

三相平衡负荷电子模拟装置的研究与仿真

李守蓉, 田铭兴

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 设计了一种三相平衡负荷电子模拟装置。该装置采用双向 PWM 变流器为主电路结构, 通过有功功率和无功功率的解耦控制, 可以实现波动、含有谐波和双向流动的负荷的模拟。文章设计了控制系统, 并构建了基于 MATLAB 的仿真模型。通过仿真分析, 说明该负荷模拟装置的设计思路和方法是正确的。

关键词: 双向 PWM 变流器; 电流环; PI 控制; 软件仿真

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0012-04

Power Control of Electronic AC Load Simulator with Reversible Power Flow

LI Shou-rong, TIAN Ming-xing

(School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A three-phase balanced load electronic simulator is designed. The device takes dual-directional PWM inverter circuit as its main structure to achieve the simulation of the load with fluctuation, harmonic and dual-direction flow via decoupling control of active power and reactive power. The control system is designed, and a simulation model based on MATLAB is constructed. Simulation result verifies the correctness of the present simulator.

Key words: dual-directional PWM inverter; current loop; PI control; simulation

0 引言

某些用电负荷具有波动性、谐波含量高、功率双向流动等特点。研究这些特点对供电系统的影响很有意义。但是, 实际负荷种类繁多, 研究每种负荷对电网的影响很不经济也不现实, 需要设计一种具有上述特点的负荷模拟装置, 并藉此研究负荷和供电系统之间的相互作用。

国外对电子负荷装置的研究已经相当深刻, 文[1]中提出了电子模拟负荷装置的基本概念, 得出了该装置对供电系统的响应曲线; 文[2]中对单相电子模拟负荷装置进行研究分析, 实现了功率因数单位化, 电能反馈。笔者拟以双向 PWM 变流器为主电路结构^[1], 对一种三相平衡负荷电子模拟装置进行分析、设计和仿真研究。

1 三相平衡负荷电子模拟装置的拓扑结构

三相平衡负荷电子模拟装置的主电路采用能量

可以双向流动的双 PWM 变流器结构, 见图 1。PWM 变流器能够实现网侧电流为正弦波、网侧功率因数可调、电能双向传输和较快的动态控制响应等传统整流器较难实现的功能。该模拟电子负荷主要分为两个部分, 一是电压控制的 PWM 整流器, 将电网电压整流后得到所需的直流电压; 二是功率控制的 PWM 逆变器, 将直流电压逆变得到电网电压, 并且输出功率能够跟随给定功率。直流中间环节采用电容滤波, 逆变输出采用电感滤波。

2 控制方法

三相平衡负荷电子模拟装置采用双 PWM 变流器结构。以电压为控制目标的 PWM 整流器采用电流内环和电压外环的双闭环控制。其中, 电流内环实现网侧功率因数为 1, 整流输入电流正弦化; 电压外环实现整流输出电压恒定, 纹波系数小。以功率为控制目标的 PWM 逆变器采用电流闭环控制, 通过控制逆变器的输出电流的相位、幅值来控制输出功率, 从而模拟负荷和供电系统之间的能量双向流动。由

收稿日期: 2008-07-18; 修回日期: 2008-11-23

基金项目: 本课题受到甘肃省教育厅计划项目资助(0604B-08)。

作者简介: 田铭兴(1968), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

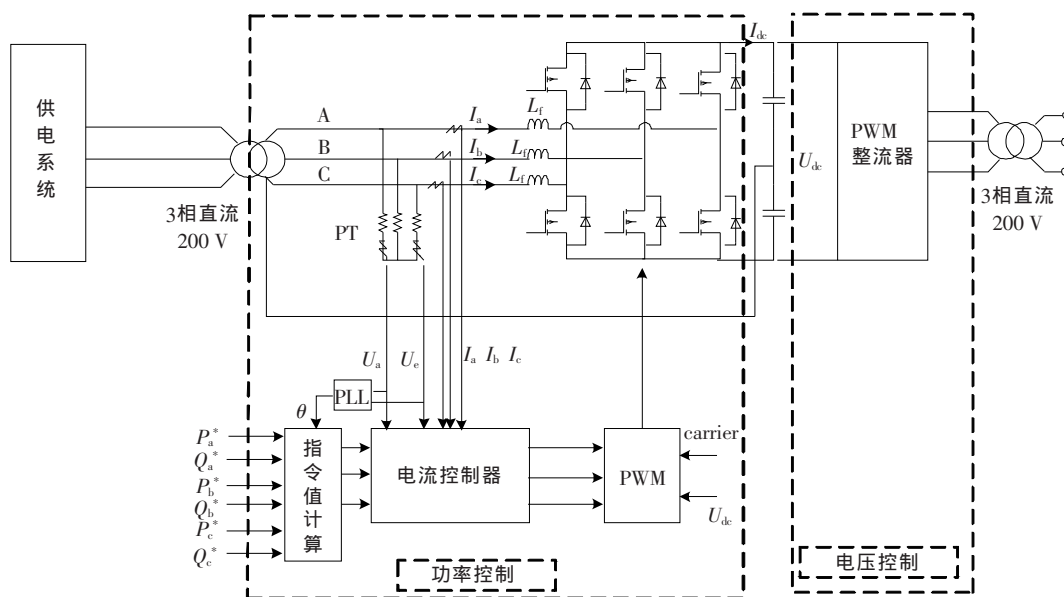


图1 三相平衡负荷电子模拟装置的主电路结构图

于实现能量双向流动的核心控制对象是逆变器,笔者文主要研究了逆变器的控制方法。

以功率为控制目标的PWM逆变器的控制目的是实现能量的双向流动,控制参数是电流。输出功率与输出电流之间的关系式为

$$i_n^* = \sqrt{2} \frac{P_n^*}{U} \sin(\omega t + \theta_n) - \sqrt{2} \frac{Q_n^*}{U} \cos(\omega t + \theta_n) \quad (1)$$

式(1)中, P, Q 为三相功率, U 为相电压有效值, θ 为初始相位差, n 为 a, b, c 三相相数。由式(1)可知,当给定了功率也就等于给定了电流。

逆变器的数学模型为

$$\begin{cases} C \frac{dU_{dc}}{dt} = -\frac{3}{2} (i_d s_d + i_q s_q) + i_L \\ L \frac{di_d}{dt} = \omega L i_q + U_{dc} s_d - R i_d - e_d \\ L \frac{di_q}{dt} = -\omega L i_d + U_{dc} s_q - R i_q - e_q \end{cases} \quad (2)$$

相应的逆变器控制模型见图2。图2中PI环是控制环节的核心部分。下面以 i_d 为例来说明电流PI调节器的设计^[3]。考虑到电流内环信号采样的延迟和PWM控制的小惯性特性,已解耦的 i_d 电流内环结构见图3。图3中, $K_{PWM}=1$, 为桥路PWM等效增益; T_s 为PWM开关周期; R 为线路阻抗; L 为输出电感; $K_{ip} \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i} = K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}$, $K_{il} = \frac{K_{ip}}{\tau_i}$ 。

3 仿真结果

系统主要的仿真参数见表1,仿真结构见图4。对搭建的系统进行仿真,图5~8为部分仿真结果。

(1)当 $t=0$ 时,指令功率设定为有功功率 $P=6$ kW,

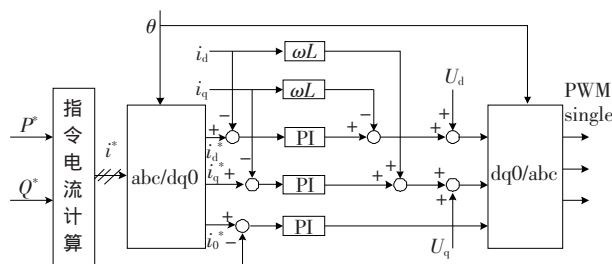


图2 逆变器电流闭环的控制结构图

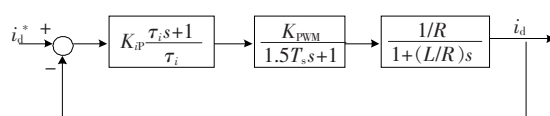


图3 电流环 i_d 的PI简化结构

表1 系统仿真所需的仿真参数

参数名称	参数数值
给定功率 S/W	6 000
电网电压有效值 U/V	200
电网频 f_0/Hz	60
逆变器输出侧电阻 R/Ω	0.05
逆变器输出侧电感 L/mH	4
开关频率 f_s/Hz	10 000
PI 参数 K_{ip}	1 333
PI 参数 K_{il}	1 666 700

无功功率为0,在 $t=0.025$ s 时, $P=-6$ kW,逆变器输出电压、电流以及功率波形见图5。从图5中可以看出,在 $t=0.025$ s 时,电流波形和电压波形由同相位变为反相位,同时有功功率也随着设定值的变化而变化,而无功功率保持为0不变。

(2)当 $t=0$ 时,指令功率设定为无功功率 $Q=6$ kvar,有功功率为0;在 $t=0.025$ s 时, $Q=-6$ kvar,逆变器输

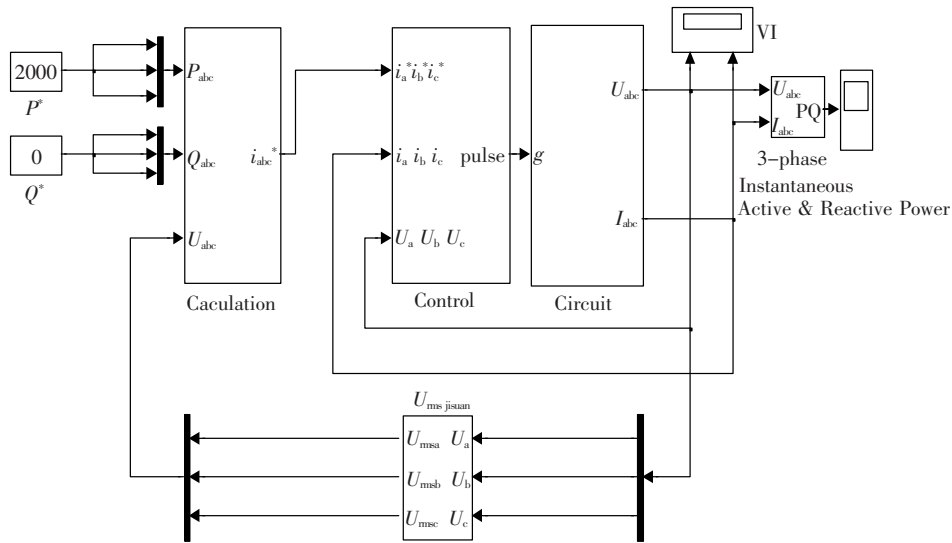


图4 系统仿真图

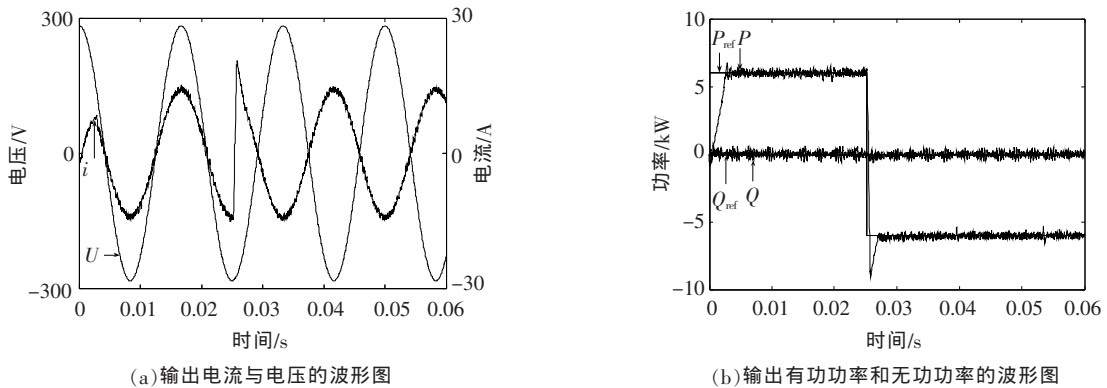


图5 有功给定突变时的响应

出电压、电流以及功率波形见图6。从图6可以看出,在 $t=0.025\text{ s}$ 时,电流波形与电压波形由超前变为滞后,同时无功功率也随着设定值的变化而变化,而有功功率保持为0不变。

(3)当 $t=0$ 时,指令功率设定为有功功率 $P=3\text{ kW}$,无功功率 $Q=-3\text{ kvar}$; $t=0.025\text{ s}$ 时, $P=-3\text{ kW}$; $t=0.040\text{ s}$ 时, $Q=2\text{ kvar}$ 。逆变器输出电压、电流以及功率波形见图7。从图7可看出,在 $t=0.025\text{ s}$ 时,电流波形发

生变化,动态过程比较短;在 $t=0.040\text{ s}$ 时,电流幅值发生变化,其相位也由超前状态变为滞后状态,同时有功功率和无功功率也随着设定值的变化而变化。

(4)当 $t=0$ 时,指令功率设定为有功功率 $P=3\sin(\omega t)$,无功功率 $Q=0$; $t=0.025\text{ s}$ 时, $P=3\sin(\omega t+\pi)$,逆变器输出电压、电流以及功率波形见图8。从图8可以看出,在 $t=0.025\text{ s}$ 时,电流波形和电压波形由同相位变为反相位,同时有功功率也随着设定值的变化

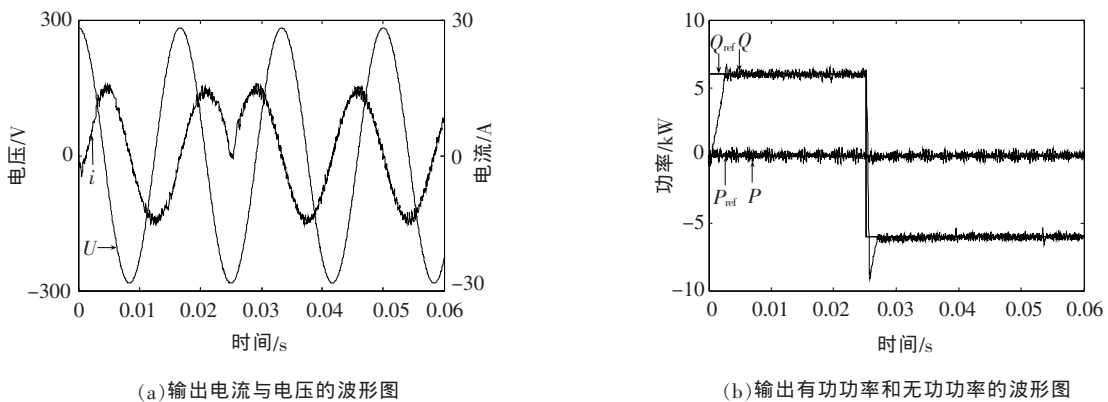


图6 无功给定突变时的响应

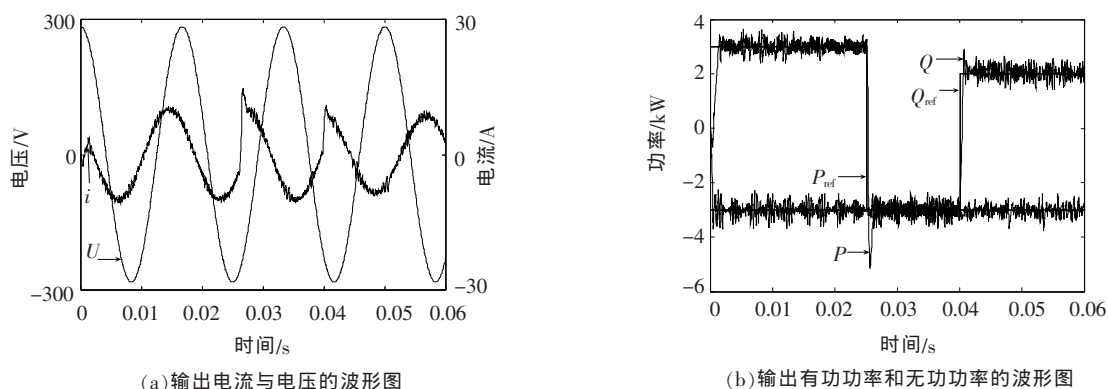


图7 有功和无功给定突变时的响应

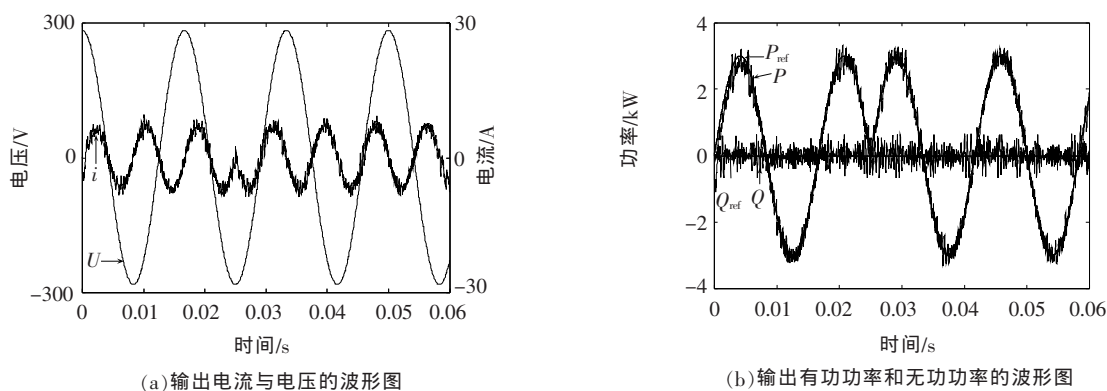


图8 有功给定突变时的响应

而变化,而无功功率保持为0不变。

从以上波形图可看出,实际电流和实际功率都很好跟踪了指令值,同时调节时间比较短,尽管超调量相对比较大,但是基本实现了能量的双向流动。

4 结语

设计了一种电子平衡负荷,并用软件仿真验证了该设计的可行性,该设计方法具有普遍性,为不平

衡负荷的实现提供了一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 李定安,伊瀬敏史.三相可逆不平衡负荷シミュレータの開発[Z].電気学会半導体電力変換研究会資料,2006.
- [2] 刘志刚,李宝昌,汪至中,等.电能反馈型电子负载的设计与实现[J].铁道学报,2001,23(3):27-30.
- [3] 张崇巍,张兴.PWM整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2003.

(上接第4页)

- [4] 黄道春,阮江军,文武,等.特高压交流输电线路电磁环境研究[J].电网技术,2007,31(1):6-11.
- [5] 郭雄.特高压输电的电磁环境研究[J].电力系统通信,2006,27(164):1-5.
- [6] 王小凤,周浩.我国1000kV特高压交流输电线路电磁环境的研究[J].环境科学与技术,2007,30(6):23-26.
- [7] CHARTIER V L, BLAIR D E. Effect of Bundle Orientation on Transmission Line Audible and Radio Noise[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1538-1544.
- [8] LUNDQUIST J, BOVERI A B. Results from AC Transmission Line Audible Noise Studies at the Anneberg EHV Test Station [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(1): 317-323.
- [9] IEEE Committee Report. A Comparison of Methods for Calculating Audible Noise of High Voltage Transmission Lines [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982 (101): 4090-4099.
- [10] OLSEN R G, STIMSON B. Predicting VHF/UHF Electromagnetic Noise from Corona on Power-line Conductors [J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 1988(30):13-22.
- [11] KOLCIO N, DIPLACIDO J, DIETRICH F M. Apple Grove 750 kV Project-two Year Statistical Analysis of Audible Noise from Conductors at 775 kV and Ambient Noise Data [J]. Ibid., 1977, 96(2):560-570.
- [12] PERRY D E, CHARTIER V L, REINER G L. BPA 1100 kV Transmission System Development Corona and Electric Field Studies [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979(98):1728-1738.