

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.11.025

燃料电池 Buck 变换器的动态演化控制仿真

黄 宸¹, 黄 亮¹, 卢 叶², 全书海¹, 谢长君¹

(1. 武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 北京惠通盛电力工程有限责任公司, 北京 100045)

摘要:针对燃料电池 DC/DC 变换器的工作优化问题,对 DC/DC 变换器的控制方法和输出响应特性进行了研究,提出一种新型控制方法——动态演化控制并将其应用于具体设计的燃料电池两相交错并联同步 Buck 变换器中,论述了该变换器的动态演化控制设计步骤,通过对变换器的特征方程以及动态演化路径进行分析,建立了控制占空比与动态演化方程之间的关系,进而实现对该变换器进行动态演化控制。利用 Matlab-Simulink 仿真平台对两相交错并联同步 Buck 变换器仿真模型分别在动态演化控制和传统 PI 控制下的负载突变输出性能进行了仿真测试。仿真研究结果表明,动态演化控制具备快速的动态响应能力和良好的抗干扰性能,比传统 PI 控制更为优越。

关键词:燃料电池;交错并联同步 Buck 变换器;Matlab-Simulink;动态演化控制

中图分类号:TM911;TP391.9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)11-1436-06

Simulation of dynamic evolution control for fuel cell Buck converter

HUANG Cheng¹, HUANG Liang¹, LU Ye², QUAN Shu-hai¹, XIE Chang-jun¹

(1. College of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Beijing HTSEE Company Limited, Beijing 100045, China)

Abstract: Aiming at optimizing the fuel cell DC/DC converter performance, the control method and output response characters of DC/DC converter were investigated. A new control technique—dynamic evolution control was proposed and applied to an interleaved synchronous Buck converter. After the analysis of converter system and dynamic evolution path, the duty cycle equation based on dynamic evolution control was obtained. Performance of the proposed dynamic evolution control and traditional PI control under step load variation condition was simulated under Matlab-Simulink environment. The simulation results indicate that the proposed control method is superior to traditional PI based controller because of fast transient response and good disturbance rejection.

Key words: fuel cell; interleaved synchronous Buck converter; matlab-simulink; dynamic evolution control(DEC)

0 引 言

与传统发电系统相比,燃料电池具有工作效率高,对环境污染小以及可扩展使用等特点,被视为发展和应用前景最好的新型能源之一,现已广泛应用于便携式、分布式发电以及备用电源等领域^[1]。但是受内部电化学反应的影响,燃料电池的输出动态响应缓慢,无过载能力,需要 DC/DC 变换器作为其输出接口单元来

改善其输出特性^[2]。

动态演化控制(DEC),是基于反馈控制理念,强制输出的偏差按照指定的路径(称这条路径为“演化路径”)趋向于零。与其他先进的控制方法相比,该方法无需对变换器模型进行任何简化或线性化处理,并充分利用了系统的非线性和时变性^[3]。只要知道变换器输出响应的公式,确定了演化路径,就可以求出动态演化控制方程,并根据该方程对变换器

收稿日期:2014-06-13

作者简介:黄 宸(1991-),男,湖北襄阳人,主要从事电力电子开关电源直流-直流变换器方面的研究。E-mail:648542228@qq.com

通信联系人:黄 亮,男,副教授,硕士生导师。E-mail:35644519@qq.com

进行控制。

由于 Buck、Boost 电路应用广泛、控制简单,关于 Buck、Boost 变换器的 DEC 控制已经实验成功,并应用到燃料电池动力汽车 (Fuel Cell Electric Vehicles, ECEV) 供电系统中实现了 Buck/Boost 的双向控制^[4-6]。交错并联技术与同步整流技术的使用,进一步扩大了 Buck、Boost 电路的应用范围。

结合上述两种技术,本研究以两相交错并联同步 Buck 电路为实验平台,设计该变换器的 DEC 控制器。在 Matlab-Simulink 仿真环境下,本研究针对两相交错并联同步 Buck 变换器的 DEC 控制性能通过仿真进行测试。

1 燃料电池

燃料电池是将燃料中的化学能转换为电能输出。只要燃料的供应不断,那么燃料电池就能不断地输出电能。可是,燃料电池的输出极易受到负载的影响,负载所需要的电流越大,燃料电池的输出电压就会被拉得越低^[7]。

实际应用的燃料电池其实是由许多单体燃料电池串并联组成的燃料电池堆,而燃料电池堆还可以继续串并联以获得更高的输出功率和输出电压。燃料电池发电系统如图 1 所示。图 1 中的二极管 D_{FC} 与吸收电容 C_{DC} 用来防止反向电流对燃料电池造成损坏。基于这样一种应用情景以及燃料电池的输出特性,本研究以两相交错并联同步 Buck 变换器作为燃料电池的输出接口电路,在此基础上应用动态演化控制,实现 DC/DC 变换器对燃料电池输出的管控。

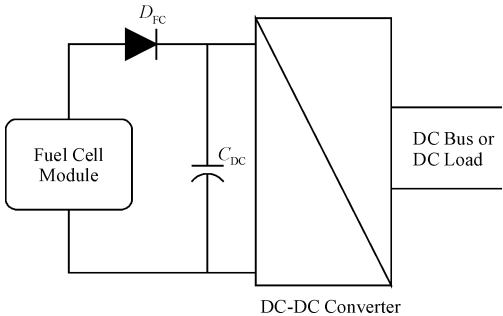


图 1 燃料电池应用情境

2 Buck 变换器

两相交错并联同步 Buck 变换器拓扑如图 2 所示。它是由 2 路基本同步 Buck 变换器并联而成,这两路同步 Buck 变换器的元件参数和开关频率都是相同的,只是控制相位上相差 π 个电角度,即半个周期。每条支

路中的上、下管处于互补工作的状态,这样减小了因使用整流二极管而造成的整流损耗,大大提高了变换器的工作效率。整个 Buck 变换器的输出电流为各支路 Buck 电路输出电流之和,输出电流纹波在开关频率没有改变的情况下频率提高了两倍,从而减小了纹波峰-峰值。同时,交错并联技术也大大减小输出滤波器的尺寸,提高变换器动态响应速度,降低变换器的开关损耗^[8-9]。

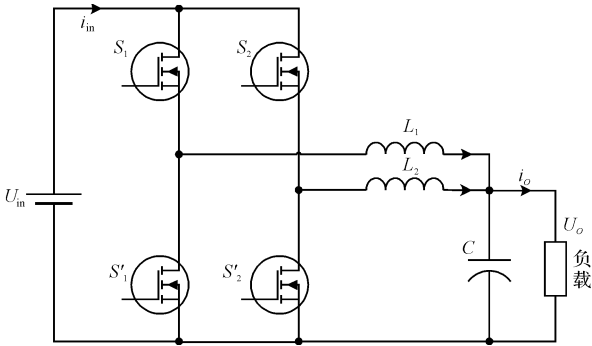


图 2 两相交错并联同步 Buck 变换器

3 动态演化控制设计

DEC 控制显著的特点就是会强制让系统的动态特性按照指定的演化路径进行演化。因此,DEC 设计的第一步是要确定演化路径,以确保系统的偏差按照特定的方式和速率减小至零。演化路径主要由分段线性曲线和指数曲线两种,这里选用指数函数的演化路径,该路径如图 3 所示。

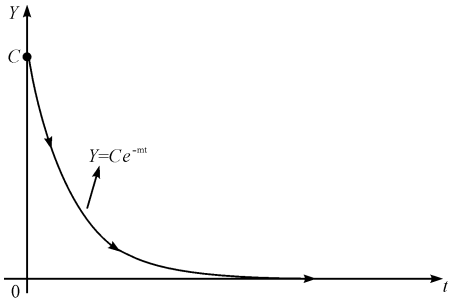


图 3 指数演化路径

该路径的曲线表达式为:

$$Y = C \cdot e^{-mt} \tag{1}$$

式中: Y —系统的动态特征参数; C — Y 的初始值; m —设计参数, $m > 0$; 该值的大小将会影响演化速度的快慢。

根据式(1)对 Y 进行微分整理,则 DEC 控制器的动态演化方程可以写成:

$$\frac{dY}{dt} + m \cdot Y = 0, m > 0 \tag{2}$$

为确保系统的动态特性能够按照演化路径减小至零,必须要获取系统的控制规律。DC/DC 变换器的控制规律对应于变换器的占空比公式 $\alpha(v_o, v_i, i_L)$, 占空比 α 是 v_o, v_i 和 i_L 的函数。该公式可通过对变换器系统的动态方程式进行分解并代入上述的动态演化方程(2)得到。

4 Buck 变换器控制分析

两相交错并联 Buck 变换器是两个 Buck 变换器并联工作。若将输出电压作为控制的目标,则对占空比 α 的分析可以基于一个基本的同步 Buck 变换器上完成^[10]。

根据基尔霍夫电压定律,可以得到同步 Buck 变换器的动态方程式:

$$L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} + v_o(t) = v_i(t) \cdot \alpha(t) \tag{3}$$

式中: L —电感感值; $v_i(t)$ —输入电压; $i_L(t)$ —电感电流; $v_o(t)$ —输出电压; $\alpha(t)$ —占空比。

对该式进行整理,就可以得到输出电压的表达式:

$$v_o(t) = v_i(t) \cdot \alpha(t) - L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \tag{4}$$

要推导出占空比公式,需先定义状态误差函数(Y)的性质。在电力电子领域中,可选择误差电压或误差电流方程作为动态演化方程中的 Y 。本研究假定 Y 是关于输出电压误差的线性函数,表示为:

$$Y = k \cdot v_{err}(t) \tag{5}$$

式中: k ——正比例系数; v_{err} —误差电压;且:

$$v_{err} = V_{ref} - v_o \tag{6}$$

式中: V_{ref} —输出电压的基准目标值。

将式(5)代入式(2),有:

$$k \cdot \frac{dv_{err}}{dt} + m \cdot k \cdot v_{err} = 0 \tag{7}$$

将式(3)和式(7)直接相加后整理得到占空比 α 公式为:

$$\alpha = \frac{k \cdot \frac{dv_{err}}{dt} + m \cdot k \cdot v_{err} + v_o + L \cdot \frac{di_L}{dt}}{v_i} \tag{8}$$

这也就是 Buck 变换器的动态演化控制律,依据该公式对开关管进行控制,就能实现两相交错并联同步 Buck 电路的 DEC 控制。由于式(8)满足动态演化方程式(2),DEC 控制会强制输出误差电压(Y)按照式(1)进行演化,并以 m 决定的减小速率一直减小到 0,达到稳态。

与其他控制策略不同,在 DEC 控制的整个推导过程中,本研究没有对系统模型做任何线性化或简化处理,因此 DEC 控制可以在系统的整个非线性范围内工作。

把式(6)代入替换掉 v_o ,再次整理式(8),得:

$$\alpha = \frac{V_{ref}}{v_i} + \frac{m \cdot k - 1}{v_i} \cdot v_{err} + \frac{k}{v_i} \cdot \frac{dv_{err}}{dt} + \frac{L}{v_i} \cdot \frac{di_L}{dt} \tag{9}$$

可以看出式(9)是由 4 个独立的部分组成。第一部分可称之为反馈项 V_{ref}/v_i ,它是基于前一时刻采样值直接计算得来。第二和第三项分别是输出电压扰动的比例项和衍生(微分)项。最后一项是电感电流的衍生(微分)项。

通过该公式可以清楚地看到,系统的输入电压、输出电压和电感电流都参与了控制过程。这种特性使得 DEC 控制可以补偿任何输入、输出端的扰动,以及电感电流的变化,因而交错并联同步 Buck 变换器会具有更好的动态特性。

5 Matlab-Simulink 仿真结果

5.1 系统模型构建

Matlab-Simulink 仿真环境下有一个专门的模块元件库 SimPowerSystem,它提供了电力电子仿真所需要的元件模型。用户可根据使用该元件库下的元件模块按照实际设计的电路进行建模,构造仿真模型^[11]。本研究在 Simulink 仿真平台上具体构建了 DEC 控制的两相交错并联同步 Buck 变换器仿真模型,该模型如图 4 所示,相关模型参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型参数

参数	指标
开关频率	40 kHz
标准输入电压	72 V
基准输出电压	48 V
电感(L_1, L_2)	60 μ H
输出电容(C)	120 μ F
初始负载(R_1)	2 Ω
附加负载(R_2)	2 Ω

由于交错并联同步 Buck 变换器需要两路 PWM 信号来驱动两组开关,那就需要从单一的 PWM 发生器中生成两组互补交错的 PWM 信号。PWM 信号产生的方法如图 5 所示。当控制信号 V_{st} 大于 V_1 时产生第一路上管的 PWM 信号,当控制信号 V_{st} 小于 V_2 时产生第二路上管的 PWM 信号。相应下管的 PWM 控制信号可通过上管的 PWM 信号取反获得。

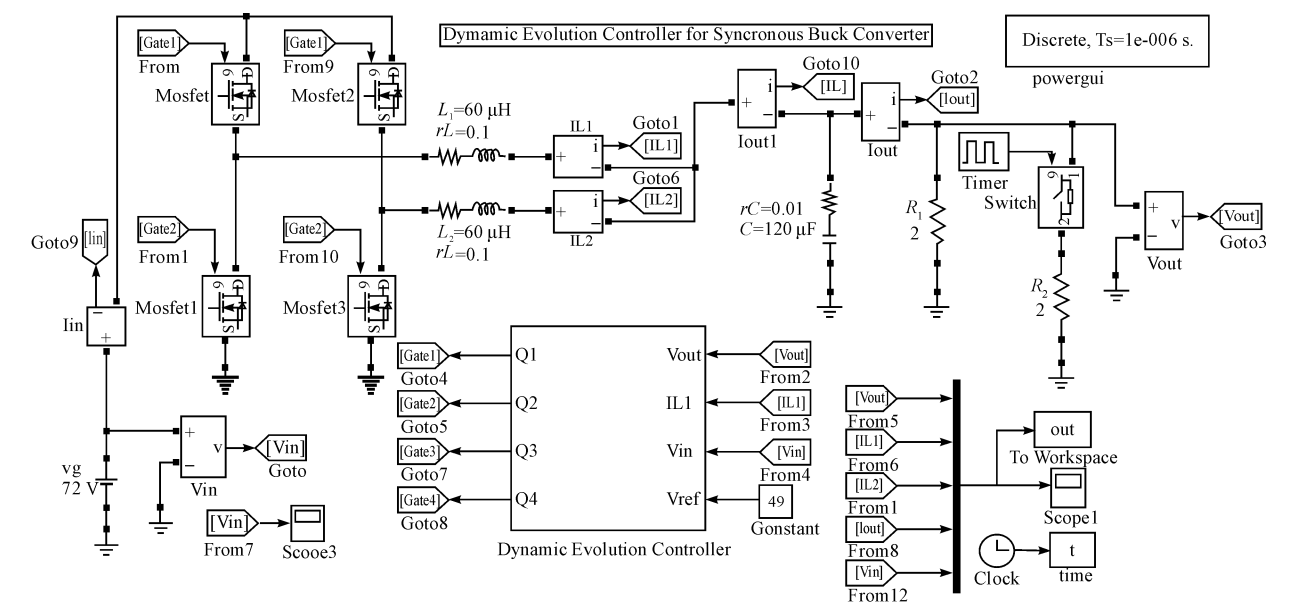


图 4 两相交错并联同步 Buck 变换器仿真模型

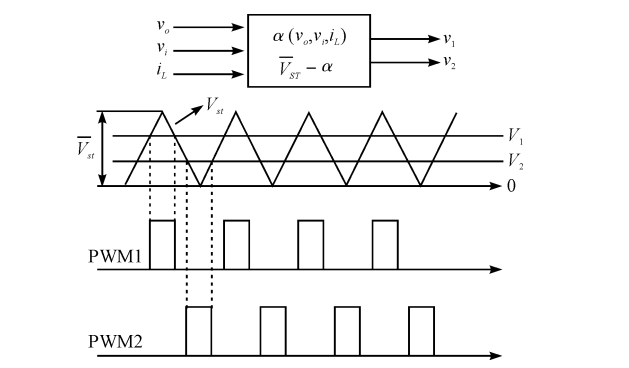


图 5 PWM 发生器

理想的电平控制信号值可按占空比式(8)或式(9)计算得到。控制信号 V_1 和 V_2 的值通过式(10、11)给出,PWM 信号则由式(12)产生:

$$v_1 = \alpha$$

(10)

$$v_2 = \overline{V_{st}} - \alpha$$

(11)

$$\begin{cases} \text{PWM1} = V_{st} > V_1 \\ \text{PWM2} = V_2 > V_{st} \end{cases}$$

(12)

5.2 控制器性能测试

负载突变是电力电子应用中经常遇到的典型问题,在该领域中要求电力供应能对负载突变做出快速响应并进行补偿。因而设计了变换器系统分别在恒定输入电压和带交流纹波输入电压下,负载阶跃变化的 DEC 仿真实验。参考输出电压设定为 72 V,负载每 20 ms 在 $1\ \Omega \sim 2\ \Omega$ 之间发生突变。设定的控制器参数 $k=1, m=22\ 000$ 。

5.2.1 恒定输入负载突变情况下的仿真

在恒定的输入电压下,负载发生突变的仿真结果

如图 6 所示。输入恒定设置为 72 V,每 20 ms 发生一次负载突变。由图 6 可以看出,相应的负载电流会在约 24 A ~ 48 A 这两个值间变动。在负载突加的瞬间,输出电压会有约 4 V 左右的下降,但是通过动态演化的闭环控制,系统在 0.2 ms 内就能补偿使输出维持在 48 V。根据这个仿真结果可以说,在 72 V 基准稳态电压输入下,控制器完成了控制变换器输出电压的任务。

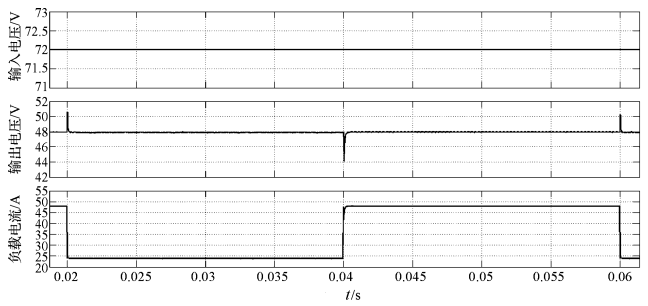


图 6 恒定输入负载突变下的仿真波形

5.2.2 变动输入负载突变情况下的仿真

本研究在 72 V 恒定直流电压上叠加一个 100 Hz, 5 V 的交流电压纹波形图(如图 7 所示)再次进行仿真。同样每隔 20 ms 发生一次负载突变(突增或突减)。输出的负载电流仍会在 24 A ~ 48 A 之间变化。在负载突加的瞬间,输出电压也会出现约 4 V 的下降,但系统能在 0.2 ms 内完全消除该压降。所得到的结果与上一小节所示结果是一样的,这就表明了动态演化控制器完全消除了输入电压纹波对输出的干扰。显然,上述控制器具备良好的抗干扰性能和快速响应能力,其表现令人满意。

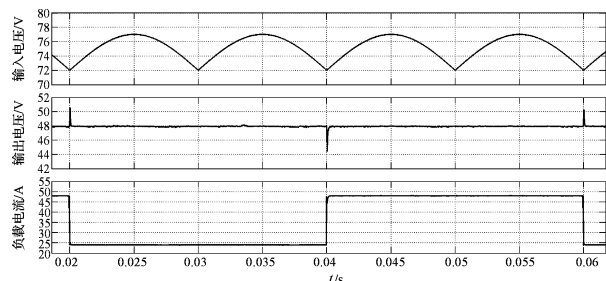


图7 变化输入负载突变下的仿真波形

5.3 DEC 与 PI 控制性能比较

当前,PI 控制在电力电子中运用的最为广泛。为了进一步说明 DEC 的优越性,本研究设计了一个基于 PI 控制的交错并联同步 Buck 变换器的仿真实验与上述 DEC 仿真进行对比。参数设定与表 1 完全一致,经过试凑,本研究设定 PI 控制器的比例系数 $P = 1.2$,积分系数 $I = 120$ 。

5.3.1 负载调节性能

输入电压为 72 V,每隔 20 ms 负载变化一次,仿真波形如图 8 所示。

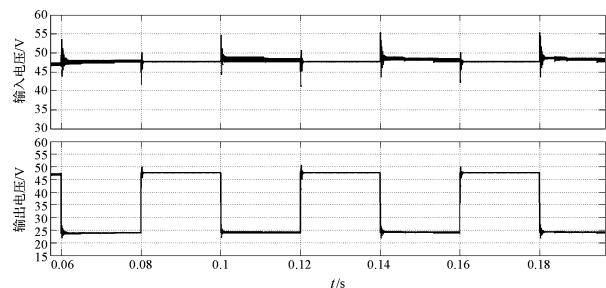


图8 恒定输入负载突变下的 PI 控制仿真波形

与负载变化相一致,相应的负载电流在 24 A ~ 48 A 这两个值间变动。在负载突加的瞬间,输出电压会有约 5 V 左右的下降,基于 PI 控制的系统需 1 ms 才能使输出重新维持在 48 V,并且稳定后的输出电压一直会有 500 mV 的上下波动。跟动态演化控制相比,在恒定输入电压下,显然动态演化控制的动态响应和输出电能质量都比 PI 控制的高。

5.3.2 输入调节性能

恒定的 72 V 输入叠加一个 100 Hz, 5 V 的交流电压纹波,负载条件不变,仿真得到的波形如图 9 所示。

跟动态演化控制相比,此时 PI 控制对于来自输入端的干扰不能进行补偿。虽然负载电流仍然在 24 A ~ 48 A 两个大约值之间突变,但明显不够稳定。在负载

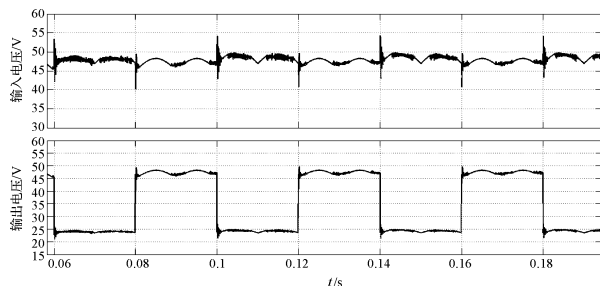


图9 变化输入负载突变下的 PI 控制仿真波形

突加的瞬间,输出电压会有将近 6 V 的下降,需要 2 ms 才能完全消除该压降。该波形结果说明在输入有干扰影响时,PI 控制器的控制性能将大打折扣,从而进一步说明了动态演化控制器的优越性。

6 结束语

本研究详细论述了两相交错并联同步 Buck 变换器的 DEC 设计思路以及 DEC 控制的实现。通过在两相交错并联同步 Buck 变换器的 Simulink 仿真模型上与传统的 PI 控制进行仿真比较,DEC 控制在变换器系统输入输出有干扰的情况下,都具有很好的抗干扰性能和快速的响应能力。无论从设计繁简程度和控制性能来说,动态演化控制都优于传统的 PI 控制。

与 PI 控制相比,DEC 控制器的优点有:

(1) 动态演化控制只需对一个参数 m 进行调整,而 PI 控制需要调整比例因子和积分因子两个参数,而这两个参数又会相互影响,通常只能试凑和实验得到大致的 PI 值。

(2) 对输入和输出电压的变化具有很好的动态响应。

(3) 响应速度快,鲁棒性好。

但是 DEC 有一个缺陷,从式(8,9)可以看出,占空比的计算有一个除法项,这使得 DEC 控制很难用模拟电路的形式实现。

参考文献 (References):

- [1] 陈敬生,王兴杰. 燃料电池在通信行业大有可为[J]. 华为技术,2011,12(58):37-38.
- [2] 古云蛟,朱新坚,邵 孟,等. 通讯基站大功率 PEMFC 备用电源 DC/DC 变换器的设计与应用[J]. 微型电脑应用,2013,29(4):1-4.

(下转第 1458 页)

本文引用格式:

黄 宸,黄 亮,卢 叶,等. 燃料电池 Buck 变换器的动态演化控制仿真[J]. 机电工程,2014,31(11):1436-1440,1458.

HUANG Cheng, HUANG Liang, LU Ye, et al. Simulation of dynamic evolution control for fuel cell Buck converter[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(11):1436-1440,1458.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

页与用户进行交互,显示动态曲线、实时数据等^[10]。

全钢三复合挤出生产线监控画面如图 4 所示。该系统实现了对全钢子午轮胎生产线的实时监控。

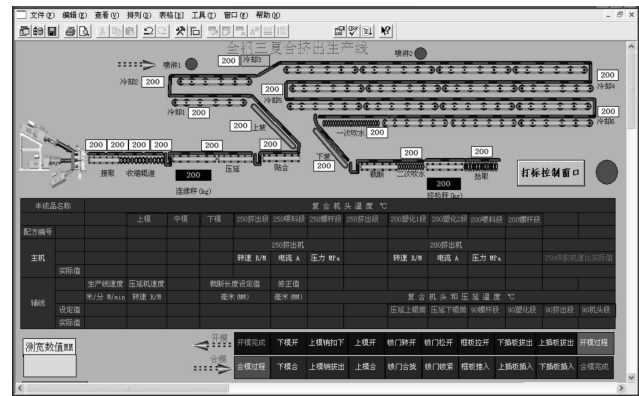


图 4 全钢三复合挤出生产线监控图

4 结束语

针对全钢子午线轮胎生产的工艺特点,结合工业以太网、数据库、互联网等技术设计了基于 OPC 的轮胎生产过程监控系统。经过现场调试,研究表明,系统通过控制层实现对生产现场设备的控制,达到生产要求,现场技术人员通过本地监控实现对生产线的实时监控,同时将传统的本地监控系统拓展到远程监

控,可以实现企业跨地区对生产的一体化监控、管理和诊断,有效提高企业对生产管理的控制能力。

参考文献 (References):

[1] 张晓峰,马铁军,李广凌. 轮胎生产过程 MES 系统研究与应用[J]. 中国制造业信息化,2008,37(5):18-21.

[2] CHEN Ting. The research of CNC machine monitoring system based on OPC and configuration[J]. **Applied Mechanics and Materials**,2013(340):809-813.

[3] 曲照伟,曾凡琳,马双华. 子午线轮胎制造过程监控系统[J]. 轮胎工业,2009,29(6):364-367.

[4] 姚红,王兴虎. 远程监控技术应用浅析[J]. 大众科技,2102,14(150):68-70.

[5] 林礼贵. 轮胎生产工艺[M]. 北京:化学工业出版社,2008.

[6] 甘霖. 胎面挤出联动线监控系统研究与开发[D]. 武汉:武汉理工大学自动化学院,2009.

[7] 廖常初. 西门子工业通信网络组态编程与故障诊断[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

[8] 苏磊,李茜,汤伟. OPC 数据访问客户端的研究与实现[J]. 计算机工程,2010,36(11):80-82.

[9] 苗岱江,邢建国,张华. 基于 C/S 模式的轮胎胶囊硫化机[J]. 计算机应用技术,2009,36(7):35-38.

[10] 叶潇,何登平. 基于 web 服务器的在线监控系统研究[J]. 数字技术与应用,2013(8):36-37.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

吴晗,杨颖,周亚军. 基于 OPC 的子午线轮胎生产过程监控系统[J]. 机电工程,2014,31(11):1455-1458.

WU Han, YANG Ying, ZHOU Ya-jun. Tire production process monitoring system based on OPC[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014,31(11):1455-1458.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第 1440 页)

[3] SAMOSIR A S, YATIM A M. Dynamic evolution control for synchronous buck DC-DC converter: theory, model and simulation[J]. **Simulation Modelling Practice and Theory**, 2010(18):663-676.

[4] SAMOSIR A S, YATIM A H. Implementation of dynamic evolution control of bidirectional DC-DC converter for interfacing ultracapacitor energy storage to fuel-cell system[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2010, 57(10):3468-3473.

[5] SAMOSIR A S, YATIM A H M. Dynamic Evolution Control of Bidirectional DC-DC Converter for Interfacing Ultracapacitor Energy Storage to Fuel Cell Electric Vehicle System [C]//Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities;[s. n.],2008:1-6.

[6] SAMOSIR A S, SUTIKNO T, YATIM H M Y. Dynamic evolution control for fuel cell DC-DC converter [J].

Telkomnika,2011,9(1):183-190.

[7] YU X, STARKE M R, TOLBERT L M, et al. Fuel cell power conditioning for electric power applications: a summary[J]. **Electric Power Applications, IET**, 2007,1(5):643-656.

[8] 赖联有. 两相交错并联同步 Buck 变换器的设计与仿真[J]. 电源技术,2012,136(8):1162-1212.

[9] 李冬,张相军. 交错并联 Buck 变换器设计及仿真分析[J]. 电气传动,2013(S1):79-81.

[10] SAMOSIR A S, ANWARI M, YATIM A H M. Dynamic Evolution Control of Interleaved Boost DC-DC Converter for Fuel Cell Application [C]//IPEC, 2010 Conference Proceedings, Chennai:[s. n.],2010:869-874.

[11] 朱春华,王建国. Matlab/Simulink 在 DC-DC 变换器仿真中的应用[J]. 现代电子技术,2008(18):23-25.

[编辑:李辉]