

链式 STATCOM 直流侧电容电压平衡控制

郭高朋, 许留伟, 江加福

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 由于链式 STATCOM 直流侧电容器相互独立, 如何使这些电容器上的电压保持一致是装置安全可靠运行需要解决的关键问题。从能量的角度, 通过研究链式 STATCOM 直流侧电容的电压变化过程, 解释了电容电压不平衡现象产生的机理。通过 simulink 进行了仿真验证。另外, 还研究了开关脉冲循环换位对直流侧电容电压不平衡的抑制作用, 但是当 STATCOM 链节单元的并联损耗不同时, 开关脉冲循环换位就不能够抑制电容电压不平衡。提出了开关脉冲排序换位的方法, 即使 STATCOM 链节单元损耗不同, 也能够使电容电压趋于平衡。仿真结果表明, 开关脉冲排序换位能够有效地抑制电容电压不平衡。

关键词: 电力电子; 静止同步补偿器(STATCOM); 链式多电平逆变器; 开关脉冲循环换位; 开关脉冲排序换位

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

文章编号: 1002-087X(2012)01-0104-04

Voltage balance control of DC side capacitor of cascade STATCOM

GUO Gao-peng, XU Liu-wei, JIANG Jia-fu

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui 230031, China)

Abstract: Because the cascade STATCOM DC side capacitor is separate, so keeping the voltage of these capacitor balanced is very important. In the energy point of view, the voltage change process of the cascade STATCOM DC side capacitor was studied, and the mechanism of the unbalanced capacitor change was explained. Otherwise, the gate pulse rotated transposition was studied, which could restrain the unbalance of the capacitor voltage. But when the wastage of the STATCOM unit was not the same, the gate pulse rotated transposition could not restrain the unbalance of the capacitor voltage. In order to avoid this problem, the gate pulse sort transposition was put forward. Especially, when the wastage of the STATCOM unit was not the same, this method could also keep the capacitor voltage balanced. The result of the simulation shows that: gate pulse sort transposition can keep the capacitor voltage balanced, when the wastage of the STATCOM unit is not the same.

Key words: power electronics; STATCOM(static synchronous compensator); cascade multilevel inverter; gate pulse rotated transposition; gate pulse sort transposition

作为一种基于大功率电力电子器件的新型 FACTS 装置, 静止同步补偿器 (STATCOM: Static synchronous COMPensation) 较传统的无功发生装置有明显的优点^[1]。迄今为止, 世界上已经投运的大容量 STATCOM 装置多采用变压器多重化的主电路结构和链式多电平电压型逆变器^[2], 二者相比, 链式 STATCOM 损耗小、占地面积小、线性度好、采用模块化结构, 便于维护和扩展容量, 采用冗余功率模块, 提高了装置的可靠性^[3]。

多重变压器 STATCOM 各个链节单元的交流侧相互隔离, 直流侧共用一个电容。而链式 STATCOM 各个链节单元的直流侧相互隔离, 每个链节单元独立使用一个电容。该结构给链式 STATCOM 带来显著优点, 也带来了问题^[2,4]。链节单元的直流侧电容电压可能出现不平衡。近年来有不少文章研究了这个问题, 调节直流侧电容电压的主要方法有^[5,6]: (1) 采用并联

于电容两端的可调电阻来调节, 通过 PWM 调制控制开关 S, 即可调节并联于电容的等效电阻值。此方法简单, 但是增加了装置的损耗。(2) 通过调节单元逆变器的输出电压相角来控制直流侧电容电压平衡, 但是对于大容量逆变器, 由于相角调节范围很小, 实际实现很困难^[2]。(3) 采用外部能量交换来控制直流侧电容电压平衡, 这种方法等效于调节电容并联损耗, 但能量没有损耗掉, 而是在各个单元逆变器间交换。这种方法需要增加设备投资^[7-10]。

本文提出了一种新的控制方法: 开关脉冲排序换位, 该方法简单有效, 不需要增加设备投资、损耗小, 更加有利于移动式 STATCOM。本文从能量的角度解释了直流侧电容电压不平衡的原因, 并给出了定量分析; 开关脉冲循环换位对直流侧电容电压的抑制作用, 以及各链节单元的并联损耗不同时, 开关脉冲循环换位便不能抑制直流侧电容电压不平衡; 而开关脉冲排序换位, 即使在各链节单元并联损耗不同时, 也能保证直流侧电容电压趋于平衡。同时也给出了开关脉冲排序换位的适用范围。

收稿日期: 2011-07-22

作者简介: 郭高朋(1982—), 男, 河北省人, 硕士研究生, 主要研究方向为无功补偿。

1 电容电压不平衡原因

图 1 所示为采用三角形连接的链式 STATCOM 系统结构图,单相链式 STATCOM 是由如图 2 所示的 H 桥逆变器串联而成,再与连接电感 L 串联后,以三角形连接成如图 1 所示,然后接入母线。 $u_a、u_b、u_c$ 分别为系统母线的相电压瞬时值, $u_m、u_{mb}、u_{mc}$ 分别为链式 STATCOM 三相的相电压基波瞬时值。 $i_a、i_b、i_c$ 为 STATCOM 相电流。

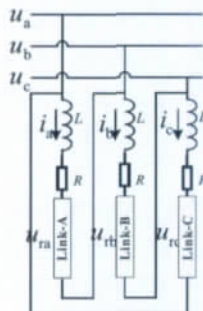


图 1 链式 STATCOM 系统结构图

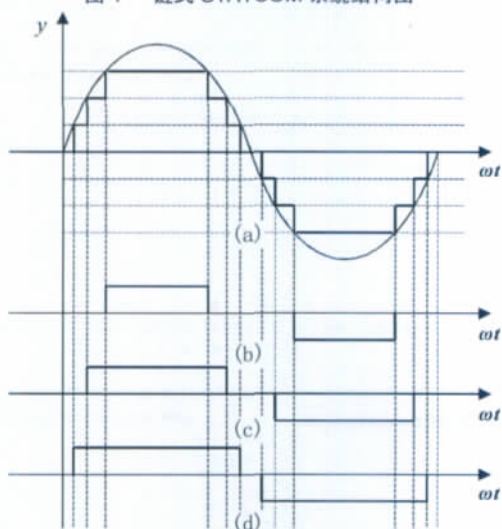


图 2 链式 STATCOM 电压叠加原理图

根据图 1 所示, 可以列出链式 STATCOM 的电压与电流的关系, 为:

$$\begin{cases} u_{ab} - u_{ra} = L \frac{di_a}{dt} - i_a R \\ u_{bc} - u_{rb} = L \frac{di_b}{dt} - i_b R \\ u_{ca} - u_{rc} = L \frac{di_c}{dt} - i_c R \end{cases} \quad (1)$$

以 a 相为例, 当 $u_{ab} > u_{ra}$ 时, 链式 STATCOM 工作在感性模式, 当 $u_{ab} < u_{ra}$ 时, 链式 STATCOM 工作在容性模式。系统的电压电流矢量图如图 3 所示, U_m 为单相 STATCOM 输出的基波电压向量, U_{ab} 为母线 a 与母线 b 间的线电压向量, I_a 为相电流向量。

如图 2(b)、(c)、(d) 所示, 链式 STATCOM 的每个链节单元输出不同宽度的脉冲电压, 通过串联方式叠加后, 组成如图 2(a) 所示的与正弦波接近的阶梯波, 当组成链式 STATCOM 的链节单元数 N 比较大时, 阶梯波就会很接近正弦波。

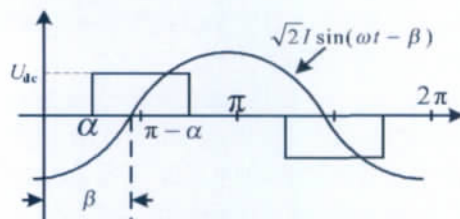


图 3 单元链节的电压电流曲线图

如图 3 所示, 以某一个链节单元为例, 开关脉冲从 α 到 $\pi - \alpha$, 假设电流 $i_c = I_m \times \sin(\omega t - \beta)$, 其中, 相位角 $0 < \beta < 90^\circ$, I 为电流有效值, 链节单元从外部吸收有功功率。

在链节单元输出电压期间, 电流 i_c 会对电容 C 进行充放电, 如果不考虑损耗, 充放电前后电容储存的电荷变化量为:

$$\Delta Q = \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} \sqrt{2} I \sin(\omega t - \beta) d\omega t \quad (2)$$

充放电前后电压变化量为:

$$\Delta U = \Delta Q / C \quad (3)$$

充放电前后电容存储的能量变化量为:

$$\Delta E = C(U + \Delta U)^2 / 2 - CU^2 / 2 \quad (4)$$

由式(2)、(3)、(4)可以得到:

$$\Delta E = 2\sqrt{2} UI \cos \alpha \cos \beta \quad (5)$$

式中: β 为电流 i_c 的相位角, 所以每个链节的 β 都相同。当电容电压 U 也相同时, 不同的只有触发角 α , 从而导致了输入电容的能量 ΔE 的不同, 进而导致了电容电压的不平衡。式中 α 越小, 输入能量就越大, 在链节单元的各种损耗都相同时, 其电容电压也就越高。

为了验证其正确性, 搭建了 4 个链节单元的链式 STATCOM 仿真电路, 如图 4 所示。曲线 1、2、3、4 所对应的 α 角一次增大, 与理论分析一致。仿真参数为, 直流侧电容 $C=8 \text{ mF}$, 等效并联电阻 $R_k=1000 \Omega$ 。

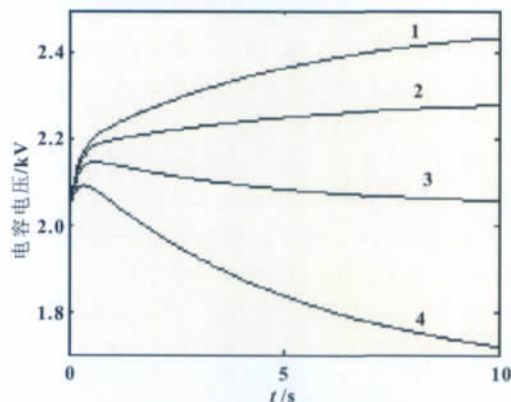


图 4 电容电压仿真曲线图

2 开关脉冲循环换位

直流侧电容电压不平衡会带来许多不利影响, 电容电压不平衡会使链式 STATCOM 输出电压的谐波增大, 当其不平衡度较大时, 某些链节的电容电压会偏高, 影响到装置的安全运行, 严重时会导致系统崩溃。另外, 电容电压不平衡还会限制 STATCOM 整体性能的发挥。根据式(5), 为了克服直流侧电容电压不平衡问题, 开关角 α 在各个链节单元之间不停的循

环,使输入每个链节单元获得相同的能量,这种方法叫做开关脉冲循环换位。

如图5所示,是三链节链式STATCOM, v_1 为链节1输出的电压, v_2 为链节2输出的电压, v_3 为链节3输出的电压,在一个半周内,各个链节输出的电压循环一次,根据式(4),在一个半周内,输入每个链节的能量相同,从而避免了因为开关角 α 的不同而引起的直流侧电容电压不平衡。如图6所示,是采用开关脉冲循环换位方法,四个直流侧电容电压的变化曲线图,可以看出,四个电容的电压趋向于相等。由此验证了该方法可以抑制因开关角 α 的不同而引起的电容电压不平衡。

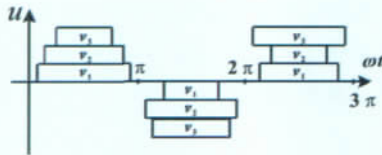


图5 开关脉冲循环换位原理图

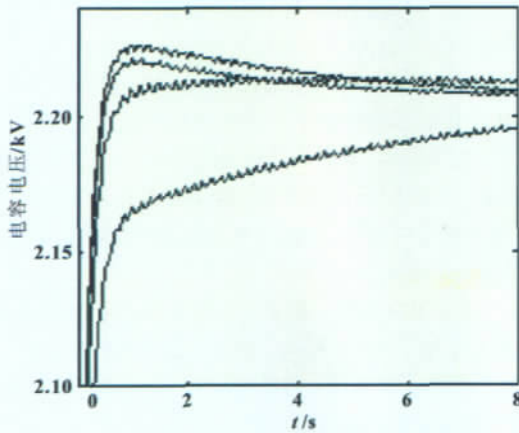


图6 采用开关脉冲循环换位时电容电压

若只考虑链节单元的并联损耗,并且将其等效为一个与电容并联的电阻 R_{dk} 。当并联损耗等效电阻 R_{dk} 不同时,有:

$$\Delta E = U^2 / R_{dk} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,即使输入的能量相同时,由于并联损耗等效电阻 R_{dk} 不同,而导致电容电压 U 不同。如图7所示的仿真结果为在链节1,2,4的并联损耗等效电阻 $R_{dk1}=R_{dk2}=R_{dk4}=3000 \Omega$, $R_{dk3}=2500 \Omega$ 时的仿真结果。仿真结果中曲线3为链节3的电容电压,可以看出在稳态时,链节3的电容电压明显低于其他三个电容的电压。

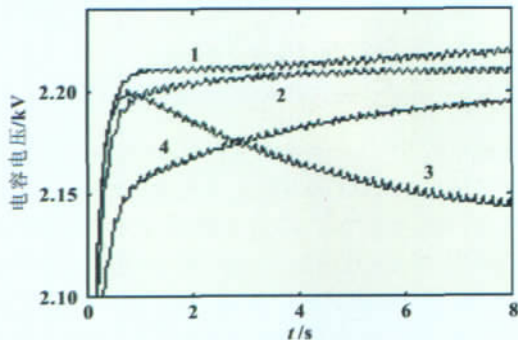


图7 并联损耗不同时的电容电压

3 开关脉冲排序换位

为了使STATCOM链节单元的损耗不同时,仍然能够保持直流侧电容电压相同,本文提出了开关脉冲排序换位的方法。由式(4)可知,开关脉冲的开关角 α 越小,输入该链节单元的能量就越大,因此,让能量消耗较大的链节单元输入较多的能量,便可以抑制因损耗不同而造成的电压不平衡。具体实现方法为:在 $\omega t = N\pi$ ($N=1,2,3, \dots$) 时刻对电容电压进行排序,电容电压高的链节单元,其开关脉冲的开关角 α 取较大的值,使其能量输入较小;电容电压低的链节单元,其开关脉冲的开关角 α 取较大的值,使其能量输入较大。每隔半个周波排序一次,如此便可以抑制电容电压的不平衡,其中排序换位的周期可以适当的放宽。

图8所示为采用开关脉冲排序换位时,电容电压随时间变化的曲线图,从图中可以看出,四个电容的电压在仿真过程中几乎严格相等,验证了开关脉冲排序换位的有效性。图8和图6的对比说明了开关脉冲排序换位比开关脉冲循环换位更有效地抑制电容电压的不平衡。

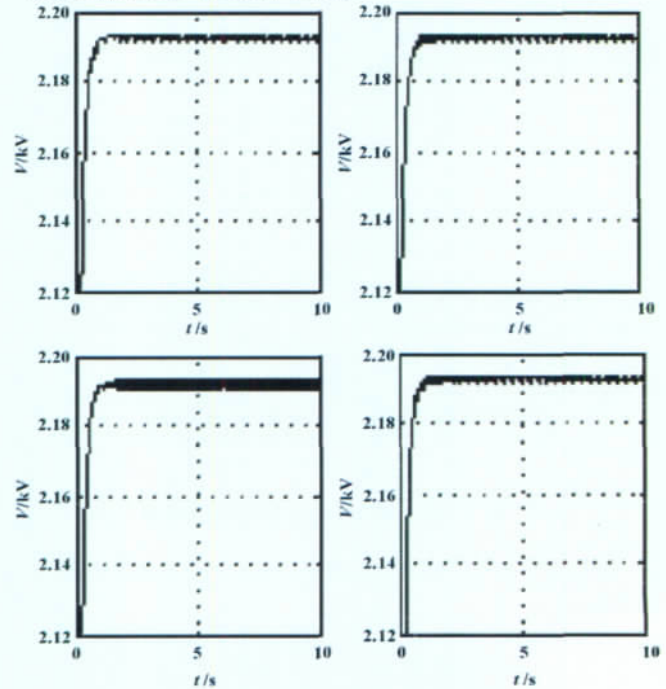


图8 采用开关脉冲排序换位的电容电压

为了求取该方法的适用范围,设链节单元中最小的并联损耗等效电阻 $R_{dk_{min}}$ 相对应最小的开关脉冲开关角 α_{min} , 最大的并联损耗等效电阻 $R_{dk_{max}}$ 对应最大的开关脉冲开关角 α_{max} , 此时恰好使每个电容的电压保持为 U , 则根据式(5)与式(6)有:

$$\begin{cases} \frac{U^2}{R_{dk_{min}}} = 2\sqrt{2} UI \cos \alpha_{min} \cos \beta \\ \frac{U^2}{R_{dk_{max}}} = 2\sqrt{2} UI \cos \alpha_{max} \cos \beta \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可以得出:

$$R_{dk_{min}} / R_{dk_{max}} = \cos \alpha_{max} / \cos \alpha_{min} \quad (8)$$

式(8)所示为临界条件,当式(8)中的等号为小于号时,等

等效电阻最小的链节单元对应最小的开关角，等效电阻最大的链节单元对应最大的开关角，仍然不能抑制电容电压的不平衡。但是，比起不控制或是开关脉冲循环移位的方法，使用该方法时，电容间的电压差较小。

4 结论

本文研究了链式 STATCOM 直流侧电容的充放电过程，提出了一种新的抑制电容电压不平衡的方法：开关脉冲排序移位，该方法能够在链节单元的损耗不同时，有效地抑制电容电压的不平衡，并且给出了适用范围，通过仿真与对比，验证了该方法的有效性。另外，该方法只对开关脉冲进行控制，并不增加硬件设备，与其它的电容电压控制方法相比，开关脉冲排序移位能够节省设备投资、减小能量损耗、提高 STATCOM 的效率。

参考文献：

- [1] 耿俊成, 刘文华, 俞旭风, 等. 链式 STATCOM 的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 65-70.
- [2] 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.
- [3] 魏文辉, 刘文华, 倪镭, 等. 链式 STATCOM 直流侧电容稳态分析及参数设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 28-31.
- [4] 刘文华, 宋强, 腾乐天, 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, 42(4): 149-154.
- [5] 魏文辉, 刘文华, 袁志昌. 链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究(一) 仿真和实验[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 53-57.
- [6] 魏文辉, 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.
- [7] LI Y D, WU B. A novel DC voltage detection technique in the CHB inverter-based STATCOM[J]. IEEE Trans On Power Delivery, 2008, 23(3): 1613-1619.
- [8] BARRENA J A, MARROYO L, VIDAL M A R, et al. Individual voltage balancing strategy for PWM cascaded H-Bridge converter based STATCOM[J]. IEEE Trans On Industry Electronics, 2008, 55(1): 1512-1521.
- [9] HAN C, QIAN C, MARIESA L C, et al. A comparison of diode-clamped and cascaded multilevel converter for a STATCOM with energy storage[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2007, 43(2): 378-385.
- [10] PENG F Z, WANG J. A universal STATCOM with delta-connected cascade multilevel inverter[C]//Power Electronics Specialists Conference. Germany: IEEE, 2004.

INDIGO

LA型锂离子电池专用水性粘合剂

LA型锂离子电池专用水性粘合剂具有良好的电化学稳定性、热稳定性和纯净的品质，适用于锂离子电池的各种正负极材料（钴酸锂、锰酸锂、磷酸亚铁锂、碳负极和钛酸锂等），使用时无需添加有机溶剂和增稠剂。

LA型水性粘合剂已行销10年，大量应用于通讯电池和动力电池领域，年产量突破1100吨。

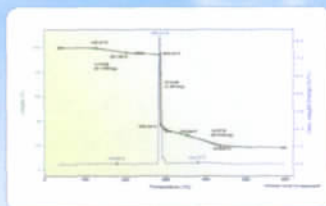


图1: TGA曲线 (LA132)

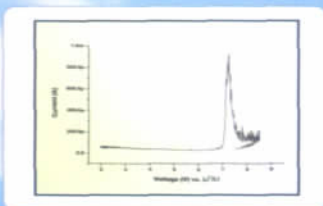


图2: CV曲线 (不锈钢-LA132/不锈钢)

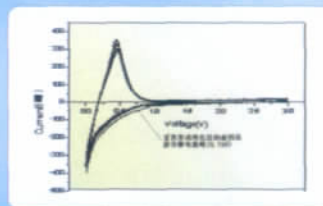


图3: CV曲线 (C-LA132/Li)

成都苗地乐电源科技有限公司以中国科学院成都有机化学研究所雄厚的科研力量及完善的检测设备为支撑，致力于锂离子电池专用水性粘合剂的研究与生产，拥有的水性粘合剂技术属国内首创，具有国际领先水平。

地址：成都市蛟龙工业港双流园区南海大道15座

电话：028-85730609/88208099

传真：028-85758238/88202189

邮编：610200

网址：www.cd-ydl.com

联系人：刘女士 (13881887312)

邮箱：indigo@cioc.ac.cn

专注于锂离子电池水性粘合剂的研发与生产

