

基于分散控制的级联静止同步补偿器 直流侧电压均衡控制

徐 晨, 戴 珂, 陈晶晶, 彭 繁, 康 勇

(华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 基于单极倍频与载波移相相结合的调制算法, 分析了级联静止同步补偿器直流侧电容电压不平衡机理, 根据分散控制的方法, 提出了通过改变输入单链节的瞬时有功功率来平衡直流侧电容电压的控制策略。该策略可在每一个逆变单元里独立实现, 与相邻逆变单元不存在耦合, 且不需要额外检测其他物理量, 具有可靠性高、易于实现等优点。仿真和样机实验验证了该控制策略的可行性和有效性。

关键词: 静止同步补偿器; 级联多电平; 直流电压均衡; 分散控制

中图分类号: TM761+.1

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)04-0032-06

DC-side Voltage Balance Control for Cascaded STATCOM Based on Distributed Control

XU Chen, DAI Ke, CHEN Jing-jing, PENG Fan, KANG Yong

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: It analyses the DC capacitor voltage imbalance mechanism of cascaded STATCOM based on unipolar dual frequency carrier phase-shifted SPWM(CPS-SPWM) modulation, presents a DC capacitor voltage control strategy based on distributed control by changing the instantaneous active power input to single module. The strategy can be realized in each inverter respectively and there is no coupling with other inverter units, what; äs more, additional test of other physical quantities is not necessary. It has the advantages such as high reliability, easy implementation, etc. Simulation and prototype test results show the feasibility and the effectiveness of the strategy.

Key words: static synchronous compensator(STATCOM); cascaded multilevel; DC voltage balancing; distributed control

0 引言

日常生活与工业生产中大量使用的冲击性负载使配电系统面临着无功污染和电压闪变等电能质量问题的考验。作为配电系统电能质量调节的有效手段, STATCOM(静止同步补偿器)成为研究热点并代表着FACTS(柔性交流输电系统)的发展方向。相对于传统变

压器多重化结构的STATCOM, 级联STATCOM具有无多重化接入变压器、效率高, 便于模块化设计等优点^[1-5]。

在级联STATCOM中, 保持各链节直流侧电压的均衡是STATCOM装置安全可靠运行的关键技术。如果各链节直流侧电压不平衡, 会导致功率器件上承受的电压不同, 造成输出电压畸变率增大。关于电压不平衡的机理, 文献[6]和[7]从数学模型的角度分析了由各种不同的损耗带来的电压不平衡现象。本文基于调制策略解释了不平衡现象的根本原因。目前直流电压平衡的控制方法有2类: 一类是通过外部的平衡控制电路来实现, 需要额外的硬件电路与控制系统, 增加了装置的复杂性与成本, 如文献[8]提出了基于交流母线能量交换

收稿日期: 2011-05-20

作者简介: 徐晨(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力电子在电力系统中的应用研究;

戴珂(1969-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力电子在电力系统中的应用研究。

项目基金: 台达2010电力电子科教发展计划项目(DREG2010009)

的直流电压均衡控制方法,文献[9]在此基础上又提出了基于直流母线能量交换的方法;另一类是通过自身的平衡算法来实现,如文献[1]中通过调节各链节的移相角来实现电压的平衡,文献[10]提出叠加有功电压矢量的平衡控制策略,文献[11]提出改变正弦调制波的相角来补偿链节有功功率损耗的方法。本文提出的改变单链节瞬时有功功率的控制方法是基于分散控制^[12-13]下的级联STATCOM系统,通过每个链节内部的平衡算法来实现。仿真与实验结果证明,该方法能够很好地控制直流侧电压,便于模块化设计。

1 基于单极倍频的载波移相调制算法的级联STATCOM 直流侧电压不均衡的机理

1.1 级联 STATCOM 结构

级联STATCOM系统结构如图1(a)所示,图中 v_{sa} 、 v_{sb} 和 v_{sc} 为电网的三相电压, i_{sab} 、 i_{sbc} 和 i_{sca} 为装置的三相电流(规定电流参考方向为由电网流向装置),耦合电感将STATCOM与电网连接起来,其中 R 为每相损耗等效电阻。图1(b)示出系统侧a、b相间单相级联型STATCOM电路图。级联STATCOM装置每相由若干个H桥串联组成,直流侧为直流储能电容。STATCOM与电网间的功率交换可通过改变级联型逆变器输出电压的大小和相位来实现。将测得的电压信号与电流信号送入STATCOM控制器以产生逆变器的触发控制信号。

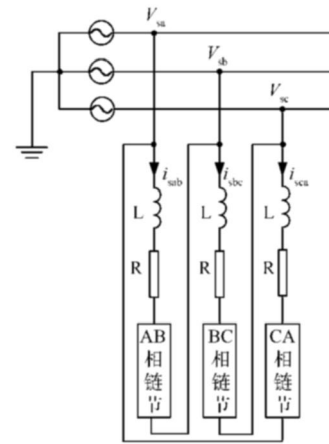
1.2 基于单极倍频的载波移相调制策略

级联STATCOM调制策略的主要任务是控制逆变器输出电压波形,使其正弦化。载波移相SPWM调制算法^[14-15]是基于成熟的SPWM调制策略,可在不提高开关频率前提下大大减少谐波电压输出。为使级联STATCOM获得更高的等效开关频率,进而获得更好的输出谐波特征,可将单极倍频调制算法引入载波移相调制策略。假设链节数为 N ,采用基于单极倍频的载波移相调制策略后,可使其等效开关频率增大到单链节开关频率的 $2N$ 倍。

图2示出单相3个链节采用的基于单极倍频的载波移相的调制原理图。图中, E 为直流侧电压, V_{c1} 、 V_{c2} 、 V_{c3} 为互错 60° 输入到每个链节的三角载波, V_{o1} 、 V_{o2} 、 V_{o3} 为每个链节的输出电压, V_o 为3个链节串联输出电压。可以看出, V_o 为七电平阶梯波,形状非常接近正弦波。

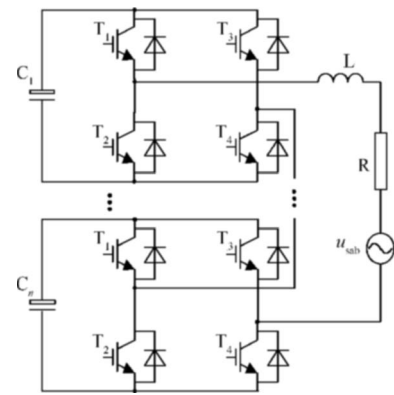
1.3 直流电压不均衡的机理

采用传统调制策略时,在不计损耗的情况下,级联型STATCOM不会出现单链节直流侧电压不均衡现象。这是因为各链节相串联,在每个链节输出电压波形相



(a) 系统结构图

(a) System structure



(b) 单相电路图

(b) Circuit diagram of single phase

图1 级联型多电平STATCOM 示图
Fig. 1 Diagram of cascaded multilevel STATCOM

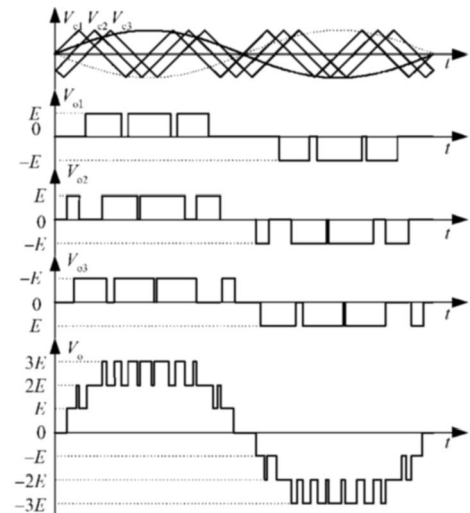


图2 基于单极倍频的载波移相调制原理图($N=3$)

Fig. 2 Theoretical diagram of unipolar dual frequency CPS-SPWM modulation ($N=3$)

同时,流过的电流相同,故对电容电压的充放电效应是一致的。在实际系统中采用传统调制策略时仍需考虑直流侧电压均衡问题,这是因为各链节损耗的微小差

异会造成直流侧电压的不均衡现象^[6-7],甚至导致系统崩溃。逆变桥的损耗分为串联型损耗、并联型损耗与混合型损耗3类。串联型损耗(如器件的通态损耗)只与逆变桥输出电流有关,并联型损耗(如吸收回路损耗、电容自身损耗)只与直流侧电压有关,而混合型损耗(如器件的开关损耗)则与输出电流和直流电压都有关。

研究发现,采用基于单极倍频的载波移相调制策略时,如果忽略每个链节损耗的影响,即使在理想情况下也会出现直流侧电压不均衡现象,并且这种现象会随着开关频率的降低而变得越发明显,载波的相角差异是造成不均衡现象的根本原因。

单极倍频SPWM输出波形的双重傅里叶分析如式(1)所示:

$$F(t) = ME \sin(\omega_r t - \varphi) + \frac{4E}{\pi} \sum_{m=2,4,\dots}^{\infty} \sum_{n=\pm 1, \pm 3, \dots}^{\pm \infty} \frac{J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right)}{m} (-1)^{\frac{m}{2}} \times \sin(m\omega_c t + n(\omega_r t - \varphi)) \quad (1)$$

式中: M ——调制比; E ——直流侧电压; ω_c ——载波角频率; ω_r ——调制波角频率; φ ——调制波初始相角; $J_n(x)$ ——贝塞尔函数(见式(2))

$$J_n(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-jx \sin y} e^{jny} dy \quad (2)$$

若再加上载波移相的调制算法,设一共有 N 个逆变单元,则第 L 个逆变单元的输出电压双重傅里叶级数

$$F(t) = ME \sin(\omega_r t - \varphi) + \frac{4E}{\pi} \sum_{m=2,4,\dots}^{\infty} \sum_{n=\pm 1, \pm 3, \dots}^{\pm \infty} \frac{J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right)}{m} (-1)^{\frac{m}{2}} \times \sin\left(m\left(\omega_c t + \frac{\pi L}{N}\right) + n(\omega_r t - \varphi)\right) \quad (3)$$

由式(3)可以看出,第 L 个逆变器输出的基波分量包含 $F_1(t)$ 和 $F_2(t)$ 2 个部分(式(4))其中 $F_2(t)$ 应满足式(5)所示条件。

$$\left. \begin{aligned} F_1(t) &= ME \sin(\omega_r t - \varphi) \\ F_2(t) &= \frac{4E}{\pi} \sum_{m=2,4,\dots}^{\infty} \sum_{n=\pm 1, \pm 3, \dots}^{\pm \infty} \frac{J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right)}{m} (-1)^{\frac{m}{2}} \times \sin\left(\omega_r t + \frac{\pi L m}{N} - n\varphi\right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$m \frac{\omega_c}{\omega_r} + n = 1 \quad (5)$$

定义: $\omega_c / \omega_r = k, n = 1 - mk$

k 值越大时, n 的绝对值也越大,而 $J_n(x)$ 则越小;—

定程度时, $J_n(x)$ 可以近似认为等于零。

开关频率越高时, k 值越大,逆变器输出电压之间的基波含量幅值差异与相角差异也就越小,基本可以忽略不计,也就不会产生不均压的现象。但开关频率过低时,不均压的现象就会很明显。

当单相桥输出电压超前或者滞后参考电压时,直流电容是充电还是放电、系统是吸收有功功率还是发出有功功率,取决于装置此时输出的无功电流是感性还是容性。

2 级联 STATCOM 分散控制原理

级联 STATCOM 所用的分散控制方法是一种将中央控制器和单链节控制器结合使用的多 DSP 控制策略。中央控制器用于实现双闭环(电压外环和电流内环)上层控制算法,其中电压外环采用传统的 PI(比例积分)控制器,电流内环可采用重复控制器与 PI 控制器相并联的控制器设计形式,在满足系统动态性能的同时也可以消除系统的周期性误差,得到较好的稳态性能。单链节控制器用于实现各链节的直流电容电压均衡控制并产生本链节的 PWM 脉冲输出。具体实现方式见第 3 节。分散控制系统(图 3)将每个链节视为具有独立控制器的功率变换模块,简化了中央控制器软件和硬件检测电路,同时也为在单链节控制器上进行直流电压均衡控制提供了硬件与软件的平台。

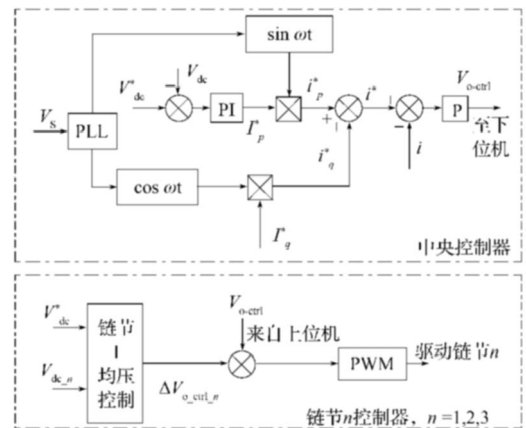


图3 分散控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of the distributed control system

3 直流侧电压均衡控制策略

消除各链节直流电容电压的差异可通过调节输入各链节的有功功率而实现。实际上,只要改变各链节的输出电压、交流侧的相电流或者它们之间的夹角就能改变输入各链节的有功功率。然而,在稳态情况下,系统的相电流只与级联逆变器的输出电压相关,其幅值固定且方向与电网电压矢量成 90° ,是不能轻易改变

的；而各链节输出电压可通过改变每个链节自身的触发脉冲来调整，灵活许多。只要找到一种改变单链节输出电压的大小或者相位的方法，就能随心所欲地改变输入单链节的有功功率，从而改变各链节的直流电容电压值，以达到均压控制的目的。

3.1 矢量分析

以一相为例说明2种工况下STATCOM各矢量之间的相位关系(图4)。图中， v_o 代表STATCOM交流侧输出电压， v_s 为电网电压， i_s 为相电流。定义 i_s 的正方向是由电网流向装置。当电网电压幅值大于输出电压幅值时，装置向电网内注入感性无功功率，称之为感性工况；当电网电压幅值小于输出电压幅值时，装置向电网内注入容性无功功率，称之为容性工况。

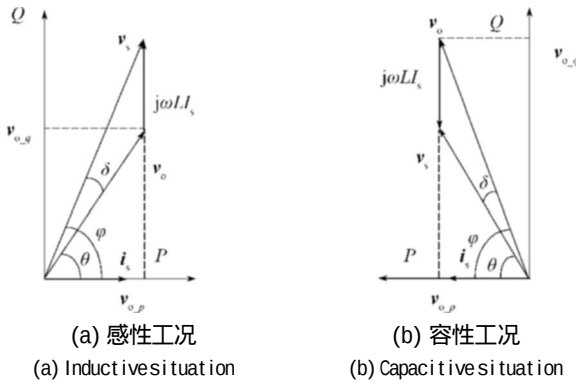


图4 STATCOM 矢量图
Fig. 4 Vector diagram of STATCOM

级联STATCOM 每个模块的输出电压也可以进行类似的矢量分解。定义链节L 交流侧输出电压和并网电流的矢量 v_{oL} 和 i_s 分别为：

$$v_{oL} = \begin{bmatrix} v_{oL,p} \\ v_{oL,q} \end{bmatrix}, i_s = \begin{bmatrix} i_{sp} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $v_{oL,p}$ ——链节L输出电压瞬时值p轴分量； $v_{oL,q}$ ——链节L 输出电压瞬时值q轴分量。

由于p轴被定义在 i_s 方向上，故输入链节L的瞬时有功功率为：

$$P_{in,L} = v_{oL}^T \times i_s = v_{oL,p} I_s \quad (7)$$

式(7)说明，在流过一样的电流 I_s 的情况下，各链节吸收的有功功率由链节交流输出电压瞬时值在 I_s 方向上的分量 $v_{oL,p}$ 决定。由此推出，在链节L的交流侧输出电压瞬时值上叠加一个分量 $\Delta v_{oL,p}$ ，方向与 i_s 的方向一致，则改变了输入链节L的瞬时有功功率，从而改变其直流电容电压值。假若说每个链节电压值都给定同一个数，则达到了均压的目的。由于叠加的是有功p轴方向上的分量，所以链节输出的瞬时无功功率不会受到影响，装置输出的无功电流自然也不会受到影响。以

一相3链节的STATCOM 矢量图(图5)进行说明，图中， v_{o1}, v_{o2}, v_{o3} 分别代表一相3个链节的输出电压矢量。

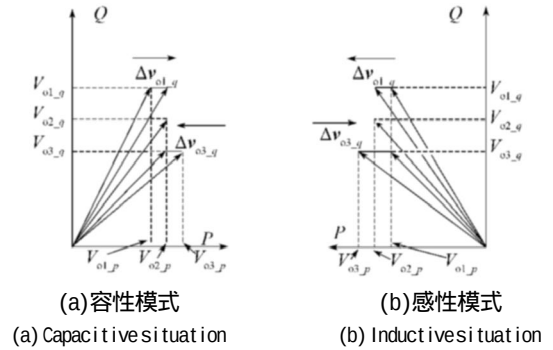


图5 级联型 STATCOM 矢量图
Fig.5 Vector diagram of cascaded STATCOM

由于采用了载波移相调制算法，3个链节输出电压基波的幅值与相位均有微小差异，但是调节量 $\Delta v_{oL,p}$ 并没有改变每个链节输出的无功功率，只是在每个链节内部弥补了由调制算法与损耗带来的有功功率差异。

在实际系统中，要检测 i_s 方向，实现起来很难。事实上，当系统进入稳态后，相电流 i_s 与电网电压 v_s 的相角之间近似成 90° 关系。而上位机锁相环输出的 $\cos \omega t$ 也与电网电压 v_s 成 90° 关系，因此可以用 $\cos \omega t$ 表示 i_s 的方向。由于均压调节量比较小，控制器设计或者在实际系统所产生的 $\cos \omega t$ 和 i_s 间微小的相位误差不会对系统造成影响。

3.2 单链节均压控制器

确定链节直流电容电压是大于还是小于参考值以判断是应该叠加与 i_s 方向相同还是相反的矢量，因此，必须引入一个符号判断函数来判断直流电容电压误差 V_{dcn_err} 的正负。另外，此符号判断函数还用于提取相电流瞬时值在指定参考方向下的正负号，该正负号与查表所得的 $\cos \omega t$ 共同确定了相电流 i_s 的相位。图6示出单链节控制器的系统框图。图中， ωt 是电网电压相位信息，由上位机中央控制器对电网电压锁相而获得，被传送到单链节控制器时无需配置专门的信号传送电路，可将其合成到调制波 v_{o_ref} 中一起传送；sign是符号判断函数，用于判断某些变量的正负，其输入为需要判断符号的变量，输出为1或者-1，分别对应正数与负数；abs是取绝对值运算函数，用于使 $\Delta v'_{oL,p}$ 始终保持为正值($\Delta v'_{oL,p}$ 与 $\Delta v_{oL,p}$ 是微调量进行变换前后的值)； v_{om} 是最终调制信号。

在单链节控制器中，无需额外检测的物理量，且单个控制器与其他单链节控制器间也没有耦合，具有稳定性高、实现简单等优点。单链节控制器对直流电容电压进行微调以实现均压，微调量 $\Delta v_{oL,p}$ 的正负方向由

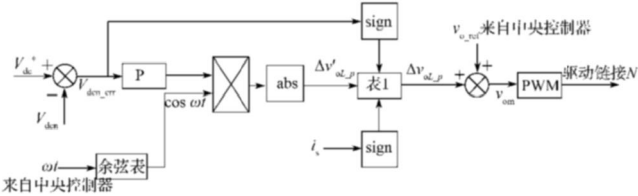


图6 单链节均压控制器系统框图

Fig. 6 Block diagram of the voltage balancing control system for singlelink

v_{dcn_err} 的正负和相电流瞬时值 i_s 在指定参考方向下的正负共同决定 以表1中 $sign(i_s)$ 为正的为例进行说明。当 $i_s > 0$ 时(约定电流方向是从电网流向装置) $v_{dcn_err} > 0$,说明电容电压小于给定值,因此取 $v_{om}=v_{o_ref} + \Delta v'_{ol-p}$ 可以使链节吸收的有功功率增加,直流电容电压升高;当 $v_{dcn_err} < 0$ 时,即电容电压大于给定值 取 $v_{om}=v_{o_ref} - \Delta v'_{ol-p}$,可以使链节吸收的有功功率减少,使直流电容电压降低。 $sign(i_s)$ 为负时,情况可以类推。

表1 单链节控制器电压微调量符号

Tab.1 Signs of the fineadjusted physical quantities for singlelinkvoltagebalancingcontrol

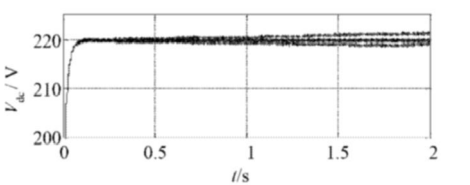
		$sign(v_{dcn_err})$	
		+	-
$sign(i_s)$	+	$\Delta v_{ol-p} = \Delta v'_{ol-p}$	$\Delta v_{ol-p} = -\Delta v'_{ol-p}$
	-	$\Delta v_{ol-p} = -\Delta v'_{ol-p}$	$\Delta v_{ol-p} = \Delta v'_{ol-p}$

4 仿真与实验

4.1 仿真结果

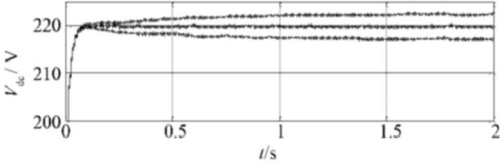
在Matlab仿真系统中建立控制系统,对级联STATCOM的电流控制和直流电容电压均衡控制进行仿真,控制系统采用上文所述的上位机实现双闭环、下位机实现均压环的策略。其主要参数如下:电网电压为380 V,直流电容电压参考值为220 V,感性无功电流参考值为20 A,容性无功电流参考值为20 A,连接电抗为8 mH,直流侧电容为4 700 μF,开关频率为1 kHz。PWM调制采用单极倍频、载波移相方式。

未采用均压算法、不计装置损耗的情况下,采用单极倍频SPWM时直流侧电压不会出现不平衡的现象;采用基于单极倍频的载波移相SPWM的调制算法时,直流侧电压会出现不平衡的现象,且随着开关频率的降低而愈发明显。在仿真中模拟高频整流的情况,始终有一个链节的电压稳定在220 V,这是因为单相电压外环的设计是以这个链节的电压作为参考。当开关频率为1 kHz时,不平衡现象不很明显;在开关频率为500 Hz时,不平衡现象有所加大;到开关频率为100 Hz时,系统就已经崩溃了(图7)。



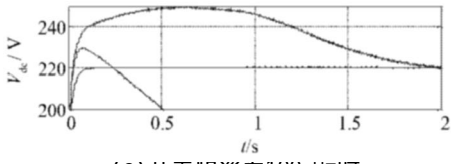
(a)开关频率为1 kHz时

(a)When switch frequency is 1 kHz



(b)开关频率为500 Hz时

(b)When switch frequency is 500 Hz

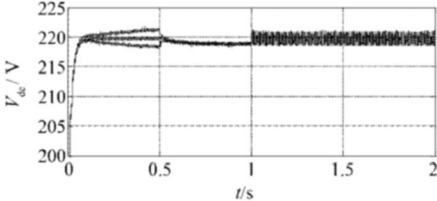


(c)升天频率为100 Hz时

(c)When switch frequency is 100 Hz

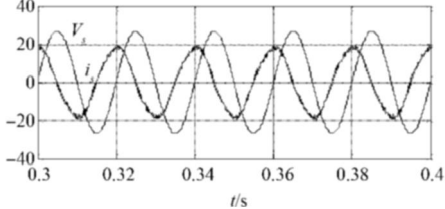
图7 载波移相SPWM算法下的电压不平衡现象
Fig. 7 Voltage imbalance when the system with CPSSPWM algorithm

图8示出加上均压环并且给定无功电流指令后系统的仿真。开关频率为500 Hz时,在0.5 s时刻加入电压均衡控制,可以看到各链节的直流电压被均衡效果明显;在1s时刻,突加感性工况下20 A无功电流指令后,各个链节直流电压依然保持平衡,保证了装置的正常运行。



(a)各链节直流电压仿真波形

(a)Simulation waveforms of DC capacitor voltage with each link



(b)稳态下系统电压(衰减20倍)输出电流波形

(b)Waveforms of system voltage (decreases by 20 times) and output current under steady-state

图8 加入均衡控制后仿真波形

Fig.8 Simulation waveforms when the system with balance control

4.2 实验结果

实验样机采用图1所示硬件结构,参数与仿真参数一致,实验采用DL750型录波仪记录波形。

图9示出容性工况下的实验波形。可以看出,STATCOM的输出电压均为七电平阶梯波,输出电流能

精确地跟踪无功电流指令值。

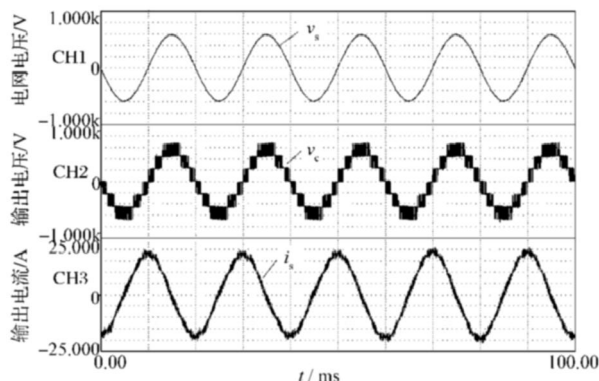
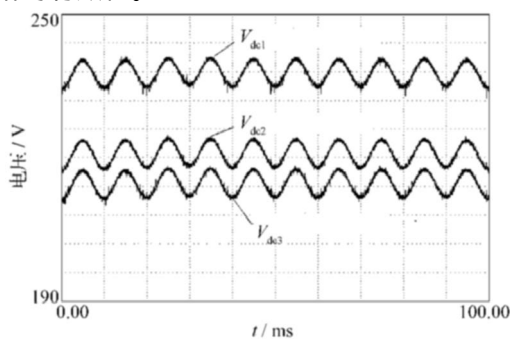


图9 输出电压和输出电流实验波形

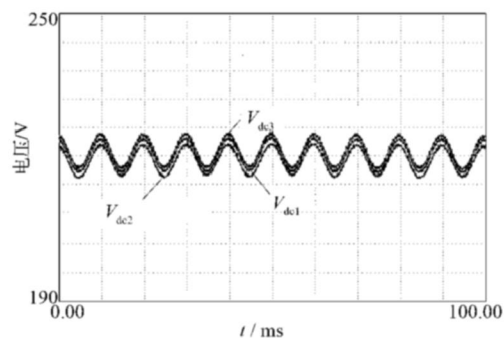
Fig.9 Waveforms of output voltage and output current

为了验证直流侧电压均衡控制的有效性,在试验样机上分别进行了不加入均压控制和加入均压控制2种情况下输出20 A无功电流的实验。图10示出2种情况下各链节直流电容电压波形。可以看出,未加均压控制时,链节间直流电容电压差在25 V左右,而经均压控制后的各链节直流电容电压基本上无差别,验证了该控制策略的有效性。



(a)不均压时

(a) As voltage unbalancing



(b)均压时

(b) As voltage balancing

图10 各链节直流电容电压波形

Fig.10 Waveforms of each link's DC capacitor voltage

5 结语

本文基于单极倍频与载波移相结合调制算法,详细分析了级联静止同步补偿器直流侧电容电压不平衡机理;根据分散控制的控制方法,提出了通过改变输

入单链节的瞬时有功功率来平衡直流侧电容电压的控制策略。由于采用了分散控制策略,每个链节之间的平衡算法与上层控制没有耦合,也不需要额外的检测电路与物理量参与计算,具有可靠性高、易于模块化实现等优点。这种基于瞬时有功功率的控制策略在样机中得以实现,并且得到良好的输出波形。理论与实验均表明,这种基于分散控制策略的电压均衡控制方法实现简单,控制效果好,具有一定的使用价值。

参考文献:

- [1] Peng F Z, Lai Jihsheng, McKeever J W, et al. A Multilevel Voltage-Source Inverter with Separate DC Sources for Static Var Generation [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1996, 32 (5) : 1130-1138.
- [2] Rodríguez J R, Lai J S, Peng F Z. Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls and Applications [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2002, 49(4) :724-738.
- [3] Lai J S, Peng F Z. Multilevel Converters:A New Breed of Power Converters [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1996, 32(3) :510-517.
- [4] Malinowski M, Gopakumar K, Rodriguez J, et al. A Survey on Cascaded Multilevel Inverters [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2010, 57(7) :2197-2206.
- [5] Liang Y Q, Nwankpa C O. A new type of STATCOM based on cascading voltage-source inverters with phase-shifted unipolar SPWM [J]. IEEE Trans. Ind. Appl., 1999 35(5) :1118-1123.
- [6] 耿俊成,刘文华,袁志昌.链式STATCOM 电容电压不平衡现象研究:(一)仿真与实验[J]. 电力系统自动化,2003,27(16) : 53-57, 86.
- [7] 耿俊成,刘文华,袁志昌.链式STATCOM 电容电压不平衡现象研究:(二)数学模型[J]. 电力系统自动化,2003,27(17) : 35-39.
- [8] Woodhouse M L, Donoghue M W, Osborn M M. Type testing of the GTO valves for a novel STATCOM converter[C]//Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission, London, 2001.
- [9] 刘文华,宋强,滕乐天,等.基于链式逆变器的50 MVA 静止同步补偿器的直流电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2004, 24(4) :146-150.
- [10] 刘钊,刘邦银,段善旭,等.链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(30) : 7-12.
- [11] 李一丹,卢文生,彭秀艳,等.级联型同步补偿器的直流电压检测及控制方法研究[J]. 中国电机工程学报,2009,31(3): 14-19.
- [12] 戴珂,陈晶晶,宫力,等.采用多DSP的级联型DSTATCOM 分散控制策略[J]. 高电压技术,2010,36(11) : 2821-2826.
- [13] 宫力,戴珂,陈晶晶,等.链式STATCOM 分散控制系统设计与实现[C]//第四届电工技术前沿问题学术论坛. 2011.
- [14] 丘东元,张波,潘虹.级联型多电平变换器一般构成方式及原则研究[J]. 电工技术学报,2005,20(3) : 24-29.
- [15] 刘文华,刘炳,王志泳,等.基于IGBT 三电平逆变器的±100 kvar D-STATCOM [J]. 电力系统自动化,2002,26(1) : 70-73, 77.
- [16] 许湘莲.基于级联多电平逆变器的STATCOM 及其控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
- [17] 李建林.载波移相级联H 桥型多电平变流器及其在有源电力滤波器中的应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- [18] Peng F Z, Lai J S. Dynamic Performance and Control of a Static Var Generator Using Cascade Multilevel Inverters [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1997, 33(3) :748-755.