

直流电容储能反馈和负载功率前馈的 Boost 变换器控制策略

姜卫东,吴志清,胡 杨,佘阳阳

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要: 从 Boost 变换器的状态空间平均方程数学模型出发,推导出其功率传递关系。在此基础上提出了一种以电流作为内环、直流侧电容储能作为外环的反馈控制策略,电流内环采用滞环电流控制,电容储能外环采用 PI 调节器控制,并设计了相应的控制器。为了进一步提高系统的快速性,减小负载扰动对系统的影响,引入负载功率的前馈,并给出了前馈功率的估计算法。实验比较了传统的电压电流双闭环和所提控制策略的动、稳态特性,结果表明,所提出的控制策略能满足系统稳态时的控制要求,并且较传统的电压电流双闭环控制策略具有更好的动态特性。

关键词: Boost; 变换器; 储能; 反馈控制; 电流控制; 双闭环; 负载功率前馈; 前馈控制

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.018

0 引言

Boost 变换器广泛应用于电动汽车、航空航天电源系统、LED 照明、不间断电源系统等领域。近年来特别是在移动电站、电力系统功率因数校正以及新能源并网等场合,Boost 变换器的重要性越来越得到体现。随之而来的是对其系统动、静态性能的要求也逐渐提高。在状态空间平均法下,Boost 变换器的数学模型是一组时变非线性方程^[1-3],传统的控制策略是利用泰勒展开式进行局部线性化,这种近似方法忽略了高阶非线性项,因此是不精确的。

为了得到更好的控制性能,研究人员做了大量的工作,文献[4-5]基于 Boost 电路的非线性数学模型,

提出了相应的优化控制,提高了控制的准确性;文献[6-8]利用非线性系统的微分几何理论,在 Boost 变换器仿射非线性模型基础上,推导出对应的非线性坐标变换矩阵和状态反馈表达式,得到 Boost 变换器状态反馈精确线性化模型;文献[9]通过对电路的分析,得出了其小信号状态空间模型,并利用模糊 PI 控制算法修改控制参数以提高系统的速度;文献[10]基于输入/输出反馈线性化提出一种新的非线性控制方案,采用以非线性控制的电感电流作为内环、具有 PI 控制的电容电压作为外环的串级结构。这些方法较多依赖电路参数的精确性,且控制算法实现较为复杂。

通过对数学模型(即状态空间平均模型)做相应的变形,可以得到 Boost 变换器的能量的交换关系。在此基础上,本文提出了一种电流内环、直流侧电容储能作为外环的反馈控制策略,并引入了负载功率

收稿日期:2013-07-19;修回日期:2014-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51007018)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51007018)

Influence of TCIPC with parallel MOV on transient process

LI Juan,LIU Yujiao,WANG Xinran,LIU Hailong,CUI Honglan

(School of Electrical Engineering,Northeast Dianli University,Jilin 132012,China)

Abstract: The over-voltage caused by TCIPC(Thyristor-Controlled Interphase Power Controller) in grid power control can be suppressed by connecting MOV(Metal Oxidized Varistor) in parallel to it,but the parallel MOV will influence the transient process of its operating mode change. The mechanism of TCIPC over-voltage is explored based on its basic structure and the dynamic model of TCIPC with parallel MOV is established. The PI correction impedance controller is designed,which,with the power as the reference,takes the entrance bus voltage of TCIPC and the line current as the coordination components. The simulative analysis for two equivalent power systems with weak AC interconnection via TCIPC shows that,the power flow regulating capability of system is reduced and the transient process of stability restoration is prolonged.

Key words: interconnected power systems; flexible AC transmission systems; thyristor-controlled interphase power controller; metal oxidized varistor; transient analysis; over-voltage

的前馈来提高电压动态响应性能以及鲁棒性。这种控制方法在 PWM 整流器中已有较多的应用^[11-16]。本文所提算法物理意义明确,并且在控制器的设计上将负载扰动加以考虑,获得了更好的控制效果。

1 Boost 变换器的数学模型及其功率分析

Boost 变换器原理图如图 1 所示。

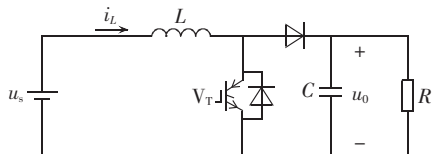


图 1 Boost 变换器原理图

Fig.1 Schematic diagram of Boost converter

为简化分析,假设功率开关管的导通电阻为 0,关断电阻为无穷大。当开关频率足够高时,根据状态空间平均法得出系统的状态方程:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = u_s - (1-d)u_0 \\ C \frac{du_0}{dt} = (1-d)i_L - \frac{u_0}{R} \end{cases} \quad (1)$$

其中, i_L 、 u_0 分别为电感电流和电容电压在开关周期内的平均值; d 为主开关 V_T 的占空比; u_s 为直流电源输入电压; L 为电感值; C 为电容值; R 为负载电阻。根据等功率约束关系,由式(1)消去占空比 d ,可得:

$$i_L u_s = \frac{C}{2} \frac{du_0^2}{dt} + \frac{u_0^2}{R} + \frac{L}{2} \frac{di_L^2}{dt} \quad (2)$$

从上式可以看出,等号左边为电源发出的功率,等号右边第 1 项为动态过程中电容储能增加时所吸收的功率,第 2 项为负载电阻的消耗功率,第 3 项为电感磁场储能增加时所吸收的功率。在稳态时第 1 项和第 3 项为 0。不妨令:

$$p_c = \frac{d\left(\frac{C}{2}u_0^2\right)}{dt}, \quad p_R = \frac{u_0^2}{R}, \quad p_L = \frac{1}{2}L \frac{di_L^2}{dt} \quad (3)$$

忽略 Boost 变换器的开关器件引起的损耗及电感内阻损耗后,认为输入端的功率减去电感的吸收功率和负载电阻消耗功率等于电容吸收的功率。当直流输入电压内阻极小时,可认为直流输入的端电压 u_s 近似不变,结合式(2)、(3)可得:

$$i_L = \frac{p_c + p_R + p_L}{u_s} \quad (4)$$

2 基于电容储能反馈的 Boost 变换器的控制

为了控制 Boost 变换器的电容电压,一般以电容电压作为反馈,而电容电压与电容储能存在一一对应关系,因此可以以电容储能为控制对象,间接实现对电容电压的快速跟踪。电容储能表达式为:

$$E_C = \frac{C}{2} u_0^2 \quad (5)$$

结合式(4)、(5)得:

$$i_L = \frac{1}{u_s} \frac{dE_C}{dt} + \frac{p_R}{u_s} + \frac{p_L}{u_s} \quad (6)$$

式(6)变换到 s 域得:

$$i_L(s) = \frac{sE_C(s)}{u_s} + \frac{p_R(s)}{u_s} + \frac{p_L(s)}{u_s} \quad (7)$$

由式(7)可知,电容储能 $E_C(s)$ 可由电感电流 $i_L(s)$ 控制,从电容储能的能量外环中可以解耦出电流内环的给定电流。得控制对象模型如图 2 所示。

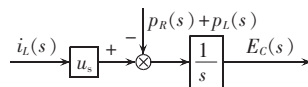


图 2 控制对象模型

Fig.2 Model of control object

基于电容储能的控制策略的外环系统将电容储能 E_C 作为整体反馈,与给定的电容储能值相比较后产生电容充电功率给定 P_c^* ,除以直流输入的端电压 u_s ,产生电感电流给定值。由于电容储能与电容的充电功率构成微分关系,即:

$$E_C = \int p_c dt = \int \left(i_L u_s - \frac{u_0^2}{R} - \frac{L}{2} \frac{di_L^2}{dt} \right) dt \quad (8)$$

根据反馈控制规律,通过控制电容的充电功率 P_c^* 就可以控制电容的储能,设计电容储能环的控制规律为:

$$p_c^* = k_{EP}(E_C^* - E_C) + k_{EI} \int (E_C^* - E_C) dt \quad (9)$$

其中, k_{EP} 为能量外环 PI 调节器的比例参数; k_{EI} 为积分参数。若将负载电阻所消耗的功率和电感储能所消耗的功率进行前馈补偿,可以获得需要从电源吸收的总功率:

$$p_g^* = p_c^* + p_R + p_L \quad (10)$$

因此,内环电感电流给定值为:

$$i_L^* = \frac{p_g^*}{u_s} \quad (11)$$

基于以上分析,得到基于电容储能反馈和负载功率前馈的 Boost 变换器控制策略的控制框图如图 3 所示。

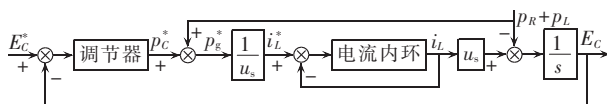


图 3 能量-电流双闭环控制框图

Fig.3 Block diagram of energy-current dual closed-loop control

3 控制系统的设计

3.1 电感电流内环的设计

考虑到电流快速跟踪性能,内环采用电流滞环。当 V_T 导通时,输入端电源对电感充电,电感电流增大;当 V_T 关断时,电感电流对电容充电,电感电流减

小。波形如图 4 所示。

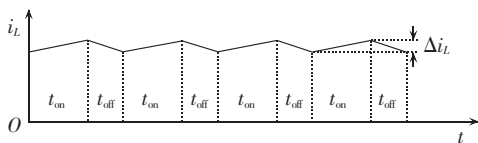


图 4 滞环电流波形

Fig.4 Waveform of hysteresis current

稳态时的开关频率为:

$$f = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = \frac{1}{\frac{\Delta i_L L}{u_s} + \frac{\Delta i_L L}{u_0 - u_s}} = \frac{(u_0 - u_s) u_s}{\Delta i_L L u_0} \quad (12)$$

其中, t_{on} 为一个开关周期内 V_T 的导通时间; t_{off} 为一个开关周期内 V_T 的关断时间; Δi_L 为电流环的滞环宽度。由式(12)可知, 稳态时 V_T 的开关频率是定值。为了保证在启动时开关频率也为定值, 可以通过控制环宽的大小实现。

相对于能量外环, 采用滞环控制的电流内环具有较好的快速性, 可把电流内环等效为一个小惯性环节:

$$W_i(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (13)$$

其中, $\tau_i = 1/f$, 为电流环等效时间常数。

实验时取 $u_0 = 150 \text{ V}$, $u_s = 48 \text{ V}$, $L = 5 \text{ mH}$, $\Delta i_L = 1 \text{ A}$, 则稳态时开关频率 $f = 6.528 \text{ kHz}$ 。

3.2 电容储能外环的设计

电容储能外环采用 PI 调节器, 结合电流内环, 可以得到开环传递模型如图 5 所示。

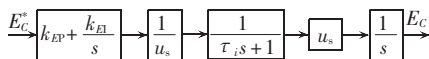


图 5 能量环的开环传递模型

Fig.5 Open-loop transfer model of energy loop

可得开环传递函数为:

$$G_E(s) = \frac{E_C^*(s)}{E_C(s)} = \frac{k_{EI} \left(\frac{k_{EP}}{k_{EI}} s + 1 \right)}{s^2 (\tau_i s + 1)} \quad (14)$$

外环可按典型 II 型系统设计。给定电容储能外环中频带宽 h_p , 由典型 II 型系统控制器参数正定关系得:

$$h_p = \frac{k_{EP}/k_{EI}}{\tau_i}, \quad k_{EI} = \frac{h_p + 1}{2h_p^2 \tau_i^2} \quad (15)$$

一般情况下可取 $h_p = 5$, 代入式(15)得:

$$k_{EP} = \frac{3}{5\tau_i}, \quad k_{EI} = \frac{3}{25\tau_i^2} \quad (16)$$

由于 $\tau_i = 1/f = 0.153 \times 10^{-3} \text{ s}$, 所以 $k_{EP} = 3.9 \times 10^3$, $k_{EI} = 5.1 \times 10^6$ 。由于能量反馈表达式中直流母线电容是一个很小的值(0.0001F), 故 k_{EP} 、 k_{EI} 系数较大。

3.3 负载功率前馈的设计

当 Boost 变换器负载发生变化时, 由于调节器的滞后性, 负载首先与电容发生能量交换, 引起电容电

压发生突变, 为了增强系统的抗干扰性能, 可以采取电阻负载功率前馈补偿的方法, 即 p_R 功率前馈。根据功率表达式, 可写出直流侧功率的前馈估计算法:

$$p_R' = \frac{\sum_{k=1}^K (u_{sk} i_{Lk}^*) \Delta T}{K \Delta T} + \frac{\left(\frac{1}{2} C u_0^2 \right)_K - \left(\frac{1}{2} C u_0^2 \right)_1}{K \Delta T} \quad (17)$$

为了消除系统的采样误差, 应该采用多周期平均值来估计负载功率, ΔT 为采样周期, K 为采样的次数。当采用负载功率前馈补偿后, 对 Boost 变换器的控制可以等效为对其的空载控制, 消除了负载的不确定性对变换器的影响。

4 实验验证与结果分析

为了验证本文提出的控制策略, 搭建了 200 W 的 Boost 变换器实验平台, 硬件电路如图 6 所示, 直流侧电容为 1000 μF , 输入侧电感为 5 mH, 负载电阻为 120 Ω , 输入电压采用 48 V 的蓄电池。实验系统中, 采样直流侧电容电压, 并计算出电容的储能, 储能采样作为能量外环的反馈, 电流采样作为电流内环的反馈。该平台的控制芯片为 Freescale 公司的 DSP MC56F8013, 系统时钟频率为 32 MHz, 芯片内有 6 路 AD 采样和 6 路 PWM 输出。该款 DSP 将 ADC 与 PWM 模块关联, 通过在 ADC 模块中设置上下阈值来实现 PWM 信号的跳变, 从而实现滞环控制。该 DSP 的采样速率可以达到 200 kHz, 完全满足滞环控制的实时性要求。该芯片广泛用于无刷直流电机控制、调光灯镇流器、DC-DC 电源、智能传感器等。

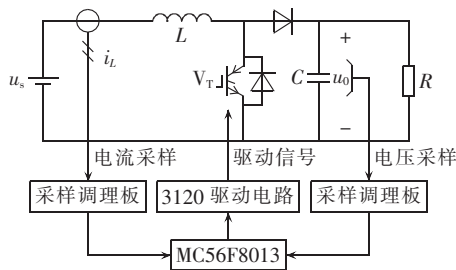


图 6 硬件电路图

Fig.6 Hardware circuit for experiment

图 7 是传统的电压电流双闭环实验波形, 图 8 为本文所提出算法的实验波形。这 2 种控制策略采用相同的内环电流滞环宽度, 外环都按照典型 II 型系统设计。

从图 7 和图 8 可以看出, 在空载启动、突加负载和带载启动 3 种情况下, 传统的电压电流闭环和本文所提出的控制策略的直流母线电压均能够被控制稳定在给定值(150 V)不变。这表明本文所提出的控制策略在稳态时可以满足系统的控制要求。

比较电压电流双闭环控制和能量-电流双闭环控制的动态响应特性, 调节时间为动态过程开始到

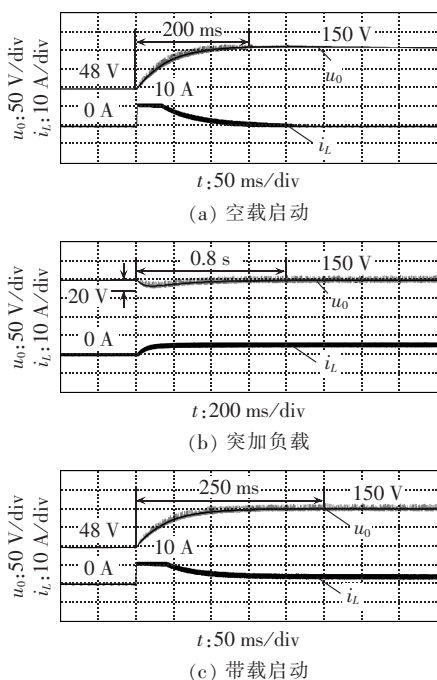


图 7 电压电流双闭环控制策略下 Boost 变换器动态响应

Fig.7 Dynamic response of Boost converter with voltage-current dual closed-loop control strategy

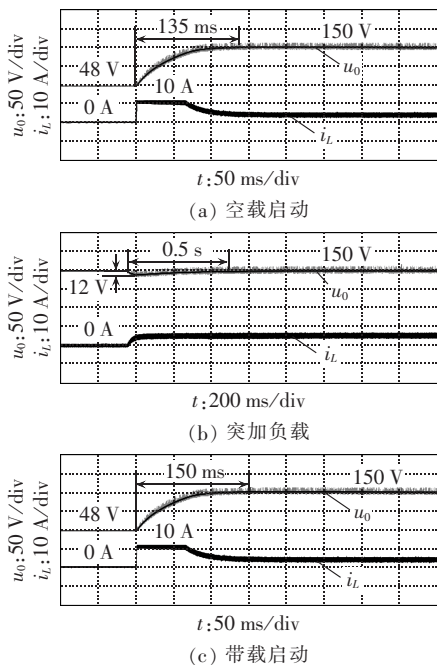


图 8 能量-电流双闭环控制策略下 Boost 变换器动态响应

Fig.8 Dynamic response of Boost converter with energy-current dual closed-loop control strategy

进入稳态值 $\pm 2\text{ V}$ 的时间。可以看出,不管从响应时间还是突加负载后电压跌落值来看,本文所提出的算法都优于传统算法。

本文在能量-电流双闭环控制策略的基础上,加入负载功率前馈补偿。实验中,将估算出的功率全部前馈到能量环中。通过突加负载实验来比较无前馈补偿和有前馈补偿的动态响应特性。比较图 8(b)与图 9 可得出,采用负载功率前馈控制后,系统的动态

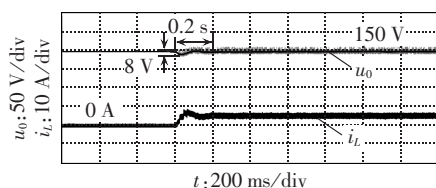


图 9 突加负载且有前馈补偿下的 Boost 变换器动态响应

Fig.9 Response of Boost converter with feedforward compensation to sudden load change

性能得到改善。

5 结论

本文分析了 Boost 变换器的数学模型和功率交换模型,提出了能量-电流双闭环控制策略,并给出了环路设计方法。实验结果表明本文所提出的控制策略能满足系统稳态时的控制要求,并且较传统的电压电流双闭环控制策略启动更快,负载扰动对输出电压的影响更小。

参考文献:

- [1] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2007:10-15.
- [2] 王前,李韬. 基于变结构的协同控制方法及其在 DC/DC 开关变换器中应用[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):31-35.
WANG Qian,LI Tao. Synergetic control based on variable structure and its application in DC/DC converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(4):31-35.
- [3] GUAN Cheng,PAN Shuangxia. Nonlinear adaptive robust control of single-rod electro-hydraulic actuator with unknown nonlinear parameters[J]. IEEE Transactions on Control System Technology,2009,16(3):434-445.
- [4] 钟建伟,杨永超. Boost 变换器的非线性最优控制系统[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):75-77.
ZHONG Jianwei,YANG Yongchao. Nonlinear optimal control system for Boost converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):75-77.
- [5] 刘晓东,邱亚杰,方炜,等. Boost 变换器电容电荷平衡动态最优控制[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):63-66.
LIU Xiaodong,QU Yajie,FANG Wei,et al. Optimal dynamic control based on capacitor charge balance for Boost converter [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):63-66.
- [6] 邓卫华,张波,丘东元,等. 电流连续型 Boost 变换器状态反馈精确线性化与非线性 PID 控制研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(8):45-50.
DENG Weihua,ZHANG Bo,QU Dongyuan,et al. The research of state variable feedback linearization method on the CCM Boost converter and nonlinear PID control law[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(8):45-50.
- [7] 帅定新,谢远祥,王晓刚. 基于状态反馈精确线性化 Buck 变换器的最优控制[J]. 中国电机工程学报,2008,28(33):1-5.
SHUAI Dingxin,XIE Yunxiang,WANG Xiaogang. Optimal control of Buck converter by state feedback linearization[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(33):1-5.
- [8] 高朝晖,林辉,张晓斌. Boost 变换器带恒功率负载状态反馈精确线性化与最优跟踪控制技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(13):70-75.

- GAO Zhaohui, LIN Hui, ZHANG Xiaobin. Exact linearization and optimal tracking control of Boost converter with constant power loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 70-75.
- [9] 尤鋈, 郑建勇. 基于模糊 PI 调节 Boost 电路的光伏系统最大功率点跟踪控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 94-98.
- YOU Jun, ZHENG Jianyong. MPPT of photovoltaic system with Boost circuit based on fuzzy PI control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 94-98.
- [10] 刘锦波, 明文龙. 一种基于输入/输出反馈线性化的 Boost 型 DC/DC 变换器非线性控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 55-61.
- LIU Jinbo, MING Wenlong. A novel scheme of nonlinear control strategy based on input-output linearization for Boost type DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 55-61.
- [11] 王恩德, 黄声华. 三相电压型 PWM 整流的新型双闭环控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(5): 24-30.
- WANG Ende, HUANG Shenghua. A novel double closed loops control of the three-phase voltage-sourced PWM rectifier [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(5): 24-30.
- [12] 郭锦, 罗安, 黎燕, 等. 新型光伏逆变器及其前馈功率预测控制[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 119-123.
- GUO Lu, LUO An, LI Yan, et al. New photovoltaic inverter and its feedforward power predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 119-123.
- [13] 杨勇, 阮毅. 三相并网逆变器直接功率控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 54-59.
- YANG Yong, RUAN Yi. Direct power control for three-phase grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 54-59.
- [14] YIN B, ORUGANTI R, PANDA S K, et al. A simple Single-Input-Single-Output(SISO) model for a three-phase PWM rectifier [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 620-631.
- [15] ZHONG Y, CHEN Y, CHEN D. A linearization voltage control strategy of three-phase PWM rectifier[C]//Proceedings of the Electrical Machines and Systems. Wuhan, China: IEEE, 2008: 819-824.
- [16] 倪靖猛, 方宇, 邢岩, 等. 基于优化负载电流前馈控制的 400 Hz 三相 PWM 航空整流器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 141-146, 164.
- NI Jingmeng, FANG Yu, XING Yan, et al. Three-phase 400 Hz PWM rectifier based on optimized feedforward control for aeronautical application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 141-146, 164.

作者简介:



姜卫东

姜卫东(1976-),男,四川广元人,副教授,研究方向为电机驱动控制、电力电子变流器控制等;

吴志清(1990-),男,安徽马鞍山人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动(E-mail: wuzhiqing1@126.com)。

Control strategy based on DC-link capacitor energy feedback and load power feedforward of Boost converter

JIANG Weidong, WU Zhiqing, HU Yang, SHE Yangyang

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The mathematical model of state space average equation is established for Boost converter and its power transfer relationship is deduced, based on which, a dual closed-loop control strategy is put forward and the corresponding controller is designed. The inner closed-loop adopts the hysteresis current control and the outer closed-loop adopts the PI regulator of DC-link capacitor energy storage. To further improve the system rapidity and reduce the influence of load disturbance on system, the load power feedforward is applied and its power evaluation algorithm is given. The static and dynamic performances are compared by experiments between the traditional voltage-current dual closed-loop control strategy and the proposed control strategy, which shows that, the proposed strategy meets the requirements of steady-state control and has better dynamic performance.

Key words: Boost; electric converters; energy storage; feedback control; electric current control; double closed-loop; load power feedforward; feedforward control