

文章编号:1005-0523(2012)06-0080-05

双向变流器控制策略的研究

曹 晖

(华东交通大学电气与电子工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:研究了一种能量双向流动的变流器。建立了双向变流器的电路模型,采用了双环PI控制方案,详细分析了控制器的选择和控制器参数的设计。搭建了Matlab仿真模型并仿真。最后进行了系统试验并给出了试验结果。实验结果表明系统稳定,且控制设计合理。

关键词:双向变流器;双环PI控制;电路模型;功率因数

中图分类号:TM464

文献标志码:A

双向变流器可以实现能量的双向流动,可以应用在许多使用电机的场合,如电力机车。电力机车在运行中需要频繁的起动和制动。目前,电机的电气制动方式有能耗制动、反接制动和回馈制动。前两种制动方式均需在电枢回路中串入耗能电阻,使制动能量以热能形式散失,这样造成了电能的极大浪费。相比之下,回馈制动能将电机制动的再生能量回馈到电网,对节能有很大价值。双向变流器的应用使能量回馈成为可能。

为了减小对电网的谐波及无功污染,双向变流器的控制策略就显得尤为重要。根据控制环路中是否直接控制电感电流,变流器传统的控制方法可分为间接电流控制和直接电流控制^[1-2]。直接电流控制又可分为峰值电流控制、滞环电流控制、平均电流控制和预测电流控制等,比较几种传统控制方法的优缺点^[3-5],本文选用了平均电流控制的双闭环PI控制。这种控制方法开关频率固定,谐波含量(THD)低。它不需要对被控系统建立非常准确的数学模型,由于引入了电流内环,系统稳定性得到加强,大大简化了电压外环的设计。

本文详细阐述了双环PI控制器的设计,并通过仿真和实验验证了控制策略的有效性和可行性。

1 主电路拓扑结构

双向变流器选用了电压型全桥PWM变流器的结构^[6]。电压型PWM变流器的结构特点是直流侧采用电容进行直流储能,直流侧呈低阻抗的电压源特性。它具有高效率,输入电流连续,响应速度快,配置简单,输入滤波器就可实现较低的电磁干扰,结构简单,易于实现等优点。其拓扑结构如图1所示。L1为电感;C1为电容;Vsin为交流电源,用 u_s 表示; i_L 为电感电流; u_{dc} 为直流电压。通过合理的控制方式,该拓扑电路可以实现能量的双向传递。当市电处于正半周时,V4恒导通、V3

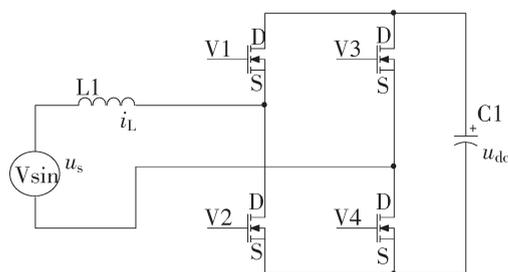


图1 双向变流器拓扑结构
Fig.1 Bidirectional converter topology

收稿日期:2012-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51067004)

作者简介:曹晖(1972—),男,高级实验师,硕士,研究方向为电力电子系统及控制技术。

恒关断、V1与V2以高频方式交替导通关断。V1导通时,在能量回馈(并网)状态下,直流储能电容给电感和交流侧提供能量;V2导通时,电感续流。当市电处于负半周时,V2恒导通、V1恒关断、V3与V4以高频方式交替导通关断。V3通时,在能量回馈(并网)状态下,直流储能电容给电感和交流侧提供能量;V4导通时,电感续流。

2 双向变流器的控制

采用平均电流控制的双闭环PI控制,控制结构如图2所示。其中 $G_{Cl}(s)$ 与 $G_{Cv}(s)$ 分别为电流环与电压环的控制对象模型; $C_v(s)$ 与 $C_l(s)$ 分别为电压环和电流环控制器; i_c 为电感电流; u_{dc} 为给定电压。

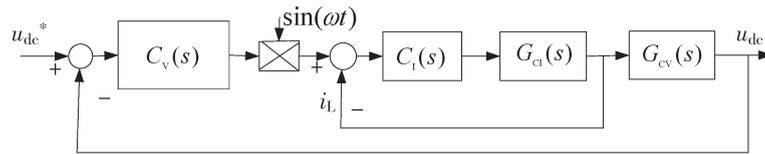


图2 双环PI制结构

Fig.2 Dual-loop PI control scheme

2.1 控制对象模型的建立

对图1所示拓扑电路建立其平均值模型。忽略电感电容内阻,列状态方程有

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = u_g - u_s \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - Di_L \end{cases} \quad (1)$$

其中: $u_g = Du_{dc}$, D 为主开关管的导通比。市电正半周时,V4恒通,V1的导通比,由 D 决定;市电负半周时,V2恒通,V3的导通比,由 D 决定。在DSP控制系统中, D 用比较值和载波峰值相除来表示。如用 u_c 来表示DSP计算得到的比较值,用 u_T 来表示三角载波的峰值,不难得出下式

$$u_g = Du_{dc} = \frac{u_c}{u_T} u_{dc} \quad (2)$$

由式(1)和(2)可画出电路模型如图3(a)所示。

由式(2)使

$$K_{pwm} = \frac{u_{dc}}{u_T} \quad (3)$$

式中: K_{pwm} 为DSP控制占空比。

2.2 电流内环

电流内环控制模型如图3(b)所示。因为电路模型中含有 u_s 这一变化较快的扰动量,为了抵消这一扰动,在控制结构中加了市电电压前馈。按二型系统校正电流环,电流环控制器可以设计为式

$$G(s) = \frac{k(s+a)}{s(s+b)} \quad (4)$$

式中: k 为增益; a 为零点; b 为极点。为了达到良好的跟踪性能,电流内环的带宽一般选择在1 kHz左右。而为了使系统足够稳定,一般希望相位裕度在 45° 以上。

2.3 电压外环

电压外环的控制目的是稳定直流侧电压 u_{dc} ,其控制模型如图3(c)所示。

其中: $W_{Cl}(s)$ 是电流内环的闭环传递函数; $\sin(\omega t)$ 是市电的相位,由锁相得到。为了使电感电流 i_L 能跟随市电相位,达到提高功率因数的控制目的,将电压误差经过PI运算得到的值作为电感电流的幅值,这个值乘以市电的相位作为电流内环的给定值。由于电流内环的带宽远大于电压外环,如电流内环控制器设计

合理,设计电压外环时可将其闭环传递函数近似为一阶小惯性延时环节。

为便于控制器的设计,对电压环控制模型进行简化处理。忽略一阶小惯性环节;将时变环节取最大值代替(最大增益对整个电压环稳定性影响最大);直流电流 i_{dc} 变化较慢,不考虑该扰动量。

同样按二型系统校正,控制器可以设计为式(4)。由直流侧功率与交流侧功率相等,可知直流母线电压 u_{dc} 含有二次谐波。为了更好地滤除二次谐波,电压外环的带宽设计在 25 Hz 左右;为了使系统足够稳定,设计相位裕度在 45° 左右。

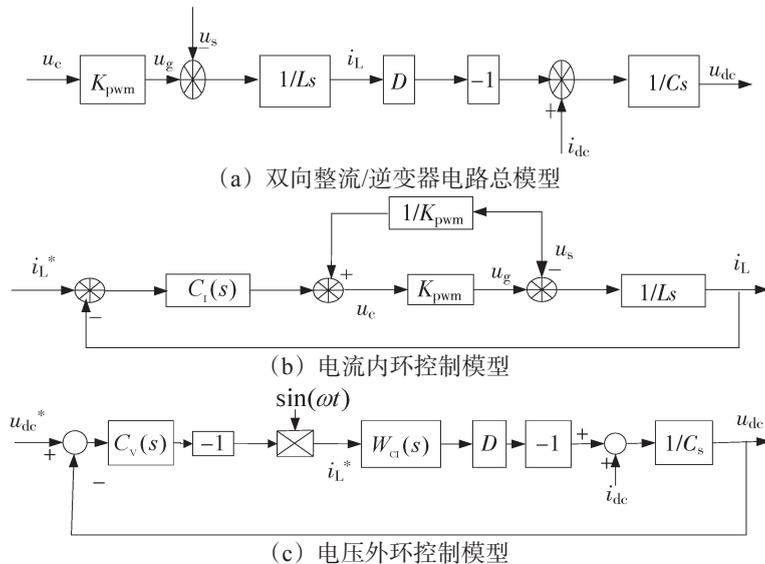


图3 双向整流/逆变器电路模型
Fig.3 Bidirectional rectifier / inverter circuit model

2.4 控制器参数的设计及仿真

控制器参数依赖于硬件参数,设计控制器参数之前必须先确定硬件参数。设计的实验参数如下:开关频率 19.2 kHz;交流侧电感 1 mH;直流侧储能电容 2.35 μ F;额定交流输入有效值 220 V;直流母线电压额定值为 360 V。

1) 电流内环控制的设计。为了更好地滤除开关频率以上的噪声,极点频率选择 4 kHz。极点频率确定后再根据带宽和相位裕度的要求来设计增益系数和零点。极点确定后,相位裕度由零点来决定;而带宽由增益系数和零点共同决定。可以通过画波特图的方法来确定增益系数和零点。实际中,为了保证计算精度,将电流环给定与反馈都放大了 100 倍。设计的电流环控制器如下

$$C_i(s) = \frac{1818(s + 6285)}{s(s + 2.514 \times 10^4)} \quad (5)$$

本项目中 $u_T = 2604$, 可得

$$K_{pwm} = \frac{u_{dc}}{u_T} = 0.138 \quad (6)$$

由图 3(b) 可得电流环开环传递函数为

$$G_i(s) = \frac{1.818 \times 10^8 (s + 6285)}{s^2 (s + 2.514 \times 10^4)} \quad (7)$$

其波特图如图 4(a) 所示。校正后,电流环截止频率为 1.36 kHz,相角裕度 45° ,基本满足设计要求。

2) 电压外环控制器的设计。为了更好地滤除二次谐波对电流内环的影响,设计极点在 40 Hz 左右。和电流内环一样,极点确定后,根据带宽和相位裕度的要求来设计增益和极点。设计控制器如下

$$C_v(s) = \frac{120(s+12)}{s(s+240)} \quad (8)$$

由图3(c)可得电压外环开环传递函数为

$$G_v(s) = \frac{51\,064(s+120)}{s^2(s+240)} \quad (9)$$

其波特图如图4(b)所示。由图可知,控制器电压外环带宽为27.5 Hz,相位裕度为50度,符合设计要求。

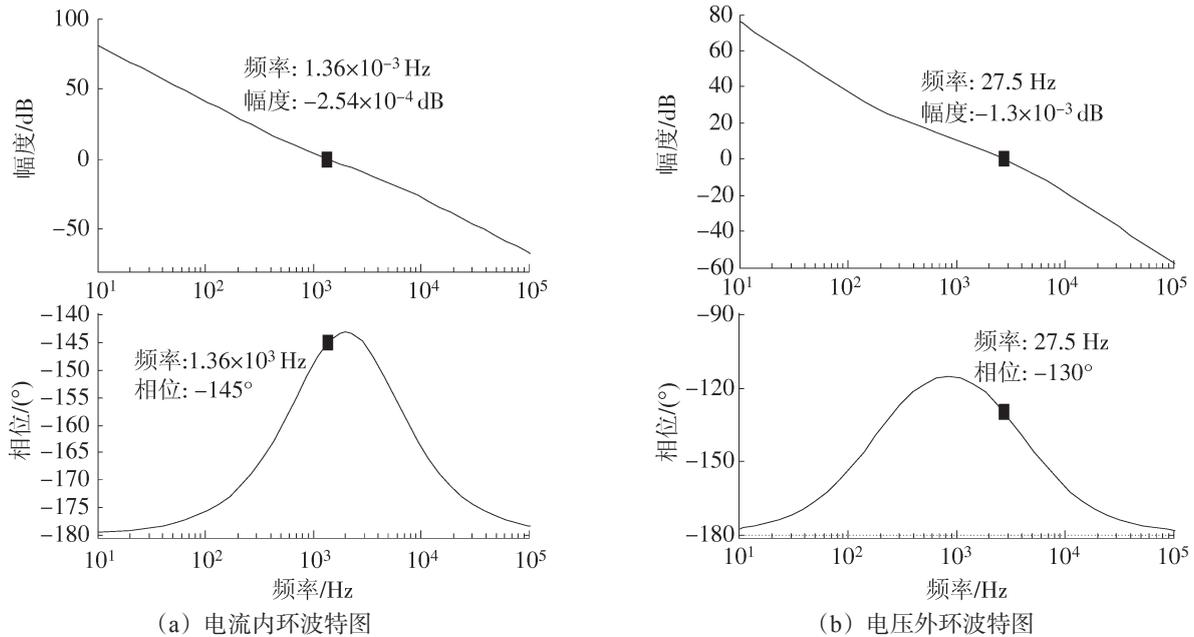


图4 控制器波特图

Fig.4 Controller Bode plot

3) 仿真波形。在 Matlab 中搭建仿真模型并仿真,仿真结果如图5。

图5为满载并网状态下的电感电流(放大10倍),市电电压与直流母线电压(BUS)的波形。由波形可以看出,电感电流能较好地跟踪市电相位,控制效果良好。

3 实验及实验波形

基于上述拓扑电路和控制原理,本课题制作了一个满载3 kW的单相变流器的实验样机。并网试验时,用PV模拟器作为直流电源,给直流侧电容充电;整流试验时,直流侧接负载。

通过实验可知,电感电流相位能较好地跟踪市电相位,半载时功率因数能达99.5%以上。控制上也可以加入无功补偿来校正轻载下的功率因数,使轻载下也能达到单位功率因数。

试验结果证明了设计的双向变流器能够实现能量的双向流动,并具有并网电流谐波小,功率因数高的特点。实验结果也验证了控制策略的有效性与可行性。

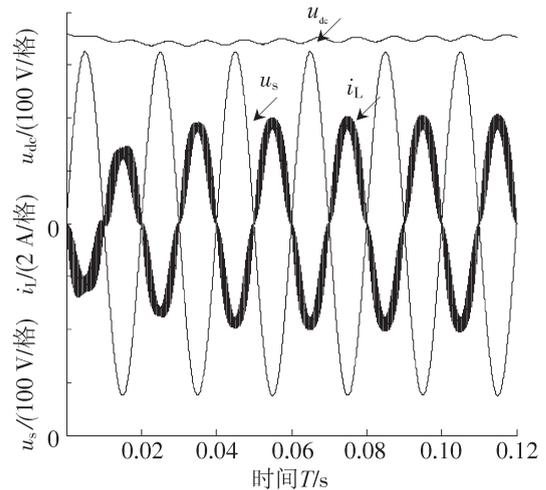


图5 Matlab 仿真波形

Fig.5 Matlab simulation waveforms

4 结论

基于同样的控制理论,合理设计硬件电路参数与器件选型,便可将机车制动时产生的再生能量回馈到电网。这种能量回馈系统可用到各种电机制动的场合,如电梯和电动汽车等。因此,对双向变流器的研究具有非常重要的现实意义与实用价值。

参考文献:

- [1] 张兴. PWM变流器及其控制策略的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2003:25-26.
- [2] 魏克新,王莉. 可逆变流器控制策略的研究[J]. 低压电器,2005(1):51-53.
- [3] 周宏林. 一种双向级联式BuckBoost逆变器的建模与分析[J]. 电源学报,2012(3):18-22.
- [4] 张兴. PWM可逆变流器空间电压矢量控制技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(10):102-105.
- [5] 徐顺刚. 电压电流双闭环反馈逆变器并联控制[J]. 电力自动化设备,2009,29(10):103-106.
- [6] 袁义生,闫勋. 变流器差模EMI的建模研究[J]. 华东交通大学学报,2012,29(3):88-91.
- [7] 赵彪. 用于电池储能系统并网的双向可拓展变流器及其分布式控制策略[J]. 中国电机工程学报,2011(31):244-250.
- [8] RODRIGUEZ J, MEMBER S, DIXON J, et al. PWM regenerative rectifiers: state of the art[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(1):5-22.

A Research on Control Strategies for the Bidirectional Converter

Cao Hui

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper firstly studies a bidirectional converter of establishing the circuit model, adopting a dual-loop PI control scheme and analyzing in details the design of the controller and the controller parameters. Then, a Matlab simulation model is built and simulated. Finally, the system is tested and experimental results are obtained. The relevant findings verify the stability of the system and the rationality of the control design.

Key words: bidirectional converter; dual-loop PI control; circuit model; power factor