

光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述

周 林, 武 剑, 栗秋华, 郭 珂

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 光伏发电系统的运行需要快速准确地进行最大功率点跟踪(MPPT), 但目前很多最大功率点跟踪方法跟踪不够准确, 从而导致了光伏系统的功率损失, 为此综述了光伏阵列最大功率点跟踪的各种方法, 包括日益成熟、改进和优化策略较多的扰动观察法和电导增量法, 并总结了两种方法应用的局限性和需要注意的问题。从最大功率点跟踪的控制原理和发展历程出发, 归纳了基于优化数学模型、扰动自寻优、智能处理方法及输出端控制等 4 类方法, 分别说明了各种跟踪控制方法的优点和不足之处, 并指出具体选择方法时需要统筹考虑跟踪方法实现的难易程度、经济成本、传感器类型、跟踪速度与精度的协调以及应用领域等各种因素。最后探讨了最大功率点跟踪控制方法的发展思路, 对该领域今后的研究方向做了展望, 指出单级式光伏逆变系统中的最大功率点跟踪已成为国内外光伏领域的一个研究热点。

关键词: 最大功率点跟踪; 最大功率点; 光伏阵列; 光伏发电; 扰动观察法; 电导增量法

中图分类号: TM615 文献标志码: A 文章编号: 1003-6520(2008)06-1145-10

Survey of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Array

ZHOU Lin, WU Jian, LI Qiu-hua, GUO Ke

(State Key Laboratory of Transmission & Distribution Equipment and Power System Safety and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: It is necessary to track the maximum power point (MPP) of the PV array rapidly and accurately and it can increase the output power of photovoltaic array. This article summarizes the methods of Maximum Power Point Tracking (MPPT), including the Perturb-and-observation Method and Incremental Conductance Method and points out the limitations and notes of those two methods. This paper divides a number of different techniques for MPPT of PV arrays into four groups by the control theory and development process of MPPT, analyses their merits and demerits and compares methods with others. The main aspects of the MPPT techniques to be taken into consideration are highlighted in the subsequent subsection. Finally, some feasible thoughts with new technologies for solving problem are discussed and its study direction in the future is also looked ahead. It is also indicated that MPPT in the single-stage inverter for PV systems has become a hot research area at home and abroad.

Key words: maximum power point tracking (MPPT); maximum power point (MPP); photovoltaic (PV) array; photovoltaic power generation; perturb and observation; incremental conductance

0 引 言

随着经济的发展和社会的进步, 能源需求日益增长, 常规能源越来越供不应求。同时, 常规能源的大量使用造成了世界范围内的环境污染和生态恶化, 因此新能源的开发和应用成为当今世界发展的必然趋势。太阳能是一种十分具有潜力的新能源, 光伏发电是当前利用太阳能的主要方式之一。虽然光伏发电与常规发电相比有技术条件的限制, 如投资成本高、系统运行的随机性等, 但由于它利用的是可再生的太阳能, 而且作为清洁能源无大气和放射性污染, 因此其具有良好的发展前景^[1,2]。

由于光伏电池的输出电压和输出电流随着日照强度和电池结温的变化具有强烈的非线性, 因此在特定的工作环境下存在着一个唯一的最大功率输出点(MPP)。在实际的应用系统中, 自然光的辐射强度及大气的透光率均处于动态变化中, 为了在同样的日照强度和电池结温下获得尽可能多的电能, 就存在着一个最大功率输出点跟踪(MPPT)的问题。

本文按照控制理论的出发点以及 MPPT 控制方法的发展过程, 对常用的 MPPT 控制方法进行了分类总结并分析比较了各种方法的优缺点。

1 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法

光伏电池是一种非线性的直流源, 图 1 和图 2 分别给出了某光伏阵列不同光照强度和不同电池结温下光伏阵列输出的特性曲线。由图 1 和图 2 可知, 当外界自然条件改变时, 光伏阵列的输出特性将

基金资助项目: 重庆市自然科学基金(CSTC2007BB6170)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Chongqing

(CSTC2007BB6170)

随之改变,其输出功率及最大功率点亦相应改变。并且,光照强度变化主要影响阵列输出电流,而电池结温的变化主要影响输出电压。当光伏阵列的工作电压位于最大功率点电压 U_{MPP} 时,光伏阵列就输出最大功率 P_{MPP} 。

早期对光伏阵列 MPPT 技术的研究主要是定电压跟踪法(CVT)^[3]、光伏阵列组合法^[4]以及实际测量法^[5]。

CVT 法是一种简化的最大功率点跟踪方法,这种方法实际上是一种稳压控制,但是这种跟踪方法忽略了温度对阵列输出电压的影响,其实质并不是真正的最大功率点跟踪,对于四季温差或日温差比较大的地区, CVT 法并不能在所有的温度环境下完全地跟踪最大功率。

光伏阵列组合法是较早提出的一种方法,这种方法是针对不同的负载来调节光伏阵列串并联的个数,从而使光伏阵列满足不同的负载要求并工作在最大功率点上。但是这种方法存在致命的缺点,它的实时性很差,不能在外界环境变化时及时地改变光伏阵列的工作点。

实际测量法是利用一片额外的光伏阵列模组以建立光伏阵列在一定日照量及温度时的参考模型,这种方法优点是可以避免因光伏电池的老化而失去准确度,但是这种方法对于小功率系统而言成本太高,对于大功率系统则需要考虑多重最大值的问题。

在更为广泛的意义上,研究光伏材料以及光伏阵列最大功率的机械式跟踪方法^[6,7]也是获得光伏阵列更高转换效率的方法,研究人员在这两方面一直都在努力。

1.1 基于优化数学模型的 MPPT 控制方法

这类方法是以建立优化的数学模型为出发点,构造求解方法及光伏阵列特性曲线,从而得出光伏阵列的最大功率输出,所以光伏电池的等效电路模型及各种参数的正确性是需要着重考虑的。

1.1.1 开路电压比例系数法

从光伏阵列的外特性可知,当光伏阵列的开路电压 U_{OC} 在不同的光强和温度下发生改变时,光伏阵列的最大功率点电压 U_{MPP} 也近似地随之成比例变化。由此可以得出光伏阵列的最大功率点电压 U_{MPP} 和光伏阵列的开路电压 U_{OC} 之间存在着近似的线性关系,即

$$U_{MPP} \approx k_1 U_{OC} \quad (1)$$

式中, k_1 为比例常数且 < 1 ; U_{MPP} 与 U_{OC} 的单位一致即可。虽然这种方法原理简单,但是对于不同的阵列 k_1 有不同的取值,文献[8-11]给出的数值为 0.71 ~ 0.80, U_{OC} 可以通过将光伏阵列和负载断开来测

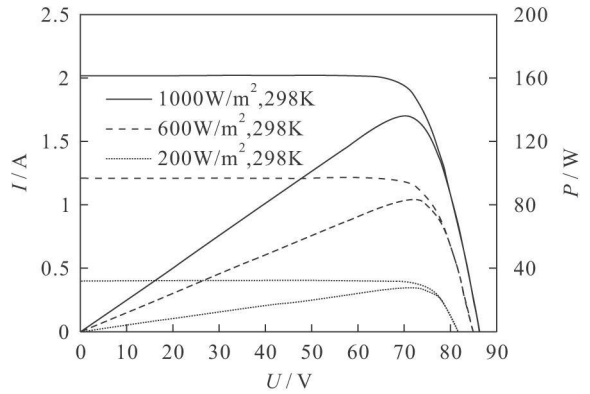


图 1 不同光照强度下光伏阵列的输出特性
Fig. 1 Irradiance characteristics of PV array

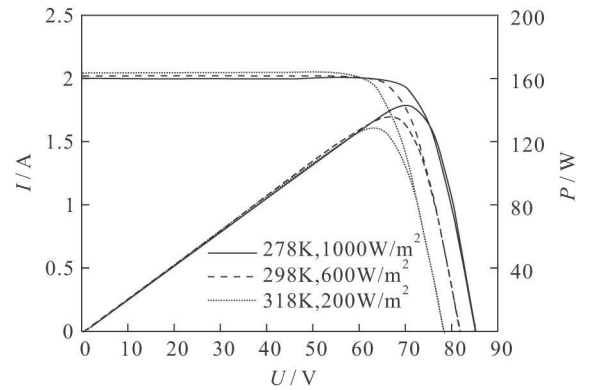


图 2 不同电池结温下光伏阵列的输出特性
Fig. 2 Temperature characteristics of PV array

得,这样即可以计算出最大功率点电压 U_{MPP} ^[12]。

采用开路电压比例系数法不会产生在最大功率点附近的振荡,并且结构简单,可以用廉价的模拟电路实现。但由于(1)式是一个近似的公式,所以光伏阵列并不是工作在真正的最大功率点上,同时由于测量 U_{OC} 要将负载侧断开,所以存在瞬时的功率损失。

1.1.2 短路电流比例系数法

从光伏阵列的外特性还可以看出,当光伏阵列的短路电流 I_{SC} 在不同的光强和温度下发生改变时,光伏阵列的最大功率点电流 I_{MPP} 也近似的随之成比例变化。由此可以得出光伏阵列的最大功率点电流 I_{MPP} 和光伏阵列的短路电流 I_{SC} 之间存在着近似的线性关系,即

$$I_{MPP} \approx k_2 I_{SC} \quad (2)$$

式中, k_2 为比例常数且 < 1 ; U_{MPP} 与 I_{SC} 的单位一致即可。对于不同的光伏阵列 k_2 有不同的取值,文献[8]给出的数值为 0.86。

短路电流比例系数法存在和开路电压比例系数法同样的缺点,即由于(2)式是一个近似的公式,所以光伏阵列并不是工作在真正的最大功率点上。另外测量 I_{SC} 要比测量 U_{OC} 复杂,通常需要在逆变器中

添加开关来周期性的短路光伏阵列从而测得 I_{SC} 。

1.1.3 电流扫描法

电流扫描法通过对光伏阵列电流的扫描波形来获得光伏阵列的 $I-U$ 特性曲线,与此同时,光伏阵列在最大功率点的工作电压可以通过其特性曲线获得^[13,14]。通过将扫描电流选择为与其倒数成比例的表达式来简化最大功率点的判断式,则扫描电流

$$i(t) = f(t) = k \frac{df(t)}{dt} \quad (3)$$

式中, k 为常数。假设 $f(t)$ 对时间的倒数不为 0, 在最大功率点可以得出

$$f(t) = Ae^{(-t/\tau)} \quad (4)$$

式中, $\tau = -k$, 如果 A 选为最大的扫描电流 I_{MAX} , 则扫描电流为一个时间常数为 τ , 从 I_{MAX} 到 0 递减的指数函数

$$f(t) = I_{MAX}e^{(-t/\tau)} \quad (5)$$

若采用模拟电路, 这样的扫描电流可以很容易地通过电容的放电来获得, 通过 DSP 编程也可以很容易的实现。与其它的方法相比, 电流扫描法最大的缺点就是跟踪速度要慢。

1.2 基于扰动的自寻优的 MPPT 控制方法

这类方法是目前研究最广也是应用较为普遍的控制方法, 这类方法不直接检测外界环境因素的变化, 而是根据直接测量到的光伏阵列的电压和电流等信息进行最大功率跟踪。

1.2.1 扰动观察法

扰动观察法^[15,22]也称为登山法, 是目前研究最多同时也是最为常用的最大功率点跟踪方法。其基本工作原理如下: 周期性的给光伏阵列的输出电压加扰动, 比较其输出功率与前一周期的输出功率的大小, 如果功率增加则在下一个周期以相同方向加扰动, 否则改变扰动的方向。

扰动观察法的优点是结构简单, 被测参数少, 容易实现, 而且是一种真正的最大功率跟踪。它的缺点为:

- 1) 引入扰动的最后结果是系统在最大功率点附近的很小范围内来回振荡;
- 2) 步长的大小将决定最大功率点的跟踪速度, 步长较小时光伏阵列很可能长时间工作于低功率输出区, 当步长较大时最大功率点附近的波动又会加大;
- 3) 当外部环境发生较快变化时, 扰动观察法则会损失较大的功率, 并且很有可能发生误判^[15]。

目前, 关于扰动观察法研究文献非常多, 针对扰动观察法存在的上述缺点, 很多文献已经提出了一些改进和优化的方法, 文献[16]采用了模糊控制等

方法来优化扰动的步长, 文献[17]采用了3点加权比较来避免外部环境发生突变发生的误判。在光伏系统的应用中, 光伏阵列和负载之间的接口通常采用 PWM 型变换器, 在这种拓扑结构中可以采用占空比 D 作为控制变量, 即基于占空比的扰动观察法^[21,22]。

1.2.2 电导增量法

电导增量法^[23,25]是通过比较光伏阵列的瞬时电导和电导的变化量来实现最大功率跟踪。从图1和图2可以看出, 光伏阵列的 $P-U$ 曲线是一个单峰值的曲线, 在最大功率点必定有: $dP/dU = 0$, 其中 P 为光伏输出功率, U 为输出电压。因此可以得到以下的判据:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dU} = 0, & \text{在最大功率点处;} \\ \frac{dP}{dU} > 0, & \text{在最大功率点左侧;} \\ \frac{dP}{dU} < 0, & \text{在最大功率点右侧。} \end{cases} \quad (6)$$

并且有

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(UI)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} \quad (7)$$

因此, 通过判断 $I/U + dI/dU$ 即 $G + dG$ (G 为电导) 的符号就可以判断光伏阵列是否工作在最大功率点。增量电导法在步长和阈值的选择上存在一定的困难, 调节步长的大小将决定跟踪速度, 当步长较大时系统反应较快, 但是光伏系统很有可能不是工作在真正的最大功率点, 并且会在最大功率点附近波动。在实际应用中增量电导法需要给一个合适的阈值 E , 并认为 $dP/dU = \pm E$ 时系统就工作在最大功率点。当变化小于这个阈值的时候就不再改变电压工作点, 理论上阈值越小越好, 越小则最后的工作点越接近最大功率点, 但实际中阈值设置太小的话系统永远达不到稳定, 最后导致在一定的范围内振荡。

1.2.3 波动相关控制法

波动相关控制法 (RCC)^[26,27]是一种与扰动观察法类似的方法。波动相关控制法利用的是光伏阵列输出端与变流器连接时, 变流器开关的导通和关断对光伏阵列电压和电流的扰动。

RCC 法适用于各种拓扑结构的变流器, 将功率对时间的倒数与电压或电流对时间的倒数相关联, 这样可以使功率曲线的斜率为 0 从而达到最大功率点^[24]。下式为 RCC 法的判据之一:

$$d = k \int \frac{dP}{dt} \frac{dU}{dt} dt \quad (8)$$

式中, D 为斩波电路的占空比; k 为常数; i_L 为光伏

阵列侧电感电流。这样通过调节占空比 D 就可以改变 i_L 的值从而使光伏阵列工作在最大功率点。

波动相关控制法利用了光伏系统自然存在的扰动,不需要像传统的扰动观察法那样人工给电压和电流加扰动信号,并且不需要预先获得光伏阵列的参数,因此可以使用一些简单并且廉价的电路来实现相关的功能。但是采用波动相关控制法需要变流器工作在连续导电模式。

1.3 基于智能处理方法和其他非线性控制策略的 MPPT 控制方法

近些年来,人工智能如模糊逻辑控制、神经网络等都已经渗入到了电气工程的各个领域,在光伏阵列最大功率点跟踪控制方法中的应用也逐渐增多。针对光伏阵列的非线性,国内外许多研究人员还在最大功率点跟踪控制方法中引入了一些新的非线性控制策略如单周控制、滑膜控制等。

1.3.1 模糊逻辑控制法

模糊逻辑控制法^[28-31]是基于模糊逻辑的 MPPT 控制方法。模糊逻辑是一类人工智能,基于模糊逻辑的控制算法通常称之为模糊控制,其实现可以分为以下 3 个步骤:模糊化、控制规则评价和解模糊。模糊逻辑控制器的输入通常为误差 E 和误差变化量 ΔE 。由于在最大功率点处 dP/dU 为 0,因此在光伏系统中其输入变量 E 与 ΔE 可以用以下两式确定

$$\begin{cases} E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{U(n) - U(n-1)}; \\ \Delta E(n) = E(n) - E(n-1). \end{cases} \quad (9)$$

式中, $P(n)$ 、 $U(n)$ 分别为光伏阵列的输出功率和输出电压。由此可知,光伏阵列工作在最大功率点时,误差量 $E(n)$ 为 0。有些文献中提出了误差 E 和误差变化量 ΔE 的其他确定方法,例如根据最大功率点处 dP/dI 为 0 也可以得出类似的表达式^[31]。

为了满足计算的精度要求,输入变量的模糊子集数量可以灵活选择。图 3 所示为一个最简单最常用的包含 5 个模糊子集的三角形隶属函数,输出控制变化量为升压斩波电路的占空比变化量 ΔD 。定义模糊集合如下:NB 为负大,NS 为负小,Z 为 0,PS 为正小,PB 为正大。

表 1 所示为用于模糊控制的规则表,包括误差 E 、误差变化量 ΔE 和输出控制变化量 ΔD 。控制规则的目的是使变量 E 恒为 0。如果光伏阵列的工作点位于 MPP 的左边较远处即 E 为正大而 ΔE 为 0 时,较大程度的提高升压斩波电路的占空比变化量 ΔD ,则输出控制变化量应为正大。

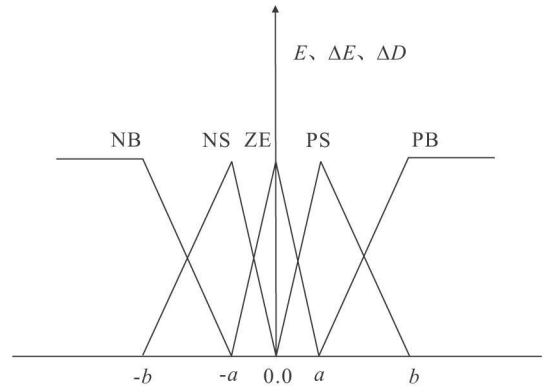


图 3 E 、 ΔE 和 ΔD 的隶属函数

Fig. 3 Membership function for E , ΔE , and ΔD

表 1 模糊控制规则表

Tab. 1 Fuzzy rule table

E	ΔE				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

要通过隶属函数将模糊输出变换为精确输出,即解模糊的过程。解模糊的方法有很多如重心法(COA)、高度法和最大值平均法等。

模糊控制最大的特点是将专家经验和知识表示成语言控制规则,然后用这些规则去控制系统,模糊逻辑控制跟踪迅速,达到最大功率点后基本没有波动,即具有较好的动态和稳态性能。但是定义模糊集、确定隶属函数的形状以及规则表的制定这些关键的设计环节需要设计人员更多的直觉和经验。

1.3.2 神经网络法

神经网络法^[32-35]是基于神经网络的 MPPT 控制方法。神经网络是一种新型的信息处理技术,一个最普通和常用的多层神经网络结构如图 4 所示。图中网络有 3 层神经元:输入层、隐含层和输出层。其中层数和每层神经元的数量由待解决问题的复杂程度确定。根据每层神经元的个数将该网络定义为 2-5-1 网络。应用于光伏阵列时,输入信号可以是光伏阵列的参数例如开路电压 U_{oc} 、短路电流 I_{sc} 或者外界环境的参数例如光照强度和温度,亦可以是上述参数的合成量。输出信号可以是经过优化后的输出电压、变流器的占空比信号等^[35]。

在神经网络中各个节点之间都有一个权重增益

W_{ij} , 选择恰当的权重可以将输入的任意连续函数转换为任意的期望函数来输出, 从而使光伏阵列能够工作于最大功率点。为了获得光伏阵列的精确的最大功率点, 权重的确定必须经过神经网络的训练来得到。这种训练必须使用大量的输入/输出样本数据, 而大多数光伏阵列的参数不同, 因此对于使用不同的光伏阵列的系统需要进行有针对性的训练, 而这个训练过程可能要花费数月甚至数年的时间, 这也是其应用于光伏系统中的一个劣势。在训练结束后, 基于该网络不仅可以使输入输出的训练样本完全匹配, 而且内插的和一定数量的外插的输入输出模式也能达到匹配, 这是简单的查表功能所不能实现的, 也是神经网络法的优势所在。

1.3.3 单周控制法(OCC)

文献[36, 37]提出了一种基于单周控制的光伏阵列最大功率点跟踪控制的方法。图5所示为采用单周控制法的光伏阵列最大功率跟踪控制电路。单周控制器由一个可重置的积分器、一个比较器, 一个RS触发器和其他的线性元件构成。

光伏阵列的输出功率 P_o 可以用光伏阵列输出电压 P_g 、光伏阵列并网电压有效值 U_o 、采样电阻 R_s 、触发器的时钟周期 T_s 以及单周控制的参数来表示。输出功率 P_o 和光伏阵列输出电压 U_g 的关系为

$$P_o = \frac{U_o^2}{R_s} \left(K + \frac{K_g T_s}{R_1 C_1} - \frac{U_c T_s}{U_g R_1 C_1} \right) \quad (10)$$

上式通过对 K 、 K_g 、 U_c 、 R_1 、 C_1 这5个单周控制的参数进行协调选择, 逆变器输出功率就可以通过光伏阵列输出电压的值得到调整从而实现光伏阵列的最大功率点的跟踪并且向电网输入单位功率因素的正弦电流。

采用单周控制可以避免传统光伏系统的两级功率转换, 采用一个单位功率电路和一个单周控制器相结合实现两项功能: 最大功率点跟踪和直流/交流转换。

在(10)式中确定单周控制参数时把光伏阵列输出电压 U_g 作为一个恒值来处理, 而实际中这个值是随光照强度和阵列温度变化的, 因此单周控制参数 (K 、 K_g 、 U_c 、 R_1 、 C_1) 相互关联和约束, 它们的协调选择对于单周控制 MPPT 是一个非常重要也是比较复杂的问题, 参数的协调选择需要根据环境条件的变化来进行, 如果参数选择较好则在不同的环境条件下都可以获得最好的跟踪效果, 并且会影响到最大功率跟踪的效率。

单周控制并不是真正的最大功率点跟踪, 单周控制参数确定后, (10)式是以 U_g 和 P_o 为纵横轴的一条曲线, 它在图1和图2中与 $P-U$ 曲线的交点即

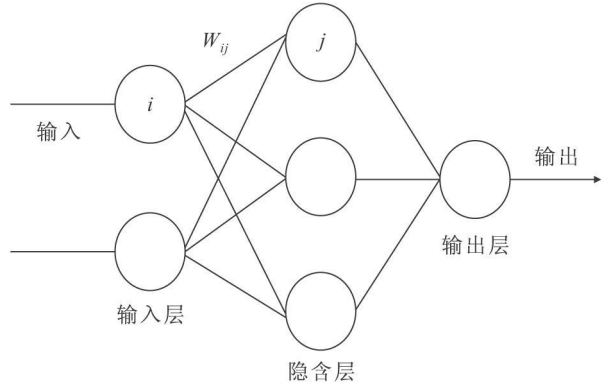


图4 多层神经网络结构

Fig. 4 Configuration of neural network

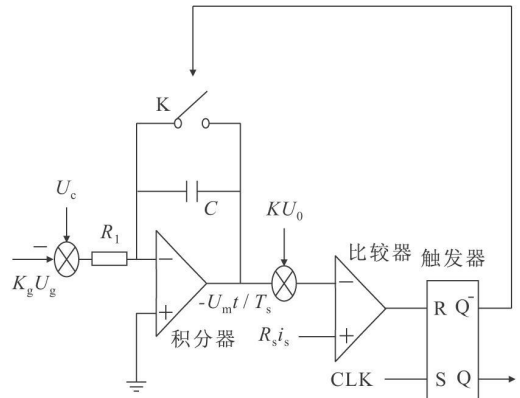


图5 采用OCC控制的MPPT控制器

Fig. 5 MPPT controller with OCC

是系统的工作点, 同样, 由于确定单周控制参数时把光伏阵列输出电压 U_g 作为一个恒值来处理, 系统的工作点不一定是最大功率点。

1.3.4 滑模控制法

滑模控制的原理是利用控制的不连续性, 依靠其高频转换强制闭环系统到达并保持在所设计的滑动面上。文献[38]介绍了太阳能电池、蓄电池和负载构成的太阳能电池发电系统, 系统采用滑模变结构控制方法来实现太阳能发电的最大功率输出, 并给出模拟和实验结果。系统的控制规则可概括描述如下, 可取控制器的控制量

$$u = \begin{cases} 0, & S \geq 0; \\ 1, & S < 0. \end{cases} \quad (11)$$

切换函数

$$S = \frac{\partial P}{\partial U} = \frac{\partial I}{\partial U} U + I \quad (12)$$

式中, u 为控制太阳能电池输出能量的功率开关器件的开关函数, 当 u 为1时表示开关器件导通, 当 u 为0时表示开关器件断开。对于其建立的系统及切换函数式, 可以使系统从任何初始状态出发, 最终稳

定于切换函数 $S = 0$ 处。

采用滑模控制法可以使光伏系统的跟踪速度得到明显的改善,但是开关器件调制深度的变化步长 Δu 的选择会影响系统跟踪的动态和稳态特性,当 Δu 增大时跟踪速度可以加快,但此时光伏阵列输出功率和电压的波动也会增大。

1.4 基于输出端控制的 MPPT 控制方法

随着半导体功率器件、微处理器以及数字控制器的迅速发展,人们将 MPPT 算法与 DC/DC 变换器统一起来以整个光伏系统为出发点进行最大功率点的跟踪控制,提出了各种有效的 MPPT 控制方法。上述基于占空比的扰动观察法等也可归为此类方法。

1.4.1 负载电流/电压最大法

MPPT 的目的是使光伏阵列的输出功率最大化,当光伏阵列与变流器相连接的时候,这个问题可以转化为使变流器输出端即负载上的功率最大化^[39,40]。

绝大多数的线性负载都可以分为以下 4 类:电压源型负载、电流源型负载、电阻型负载以及电阻和电压源组合的负载。对大多数线性负载来说,都可以通过调节负载的电压和电流来使负载功率最大。而对于非线性负载,当其阻抗非负时,这种单输出变量的控制同样适用。

传统的控制方法是通过控制变流器等输入端的电压或电流来获得最大功率点,而对于负载电流/电压最大法来讲,只需要获得输出电压或者电流值中的一个即可完成最大功率点的跟踪,因此在功能的实现上更加简单。由于这种方法是把变流器假设为理想变流器为前提的,负载电流/电压最大法并不是真正的最大功率点跟踪控制方法。

1.4.2 直流侧电压下降控制法

当光伏阵列以电压源型变流器为连接电路并网时,光伏阵列的输出电压需要通过升压斩波电路变换为稳定的直流电压,然后这个稳定的直流电压再通过 PWM 变流器供给交流电网。

在这种情况下即可采用基于直流侧电压下降的最大功率点跟踪方法^[41,42]。在这种控制方法中,光伏阵列的输出功率可以由交流侧的电流来控制。图 6 所示为这种控制方法的基本原理框图。升压斩波电路的占空比

$$D = 1 - \frac{U_{cell}}{U_{link}} \quad (13)$$

式中, U_{cell} 为升压前电压即光伏阵列的输出电压; U_{link} 为升压后电压即 PWM 变流器的直流侧电压。由(13)式可知,通过控制升压斩波电路的占空比可

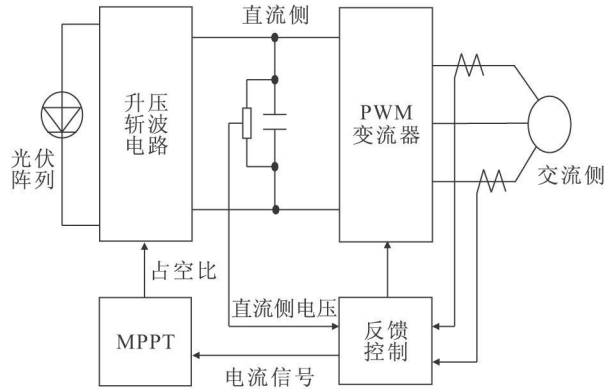


图 6 直流侧电压下降控制法基本控制框图

Fig. 6 Basic control block diagram of DC link capacitor droop control

以使其输出的直流侧电压 U_{link} 保持恒值, U_{link} 同时也是直流侧的控制电压。增加变流器的输出电流就可以增加升压斩波电路的输出功率,从而增大光伏阵列的输出功率。只要输出功率小于它的可能最大功率 P_{MAX} , 通过电流信号 I_{peak} 控制占空比 D 就可以使直流侧的电压稳定在恒定值 U_{link} 。如果输出功率 $> P_{MAX}$, 由于直流侧的功率输入和输出不再平衡则直流侧电压 U_{link} 会衰减。因此, PWM 变流器需要进行反馈控制, 通过调节交流侧的电流幅值来避免直流侧电压的下降, 这样就可以把工作点稳定在最大功率点。

这种 MPPT 控制方法不需要计算光伏阵列的输出功率并且只需要逻辑运算放大器和逻辑控制电路即可很容易实现。这种方法的动态和稳态性能在很大程度上依赖主电路以及控制系统的参数选择, 但是参数的设计选择相比于其他的方法要复杂的多。

1.4.3 极值周期控制法

极值周期控制法不需要获得太阳能阵列的信息, 利用系统在最大功率点附近时, 功率平衡与不平衡的边界处所固有的极值周期来实现最大功率点跟踪^[43]。升压变换器和逆变器间的直流侧电压 U_{link} 通过升压斩波电路的 PI 控制保持恒值, 与此同时, U_{link} 的误差信号通过逆变器侧的比较器观察, 负载水平通过改变交流电流的幅值信号 I_{peak} 来调整, 假设积初始时刻 I_{peak} 逐渐增大, 在阵列功率 P_{array} 到达 P_{MAX} 之前, 在 PI 控制下直流侧的电压保持恒值。当 P_{array} 到达 P_{MAX} 时, 由于功率平衡被打破则 U_{link} 减小不再保持恒值, 此时 I_{peak} 开始减小而 U_{link} 开始增加。这样一个过程是通过改变积分器的终端输入来实现的, 这样就产生了在功率平衡与不平衡边界处的一个非线性的震荡, 称之为极值周期。

表2 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法的类比

Tab. 2 Comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic array

MPPT 控制方法	控制方法的优点	控制方法的缺点
定点压跟踪法	最简单,简化为稳压控制	忽略了温度的影响,非真正的最大功率点跟踪,将逐渐被取代
光伏阵列组合法	较简单,可根据不同负载来调节	实时性很差
实际测量法	可以避免因光伏电池的老化而失去准确度	对小功率系统成本太高,对大功率系统需要考虑多重最大值
开路电压比例系数法	电路结构简单且经济	非真正的最大功率点跟踪,存在瞬时功率损失
短路电流比例系数法	可用廉价的模拟电路实现	非真正的最大功率点跟踪,测量短路电流较复杂
电流扫描法	扫描电流很容易实现	跟踪速度较慢
扰动观察法	结构简单,被测参数少,容易实现,研究广泛,改进和优化的方法较多	系统在最大功率点附近会产生振荡,步长的选择会影响跟踪的速度,环境变化较快时功率损失大且可能发生误判
电导增量法	通过修改逻辑判断式减小了振荡	步长和阈值的选择上存在一定的困难
波动相关控制法	利用的是光伏系统自然存在的扰动,可使用简单且廉价的电路实现	需要变流器工作在连续导电模式
模糊逻辑控制法	控制和跟踪迅速,具有较好的动态和稳态性能	设计环节需要设计人员更多的直觉和经验
神经网络法	训练结束后的效果比简单的查表功能要好的多	不同的光伏阵列系统需要进行有针对性且长时间的训练
单周控制法	可同时控制最大功率点跟踪和直流/交流转换	非真正的最大功率点跟踪,单周控制参数的选择重要却较复杂
滑模控制法	明显的改善光伏系统的跟踪速度	Δu 变化步长的选择会影响系统跟踪的动态和稳态特性
负载电流/电压最大值	实现简单	非真正的最大功率点跟踪
直流侧电压下降控制法	实现简单,无需计算光伏阵列的输出功率	参数的设计选择十分重要但是较复杂
极值周期控制法	不需要获得太阳能阵列的信息	参数的设计选择十分重要但是较复杂

这种方法不需要获得太阳能阵列的电压和电流信息就可以实现输出功率的最大化,并且它的实现电路较简单。这种方法的跟踪效果在很大程度上依赖系统的参数选择,但是参数的设计选择相比于其他的方法要复杂。

1.5 选择 MPPT 控制方法时应考虑的问题

表2列出了前边介绍的各种光伏阵列最大功率点跟踪控制方法的优缺点以便对比。在MPPT控制方法的选择上,除了需要考虑各种方法本身的优缺点外,针对不同的应用领域还需要考虑多种不同的因素:控制方法实现的难易程度、经济成本、传感器类型、跟踪速度和精度、应用领域等。

采用模拟电路实现的MPPT控制方法在实现的难易程度上较其他采用采用数字信号处理器的控制方法要简单和经济,且不像采用数字信号处理器的控制方法那样需要软件编程来实现和优化算法。

对于不同的控制方法需要采集不同的信号进行控制,例如电压、电流、光照强度和温度等信号。通常情况下测量电压要比测量电流更加容易,并且电压传感器要比电流传感器便宜。如果实现过程当中需要使用光照强度传感器则会进一步提高系统的成本。

跟踪速度及精度是衡量一种控制方法的重要指

标,在考虑跟踪速度和精度时应着重考虑光伏阵列应用的领域对其的要求^[44-47],例如太阳能汽车对跟踪速度有较高的要求,而卫星、空间站等则对跟踪的速度和精度都有很高的要求。

2 MPPT 控制方法研究发展方向

通过上述分析可以看出,各种跟踪控制方法都有自己的优点同时又不可避免的存在缺点,由于光伏发电最大功率点跟踪控制方法的发展不很完善,其技术手段尚未完全成熟,因此光伏阵列最大功率点跟踪控制方法还具有广泛的研究前景和发展空间。

2.1 数学模型逐步优化、智能处理方法广泛应用

数学模型的逐步优化是希望在已知影响光伏阵列的光照强度和温度两大因素的情况下,尽可能精确地实时获得光伏阵列的最大功率点。人工智能是计算机科学和工程领域的一个重要分支,本文已经介绍了基于模糊逻辑和人工神经网络的MPPT控制方法,尽管人工智能还有很多缺陷,但是它在某些方面还是更胜于人类思维。随着光伏阵列最大功率点跟踪控制方法研究的逐渐深入,数学模型的逐步优化将会简化求解方法,智能处理方法的应用也会得到越来越多的应用。

2.2 多种控制方法的有机结合

由于各种 MPPT 方法均存在着一定的缺点或者局限性,并且对其进行改进又要付出实现难易度以及成本上的代价,因此对各种方法有机结合则可以扬长避短,充分发挥各种方法的优点。

由于每天早晨光伏阵列启用和晚上停止使用时,光照强度非常低($20\sim 50\text{ W/m}^2$),在这种情况下光伏阵列的 $P-U$ 曲线是很平的,这样就使得扰动观察法和增量电导法的性能降低,甚至有可能使最大功率点的跟踪失败。在弱光的条件下,对电流的检测的精度要求很高,一般很难达到,当电流较小时,可以直接根据开路电压设定最大功率点,直到检测到的光伏阵列的电流高于一定值,再用特定的算法寻优。因此文献[48]采用了开路电压相关系数法和扰动观察法相结合的方式,并给出了仿真和实验的结果,较好的解决了这一问题。

还有其他文献也提出了多种控制方法的结合,例如文献[49]提出了采用单周控制和扰动观察法相结合的方式,文献[50]提出了短路电流比例系数法和扰动观察法相结合的方式。

2.3 单级式并网系统中的应用

在并网光伏发电系统中,主要的问题是如何提高太阳能电池工作效率,以及提高整个系统工作的稳定性。传统并网光伏系统一般采用两级功率转换,一级控制直流/直流变换器跟踪最大功率点,一级直流/交流变换器提供和电网电压同相的正弦电流。单级式光伏并网逆变系统则用一个能量变换环节实现两项功能。因此在单级式光伏并网逆变系统的控制中既要考虑跟踪光伏阵列的最大功率点,也要同时保证对电网输出电流的幅值和相位,控制较为复杂。日前实际应用的光伏并网系统采用这种拓扑结构的仍不多见,本文介绍的单周控制以及文献[51]均提出了此类控制方法。随着现代电力电子技术以及数字信号处理技术的飞速发展,系统拓扑结构引起的控制困难正在逐渐被克服,单级式光伏逆变系统已成为国内外光伏领域的一个研究热点。

3 结 语

由于光伏电池的非线性、环境条件的变化以及文中提及的各种影响因素,使得光伏阵列最大功率点跟踪控制成为一个复杂的综合性问题。现代应用数学和智能处理方法的蓬勃发展,为解决光伏阵列最大功率点跟踪这一复杂问题提供了丰富的理论依据和新的思路,目前在这一领域已取得大量的成果。如何将各种最大功率点跟踪控制方法进行有机结合、取长补短,使其能更好满足现场实际需求,是今后光伏阵列最大功率点跟踪控制的研究方向。随着

太阳能等可再生能源利用的蓬勃发展,光伏阵列最大功率点跟踪技术的实现方法的简化以及跟踪速度和跟踪精度的提高是将来必然的发展趋势。

参 考 文 献

- [1] 梁有伟,胡志坚,陈允平,等. 分布式发电及其在电力系统中的应用综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-74.
LIANG Youwei, HU Zhijian, CHEN Yurping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-74.
- [2] 严陆光,倪受元,李安定,等. 太阳能与风力发电的现状与展望[J]. 电网技术, 1995, 19(5): 1-9.
YAN Luguang, NI Shouyuan, LI An ding, et al. Status and perspective of solar and wind power generation[J]. Power System Technology, 1995, 19(5): 1-9.
- [3] 余世杰,何慧若,曹仁贤,等. 光伏水泵系统中 CVT 及 MPPT 的控制比较[J]. 太阳能学报, 1998, 19(4): 394-398.
YU Shi jie, HE Huiruo, CAO Renxian, et al. A comparison between CVT and MPPT control in photovoltaic water pumping system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 1998, 19(4): 394-398.
- [4] El Shibini M A, Rakha H H. Maximum power point tracking technique[C] // Integrating Research, Industry and Education in Energy and Communication Engineering: MELECON' 89. Lisbon, Portugal, 1989: 21-24.
- [5] Hart G W, Branz H M, Cox C H. Experimental tests of open loop maximum power point tracking techniques for photovoltaic arrays[J]. Solar Cells, 1984, 13(2): 913-917.
- [6] Koyuncu B, Balasubramanian K. A microprocessor controlled automatic sun tracker[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1991, 37(4): 913-917.
- [7] Ito M, Kato K, Komoto K. An analysis of variation of very large scale PV(VLS-PV) systems in the world deserts[C] // Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka, Japan, 2003: 2809-2814.
- [8] 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.
- [9] Schoeman J, Van Wyk J D. A simplified maximal power controller for terrestrial photovoltaic panel arrays[C] // 13th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Cambridge, USA, 1982: 361-367.
- [10] Andersen M, Alvsten T B. 200 W Low cost module integrated utility interface for modular photovoltaic energy systems[C] // Proceedings of the 1995 IEEE IECON 21st International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation. Orlando, USA: IEEE, 1995: 572-577.
- [11] Abou El Ela M, Roger J. Optimization of the function of a photovoltaic array using a feedback control system[J]. Solar Cells: Their Science, Technology, Applications and Economics, 1984, 13(2): 185-195.
- [12] Abu Tariq, Jamil Asghar M S. Development of microcontroller-based maximum power point tracker for a photovoltaic panel[C] // IEEE Power India Conference. New Delhi, India: IEEE, 2006.
- [13] Bodur M, Ermis M. Maximum power point tracking for low

- power photovoltaic solar panels[C] // Proceedings of 7th Mediterranean Electrotechnical Conference. Antalya, Turkey, 1994: 758-761.
- [14] Huang F, Zhimin G, Forughian T, et al. A new microcontroller based solar energy conversion modular unit[C] // Proceedings of the Power Conversion Conference. Nagaoka, Japan, 1997: 697-700.
- [15] Femia N, Petrone G, Spagnuolo G, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4): 963-973.
- [16] Altas I H, Sharaf A M. A novel on-line MPP search algorithm for PV arrays[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(4): 748-754.
- [17] Chee Wei Tan, Green T C, Hernandez Aramburo C A. An improved maximum power point tracking algorithm with current mode control for photovoltaic applications[C] // International Conference on Power Electronics and Drives Systems. Kuala Lumpur, Malaysia, 2005: 489-494.
- [18] 孙务本, 曾奕, 江秀臣, 等. 户外在线监测装置电源系统的设计及实现[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 178-182.
SUN Wuben, ZENG Yi, JIANG Xiuchen, et al. Design and realization of power supply system for outdoor on-line monitoring device[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 178-182.
- [19] D' Souza N S, Lopes L A C, XueJun Liu. An intelligent maximum power point tracker using peak current control[C] // IEEE 36th Conference on Power Electronics Specialists. Recife, Brazil: IEEE, 2005: 172-177.
- [20] Ying Tung Hsiao, Chin-Hong Chen. Maximum power tracking for photovoltaic power system[C] // Conference Record of the Industry Applications Conference. Pittsburgh, USA, 2002: 1035-1040.
- [21] Femia N, Petrone G, Spagnuolo G, et al. Optimizing duty cycle perturbation of P&O MPPT technique[C] // IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004: 1939-1944.
- [22] Femia N, Petrone G, Spagnuolo G, et al. Optimizing sampling rate of P&O MPPT technique[C] // IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004: 1945-1949.
- [23] Hussein K H, Muta I, Hoshino T, Osakada M. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142(1): 59-64.
- [24] Yusof Y, Sayuti S H, Abdul Latif M, et al. Modeling and simulation of maximum power point tracker for photovoltaic system[C] // Proceedings of National Power and Energy Conference. Kuala Lumpur, Malaysia, 2004: 88-93.
- [25] Harada K, Zhao G. Controlled power interface between solar cells and AC source[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1993, 8(4): 654-662.
- [26] Logue D L, Krein P T. Optimization of power electronic systems using ripple correlation control: a dynamic programming approach[C] // IEEE Power Electronics Specialists Conference. Vancouver, Canada: IEEE, 2001: 459-464.
- [27] Esram T, Kimball J W, Krein P T, et al. Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5): 1282-1291.
- [28] Mummadi Veerachary, Katsumi Uezato, Katsumi Uezato. Feed forward maximum power point tracking of PV system using fuzzy controller[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(3): 969-980.
- [29] Wilamowski B M, Xiangli Li. Fuzzy system based maximum power point tracking for PV system[C] // IEEE Conference of the Industrial Electronics Society. Sevilla, Spain: IEEE, 2002: 3280-3284.
- [30] Khaehintung N, Sirisuk P. Implementation of maximum power point tracking using fuzzy logic controller for solar powered light flasher applications[C] // The 47th IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems. Hiroshima, Japan: IEEE, 2004: 171-174.
- [31] Chung-Yuen Won, Duk Heon Kim, Sei-Chan Kim, et al. A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller[C] // 25th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Taipei, Taiwan: IEEE, 1994: 396-403.
- [32] Hiyama T, Kouzuma S, Imakubo T, et al. Evaluation of neural network based real time maximum power tracking controller for PV system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(3): 543-548.
- [33] Hiyama T, Kitabayashi K. Neural network based estimation of maximum power generation from PV module using environmental information[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, 12(3): 241-247.
- [34] Veerachary M, Senjyu T, Uezato K. Neural network based maximum power point tracking of coupled inductor interleaved boost converter supplied PV system using fuzzy controller[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(4): 749-758.
- [35] Hiyama T, Kouzuma S, Imakubo T. Identification of optimal operating point of PV modules using neural network for real time maximum power tracking control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(2): 360-367.
- [36] Yang Chen, Smedley K M. A cost effective single stage inverter with maximum power point tracking[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1289-1294.
- [37] Yang Chen, Smedley K, Vacher F, et al. A new maximum power point tracking controller for photovoltaic power generation[C] // Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Taipei, Taiwan: IEEE, 2003: 58-62.
- [38] Miao Zhang, Jie Wu, Hui Zhao. The application of slide technology in PV maximum power point tracking system[C] // Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, China, 2004: 5591-5594.
- [39] Shmilovitz D. On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters[J]. IEEE Proceedings-electric Power Applications, 2005, 152(2): 239-248.
- [40] 傅诚, 陈鸣, 沈玉樑, 等. 基于输出参数的光伏电池最大功率点控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 148-152.
FU Cheng, CHEN Ming, SHEN Yuliang, et al. A control method of maximum power point based on output parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 148-152.

[41] Kitano T, Matsui M, Dehong Xu. Power sensorless MPPT control scheme utilizing power balance at DC link system design to ensure stability and response[C] // The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, USA: IEEE, 2001: 1309-1314.

[42] Matsui M, Kitano T, Dehong Xu, et al. A new maximum photovoltaic power tracking control scheme based on power equilibrium at DC link[C] // Thirty-Fourth IAS Annual Meeting Conference Record of the Industry Applications Conference. Phoenix, USA, 1999: 804-809.

[43] Matsui M, Kitano T, Dehong Xu. A simple maximum photovoltaic power tracking technique utilizing system inherent limit cycle phenomena[C] // 38th IAS Annual Meeting Conference Record of the Industry Applications Conference. Salt Lake City, USA, 2003: 2041-2047.

[44] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政, 等. 独立光伏照明系统中的能量管理控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 68-72.
WU Li bo, ZHAO Zheng ming, LIU Jian zheng, et al. A novel energy management and control for stand alone photovoltaic lighting system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 68-72.

[45] Capel A. The power system of the multimedia constellation satellite for the SKYBRIDGE missions [C] // 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Fukuoka, Japan: IEEE, 1998: 1913-1930.

[46] Wolfs P, Quan Li. A current sensor-free incremental conductance single cell MPPT for high performance vehicle solar arrays [C] // 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. Jeju, Korea: IEEE, 2006: 1-7.

[47] 戴欣平, 马广, 杨晓红, 等. 太阳能发电变频器驱动系统的最大功率跟踪控制法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 95-99.
DAI Xin ping, MA Guang, YANG Xiaohong. A control method for maximum power tracing of photovoltaic generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 95-99.

[48] Dorofte C, Borup U, Blaabjerg F. A combined two method MPPT control scheme for grid connected photovoltaic systems [C] // European Conference on Power Electronics and Applications. Dresden, Germany, 2005.

[49] Egiziano L, Femia N, Granazio D, et al. Photovoltaic inverters with Perturb& Observe MPPT technique and one cycle control [C] // Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Island of Kos, Greece: IEEE, 2006: 3718-3721.

[50] 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.

[51] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政, 等. 单级式光伏并网逆变系统最大功率点跟踪算法稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 73-77.
WU Li bo, ZHAO Zheng ming, LIU Jian zheng, 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.



ZHOU Lin
Ph. D., Professor

周林
1961—, 男, 博士, 教授, 博导
从事电能质量及光伏发电方面的研究
电话: (023) 65102430
E-mail: zhoulin@equ.edu.cn



WU Jian

武剑
1984—, 男
主要从事光伏发电方面的研究
E-mail: hzhwujian@126.com

收稿日期 2007-11-09 编辑 任明