

文章编号:1004-4736(2008)01-0087-04

三电平 STATCOM 的建模和仿真分析

文小玲^{1,2}, 尹项根²

(1. 武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:利用开关函数的概念,建立了三电平 STATCOM 的数学模型。在不考虑系统有功损耗的情况下,对三电平 STATCOM 在基频调制下的电压、电流进行了理论分析。同时利用所建数学模型,对 STATCOM 的瞬时有功与无功功率变化情况以及电压和电流波形进行了仿真分析。仿真结果表明所建模型及电压、电流理论分析方法是正确、有效的,可推广应用于其它类似结构的电力电子系统的分析中。

关键词:三电平 STATCOM; 开关函数; 数学模型; 基频调制; 仿真分析

中图分类号: TN 343

文献标识码: A

0 引言

随着现代科学技术的发展,一方面,电力电子设备的广泛应用使得供电系统中的各类非线性负载大量增加,导致电网中电能质量问题越来越严重。另一方面,生产自动化、数字化和集成化程度在不断提高,计算机系统、自动化流水线、机器人等敏感负荷的普遍应用使得电力用户对电能质量的要求越来越高。STATCOM 作为柔性交流输电系统(FACTS)装置之一,可用于调节无功,提高电力系统的稳定性;同时,它作为配电网中“用户电力”的一个重要设备^[1],可以在电网连接点处提供快速的电压和无功调节,既能改善配电网供电质量,提高线路的功率因数、减小线损,又可保护电网不受谐波、电压闪变和电压不对称之类的污染。

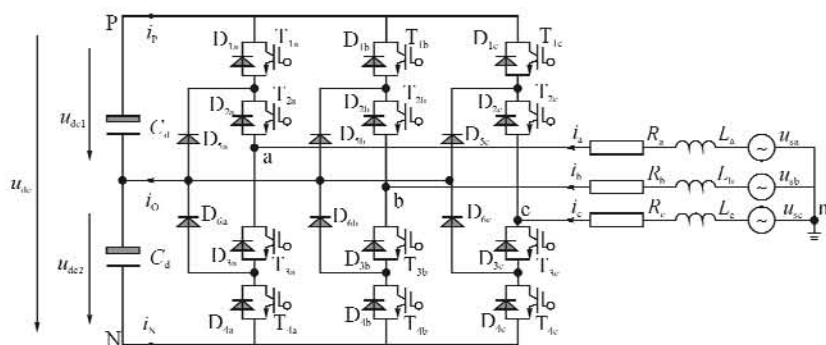
与传统两电平逆变器相比,虽然三电平逆变器主电路结构和控制较复杂,但它有其特点^[2]:1) 每个主管承受的关断电压仅为直流母线电压的一半,适用于高压大容量的功率应用领域;2) 能产生

5 个电平的线电压,在相同开关频率及控制方式下,其输出电压或电流中的谐波含量远小于传统的两电平逆变器。因此,它在中高压变频调速和电力系统无功补偿等领域的应用越来越广^[3~7]。

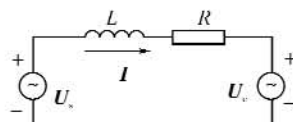
直接对大功率电力电子装置进行试验既费时又成本高,在研制时需建立装置的数学与仿真模型,对装置及其控制方法的有效性进行仿真分析。利用开关函数的概念,建立三电平 STATCOM 的数学模型,对其电压和电流进行理论和仿真分析。

1 三电平 STATCOM 的数学模型

三电平逆变器主电路结构如图 1(a) 所示,每相含有 4 个开关管 $T_1 \sim T_4$ 及相应的反并联二极管 $D_1 \sim D_4$ 和 2 个钳位二极管 D_5 、 D_6 。其中 T_1 、 T_4 相当于两电平逆变器中的上下互补开关管,而 T_2 (D_2)、 T_3 (D_3) 与 D_5 、 D_6 构成中点钳位电路。直流侧由 2 个电容 C_d 串联而成,其中点 O 与 D_5 、 D_6 中点相连,以实现中点钳位。当 $u_{dc1} = u_{dc2} = u_{dc}/2$ 时,主开关管 $T_1 \sim T_4$ 关断时承受的电压为 $u_{dc}/2$ 。



(a) 主电路



(b) 单相等效电路

图 1 三电平 STATCOM 主电路原理图

Fig. 1 The schematic diagram of the three-level STATCOM power circuit

收稿日期:2007-01-30

作者简介:文小玲(1962-),女,湖南湘乡人,副教授,博士研究生。研究方向:电力电子与电气传动。

STATCOM 的单相等效电路如图 1(b) 所示, 其中 U_s 为电网电压相量, U_c 为 STATCOM 的输出电压相量, R 和 L 是一相总的电阻和电感(包括逆变器和线路阻抗等)。通过控制 STATCOM 输出基波电压的有效值 U_c 和相位 δ 实现 STATCOM 与电网的功率交换。假设 STATCOM 处于无损耗的理想状态, 则它只与电网进行无功功率交换。此时 U_c 与 U_s 同相位, 通过改变 STATCOM 输出基波电压有效值 U_c 就可控制无功功率。若 U_c 大于电网电压有效值 U_s , 则 I 超前 $U_s 90^\circ$, STATCOM 输入容性无功电流; 若 U_c 小于 U_s , 则 I 滞后于 $U_s 90^\circ$, 呈感性, STATCOM 吸收感性无功功率。但实际系统由于存在器件开关损耗等必须从电网吸收有功功率以补偿内部损耗, 否则直流侧电容将放电释放能量导致直流电压下降。为保持直流电压恒定, U_c 与 U_s 间必须有相位差 δ , 其相应的相量图如图 2。改变 U_c 和 δ , I 的相位和大小也随之变化, STATCOM 与电网的无功交换也就得到了控制。

定义三相开关函数为

$$\begin{bmatrix} L_a \frac{di_a}{dt} \\ L_b \frac{di_b}{dt} \\ L_c \frac{di_c}{dt} \\ C_d \frac{du_{dc1}}{dt} \\ C_d \frac{du_{dc2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a & 0 & 0 & -\left(S_{1a} - \frac{S_{1a1} + S_{1b1} + S_{1c1}}{3}\right) & \left(S_{3a} - \frac{S_{3a1} + S_{3b1} + S_{3c1}}{3}\right) \\ 0 & -R_b & 0 & -\left(S_{1b} - \frac{S_{1a1} + S_{1b1} + S_{1c1}}{3}\right) & \left(S_{3b} - \frac{S_{3a1} + S_{3b1} + S_{3c1}}{3}\right) \\ 0 & 0 & -R_c & -\left(S_{1c} - \frac{S_{1a1} + S_{1b1} + S_{1c1}}{3}\right) & \left(S_{3c} - \frac{S_{3a1} + S_{3b1} + S_{3c1}}{3}\right) \\ S_{1a} & S_{1b} & S_{1c} & 0 & 0 \\ -S_{3a} & -S_{3b} & -S_{3c} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_{dc1} \\ u_{dc2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 电压电流波形分析

2.1 电压谐波分析

设三电平 STATCOM 采用基频调制 (FFM) 方式, 其输出相、线电压 u_{ao} 、 u_{ab} 波形如图 3 所示。

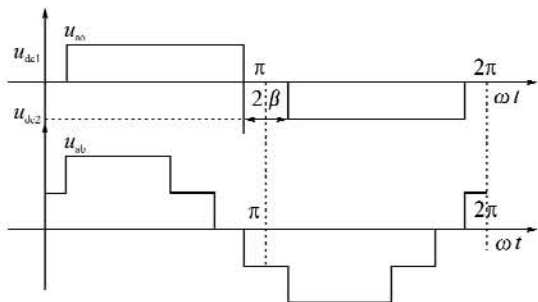


图 3 三电平 STATCOM 输出相电压和线电压波形

Fig. 3 Phase-to-phase voltage waveform and phase to neutral voltage waveform

在电容电压 $u_{dc1} = u_{dc2} = E$ 的条件下, 将图 3 中的 u_{ab} 波形按傅立叶级数展开可得线电压基波和

$$S_i = \begin{cases} +1 & T_{1i}, T_{2i} \text{ 导通, } T_{3i}, T_{4i} \text{ 截止} \\ 0 & T_{2i}, T_{3i} \text{ 导通, } T_{1i}, T_{4i} \text{ 截止} \\ -1 & T_{3i}, T_{4i} \text{ 导通, } T_{1i}, T_{2i} \text{ 截止} \end{cases} \quad (1)$$

$i = a, b, c$

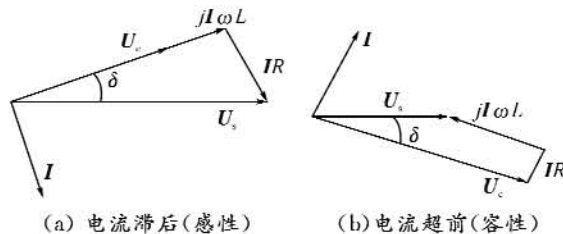


图 2 STATCOM 的电压相量图

Fig. 2 The voltage phasor diagram of STATCOM

将开关函数 S_i 进一步分解为三个开关函数 S_{1i} 、 S_{2i} 、 S_{3i} , 其中 $i = a, b, c$ 使它们满足以下条件:

若 $S_i = 1$, 则 $S_{1i} = 1, S_{2i} = 0, S_{3i} = 0$;

若 $S_i = 0$, 则 $S_{1i} = 0, S_{2i} = 1, S_{3i} = 0$;

若 $S_i = -1$, 则 $S_{1i} = 0, S_{2i} = 0, S_{3i} = 1$;

$$S_{1i} + S_{2i} + S_{3i} = 1, i = a, b, c \quad (2)$$

根据图 1 和开关函数的定义可推得三电平 STATCOM 在 ABC 三相坐标系下的数学模型为

各次谐波幅值表达式为

$$U_k = \frac{8E}{\sqrt{3}k\pi} \left[1 + \cos\left(k \cdot \frac{\pi}{3}\right) \right] \cos(k\beta) \quad k = 6N \pm 1, \quad N = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

令 $\eta = \sqrt{\sum U_k^2 / U_1}$ 和 N 分别取 0, 1, 2, 3, ..., 25, 让 β 在 $0^\circ \sim 25^\circ$ 之间变化, 可得 η 随 β 的变化曲线如图 4 所示。当 $\beta = 15.18^\circ$ 时, 电压谐波含量最小, $\eta = 16.5027\%$, 而当 $\beta = 15^\circ$ 时, $\eta = 16.5075\%$, 可见二者的电压谐波总畸变率相差不大。

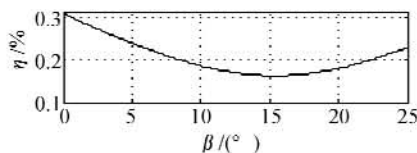


图 4 η 随 β 的变化曲线

Fig. 4 The variation of η in β

2.2 三相交流电流

设电网电压为三相正弦波, 且忽略 STATCOM

的有功损耗,若 $R_a=R_b=R_c=0$,可推得三相电流表达式.其前半周期内($0 \leq \omega t \leq \pi$)A相电流表达式为

$$i_a(\omega t) = \begin{cases} -\frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t) + \frac{4\pi E}{9\omega L} - \frac{2E\beta}{3\omega L} & 0 \leq \omega t \leq \beta \\ -\frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t) - \frac{2E}{3L} + \frac{4\pi E}{9\omega L} & \beta \leq \omega t \leq \pi/3 - \beta \\ -\frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t) - \frac{E}{L} + \frac{5\pi E}{9\omega L} - \frac{E\beta}{3\omega L} & \pi/3 - \beta \leq \omega t \leq \pi/3 + \beta \\ -\frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t) - \frac{4E}{3L} + \frac{2\pi E}{2\omega L} & \pi/3 + \beta \leq \omega t \leq 2\pi/3 - \beta \\ -\frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t) - \frac{E}{L} + \frac{4\pi E}{9\omega L} + \frac{E\beta}{3\omega L} & 2\pi/3 - \beta \leq \omega t \leq 2\pi/3 + \beta \\ -\frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t) - \frac{2E}{3L} + \frac{2\pi E}{9\omega L} & 2\pi/3 + \beta \leq \omega t \leq \pi - \beta \\ -\frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t) - \frac{4\pi E}{9\omega L} + \frac{2E\beta}{3\omega L} & \pi - \beta \leq \omega t \leq \pi \end{cases} \quad (5)$$

由于后半周期内($\pi \leq \omega t \leq 2\pi$)的电流波形与前半周期内的波形关于横轴镜像对称,因此在式(5)的基础上取 $i_s(\omega t) = -i_s(\omega t - \pi)$ 即得后半周期内的电流表达式.

2.3 直流侧电流

直流侧电流以3倍于基波的频率交变,根据图1并利用三相电流可按式(6)~(8)求得直流侧的电流表达式.

$$i_p(\omega t) = C_d \frac{du_{dc1}}{dt} = \begin{cases} i_c(\omega t) & 0 \leq \omega t \leq \beta \\ i_a(\omega t) + i_c(\omega t) & \beta \leq \omega t \leq \pi/3 \\ i_s(\omega t) & \pi/3 \leq \omega t \leq \pi/3 + \beta \\ i_a(\omega t) & \pi/3 + \beta \leq \omega t \leq 2\pi/3 \end{cases} \quad (6)$$

$$i_0(\omega t) = \begin{cases} i_a(\omega t) & 0 \leq \omega t \leq \beta \\ 0 & \beta \leq \omega t \leq \pi/3 \\ i_c(\omega t) & \pi/3 \leq \omega t \leq \pi/3 + \beta \\ 0 & \pi/3 + \beta \leq \omega t \leq 2\pi/3 \end{cases} \quad (7)$$

$$i_N(\omega t) = C_d \frac{du_{dc2}}{dt} = -[i_p(\omega t) + i_0(\omega t)] \quad (8)$$

2.4 直流侧电压

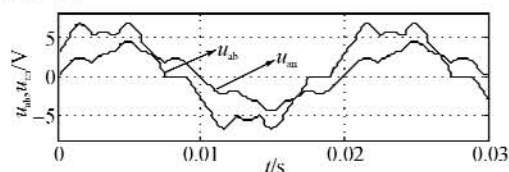
假设直流侧电容为无限大,则可认为其电容电压保持为某个常数不变.实际上电容是有限的,因此直流侧电容电压中存在脉动量,其大小与电容电流和电容值有关.由 $u_{dc1}(t) = \frac{1}{C_d} \int_{t_1}^t i_p(t) dt + U_{01}$ 和 $u_{dc2}(t) = -\frac{1}{C_d} \int_{t_1}^t i_N(t) dt + U_{02}$ 可推得它们的表达式(由于太长故略去).设 $\beta = \pi/12$,由 $E = \frac{3\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{dc1}(t) dt$ 和 $E = \frac{3\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{dc2}(t) dt$ 得

$$U_{01} = U_{02} = -0.00836 \frac{U_m}{\omega^2 LC} + 0.00761 \frac{\pi^2 E}{\omega^2 LC} + E \quad (9)$$

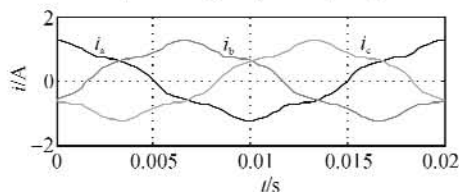
上述分析基于三电平 STATCOM 本身无损耗,只与电网进行无功功率的交换.但实际上,由于开关器件存在开关损耗等原因使得 STATCOM 在运行过程中会消耗有功功率.通过控制电网电压与 STATCOM 输出电压基波分量相位角 δ 的大小可达到补偿 STATCOM 有功损耗的目的.

3 仿真结果及分析

为验证模型的有效性和上述理论分析的正确性,利用三电平 STATCOM 的数学模型式(3)对电压和电流进行了仿真分析.仿真条件为^[8]:交流侧三相电网电压对称,其中 $u_{sa} = U_m \sin(\omega t)$, $U_m = 2.5$ V(输入超前电流时);系统采用基频调制方式;仿真参数为 $R_a=R_b=R_c=0$, $L_a=L_b=L_c=3$ mH, $\beta = \pi/12$, $C_d = 250$ μ F.图5为 STATCOM 的交流侧电压和电流波形;图6为 STATCOM 的直流侧电流和电压波形;图7为瞬时无功和有功功率波形.



(a) 相电压 u_m 、线电压 u_{ab} 波形



(b) 三相电流波形

图5 三电平 STATCOM 的交流侧电压电流波形

Fig. 5 The AC current and voltage waveforms of the three-level STATCOM

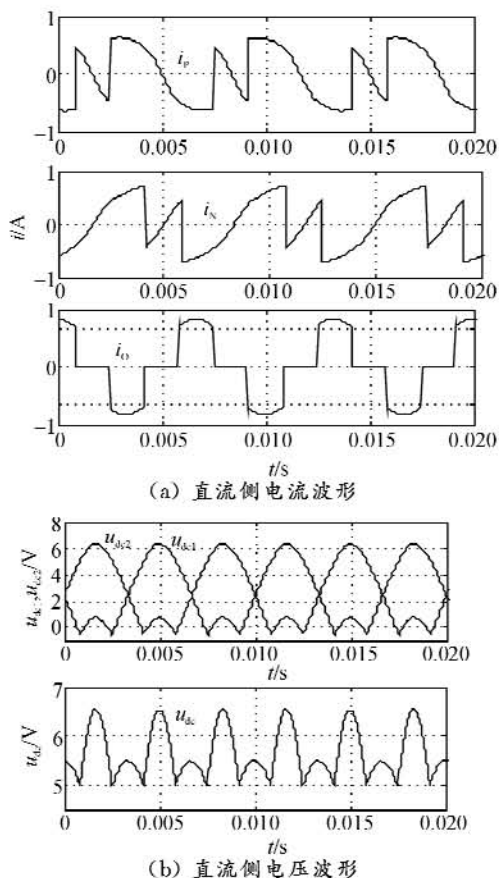


图 6 三电平 STATCOM 的直流侧电压电流波形

Fig. 6 The DC current and voltage waveforms of the three-level STATCOM

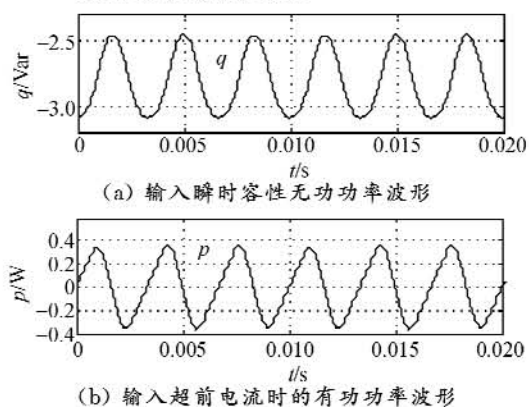


图 7 三电平 STATCOM 的瞬时无功和有功功率波形

Fig. 7 The active and reactive power waveforms of the three-level STATCOM

分析上述仿真结果可知:

(1) 在电容为有限值的情况下,当忽略 STATCOM 的损耗时,直流侧电容电压 u_{dc1} 、 u_{dc2} 和 u_{dc} 在平均值上下波动,其中 u_{dc1} 、 u_{dc2} 的交变频率为电源电压基波频率的三倍, u_{dc} 的交变频率为电源电压基波频率的六倍.直流侧电流以三倍于电源电压基波的交变频率变化;瞬时有功和无功功率以六倍于电源电压基波的交变频率变化,有功电流的平均值近似为零;输入容性无功时无功功率为负,同样可以仿真得出当输入感性无功时

无功功率为正.

(2) 在电容为有限值的情况下,当考虑 STATCOM 的损耗时,例如若 $R_s = R_b = R_c = 0.047 \Omega$,当 $U_m = 2.5 \text{ V}$ 时,采用有功补偿控制,控制 δ 为 1.19° ,可得到基本相同的仿真结果.但值得注意的是,在实际的大容量 STATCOM 装置中损耗等效电阻不再是常数,它会随着 STATCOM 工况的不同而变化,这时应随着等效电阻的变化实时改变 δ ,从而改变控制器的输出,以补偿装置的有功损耗,可采用直流侧电容电压闭环控制方式.

4 结 语

以上建立了三电平 STATCOM 基于开关函数的数学模型,在不考虑系统有功损耗的前提下,对其电压和电流进行了理论分析,给出了相应的表达式.并且利用所建数学模型,针对系统有损耗和无损耗两种情况进行了仿真研究.仿真结果表明,所建模型及电压、电流理论分析方法和结果是正确、有效的,在类似结构的电力电子系统的理论分析与仿真研究中具有一定的实用价值.

参考文献:

- [1] Hingorani N G. Introducing custom power [J]. IEEE Spectrum, 1995, 32(6): 41-48.
- [2] 詹长江,秦荃华,韩英铎,等.三电平脉宽调制高频整流器系统数学模型及仿真分析[J].中国电机工程学报, 1999, 19(7): 45-48.
- [3] Ekanayake J B, Jenkins N. A three-level advanced static VAR compensator [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(1): 540-545.
- [4] Shen J, Butterworth N. Analysis and design of a three-level PWM converter system for railway traction applications [J]. IEE Proc - Electr Power Appl, 1997, 144(5): 357-371.
- [5] 谢小荣,严干贵,陈远华.三电平 PWM 变频控制系统的 MATLAB 仿真平台 [J]. 电网技术, 2003, 27(9): 18-22.
- [6] 王庆红,胡国根.统一潮流控制器的 MATLAB 仿真建模及分析[J]. 电网技术, 2000, 24(9): 22-25.
- [7] Trainer D R, Tcmakoon S B, Morrison R E. Analysis of GTO-based static VAR compensators [J]. IEE Proc Electr Power Appl, 1994, 141(6): 293-302.
- [8] Ricardo J Davalos, Rcmircz J M, Ruben Tapia. Multi-step static VAR compensators analysis [A]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting [C]. USA: Chicago IL, 2002, 1451-1456.

(下转第 107 页)

得了好成绩。



图6 BOTNIA 智能足球机器人原形

Fig. 6 Prototype of BOTNIA RoboCup robots

参考文献:

- [1] 丁化成, 耿德根, 李君凯. AVR 单片机应用设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [2] 王金波, 姜 华. 基于 LM629 芯片的位置伺服系统 [J]. 煤矿机械, 2003, (10): 63-65.
- [3] National Semiconductor Corporation. LM628/629 User Guide[EB/OL]. Application note 706, 1993-10, <http://www.national.com/pf/LM/LM629.html>.

Motion control system design and implementation based on LM629 for Small-Size RoboCup robots

WANG Wei

(Department of Communication Engineering, Helsinki University of Technology, Helsinki 02150, Finland)

Abstract: The motion control system of F-180 Small-Size RoboCup mobile robots have been designed and implemented based on Micro controller ATmega8535 and Motion controller LM629. The motion control system based on LM629 makes the hardware design of robot control system simple and support real time computational task with high accuracy, high performance. This paper describes the operation theory of LM629 and the implementation of motion control system, in the end also introduces the method of relevant software design.

Key words: Small-Size RoboCup robots; motion controller; motor controller; LM629; ATmega8535

本文编辑:陈晓革



(上接第 90 页)

The modeling and simulation analysis of the three-level STATCOM

WEN Xiao-ling^{1, 2}, YIN Xiang-gen²

(1. School of Electrical and Information, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, the mathematical model of the three-level STATCOM based on the switching function is presented. On the assumption that STATCOM has no active power losses, the current and voltage of the three-level STATCOM under the fundamental frequency modulation(FFM) are analyzed using the theoretical analysis method. Meanwhile, the current, voltage, active power, and reactive power waveforms are simulated by means of the proposed mathematical model. Simulation results verify the validity of the system model and the theoretical method, which can be extended to the similar power electronic system.

Key words: three level STATCOM; switching function; mathematical model; FFM; simulation analysis

本文编辑:陈晓革