

研
究
开
发基于蓄电池负载 DC/DC 变换器的
数字式前馈控制器仿真分析

张小勇, 谢 伟, 李 梅

(株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)



摘 要: 采用前馈控制的方式, 可以提高带蓄电池负载的 DC/DC 变换器的动态性能。针对列车上采用的半桥式 DC/DC 电源装置设计了与其相适应的前馈控制器, 并且对该系统进行了仿真。仿真分析表明, 这种前馈控制方式能够大大改善系统的动态性能以及稳定精度。

关键词: DC/DC 变换器; 前馈控制; 仿真; 蓄电池

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2012)05-0050-04

作者简介: 张小勇 (1980-), 男, 工程师, 现从事中小功率 DC/DC 变换器的研究工作。

Simulation Analysis on Digital Feed-Forward Controller for DC/DC
Converter with Battery Load

ZHANG Xiao-yong, XIE Wei, LI Mei

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

Abstract: Dynamic performance of DC/DC converter with battery load could be enhanced by adopting feed-forward control method. Feed-forward controller for vehicle supply based on half-bridge topological DC/DC converter was designed and simulated, which was proved to greatly enhance the dynamic and stability performance of the system.

Key words: DC/DC converter; feed-forward control; simulation; battery

0 引言

对于带蓄电池负载的 DC/DC 变换器而言, 当蓄电池负载退出限流以后, 蓄电池电流曲线是一个随时间变化的曲线。对于这种工况下的 DC/DC 变换器, 一般采用电压环单环控制。

随着直流变换器的发展, 为了解决单个变换器不断增加的电流应力、热应力以及价格昂贵的功率开关器件等问题, 多模块组合的技术广泛地在直流变换器中得到采用并推广。

如何使多模块中各相电流在系统动态和稳态工作时都保持良好的均压均流特性成为组合式直流变换器设计的主要研究课题之一。目前已有大量文献介绍组合式直流变换器的均压均流技术, 原理虽然不尽相同, 但是 DC/DC 变换器的工作场合基本都是基于电阻负载或恒功率负载情况下研究的。由于负载状况已知, 因此可以加入反应速度更快的电流环来参与 PID 调节,

以满足系统瞬态和稳定精度的要求。

由于带蓄电池负载的特殊性, 在实际工况中, 还可能存在着其他各种形式的负载波动, 这样就会使得单电压环 PID 调节器策略很难满足实际控制的要求。特别是系统采用组合式控制模块以后, 由于组合式模块系统的强耦合性、非线性特性, 再加上 DC/DC 变换器本身就是一个滞后的系统, 这样就会使得其 PID 控制器的参数整定非常困难, 因而很难通过单电压环 PID 调节器来满足各种动态性能和稳定精度的要求。

目前对于带类似蓄电池负载的这种 DC 电源装置的控制方式研究得比较少, HXD3 型机车上日本原装 RFE081-A0 型 DC 110 V 电源装置^[1]通过对蓄电池的电流作一条精确的电流曲线来实现双闭环控制, 这样做可以大大提高系统的性能。但是, 随着蓄电池的老化, 其充电曲线是会变化的。随着时间的推移, 蓄电池的充电曲线是会变化的, 有可能需要经常对软件系统的控制曲线进行更新, 这样就大大增加了系统的维护难度和成本。

数字预估控制方式一般采用电流控制方式^[2-4], 通

收稿日期: 2011-12-30

通过对电感电流的预估进行控制, 来补偿电压环的速度问题。本文通过采用前馈控制的方式, 对电感电流进行预估, 同时引入网压前馈控制, 以改善系统的动态调节问题。

1 系统控制模型

1) 控制系统概述

图1是列车上DC/DC变换器控制原理图, 在原有的PID控制器上, 增加了1个电流前馈控制器和1个电压前馈控制器。通过对这些控制器的数据进行处理, 系统驱动开关管, 给负载提供能量。每个周期系统通过增加对输出电流和输入电压的控制, 根据电压环调节的结果 d_s 计算出前馈控制环给系统带来的变化量 Δd , 以加快系统的动态调节性能。

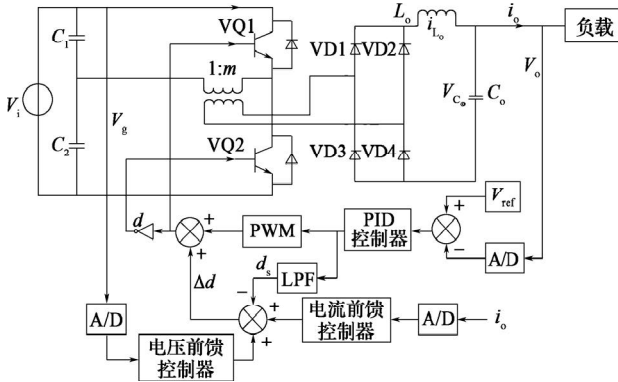


图1 DC/DC变换器控制系统图

2) 占空比与输入电压输出电流的关系

考虑到车载电源是一种系统可靠性要求很高的电源装置, 在设计中, 一般按照10%负载电流时, 电感电流临界连续进行输出滤波电感设计。因此, 这里只考虑电感电流连续(CCM)的情况。这种条件下, 电感电流波形如图2所示。

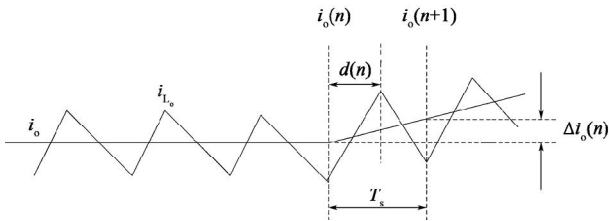


图2 CCM情况下电感电流波形

根据图2可以计算出输出电流的变化和占空比有如下关系^[5]:

$$i_o(n+1) = i_o(n) + \frac{\mu[1-d(n)]V_g - V_o}{L_o} d(n)T_s + \frac{\mu d(n)V_g - V_o}{L_o} [1-d(n)]T_s \quad (1)$$

从而可以得出:

$$d(n)^2 - d(n) + \frac{L_o[i_o(n+1) - i_o(n)]}{2\mu V_g T_s} + \frac{V_o}{2\mu V_g} = 0$$

进而可以计算出前馈控制环节的调节量有如下关

系式:

$$\Delta d = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{2L_o[i_o(n+1) - i_o(n)]}{\mu V_g T_s} - 2 \frac{V_o}{\mu V_g} - d_s(n)} \quad (2)$$

3) 系统小信号模型

DC/DC变换器的动态性和稳定性可以通过小信号模型来进行分析。对于半桥式DC/DC的小信号模型如何建立已有诸多文献介绍过。由图1可以列出, 半桥式DC/DC变换器包括下面2个状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_{v_{g1}} v_g(t) + B_{i_{o1}} i_o(t) & nT_s < t \leq (n+d)T_s \\ \dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_{v_{g2}} v_g(t) + B_{i_{o2}} i_o(t) & (n+d)T_s < t \leq (n+1)T_s \end{cases} \quad (4)$$

这里:

$$\begin{aligned} x(t) &= \begin{bmatrix} i_{L_o}(t) \\ v_{C_o}(t) \end{bmatrix} \\ A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_o} \\ \frac{1}{C_o} & 0 \end{bmatrix}, B_{v_{g1}} = \begin{bmatrix} \frac{\mu}{2L_o} \\ 0 \end{bmatrix}, B_{i_{o1}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_o} \end{bmatrix} \\ A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_o} \\ \frac{1}{C_o} & 0 \end{bmatrix}, B_{v_{g2}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_{i_{o2}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_o} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

这个半桥模型是在忽略了电路中寄生参数以及电路中元器件损耗的影响下建立的, 纯粹为一个理想半桥电路的模型。

从式(4)根据状态空间平均法可以得出:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bd(t) + B_{v_g} v_g(t) + B_{i_o} i_o(t) \\ v_o = Cx(t) \end{cases} \quad (5)$$

离散模型各表达式参数如下:

$$\begin{aligned} A &= A_1 D + A_2 (1-D) \\ B &= (A_1 - A_2)X + (B_{v_{g1}} - B_{v_{g2}})V_g + (B_{i_{o1}} - B_{i_{o2}})I_o \\ B_{v_g} &= B_{v_{g1}} D + B_{v_{g2}} (1-D) \\ B_{i_o} &= B_{i_{o1}} D - B_{i_{o2}} (1-D) \\ C &= [0 \ 1] \end{aligned}$$

给系统施加小信号扰动, $x(t) = X + \hat{x}(t)$, $d(t) = D + \hat{d}(t)$,

$v_g(t) = V_g + \hat{v}_g(t)$, $i_o(t) = I_o + \hat{i}_o(t)$, $v_o(t) = V_o + \hat{v}_o(t)$, 带入式(5)中, 并作Laplace变换, 可以得出系统的开环小信号的传递函数:

$$\begin{aligned} G_{vd}(s) &= \left. \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} \right|_{\hat{v}_g=0, \hat{i}_o=0} = C(sI - A)^{-1} B = \frac{1}{2} \frac{\mu}{L_o C_o s^2 + 1} V_g \\ Z_p(s) &= \left. \frac{\hat{v}_o}{\hat{i}} \right|_{\hat{d}=0, \hat{v}_g=0} = C(sI - A)^{-1} B_{i_o} = \frac{L_o(1-2D)s}{L_o C_o s^2 + 1} \end{aligned}$$

$$A_u(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_g} \bigg|_{\hat{i}_o=0} = C(sI - A)^{-1} B_{v_g} = \frac{1}{2} \frac{\mu D}{L_o C_o s^2 + 1}$$

可以通过Matlab的相关函数得出 $G_{vd}(s)$, $Z_p(s)$, $A_u(s)$, 在实际工作时的离散化传递函数 $G_{vd}(z)$, $Z_p(z)$, $A_u(z)$ 。

而对于电流前馈控制系统的离散化传递函数, 可以通过对方程(1)施加小信号扰动: $d(n) = D + \hat{d}f(n)$, $i_o(n) = I_o + \hat{i}_o(n)$, $i_o(n+1) = I_o + \hat{i}_o(n+1)$, 得出相应的离散域的传递函数:

$$F_i(z) = \frac{\hat{d}_f}{\hat{i}_o} = 2 \frac{L_o(2D-1)}{\mu V_g T_s} (z-1)$$

$$F_{V_g}(z) = \frac{\hat{d}_f}{\hat{V}_g} = -\frac{D}{V_g}$$

从而可以得出前馈控制离散模型如图3所示。

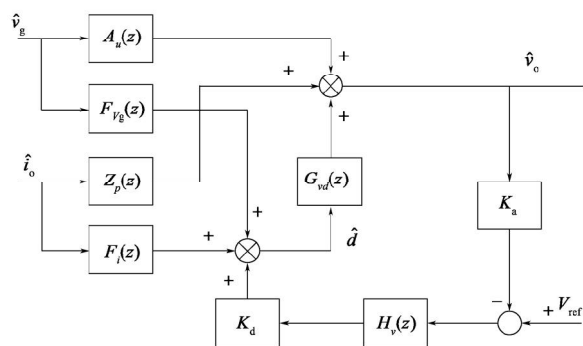


图3 系统控制框图

4) 输出阻抗以及稳定性分析

从图3的小信号框图可以得出, 闭环系统的输出阻抗 Z_o 可以表示为:

$$Z_o = \frac{\hat{v}_o}{\hat{i}_o} = \frac{Z_{pf}}{1 + T_o}$$

式中: $Z_{pf} = Z_p + A_u + F_i G_{vd} + F_{v_g} G_{vd}$; $T_o = K_a H_v K_p G_{vd}$ 。

T_o 为一个常规的PID控制器的等效输出阻抗。这里可以简要地看出, 由于系统的分子加入了2个负数, 对于前馈控制系统而言, 实际上是相当于系统的输出阻抗减小了。对于半桥型系统这种可以近似为二阶系统的电源装置而言, 输出阻抗的减小, 实际上会有更好的稳定性^[5]。

2 系统仿真分析

为了验证采用这种前馈控制策略的性能, 本文针对一个功率为30 kW, 开关频率为8 kHz的半桥系统进行了仿真分析, 其输入电压范围: DC 448~616 V, 这里用1个直流信号加1个交流信号进行网压波动模拟, 输出电压范围为DC 110 (1±2%) V, 最大电流为275 A, 通过并联1个电阻来模拟负载突投突切。图4是系统的仿真原理图, 当系统不采取前馈控制时, 直接去掉Fi

Controller和Fvg Controller即可。

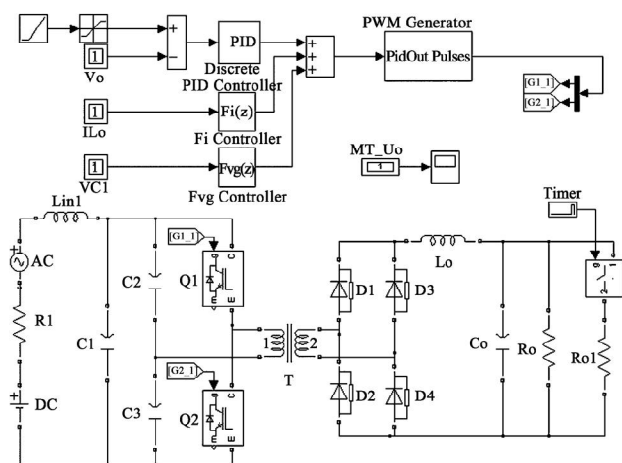


图4 仿真系统图

图5为没有前馈控制系统的仿真波形。从图5(b)可以看出, 在输入电源受到连续干扰的情况下, DC/DC系统实际上是有些地方无法达到2%的精度要求的。图5(c)和图5(d)分别为系统的负载突投和突切的示意图, 从图上可以看出, 在突投和突切瞬间, 系统的超调量都超过了15 V, 超过了系统所要求(≤10%)的超调量要求。

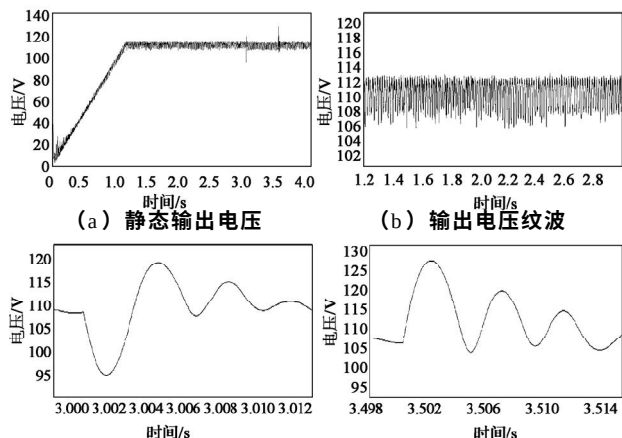


图5 不加前馈控制时的输出电压仿真波形

图6为加了前馈控制的系统仿真波形。从图上可以看出, 在同样的情况下, 由于前馈控制的引入, 系统对

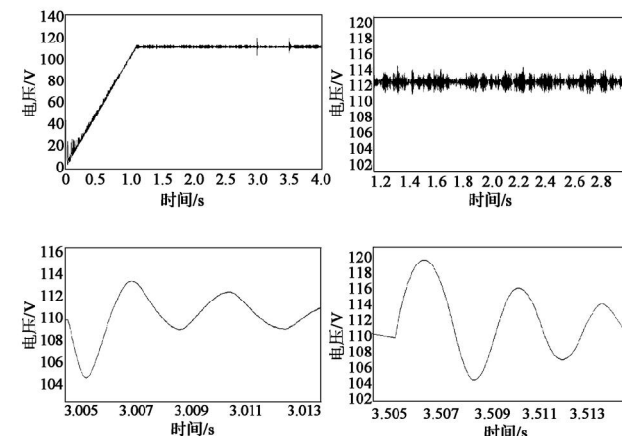


图6 加前馈控制时的输出电压仿真波形

抗干扰能力明显增强, 不管是稳态精度还是突投和突切的动态性能, 都要优于没有前馈控制的情况。

3 结语

对于DC/DC这种滞后系统, 在干扰比较严重的情
况下, 采用前馈控制可以对抗动量直接产生校正作用,
以迅速抵消扰动的影响, 在控制算法和控制参数选择
合适的情况下, 可以达到很高的精度和相应速度。
本系统小信号模型是在忽略了系统的寄生参数以
及元器件功耗的情况下建立的, 系统仿真也是在所有
元器件理想的情况下进行的。实际上系统的寄生参数
以及元器件功耗对系统的小信号模型建立有很大的影
响, 并直接影响到前馈控制器的设计。因此, 如何让控
制器设计更加贴近实际情况, 将是进一步需要研究的
问题。

参考文献:

[1] 李 新. HX₃型机车用DC 110 V电源装置 [J]. 电力机车与
城轨车辆, 2008, 31(2): 42-45.
[2] S Bibian, J Hua. High performance predictive dead-beat digital
controller for dc power supplies [J]. IEEE Trans. Power Electron.,
2002, 17(3): 420-427.
[3] P Mattavelli. Digital control of dc-dc boost converters with inductor
current estimation [C] //Proc. IEEE Appl. Power Electron.
Conf., 2004: 74-80.
[4] H Peng, D Maksimovic. Digital current-mode controller for dc-dc
converters [C] //Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf., 2005:
899-905.
[5] Suyong Chae, Woosup Kim, Bohyung Cho. Digital Predictive
Feed-Forward Controller for a DC-DC Converter in Plasma
Display Panel [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2008, 23(2):
74-80.

动态消息

新型储能式电力牵引轻轨车下线

世界首台采用超级电容储存电能作为主动力能源的
“ 储能式电力牵引轻轨车 ”原型车, 8月10日在位于“ 电力机
车之都 ”株洲的中国南车株洲电力机车有限公司下线,中国
工程院院长周济、国资委副主任黄丹华、湖南省委书记周强、
湖南省省长徐守盛、铁道部总工程师何华武、中国南车董事
长赵小刚等出席下线仪式并剪彩。

该车采用超级电容储备电能为主动力, 设计最高速度
80 km/h, 占地宽仅需8 m, 有效节约道路土地建设资源, 实
现了污染物零排放, 是一款集绿色、低碳、便捷、美观于一体的
的公共交通系统新能源产品。储能式轻轨车的核心主要有超
级电容动力电源系统、储能管理模块、牵引控制系统、永磁
同步电机、网络智能控制系统等。其中主变流器、储能管理
模块及网络智能控制系统均由株洲南车时代电气股份有限
公司生产, 永磁同步电机由南车电机提供, 整车具有完全自
主知识产权。核心部件参数如下:

储能电源 (1个单元)

额定工作电压	DC 750 V
最高充电电压	DC 900(1 ± 1%)V
超级电容单体	2.7 V, 7 000 F
储能电源构成	4并342串
储能电源总容量	82 F
储能电源储能能量	9.2 kW · h

牵引逆变器	
输入电压	DC 750 V (550~900 V)
额定容量	2 × 105 kVA
输出电压	0~555 V
输出频率	0~160 Hz
开关频率	500 Hz
额定输出电流	2 × 180 A
最大输出电流	2 × 240 A
控制方式	VVVF直接力矩控制
永磁同步电机	
类型	全封闭永磁同步电机
供电	VVVF逆变器
额定功率	100 kW
效率	0.96

储能式电力牵引轻轨车辆利用乘客上下车的时间, 在
站台30 s内快速完成充电, 一次充电后能连续行驶2 km, 到
达下一站台再行充电, 周而复始, 这将为车辆的运营带来极
大便利。储能车在牵引工况时依靠自身储能提供动力, 制动
时可将动能完全转化为电能并吸收储存实现再利用, 其控制
方式采用轴控方式, 可实现车辆动轴独立高粘着驱动控制;
采用车站静止受电, 可实现轻轨车辆无接触网运行。

储能式电力牵引轻轨车是城轨交通车辆的一种新形式,
可实现牵引、制动工况电能和动能的循环高效利用。储能车
的研制成功, 推进了储能技术在轨道交通中的应用, 大大提
升了产品的节能高效竞争力和企业技术创新能力。

(乔显华)