

系统电压不平衡下链式静止同步补偿器控制研究

刘钊¹, 刘邦银², 段善旭², 康勇², 史晏军², 陈仲伟²

- (1. 南京电子技术研究所, 江苏省 南京市 210039;
2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

Research on Cascade Multilevel STATCOM Under Unbalanced System Voltage

LIU Zhao¹, LIU Bangyin², DUAN Shanxu², KANG Yong², SHI Yanjun², CHEN Zhongwei²

- (1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, Jiangsu Province, China; 2. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The individual phase instantaneous current control strategy was proposed to solve problems about delta-connected cascade multilevel static synchronous compensators (STATCOM) under unbalanced system voltage; on this basis, two modified compensation modes, reactive control mode and voltage control mode, were studied; and the discrete current loop controller was designed. The cascade multilevel STATCOM can maintain normal operation under unbalanced voltage by using the individual phase instantaneous current control strategy; and the unbalanced system can be effectively compensated by the two modified compensation modes. Simulation results were given; and experiments were conducted based on the development of a prototype for three-phase and 36-chain STATCOM, so as to verify the effectiveness of the proposed control strategy and compensation modes.

KEY WORDS: static synchronous compensator (STATCOM); cascade multilevel convertor; individual phase instantaneous current control; compensation mode; discretization

摘要: 针对三角形连接的链式静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)系统电压不平衡下的控制问题, 提出分相瞬时电流控制策略, 在此基础上研究了链式 STATCOM 在不平衡电压下的补偿模式, 提出无功补偿和电压控制 2 种改进型补偿模式, 并设计了其离散化电流环控制器。通过分相瞬时电流控制能够维持链式 STATCOM 在不平衡电压下的正常工作, 2 种改进型补偿模式使链式 STATCOM 能够有效的对不平衡系统进行补偿, 仿真验证了所提控制策略及补偿模式。研制了一台三相 36 个链节的物

理样机, 并在样机上进行实验, 证明了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 静止同步补偿器; 级联多电平; 分相瞬时电流控制; 补偿模式; 离散化

0 引言

随着电力系统的发展, 无功补偿引起了人们的广泛重视。动态无功补偿对于稳定系统电压、阻尼系统振荡以及改善系统阻尼等有着极为重要的作用^[1-2], 因此, 各种基于大功率电力电子开关器件的无功补偿装置陆续提出^[3-5], 其中链式静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)由于可以减少变压器数量、体积小、易于模块化^[6-8]以及可以分相控制等优点, 近年来得到了广泛的应用。

链式 STATCOM 的控制策略主要有电流解耦控制^[9-11]、有功无功解耦控制^[12]以及非线性控制^[13-14]等, 但都是基于三相对称控制, 当系统电压不平衡时会出现某一相过流而导致 STATCOM 退出工作。文献^[15-16]提出对于星形连接的链式 STATCOM 可以让其输出正序、负序及零序电压来维持自身的稳定, 但不适合三角形连接的链式 STATCOM, 而且其算法实现非常复杂; 文献^[17]基于链式 STATCOM 自身的特殊电路结构提出了分相控制, 使装置具有很强的适应不对称电压的能力, 但其牺牲了装置的无功响应速度; 文献^[18]在分相控制的基础上提出了基于逆系统的有功和无功解耦脉宽调制(pulse width modulation, PWM)控制, 提高了装置的无功响应速度, 但需要对电压电流进行傅里叶变换, 计算复杂; 文献^[19]提出了基于瞬时电流控制的分相控制策略, 通过改变移相角的方法来控制直流电

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB219701)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB219701).

压,但大容量 STATCOM 装置的移相角很小,不适当的改变移相角容易造成系统的不稳定。

系统电压平衡时,STATCOM 有无功控制和电压控制 2 种工作模式。当系统电压不平衡时,对于三相逆变桥式结构的 STATCOM,文献[20-21]提出用 STATCOM 来补偿系统电压的不平衡;文献[22]提出了变压器隔离型链式 STATCOM 不平衡电压下的控制方法。对于传统不带变压器的链式 STATCOM,目前还鲜有文献对其在不平衡系统电压下的工作模式进行研究。

本文研究了系统电压不平衡下链式静止同步补偿器的控制策略和补偿模式。首先提出链式 STATCOM 分相瞬时电流控制策略,然后在此基础上针对系统电压不平衡时链式 STATCOM 的工作模式进行了研究,并提出了无功控制和电压控制 2 种改进型补偿模式,此外还设计了分相瞬时电流控制中离散化电流环控制器,最后通过仿真和实验,验证了所提的控制策略和补偿模式。

1 链式 STATCOM 分相瞬时电流控制

三角形连接的链式 STATCOM 直流侧电容相互独立,其数学模型同 3 个单相链式 STATCOM 的数学模型完全相同^[23];此外由于零序电流分量能在三角形环内流通,其三相链接间电流完全解耦。综合可知三角形连接的链式 STATCOM 可以等效为三单相链接来控制,如图 1 所示。其中 u_{sab} , u_{sbc} , u_{sca}

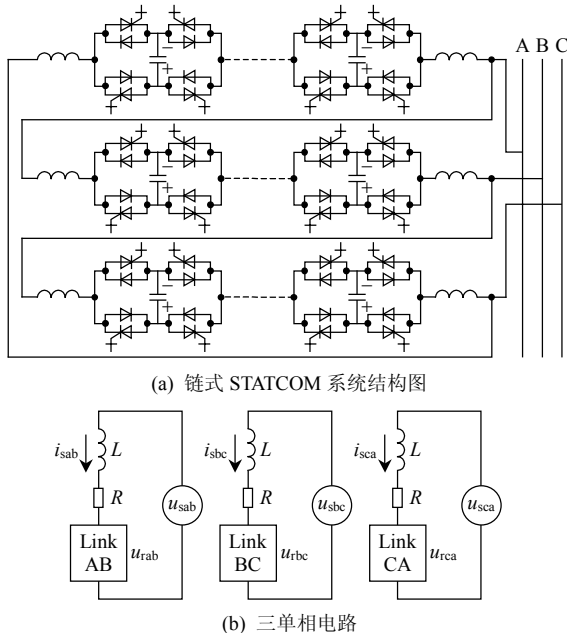


图 1 三角形连接链式 STATCOM 等效电路图
Fig. 1 Equivalent circuit of delta-connected cascade multilevel STATCOM

为三相系统电压; u_{rab} , u_{rbc} , u_{rca} 为三相链接输出电压; L 为连接电感; R 为系统损耗。

当三相系统电压不平衡时,可以对三角形连接的链式 STATCOM 三相链接独立控制,因此本文提出了链式 STATCOM 分相瞬时电流控制策略,控制框图如图 2 所示。

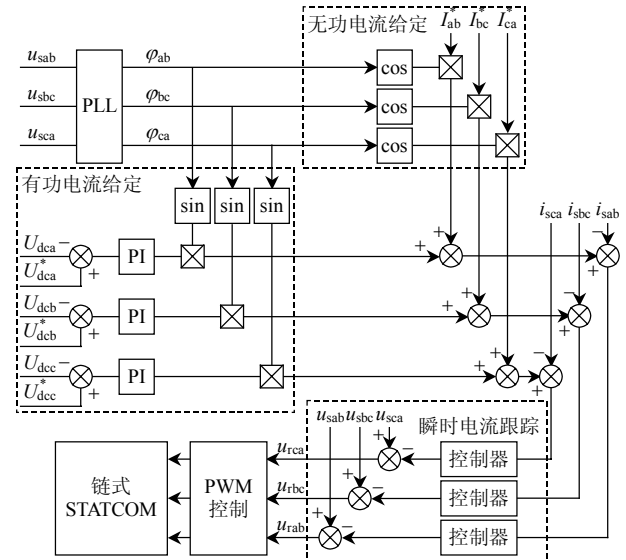


图 2 链式 STATCOM 分相瞬时电流控制框图
Fig. 2 Control diagram of cascade multilevel STATCOM based on individual phase instantaneous current control

图 2 中控制框图由锁相环、有功电流给定、无功电流给定、瞬时电流跟踪 4 部分组成。锁相环用来跟踪系统电压的相位 φ_{ab} 、 φ_{bc} 和 φ_{ca} , 得到系统电压相位的正弦值和余弦值;有功电流的相位和系统电压相位相同,其幅值通过直流电压闭环得到,用来补偿各相链接的有功损耗;无功电流的相位超前系统电压相位 90° ,幅值 I_{ab}^* , I_{bc}^* , I_{ca}^* 由补偿模式决定,当无功电流幅值为正时,表示无功电流超前系统电压,向系统补偿无功,反之,当无功电流幅值为负时,表示无功电流滞后系统电压,从系统中吸收无功;有功电流给定和无功电流给定之和就组成了系统相电流的给定,通过瞬时电流反馈来跟踪该给定电流,系统电压前馈能增大控制系统的稳定裕度。

2 链式 STATCOM 不平衡电压下补偿模式

2.1 无功控制模式

无功控制模式就是让链式 STATCOM 发出或吸收指令大小的无功,该无功指令可以是固定大小的无功,如由电网调度给出,也可以是动态补偿系统中负载侧的瞬时无功。动态补偿中无功指令获取可以通过直接检测负载侧无功,也可以检测系统侧

无功，然后通过闭环的方法得到指令无功，如图 3 所示，其中 Q 为通过瞬时无功理论检测到系统中的无功大小， Q_{ref} 为通过闭环控制得到的实际无功指令。

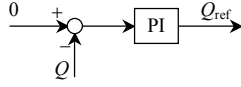


图 3 通过闭环方式获取无功指令

Fig. 3 Obtain of reactive power command through closed-loop method

对于图 2 所示的控制框图，其无功电流指令为

$$\begin{cases} I_{ab}^* = 2Q_{ref} / (3u_{sab}) \\ I_{bc}^* = 2Q_{ref} / (3u_{sbc}) \\ I_{ca}^* = 2Q_{ref} / (3u_{sca}) \end{cases} \quad (1)$$

系统电压平衡时，三相指令无功电流大小相同：

$$I_{ab}^* = I_{bc}^* = I_{ca}^* \quad (2)$$

因为系统电压出现轻微的不平衡是很正常的，所以当系统电压不平衡较小时，仍然希望其能够继续补偿无功，但一旦系统电压不平衡度超过一定的范围，链式 STATCOM 就只吸收少量的有功维持自身的损耗，不再补偿无功，当电压恢复正常后，装置也正常补偿无功。其无功补偿模式流程图如图 4 所示。

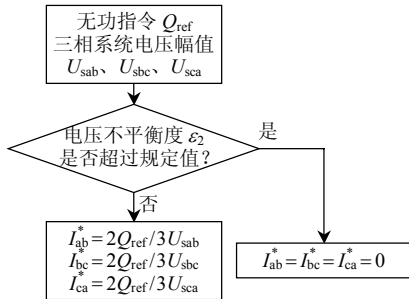


图 4 链式 STATCOM 不平衡电压下无功补偿流程图

Fig. 4 Flow chart of reactive power control mode for cascade multilevel STATCOM under unbalanced voltage

三相三线制系统中电压不平衡度通常由其负序不平衡度 ε_2 表示：

$$\varepsilon_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6L}}{1 + \sqrt{3 - 6L}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 $L = (U_{sab}^4 + U_{sbc}^4 + U_{sca}^4) / (U_{sab}^2 + U_{sbc}^2 + U_{sca}^2)^2$ 。

2.2 电压控制模式

当 STATCOM 应用到风电场等场合时，通常用来稳定系统电压，实际中当系统发生不平衡时，希望 STATCOM 也能够补偿系统电压的不平衡。系统电压的不平衡主要是由负载的不平衡引起的，文献[24]指出对于任意不平衡负荷都可以用导纳补偿

的方法补偿到平衡，其补偿原理如图 5 所示。

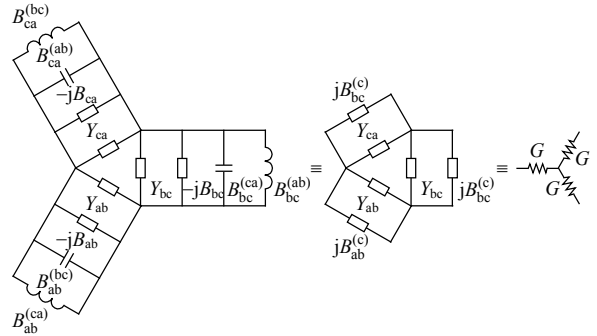


图 5 不平衡负载导纳补偿原理

Fig. 5 Admittance compensation principle for unbalanced load

图 5 中， $B_{ab}^{(ca)}$ 、 $B_{bc}^{(ab)}$ 、 $B_{ca}^{(bc)}$ 为各相补偿的感性阻抗， $B_{ab}^{(bc)}$ 、 $B_{bc}^{(ca)}$ 、 $B_{ca}^{(ab)}$ 为各相补偿的容性阻抗，其中上标表示补偿量的大小，与上标所对应的相阻抗相关； Y_{ab} 、 Y_{bc} 、 Y_{ca} 分别为三相负载导纳，有

$$\begin{cases} Y_{ab} = 1 / Z_{ab} = G_{ab} + jB_{ab} \\ Y_{bc} = 1 / Z_{bc} = G_{bc} + jB_{bc} \\ Y_{ca} = 1 / Z_{ca} = G_{ca} + jB_{ca} \end{cases} \quad (4)$$

式中： Z_{ab} 、 Z_{bc} 、 Z_{ca} 分别为三相负载阻抗； G_{ab} 、 G_{bc} 、 G_{ca} 分别为三相负载电导； B_{ab} 、 B_{bc} 、 B_{ca} 分别为三相负载电纳。

如果三相补偿导纳为

$$\begin{cases} B_{ab}^{(c)} = -B_{ab} + (G_{ca} - G_{bc}) / \sqrt{3} \\ B_{bc}^{(c)} = -B_{bc} + (G_{ab} - G_{ca}) / \sqrt{3} \\ B_{ca}^{(c)} = -B_{ca} + (G_{bc} - G_{ab}) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (5)$$

因此三相负载被补偿到三相纯阻性平衡负载：

$$G = G_{ab} + G_{bc} + G_{ca} \quad (6)$$

三角形连接的链式 STATCOM 三相链接等效于三相可变的导纳，只要能够补偿适当的导纳，就可以将负载补偿到平衡，同时三相系统电压也被补偿到平衡。结合图 2，负载的大小决定了节点电压的大小，因此可以通过电压闭环的方式得到期望补偿导纳的大小，进而转换成补偿电流指令的大小，如图 6 所示，其中 U_{ref} 为期望三相公共耦合点(point of

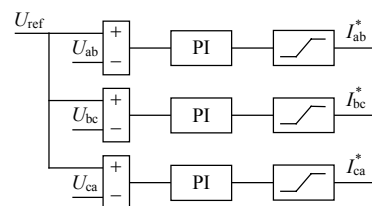


图 6 不平衡电压下电压控制模式无功电流指令获取

Fig. 6 Gaining of reactive current based on voltage control mode under unbalanced voltage

common coupling, PCC)电压幅值, U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} 为各相 PCC 点电压实际幅值。

3 分相瞬时电流控制电流环参数设计

任取一相链接为例, 其电流环控制框图如图 7 所示, u_g 是系统中的扰动量, 包括链式 STATCOM 输出谐波电压等。大功率链式 STATCOM 中都是采用电流互感器来采样输出电流, 由于直流偏置的影响, PI 控制器会对直流误差累积, 从而控制器失稳, 因此采用纯比例控制器。

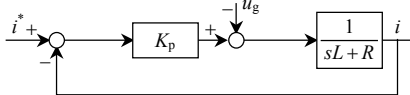


图 7 连续域电流环控制框图

Fig. 7 Control diagram of current loop based on continuous domain

实际控制中采用数字控制, 所以对控制器的设计要转化到离散域, 数字控制中通常存在零阶保持器和一拍滞后的影响, 但由于链式 STATCOM 实验装置中采用 FPGA 实时比较发出 PWM 波, 所以不存在滞后一拍。只考虑零阶保持器的影响, 对图 7 作离散化, 如图 8 所示。

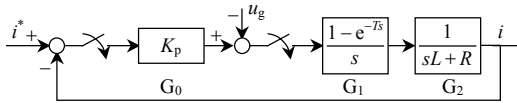


图 8 离散域电流环控制框图

Fig. 8 Control diagram of current loop based on discrete domain

其输出电流的表达式为

$$I(z) = W_1(z)I^*(z) - W_2(z)U_g(z) \quad (7)$$

式中:

$$\begin{cases} W_1(z) = \frac{K_p(1 - e^{-(R/L)T})}{(z - e^{-(R/L)T})R + K_p(1 - e^{-(R/L)T})} \\ W_2(z) = \frac{1 - e^{-(R/L)T}}{(z - e^{-(R/L)T})R + K_p(1 - e^{-(R/L)T})} \end{cases} \quad (8)$$

首先对系统稳定性进行分析, 其系统特征方程为

$$F(z) = (z - e^{-(R/L)T})R + K_p(1 - e^{-(R/L)T}) = 0 \quad (9)$$

当系统稳定时, 必须有 $|z| < 1$ 。

由式(9)可得

$$-R < K_p < \frac{1 + e^{-(R/L)T}}{1 - e^{-(R/L)T}} R \quad (10)$$

其次由式(7)分析可知, 输出电流有 2 部分组成, 一部分为指令电流跟踪项, 另一部分为外部扰动项。指令参考电流为标准正弦波, 由控制理论,

期望 $W_1(z)$ 在工频 50 Hz 处增益为 1, 同时 $W_2(z)$ 在全频范围内增益趋于零。

取 $L=5$ mH, $R=0.1 \Omega$, $T=1/6000$, 分别对 $W_1(z)$ 、 $W_2(z)$ 进行波特图分析, 并设计电流环控制器参数。

由式(10)可得比例控制器的取值范围为 $0 < K_p < 60$, 令 K_p 分别为 10、20、30、40、50, $W_1(z)$ 的波特图如图 9 所示。

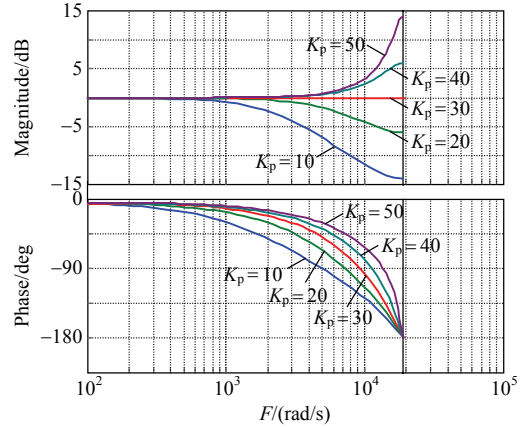


图 9 K_p 变化时 $W_1(z)$ 的波特图

Fig. 9 Bode diagram of $W_1(z)$ for various K_p

同样, 令 K_p 分别为 10、20、30、40、50, $W_2(z)$ 的波特图如图 10 所示。

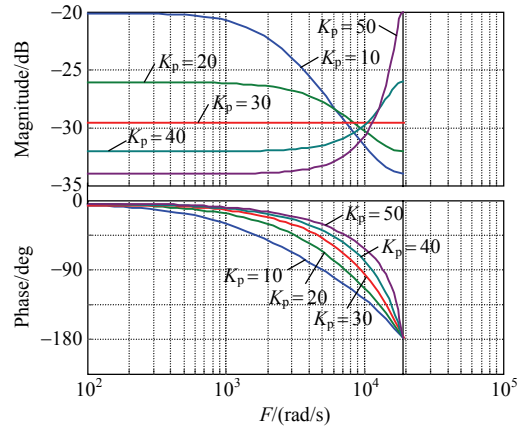


图 10 K_p 变化时 $W_2(z)$ 的波特图

Fig. 10 Bode diagram of $W_2(z)$ for various K_p

综合分析图 9、10 可知:

- 1) 因为 $W_1(z)$ 表征系统跟踪指令电流的性能, K_p 越大, 系统带宽越大, 动态性能越好。
- 2) $W_2(z)$ 可以表征为系统的扰动导纳, 所以期望 $W_2(z)$ 的增益越小越好, 即 K_p 越大越好, 但由图 10 可知, K_p 过大时, 对高频段谐波会有放大作用, 造成系统不稳定, 因此 K_p 也不能过大。
- 3) 综合选取 K_p 为 30 比较合适。

4 仿真验证

4.1 仿真系统参数

对链式 STATCOM 不平衡电压下的控制策略进行仿真验证，仿真系统参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

Tab. 1 Main parameters of cascade STATCOM system

参数	三相系统线电压 U_g/V	电网频率 f_g/Hz	输出电感 L_g/mH	直流侧电容 $C_{dc}/\mu F$
数值	6000	50	28.6	1840
参数	直流侧电容电压 U_{dc}/V	载波移相单极 倍频 f_c/Hz	链节数 N	输出额定无功 电流 I_{ref}/A
数值	1000	250	12	100

4.2 无功控制模式

基于无功控制模式下仿真波形如图 11、12 所

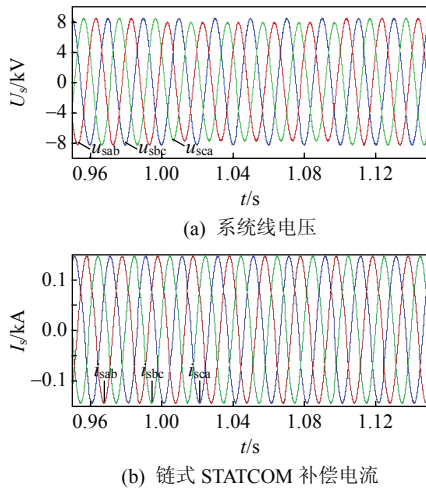


图 11 电压不平衡度较小时链式 STATCOM 无功控制模式

Fig. 11 Reactive power control mode for cascade multilevel STATCOM under a small degree of unbalanced voltage

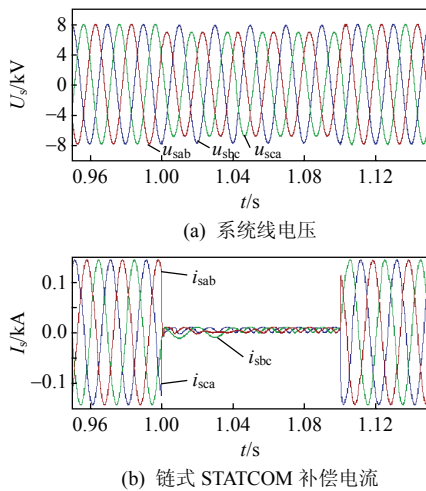


图 12 电压不平衡度较大时无功补偿模式
Fig. 12 Reactive power control mode for cascade multilevel STATCOM under a large degree of unbalanced voltage

示，仿真中通过改变三相负载的不平衡从而造成三相 PCC 点电压的不平衡，图中在 $t=1s$ 时发生不平衡故障，在 $t=1.1s$ 时故障恢复。图 11 中故障时电压不平衡度较小，STATCOM 继续补偿 100 A 无功电流，图 12 中电压不平衡度超过了限定值，STATCOM 只吸收少量有功电流维持自身的损耗，故障清除后 STATCOM 也恢复正常工作。图 11、12 验证了分相瞬时电流跟踪控制以及不平衡电压下无功控制模式的有效性。

4.3 电压控制模式

负载的不平衡引起三相 PCC 点电压不平衡，期望通过链式 STATCOM 将三相电压补偿到平衡。通常电力系统的短路容量很大，而 STATCOM 装置的补偿容量有限，为验证所提补偿模式的有效性，仿真中设置较大短路阻抗，并改变三相负载到不平衡。图 13(a)为不加链式 STATCOM 装置时三相 PCC 点电压，其中三相电压幅值为 $U_{sab-p}=U_{sca-p}=6.05 kV$ ， $U_{sbc-p}=5.66 kV$ ，负序不平衡度 $\varepsilon_2=4.35\%$ ；图 13(b)为补偿后的三相 PCC 点电压波形；图 13(c)为链式 STATCOM 各相电流波形，由于系统短路阻抗大，造成 PCC 点电压中谐波含量也较大。

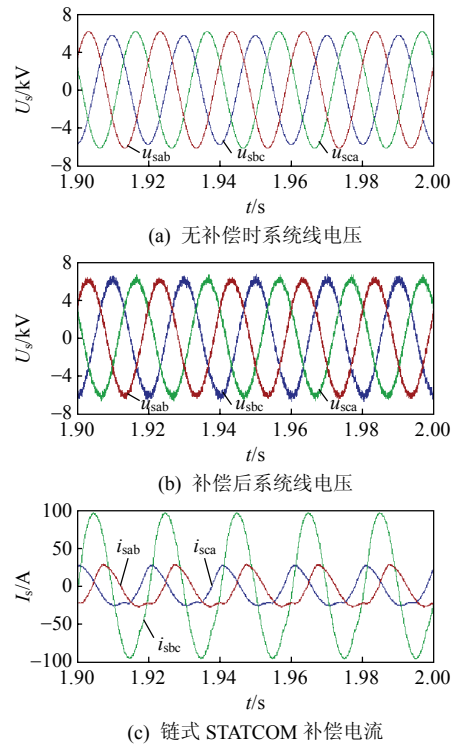


图 13 电压不平衡时链式 STATCOM 电压控制模式
Fig. 13 Voltage control mode for cascade multilevel STATCOM under unbalanced voltage

图 13 表明通过所提的电压补偿方法，可以将三相电压补偿到平衡，验证控制方法的有效性。

5 实验验证

5.1 实验系统参数

为验证所提控制策略及补偿模式的有效性,在研制的链式 STATCOM 样机上进行了实验,实验系统结构如图 1 所示,主电路采用三角形连接,每相 12 个链节。表 2 为实验样机的电路参数。

表 2 链式 STATCOM 系统电路结构参数

Tab. 2 Main parameters of cascade STATCOM system

参数	三相系统线电压 U_s/V	电网频率 f_s/Hz	输出电感 L_s/mH	直流侧电容 $C_{dc}/\mu F$
数值	380	50	5	940
参数	直流侧电容电压 U_{dc}/V	给定无功电流 I_{ref}/A	载波移相单极 倍频 f_c/Hz	链节数 N
数值	50	3.5(幅值)	250	12

5.2 不平衡控制下无功补偿模式实验验证

由于条件限制,仅对链式 STATCOM 的无功补偿模式进行实验验证。实验包括 2 个方面的内容,一个是当三相系统电压不平衡度较小时,三相链接仍然发固定大小无功电流;另一个是当三相系统电压不平衡度变化时,指令无功电流突变。

1) 不平衡度较小时实验验证。

实验中,三相系统电压不平衡,其中 AB 相系统电压 320 V, BC 相 250 V, CA 相 320 V,每相链接给定无功电流均为 3.5 A(幅值),实验波形如图 14 所示,其中 u_{sab} 、 u_{sbc} 、 u_{sca} 为三相系统电压, u_{rab} 、 u_{rbc} 、 u_{rca} 三相链接输出电压, i_{ab} 、 i_{bc} 、 i_{ca} 各相输出电流。由图 14 可知,在系统电压不平衡时,链式 STATCOM 能正常工作。

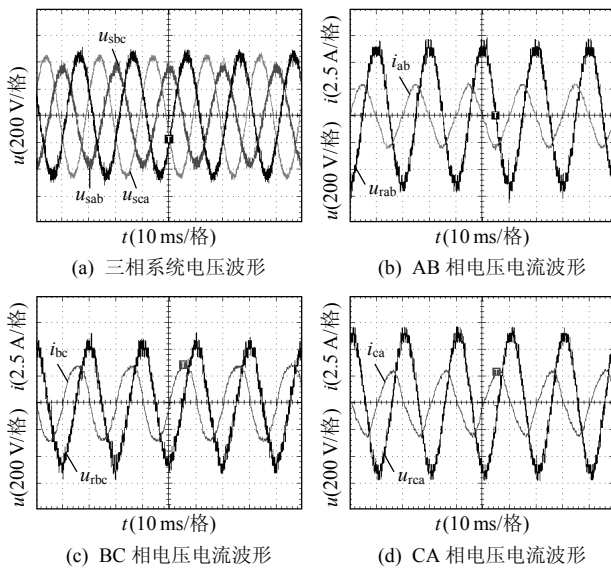
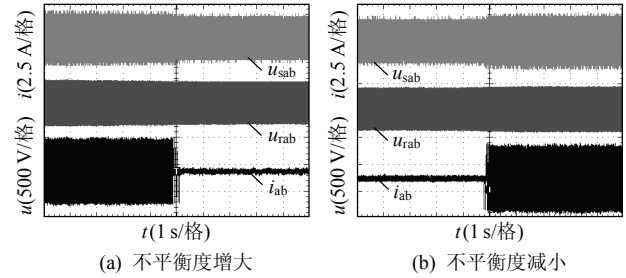


图 14 电压不平衡度较小时实验验证

Fig. 14 Experiment verification under a small degree of unbalanced voltage

2) 不平衡度发生变化时实验验证。

实验中,AB 相系统电压为 320 V,CA 相系统电压为 320 V,BC 相系统电压慢慢变化,当 BC 相电压高于 200 V 时,三相链接均发 3.5 A(幅值)无功电流,反之发 0 A 无功电流,实验波形如图 15—17 所示。实验表明,根据所提控制方法,链式 STATCOM 具有很好的抵御系统电压不平衡的能力。

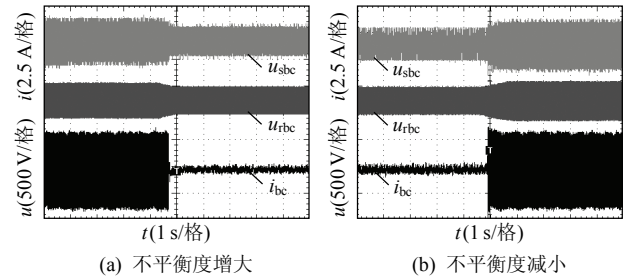


(a) 不平衡度增大

(b) 不平衡度减小

图 15 不平衡度变化时 AB 相电压电流波形

Fig. 15 Voltage and current waveform of link AB under varied unbalanced degree

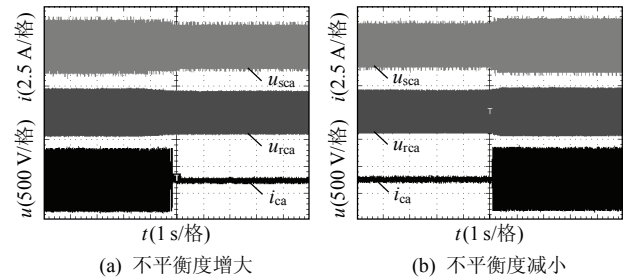


(a) 不平衡度增大

(b) 不平衡度减小

图 16 不平衡度变化时 BC 相电压电流波形

Fig. 16 Voltage and current waveform of link BC under varied unbalanced degree



(a) 不平衡度增大

(b) 不平衡度减小

图 17 不平衡度变化时 CA 相电压电流波形

Fig. 17 Voltage and current waveform of link CA under varied unbalanced degree

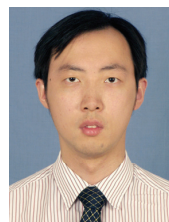
6 结论

本文分析了链式静止同步补偿器在系统电压不平衡时的控制问题,提出了链式 STATCOM 分相瞬时电流控制策略以及无功控制模式和电压控制模式 2 种改进型补偿模式。通过仿真对所提的控制策略和补偿模式进行验证,并在一台链式 STATCOM 物理样机上进行了实验研究。仿真和实验结果均表明:所提的控制策略和补偿模式能有效

的增强链式 STATCOM 的故障抵抗能力, 提高装置的可靠性和利用率, 具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] Lerch E, Povh D, Xu L. Advanced SVC control for damping power system oscillations[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1991, 46(2): 524-531.
- [2] Cheng C H, Hsu Y Y. Damping of generator oscillations using an adaptive static var compensator[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1992, 7(2): 718-725.
- [3] Gyugyi L, Taylor E R. Characteristics of static, thyristor-controlled shunt compensators for power transmission system applications[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(5): 1795-1804.
- [4] Sumi Y, Harumoto Y, Hasegawa T, et al. New static var control using force-commutated inverters[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(9): 4216-4224.
- [5] Peng F Z, Lai J S. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1997, 32(5): 1130-1137.
- [6] Soto D, Green T C. A comparison of high-power converter topologies for the implementation of FACTS controllers[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2002, 49(5): 1072-1080.
- [7] Lee C K, Leung J S K, Hui S Y R, et al. Circuit-level comparison of STATCOM technologies[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2003, 18(4): 1084-1092.
- [8] An T, Powell M T, Thanawala H L, et al. Assessment of two different STATCOM configurations for FACTS application in power systems [C]//International Conference on Power System Technology. Beijing, China: IEEE, 1998: 307-312.
- [9] Chong Han, Zhanoning Yang, Bin Chen, et al. Evaluation of cascade-multilevel-converter-based STATCOM for arc furnace flicker mitigation[J]. IEEE Trans. on Industry Application, 2007, 43(2): 378-385.
- [10] Akagi H, Inoue S, Yoshil T. Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2007, 43(4): 1041-1049.
- [11] Liu Y, Bhattacharya S, Song W C, et al. Control strategy for cascade multilevel inverter based STATCOM with optimal combination modulation[C]//Power Electronics Specialists Conference 2008. Rhodes, Greece: IEEE, 2008: 4812-4818.
- [12] 魏文辉, 刘文华, 宋强, 等. 基于逆系统方法有功无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 23-28.
Wei Wenhui, Liu Wenhua, Song Qiang et al. Research on fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 23-28(in Chinese).
- [13] Song Q, Liu W H, Yuan Z H. Multilevel optimal modulation and dynamic control strategies for STATCOMs using cascaded multilevel inverters[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2007, 22(3): 1937-1946.
- [14] Soto D, Pena R. Nonlinear control strategies for cascaded multilevel STATCOMs[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(4): 1919-1927.
- [15] Betz R E, Summers T J. Using a cascaded H-bridge STATCOM for rebalancing unbalanced voltages[C]//7th International Conference on Power Electronics. Daegu, Korea: IEEE, 2007: 1219-1224.
- [16] Song Q, Liu W H. Control of a cascade STATCOM with star configuration under unbalanced conditions[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2009, 24(1): 45-58.
- [17] Horwill C, Totterdell A J, Hanson D J, et al. Commissioning of a 225 Mvar SVC incorporating a ± 75 Mvar STATCOM at NGC's 400 kV east claydon substation[C]//Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission. London, UK: IEE, 2001: 232-237.
- [18] 魏文辉, 刘文华, 滕乐天, 等. 基于反故障控制的链式 STATCOM 动态控制策略的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 19-24.
Wei Wenhui, Liu Wenhua, Teng Letian, et al. Research on anti-fault dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 19-24(in Chinese).
- [19] 袁志昌. 链式静止同步补偿器的控制与保护策略研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
Yuan Zhichang. Research on the control and protect schemes of STATCOM using cascade multilevel inverter[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006(in Chinese).
- [20] Hochgraf C, Lasseter R H. Statcom controls for operation with unbalanced voltages[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(2): 538-544.
- [21] 罗安, 欧剑波, 唐杰, 等. 补偿配电网电压不平衡的静止同步补偿器控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 55-60.
Luo An, Ou Jianbo, Tang Jie, et al. Research on control method of STATCOM for grid voltage unbalance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 55-60(in Chinese).
- [22] 许树楷, 宋强, 朱永强, 等. 用于不平衡补偿的变压器隔离型链式 D-STATCOM 的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 137-143.
Xu Shukai, Song Qiang, Zhu Yongqiang, et al. Research on the transformer-isolated multilevel H-bridges D-STATCOM for unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 137-143(in Chinese).
- [23] 耿俊成, 刘文华, 俞旭峰, 等. 链式 STATCOM 的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 66-70.
Geng Juncheng, Liu Wenhua, Yu Xufeng, et al. Modeling of cascade STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 66-70(in Chinese).
- [24] Otto R A, Putman T H, Gyugyi L. Principles and applications of static, thyristor-controlled shunt compensators[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1978, PAS-97(5): 1935-1945.



刘钊

收稿日期: 2010-12-23。

作者简介:

刘钊(1983), 男, 博士, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用, hustceee@gmail.com;

刘邦银(1979), 男, 博士后, 研究方向为光伏发电系统的变换拓扑与控制技术, lby@mail.hust.edu.cn;

段善旭(1970), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要研究方向为新能源发电及电能质量控制。

(实习编辑 胡琳琳)