

DOI: 10.7667/PSPC152160

# 固体氧化物燃料电池发电系统模型建立及逆变器仿真研究

魏立明, 吕雪莹

(吉林建筑大学电气与计算机学院, 吉林 长春 130118)

**摘要:** 以固体氧化物燃料电池发电系统为研究对象, 以释放变换器上电感能量, 减少电容充电时间为目的, 提出了在 DC/DC 变换器中增加一个反激式绕组。该反激式绕组的输出端、接地端分别与 DC/DC 变换器的输出端、输出接地端相连, 构成输出回路, 以释放输入电感启动时多余能量, 保证输出直流母线电压的稳定性。逆变器输出电压控制采用模糊 PID 控制策略, 可在固体氧化物燃料电池输出电压不稳定时, 通过监测该系统的输出电压和给定电压差值, 在线调整  $K_p$ 、 $K_d$ 、 $K_i$  控制输出量。该控制策略与传统 PID 控制策略进行了比较, 比较结果证明其性能优于传统 PID 控制策略。采用 Matlab 软件搭建系统模型, 固体氧化物燃料电池发电系统的仿真研究验证了以上的理论分析。

**关键词:** 燃料电池; 隔离型全桥变换器; DC/AC 逆变器; 滤波器; Matlab 仿真

## Solid oxide fuel cell power generation system model and study on inverter simulation

WEI Liming, LÜ Xueying

(School of Electrical and Computer, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** Based on the study of the solid oxide fuel cell power generation system, and to release the energy of converter inductance and reduce the charging time of capacitance for the purpose, adding a flyback winding in DC / DC converter is proposed. Its output terminal and ground terminal are connected with the DC / DC converter output terminal and the output ground terminal separately, forming the output circuit and releasing excess energy when the input inductor starts, to ensure the stability of the output voltage of the DC/DC bus. Fuzzy PID control strategy is used in inverter output voltage control, by monitoring the system output voltage and the given voltage based on-line adjust  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$  control output, when solid oxide fuel cell output voltage is instable. Comparative results show that its performance is superior to the traditional PID control strategy. The simulation of the solid oxide fuel cell power generation system has verified the above theoretical analysis by using Matlab software to build the model system.

**Key words:** fuel cell; isolated boost full bridge converter; DC/AC inverter; filter; Matlab simulation

## 0 引言

燃料电池发电系统是友好的、无污染的、高效率的发电技术之一, 其零污染的优点使其拥有广泛的应用。其中 SOFC 的转换效率相比其他的燃料电池高, 使用周期长, 提高了人们对 SOFC 研究的关注度。文献[1]研究 SOFC 的模型、电化学特性, 提出了平板状阳极支撑 SOFC。文献[2]采用 BOOST 升压变换器, 已经将 SOFC 的低压电升为 450 V 直流电, 但是其刚开始充电时, 电压升压不稳定, 振荡严重。文献[3]只针对 DC/AC 逆变部分进行设计, 对 DC/DC 变换部分的设计较粗糙, 不能准确地反映出 SOFC 的响应特征。针对以上提出的问题再结合 SOFC 发电系统本身的特点, 本文提出了包括

SOFC 模块、改进型隔离升压变换器、单相全桥逆变器、LC 滤波器的系统模型。逆变系统采用模糊 PID 控制技术, 改善了输出电压的稳定性, 减小了超调量。DC/DC 变换器增加一个反击式绕组, 负载由 1 000 W 突变为 500 W 时系统也可以正常运行。由仿真结果分析了 SOFC 正常工作响应特性, 验证了本文设计要求符合理论知识。

## 1 固体氧化物燃料电池模型

### 1.1 固体氧化物燃料电池建模

燃料电池的制取是燃料和氧气的结合, 由化学能直接生成电能, 在装置的阳极输入燃料, 阴极输入氧化物(氧化物常为空气或者氧气), 阴极的氧气由于其自身的催化作用, 使  $O_2$  得到 2 个电子成为

$O^{2-}$ , 然后  $O^{2-}$  通过电解质到达阳极与燃料发生化学反应, 最终失去的电子又回到了阴极。此外, 其生成的氧化产物不是构成燃料电池的一部分, 燃料和氧化物可以不间断的供应产生电能<sup>[4]</sup>, 图 1 是单体固体氧化物的制取原理。

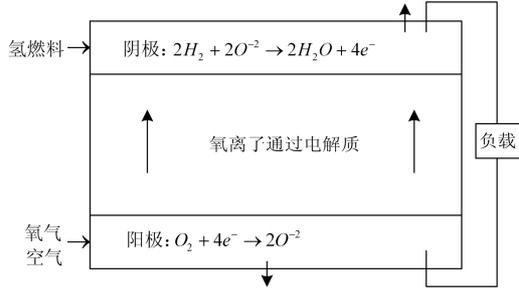


图 1 单体燃料电池制取原理

Fig. 1 Single fuel cell preparing principle

与燃料电池相比, 传统的可充电式电池由电极的化学能变成电能, 当电能枯竭时它需要一个从电力系统中再生化学能的过程。然而, 燃料电池是从外界供给的燃料中获取化学能, 燃料电池有很高转换效率, 转换效率为 50%~60%, 电化学反应会产生热量, 当燃料电池和热能与电能(热电联供)联合时会产生更高的转换效率, 可高达 85%。公式(1)是燃料电池与热电联产联合产生的效率。

$$\eta_{\text{Total}} = \frac{Q + E}{m_{\text{H}_2} \cdot \text{LHV}_{\text{H}_2}} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为获得的热量;  $E$  为燃料电池产生的电能;  $m_{\text{H}_2}$  为氢气流量;  $\text{LHV}_{\text{H}_2}$  为氢气低加热功率。

SOFC 工作温度由原来的 800~1 000 $^{\circ}\text{C}$  下降到 600 $^{\circ}\text{C}$  以下, 大大减少设备损坏程度, 提高 SOFC 的稳定性。燃烧物质来源于天然气、煤气、沼气, 电解质为固体陶瓷。假定气体是理想的, 工作在温度均匀恒温的条件下<sup>[1]</sup>。

$$\begin{cases} \frac{q_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2}} = \frac{K_{\text{an}}}{\sqrt{M_{\text{H}_2}}} = K_{\text{H}_2} \\ \frac{q_{\text{O}_2}}{p_{\text{O}_2}} = \frac{K_{\text{ca}}}{\sqrt{M_{\text{O}_2}}} = K_{\text{O}_2} \\ \frac{q_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{K_{\text{an}}}{\sqrt{M_{\text{H}_2\text{O}}}} = K_{\text{H}_2\text{O}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $q_{\text{H}_2}, q_{\text{O}_2}, q_{\text{H}_2\text{O}}$  分别为  $\text{H}_2, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O}$  的摩尔流量 ( $\text{kmol/s}$ );  $p_{\text{H}_2}, p_{\text{O}_2}, p_{\text{H}_2\text{O}}$  分别为  $\text{H}_2, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O}$  的压力;  $K_{\text{H}_2}, K_{\text{O}_2}, K_{\text{H}_2\text{O}}$   $\text{H}_2, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O}$  的阀摩尔常数, ( $\text{kmol/s} \cdot \text{atm}$ );  $M_{\text{H}_2}, M_{\text{O}_2}, M_{\text{H}_2\text{O}}$  分别为

$\text{H}_2, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O}$  的分子量, ( $\text{kg/kmol}$ )。

由理想气体状态方程可知氢气、氧气、水蒸气的偏微分方程为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} p_{\text{H}_2} = \frac{RT}{V_{\text{an}}} (q_{\text{H}_2}^{\text{in}} - q_{\text{H}_2}^{\text{out}} - q_{\text{H}_2}^{\text{r}}) \\ \frac{d}{dt} p_{\text{O}_2} = \frac{RT}{V_{\text{ca}}} (q_{\text{O}_2}^{\text{in}} - q_{\text{O}_2}^{\text{out}} - q_{\text{O}_2}^{\text{r}}) \\ \frac{d}{dt} p_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{RT}{V_{\text{an}}} (q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{in}} - q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{out}} - q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{r}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $V_{\text{an}}$  为燃料电池阳极体积;  $V_{\text{ca}}$  为燃料电池阴极体积;  $R$  为通用气体常数;  $T$  为工作温度;  $q_{\text{H}_2}^{\text{in}}, q_{\text{O}_2}^{\text{in}}, q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{in}}$  为  $\text{H}_2, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O}$  的输入摩尔流量;  $q_{\text{H}_2}^{\text{out}}, q_{\text{O}_2}^{\text{out}}, q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{out}}$  为  $\text{H}_2, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O}$  的输出摩尔流量;  $q_{\text{H}_2}^{\text{r}}, q_{\text{O}_2}^{\text{r}}$  为  $\text{H}_2, \text{O}_2$  气体反应消耗的摩尔流量;  $q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{r}}$  为生成的摩尔流量, 单位( $\text{mol/s}$ )。

根据燃料电池基本电化学反应关系可知: 氢气、氧气和水蒸气气体反应消耗的摩尔流量如式(4)。

$$\begin{cases} q_{\text{H}_2}^{\text{r}} = \frac{N_0 I}{2F} = 2K_{\text{r}} I \\ q_{\text{O}_2}^{\text{r}} = K_{\text{r}} I \\ q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{r}} = 2K_{\text{r}} I \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $N_0$  为串联电池的数量;  $I$  为燃料电池电堆的电流;  $F$  为法拉第常数,  $96487 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

氢气、氧气、水蒸气的输出流量为

$$\begin{cases} q_{\text{H}_2}^{\text{out}} = K_{\text{H}_2} p_{\text{H}_2} \\ q_{\text{O}_2}^{\text{out}} = K_{\text{O}_2} p_{\text{O}_2} \\ q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{out}} = K_{\text{H}_2\text{O}} p_{\text{H}_2\text{O}} \end{cases} \quad (5)$$

将式(3)、式(4)代入式(2)中, 进行拉普拉斯变换得到式(6)。

$$\begin{cases} p_{\text{H}_2} = \frac{1/K_{\text{H}_2}}{1 + \tau_{\text{H}_2} s} (q_{\text{H}_2}^{\text{in}} - 2K_{\text{r}} I_i) \\ p_{\text{O}_2} = \frac{1/K_{\text{O}_2}}{1 + \tau_{\text{O}_2} s} (q_{\text{O}_2}^{\text{in}} - K_{\text{r}} I_i) \\ p_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1/K_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + \tau_{\text{H}_2\text{O}} s} \cdot 2K_{\text{r}} I_i \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\tau_{\text{H}_2}, \tau_{\text{O}_2}, \tau_{\text{H}_2\text{O}}$  分别为气体相应的时间,  $\tau_{\text{H}_2} = V_{\text{an}} / K_{\text{H}_2} RT$ ,  $\tau_{\text{O}_2} = V_{\text{ca}} / K_{\text{O}_2} RT$ ,  $\tau_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{an}} / K_{\text{H}_2\text{O}} RT$ ;  $K_{\text{r}}$  为常数。

$$V = N_0 \left( E_0 + \frac{RT}{2F} \left[ \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \right) - rI \quad (7)$$

式中:  $I$  为电堆电流;  $r$  为电堆的欧姆极化损失电阻。

## 1.2 固体氧化物燃料电池仿真分析

如图 2 所示, 从零开始电压迅速上升, 约 15 s 电压增加接近到 274 V, 达到电压的峰值, 15~200 s 电压开始迅速下降, 200 s 后电压随时间的增加而逐渐减小, 此时电压下降的幅度已经很小, 370 s 下降到 253.2 V 达到稳定值。

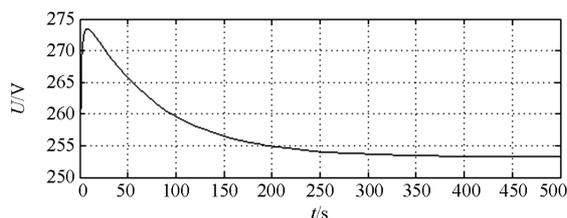
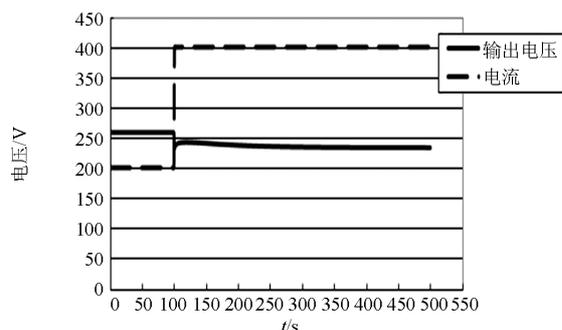


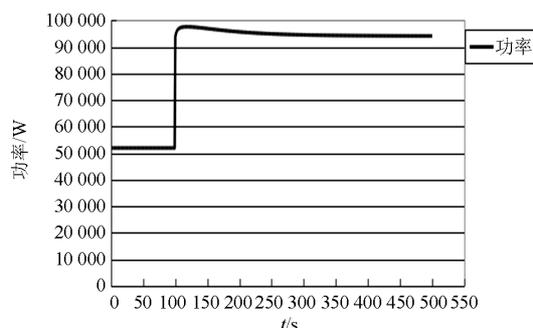
图 2 固体氧化物燃料电池输出电压

Fig. 2 Solid oxide fuel cell output voltage

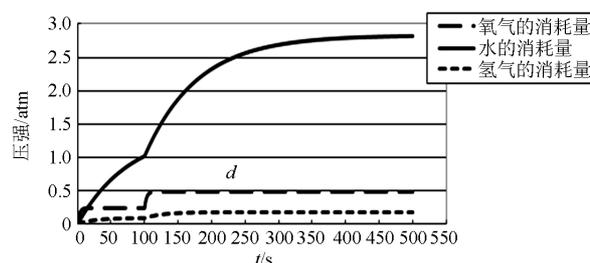
当  $t=100$  s 时, 负荷电流从 200 A 阶跃到 400 A, SOFC 的电压瞬态响应, 功率瞬态响应, 氢气、氧气和水消耗量的变化曲线如图 3 所示。当电流发生变化时, 氢气、氧气和水的消耗量接近 20 s 达到稳定值, 而电压和功率 20 s 后变化的幅度已经很小了, 250 s 时即可达到稳定值。



(a) 电压瞬态响应



(b) 功率瞬态响应



(c) 氢气、氧气和水消耗量的瞬态响应

图 3 电流从 200 A 阶跃到 400 A 时固体氧化物燃料电池的反应特性

Fig. 3 Response characteristics of the current time step 200 A to 400 A of solid oxide fuel cell

## 2 固体氧化物燃料电池发电系统模型

固体氧化物燃料电池发电系统模型如图 4 所示, 由固体氧化物燃料电池模块、隔离型全桥升压变换器、单相全桥逆变器、滤波器组成。燃料电池电堆输出低压直流电, 前级逆变部分采用隔离型全桥升压变换电路, 提高直流母线电压供给后级逆变器<sup>[5]</sup>, 后级逆变器接收到稳定的高压直流电后经滤波器滤除高次谐波的干扰。



图 4 固体氧化物燃料电池发电系统结构图

Fig. 4 Solid oxide fuel cell power generation system architecture diagram

### 2.1 DC/DC 变换器

固体氧化物燃料电池的负荷功率变化时, 电压波动范围在 28~43 V 之间, 隔离型升压全桥变换器目的就是将燃料电池电堆输出的低压电升为满足 DC/AC 逆变需要的直流母线电压<sup>[6-7]</sup>, 常规单级逆变结构无法满足固体氧化物燃料电池的逆变要求, 固体氧化物燃料电池需要两级逆变, 由于固体氧化物燃料电池自身是一个热电联合系统, 燃料电池电压不稳定, 前级变换结构的设计必须接受大范围电压、电流, 限流和响应速度快的功能。

本文在隔离型升压变换器基本电路的基础上在输入电感上增加了一个反激式绕组, 目的是将电感无法释放的能量通过其得到释放, 传递给负载, 延长设备的寿命时间, 并且启动速度快, 充电时间短, 可实现快速升压的功能<sup>[8-9]</sup>。输出的直流电压偏差信号经 PI 环节再由 PWM 进行调制, 得到占空比控制功率开关工作, 电压反馈采用传统的 PI 滞后补偿控

制<sup>[10-11]</sup>。图 5 为改进型全桥升压变换器。软启动方案为当占空比  $0 < D < 0.5$ , DC/DC 变换器处于 Buck 工作模式。此时反激式绕组工作,在 2on 阶段,  $Q_1, Q_4$  或者  $Q_2, Q_3$  导通, 能量经过变压器 T 传递给负载, 在 4off 阶段,  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  同时关断, 电感上未能得到释放的能量通过反激式绕组输出至输出端。占空比为  $0.5 < D < 1$ , 处于 Boost 工作模式, 此时, 反激式绕组不工作, 在 4on 阶段,  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  状态相同时, 桥臂短路, 电感充电, 在 2off 阶段,  $Q_1, Q_4$  或者  $Q_2, Q_3$  导通, 电源、电感经变压器 T 为负载供电<sup>[12]</sup>。图 6(a)、(b)分别为 Buck 模式时序图和 Boost 模式时序图。

2.2 DC/AC 逆变器

后级逆变器采用单相全桥逆变器是将前级变换器输出的高压电逆变为满足负载正常使用的交流电<sup>[13-14]</sup>, 本文中, 在两级变换的电路之间额外增加一级滤波电路, 能减少电源的负载需求容量, 提高发电效率<sup>[15]</sup>。

考虑到固体氧化物燃料电池输出电压受温度、压力、流量的影响大, 提高固体氧化物燃料电池发电系统为用户供电的稳定性, 单相全桥逆变器采用

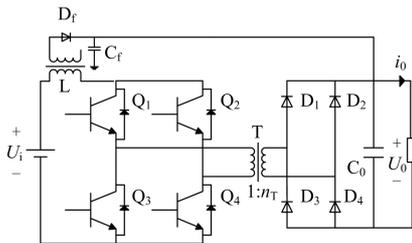
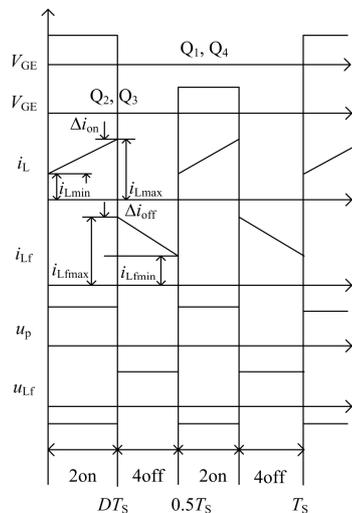
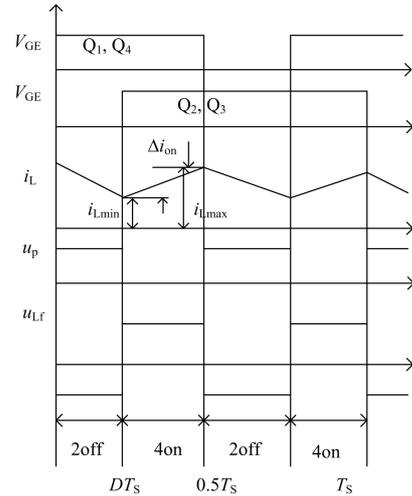


图 5 改进型 DC/DC 变换器  
Fig. 5 Improved DC / DC converter



(a) Buck工作模式时序图



(b) Boost工作模式时序图

图 6 DC/DC 变换器两种工作模式时序图

Fig. 6 DC / DC converter timing diagram of two operating modes

模糊 PID 控制技术。开环传递函数  $G_0(S) = \frac{K_0 K_p (T_i S + 1)}{T_i S^2 (TS + 1)}$ , 式中:  $K_0$  为常数;  $K_p$  为比例系数;

$T_i$  为积分时间常数, 采用 Ziegler-Nichols 整定公式计算出  $K_p, K_d, T_i$ , 模糊 PID 控制技术通过监测固体氧化物燃料电池系统输出电压和给定电压差值, 在线调整  $K_p, K_d, T_i$ , 进而得到输出控制量。图 7、图 8 分别为传统 PID 控制技术阶跃响应图和模糊 PID 控制技术阶跃仿真图, 从图 7 中可以看出, 0~15 s 之间曲线上升平稳, 16 s 后即达到平稳状态, 与传统 PID 控制技术相比, 模糊 PID 控制技术超调量小, 控制过程无震荡发生, 响应速度快、并且具有很好的鲁棒性。固体氧化物燃料电池单相全桥逆变器电路的输出电压波形同时含有高次谐波和低次谐波<sup>[16-17]</sup>, 为了保证输出波形的稳定性, 本文中增加滤波器<sup>[18]</sup>, 图 9 为滤波器的结构图。图中:  $L_{f1}, L_{f2}$  和  $L_{f3}$  为普通的电感,  $CMR-L_f$  为共模抑制电感,  $C_{f3}$  和  $C_{f4}$  的作用为对输出电压差模干扰的控制。

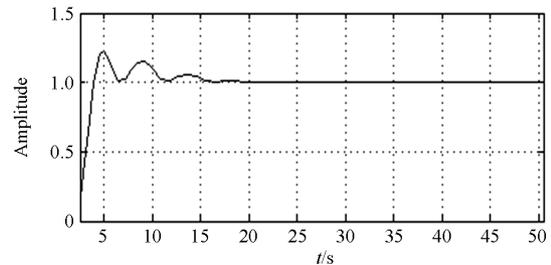


图 7 传统 PID 控制图

Fig. 7 Traditional PID control chart

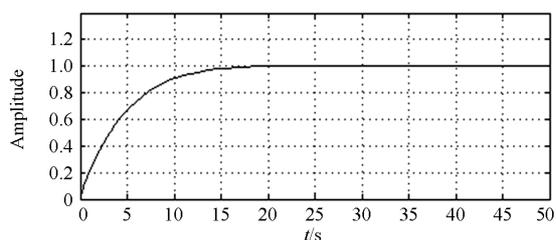


图 8 模糊 PID 控制图

Fig. 8 Fuzzy PID control chart

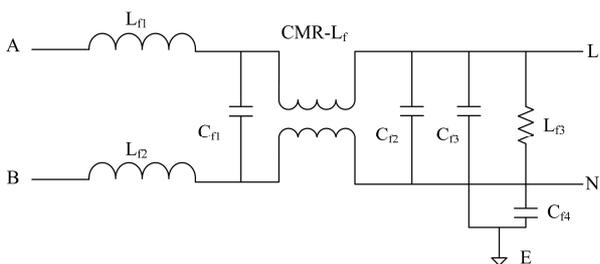


图 9 滤波器结构图

Fig. 9 Filter structure diagram

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 仿真结果分析

根据以上的设计方法, 基于 Matlab 软件对固体氧化物燃料电池的发电系统进行系统模型搭建。图 10 为逆变器仿真模型。

图 11、图 12 分别为 Boost 升压变换器和改进隔离型升压变换器的直流母线电压的仿真图。图 11 为 SOFC 发电系统升压变换器从 0~1.5 s 升压的过程, 从零开始电压快速上升, 0.5 s 达到理想值, 0.75~0.82 s 时负载发生突变功率从 1 000 W 下降到 500 W, 此时, 电压迅速恢复到理想状态, 0.83 s 后达到稳定值, 给后级逆变器提供稳定的直流母线电压, 输出的电压波形平滑。相比 Boost 变换器, 其升压震动小, 充电时间快。由图 13 中可以得出, 单相全桥逆变器将 DC/DC 升压变换器输出的高压直流电逆变为正弦交流电, 输出正弦 220 V/50 Hz 的电压波形稳定, 当负载发生突变时 DC/AC 逆变器正常运行。因此, 通过 Matlab/Simulink 软件仿真结果可知, 以上对 SOFC 发电系统逆变器的设计符合要求。

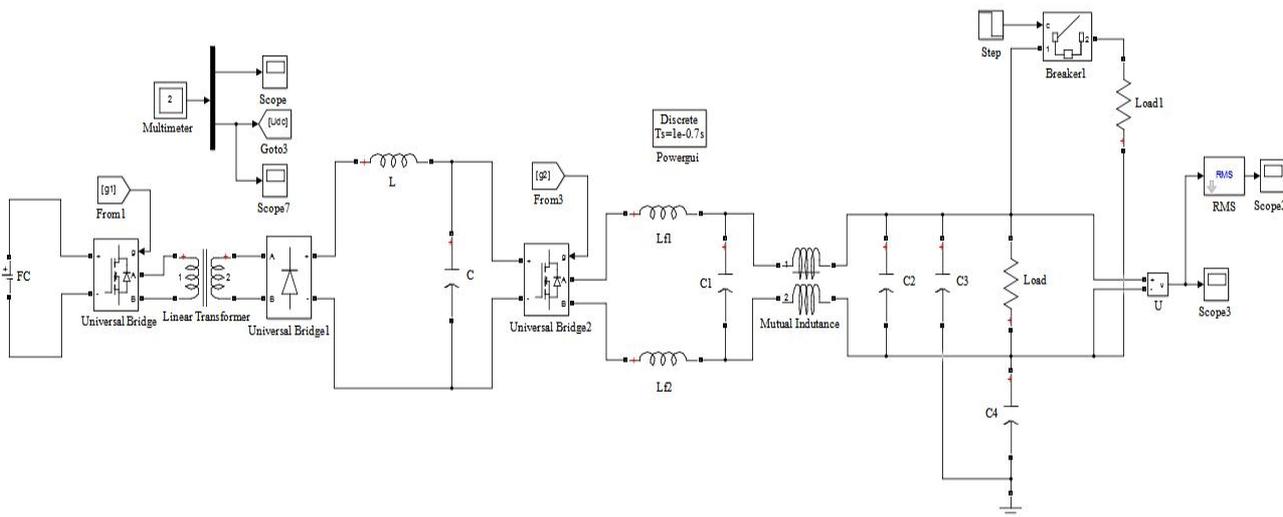


图 10 逆变器仿真模型

Fig. 10 Inverter simulation model

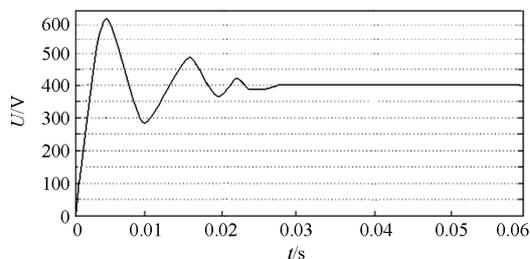


图 11 Boost 变换电路的直流母线电压

Fig. 11 Boost converter circuit DC bus voltage

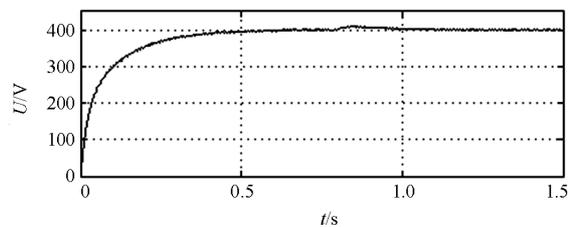


图 12 隔离型全桥逆变电路的直流母线电压

Fig. 12 DC bus voltage of isolated full-bridge inverter circuit

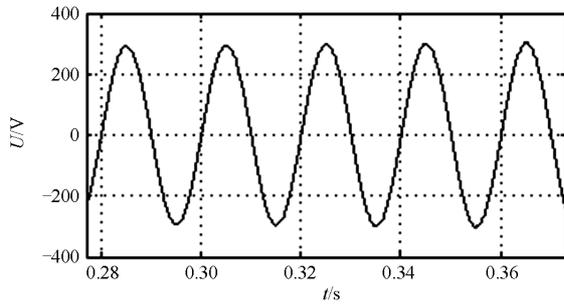


图 13 全桥逆变电路输出电压

Fig. 13 Full-bridge inverter circuit output voltage

## 4 结论

本文研究了当负荷电流从 200 A 阶跃到 400 A 时, 电压、功率、氢气氧气和水消耗量的特性。DC/DC 变换器采用改进型全桥变换器, 解决了升压过程中电压振荡严重、快速充电的问题, DC/DC 软启动方案输出电压上升到额定值时曲线平滑, 保证 DC/AC 逆变器提供稳定的交流电供负载正常工作。相较于传统 PID 控制, 模糊 PID 控制策略更加适用于参数变化大的对象, DC/AC 逆变器采用模糊 PID 控制方式, 保障固体氧化物燃料电池发电系统单独为负载供电时用电的稳定性。由上述仿真可知, 本文中固体氧化物燃料电池发电系统模型充分反映出当固体氧化物燃料电池发电过程中发生突变时可以稳定运行, 控制策略良好。

## 参考文献

- [1] 汤根土. 平板状阳极支撑固体氧化物燃料电池的实验与数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.  
TANG Gentu. Experimental and numerical of plate-shaped anode supported solid oxide fuel cells[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [2] 陈哲. 氢能燃料电池逆变控制的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.  
CHEN Zhe. Research on hydrogen fuel cell inverter control[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [3] 方如举, 吕延会, 张元敏. 燃料电池逆变供电系统的建模和控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 90-94.  
FANG Rujū, Lǚ Yānhuì, ZHANG Yuānmín. Modeling and control of fuel-cell inverter power system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 90-94.
- [4] MARTIN J I S, ZAMORA I, APERRIBAY V. Hybrid fuel cell technologies for electrical microgrids[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(2): 993-1005.
- [5] 周念成, 李春艳, 王强钢, 等. 固体氧化物燃料电池发电系统建模与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 120-126.  
ZHOU Niancheng, LI Chunyan, WANG Qianggang, et al. Modeling and control strategy of solid oxide fuel cell generation system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 120-126.
- [6] 周莹. 1 kW SOFC 发电系统 DC-DC 变换器分析与设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.  
ZHOU Ying. Study and design on DC-DC converter for a 1 kW solid oxide fuel cell power system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [7] 胡雪峰, 龚春英. 适用于光伏/燃料电池发电的组合式直流升压变换器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 8-15.  
HU Xuefeng, GONG Chunying. A combined-type boost converter for solar cell and fuel cell power generating systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 8-15.
- [8] 孙娇俊, 孙涛, 龚春英. 一种用于燃料电池发电系统的前级 DC/DC 变换器[J]. 电力电子技术, 2009, 43(2): 17-18.  
SUN Jiaojun, SUN Tao, GONG Chunying. A front-end DC/DC converter for fuel cell power system[J]. Power Electronics, 2009, 43(2): 17-18.
- [9] 陈章勇, 许建平, 王金平. 一种新型非调节隔离 DC-DC 变换器[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 58-65.  
CHEN Zhangyong, XU Jianping, WANG Qianjin. A novel unregulated isolated DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 58-65.
- [10] 周娟, 魏琛, 杨宇. 逆变器简化 PWM 算法及抑制共模电压策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 158-165.  
ZHOU Juan, WEI Chen, YANG Yu. Inverter simplified algorithm of PWM and inhibit common-mode voltage strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 158-165.
- [11] JANG S J, WON C Y, LEE B K. Fuel cell generation system with a new active clamping current-fed half-bridge converter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 332-340.
- [12] 徐玉琴, 马焕均. 基于改进下垂控制的逆变器并联运行技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 103-107.  
XU Yuqin, MA Huanjun. Parallel operation technology of inverters based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 103-107.

- [13] 黄庆丰, 杨红培, 翟登辉. 基于Simulink的两级式单相光伏逆变器的系统仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 58-61.  
HUANG Qingfeng, YANG Hongpei, ZHAI Denghui. System simulation of double-stage single-phase photovoltaic inverter based on Simulink[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 58-61.
- [14] 陈新, 韦微, 胡雪峰. 三相并网逆变器 LCL 滤波器的研究及新型有源阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 71-79.  
CHEN Xin, WEI Wei, HU Xuefeng. Research on LCL filter in three-phase grid-connected inverter and novel active damping control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 71-79.
- [15] LI Y H, RAJAKARUNA S, CHOI S S. Control of a solid oxide fuel cell power plant in a grid-connected system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 405-413.
- [16] 董开松, 胡殿刚, 秦睿. 考虑系统多运行方式的微电网逆变控制器参数优化方法[J]. 高压电器, 2014, 51(6): 115-121.  
DONG Kaisong, HU Diangang, QIN Rui. Optimization design for inverter controllers in microgrid considering the system of multiply operation mode[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 51(6): 115-121.
- [17] 乔庆. 3 kW 单相并网逆变器谐波抑制问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.  
QIAO Qing. Study on harmonic suppression for 3 kW single-phase grid-connected inverter[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [18] 潘爱强, 时珊珊, 董瑞安. 微网电能质量特征及其监测分析[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 133-138.  
PAN Aiqiang, SHI Shanhan, DONG Ruian. Power quality characteristics and detection concerning in microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 133-138.

---

收稿日期: 2015-12-11; 修回日期: 2016-05-17

作者简介:

魏立明(1974-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 从事电气工程及其自动化方面的教学与科研工作; E-mail: weiliming\_1@sina.com

吕雪莹(1989-), 女, 硕士研究生, 从事燃料电池发电系统逆变器的研究。E-mail: 370844404@qq.com

(编辑 魏小丽)