

# 三角波移相电流控制法及其在 STATCOM 中的应用

王心琦, 张代润, 杨柳柳

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 将载波移相正弦脉宽调制 (CPS-SPWM) 电压控制法中的载波移相方法应用到三角波比较电流控制法中形成一种新的控制方法——三角波移相电流控制法。通过简化模型的 simulink 仿真结果详细介绍了三角波移相电流控制法的基本原理。通过 simulink 仿真, 论述了三角波移相电流控制法应用于 STATCOM 的可行性及优越性。对比了采用 CPS-SPWM 电压控制法和采用三角波移相电流控制法的 STATCOM 在输出电流和暂态响应上的不同。

**关键词:** STATCOM; CPS-SPWM 电压控制; 三角波移相电流控制

**Abstract:** The feasibility of CPS-SPWM voltage control applied to the carrier phase-shift current control method is discussed. Through the simulink simulation results of the simplified model, the basic principles of carrier phase-shift current control are introduced in detail. Through simulink simulation, the feasibility and superiority of the carrier phase-shift current control are discussed when being applied to STATCOM. The differences in output current and transient response are compared when CPS-SPWM voltage controlling STATCOM and when the carrier phase-shift current controlling STATCOM.

**Key words:** STATCOM; CPS-SPWM voltage control; carrier phase-shift current control

**中图分类号:** TM861 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0044-05

静止同步补偿器 (STATCOM) 与传统的电容器组、电抗器组、调相机等传统无功补偿装置及静止无功补偿装置 (SVC) 均不同, 而是按调相机原理, 由新型大功率固体电子元件构成的可调节逆变器、直流电容器组和输出变压器等组成的无转动结构的静止无功补偿装置。静止同步补偿器 (STATCOM) 较传统的无功发生装置具有响应速度快、运行范围宽、吸收无功连续、谐波电流小、损耗低等明显的优点<sup>[1]</sup>, 故其在电力系统中的应用得到广泛的关注。

目前 STATCOM 的控制策略主要分为电流间接控制和电流直接控制。

间接电流控制方法通过控制逆变器所产生的交流电压基波相位与系统侧电压相位的相位差  $\delta$  来控制 STATCOM 发出的无功功率和吸收的有功功率。稳态时 STATCOM 发出的无功功率和吸收的有功功率分别如式 (1) 和式 (2)<sup>[2]</sup> 所示,  $U_s$  为相电压有效值。由式 (2) 可知当  $\delta$  为正时 STATCOM 发出无功功率,  $\delta$  为负时吸收无功功率。由式 (1) 可知无论  $\delta$  为正还是为负 STATCOM 都吸收有功功率。

$$P = -\frac{3U_s^2}{R} \sin^2 \delta \quad (1)$$

$$Q = -\frac{3U_s^2}{2R} \sin^2 \delta \quad (2)$$

在大容量的 STATCOM 中, 电流间接控制应用得较多, 因为受主电路结构和开关频率的制约, 在大容量的情况下直接电流控制法无法对电流波形进行精确跟踪控制。针对电流间接控制, 目前已研究出了多种主电路结构。比如多重叠加结构和多电平结构, 其中多电平结构又分为二极管钳位式多电平结构、飞跨电容钳位式多电平结构及级联式多电平结构<sup>[3]</sup>。其中主电路结构采用级联式多电平结构, 器件级控制采用载波移相正弦脉宽调制的 STATCOM 目前正受到广泛的关注, 简称 CPS-SPWM 级联多电平 STATCOM。CPS-SPWM 技术的基本思想是 (以一相为例): 在变流器单元数为 N 的级联型逆变器中, 各逆变器单元采用共同的调制波信号  $U_s$ , 其频率为  $\omega_s$  逆变器单元的三角载波频率为  $k\omega_s$  将各三角载波的相位互相错开一定的角度, 那么级联逆变器的输出电压就能得到多电平的输出波形。CPS-SPWM 技术是一种适用于大功率电力开关变流器的优秀调制策略, 能够在较低的器件开关频率下实现较高等效开关频率的效果, 不但使 SPWM 技术应用于特大功率场合成为可能, 而且在提高装置容量的同时, 有效地减小输出谐波, 提高了整个装置的信号传输带宽。除此之外, 该技术还具备输入输出线性度好、控制性能优越等一系列优点<sup>[4]</sup>。

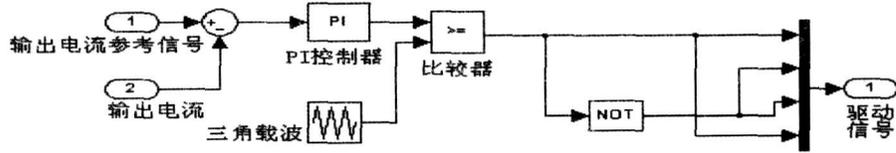


图 1 三角波比较电流控制法驱动电路

直接电流控制具有控制精度高, 暂态响应迅速的优点。但是其需要较高的器件开关频率来减小输出电流的误差范围, 开关频率越高, 输出电流误差越小, 谐波越少。目前在三角波比较电流控制法和电流滞环控制法中至少需要 50 kHz 的频率才能把 THD 限制在 5% 以下。GTO 和 IGBT 达不到这么高的开关频率。目前 IGBT 的开关频率可以达到 50 kHz。但对于大功率逆变器场合, 大功率开关器件的功率处理能力和开关频率之间往往存在着矛盾, 通常功率越大开关频率越低。因此在大容量的 STATCOM 中, IGBT 的开关频率也不可能达到 50 kHz。目前常用的单个 IGBT 的耐压值只有 600~1 500 V, 连续集电极电流 ( $I_c$ ) 在 20~320 A。 $I_c$  越大的 IGBT, 其耐压值越低。无论采用三相桥的主电路结构还是三单相桥的主电路结构, 采用直接电流控制的 STATCOM 的容量受开关器件的制约都无法达到很大的容量。综上所述, 开关频率和输出容量是限制直接电流控制的 STATCOM 发展和应用的两大瓶颈。

下面将提出一种适用于大容量 STATCOM 的直接电流控制方法, 该方法能有效减少输出电流谐波, 从而使该方法可以使用在低开关频率下。并使用 simulink 搭建仿真模型, 解释其工作原理。验证该控制方法应用于 STATCOM 的可行性, 并与 CPS-SPWM 级联式 STATCOM 进行性能对比。

### 1 三角波移相电流控制法

CPS-SPWM 级联多电平 STATCOM 的显著优点是等效开关频率高和输出容量大。那么把 CPS-SPWM 级联多电平 STATCOM 的主电路结构和 CPS-SPWM 控制方法中的载波移相法应用到直接电流控制中, 是否也会带来很多好处呢? 目前直接电流控制的方法有很多种, 常用的有滞环比较方式、三角波比较方式、次振荡方式、输出电流预测方式、同步采样方式等。很明显, 只有三角波比较方式中有载波这一概念。CPS-SPWM 级联多电平 STATCOM 是在每一相

把同一个系统电压作为调制波与 N 个相位依次相差 ( $180^\circ/N$ ) 的载波比较, 结果作为 N 个串联的逆变桥的驱动脉冲<sup>[3]</sup>, 其输出电压基波就为与调制波同频率的正弦波。在三角波比较电流控制方式中, 当每相有 N 个单独的 H 逆变桥的时候, 用参考电流值与输出电流值比较, 比较的结果再去和 N 个相位依次错开一定角度的载波相比较, 结果分别用来驱动 N 个逆变桥, 使输出电流向参考电流靠近。各载波依次错开的角度为  $360^\circ/N$ , 这种电流跟踪控制法称为三角波移相电流控制法。

### 2 用简化模型分析三角波移相电流控制法的工作过程

三角波移相电流控制法的主电路为串联了 4 个 H 逆变桥的单相逆变器, 依次命名为逆变桥 1、2、3、4, 每个逆变桥直流侧为 50 V 直流电源。传统三角波比较电流控制法的主电路为 1 个 H 逆变桥, 逆变桥直流侧为 100 V 直流电源。三角波移相电流控制法的主电路中每个逆变桥采用一个如图 1 所示的驱动电路来驱动, 只是每个 H 逆变桥的驱动电路中的三角载波依次相差  $90^\circ$  ( $360^\circ/4$ )。两种控制方法均设定输出电流参考信号为幅值 50 A 的直流电流。

图 2 为三角波移相电流控制法和传统三角波比较电流控制法的仿真结果, 图 2(a)、(d) 为 0.006~0.0065 s 这段时间内两种控制方式的输出电流和输出电压对比图, 图 2(e)、(f) 为两种控制方式的输出电流在 0~0.03 s 内的概览图, 0.03 s 后电流一直保持稳定。图 2(a) 为三角波移相电流控制逆变器的输出电流, 图 2(b) 为传统三角波比较电流控制逆变器的输出电流, 图 2(c) 为三角波移相电流控制逆变器的输出电压, 图 2(d) 为传统三角波比较电流控制逆变器的输出电压。从图 2(a)、(b) 的对比可以发现, 三角波移相电流控制法的输出电流相对于传统三角波电流控制法的输出电流有了明显的不同, 其纹波减小得非常明显。

图 2(g) 为  $6.3 \times 10^{-3}$  s 至  $6.45 \times 10^{-3}$  s 内三角

波移相电流控制法逆变器工作过程。这里详细介绍逆变桥 1 和逆变桥 3 的工作过程, 逆变桥 2 和逆变桥 4 的工作过程类似。图 2(m) 为三角波移相电流控制逆变器的输出电压, 图 2(k) 为三角波移相电流控制逆变器的输出电流。输出电流纹波峰峰值在 0.1 A 左右, 较之于传统三角波比较电流控制逆变器输出电流纹波峰峰值 2 A 减小了很多。下面就来深入分析这种控制方法的原理。图 2(g) 为逆变桥 1 输出电流与参考电流的差值 (曲线 1) 与三角载波 (曲线 2) 的比较图, 图 2(f) 为逆变桥 3 输出电流与参考电流的差值 (曲线 1) 与三角载波 (曲线 2) 的比较图, 图 2(i) 为逆变桥 1 左桥臂上开关管的开关脉冲, 图 2(j) 为逆变桥 3 左桥臂上开关管的开关脉冲。从图中可以看出, 在  $6.4 \times 10^{-3}$  s 时, 输出电流大于参考电流, 输出电流与参考电流差值为负。因为逆变桥 1 的载波与逆变桥 3 的载波相差  $180^\circ$ , 所以逆变桥 1 的载波从下往上与差值相交, 而逆变桥 3 的载波从上往下与差值相交, 此时必然是逆变桥 1 的载波先与差值相交, 相交后因为载波大于差值, 逆变桥 1 输出一个负向的电压, 且此时逆变桥 3 的前一个负向电压还未结束, 因此, 输出电压就为逆变桥 1 和逆变桥 3 两个负向电

压相加的电压  $-100$  V。在很短的一段时间以后, 逆变桥 3 的载波从上往下与差值相交, 载波小于差值, 逆变桥 3 输出正向的电压, 使输出电压为 0, 输出电流停止变化。直到下一个载波周期逆变桥 1 和逆变桥 3 又产生下一个脉冲电压。一个载波周期内, 逆变桥 1 和逆变桥 3 产生的很短的那一个负电压脉冲, 使输出电流从大于参考电流变成小于参考电流, 但是由于脉冲很短, 输出电流不会小于参考电流太多。在载波周期的大部分时间内, 输出电流都保持在离参考电流很接近的一个值并且不会变化, 有效地避免了载波频率较低情况下传统三角波比较电流控制法中每个载波周期内输出电压只有两电平致使输出电流偏离参考电流较多的问题。由图 2(k) 和 (m) 可以看出, 当输出电流偏离参考电流比较多时, 输出电压的脉冲也会变宽。逆变桥 1、3 在一个载波周期内会产生两个负脉冲输出电压, 逆变桥 2、4 在一个载波周期内会产生两个正脉冲输出电压, 这样在一个载波周期内输出电压的脉动频率就变成了 2 倍载波的频率, 每个逆变桥在每个载波周期内却只动作 1 次。

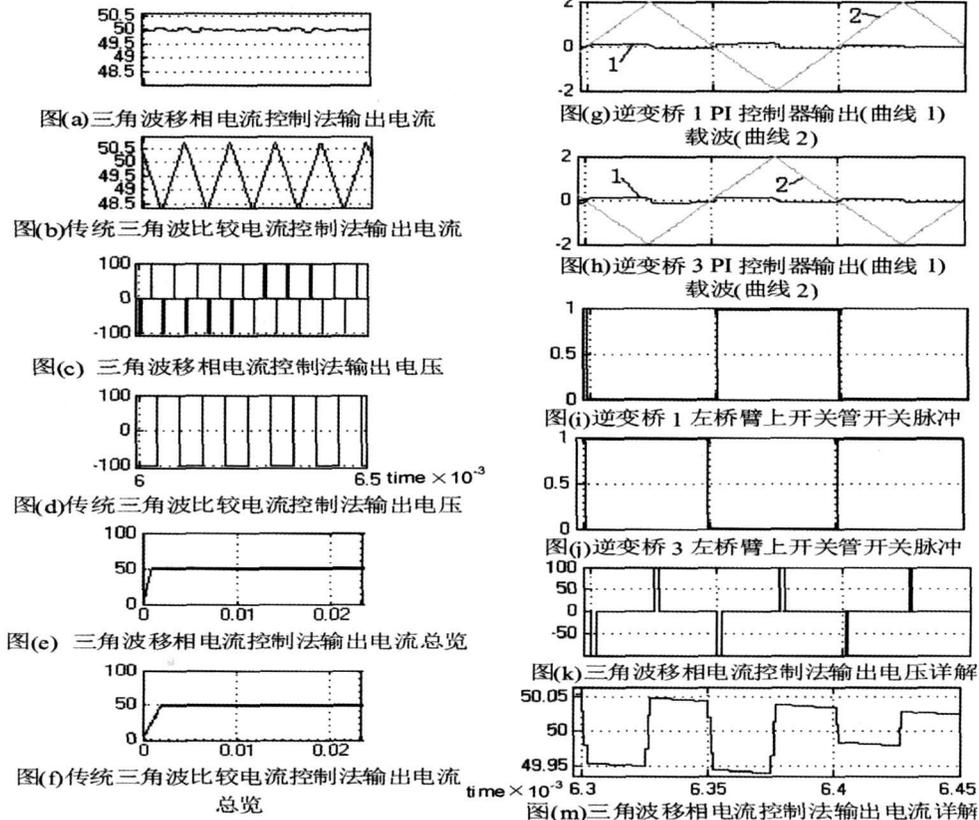


图 2 三角波移相电流控制法与传统三角波移相电流控制法输出结果比较

### 3 三角波移相电流控制法应用于 STATCOM

主电路采用每相 4 个 H 逆变桥, 星形接线组成三相逆变器。检测负载三相电流电压, 通过派克变换得到  $i_d, i_q, i_\omega$ , 把  $i_q$  进行派克反变换就得到参考电流。  $i_q$  在 0.2 s 时, 从 -40 A 变成 40 A。每个逆变桥的三角载波频率都为 10 kHz, 不控制直流侧电压。系统侧电压为 10 kV, STATCOM 通过 Y-Y 变压器与系统连接, 变压器低压侧与系统侧变比为 1 比 7。

变压器低压侧与 STATCOM 相连, 其低压侧电压有效值为 1 429 V, 峰值为 2 000 V, 每个 IGBT 承受的电压在 500 V 左右。当  $i_d$  为 40 A 时, STATCOM 输出电流峰值为 40 A, 有效值为 28.3 A。输出容量为 120 kvar 左右。真实设计电路时需要考虑一定的裕度。目前,  $V_{ce}=900$  V,  $I_c=60$  A 的 IGBT 比较多, 而且价格也很便宜, 因此这种电路结构具有很大的实用性。

图 3(a) 中 A 相系统侧电压和图 3(b) 中 A 相输出电流始终有绝对值  $90^\circ$  的相位差。0.2 s 前输出容性无功, 0.2 s 之后输出感性无功。图 3(c) 为 A 相电流暂态响应详图, 因为是电流直接控制, 其响应速度非常快, 为 1 ms 左右。

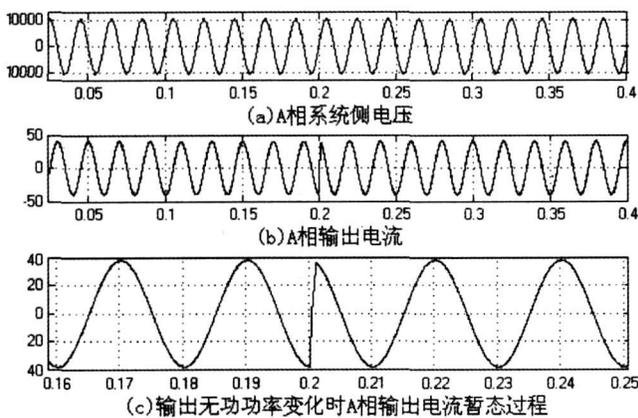


图 3 STATCOM 三相输出电流

谐波次数	谐波幅值	谐波次数	谐波幅值
399	0.05	1199	0.01
401	0.06	1201	0.01
799	0.07	1203	0
801	0.07	1599	0.01
1197	0.02	1601	0.02

图 4 为稳态时 STATCOM 的 A 相输出电流波形的傅立叶分析。傅立叶分析的范围为 0.1~0.2 s 的 5 个周期。基波未显示完全, 因为基波的值超出了纵坐标的显示范围。因为载波为 10 kHz (400 次基波), 因此其特征谐波在 400、800、1 200、1 600 次附近, 除去 30 次以下的谐波, 其他谐波主要集中在 2 倍载波频率整数倍附近的特征谐波中, 这样可以很方便地设计输出滤波器。傅立叶分析图的纵坐标为谐波幅值, 横坐标为谐波次数。THD=0.65%, 远远低于 5%。

### 4 与 CPS-SPWM 级联 STATCOM 的对比

采用每相 4 个 H 逆变桥, 搭建与第 3 节中相同的主电路结构的 STATCOM, 采用 CPS-SPWM 控制, 输出电压为 9 电平。其系统侧电压与第 3 节所讨论的电流直接控制 STATCOM 相同, 载波频率也相同。在 0.5 s 时, 输出无功功率从 -75 kvar 变成 60 kvar, A 相输出电流暂态响应如图 5 所示。其响应时间长达 80 ms 左右。若输出功率从 -120 kvar 变成 120 kvar 则响应时间会更长。控制方式为电压控制的 STATCOM, 输出无功变化以后, 输出电压的变化需要在电容缓慢放电以后才能变化, 因此动态响应速度一般都较慢, 且动态响应速度与电容的大小有关系。动态响应速度慢有可能导致系统失去稳定。

CPS-SPWM 控制的 9 电平 STATCOM 的输出电流经傅立叶分析其 THD 为 2.11%, 虽小于 5%, 但比所提出的电流控制方式输出电流的 THD 大得多。当载波频率降低或连接电抗器的电抗降低时, 其输出电流 THD 会上升得比所提出的电流控制方式 STATCOM 的输出电流 THD 要快。

CPS-SPWM 控制的 9 电平级联式 STATCOM, 因为采用电流间接控制, 对于其主电路输出电压的研究都是在直流侧电压稳定的情况下进行的。因此, 要得到理想的输出电压波形, 需要直流侧电压稳定。但是

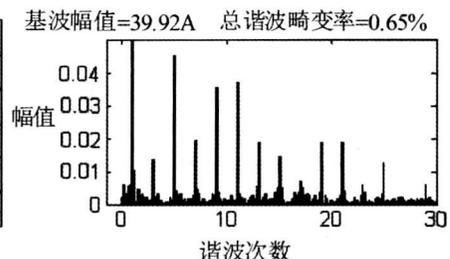


图 4 A 相稳态输出电流波形的傅立叶分析

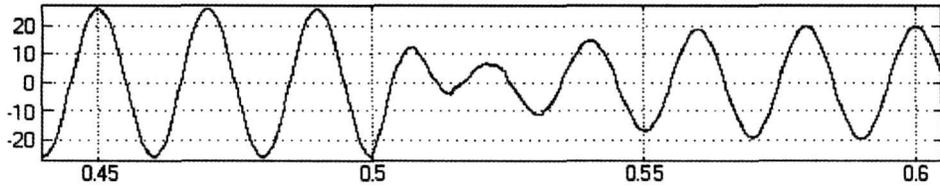


图 5 A 相输出电流暂态响应

在 STATCOM 运行的过程中,直流侧电容在不停地释放和吸收能量,因此其直流侧电压必然是一个脉动的波形。为了不至于对输出的电压波形有太大的影响,直流侧电容必须按恰当的方式选择<sup>[5]</sup>。间接电流控制方法的 STATCOM 中,主要调节输出电压的相位与系统电压的相位差  $\delta$  来控制 STATCOM 输出的无功功率和吸收的有功功率,调节  $\delta$  时电容电压在暂态过程中自己达到新的稳定值,由于电容是储能元件,电压的变化需要有能量交换的过程,其动态响应较慢。也有采用同时控制  $\delta$  和 PWM 调制比的双变量协调控制加快 STATCOM 的暂态响应速度<sup>[6]</sup>,但是会带来谐波等新的问题。在 CPS-SPWM 级联多电平 STATCOM 中,由于每个逆变桥的直流侧都有独立的电容,理想状态下稳态运行中所有逆变桥的直流侧电容电压是相同的,但是实际情况中因为每个逆变桥的开关器件的开关损耗、吸收回路的损耗及脉冲延时均有不同,会造成各个逆变桥的直流侧电容电压的不平衡<sup>[7]</sup>。需要采取措施使每个逆变桥直流侧电容电压平衡才能使 STATCOM 输出需要的波形。而三角波移相电流控制法就不存在这些问题,从而简化了控制方法。

## 5 结论

综上,采用三角波移相的电流直接控制相对于传统三角波比较电流控制法,其输出电流的改善是相当明显的。由于每相有  $N$  个 H 逆变桥串联,相对于传统三角波比较电流控制法的主电路,这种主电路结构使整个装置的输出容量大幅度提升了。在每相有  $N$  个 H 逆变桥串联的情况下,输出电压的等效波动频率为  $(N/2)f_c$   $f_c$  为载波频率。采用三角波移相电流控制比 CPS-SPWM 控制具有以下几个优点:①输出电流谐波畸变小;②直流侧电压波动对输出电压影响

小;③暂态响应速度快。需要注意的是,在每相串联的 H 逆变桥个数相同的情况下,其输出电压的脉动频率没有 CPS-SPWM 高,为 CPS-SPWM 法的一半。从三角波移相的电流控制法的原理可以推断出,其主电路每相必须采用偶数个 H 逆变桥串联,每两个载波相位相差  $180^\circ$  的逆变桥组成一对,而 CPS-SPWM 控制法则不存在这个问题。

## 参考文献

- [1] 姜齐荣. 新型静止无功发生器建模及其控制的研究 [R]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 1997.
- [2] 罗承廉, 纪勇, 刘遵义. 静止同步补偿器 (STATCOM) 的原理与实现 [M]. 中国电力出版社, 2005.
- [3] 刘凤君. 多电平逆变技术及其应用 [M]. 机械工业出版社, 2007.
- [4] 许湘莲. 基于级联多电平逆变器的 STATCOM 及其控制策略研究 [R]. 华中科技大学, 2006. 7.
- [5] 欧开健. STATCOM 直流侧电容值对系统谐波含量和电容电压波动幅值的影响及其选择 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 6-8.
- [6] 马献鸿, 同向前, 李峰. SPWM 型 DSTATCOM 的双变量协调控制 [J]. 电力电子技术, 2005, 39(1): 29-31.
- [7] 耿俊成, 刘文华, 袁志昌. 链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究 (一) 仿真和试验 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 53-57.

## 作者简介:

王心琦, 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

张代润, 男, 教授, 研究方向为电能质量控制技术, 非线性电路功率理论及其应用。

杨柳柳, 女, 大学本科, 乐山电业局修试所安监科, 从事安全管理工作。

(收稿日期: 2009-04-23)

# 节约能源 保护环境