

文章编号: 1000-8152(2010)02-0244-05

大容量链式静止补偿器的非线性双输出解耦控制

郑 宏, 陈灵奎, 郭 凯

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 大容量链式静止同步补偿器(STATCOM)是典型非线性系统, 其控制理论和算法复杂且抽象。本文根据链式STATCOM的有功-无功电流的动态数学模型, 得到非线性动态无功控制策略, 利用双输入双输出线性化的控制方法, 实现双输出变量解耦控制。仿真及实验研究表明, 该链式STATCOM非线性双输出解耦控制器, 在系统发生短路或大功率负载突变时具有良好的动态性能。

关键词: 链式STATCOM; 非线性; 解耦

中图分类号: TM761 文献标识码: A

Control of nonlinearity and two outputs variables decoupling in cascade STATCOM

ZHENG Hong, CHEN Ling-kui, GUO Kai

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: High power cascade static synchronous compensator(STATCOM) is a typical nonlinear system; the control theory and algorithm of which are complex and abstract. Based on the dynamic mathematical model of the active and the reactive currents in a cascade STATCOM, we develop a nonlinear dynamic control strategy for the reactive power; and using the control method of two-input two-output linearization, we achieve the decoupling control for the output variables. The simulation and experimental results show that this nonlinear and two-output decoupling controller has a desirable dynamic performance, when a short circuit fault occurs or a high-power load abruptly changes.

Key words: cascade STATCOM; nonlinear; decoupling

1 引言(Introduction)

自文献[1]首次提出链式STATCOM概念以来, 链式结构引起了广泛关注。图1为链式STATCOM主电路结构, 每相采用若干个具有独立直流电源的单相逆变桥直接串联而成, 与传统的变压器多重化结构的STATCOM相比, 链式STATCOM摒弃了多重化变压器, 减少了占地面积, 降低了装置成本, 避免了因变压器的非线性特征致使控制困难等缺点。同时链式STATCOM便于分相控制、易于扩展容量等优点, 还可以通过冗余设计, 进一步提高装置的可靠性。

链式STATCOM装置是个典型的非线性系统。因此, 对该系统应用非线性的控制方法可实现较高精度的控制。文献[2]采用了理论比较成熟的单输出变量的线性化控制方法, 但该方法的应用范围很小且误差很大。文献[3]证实了在运行点附近进行局部线性化的控制方法存在很大的缺点。而逆系统方法虽

然有不依赖运行点的非线性控制特性, 但其控制理论极其复杂且抽象性很强^[4]。相比之下, 本文中基于非线性双输出变量的解耦控制方法即包含了逆系统方法的优点, 又实现了理论及运算的简便, 无疑是更好的非线性控制方法。本文根据链式STATCOM的有功-无功电流的动态模型, 利用双输入双输出线性化的控制方法, 实现输出变量解耦控制。并进行了仿真实验, 从而证实了该方法的可行性。

2 链式STATCOM动态数学模型(Dynamic mathematical model of cascade STATCOM)

链式结构STATCOM的基本特点是每相由具有独立直流电源的单相逆变桥(H桥)直接串联而成^[5]。通过合成各串联H桥的输出电压波形, 形成一个接近正弦波形的阶梯波, 达到减小各输出相电压谐波的目的。链式STATCOM与系统的等效连接图如图2所示^[1]。

收稿日期: 2009-06-23; 收修改稿日期: 2009-09-09。

基金项目: 江苏省科技攻关计划项目(BE2007069); 江苏省研究生培养创新工程项目(CH07B-102z)。

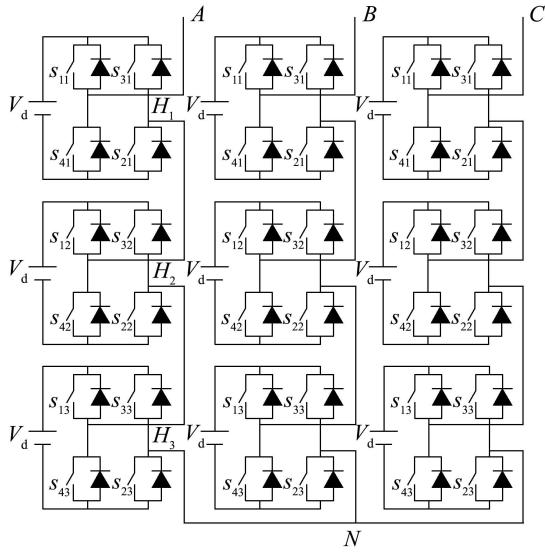


图1 Y型链式STATCOM主电路结构

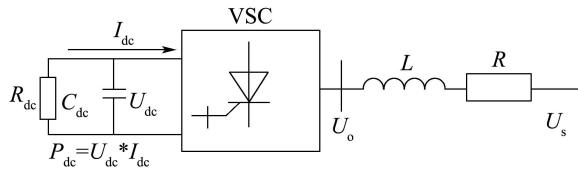
Fig. 1 The main circuit structure of Y type cascade STATCOM

图2 链式STATCOM与系统的等效连接图

Fig. 2 The equivalent connection graph of cascade STATCOM and power grid

根据上述等效连接图及文献[2]可得到链式STATCOM在 $d-q$ 旋转坐标下的数学模型。其中: ω 是旋转坐标频率, L 是连接STATCOM与系统线电压的等效电抗, R 是传输线路损耗和变换器损耗的等效电阻值, 直流侧并联电阻 R_{dc} 表示变换器的开关损耗。 U_{dc} 表示变换器中各电容电压的直流电压(假设各电容电压是相等的)。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & \frac{NM}{L} \cos \delta \\ -\omega & -\frac{R}{L} & -\frac{NM}{L} \sin \delta \\ -\frac{M}{2C_{dc}} \cos \delta & \frac{M}{2C_{dc}} \sin \delta & -\frac{1}{C_{dc}R_{dc}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sp} \\ V_{sq} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中: N 表示每相的直流电源个数, V_{sp} 和 V_{sq} 分别表示网侧电压的正序分量和负序分量, δ 是STATCOM产生的电压与系统电压的相位差, M 是调制比, 即变换器输出相电压峰值与一相中总电容电压的比值。

3 非线性控制算法(Nonlinear control algorithm)

从上述数学模型可以分析出, 通过综合控制相位角 δ 和调制比 M 就可以实现对STATCOM输出电压(电流)的控制。因此, 在 dq 旋转坐标下可实现有功和无功电流分量的解耦控制^[6,7]。令

$$u_1 = NM \cos \delta, \quad u_2 = NM \sin \delta.$$

从上面的分析可得到, 该系统为标准的非线性系统, 其动态性能可以等效为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u, \\ y = h(x), \end{cases} \quad (2)$$

$$x = [x_1, x_2, x_3]^T = [i_d, i_q, U_{dc}]^T,$$

$$f(x) =$$

$$\begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ f_3(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 + \omega x_2 - \frac{V_{sp}}{L} \\ -\omega x_1 - \frac{R}{L}x_2 - \frac{V_{sq}}{L} \\ -\frac{x_3}{C_{dc}R_{dc}} \end{bmatrix},$$

$$g(x) =$$

$$\begin{bmatrix} g_{11}(x), g_{12}(x) \\ g_{21}(x), g_{22}(x) \\ g_{31}(x), g_{32}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_3}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{x_3}{L} \\ -\frac{x_1}{2NC_{dc}} & \frac{x_2}{2NC_{dc}} \end{bmatrix},$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} NM \cos \delta \\ NM \sin \delta \end{bmatrix}.$$

输出变量为

$$y = h(x) = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由式(2)(3)可以看出, 该等效的数学模型是两输入两输出三状态变量的非线性耦合系统, 为实现该系统的解耦控制和线性化, 本文应用了输入—输出线性化的算法。输出变量中, $h_1(x)$ 是2阶子系统, 而 $h_2(x)$ 为1阶子系统。对两个子系统分别进行哈密顿解耦算法。

$$E(x) = \begin{bmatrix} Lg_1Lfh_1(x) & Lg_2Lfh_1(x) \\ Lg_1h_2(x) & Lg_2h_2(x) \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} Lfh(x) &= \nabla h(x)f(x), \\ LgLf(x) &= \nabla(Lfh(x))g(x), \end{aligned}$$

得到解耦矩阵 $E(x)$:

$$E(x) = \begin{bmatrix} \frac{x_1}{2NR_{dc}C_{dc}^2} & \frac{x_1}{2NR_{dc}C_{dc}^2} \\ 0 & -\frac{x_3}{L} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

实际正常运行条件下式(4)并不是唯一的,而且该系统能转化成两组解耦的线性化系统。定义在线性可控系统中的状态变量为

$$\begin{cases} z_1 = x_3, \\ z_2 = -\frac{u_1 x_1}{2NC_{dc}} + \frac{u_2 x_2}{2NC_{dc}} - \frac{x_3}{C_{dc} R_{dc}}, \\ z_3 = x_2. \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)能够得到下面的空间状态等式:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2, \\ \dot{z}_2 = v_1, \\ \dot{z}_3 = v_2. \end{cases} \quad (6)$$

其中: v_1 和 v_2 是系统的新的输入量。根据式(6)可以设计出理想轨迹的控制方法。但为了克服系统模型和不确定性参数引起的错误,本文加入了积分控制环节:

$$\begin{cases} z_{vdc} = \int (v_{dc} - v_{dc}^*) dt, \\ z_q = \int (i_q - i_q^*) dt. \end{cases} \quad (7)$$

此时的线性系统为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_{vdc} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_{vdc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} v_{dc}^*, \\ \begin{bmatrix} \dot{z}_3 \\ \dot{z}_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_3 \\ z_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} i_q^*. \end{aligned}$$

因此,该控制算法定义为

$$\begin{cases} v_1 = -k_1 z_1 - k_2 z_2 - k_{vdc} z_{vdc} = \\ \quad -k_1 x_3 - k_2 \dot{x}_3 - k_{vdc} \int (x_3 - v_{dc}^*) dt, \\ v_2 = -k_3 z_3 - k_q z_q = \\ \quad -k_3 x_2 - k_q \int (x_2 - i_q^*) dt. \end{cases} \quad (8)$$

通过上式可以获取反馈的增益。因此,该控制算法的最终形式为

$$\begin{cases} u_1 = \frac{(-L^2 fh_1 + v_1)}{Lg_1 Lfh_1} = \\ \quad -\frac{2N x_3^2}{R_{dc} x_1} + \frac{2N R_{dc} C_{dc}^2}{x_1} v_1, \\ u_2 = \frac{(-Lfh_2 + v_2)}{Lg_2 h_2} = \\ \quad -\frac{\omega L x_1 + Rx_2 + v_{sq} + Lv_2}{x_3}. \end{cases} \quad (9)$$

因此,可以得到装置输出控制量相位角 δ 和调制比 M 与输入量 i_d , i_q 和 U_{dc} 的关系。从而,实现了该非线性系统双输出变量的解耦,便于该复杂控制器的设计^[8]。

4 控制器设计及仿真实验(Controller design and simulation experiment)

据上述数学模型和非线性解耦控制算法,该系统的控制器框图如图3所示。

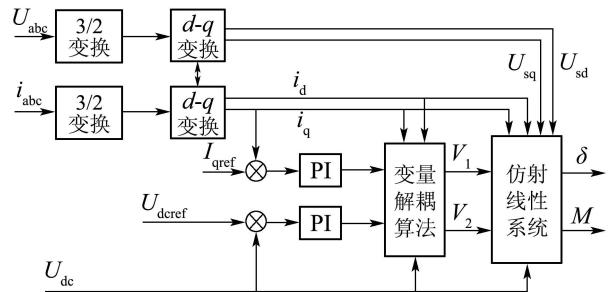


图3 非线性解耦控制器框图

Fig. 3 The diagram of nonlinear decoupling controller

本文运用MATLAB/Simulink里的PowerBlock搭建了仿真系统(如图4)测试STATCOM非线性解耦控制器的有效性。该仿真系统主电路采用链式Y型结构的STATCOM形式(如图1),并在系统电压发生短路和大功率负载突变时的情况进行仿真实验。

系统在1.5 s处发生短路故障,STATCOM未投入使用前,通过仿真波形图5(a)可知,总线3处系统电压与参考电压间差距很大,并在短路点处出现很大的电压波动。

当STATCOM在开始处投入使用时,通过仿真波形图5(b)可知,系统电压与参考电压几乎一致,短路处电压也只是在参考电压附近有轻微波动。对比可知,该控制方法可实现系统电压的平衡。

与前述系统短路故障情况一致,系统通过总线10处的LOAD负载,分别在0 s, 1.0 s和2.0 s处发生大功率负载突变,对比图6(a)和图6(b)可知,STATCOM可在负载突变时短时间内实现电网电压的平衡并保证较小的波动。从而证实了基于非线性双输出变量的解耦控制方法的可行性和有效性。

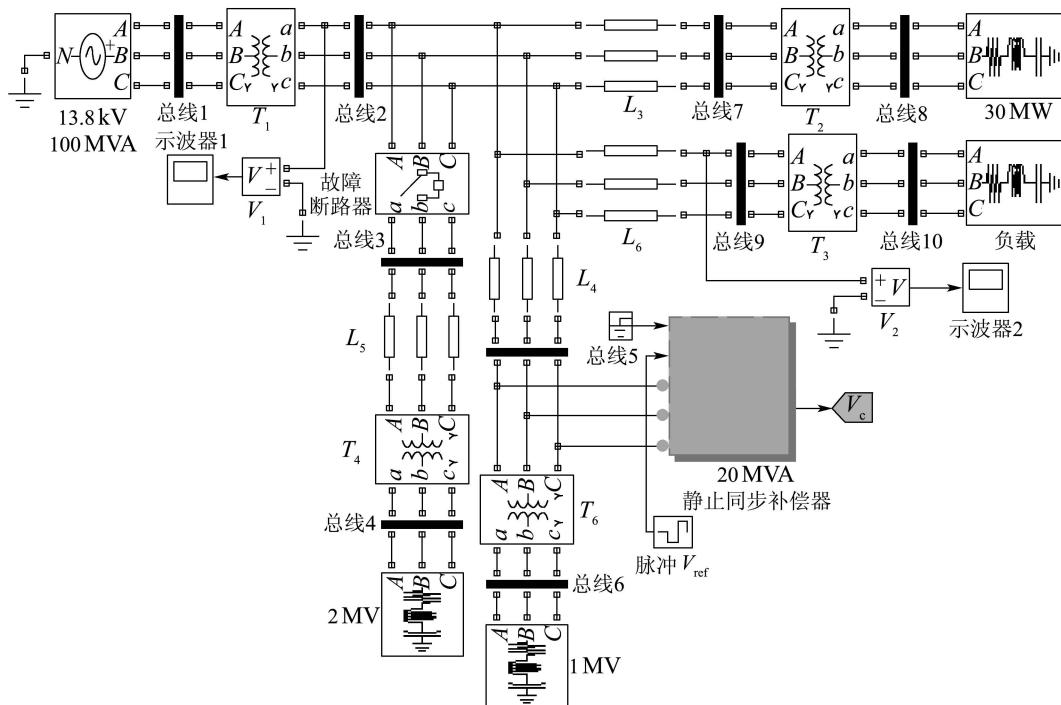


图4 链式STATCOM仿真系统模型

Fig. 4 The simulation system model of cascade STATCOM

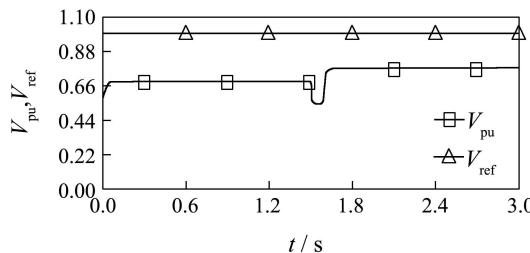


图5(a) 短路故障时补偿前的系统电压及其参考电压

Fig. 5(a) The system and its reference voltage before compensation while occurring short-circuit failure

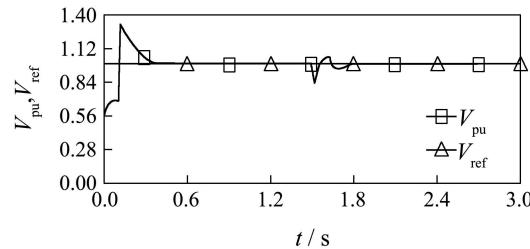


图5(b) 短路故障时补偿后的系统电压及其参考电压

Fig. 5(b) The system and its reference voltage after compensation while occurring short-circuit failure

除此之外,研制了基于IGCT链式STATCOM实验样机,并对负载不对称情况下的动态跟踪补偿实验中进行了突然加载的实验,得到图7波形图。由动态响应实验波形可知,经过一个工频周期的

暂态后,系统进入稳态,无功得以补偿。综上所述,基于非线性解耦控制的链式STATCOM能够提高电网的稳定性且补偿效果非常好。

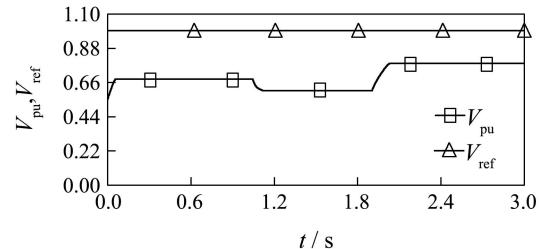


图6(a) 大功率负载突变时补偿前的系统电压及参考电压

Fig. 6(a) The system and its reference voltage before compensation while large power load mutating

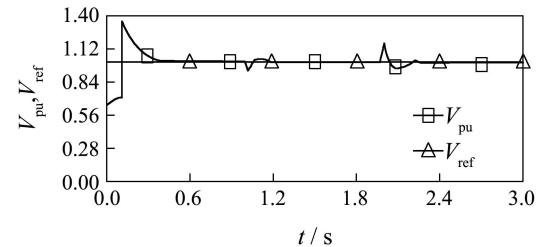


图6(b) 大功率负载突变时补偿后的系统电压及参考电压

Fig. 6(b) The system and its reference voltage after compensation while large power load mutating

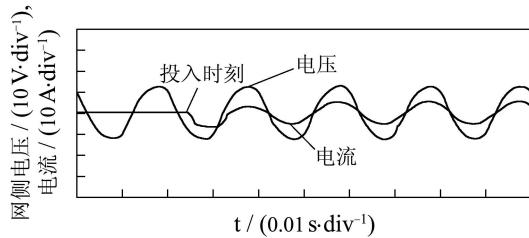


图 7 动态响应实验

Fig. 7 The experiment of dynamic response

5 结论(Conclusion)

本文针对大容量链式STATCOM的控制理论算法的复杂性,提出了一种基于非线性双输入双输出变量解耦控制的链式STATCOM算法,并设计了非线性动态无功控制器。仿真及实验研究表明,在系统发生短路及大功率负载突变时,该控制方法能够实现系统的快速无功功率补偿和电压调整,用该方法提高系统的动态性能是有效可行的。

参考文献(References):

- [1] PENG F Z, LAI J S. Dynamic performance and control of a static var generator using cascade multilevel inverters[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, 33(3): 748 – 755.
- [2] NIKUN J, SHAH M. *EMTP-RV Simulation of a Chain Link STATCOM*[M]. Canada: Concordia University, 2007.
- [3] 吕燕. DSTATCOM建模及其非线性控制的研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.

(LÜ Yan. *Research on the modeling and nonlinear control of DSTATCOM*[D]. Jinan: Shandong University, 2006.)

- [4] 魏文辉, 刘文华, 宋强, 等. 基于逆系统方法有功—无功解耦PWM控制的链式STATCOM动态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 23 – 28.
(WEI Wenhui, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. Research on fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2005, 25(3): 23 – 28.)
- [5] WU B. *High-Power Converters and AC Drives*[M]. Canada: Wiley-IEEE Press, 2006.
- [6] HAN B, BAEK S, KIM H. Static synchronous series compensator based on cascaded H-bridge inverter[J]. *Electric Power Systems Research*, 2003, 65(2): 159 – 168.
- [7] YAO Z, DONESCU V, PETAL K. Nonlinear control for STATCOM based on differential algebra[C] // *IEEE Power Electronics Specialists Conference(PESC98)*. Fukuoka, Japan: IEEE, 1998, 5: 329 – 334.
- [8] 刘涛, 张卫东, 欧林林. 双输入输出时滞过程解耦控制的解析设计[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 31 – 37.
(LIU Tao, ZHANG Weidong, OU Linlin. Analytical design of decoupling control for two-input two-output processes with time delays[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 31 – 37.)

作者简介:

- 郑宏 (1965—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电力电子器件与应用、FACTS技术, E-mail: zhenghong0511@sina.com;
- 陈灵奎 (1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事电能质量检测以及特定情况下STATCOM的模型分析, E-mail: chlk888@yahoo.com.cn;
- 郭凯 (1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术应用、谐波治理、无功补偿, E-mail: immortalitygk@163.com.