

燃料电池电站功率调节系统主电路研究

唐朝阳, 黄石生, 周漪清, 陈意庭
(华南理工大学, 广东 广州 510641)

摘要:在燃料电池电站功率调节系统设计中,为了达到高效率、高可靠性和低成本的总体目标,需对功率调节系统进行优化设计。通过分析电路结构、工作电压等级和工作频率等因素,探索了功率调节系统的优化设计理论和规律。按功率调节系统优化设计规律,研究了 50 kW 级燃料电池电站的功率调节系统电路结构与工作参数的优化配合关系。同时设计了燃料电池中通过逆变器直接与负载联结以及通过升压斩波器-逆变器与负载联结两种电路的结构和参数。最后,通过实验对所提出的设计进行了验证。

关键词:燃料电池; 电站; 逆变器; 升压斩波器 / 功率调节系统;

中图分类号: TP271.8; TM464

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2008)02-0031-02

Study on Main Circuit of Power Conditioner System of Fuel Cell Power Plant

TANG Zhao-yang, HUANG Shi-sheng, ZHOU Yi-qing, Chen Yi-ting

(South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: It is needed to optimize the power conditioner design for obtaining the collectivity aim of high efficiency and reliability, low cost of manufacture. And the optimum designing theories or laws of power conditioner system were explored by the methods of studying the factors such as main circuit topology, operating voltage level, frequency and so on. Then according to the optimum designing laws of power conditioner, the topology and parameters optimizing and cooperating of the 50kW grade power conditioner were studied. The main circuits which fuel cell connected directly to loads through an inverter and fuel cell connected to Loads through boost-inverter were all designed at the same time. Finally, the laws were verified by experimental results.

Keywords: fuel cell; power plant; inverter; boost chopper / power conditioner system

Foundation Project: Supported by a Grant from the Major Programs of Science and Technology Foundation of Guangdong Province Industry (No.124B2041570).

1 引言

燃料电池能量转换率高,对环境的负面影响几乎为零,在能源紧张、环境污染严重的当今,用燃料电池电站替代部分火力发电是很有意义的。燃料电池的输出电压范围比较宽,电压比较低,输出特性软,必须经过变换器改善其输出电压特性;燃料电池发电产生的是直流电,为了适应一般的工业和生活电力负荷使用,必须转换为交流电,即需要逆变变换。功率调节系统主电路的效率影响整个电站系统的发电效率,提高主电路的效率对电站系统有很重要的意义。此外,主电路的可靠性和低成本也是电站建设的重要指标^[1]。

2 功率调节系统优化设计

燃料电池功率调节系统的主要功能是电力变换。可根据各种 DC/DC 变换电路模块和 DC/AC 变换电路模块的特性,按照系统高效率、小型化、低成本的目标,进行选择搭配。并通过仿真、实验的途径

来进行优化设计^[1-3]。根据 1999 年对日本实用化比例较大的 110 台 PAFC 燃料电池逆变器统计数据进行分析^[4],优化设计中应注意:

(1) 燃料电池容量与输出直流电压的关系 直流电压基本在 100~350 V,其中 100~200 kW 级直流电压为 200~350 V。随着容量增大,直流电压也增高。从变换效率方面考虑,提高输出直流电压对逆变器更加有利,但小容量燃料电池的直流电压并不高。

(2) 燃料电池容量与功率器件开关频率的关系 开关频率分布在 1~8 kHz 范围内,其中 100~200 kW 级多采用 4~8 kHz 高频,而对采用 GTO 器件的大功率逆变器,其开关频率在几百赫兹的低频范围内。

(3) 开关频率与逆变器效率的关系 随着开关频率上升,逆变器的效率大致是下降的。因为开关频率越高,用于静态吸收的缓冲电路和元件本身的损耗将增加,从而使效率降低。但是,降低开关频率,输出的高次谐波就会增加,从而带来滤波器电路的容量增大等缺点,应用中应根据损耗和高次谐波来综合考虑。

(4) 系统联结电压与燃料电池容量的关系 对 500 kW 以下容量,大部分与三相 200 V, 400 V 系统联结;超过 1 MW 则与 6.6 kV 和 66 kV 系统联结。

基金项目:广东省科技工业攻关重大项目(项目号: 124B2041570)

定稿日期: 2007-09-21

作者简介:唐朝阳(1973-),男,湖南邵阳人,博士研究生,研究方向为数字化电源与电力系统。

3 功率调节系统主电路设计

根据以上对功率调节系统的分析,在 50 kW 级燃料电池电站功率调节系统设计中,分别选择逆变器与燃料电池直接联结和通过直流升压、稳压电路如斩波电路等环节间接联结两种设计方案,主电路如图 1 所示。为了提高供电安全性和电能质量,两种设计方案都采用了工频隔离输出变压器^[5]。

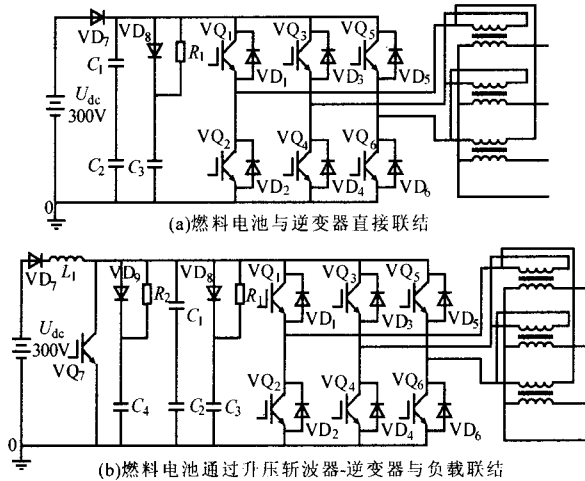


图 1 燃料电池的两种联结方案

从结构上看,两种主电路主要由斩波器、逆变电路及其辅助电路组成。

3.1 斩波器及其辅助电路设计

把斩波器环节的直流输入升压、稳压为设定值,以供逆变器工作。所以,斩波器输出电压设定值与逆变器输出电压、逆变器电压利用率有关。对于正弦波调制的三相 PWM 逆变器来说,输出线电压为:

$$u = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{dc} M \quad (1)$$

式中: u 为输出线电压; M 为调制度; U_{dc} 为输入直流电压。

理想的升压斩波器工作在连续模式下,电压增益为:

$$G = 1/D \quad (2)$$

式中: D 为功率开关的关断占空比。

实际应用中,斩波器的元件是有寄生参数的。设电感的寄生电阻为 R_L 、电容的寄生电阻为 R_C 、负载电阻为 R ,则电压增益关系为:

$$G = [D^2 R / R'] / D \quad (3)$$

式中: $R' = R_L + (R/R_C)D + [R^2 D_1^2 / (R + R_C)]$; D_1 为功率开关的开通占空比。

在实际中,斩波器电压增益是有限度的,使用中应使斩波器电压增益处于最大值范围之内。应使大功率升压斩波器工作在连续模式下。当斩波器在连续模式限制值下工作时,其电感临界值为:

$$\begin{cases} L_c = \frac{U_o T_s}{2I_{o\min}} D_{\min} (1 - D_{\min})^2 \\ I_{L(\max)} = \frac{U_o}{R} \sqrt{\left(\frac{1}{1 - D_1}\right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2\tau_L}\right)^2} D_1 (1 - D_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: D_{\min} 为最小开通占空比; I_{\min} 为最小输出电流; U_o 为输出

电压; T_s 为开关周期。

在纹波电压 Δu_o 限制值下,选择电容为:

$$C = \frac{D_1 T_s}{\Delta u_o} I_o \quad (5)$$

可通过的纹波电流为:

$$I_{c(\max)} = \frac{U_o}{R} \sqrt{\frac{D_1}{1 - D_1} + \frac{D_1}{12} \left[\frac{(1 - D_1) R T_s}{L} \right]^2} \quad (6)$$

功率开关选用 IGBT 管,其保护电路选用 RCD 缓冲电路。保护电路的电容和电阻设计为:

$$C_2 = \frac{I_c (t_r + t_f)}{U_{CE}}, \quad R_2 = \frac{t_{on}}{3C_2} \text{ 或 } R_2 = \frac{U_{CE}}{0.25 I_{c2}} \quad (7)$$

计算电路损耗为:

$$P_{R2} = \frac{1}{2} C_2 U_{CE}^2 f \quad (8)$$

式中: f 为开关频率; U_{CE} 为 IGBT 额定电压。

3.2 逆变器及其辅助电路设计

三相 PWM 逆变器主电路的设计问题主要是功率开关管的选择、开关速度的选择、散热设计、保护电路的设计等。逆变器与燃料电池直接联接,其输出电压可通过式(1)计算获得。通过输出总功率 S 和安全系数 λ 可计算出工作电流:

$$I_3 = \lambda S / U \quad (9)$$

功率管选择三相 IGBT 整体模块,这样电路的寄生参数小,保护电路设计容易。过压保护电路选用 RCD 缓冲电路。缓冲电容和电阻分别为:

$$C_s = I_3^2 L / (\Delta U_s^2), \quad R_s \leq 1 / (2.3 C_s f_s) \quad (10)$$

式中: f_s 为开关频率; ΔU_s 为过冲电压; L_s 为布线电感。

开关频率越高,逆变器输出波形越好。但是开关频率高会使单位时间内工作次数增多,从而使损耗增加,功率管发热增加。由于功率管工作温度升高,其安全工作电流就会下降,所以要协调设计开关频率和散热件,同时还需考虑电路损耗 $P_{R3} = C_s \Delta U_s^2 f_s / 2$ 。

4 实验

实验电站的参数为:输入直流电压 300 V;输出三相四线 220 V/50 Hz 交流电,输出额定功率 50 kW;主电路选用逆变器直接联接燃料电池的电路结构;开关速度 6 kHz;滤波电容 30 μ F;滤波电感 700 μ H;实验负载为 20 kW 阻性负载。图 2 示出输出电压实验波形。实验证明,系统运行稳定、可靠。通过输入电压、输出电压和负载电阻算出功率转换效率为 93.5%,这是可接受的。

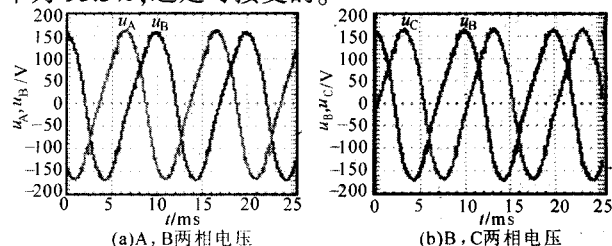


图 2 输出电压波形 (下第 35 页)

阶段出现恒流特性时刻,因此以 U_p 小于 50 V 为宜。

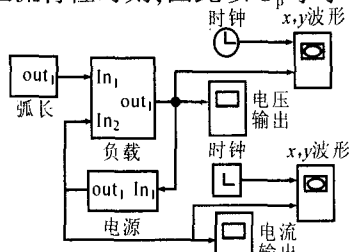


图5 系统整体仿真模型

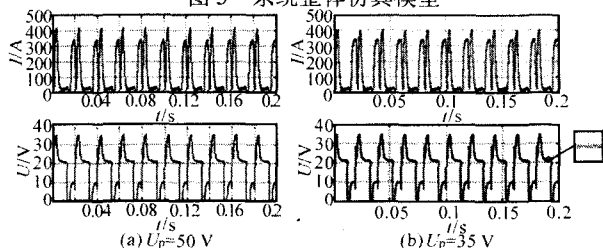


图6 波形控制的 CO₂ 焊短路过渡过程仿真结果

图6 仿真结果达到了控制方案的要求,即在短路初期、缩颈时刻电流下降,而在燃弧时有大的燃弧脉冲电流,分别起到了减少飞溅,改善成形的作用。由于电感的作用,电流不会出现阶跃。在燃弧初期电压波形中有一个尖峰,但此时电流正在减小。这是由于在电源输出电压上叠加了电感储能电压。燃弧电压中存在的谐波是由逆变电源本身 PWM 的调制谐波产生的,其频率应与逆变电源工作频率相同。

4 实验验证

根据仿真模型中各环节之间的联系,选择实验条件:CO₂ 气体流量 $Q_v=15$ L/min;焊丝干伸长 $L=12$ mm,焊丝材料采用 H08Mn2SiA,其直径 $D=1.2$ mm。图7 示出的实验波形与图6 仿真波形基本一致。在短路初期阶段,熔滴刚接触到熔池时,电流降低,以免产生飞溅;短路稳定后,电流又迅速增大,以增加过渡频率;短路末期,电流又迅速减小,避免产生电爆炸飞溅。在燃弧阶段,产生一个大电流脉冲,使焊丝和工件充分加热,从而改善焊缝成形。在

燃弧开始阶段,由于电感储能的作用,使电压波形中均存在一个尖峰。燃弧初期电流下降迅速的主要原因是电源的输出电感小,焊接回路时间常数 L/R 小。此外,图7 中亦出现了谐波,与仿真波形相比,实际波形并不十分规则,原因是实际焊接过程是一个随机过程,而在仿真模型中难以体现这种随机过程的影响,这就为以后深入研究随机干扰对焊接过程的影响奠定了基础。

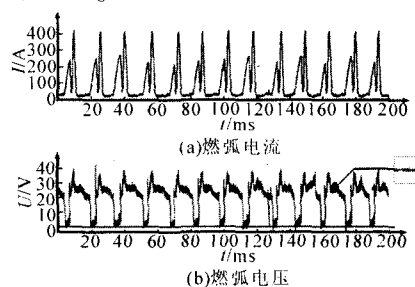


图7 实测电压电流波形

5 结论

利用 MATLAB 强大的功能建立了逆变电源-电弧系统的数学仿真模型,并得出了仿真结果。通过具体实验,得到的实际波形图与仿真波形基本一致,证明了所建模型的合理性。更加贴近实际的模型为以后深入研究谐波以及随机干扰对电源控制过程的影响奠定了基础。

参考文献

- [1] 杨立军.AWP 波控 CO₂ 短路过渡焊的研究[D].天津大学,2001.
- [2] 李 桓,胡连海,李俊岳,等.波控 CO₂ 焊短路过渡过程的计算机仿真及实验[J].焊接学报,2002,23(2):1.
- [3] Ogata K.Solving Control Engineering Problems with MATLAB[M]. New Jersey:Prentice Hall,1993.
- [4] 余文松,薛家祥,黄石生,等.CO₂ 焊弧焊动态过程 MATLAB 仿真研究[J].焊接学报,1999,20(3):153-157.
- [5] 殷树言,刘 嘉,陈树君.CO₂ 焊接工艺控制及 CO₂ 焊接方法的发展[J].机械工人(热加工),2000,(11):4-5.

(上接第 32 页)

5 结论

针对不同的燃料电池参数,探索了功率调节系统最佳转换效率、最低成本和高可靠性、高供电品质的主电路设计理论和规律。规律表明,当燃料电池输出电压较高时,直接采用逆变电路的功率调节系统电路结构简单,可靠性高,有较高的效率;在燃料电池输出电压较低时,采用升压、稳压逆变,则系统有更好的效率和输出稳压能力,但是电路较复杂,可靠性会相应降低。以此为指导思想,研制了 50 kW 燃料电池电站功率调节系统。实验结果表明,功率调节系统的主电路设计理论和规律是实用、可行的。

参考文献

- [1] 谢少军,韩 军,张 勇.低输入电压大功率逆变器技术研究[J].南京航空航天大学学报,2004,36(2):231-234.
- [2] 李 旭,陈道炼,张 蓉,等.性能优良的高频软开关三相逆变电源[J].电力电子技术,2005,39(1):83-86.
- [3] 张厚升,张晓斌.9 kVA 三相航空逆变电源的设计与实现[J].电力电子技术,2006,40(4):93-95.
- [4] 电气学会.燃料电池发电 21 世纪系统技术调查专门委员会.燃料电池技术(谢晓峰,范星河译)[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [5] 汪 飞,何湘宁.基于多重化结构的并网逆变器系统特性研究[J].电力电子技术,2005,39(1):17-19.