

燃料电池实时电阻匹配最大功率跟踪法

朱国荣, 卢家航, 黎沃铭

(香港理工大学电子及资讯工程学系, 中国香港特别行政区)

A Maximum-Power-Point-Tracking Method Based on Real-time Resistance Matching for Fuel Cells Energy System

ZHU Guorong, K. H. Loo, Y. M. Lai

(Department of Electronic and Information Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China)

ABSTRACT: The need to fully utilize fuel cells by operating them at the maximum power point (MPP) is motivated by their extremely high cost per unit power and limited lifetimes. According to the unique output characteristics of fuel cells, a specialized algorithm based on resistance matching was developed in this work, which is capable of tracking the MPPs of fuel cells when they exist in both the ohmic and concentration polarization regions. Under changing operation condition, a fixed step size was used to perturb the system in the direction of the new MPP, and a variable tracking step size was subsequently used to provide fast tracking of the new MPP. For validation, the proposed algorithm was implemented in a hybrid energy system that used super-capacitors for power balancing and load voltage regulation while the fuel cells constantly operated at the MPP. It was shown that the proposed algorithm is able to quickly and closely track the MPP when the fuel cells' operating condition, such as fuels' flow rate and environmental conditions, changes dynamically. The proposal algorithm had been verified by experiment results.

KEY WORDS: fuel cell; maximum power point tracking (MPPT); resistance matching; hybrid energy system

摘要: 燃料电池单位功率投资成本高, 且寿命有限, 为充分发挥系统效能, 需采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制使其连续稳定地向负载输出最大功率。该文利用燃料电池特有的物理特性和电气特性, 提出一种通过检测燃料电池输出电压、电流, 实时计算内阻, 根据电阻匹配的最大功率传输理论, 实现燃料电池 MPPT 算

法。若由于工作条件突变, 最大功率点(maximum power point, MPP)超出了燃料电池外特性的欧姆线性区, 则采取自适应变步长追踪 MPP。同时, 该文还采用固定步长确定新 MPP 方向与自适应变步长追踪新 MPP 相结合, 实现此 MPPT 方法对环境的自适应能力以及解决追踪精度和速度之间的矛盾。此方法能够简单而准确地跟踪具有各种外特性的燃料电池 MPP, 且在稳态下不存在功率波动。最后, 在燃料电池/超级电容混合能量系统上, 实验验证了理论分析的正确性。

关键词: 燃料电池; 最大功率跟踪; 电阻匹配; 混合能量系统

0 引言

由于传统石化能源日益枯竭, 而且它所造成的环境污染日益严重, 全世界正致力于风能、太阳能等可再生能源以及燃料电池等绿色能源的开发与利用^[1], 其中燃料电池供电系统具有能量密度高, 无噪声, 无环境污染, 且不受阳光、风力等自然条件限制等特点而受到青睐。然而, 燃料电池供电系统投资成本高, 且燃料电池本身寿命有限, 为了充分利用燃料电池系统, 将燃料电池控制在最大功率输出状态逐渐成为一个研究热点^[2-8]。在光伏发电系统的研究和应用中, 已有大量的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)方法^[9-11]: 寄生电容法、强迫振荡法、固定参数法(固定电压法或者固定电流法)、扰动观测法、电导增量法以及人工智能法。寄生电容法和强迫振荡法都是对变换器参数的交流纹波分量或者注入交流纹波来进行分析, 文献[3]将注入纹波方法自适应跟踪燃料电池最大功率点(maximum power point, MPP), 然而低频交流纹波会增大交换膜的机械压力, 降低燃料电池

基金项目: 香港特别行政区大学教育资助委员会研究资助局优配研究金(PolyU-5209/09E)。

Project Supported by University Grants Committee of the Hong Kong Special Administrative Region, Research Grant Council, General Research Fund (PolyU-5209/09E).

的寿命^[12]，高频交流纹波电导和低频交流纹波电导又不一致^[13]，所以寄生电容法和强迫振荡法均需要优化才能应用于燃料电池的 MPPT。燃料电池电压-电流外特性不存在恒流和恒压特性^[13]，所以固定参数法不适合应用于燃料电池的 MPPT。扰动观测法原理简单、易于实现，文献[4-7]将扰动观测法应用于燃料电池 MPPT，但是外部环境变化时，扰动观测法不能快速跟踪 MPP，容易出现误判现象^[9]，而且系统工作在 MPP 附近来回振荡，这种振荡会降低燃料电池寿命，所以扰动观测法必须进行优化才能应用于燃料电池的 MPPT。文献[8]采用智能控制对燃料电池进行 MPPT，然而人工智能法对硬件要求高，控制复杂，不适合于实际应用。电导增量法(incremental conductance, INC)比扰动观测法能够更快跟踪环境变化，而且最后能够固定工作于最大功率点上。为了解决跟踪速度和跟踪精度之间的矛盾，文献[14]提出了应用于光伏系统的变步长 INC 方法，可以根据与 MPP 距离自适应确定步长尺寸，实现优化 INC 方法。然而，环境变化引起的步长因子与追踪步长因子采用同一个值，如果已经追踪到 MPP，步长因子已经等于零，此时环境变化引起的 MPP 的变化，采用零步长因子将不能追踪到新的 MPP。

燃料电池外特性中存在分段线性内阻特性，且内阻能够反映燃料电池本身和外部环境特性，这是燃料电池和光伏电池外特性最大的区别。本文在分析燃料电池特性的基础上，提出一种新的最大功率跟踪控制方法，该方法通过实时检测燃料电池输出端口的电压和电流，计算燃料电池内阻，根据基于电阻匹配的最大功率传输理论，当等效外阻等于内阻时，可以跟踪燃料电池的最大功率输出；采用固定步长和自适应变步长相结合，分析此 MPPT 方法的自适应追踪不同外特性以及环境变化的 MPP，实现了多种条件下的燃料电池 MPPT，从而提高对燃料电池系统的利用率；设计了燃料电池混合能量系统，实验验证了理论研究的正确性。此方法适合于各种燃料电池的最大功率跟踪控制，同时，实时监测的线性段各种特征参数能够反映燃料电池本身、工作环境等物理特性，为燃料电池系统控制提供有力依据，也有助于对燃料电池进行故障分析和诊断。

1 燃料电池电气特性

燃料电池电气特性如图 1 所示，电压曲线主要

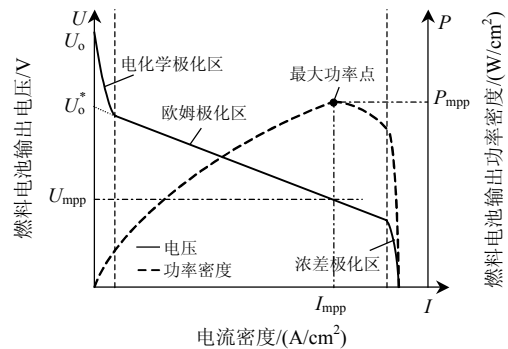


图 1 燃料电池电压及功率特性

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

分为 3 部分：电化学极化区、欧姆极化区、浓差极化区。从空载开始小电流放电的初期，燃料电池电压发生一个陡降，其原因是电极反应而导致的电化学极化压降，此段内阻较大；随着电流的增加，欧姆极化成了主导因素，对于给定参数的燃料电池，其内阻变化幅度不大，因此这段伏安特性曲线近似线性，即遵循欧姆定律；当输出电流逐渐趋近电池的极限电流时，浓差极化对电池电压的影响比较明显，引起附加电压降，该区域电池电压急剧下降，此段内阻迅速增大。图 1 中 U_0^* 为欧姆极化曲线延长到电压轴上的电压；存在最大功率点 P_{mpp} ，对应电压、电流分别为 U_{mpp} 和 I_{mpp} 。由此可看出，燃料电池的输出电压电流具有高度的非线性特性，燃料电池的输出电压可用下式^[15]来表达：

$$U = U_0 - (I + I_n)R - A \cdot \ln\left(\frac{I + I_n}{I_0}\right) + B \cdot \ln\left(1 - \frac{I + I_n}{I_{lim}}\right) \quad (1)$$

式中： U_0 为开路电压，V； I 为输出电流密度， A/cm^2 ； I_n 为内部等效电流密度(A/cm^2)，对应于透过催化剂层而没有产生电流的那部分燃料； A 为电化学极化阶段参数(V)，该参数与电化学极化阶段的斜率有关； I_0 为交换电流密度(A/cm^2)，在该电流密度，电压开始下降，并提供外电路电流； B 为浓差极化区参数(V)，该参数表达由电极表面反应燃料浓度变化产生的损耗； I_{lim} 为燃料全部反应所能达到的最大电流密度(A/cm^2)； R 为燃料电池稳定运行所对应的电极电阻(Ω)，对应于图 1 中的欧姆极化区。各参数随具体的燃料电池结构而有所不同。

燃料电池等效电路模型如图 2 所示^[13]。其中， U_0 为开路电压， $R_{f,A}$ 、 R_Ω 、 $R_{f,C}$ 分别为阳极感应电阻、欧姆电阻以及阴极感应电阻， $C_{dl,A}$ 、 $C_{dl,C}$ 分别为阳极感应电容和阴极感应电容， U 、 I 表示燃料电

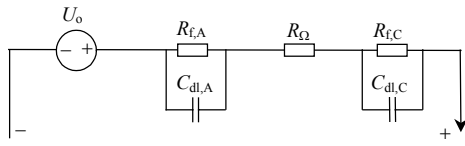


图2 燃料电池等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of fuel cell

池输出端口电压和电流。 $R_{f,A}$ 和 $R_{f,C}$ 是非线性电阻,随着电流变化而变化,当燃料电池工作于电化学极化区和浓差极化区时,这2个电阻相当大,当燃料电池工作于欧姆极化区时,这2个电阻非常小,总电阻 $R_{f,A}+R_{\Omega}+R_{f,C}$ 基本呈线性。

从图1可以看出,燃料电池的外特性很软,也就是说燃料电池输出电压随着负载加大而下降,所以需要变换器才能供给负载应用。实际燃料电池工作区域都在欧姆极化区,只要将变换器工作区间控制于此区域,就可以将式(1)简化为:

$$U = U_o^* - R_{in} I \quad (2)$$

式中 $R_{in}=R_{f,A}+R_{\Omega}+R_{f,C}$,代表燃料电池线性工作区的内阻,而且在欧姆线性区内, $R_{f,A} \ll R_{\Omega}$ 以及 $R_{f,C} \ll R_{\Omega}$,也就是说,如果控制燃料电池工作于欧姆极化区,燃料电池就基本可以等效为一个电压源 U_o^* 与欧姆内阻 R_{Ω} 串联而成。

2 MPPT 算法原理

2.1 欧姆线性区最大功率点

从图1中功率-电流曲线可以看出,燃料电池输出特性存在一个最大功率点。为了充分利用燃料电池装置,可以控制变换装置工作于此最大功率点。根据最大功率传输理论,当燃料电池内阻等于外阻时,得到最大功率输出。如果能够实时检测出内阻,通过控制变换器占空比得到等效外阻等于内阻,就可以得到燃料电池以最大功率传输给负载。然而,燃料电池MPP可能位于欧姆线性区,可能位于浓差极化区,分别需要用不同的方法进行追踪。此外,当燃料电池已经稳定工作于一个MPP状态时,如果外部环境变化,使得燃料电池最大功率点移动后,必须通过算法追踪到新的最大功率点工作。

图3为简化的燃料电池外特性图。由于两点可以确定一条线,将燃料电池变换器控制成电流控制模式,若控制变换器的输入电流(也就是燃料电池输出电流)为 I_1 ,可以检测到相应的燃料电池输出电压

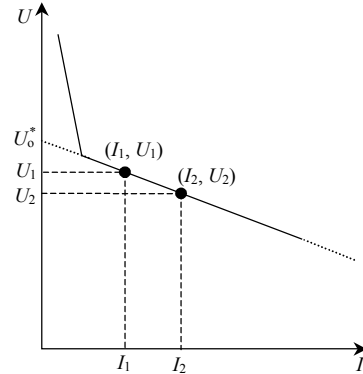


图3 燃料电池简化外特性曲线

Fig. 3 Simple characteristic curve of fuel cell

U_1 ,再控制变换器的输入电流为 I_2 ,可以检测到相应的燃料电池输出电压 U_2 ,可以得到如下表达式:

$$\begin{cases} R_{in} \times I_1 = U_o^* - U_1 \\ R_{in} \times I_2 = U_o^* - U_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中 R_{in} 为燃料电池的等效内阻。从式(3)可以得到式(2)对应的2个参数:

$$R_{in} = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2} = -\frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (4)$$

$$U_o^* = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{I_2 - I_1} \quad (5)$$

从燃料电池往变换器端看,等效外阻 $R_{eq}=U/I$ 。根据最大功率传输理论,当等效外阻等于内阻,即 $U/I=-\Delta U/\Delta I$ 时,系统可以得到最大功率输出,所以最大功率点电流参考值为

$$I_{ref} = \frac{U_o^*}{2R_{in}} = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{2(I_2 - I_1)} \quad (6)$$

具体程序框图如图4所示:通过控制变换器工作于给定电流 I_1 和 I_2 ,检测相应的燃料电池输出电压 U_1 和 U_2 ;根据式(4)和(5)可以计算出燃料电池内阻和欧姆线性区延长到电压轴上的电压,式(6)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} ,然后控制变换器工作于此电流,此时燃料电池已经工作于MPP。此方法只需通过两点就可以计算出工作于欧姆线性区的燃料电池内阻 R_{in} 和线性区延长到电压轴上对应的电压值 U_o^* ,从而可以得出最大功率点对应的电流 I_{ref} ,计算方法简单,可以实现快速跟踪,且最终能够稳定工作于燃料电池最大功率输出。这2个物理参数:内阻和电压值能够反映燃料电池寿命、工作温度、湿度以及燃料的流量等工作环境,有助于对燃料电池进行故

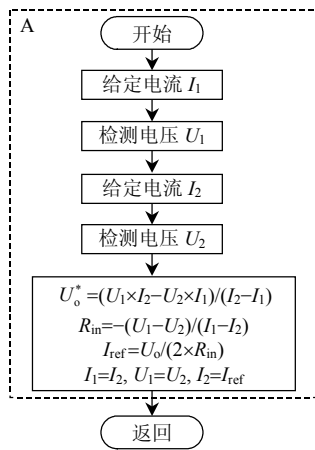


图 4 欧姆线性区 MPPT 程序框图

Fig. 4 MPPT diagram when MPP resides inside the ohmic region

障分析和诊断。图 4 中虚线框 A 表示通过一步计算成功追踪到欧姆线性区 MPPT 的过程。

2.2 浓差极化区最大功率点

2.2.1 固定步长 MPPT 过程

如图 5 所示，如果通过调整燃料电池工作环境使得燃料电池工作状态变化^[16]，基于一歩电阻匹配计算出 MPP 的电流值 I'_{mpp} 超出了欧姆线性区，进入浓差极化区，此时必须将燃料电池的输出电流控制回线性区工作，然后逐步增加电流以追踪最大功率点。然而，此时燃料电池输出的最大功率已经不再是内阻等于外阻对应的功率，而是进入浓差极化区时刻的功率，所以必须进行搜索，搜索过程又可以分为固定步长和自适应步长方式。

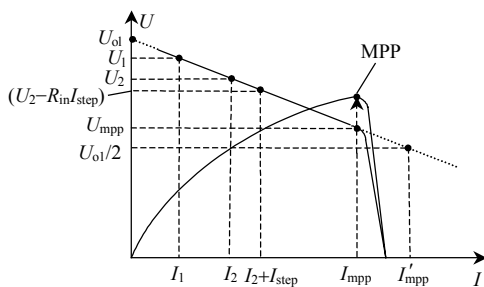


图 5 MPP 不在欧姆区的 MPPT 过程

Fig. 5 MPPT operation when MPP resides outside the ohmic region

程序框图 6 表示通过图 4 框图中的 2 个点 (I_1, U_1) 、 (I_2, U_2) 计算出来 MPP 超出了欧姆线性区时 MPPT 过程，图 6 中的 A 为图 4 中的 A 模块，代表了第一步追踪 MPPT 过程。后一个点的工作电流 I_2 、电压 U_2 传递给前一个点 (I_1, U_1) 存储，通过一步计算出来的 MPP 的电流作为后一点的电流 $I_2 = I_{ref}$ ，检测

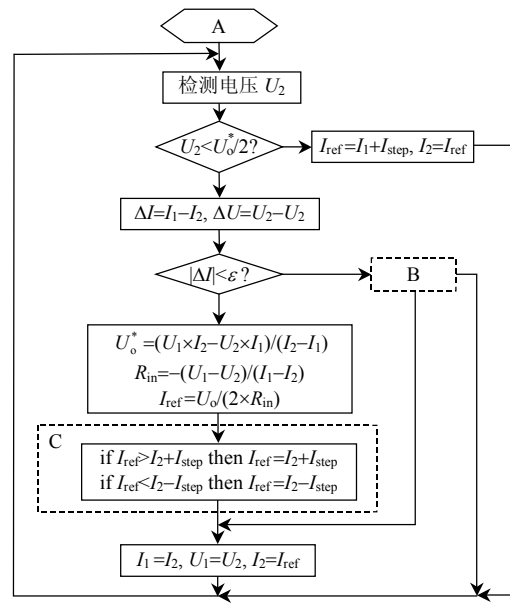


图 6 浓差极化区 MPPT 程序流程图

Fig. 6 MPPT algorithm when MPP resides outside the ohmic region

出此时的电压作为后一点的电压 U_2 ，如果 U_2 低于门槛电压 $U_o^*/2$ (门槛电压根据前一步的计算结果得知)，表示一步计算出来的 MPP 超出了欧姆线性区，则采用 $I_{ref} = I_1 + I_{step}$ (I_{step} 根据燃料电池额定电流和系统快速性要求而定)，将燃料电池的输出电流控制回线性区工作，将新的两点 (I_2, U_2) 和 $(I_{ref}, U_2 - R_{in} I_{step})$ 再通过式(6)计算出 MPP 电流 I_{ref} ，通过控制固定步长 I_{step} 追踪到燃料电池 MPP，此时的 MPPT 过程称为固定步长 MPPT。

考虑到可能存在的数字采样和数值计算误差，如果 2 点电压电流偏差非常小(小于 ϵ)，可以认为系统已经工作于 MPP，稳定在此最大功率点工作。

图 6 中的 B 为特殊情况下为了追踪 MPP 而预留的部分框图，C 为固定步长 MPPT 的追踪过程。

2.2.2 自适应步长的 MPPT 过程

框图 6 中的模块 C 里的步长因子 I_{step} 跟 MPPT 系统的控制精度和速度要求有关，如果采用固定步长 MPPT，步长因子 I_{step} 大，速度快，但精度低；反之，步长因子 I_{step} 小，精度高，但速度慢，所以固定步长存在跟踪速度和稳态精度的矛盾。

从燃料电池往变换器方向看，可得燃料电池系统等效外阻：

$$R_{eq} = \frac{U}{I} = \frac{(U_1 + U_2) / 2}{(I_1 + I_2) / 2} \quad (7)$$

而燃料电池内阻计算公式为式(4)，当 $R_{in} = R_{eq}$

燃料电池最大功率输出。若取系数:

$$q = R_{cq} - R_{in} = \frac{U_1 + U_2}{I_1 + I_2} + \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2} = \frac{2(U_1 I_1 - U_2 I_2)}{I_1^2 - I_2^2} \quad (8)$$

且从图1可以看出, 燃料电池的 $P-I$ 曲线有如下特点:

$$\begin{cases} q > 0, & \text{最大功率左}(R_{in} < R_{cq}) \\ q = 0, & \text{最大功率}(R_{in} = R_{cq}) \\ q < 0, & \text{最大功率右}(R_{in} > R_{cq}) \end{cases} \quad (9)$$

且无论在最大功率点左侧或者右侧, 随着逐渐接近最大功率点, q 的绝对值均单调递减, 当到达最大功率点时, q 的绝对值为零。

根据燃料电池这一内在特性, 可以构造自适应步长表达式:

$$k_1 = G \times q = G \frac{(U_1 I_1 - U_2 I_2)}{I_1^2 - I_2^2} \quad (10)$$

式中 G 为正数, 即变步长速度因子, 用于调整跟踪速度, 由式(10)可以看出, 当燃料电池运行点远离最大功率点时, 跟踪步长大, 反之步长小, 接近于最大功率点时趋近于零。

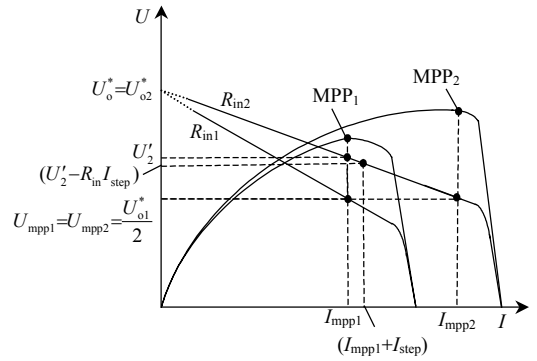
由于 k_1 可能为正、负数或零, 所以若采用自适应步长 MPPT 过程, 此时框图6中的C部分表达式修改为

$$\text{if } |I_{ref} - I_2| > |k_1| I_{step}, \text{ then } I_{ref} = I_2 + k_1 I_{step} \quad (11)$$

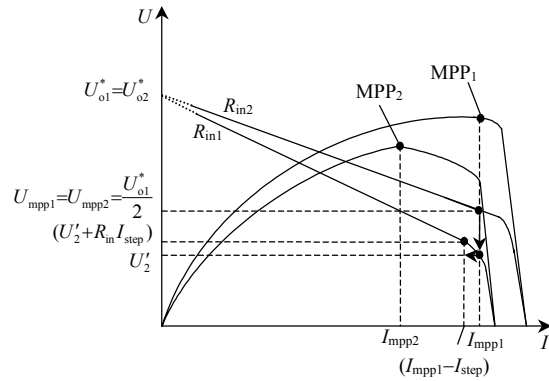
此自适应最大功率跟踪巧妙地利用电阻匹配的改变来控制步长的改变, 内阻和等效外阻相差比较大时, 大步长跟踪, 反之小步长跟踪, 直到最大功率点, 步长为零, 这样可以获得比采用固定步长方法更高的精度, 而且可以稳定工作于最大功率点, 不存在功率波动。

2.3 环境变化的自适应 MPPT 过程

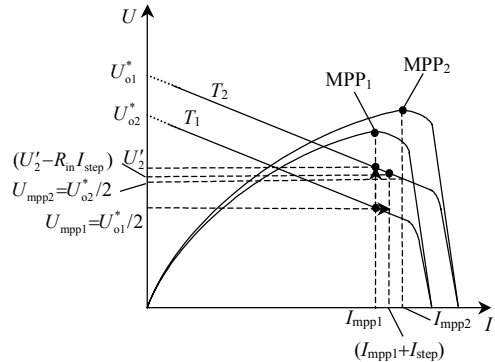
图7表示已经稳定工作于 MPPT, 如果外部环境变化, 使得燃料电池最大功率点移动后, 如何追踪新的最大功率点的工作过程。图7(a), (c)表示, 燃料电池已经稳定工作于最大功率点 MPP_1 时, 实时检测燃料电池输出电压的变化, 当两点电流偏差非常小(小于 ε), 但是电压明显增大(U_{mpp1} 增大到 U'_2), 表示燃料电池流量增大、浓度增大、温度提高或者湿度达到合适的调整等因素使得燃料电池内阻 R_{in} 变小或 U_o^* 增大, 此时由于最大功率点所对应的电流增大, 增大给定电流 $I_{mpp1} + I_{step}$, 检测此时



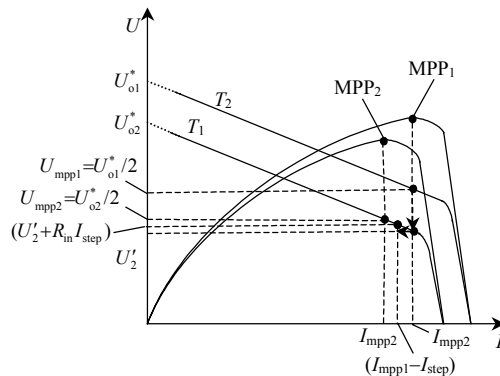
(a) $R_{in2} < R_{in1}$



(b) $R_{in2} > R_{in1}$



(c) $T_2 > T_1$



(d) $T_2 < T_1$

图7 环境变化引起最大功率点变化的追踪过程

Fig. 7 New MPPT process with the variable operation environment

燃料电池输出电压 $U'_2 - R_{in} I_{step}$, 通过式(6)继续跟踪

新的最大功率点；反之，图 7(b), (d)表示，燃料电池已经稳定工作于最大功率点 MPP_1 时，实时检测燃料电池输出电压的变化，当两点电流偏差非常小（小于 ϵ ），但是电压明显减小（ U_{mpp1} 减小到 U'_2 ），表示燃料电池流量减小、浓度减小、温度降低，湿度偏低出现干燥或者湿度偏大出现水泛滥等因素使得燃料电池内阻 R_{in} 变大或 U_o^* 减小，此时由于最大功率点所对应的电流减小，减小给定电流 $I_{mpp1} - I_{step}$ ，检测此时燃料电池输出电压 $U'_2 + R_{in}I_{step}$ ，通过式(6)继续跟踪新的最大功率点。为了实时跟踪外部环境变化时新的 MPP，程序框图 6 中的 B 模块框图如图 8 所示。

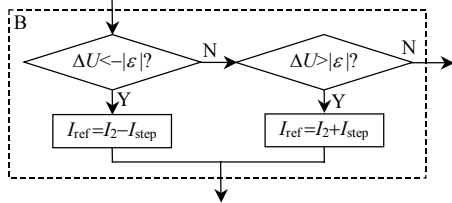


图 8 自适应环境变化 MPPT 部分框图

Fig. 8 Algorithm for tracking MPP under changing operating condition

图 8 中的电流调整实现 2 个功能：1)根据电压变化，判断新的 MPP 位置，确定追踪新的 MPP 的方向；2)在新的线性曲线上找出另外一点 (I_{ref}, U_2) ，从而可以与已经位于新的曲线上的另外一点 (I_{mpp1}, U'_2) 计算出新的 MPP 位置，基于自适应步长追踪到新的 MPP。

文献[14]是应用于光伏系统的变步长 INC 方法，可以根据离 MPP 距离自适应确定步长尺寸，实现优化 INC 方法。然而，环境变化引起的步长因子与追踪步长因子采用同一个值，如果已经追踪到 MPP，步长因子已经等于零，此时环境变化引起的 MPP 的变化，采用零步长因子将不能追踪到新的 MPP。本文采用固定确定方向的步长因子(图 8 中的 I_{step})和自适应追踪步长因子(图 6 中的 $k_1 I_{step}$)相结合，不但解决了速度和精度的矛盾，同时实现了 MPPT 方法的自适应环境变化能力。

此 MPPT 方法能够快速追踪到燃料电池最大功率输出，而且适应于具有不同输出特性的燃料电池最大功率跟踪控制；如果燃料流量变化、浓度变化、温度变化或者湿度变化将引起内阻或电压变化，此时最大功率点也变化，通过增大或减少燃料电池输出电流去寻找新的 MPP，从而加强其适应环境变化

的能力；同时燃料电池控制系统可以根据计算出内阻值，判断燃料电池工作条件，通过适度调整工作状态，有利于延长燃料电池的寿命，以及输出的物理参数对燃料电池故障诊断提供帮助。

3 实验系统与结果

为了验证基于在线内阻监测的最大功率跟踪方法的正确性和可行性，利用实验室已有的额定功率为 10W 的 Apollo DMFC Stack 完成了燃料电池/超级电容混合能量系统实验，如图 9 所示。具体参数如下。燃料电池输出最大功率： $P_{fc}=12\text{ W}$ ；燃料电池输出电压： $U_{fc}=6\sim 10.8\text{ V}$ ；系统输出电压： $U_o=20\text{ V}$ ；输出容量：满载 $P_o=10\text{ W}$ ，峰值功率 20W 维持 10s，最低负载 2W。

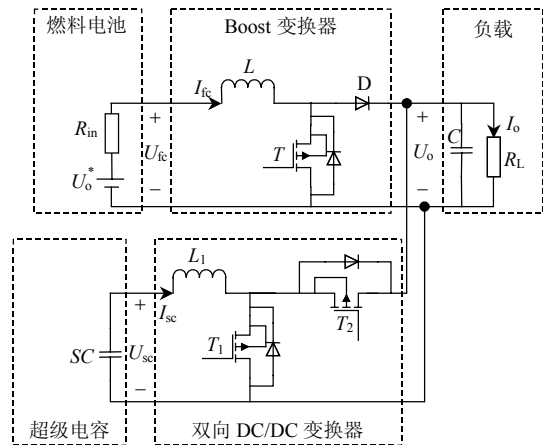


图 9 燃料电池混合能量系统

Fig. 9 Hybrid energy system of DMFC and SC

超级电容器快速提供充放电功率平抑输出波动时，其电压会随之迅速变化并可能导致过充放电的发生，过充电会严重影响超级电容器使用寿命，过放电则会导致超级电容器输出功率受限，因此通常对超级电容充放电限制在额定电压 U_{rate} 和最低电压 $U_{rate}/2$ 之间^[17]。根据 $\frac{1}{2}C[U_{rate}^2 - (\frac{U_{rete}}{2})^2] = P \times t$ ，选择的超级电容， $C=2\text{ F}$ ， $U_{rate}=12\text{ V}$ 。

燃料电池输出电压低，通过一个 Boost 电路升压给负载供电。辅助电源用功率密度大的超级电容，通过双向变换器在负载侧与 Boost 变换器输出端并联，满足负载快速性要求以及实现能量系统功率平衡。

通过调节 Boost 变换器输入电流，也就是控制燃料电池输出电流来跟踪燃料电池的最大功率输出。通过控制双向变换器实现恒压输出的负载调节

特性。混合能量系统中燃料电池为主供电电源,系统在正常额定工作时,所有能量由燃料电池提供,而超级电容作为辅助能量存储装置在系统冷启动和过载时给负载供电,在轻载或者负载反馈能量时吸收多余的能量^[18-21]。

图 10 为甲醇流量为 120 和 180 mL/min 流过 DMFC 时的燃料电池电压、功率外特性曲线。从图 10 可以看出: 1) 2 种情况流量都存在最大功率点, 120 mL/min 时燃料电池最大功率为 10 W(对应外特性曲线上的 A 点), 180 mL/min 时燃料电池最大功率为 12 W(对应外特性曲线上的 B 点); 2) 当甲醇流量变小时, 尽管电化学极化区变化不大, 但是欧姆内阻变大; 3) 当甲醇流量变小时, 电压电流曲线在相对低电流时就进入了浓差极化区。

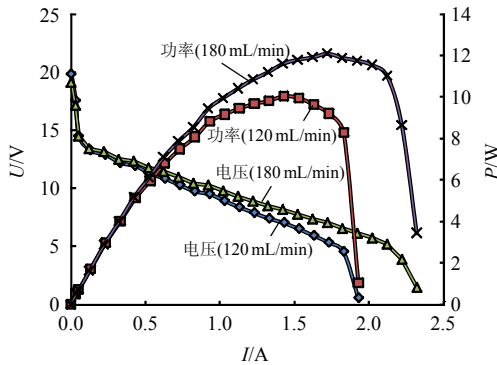
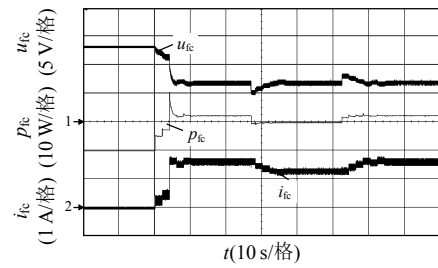


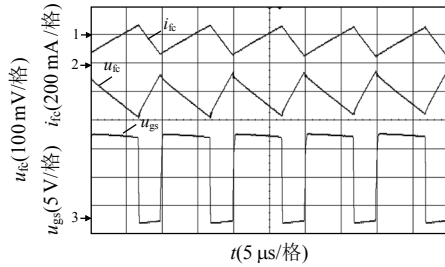
图 10 燃料电池输出电压和功率对电流的外特性测量曲线

Fig. 10 Measured output voltage and power characteristics for 120 mL/min and 180 mL/min methanol solution's flow rates

图 11 为燃料电池通过 Boost 变换器工作于最大功率跟踪状态单独供电负载, 在 21 s (10 s/格) 启动燃料电池跟踪到甲醇流量 180 mL/min 流过 DMFC 时的最大功率; 然后在 48 s 时, 将燃料调到 120 mL/min 流过 DMFC, 最后在 73 s 时, 将燃料调回到 180 mL/min 的过程中流过 DMFC 时燃料电池输出电压 u_{fc} (1 通道, 5 V/格), 燃料电池输出电流 i_{fc} (2 通道, 1 A/格) 以及燃料电池输出功率 $P_{fc}(u_{fc} \times i_{fc})$ 波形。可以看出, 当甲醇流量为 180 mL/min 时, 启动以及跟踪在 10 s 内完成, 燃料电池输出的最大功率输出 12 W, 当流量调到 120 mL/min 时, 燃料电池输出的最大功率迅速降低到 10 W, 跟踪时间为 3 s, 跟踪迅速, 且无功率波动。2 种流量工况, 燃料电池输出电压基本不变, 表明 U_o^* 基本不变, 也就是电化学极化区基本不变; 燃料流量增大, 燃料电



(a) 2 种流量的 MPPT 下燃料电池输出电压和电流



(b) 180 mL/min 时燃料电池输出电流和电压的交流分量与驱动的关系图

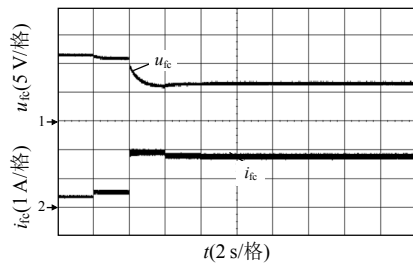
图 11 2 种流量下燃料电池 MPPT 特性曲线

Fig. 11 The MPPT characteristics curve of fuel cell under two step changes of methanol solution's flow rate

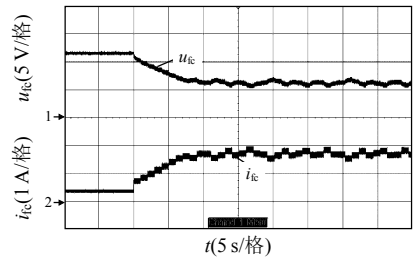
池最大功率工作电流增大, 表明线性区内阻减小, 这是由于流量增大后, 甲醇浓度增加, 使反应更加充分所致。2 种流量下最大功率完全等于图 10 中离线检测的数据(对应图 10 中 A 点和 B 点), 说明最大功率跟踪算法准确。图 11(b) 表示流量为 180 mL/min 时燃料电池输出电流和电压的交流分量 i_{fc} (200 mA/格) 和 u_{fc} (100 mV/格) 与驱动的关系图。从交流信号可以看出, 此电源是含有内阻的电源(燃料电池含有内阻); 此时占空比为 67% (5 μ s/格), 实验中发现当流量为 120 mL/min 时, 占空比为 63%, 这是由于流量变小后, 燃料电池内阻变大, 系统输出电阻不变时, 必须通过降低占空比来跟踪新流量下的最大功率输出。

图 12(a) 和 (b) 分别表示用本文提出的基于电阻匹配的 MPPT 方法和经典的 P&O 方法去追踪流量为 180 mL/min 时的 MPP 的过程。

从图 12 可以看出: 1) P&O 方法在追踪 MPP 时经历爬坡的过程, 经历 10 s 达到最大功率; 电阻匹配方法在追踪 MPP 时一步计算完成, 经历 4 s 达到最大功率; 说明电阻匹配方法实现 MPPT 迅速。2) 当达到最大功率后, P&O 方法不停地扰动电流来观察功率, 不能稳定在最大功率点上, 这种扰动将降低燃料电池效率, 如果扰动幅度过大, 燃料电池工作点可能进入浓差极化区, 将降低燃料电池寿



(a) 基于电阻匹配的 MPPT 追踪过程



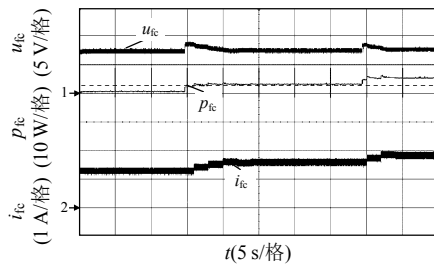
(b) 基于 P&O 的 MPPT 追踪过程

图 12 2 种 MPPT 方法启动过程的燃料电池电压和电流曲线

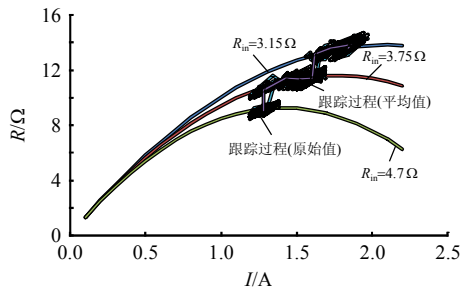
Fig. 12 Start-up voltage (u_{fc}) and current (i_{fc}) waveforms of fuel cell for the two MPPT method

命；而这些致命弱点在电阻匹配方法中不再存在，保证了燃料电池工作效率和寿命。

图 13 为连续 2 次改变燃料流量(15 s 时，从 120mL/min 升到 180mL/min, 40s 时，从 180mL/min



(a) 连续调节流量的 MPPT 过程燃料电池输出电压和电流



(b) 连续调节流量的 MPPT 过程功率-电流曲线

图 13 连续调节流量的 MPPT 过程特性曲线

Fig. 13 The MPPT characteristics curve under continuous changes of methanol solution's flow rate

升到 250mL/min, 电阻匹配方法 MPPT 过程的电压电流和功率曲线。图 13(b)中的功率、电流和电阻值是根据图 13(a)中 3 种流量下最大功率跟踪过程燃料电池的端口电压和电流以及实时检测的内阻值而得到的曲线。3 条功率-电流曲线是根据电阻匹配 MPPT 输出的 2 个物理参数 R_{in} 和 U_o^* 画出的理想曲线，跟踪过程曲线就是图 13(a)对应的电流和功率实验值。从图 13 可以看出，基于电阻匹配的 MPPT 方法能够随着工作环境变化而准确快速追踪燃料电池新的最大功率点。

4 结论

为了充分利用燃料电池本身，本文在分析了燃料电池特性的基础上提出了一种在线内阻监测的燃料电池最大功率跟踪算法，可以实时计算出燃料电池不同环境下的内阻变化，实时跟踪燃料电池最大功率输出。固定步长确定 MPP 方向和自适应变步长追踪新 MPP 相结合，能准确快速地跟踪燃料电池的最大功率点，动态性能好，且不存在功率波动，有效地解决了动态性能和稳态精度矛盾。在一台基于 DSP(TMS320LF2812)控制的燃料电池/超级电容混合能量系统上，将本文提出的最大功率跟踪算法在燃料电池不同环境下进行最大功率跟踪验证。通过实验证明：本文提出的最大功率跟踪算法简单、快捷、准确、环境适应能力强，充分发挥了燃料电池系统效能，具有较好的实用价值，此算法可应用于各种燃料电池的最大功率跟踪控制，实时监测的物理参数有助于燃料电池故障诊断研究。

参考文献

- [1] Rajashekara K. Hybrid fuel-cell strategies for clean power generation[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(3): 682-689.
- [2] Benziger J B, Satterfield M B, Hogarth W H J, et al. The power performance curve for engineering analysis of fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2006, 155(2): 272-285.
- [3] Zheng Z D, Huo H B, Zhu X J, et al. Adaptive maximum power point tracking control of fuel cell power plants[J], Journal of Power Sources. 2007, 176(1): 259-269.
- [4] Giustiniani A, Egiziano L, Petrone G, et al. Optimization of perturb and observe control of grid connected PEM fuel cells[C]/International Conference on Clean Electrical Power Renewable Energy Resources Impact, Capri, Italy, 2009.

- [5] Dargahi M, Rouhi J, Rezanejad M, et al. Maximum power point tracking for fuel cell in fuel cell/battery hybrid power systems[J]. European Journal of Scientific Research, 2009, 25(4): 538-548.
- [6] Alessandro G, Giovanni P, Giovanni S, et al. Low-frequency current oscillations and maximum power point tracking in grid-connected fuel-cell-based systems [J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2010, 57(6): 2042-2053.
- [7] Carlos A R P, Giovanni S, Giovanni P, et al. Fuel cell MPPT for fuel consumption optimization[C]//IEEE International Symposium on Circuits And Systems, Paris, Franc, 2010.
- [8] Chanasut N, Premrudeepreechacharn S. Maximum power control of grid-connected solid oxide fuel cell system using adaptive fuzzy logic controller[C]//IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Alberta, Canada, 2008.
- [9] ESRAM T, Chapman P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2007(22): 439-449.
- [10] 张超, 何湘宁. 短路电流结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 98-102.
Zhang Chao, He Xiangning. Short-current combined with perturbation and observation maximum-power-point tracking method for photovoltaic power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 98-102(in Chinese).
- [11] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政, 等. 单级式光伏并网逆变系统中的最大功率点跟踪算法稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 73-77.
Wu Libo, Zhao Zhengming, Liu Jianzheng, et al. Research on the stability of MPPT strategy applied in single-stage grid-connected photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 73-77(in Chinese).
- [12] Fontes G, Turpin C, Astier S, et al. Interactions between fuel cells and power converters: Influence of current harmonics on a fuel cell stack[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2007, 22(2): 670-678.
- [13] Hayre R O, Cha S W, Colella W, et al. Fuel cell fundamentals[M]. American: John Wiley & Sons Inc, 2005: 221-225.
- [14] Liu Fangrui, Duan Shanxu, Liu Fei, et al. A variable step size INC MPPT method for PV systems[J], IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2622-2628.
- [15] Larminie J, Dicks A. Fuel cell systems[M]. American: John Wiley & Sons, 2000: 59-60.
- [16] Yan W M, Liu H C, Soong C Y, et al. Numerical study on cell performance and local transport phenomena of PEM fuel cells with novel flow field designs[J]. Journal of Power Sources, 2006, 161(2): 907-919.
- [17] Phatiphat T, Stéphane R, Bernard D. Control strategy of fuel cell/supercapacitors hybrid power sources for electric vehicle[J]. Journal of Power Sources, 2006(158): 806-814.
- [18] Jiang Z, Dougal R. A compact digitally controlled fuel cell/battery hybrid power source[J]. IEEE Trans. on Industry Electronics, 2006, 53(4): 1094-1104.
- [19] 张方华, 朱成花, 严仰光. 双向 DC-DC 变换器的控制模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 46-49.
Zhang Fanghua, Zhu Chenghua, Yan Yangguang. The controlled model of Bi-directional DC-DC converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 46-49(in Chinese).
- [20] 廖志凌, 阮新波. 独立光伏发电系统能量管理控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 46-52.
Liao Zhiling, Ruan Xinbo. Energy management control strategy for stand-alone photovoltaic power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 46-52(in Chinese).
- [21] 朱选才, 徐德鸿, 吴屏, 等. 燃料电池发电装置能量管理控制系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(11): 101-106.
Zhu Xuancai, Xu Dehong, Wu Ping, et al. Design of energy management control in fuel cell power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(11): 101-106(in Chinese).



朱国荣

收稿日期: 2011-02-26。

作者简介:

朱国荣(1975), 女, 博士后, 研究方向为电力电子变换技术与电力传动控制技术, 可再生能源能量管理技术, zhgr_55@hotmail.com。

(责任编辑 车德竞)