

文章编号:1004-289X(2009)01-0050-04

# 基于三相电压型逆变器 STATCOM 的研究

李树卿,史建立,李世作,张志斌

(广西大学电气工程学院,南宁 530004)

**摘要:**介绍了静止同步补偿器(STATCOM)的分类与工作原理并建立了三相坐标系和同步旋转坐标系下 STATCOM 的非线性数学模型;采用非线性变换和反馈线性化理论,设计了 STATCOM 的状态反馈解耦控制器,以实现有功电流和无功电流的解耦。

**关键词:**静止同步补偿器;无功补偿;解耦控制

中图分类号:TM464

文献标识码:B

## Study on STATCOM Based on Three-phase Voltage Type Inverter

LI Shu-qing, SHI Jian-li, LI Shi-zuo, ZHANG Zhi-bin

(College of Electrical Engineering, Guangxi university, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The classification and Operating principle of static synchronous compensator(STATCOM) are presented and set up the nonlinear mathematical model three-phase and synchronous rotating coordinate system in STATCOM. By the non-linear transformation and feedback linearization theory, design feedback decoupling controller of STATCOM state to achieve active current and reactive current decoupling.

**Key words:** static synchronous compensator; reactive compensation; decoupling control

### 1 引言

静止同步补偿器(STATCOM)又称为先进的无功发生器(ASVG),是柔性交流输电系统(FACTS)的重要成员之一。较之目前在电力系统中应用较普遍的静止无功补偿装置 SVC,STATCOM 具有响应速度快、控制稳定性好、交流侧电压谐波含量较小、运行范围更宽、损耗低以及安装面积大大降低等优点,受到广泛的重视。随着电力系统中出现了越来越多的冲击性和非线性负荷,STATCOM 在输配电系统中起着越来越重要的作用。因而,对于 STATCOM 的原理以及应用进行深入地研究,将会带来显著的经济效益和社会效益。

### 2 分类

STATCOM 的主电路由变流器构成。根据变流器的直流侧采用电容或电感两种不同的储能元件,可以分为电流型 STATCOM 和电压型 STATCOM 两种,如图 1 所示。图 1(a)所示, VSI-STATCOM 直流侧以电容为储能元件,主电路采用三相电压型逆变桥,将直流电压变为交流电压,然后通过串联电抗器接入系统。电抗器的

作用是阻尼过电流、滤除谐波。CSI-STATCOM 直流侧以电感为储能元件,图 1(b)所示,主电路采用电流源变换电路,将直流电流逆变为交流电流送入电网。并联在交流侧的电容可以吸收换相产生的过电压。

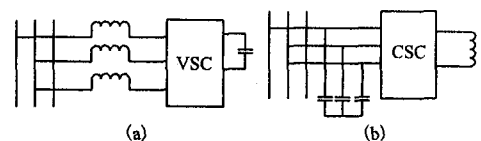


图 1 STATCOM 基本电路结构图

长期以来,电压型 STATCOM 一直是静止无功补偿器的研究重点。这主要是因为通常的电力能源例如发电机、电网、电池等均属电压源,而且在大功率场合,电压型变流器中的储能元件电容与电流型变流器中的储能元件电感相比,储能效率和储能器件的体积、价格等都具有明显的优势,并由于 CSI 交流侧 LC 滤波环节所导致的电流畸变、振荡等问题,使其结构和控制相对复杂化,从而制约了电流型 PWM 变流器的应用和研究<sup>[1]</sup>。以下以电压型为例来介绍静止同步补偿器的工作原理及控制策略。

### 3 VSI 型 STATCOM 的工作原理<sup>[2]</sup>

图 2 中 VSI - STATCOM 的主电路由以下几部分组成:电压支撑电容为 STATCOM 提供直流电压支撑;由大功率电力电子开关器件组成的电压源逆变器(VSI),其输出交流电压的大小、频率和相位可以通过脉宽调制(PWM)技术控制逆变器中的关断器件(如 GTO、IGCT、IEGT)的驱动脉冲进行改变;耦合变压器将逆变器输出的电压变换到与系统电压,从而使 STATCOM 装置可以并联到电力系统中。连接变压器本身的漏抗可以用于限制电流,滤除高次谐波,使 STATCOM 的输出电压接近正弦波。

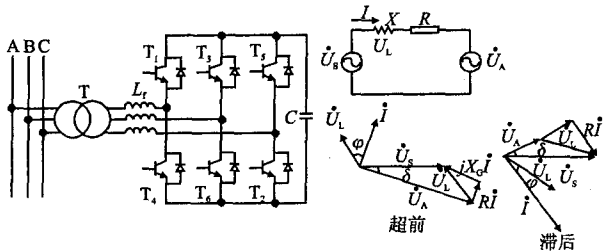


图 2 STATCOM 的基本结构

图 3 STATCOM 的等值电路图以及相量图

STATCOM 工作时通过开关的通断,将直流侧的电压转换成与网侧同频率的交流电压,可将其等效为一个交流电压源,其幅值和相位都可以控制。理想情况下(忽略线路阻抗和 STATCOM 自身的损耗),设装置输出电压为  $\dot{U}_A$ ,变压器短路阻抗为  $R + jX$ ,其中电阻  $R$  中还包含了逆变器的损耗, $\dot{U}_L$  为变压器阻抗电压;系统母线电压为  $\dot{U}_S$ 。图中  $\delta$  为  $\dot{U}_S$  领先  $\dot{U}_A$  的角度。在稳态工况下,由于  $\delta$  的存在使 STATCOM 能从交流系统吸收有功功率,补偿其内部的各种损耗并使直流电容器的电压得以维持。在动态过程中, $\delta$  的变化使电容器  $C$  放电或充电,从而逆变器输出电压幅值也发生相应变化,从而达到调节 STATCOM 输出无功功率的大小和性质的目的。

### 4 动态数学模型

系统的三相电压为:

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

式中:  $U_s$  为系统线电压有效值。

STATCOM 产生的电压为三相对称正弦电压,与

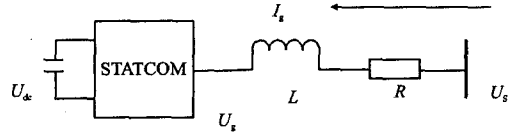


图 4 STATCOM 的原理接线图

系统电压相差角度为  $\delta$ ,直流侧电压幅值为  $U_{dc}$ ,调制比为  $K$ ,交流侧相电压有效值为  $KU_{dc}$ ,其表达式如下:

$$\begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} = KU_{dc} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \delta) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \delta\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \delta\right) \end{bmatrix}$$

由简化电路可知电压回路方程为:

$$L \frac{di_{abc}(t)}{dt} = u_{sabc} - u_{gabc} - Ri_{abc} \quad (1)$$

由能量守恒可得:

$$CD_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = u_{ga}i_a + u_{gb}i_b + u_{gc}i_c \quad (2)$$

由(1)(2)联立可得 ABC 坐标系下的动态时域数学模型。由于比较复杂,通过坐标变换将三相交流量变成旋转坐标系(d-q)下的直流量。其变换矩阵为:

$$Y = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \omega t & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

将其带入(1)(2)进行 dq 变换得:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L}u_{sd} - \frac{R}{L}i_{sd} - \frac{1}{L}K_d U_{dc} + \omega i_{sq} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L}u_{sq} - \frac{R}{L}i_{sq} - \frac{1}{L}K_q U_{dc} + \omega i_{sd} \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}K_d i_{sd} + \frac{1}{C}K_q i_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $K_d$ 、 $K_q$  为同步坐标系下的开关函数控制变量  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 、 $i_{sq}$ 、 $i_{sd}$  分别为同步坐标系下电网电压和电流的 dq 轴分量,即通过坐标变换后三相交流量变成旋转坐标系下的直流量。

### 5 控制策略

STATCOM 的主要作用是对电力系统的无功功率进行控制,维持控制点及其附近区域的电压稳定,防止系统发生电压崩溃,提高电力系统的电压稳定性。其控制目标主要有 2 个:校正系统功率因数和调节系统电压。这两种目标都是通过向系统注入无功电流来实

现,但针对不同的用途,各种控制策略不尽相同。目前展开研究的控制策略主要包括基于比例的系统电压控制、基于PI的无功功率控制、PID控制、PID+PSS控制、逆系统PI控制、微分代数控制、非线性鲁棒控制、滑模变结构控制、模糊控制、递归神经网络自适应控制等<sup>[3]</sup>。神经网络自适应控制方法不依赖于系统模型的建立,但是它有时性不好,网络结构难确定等缺点;其余几种方法均是对非线性系统进行线性化,其中微分代数控制方法中微分方程和代数方程的联立求解过程太复杂,鲁棒自适应控制方法中权系数的正确选择很困难。因此,实际应用中以PI控制居多。

由无功电流(或无功功率)参考值调节STATCOM产生所需无功电流的具体控制方法,可以分为直接电流控制和间接电流控制两大类。直接电流控制就是采用跟踪型PWM控制技术对电流波形的瞬时值进行反馈控制。这种方法适用于中小容量的STATCOM的控制;间接控制是通过STATCOM逆变器所产生交流电压基波分量的相位和幅值来间接控制STATCOM的交流侧电流。该方法适用于较大容量STATCOM。

下面简略介绍一种直接电流控制方法。采用非线性解耦控制策略。

从式(3)不难看出,若以开关函数( $K_d, K_q$ )为输入,交流网侧电流( $i_{sd}, i_{sq}$ )为输出,则该模型是一个多较入、多输出的非线性耦合系统模型。当前大都是将电力系统非线性模型用相关方法在某个运行点线性化,再对得到的线性化模型设计的控制器。本方法采用反馈线性化方法对模型线性化。

非线性系统反馈线性化理论的基本思路<sup>[4]</sup>:就是选择适当的非线性坐标变换 $z = T(x)$ 和非线性状态反馈量 $v = \alpha(x) + \beta(x)u$ ,从而使非线性系统得以在大范围甚至在全局范围内线性化,对于多变量非线性系统,实现线性化的同时又实现了解耦。

根据以上理论,在考虑 $U_{dc}$ 为恒定值条件下,选取状态变量 $x = [x_1, x_2] = [i_{sd}, i_{sq}]$ 输入变量 $u = [u_1, u_2] = [K_d, K_q]$ 可将式(3)写成两输入两输出的仿射非线性数学模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g_1[x(t)]u_1 + g_2[x(t)]u_2 \\ y_1 = h_1[x(t)] \\ y_2 = h_2[x(t)] \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 + \omega x_2 + \frac{1}{L}u_{sd} \\ -\frac{R}{L}x_2 - \omega x_1 + \frac{1}{L}u_{sq} \end{bmatrix} g_1(x) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}U_{dc} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L}U_{dc} \end{bmatrix} h_1[x(t)] = i_{sd} h_2[x(t)] = i_{sq}$$

式中相关阶次等于状态方程阶次,满足线性化条件,根据式(4)输出方程 $y_1$ 和 $y_2$ ,可得非线性坐标变换为:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}$$

通过坐标变换期望得到如下解耦的线性系统

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -k_1 z_1 + k_1 v_1 \\ \dot{z}_2 = -k_2 z_2 + k_2 v_2 \end{cases} \quad (5)$$

$v_1, v_2$ 为线性系统反馈控制变量。

联立式(4)和(5)的原非线性系统的反馈解耦控制量

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \frac{L}{U_{dc}} \begin{bmatrix} \frac{1}{L}u_{sd} - \frac{R}{L}x_1 + \omega x_2 - k_1(v_1 - x_1) \\ \frac{1}{L}u_{sq} - \frac{R}{L}x_2 + \omega x_1 - k_2(v_2 - x_2) \end{bmatrix}$$

此即为换流器实现非线性反馈线性化的控制量。利用线性系统最优控制原理求得反馈控制变量 $v_1, v_2$ 分别对应有功和无功电流以实现二者的解耦控制。其控制器结构图如图5所示。

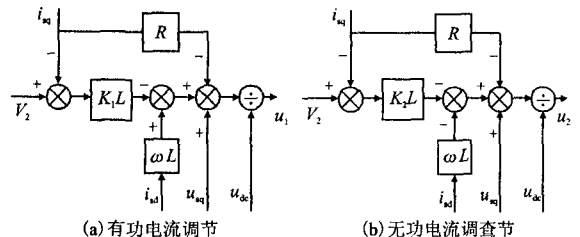


图5 电流解耦控制器结构

### 6 结语

目前研究的热点为VSI-STATCOM上,已投产的静止同步补偿器装置亦全部采用电压型逆变器为主电路,但随着高温超导技术突破性的发展并进入实用化,电流型逆变器的储能效率问题将得以解决,同时电力超导系统中储能线圈具有电流源特性,可直接作为电流型逆变器直流侧储能电感,具有良好的电流保护性能<sup>[5]</sup>,可以预见CSI-STATCOM的应用亦将增多。

在控制领域,随着非线性系统理论的进步,直接对电力系统的非线性模型进行控制器的设计研究也将是热点。

#### 参考文献

[1] 李玉玲. 电流型PWM整流器及其控制策略的研究[J]. 浙江大学, 2006.

II 母线连接线路 L4、L5、L6 没有行波,无模极大值(即模极大值均为 0),由此可以很容易判别出是 I 母故障,进行选择性跳闸。

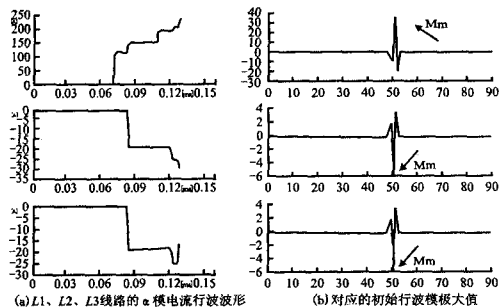


图 7

关于故障仿真的两点补充:

(1) 电压过零点发生故障,理论上故障分量电压为零,故障母线连接出线上没有行波,但是由现场数据搭建的系统模型仿真发现,电压过零点发生故障,故障母线连接的所有出线上的电流行波模极大值会变小,但是极性不变,不影响极性判断。因此进一步验证了理论的正确性与可行性。

(2) 采用克拉克变换,α 模量无法正确判断 BC 两相短路,β 模分量不能正确判断 A 相接地故障,但是只要将 α 模分量和 β 模分量共同作为检测量,即可反映各种类型故障。

### 4 保护实现方案

随着硬件技术的发展,高速采样(高速 A/D),数字信号处理芯片 DSP 和 PLC 在电力系统中越来越广泛的应用,为行波保护提供了硬件支持。

本方案采用 DSP 芯片和 PLC 相配合的方式,实现数据的采集处理与逻辑判断。由 DSP 芯片对采集的大量数据进行小波变换,只有在系统发生故障(即模极大值出现)情况下,DSP 才与 PLC 交换数据,将得到的电力初始行波极性传给 PLC,由 PLC 进行逻辑判断跳闸。软件流程图见图 8。

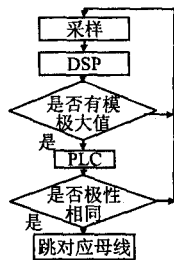


图 8 程序流程图

行波速度极快,在 1~3ms 之内就能完成全部信

息的收集、判断与动作,不受电流互感器饱和和影响。利用小波变换独特的模极大值,只分析初始电流行波的极性,计算量相对较少。基于行波初始电流极性的母线保护,原理简单易实现,快速、灵敏、有选择性、可靠。

### 5 结束语

本文提出的方案不仅可以实现母线保护,如果对模极大值的幅值、极性进一步分析,还可以实现选相、选线及线路保护,还可以根据变电站的具体特点进行功能扩展。

基于小波变换的行波保护,已经引起了继电保护学者的极大兴趣和关注,随着技术的发展,将会有更多的新理论、新方法和新应用需要探索和研究。

### 参考文献

[1] 汪觉恒. 国内外各类母线保护技术性能分析[J]. 电力系统自动化设备, 2000, 20(1): 43-45.

[2] 何正友, 钱清泉. 电力系统暂态信号的小波分析方法及其应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002(5): 1-3.

[3] 王平. 基于小波变换的信号奇异点检测[J]. 机械管理开发, 2005(3): 57-58.

[4] 胡昌华, 等. 基于 MATLAB 6. X 的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.

[5] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

收稿日期: 2007-12-25

作者简介: 崔璐(1982-) 女, 硕士, 新疆大学电气工程学院, 研究方向: 电力系统综合自动化。

晁勤(1959-) 女, 新疆大学电气工程学院教授, 博士生导师. 研究方向: 电力系统综合自动化。

(上接第 52 页)

[2] 栗时平, 刘桂英. 静止无功功率补偿技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[3] 许军山, 张超武, 曾贤虎. 静止同步补偿器原理与应用研究[J]. 移动电源与车辆, 2007: 40-43.

[4] 卢至锋, 张波, 邓卫华. 三相电压型 PWM 整流器非线性解耦控制研究[J]. 电力电子技术, 2005, 39(1): 40-44.

[5] Yang Ye, Member, IEEE, Mehrdad Kazerani, Senior Member, IEEE, and Victor H. Quintana, Fellow, IEEE. Current - Source Converter Based STATCOM: Modeling and Control. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 795-800.

收稿日期: 2008-06-15

作者简介: 李树卿(1985-) 女, 硕士研究生, 研究方向: 是电力系统分析与控制。

史建立(1981-) 男, 硕士研究生, 研究方向: 是电力系统分析与计算。

李世作(1969-) 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电磁兼容技术的研究和教学工作。

张志斌(1982-) 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与计算。