

基于能量整形的先进静止无功发生器(ASVG)控制器设计

梁志珊¹, 谢争先², 张化光²

(1. 中国石油大学机电工程学院, 北京 102249; 2. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 建立了适合能量整形和考虑系统调节动态的简化 ASVG 三阶模型, 首次应用能量整形 IDA-PBC 方法设计了先进静止无功发生器(ASVG)的闭环稳定控制器。能量整形 IDA-PBC 方法直接使用系统能量作为存储函数, 物理意义明确, 较其它非线性控制器结构简单, 并避免了可能产生的不期望的高增益问题, 由于设计中完整地保留了系统非线性结构, 不需进行任何线性化处理, 较各种线性化设计方法具有更强的鲁棒性, 适应系统模型和参数不精确程度效果较好。给出的仿真算例表明所提出的 ASVG 控制器能够在系统发生大的扰动后, ASVG 安装点电压和电容器的直流电压能尽快恢复正常, 控制方案有效可行。

关键词: 能量整形; 哈密顿系统; 先进静止无功发生器(ASVG)

Novel ASVG controller design for stability improvement via energy shaping

LIANG Zhi-shan¹, XIE Zheng-xian², ZHANG Hua-guang²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: In this paper, a novel ASVG controller is first presented for power system transient stability improvement via energy-shaping IDA-PBC method. The main contributions include the establishment of a three order simplified ASVG model, which is more suitable for energy shaping method and a consideration of the dynamic effect of ASVG regulation as well. The proposed IDA-PBC passive stabilizer uses the real energy function of power system as the close loop Hamiltonian function in simple structure. Since the system nonlinear characteristics are completely preserved, the proposed ASVG IDA-PBC controller is more robust than linear control method. Also a feasible scheme is proposed to employ the control strategy after considering the physical structure of power system. The proposed strategy and method are proved to be effective by the results of digital simulation, fast recovery of AC voltage where ASVG is installed and fast recovery of DC voltage across the capacitor after the disturbance.

Key words: energy-shaping; Hamiltonian system; ASVG

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)19-0050-06

0 引言

作为交流柔性输电系统(FACTS)的重要成员^[1], 先进静止无功发生器(ASVG)是一种并联型无功功率(电流)补偿装置, 它是由综合静止无功补偿、电压源逆变等技术而形成的。与传统无功补偿装置 SVC 相比, ASVG 具有调节能力强、谐波含量低和装置体积小等优点。随着电力系统中出现了越来越多的冲击性和非线性负荷, ASVG 在输电网中对提高电力系统稳定性^[2]和改善系统阻尼^[3]等方面可发挥重要作用。

安装在电力系统中的 ASVG 的基本原理是通过连到 DC 电容器的变换器(VSI)产生交流电压, 靠电

抗器上的电压差使 ASVG 和系统之间产生有功和无功交换。ASVG 的第一个控制器交流电压控制器, 通过控制交流电压可以调节 ASVG 和系统之间产生有功和无功。ASVG 的第二个控制器直流电压控制器, 被用来调节电容器上的电压。在传统控制方案里, 两个控制器均是比例积分串联调节器。ASVG 本身及它在其中运行的电力系统模型是本质非线性的。对这种非线性系统, 可应用泰勒级数将其在初始运行点附近化为线性系统, 然后利用线性系统的最优控制方法对系统进行综合, 设计其控制器^[4]。但这种方法存在严重缺陷, 即当系统状态偏离初始运行点较远时, 所设计的控制器将失效, 甚至对系统产生负面影响。为解决这一问题, 各种精确线性化方法应运而生。如 PI 控制方法^[5]、基于微分几何的方法^[6]、PI 逆控制方法^[7]、直接反馈线性化方法^[8]、鲁棒

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目资助(104117)

自适应控制方法^[9]、递归神经网络自适应控制方法^[10]等。这些方法克服了上述近似线性化方法的不足。但是这些方法无法从理论上保证系统运行的稳定性, 因此实际应用中还以PI控制最为实用。

近年来, 非线性控制理论有了快速发展, 系统控制的能量整形方法尤其受到高度重视, 主要特征是被控系统具有端口受控哈密顿结构, 采用端口受控哈密顿PCH (port-controlled Hamiltonian)模型表示系统, 闭环系统的哈密顿函数可作为Lyapunov(存储)函数, 根据系统特有的互联和阻尼配置方法, 使系统的控制器设计与稳定性分析更加容易。在科学和工程领域, 能量是基本概念之一, 通常认为动态系统是能量变换装置, 依靠互联并向系统注入能量可确定整个系统的行为。能量整形是指有目的地对于系统能量的修改(整形)以达到系统控制设计目标, 基于能量整形的控制设计方法, 可应用于背景广泛的系统和功能多样的控制器设计, 完整地保留了系统非线性结构, 能够提供系统及其控制行为的物理解释, 对于控制系统具有直观的几何和物理描述, 具有广泛应用前景。能量整形概念由来已久, 早期曾在机器人操作控制中取得很大成功^[11], 在Hamiltonian系统模型中严格包含了Euler-Lagrange模型描述系统, 因此, 近年来基于端口耗散受控Hamiltonian(PCHD-Port Controlled Hamiltonian with Dissipation)系统的能量整形理论和方法日益得到重视和应用, 尤其是Ortega在其著作中对Hamiltonian系统能量整形作了系统总结, 上升到系统的非线性控制器设计理论^[12, 13]。

利用Hamiltonian系统结构和无源镇定思想, 本文将给出基于含ASVG控制的电力系统Hamiltonian模型的连接和阻尼指定-无源控制(IDA-PBC, Interconnections and Damping Assignment and Passivity Based Control)能量整形控制器, 通过修改Hamiltonina系统连接和阻尼结构矩阵而(整形)构造闭环系统的能量函数, 该能量函数在控制设计平衡点处具有最小值, 并可作为存储函数使闭环系统满足无源控制条件。本文建立了新的ASVG系统模型, 利用能量整形和无源性控制方法对ASVG进行控制, 这将为ASVG的现代非线性控制提供新的途径和有效方法。仿真结果表明所建议方法的有效性。

1 先进静止无功发生器(ASVG)模型^[14]

图1是ASVG的三相简化电路, 电网电压用三相交流电压源 U_s 表示, 电压型逆变器的主开关管采用IGBT。为了便于分析, 作如下假设: (a) 开关元件为理想器件; (b) a, b, c三相参数对称且电网电压

对称; (c) 整个装置的损耗用等效电阻 R_s 表示, 电感用等效电感 L 表示; (d) 忽略逆变器交流侧的电压谐波分量。

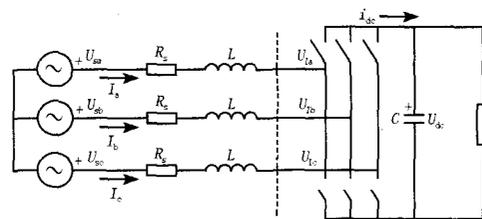


图1 ASVG的三相简化电路

Fig.1 Simplified three-phase circuit of ASVG

设 U_s 为系统(电网)线电压有效值, 系统三相电压为:

$$u_{sabc} = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_s \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

忽略逆变器交流侧的电压谐波, 得逆变器开关函数为:

$$S = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} m \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \delta) \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \delta) \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \delta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: m 为逆变器输出端线电压有效值与直流电压值的比值; δ 为逆变器输出端电压与电网电压的相位差。

逆变器交流侧电压为:

$$u_{iabc} = \begin{bmatrix} u_{ia} \\ u_{ib} \\ u_{ic} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} m u_{dc} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \delta) \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \delta) \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \delta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

上述三相电路的电压回路方程为:

$$L \frac{di_{abc}}{dt} = u_{sabc} - R_s i_{abc} - u_{iabc} \quad (4)$$

另外, 由能量守恒可得:

$$C u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = u_{ia} i_a + u_{ib} i_b + u_{ic} i_c \quad (5)$$

对上述的方程进行dq变换, 其变换矩阵为:

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

逆变换:

$$T^{-1} = T^T \quad (7)$$

对式(4)和式(5)进行dq变换可得出如下的ASVG

数学模型:

$$\begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{u}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega L & -u_d \\ -\omega L & -R_s & -u_q \\ u_d & u_q & -G_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: u_d, u_q 为控制输入, i_d, i_q 为输出, U_t 为ASVG安装点的电压。由状态方程(8)可以看出:模型是非线性的,通过调节 u_d, u_q 可以改变无功电流的大小。

ASVG的PCH数学模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega L & -u_d \\ -\omega L & -R_s & -u_q \\ u_d & u_q & -G_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9-1)$$

或者:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega L & 0 \\ -\omega L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & G_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -u_{dc} & 0 \\ 0 & -u_{dc} \\ i_d & i_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9-2)$$

简写为:

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)]D^{-1}x + g(x)u + e \quad (10)$$

其中:

$$x = \begin{bmatrix} Li_d \\ Li_q \\ Cu_{dc} \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} \quad e = \begin{bmatrix} U_t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$$

$$J(x) = \begin{bmatrix} 0 & \omega L & 0 \\ -\omega L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix}$$

$$R(x) = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & G_c \end{bmatrix} \quad g(x) = \begin{bmatrix} -u_{dc} & 0 \\ 0 & -u_{dc} \\ i_d & i_q \end{bmatrix} \quad (11)$$

取整个系统的Hamiltonian函数为:

$$H(x) = \frac{1}{2}x^T D^{-1}x = \frac{1}{2}L^{-1}i_d^2 + \frac{1}{2}L^{-1}i_q^2 + \frac{1}{2}C^{-1}u_{dc}^2 \quad (12)$$

2 标准的PCH模型

在Ortega等论文^[12]中,对基于Hamiltonian的能量整形IDA-PBC方法基本问题有明确而周密的阐述,为能量整形IDA-PBC方法奠定了理论基础,其核心结论可归结如下。

2.1 端口受控哈密顿(PCH)系统

一般非线性系统形式可描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (13)$$

其中: $x \in R^n$; $u, y \in R^m$, f, g, h 连续可微。

取整个系统的Hamiltonian能量函数为 H , 将哈密顿系统对式(13)进行扩展成为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)u \\ y = h(x) = g^T(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} \end{cases} \quad (14)$$

其中: $R(x)$ 为光滑依赖于 x 的半正定对称矩阵, $R(x) = R^T(x) \geq 0$, 它反映了端口上的附加阻性结构; $J(x)$ 为反对称矩阵, $J(x) = -J^T(x)$, 它反映了系统内部的互联结构; 则称式(14)是结构矩阵为 $J(x)$ 和耗散矩阵为 $R(x)$ 的端口受控耗散哈密顿(PCH)系统。

2.2 PCH系统的控制原理

为将系统(13)渐近地稳定在期望的平衡点 x_* , 构造一个期望的能量函数 $H_d(x) > 0$ 和反馈控制:

$$u = u(x) \quad (15)$$

使闭环系统:

$$\dot{x} = [J_d(x) - R_d(x)] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \quad (16)$$

的期望能量函数 $H_d(x)$ 在 x_* 处取严格极小值, 因此, x_* 是稳定的平衡点的条件是:

$$\frac{\partial H_d(x_*)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial^2 H_d(x_*)}{\partial^2 x} > 0 \quad (17)$$

为保证闭环系统(16)仍为一耗散的PCH系统, 须选择

$$J_d(x) = J(x) + J_a(x) = -J_d^T(x)$$

$$R_d(x) = R(x) + R_a(x) = R_d^T(x) \geq 0 \quad (18)$$

因 $J_d(x)$ 为反对称矩阵, 故有:

$$\left[\frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \right]^T J_d(x) \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

由于 $R_d(x)$ 是正定对称阵, 因此, 沿着系统(16)的轨迹, $H_d(x)$ 对时间的导数为:

$$\frac{dH_d(x)}{dt} = \left[\frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \right]^T \dot{x} = - \left[\frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \right]^T R_d(x) \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} < 0 \quad (20)$$

故闭环系统(16)是渐进稳定的。由式(14)和式(16)得:

$$[J_d(x) - R_d(x)] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)u \quad (21)$$

也可以表示为:

$$[J_d(x) - R_d(x)] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} = [J_a(x) - R_a(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)u \quad (22)$$

因此, 只要合适选择 $H_d(x) > 0$ 并按式(18)有效地配置 $J_d(x)$, $R_d(x)$, 然后按式(22)即可求解偏微分方程组(PDE), 可得反馈控制 $u = u(x)$ 。

从上述可以看出, 求系统控制规律 $u(x)$ 就是解式(22)的 PDE。一般而言, 没有固定的方法可以遵循, 基本上是采用试探法, 对于具体控制问题都需要进行特殊的研究才能找到 PDE 的允许解, 步骤为:

第一步, 根据经验或研究对象的能量函数, 找开环哈密顿函数 $H(x)$ 、 $R(x)$ 和 $J(x)$ 。

第二步, 将式(22)分解成含有 $u(x)$ 和不含有的 $u(x)$ 两类 PDE, 即:

$$[J_d(x) - R_d(x)] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)u \quad (22-1)$$

$$[J_d(x) - R_d(x)] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} \quad (22-2)$$

其中: 式(22-1)的方程个数和式(22-2)的方程个数之和等于式(22)的方程个数。

第三步, 指定期望的哈密顿函数 $H_d(x)$ (可选二次型误差函数), 借助 MATHEMATICA 符号计算软件求解 PDE (22-2), 解出 $R_d(x)$ 和 $J_d(x)$; 或者指定阻尼 $R_d(x)$ 和连接 $J_d(x)$, 借助 MATHEMATICA 符号计算软件求解 PDE (22-2), 解出哈密顿函数 $H_d(x)$, 这就是本文指定阻尼和连接 IDA 方法控制器参数的实质。

第四步, 将求出的 $H_d(x)$ 或 $R_d(x)$ 和 $J_d(x)$ 代入

PDE (22-1), 可解出反馈控制 $u(x)$ 。

3 ASVG 控制器设计

3.1 平衡点 (期望轨迹) 的确定

在平衡点处 x_* , 期望的系统的平衡点为 $x_* = [Li_{d*} \quad Li_{q*} \quad Cu_{dc*}]^T$, 由式(8)可知, 在稳态平衡点处有:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega L & -u_{d*} \\ -\omega L & -R_s & -u_{q*} \\ u_{d*} & u_{q*} & -G_c \end{bmatrix} D^{-1} \begin{bmatrix} x_{1*} \\ x_{2*} \\ x_{3*} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

即平衡点处 x_* 的值:

$$\begin{bmatrix} x_{1*} \\ x_{2*} \\ x_{3*} \end{bmatrix} = -D \begin{bmatrix} -R_s & \omega L & -u_{d*} \\ -\omega L & -R_s & -u_{q*} \\ u_{d*} & u_{q*} & -G_c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

3.2 控制规律的设计

关于 ASVG 控制器设计问题, 主要关心的应该是 ASVG 两侧的直流电压和交流电压, 所以设计目标是通过调节线电流得到较好的交直流电压跟踪特性。

取闭环系统期望的 Hamiltonian 函数为:

$$H_d(x) = H(x_*) + \frac{1}{2}(x - x_*)^T D^{-1}(x - x_*) \quad (25)$$

$$\text{取 } J_a(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R_a(x) = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & g_3 \end{bmatrix} \quad (26)$$

其中: r_1, r_2, g_3 分别为待定阻尼系数。则有:

$$\frac{\partial H_d(x)}{\partial x} = D^{-1}(x - x_*), \quad \frac{\partial H(x)}{\partial x} = D^{-1}x, \quad \frac{\partial H^2(x)}{\partial x^2} =$$

$$D^{-1} \frac{\partial H_a(x)}{\partial x} = \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} - \frac{\partial H(x)}{\partial x} = -D^{-1}x_* \quad (27)$$

由式(21)求得:

$$-[J_d(x) - R_d(x)]D^{-1}x_* = -[J_a(x) - R_a(x)]D^{-1}x + g(u)x + e \quad (28)$$

将式(11)和式(26)代入式(28), 得控制规律和阻尼系数的约束方程:

$$\begin{bmatrix} (R_s + r_1) & -\omega L & 0 \\ \omega L & (R_s + r_2) & 0 \\ 0 & 0 & (G_c + g_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d*} \\ i_{q*} \\ u_{dc*} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & g_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -u_{dc} & 0 \\ 0 & -u_{dc} \\ i_d & i_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + e$$

由式 (29) 的第一和二式求得 ASVG 控制规律:

$$\begin{cases} u_d = \frac{1}{u_{dc}} [U_t + r_1(i_d - i_{d*}) - R_s i_{d*} + \omega L i_{q*}] \\ u_q = \frac{1}{u_{dc}} [r_2(i_q - i_{q*}) - R_s i_{q*} - \omega L i_{d*}] \end{cases} \quad (30)$$

传统上, 期望的电流给定值 i_{d*} 从 ASVG 的稳态解中求出, 然而, 电力系统中寄生电容的存在和参数的不确定性会导致 i_{d*} 的不确定性, 尤其在大的干扰下会引起母线电压的稳态误差。为了获得更强的鲁棒性的跟踪性能, 传统的 PI 控制器被用来调节 d-q 轴的参考电流 i_{d*} 和 i_{q*} , 给予 PCH 的非线性控制器的控制系统的方框图如图 2 所示。

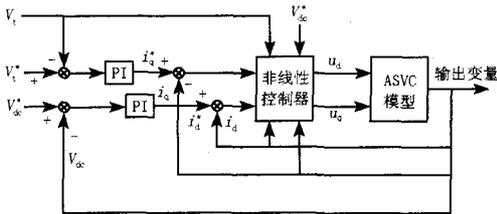


图 2 具有 PI 补偿的 ASVG 控制器的方框图

Fig.2 Block diagram of the ASVG controller with PI compensation

3.3 稳定性分析

具有 ASVG 的闭环系统:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -(R_s + r_1) & \omega L & 0 \\ -\omega L & -(R_s + r_2) & 0 \\ 0 & 0 & -(G_c + g_3) \end{bmatrix} D^{-1}(x - x_*) \quad (31)$$

的期望能量函数 $H_d(x)$ 在 x_* 处取严格极小值, 因为在 x_* 点

$$\frac{\partial H_d(x_*)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial^2 H_d(x_*)}{\partial^2 x} = D^{-1} > 0 \quad (32)$$

选择

$$J_d(x) = -J_d^T(x) \quad R_d(x) = R_d^T(x) \geq 0 \quad (33)$$

闭环系统 (31) 为一耗散的 PCH 系统。因 $J_d(x)$ 为反对称矩阵, 故有:

$$\left[\frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \right]^T J_d(x) \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} = 0 \quad (34)$$

由于 $R_d(x)$ 是正定对称阵, 因此, 沿着系统 (31) 的轨迹, $H_d(x)$ 对时间的导数为:

$$\frac{dH_d(x)}{dt} = \left[\frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \right]^T \dot{x} = - \left[\frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \right]^T R_d(x) \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} < 0 \quad (35)$$

故闭环系统 (31) 是渐进稳定的。

3.4 仿真分析

为了验证所得到的控制规律的正确性和有效性, 将 ASVG 接入如图 3 所示的单机无穷大系统。在图 3 中, 系统的参数设为: $x_d = 0.22, H = 6.7, D = 1.0, x_{L2} = 0.2, x_{L1} = 0.2, x_T = 0.1, R_s = 0.5 \Omega, p_m = 0.9, T_{d0}' = 10 \text{ s}, V_\infty = 1.0, L = 20 \text{ mH}, C = 270 \mu\text{F}, G_c = 0.02/\Omega$, 直流电压 PI 控制器参数: $K_{Pdc} = 0.011, K_{Idc} = 0.291$, 交流电压 PI 控制器参数: $K_{Pac} = 2.05, K_{Iac} = 9.95$ 。研究控制器在电力系统暂态稳定问题中对系统的调节作用。电力系统暂态稳定是指电力系统在运行状态下突然受到大的干扰后, 能够经过暂态过程恢复到原来的状态。本文仿真中, 采用图 3 所示系统线路 2 发生三相短路来模拟。假设在系统线路 2 中间在 0.5 s 发生瞬时短路, 在 0.05 s 后切除, 记录 ASVG 安装点电压变化的动态特性曲线如图 4 所示, 电容器两端直流电压动态特性曲线如图 5 所示。仿真结果说明所设计的 ASVG 控制器在保持安装点电压恒定上发挥了很好的控制作用。

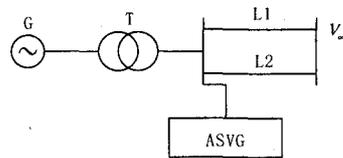


图 3 具有单机无穷大系统

Fig.3 Single machine infinite bus system with ASVG

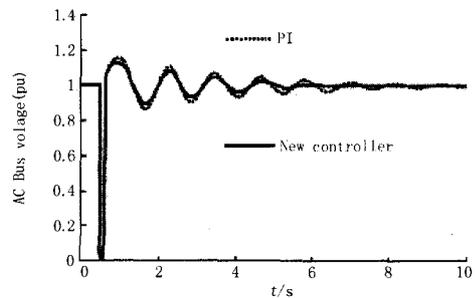


图 4 ASVG 安装点电压仿真曲线

Fig.4 Transient response for the AC bus voltage

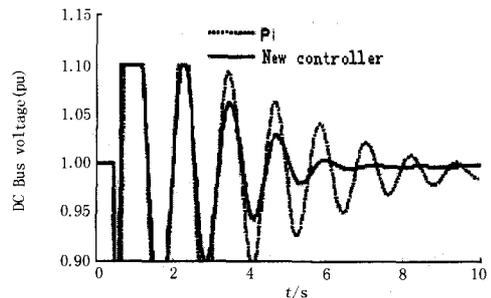


图 5 直流电压仿真曲线

Fig.5 Transient response for the DC-side voltage

对图4和图5曲线的说明:在如上的论述中,为了验证所设计的新控制器的控制效果,做了与传统PI控制器相比较的仿真,这里很容易引起误解的是:从曲线上看控制效果并没有得到明显的改善。实际上,由上面可知,系统参数取 $R_s = 0.5 \Omega$,在对PI控制器做系统仿真时,当系统发生上述的扰动后,系统不稳定。为了在同一坐标系下将PI控制器和新控制器作用下的曲线作比较,对PI控制器作仿真时,人为将系统参数 R_s 取 4.5Ω ,而在做新控制器仿真时,系统参数取 $R_s = 0.5 \Omega$,但在控制规律(30)中指定系统阻尼时, $r_1 = r_2 = 3.5 \Omega$,这样才能把两条曲线画在一起。由此可见,在相同的系统参数下,新控制器的控制效果是显而易见的。由此也看到了本文控制方法指定系统阻尼的本质。

4 结论

本文建议了基于PCH模型的ASVG控制器的设计过程,能够提供ASVG安装点的无功补偿和电压调节。采用了本质上为非线性控制的能量成型和端口受控哈密顿系统理论,建立ASVG的PCH系统模型,该模型给出了结构互联和阻尼的清晰定义。将IDA-PBC的方法应用到ASVG的输出调节器中,它的主要特点是直接采用哈密顿函数作为存储函数,不仅保证了数学上的严密性,且也有明确的物理意义。采用互联和阻尼矩阵配置方法实现了ASVG的解耦控制,系统控制问题最终被归结为一类偏微分方程的求解。尽管偏微分方程直接求解的难度较大,但通过选择期望的闭环哈密顿函数,配置互联和阻尼,可将偏微分方程转换成一组普通的微分方程,使求解变得容易。文中设计了系统的控制器,分析了平衡点的稳定性仿真结果表明,用该方法得到的控制器简单,动态性能好,具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] Ram A. FACTS System Studies[J].IEEE Power Engineering Review, 2002, 22 (12):17-22.
- [2] 张敏, 罗安, 何早红. 包含静止无功发生器的电力系统吸引域[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 25-28. ZHANG Min, LUO An, HE Zao-hong. The Domain of Attraction for Power System with STATCOM[J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(6): 25-28.
- [3] 沈沉, 孙元章. ASVG非线性控制对改善电力系统阻尼特性的研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(5): 29-32. SHEN Chen, SUN Yuan-zhang. Studies on the Effectiveness of Applying Nonlinear Control Strategy of ASVG to Improving Power System's Damping[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(5): 29-32.
- [4] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1982. LU Qiang, WANG Zhong-hong, HAN Ying-duo. Optimal Control of Electric Power System[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [5] Cong L, Wang Y. Co-ordinated Control of Generator Excitation and STATCOM for Rotor Angle Stability and Voltage Regulation Enhancement of Power Systems[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2002, 149(6): 659-666.
- [6] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993. LU Qiang, SUN Yuan-zhang. Nonlinear Control of Electric Power System[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [7] 姜齐荣, 王强, 韩英铎, 等. 新型静止无功发生器(ASVG)装置的建模及控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(7): 21-25. JIANG Qi-rong, WANG Qiang, HAN Ying-duo, et al. Modelling and Control of Advanced Static Var. Generator[J]. Journal of Tsinghua University(Natural Science), 1997, 37(7): 21-25.
- [8] WANG You-yi, Hill David J, GUO Guo-xiao. Robust Decentralized Control for Multi-machine Power Systems[J]. IEEE Trans on Circuit and Systems-I, 1998, 45(3): 271-279.
- [9] 谢小荣, 崔文进, 唐义良, 等. 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): 35-39. XIE Xiao-rong, CUI Wen-jin, TANG Yi-liang, et al. Robust Adaptive Control of STATCOM's Reactive Current[J]. Proceedings of CSEE, 2001, 21(4): 35-39.
- [10] 陈巍, 吴捷. 静止无功发生器递归神经网络逆动力学控制[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 27-31. CHEN Wei, WU Jie. Invert Dynamic Control of ASVG by Using Diagonal Recurrent Neural Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8): 27-31.
- [11] Takegaki M, Arimoto S. A New Feedback Method for Dynamic Control of Manipulators[J]. ASME J Dyn Syst Meas Control, 1981(103): 119-1251.
- [12] Ortega R, Vander Schaft A J, Maschke B M, Escobar G. Interconnection and Damping Assignment Passivity Based Control of Port Controlled Hamiltonian Systems[J]. Automatica, 2002, 38(3): 585-8961.
- [13] Galaz M, Ortega R, Bazanella A. An Energy Shaping Approach to Excitation Control of Synchronous Generators[J]. Automatica, 2003, 39(1): 111-1191.
- [14] Han B M, Karaady G G, Park J K. Interaction Analysis Model for Transmission Static Compensator with EMPT [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1297-1302.

的信息完成整个驱动程序堆栈创建。

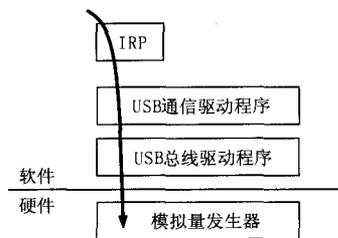


图 5 USB 通信驱动程序层次结构
Fig. 5 Hierarchy of USB device driver

从层次结构可以知道 IRP 被送到设备堆栈的最上层驱动程序，然后逐渐传递到下面的驱动程序。每一层驱动程序都可以根据设备功能以及 IRP 所携带的内容决定如何处理 IRP。

图 6 是 WDM 驱动程序一般构成情况。

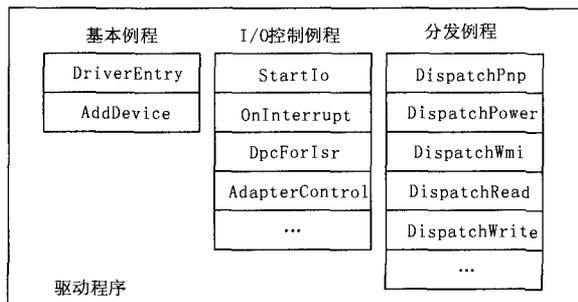


图 6 WDM 驱动程序的一般组成
Fig. 6 Structure of WDM device driver

驱动程序作为程序表现为一组功能函数集合，分为三部分：基本例程、I/O 控制例程和分发例程。基本例程必不可少，而且 DriverEntry 的函数名也不容许变更，这是 Windows 默认的驱动程序入口函数名。I/O 控制例程和分发例程都是可选的。当 Windows 得到读写等操作指令后，它就调用驱动程序中的相应例程来执行各种操作。需要对操作请求排队的驱动程序一般都有一个 StartIo 例程。生成硬

件中断的设备，其驱动程序都有一个中断服务例程 (ISR) 和一个推迟过程调用 (DPC) 例程。驱动程序一般都有几个支持不同类型输入输出请求的分发函数，例如读、写、即插即用等。所以，开发 WDM 驱动程序的一个任务就是为这个驱动程序设计所需要的分发例程。

4 结束语

以上对电力故障仿真装置的硬件设计和 USB 通信驱动程序在 Windows 中的工作机制作了基本分析。高性能的微控制器和其它电子器件为电力故障仿真装置的硬件实现提供了基础，而 USB 是一种新兴的通信方式，具有优越的性价比，传统的串口和并口通信方式最终不可避免地要过渡到 USB 通信方式，因此在开发新产品时应优先选择 USB 通信方式。

参考文献

- [1] Don A. USB 系统体系[M].北京: 中国电力出版社, 2000.
- [2] Chris C. Windows WDM 设备驱动程序开发指南 [M].北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] Baker A, Lozano J. Windows 2000 设备驱动程序设计指南[M].北京: 机械工业出版社, 2001.
- [4] ONEY Walter. Programming Windows Driver Model[M].北京: 北京大学出版社, 2000.
- [5] 许永和. USB 外围设备设计与应用[M].北京: 中国电力出版社, 2002.

收稿日期: 2007-02-05;

修回日期: 2007-05-23

作者简介:

陈新军(1963-), 男, 硕士, 讲师, 从事电力系统及自动化的教学与研究; E-mail: zzdzzjf@sina.com

冯玉东(1971-), 女, 硕士, 讲师, 从事计算机应用软件开发与研究;

靳建峰(1963-), 男, 硕士, 副教授, 从事电力系统及自动化的教学与研究。

(上接第 55 页 continued from page 55)

收稿日期: 2007-03-10;

修回日期: 2007-05-10

作者简介:

梁志珊(1958-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统控制与稳定, 非线性控制, 特殊电源;

E-mail: lzs1960@yahoo.com.cn

谢争先(1973-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统非线性控制, 柔性交流输电系统;

张化光(1959-), 男, 博士, 教授, 研究方向为模糊控制, 自适应控制, 电力系统自动化。