、电抗(L)和电阻(R); U 是连接点(PCC)处的电压; p, q 是在 PCC 处 ASVG 的瞬时无功和有功交换值; p_R 为滤波器阻抗的电能损失; p_L 为滤波器+变压器的电感电能消耗; p_e, q_e 分别为逆变器和交流系统交换的有功和瞬时无功。

在状态空间, 利用帕克变换^[10], ASVG 的瞬时三相 $d-q$ 分量为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_d \\ \Delta e_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期: 2005-10-17; 修回日期: 2006-03-31
基金项目: 国家自然科学基金(60474041); 国家“863”计划项目(863-511-820-007)

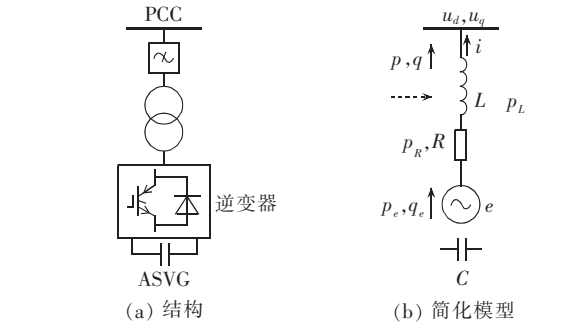


图 1 ASVG 的结构和简化模型
Fig.1 ASVG configuration and its simplified model

$\Delta e_d = e_d - u_d, \Delta e_q = e_q - u_q$
式中 ω 为坐标系统的角速度。
简化后

$$\frac{dX}{dt} = AX + B\delta \quad (2)$$

式中 X 为状态空间矢量; δ 为输入矢量; A, B 分别为状态矩阵和输入矩阵。

2 控制算法

ASVG 控制系统如图 2 所示。本文的控制器为双环控制器。内环为功率控制环, 提出的离散变趋近速度滑模变结构控制保证了稳态时系统的渐近稳定性并增强了闭环系统的鲁棒性。外环为电压控制环, 研究了单神经元自适应 PI 控制, 有效地提供给逆变器所需交换的用于保持电容侧电压恒定的有功功率参考值。

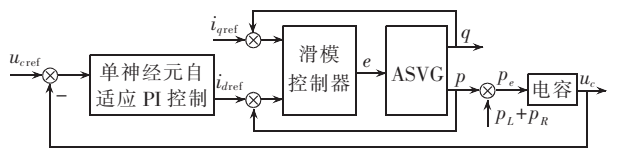


图 2 ASVG 控制结构图
Fig.2 Control structure of ASVG

2.1 PQ 的离散解耦模型
由于式(1)中状态阵 A 存在交叉项, i_p 和 i_q 之间

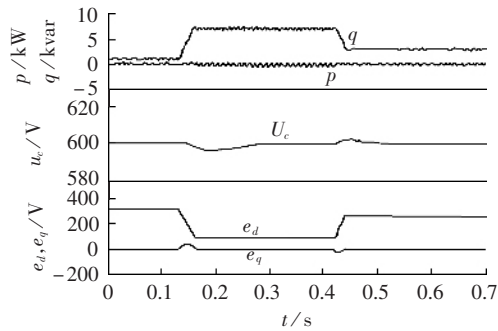


图 4 无功功率参考值变化时的闭环响应仿真图
Fig.4 Simulation close-loop response to a step change of reactive power reference

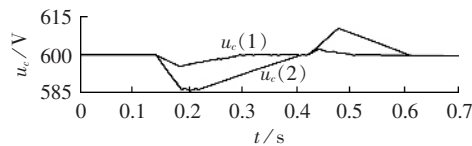


图 5 单神经元自适应 PI 控制 $[u_c(1)]$ 和普通 PI 控制 $[u_c(2)]$ 时电容电压变化的比较
Fig.5 Comparison of capacitor-voltage variation between single neur adaptive PI control $[u_c(1)]$ and normal PI control $[u_c(2)]$

4 结论

本文建立了系统的离散时间模型,可实现有功和瞬时无功的快速解耦控制,解耦有功功率对保证 PWM 逆变器控制正常工作有很大意义。同时,研究了基于变趋近速度滑模变结构的 ASVG 控制系统,滑模变结构在 ASVG 中应用,使系统能在不受外界干扰下运行,增强了系统的鲁棒性。并考虑了电容电压的快速、自适应控制,改进了传统 PI 控制参数在线不可调的局限性,提出单神经元自适应 PI 控制,实现简单,保证逆变器的直流端电容值可以很小。

参考文献:

[1] HSU Shih-min. Discussion of “using a static var compensator to balance a distribution system” [J]. Industry Applications, IEEE Transactions, 1999, 35(5): 1174-1176.

[2] LIANG Xu, LIU Wen-hua, JIANG Qi-rong, et al. Development of a voltage source inverter based static var generator[C]//Energy Conversion Engineering Conference, IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety. Washington, USA: IEEE, 1996: 611-616.

[3] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

[4] 孙元章, 刘前进. FACTS 控制技术综述——模型、目标与策略[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 1-5.

SUN Yuan-zhang, LIU Qian-jin. A summary of FACTS control technology—model, objective and strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 1-5.

[5] WANG H F, LI H, CHEN H. Power system voltage control by multiple STATCOMS based on learning humoral immune response[J]. IEE Proc Genet Transm Distrib, 2002, 149(4): 416-426.

[6] 谢小荣, 崔文进, 唐义良. STATCOM 无功电流的鲁棒自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 35-40.

XIE Xiao-rong, CUI Wen-jin, TANG Yi-liang. Robust adaptive control of STATCOM's reactive current[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 35-40.

[7] SUN Y Z, SUN C X. Voltage security enhancement using ASVG nonlinear control [C]//Proceedings of International Conference on Energy Management and Power Delivery, IEEE Singapore Section. Singapore: IEEE, 1995: 337-341.

[8] SCHAUDER C, GERNHARDT M, STACEY E. Development of a 100 Mvar static condenser for voltage control of transmission systems [J]. IEEE Trans Power Delivery, 1995, 10(3): 1486-1496.

[9] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[10] KRAUSE P C. Analysis of electric machinery[M]. New York: Mc-Graw-Hill Inc, 1984.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

董 密 (1976-), 女, 广东罗定人, 博士研究生, 研究领域为柔性交流输电及电力系统自动化(E-mail: dm1221@163.com);
罗 安 (1957-), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士研究生导师, 研究领域为柔性输配电控制技术、有源滤波和无功补偿理论研究和工程应用。

Control system of static var generator based on sliding variable structure
DONG Mi¹, LUO An²

(1. Central South University, Changsha 410083, China;
2. Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The PQ discrete-time decoupled model for the ASVG (Advanced Static Var Generator) controller is researched for the rapid decoupled control of the active power and the instantaneous reactive power. Based on it, a double-loop control system is designed for the ASVG. The internal loop is to control the power, and a changing reaching law method in discrete sliding variable structure control is proposed to reduce the system chattering, ensure the asymptotic stability of the system in steady state and improve the robustness of the colse-loop system. The external loop is to control the DC (Direct Current) capacitor voltage. A single neur adaptive PI (Proportional Integral) control is adopted for the voltage control, which adapts itself to online system parameter changes for avoiding disturbances and keeping capacitor voltage almost constant during instantaneous reactive power exchange. Simulations verify its effectiveness.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(60474041) and the National High Technology Research and Development of China(863 Program)(863-511-820-007).

Key words: sliding variable structure; reactive power control; static var generator; single neur adaptive PI