

研
究
开
发基于开关函数的电压型四象限
变流器及控制系统仿真陶 艳¹, 陈特放¹, 刘可安²(1. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075 ;
2. 株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)

作者简介: 陶 艳 (1980-), 女, 工程师, 现从事电动车组牵引传动系统与网络控制系统的设计及理论研究。

摘 要: 建立了基于开关函数的电压型四象限变流器数学模型, 结合瞬态电流控制, 搭建了整个基于开关函数的四象限变流器及控制系统的仿真模型, 并在MATLAB环境下进行了稳态及动态的仿真, 验证了瞬态电流控制是一种较好的控制策略。

关键词: 开关函数; 四象限变流器; 控制系统; 瞬态电流; 仿真**中图分类号:** TM46**文献标识码:** A**文章编号:** 1000-128X(2011)03-0037-03Simulation of Voltage-source Four-quadrant Converter
and It's Control System Based on Switching FunctionTAO Yan¹, CHEN Te-fang¹, LIU Ke-an²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China ;

2. Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The mathematic model of voltage-source four-quadrant converter was built based on switching function, and with the transient current control method, the simulating model of converter and control system was established. Steady-state and dynamic simulation in MATLAB was carried out, validating the effect of control scheme.

Key words: switching functions; four-quadrant converter; control system; transient current; simulation

0 引言

最近几年来, 开关函数广泛地用于各种电力电子技术的分析。用开关函数的方法建立变流器的仿真模型, 不但能有效简化仿真模型, 缩短仿真步长, 还可使得整个模型能较快收敛, 并方便扩展, 从而使设计人员在其基础上能快速地验证各种控制策略。

本文基于开关函数对电压型四象限变流器及控制系统建模并进行仿真。

1 四象限变流器仿真方法

四象限变流器的作用是保持交流侧功率因数接近1, 消除谐波, 使电源电流波形接近于正弦波, 提高电网的经济效益, 减轻对环境的电磁干扰, 并且维持中间直流环节电压恒定, 方便实现再生制动。PWM变流器能有效抑制注入交流侧的谐波, 实现交流侧单位功率因数和能量双向流动, 并且系统具有很好的动态特性。

单相电压型二电平PWM变流器主电路如图1所示。该系统采用了可逆PWM变流器, 该变流器同时具备AC/DC变流特性(整流情况下)以及DC/AC变流特性(有源逆变情况下)。其拓扑结构为单相两桥臂, 每个桥臂的功率开关器件并联续流二极管。图1中, U_N 为牵引变压器各二次侧绕组电压, L_N 与 R_N 分别为折算到牵引变压器各二次侧绕组的漏感和电阻, VT1~VT4为开关器件, VD1~VD4为续流二极管, L2和C2为二次谐振电感和电容, C_d 为支撑电容。

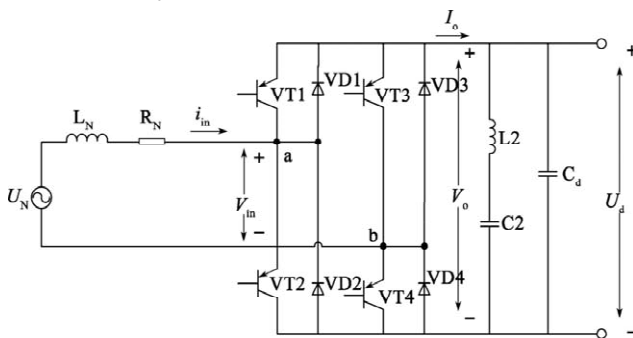
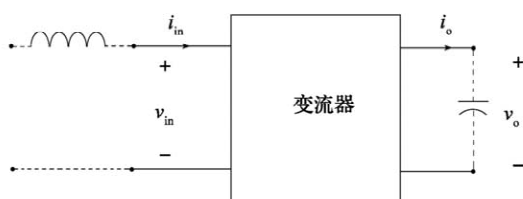


图 1 单相 PWM 变流器主电路

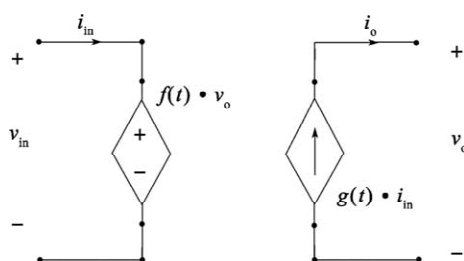
收稿日期: 2011-03-19

为了简化结构,假设所有功率器件为理想开关,开关动作瞬时完成,忽略开关过程所产生的压降和损耗。假设每个桥臂上的理想开关函数为 S_i ,定义为:

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{上管开通, 下管关断} \\ 0 & \text{上管关断, 下管开通} \end{cases} \quad (i = a, b)$$



(a) 单相 PWM 变流器电路



(b) 单相 PWM 变流器的等效电路

图 2 单相 PWM 变流器等效电路

使用开关函数表示变流器电流间的关系及电压间的关系,如图 2(a)所示,一部分是输入电压 $v_{in}(t)$ 及电流 $i_{in}(t)$,另一部分是输出电压 $v_o(t)$ 及电流 $i_o(t)$ 。

根据图2分析可知,输入和输出之间存在对应关系:

$$v_{in}(t) = f(t) \times v_o(t)$$

$$i_o(t) = q(t) \times i_{in}(t)$$

其中, $f(t)$, $g(t)$ 为开关相关的函数。变流器电路可以等效为由一个受控电压源和受控电流源组成的电路, 如图 2(b) 所示。

单相PWM变流器的输入端电压 $v_{in}(t)$ 取值包括 $v_o, 0, -v_o$ 3种情况, 根据图1电路分析可知, $v_{in}(t)$ 与两相的开关函数 S_i 对应关系分别为:

$$v_{\text{in}} = \begin{cases} v_o & S_1 S_2 = 10 \\ 0 & S_1 S_2 = 00, \text{ 或者 } S_1 S_2 = 11 \\ -v_o & S_1 S_2 = 01 \end{cases}$$

由此可推出, $f(t)=S_1-S_2$ 。同理可得 $i_o(t)$ 与两相的开关函数对应关系分别为:

$$v_{\text{in}} = \begin{cases} v_0 & S_1 S_2 = 10 \\ 0 & S_1 S_2 = 00, \text{ 或者 } S_1 S_2 = 11 \\ -v_0 & S_1 S_2 = 01 \end{cases}$$

因此可得, $q(t)=S_1-S_2$ 。

2 四象限变流器瞬态电流控制仿真

对单相PWM变流器进行整流实时控制,采用瞬时电流法。控制原理为:根据变流器交流侧和直流侧功

率平衡,通过PI调节器控制直流侧中间电压保持稳定。为了改善该调节器的动态响应性能,通过中间电流来计算交流侧的电流给定值,使用电流PI调节器最后确定调制电压信号。该控制方案具体实现原理见图3。

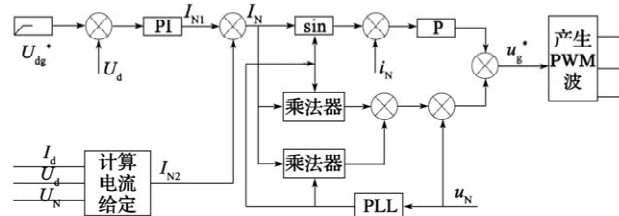


图3 瞬时电流控制方案具体实现原理框图

由图3分析可知：

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{N1} = K_p(U_{dg} - U_d) + 1/T_i \int (U_{dg} - U_d) dt \\ I_{N2} = I_d U_d / U_N \\ I_N = I_{N1} + I_{N2} \\ u_s(t) = u_N(t) - (I_N R_N \sin \omega t + I_N \omega L_N \cos \omega t) - \\ K[I_N \sin \omega t - i_N(t)] \end{array} \right.$$

式中： K_p 和 T_i 为PI调节器的参数， K 是比例放大系数； I_d 、 U_d 分别为中间直流环节电流和电压； $u_N(t)$ 和 U_N 分别为牵引变压器二次测电压和电压有效值； R_N 为变压器二次侧漏电阻； L_N 为网侧电感； U_{dg} 为中间直流环节电压给定值； $I_N(t)$ 为变压器二次测电流。

通过搭建MATLAB/Simulink模块实现上式,可得出瞬态电流控制器的仿真模型如图4所示。

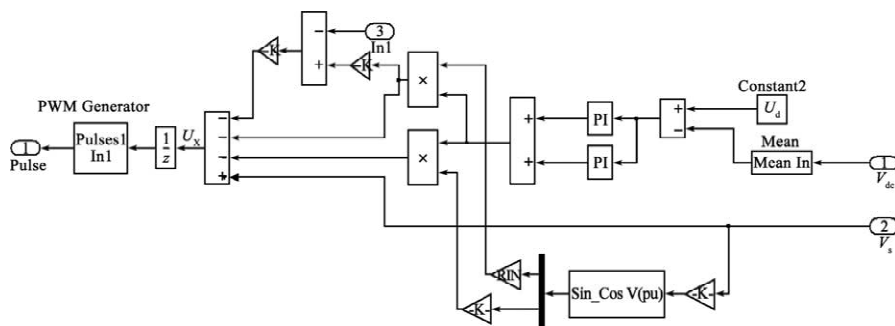


图 4 瞬态电流控制器仿真模型

3 仿真结果

对上述建模方法搭建的模型进行仿真, 主电路参数为: $U_N=970\text{ V}$; 变压器二次侧漏电阻 $R_N=0.01\text{ }\Omega$; 网侧电感 $L_N=0.82\text{ mH}$, 中间直流环节电压 $U_d=1\text{ 800 V}$ 。搭建的基于开关函数的电压型四象限变流器及控制系统仿真模型如图5。其中虚线框部分为基于开关函数的电压型四象限变流器模型, 4QS control为瞬态电流控制器仿真模型。

图6、图7为变流器系统稳态运行时的仿真结果。图6为负载电流为500 A时的仿真图,图6(a)为中间电压,图6(b)为变压器交流侧电压及电流。图7为负载电流为200 A时的仿真图。

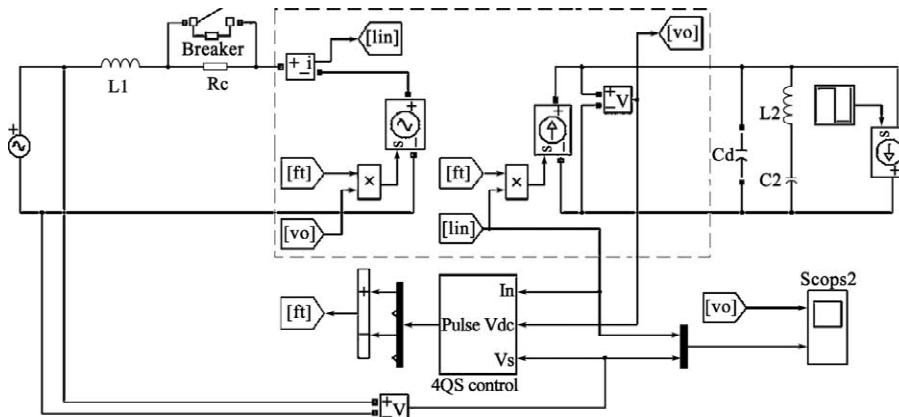


图5 基于开关函数的电压型四象限变流器及控制系统仿真模型

由图6、图7可见, 变流器系统稳态运行时中间电压稳定, 波动范围很小, 变压器交流侧电压和电流基本同相位。但是在小负载的情况下, 功率因数相对较低, 因为控制算法只能保证变压器在额定情况下的功率因数大于0.98。

图8、图9为变流器系统在动态情况下的仿真波形。

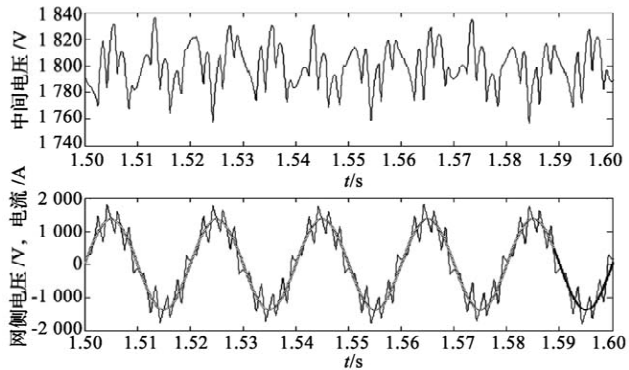


图6 变流器系统大负载时的仿真结果

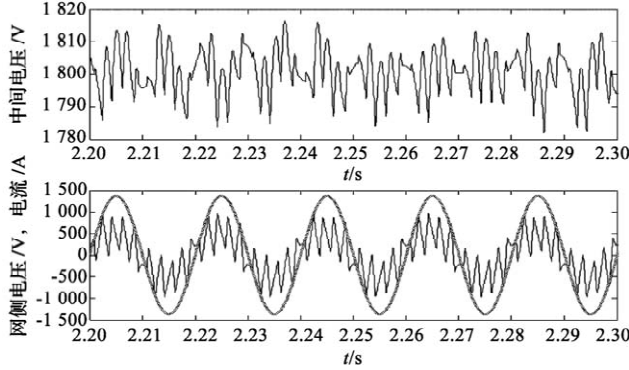


图7 变流器系统小负载时的仿真结果

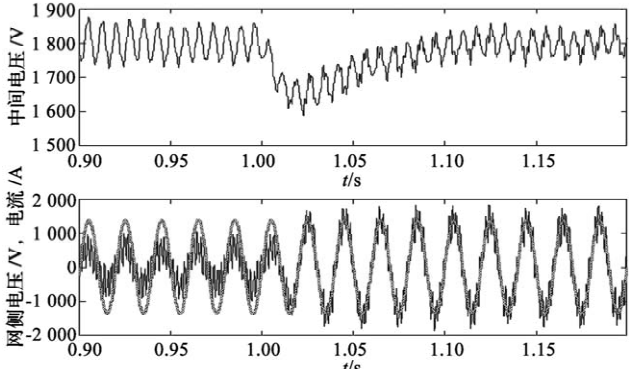


图8 变流器系统小负载切换到大负载(突投)动态过程的仿真结果

图8为变流器系统从小负载切换到大负载时的动态响应过程。从图8可见, 变压器交流侧电流变大, 直流电压开始降低, 通过控制器调节, 逐渐恢复到1800 V。

图9为变流器系统从大负载切换到小负载时的动态响应过程。从图9可见, 变压器交流侧电流变小, 直流电压开始升高, 通过控制器调节, 逐渐恢复。

图10为变流器系统从馈电切换到供电时的动态响应过程。从图10可见, 变压器交流侧电流相位逐渐变化, 由原来的反相运行变为同相, 直流电压开始降低, 通过控制器调节, 逐渐恢复。

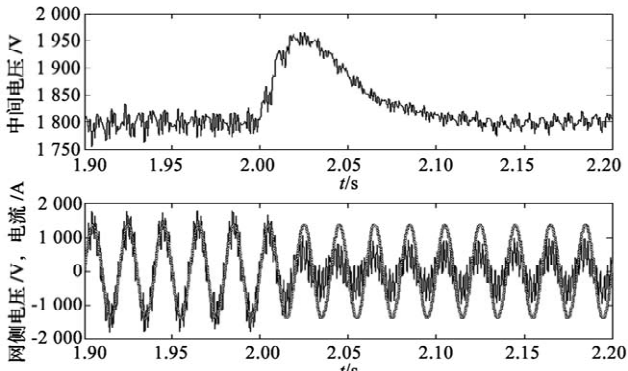


图9 变流器系统大负载切换到小负载(突切)动态过程的仿真结果

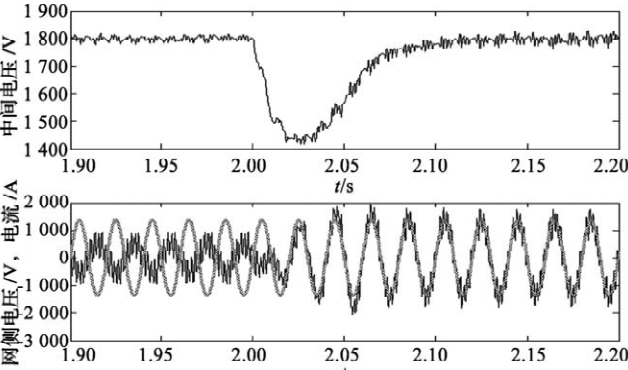


图10 变流器系统由馈电到供电动态过程的仿真结果

4 结语

综上所述, 基于开关函数能够简单有效地建立四象限变流器及控制系统的仿真模型。通过稳态及动态情况下对整个系统的仿真, 也验证了瞬态电流控制是一种较好的控制策略。因此, 本文提出的基于开关函数的四象限变流器及控制系统的仿真方法, 对于控制策略的设计、整个系统的静态性能的分析都具有重要的指导作用。

参考文献:

[1] Jin H, Member. IEEE, Behavior-Mode (下转第43页)

```
rolling stock spring,SLDPRT"));
//定义文件名, 括号中为文件路径
CComPtr<IModelDoc2>m_iModelDoc;
//定义ModelDoc对象
m_iSldWorks_dlg->OpenDoc6(fileName,swDocPART,
Options,NULL,&Errors,&Warnings, &m_iModelDoc);
//打开文件
```

用户根据生产需要进行弹簧的选型设计, 基于 Visual C++ 中的条件判断及语句循环实现。优化得到弹簧参数后的操作与由用户直接输入弹簧参数生成模型大致相同, 其主要代码为:

```
CComPtr<IConfigurationManager>
pConfigurationManager;
//定义配置管理器对象
m_iModelDoc->get_ConfigurationManager
(&pConfigurationManager);
//获得当前文件的配置管理器
CStringa0="D1@circle";
//定义参数名
.....
paramNames[0]=a0.AllocSysString();
//将参数名CString类型变量转变为BSTR类型
.....
CStringb0=m_middia.GetBuffer(0);
//获得用户输入的参数值
.....
paramValues[0]=b0.AllocSysString();
//将参数名CString类型变量转变为BSTR类型
.....
pConfigurationManager->ISetConfigurationParams
(Name, paramCount, paramNames, paramValues, &retval);
//设置配置中的各参数值
```

```
m_iModelDoc->ViewZoomtofit();
//调整视图为全屏显示
pConfigurationManager.Release();
//释放配置管理器
m_iModelDoc=NULL;
//释放ModelDoc对象
```

利用本文方法生成的弹簧三维模型如图3所示, 利用 SolidWorks 平台在其三维软件中可进一步生成弹簧的二维 AutoCAD 图纸, 便于施工生产。

5 结语

本文介绍了 SolidWorks 的二次开发工具 API 函数的构成与使用方法, 并通过面向对象的开发工具 Visual C++, 在 SolidWorks 平台下开发出了适用于铁道车辆悬挂系统的圆柱形螺旋压缩圆弹簧结构优化和特性参数分析模块, 实现了螺旋压缩圆弹簧的参数化设计。用户只需输入弹簧三维设计的初始边界条件、工作载荷、安装空间、高度变化范围即可自动完成弹簧设计, 其对提高机车车辆悬挂系统的设计效率和质量具有较大的工程意义。

参考文献:

- [1] 严隽豪, 傅茂海. 车辆工程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007: 58-71.
- [2] 叶炜威, 余才佳. SolidWorks 2006 实体建模与二次开发教程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] 王文波, 涂海宁, 熊君星. SolidWorks 2008 二次开发基础与实例 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [4] 侯俊杰. 深入浅出 MFC [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [5] 曾宪茹, 肖世德. 铁道车辆专用螺旋压缩圆弹簧的计算机辅助设计 [J]. 机械, 2004, 31(S1): 98-100.

(上接第39页)

- Simulation of Power Electronic Circuits [J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 1997, 12(3): 443-452.
- [2] 王挺泽. 1 000 V 交直交地面试验系统四象限变流器的主电路及控制电路 [J]. 机车电传动, 1993(6): 22-26.
 - [3] 刘子建, 桂武鸣. 电压型四象限变流器的计算机仿真 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2003, 26(1): 11-13.
 - [4] 宋文胜, 刘志敏, 冯晓云. 四象限变流器控制策略研究与仿真 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30(2): 34-37.

- [5] 邹仁. 四象限变流器瞬态电流控制的仿真研究 [J]. 机车电传动, 2003(6): 17-20.
- [6] 刁利军, 梅樱, 孙大南, 刘志刚. 基于简化开关函数的交-直-交变换器建模仿真 [J]. 电气应用, 2010(12): 32-35.
- [7] 康英. 单相两电平 PWM 整流器控制策略研究与仿真 [J]. 科技创新导报, 2010(26): 59-60.
- [8] 黄济荣. 电力牵引交流传动与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.