

燃料电池三点比较实时电阻匹配最大功率跟踪*

吕学勤 刘文明

(上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 依据最大功率传输理论以及燃料电池电气的特性,提出了一种适用于燃料电池的最大功率跟踪控制方法。该方法通过实时在线检测燃料电池工作点处的输出电压与电流并计算燃料电池的内阻和理想状态下欧姆极化区的开路电压,求解出最大功率点对应的电流型变换器的参考电流。通过控制变换器使燃料电池能够较为稳定地工作在燃料电池欧姆极化区的最大功率输出点处。当外界环境发生变化时,通过电流型扰动观察法完成对燃料电池的最大功率点跟踪。所提算法具有功率自校正功能,以减小算法本身对燃料电池功率输出的扰动。仿真结果表明:当负载或者工作环境发生变化时,该算法可以有效地跟踪燃料电池的最大功率点。

关键词: 燃料电池 最大功率跟踪 电阻匹配 三点比较

中图分类号: TM911.48 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0372-07

Maximum Power Point Tracking Method Based on Three Points Comparison and Real-time Resistance Matching for Fuel Cell

Lü Xueqin Liu Wenming

(School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: It is necessary to force the system to operate in conditions to improve the utilization efficiency of the fuel cell, which corresponds to fuel cell maximum power point (MPP). According to the unique output characteristics of fuel cells, an algorithm based on the theory of maximum power transfer was developed, which was capable of tracking the MPPs of fuel cells. By controlling the DC-DC converter working at the reference current which was calculated by the real-time detection of fuel cell electric current and voltage, the fuel cell can work more stably at MPP which was located in the region of Ohm polarization. When the external environment changed, the algorithm with current type of perturbation and observation method can complete the maximum power point tracking of fuel cell. At the same time, in order to reduce the algorithm disturbance of fuel cell power, the correction was adopted in the algorithm. Simulation results showed that the control approach can yield satisfactory results under different operation conditions of fuel cell and load changes.

Key words: Fuel cell Maximum power point tracking Resistance matching Three points comparison

引言

质子交换膜燃料电池不受卡诺循环的限制,具有清洁、高效、易高度模块化、噪声低、安装及维护简便等优点,被视为满足未来能源需求的新兴能源之一^[1]。

近年来关于新能源的最大功率点跟踪技术逐渐

成为研究的热点,特别在光伏发电系统以及风力发电系统的研究及应用中,已经提出了许多最大功率点跟踪(Maximum power point tracking, MPPT)的方法^[2],如短路电流法、开路电压法、扰动观察法、电导增量法以及人工智能法等^[3-7]。短路电流法和开路电压法提供了一种简单有效的方法来获取最大功率。但是,它需要周期性的使燃料电池短路或者断

收稿日期: 2015-03-06 修回日期: 2015-06-12

* 国家自然科学基金资助项目(51405286)和上海市重点实验室电站自动化技术实验室资助项目(13DZ2273800)

作者简介: 吕学勤,副教授,主要从事燃料电池机器人驱动及能量流分配研究, E-mail: lvxueqin@sheip.edu.cn

开以测量燃料电池的短路电流或者是开路电压,这会影 响系统工作的连续性同时造成不必要的功率损耗。扰动观察法需要在稳定状态下平衡由于扰动幅值引起系统的反应速度与振荡幅值之间的平衡关系,同时,如果系统的操作点快速的变化,扰动观察法有跟踪出现错误的倾向。电导增量法不但需要较为复杂的控制电路而且寻优时间相对较长。此外,针对燃料电池的高度非线性,模糊控制与神经网络等人工智能法为最大功率控制的实现提供了一种新的方法。但是,人工智能法需要对燃料电池的模型进行前期的训练而且控制算法与控制电路复杂,因此人工智能方法在通用性上受到限制。

当燃料电池的工作环境或负载发生变化时,为保证燃料电池产生可靠有效率的功率响应,通过控制算法准确地控制燃料电池使其工作在最大功率点处是十分必要的^[8]。本文在基于燃料电池电气特性的基础上提出适用于燃料电池的最大功率跟踪控制方法。该方法依据最大功率传输理论^[9],通过实时在线检测燃料电池工作点处的输出电压与电流并计算出燃料电池的内阻和理想状态下欧姆极化区的开路电压,以求解出最大功率点对应的电流型变换器的参考电流值。通过控制变换器的工作状态,实现对燃料电池的欧姆极化区最大功率点的实时跟踪。同时,采用电流扰动观察法来寻找燃料电池欧姆极化区内的工作点从而确定燃料电池的工作电流参考值的方法解决由于外界环境变化而导致的燃料电池最大功率点偏移问题。最后,在燃料电池能量管理系统中所提方法的控制效果进行验证。

1 燃料电池模型

1.1 燃料电池特性分析

燃料电池的极化曲线可表示燃料电池性能^[10-11],通过极化曲线可知燃料电池的电压与电流之间具有高度非线性。燃料电池的电压与功率特性曲线如图1所示。图中, U_0 为燃料电池的可逆电压; U_0^* 为理想状态下欧姆极化区的开路电压; P_{mpp} 为燃料电池的最大功率点, U_{mpp} 和 I_{mpp} 为对应于最大功率点处的电压、电流。

当燃料电池向外界提供电能时,实际电池电压会因若干非可逆因素而下降。导致开路电压下降的电压损失主要可以分为:电化学极化、欧姆极化和浓度极化。在低电流密度下活化极化对电压损失起主要作用,在活化极化主导的区域内燃料电池的内阻较大;随着电流密度的增大,由于电荷传输阻抗而引起的电压损失即欧姆损失将成为主导因素。对于给定参数的燃料电池,在欧姆极化主导的区域内燃料

电池的内阻变化幅度不大,即燃料电池的伏安特性,遵循欧姆定律近似呈线性。当电流密度增加到一定程度后,由燃料和氧化剂的质量传输引起的浓差损失将占据主导作用。在浓差极化占主导的区域内,由于燃料电池的内阻迅速增大导致燃料电池的电压产生急剧下降。

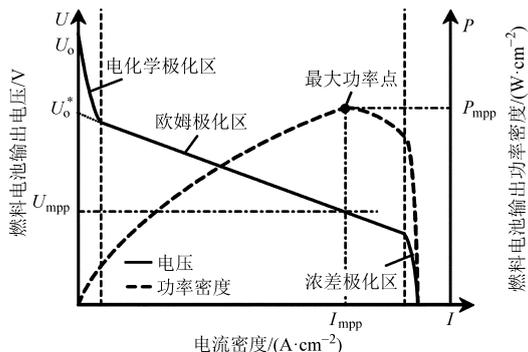


图1 燃料电池电压及功率特性

Fig. 1 Typical $U-I$ and $P-I$ characteristics of fuel cell

根据燃料电池的特性分析,燃料电池的模型可以分为静态模型与动态模型。

1.2 燃料电池的静态模型

燃料电池的静态模型是基于如下假设提出的^[12-13]:

- (1) 输入燃料电池的气体为理想状态下的纯净氢气与氧气。
- (2) 燃料电池堆配备有制冷系统以维持阴极与阳极的出口温度稳定在电堆温度。
- (3) 燃料电池堆配备有水处理系统以确保燃料电池堆的内部湿度在任何负载情况下均保持在一个适当的水平。
- (4) 在流量通道的压力下降忽略不计。
- (5) 燃料电池电压下降是由于反应动力学和电荷传输,因为大多数的燃料电池的工作区域在欧姆极化区内。
- (6) 在燃料电池的任何工作区域内燃料电池的内阻是恒定的。
- (7) 流动的气体与水通过质子交换膜的情况不考虑在内。
- (8) 温度与质子交换膜的湿度对电阻的影响忽略不计。

该模型代表一个特定的燃料电池堆模型,当燃料电池的参数如压力、温度、燃料流量不同时燃料电池的模型会发生变化。这些参数的变化将影响燃料电池的开路电压 E 、交换电流 i_0 和塔费尔坡 A 。 E 、 i_0 、 A 将会根据气体的压力、流量、电堆的温度和气体成分而实时更新, E 、 i_0 、 A 的公式为

$$E = K_c E_n \quad (1)$$

$$i_0 = \frac{zFk(p_{H_2} + p_{O_2})}{Rh} e^{-\frac{\Delta G}{RT}} \quad (2)$$

$$A = \frac{RT}{z\partial F} \quad (3)$$

式中 R ——气体常数

z ——移动电子的数量

E_n ——奈奎斯特电压

F ——法拉第常数

∂ ——电荷转移系数,取决于所使用的电极与催化剂的类型

p_{H_2} ——输入燃料电池 H_2 的压力

p_{O_2} ——输入燃料电池 O_2 的压力

k ——玻耳兹曼常数

h ——普朗克常数

ΔG ——活化障碍,取决于燃料电池电极与催化剂的类型

T ——燃料电池的工作温度

K_c ——在额定工作状态下的电压常数

氢气与氧气的转化利用率为

$$U_{H_2} = \frac{30\,000RTN_{FC}}{Fp_{fuel}v_{fuel}x_{H_2}} \quad (4)$$

$$U_{O_2} = \frac{15\,000RTN_{FC}}{Fp_{air}v_{air}x_{O_2}} \quad (5)$$

式中 I_{FC} ——燃料电池的输出电流

p_{fuel} ——氢气的绝对供给压力

p_{air} ——空气的绝对供给压力

v_{fuel} ——氢气的流动速率

v_{air} ——空气的流动速率

x_{H_2} ——在燃料中的氢气含量

x_{O_2} ——在空气中的氧气含量

N ——燃料电池堆中的电池片的数量

部分压力公式与奈奎斯特电压的计算公式为

$$p_{H_2} = (1 - U_{H_2})x_{H_2}p_{fuel} \quad (6)$$

$$p_{O_2} = (1 - U_{O_2})x_{O_2}p_{air} \quad (7)$$

$$E_n = 1.229 + \frac{RT}{zF} \ln(p_{H_2}p_{O_2}^{1/2}) + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} \quad (8)$$

式中 U_{H_2} ——氢气的转化利用率

U_{O_2} ——氧气的转化利用率

1.3 燃料电池的动态模型

燃料电池存在一个快速动态特性,称为“双电荷层”现象。具体来说,在电极与电解液界面附近有一层“双电荷层”,用于存储电荷以及能量。双电荷层的电气特性像一个电容器,充电电荷的聚集将会生成一个电压,与之相对应的是前文所提及的电化学极化过电压和浓度极化过电压^[14]。因此,当电

路发生突然变化时,电化学极化过电压与浓度极化过电压会跟随电路变化而变化。另一方面,欧姆极化区的电压则会瞬间响应电路的变化。图2为燃料电池动态电路的等效模型^[15]。图中, R_{conc} 为浓度极化区的等效电阻, R_{act} 为电化学极化区的等效电阻, R_{ohm} 为欧姆极化区的等效电阻, C 为双层电荷层的等效电容, E 为电化学电动势, V_{FC} 为燃料电池的输出电压,其中

$$R_{act} = \frac{1}{i} [v_0 + v_a(1 - e^{-ci})] \quad (9)$$

$$R_{conc} = \left(c_2 \frac{i}{i_{max}}\right)^{c_3} \quad (10)$$

$$i = C \frac{dv_c}{dt} = \frac{v_c - v_0}{R_{act} + R_{conc}} \quad (11)$$

$$V_{FC} = E - v_c - iR_{ohm} \quad (12)$$

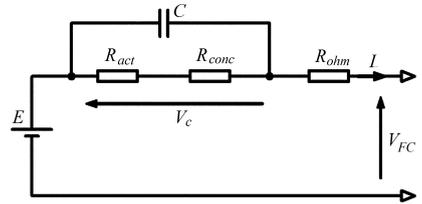


图2 燃料电池等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit of PEMFC

当燃料电池工作在不同的极化区域时,由于燃料电池中的流动、传热的耦合会影响燃料电池的开路电压、最大功率输出的数值及等效内阻 R_{in} 值。但是燃料电池当前工作区域的等效电阻 R_{conc} (或者 R_{act} 及 R_{ohm})将会起主导作用。其中, R_{conc} 与 R_{act} 变化幅度较大,而 R_{ohm} 近似为恒定值^[16]。

从燃料电池等效电路模型可以看出,燃料电池的稳态电压-电流特性分为两部分:一部分称为稳态分量,包括电化学电动势和欧姆过电压;另一部分称为瞬态分量,包括激活过电压和浓度过电压。当燃料电池工作区域在欧姆极化区时,燃料电池工作于欧姆极化区时的电池内阻 $R_{in} = R_{conc} + R_{act} + R_{ohm}$,而且由于3个电阻之间存在 $R_{conc} \ll R_{ohm}$ 及 $R_{act} \ll R_{ohm}$ 的关系。因此,当燃料电池工作于欧姆极化区时,燃料电池基本可以等效为一个电压源 E_r 与欧姆内阻 R_{ohm} 串联而成。燃料电池的输出电压可简化为

$$E = E_r - R_{in}I \quad (13)$$

2 最大功率点跟踪策略

燃料电池与蓄电池、超级电容等能量存储元件相比其动态特性偏软。因此,燃料电池需要与DC/DC变换器配合使用。本文采用图3所示的燃料电池能量系统进行燃料电池的最大功率跟踪策略的研究。

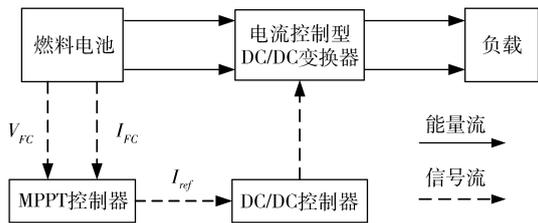


图3 燃料电池能量系统

Fig.3 Energy system of fuel cell

2.1 稳定条件下的最大功率跟踪

根据最大功率传输理论:当燃料电池内阻与外阻相等时,燃料电池可以输出最大功率。因此,可以通过电流与电压传感器实时在线测量燃料电池的输出端电压与电流以计算燃料电池的等效内阻。通过控制变换器的占空比实现燃料电池的内、外电阻匹配,从而使负载端获得最大功率。

由燃料电池的电气特性可知:当改变燃料电池的工作电流时,其输出电压同时改变。若实时在线检测到的变换器的输入电流(即,燃料电池输出电流)为 I_1 ,相应的输出电压为 U_1 ;通过控制变换器的参考工作电流 I_{ref} 使燃料电池的输出电流变为 I_2 ,可以检测到相应的燃料电池的输出电压 U_2 。由燃料电池的等效电路模型可知,当燃料电池的输出电流 I_1 、 I_2 均位于燃料电池的欧姆极化区内时,可由式(13)得到

$$R_{in}I_1 = E_r - U_1 \quad (14)$$

$$R_{in}I_2 = E_r - U_2 \quad (15)$$

$$R_{in} = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2} \quad (16)$$

$$E_r = \frac{I_1U_2 - I_2U_1}{I_1 - I_2} \quad (17)$$

因此,根据最大功率传输理论可以得到燃料电池最大功率点处的输出电流参考值为

$$I_{ref} = \frac{E_r}{2R_{in}} = \frac{I_1U_2 - I_2U_1}{2(U_2 - U_1)} \quad (18)$$

当外部环境变化时,燃料电池的最大功率点会产生移动。普通的基于电阻匹配计算出的参考电流 I_{ref} 可能会使得燃料电池的工作点超出欧姆线性区,进入浓差极化区或者进入电化学极化区。因此,提出三点比较实时电阻匹配最大功率跟踪方法,确保燃料电池实时工作在欧姆极化区的最大功率点处。

为了准确地计算燃料电池欧姆极化区内的等效内阻,采用了三点测量法。在实时检测到燃料电池输出电流 I_1 的基础上等增量 ΔI 改变变换器的参考工作电流 I_{ref} 至 I_2 、 I_3 ,从而得到 (U_1, I_1) 、 (U_2, I_2) 、 (U_3, I_3) 3个测量数据。因此,可以将 (U_1, I_1) 、 (U_2, I_2) 和 (U_1, I_1) 、 (U_3, I_3) 分别代入式(5)中,从

而得到 R_{12} 、 R_{23} ,计算 R_{12} 与 R_{23} 的差值为

$$\Delta R = R_{12} - R_{23} \quad (19)$$

在欧姆极化区内,燃料电池的伏安特性呈线性化。如果 ΔR 的取值近似为零,表明所选取的3个点均位于欧姆极化区;如果 ΔR 的值较大,说明所选取的3个点不全位于欧姆极化区。如所选取的3个点均位于欧姆极化区则可以根据式(18)得到燃料电池最大功率点处的输出电流参考值;否则,通过电流扰动观察法重新对燃料电池的工作点进行选取直至寻找到燃料电池欧姆极化区的工作点。

通过控制变换器使燃料电池工作在最大功率点后,实时计算出燃料电池的当前等效内阻 R_{in} ,并通过式(19)中的 ΔR 判断燃料电池最大功率点是否发生偏移。

2.2 环境变化时的最大功率跟踪

工作环境发生变化时,燃料电池的最大功率点会发生漂移。此时可以利用定步长扰动在初始阶段跟踪速度较快的特点,采用电流型扰动观察法选取燃料电池欧姆极化区的工作点以确定燃料电池最大功率点处的参考电流。

与传统的扰动观察法不同,当等效内阻差值不满足要求时,本文通过 $I + \Delta I$ 周期性地改变燃料电池的工作电流,并实时检测扰动前后的功率变化:如果燃料电池的输出功率增加,说明燃料电池工作在活化极化区,此时可以沿同一方向(ΔI)继续扰动燃料电池的工作电流值;如果燃料电池的输出功率变小,说明燃料电池工作在浓差极化区,则需要对燃料电池进行反方向($-\Delta I$)扰动。经过连续的扰动变化后,最终使燃料电池工作在欧姆极化区内,然后计算燃料电池最大功率点处的参考电流,从而保证燃料电池工作在最大功率点处。

2.3 最大功率跟踪流程图

根据以上原理,建立图4所示的流程图。通过实时在线检测得到燃料电池的输出电流 I_1 后等增量 ΔI 改变变换器的参考工作电流 I_{ref} 至 I_2 、 I_3 ,检测相应的燃料电池输出电压为 U_1 、 U_2 和 U_3 。根据式(16)、(17)计算燃料电池的内阻 R_{12} 与 R_{23} 的值以及欧姆极化区开路电压。根据式(19)计算内阻的偏差值,如果 ΔR 符合要求则通过式(18)可以计算出两点确定燃料电池工作于欧姆线性区MPP的工作电流 I_{ref} ,通过控制变换器使燃料电池工作在最大功率点处;当电路工作在 I_{ref} 后,重新检测当前的电阻差值 ΔR ,如果 ΔR 不符合条件则通过电流型扰动观察法,使燃料电池工作在欧姆极化区内的最大功率点处。

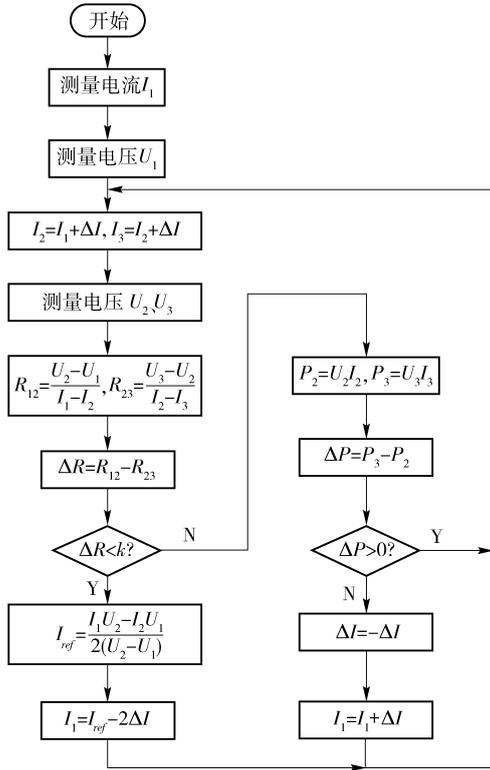


图4 燃料电池 MPPT 程序框图
Fig.4 MPPT diagram of fuel cell

3 仿真验证

根据以上分析,在 Matlab/Simulink 中建立如图 5 所示的仿真模型,采用电流控制型的 Boost 变化器以实现燃料电池输出电流的控制,并使燃料电池的输出电压升压给负载供电^[17-21]。在 Boost 变换器的 PWM 脉冲产生过程中采用 PID 控制。燃料电池模块分别采用最大输出功率为 8 325、2 000、560 W 的燃料电池。Boost 变化器的电路参数为 $L=0.012\text{ H}$, $C=0.0025\text{ F}$,开关频率为 10 kHz。

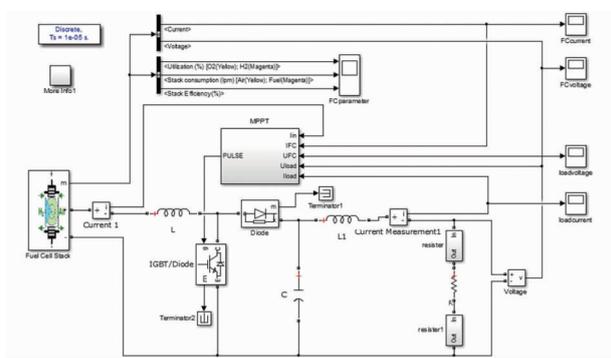


图5 仿真原理图
Fig.5 Principle diagram of simulation

燃料电池能量系统仿真过程中,在 $T=5\text{ s}$ 时使变换器负载端的负载减小,在 $T=10\text{ s}$ 时使变换器负载端的负载增大,以验证负载变化时设计算法的有效性。图 6 为采用 3 种功率不同的燃料电池模获

得的燃料电池输出功率仿真结果。可知,燃料电池能够较为快速地工作在最大功率状态而且燃料电池的功率输出不因负载的变化而发生波动,具有较好的稳定性。

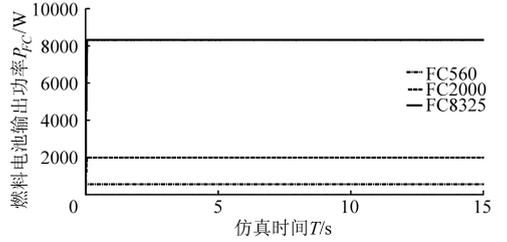


图6 燃料电池输出功率
Fig.6 Output power of fuel cell

图 7 为仿真过程中燃料电池输出端的电流变化曲线。由图可知,燃料电池输出端的电流能够在较短的时间内进入稳定状态且不随负载的变化而变化。

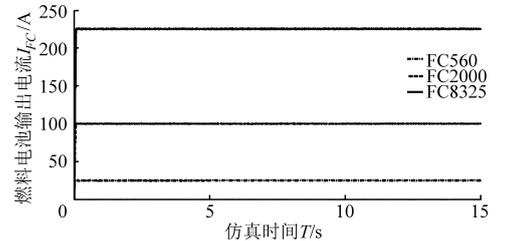


图7 燃料电池输出电流
Fig.7 Output current of fuel cell

图 8 为不同功率的燃料电池模块下获得的负载端的功率变化曲线。由此看出,当负载端的负载不发生变化时,负载端获得的功率近似等于燃料电池的最大功率输出(变换器存在功率损耗);当负载端的功率发生变化时,负载变化的瞬间会出现功率的波动,由于燃料电池的功率响应速度较慢,因此产生的功率波动将由 Boost 变换器后端的电容提供或吸收。振荡过后负载端的功率将趋于稳定。

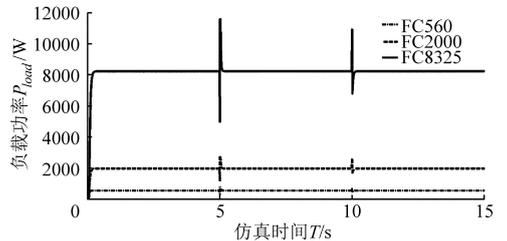


图8 负载端功率
Fig.8 Power of load

图 9 与图 10 分别对应于仿真过程中负载端的电流与电压变化曲线。由于采用的燃料电池能量系统不存在蓄电池等大型的能源存储装置,因此,当负载发生变化时会导致负载端电压与电流的波动。

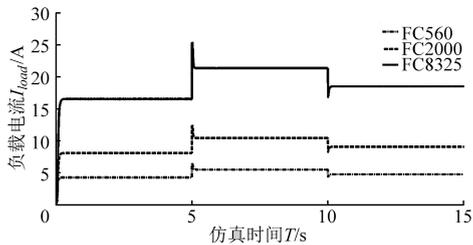


图9 负载端电流

Fig. 9 Current of load

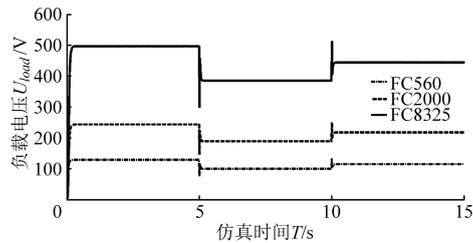


图10 负载端电压

Fig. 10 Voltage of load

4 结论

(1) 提出适用于燃料电池的最大功率跟踪控制方法。可以提高燃料电池的利用效率,防止电解质膜损伤以及燃料电池堆有害的电压老化和氧气耗尽。

(2) 当负载或燃料电池的工作状态发生变化时,通过电流扰动法寻找燃料电池的欧姆极化区工作点以重新匹配燃料电池的内阻从而确定变换器的参考电流,实现燃料电池最大功率输出的实时跟踪。

(3) 实验证明,提出的最大功率跟踪算法具有简单、快捷、准确、环境适应能力强的优势,可以比较充分地发挥燃料电池发电系统的效能,具有较好的实用价值,此算法可应用于燃料电池的最大功率跟踪控制。

参 考 文 献

- Luis Valverde, Felipe Rosa, Carlos Bordons. Design, planning and management of a hydrogen-based microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(3): 1398 - 1404.
- Subudhi B, Pradhan R. A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 89 - 98.
- Masoum M A S, Dehbonei H, Fuchs E F. Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage- and current-based maximum power-point tracking [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(4): 514 - 522.
- Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, et al. A technique for improving P&O MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2009, 56(11): 4473 - 4482.
- Tian Yong, Xia Bizhong, Xu Zhihui, et al. Modified asymmetrical variable step size incremental conductance maximum power point tracking method for photovoltaic systems [J]. Journal of Power Electronics, 2014, 14(1): 156 - 164.
- Liu Fangrui, Duan Shanxu, Liu Fei, et al. A variable step size INC MPPT method for PV systems [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2008, 55(7): 2622 - 2628.
- Noroozian R, Barzideh F, Jalilvand A. A novel maximum power point tracking method for PV systems using artificial neural network [J]. Engineering Intelligent Systems, 2013, 21(4): 239 - 247.
- Ramos C A, Romero A, Giral R, et al. Maximum power point tracking strategy for fuel cell power systems [C] // 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2007), 2007: 2613 - 2618.
- 朱国荣, 卢家航, 黎沃铭. 燃料电池实时电阻匹配最大功率跟踪法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(26): 44 - 52.
Zhu Guorong, Lu Jiahang, Li Woming. A maximum-power-point-tracking method based on real-time resistance matching for fuel cells energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(26): 44 - 52. (in Chinese)
- Miller M, Bazylak A. A review of polymer electrolyte membrane fuel cell stack testing [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(2): 601 - 613.
- 刘爱骥, 王冰, 翁一武, 等. 生物质-燃料电池/燃气轮机发电系统特性研究 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 178 - 183.
Liu Aiguo, Wang Bing, Weng Yiwu, et al. Performance of biomass-fuel cell/gas turbine power plant [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 178 - 183. (in Chinese)
- Souleman N M, Tremblay O, Dessaint L A. A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell power systems [C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting (PES'09), 2009: 1 - 8.
- Karami N, Outbib R, Moubayed N. Fuel flow control of a PEM fuel cell with MPPT [C] // IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC), 2012: 289 - 294.
- Nabil Karami, Rachid Outbib, Nazih Moubayed. Maximum power point tracking with reactant flow optimization of proton exchange membrane fuel cell [J]. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2013, 10(6): 1 - 14.
- 贺建军, 孙超. 质子交换膜燃料电池的建模与仿真分析 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(2): 566 - 571.
He Jianjun, Sun Chao. Modeling and simulation analysis of proton exchange membrane fuel cell [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(2): 566 - 571. (in Chinese)

- 16 徐腊梅, 肖金生, 潘牧, 等. 基于电化学模型的 PEM 燃料电池建模与仿真[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(5): 933-936.
Xu Lamei, Xiao Jinsheng, Pan Mu, et al. Modeling and simulation of PEM fuel cell based on electrochemical model[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2008, 32(5): 933-936. (in Chinese)
- 17 陈静, 王登峰, 刘彬娜. 燃料电池-蓄电池-超级电容混合动力汽车控制策略[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 36-39.
Chen Jing, Wang Dengfeng, Liu Binna. Control strategy of fuel cell-battery-ultracapacitor hybrid electric vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 36-39. (in Chinese)
- 18 Wai Rong-Jong, Jhung Shih-Jie, Liaw Jun-Jie, et al. Intelligent optimal energy management system for hybrid power sources including fuel cell and battery[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7): 3231-3244.
- 19 Yu Ruihong, Li Yanqin, Cai Jianxian. Maximum power point tracking from a wind turbine emulator using a DC-DC converter controlled[J]. International Journal of Control and Automation, 2014, 7(1): 117-128.
- 20 李玉芳, 林逸, 何洪文. 燃料电池混合动力汽车能源系统优化配置[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 39-42.
Li Yufang, Lin Yi, He Hongwen. Optimization study on power system configuration for fuel cell hybrid vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 39-42. (in Chinese)
- 21 王猛, 孙泽昌, 卓桂荣, 等. 电动汽车制动能量回收系统研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 6-10.
Wang Meng, Sun Zechang, Zhuo Guirong, et al. Braking energy recovery system for electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 6-10. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 366 页)

- 14 Zhang T, Chen K, Fu W X, et al. Optimal two-iteration sculling compensation mathematical framework for SINS velocity updating [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(6): 1065-1071.
- 15 严恭敏, 周琪, 翁浚, 等. 捷联惯导系统内杆臂补偿方法及试验验证[J]. 宇航学报, 2012, 33(1): 62-67.  
Yan Gongmin, Zhou Qi, Weng Jun, et al. Inner lever arm compensation and its test verification for SINS [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(1): 62-67. (in Chinese)
- 16 Kang C W, Cho N I, Park C G. Approach to direct coning/sculling error compensation based on the sinusoidal modelling of IMU signal[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2012, 7(5): 527-534.
- 17 Lai J Z, Lv P, Liu J Y, et al. Noncommutativity error analysis of strapdown inertial navigation system under the vibration in UAVs[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9: 1-8.
- 18 汤传业, 陈熙源, 李博天. 基于新的圆锥补偿结构的姿态算法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(5): 580-586.  
Tang Chuanye, Chen Xiyuan, Li Botian. Attitude algorithm based on a novel coning correction structure [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(5): 580-586. (in Chinese)
- 19 Zhang T, Chen K, Fu W X, et al. Optimal two-iteration sculling compensation mathematical framework for SINS velocity updating [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(6): 1065-1071.
- 20 赵欣, 王仕成, 杨东方, 等. 一种改进的高动态捷联惯导解算算法[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(2): 163-169.  
Zhao Xin, Wang Shicheng, Yang Dongfang, et al. Improved algorithm for high dynamic strapdown inertial navigation system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(2): 163-169. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 371 页)

- 14 Miao Z, Xu J L, Yang X F, et al. Operation and performance of a low temperature organic Rankine cycle [J]. Apply Thermal Engineering, 2015, 75(22): 1065-1075.
- 15 Wei D H, Lu X S, Lu Z, et al. Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(4): 1113-1119.
- 16 Chang J C, Chang C W, Hung T C, et al. Experimental study and CFD approach for scroll type expander used in low-temperature organic Rankine cycle [J]. Apply Thermal Engineering, 2014, 73(2): 1444-1452.
- 17 Miao Z, Yang X F, Xu J L, et al. Development and dynamic characteristics of an organic Rankine cycle [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(33): 4367-4378.
- 18 Gao P, Jiang L, Wang L W, et al. Simulation and experiments on an ORC system with different scroll expanders based on energy and exergy analysis [J]. Apply Thermal Engineering, 2015, 75(22): 880-888.
- 19 Yun E, Kim D, Yoon S Y, et al. Experimental investigation of an organic Rankine cycle with multiple expanders used in parallel [J]. Applied Energy, 2015, 145: 246-254.
- 20 Wu Z, Pan D, Gao N, et al. Experimental testing and numerical simulation of scroll expander in a small scale organic Rankine cycle system [J]. Apply Thermal Engineering, 2015, 87(5): 529-537.