

T 型 H 桥级联多电平变换器的改进型脉宽调制策略

王 跃, 赵文健, 胡耀威, 陈国柱

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 针对 T 型 H 桥级联变换器的拓扑结构及其调制策略进行分析和研究, 提出了基于载波移相脉宽调制(CPS-PWM)的改进型调制策略。以单极倍频 CPS-PWM 所得的虚拟五电平波形作为 T 型 H 桥的输出目标, 结合 T 型 H 桥变换器输出不同电平时的开关模式, 遵循“改变最少个数开关管状态来实现输出电平改变”原则, 逆向推导 T 型 H 桥变换器的 PWM 信号, 并在此基础上给出基于 T 型 H 桥单元级联多电平变换器的调制策略。搭建了基于 T 型 H 桥级联的单相静止同步补偿器(STATCOM)样机, 分析了 T 型 H 桥上、下电容均压策略, 最后通过仿真和实验结果验证所提调制策略以及电容均压策略的正确性和可行性。

关键词: T 型 H 桥; 级联多电平变换器; 虚拟五电平; 载波移相脉宽调制; 开关模式; 级联静止同步补偿器

0 引言

多电平变换器因其输出电压谐波特性好, 适合于中高压大功率场合, 受到了广泛的关注和研究^[1-3]。多电平技术自 20 世纪 80 年代发展至今, 出现了大量的拓扑结构, 归纳起来主要有飞跨电容型、二极管钳位型以及级联型多电平变换器共三种。针对这三种拓扑结构应运而生多种调制方法和控制策略, 如指定次谐波消除脉宽调制(SHEPWM)方法、空间矢量脉宽调制(SVPWM)方法以及载波移相脉宽调制(CPS-PWM)方法等。

目前对于多电平变换器的研究, 依然集中在多电平变换器的拓扑结构以及调制策略两方面^[3-8]。拓扑结构的研究侧重于传统结构的简化、模块化实现以及新型拓扑的构建。调制策略的研究主要是改进现有的调制方法, 提高多电平变换器的输出性能, 减少开关损耗, 以及针对新拓扑提出正确合适的调制方法。

H 桥级联型变换器是多电平变换器中输出同样数量电平而所需器件最少的一种^[5-10]。普通四开关 H 桥采用适当的调制策略可以输出三电平电压, 若要输出五电平则需要两级级联, 共需 8 个全控开关器件。文献[11]提出了一种仅需五开关的单相单

级 T 型 H 桥变换器, 这种拓扑结构优点是: 在输出相同电平数电压的情况下, 减少了功率开关器件的数量, 因而可简化脉宽调制(PWM)控制电路, 减小装置体积, 甚至提高了系统可靠性。

T 型 H 桥级联多电平变换器由于具有输出电压为多电平、谐波特性好; 直流侧相互独立, 容易实现均压; 各逆变单元结构相同, 便于模块化的设计、安装、维修等优点, 非常适合于中高压大功率变频器、静止同步补偿器、风力发电并网变流器等领域^[12-14]。此外, 若将光伏电池阵列作为 T 型 H 桥级联型逆变器的独立直流电源, 不仅无需对直流侧电压进行均压控制, 而且能实现光伏并网逆变器更大的单体容量、更高的电压等级, 具有很好的应用前景。

文献[15]针对 T 型 H 桥介绍了载波交错正弦脉宽调制(SPWM)控制方法, 但该控制方法要求载波与调制波同步且需要判断调制波的过零点, 不适合于调制波频率变化或存在重复过零点的场合, 同时无法直接应用于级联场合。文献[16]将 T 型 H 桥与传统 H 桥级联构成混合级联型逆变器拓扑结构, 并采用特定次谐波消除 PWM 策略, 理论上可以输出消除任意次谐波的电压, 并且开关损耗小, 该调制策略的难点是用牛顿迭代法求解非线性方程组, 需要选取合适的初始解才能保证解法收敛, 不适合于在线计算, 并容易出现某些调制比范围内无解的状况。

本文在此基础上, 提出了基于载波移相脉宽调

收稿日期: 2015-04-04; 修回日期: 2015-09-04。

上网日期: 2016-08-19。

国家自然科学基金资助项目(51177147); 浙江省重点科技创新团队项目(2010R50021)。

制的改进型调制策略,以单极倍频载波移相脉宽调制所得的五电平波形作为 T 型 H 桥的输出目标,结合 T 型 H 桥输出不同电平时的开关模式,遵循“改变最少个数开关管状态来实现输出电平改变”的原则,逆向推导 T 型 H 桥变换器的 PWM 信号,并进一步给出基于该 T 型 H 桥级联的多电平变换器的调制策略。最后搭建了基于 T 型 H 桥级联的单相静止同步补偿器(STATCOM)样机,分析了 T 型 H 桥上、下电容的均压控制策略,通过仿真和实验结果证明了所提调制策略以及电容均压策略的正确性和可行性。

1 T 型 H 桥变换器

T 型 H 桥变换器的拓扑结构如图 1 所示,其中 T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 为全控型开关器件,每一个开关器件都反并联一个续流二极管(D_1 至 D_5),钳位二极管 D_6, D_7, D_8, D_9 与 T_5 构成了典型的双向开关(图中红色线所圈部分)。直流侧电容 $C_{d1} = C_{d2}$,电容电压值均为 E ,T 型 H 桥的输出电压为 U_o 。

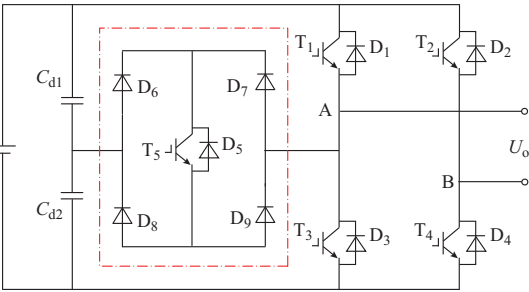


图 1 T 型 H 桥变换器拓扑
Fig.1 Topology of a T-type H-bridge converter

为分析该 T 型 H 桥的工作机理,首先定义开关函数:假设开关器件 T_i 或者续流二极管 D_i 导通时,开关函数 S_i 为 1,反之为 0,即开关函数 $S_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 可表示为:

$$S_i = \begin{cases} 1 & T_i \text{ 或者 } D_i \text{ 导通} \\ 0 & T_i \text{ 和 } D_i \text{ 不导通} \end{cases} \quad (1)$$

T 型 H 桥变换器可以输出 $2E, E, 0, -E$ 以及 $-2E$ 共 5 种电平,不同电平对应的导通路径如附录 A 图 A1 所示,任一导通路径中有且只有两个开关器件导通,与输出电平无关。由此可列出 T 型 H 桥输出不同电压时的开关器件工作模式,如表 1 所示。

2 T 型 H 桥级联变换器及载波移相调制

2.1 T 型 H 桥载波移相脉宽调制

普通 H 桥两级级联变换器采用单极倍频载波

表 1 T 型 H 桥开关模式
Table 1 Switching mode of T-type H-bridge

U_o	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
$2E$	1	0	0	1	0
E	0	0	0	1	1
0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0
$-E$	0	1	0	0	1
$-2E$	0	1	1	0	0

移相脉宽调制恰好输出五电平电压,因此可将该调制方法用于 T 型 H 桥变换器:将两级普通 H 桥级联变换器的五电平输出电压作为 T 型 H 桥的输出目标,与 T 型 H 桥的开关模式对照,逆向推导出 T 型 H 桥开关器件的 PWM 信号。

具体实现方式如下:假设有两个普通 H 桥级联连接,对应的三角载波分别如图 2(a)中的 V_{c1}, V_{c2} 所示,载波频率为 f_c (载波周期为 T_c),两载波的相位差为 $T_c/4, V_{mL}$ 和 V_{mR} 为幅值和频率相等、相位相反的两调制波,分别作为普通 H 桥左、右半桥的调制信号。将调制所得左、右半桥开关器件的开关函数相减,可得虚拟的三电平波形,分别记为 V_{3L-1}, V_{3L-2} ,两者叠加得到虚拟的五电平波形,如图 2(b)中的 V_{5L} 所示,该虚拟的五电平波形正是 T 型 H 桥的输出目标。因此,将虚拟五电平波形与表 1 所示 T 型 H 桥变换器的开关模式相结合,可逆向推导出 5 个开关器件的 PWM 信号。需要注意的是,根据表 1,非零电平输出电压的开关模式具有唯一性,而零电平输出电压则有两种开关模式。为了尽可能地减小器件的开关损耗,应遵循“改变最少个数开关管状态来实现输出电平改变”的原则,也就是说零电平的开关模式的选择应保证开关管状态的改变数最少。同时为避免直流侧短路,同一桥臂的上、下两个开关器件(或与之相连双向开关中的开关器件)同一时刻至多只能有一个导通。

根据以上原则,当输出电压在非负电平间切换时,开关管 T_4 应维持开通状态, T_2 则始终关闭:
①若输出 $+2E$ 电平,开关管 T_1 开通, T_3, T_5 关断;
②若输出 $+E$ 电平,开关管 T_5 开通, T_1, T_3 关断;
③若输出零电平,则开关管 T_3 开通, T_1, T_5 关断。

反之,当输出电压在非正电平间切换时, T_2 开关管持续开通,而 T_4 保持关闭状态:
①若输出 $-2E$ 电平,开关管 T_3 开通, T_1, T_5 关断;
②若输出 $-E$ 电平,开关管 T_5 开通, T_1, T_3 关断;
③若输出零电平,开关管 T_1 开通, T_3, T_5 关断。

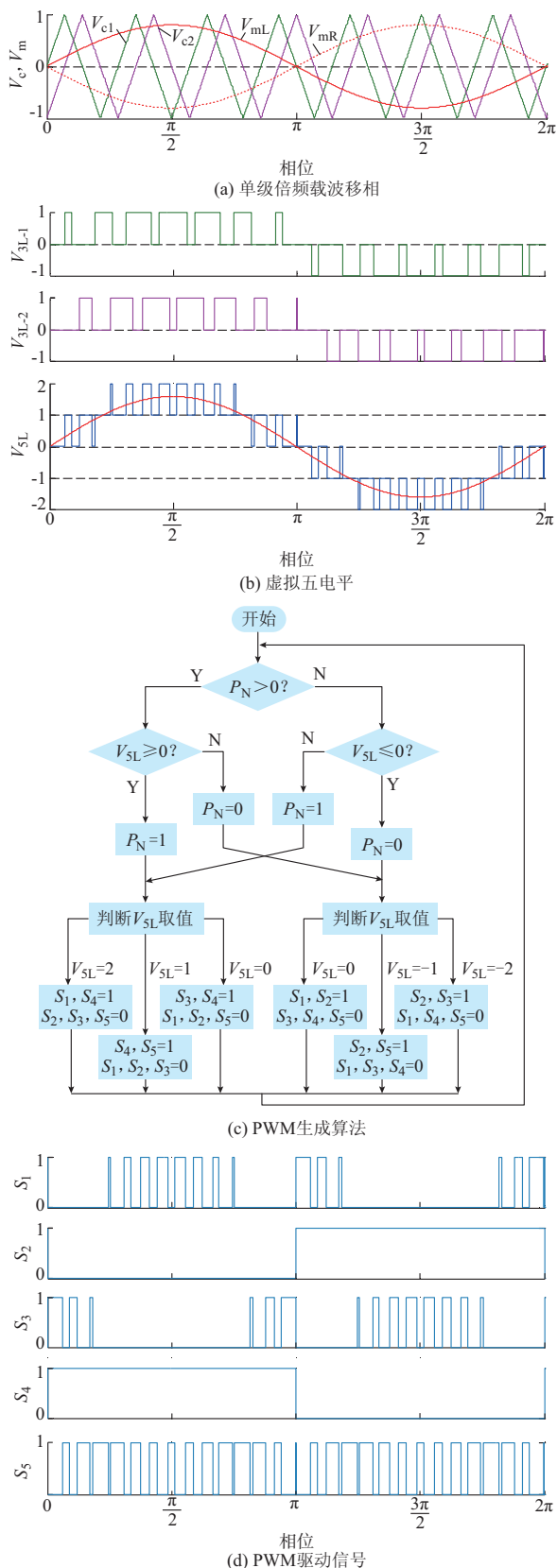


图 2 用于 T 型 H 桥变换器的改进 CPS-PWM 策略
Fig.2 Improved CPS-PWM strategy for T-type H-bridge converter

由此可得 T 型 H 桥中开关器件的 PWM 控制信号的生成算法流程如图 2(c)所示:定义状态变量 P_N ,当虚拟五电平 V_{5L} 在非负电平间切换时 $P_N = 1$,当 V_{5L} 在非正电平间切换时 $P_N = 0$,之后采用判断语句,针对不同电平根据 T 型 H 桥的开关模式确定 PWM 信号。T 型 H 桥的 PWM 控制信号如图 2(d)所示。

在 MATLAB/Simulink 中搭建了 T 型 H 桥单元的仿真模型,直流侧电压 $E = 500$ V,载波频率 $f_c = 1$ kHz,调制波频率 $f_m = 50$ Hz。考虑到调制比取值比较小时可能出现电平缺失,为避免此种情况调制比取为 $m = 0.9$ 。

仿真得到的输出电压波形及其频谱如附录 A 图 A2 所示,T 型 H 桥输出电压为五电平。由于单极倍频载波移相调制策略的应用,输出电压的等效开关频率为 $4f_c$,即载波频率的 4 倍。从输出电压的快速傅里叶变换(FFT)结果可以看出,谐波主要分布在 $4n$ (n 为自然数)倍载波频率附近。

2.2 T 型 H 桥级联多电平变换器调制策略

基于上述 T 型 H 桥级联的变换器可输出更多电平,其电路拓扑如附录 A 图 A3 所示。级联多电平变换器包括 N 个相同的 T 型 H 桥单元,各单元直流侧电压相同,总的输出电压记为 U_o 。

级联变换器中各 T 型 H 桥单元的调制依然采用上节所述的改进型载波移相脉宽调制策略,共用调制波 V_{mL}, V_{mR} ,每个 H 桥单元对应两路载波 V_{cj1}, V_{cj2} (以第 j 级 T 型 H 桥变换器为例),其中 V_{cj1} 与 V_{cj2} 的相位差仍为 $T_c/4$,同时 V_{cj1}, V_{cj2} 分别滞后第一级 T 型 H 桥单元对应的载波 V_{c11}, V_{c12} 相同的相位差 φ_j ,如图 3 所示(图 3(b)是图 3(a)的局部放大图),其中 φ_j 可通过式(2)计算得到。

$$\varphi_j = \frac{j-1}{4N} T_c \quad 1 \leq j \leq N \quad (2)$$

在 MATLAB/Simulink 中搭建基于 T 型 H 桥级联的多电平变换器仿真模型,直流侧电压 $E = 500$ V,载波频率 $f_c = 1$ kHz,调制波频率 $f_m = 50$ Hz,调制比仍为 $m = 0.9$ 。取级联数 $N = 2$ 进行仿真,级联变换器输出电压及其 FFT 分析分别如附录 A 图 A4 所示,输出电压每 500 V 一个电平台阶,共有 $4N+1=9$ 个电平。从 FFT 分析结果可知,多电平电压的谐波主要分布在 $4Nn$ (n 为自然数)倍载波频率附近,且幅值很小。

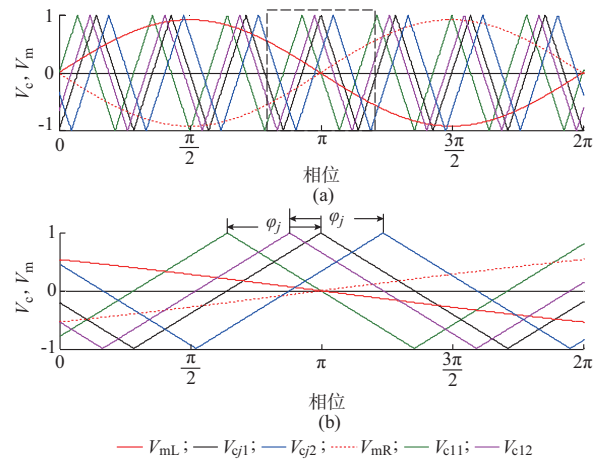


图3 T型H桥级联变换器第j级单元的三角载波
Fig.3 Carriers for the j-th T-type H-bridge in a cascaded multilevel converter

3 T型H桥级联STATCOM直流电压控制

为验证T型H桥带负载运行的性能,研究了基于上述T型H桥级联的单相STATCOM,单相STATCOM电路结构如附录A图A3所示,通过滤波电感L(R为其等效电阻)接入单相交流电压源。STATCOM闭环控制策略包括电流控制以及直流侧电压控制。

对于单相系统,在静止坐标系下传统比例-积分(PI)控制器在跟踪交流信号时存在稳态误差。为提高控制精度,引入基于内模原理的重复控制器(REP),设计了基于PI控制内环和重复控制外环的电流复合控制策略^[17]。

直流侧电容电压稳定在电压设定值,是级联STATCOM正常工作的前提。本研究是在不外加均压电路的条件下,通过与电网进行有功功率交换来实现电容均压控制。传统方法是增加电压外环控制以及模块间均压控制^[18-19],这部分内容在H桥级联STATCOM中研究较多,本文不再重复介绍。

此外,T型H桥的直流侧有上、下两个独立电容。正常工作时,还要控制上、下两个电容电压的均衡。对于如附录A图A1所示的T型H桥的各工作模式,取电流流入桥臂A(以附录A图A1(d)为例)的方向为正,反之(以附录A图A1(c)为例)为负。

在附录A图A1所示的(a)(b)(e)(f)四种模式下,由于流过上、下电容的电流相同,因此不会影响电容电压的均衡;其他情况时,在电流为负的模式下,电流的作用是使下电容放电(模式(c))或上电容充电(模式(g)),即在这两种模式下,上电容C_{d1}电压上升而下电容C_{d2}电压下降;相反地,在电流为正

的模式下,电流的作用是使下电容充电(模式(d))或上电容放电(模式(h)),即在这两种模式下,上电容C_{d1}电压下降而下电容C_{d2}电压下降;当T型H桥产生的电流不含直流分量时,模式(c)(d)(g)(h)四种工作模式下,电容积累和释放的电荷将得到平衡,即尽管电容电压会因为电流通过而存在波动,但其平均值不会变化。当输出电流含有直流分量时,则电荷会积累在电容上,造成上、下电容的平均电压失去均衡。另外开关器件的混合型损耗差异、开关触发脉冲延时不一致等因素也会影响上、下电容电压的平衡。

为了消除直流分量的影响,维持上、下电容的均衡,需要加入均压环进行控制,即在电流指令环节加入部分调节量,模块内直流电压均压控制结构框图如图4所示。

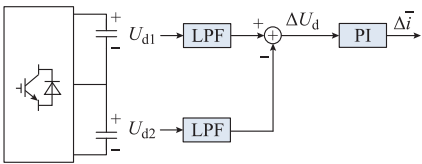


图4 T型H桥模块内直流电压均压控制环
Fig.4 Inner DC-link voltage balancing control loop of T-type H-bridge module

由上述控制框图可知,当两电容的电压出现不平衡时,如U_{d1}大于U_{d2}时,经PI调节器的作用,输出调节信号Δ $\bar{i}$ 为正,在指令电流的作用下,输出电流中将含有正的直流分量。由之前的分析可知,正的直流分量的作用将使得上电容的平均电压值下降而下电容的平均电压值上升,从而使得U_{d1}等于U_{d2};反之亦然。

通过对不同工作模式的分析,指令电流中的直流分量与上下电容电压之差的变化关系为:

C_{d1} dU_{d1}/dt - C_{d2} dU_{d2}/dt = i_d (3)

式中:U_{d1}和U_{d2}分别为上下电容电压;C_{d1}和C_{d2}分别为上下电容值,假设C_{d1}=C_{d2}=C_d/2,经过拉普拉斯变换后有

C_d/2 s ΔU_d(s) = i_d(s) (4)

进而可得到被控对象的传递函数为:

G_d(s) = ΔU_d(s) / i_d(s) = 2 / C_ds (5)

系统为一阶积分环节,其截止频率受直流侧电容值的影响。本系统中该均压环实际要控制的直流流量,而T型H桥级联STATCOM正常工作过程中还会流过无功补偿电流,故均压环的控制要求既能

实现对直流量的无静差控制,但同时不能影响其他电流输出。根据以上要求,需要均压环的控制带宽不能太高,在实际系统中除 PI 控制器外,可以采用低通滤波环节(LPF)进行校正,进一步增强对中高頻的衰减能力。

4 实验验证

为验证本文研究的 T 型 H 桥载波移相脉宽调制策略及直流侧电压均压控制的正确性与可行性,搭建了两级 T 型 H 桥级联构成的单相 STATCOM 样机进行实验研究,开关器件采用绝缘栅双极型晶体管(IGBT),二极管钳位电路由单相整流桥构成。控制系统系统采用 TI 公司的定点运算数字信号处理器(DSP)芯片 TMS320F2812 结合 ALTERA 公

司的 EP3C 系列现场可编程门阵列(FPGA)芯片实现^[20],其中 DSP 产生正弦波调制信号并经数据总线写入 FPGA,FPGA 根据前文所述的载波移相调制策略,先得到虚拟五电平,然后生成 5 路 PWM 信号,PWM 信号经光纤隔离后分别驱动主电路的各开关器件。T 型 H 桥 PWM 发生器单元的 FPGA 实现原理如附录 A 图 A5 所示,PWM 产生模块的算法流程如图 2(c)所示。实验时,直流侧电容容值 $C_{d1}=C_{d2}=5\text{ mF}$,直流电压 $E=120\text{ V}$,载波频率为 1 kHz ;单相 STATCOM 并网电感 $L=2\text{ mH}$,单相交流电源通过调压器获得,频率为 50 Hz ,电压有效值为 280 V 。

图 5(a)为调制比 m 取 0.9 时单个 T 型 H 桥开关器件的 PWM 信号,与图 2(d)中仿真结果相符。

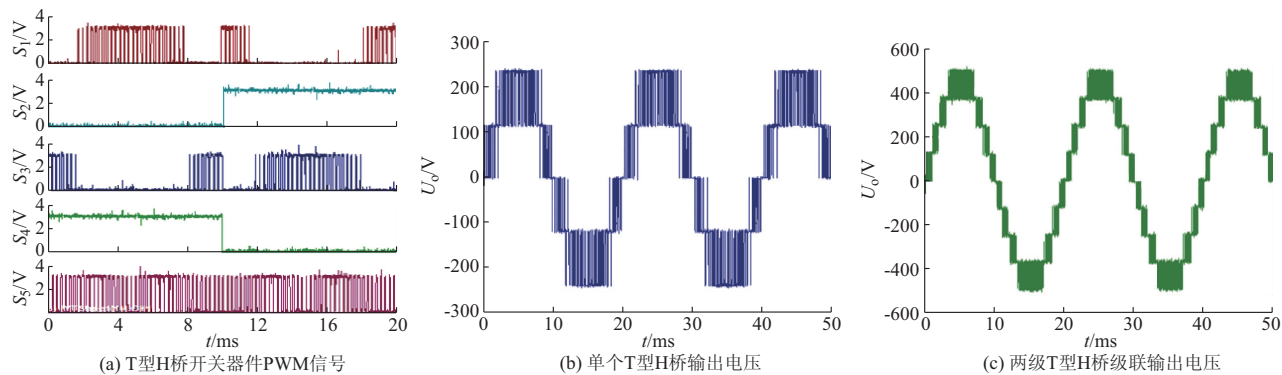


图 5 T 型 H 桥级联多电平变换器 PWM 信号及输出电压
Fig.5 PWM signals and output voltage of T-type H-bridge cascaded multilevel converter

图 5(b)为单个 T 型 H 桥的输出电压波形,当调制比 $m=0.9$ 时,输出电压为五电平;图 5(c)为 T 型 H 桥两级级联变换器的输出电压波形,当调制比 $m=0.9$ 时,输出电压为九电平,均与仿真结果相符。

T 型 H 桥两级级联单相 STATCOM 输出有效值为 60 A 的无功电流的波形如图 6(a)所示,FFT 分析显示其总的谐波畸变率(THD)仅为 1.8% 。此时单个 T 型 H 桥的直流侧电压波形如图 6(b)所示, U_d 为直流侧总电压,可见上、下电容电压均压效果较好,总体直流侧电压稳定,其中的二倍工频(100 Hz)波动是因 STATCOM 装置与交流电源交换无功电流引起。

5 结语

本文针对一种旨在减少开关器件的 T 型 H 桥级联变换器的拓扑结构及其调制策略进行分析和研究。以单极倍频载波移相脉宽调制所得的虚拟五电平波形作为 T 型 H 桥的输出目标,结合 T 型 H 桥输出不同电平时的开关模式,逆向推导 T 型 H 桥变

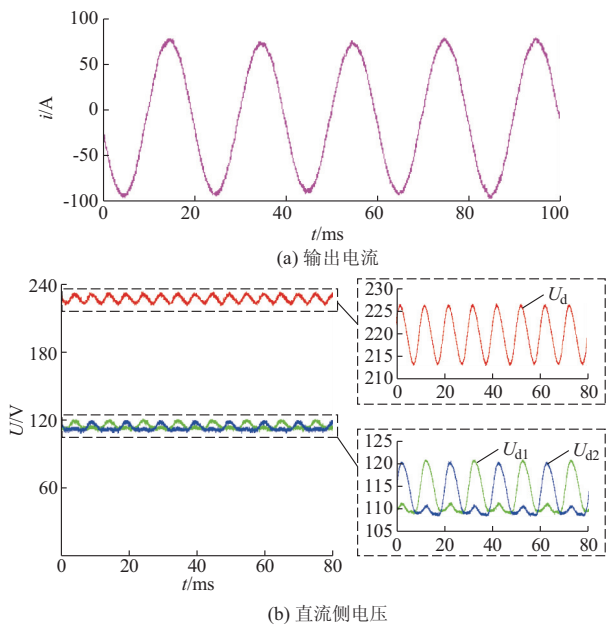


图 6 T 型 H 桥级联 STATCOM 输出电流及直流侧电压
Fig.6 Output current and DC-link voltage of T-type H-bridge cascaded STATCOM

换器的 PWM 信号,为减小器件开关损耗,遵循“改变最少个数开关管状态来实现输出电平改变”原则,给出基于 T 型 H 桥级联多电平变换器的调制策略。搭建了基于 T 型 H 桥级联的单相 STATCOM 样机,仿真和实验结果证明了所提调制策略以及电容均压策略的正确性和可行性。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] HOMES D G, LIPO T A. Pulse width modulation for power converters: principles and practice[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

[2] PENG F Z, LAI J S, MCKEEVER J, et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(5): 1130-1138.

[3] MCGRATH B P, HOLMES D G. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 858-867.

[4] WANG P Y, ZHANG X P, COVENTRY P F, et al. Control and protection strategy for MMC MTDC system under converter-side AC fault during converter blocking failure[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(3): 272-281.

[5] 李楠,高峰,田昊,等.九开关变换器脉宽调制策略[J].电力系统自动化,2014,38(3):83-88.DOI:10.7500/AEPS20130701013.

LI Nan,GAO Feng,TIAN Hao, et al. Pulse width modulation strategy of nine-switch converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 83-88. DOI: 10.7500/AEPS20130701013.

[6] LEZAN A P, RODRIGUEZ J, OYARZUU D A. Cascaded multilevel inverter with regeneration capability and reduced number of switches[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2006, 55(3): 1059-1066.

[7] 欧阳旭东,彭程,胡广振,等.高压大容量静止同步补偿器功率开关器件选用分析[J].电力系统自动化,2013,37(2):113-118.

OUYANG Xudong, PENG Cheng, HU Guangzhen, et al. Power device characterization and selection of high voltage and high power STATCOM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 113-118.

[8] CHEN B, YAO W X, LU Z Y. Novel five-level three-phase hybrid-clamped converter with reduced components[J]. Journal of Power Electronics, 2014, 14(6): 1119-1129.

[9] WANG Y, YANG K, CHEN G Z. Implementation of a no pulse competition CPS-SPWM technique based on the concentrated control for cascaded multilevel DSTATCOMs[J]. Journal of Power Electronics, 2014, 14(6): 1139-1146.

[10] 杜翼,江道灼,林志勇,等.混合级联多电平换流器型静止同步补偿器的优化设计[J].电力系统自动化,2015,39(6):88-94. DOI:10.7500/AEPS20140315004.

DU Yi, JIANG Daozhuo, LIN Zhiyong, et al. Optimal design of STATCOM based on hybrid cascaded multilevel converter

[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 88-94. DOI: 10.7500/AEPS20140315004.

[11] PARK S J, KANG F S, LEE M H, et al. A new single-phase five-level PWM Inverter employing a deadbeat control scheme [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003,18(3): 831-843.

[12] GERARDO C, VICTOR G, CARLOS S, et al. A new simplified multilevel inverter topology for DC-AC conversion [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2006, 21(5): 1311-1319.

[13] 姚致清,于飞,赵倩,等.基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J].中国电机工程学报,2013,33(36): 27-33.

YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.

[14] KADAM C J, WAIPHALE V V, KUMBHAR P D, et al. A single phase multistring five-level inverter for grid connected PV system during constant solar radiation[C]// International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT ' 14), March 20-21, 2014, Nagercoil, India: 287-290.

[15] 孙醒涛,孙力,张云,等.一种新型电压型逆变器拓扑结构及其 PWM 控制方法[J].电工技术学报,2008,23(7):75-80.

SUN Xingtao, SUN Li, ZHANG Yun, et al. Topology and PWM control method of a novel voltage-source inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 75-80.

[16] 张云,孙力,吴凤江,等.五开关五电平逆变器的载波交错 SPWM 控制方法[J].电工技术学报,2010,25(2):101-106.

ZHANG Yun, SUN Li, WU Fengjiang, et al. Carriers-staggered SPWM control method based on a five-switch five-level inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 101-106.

[17] 杨昆,陈国柱.基于重复控制的 DSTATCOM 补偿电流控制[J].电力系统自动化,2013,37(10):80-85.

YANG Kun, CHEN Guozhu. Compensation current control for DSTATCOM based on repetitive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 80-85.

[18] WANG Y, YANG K, HE C, et al. A harmonic elimination approach based on moving average filter for cascaded DSTATCOM[C]// Proceedings of 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29-November 1, 2014, Dallas, USA: 4508-4513.

[19] 史丽萍,曹雪祥,陈丽兵,等.改进的 STATCOM 相内直流电容电压平衡控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(2):119-126. DOI:10.7500/AEPS20130526003.

SHI Liping, CAO Xuexiang, CHEN Libing, et al. An improved DC capacitor voltage balance control strategy among phases for STATCOM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 119-126. DOI: 10.7500/AEPS20130526003.

[20] 王跃,杨昆,杨华,等.通用 SPWM 发生器的实现及脉冲竞争消除新方法 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(11): 2087-2093.

WANG Yue, YANG Kun, YANG Hua, et al. Implementation

of universal SPWM pulse generator and novel method for pulse competition elimination[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(11): 2087-2093.

王 跃(1988—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:有源电能质量技术、大功率级联多电平配电网 STATCOM及其数字控制技术。E-mail: wangyuehfut@163.com

赵文健(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向:模块化多电平变换器及其控制技术。E-mail: 15229269450@163.com

胡耀威(1992—),男,博士研究生,主要研究方向:多电平变流器拓扑结构及其调制技术。E-mail: ywhu007@163.com

(编辑 丁琰)

Improved Phase Width Modulation Strategy for T-type H-bridge Based Cascaded Multilevel Converter

WANG Yue, ZHAO Wenjian, HU Yaowei, CHEN Guozhu

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The cascaded multilevel converter is widely employed in medium/high voltage and high power electronic applications for its small harmonic components of output voltage and convenient modulation. In this paper, the operation principle of a T-type H-bridge topology is investigated in detail, and a carrier phase shifted pulse width modulation (CPS-PWM) based control method for this topology is proposed. By taking a virtual five-level waveform achieved with uni-polar double frequency CPS-PWM as the output objective, PWM signals of the T-type H-bridge can be obtained by reverse derivation according to its switching modes. Besides, a control method for T-type H-bridge based cascaded multilevel converter is introduced. A single-phase T-type H-bridge cascaded static synchronous compensator (STATCOM) prototype is built, and the DC-link voltage balancing control scheme is analyzed. Finally, the correctness and feasibility of the proposed modulation method and control strategy for T-type H-bridge based cascaded multilevel converter is verified by simulation and experimental results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177147) and Zhejiang Key Science and Technology Innovation Group Program (No. 2010R50021).

Key words: T-type H-bridge; cascaded multilevel converter; virtual five-level; carrier phase shifted pulse width modulation (CPS-PWM); switching mode; cascaded static synchronous compensator (STATCOM)