

基于反馈线性化控制的级联 H 桥 SVG 的控制

于雁南^{1,2}, 杨荣峰¹, 武 健¹, 王高林¹, 徐殿国¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 黑龙江科技大学 电气与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

摘要: 级联 H 桥静止无功发生器(SVG)在两相同步旋转 dq 坐标系下的数学模型是多变量、非线性、强耦合的。通过非线性状态反馈变换使 SVG 实现状态反馈线性化, SVG 降阶为线性系统, 从而实现有功和无功分量的解耦。首先判断该系统数学模型是否符合状态空间精确线性化的充要条件, 若满足条件则确定输出函数, 对 SVG 系统电流环进行状态空间精确线性化, 并对系统进行稳定性分析。为了验证控制策略的稳态和动态性能, 搭建 MATLAB 仿真模型和 10 kV 实验样机。仿真和实验样机的实验结果表明: 采用所提算法, SVG 无功补偿精度较高、稳态特性好、动态响应较快。

关键词: 静止无功发生器; 级联 H 桥; 反馈线性化控制; dq 坐标系; 补偿

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.023

0 引言

目前人们对绿色电能、电能质量愈发关注, 但是大量非线性负载和电力电子设备的使用导致电力系统的电能质量不能满足人们日益提高的要求。改善和提高电能质量、净化电能污染的主要手段是应用动态无功补偿装置和有源滤波装置, 级联 H 桥静止无功发生器 SVG(Static Var Generator)是目前应用较为广泛的无功补偿和谐波抑制装置, 相关研究也随之得到广泛的关注和讨论^[1-3]。

目前电网负荷多为大功率、非线性交直流传动设备, 它们不仅在启停时产生巨大的无功冲击, 还会产生网侧电压、电流波形畸变, 产生谐波电流等, 对电网和其他设备的安全稳定运行构成潜在的威胁。因此对电网进行无功功率动态补偿和谐波抑制具有很大的研究价值。级联 H 桥 SVG 因其智能化、动态响应快、效率高等优势而成为目前无功补偿装置研究的热点和重点^[1-6]。

电流环的控制研究是决定 SVG 系统性能的关键, 所以国内外的学者对其控制算法做了大量的研究, 目前在文献和 SVG 产品中应用的控制方法主要有重复控制、解耦控制、无差拍控制、数字 PID 前馈

解耦控制、滞环比较控制、滑模变结构控制等。其中传统的数字 PID 前馈解耦控制因为存在比例积分环节, 所以在满足系统各项性能指标的前提下参数调试比较困难, 无法实现完全解耦; 重复控制动态响应较差, 而且容易产生振荡, 影响系统的稳定性^[7-8]; 滑模变结构控制需要较高的采样频率和理想的滑模切面才能取得较好的控制效果, 即控制前提要求较高^[9]; 滞环比较控制虽然实现原理简单, 但是滤波器设计比较困难。

基于以上分析, 考虑级联 H 桥 SVG 是非线性、强耦合系统, 本文采用反馈线性化控制。在现有的文献中, 文献[10]考虑系统实际的环境条件, 其中参考值框架的选取可以避免潜在的奇异性引起的代数流形中的分支, 提高了系统的可靠性。文献[11]采用了反馈线性化控制, 实现了有功功率和无功功率的解耦控制。文献[12]是对系统进行了部分线性化, 尤其是系统在内部零动态时表现出的适当的瞬态性能。文献[13]采用周期性输出反馈设计, 采用了增益矩阵形式的控制器。文献[14]中的静止同步补偿器采用状态反馈控制无功和有功电流, 2 个电流采用 PI 调节器, 其中比例控制器级联在 d 轴电流环后控制直流电压稳定, 此外, 该静止无功补偿器的控制采用线性矩阵不等式的方法调节电流和电压的平衡。文献[15]采用线性二次型输出反馈控制设计分散的多变量控制器, 涉及了秩约束线性矩阵不等式的问题。

通过分析以上反馈线性化控制方法的优势和问题, 本文推导级联 H 桥 SVG 的数学模型, 通过非线性控制理论, 利用反馈线性化, 并进行状态反馈, 实现系统有功、无功电流的解耦, 将系统降阶为 2 个一阶系统, 控制效果明显, SVG 非线性系统状态反馈在线性化过程中不损失任何高阶非线性项, 其线性化是

收稿日期: 2016-04-28; 修回日期: 2017-01-23

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51237002); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51407043); 台达电力电子科教发展计划项目(DREM2012001); 哈尔滨科技创新人才研究专项基金青年后备人才项目(2016RAQXJ035)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(51237002), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(51407043), the Power Electronics Science and Education Development Program of Delta Environmental & Educational Foundation(DREM2012001) and the Science and Technology Innovation Talent Research Special Fund Youth Talent Project of Harbin(2016RAQXJ035)

整体而精确的,对整个区域变换都适用。

1 系统结构和数学模型

图 1 为级联 H 桥 SVG 主功率电路,图中三相交流电源和 SVG 均采用星形连接,SVG 每一相由 N 个串联在一起的功率单元组成,每个功率单元由 4 个 IGBT 组成的全桥电路结构和 1 个电容并联组成。级联 H 桥主电路拓扑和三相交流电源通过连接电抗器并联在一起。图中, u_{sa},u_{sb} 和 u_{sc} 为三相电网电压; i_{sa},i_{sb} 和 i_{sc} 为网侧电流; i_{la},i_{lb} 和 i_{lc} 为负载电流; i_{ca},i_{cb},i_{cc} 为 SVG 的电流; u_{ca},u_{cb} 和 u_{cc} 为 SVG 电压; R,L 分别为连接电抗器的等效电阻、电感。

根据图 1 所示的电路结构列写 SVG 的数学模型,得到:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{sa}-u_{ca} \\ u_{sb}-u_{cb} \\ u_{sc}-u_{cc} \end{bmatrix} \tag{1}$$

对式(1)进行 dq 变换,得到在 dq 坐标系下的数学模型如下:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{sd}-u_{cd} \\ u_{sq}-u_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega i_q \\ -\omega i_d \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中, i_d,i_q 为 dq 坐标系下 SVG 输出的瞬时补偿电流; u_{sd},u_{sq} 分别为 dq 坐标系下网侧电源电压的有功、无功分量; u_{cd},u_{cq} 分别为 dq 坐标系下 SVG 输出电压的有功、无功分量; ω 为角频率。

2 状态空间反馈线性化控制

2.1 状态空间精确线性化的基本充要条件

由式(2)可知有功电流和无功电流互相耦合,这

给控制器的设计带来困难。考虑通过状态空间精确线性化实现解耦,系统非线性模型如下^[16-17]:

$$\begin{cases} \dot{x}=f(x)+\sum_{i=1}^2 g_i(x)u_i & f,g:D\subset R^n\rightarrow R^n \\ y_i=h_i(x) & i=1,2;h:D\subset R^n\rightarrow R \end{cases} \tag{3}$$

$$x=\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, u=\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix}$$

$$Y=\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, f(x)=\begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix}$$

其中, D 为 R^n 的一个开子集, D 内的每一点都可以找到一个完全属于 D 的邻域。则此 SVG 系统模型为 2 输入 2 输出非线性系统,可得:

$$\begin{aligned} f(x) &= \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1+\omega x_2+\frac{u_{sd}}{L} \\ -\omega x_1-\frac{R}{L}x_2+\frac{u_{sq}}{L} \end{bmatrix} \\ g_1(x) &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}, g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{4}$$

根据非线性控制的基本理论,计算向量相对阶数,可设在 $x=x^\circ$ 处有:

$$A(x^\circ)=\begin{bmatrix} L_{g_1}h_1(x^\circ) & L_{g_2}h_1(x^\circ) \\ L_{g_1}h_2(x^\circ) & L_{g_2}h_2(x^\circ) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \tag{5}$$

矩阵中有李导数:

$$L_{g_j}h_i(x^\circ)=\frac{\partial h_i(x)}{\partial x^T}g_j(x) \quad i,j=1,2$$

其中, $x^\circ \in U,U$ 为流形 $N=R^n$ 上一开集,根据坐标变

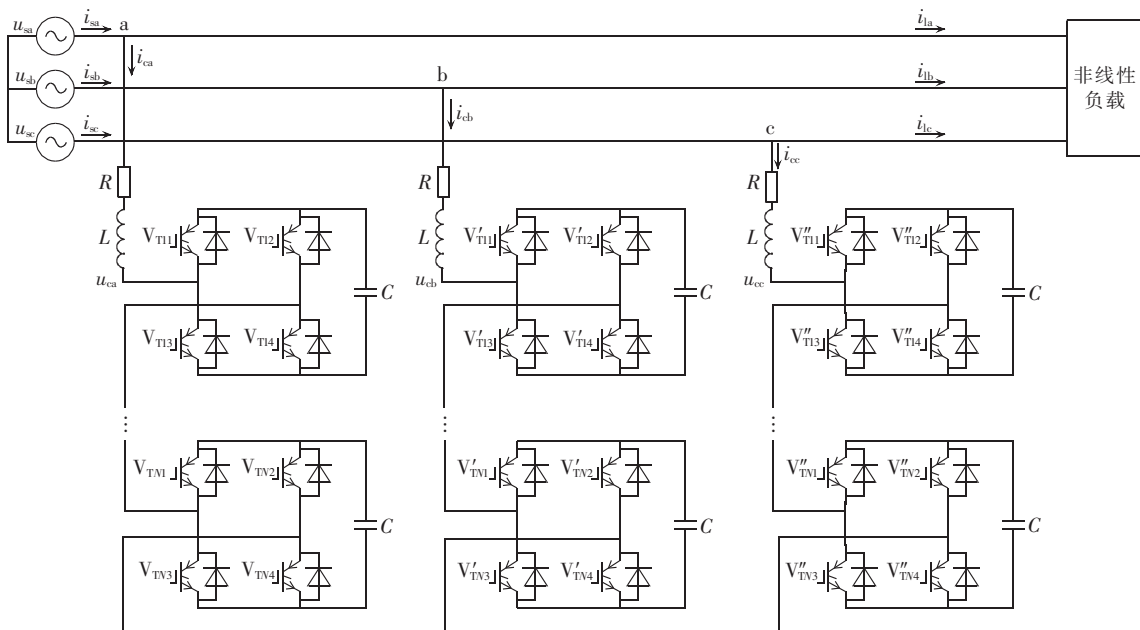


图 1 级联 H 桥 SVG 主电路结构图

Fig.1 Main circuit of cascaded H-bridge SVG

换函数集推论 $r_1 + r_2 \leq n = 2, r_1 = r_2 = 1$, 满足状态空间精确线性化的基本充要条件, 所以给定输出函数可以进行反馈线性化。

2.2 输出函数的确定及状态空间精确线性化

根据局部坐标变换函数集的引理, 选择定义在 $\mathbf{x}^\circ$ 邻域的坐标变换函数集, 设有如下关系式^[18]:

$$\dot{\varepsilon}_1^1(\mathbf{x}) = \phi_1^1(\mathbf{x}) = L_f^0 h_1(\mathbf{x}) = h_1(\mathbf{x}) \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}_1^2(\mathbf{x}) = \phi_1^2(\mathbf{x}) = L_f^0 h_2(\mathbf{x}) = h_2(\mathbf{x}) \quad (7)$$

系统方程变换成如下 2 组方程:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1^1 = \varepsilon_1^1 \\ \dot{\varepsilon}_1^1 = b_1(\varepsilon) + \sum_{j=1}^2 a_{1j}(\varepsilon) u_j \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1^2 = \varepsilon_1^2 \\ \dot{\varepsilon}_1^2 = b_2(\varepsilon) + \sum_{j=1}^2 a_{2j}(\varepsilon) u_j \end{cases} \quad (9)$$

式(8)、(9)中有如下关系式:

$$b_i(\varepsilon) = L_f^1 h_i(\Phi^{-1}(\varepsilon)) \quad (10)$$

$$a_{ij}(\varepsilon) = L_{g_j} L_f^0 h_i(\Phi^{-1}(\varepsilon)) \quad (11)$$

其中, $\Phi^{-1}(\varepsilon) = \mathbf{x}$ 。

把式(8)、(9)写成矩阵形式, 可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_1^1 \\ \dot{\varepsilon}_1^2 \end{bmatrix} = \mathbf{b}(\varepsilon) + \mathbf{A}(\varepsilon) \mathbf{u} = \begin{bmatrix} b_1(\varepsilon) \\ b_2(\varepsilon) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11}(\varepsilon) & a_{12}(\varepsilon) \\ a_{21}(\varepsilon) & a_{22}(\varepsilon) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

因为矩阵 $\mathbf{A}(\varepsilon)$ 在 $\varepsilon^\circ = \Phi^{-1}(\mathbf{x}^\circ)$ 的一个邻域非奇异, 令 $\mathbf{b}(\varepsilon) + \mathbf{A}(\varepsilon) \mathbf{u} = \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$, 可解得精确线性化应加的反馈为:

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}^{-1}(\varepsilon) [-\mathbf{b}(\varepsilon) + \mathbf{v}] \quad (12)$$

最后, 系统解耦降阶为状态变量互相独立的一阶线性系统, 得到 Brunovsky 标准型系统为:

$$\dot{\varepsilon}_1^1 = v_1, \dot{\varepsilon}_1^2 = v_2, \dot{\varepsilon}_1^1 = \varepsilon_1^1, \dot{\varepsilon}_1^2 = \varepsilon_1^2 \quad (13)$$

经过反馈线性化控制在变换区域内全状态精确线性化, 系统状态信息没有丢失, 系统完全解耦, 有利于系统电压、电流的有功和无功的各自调节, 互不耦合影响, 简化了 SVG 控制器的设计步骤, 降低了控制器的设计难度。由式(12)可以得到系统实际的控制量^[19]。

3 稳定性分析

选择整定对称矩阵 $\mathbf{Q}$ 为单位矩阵, $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,

解得李雅普诺夫方程的解为 $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.002 & 0 \\ 0 & 0.002 \end{bmatrix}$, $\mathbf{P}$ 为正定阵。

根据 $\mathbf{V}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}$, 系统的李雅普诺夫函数为:

$$\mathbf{V}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x} =$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.002 & 0 \\ 0 & 0.002 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0.002x_1^2 + 0.002x_2^2$$

在状态空间内, $\mathbf{V}(\mathbf{x})$ 是正定的, 而且:

$$\dot{\mathbf{V}}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{x} = \mathbf{x}^T (-\mathbf{I}) \mathbf{x} =$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = -x_1^2 - x_2^2$$

在状态空间内, $\dot{\mathbf{V}}(\mathbf{x})$ 是负定的。当 $\|\mathbf{x}\| \rightarrow \infty$ 时, 有 $\mathbf{V}(\mathbf{x}, t) \rightarrow \infty$, 因此系统 SVG 原点处的平衡状态是大范围内渐近稳定的^[20]。

4 仿真结果及分析

为了验证本文提出的反馈线性化解耦控制的可实现性和优良性能, 在 MATLAB 仿真软件环境中搭建仿真模型进行研究, 并将该控制方法与比例谐振 PR (Proportional Resonant) 控制方法的仿真结果进行比较和分析。

具体的仿真参数如下: 网侧电压为 10 kV, 励磁电感为 500 p.u., 三相变压器磁阻为 500 p.u.。电网频率为 50 Hz, SVG 每相由 12 个 H 桥单元级联, 开关器件为 IGBT, 每个功率单元直流侧电容电压初始值为 800 V, 网侧与 SVG 串联接电抗器为 10 mH。

仿真实验分为不同控制方法稳态实验和负载突变动态实验。负载为有功负载、感性无功负载、容性无功负载。

4.1 系统稳定情况

三相有功负载为 $P = 200$ kW; 三相感性无功负载为 $Q_L = 200$ kvar。

任取其中一相, 以 a 相为例进行分析。仿真结果中 u_{sa} 、 i_{sa} 均为标么值。

图 2 为未加反馈线性化开环控制时网侧 a 相电压和电流波形。可见, 网侧电压和电流相位存在较大的相位差, 相差 45° 。因为是阻感负载, 所以电流相位滞后于电压。

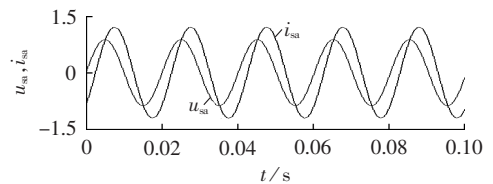


图 2 补偿前网侧电压及电流

Fig.2 Grid-side voltage and current before compensation

图 3 为采用 PR 控制方法进行电流环控制的网侧 a 相电压和电流波形。与未补偿控制对比看出, 补偿后电压和电流基本上没有相位差, 网侧电流补偿效果较好, 正弦度基本满足要求, 只是电流波形纹波

较大,对波形进行快速傅里叶变换 FFT(Fast Fourier Transformation)分析,总谐波失真 THD(Total Harmonic Distortion)参数为 2.17%,如图 4 所示。

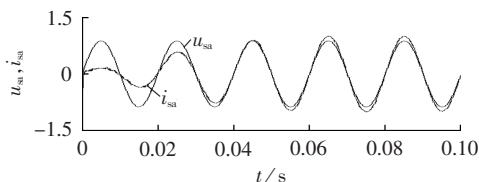


图 3 PR 控制下的网侧电压及电流

Fig.3 Voltage and current of grid-side with PR control

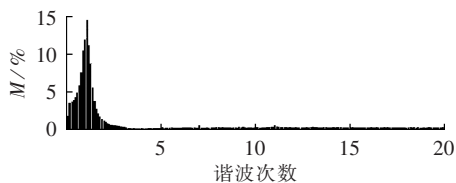


图 4 PR 控制下的快速傅里叶变换分析

Fig.4 FFT analysis for PR control

图 5 为本文所提反馈线性化控制算法网侧电压、电流波形图,从图中可以看到电压和电流波形无相位差,尤其是网侧电流波形正弦度比 PR 控制要更好,电流跟踪精度与 PR 控制相比更高。其 THD 相比 PR 控制很低,仅为 1.75%,如图 6 所示。

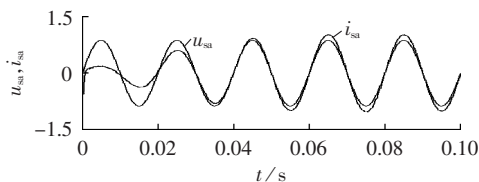


图 5 反馈线性化控制下的网侧电压及电流

Fig.5 Voltage and current of grid-side with feedback linearization control

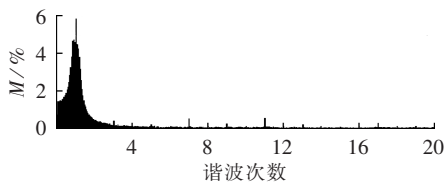


图 6 反馈线性化控制下的快速傅里叶变换分析

Fig.6 FFT analysis for feedback linearization control

4.2 负载突变情况

整个仿真过程为 0.2 s,在 0.1 s 时刻,系统负载变化。图 7、8 分别为未加补偿和反馈线性化控制下系统突加负载时 a 相电压、电流波形。0.1 s 之前,负载情况为 100 kW 有功负载和 100 kvar 感性无功负载;0.1 s 之后,负载情况突变为 200 kW 有功负载和 200 kvar 感性无功负载,即有功负载和无功负载同时增加。

对比图 7、8 可以看出,补偿前网侧电压、电流不仅存在较大的相位差,而且在突变时刻的下一个

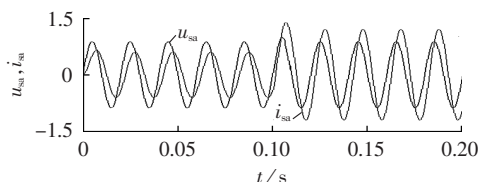


图 7 补偿前加载时网侧电压及电流

Fig.7 Grid-side voltage and current during load augment before compensation

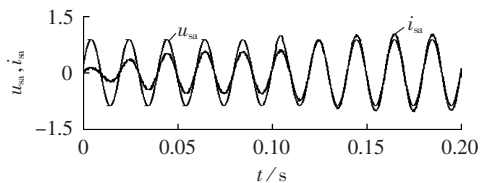


图 8 反馈线性化控制下加载时网侧电压及电流

Fig.8 Voltage and current of grid-side with feedback linearization control during load augment

周期,网侧电压和电流的波峰值较大,其中电流超过了下一稳态幅值的 10%,给负载带来较大冲击,系统谐波抑制情况较差,网侧电压波形在归零点附近有少许振荡。加入补偿后,网侧电压波形在突变瞬间之后的下一个波峰电压值稍有变大,电压和电流波形没有发生相位和波形的畸变,在 0.1 s 后,网侧电压下一周期波形幅值增长了 4.5%,通过一个周期的过渡过程调整,网侧电流迅速进入另一个新的稳态,采用反馈线性化控制下的系统动态性能表现良好。

图 9 为系统突减负载时的 a 相电压、电流波形。0.1 s 之前,负载情况为 300 kW 有功负载和 300 kvar 感性无功负载;0.1 s 之后,负载情况突变为 200 kW 有功负载和 200 kvar 感性无功负载。从图 9 可以分析出系统突减负载时,网侧单相电流在突变后经过一个半周期调整后进入下一稳态,电流波形和相位没有畸变,只是在 0.1 s 突变后的下一个周期,电压波形在归零点稍有波动,整体看系统突减负载时的动态性能表现较好。

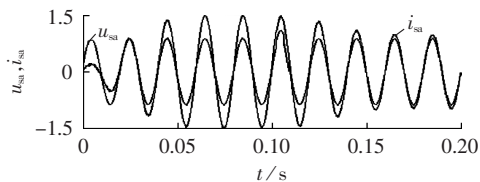


图 9 反馈线性化控制下减载时网侧电压及电流

Fig.9 Voltage and current of grid-side with feedback linearization control during load reduction

图 10、11 分别为补偿前后系统负载性质突变时的网侧 a 相电压、电流波形。0.1 s 之前,负载情况为 500 kW 有功负载和 500 kvar 容性无功负载;0.1 s 之后,负载情况突变为 500 kW 有功负载和 500 kvar 感性无功负载。从图 10 可以分析出系统负载性质突变前,因为是阻容性负载,所以电压相位超前于电流

相位,突变瞬间,电流幅值突增,超过幅值的 36.7%,波形畸变较大,电流相位超前于电压相位,谐波较大。由图 11 可见,网侧单相电流在突变后经过一个半周期调整后进入下一稳态,电流波形和相位没有畸变,系统突减负载时的动态性能表现较好。

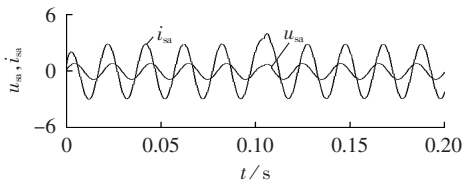


图 10 补偿前负载性质突变时网侧电压及电流
Fig.10 Grid-side voltage and current during load type change before compensation

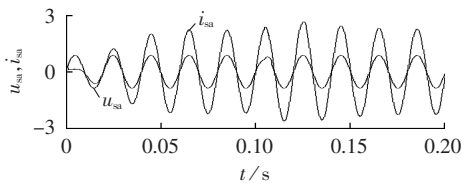


图 11 反馈线性化控制负载性质突变时网侧电压及电流
Fig.11 Voltage and current of grid-side with feedback linearization control during load type change

5 实验结果

本文采用数字信号处理 DSP(Digital Signal Processing)、现场可编程门阵列 FPGA(Field Programmable Gate Array)的双核控制,研制了一套试验样机进行实验验证。其中,SVG 系统的三相采用星形连接,每相由 12 个功率单元组成;IGBT 选择英飞凌的型号为 FF300R17KE3 的开关管,其额定电压为 1700 V。基本的实验参数如下:网侧电压 $u_s=10\text{ kV}$,开关频率 $f=1.2\text{ kHz}$,每相 H 桥单元数 $N=12$,电感 $L=10\text{ mH}$,直流侧电容 $C=5600\text{ }\mu\text{F}$,直流侧电压参考值 $U_{dc}=800\text{ V}$ 。

控制系统的框图如图 12 所示,通过电流互感器等检测到的 SVG 三相电流、电网电压、电网三相电流信号经信号调理电路、AD 转换器转换成数字信号后送入复杂可编程逻辑器件 CPLD(Complex Programmable Logic Device),之后送入 DSP 进行处理,并根据反馈线性化控制算法进行读取和处理,在 DSP 内部计算得到电压调制信号后送入 FPGA。采用载波移相空间矢量调制后,生成调制驱动信号,数

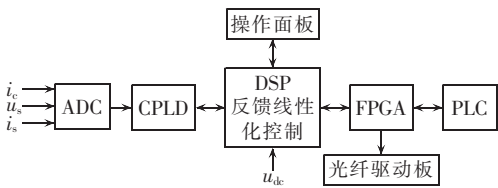


图 12 控制系统结构框图
Fig.12 Block diagram of control system

据从 FPGA 传送入光纤驱动电路,从而驱动 IGBT。操作面板通过 CAN 总线与 DSP 相连。

为了验证本文所设计的 SVG 反馈线性化控制算法在大容量负载下的补偿性能和快速性,搭建了 2 台 SVG 系统组成对拖实验平台,其中一台发出无功电流,另外一台进行无功电流补偿。测得的稳态实验波形如图 13 所示。其中, i_q 为 SVG 发出的无功电流; i_c 为补偿电流; i_h 为无功电流和补偿电流的差值,即网侧剩余电流。从图 13 中可以看出,采用本文所提反馈线性化控制策略,补偿器输出的电流较好地补偿了系统发出的无功电流,使得网侧的剩余电流很小, i_h 的方均根值为 1.57 A。其中 i_c 的方均根值为 24.63 A, i_q 为 24.84 A,系统补偿精度高,SVG 的跟踪性能较好。

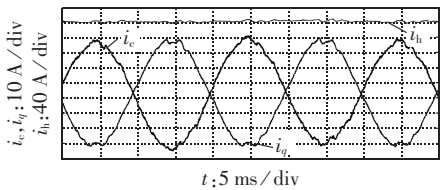


图 13 稳态电流波形
Fig.13 Waveforms of steady-state currents

图 14 为无功电流增加时,补偿电流动态跟踪无功电流的情况。突变前 SVG 发出补偿电流值为 12.29 A,无功电流值为 12.45 A,剩余电流为 1.59 A。系统负载增加时,补偿电流可以快速跟踪并迅速达到下一稳态,网侧剩余电流有非常小的突变,和之前的仿真波形的动态跟踪特性总体表现一致,证明了所提反馈线性化算法的可行性和优越动态性能。

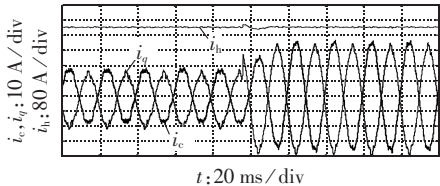


图 14 加载时电流波形
Fig.14 Waveforms of currents during load augment

图 15 为负载减小时,补偿电流动态跟踪无功电流的情况。无功电流突变前 SVG 发出的无功电流值为 24.64 A,补偿电流为 24.81 A,网侧剩余电流为 1.55 A。系统负载减小瞬间,补偿电流快速跟踪并迅速达到下一稳态,网侧剩余电流的突变时间短,变化

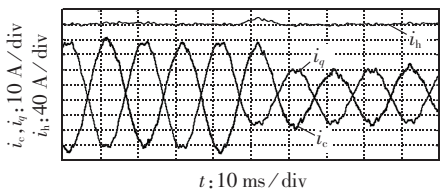


图 15 减载时电流波形
Fig.15 Waveforms of currents during load deduction

小。其动态性能表现良好,并没有出现动态变化的电流超调和波形的畸变。

图 16、17 分别为负载连续阶段增加和减小时,补偿电流动态跟踪无功电流的情况。2 个阶梯电流指令值分别为 12 A 和 24 A。从图中可以看到,无功电流和补偿电流 2 个波形完全重合在一起,补偿精度较高。网侧剩余电流只在突变时刻有微小的突变,采用反馈线性化控制的 SVG 系统在负载阶段性变化时,动态性能较优。

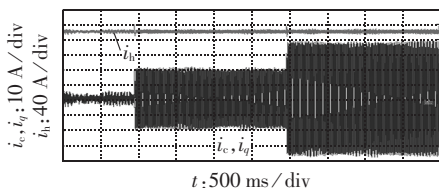


图 16 负载连续增加时电流波形

Fig.16 Waveforms of currents during successive load augment

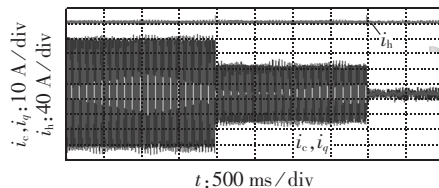


图 17 负载连续减小时电流波形

Fig.17 Waveforms of currents during successive load reduction

6 结论

本文将反馈线性化控制策略应用在中高压级联 SVG 系统中,实现系统电流有功、无功分量的解耦,加速了控制响应,无功电流跟踪比常规的 PR 调节器控制的 SVG 速度较快,电流突变时波动小。同时电容器容量、设备的成本和体积也减小了。该算法在线性化过程中不损失高阶非线性项,线性化过程对整个区域变换都适用。对于控制中解耦矩阵的奇异点问题,实际工程中可以通过给导致奇异点的量预置数来解决。仿真和实验验证结果证明了所提控制策略的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] TOWNSEND C D, SUMMERS T J, BETZ R E. Multigoal heuristic model predictive control technique applied to a cascaded H-bridge statcom[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1191-1200.
- [2] 王轩, 林嘉扬, 滕乐天, 等. $d-q-0$ 坐标系下链式 STATCOM 电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 48-54.
- WANG Xuan, LIN Jiayang, TENG Letian, et al. Current control strategy of chain circuit STATCOM in $d-q-0$ coordinates[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 48-54.
- [3] 王宝安, 商姣, 陈豪. SVG 用于单相负荷电能质量综合治理时相

电流指令的计算[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 57-64.

- WANG Baoan, SHANG Jiao, CHEN Hao. Phase-current reference calculation for SVG used in comprehensive management of single-phase load power quality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 57-64.
- [4] 丁明, 陈中, 张国荣, 等. 级联 H 桥储能变换器直流纹波电流的无源与有源抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 19-24, 61.
- DING Ming, CHEN Zhong, ZHANG Guorong, et al. Passive and active schemes of DC ripple suppression for cascaded H-bridge converter of energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 19-24, 61.
- [5] KHODABAKHSHIAN A, MORSHED M J, PARASTEGARI M. Coordinated design of STATCOM and excitation system controllers for multi-machine power systems using zero dynamics method[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2013, 49(1): 269-279.
- [6] 刘锦宁, 刘洋, 何伟斌. ± 200 Mvar 静止同步补偿器的电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 29-35.
- LIU Jinning, LIU Yang, HE Weibin. Grid voltage control of ± 200 Mvar STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 29-35.
- [7] 何英杰, 刘进军, 王兆安, 等. 基于重复预测原理的三电平 APF 无差拍控制方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 114-120.
- HE Yingjie, LIU Jinjun, WANG Zhaoan, et al. A deadbeat control algorithm based on repetitive predictive predictor theory for three-level active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 114-120.
- [8] HORNIK T, ZHONG Q C. A current-control strategy for voltage-source inverters in microgrids based on and repetitive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 943-952.
- [9] 徐榕, 于泳, 于雁南, 等. 基于离散状态观测器的 H 桥级联 STATCOM 无差拍控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 58-65.
- XU Rong, YU Yong, YU Yannan, et al. Dead-beat control of H-bridge cascaded STATCOM based on discrete-time state observer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 58-65.
- [10] WANG Keyou, CROW M L. Power system voltage regulation via STATCOM internal nonlinear control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1252-1262.
- [11] 张振华, 江道灼. 基于模块化多电平变流器的 STATCOM 研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 62-66.
- ZHANG Zhenhua, JIANG Daozhuo. STATCOM based on modularized multilevel converters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 62-66.
- [12] ZHANG J L. STATCOM based on cascade multilevel inverter[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 55-57: 1365-1369.
- [13] PANT V, DAS B, BHARGAVA A. Periodic output feedback technique based design of STATCOM damping controller[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, 43(1): 344-350.
- [14] BENSMAINE F, BACHELIER O, TNANI S, et al. LMI approach of state-feedback controller design for a STATCOM-supercapacitors energy storage system associated with a wind generation[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 96: 463-472.
- [15] HOSSAIN M J, POTA H R, RAMOS R A. Improved low-voltage-ride-through capability of fixed-speed wind turbines using decen-

tralised control of STATCOM with energy storage system[J]. IET Generation,Transmission and Distribution,2012,6(8):719-730.

[16] 江道灼,张振华. 单相 H 桥级联静止同步补偿器反馈线性化解耦控制[J]. 电网技术,2011,35(11):74-79.

JIANG Daozhuo,ZHANG Zhenhua. Control scheme of decoupled state feedback linearization of single-phase H-bridge cascaded STATCOM[J]. Power System Technology,2011,35(11):74-79.

[17] 江道灼,张振华. 三相 H 桥级联静止同步补偿器的控制策略[J]. 高电压技术,2011,37(8):2024-2031.

JIANG Daozhuo,ZHANG Zhenhua. Control scheme of three-phase H-bridge cascaded STATCOM[J]. High Voltage Engineering,2011,37(8):2024-2031.

[18] 查晓明,张茂松,孙建军. 链式 D-STATCOM 建模及其状态反馈精确线性化解耦控制[J]. 中国电机工程学报,2010,30(28):107-113.

ZHA Xiaoming,ZHANG Maosong,SUN Jianjun. Modeling of cascade D-STATCOM with decoupled state variable feedback linearization control[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(28):107-113.

[22] 李殿璞. 非线性控制系统理论基础[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2014:310-340.

[23] 郑大钟. 线性系统理论[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2002:

213-250.

作者简介:



于雁南

于雁南(1979—),女,吉林舒兰人,讲师,博士研究生,主要研究方向为无功补偿与谐波抑制、多电平变换技术、开关电源(E-mail:yyn@hit.edu.cn);

杨荣峰(1979—),男,四川资中人,讲师,博士,主要研究方向为大功率能量变换与交流电机变频驱动技术(E-mail:yrf@hit.edu.cn);

武 健(1979—),男,黑龙江肇东人,讲师,博士,主要研究方向为电能质量、多电平变换技术(E-mail:wujianhit@163.com);

王高林(1978—),男,福建厦门人,教授,博士,主要研究方向为交流电机控制理论与应用技术(E-mail:wgl818@hit.edu.cn);

徐殿国(1960—),男,黑龙江大庆人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力电子与电力传动技术、照明电子技术、电机及控制技术、高压直流输电技术等(E-mail:xudiang@hit.edu.cn)。

Cascaded H-bridge SVG control based on feedback linearization control

YU Yannan^{1,2},YANG Rongfeng¹,WU Jian¹,WANG Gaolin¹,XU Dianguo¹

(1. Department of Electrical Engineering,Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China;

2. College of Electrical and Control Engineering,Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022,China)

Abstract: Because the mathematical model of cascaded H-bridge SVG(Static Var Generator) in the synchronous rotating dq coordinates system is multivariable,nonlinear and strongly-coupled,the nonlinear state feedback transformation is applied to linearize the state feedback of SVG for making it a linear system to decouple its active and reactive components. The mathematic model of SVG system is first checked if the necessary and sufficient conditions for its precise linearization in the state space are satisfied. If they are satisfied,the output function is then determined to precisely linearize the current-loop of SVG in the state space and analyze the system stability. A MATLAB simulation model and a 10 kV experimental prototype are built to verify the steady-state and dynamic performances of control strategy. Results show that, with the proposed control algorithm,the reactive power compensation of SVG has higher precision,better steady-state performance and quicker dynamic response.

Key words: static var generator; cascaded H-bridge; feedback linearization control; dq coordinates system; compensation