

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.10.025

双向 DC-DC 电源软件设计^①

杨 奕, 万春梅, 申小松

重庆理工大学 电气与工程学院, 重庆 400054

摘要: 提出了一种针对锂离子电池设计的充电电流可变、放电电压恒定的高效率双向 DC-DC 电源装置模型. 通过对该模型进行理论推导和控制器仿真, 确定了以 PID 算法作为软件设计的核心, 同时建立开关电源小信号模型, 得出开关状态及其数学模型, 并选择合适的控制器作为闭环控制的核心, 建立 MATLAB 数学仿真模型, 验证了控制算法的合理性和正确性, 为双向 DC-DC 电源设计提供了可靠的理论依据及设计参考.

关键词: 双向 DC-DC 电源; PID 算法; 小信号模型

中图分类号: U463.63

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)10-0175-06

随着经济和科技的飞速发展, 人类对能源的需求和要求进一步提高, 世界各国都在探寻和研究可再生绿色能源^[1]. 但是如果直接将新能源发出的电量并入电网系统中, 会对电网的稳定和电能质量造成影响, 无法安全可靠地保证电网的正常运行^[2]. 因此, 在电力微网系统中应用了变换技术和电池储能技术来提高电能质量. 变换技术中双向 DC-DC 变换器最为突出, 能完成能量的流向控制, 因此广泛应用于各领域中^[3]. 以燃料电池电动汽车为例, 燃料电池电动车供电系统结构图如图 1 所示, 燃料电池系统中的用电设备主要为压缩机, 电动汽车在平时的行驶过程中, 燃料电池向压缩机及汽车内部用电设备提供运行所需的电能, 当电动汽车启动时, 燃料电池的电压较低, 不足以完全支撑电动汽车系统中用电设备的运行, 这时双向 DC-DC 变换器将工作在 BOOST 升压模式, 将蓄电池存储的能量输出至负载端, 防止在启动时燃料电池的输出电压不够, 影响电动汽车系统的运行. 当电动汽车制动时, 双向 DC-DC 变换器工作在 BUCK 模式下, 制动过程所产生的能量通过双向 DC-DC 变换器流向蓄电池, 为蓄电池充电^[4].

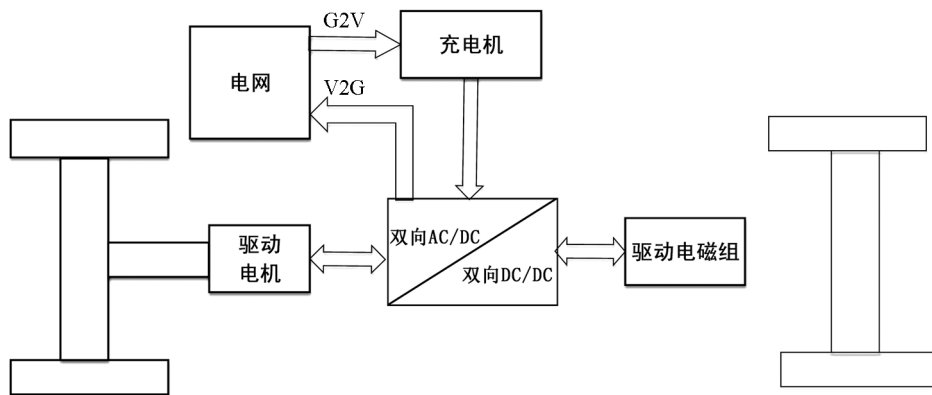


图 1 燃料电池电动车供电系统结构图

① 收稿日期: 2016-12-26

基金项目: 国家大学生创新创业训练计划项目(201611660002); 重庆理工大学学生科技创新团队建设项目(xc201609); 重庆市高等学校大学生创新创业训练计划项目(201611660019).

作者简介: 杨奕(1970-), 男, 重庆人, 教授, 硕士, 主要从事电工电子技术、信息理论及汽车电子方面的研究和教学.

1 双向 DC-DC 电源的数学模型

根据对开关电路的理想化方法和抽象程度,可以建立 3 个不同层次的开关电源模型,包括开关模型、状态空间平均模型和小信号模型^[5-7].其中,开关模型所建立的系统是非线性时变系统,需要通过将方程简化为线性定常的方程来确定解析解.通过对理想开关模型在开关处于开通或者关断时的方程进行加权平均处理,得到近似的平均状态方程.开关电源的控制是通过改变 PWM 波占空比来实现的, PWM 波的占空比为开关电源的一个随着时间变化而变化的输入量.这种情况下,状态变量和控制变量之间有乘积项,也就是存在耦合^[8],此时,状态空间平均模型不是线性的,所以通常需要对系统进行局部线性化,即得到小信号模型.

1.1 双向 DC-DC 电源恒流充电数学模型

本设计充电模式选择恒流充电.当双向 DC-DC 电源在恒流充电模式下工作时,双向 DC-DC 的工作模式为 BUCK 降压模式,作为电池的负载可以使用电池的简化模型进行模型的建立.在 BUCK 降压模式下,电源工作在电感电流连续(CCM)模式,每一个周期电源都会有两个不同的状态^[9],如图 2 所示,设图中元件均是理想器件,忽略寄生参数影响,开关周期为 T ,占空比为 d ,建立直流输入电压 $V_{DC}(t)$ 作为输入变量,输入电流 $i_{DC}(t)$ 和电池两端电压 $V_{bat}(t)$ 作为输出变量,输出电容电压 $V_{C_{bat}}(t)$ 和电感电流 $i_L(t)$ 作为状态变量的小信号模型^[10].

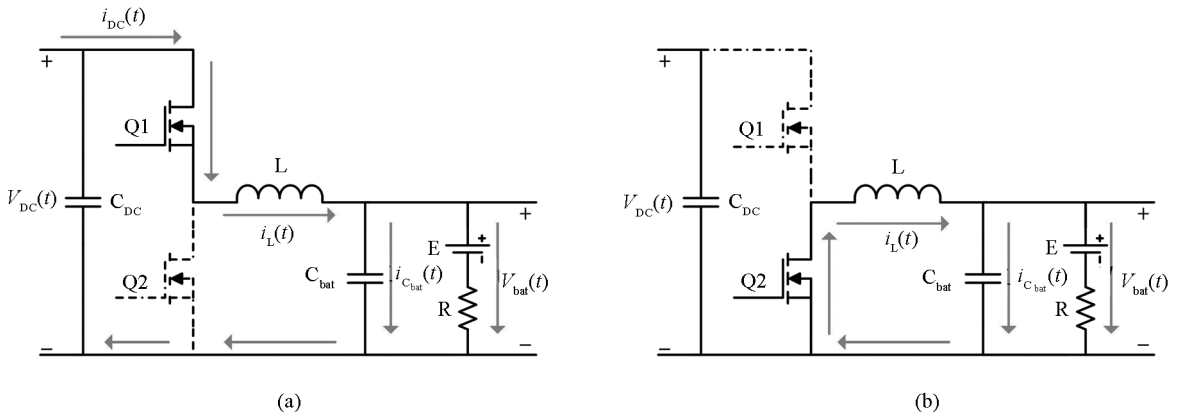


图 2 BUCK 模式下开通和关断工作状态

如图 1(a)所示,当 Q1 导通、Q2 关断时将导通和关断得到方程进行加权平均处理并引入小信号得到输出方程:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_{DC} + i_{DC}^{\wedge}(t) \\ \dot{V}_{bat} + v_{bat}^{\wedge}(t) \end{bmatrix} &= (D + d^{\wedge}(t)) \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L + i_L^{\wedge}(t) \\ V_{bat} + v_{bat}^{\wedge}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [v_{DC} + v_{DC}^{\wedge}(t)] + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E}{RC_{bat}} \end{bmatrix} \right\} \\ &+ (1 - (D + d^{\wedge}(t))) \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L + i_L^{\wedge}(t) \\ V_{bat} + v_{bat}^{\wedge}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [v_{DC} + v_{DC}^{\wedge}(t)] + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E}{RC_{bat}} \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

电池端电压 $V_{bat}^{\wedge}(s)$ 对占空比 $d^{\wedge}(s)$ 的传递函数 $G_{V_{bat}^{\wedge}d^{\wedge}}(s)$ 为

$$G_{V_{bat}^{\wedge}d^{\wedge}}(s) = \left. \frac{V_{bat}^{\wedge}(s)}{d^{\wedge}(s)} \right|_{V_{DC}(s)^{\wedge}=0} = \frac{V_{DC}}{LC_{bat}s^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (2)$$

电感电流 $i_L^{\wedge}(s)$ 对 PWM 占空比 $d^{\wedge}(s)$ 的传递函数 $G_{i_L^{\wedge}d^{\wedge}}(s)$ 为

$$G_{i_L^{\wedge}d^{\wedge}}(s) = \left. \frac{i_L^{\wedge}(s)}{d^{\wedge}(s)} \right|_{V_{DC}(s)^{\wedge}=0} = \frac{V_{DC} \left(sC_{bat} + \frac{1}{R} \right)}{LC_{bat}s^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (3)$$

1.2 双向 DC-DC 电源恒压放电数学模型

当双向 DC-DC 电源在 BOOST 模式下时, 电源工作在电感电流连续 (CCM) 模式^[9]. 每一个周期电源都会有两个不同的状态, 如图 3 所示, 设图 2 中所有电子元件均是理想器件, 开关周期为 T , 占空比为 d , 建立小信号模型.

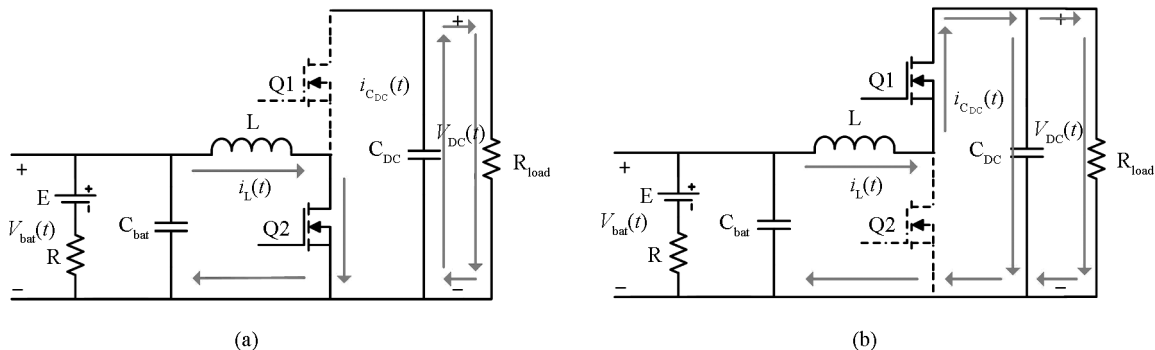


图 3 BOOST 模式下开通和关断工作状态

同上, 将导通和关断得到方程进行加权平均并引入小信号处理并得到输出方程:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_L + i_L^\wedge(t) \\ \dot{V}_{DC} + v_{DC}^\wedge(t) \end{bmatrix} &= (D + d^\wedge(t)) \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L + i_L^\wedge(t) \\ V_{DC} + v_{DC}^\wedge(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [v_{bat} + v_{bat}^\wedge(t)] \right\} \\ &+ (1 - (D + d^\wedge(t))) \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L + i_L^\wedge(t) \\ V_{DC} + v_{DC}^\wedge(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [v_{bat} + v_{bat}^\wedge(t)] \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

电感电流 $i_L^\wedge(s)$ 对 PWM 占空比 $d^\wedge(s)$ 的传递函数 $G_{i_L, d}^\wedge(s)$ 为

$$G_{i_L, d}^\wedge(s) = \left. \frac{i_L^\wedge(s)}{d^\wedge(s)} \right|_{v_{bat}^\wedge(s) \wedge=0} = \frac{V_{DC} (sC_{DC} + \frac{2}{R_{load}})}{LC_{DC}s^2 + \frac{L}{R_{DC}}s + (1-D)^2} \quad (5)$$

2 双向 DC-DC 电源的控制系统设计

2.1 双向 DC-DC 电源恒流充电控制器的设计与仿真

经过前面的小信号模型分析, 输出电压对占空比的传递函数为

$$G_{V_{bat}, d}^\wedge(s) = \left. \frac{V_{bat}^\wedge(s)}{d^\wedge(s)} \right|_{v_{DC}^\wedge(s) \wedge=0} = \frac{V_{DC}}{LC_{bat}s^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (6)$$

充电电流为

$$I_{bat} = \frac{V_{out} - V_{bat}}{R_{bat}} \quad (7)$$

本文设计所采用直流侧电压为 30 V, 电感参数为 330 uH, 电容参数为 2 200 uF. 建立 Simulink 数学模型如图 4(a) 所示^[11], BUCK 模式下的开环伯德图如图 4(b) 所示.

当双向 DC-DC 变换器工作在 BUCK 模式下, 系统的传递函数是一个二阶的振荡环节, 为了更好补偿共轭极点造成的相位滞后, 控制器的一个零点 z_1 应在谐振频率 $1/\sqrt{LC}$ 处^[12], 控制器的第二个零点 z_2 应选择在与距离共轭极点很远的位置处, 提供更多的超前相位, 一般选取在 $1/10$ 的共轭极点频率处.

选择系统的控制器为 PID 控制器, 其传递函数为

$$G_{PID}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = K_P \left(\frac{T_I T_D s^2 + T_I s + 1}{T_I s} \right) = K_P \left(\frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{T_I s} \right) \quad (8)$$

式中: τ_1 、 τ_2 是 PID 控制器的零点:

$$\tau_1 = \frac{1}{z_1} \quad \tau_2 = \frac{1}{z_2}$$

开关电源传递函数的谐振频率 $1/\sqrt{LC} = 1/\sqrt{330 \times 10^{-6} \times 2200 \times 10^{-6}} = 1173.6 \text{ rad/s}$,

取 PID 控制器的第一个零点在开关电源传递函数的谐振频率处, 第二个零点在开关电源传递函数的谐振频率的 1/10 处, 即取 $z_1 = 1173.6 \text{ rad/s}$, $z_2 = 117.36 \text{ rad/s}$,

则:

$$\tau_1 = \frac{1}{z_1} = \frac{1}{1173.6} = 0.000852 \quad \tau_2 = \frac{1}{z_2} = \frac{1}{117.36} = 0.00852$$

得到传递函数:

$$G_{\text{PID}}(s) = \frac{7.26 \times 10^{-5} s^2 + 0.09373s + 10}{1126s}$$

对应的 $G_{\text{PID}}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$, 其中 $K_P = 0.00008324$ 、 $K_I = 0.008881$ 、 $K_D = 0.000000645$.

加入 PID 控制器, 闭环负反馈系统的数学模型如图 5(a), 开环伯德图如图 5(b)所示. 从图 5(b)中可以看出, 系统穿越频率^[13]在 3500 rad/s 附近, 穿越斜率为 -20 dB/dec , 相位裕度 $>45^\circ$, 满足稳定条件, 可以分析得出系统稳定.

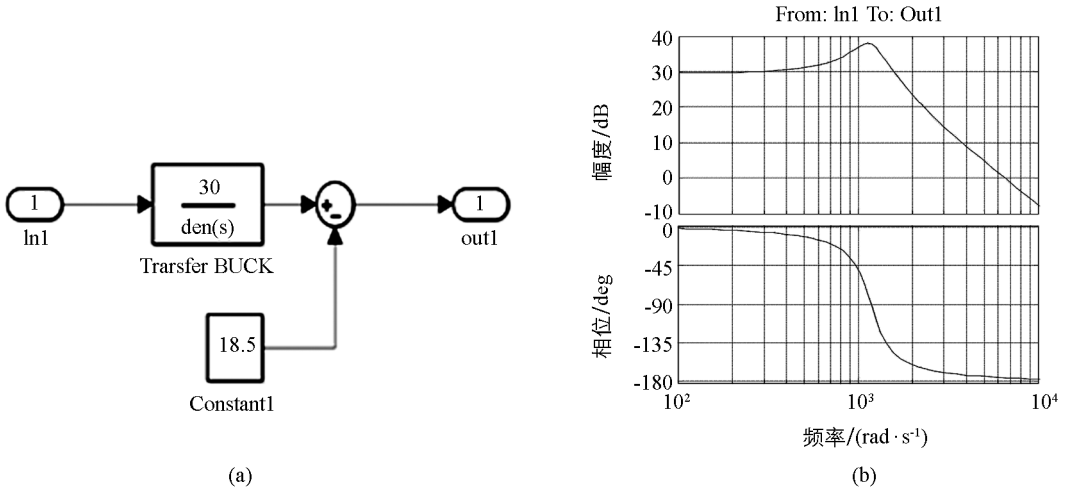


图 4 BUCK 电路 Simulink 数学模型和开环伯德图

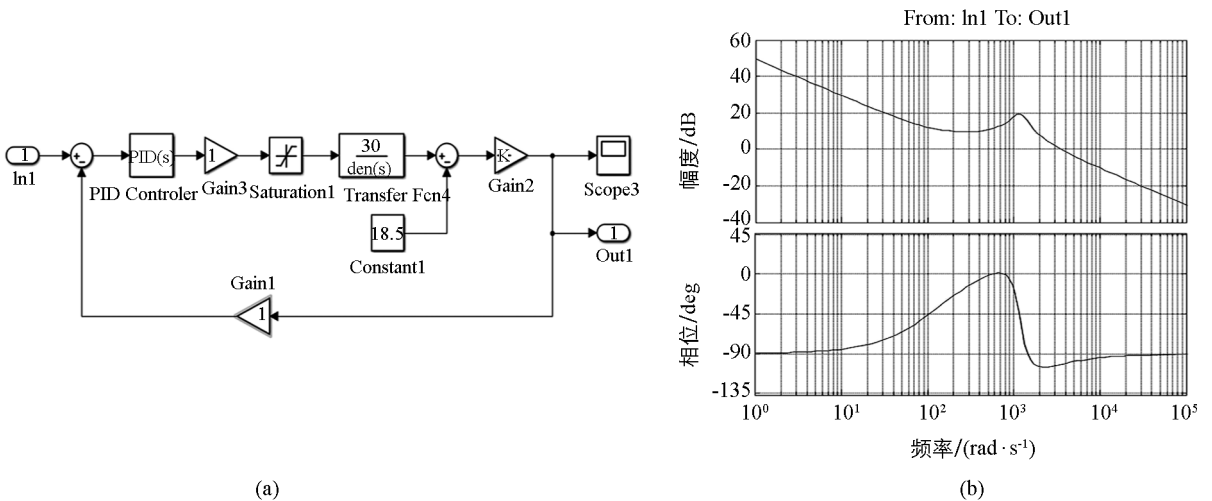


图 5 BUCK 电路加入控制器后的数学模型和开环伯德图

2.2 双向 DC-DC 电源恒压放电控制器的设计与仿真

经过前面的小信号模型分析, 输出电压对 PWM 占空比的传递函数为

$$G_{V_{DC}d}(s) = \frac{V_{DC}^{\wedge}(s)}{d^{\wedge}(s)} \Big|_{V_{bat}(s) \wedge=0} = \frac{(1-D)V_{DC} - sLI_L}{LC_{DC}s^2 + \frac{L}{R_{load}}s + (1-D)^2} \quad (9)$$

本文设计所采用电感参数为 330 uH, 电容参数为 330 uF, 电池两端电压 18.5 V 左右. 电感初始电流 $I_L=0$, 初始占空比 $D=0$. 则传递函数为

$$G_{V_{DC}d}(s) = \frac{V_{DC}^{\wedge}(s)}{d^{\wedge}(s)} \Big|_{V_{bat}(s) \wedge=0} = \frac{V_{DC}}{LC_{DC}s^2 + \frac{L}{R_{load}}s + 1} \quad (10)$$

用 Matlab 中的 Simulink 建立其数学模型如图 6(a)所示, BOOST 模式下的开环伯德图如图 6(b)所示.

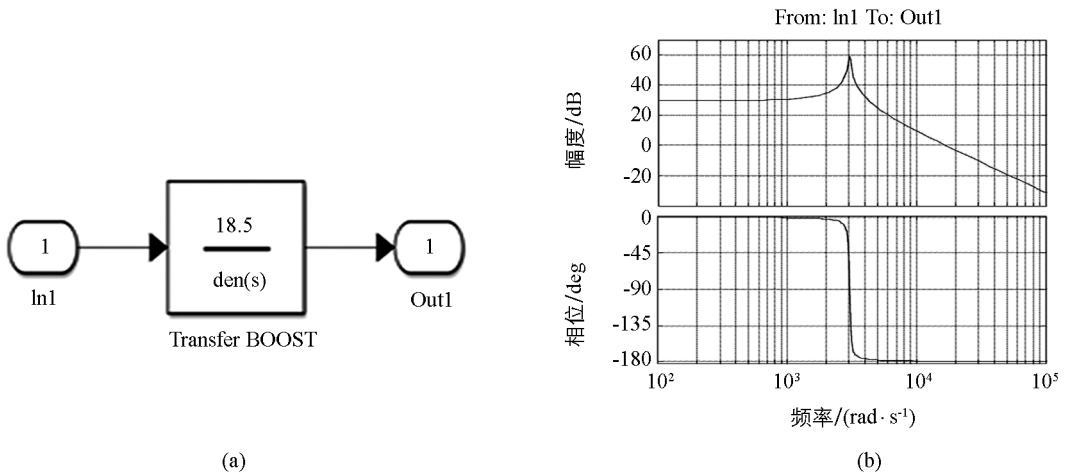


图 6 BOOST 电路 simulink 数学模型和开环伯德图

此模型与 BUCK 电路的模型类别一致, 传递函数均为二阶振荡环节, 按照上一节给出的计算 PID 参数方法, 得到参数: $K_p=0.000\ 740\ 8$ 、 $K_I=0.204\ 1$ 、 $K_D=0.000\ 000\ 222$, 加入 PID 控制器, 闭环负反馈系统的数学模型如图 7(a), 开环伯德图如图 7(b)所示. 从图 7(b)可以分析得出, 系统穿越频率在 5 000 rad/s 附近, 穿越斜率为 $-20\ \text{db/dec}$, 相位裕度 >45 , 满足稳定条件系统稳定.

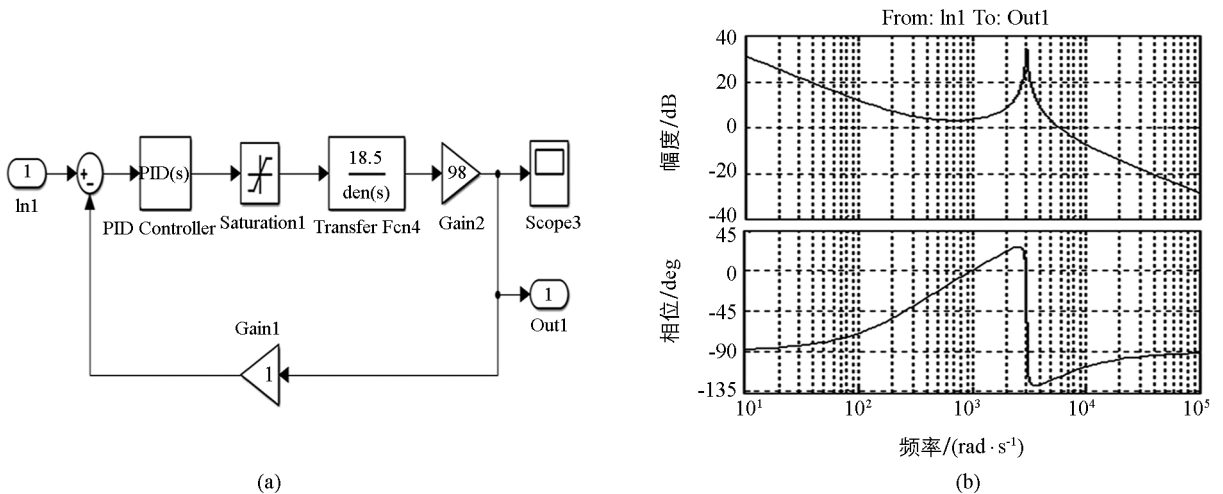


图 7 BOOST 电路加入控制器的数学模型和开环伯德图

3 结 论

双向 DC-DC 电源广泛应用于电动汽车、UPS(不间断电源)、光伏并网系统、和分布式电站、轨道交通

等众多领域中. 在本文设计选用双向半桥型开关电源拓扑作为系统的主电路设计方案, 同时使用同步整流技术进一步提高了双向 DC-DC 电源的效率. 运用开关电源相关知识对双向 DC-DC 电源进行了数学模型建立及仿真, 分析并验证了 PID 控制器在开关电源控制中的正确性. 同时利用 Matlab 编程计算设计参数、simulink 仿真验证参数设计的合理性, 完成了对开关电源理论的基本分析和验证.

参考文献:

- [1] 史丹. 我国新能源产能“过剩”的原因与解决途径 [J]. 中国能源, 2012, 34(9): 5-8, 30.
- [2] 崔金兰, 刘天琪. 分布式发电技术及其并网问题研究综述 [J]. 现代电力, 2007(3): 53-57.
- [3] 高明远. 双向 DC-DC 变换器基于切换系统的建模与储能控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 129-134.
- [4] 邹文. 燃料电池电动汽车车载大功率 DC/DC 研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [5] 张克波. 单端正激式零电压转换逆变弧焊电源的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [6] 阎昌国, 龚仁喜, 陈连贵. 基于快充技术的开关电源设计 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015, 29(12): 138-142.
- [7] 谷峰, 蒲利春, 冉秦翠. 一种可输出预置序列的新型程控电源设计 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015, 29(2): 86-90.
- [8] 宋红瑾. 轻型直流输电系统控制方法研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- [9] 马皓, 毛兴云, 徐德鸿. 兼顾电感电流连续导通和断续运行模式的 DC/DC 电路建模和参数辨识 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 64-69.
- [10] 解光军, 徐慧芳. 峰值电流模式控制非理想 Buck 变换器系统建模 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 52-58+10.
- [11] 胡柏林, 王丽丹, 黄艺文, 等. 忆阻器 Simulink 建模和图形用户界面设计 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(9): 50-56.
- [12] 熊宝库, 王林, 陈东, 等. BH 分子基态的分析势能函数与光谱常数 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(11): 38-41.
- [13] 孙慧峰, 熊旭平, 李风云. 穿越频率 ω_c 的求解 [J]. 水利电力机械, 2003(5): 55-58.

Software Design for Bidirectional DC-DC Power Supply

YANG Yi, WAN Chun-mei, SHEN Xiao-song

School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract: In order to provide a reliable theoretical basis and design reference for bidirectional DC-DC power supply, a high-efficiency bidirectional DC-DC power supply unit model with variable charging current and constant discharge voltage is proposed for lithium ion battery design in this paper. Through the theoretical derivation and controller simulation of the mathematical model of bidirectional DC-DC power supply, the PID algorithm is taken as the core of software design. At the same time, a small signal model of switching power supply is established, the switch state and its mathematical model are obtained, and the appropriate controller is chosen as the core of closed-loop control. A mathematical simulation model of MATLAB is established, and the rationality and correctness of the control algorithm are verified.

Key words: bi-directional DC-DC power supply; PID algorithm; small-signal model