

中点钳位式三电平 STATCOM 的动态相量建模与仿真

刘皓明^{1,2}, 戚庆茹³, 李 扬¹, 倪以信^{2,4}

(1. 东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096;

2. 清华港大深圳电力系统研究所, 广东 深圳 518055;

3. 北京国电华北电力工程有限公司, 北京 100084;

4. 香港大学 电机电子工程系, 香港)

摘要: 首先介绍了中点钳位式(NPC)三电平静止同步补偿器(STATCOM)的结构和原理,采用一种改进的空间矢量脉宽调制(SVPWM)控制方法,用以解决换流器直流侧两个电容的电压均衡问题;通过开关函数详细描述了换流桥的离散动态过程,使用动态相量法得到 STATCOM 的动态模型,并同时给出了电源、负荷和输电线路的动态相量模型;最后使用 Simulink / Matlab 平台分别实现了含 NPC 三电平 STATCOM 测试系统的电磁暂态模型和动态相量模型的建模,仿真结果验证了动态相量模型的精确性和有效性。

关键词: 中点钳位式; 三电平; 静止同步补偿器; 空间矢量脉宽调制; 动态相量

中图分类号: TM 714.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)08-0018-05

0 引言

静止同步补偿器(STATCOM)在互联电力系统的稳定安全运行中得到越来越多的应用^[1]。基于二极管中点钳位式 NPC(Neutral Point Clamped)三电平换流器的 STATCOM 是目前较为先进的柔性交流输电系统(FACTS)装置之一,具有电压高、容量大、成本低等特点,而且交流侧电压由 5 个电平组成,波形更接近正弦波,减少了谐波含量^[2]。

多电平换流器的 PWM 控制方法与其电路拓扑结构有直接关系,用于 NPC 型多电平换流器的 PWM 控制方法有多种,如正弦波脉宽调制(SPWM)法^[3]、特定消谐波法、优化目标函数法^[4,5],以及基于滞环电流控制的方法^[6],这些方法各有优劣。基于电压空间矢量的 SVPWM(Space Vector PWM)控制方法,不仅可提高器件的电压利用率、降低装置成本,而且可优化开关矢量、便于实施电容电压控制。本文将使用改进的 SVPWM 控制方法,较好地解决直流电容的电压不平衡问题,并有效地降低了总谐波畸变^[7,8]。

本文在含 STATCOM 的系统建模中引入动态相量法(dynamic phasors),其思想源于传统的平均值法,是基于反映元件动态特性的状态变量对应的时变傅里叶系数而形成的一种建模方法^[9],已被用于 TCSC^[10]、UPFC^[11]、同步感应电机^[12]以及电力系统次同步谐振^[13]等研究中。

本文首先介绍了 NPC 型三电平 STATCOM 的结构、原理和 SVPWM 控制策略;然后通过开关函数详细描述了换流桥的离散动态过程^[14],使用动态相量法得到 STATCOM 的动态模型,并同时给出了电源、负荷和输电线路的动态相量模型;最后使用 Simulink / Matlab 平台分别实现了含 NPC 三电平 STATCOM 测试系统的电磁暂态模型和动态相量模型的建模,仿真结果验证了动态相量模型的精确性和有效性。

1 三电平 STATCOM 及 SVPWM 控制

1.1 NPC 型三电平换流器

电压型换流器是 STATCOM 的核心组成部分,二极管中点钳位式三电平换流器结构如图 1 所示^[15]。换流器有三相 6 个支臂,每个支臂由 2 个晶闸管串联组成, $S_{mX}(m=1,2,3,4;X=A,B,C)$ 分别对应三相中

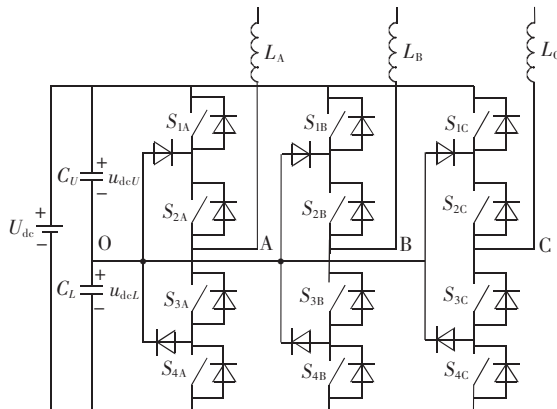


图 1 NPC 型三电平换流器结构图

Fig.1 Schematic diagram of the 3-level NPC converter

收稿日期:2005-04-25

基金项目:国家重点基础研究专项经费项目(2004CB217900);

国家自然科学基金项目(50337010)

的晶闸管开关。直流电源接 2 个电容分压,电容电压中点通过 6 个钳位二极管与 6 个支臂的中间连接起来。每相包括 2 个钳位二极管、4 个晶闸管和 4 个反并联续流二极管。

NPC 型换流器的相邻 2 个开关器件一起导通,每相有 3 种工作状态。如果用 P,O,N 分别代表这 3 种工作状态,或者用 S_P 、 S_0 和 S_N 对应等效开关函数,则每相的工作状态和输出电压关系见表 1。按照一定的策略组合 A,B,C 三相的各种开关状态,就可以构造出期望的输出电压波形。

表 1 三电平换流器开关状态($X=A,B,C$)

Tab.1 Switching states of the 3-level converter($X=A,B,C$)

开关状态	S_{1X}	S_{2X}	S_{3X}	S_{4X}	U_{XN}
$S_P=1$	ON	ON	OFF	OFF	U_{dcU}
$S_0=1$	OFF	ON	ON	OFF	0
$S_N=1$	OFF	OFF	ON	ON	$-U_{dcL}$

NPC 型三电平换流器的技术难点在于直流电容的电压均衡^[16,17]。在吞吐功率时,如果一个周期内从 2 个电容分别流入(出)的电流不等,则 2 个电容充(放)电量不同,使得电容电压变化幅度不等。若此种情况经常发生或者持续时间过长,会引起电容电压失衡,以至于会增加交流侧的电流谐波含量,增加功率开关所承受的反向电压,降低装置的可靠性和使用寿命。本文采用了改进的 SVPWM 控制方法,很好地解决了直流电容电压均衡问题。

1.2 SVPWM 控制方法

对于三电平系统,若用 $u_a(t)$ 、 $u_b(t)$ 、 $u_c(t)$ 分别表示换流器交流侧 A,B,C 三相输出相电压的瞬时值(p.u.),则电压空间矢量 $u(t)$ 可定义为

$$u(t)=\frac{2}{3}[u_a(t)+au_b(t)+a^2u_c(t)] \tag{1}$$

式中 $a=e^{j2\pi/3}$ 。

由于三相各有 3 个电平状态 P,O,N,于是电压空间矢量也有 27 种可能的状态,如图 2 所示。

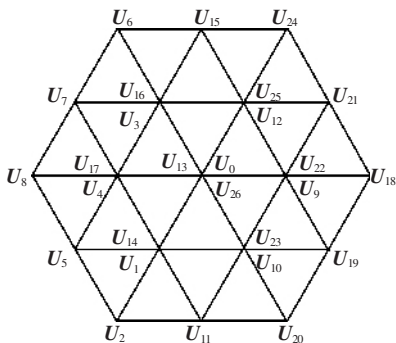


图 2 NPC 三电平换流器电压空间矢量图

Fig.2 Space vectors of the 3-level converter

可以看出中间的小正六边形的每个顶点都对应着 2 个小电压矢量状态:高位和低位,这种情况被称为开关状态冗余。高位状态称为 P 型小电压矢量(各相开关状态只有 P 和 O),如 U_{22} 对应的三相开关状态为“POO”;低位状态称为 N 型小电压矢量(开关状态

只有 O 和 N),如 U_9 对应的三相开关状态为“ONN”。这里利用开关状态的冗余特性解决电容电压失衡问题。

若参考电压是幅值为 U_{ref} 的三相对称正弦,即

$$\begin{aligned} u_a(t) &= U_{ref} \cos(\omega t) \\ u_b(t) &= U_{ref} \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ u_c(t) &= U_{ref} \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \tag{2}$$

代入式(1),整理可得电压空间矢量 $U=U_{ref}e^{j\omega t}$,其为复平面上一个大小为 U_{ref} ,沿着逆时针方向旋转的矢量。定义磁链矢量为电压矢量对时间的积分

$$\lambda = \int U dt \tag{3}$$

则电压 SVPWM 控制的原理为:不断跟踪磁链矢量,使它的运行轨迹尽量接近参考三相对称正弦电压的磁链矢量轨迹(理想圆形)。这种控制方法的关键在于开关矢量的选择及其作用时间。如果给定采样周期为 T ,那么在每个采样周期内需满足

$$\int_{sT-T}^{sT} U(t)dt = \int_{sT-T}^{sT} U_{PWM}(t)dt = U_{s1}t_1 + U_{s2}t_2 + \cdots + U_{sr}t_r \tag{4}$$

式中 $U(t)$ 为参考电压矢量; $U_{s1},U_{s2},\cdots,U_{sr}$ 为第 s 个采样周期内选择的电压矢量信号,对应的持续作用时间分别为 $t_1,t_2,\cdots,t_r$,并且满足 $t_1+t_2+\cdots+t_r=T$ 。

用以解决直流侧电容电压不平衡问题的思路在于:在一个时段内,合理配合使用对应相同电压空间矢量的不同开关状态,以保证直流侧 2 个电容在同一时段内充放电相等,从而消除电容电压不平衡现象。分析表明,在 P 型小电压矢量状态下,NPC 型三电平换流器直流侧上面电容 C_U 会放电、下面电容 C_L 会充电;在 N 型小电压矢量状态下,上面电容充电、下面电容放电。若负荷平衡,在其他电压空间矢量对应的状态下上下电容同时充放电,则不需考虑电压平衡问题。

具体实施时,可以采用“时间补偿法”来保证一个周期内,P 型和 N 型电压矢量的作用时间相等。

2 动态相量建模

动态相量法基于频率分解的思想,希望仅保留时变傅里叶级数中相对较大的系数来近似原始信号,以抓住系统的主要特征。将保留的这些系数对应的相量看作系统变量,即可得到系统动态相量空间的模型,且可以保留原时域模型的非线性^[9]。

根据电力系统参数的特征和待研究问题的情况,在电力电子换流器建模过程中往往保留傅里叶系数中对应的基频分量(交流侧)和直流分量(直流侧),即 1 阶和 0 阶动态相量系数。若引入开关函数,将可以对含离散开关事件晶闸管元件的电力电子设备建立连续模型。

需要说明的是,在多相不平衡的系统中,动态相量也可以分相建模,予以适用,从而可用于对三相不对称故障 HVDC 换相失败等不平衡快速暂态过程的

建模。本文主要针对的是三相平衡系统的建模,不难推广到三相不平衡状态的分相建模。

针对如图 3 所示测试系统,本节对系统各部分分别建立三相对称的动态相量模型。

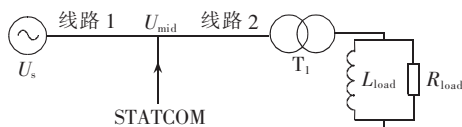


图 3 含 STATCOM 的测试系统

Fig.3 Test system with STATCOM

输电线路参数:阻抗基值 144.4Ω ;电阻 0.0001 p.u./km ;电感 0.001 p.u./km ;充电电容 0.0018 p.u./km 。

负荷参数:等效电阻 237Ω ;等效电感 0.23 H 。

变压器变比: $1:1.23(\text{Y/Y 型, p.u.})$ 。

STATCOM 参数:直流电容 $1590 \mu\text{F}$ (2 个);串联电抗 68.9 mH ;调制比 0.8 。

2.1 电源模型

将电源等效为理想电压源和阻抗串联表示,理想电压源为

$$u_s(t) = E_s \sin(\omega t + \varphi)$$

式中 $\omega = 2\pi f = 100\pi$, f 为电源频率。

则电压源一阶动态相量模型为

$$U_{s1} = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t E_s \sin(\omega \tau + \varphi) e^{-j\omega \tau} d\tau \quad (5)$$

2.2 线路模型

线路中点接入 STATCOM,可将线路等效为 2 个 π 型等值电路相串联的形式,如图 4 所示。

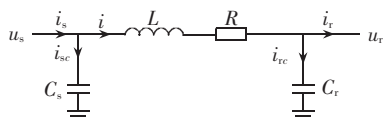


图 4 线路图

Fig.4 Transmission line

π 型等值电路电磁暂态时域模型可以表示为

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} + Ri &= u_s - u_r, \quad C_s \frac{du_s}{dt} = i_{sc} \\ C_r \frac{du_r}{dt} &= i_{rc}, \quad i_s = i + i_{sc}, \quad i_r = i - i_{rc} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 u_s 和 u_r 分别为线路首、末端电压。

若只考虑基频分量,可以推导出相应的 π 型输电线路的动态相量模型

$$\begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= \left(-\frac{R}{L} - j\omega_s\right) I_1 + \frac{1}{L} U_{s1} - \frac{1}{L} U_{r1} \\ \frac{dU_{s1}}{dt} &= \frac{1}{C_s} I_{sc1} - j\omega_s U_{s1} \\ \frac{dU_{r1}}{dt} &= \frac{1}{C_r} I_{rc1} - j\omega_s U_{r1} \\ I_{s1} &= I_{sc1} + I_1 \\ I_{r1} &= I_1 - I_{rc1} \end{aligned} \quad (7)$$

2.3 负荷模型

RL 型负荷如图 5 所示。

其时域模型为

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} &= u \\ u &= Ri_R \\ i &= i_R + i_L \end{aligned} \quad (8)$$

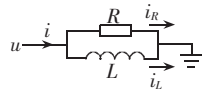


图 5 负荷图

Fig.5 RL load

i_R 和 i_L 分别为流经电阻和电感的电流,由此可得 RL 型负荷动态相量模型

$$\begin{aligned} \frac{dI_{L1}}{dt} &= -j\omega_s I_{L1} + \frac{1}{L} U_1 \\ I_1 &= \frac{1}{R} U_1 + I_{L1} \end{aligned} \quad (9)$$

2.4 STATCOM 模型

在三相对称的情况下,NPC 型三电平 STATCOM 的 A 相等值电路见图 6,则时域动态模型为

$$\begin{aligned} L_A \frac{di_A}{dt} &= u_A - u_{sA} \\ u_{sA} &= S_{PA}(u_{dcU} + u_o) + S_{NA}(u_o - u_{dcL}) + S_{OA}u_o \\ C_U \frac{du_{dcU}}{dt} &= i_{dcU} = \sum_{j=A,B,C} i_j S_{Pj} \end{aligned} \quad (10)$$

$$C_L \frac{du_{dcL}}{dt} = -i_{dcL} = -\sum_{j=A,B,C} i_j S_{Nj}$$

式中 S_{Pj} , S_{Nj} 和 S_{Oj} 均为等效开关函数,且满足 $S_{Pj} + S_{Nj} + S_{Oj} = 1 (j=A, B, C)$ 。

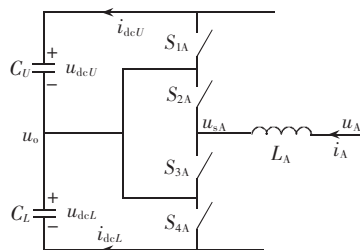


图 6 三电平 STATCOM 的 A 相等值电路图

Fig.6 Equivalent circuit of phase A of 3-level STATCOM

当三相对称时可以推导出

$$u_o = -\frac{1}{3} (u_{dcU} \sum_{j=A,B,C} S_{Pj} - u_{dcL} \sum_{j=A,B,C} S_{Nj}) \quad (11)$$

若只考虑工频和直流分量,根据式(10)和(11)可以推导出三电平 STATCOM 的 A 相完整动态相量模型(下标 A 略去):

$$\begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= -j\omega I_1 + \frac{1}{L} U_1 - \frac{1}{L} (S_{P1} U_{dcU0} - S_{N1} U_{dcL0}) \\ \frac{dU_{dcU0}}{dt} &= \frac{3}{C_U} (I_1 S_{P1}^* + I_1^* S_{P1}) \\ \frac{dU_{dcL0}}{dt} &= -\frac{3}{C_L} (I_1 S_{N1}^* + I_1^* S_{N1}) \end{aligned} \quad (12)$$

至此,得到了系统各个部分的动态相量模型。

3 仿真

本节算例为图 3 所示系统。

3.1 STATCOM 运行在容性模式下

图 7 给出了 STATCOM 运行在容性模式下,系

统基于动态相量模型和 EMT 模型仿真的结果。设向系统注入的无功功率为 100 var,即 $Q_{ref}=-100\text{ var}$ 。

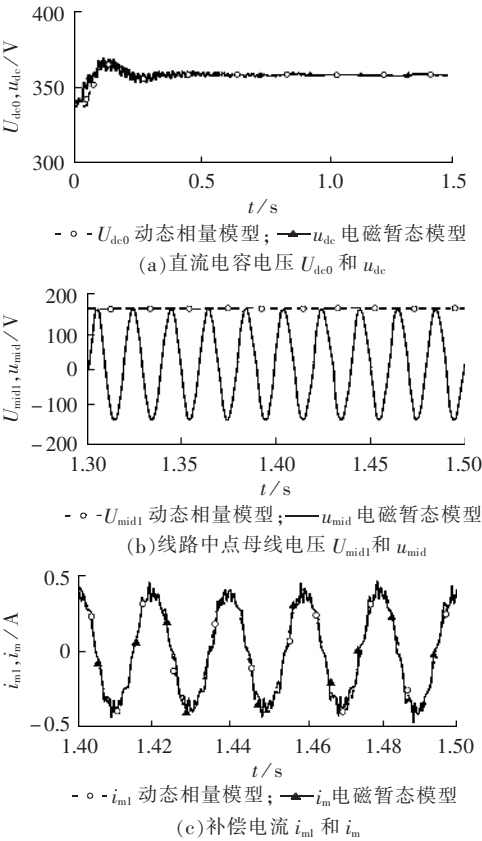


图 7 STATCOM 运行在容性模式下系统仿真结果
Fig.7 Simulative results with STATCOM in capacitive mode

图 7(a)描述的是直流侧电容电压, $U_{dc0}=U_{dcU0}+U_{dcL0}$ 为动态相量模型结果, $u_{dc}=u_{dcU}+u_{dcL}$ 为 EMT 模型仿真结果; (b)显示了 STATCOM 接入系统母线(输电线路中点)的电压,可以看出动态相量结果为电磁暂态结果的包络; (c)显示了 STATCOM 向系统注入的电流值,其中 i_{m1} 为 1 阶动态相量 I_{m1} 转换而来的基波正弦信号。可以看出,当 STATCOM 运行在容性模式下时,由动态相量模型得到的仿真结果可以很好地与电磁暂态结果相吻合。

3.2 STATCOM 运行状态发生跳变

本算例用来仿真系统动态变化时,动态相量模型的仿真结果。设在 $t=0.1\text{ s}$ 时,STATCOM 向系统注入的无功功率 Q_{ref} 从 300 var 跳变至 -300 var。图 8 给出了 STATCOM 在此扰动下,从容性运行模式跳变为感性运行模式时的动态响应。可看出动态相量模型的仿真结果也可以很好地跟踪系统过渡过程中的动态变化,与电磁暂态模型的仿真结果基本一致。

此外,运用 2 种方法进行仿真时,仿真时间上有很大差异。本例中,电磁暂态仿真步长取 0.05 ms,动态相量仿真步长取 1 ms,则电磁暂态模型仿真和动态相量仿真所需时间分别为 45.708 s 和 4.905 s。可以看出,动态相量法可节省计算时间,可望在大规模电力系统仿真中推广应用。

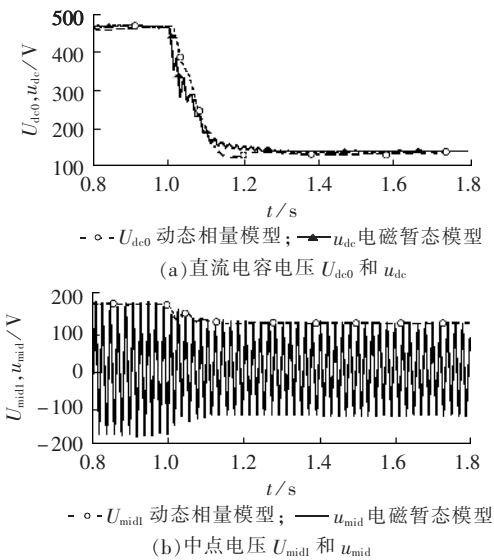


图 8 系统运行模式变化时的响应
Fig.8 Response to operation mode change

4 结论

本文首先介绍了基于 NPC 型三电平换流器的 STATCOM 的结构和原理,提出一种改进的 SVPWM 控制方法,用以解决换流器直流侧 2 个电容的电压不平衡问题。将动态相量理论应用于含 STATCOM 系统的建模和仿真,并与电磁暂态模型仿真结果对比。仿真结果说明文中建立的动态相量模型不仅可以正确描述系统稳态情况下的特性,也可以很好地跟踪系统的动态变化过程;且与 EMT 模型相比,动态相量模型可取较大仿真步长,从而节约计算时间,提高仿真速度;在仿真中如果合理地选择保留动态相量的阶数,则可用于系统发生不对称故障时的仿真。

参考文献:

[1] HINGORANI N G, GYUGYI L. Understanding FACTS — Concepts and technology of flexible AC transmission systems[M]. New York: Wiley - IEEE Press, 2001.
[2] OOI B T, JOOS G, HUANG X G. Operating principles of shunt STATCOM based on 3-level diode-clamped converters[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(4): 1504–1510.
[3] WU C M, LAU W H, CHUNG H. Generic analytical solution for calculating the harmonic characteristic of multi-level sinusoidal PWM inverter[A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C]. Orlando, USA; IEEE, 1999. 184–187.
[4] SHYU F S, LAI Y S. Virtual stage pulse-width modulation technique for multilevel inverter / converter[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2002, 17(3): 332–341.
[5] LI L, CZARKOWSKI D, LIU Y G, et al. Optimal surplus harmonic distribution in selected harmonic elimination PWM technique for multilevel inverters[A]. Proceedings

- of the 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [C]. San Jose, USA: IEEE, 1999. 589–594.
- [6] LOH P C, HOLMES D G. A new flux modulation technique for multilevel inverters [A]. *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems* [C]. Bali, Indonesia: IEEE, 2001. 396–402.
- [7] 吴学智, 刘亚东, 黄立培. 三电平电压型逆变器空间矢量调制算法的研究 [J]. *电工电能新技术*, 2002, 21(4): 16–19, 封四.
- WU Xue-zhi, LIU Ya-dong, HUANG Li-pei. Research on space vector modulation algorithm for three-level PWM voltage source inverter [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2002, 21(4): 16–19, cover four.
- [8] MONDAL S K, BOSE B K, OLESCHUK V, *et al.* Space vector pulse width modulation of three-level inverter extending operation into overmodulation region [J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2003, 18(2): 604–611.
- [9] SANDERS S R, NOWOROLSKI J M, LIU X Z, *et al.* Generalized averaging method for power conversion circuits [J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 1991, 6(2): 251–259.
- [10] STANKOVIC A M, MATAVELLI P, CALISKAN V, *et al.* Modeling and analysis of FACTS devices with dynamic phasors [A]. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting* [C]. Singapore: IEEE, 2000. 1440–1446.
- [11] STEFANNOV P C, STANKOVIC A M. Modeling of UPFC operation under unbalanced conditions with dynamic phasors [J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 2002, 17(2): 395–403.
- [12] STANKOVIC A M, SANDERS S R, AYDIN T. Dynamic phasors in modeling and analysis of unbalanced poly-phase AC machines [J]. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 2002, 17(1): 107–113.
- [13] MATAVELLI P, STANKOVIC A M, VERGHESE G C. SSR analysis with dynamic phasor model of thyristor-controlled series capacitor [J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1999, 14(1): 200–208.
- [14] NABAVI-NIAKI S A, IRAVANI M R. Steady-state and dynamic models of unified power flow controllers (UPFC) for power system studies [J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1996, 11(4): 1937–1943.
- [15] NABAE A, TAKAHASHI I, AKAGI H. A new neutral point clamping PWM inverter [J]. *IEEE Trans. on Industrial Application*, 1981, 17(5): 518–523.
- [16] 耿俊成, 刘文华, 袁志昌. 链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究: (一) 仿真和试验 [J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(16): 53–57, 86.
- GENG Jun-cheng, LIU Wen-hua, YUAN Zhi-chang. Research on the voltage unbalance of DC capacitors of cascade STATCOM. Part one: Simulations and experiments [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(16): 53–57, 86.
- [17] 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.
- GENG Jun-cheng, LIU Wen-hua, YUAN Zhi-chang. Research on the voltage unbalance of DC capacitors of cascade STATCOM. Part two: Mathematical model [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(17): 35–39.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

刘皓明(1977–), 男, 江苏东台人, 博士, 主要研究方向为电力系统动态分析与控制、电力市场 (E-mail: liuhaom@hotmail.com);

戚庆茹(1978–), 女, 河南洛阳人, 博士, 主要研究方向为 FACTS 在电力系统中的应用、HVDC、电力系统动态分析;

李 扬(1960–), 男, 江苏泰兴人, 教授, 主要研究方向为电力市场。

Modeling and simulation of STATCOM system based on 3-level NPC inverter using dynamic phasors

LIU Hao-ming^{1,2}, QI Qing-ru³, LI Yang¹, NI Yi-xin^{2,4}

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. THU-HKU Shenzhen Power System Research Institute, Shenzhen 518055, China;

3. North China Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100084, China;

4. The University of Hongkong, Hongkong, China)

Abstract: The structure and principle of STATCOM (STATIC synchronous COMPensator) based on a three-level NPC (Neutral Point Clamped) converter are introduced. An improved SVPWM (Space Vector PWM) control strategy is used to balance the voltages of two capacitors at converter DC side. The discrete dynamic process of converter is described through switching function. The dynamic model of STATCOM is established by using dynamic phasors method, and the dynamic models of source, load, transmission line are achieved as well. A test system with NPC three-level STATCOM is modeled with Simulink/Matlab, and the results verify its accuracy and effectiveness.

This project is supported by National Basic Research Special Fund (2004CB217900) and National Natural Science and Technology Fund (50337010).

Key words: NPC; three-level; STATCOM; SVPWM; dynamic phasors