DOI：10.7500/AEPS201205241

基于 Buck 交-交斩波器的无功补偿器拓扑与控制方法设计

武 伟，谢少军，汤 雨，许津铭
（南京航空航天大学自动化学院，江苏省南京市 210016）

摘要： 首先介绍了一种新的交流斩波型无功补偿器，无需直流储能环节，系统可靠性得到加强。以 Buck 型交流斩波无功补偿器为对象，分析了交流斩波无功补偿的基本原理和补偿特性，推导出占空比与补偿电流之间的关系，建立了系统分析模型。在此基础上，提出了基于广义积分的直接电流控制策略，并给出了参数设计准则，最后进行了仿真和实验验证。仿真和实验结果表明，基于直接电流控制的 Buck 型交流斩波无功补偿器可以实现对网侧无功功率的实时补偿。

关键词： 交流斩波；Buck 电路；无功补偿；直接电流控制；锁相环

0 引言

现代电力系统中，无功功率补偿对供电系统和负载的运行都起着十分重要的作用：提高系统功率因数，稳定受电端及电网的电压，平衡三相有功和无功负载等[1-2]。早期的无功补偿设备，如同步调相机、并联电容器组，由于其动态响应慢而限于一些负载固定的无功补偿场合使用。静止无功补偿器（static var compensator，SVC）在补偿无功功率的同时还要考虑高次谐波的消除，在系统电压偏低时其无功补偿的能力会降低[3-6]。静止同步补偿器（static synchronous compensator，STATCOM）可以达到连续补偿无功功率、抑制闪变的目的，但是由于其采用直流/交流（DC/AC）逆变结构，直流侧通常需要大容量的储能元件（一般为电解电容）来支撑，因此可靠性降低，同时由于其成本较高，在工程上推广使用还有一定的难度[7-10]。

针对传统无功补偿设备的固有缺陷，文献[11]提出了无逆变器型 STATCOM 的概念，将传统的并联补偿电容器变为“动态电容器”，只采用一级交-交斩波变换电路，省去了直流储能环节，但文献[11]仅给出了基本原理，对新型无功补偿技术的特性未作深入研究，且并未涉及系统的闭环控制问题。文献[12]提出了一种基于有源阻抗概念的无功功率补偿技术，其基本思想与文献[11]相似。文献[12]采用开环控制策略对基波无功电流进行补偿，不能实现系统的无静差补偿。文献[13-15]基于双虚拟正交源调制技术[16]，提出了动态电容器的无功及谐波补偿技术，但由于该控制方案中各谐波分量之间还有一定的耦合，对各谐波分量的控制较难实现。目前，国内对交流斩波无功补偿技术并未有研究，国外在这方面的研究也处于初级阶段，对交-交无功补偿特性、闭环控制策略有待进行深入的研究。

本文以 Buck 型交流斩波无功补偿基本模块为对象，详细分析了交流斩波无功补偿的基本原理和补偿特性。针对现有控制策略存在的不足，提出了一种基于广义积分的直接电流控制策略，实现了对基波无功功率的实时精确控制。

1 交流斩波无功补偿器的工作原理

单相交流斩波无功补偿系统实现框图如图 1 所示。

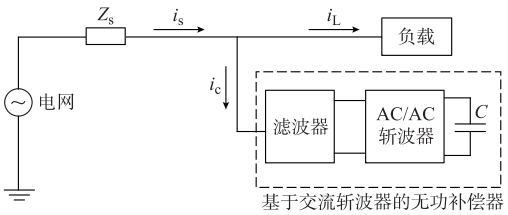


图 1 交流斩波无功补偿系统
Fig. 1 Reactive power compensation system based on AC/AC chopper

交流斩波无功补偿技术是在传统并联无功补偿电容的基础上，在电网与电力电容器之间加入一个交-交变换接口电路，通过对交-交斩波接口电路的控制，得到一超前电网电压 90°、幅值可调的容性电流 i_c，实现对交流网侧感性无功功率连续动态的补偿，最终使得网侧的功率因数为 1。交流斩波无功补偿器主要由网侧滤波器（主要滤除开关频率及其倍数频率的边频谐波分量，因此其容量较小）、交-

收稿日期：2012-05-26；修回日期：2012-07-09。

交斩波器及补偿电容器 3 部分组成,如图 1 的虚线框内所示。图中交流斩波器的实现电路多种多样,可以是各种四象限交-交变换电路。

图 2(a)所示为 Buck 型交流斩波无功补偿拓扑,双向开关(S1 和 S2)采用 2 个带反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)反串联构成;电感 L_f 与电容 C_f 构成网侧滤波器来滤除开关频率及其倍频的高次谐波分量;电容 C 为无功补偿电容器;电感 L 为滤波电感,用来抑制峰值电流。开关 S1 与 S2 采用互补工作方式。为了便于分析,可将图 2(a)简化为如图 2(b)所示的等效电路。

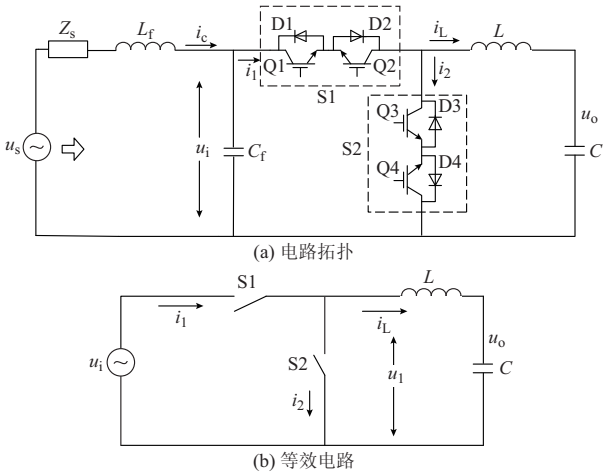


图 2 Buck 型交流斩波无功补偿器

Fig. 2 Var compensator based on Buck AC/AC chopper

在电路元件均为理想器件的条件下,设输入电压为 u_i,斩波后的电压为 u_1,开关频率为 f_s,开关周期 $T_s=1/f_s$,S1 的占空比为 $D(0<D<1)$。定义开关函数 $D(t)$为:

$$D(t)=\begin{cases}1 & mT_s\leqslant t<DT_s+mT_s\\ 0 & mT_s+DT_s\leqslant t<(m+1)T_s\end{cases} \tag{1}$$

由等效电路图 2(b)可得:

$$u_1(t)=u_i(t)D(t)=u_{11}(t)+\sum_{n=2}^{\infty}u_{1n}(t) \tag{2}$$

$$i_1(t)=i_L(t)D(t) \tag{3}$$

$$i_2(t)=i_L(t)(1-D(t)) \tag{4}$$

$$i_L(t)=\frac{u_{11}(t)}{\mathrm{j}(X_{L1}-X_{C1})}+\sum_{n=2}^{\infty}\frac{u_{1n}(t)}{\mathrm{j}(X_{Ln}-X_{Cn})} \tag{5}$$

式中:$u_{1n}(t)$为 $u_1(t)$中的 n 次谐波分量;X_{Ln} 和 X_{Cn} 分别为电感 L 和电容 C 在 n 倍基波频率下的阻抗值。

式(1)利用傅里叶级数展开可得:

$$D(t)=D+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2}{n\pi}\sin nD\pi\cos n\omega_s t \tag{6}$$

式中:$\omega_s=2\pi f_s$。

由于网侧滤波电感 L_f 的感值较小,L_f 上的压降可忽略不计,输入电压 u_i 近似于电网电压 u_s,即

$$u_i(t)=u_s(t)=U_s\sin\omega_1 t \tag{7}$$

式中:U_s 为电网电压幅值;ω_1 为基波角频率。

由式(2)—式(7)可得:

$$u_1(t)=DU_s\sin\omega_1 t+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2U_s\sin\omega_1 t}{n\pi}\sin nD\pi\cos n\omega_s t \tag{8}$$

$$i_1(t)=\frac{D^2U_s\sin\omega_1 t}{\mathrm{j}(X_{L1}-X_{C1})}+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2DU_s\sin\omega_1 t}{\mathrm{j}n\pi(X_{Ln}-X_{Cn})}\sin nD\pi\cos n\omega_s t \tag{9}$$

考虑到 $X_{L1}\ll X_{C1}$,式(9)可以简化为:

$$i_1(t)=\frac{D^2U_s\sin\omega_1 t}{-\mathrm{j}X_{C1}}+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2DU_s\sin\omega_1 t}{\mathrm{j}n\pi(X_{Ln}-X_{Cn})}\sin nD\pi\cos n\omega_s t \tag{10}$$

式(8)表明输出电压以 $DU_s\sin\omega_1 t$ 为基波,谐波频率分布在 ω_s 整数倍两侧处。式(10)表明输入电流 i_1 的基波是与输入电压同频的正弦波,其相位超前电压相位 90°(即提供容性电流),谐波频率分布在 ω_s 整数倍两侧 $\pm\omega_1$ 处,经过 LC 低通滤波后,可得

$$i_c(t)=\frac{D^2U_s\sin\omega_1 t}{-\mathrm{j}X_{C1}}=\mathrm{j}\omega_1 D^2CU_s\cos\omega_1 t \tag{11}$$

式(11)表明,Buck 型交流斩波无功补偿器可视为一个容值可连续调节的电容器,通过对占空比 D 的实时控制,可实现对网侧无功功率的动态补偿。Buck 型交流斩波无功补偿器所提供的无功功率大小与补偿电容 C、网侧电压 U_s 以及占空比 D 有关。通常情况下,网侧电压是基本固定的,补偿电容 C 亦是固定的(本文所选补偿电容 $C=200\ \mu\mathrm{F}$),因此补偿无功功率的大小直接由占空比 D 来确定。图 3(a)所示为 Buck 型交流斩波无功补偿模块的无功补偿范围,随着电网电压的跌落,其额定最大补偿容量相应地下降。图 3(b)为 Buck 型交流斩波无功补偿模块补偿 D-U-I 曲线图,其展示了补偿电流与占空比、网侧电压的关系。

2 Buck 型交-交斩波无功补偿器直接电流控制策略

与 STATCOM 由直流侧电压和网侧电流产生补偿的无功电流指令不同,交流斩波无功补偿器对有功功率不可控。文献[11-12]只给出了交流斩波

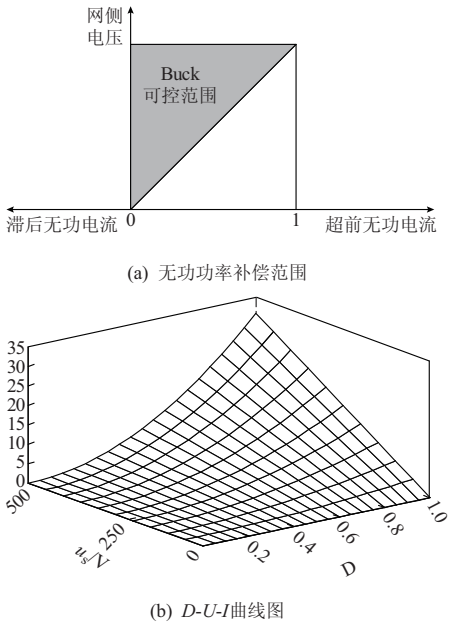


图 3　Buck 型交流斩波无功补偿器补偿特性
Fig. 3　Characteristics of Buck AC-AC var compensator

无功补偿的开环控制策略，并不能实现系统的无静差补偿，因此，需要研究适当的补偿电流产生及闭环控制策略。

为了实现对负载无功功率的及时补偿，针对 Buck 型交流斩波无功补偿提出了如图 4 所示的直接电流控制策略。

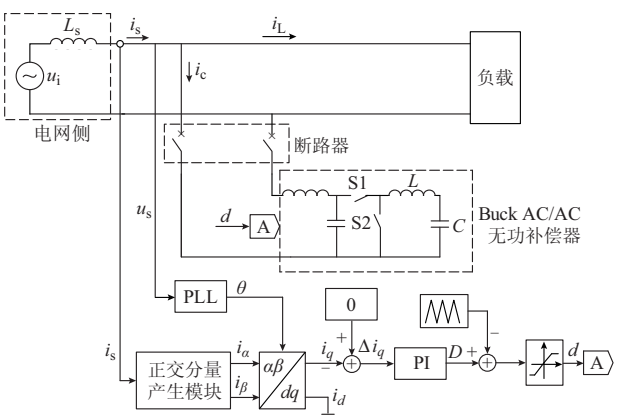


图 4　Buck 型交流斩波无功补偿的直接电流控制
Fig. 4　Direct current control of Buck AC-AC var compensator

图 4 原理是：首先采样网侧电流，将网侧电流进行正交分解，得到 2 个正交的电流分量 i_α 和 i_β，再经 dq 变换（d 轴与网侧电压矢量同轴）得到 q 轴的分量 i_q 和 d 轴分量 i_d（其中 i_q 代表检测的网侧无功电流大小），将 i_q 与 0 作差（将 i_q 控制为 0 即可实现对网侧无功电流的补偿），差值经比例-积分（PI）环节后再经脉宽调制（PWM）后形成交流斩波开关管的触发脉冲信号，最终实现对网侧无功电流的实时控制。对电网电压的锁相和对网侧电流的检测计算都需要对采样电压和电流信号进行正交分解，以形成一对正交分量。传统的正交分解方法包括：延迟模块产生 90°相位差、Hilbert 变换、逆向 Park 变换等，然而，这些方式都存在一些缺陷，如实现复杂、具有非线性特性以及滤波性差等[17-18]。本文采用二阶广义积分器模块产生一对正交的信号，来满足闭环控制的动态和稳态性能要求。

图 4 所示的电网电压锁相环（PLL）采用的是基于二阶广义积分器的单相锁相环[17]，基于二阶广义积分器的单相锁相环结构在各种扰动影响或突变情况下，都能很好地跟踪输入的电网电压信号，实现简单、精度高、响应速度快[18]。基于二阶广义积分器的单相锁相环结构如图 5(a)所示，其中的二阶广义积分正交分解模块如图 5(b)所示。图 5(b)所示的二阶广义积分器正交电压生成模块输出一路与输入信号幅值、相位以及频率都相等的信号，此外还输出一路与输入信号频率相同但相位滞后 90°的信号，即产生一对正交的信号。对网侧电流的正交分解，图 4 亦采用这种方法实现。

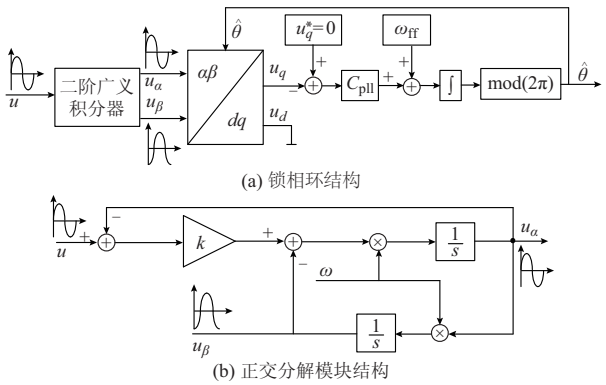


图 5　基于二阶广义积分器的单相锁相环
Fig. 5　Structure of single-phase PLL based on second-order generalized integrator

2.1　基于二阶广义积分器的正交分解模块设计

由图 5(b)可以得到基于二阶广义积分的正交分解模块的闭环传递函数为：

$$G_d(s)=\frac{u_\alpha(s)}{u(s)}=\frac{k\omega s}{s^2+k\omega s+\omega^2} \tag{12}$$

$$G_q(s)=\frac{u_\beta(s)}{u(s)}=\frac{k\omega^2}{s^2+k\omega s+\omega^2} \tag{13}$$

式中：ω 为二阶广义积分器的谐振频率；k 为系数，其决定着闭环系统的带宽。

输入信号 u 经过该二阶广义积分器模块可以简单方便地得到所需要的正交电压信号 u_α 和 u_β。在

不同 k 值情况下,闭环传递函数的幅频特性曲线如图 6 所示。

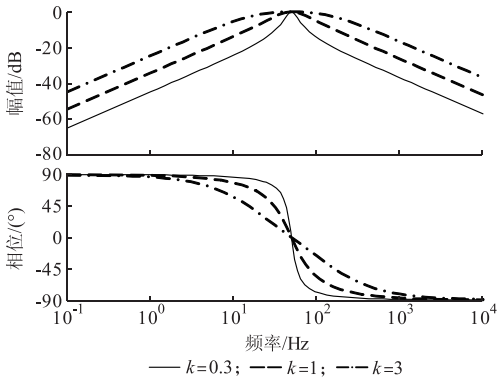


图 6 不同 k 值情况下传递函数 $G_d(s)$ 的波特图
Fig. 6 Bode diagram of $G_d(s)$ with different k

图 6 表明,系统在谐振频率(50 Hz)处没有衰减,其他处都存在一定的衰减,且偏离谐振频率越远,衰减越大,且当 k 值减小时,系统带宽变窄,滤波作用增强。系统动态响应速度亦与 k 值有关,k 值越小,系统动态响应速度越慢,综上考虑,将 k 值选为 0.8。

2.2 直接电流控制环的设计

由于交-交变换的动态模型较难建立,因此,本文基于系统的有效值进行建模分析,为直接电流控制器参数设计提供一定的参考。如图 7(a)所示,虚线框内为 Buck 型交-交无功补偿器由占空比至补偿电流的有效值稳态模型。当控制系统带宽远小于基频(50 Hz)时,可建立有效值下的小信号模型,如图 7(b)所示。

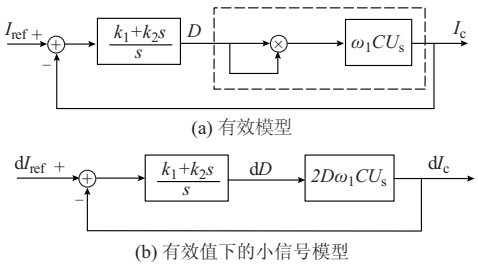


图 7 Buck 型交流斩波无功补偿系统直接电流控制模型
Fig. 7 Direct current control model of Buck AC-AC var compensator

由图 7(b)可得系统的闭环传递函数为:

$$G_{close}=\frac{k_1k_3+k_2k_3s}{(1+k_2k_3)s+k_1k_3} \tag{14}$$

式中:$k_3=2D\omega_1CU_s$;k_1 为 PI 控制器的积分系数;k_2 为 PI 控制器的比例系数。

3 仿真和实验验证

为了验证文中理论分析的无功补偿特性以及提出的直接电流控制策略的正确性和有效性,设计了一台 Buck 型交流斩波无功补偿样机,样机主电路结构如图 2(a)所示。电网基波频率为 50 Hz;样机的输入电压 $U_s=220$ V;额定补偿容量为 $Q=3.3$ kvar;开关频率为 $f_s=10$ kHz;网侧滤波电感 $L_f=1$ mH;网侧滤波电容 $C_f=20$ μF;滤波电感 $L=220$ μH;补偿电容 $C=200$ μF,功率开关采用 International Rectifier 公司的 IGBT IRG4PC50FD。

采用 Saber 软件对系统进行了仿真验证。附录 A 图 A1 为占空比为 0.2,0.5,0.8 时系统的补偿电流仿真结果。图 8 为占空比分别为 0.2,0.5,0.8 时的输入电压和补偿电流的实验波形。从仿真和实验的结果可以看出,通过对交流斩波拓扑占空比的控制,完全可以控制相应的补偿电流,该补偿电流是与电网电压同频率且超前的容性无功电流。

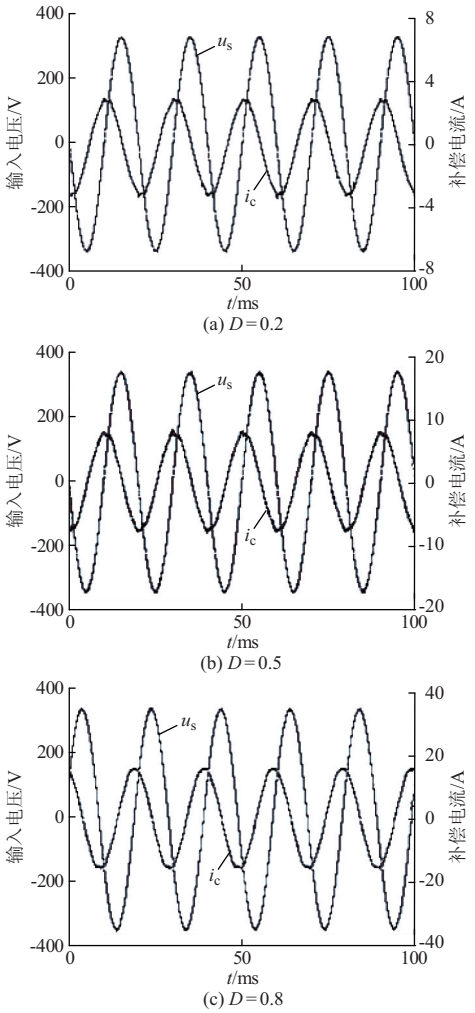


图 8 Buck 型交流斩波无功补偿模块的实验波形
Fig. 8 Experimental waveforms of Buck AC-AC var compensator

为了验证直接电流控制策略的正确性和有效性，搭建如图 4 所示的系统平台，控制芯片选用 TI 公司的 TMS320F28335。负载采用并联 RL 作为阻感性负载，取 $R_{\mathrm{Load}}=50\ \Omega$，$L_{\mathrm{Load1}}=90$ mH。附录 A 图 A2 为直接电流控制下的仿真波形。图 9 为直接电流控制下的实验结果。

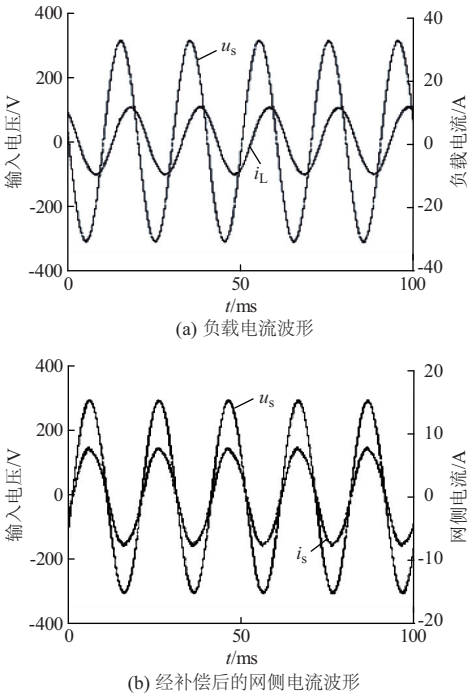


图 9　直接电流控制下的稳态实验波形
Fig. 9　Steady experimental waveforms under direct current control

仿真和实验表明，感性负载的电流在相位上滞后于电网电压，电流有效值达到 7.61 A，如图 9(a)所示。经补偿达到稳定后网侧电流与电网电压同相位，功率因数达到 1，电流的有效值为 5.58 A，如图 9(b)所示。

为了证实直接电流控制策略在负载突变时，系统仍有较好的动态及稳态性能，进行了突加和突卸负载的实验。感性负载突变时，交流斩波无功补偿器补偿动态变化的实验波形见附录 A 图 A3。可见，在感性无功负载突变时，补偿电流可在一个工频周期即达到稳定，使得网侧电流功率因数为 1。仿真和实验的结果表明，基于直接电流控制的 Buck 型交流斩波无功补偿器可以实现对网侧无功功率的实时、动态补偿。

4　结论

1)通过理论分析得出 Buck 型交流斩波无功补偿拓扑下的无功补偿特性，并绘出了补偿特性曲线图。

2)通过仿真和实验验证了 Buck 型交流斩波无功补偿拓扑的补偿特性，证实了交流斩波无功补偿的可行性。

3)提出了基于二阶广义积分的无功补偿直接电流控制策略，建立了相应的有效值模型，并通过仿真实验验证了该方案可以实现对网侧无功功率的实时补偿。该新型无功补偿器无需直流储能环节，结构简单，可降低系统的体积和成本，同时具有较高的可靠性。

附录见本刊网络版(http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx)。

参 考 文 献

[1] 王兆安，杨君，刘进军，等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京：机械工业出版社，2005：39-51.

[2] 谢小荣，姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2006：47-56.

[3] 陈栋，涂春鸣，罗安，等. SVC 与 STATCOM 联合运行协调控制设计与仿真[J]. 电力系统自动化，2008，32(19)：76-80.
CHEN Dong, TU Chunming, LUO An, et al. Coordinated control design and simulation of joint operation for SVC with STATCOM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 76-80.

[4] KULKARNI D B, UDUPI G R. ANN-based SVC switching at distribution level for minimal-injected harmonics [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(3): 1978-1985.

[5] 洪磊，陈国柱. 具有谐振抑制功能的新型 SVC 拓扑设计及控制方法[J]. 电力系统自动化，2012，36(1)：101-106.
HONG Lei, CHEN Guozhu. Topology design and control method for a new static var compensator with resonance suppression function [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 101-106.

[6] 高聪哲，姜新建，李永东. 基于级联有源滤波器与静止无功补偿器的综合补偿控制方案[J]. 电力系统自动化，2012，36(7)：92-98.
GAO Congzhe, JIANG Xinjian, LI Yongdong. A universal compensation control scheme based on cascade active power filter and static var compensator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 92-98.

[7] 赵伟，罗安，唐杰，等. 静止无功发生器与晶闸管投切电容器协同运行混合无功补偿系统[J]. 中国电机工程学报，2009，29(19)：92-98.
ZHAO Wei, LUO An, TANG Jie, et al. Hybrid var compensator based on the coordinated operation of STATCOM and TSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 92-98.

[8] 张茂松，查小明，孙建军，等. 链式 D-STATCOM 的无源性控制[J]. 中国电机工程学报，2011，31(15)：33-39.

ZHANG Maosong, ZHA Xiaoming, SUN Jianjun, et al. Passivity-based control of cascade D-STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15): 33-39.

[9] XIE H L, ANGQUIST L, NEE H P. Design study of a converter interface interconnecting energy storage with the DC link of a STATCOM[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(4): 2676-2686.

[10] 胡应宏,任佳佳,王建赜,等.级联 STATCOM 阀组直流侧电压不平衡现象及原因分析[J].电力系统自动化,2011,35(21):96-99.
HU Yinghong, REN Jiajia, WANG Jianze, et al. Analysis of voltage unbalance phenomenon and causes in cluster DC link of cascaded H-bridge STATCOM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 96-99.

[11] DEEPAK D, JYOTI S. Inverter-less STATCOMs[C]// Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 15-19, 2008, Rhodes, Greece: 1372-1377.

[12] LADOUX P, LOWINSKY A, MARINO P. Reactive power compensation in railways using active impedance concept[C]// Proceedings of 2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion, June 14-16, 2010, Pisa, Italy: 1362-1367.

[13] ANISH P, JYOTI S, DEEPAK D. Dynamic var/harmonic compensation with inverter-less active filters[C]// Proceedings of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, October 5-9, 2008, Edmonton, Canada: 6p.

[14] ANISH P, JYOTI S, DEEPAK D. Dynamic capacitor (D-CAP): an integrated approach to reactive and harmonic compensation[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2010, 46(6): 2518-2525.

[15] ANISH P, DEEPAK D. Control of dynamic capacitor[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2011, 47(1): 161-168.

[16] DIVAN D M, SASTRY J. Voltage synthesis using dual virtual quadrature sources—a new concept in ac power conversion[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(6): 3004-3013.

[17] CIOBOTARU M, TEODORESCU R, BLAABJERP F. A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator[C]// Proceedings of the 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 18-22, 2006, Jeju, South Korea: 6p.

[18] CIOBOTARU M, TEODORESCU R, AGELIDIS V G. Offset rejection for PLL based synchronization in grid-connected converters[C]// Proceedings of the 23rd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 24-28, 2008, Austin, TX, USA: 1611-1617.

武 伟(1983—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力电子及电力传动。E-mail: wujia2006@126.com

谢少军(1968—),男,教授,主要研究方向:航空电源和功率电子变换技术。E-mail: eeac@nuaa.edu.cn

汤 雨(1980—),男,博士,硕士生导师,主要研究方向:功率电子变换技术。

(编辑 孔丽蓓)

Topology and Control Strategy Design for Buck AC-AC Chopper Based Var Compensators

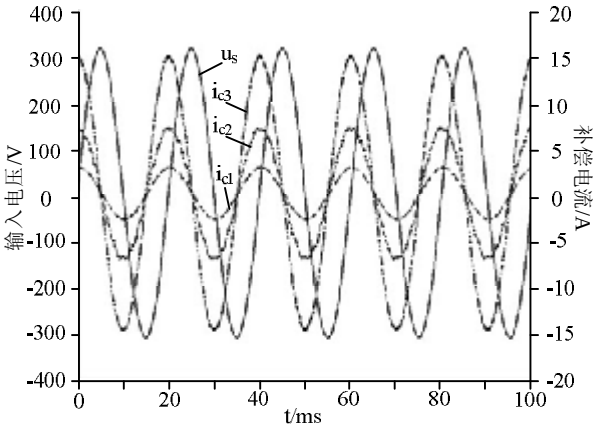
WU Wei, XIE Shaojun, TANG Yu, XU Jinming

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A new AC-AC chopper based var compensator is proposed. It does not require the DC-link energy storage and can effectively enhance the system reliability. The basic principles and compensation characteristics of the Buck AC/AC chopper based var compensator are described, the relationship between duty ratio and compensation current is derived, and the system analysis model is developed. A new direct current control method based on the second order generalized integral is proposed for the var compensator with detailed design criteria as well. The experimental and simulation results demonstrate that the real-time compensation of reactive power in grid side can be realized by this var compensator based on a direct current controlled Buck AC/AC chopper.

Key words: AC chopper; Buck circuit; reactive power compensation; direct current control; phase-locked loop (PLL)

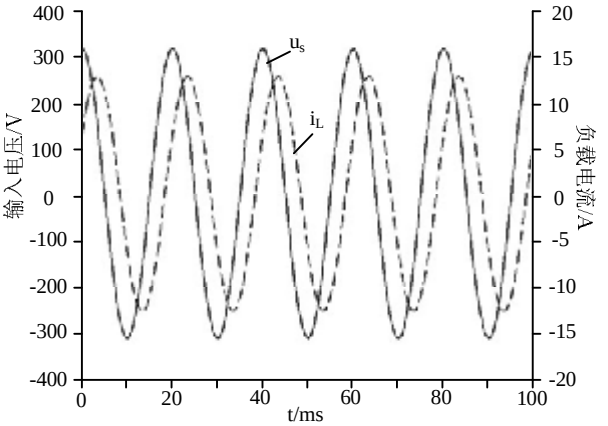
附录 A



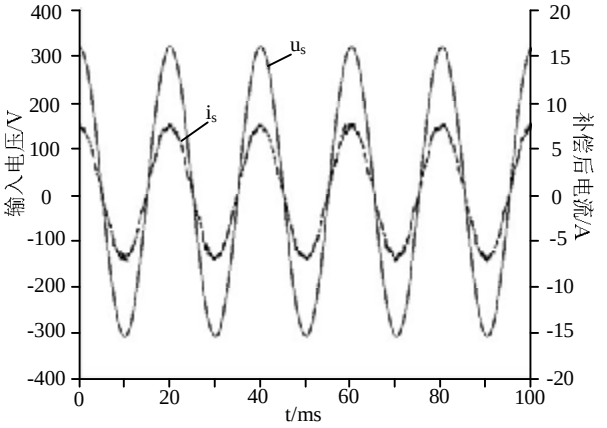
i_{c1}，i_{c2}，i_{c3} 分别代表占空比为 0.2,0.5,0.8 时的补偿电流波形

图 A1　Buck 型交流斩波无功补偿模块的仿真波形

Fig.A1　Simulation waveforms of Buck AC-AC var compensator



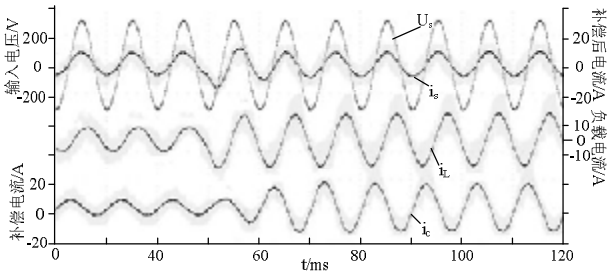
(a) 负载电流波形



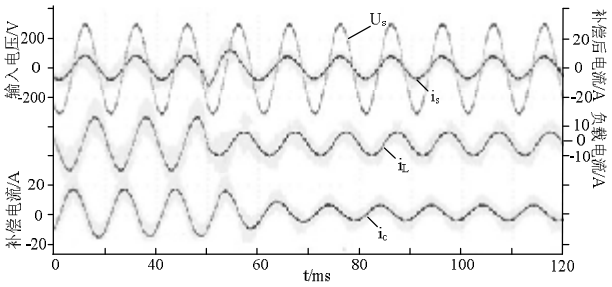
(b) 经补偿后的网侧电流波形

图 A2　直接电流控制下的仿真波形

Fig.A2 Simulation waveforms under direct current control



(a) 突加感性负载（负载由 R_{load}=50Ω，L_{load2}=150mH 突变为 R_{load}=50Ω，L_{load3}=50mH）



(b) 突卸感性负载（负载由 R_{load}=50Ω，L_{load3}=50mH 突变为 R=50Ω，L_{load2}=150mH）

图 A3　直接电流控制下的动态实验波形

Fig.A3　Dynamic experimental waveforms under direct current control