

# 新型三电平拓扑的无功补偿器控制研究

岳 艳,周剑君

(大盛微电科技股份有限公司,河南 许昌 461000)

**摘要:**分析了传统二极管箝位型三电平无功补偿器的原理,指出其存在器件耐压水平低、功率等级低的缺点。提出一种新型的 T 型三电平拓扑无功补偿器,通过开关器件的串联提高耐压水平与功率等级。采用电网电压定向的矢量控制策略对有功无功电流进行解耦控制,引入零序电压注入的中点电压控制方案实现正负母线的均压。通过搭建仿真模型验证了所提方案的有效性,实现了无功电流的快速补偿。

**关键词:**三电平拓扑;无功补偿器;矢量控制;零序电压

**Abstract:** The principle of traditional diode-clamped three-level reactive power compensator is analyzed, which has the disadvantages of low voltage-withstand level and low power level. A new kind of reactive power compensator based on T-type three-level topology is proposed, which can improve the voltage-withstand level and power rating through the series of switch devices. Grid voltage oriented vector control strategy is adopted for decoupling control of active and reactive current. The neutral-point voltage control scheme which introduces zero sequence voltage injection is used to achieve the voltage-sharing of positive and negative buses. The established simulation model of the reactive power compensator proves the validity of the proposed control strategy, which achieves the fast compensation of reactive current.

**Key words:** three-level topology; reactive power compensator; vector control; zero sequence voltage

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)05-0032-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.05.007

## 0 引言

电力系统配电网的迅速发展带来诸多问题,例如电网电压畸变、三相负载不平衡、谐波含量大等问题。无功补偿器 SVG 是新一代柔性输电装置,可以向电网提供精确、快速的无功补偿,支撑电网电压。国内外多电平 SVG 产品的拓扑结构可分为 3 类:三电平拓扑、飞跨电容多电平拓扑和 H 桥级联拓扑。其中,三电平 H 桥级联拓扑得到广泛应用,飞跨电容拓扑则由于结构复杂应用较少。

目前,三电平拓扑 SVG 主要采用二极管箝位型结构,其特点是依靠二极管对中点进行箝位,实现三电平的输出,达到改善 PWM 电压正弦度、降低电流谐波的效果。国内对此种拓扑 SVG 的理论研究、产品应用均取得了较多成果。文献 [1-2] 针对二极管箝位型三电平拓扑 SVG,利用电力电子仿真软件详细研究了有功无功解耦算法、SVPWM 调制算法等,在理论上论证了三电平 SVG 的优越性。文献 [3] 采用二极管箝位型三电平拓扑,针对 380 V 电网电压,对 SVG 的主回路选型、控制算法等进行详

细设计,并制造出样机对无功补偿效果进行了深入研究。

下面提出一种新型三电平拓扑 SVG,采用了两管 IGBT 串联的 T 型拓扑结构,可提高交流侧耐压等级与功率。在  $dq$  坐标系下,采用电网电压定向的矢量控制策略,进行电网电压前馈计算,实现有功无功电流的解耦控制。同时,采用 PI 控制器实时计算零序电压对中点电压进行平衡控制,实现正负母线的均压。

最后,搭建了 690 V 三电平 SVG 的 Matlab 仿真模型,给出主电路、控制系统参数。仿真结果显示,无功电流的响应速度快,输出电流 THD 效果好。

## 1 三电平 SVG 的电路结构

图 1 中: $L$  为进线电抗器; $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ 、 $u_{sc}$  为电网电压;SVG 输出电压分别为  $u_{ca}$ 、 $u_{cb}$ 、 $u_{cc}$ ;SVG 补偿电流分别为  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 。

采用双管 IGBT 串联的 T 型三电平结构,它与二极管箝位三电平结构的差异在于:取消了箝位二极管,将中点改为 IGBT 开关器件换流,对 IGBT 进

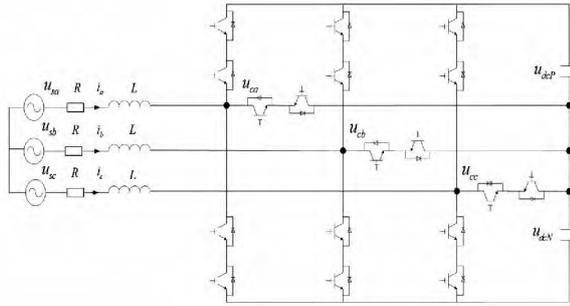


图 1 三电平 SVG 的电路结构图

行控制实时切换;同时,在正负电平中采用两管 IGBT 串联。这种结构的优点是,正负电平环路中每个 IGBT 所承受的正向阻断电压为 1/4 母线电压,提高了器件的耐压能力与交流侧输出电压。

## 2 三电平 SVG 的控制方案

### 2.1 SVG 无功电流控制方案

如图 1 所示,三电平 SVG 可等效成三相电压型 PWM 整流器,列出其在三相静坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = u_{sa} - i_a R - u_{ca} \\ L \frac{di_b}{dt} = u_{sb} - i_b R - u_{cb} \\ L \frac{di_c}{dt} = u_{sc} - i_c R - u_{cc} \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)进行 park 变换,可得其在 dq 坐标系下的数学模型为

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

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  为 SVG 的交流侧电压分量;  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  为电网电压分量。

采用电网电压定向的矢量控制策略<sup>[4]</sup>,即 d 轴定向于电网电压矢量  $u_s$  的方向上,则 d 轴分量为有功分量, q 轴分量为无功分量。

式(2)可化为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = \omega Li_q + u_{sd} - u_d \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = \omega Li_d + u_{sq} - u_q \end{cases} \quad (3)$$

式中 dq 轴电流的一阶微分方程除受电压分量  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 、 $u_d$ 、 $u_q$  的影响外,还受电流的交叉耦合项  $\omega Li_d$ 、 $\omega Li_q$  的影响。

将式(3)改写为

$$\begin{cases} u_d = -u'_d + \Delta u_d + u_{sd} \\ u_q = -u'_q + \Delta u_q + u_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases} u'_d = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d \\ u'_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q \end{cases} \begin{cases} \Delta u_d = \omega Li_q \\ \Delta u_q = -\omega Li_d \end{cases}$$

根据式(4)可得到 dq 轴电流的一阶微分方程,列出传递函数,设计出电流基波闭环控制方案。 $\Delta u_d$ 、 $\Delta u_q$  是电流交叉耦合的补偿项;电网电压  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  可做前馈补偿项;  $u_d$ 、 $u_q$  为基波调制波的 dq 分量。电流外环 d 轴有功指令可通过直流电压闭环控制得到。一般无功电流 q 轴指令的产生方式有多种,可以手动设置 q 轴指令、无功功率闭环产生 q 轴指令、电网电压闭环产生 q 轴指令等。

### 2.2 中点电压控制方案

由于三电平拓扑采用正负直流母线的特点,正负母线电压  $u_{dep}$ 、 $u_{den}$  需要进行均压控制。这是因为硬件参数差异、负载波动、算法缺陷等原因会导致  $u_{dep}$ 、 $u_{den}$  电压的不均衡,即中点电压会发生偏移,并对器件形成损坏隐患。目前,中点电压平衡控制主要有两种方案:一是硬件方案,通过施加中点电压平衡电路实现中点电压的平衡;二是软件算法方案,常见的有平衡因子法、滞环算法、零序电压注入法等<sup>[5]</sup>。

考虑到载波脉宽调制(carrier-based pulse width modulation, CBPWM)方案算法结构易于实现,可与 SVPWM 调制等效,于是在 CBPWM 基础上叠加零序电压实现对正负母线的均衡控制效果。以下通过实时采集  $u_{dep}$ 、 $u_{den}$ 、 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  变量,采用 PI 调节器计算出零序电压分量注入到基波调制波。

首先,要对中点电压的数学模型、传递函数进行推导计算和理论分析。

假设 SVG 输出的三相基波调制波为  $v_{sa}$ 、 $v_{sb}$ 、 $v_{sc}$ , 输出电流为  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 。

$$\begin{cases} v_{sa} = v_m \cos(\alpha) \\ v_{sb} = v_m \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ v_{sc} = v_m \cos(\alpha + 2\pi/3) \end{cases} \begin{cases} i_a = i_m \cos(\alpha - \beta) \\ i_b = i_m \cos(\alpha - 2\pi/3 - \beta) \\ i_c = i_m \cos(\alpha + 2\pi/3 - \beta) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $v_m$  为三相电压的幅值;  $i_m$  为三相电流的幅值;  $\beta$  为功率因数角。

对于离散化 CBPWM,通常利用一个载波周期的等效作用效果来计算中点电流。一个  $T_r$  中,中点电流的公式可写为

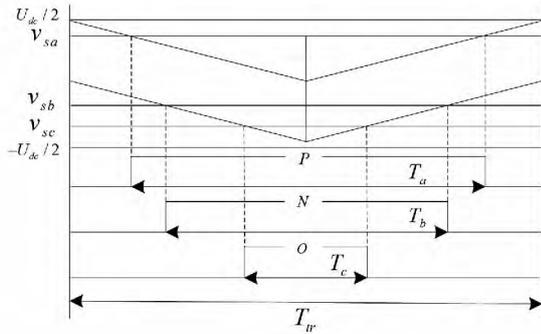


图2 一个载波周期内电平作用时间

$$i_{z1} = \frac{i_a T_{a0} + i_b T_{b0} + i_c T_{c0}}{T_s} = (1 - \frac{|v_{sa}|}{U_{dc}/2}) i_a + (1 - \frac{|v_{sb}|}{U_{dc}/2}) i_b + (1 - \frac{|v_{sc}|}{U_{dc}/2}) i_c \quad (6)$$

当注入的零序电压为  $v_z$  时,则中点电流为

$$i_{z2} = \frac{i_a T'_{a0} + i_b T'_{b0} + i_c T'_{c0}}{T_s} = (1 - \frac{|v_{sa} + v_z|}{u_{dc}/2}) i_a + (1 - \frac{|v_{sb} + v_z|}{u_{dc}/2}) i_b + (1 - \frac{|v_{sc} + v_z|}{u_{dc}/2}) i_c \quad (7)$$

由于三相星型系统  $v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$  与  $i_a, i_b, i_c$  之和均为0,式(8)为

$$\begin{cases} i_{z1} = -\frac{|v_{sa}|}{U_{dc}/2} i_a - \frac{|v_{sb}|}{U_{dc}/2} i_b - \frac{|v_{sc}|}{U_{dc}/2} i_c \\ i_{z2} = i_{z1} - \text{sgn}(v_x) \frac{4v_z i_x}{U_{dc}} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $v_x$  为三相调制波中与其他两相符号相反的调制波;  $i_x$  为与  $v_x$  同相的电流;  $\text{sgn}()$  为符号函数。

通过式(8)可得中点电流、电压的传递函数框图,如图3所示。

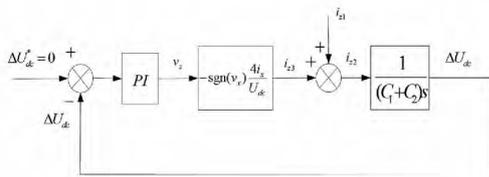


图3 系统传递函数框图

图3中,PI为所设计的中点电压控制器。结合图3、公式(8),可得  $\Delta U_{dc}, v_z$  的一阶微分公式为

$$v_z = (\frac{U_{dc}}{-\text{sgn}(v_x) 4i_x}) (\frac{C_1 + C_2}{dt} \Delta U_{dc} - \frac{i_{z1} U_{dc}}{-\text{sgn}(v_x) 4i_x}) \quad (9)$$

系统的开环传递函数如下:

$$G_z(s) = (\frac{-\text{sgn}(v_x) 4i_x}{U_{dc}}) \frac{1}{(C_1 + C_2)s} G_{PI}(s) \quad (10)$$

其次要根据系统传递函数,设计合适的PI调节器,改善系统的动态、稳态响应效果。

在式(10)中,设:

$$G_{iv}(s) = -\text{sgn}(v_x) \frac{4i_x}{U_{dc}} \quad (11)$$

可见,  $G_{iv}(s)$  是一个符号、幅值可变的函数,并且其幅值与功率因数关联。即,当SVG运行于容性、感性不同的功率因数时,  $-\text{sgn}(v_x) i_x$  的符号不固定。

因此,设计了一种符号、幅值可动态调节的PI调节器,消  $G_{iv}(s)$  的符号特性,获得稳定的闭环传递函数。

PI调节器参数如下:

$$\begin{cases} K_p = [-\text{sgn}(v_x) \frac{4i_x}{U_{dc}}] k \\ K_i = [-\text{sgn}(v_x) \frac{4i_x}{U_{dc}}] k / \tau \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $k$  为比例增益;  $\tau$  为动态响应时间系数。

通过设计动态参数PI调节器,比传统单纯的P调节器控制效果平滑,暂态过渡过程缩短,稳态控制精度得到提高。

### 2.3 整体控制方案

将前面的电流控制、中点电压控制方案综合,可得到SVG的整体控制方案,如图4所示。

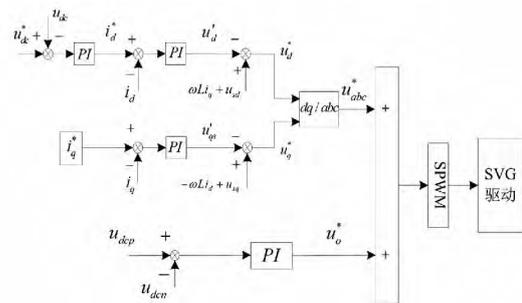


图4 三电平SVG的总体控制方案

对于基波调制波的产生,按照式(4)的原理可设计  $dq$  轴有功无功电流的控制环路。外环  $d$  轴有功电流指令由  $u_{dc}$  控制输出产生;无功电流指令由手动设置产生,可以为容性或感性。

对于零序调制波的产生,按照图3的原理将  $u_{dcp}, u_{dcn}$  电压偏差经PI控制器处理可得零序电压分量。将基波调制波、零序叠加得到总调制波,对总调制波进行SPWM调制可得IGBT驱动脉冲。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真参数

为了验证所提控制方案的有效性,搭建 Matlab

仿真模型。三电平 SVG 的系统参数如下: 电网线电压 690 V; 频率 50 Hz; 进线电抗器  $L=0.8\text{ mH}$ ; 直流母线电容  $C_p=C_n=1\ 200\ \mu\text{F}$ ; 直流电压指令  $U_{dc}^*=1\ 200\ \text{V}$ ; 额定电流  $I_c=800\ \text{A}$ ; 开关频率  $f_s=2\ 000\ \text{Hz}$ 。采用 SPWM 调制。

### 3.2 仿真结果

采用所提无功电流控制方案, 得到无功电流的阶跃响应如图 5 所示。

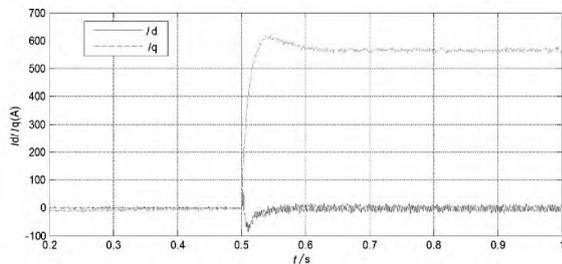


图 5 SVG 的 dq 轴电流响应

图 5 中,  $t=0\sim 0.5\text{ s}$ , 无功电流指令  $I_{q\_ref}=0$ ;  $t=0.5\text{ s}$   $I_{q\_ref}=565$ 。可见, 无功电流的阶跃响应时间在 20 ms 内, 且稳态后较为平滑; 有功电流最大超调在 50 A 左右, 稳态后保持在 15 A 左右。说明无功电流的响应速度快、收敛性好。

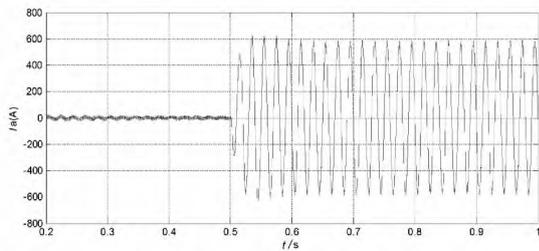


图 6 SVG 输出 a 相电流

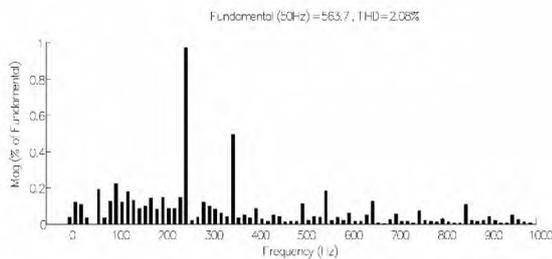


图 7 SVG 输出 a 相电流的 THD

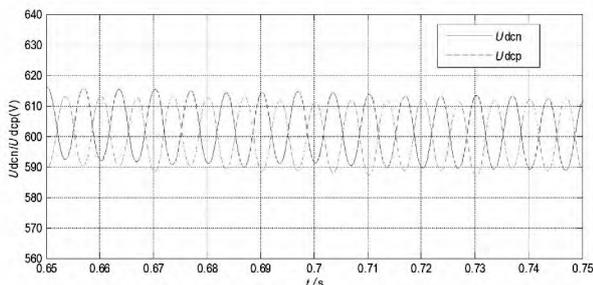


图 8 SVG 的正负母线电压

图 6、图 7 显示, SVG 输出 a 相电流较为平滑, 正弦度较好, 通过 FFT 分析, 得到其 THD = 2.08%。说明控制输出电流的谐波较小。

图 8、图 9 显示, 在发出 565 A 的无功功率后, 正负母线出现 2 倍频波动, 波动峰峰值增大到 45 V 左右, 这是因为无功功率的输出造成了峰值的增大。通过对中点电压的分析, 可见正负母线的中点电压波动在 5% 以内且较为稳定, 满足稳态运行的要求。

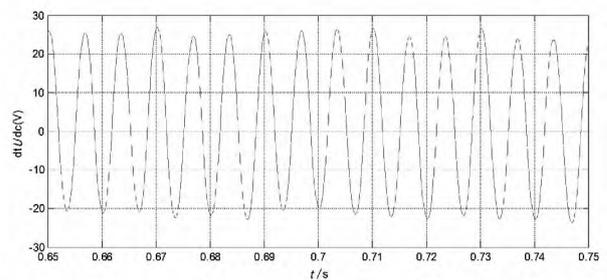


图 9 SVG 正负母线的中点电压

## 4 结论

详细分析了 T 型三电平 SVG 的数学模型, 给出了基于电网电压定向的无功电流控制方案; 并针对中点电压波动提出零序电压注入方案, 通过实时采集正负母线电压对中点电压进行控制。最后, 通过 Matlab 模型对无功电流的阶跃响应、正负母线波动进行了仿真分析, 验证了所提控制方案的有效性, 可作为产品设计的指导方案。

### 参考文献

- [1] 张益华, 孙玉坤, 张亮. 一种新型的 NPC 三电平矿用无功补偿器及其解耦控制研究 [J]. 电测与仪表, 2015, 51(3): 54-58.
- [2] 房公柱, 谢歆. 基于 PSCAD/EMTDC 的三电平电压源型 STATCOM 的仿真研究 [J]. 现代电子技术, 2015, 38(22): 147-149.
- [3] 王景尊. 基于三电平技术的静止同步无功补偿器研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [4] 郑宏, 陈灵奎, 郭凯. 大容量链式静止同步补偿器的非线性双输出解耦控制 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(2): 244-248.
- [5] 李宁, 王跃, 雷万钧, 等. NPC 三电平变换器中点电压控制方法综述 [J]. 电力电子技术, 2011, 45(10): 78-80.

### 作者简介:

岳 艳(1983), 助理工程师, 研究方向为大功率变流器技术;

周剑君(1975), 工程师, 研究方向为大功率变流器技术。

(收稿日期: 2016-05-11)