

基于级联 STATCOM 的 CPS-SPWM 脉冲相移技术

靳艳, 黄晶晶, 同向前, 高亮

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 载波移相 SPWM (CPS-SPWM) 技术作为级联 H 桥静止无功补偿器 (STATCOM) 最常用的调制方法, 对级联 H 桥 STATCOM 输出电压精度、实时性等性能有着重要的影响。通过分析对比 CPS-SPWM 技术的三种脉冲生成方法—自然采样法、对称规则采样法以及不对称规则采样法, 提出基于不对称规则采样的 CPS-SPWM 脉冲相移技术, 以解决传统 CPS-SPWM 技术在级联 H 桥数较多时 DSP 控制复杂、FPGA 硬件资源不足等问题。与传统 CPS-SPWM 技术的仿真对比表明, 当级联 H 桥数目较多时, 所设计方法能够在保证 STATCOM 输出特性的基础上, 有效减少硬件资源, 简化了电路设计, 更便于工程应用。

关键词: 载波移相 SPWM; 级联 H 桥; 静止无功补偿器; 不对称规则采样法; 脉冲相移技术

Pulse phase shifting technology of CPS-SPWM for cascaded STATCOM

JIN Yan, HUANG Jingjing, TONG Xiangqian, GAO Liang

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: As the core modulation technology of cascaded H-bridge static synchronous compensator (STATCOM), carrier phase-shifted SPWM (CPS-SPWM) technique is important for STATCOM output voltage precision and the real-time performance. The three pulse generating methods for CPS-SPWM technique, i.e. natural sampling method, symmetry rule sampling method and asymmetry rule sampling method, are analyzed and compared. Then, CPS-SPWM pulse phase shifting technology based on the asymmetry rule sampling is proposed to solve the problem of DSP control complexity, lack of hardware resources CPLD when the number of cascade H-bridge is large. The simulation results show that compared with traditional CPS-SPWM technology, the proposed method can ensure output characteristics of STATCOM and effectively reduce the hardware resources, which can simplify the circuit design and be easier for the engineering applications.

Key words: carrier phase-shifted SPWM (CPS-SPWM); cascaded H-bridge; static synchronous compensator (STATCOM); asymmetry rule sampling method; pulse phase shifting

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0120-06

0 引言

多电平变换器具有容量大、易于扩容、输出电压谐波特性好等特点, 在大功率变频调速、电力系统无功补偿、直流输电等领域得到了广泛应用^[1-2]。其中最具有代表性的应用就是级联 H 桥静止无功补偿器 (Static Synchronous Compensator, STATCOM), 它具有模块化、多电平、易于扩展等优点, 在高压、大功率场合中有着很好的应用前景, 成为国内外电力系统行业的重点研究课题之一^[3-5]。

目前, 级联 H 桥 STATCOM 的调制策略主要包括特定谐波消除 PWM 技术、开关频率优化 PWM 技术、空间矢量调制 (SVPWM) 技术以及载波移相 SPWM (Carrier Phase-Shifted SPWM, CPS-SPWM) 技术等^[6-9]。其中, CPS-SPWM 技术由于具有等效开关频率高、输出电压谐波含量小、信号传输带宽以及控制方法简单等特性而被广泛采用^[10-12]。

CPS-SPWM 技术是在 SPWM 技术的基础上产生的。目前, SPWM 技术所采用的 PWM 脉冲生成方法主要包括自然采样法和规则采样法。自然采样法计算精确, 但不适合微机实时控制; 而规则采样法是一种应用较广的数字控制方法, 其效果接近于自

基金项目: 陕西省重点学科建设项目 (5X1301)

然采样法, 但计算量却远少于自然采样法^[13]。规则采样法又可以进一步划分为对称规则采样法和不对称规则采样法。相对于对称规则采样法, 不对称规则采样法由于采样点和计算量增加了一倍, 使得输出电压谐波含量大为减少, 波形的不对称性也有所改善^[14-15]。在级联STATCOM装置中, 随着级联H桥数的增加, 所选择的PWM脉冲生成方法将直接影响到整个装置的性能及其系统设计, 但是现有文献却鲜少研究PWM脉冲生成方法对级联STATCOM装置的影响。

针对上述问题, 本文从级联STATCOM装置采用的传统PWM脉冲生成方法着手, 分析并对比了这三种SPWM脉冲生成方法对级联STATCOM输出电压的基波有效值及谐波特性的影响, 在此基础上, 提出基于不对称规则采样法的CPS-SPWM脉冲相移技术, 并通过与传统CPS-SPWM技术的仿真对比进一步验证该方法的有效性。

1 传统 CPS-SPWM 脉冲实现方法

由于级联H桥STATCOM的三相对称性, 下面以A相为例给出级联H桥STATCOM的单相主电路拓扑如图1所示。

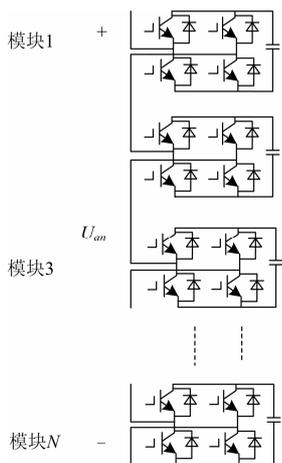


图 1 级联STATCOM主电路拓扑

Fig. 1 Main circuit topology of cascaded STATCOM

级联STATCOM由若干H桥模块级联而成, 每个模块可以工作于工频三电平阶梯波方式, 也可以工作于高频PWM方式, 一般 N 个H桥模块级联, 可以产生 $2N+1$ 个电平。

CPS-SPWM技术是级联H桥STATCOM广泛应用的调制策略, 即每个H桥单元的驱动信号由一个正弦调制波和相位互差 180° 两个三角载波比较生成, 同一相的级联H桥单元之间的正弦调制波相同, 三角载波互差 $180^\circ / N$ 。

CPS-SPWM技术采用不同的脉冲生成方法, 不仅对级联H桥STATCOM输出电压精度、实时性等性能有着重要的影响, 而且决定了CPS-SPWM技术实现时的采样频率以及算法的复杂程度。对于CPS-SPWM这项技术的脉冲生成方法, 最初主要为自然采样法, 而自然采样法通常由模拟电路实现, 随着数字控制技术的发展, 相应产生了规则采样法。数字控制中的规则采样分为对称规则采样法和不对称规则采样法, 下面将展开讨论。

1.1 自然采样法

自然采样法是在正弦波和三角波的自然交点时刻生成PWM波形, 从而控制功率器件的开通和关断, 如图2所示。其中 u_r 为调制波; u_c 为载波; δ 为开通时刻脉冲宽度; T_c 为三角波载波周期。

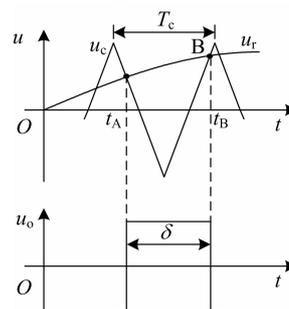


图 2 自然采样法

Fig. 2 Natural sampling method

自然采样法是最基本的PWM脉冲生成方法, 所得到的PWM波形很接近于正弦波, 但这种方法要求解复杂的超越方程, 在采用微机控制技术时需要花费大量的计算时间, 在工程上实际应用不多。

1.2 对称规则采样法

对称规则采样法是从自然采样法演变而来的, 即经过采样的正弦波(实际上是阶梯波)与三角波相交, 由交点算出脉冲宽度。图3中以三角波周期 T_c 作为采样周期, 每次在三角载波的负峰值位置采样, 过采样点做一条水平直线和三角波分别交于两点, 在交点时刻控制功率器件的通断。根据图3以及三角形定理, 可以得到关系式(1)^[16]。

$$\delta = T_c(1 + a \sin \omega t_D) / 2 \quad (1)$$

式中: a 为调制比; ω 为正弦波角频率; t_D 为三角波的负峰值所处采样时刻; δ 为开通时刻脉冲宽度; T_c 为三角波载波周期。

对称规则采样法是用处于两个自然采样之间一个特殊时刻点的采样值来近似两个自然采样值。这样对于处理器而言, 避免了解超越方程, 节省了运算时间, 提高了运算速度。但由于对采样点进行了近似, 数据少了一半, 牺牲了很大的精度。

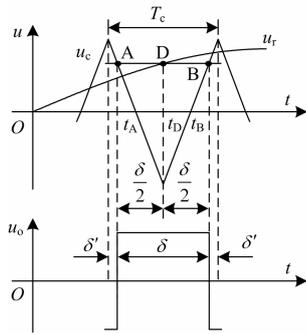


图3 对称规则采样法

Fig. 3 Symmetry rule sampling method

1.3 不对称规则采样法

不对称规则采样法的PWM脉冲生成原理与对称规则采样法类似,均由经过采样的正弦波(实际上是阶梯波)与三角波相交,由交点算出脉冲宽度,所不同的是不对称规则采样法在每个载波周期采样两次,这样形成的阶梯波与正弦波的逼近程度大大提高,更接近于自然波。相对于自然采样法而言,该方法更适于数字控制;相对于对称规则采样法而言,它的谐波含量更少,成为工程应用首选。然而将不对称规则采样法引入到CPS-SPWM技术中的一大难题是:CPS-SPWM技术数字化实现时对PWM发生器数目的要求极高。一个单相 $2N+1$ 电平的级联STATCOM在采用CPS-SPWM技术时需要 $2N$ 对互补的PWM脉冲信号,即 $2N$ 对互补的PWM发生器。而目前常用的DSP芯片TMS320F2812和TMS320F28335,最多也只能提供6对PWM发生器,这仅仅能实现3个模块的级联。并且随着级联H桥数目的增多,所需PWM发生器就越多,单个DSP芯片已远远达不到要求。

2 基于不对称采样的 CPS-SPWM 脉冲相移技术

综合上述不同方法所存在的问题,本文提出一种基于不对称规则采样的CPS-SPWM脉冲相移技术。它既可以达到传统CPS-SPWM技术的输出要求,又能在减少CPU运用资源的基础上提高运算速率。下面以3个H桥为例来介绍本文所提基于不对称采样的CPS-SPWM脉冲相移技术,具体如图4所示,实现过程如下。

(1) 首先采用不对称规则采样法生成每相第一个H桥的2对互补的PWM脉冲信号,作为基准脉冲。不对称规则采样法的PWM脉冲生成原理如图4(a)所示,以三角波周期 T_c 作为采样周期,在每个载波周期采样两次,即在三角波的顶点位置采样,又在三

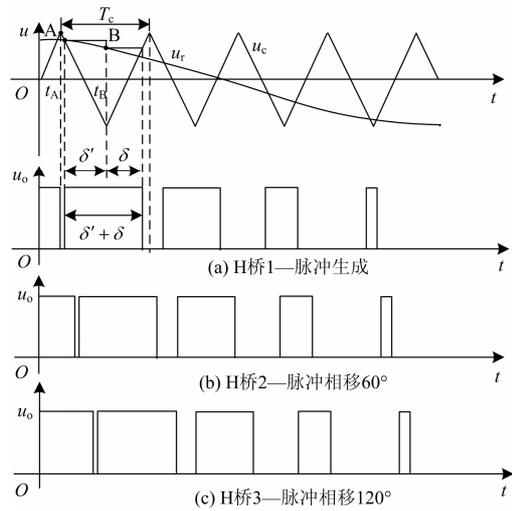


图4 基于不规则采样法的CPS-SPWM脉冲相移技术

Fig. 4 CPS-SPWM pulse phase shifting technology based on asymmetry rule sampling method

角波的底点位置采样,并于采样点处做水平线与三角波交于两点,在交点时刻控制功率器件的通断。根据图4(a)以及三角形定理,得到如下关系式^[17]。

$$\begin{aligned} \delta' &= T_c(1 + a \sin \omega t_A) / 4 \\ \delta &= T_c(1 + a \sin \omega t_B) / 4 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: t_A 为三角波的正峰值对应的采样时刻; t_B 为三角波的负峰值对应的采样时刻; $\delta' + \delta$ 为开通时刻脉冲宽度; T_c 为三角波载波周期,因此可得开通时刻的脉冲宽度为

$$\delta' + \delta = T_c(2 + a \sin \omega t_A + a \sin \omega t_B) / 4 \quad (3)$$

(2) 基准脉冲确定后,将基准脉冲依次移相 $180^\circ / N$ (相对于三角波而言)就可以得到每相应H桥的PWM脉冲信号。在图4中以3个H桥为例,移相 60° 后即第二个H桥的PWM脉冲信号,如图4(b)所示;移相 120° 后即第三个H桥PWM的脉冲信号,如图4(c)所示。这样通过简单的移相使得3个H桥的PWM脉冲信号都得以生成。

CPS-SPWM脉冲移相技术主要是通过DSP和FPGA联合实现的,在DSP中仅仅完成每相的第一个H桥脉冲信号的生成,通过FPGA的移相得到每相其余H桥的PWM脉冲信号。由此可见,基于不对称规则采样的CPS-SPWM脉冲相移技术大大简化了CPU控制复杂度,节省了硬件资源。

3 仿真实验

3.1 SPWM 采样方法仿真对比

在Matlab/Simulink仿真平台下对自然采样法、对称规则采样法,不对称规则采样法这三种传统

PWM脉冲生成方法进行对比分析, 以A相五链节 STATCOM为模型, 并结合CPS-SPWM调制策略, 通过分析这三种采样方法下级联H桥STATCOM的交流侧输出电压特性来对比不同采样方法的优劣。具体仿真参数如表1所示。

表 1 仿真参数

参数	数值
调制波频率 f_c /Hz	50
载波比 k_c	10
调制比 m_a	0.95

采用自然采样法时PWM输出波形如图5(a)所示, 五链节级联H桥STATCOM输出交流侧电压如图5(b)所示, 此电压在10个周期内的谐波总畸变率 $THD=12.58\%$, 基波电压有效值为1898 V, 如图5(c)所示, 基波初始相位为 -0.1° 。

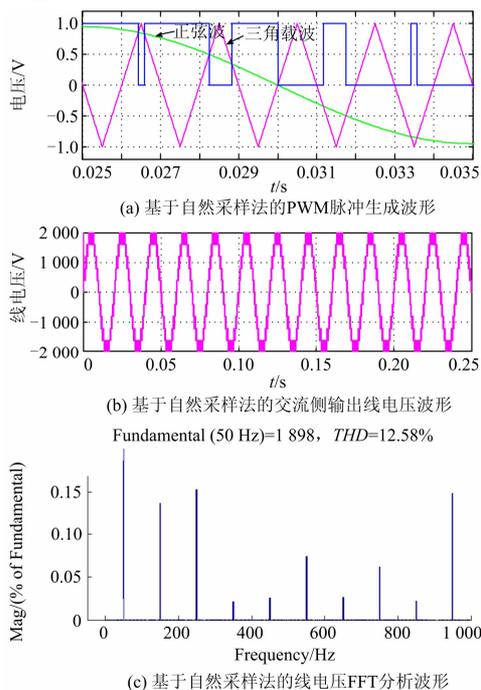


图 5 基于自然采样法的仿真输出波形

Fig. 5 Simulation output waveform based on natural sampling method

采用对称规则采样法时 PWM 输出波形如图6(a)所示, 五链节级联 H 桥 STATCOM 输出交流侧电压在 10 个周期内 $THD=12.86\%$, 基波电压有效值为 1 871 V, 如图 6(b)所示, 基波相位为 -18.1° 。

采用不对称规则采样法时 PWM 输出波形如图7(a)所示, 五链节级联 H 桥输出交流侧电压在 10 个周期内 $THD=12.80\%$, 基波电压有效值为 1 894 V, 如图 7(b)所示, 基波相位为 -9.1° 。

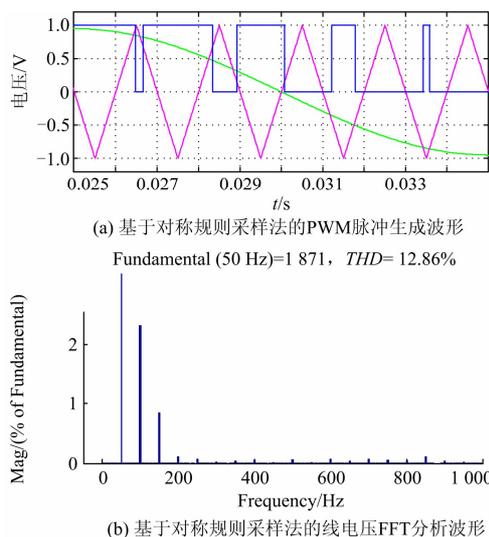


图 6 基于对称规则采样法的仿真输出波形

Fig. 6 Simulation output waveform based on symmetry rule sampling method

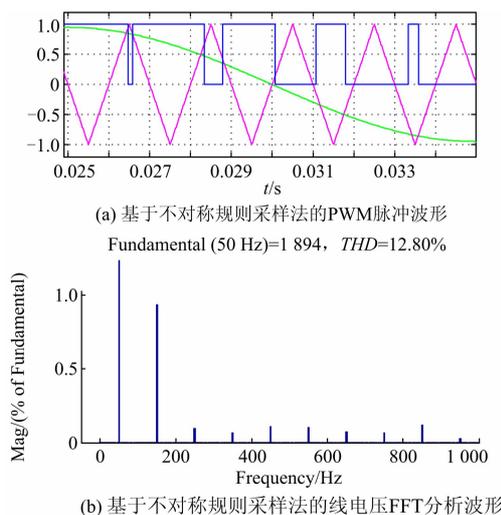


图 7 基于不对称规则采样法的仿真输出波形

Fig. 7 Simulation output waveform based on asymmetry rule sampling method

为了更清楚地对比上述三种方法, 将上述结果总结如表 2 所示, 调制波的初始相位为 0° 。

表 2 不同 SPWM 采样方法对比

Table 2 Comparison of different SPWM sampling methods

方法名称	基波有效值/V	基波初始相位/ $^\circ$	5H 桥输出电压 THD (10 个周期)/%
自然采样	1 898	-0.1	12.58
对称规则采样	1 871	-18.1	12.86
不对称规则采样	1 894	-9.1	12.80

从表2可以看出, 自然采样方法下的级联H桥STATCOM输出电压的基波初始相位偏差最小, 畸变率最低, 但是难以在数字控制中实现。而相对于对称规则采样, 不对称规则采样不仅输出电压高, 而且电压初始相位和THD都较小, 更接近于自然采样法。此外不对称规则采样PWM还具有1/4对称性, 因而不具有偶次谐波, 图7(b)很好地验证了这一点。

3.2 基于不对称规则采样的 CPS-SPWM 脉冲相移技术

为了验证CPS-SPWM脉冲相移技术的正确性, 本文以A相级联STATCOM为模型, 通过输出电压的基波和谐波特性来对比该调制策略与传统CPS-SPWM技术的误差, 表3即为对比结果。

表3 脉冲相移技术与传统CPS-SPWM技术对比
Table 3 Comparison of pulse phase shifting technology and traditional CPS-SPWM technology

方法	级联H桥数	基波有效值/V	基波初始相位/(°)	输出电压 THD (10个周期)/%
传统 CPS-SPWM	1	378.7	-9.1	59.49
	3	1 141	-9.1	21.17
	5	1 894	-9.1	12.80
	7	2 656	-9.1	9.37
	9	3 417	-9.1	7.32
CPS-SPWM 脉冲相移技术	1	/	/	/
	3	1 132	-15.1	22.56
	5	1 885	-16.3	14.67
	7	2 640	-16.8	10.26
	9	3 393	-17.1	8.38

从表3可以看出, 基于不对称规则采样的CPS-SPWM脉冲相移技术与传统CPS-SPWM技术相比, 传统CPS-SPWM技术的波形质量要略好于脉冲相移技术, 但整体波形非常接近。而且在数字化实现中脉冲相移技术远远优于传统CPS-SPWM技术, 并且随着级联H桥数目的增多, 脉冲相移技术的优势越明显。级联H桥数越多, 传统CPS-SPWM技术所需要的PWM发生器就越多, 故所需要的DSP芯片的个数就要增加, 如果增加DSP芯片的个数, 不仅会造成电路设计复杂, 可靠性降低, 增加设计成本, 且难以完成各相功率器件的同步触发, 控制算法复杂。而脉冲相移技术仅需要FPGA增加几路移相就能得到所需要的PWM脉冲信号, 在基本不影响输出性能的情况下, 大大简化了CPU控制复杂度, 控制逻辑较为简明清晰, 且资源占用少。

4 结论

本文对不同采样方法下采用 CPS-SPWM 策略

的级联H桥STATCOM输出波形进行了对比分析, 结果表明, 不对称规则采样法既克服了自然采样法不适合数字控制的缺点, 又克服了对称规则采样法谐波大的缺点, 在工程实际中应用广泛。在工程实践中, 当级联H桥数目较多时, CPU的资源受到限制, 因此, 本文提出了基于不对称规则采样 CPS-SPWM 脉冲相移技术, 与传统 CPS-SPWM 技术的对比结果表明, 随着级联H桥数目的增多, 脉冲相移技术的优势越明显, 即最大限度减轻CPU控制复杂度, 节省硬件资源, 易于扩展。

参考文献

- [1] 刘凤君. 多电平逆变技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 6-9.
- [2] 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.
- [3] MALINOWSKI M, GOPAKUMAR K, RODRIGUEZ J, et al. A survey on cascaded multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2197-2206.
- [4] 杨晓峰, 范文宝, 王晓鹏, 等. 基于模块组合多电平变换器的STATCOM及其控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 7-13.
YANG Xiaofeng, FAN Wenbao, WANG Xiaopeng, et al. Static synchronous compensator based on modular multilevel converter based STATCOM and its control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 7-13.
- [5] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-127.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-127.
- [6] 林志勇, 江道灼, 周月宾, 等. 基于级联H桥换流器的APF-STATCOM的控制与调制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 91-96.
LIN Zhiyong, JIANG Daozhuo, ZHOU Yuebin, et al. Control and modulation for APF-STATCOM based on cascaded H-bridge converter[J]. Power System Protection

- and Control, 2014, 42(7): 91-96.
- [7] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [8] 常伟, 史丽萍, 王思捷, 等. 空间矢量调制技术在6 kV 级联静止同步补偿器中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 95-99.
CHANG Wei, SHI Liping, WANG Sijie, et al. Application of space vector modulation in 6 kV cascade STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 95-99.
- [9] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [10] ZANG Chunyan, PEI Zhenjiang, HE Junjia, et al. Research on the application of CPS-SPWM technology in cascade multilevel inverter[C] // International Conference on Machines and Systems, Tokyo: IEEE, 2009: 1-4.
- [11] 同向前, 伍文俊, 任碧莹. 电压源换流器在电力系统中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 57-71.
- [12] IMAN-EINI H, SCHANEN L, FARHANGI S, et al. A modular strategy for control and voltage balancing of cascaded H-Bridge rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2428-2442.
- [13] 许胜, 赵剑锋, 唐国庆. 级联H桥型静止同步补偿器触发脉冲的快速生成方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 43-48.
- XU Sheng, ZHAO Jianfeng, TANG Guoqing. New trigger pulse quick generating method for cascaded H-bridge DSTATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(12): 43-48.
- [14] 许胜, 赵剑锋. 基于不对称规则采样法的级联H桥型变流器CPS-SPWM输出电压谐波特性分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 121-127.
XU Sheng, ZHAO Jianfeng. Analysis of the harmonic characteristics of the CPS-SPWM output voltage of cascaded H-bridge converters based on irregular sampling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 121-127.
- [15] 袁志昌, 宋强, 刘文华. 规则采样对载波相移SPWM输出基波相位滞后的影响[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 107-111.
YUAN Zhichang, SONG Qiang, LIU Wenhua. The effect of regulated sampling on phase delay of phase-shift SPWM output[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 107-111.
- [16] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 170-171.
- [17] 李建林, 王立乔. 载波相移调制技术及其在大功率变流器中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 92-97.

收稿日期: 2014-10-07; 修回日期: 2015-01-16

作者简介:

靳艳(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用。E-mail: 524141810@qq.com

(编辑 周金梅)