

链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究

(二)数学模型

耿俊成, 刘文华, 袁志昌

(清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要: 电容电压不平衡及其控制是链式静止同步补偿器(STATCOM)安全可靠运行必须解决的关键问题。文中建立了链式 STATCOM 的数学模型, 揭示了电容电压不平衡现象产生的机理, 正确描述了逆变桥各参数对电容电压分配的影响。基于 PSCAD 的仿真验证了模型的正确性。该模型对于电压平衡控制策略的设计具有重要意义。

关键词: 静止同步补偿器; 链式多电平逆变器; 电容电压不平衡; 数学模型

中图分类号: TM761.12

0 引言

链式静止同步补偿器(STATCOM)直流电容器完全分开, 如何使各电容器上的电压保持一致, 是装置安全可靠运行的关键。而电容电压不平衡机理的研究则是制定平衡控制策略的基础。文献[1]基于数字仿真和原理样机试验研究了电容电压不平衡的机理, 分析和讨论了各种因素对电容电压不平衡的影响。然而, 该文献仅给出了定性的结论。为了给出定量的结论, 以满足控制器设计的需要, 应建立链式 STATCOM 的数学模型。

链式 STATCOM 由多个逆变桥串联而成, 拓扑结构十分复杂。装置中既包含电感、电容之类的线性元件, 又包含强非线性的开关元件。因此, 建立一个简单而又实用的数学模型并非易事。电力电子装置的建模方法一般有两种^[2,3]: 一种是拓扑建模方法, 该方法与主电路结构密切相关, 不具有普遍的适用性, 而且往往过于复杂; 另一种是平均建模方法, 该方法在形式上较为简单, 但需要事先对电路进行正确的分析、合理的假设和适当的近似。

本文采用平均建模法, 将电容电压视为直流分量与交流分量之和, 把电流和开关函数分解为基波分量及谐波分量, 从而得到了反映电容电压不平衡特性的链式 STATCOM 数学模型。基于 PSCAD 的仿真验证了模型的正确性。

1 链式 STATCOM 数学模型

1.1 模型的假设条件

在建立链式 STATCOM 数学模型之前, 首先

做如下假设:

a. 系统。由文献[1]可知, 电容电压不平衡是由于各逆变桥参数之间存在差异, 导致输入能量与自身损耗不一致, 经长时间的积累造成的。在这一过程中, 只要各逆变桥的调制比以及 STATCOM 输出电压的相位不变, 装置输出无功就基本不变。因此, 在研究电容电压不平衡问题时, 可将系统等效为一交流电流源。

b. 装置损耗。包括各逆变桥损耗和连接电抗器损耗。连接电抗器损耗可等效为串联电阻; 逆变桥损耗可分为串联型、混合型和并联型等 3 类^[1]。串联型损耗主要是器件的导通损耗, 这部分损耗仅与装置电流有关, 与直流电压无关, 可用串联电阻表示; 混合型损耗主要是器件的开关损耗, 既与直流电压有关, 也与装置电流有关, 可等效为与电容器并联的受控电流源; 并联型损耗包括器件断态损耗、电容器自身损耗和吸收回路损耗等, 与装置电流无关, 仅与直流电压有关, 可等效为与电容器并联的电阻。

c. 逆变桥控制方式。采用正弦载波调制控制方式, 各逆变桥触发脉冲指令完全相同。

d. 触发脉冲差异。由于触发脉冲指令需要经过若干逻辑电路和放大环节, 开关器件门极驱动脉冲之间或多或少存在一定的误差, 表现为开关函数相位的差异。

1.2 链式 STATCOM 的数学描述

链式 STATCOM 原理电路如图 1 所示。

该装置由 n 个逆变桥串联而成, 通过连接电抗 L_s 接入系统。系统为一交流电流源, 其有效值为 I 。连接电抗器损耗和所有逆变桥的串联型损耗统一用串联电阻 R_s 表示, 混合型损耗和并联型损耗分别

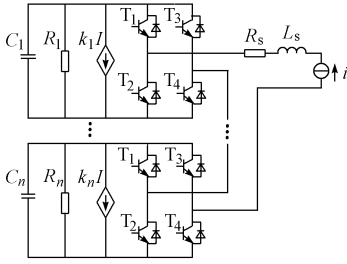


图1 链式 STATCOM 原理电路

Fig. 1 Schematics of cascade STATCOM

用受控电流源 $k_j I$ ($j=1, 2, \dots, n$) 和电阻 R_j ($j=1, 2, \dots, n$) 表示。

对逆变桥 j , 有:

$$C_j \frac{du_j(t)}{dt} + \frac{u_j(t)}{R_j} + k_j I = i(t) S_w(t, j) \quad (1)$$

式中: $S_w(t, j)$ 为逆变桥 j 的开关函数。

当 T_1, T_4 导通时, $S_w=1$; 当 T_2, T_3 导通时, $S_w=-1$ 。

电容电压可表示为直流分量和交流分量之和:

$$u_j(t) = U_{j-}(t) + u_{j-}(t) \quad (2)$$

式中: $U_{j-}(t)$ 为电容电压中的直流分量, 亦即电容电压平均值; $u_{j-}(t)$ 为电容电压中的交流分量。

电流源 i 由基波分量和谐波分量组成:

$$i(t) = \sqrt{2} I_f \sin(\omega t - \varphi) + i_h(t)$$

式中: $i_h(t)$ 为电流中高次谐波分量; I_f 为电流中基波分量的有效值; φ 为基波电流与 STATCOM 输出电压基波分量的相位差, 以电流落后电压为正。

STATCOM 装置电流谐波通常很小, 因此近似有 $I_f = I$, 即有:

$$i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) + i_h(t) \quad (3)$$

逆变桥 j 的开关函数可表示为:

$$S_w(t, j) = M \sin(\omega t - \Delta_j) + S_{wh}(t, j) \quad (4)$$

式中: $S_{wh}(t, j)$ 为开关函数的高次谐波分量; M 为调制比, 即逆变桥输出电压最大值与直流电压平均值之比; Δ_j 为由于脉冲延时导致的相位误差, 以落后于脉冲指令为正。

将式(2)~式(4)代入式(1), 整理得:

$$C_j \frac{dU_{j-}(t)}{dt} + \frac{U_{j-}(t)}{R_j} + k_j I = \frac{\sqrt{2} I M}{2} \cos(\varphi - \Delta_j) \quad (5)$$

当达到稳态后, 电容电压平均值不再发生变化, 因此有:

$$U_{j-} = IR_j \left(\frac{\sqrt{2} M}{2} \cos(\varphi - \Delta_j) - k_j \right) \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 电容电压稳态分配仅与并联损耗、开关损耗以及脉冲延时的差异有关, 与电容器

容量和电压电流谐波无关。这与文献[1]的分析结果一致。

2 模型分析和仿真验证

为了进一步验证模型的准确性, 本文建立了链式 STATCOM 的 PSCAD 仿真模型。如图 2 所示, STATCOM 采用三相三角形接法, 每相由 3 个逆变桥串联而成。每相串联的电抗器为 2.4 mH, 直流侧电容均为 4 000 μ F。STATCOM 额定容量为 1.35 MVA, 直接接入无穷大系统, 系统线电压为 1.5 kV。

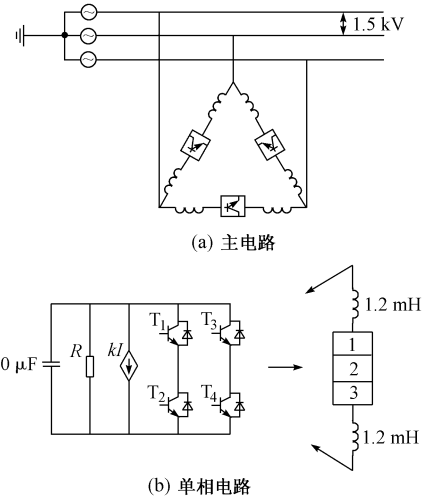


图2 链式 STATCOM 仿真模型

Fig. 2 Schematics of cascade STATCOM simulation module

2.1 并联电阻不同时的仿真结果

设各逆变桥的触发脉冲完全一致 ($\Delta_j=0$), 并联受控电流源也完全相同 ($k_j=k$), 由式(6)可得:

$$U_{j-} = IR_j \left(\frac{\sqrt{2} M}{2} \cos \varphi - k \right) \quad (7)$$

此时电容电压的平均值与并联电阻成正比, 而且无论装置吸收还是发出无功, 也无论装置吸收或发出多少无功, 电容电压的比值不变。也就是说, 此时电容电压不平衡程度与装置运行点无关。

令开关损耗比例系数 $k=0.001$, 3 个逆变桥的并联电阻依次为 0.9 k Ω , 1.0 k Ω 和 1.1 k Ω 。事实上, 实际装置的并联型损耗很小, 因而等效并联电阻通常很大。但如果采用实际值, 仿真过程将非常缓慢。因此, 本文选择了较小的电阻值。

仿真结果如图 3 所示。STATCOM 输出电压超前系统电压, 它们之间的相位差 $\delta=1^\circ$, 对应吸收无功的情形。达到稳态后, 电容电压平均值依次为 665.7 V, 738.7 V 和 811.0 V, 比值为 $U_1:U_2:U_3=0.901:1.000:1.098$, 与电阻比值基本一致。

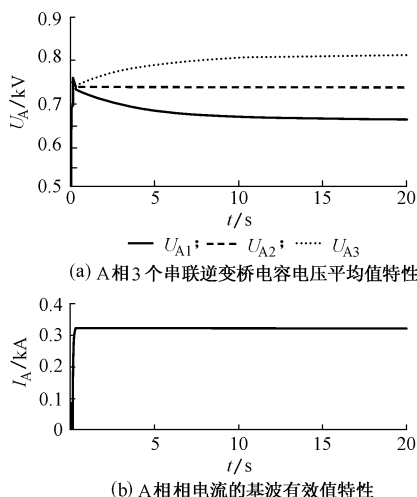


图3 并联电阻不同时的仿真结果($\delta=1^\circ$)
Fig. 3 Simulation result with different parallel resistors ($\delta=1^\circ$)

图4为 $\delta=0.5^\circ$ 的情形。达到稳态后,电容电压平均值依次为705.9 V,783.3 V和860.0 V,比值为 $U_1:U_2:U_3=0.901:1.000:1.098$,与电阻比值基本一致。

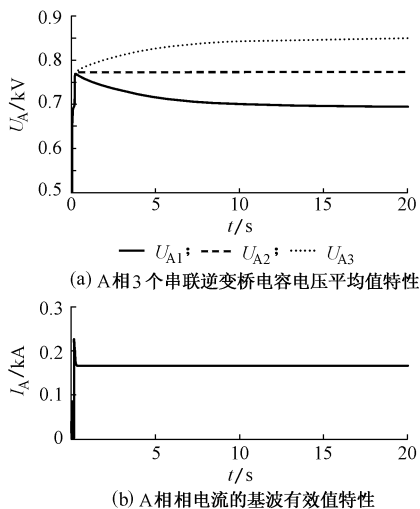


图4 并联电阻不同时的仿真结果($\delta=0.5^\circ$)
Fig. 4 Simulation result with different parallel resistors ($\delta=0.5^\circ$)

以上均为装置吸收无功的情形,发出无功的情形也有同样的结论,如表1所示。

表1 并联电阻不同时的仿真结果
Table 1 Simulation results with different parallel resistors

$\delta/(\circ)$	电容电压平均值/V			比值
	U_{1-}	U_{2-}	U_{3-}	
0	735.1	815.6	895.5	0.901:1.000:1.098
-0.5	760.3	843.6	926.2	0.901:1.000:1.098
-1.0	789.2	875.7	961.5	0.901:1.000:1.098

2.2 开关损耗不同时的仿真结果

设各逆变桥的触发脉冲完全一致($\Delta_j=0$),并联电阻也完全相同($R_j=R$)。由式(6)可得:

$$U_{j-} = IR \left(\frac{\sqrt{2}M}{2} \cos \varphi - k_j \right) \quad (8)$$

由式(8)可得:

$$U_{j-} - U_{l-} = IR(k_l - k_j) \quad (9)$$

式中: $j, l=1, 2, \dots, n; j \neq l$ 。

此时电容电压的不平衡程度与装置的运行点,亦即装置吸收或发出无功的多少有关。当吸收或发出较多无功时,电容电压不平衡的程度也更大。

设3个逆变桥的开关损耗比例系数依次为0.000 9,0.001 0和0.001 1,并联电阻均为1 k Ω ,STATCOM输出电压与系统电压之间的相位差 $\delta=1^\circ$ 。仿真结果如图5所示。达到稳态后,电流有效值为323 A,由式(9),电容电压之间的差值应为32.3 V。由仿真结果,电容电压平均值依次为770.2 V,738.5 V和706.8 V,相差31.7 V,与理论分析结果基本一致。

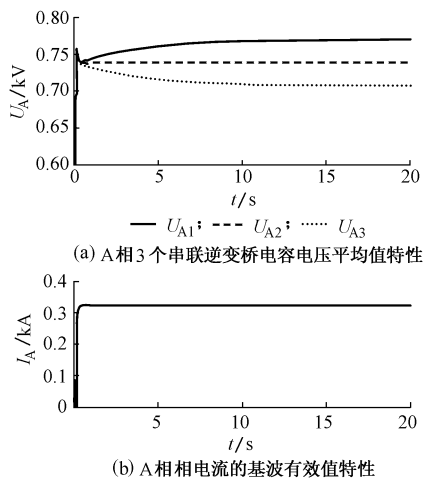


图5 开关损耗不同时的仿真结果($\delta=1^\circ$)
Fig. 5 Simulation result with different switching loss ($\delta=1^\circ$)

图6为 $\delta=0.5^\circ$ 的情形。达到稳态后,电流有效值为167 A,电容电压之间的差值应为16.7 V。由仿真结果,电容电压平均值依次为799.4 V,783.0 V和766.6 V,相差16.4 V,与理论分析结果基本一致。与 $\delta=1^\circ$ 时相比,电容电压分散性有所减轻。

装置发出无功的情形与此类似,在此不再赘述。由于并联型损耗较小,实际装置的等效并联电阻通常很大,因而开关损耗的微小差异都会造成严重后果。即使受控电流源之间的差异仅有几毫安,相当于各逆变桥开关损耗仅有几瓦的差异,若并联电阻

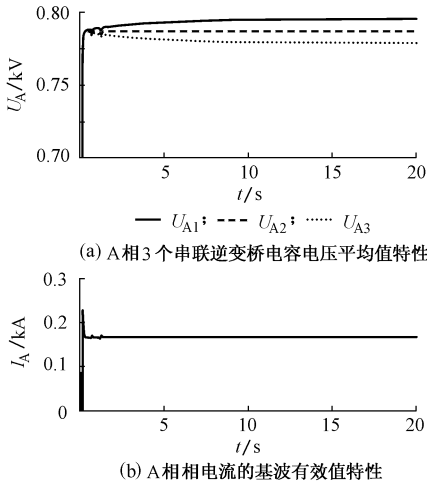


图6 开关损耗不同时的仿真结果($\delta=0.5^\circ$)
Fig. 6 Simulation result with different switching loss ($\delta=0.5^\circ$)

有几十千欧,电容电压之间的差异也将达到几十伏甚至上百伏,严重影响装置的安全可靠运行。

2.3 输入脉冲延时不同时的仿真结果

设各逆变桥的并联电阻完全相同($R_j=R$),并联受控电流源也完全相同($k_j=k$)。由式(6)可得:

$$U_{j-} = IR \left(\frac{\sqrt{2}M}{2} \cos(\varphi - \Delta_j) - k \right) \quad (10)$$

由式(10)可得:

$$U_{j-} - U_{l-} = \frac{\sqrt{2}}{2} IRM (\cos(\varphi - \Delta_j) - \cos(\varphi - \Delta_l)) = \sqrt{2} IRM \sin\left(\varphi - \frac{\Delta_j + \Delta_l}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta_j - \Delta_l}{2}\right) \quad (11)$$

式中: $j, l=1, 2, \dots, n; j \neq l$ 。

由于

$$\sin\left(\varphi - \frac{\Delta_j + \Delta_l}{2}\right) \approx 1$$

$$\sin\left(\frac{\Delta_j - \Delta_l}{2}\right) \approx \frac{\Delta_j - \Delta_l}{2}$$

因有:

$$U_{j-} - U_{l-} = \frac{\sqrt{2}}{2} IRM (\Delta_j - \Delta_l) \quad (12)$$

比较式(9)和式(12)可以看出,脉冲延时差异对电容电压的影响与开关损耗差异类似。

令3个逆变桥的开关损耗比例系数为0.001,并联电阻为1 k Ω 。逆变桥1的输出电压超前系统电压 1° ,逆变桥2和逆变桥3触发脉冲相对逆变桥1分别落后1 μ s和2 μ s。每个逆变桥的调制比均为0.85。仿真结果如图7所示。达到稳态后,电流有效值为250 A,由式(12),电容电压之间的差值应为47.2 V。由仿真结果,电容电压平均值依次为

712.3 V, 759.3 V和806.3 V,相差47 V,与理论分析结果基本一致。

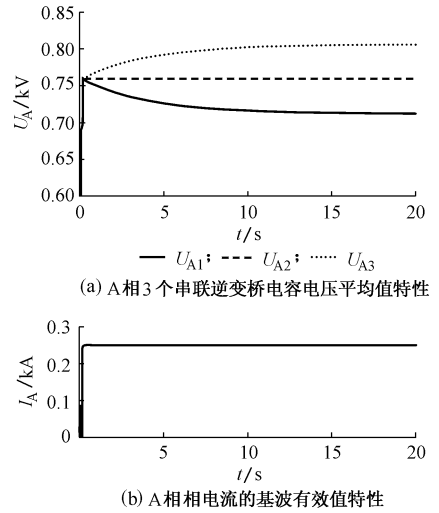


图7 脉冲延时不同时的仿真结果($\delta=1^\circ$)
Fig. 7 Simulation result with different pulse delay ($\delta=1^\circ$)

图8为 $\delta=0.5^\circ$ 的情形。达到稳态后,电流有效值为103 A,由式(12),电容电压之间的差值应为19.4 V。由仿真结果可知,电容电压平均值依次为781.5 V, 801.3 V和821.1 V,相差19.8 V,与理论分析结果基本一致。装置发出无功的情形也有类似的结论,在此不再赘述。

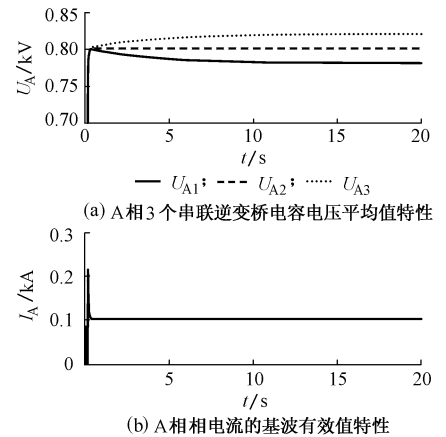


图8 脉冲延时不同时的仿真结果($\delta=0.5^\circ$)
Fig. 8 Simulation result with different pulse delay ($\delta=0.5^\circ$)

由于实际装置等效并联电阻通常很大,脉冲延时的微小差异都会造成电容电压严重不平衡,开关脉冲之间相差1 μ s,电容电压之间可能相差上百伏甚至更高。

2.4 进一步讨论

由式(6),链式STATCOM电容电压不平衡是各逆变桥并联型损耗和混合型损耗差异以及脉冲延

时的差异共同作用的结果。根据以上分析,即使差异很小,随着时间的积累,电容电压之间仍可能相差几十伏甚至上百伏。因此在设计链式 STATCOM 装置时,需要注意如下两点:①应选用同厂家、同批号的元器件,以尽可能减少由于元器件差异造成的电容电压不平衡;②应提高脉冲控制器的控制精度,并采用一定的措施对各逆变桥的脉冲延时进行补偿。

由于各逆变桥之间的差异是不可避免的,为了装置安全可靠运行,必须采取一定的平衡控制策略。控制策略设计可从如下两个方向着手:一个是逆变桥自身能量平衡,另一个是逆变桥之间能量平衡。

所谓逆变桥自身能量平衡,是指通过调节逆变桥内部参数达到平衡的目的。文献[4]提出的通过调节逆变桥与系统之间的相位差实现电容电压平衡,以及文献[5]提出的通过调节各逆变桥调制比实现电容电压平衡都属于此类,前者相当于控制式(6)中 Δ_i , 后者相当于调节式(6)中的 M 。

所谓逆变桥之间能量平衡,是指通过外部电路的能量交换,实现电容电压动态平衡。ALSTOM 公司为英国国家电网公司研制的 ± 75 Mvar STATCOM 采用的电容电压平衡控制策略即属于此类^[6]。直流侧电容通过双向运行的逆变器和隔离变压器连接到公共耦合总线上,能量便从电压较高的逆变桥流向电压较低的逆变桥,从而实现平衡的控制目的。控制电路的容量可参照式(6)计算。

两类控制方法理论上都是可行的,前者的控制器设计复杂,而后者则需要复杂的外部电路。装置的控制方案需要根据实际情况决定。

3 结语

本文在文献[1]数字仿真和物理模型试验研究的基础上,建立了反映链式 STATCOM 电容电压不平衡特性的数学模型。该模型准确地描述了逆变

桥各参数对电容电压分配的影响,基于 PSCAD 的仿真验证了模型的正确性。模型对于电容电压平衡控制策略的设计具有重要意义。

参考文献

- 耿俊成,刘文华,袁志昌(Geng Juncheng, Liu Wenhua, Yuan Zhichang). 链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究:(一)仿真和试验(The Research on the Voltage Unbalance of DC Capacitors of Cascade STATCOM: Part One Simulations and Experiments). 电力系统自动化(Automation of Electrical Power Systems), 2003, 27(1)
- 沈东(Shen Dong). 基于标么值模型的静止同步补偿器性能分析与主电路参数评估:[博士学位论文](Performance Analysis and Main Circuit Parameters Evaluation of STATCOM Based on p. u. Model, Doctoral Dissertation). 北京:清华大学(Beijing: Tsinghua University), 1999
- Meynard T A, Fadel M, Aouda N. Modeling of Multilevel Converters. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1997, 44(3)
- Peng F Z, Lai J S. Dynamic Performance and Control of a Static Var Generator Using Cascade Multilevel Inverters. IEEE Trans on Industry Applications. 1997, 33(3): 748~755
- 谢旭(Xie Xu). 面向大容量 STATCOM 的 IGCT 应用研究和链式结构研究:[硕士学位论文](Studies on Application of IGCT and Cascade Multilevel Configuration for High Capacity STATCOM, Thesis). 北京:清华大学(Beijing: Tsinghua University), 2002
- Woodhouse M L, Donoghue M W, Osborne M M. Type Testing of the GTO Valves for a Novel STATCOM Convertor. AC-DC Power Transmission. In: Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission (IEE Conference Publication No 485). London (UK): IEE, 2001. 84~90

耿俊成(1976—),男,博士研究生,研究方向为电力电子、柔性输配电。E-mail: gengjuncheng@tsinghua.org.cn

刘文华(1968—),男,博士,副研究员,研究方向为柔性输配电技术及高频变换电源。

袁志昌(1980—),男,博士研究生,研究方向为电力电子、柔性输配电。

RESEARCH ON THE VOLTAGE UNBALANCE OF DC CAPACITORS OF CASCADE STATCOM

Part Two Mathematical Model

Geng Juncheng, Liu Wenhua, Yuan Zhichang

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To keep the DC capacitors' voltage balance is very important for the reliable operation of cascade STATCOM since DC capacitors of cascade STATCOM are separate. This paper presents a mathematical model to study the mechanism of the happened voltage unbalance. Further more, the impacts of inverter's parameters on the distribution of capacitors' voltage are investigated. Simulations verify the correctness of this model and the conclusion has significant contribution to designing controller to balance the voltages.

Key words: static synchronous compensator (STATCOM); cascade multilevel inverter; DC capacitor voltage unbalance; mathematical model