

基于频率正割角的 PEMFC 性能优化

高 志, 卫 东, 王 振, 童 鹏

(中国计量大学机电工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 传统 EIS 法利用扫频的方式得到阻抗谱曲线, 进而对燃料电池内部进行水热管理。然而该方法测试时间冗长且过程繁琐, 不适合在线实时优化。该文在此基础上提出一种快速 EIS 法——频率正割角法, 通过引入阻抗正割角 α , 将传统 EIS 法使用一组频率信号简化为最高频率 M_1 和高频转折频率 M_2 这 2 个高频信号, 通过采样这两处频率点的阻抗信息, 获得两点连线与实轴的夹角 α , 并利用仿真及实验得出理想条件下转折频率 f_{opt} 和 α_{opt} , 作为控制标准, 将当前状态下 α 与理想条件下 α_{opt} 对比进而对操作条件进行调节, 实现燃料电池堆内部快速的水热管理, 比传统方法更加经济实用。

关键词: 燃料电池; 水热状态; 频率正割角法; 转折频率; 操作条件

中图分类号: TM911.4

文献标识码: A

0 引 言

质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 的输出性能受其内部水热状态影响较大^[1], 在实际使用中需要实时调节其操作条件, 使其内部达到较理想的水热环境, 而堆内水热状态最直观反映是内部阻抗的大小^[2,3], 需要通过实验来测得燃料电池的内部阻抗, 以此推测其水热状态, 进而实时调节其操作条件。研究者对此做了许多研究, 文献[4,5]通过断流法对电池内部阻抗进行测量, 然而断流法在电流切断瞬间危险且操作难度大, 不适合在线频繁的测试; 文献[6]在不同情况下使用电化学阻抗谱法 (EIS 法) 对内部阻抗进行测量, 然而该方法测试时间较长, 阻抗参数拟合过程繁琐, 也不适合在线实时测试。

本文在传统 EIS 法的基础上提出一种快速 EIS 法, 根据电化学阻抗谱特性曲线的变化规律, 选取 2 个特定频率点, 通过检测两处频率点响应信号的实部和虚部, 求得两点连线与实轴的正割角 α , 通过 α 的大小来判断电池内部的水热情况, 并作为控制依据, 实现更有效的水热管理, 优化燃料电池输出性能。

1 方法简介

根据 PEMFC 阻抗谱特性曲线变化规律, 结合燃料电池堆等效电路的电路特性, 选取 2 个具有明显特征的频率点, 设为 M_1 、 M_2 , 测量采样点 M_1 、 M_2 的阻抗信息, 根据 M_1 及 M_2 点的实部与虚部值, 计算两点连线与实轴的正割角 α 。取 M_1 点为交流阻抗谱曲线与实轴的高频交点, 即为点 $(R_m, 0)$ ^[7], 该点为交流阻抗实验的最高频率点, 定为 20 kHz^[8]; 取 M_2 点为等效电路的高频转折频率点, 该点与 M_1 点连线与实轴所成夹角 α , 与堆内阻抗直接相关。方法示意如图 1 所示。

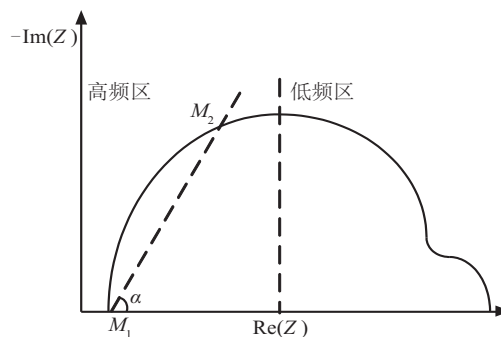


图1 频率正割角法阻抗谱采样点分区示意图

Fig. 1 Impedance spectrum sampling point partition map based on frequency secant angle method

收稿日期: 2017-03-09

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFF0210702)

通信作者: 卫 东 (1969—), 男, 博士、教授, 主要从事新能源发电系统检测、控制与故障诊断技术方面的研究。wd101@cjlu.edu.cn

通过该方法可得到当前操作条件下 PEMFC 的膜阻抗:

$$Z_{M1} = Z_{R1} - j \cdot Z_{i1} \quad (1)$$

$$Z_{M2} = Z_{R2} - j \cdot Z_{i2} \quad (2)$$

式中, Z_{R1} 、 Z_{i1} 和 Z_{R2} 、 Z_{i2} —— M_1 、 M_2 频率点下测得的响应信号实部与虚部值。

由于 M_1 点频率为交流阻抗实验的最高频率, 所以 Z_{i1} 值约等于零, Z_{R1} 为膜阻抗值, 计算得出正割角 α 值为:

$$\alpha = \arctan \frac{Z_{i2}}{Z_{R2} - Z_{R1}} \quad (3)$$

2 建模和理论分析

2.1 电路模型

在 PEMFC 中存在双电层现象^[9], 即 H^+ 会聚集在质子交换膜表面, 而电子会聚集在电极的表面。它们产生的电压, 等效于在极化电阻两端并联 1 个电容 C , 使电极和质子交换膜表面以及附近电荷层进行电荷和能量储存。这个电容称之为等效电容。因此, 燃料电池电压动态特性模型可通过在其稳定模型下, 增加 1 个电容 C 进行建模, 等效电路模型^[10]如图 2 所示。

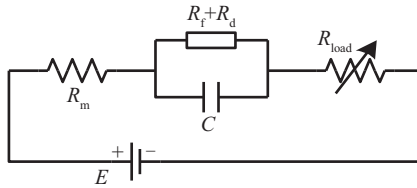


图2 PEMFC 等效电路模型

Fig. 2 PEMFC equivalent circuit model

图 2 中 R_{load} 是外部负载, R_m 是膜电阻, 即式(1)中 $Z_{R1} = R_m$, R_f 和 R_d 分别为活化电阻和扩散电阻, 令 $R_a = R_f + R_d$, 则燃料电池内部阻抗为:

$$Z = R_m + \frac{R_a \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R_a + \frac{1}{j\omega C}} = \left[R_m + \frac{R_a}{(\omega C \cdot R_a)^2 + 1} \right] - j \frac{\omega C \cdot R_a^2}{(\omega C \cdot R_a)^2 + 1} \quad (4)$$

式中, ω ——角频率, Hz。

根据电路的知识, 该 RC 串并联电路存在 2 个转折频率点^[11], 分别为:

$$\text{低频点: } f_1 = \frac{1}{2\pi C \cdot R_a} \quad (5)$$

$$\text{高频点: } f_2 = \frac{1}{2\pi C \cdot \frac{R_a \cdot R_m}{R_a + R_m}} \quad (6)$$

1) 当信号频率低于 f_1 时, 双电层电容 C 相当于开路, 此时测出阻抗为 R_m 与 R_a 之和;

2) 当信号频率高于 f_2 时, 双电层电容 C 相当于短路, 此时测出阻抗只有 R_m ;

3) 当信号频率在 f_1 与 f_2 之间时, 此时测出阻抗值将在 R_m 到 $(R_m + R_a)$ 之间变化。

2.2 转折频率的选取

现假设 M_2 点频率取电路的转折频率, 分别求出 2 个转折频率点的实部和虚部。

1) 当 M_2 点频率取低频转折频率 f_1 时, 角频率如式(7)所示:

$$\omega = 2\pi f_1 = \frac{1}{R_a \cdot C} \quad (7)$$

此时阻抗 Z 的实部为:

$$\begin{aligned} Z_{R2} &= R_m + \frac{R_a}{(\omega C R_a)^2 + 1} \\ &= R_m + \frac{R_a}{\left(\frac{1}{C R_a} \cdot C R_a\right)^2 + 1} = R_m + \frac{R_a}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

阻抗 Z 的虚部为:

$$Z_{i2} = \frac{\omega C \cdot R_a^2}{(\omega C \cdot R_a)^2 + 1} = \frac{\frac{1}{C R_a} \cdot C R_a^2}{\left(\frac{1}{C R_a} \cdot C R_a\right)^2 + 1} = \frac{R_a}{2} \quad (9)$$

所以该点与 M_1 点做割线与实轴的角度为:

$$\alpha = \arctan \frac{Z_{i2}}{Z_{R2} - Z_{R1}} = 45^\circ \quad (10)$$

因为该角度是一个定值, 与电池内部温湿度等性能影响因素无关, 不能表征出当前状态下燃料电池内部水热环境, 故舍弃该角度。

2) 当 M_2 点频率取高频转折频率 f_2 时, 角频率如式(11)所示:

$$\omega = 2\pi f_2 = \frac{1}{C \cdot \frac{R_a \cdot R_m}{R_a + R_m}} \quad (11)$$

此时阻抗 Z 的实部为:

$$Z_{R2} = R_m + \frac{R_a}{(\omega C R_a)^2 + 1} = R_m + \frac{R_a \cdot R_m^2}{(R_a + R_m)^2 + R_m^2} \quad (12)$$

虚部:

$$Z_{i2} = \frac{\omega C \cdot R_a^2}{(\omega C \cdot R_a)^2 + 1} = \frac{R_a R_m (R_a + R_m)}{(R_a + R_m)^2 + R_m^2} \quad (13)$$

所以该点与 M_1 点做割线与实轴的夹角为:

$$\alpha = \arctan \frac{Z_{i2}}{Z_{R2} - Z_{R1}} = \arctan \left(1 + \frac{R_a}{R_m} \right) \quad (14)$$

因为该夹角是一个与 R_a 、 R_m 直接相关的量, R_a 、 R_m 与堆内水热环境又息息相关, 所以 α 角的不断变化可反映出堆内的水热环境变化, 将 M_2 点的频率定为 f_2 。

2.3 α 角特性机理分析

频率正割角 α 虽与内阻直接有关, 但两者关系并非一一对应, 故不好直接用于燃料电池输出性能的实时优化; 由式(6)可知, 高频转折频率 f_2 与内阻直接相关, 只有当 f_2 确定, α 才能相应确定, 所以选取高频转折频率 f_2 和频率正割角 α 这 2 个特性参数, 研究与内阻的特性关系。将式(6)、式(14)联立求解可得:

$$\begin{cases} R_m = \frac{\tan \alpha}{2\pi C \cdot f_2 (\tan \alpha - 1)} \\ R_a = \frac{\tan \alpha}{2\pi C \cdot f_2} \end{cases} \quad (15)$$

燃料电池正常工作输出为直流电, 不用考虑容性阻抗及其他复阻抗, 根据等效电路模型有:

$$R_{\text{stack}} = \frac{\tan \alpha}{2\pi C \cdot f_2 \left(1 - \frac{1}{\tan \alpha} \right)} \quad (16)$$

由式(16)可知, 只有当高频转折频率 f_2 和频率正割角 α 同时确定, 总内阻 R_{stack} 才能确定; 因此, 如果确定了理想高频转折频率 f_{opt} 和理想频率正割角 α_{opt} , 向电堆发射最高频率和当前工况下理想转折频率 f_{opt} 两组交流测试信号, 测其当前工况下 α 角大小; 再调节冷却水流量、进气加湿度等控制变量改变堆内水热环境, 改变当前 α 角值, 使得 α 与 α_{opt} 一致, 那么在调节完成后, 此时的堆内总阻抗 R_{stack} 即与最佳状态下的总阻抗一致, 即为最优工作状态。

对比传统的输出性能优化方法, 一般直接以最佳温湿度为控制指标, 虽然简单清晰, 但由于操作条件之间存在耦合特性, 导致控制难度大、控制精度不高; 此外外部参数(电压、电流)并

不等同于堆内的真实水热环境, 其内部水热环境与燃料电池堆前一反应状态以及所处的外部环境条件都有关系; 而内阻与堆内反应环境直接相关, α 角直接由内阻决定, 以 α 角为控制指标与温湿度操作条件相比, 优化效果更佳, 且具有良好的实时性能。

3 α 角输出性能优化实验

3.1 实验系统

为研究 α 角与电池性能的内在关系, 现设计实验, 实验平台由上海神力公司搭建, 额定电流为 100 A, 电堆由 10 片单电池组成, 单片有效反应面积为 120 cm²。采用日本菊水公司的阻抗测试系统 KFM2150 进行交流阻抗实验, 电子负载选用菊水公司的 PLZ1004W 型号。通过埋设在双极板内部的 3 个温度传感器, 加权平均处理后, 作为堆内温度, 温度传感器精度为 ± 0.2 °C; 由于电池内部封装严密, 无法直接测量湿度, 尾气排放又是瞬态过程, 用尾气排放口处湿度代替堆内湿度虽有误差, 但误差可接受, 湿度传感器精度 $\pm 2\%$; 通过调节风扇和膜管增湿器控制堆内的温湿度, 通过 CAN 总线实现电堆与上位机的通信, 本文自主设计 Labview 界面, 可实时采集下位机电气数据展示在界面上; 阻抗测试仪输出的交流信号频率最低 0.01 Hz, 最高可达 20 kHz, 幅值范围能设定在负载电流大小的 0.1%~10% 之间。实验系统如图 3 所示。

3.2 实验思路与步骤

当燃料电池工作在恒定功率点时, 总内阻 R_{stack} 最小对应堆内水热状态最优, 最优的水热管理状态, 能够保证电池工作在最佳工况下。由于本文的实验系统与文献[12]相同, 最优操作条件参考其所得结论, 文献[12]通过 $V-I$ 特性曲线法, 活化段以定电流下电压高、欧姆段以定功率下斜率小、浓差段以定电压下电流大的寻优原则, 研究最佳操作条件与电流密度的变化规律, 获得了多个功率点的最佳操作条件, 建立两者之间的经验模型; 上述寻优原则与总内阻 R_{stack} 最小近似成等价关系, 可用此结论结合上文机理模型, 进一步探究理想转折频率 f_{opt} 和理想正割角 α_{opt} 与电流密度 i 的关系。

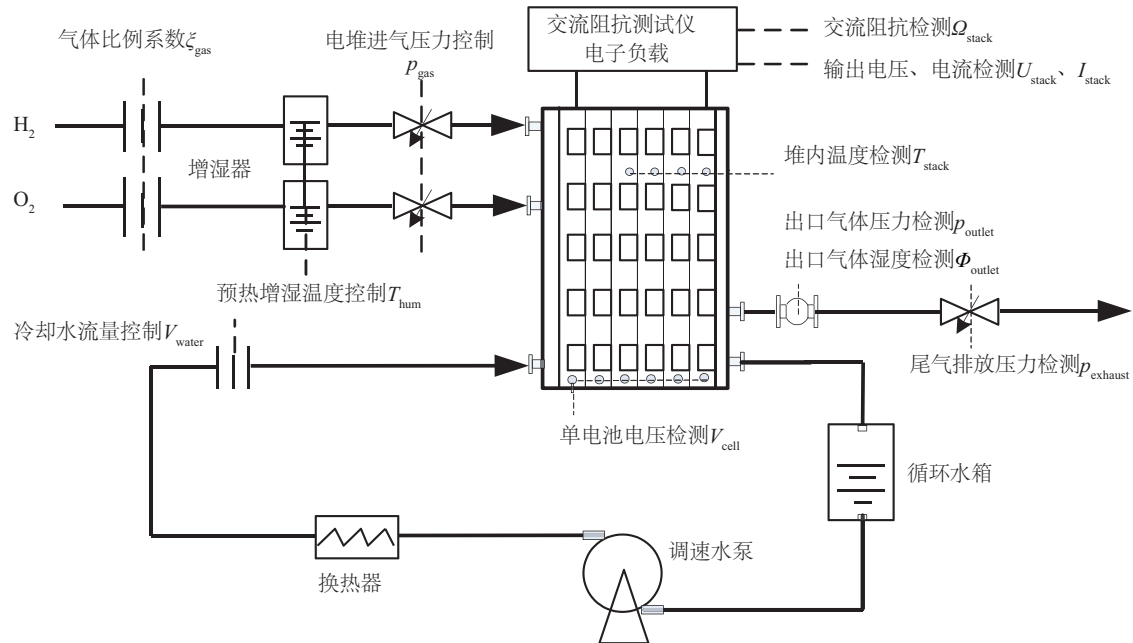


图3 水冷型燃料电池实验系统

Fig. 3 Water cooled type fuel cell experiment system

在此基础上进行实验,电流密度为 $0.1 \sim 1.2 \text{ A/cm}^2$ 范围内,以步长为 0.1 共选取 12 个电流密度点,通过调节电子负载使电堆依次稳定工作在上述电流密度点下;其次,通过调节冷却水流量、进气加湿度等控制变量,改变堆内的温湿度值,使其稳定工作在文献[12]所得的最佳操作条件工况下;然后,阻抗测试仪依次发射 3 、 8 、 13 、 20 kHz 共 4 组高频测试

信号,采集得到多组响应信号,剔除异常点后求出 4 组信号的响应平均值 $Z_1 \sim Z_4$,代入式(17)中,联立方程组求解出 R_f 、 R_m 、 R_d 、 R_{dl} 大小,再代入式(6)、式(14)中,计算出对应的转折频率 f_2 和 α_{opt} ;最后调节电子负载,使电堆工作在不同的电流密度下,重复上述实验,实验结果如表 1 所示。

表 1 最佳工况下不同电流密度各阻抗及 f_{opt} 、 α_{opt} 实验结果Table 1 Each impedances and f_{opt} , α_{opt} experimental result under different current density in best working condition

电流密度 $i/\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$	电堆各阻抗及容抗				转折频率	频率正割角
	$R_m/\text{m}\Omega$	$R_f/\text{m}\Omega$	$R_d/\text{m}\Omega$	C_{dl}/F	f_{opt}/Hz	$\alpha_{\text{opt}}/(\text{ }^\circ)$
0.1	7.73	15.03	0.57	0.0337	913.72	71.67
0.2	7.86	9.83	0.64	0.0343	1033.55	66.79
0.3	7.79	7.69	0.81	0.0354	1091.65	64.15
0.4	8.86	4.84	1.04	0.0368	1223.69	58.99
0.5	9.59	2.51	1.31	0.0378	1541.30	54.43
0.6	9.06	1.58	1.63	0.0388	1650.66	53.56
0.7	8.28	1.19	2.01	0.0395	1695.81	54.20
0.8	7.50	1.04	2.67	0.0400	1603.04	56.22
0.9	6.58	1.01	3.71	0.0401	1484.11	59.79
1.0	5.40	1.00	5.19	0.0402	1452.80	65.02
1.1	4.27	1.00	6.83	0.0403	1429.30	70.56
1.2	3.90	0.98	8.84	0.0403	1414.84	74.13

$$\begin{cases} R_m + \frac{R_f + R_d}{(R_f + R_d) \cdot j\omega_1 C + 1} = Z_1 \\ R_m + \frac{R_f + R_d}{(R_f + R_d) \cdot j\omega_2 C + 1} = Z_2 \\ R_m + \frac{R_f + R_d}{(R_f + R_d) \cdot j\omega_3 C + 1} = Z_3 \\ R_m + \frac{R_f + R_d}{(R_f + R_d) \cdot j\omega_4 C + 1} = Z_4 \end{cases} \quad (17)$$

3.3 理想转折频率 f_{opt} 与 α_{opt} 角经验模型

表 1 列出了最优操作条件下电流密度与转折频率 f_{opt} 、频率正割角 α_{opt} 的对应关系,使用 Matlab 拟合工具箱,对数据进行公式拟合,得到电流密度 i 分别与转折频率 f_{opt} 、 α_{opt} 角的经验为:

$$f_{opt} = (8.56i^4 - 22.19i^3 + 17.49i^2 - 3.55i + 1.13) \cdot 10^3 \quad (18)$$

$$\alpha_{opt} = -130.67i^4 + 338.89i^3 - 225.97i^2 - 10.65i + 72.23 \quad (19)$$

式(18)、式(19)的模型决定系数分别为 0.933 和 0.942,均大于 0.9,即回归平方和/实验值离散均差平方和达到显著性水平,表明模型具有较高的精度。

3.4 频率正割角方法优化步骤

在实际操作中,首先需要确定燃料电池的当前工作电流密度,代入式(18)、式(19)中计算出当前工作电流下的 f_{opt} 、 α_{opt} ;再使用交流阻抗测试仪或其他信号发射设备,向电堆发射最高频率 20 kHz 和理想转折频率 f_{opt} 的两组交流电信号,采集响应信号计算两者连线与实轴的夹角 α ,即当前工况下 α 角;最后,调节控制变量改变堆内水热状态,进而改变当前 α 角,使得 α 趋向于 α_{opt} ,当近似相等时调节完成,此时燃料电池工作在最佳工况下,输出性能最佳,优化流程如图 4 所示。

3.5 频率正割角方法实验验证

为研究上述方法的有效可行性,设计验证性实验。第 1 步,确定电池未优化前的操作条件初始值,以一般性为原则,设定活化段温湿度分别为 333 K、0.6,欧姆段温、湿度分别为 343 K、0.7,浓差段温、湿度分别为 353 K、0.8,调节控制变量使电堆依次稳定工作在上述操作条件下;第 2 步,使用阻

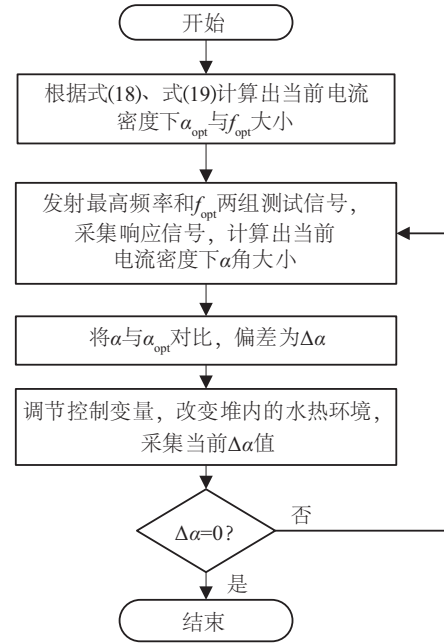


图 4 频率正割角法优化流程图

Fig. 4 Frequency secant angle method optimization flow chart

抗测试仪向电堆发射 3、8、13、20 kHz 共 4 组高频测试信号,采集得到响应信号计算出各阻抗大小,得到总内阻 R_{stack} ;再向电堆发射 20 kHz、 f_{opt} 两组测试信号,得到当前工况下 α 角;最后,调节相关控制变量并实时监控 α 角,使得当前 α 角向 α_{opt} 变化,待二者近似相同后,重复第 2 步操作,检测电堆总内阻 R_{stack} ,并采集此时输出电压。调节前后操作条件及总内阻变化如表 2 所示, α 角和输出电压变化如图 5、图 6 所示。

对比实验前后数据,优化后的电堆总内阻明显减小,输出电压明显提高,验证了本文提出的频率正割角方法的有效正确性;实验还显示,当以 α_{opt} 为优化指标时,优化后的温湿度值与计算所得的最优温湿度有所不同,这是因为燃料电池操作条件并不完全等同于其内部的水热环境,其内部水热环境与燃料电池堆前一反应状态以及所处的外部环境等都有关系,所以即使以最优温湿度值为优化指标,调节当前温湿度到最优状态,此时的总内阻也不是先前所得的最优内阻值;而频率正割角 α 与内阻直接相关,内阻与堆内反应环境直接相关,因此与 $V-I$ 特性法相比,频率正割角优化方法要具有更佳的优化效果。

表2 优化前后各参数值

Table 2 Each parameter value before and after the optimization

电流密度/ $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	优化前			优化后		
	温度/K	湿度	总内阻/ $\text{m}\Omega$	温度/K	湿度	总内阻/ $\text{m}\Omega$
0.1	333	0.60	28.07	331	0.52	23.33
0.2	333	0.60	22.60	336	0.58	18.33
0.3	333	0.60	19.18	340	0.62	16.49
0.4	333	0.60	17.65	344	0.66	14.74
0.5	343	0.70	15.87	348	0.72	13.41
0.6	343	0.70	15.00	351	0.75	12.27
0.7	343	0.70	14.23	353	0.78	11.48
0.8	343	0.70	13.64	355	0.81	11.21
0.9	353	0.80	12.03	356	0.83	11.30
1.0	353	0.80	12.98	356	0.84	11.59
1.1	353	0.80	14.89	357	0.86	12.10
1.2	353	0.80	18.63	357	0.87	13.72

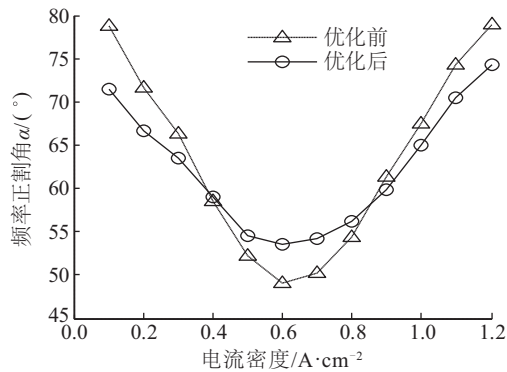


图5 优化前后 α 角变化对比

Fig. 5 Contrast of change with α angle before and after optimization

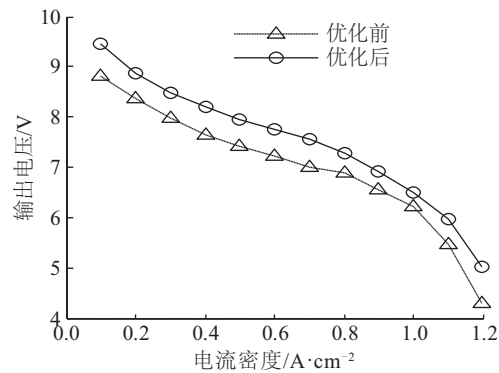


图6 优化前后输出电压对比

Fig. 6 Contrast of change with output voltage before and after optimization

4 结 论

本文基于理论研究和实验数据,提出一种燃料电池输出性能的优化方法——频率正割角法,实现了更快速有效地对燃料电池输出性能的监测与控制。该方法不需要像传统 EIS 法测量每个频率(从高频到低频)下的阻抗信息,也不需拟合计算阻抗中各参数值,只需测量 2 个特定频率点的阻抗信息,计算出当前状态下的正割角 α ,并与理想状态的 α_{opt} 对比,以 α_{opt} 为控制标准对操作条件进行控制与调节,实现优化燃料电池堆输出性能的目的,特别适合于实际的燃料电池堆的控制

[参考文献]

[1] 张连洪,揭伟平. 温度、压力和湿度对 PEMFC 堆电效率的影响[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2007, 40(5): 594—598.

[1] Zhang Lianhong, Jie Weiping. Temperature, pressure and humidity influence on the electrical efficiency of PEMFC stack [J]. Journal of Tianjing University: Science and Engineering Technology Edition, 2007, 40 (5): 594—598.

[2] Yuan Xiaozhi, Sun Jian Colin, Blanco M, et al. AC impedance diagnosis of a 500 W PEM fuel cell stack (Part I): Stack impedance [J]. Journal of Power

- Sources, 2006, 161(2): 920—928.
- [3] Yuan Xiaozhi, Sun Jian Colin, Wang Haijiang, et al. AC impedance diagnosis of a 500W PEM fuel cell stack (Part II): Individual cell impedance[J]. Journal of Power Sources, 2006, 161: 929—937.
- [4] Rubio M A, Urquia A, Dormido S. Diagnosis of PEM fuel cells through current interruption[J]. Journal of Power Sources, 2007, 171(2): 670—677.
- [5] 王 珂. 基于电流断路法的空冷型燃料电池阻抗谱实验分析. 中国电机工程学报, 2012, 32(29): 87—93.
- [5] Wang Ke. Experimental diagnosis of air breath proton exchange membrane fuel cell through current interrupt [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(29): 87—93.
- [6] Gomadam P M, Weidner J W. Analysis of electrochemical impedance spectroscopy in proton exchange membrane fuel cells[J]. International Journal of Energy Research, 2005, 29(12): 1133—1151.
- [7] Rodat S, Sailer S, Art F, et al. EIS measurements in the diagnosis of the environment within a PEMFC stack [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2010, 40 (5): 911—920.
- [8] Dale N V, Mann M D, Salehfar H, et al. AC impedance study of a proton exchange membrane fuel cell stack under various loading conditions[J]. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2010, 7(3): 155—163.
- [9] Rodat S, et al. EIS measurements in the diagnosis of the environment within a PEMFC stack[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2010, 40(5): 911—920.
- [10] Yuan Xiaozhi, Wang Haijiang, Sun Jian Colin, et al. AC impedance technique in PEM fuel cell diagnosis—A review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(17): 4365—4380.
- [11] Iftikhar M U, Riu D, Art F, et al. Dynamic modeling of proton exchange membrane fuel cell using non-integer derivatives [J]. Journal of Power Sources, 2006, 160 (2): 1170—1182.
- [12] 郑 东. 水冷型质子交换膜燃料电池堆输出性能控制与分析[D]. 杭州: 中国计量学院, 2012.
- [12] Zheng Dong. Control and analysis of output performance for water-cooling PEMFC stack [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2012.

PEMFC PERFORMANCE OPTIMIZATION BASED ON FREQUENCY OF SECANT ANGLE

Gao Zhi, Wei Dong, Wang Zhen, Tong Peng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Fuel cell internal water thermal state has an important effect on the output performance of fuel cell. The traditional EIS method uses the sweep mode to obtain the fuel cell impedance spectrum curve, and then to get the fuel cell internal water and heat management. However, the method has the disadvantage of long test time and cumbersome process so that it is not suitable for online real-time testing. In this paper, a fast EIS method was proposed based on the traditional electrochemical impedance spectroscopy (EIS) method—frequency secant angle method. This method introduces impedance secant angle α to simplify a set of frequency signal of traditional EIS method as the highest frequency M_1 and high frequency transition frequency M_2 of the two high frequency signal, by sampling the two frequency point impedance information, the cut angle α between the line of two points and the real axis can be obtained. At the same time, the simulation and experiment are used to obtain the change rule of the transition frequency f_{opt} and the angle α_{opt} with the current density under the ideal condition as the control basis, and then adjust the operating conditions of the fuel cell under the comparison with the current condition α and the ideal condition α_{opt} to reach better and faster water and thermal management of internal of the PEMFC which is more economical than traditional methods.

Keywords: PEMFC; hydrothermal state; frequency secant angle method; turning frequency; operation conditions