

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)

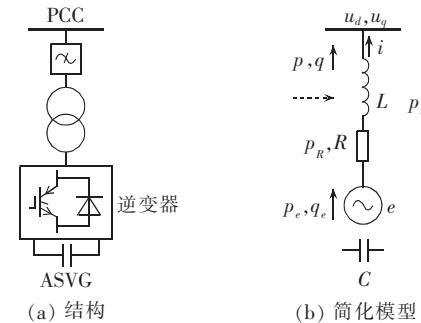


图 1 ASVG 的结构和简化模型

Fig.1 ASVG configuration and its simplified model

式中 $\Delta e_d = e_d - u_d$, $\Delta e_q = e_q - u_q$
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。

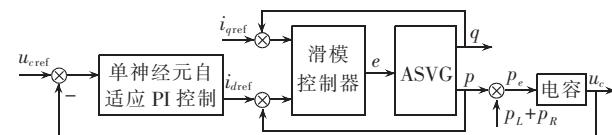


图 2 ASVG 控制结构图

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

存在耦合,本文探讨一种数字化 ASVG 系统 i_p 和 i_q 的解耦控制。假设式(1)中的 ω 是常量,系统模型线性时不变,采用零阶保持器得到离散模型如下:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{X}_k + \boldsymbol{\Gamma} \boldsymbol{\delta}_k \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\Phi} = e^{Ats} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & \Phi_2 \\ -\Phi_2 & \Phi_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\Gamma} = \int_0^{t_s} e^{A\eta} d\eta \mathbf{B} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 \\ -r_2 & r_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 t_s 为采样间隔。

如式(3)~(5)所示,在状态矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 和输入矩阵 $\boldsymbol{\Gamma}$ 中仍存在 d 轴与 q 轴变量的交叉耦合项。要克服这一耦合问题,可把系统改写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 \\ 0 & \Phi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}_k \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 0 & \Phi_2 \\ -\Phi_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_k + \boldsymbol{\Gamma} \begin{bmatrix} \Delta e_d \\ \Delta e_q \end{bmatrix}_k \quad (7)$$

由方程(6)可见:当 u_q 仅影响 i_q 时, u_d 通过一阶传递函数影响 i_d 。因此,可根据控制规律独立地设计 u_d 和 u_q 并将其作为控制输入,从而实现 i_d 和 i_q 的解耦控制。由于 $\boldsymbol{\Gamma}$ 为非奇异阵且可逆,因此可利用方程(7)得到的 u_d 和 u_q 计算逆变器的输出电压 e_d 和 e_q 。

2.2 变趋近速度离散滑模变结构控制

离散时间模型(6)可分解为 2 个独立的解耦模型(d 和 q 部分)。控制规则的设计可简化为设计 2 个状态反馈滑模控制规则。

由式(6)状态方程为

$$\mathbf{I}(k+1) = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{I}(k) + \mathbf{U}(k) \quad (8)$$

取 ASVG 的离散滑模变结构控制的切换函数为

$$\mathbf{S}(k) = \Delta \mathbf{I}(k) = \mathbf{I}_{\text{ref}}(k) - \mathbf{I}(k) = 0 \quad (9)$$

根据离散滑模变结构控制理论,为满足系统稳定性条件,取指数趋近律^[9]

$$\mathbf{S}(k+1) = (1 - \lambda T) \mathbf{S}(k) - \beta(k) T \varepsilon \text{sgn}(\mathbf{S}(k)) \quad (10)$$

式中 $\varepsilon > 0, \lambda > 0; T$ 为采样周期(控制周期); $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

由于滑动模态附近,系统可能发生抖振现象,难以达到良好的动态特性,因此提出一种变趋近速度方法,即在趋近段、滑动模态初期采用指数趋近率,在中后期采用衰减控制,改善系统动态性能,可设计

$$\beta(k) = \begin{cases} \beta(k-1) & |\mathbf{S}(k)| > m \\ \rho \beta(k-1) & |\mathbf{S}(k)| \leq m \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\rho < 1; m$ 为可选常数。

由式(9)(10)可推出

$$\mathbf{U}(k) = \begin{cases} \mathbf{I}_0(k) + \beta(k) T \varepsilon & \mathbf{S}(k) > 0 \\ \mathbf{I}_0(k) - \beta(k) T \varepsilon & \mathbf{S}(k) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\mathbf{I}_0(k) = (1 - \boldsymbol{\Phi}) \mathbf{I}(k) - \lambda T \mathbf{S}(k)$ 。

以上分析总结如下:

a. 参考值 q 由主控制器给出,参考值 p 由电容侧直流电压控制器给出;

b. ASVG 控制器分别给出 p, q 所需 u_d 和 u_q 值;
c. 通过方程(7)计算出逆变器所需的输出电压 e 。

2.3 单神经元自适应 PI 电容电压控制

电容电压的波动会使所需的电容值增加,这样将会提高设备的成本。若忽略逆变器损耗,电容中储存能量的状态空间表示形式为

$$\frac{du_c^2}{dt} = -2p_e/C, \quad p_e = e_d i_d + e_q i_q \quad (13)$$

状态变量和式(13)中的控制输入分别是 u_c^2 和 p_e 。很明显,如果 u_c 保持恒定,则 p_e 的稳态值必须为 0。

虽然逆变器的损耗瞬态时可忽略,但如果考虑损耗时间累积作用,设计电容电压控制器还是要考虑逆变器损耗。滤波器的功率损耗包括滤波器的电阻损耗(图 1 中的 p_R)和当 ASVG 的无功(图 1 中的 q)交换变化时,滤波器电抗的有功损耗(p_L),则 $p_F = p_L + p_R$ 。理想情况下,ASVG 应该仅从系统中消耗所需的有功来补偿逆变器和系统损耗;但是,当瞬时无功参考值($i_{q\text{ref}}$)发生变化时,装置就需要消耗更多的有功,当电流变化时, p_L 与连接的三相电感储存的能量变化有关。如果没有快速校正,逆变器的电容将发出/吸收所需的能量以支持电流的快速变化,则直流电容电压也将发生变化。很明显,PI 反馈控制可以使得在稳定状态中的 $p + p_F = 0$ 。

由于传统的 PI 控制不能在线修改参数,而 ASVG 在噪声、负载扰动等因素影响下,过程参数可能发生变化,因此,本文提出单神经元自适应 PI 控制,使 PI 参数的整定不依赖于对象模型,还能在线学习、自动调整,以自适应被控过程参数变化和克服扰动影响。该控制算法实现简单,仿真表明该控制方法比常规 PI 控制器具有更强的鲁棒性,可获得更好的控制效果。电容电压控制器如图 3 所示。

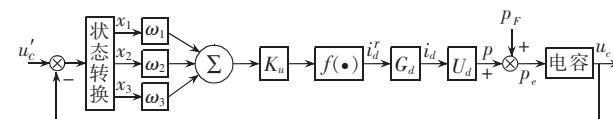


图 3 逆变器直流侧控制系统方框图

Fig.3 Block diagram of DC-link voltage control system of converter

图中, G_d 表示有功功率控制器的闭环传递函数,单神经元输入如式(14)所示, ω_i 为神经元权值, K_u 为增益系数, $f(\cdot)$ 为激活函数,取 sigmoid 函数。

$$\begin{aligned} x_1 &= u_c^r - u_c = e(k), \quad x_2 = e(k) - e(k-1) = \Delta e(k) \\ x_3 &= e(k) - 2e(k-1) + e(k+2) \end{aligned} \quad (14)$$

3 仿真分析

本文通过 Matlab 仿真说明了控制系统的性能。图 4 是采用固定采样频率的空间矢量调制控制逆变器电压,当无功参考值从 1 kvar 上升到 7 kvar,再下降到 3 kvar 时 ASVG 的响应曲线。仿真中连接滤波器的有功损耗被忽略。由图 4 看出, q 紧紧跟随其参考值的变化,在稳态时无误差; p 变化很慢以校正直流电压 u_c 的变化值。在 $\pm 1\%$ 稳态范围内, q 的稳定时间为 47 ms, 超调小于 5%。 e_d, e_q 为逆变器的参考电压。

考虑滤波器的功率消耗(见图 3),做同样的仿真,得到相似的 q 值结果。单神经元自适应 PI 与普通 PI 2 种方法中电容电压变化的比较见图 5。可见,本文中的控制器提高了电容电压控制器的性能。

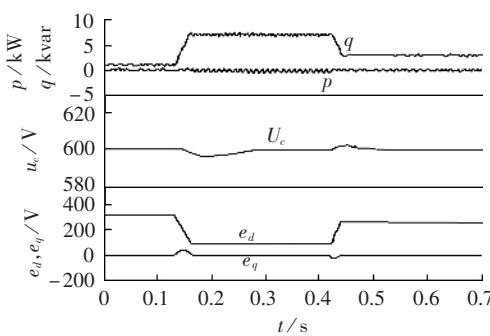


图 4 无功功率参考值变化时的闭环响应仿真图

Fig.4 Simulation close-loop response to a step change of reactive power reference

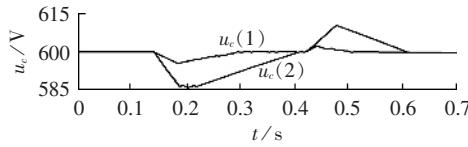
图 5 单神经元自适应 PI 控制 [$u_c(1)$] 和普通 PI 控制 [$u_c(2)$] 时电容电压变化的比较

Fig.5 Comparison of capacitor-voltage variation between single neurone 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: McGraw-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及工程应用。

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 neurone 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 neurone adaptive PI