

# 基于模糊 PI 控制的大功率光伏模拟器

宁 佳<sup>1,2</sup>, 张继元<sup>1,2</sup>, 舒 杰<sup>1,2</sup>, 丁建宁<sup>3</sup>

(1.中国科学院 广州能源研究所,中科院可再生能源重点实验室,广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室,广东 广州 510640; 2.中国科学院大学,北京 100049; 3.江苏省光伏科学与工程协同创新中心,江苏 常州 213164)

摘 要:针对大功率光伏模拟器控制设计的不足之处,提出一种基于模糊控制和 PI 控制相结合的控制方法,通过电压电流输出信号与光伏参考  $V-I$  特性相比求得误差,再经模糊 PI 控制器运算及 SVPWM 模块产生控制信号,为保证模拟器安全稳定运行,引入开路电压单独控制回路。最后通过 Matlab 仿真和样机实验,验证了该控制策略具有较好的动态性能和较高的稳态精度。

关键词:模糊控制;PI 控制;光伏模拟器;大功率;开路控制

中图分类号:TM615 文献标志码:A 文章编号:1671-5292(2017)04-0559-07

DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2017.04.014

## 0 前言

光伏模拟器是研发与测试光伏逆变器的重要设备,相比于光伏方阵,光伏模拟器可以节省场地、降低成本、缩短开发周期,具有不依赖自然环境的特性,为研究提供了极大的方便<sup>[1],[2]</sup>。

目前,光伏模拟器多为不控整流器加 BUCK 直流变换器的中小功率模拟器,其存在结构功率等级不高、单向变换拓扑结构后使得系统动态性能受到极大约束等的问题<sup>[3]-[5]</sup>。对于大功率光伏模拟器的研究,文献 [6] 采用多单元并联 BUCK-BOOST 变换器,成本较高、控制复杂、可靠性差。模拟器控制算法大致可分为 PI 控制、模糊控制、分段混合控制等,其存在问题:①PI 控制动态性能差;②模糊控制稳态精度低;③分段混合控制的分段点没有统一标准,分段后精度也相应有所降低<sup>[7]-[9]</sup>。除此之外,传统的模拟器控制结构设计忽略了空载时开路电压控制,这有可能引起安全问题。

针对以上问题,本文提出一种基于模糊 PI 控制的大功率光伏模拟器,其主电路采用三相 PWM 整流电路,能够将功率等级提升到 100 kVA 以上。该光伏模拟器将传统 PI 控制与模糊控制相结合,具有稳态精度高,动态响应快的性能<sup>[7]-[9]</sup>。此外通过采集三相 PWM 整流电路的输出电压与电流

信号,判断系统是否空载,并分别进行控制,从而保证了系统在空载和带载时都能安全稳定地运行。最后,本文通过 Matlab 仿真与样机实验验证了方法的可行性和有效性。

## 1 光伏 $V-I$ 曲线的获取

光伏  $V-I$  特性曲线作为控制系统所需参考条件,主要通过光伏阵列工程数学模型、分段拟合曲线的方法以及幂函数模型建立<sup>[10]-[13]</sup>。分段拟合方法在计算复杂程度上比光伏阵列工程数学模型简单,但不如光伏阵列工程数学模型精确,且分段拟合方法中分段点的确定条件没有统一标准,得出的结果有一定的误差。幂函数模型与分段拟合方法类似,在精度上要低于光伏阵列工程数学模型。综合以上问题。本文最终选择通过工程数学模型的方法生成模拟所需  $V-I$  特性曲线。

光伏电池厂商通常会提供标准条件(太阳辐照度参考值  $R_{ref}=1 \text{ kW/m}^2$ ,光伏电池温度参考值  $T_{ref}=25 \text{ }^\circ\text{C}$ )测试下的光伏电池的短路电流  $I_{sc}$ 、开路电压  $V_{oc}$ 、最大功率点电流  $I_m$  以及最大功率点电压  $V_m$ ;可根据光伏阵列工程数学模型推导出光伏阵列输出电压为  $V$  时,其输出的电流  $I$  为

$$I=I_{sc}-C_1 I_{sc} \left[ \exp\left(\frac{V}{C_2 V_{oc}}\right)-1 \right] \quad (1)$$

收稿日期:2016-12-19。

基金项目:广东省自然科学基金(2014A030310191);广州市创新平台与共享项目(201509010018);省协同创新与平台环境建设项目(2014B040404002)。

通讯作者:舒 杰(1969-),男,研究员,博士研究生导师,主要从事可再生能源发电技术研究工作。E-mail:shujie@ms.giec.ac.cn

$$C_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \exp(\frac{-V_m}{C_2 V_{oc}}) \quad (2)$$

$$C_2 = (\frac{V_m}{V_{oc}} - 1) [\ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}})]^{-1} \quad (3)$$

由式(1)~(3)可知,当光伏电池参数  $I_{sc}, I_m, V_{oc}, V_m$  确定时,可得光伏电池的  $V-I$  特性曲线。如果太阳辐照度或者温度发生变化时,则需要重新估算新状态下(假设此时太阳辐照度为  $R$ , 电池温度为  $T$ ) 的电池参数  $I_{sc-new}, I_m-new, V_{oc-new}, V_m-new$ , 然后求得新的  $C_1, C_2$ , 再由此重新估算出新状态下的光伏  $V-I$  特性曲线。新状态下估算的光伏电池参数为

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (4)$$

$$\Delta R = \frac{R}{R_{ref}} - 1 \quad (5)$$

$$I_{sc-new} = I_{sc} (\frac{R}{R_{ref}}) (1 + a\Delta T) \quad (6)$$

$$I_m-new = I_m (\frac{R}{R_{ref}}) (1 + a\Delta T) \quad (7)$$

$$V_{oc-new} = V_{oc} [(1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta R)] \quad (8)$$

$$V_m-new = V_m [(1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta R)] \quad (9)$$

参数  $a, b, c$  的典型值:  $a=0.0025/^\circ\text{C}, b=0.5, c=0.00288/^\circ\text{C}$ 。因此,可以通过光伏阵列工程数学模型获得所需任何条件下的光伏输出  $V-I$  曲线模型。

典型的光伏  $V-I$  特性曲线如图 1 所示。

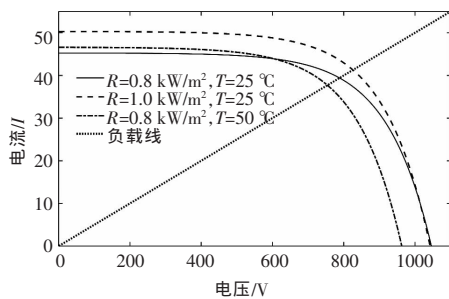


图 1 不同条件下的光伏  $V-I$  特性曲线  
Fig.1  $V-I$  characteristic curves of PV of different situation

从图中可以看出:①光伏输出  $V-I$  特性曲线具有非线性,其在重载时类似于电流源,在轻载时类似于电压源<sup>[9]</sup>;②在同等太阳辐照度(如  $R=0.8 \text{ kW/m}^2$ )和负载作用下,光伏  $V-I$  特性曲线随温度的升高,在“类电流源区”将有所上升,在“类电压源区”将会左移,即截止电压将会随着温度的升高而降低,截止电流将会随着温度的升高而升高;③在同等温度(如  $T=25^\circ\text{C}$ )和负载作用下,随着太阳辐照度的升高,光伏曲线在类电流源区将会大幅上升,在类电压源区会微微左移,即截止电压将会随着太阳辐照度的升高而有所降低,截止电流将会随着太阳辐照度的升高而大幅升高;④由图中负载线看出,在同样的负载作用下,光伏输出  $V-I$  曲线左移或者下移都会使得输出电流电压降低,右移或者上移则会使得输出电流电压升高;⑤由于负载线的斜率大小决定了负载值的大小,可以推得出在温度和太阳辐照度条件不变的情况下,当负载增大时(即负载线斜率变小时),模拟器的输出电压将会有所增大,输出电流将会有所减小;当负载减小时,模拟器的输出电压将会减小而输出电流则会增大。

## 2 模糊 PI 控制器结构

### 2.1 模糊控制器的结构

模糊控制器是模糊控制的核心,主要由知识库(数据库和规则库)、模糊化、推理机以及解模糊 4 个部分组成<sup>[14]</sup>。模糊化将输入量转换为模糊控制器相应的语言值;知识库由数据库和规则库组成,数据库定义了模糊规则中语言变量的隶属度函数;规则库由一系列的“IF-THEN”规则语句组成,实现输入输出间的非线性映射;推理机根据知识库中的模糊规则来推理得出模糊控制量;解模糊将模糊控制量转换成相应的物理值并输出。

考虑到模糊控制器的精度以及计算量的大小,本文采用了输入为误差和误差变化率的二维输入结构,其控制框图如图 2 所示。

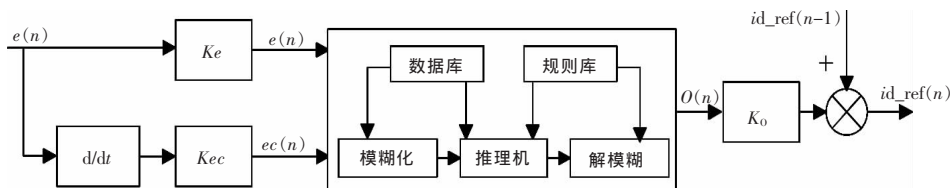


图 2 模糊控制结构框图  
Fig.2 The structure of fuzzy control

当模拟器正常工作时,其误差输入值  $e(n)$  为输出电流  $I_{dc}$  与光伏模型输出电流  $I_{dc\_ref}$  的差值。 $E(n)$  和  $E_c(n)$  是差值  $e(n)$  及其变化值经  $K_e$  和  $K_{ec}$  的量化结果,并作为模糊控制器的输入;模糊控制器的输出  $O(n)$  作为控制量的增量,经  $K_o$  量化后得到实际增量,再与上一时刻  $i_d$  的参考值  $i_{d\_ref}(n-1)$  相加最终得到本次参考值的输出  $i_{d\_ref}(n)$ 。

### 2.2 模糊控制器算法设计

模糊控制器的输入输出变量论域均被规范化为  $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$ ;隶属度函数采用幅值为 1 的等腰三角形,如图 3 所示。

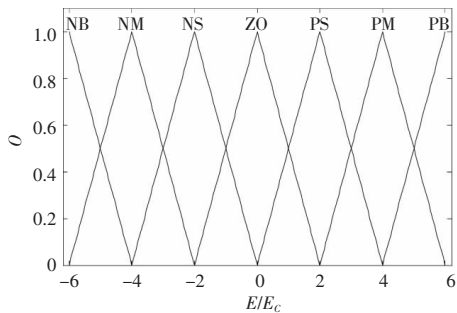


图 3 模糊输入隶属度函数

Fig.3 Fuzzy input membership functions

图 3 中模糊子集定义为 {负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (ZO)、正小 (PS)、正中 (PM)、正大 (PB)}。由控制目标结合专家经验可得:

IF  $E(n)=PB$  and  $E_c(n)=NB$ , THEN  $O(n)=ZO$ ;

IF  $E(n)=PB$  and  $E_c(n)=NM$ , THEN  $O(n)=ZO$ ;

.....

最终,可以得到 49 条控制规则,如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 The table of fuzzy control rule

E	E <sub>c</sub>						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	ZO	ZO
NM	PB	PB	PB	PB	PM	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PM	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NM	NM	NM	NM
PM	ZO	ZO	NM	NB	NB	NB	NB
PB	ZO	ZO	NM	NB	NB	NB	NB

在控制器完成模糊推理后,采用重心法解模糊获得精确的输出量  $O(n)$ 。假设  $f[O(n)_k]$  是  $O(n)_k$  处的隶属度,则有:

$$O(n) = \frac{\sum_{k=1}^n O(n)_k f[O(n)_k]}{\sum_{k=1}^n f[O(n)_k]} \quad (10)$$

量化因子  $K_e, K_{ec}, K_o$  为

$$K_e = n/e_{\max} \quad (11)$$

$$K_{ec} = n/ec_{\max} \quad (12)$$

$$K_o = O_{\max}/n \quad (13)$$

式中:  $n$  为误差、误差变化率以及输出控制量量化后分成的档数,  $n$  的值越大,所控精度越高,但计算量会成倍增加,一般选择与语言值类型个数相同;  $e_{\max}, ec_{\max}, O_{\max}$  分别为误差、误差变化率以及输出控制量的最大值。

### 2.3 模糊 PI 控制整体结构

本文设计的模糊 PI 控制总体控制框图如图 4 所示。

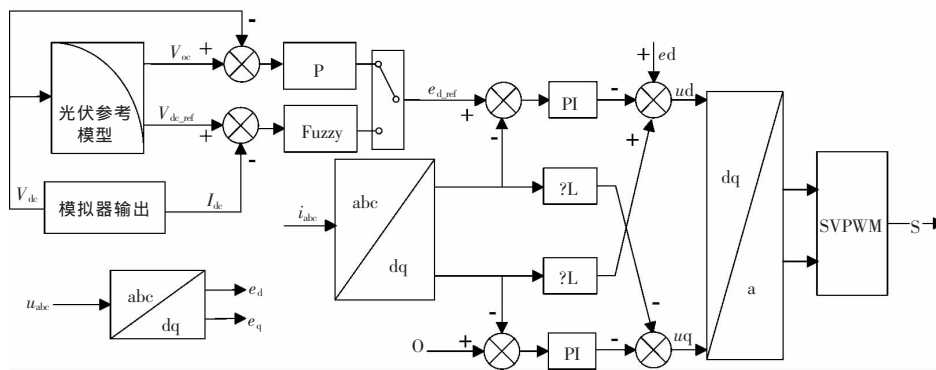


图 4 模糊 PI 控制框图

Fig.4 The structure of fuzzy and PI control

图 4 中光伏参考模型实际上就是光伏输出  $V-I$  曲线模型,它的输入为直流输出电压  $V_{dc}$ ,有两个输出,一个是直流输出电压所对应的直流输

出电流的参考值  $I_{dc\_ref}$ ; 另一个是光伏模型的开路电压  $V_{oc}$ ,为开路状态时输出电压的参考值。当光伏模拟器工作在开路状态时,由开路电压  $V_{oc}$  和

输出电压  $V_{dc}$  的差值经 P 控制器给出 d 轴电流  $i_d$  的参考电流  $i_{d\_ref}$ ; 当模拟器工作于带载状态时, 由光伏模型输出直流电流参考电流  $I_{dc\_ref}$  和直流输出电流  $I_{dc}$  的差值给出  $i_d$  的参考电流  $i_{d\_ref}$ ;  $i_d$  与  $i_q$  分别是三相电流  $i_{abc}$  经过 PARK 变换后 d 轴与 q 轴电流; 通过以上的控制方式能够保证光伏模拟器安全稳定地运行在开路或带载状态, 避免干扰等不稳定因素造成的影响。

三相 PWM 整流器 d-q 数学模型为

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+Ls & -\omega L \\ \omega L & R+Ls \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:  $e_d, e_q$  为电网电动势在 d 轴与 q 轴的分量;  $v_d, v_q$  为整流器交流侧电压矢量 d 轴与 q 轴的分量;  $\omega$  为电网角频率;  $R$  为输入电阻值;  $L$  为输入电感值。

由式(14)可知, 为了消除 d, q 轴电流之间的耦合, 可以引入电流状态反馈, 并采用 PI 控制器, 即:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \begin{bmatrix} i_{d\_ref} - i_d \\ i_{q\_ref} - i_q \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} i_q \\ -i_d \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $K_p, K_i$  为 PI 控制器的参数;  $i_{q\_ref}$  在本文中选为零。

将式(15)带入公式(14)后运算可知, 引入电流状态反馈后可以实现有功电流和无功电流的解耦控制; 为了进一步减少电网电压对控制系统的影响, 同时引入了电网电压前馈补偿  $e_d$  与  $e_q$ ; 最后将得到的参考信号  $u_d$  和  $u_q$  通过 CLARK 变换并经 SVPWM 输出三相 PWM 整流电路的控制信号  $S$ 。

### 2.4 模拟器开路控制

传统的模拟器控制结构设计忽略了空载时开路电压控制, 这会造成模拟器空载运行时的电压输出不稳定, 如图 5 所示。

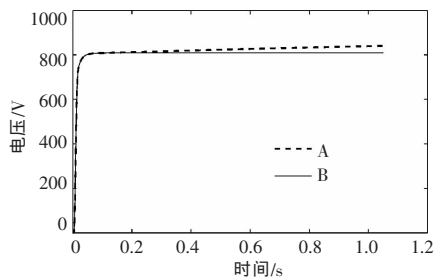


图 5 不同控制策略的比较

Fig.5 The compare of different control strategies

图 5 中曲线 A 非常不稳定, 还有缓慢上升的趋势; 曲线 B 则能够一直保持稳定。

如果电压不能保持稳定值, 容易引发安全问题。针对此类情况, 本文设计了开路电压的单独控制策略, 当系统判断模拟器处于开路状态时, 误差信号  $e$  通过  $V_{oc}$  与  $V_{dc}$  的差值获取, 判断条件是  $V_{dc} \geq V_{oc}$  或  $I_{dc}=0$ , 其判断流程图如图 6 所示。

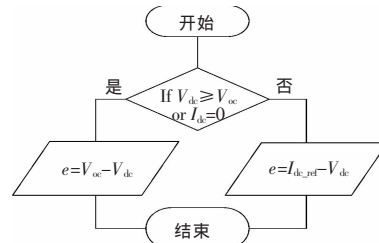


图 6 开路判断流程图

Fig.6 Judgment of open circuit flow chart

本文在开路控制时选择 P 控制器, 主要原因: ①电压间的误差大小与电流间的误差大小不同, 如果继续沿用以前的模糊控制器, 会造成控制不精确; 由式(11)~(13)可知, 误差大小发生变化, 则控制器的量化因子也应作出调整, 所以必须修改量化因子才能够保证控制的精度; ②P 控制器结构简单, 相对于模糊控制算法可以节约计算量, 同时还可以与后接的 PI 控制器结合实现对输出电压的无差控制; 此时  $i_d=0$ , P 控制器与 PI 控制器组合成新的 PI 控制器。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 仿真实验

为了验证模糊 PI 控制策略的有效性和可行性, 在 Simulink 中搭建了仿真电路, 主电路采用二极管钳位式三相 PWM 整流电路, 其整体的系统结构如图 7 所示。

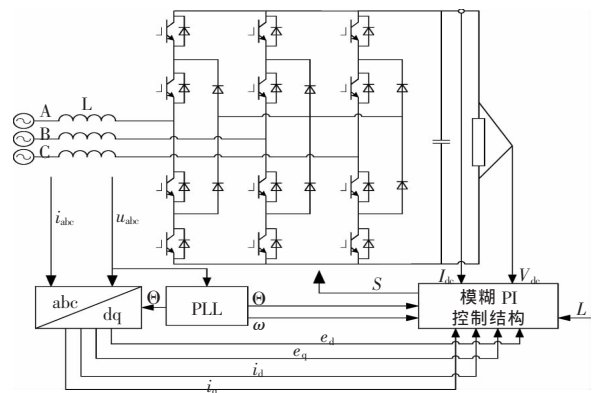


图 7 模拟器整体结构图

Fig.7 The overall structure of simulator



控制器采用了上文设计的模拟 PI 控制结构;分别测试了在负载、温度和光照等突变情况下的输出。其中三相电源电压幅值为 311 V、频率为 50 Hz,输入电感为 6 mH,输出电容为 7 500  $\mu$ F,负载为 17.2~27.7  $\Omega$ ; $\theta$  为电网相位; $\omega$  为电网角频率。

在 0.1 s 负载突变时光伏模拟器的电流电压输出波形如图 8 所示。

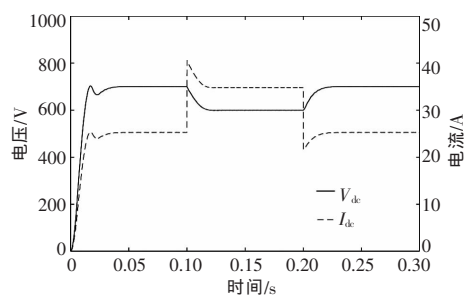
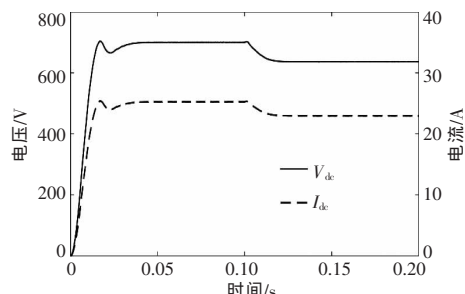


图 8 负载突变输出波形

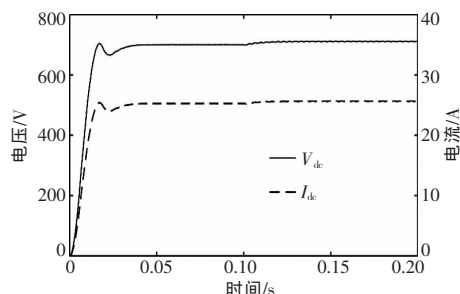
Fig.8 The waveforms of resistance mutation

当负载突变时,模拟器输出的电流和电压的变化方向是相反的,当负载增大时,电压上升,电流下降;当负载减小时,电压下降,电流上升,这与从图 1 中得到的结论相同;图中电流的突变会产生尖刺,这是由于电容电压不能突变,随着电容电压的上升,负载电流也随之同步上升或下降。

由图 1 可知,当温度上升时,在类电压源区光伏曲线将会左移,即在同等太阳辐照度和负载作用下,电压电流会有所下降。本文的设计采用的是三相 PWM 整流电路,其结构特性决定了光伏模拟器几乎不会工作在类电流源区,因此只测试了在类电压源区的变化,其结果如图 9 所示。由图 9 (a)可知,当太阳辐照度为 1 200  $W/m^2$  时,在 0.1 s 温度由 25  $^{\circ}C$  上升到 100  $^{\circ}C$ ,光伏模拟器的输出电流电压均会大幅下降,这与从图 1 中得到的结论吻合。图 9(b)为当温度为 25  $^{\circ}C$  时,在 0.1 s 太阳辐照度从 1 200  $W/m^2$  降低至 800  $W/m^2$  时的变化图。



(a) 辐射强度变化



(b) 温度变化

图 9 温度、光照突变输出波形

Fig.9 The waveforms of temperature mutation and light mutation

光伏模拟器输出电流、电压均有微微的上浮,同样与图 1 得到的结论吻合。

由图 8,9 可以看出:在模拟 PI 控制作用下,光伏模拟器的动态响应速度十分迅速,能够在 50 ms 内由启动达到稳态;无论负载、温度还是太阳辐照度的突变,模拟器都能很好地适应变化,在 50 ms 之内就可以由突变状态达到稳态;模拟器的稳态精度也相对较高,在未添加任何滤波结构条件下,其精度可以达到 1 V 左右,随着模糊控制器的进一步优化,精度还可以提高。

### 3.2 样机实验

为了验证控制策略的实际效果,搭建了一个 80 kVA 的实验样机进行测试,样机采用三电平 IGBT 整流电路,输入电感 10 mH,输出电容 2 $\times$  240  $\mu$ F,额定功率 80 kW,额定电流 116 A,其主控芯片采用 TI 公司生产的 TMS320F28335,开关频率 9.6 kHz;为了同时检测直流侧与交流侧的变化,最终选择同时测量直流输出电压以及 A 相交流输入电流来加以分析判断,因为测试段位于模拟器的类电流源区,所以输入端的电流变化不是十分明显,

负载发生跳变时的输入电流与输出电压的情况如图 10 所示。由图 10 可知:负载增大时,直流电压有所上升,交流电流有所降低;负载减小时,直流电压有所下降,交流电流有所上升,这与预期结果一致;同时图中电流变化部分有明显的尖刺,这与仿真结果一致。

光照强度和温度发生变化时输入电流和输出电压的变化情况如图 11 所示。由图 11 可知,光照突然下降时,输出电压有所上升,电流也略微有所上升。温度突然升高时,输出电压与输入电流都

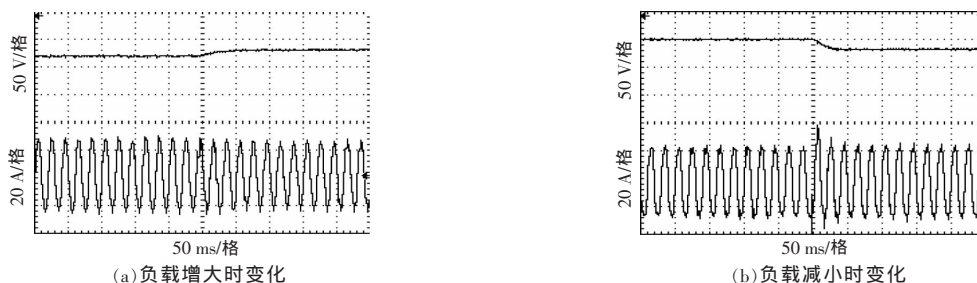


图 10 实际负载突变输出波形  
Fig.10 The waveforms of real resistance mutation

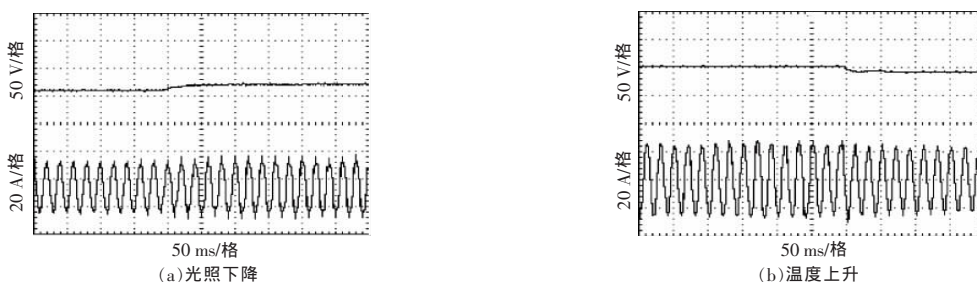


图 11 光照和温度突变输出波形  
Fig.11 The waveforms of temperature and light mutation

有所下降；这同样与之前得到的结论以及实验结果一致。

由图 10,11 可以看出,在实际测试当中,模拟器的调整时间大约为 50 ms,十分迅速;模拟器的稳态性能良好,动态响应迅速,输出电压谐波小,说明了控制策略的有效性与可行性。

#### 4 结论

本文采用模糊 PI 控制设计了一种基于三相 PWM 整流电路的大功率光伏模拟器,其功率能够达到 100 kVA 以上。通过模糊控制和 PI 控制的结合,光伏模拟器能够在保证输出精度的前提下提高动态响应能力;同时增加了模拟器开路电压的单独控制回路,保证了模拟器稳定与安全地运行。最后结合 Matlab 仿真与样机实验,验证了控制方法的可行性和有效性。

#### 参考文献:

[1] 张长征,陈乔夫,邹建章. 大功率光伏电池阵列模拟器研究[J]. 太阳能学报, 2011(10): 1461-1465.  
 [1] Zhang Changzheng, Chen Qiaofu, Zou Jianzhang. Research on large capacity PV array simulator [J]. Acta Ener-giae Solaris Sinica, 2011(10): 1461-1465.  
 [2] 张计科,王生铁,王志和,等. 基于推挽正激电路的数字光伏模拟器建模与控制器参数设计 [J]. 太阳能学报, 2014(3): 508-515.

[2] Zhang Jike, Wang Shengtie, Wang Zhihe, et al. Mod-eling and controller parameter design of digital PV sim-ulator based on push-pull forward circuit[J]. Acta Ener-giae Solaris Sinica, 2014(3): 508-515.  
 [3] 谢俊文,陆继明,毛承雄,等. 数字式通用型电池模拟器的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2013(5): 156-163.  
 [3] Xie Junwen, Lu Jiming, Mao Chengxiong, et al. Design and implementation of digital battery simulator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013 (5): 156-163.  
 [4] 杨立永,杨烁,陈智刚,等. 基于 DSP 的数字式光伏模拟器研究[J]. 电力电子技术, 2015(8): 16-18.  
 [4] Yang Liyong, Yang Shuo, Chen Zhigang, et al. Research on digital photovoltaic emulator based on DSP [J]. Power Electronics, 2015(8): 16-18.  
 [5] Cupertino A F, Santos G V, Pereira H A, et al. Modeling and control of a flexible photovoltaic array simulator[A]. 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics 2015[C]. Buzios: IEEE, 2015.318-324.  
 [6] 杜燕,张军军,苏建徽. 兆瓦级光伏阵列模拟器的设计和控制研究[J]. 电力电子技术, 2015(8): 19-21.  
 [6] Du Yan, Zhang Junjun, Su Jianhui. Design and control of megawatt photovoltaic array simulator [J]. Power Electronics, 2015(8): 19-21.  
 [7] Cheng Z, Pang Z, Liu Y, et al. An adaptive solar

- photovoltaic array reconfiguration method based on fuzzy control[J]. 2010:176–181.
- [8] Feng G. A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2006, 14(5): 676–697.
- [9] 刘振永, 孙建起. 基于模糊 PID 的光伏电池 MPPT 研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(6): 834–838.
- [9] Liu Zhenyong, Sun Jianqi. Reserch on solar cells MPPT based on fuzzy adaptive PID [J]. Renewable Energy Resource, 2015, 33(6): 834–838.
- [10] 李媛. 基于混合控制策略的光伏电池模拟器 [J]. 电工技术学报, 2012(11): 197–202.
- [10] Li Yuan. A hybrid control strategy for photovoltaic simulator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012(11): 197–202.
- [11] 张厚升, 赵艳雷. 多项式拟合的光伏电池阵列模拟器研究与设计[J]. 电力自动化设备, 2012(2): 109–113.
- [11] Zhang Housheng, Zhao Yanlei. Research and design of photovoltaic cells simulator by ploynomial fitting [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012 (2): 109–113.
- [12] 杨天宇, 王志新, 陆斌锋. 基于自动分段拟合的光伏阵列模拟器的研究 [J]. 现代电子技术, 2015 (10): 137–140.
- [12] Yang Tianyu, Wang Zhixin, Lu Binfeng. Research on photovoltaic array simulator based on automatic piecewise fitting[J]. Modern Electronics Technique, 2015 (10): 137–140.
- [13] 宋长江, 梁岚珍. 光伏阵列幂函数模型及其模拟装置 [J]. 可再生能源, 2013, 31(6): 5–9.
- [13] Song Changjiang, Liang Lanzhen. Photovoltaic array power function model and its simulation device [J]. Renewable Energy Resource, 2013, 31(6): 5–9.
- [14] 梁海刚. 三相 PWM 整流模糊控制方法的研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [14] Liang Haigang. Study on fuzzy control based on three-phase PWM rectifier [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.

## High-power PV simulator based on fuzzy PI control

Ning Jia<sup>1,2</sup>, Zhang Jiyuan<sup>1,2</sup>, Shu Jie<sup>1,2</sup>, Ding Jianning<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Renewable Energy, Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of the control design of the high power photovoltaic simulator, a control method based on the combination of fuzzy control and PI control is proposed. An error is obtained by comparing the voltage-current output signal with the PV reference  $V-I$  characteristic, then operation by the fuzzy PI controller and generating control signals by the SVPWM module. In order to make the simulator can run stably and securely, a separate control loop for open-circuit voltage is introduced. Finally, the effectiveness and stability of the control strategy are verified by Matlab simulation and prototype experiment.

**Key words:** fuzzy control; PI control; photovoltaic simulator; high-power; open circuit control