

基于无源性理论的 H 桥级联 STATCOM 非线性控制策略

徐 榕, 于 泳, 杨荣峰, 徐殿国

(哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 采用传统的线性控制方法控制高压大功率条件下的静止同步补偿器(STATCOM)时, 动态稳定性较差。因此, 通过对 STATCOM 系统的数学模型与工作原理的分析, 建立 EL(Euler-Lagrange)系统模型, 提出基于无源性理论的非线性控制策略, 该策略可以保证系统的 Lyapunov 函数的稳定性。通过控制 d 轴有功电流维持功率单元直流侧电容电压稳定, 减少系统期望平衡点数量。为了提高系统的收敛速度, 对系统注入阻尼, 加速系统能量耗散, 并对注入阻尼的量进行了分析; 构造离散状态观测器对系统参考指令电流进行预测, 以消除参考指令电流滞后 1 个采样周期造成的影响。仿真与实验结果表明, 所提控制策略具有良好的动态性能和较强的鲁棒性, 有效地降低了 STATCOM 输出电流的谐波。

关键词: H 桥级联; 静止同步补偿器; 无功补偿; 无源性理论; 非线性控制系统; 电流预测; 离散状态观测器; 稳定性

中图分类号: TM 71

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.01.008

0 引言

静止同步补偿器(STATCOM)是柔性交流输电系统(FACTS)的重要组成部分, 是目前 FACTS 中性能最好的无功补偿装置, 在提高输电系统传输容量和提高电力系统稳定性等方面发挥着重要作用^[1-3]。在几种比较成熟的拓扑结构中, H 桥级联 STATCOM 利用多电平变换技术, 将开关器件电压应力降低, 通过级联, 使整个装置可以输出高电压, 并具有损耗低、响应快、储能元件体积小和输出电流谐波含量低等优点, 成为动态无功补偿装置发展的重要方向, 在中高压大容量的应用场合得到了迅速的发展^[4-7]。

由于 STATCOM 的控制方法是影响其补偿性能和效果的重要因素, 国内外学者对 STATCOM 的控制方法与策略进行了多方面研究。文献[8]采用传统 PI 控制器实现对 STATCOM 的控制, 这是目前应用最广泛的控制方法, 但其控制性能不太理想, 特别是在负载突变的过程中; 文献[9]采用滞环电流控制, 易实现, 有较强的鲁棒性和快速的动态响应能力, 但开关频率不固定, 滤波器设计困难; 文献[10]采用 PI 控制器对有功功率和无功功率进行解耦控制时, 由于存在 PI 环节, 其参数整定困难, 不适合大范围应用; 文献[11]采用比例谐振控制, 其只能对某个特定谐波进行无差控制, 难以广泛使用; 文献[12]使用重复控制, 理论上可实现对谐波信号的无差控制, 但由于重复控制存在延时, 系统动态响应变差。

上述控制策略都是基于线性控制, 将 H 桥级联 STATCOM 的数学模型等效为线性模型。但实际上, 由于其级联形式的结构本身就是一个非线性、多变量、强耦合型系统, 所以采用传统的线性控制方法无法得到很好的动态解耦, 难以实现精确的控制。为了克服这一限制, 文献[13]采用了非线性鲁棒控制, 控制性能较好, 但其权系数选择较困难, 且理论较复杂; 文献[14-15]也采用了相应的非线性控制器对 STATCOM 进行控制, 但这些控制器都不能保证系统的 Lyapunov 函数的稳定性; 文献[16]采用的非线性控制方法保证了系统的 Lyapunov 函数的稳定性, 但并未通过具体的实验对控制方法进行有效验证。

针对上述问题, 本文通过对 STATCOM 系统数学模型与工作原理的分析, 建立 EL(Euler-Lagrange)系统模型, 提出新的基于无源性理论的非线性控制策略, 并从理论上保证了系统的 Lyapunov 函数的稳定性。同时为了提高控制算法的实时性和系统的动态性能, 消除参考指定电流滞后一拍的影响和抑制 STATCOM 输出电流的谐波, 构造离散状态观测器对系统参考指令电流进行预测。仿真与实验结果表明了本文提出的控制方法的正确性和有效性。

1 STATCOM 的数学模型与 EL 系统模型

1.1 STATCOM 的数学模型

H 桥级联 STATCOM 的主电路拓扑结构见图 1。STATCOM 采用星形接法, 通过连接电抗器并联于电网与负载间, STATCOM 通过注入与负载类型相反的无功电流, 补偿负载的无功, 提高电网输电质量, 使电网只提供有功电流。每相桥臂由 N 个 H 桥逆变单元级联而成。设功率开关器件工作于理想状态。 u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 为网侧三相电压; u_a 、 u_b 和 u_c 为 STATCOM

收稿日期: 2013-12-11; 修回日期: 2014-11-24

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51237002); 台达电力电子科教发展计划重大项目(DREM2012001)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51237002) and Power Electronics Science and Education Development Program of Delta Environmental & Educational Foundation(DREM2012001)

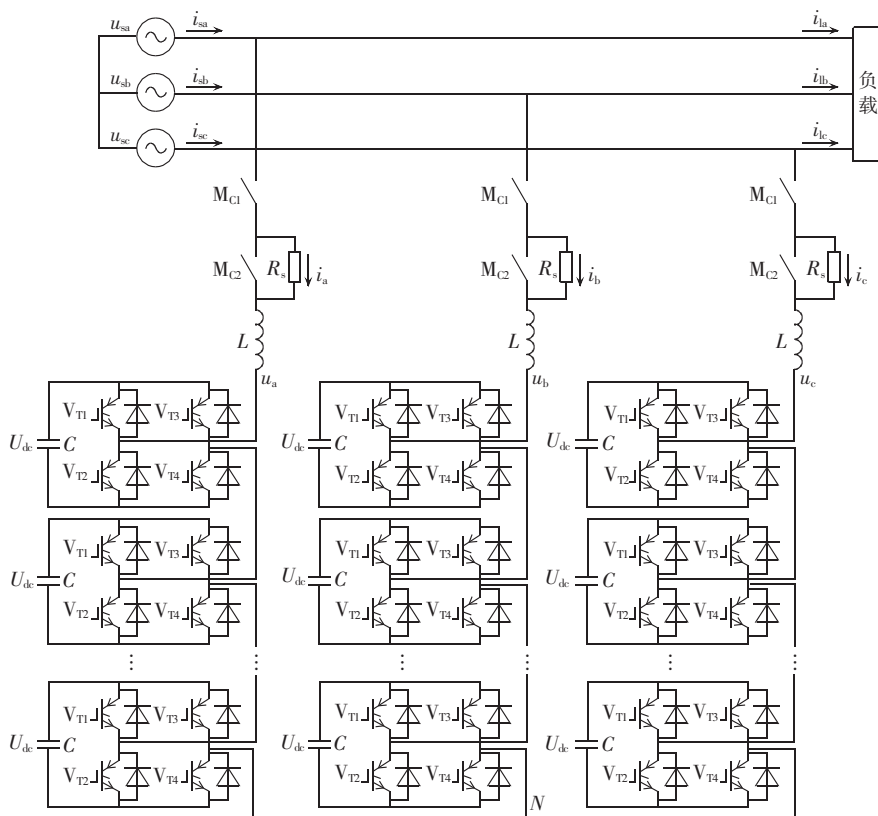


图 1 H 桥级联 STATCOM 的主电路拓扑

Fig.1 Topology of main circuit of STATCOM with cascaded H-bridges

输出三相电压; i_{sa} 、 i_{sb} 和 i_{sc} 为网侧三相电流; i_a 、 i_b 和 i_c 为 STATCOM 输出的三相补偿电流; i_{la} 、 i_{lb} 和 i_{lc} 为负载三相电流; U_{dc} 为直流侧电容电压参考值; C 为直流侧电容; L 为连接电抗器; R_s 为充电电阻。

对图 1 所示的电路应用基尔霍夫电压、电流定律及能量关系,可得 STATCOM 数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = u_{sa} - u_a - Ri_a \\ L \frac{di_b}{dt} = u_{sb} - u_b - Ri_b \\ L \frac{di_c}{dt} = u_{sc} - u_c - Ri_c \end{cases} \quad (1)$$

其中, R 为系统的等效损耗电阻。

对式(1)进行 abc/dq 同步旋转坐标变换,可得在同步旋转坐标系下 STATCOM 的数学方程为:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega Li_q + u_{sd} - u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = -\omega Li_d - Ri_q + u_{sq} - u_q \end{cases} \quad (2)$$

其中, i_d 、 i_q 为 dq 坐标系下的 STATCOM 输出补偿电流; u_{sd} 、 u_{sq} 为 dq 坐标系下的网侧电压; u_d 、 u_q 为 dq 坐标系下的 STATCOM 输出电压。

1.2 STATCOM 的 EL 系统模型

EL 系统模型是非线性无源控制理论的重要组成部分^[17]。EL 系统方程为:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F_L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial F_L}{\partial q} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}} = F \quad (3)$$

其中, q 为广义位形坐标; F_L 为拉格朗日函数,且有 $F_L = K - V$, K 为动能函数, V 为势能函数; F 为外界作用于系统的广义力向量; D 为瑞利耗散函数。

EL 模型是有效的建模技术,通过设置一般变量来定义能量方程,并调用分析动态特性的已知定理来推导运动方程,可使系统沿 Lagrangian 积分最小化轨迹移动。采用 EL 模型来定义 STATCOM 控制系统的一个最重要原因是它描述了难以用线性化控制工具处理的系统的特性。

将式(2)转化成如下形式:

$$\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega L \\ \omega L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sd} - u_d \\ u_{sq} - u_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

选取 i_d 和 i_q 为状态变量,根据式(3),进而将式(4)写成标准 EL 系统模型形式为:

$$M\dot{x} + Jx + Rx = u \quad (5)$$

$$x = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_{sd} - u_d \\ u_{sq} - u_q \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L \\ \omega L & 0 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}$$

其中, $\mathbf{x}$ 为状态变量; $\mathbf{M}$ 为正定的惯性矩阵, $\mathbf{M}=\mathbf{M}^T$; $\mathbf{J}$ 为反对称互联矩阵, $\mathbf{J}=-\mathbf{J}^T$; $\mathbf{R}$ 为正定对称矩阵, 反映系统的耗散特性; $\mathbf{u}$ 为外部输入矩阵, 反映系统与外界的能量交换。

2 基于无源性理论的非线性控制器设计

2.1 STATCOM 的无源性

对于系统, 若存在半正定能量存储函数 $V(\mathbf{x})$ 及正定函数 $Q(\mathbf{x})$, 对 $\forall T>0$ 使得耗散不等式(6)对系统的输入 $\mathbf{u}$ 、输出 $\mathbf{y}$ 及能量供给率 $\mathbf{u}^T\mathbf{y}$ (伴随着输入 $\mathbf{u}$ 由外部注入到系统的能量供给率)成立, 则系统是严格无源的。

$$\dot{V} \leq \mathbf{u}^T\mathbf{y} - Q(\mathbf{x})$$

即:

$$V(\mathbf{x}(T)) - V(\mathbf{x}(0)) \leq \int_0^T \mathbf{u}^T\mathbf{y} d\tau - \int_0^T Q(\mathbf{x}) d\tau \quad (6)$$

其中, T 为从初始时刻到当前时刻的时间。

由上文可以知道, 耗散不等式表明系统的能量由初始时刻到当前时刻的增长量小于或等于外部注入的能量总和, 即无源系统的运动总是伴随着能量的损失。

对于严格无源的系统, 若存在光滑可微且正定的存储函数, 那么 $\mathbf{x}=0$ 就是该系统渐近稳定的平衡点, 而存储函数就可以写成 Lyapunov 函数。

对于 H 桥级联 STATCOM, 设系统的能量存储函数为:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{M} \mathbf{x} = \frac{1}{2} L(i_d^2 + i_q^2) \quad (7)$$

对 V 求导, 并利用 $\mathbf{J}$ 的反对称特性, 可得:

$$\dot{V} = \mathbf{x}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^T (\mathbf{u} - \mathbf{J} \mathbf{x} - \mathbf{R} \mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{u} - \mathbf{x}^T \mathbf{R} \mathbf{x}$$

即:

$$\begin{aligned} V(\mathbf{x}(T)) - V(\mathbf{x}(0)) &= \int_0^T \mathbf{x}^T \mathbf{u} d\tau - \int_0^T \mathbf{x}^T \mathbf{R} \mathbf{x} d\tau \\ V(\mathbf{x}(T)) - V(\mathbf{x}(0)) &+ \int_0^T \mathbf{x}^T \mathbf{R} \mathbf{x} d\tau = \int_0^T \mathbf{x}^T \mathbf{u} d\tau \quad (8) \end{aligned}$$

对应式(6), 由式(8)可知, H 桥级联 STATCOM 的能量变化率 $V(\mathbf{x}(T)) - V(\mathbf{x}(0))$ 总小于外部供给能量 $\int_0^T \mathbf{x}^T \mathbf{u} d\tau$, 二者之差为耗散量 $\int_0^T \mathbf{x}^T \mathbf{R} \mathbf{x} d\tau$ 。所以 H 桥级联 STATCOM 是严格无源系统。进而, 可以利用无源理论对其进行控制器设计。

2.2 期望平衡点的确定

H 桥级联 STATCOM 在稳定运行时, 由于系统存在开关损耗、等效电阻损耗以及储能电容自身的损耗等, 会引起功率单元直流侧电容电压下降, 因此 STATCOM 在运行时除了对电网进行无功补偿, 同时

还需要维持每个功率单元直流侧电容电压的稳定。所以 STATCOM 稳定运行时有 3 个期望平衡点: 直流侧电压参考值 U_{dc} ; dq 旋转坐标系下 d 轴、 q 轴补偿电流参考值 i_d^* 和 i_q^* 。

通常情况下, H 桥级联型 STATCOM 每个功率单元直流侧电容电压的平衡, 主要靠从电网侧吸收有功电流来维持, 因此可以通过控制 d 轴有功电流的方法实现其稳定。此时, 可以将从电网侧吸收的维持功率单元直流侧电容电压稳定在 U_{dc} 的有功电流 i_{dc}^* , 叠加到 d 轴补偿电流参考值中, 得到新的参考电流为 $i_{dnew}^* = i_d^* + i_{dc}^*$ 。则系统的期望平衡点可以修正为 2 个:

$$\mathbf{x}_1^* = i_{dnew}^*, \quad \mathbf{x}_2^* = i_q^*$$

2.3 无源控制器设计

建立误差系统, 令:

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{x} - \mathbf{x}^* = [i_d - i_{dnew}^* \quad i_q - i_q^*]^T \quad (9)$$

其中, $\mathbf{x}^*$ 为系统的期望平衡点。将 $\mathbf{x}_e$ 代入式(5)可得系统的误差动力学方程为:

$$\mathbf{M}(\dot{\mathbf{x}}_e + \dot{\mathbf{x}}^*) + \mathbf{J}(\mathbf{x}_e + \mathbf{x}^*) + \mathbf{R}(\mathbf{x}_e + \mathbf{x}^*) = \mathbf{u} \quad (10)$$

即:

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}_e + \mathbf{J} \mathbf{x}_e + \mathbf{R} \mathbf{x}_e = \mathbf{u} - (\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}^* + \mathbf{J} \mathbf{x}^* + \mathbf{R} \mathbf{x}^*) \quad (11)$$

为加速系统收敛, 提高 $\mathbf{x}$ 向 $\mathbf{x}^*$ 的收敛速度, 使误差能量函数快速变为 0, 对式(11)注入阻尼, 加速系统能量耗散, 使其迅速收敛到期望的平衡点。注入阻尼耗散项为:

$$\mathbf{R}_d \mathbf{x}_e = (\mathbf{R} + \mathbf{R}_a) \mathbf{x}_e \quad (12)$$

$$\mathbf{R}_a = \begin{bmatrix} R_{a1} & 0 \\ 0 & R_{a2} \end{bmatrix}$$

其中, $\mathbf{R}_d$ 为系统阻尼矩阵; $\mathbf{R}_a$ 为拟注入的阻尼矩阵, 其为正定矩阵, 且满足 $R_{a1}>0$ 、 $R_{a2}>0$ 。注入阻尼的量是无源控制器设计的关键, 当注入的阻尼越大时, 控制器对控制目标的跟踪速度越快, 精度越高; 但注入的阻尼过大时, 会使控制系统不能正常工作, 所以其选取原则为缓慢增大注入的阻尼, 直到达到满意的控制效果。

将式(12)代入式(11), 得到注入阻尼后的新的误差动力学方程为:

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}_e + \mathbf{J} \mathbf{x}_e + \mathbf{R}_d \mathbf{x}_e = \mathbf{u} - (\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}^* + \mathbf{J} \mathbf{x}^* + \mathbf{R} \mathbf{x}^* - \mathbf{R}_a \mathbf{x}_e) = \xi \quad (13)$$

系统的 Lyapunov 函数为:

$$V_1 = \frac{1}{2} \mathbf{x}_e^T \mathbf{M} \mathbf{x}_e = \frac{1}{2} L(i_{ed}^2 + i_{eq}^2) \quad (14)$$

其中, i_{ed} 、 i_{eq} 分别为系统误差的 d 轴和 q 轴分量。

因为矩阵 $\mathbf{M}$ 是正定的, 所以 Lyapunov 函数 V_1 恒大于 0。

结合式(13), 对式(14)求导得:

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= \frac{1}{2}L(2i_{ed}\dot{i}_{ed} + 2i_{eq}\dot{i}_{eq}) = Li_{ed}\dot{i}_{ed} + Li_{eq}\dot{i}_{eq} = \\ & [Li_{ed} \quad Li_{eq}] \begin{bmatrix} \dot{i}_{ed} \\ \dot{i}_{eq} \end{bmatrix} = [i_{ed} \quad i_{eq}] \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{ed} \\ \dot{i}_{eq} \end{bmatrix} = \\ & \mathbf{x}_e^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{x}_e^T (\xi - \mathbf{J} \mathbf{x}_e - \mathbf{R}_d \mathbf{x}_e) = \\ & \mathbf{x}_e^T \xi - \mathbf{x}_e^T \mathbf{J} \mathbf{x}_e - \mathbf{x}_e^T \mathbf{R}_d \mathbf{x}_e \end{aligned} \quad (15)$$

由于 $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L \\ \omega L & 0 \end{bmatrix}$ 为反对称互联矩阵,所以:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_e^T \mathbf{J} \mathbf{x}_e &= [i_{ed} \quad i_{eq}] \begin{bmatrix} 0 & -\omega L \\ \omega L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ed} \\ i_{eq} \end{bmatrix} = \\ & [\omega Li_{eq} \quad -\omega Li_{ed}] \begin{bmatrix} i_{ed} \\ i_{eq} \end{bmatrix} = \omega Li_{eq} i_{ed} - \omega Li_{ed} i_{eq} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)得:

$$\dot{V}_1 = \mathbf{x}_e^T \xi - \mathbf{x}_e^T \mathbf{R}_d \mathbf{x}_e \quad (17)$$

由于 $\mathbf{R}_d$ 正定,若有 $\xi = -\lambda \mathbf{x}_e$ ($\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$),且 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0, \lambda_3 > 0$),则有:

$$\dot{V}_1 = -\mathbf{x}_e^T (\mathbf{R}_d + \lambda) \mathbf{x}_e \quad (18)$$

由式(14)、式(18)和 Lyapunov 稳定性定理可知: $V_1 > 0, \dot{V}_1 < 0$, 式(10)所示的误差动力学方程以指数形式渐近稳定到期望平衡点,即系统是指指数渐近稳定的。所以 i_d, i_q 向 i_d^*, i_q^* 收敛,系统达到期望平衡点时, $\mathbf{x}_e = 0$, 此时 $\xi = -\lambda \mathbf{x}_e = 0$ 。

结合式(13)可知,系统应该满足:

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}^* + \mathbf{J} \mathbf{x}^* + \mathbf{R} \mathbf{x}^* - \mathbf{R}_d \mathbf{x}_e = \mathbf{u} \quad (19)$$

由式(19)得到 STATCOM 的无源控制器表达式为:

$$\begin{cases} u_d = -L \frac{di_{dnew}^*}{dt} + \omega Li_q^* - Ri_{dnew}^* + R_{a1}(i_d - i_{dnew}^*) + u_{sd} \\ u_q = -L \frac{di_q^*}{dt} - \omega Li_{dnew}^* - Ri_q^* + R_{a2}(i_q - i_q^*) + u_{sq} \end{cases} \quad (20)$$

为了将式(20)所表示的无源控制器应用到实际的控制系统中,需要对其进行数字化处理,设采样周期为 T_s ,将式(20)离散化并整理得:

$$\begin{cases} u_d(k) = -\frac{L}{T_s} [i_{dnew}^*(k+1) - i_{dnew}^*(k)] + \omega Li_q^*(k) - \\ \quad Ri_{dnew}^*(k) + R_{a1}[i_d(k) - i_{dnew}^*(k)] + u_{sd}(k) \\ u_q(k) = -\frac{L}{T_s} [i_q^*(k+1) - i_q^*(k)] - \omega Li_{dnew}^*(k) - \\ \quad Ri_q^*(k) + R_{a2}[i_q(k) - i_q^*(k)] + u_{sq}(k) \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)可看出,根据时刻采样的 $i_d(k), i_q(k), u_{sd}(k), u_{sq}(k), i_{dnew}^*(k), i_{qnew}^*(k)$ 以及 $k+1$ 时刻采样的 $i_d^*(k+1), i_q^*(k+1)$ 可以计算出 k 时刻 STATCOM 参考输出的指令电压 $u(k)$ 。但由于数字系统固有的延时性,计算出指令电压的时刻要滞后采样时刻一拍,所以 $k+1$ 时刻的指令电压是由 k 时刻的采样值计

算得到的,由此,式(21)可改写为:

$$\begin{cases} u_d(k+1) = -\frac{L}{T_s} [i_{dnew}^*(k+1) - i_{dnew}^*(k)] + \omega Li_q^*(k) - \\ \quad Ri_{dnew}^*(k) + R_{a1}[i_d(k) - i_{dnew}^*(k)] + u_{sd}(k) \\ u_q(k+1) = -\frac{L}{T_s} [i_q^*(k+1) - i_q^*(k)] - \omega Li_{dnew}^*(k) - \\ \quad Ri_q^*(k) + R_{a2}[i_q(k) - i_q^*(k)] + u_{sq}(k) \end{cases} \quad (22)$$

在实际的处理过程中,如果不对 $k+1$ 时刻的参考指令电流 $i_d^*(k+1), i_q^*(k+1)$ 进行提前一拍预测,可以将其近似地用 $i_d(k), i_q(k)$ 代替,这样也能够达到一定的控制效果。但由于二者之间的偏差,会影响系统的实时性,降低跟踪速度,增加 STATCOM 输出电流的谐波,进而对电网造成污染。

为了解决这一问题,本文通过构造离散状态观测器,并利用其预测功能,在时刻计算得到 $k+1$ 时刻的参考指令电流 $i_d^*(k+1), i_q^*(k+1)$,以减小 STATCOM 输出电流的谐波,提高补偿性能。

3 离散状态观测器设计

取 STATCOM 输出补偿电流为状态变量,采样周期为 T_s ,则将式(2)化为离散状态方程如式(23)所示。

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}\mathbf{U}(k) \quad (23)$$

$$\mathbf{X}(k) = [i_d(k) \quad i_q(k)]^T$$

$$\mathbf{U}(k) = [u_{sd}(k) - u_d(k) \quad u_{sq}(k) - u_q(k)]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{RT_s}{L} & \omega T_s \\ -\omega T_s & 1 - \frac{RT_s}{L} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L} \end{bmatrix}$$

基于式(23),构造离散状态观测器如下:

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(k) + \mathbf{B}\mathbf{U}(k) + \mathbf{G}[\mathbf{X}(k) - \hat{\mathbf{X}}(k)] \quad (24)$$

其中, $\mathbf{G}$ 为误差环节,即观测器输出误差补偿矩阵;“ $\wedge$ ”表示状态变量的预测值。

定义误差函数为状态变量的预测误差值,如式(25)所示,系统根据预测误差值对预测值进行反馈校正。

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{X}(k) - \hat{\mathbf{X}}(k) \quad (25)$$

用式(23)减去式(24)得:

$$\begin{aligned}\mathbf{X}(k+1) - \hat{\mathbf{X}}(k+1) &= \\ & \mathbf{A}[\mathbf{X}(k) - \hat{\mathbf{X}}(k)] - \mathbf{G}[\mathbf{X}(k) - \hat{\mathbf{X}}(k)] \end{aligned} \quad (26)$$

将式(25)代入式(26),整理得到观测器误差方程:

$$\mathbf{e}(k+1) = (\mathbf{A} - \mathbf{G})\mathbf{e}(k) \quad (27)$$

根据线性时不变系统的稳定性结论,若矩阵的 $\mathbf{A} - \mathbf{G}$ 所有特征值均在 z 平面单位圆内,则观测器误差系统(27)是渐近稳定的,从而对任意初始误差

$e(0)$,随着时间的不断增加, $e(k)$ 都将趋向于 0。即随着时间的推移,式(24)中的预测状态变量 $\hat{X}(k)$ 将趋于系统的实际状态变量 $X(k)$,使预测误差最终减小到 0。

令系统在 $k+1$ 时刻,预测误差减小到 0,即令 $e(k+1)=0$,则由式(27)可得:

$$G=A=\begin{bmatrix} 1-\frac{RT_s}{L} & \omega T_s \\ -\omega T_s & 1-\frac{RT_s}{L} \end{bmatrix} \quad (28)$$

4 仿真结果分析

为了验证本文所提控制算法的有效性,根据 H 桥级联 STATCOM 的工作原理与数学模型,在 MATLAB/Simulink 环境中搭建三相星形连接的 STATCOM 仿真模型,具体仿真参数如下:网侧电压 $u_s=1500$ V,电网频率 $f_g=50$ Hz,开关频率 $f_s=1$ kHz,每相 H 桥单元数 $N=6$,电感 $L=10$ mH,直流侧电容 $C=5600$ μ F,直流侧电压参考值 $U_{dc}=350$ V。

为了验证本文所提算法在 STATCOM 补偿负载无功突变过程中的补偿效果,负载采用三相 RL 负载,并给出了定量的比较。下文中电压和电流均以标幺值的形式给出。

4.1 稳态补偿仿真

选取 RL 负载,其中,有功功率为 150 kW,感性无功功率为 150 kvar,对比仿真有无离散状态观测器时的补偿效果。

图 2 为未补偿时的 a 相网侧电压和电流波形,由图可以看出,网侧电压与电流存在一定的相位差,电压相位超前电流相位,这是由负载产生的感性无功造成的。

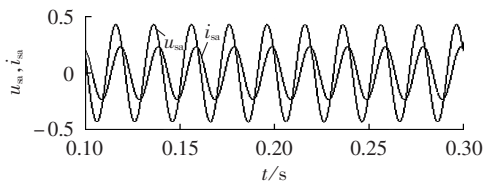
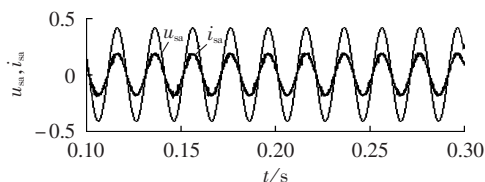
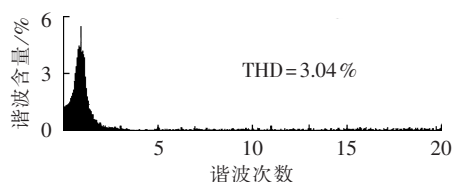


图 2 补偿前 a 相网侧电压和电流
Fig.2 Grid voltage and current of phase a before compensation

图 3(a)为采用无离散状态观测器的无源控制算法进行补偿后的 a 相网侧电压和电流波形,图 3(b)为相应的 FFT 分析结果和 THD 含量。图 4(a)为采用有离散状态观测器的无源控制算法进行补偿后的 a 相网侧电压和电流波形,图 4(b)为相应的 FFT 分析结果和 THD 含量。其中,在控制器无离散状态观测器时,注入的阻尼 $R_{a1}=R_{a2}=30$;在控制器有离散状态观测器时,注入的阻尼 $R_{a1}=R_{a2}=50$ 。这是由于控

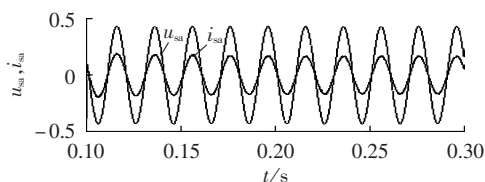


(a) 补偿后的 a 相网侧电压和电流

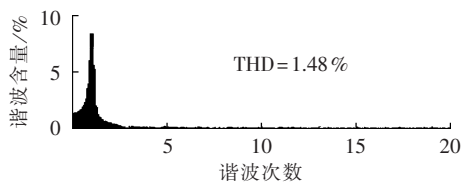


(b) FFT 分析结果与 THD 含量

图 3 无离散状态观测器的仿真结果
Fig.3 Simulative results, without discrete state observer



(a) 补偿后的 a 相网侧电压和电流



(b) FFT 分析结果与 THD 含量

图 4 有离散状态观测器的仿真结果
Fig.4 Simulative results, with discrete state observer

制器引入额外的观测器后,会增加控制器的计算量,延长计算时间,影响控制器的控制效果,降低控制器对控制目标的跟踪速度及精度,同时会使对谐波的抑制效果有所降低,所以通过增大注入的阻尼,补偿计算量增大后对跟踪速度及精度的影响。对比图 3 和图 4 可以看出,本文所提控制算法下的 STATCOM 可以快速补偿系统所需的无功电流,相位和幅值基本无误差,补偿后的网侧电流谐波含量明显降低,THD 由 3.04%下降到 1.48%。

图 5(a)和图 5(b)分别为 a 相参考电流的预测值与实际值的波形和两者的误差。从图 5 中可以看出,预测值与实际值的误差非常小,观测器实现了准确的预测。

4.2 动态补偿仿真

选取 RL 负载,其中有功功率为 300 kW,感性无功功率为 300 kvar,仿真动态突减感性无功这一过程。突减的负载为 RL 负载,其中有功功率为 150 kW,感性无功功率为 150 kvar。

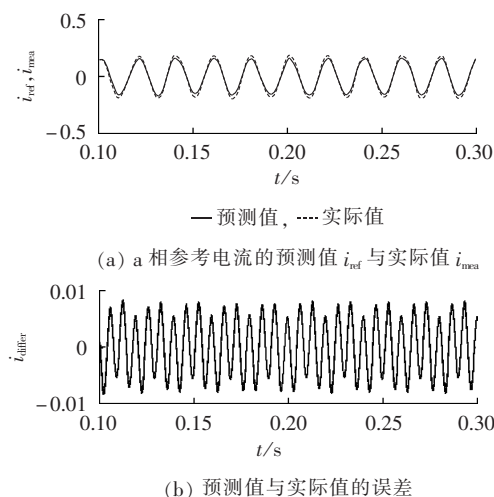


图 5 a 相参考电流预测值与实际值
Fig.5 Predicted and actual reference
currents of phase a

图 6(a)和 6(b)分别为突减负载过程中,补偿前后的 a 相网侧电压和电流波形。从图 6(a)中可以看出,在 0.45 s 突减负载之后,网侧电流突然减小,电压与电流存在相位差,电压相位超前电流相位。从图 6(b)中可以看出,突减负载后,STATCOM 仍然可以快速地补偿系统所需的无功电流,补偿精度高,动态响应迅速。

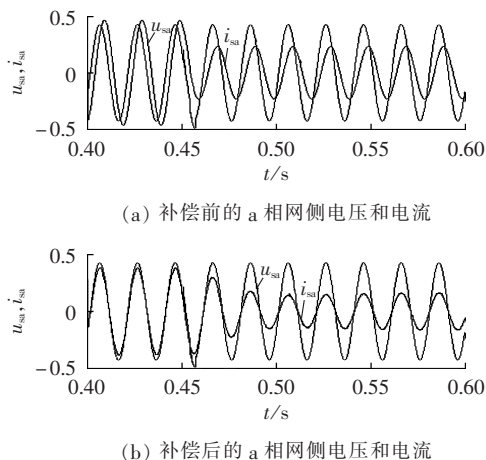


图 6 负载突减情况下的仿真结果
Fig.6 Simulative results when load
is suddenly reduced

通过上述稳态和动态仿真研究,将本文所提出的控制算法应用到 STATCOM 中,可以快速准确地补偿稳态和动态过程中系统的无功电流,且大幅降低了 STATCOM 输出电流的谐波含量,减小了对电网的污染。

5 实验结果分析

为进一步验证本文方法的正确性和有效性,搭建电压等级 10 kV、额定容量为 2 Mvar 的 STATCOM 对拖实验平台,即 2 台 STATCOM 同时运行,其中 1

台产生设定的无功,而另外 1 台进行补偿,使无功电流不流入网侧。STATCOM 控制器中的 DSP 选择 TI 公司的 TMS320F28335 芯片,负责无功电流检测、参考指令电流计算和直流电压控制;FPGA 选择 Altera 公司的 Cyclone III 系列 EP3C25 芯片,负责产生 36 路 PWM 脉冲控制信号,并且通过光纤将脉冲触发信号送到每个 H 桥单元。测得的实验波形均为 a 相电流波形。具体实验参数如下:网侧电压 $u_s=10$ kV,电网频率 $f_g=50$ Hz,开关频率 $f_s=1$ kHz,每相 H 桥单元数 $N=12$,电感 $L=10$ mH,直流侧电容 $C=5\,600$ μ F,直流侧电压参考值 $U_{dc}=800$ V。

5.1 稳态补偿实验

图 7(a)和 7(b)为无源控制算法在无离散状态观测器和有离散状态观测器情况下的静态补偿对拖实验波形(i_Q 、 i_c 、 i_s 分别为无功电流、补偿电流和网侧剩余电流, I_Q 、 I_c 、 I_s 分别对应其均方根;后同)。其中,在控制器无离散状态观测器实验中,注入的阻尼 $R_{a1}=R_{a2}=15$;在控制器有离散状态观测器实验中,注入的阻尼 $R_{a1}=R_{a2}=25$ 。

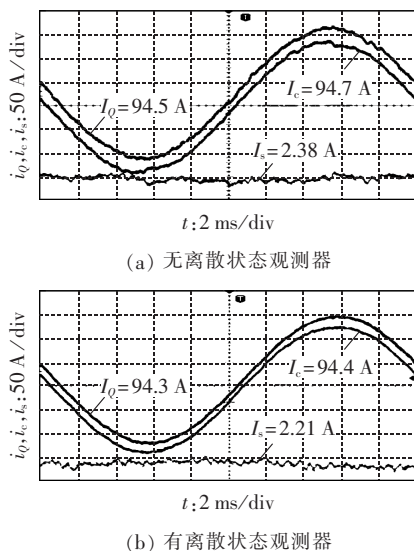


图 7 负载不变时的补偿效果
Fig.7 Compensation results for constant load

从图 7 中可以看出,无论是否采用离散状态观测器,无源控制算法都可以很好地对无功电流进行补偿,误差很小,且补偿电流与无功电流的相位基本一致。采用了本文提出的离散状态观测器对参考指令电流进行预测后,无功电流和补偿电流中的谐波含量均有所降低,增加了电流波形的正弦度;无功电流的 THD 由原来的 2.47% 下降到 1.50%;补偿电流的 THD 由原来的 2.54% 下降到 1.53%。

5.2 动态补偿实验

为了验证装置的动态性能,即装置在负载无功突变过程中的补偿效果,仍然采用 2 套装置进行对拖实验,当 2 套装置均处于稳态工作时,在某一时刻,

突然减小无功电流,此时补偿效果如图 8 所示。

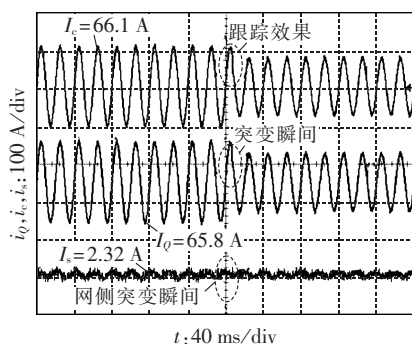


图 8 负载突变时的补偿效果

Fig.8 Compensation results for suddenly changed load

从图 8 中可以看出,一台 STATCOM 输出的无功电流在突变的瞬间,另一台 STATCOM 输出的补偿电流也随之发生相同的变化,此时,网侧电流仅有很小的突变,然后马上回到稳定状态,网侧剩余电流 $I_s=2.32$ A,整个过程非常迅速。

由稳态补偿实验和动态补偿实验的结果可以看出,采用本文提出的控制算法后,STATCOM 可以准确地跟踪参考指令电流,并且能够快速补偿负载突变时所需的无功电流,补偿精度高,动态响应迅速。

6 结论

为了解决现有的线性控制策略应用于 H 桥级联 STATCOM 系统时存在动态稳定性较差这一问题,本文提出了新的基于无源性理论的非线性控制策略,并从理论上保证了系统的 Lyapunov 函数的稳定性。通过对 STATCOM 数学模型与工作原理的分析,建立 EL 系统模型。为了减少系统的计算量,提出减少系统期望平衡点数量的方法;同时,通过对系统注入阻尼,加速了系统能量耗散,大幅提高了系统向期望平衡点收敛的速度,并对注入阻尼的量做了详细的分析;为了提高控制算法的实时性,提高系统的动态性能,消除参考指令电流滞后一拍的影响和抑制 STATCOM 输出电流的谐波,构造了离散状态观测器对系统参考指令电流进行预测。最后通过仿真与实验对本文所提出控制方法的可行性和有效性进行验证,结果表明,本文提出控制算法简单,易于实现,控制精度高,稳态和动态性能优越,并有效地降低了 STATCOM 输出电流的谐波。

参考文献:

- [1] 刘骥,徐在德,高岩涛,等. 单电流检测配网静止同步补偿器的改进控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):60-64.
LIU Ji,XU Zaide,GAO Yantao,et al. Improved compensation scheme of DSTATCOM based on single current control [J].

Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):60-64.

- [2] ARABI S,KUNDUR P. Stability modeling of storage devices in FACTS applications[C]//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Vancouver,BC,Canada:IEEE,2001:767-771.
- [3] SOTO D,GREEN T. A comparison of high-power converter topologies for the implementation of FACTS controllers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2002,49(5):1072-1080.
- [4] HATANO N,ISE T. A configuration and control method of cascade H-bridge STATCOM[C]//Proceedings of General Meeting of the IEEE-Power-and-Energy-Society. Pittsburgh,USA:IEEE,2008:1885-1892.
- [5] 黄伟雄,刘锦宁,王永源,等. 35 kV ± 200 Mvar STATCOM 系统总体设计[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):136-142.
HUANG Weixiong,LIU Jinning,WANG Yongyuan,et al. Overall design of 35 kV ± 200 Mvar STATCOM system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):136-142.
- [6] 杨昆,陈磊,陈国柱. DSTATCOM 补偿不平衡负载分序控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):36-41.
YANG Kun,CHEN Lei,CHEN Guozhu. Individual sequence control of DSTATCOM compensation for unbalanced load [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):36-41.
- [7] 刘文华,宋强,滕乐天,等. 基于集成门极换向晶闸管与链式逆变器的 ± 50 Mvar 静止同步补偿器[J]. 中国电机工程学报,2008,28(15):55-60.
LIU Wenhua,SONG Qiang,TENG Letian,et al. ± 50 Mvar STATCOM based on chain circuit converter employing IGCT's[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(15):55-60.
- [8] 王盛,李立学,郑益慧,等. 基于多模型 PI 的 STATCOM 直接电压控制方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):42-46.
WANG Sheng,LI Lixue,ZHENG Yihui,et al. Multi-model PI controller for direct voltage control of STATCOM [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):42-46.
- [9] 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.
- [10] 章勇高,康勇,刘黎明,等. 静止同步补偿器的双闭环控制系统设计[J]. 电力自动化设备,2006,26(10):62-66.
ZHANG Yonggao,KANG Yong,LIU Liming,et al. Double loop control design of STATCOM [J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(10):62-66.
- [11] CORZINE K A,WIELEBSK M W,PENG F Z,et al. Control of cascaded multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2004,19(3):732-738.
- [12] FILIZADEH S,GOLE A M. Harmonic performance analysis of an OPWM-controlled STATCOM in network applications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):1001-1008.
- [13] 孙丽颖,冯佳昕,赵军. STATCOM 的非线性鲁棒控制器设计[J]. 东北大学学报,2009,30(4):466-470.
SUN Liying,FENG Jiaxin,ZHAO Jun. Design of a nonlinear robust controller for STATCOM [J]. Journal of Northeastern University,2009,30(4):466-470.

- [14] SOTO D,PEN A R. An adaptive controller in stationary reference frame for D-STATCOM in unbalanced operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51 (2): 401-409.
- [15] SCHAAO N C,PANIGRAHI B K,DASH P K,et al. Multivariable nonlinear control of STATCOM for synchronous generator stabilization [J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2004, 26(1): 37-48.
- [16] 郭源博,周鑫,张晓华,等. 电网不平衡条件下 STATCOM 的非线性控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 50-55.
- GUO Yuanbo,ZHOU Xin,ZHANG Xiaohua,et al. Nonlinear control of STATCOM under unbalanced condition [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 50-55.
- [17] ORTEGA R,LORIA A,NICKLASSON P J,et al. Passivity-based control of Euler-Lagrange systems: mechanical electrical and electromechanical application [M]. London, UK: Springer-Verlag, 1998: 15-28.

作者简介:



徐 榕

yuyong@hit.edu.cn);

徐 榕(1984—),男,吉林舒兰人,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(E-mail: xurong0707@sina.com);

于 泳(1974—),男,吉林舒兰人,副教授,博士,主要研究方向为电能质量控制技术、变频器故障诊断与容错控制技术(E-mail:

yuyong@hit.edu.cn);

杨荣峰(1979—),男,四川攀枝花人,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);

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)。

Strategy based on passivity theory for nonlinear control of STATCOM with cascaded H-bridges

XU Rong, YU Yong, YANG Rongfeng, XU Dianguo

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the poor transient stability of traditional linear control method for STATCOM in the conditions of high voltage and large power, a nonlinear control strategy based on the passivity theory is proposed for the STATCOM with cascaded H-bridges, which guarantees the Lyapunov function stability of the system. The mathematical model and operating principle of STATCOM system are analyzed, based on which, its Euler-Lagrange system model is built. In order to reduce the number of expected stable equilibrium points, the DC capacitor voltage of power unit is kept stable by controlling the active current on d -axis. The amount of damping injected into the system to accelerate the system energy dissipation for faster convergency is analyzed. In order to eliminate the influence of one-sampling-period delay, a discrete state observer is constructed to predict the reference current. Simulative and experimental results show that, the control strategy has better dynamic performance and robustness, effectively reducing the harmonic component of STATCOM output current.

Key words: H-bridge cascading; static synchronous compensator; reactive power compensation; passivity theory; nonlinear control systems; current prediction; discrete state observer; stability