光伏系统双轨迹最大功率跟踪技术仿真研究

提出了一种双轨迹最大功率跟踪方法，该方法将最大功率跟踪分为三个阶段进行，在左侧快速跟踪区和右侧快速跟踪区采用单调比较算法沿$P-V$曲线进行跟踪，在电导增量区采用电导增量法沿$I-V$曲线进行跟踪，三个区域的分界点的确定需要借助于短路电流法，应用Matlab对光伏电池输出特性方程组参数进行求解验证了分界点的正确性。将双轨迹最大功率跟踪技术应用于某机场光伏电源仿真系统中，对系统不同工作状态进行一系列仿真研究，仿真结果表明，双轨迹最大功率跟踪技术在多种状态下均能很好地跟踪最大功率点，验证了方法的可行性和正确性。

刘施宇　葛红娟　袁　晶　陈　思/南京航空航天大学

刘施宇/硕士研究生

关键词/Keywords
双轨最大功率迹跟踪方法 ·
机场光伏电源 ·
短路电流法 ·
Matlab ·

0　引言

光伏发电作为新能源发电技术以其安全、环保等优势已在电力行业占有一席之地[1]，但是光伏发电同时也存在一定的不稳定性。目前光伏发电中需要解决的主要问题体现在如何提高利用率和维持其稳定性，最大功率跟踪技术顺势而生，目前广泛应用的最大功率跟踪技术有：短路电流法[2,4-5]、固定电压法、扰动增量法[6]和电导增量法[3]等。

本文提出了一种双轨迹最大功率跟踪技术，该方法采用分区域切换轨迹跟踪的方式寻找光伏系统的最大功率点。

机场光伏移动电源是一种以太阳能发电为基础，应用于机场设备维护和紧急发电的离网型供电电源。本文将双轨迹最大功率跟踪技术应用于机场光伏移动电源系统中，并进行仿真研究，对其适用性进行了验证。

民航科技创新引导资金（2012ZC52034），国家自然科学基金（U1233127）。

1　双轨迹最大功率跟踪技术

1.1　光伏输出特性分析

本文提出的光伏输出特性非理想状态下，而是考虑光伏电池的串联电阻R_s和并联电阻R_{sh}的影响，因此其光伏电池的等效模型如图1所示，则负载电流I_L为

$$I_L = I_{ph} - I_o\{\exp[\frac{q(U+I_LR_s)}{AkT}]-1\} - \frac{U+I_LR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$U = I_LR_L \quad (2)$$

在标准测试条件下：$H=1\ \mathrm{kW/m^2}$，$T=25\ ℃$，AM1.5。求得短路条件下，$U=0$，$I=I_{sc}$，可得

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o[\exp(\frac{qI_{sc}R_s}{AkT})-1] - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

开路条件下，$U=U_{oc}$，$I=0$，可得

$$I_{ph} = I_o[\exp(\frac{qU_{oc}}{AkT})-1] + \frac{U_{oc}}{R_{sh}} \quad (4)$$

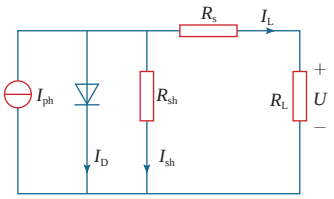


图1　非理想条件下光伏电池等效模型

1.2　光伏最大功率跟踪方法介绍

在前文提及的四种常用的最大功率跟踪方法中，短路电流法是利用了光伏最大功率点处的电流与光伏电源的短路电流之间的关系，来定位最大功率点。同样，固定电压法是利用了光伏最大功率点处的电压与光伏电源开路电压之间

中国知网　https://www.cnki.net

的关系来跟踪最大功率点。扰动观察法是通过算法设定一个电压扰动量，通过电压的变化和功率的变化的关系在$P-V$曲线上定位最大功率点。而电导增量法利用在$I-V$曲线上最大功率点处电导变化率与此点处电导值之间的等量关系来确定最大功率点。

1.3 双轨迹最大功率跟踪方法

双轨迹最大功率跟踪方法其本质是一种改良的电导增量法，一般的电导增量法是沿$I-V$曲线对最大功率点进行跟踪的。在$I-V$曲线的开始比较长的一段轨迹内随着电压的变化，电流的变化ΔI并不明显，换言之，在这段区域内进行跟踪时有很大可能某两次的算法所得的电导增量近似相等，这样就会造成算法跟踪失去方向性，从而造成跟踪延迟，降低跟踪效率。

双轨迹最大功率跟踪算法则能很好地避免这个跟踪延迟，电导增量法之所以可以有很好的应用前景，是因为可以对最大功率点处的电压与电流值给出一个等量关系，即

$$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{pv}}}{\mathrm{d}V_{\mathrm{pv}}}=-\frac{I_{\mathrm{pv}}}{V_{\mathrm{pv}}} \tag{5}$$

本文提出了双轨迹的概念，将跟踪过程分为三个区域：左侧快速跟踪区域、电导增量区和右侧快速跟踪区。在跟踪过程处于左、右侧快速跟踪区时选择沿$P-V$曲线进行单调增量算法，而在电导增量区内则采用电导增量法沿着$I-V$曲线对最大功率点进行准确定位，这里需要引入短路电流法来确定两个分界点A（C），B（D）。

短路电流法表述为最大功率点电流的I_{mpp}与光伏电池的短路电流I_{sc}存在一定的数量关系[3]，即

$$I_{\mathrm{mpp}}=kI_{\mathrm{sc}} \tag{6}$$

对于不同外部条件和不同型号的光伏电池时，式（6）均是成立的，那么I_{mpp}就可以看作是一个集合，根据经验数值$k=0.80\sim0.90$，所以可得式（7）和式（8）为

$$I_{\mathrm{mpp(max)}}=k_1I_{\mathrm{sc}} \tag{7}$$

$$I_{\mathrm{mpp(min)}}=k_2I_{\mathrm{sc}} \tag{8}$$

不妨设电导增量区的上边界点为$I_{\mathrm{mpp(max)}}$，下边界点为$I_{\mathrm{mpp(min)}}$，由式（7）和式（8）可知$I_{\mathrm{mpp(max)}}=k_1I_{\mathrm{sc}}=0.90I_{\mathrm{sc}}$，$I_{\mathrm{mpp(min)}}=k_2I_{\mathrm{sc}}=0.80I_{\mathrm{sc}}$，令$I_{\mathrm{Lmax}}=I_{\mathrm{mpp(max)}}$，$I_{\mathrm{Lmin}}=I_{\mathrm{mpp(min)}}$，由罗尔定理可知，即$P_A=P_B$，说明电导增量区中存在最大功率点，具体求解步骤如图2所示。

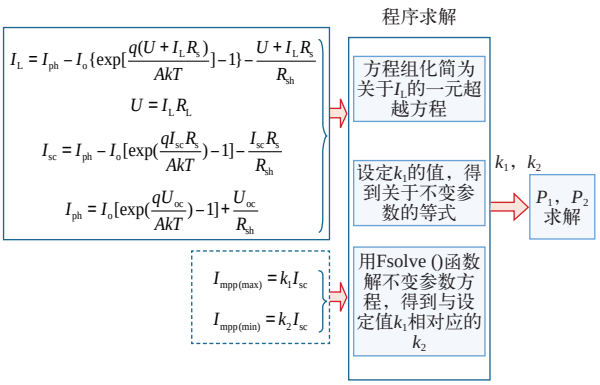


图2 电导增量区区域边界求解

计算P_A，P_B时，由于超越方程的存在，会求解出很多组解，并非所有解都为合理的，故只能固定k_1、k_2其中一个值来求解另一个，验证k_1、k_2是否合理。本文令$k_1=0.90$来求解k_2，经仿真计算得到k_2约等于0.80，故依据罗尔定理，最大功率点存在于电导增量区间内，说明了边界参数k_1，k_2取值的正确性。

如图3所示的轨迹为光伏输出特性曲线$I-V$曲线和$P-V$曲线，其中A点所对应的就是$0.92I_{\mathrm{sc}}$在$I-V$曲线上的位置，B点所对应的就是$0.78I_{\mathrm{sc}}$所在的位置。可以看出，区间AB在$I-V$曲线和$P-V$曲线上截取出两个区间，就区间的边界而言，两个区间在算法里的意义是相同的。在区间AB内是沿着$I-V$曲线的电导增量法，在区间外则是沿着$P-V$曲线快速靠近A、B两边界的单调比较算法。在A、B两点进行算法的切换，如短路电流法所阐述，此时光伏系统的最大功率点就在这个区间内，对最大功率点准确的定位则需要利用式（5）的等量关系

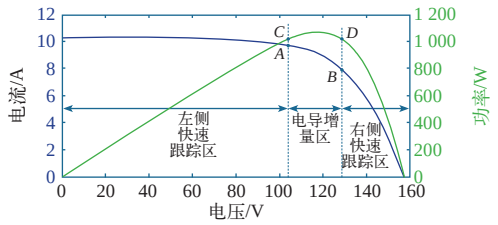


图3 双轨迹跟踪最大功率点轨迹图

中国知网 https://www.cnki.net

来定位。

2　机场光伏离网系统仿真模型

2.1　机场光伏离网系统结构及工作状态

图4为机场光伏离网电源系统结构图，该系统由四块250 W的单晶型光伏电池板、一台光伏控制器、一块48 V/50 A·h的铅酸蓄电池和一台离网逆变器组成。系统根据功率流向可以分为三种工作状态，其中光伏电池的输出功率为P_{pv}，负载额定功率为P_o，流向蓄电池的功率为P_b。

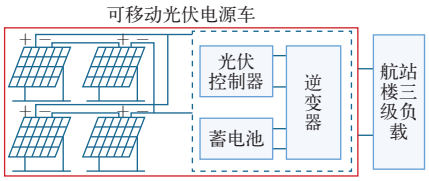


图4　机场光伏离网电源系统结构图

1）当$P_{pv}>P_o$，此时光伏电池的输出功率大于负载所需的功率，多余能量则通过双向DC/DC给蓄电池充电，而此时的双向DC/DC工作在Buck状态，给蓄电池充电时采用先恒流后涓流的充电方式，根据蓄电池的SOC状态自动切换。

2）当$P_{pv}=P_o$，光伏电池输出功率等于负载所需功率，双向DC/DC处于关断状态。

3）当$P_{pv}<P_o$时，光伏电池的输出功率小于负载所需的功率，蓄电池就要给负载提供功率，维持系统正常工作。

4）当$P_{pv}\gg P_o+P_b$时，即光伏电池输出的功率大于负载及蓄电池所需的功率时，光伏控制器的工作状态由最大功率跟踪切换到恒压工作模式，以保证系统稳定的工作。

2.2　光伏离网系统仿真模型

在Matlab/Simulink里搭建了光伏离网系统仿真模型，光伏电池阵列输出V_{PV}和I_{PV}到光伏控制器，双轨迹最大功率跟踪技术采样V_{PV}和I_{PV}通过一系列计算得出最大功率点，并通过改变光伏控制器开关管的占空比使其工作在最大功率状态，而双向DC－DC的工作模态则是根据光伏电池输出功率来决定的。本系统在$P_{pv}>P_o$时，需要给蓄电池进行充电，充电过程分为两个阶段进行，当电池SOC＜95%时，采用恒流充电，充电电流0.2 C，当SOC＞95%时采用涓流充电，充电电流为0.05 C。仿真框图如图5所示。

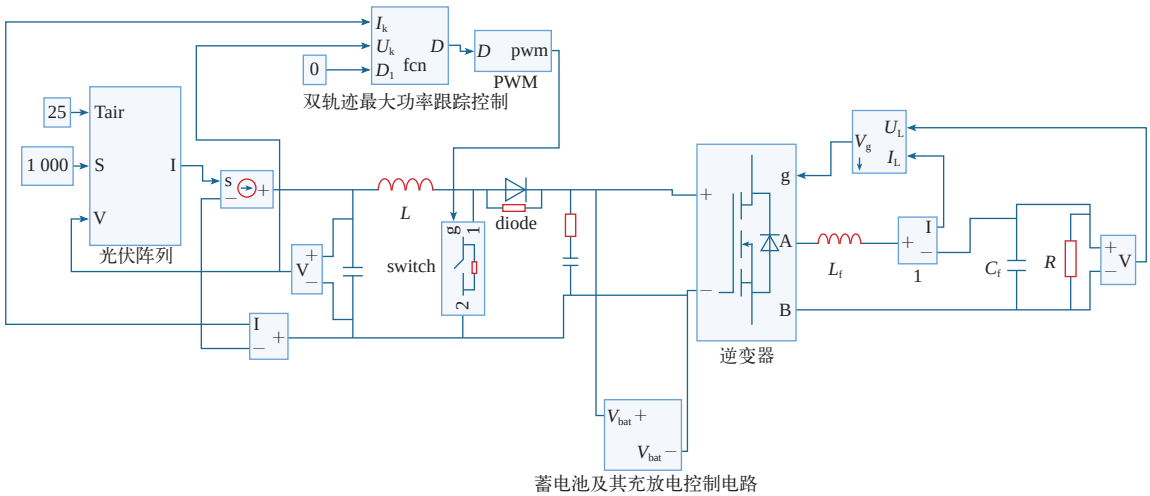
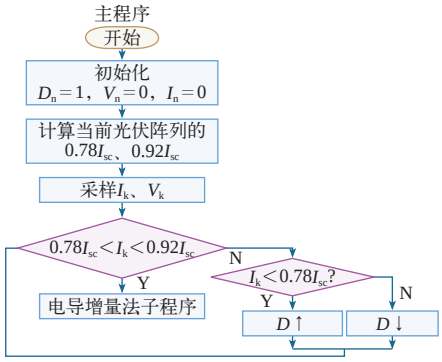


图5　光伏离网系统Simulink仿真框图

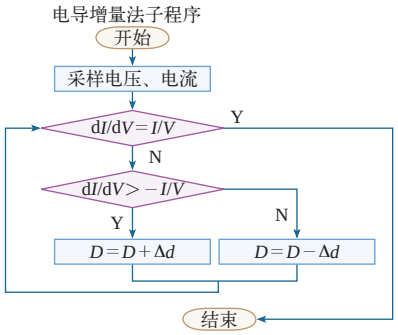
2.3　双轨迹最大功率跟踪算法流程

最大功率跟踪算法流程图如图6所示。双轨迹最大功率跟踪算法分为两个部分进行，在光伏电源未在电导增量区工作时，双轨迹最大功率跟踪算法将对其进行向电导增量区快速靠近的单调比较算法，其中步长Δd为0.01，当光伏电源通过算法控制进入电导增量区工作时，则采用电导增量法对最大功率点进行跟踪。

中国知网　https://www.cnki.net



（a）主程序流程图



（b）子程序流程图

图6　双轨迹最大功率跟踪算法流程图

（D为光伏控制器的开关管占空比，Δd为算法步长）

3　仿真实验

3.1　光伏电池不同辐照度下的输出特性

在Matlab/Simulink里搭建系统的仿真模型，考虑到不同的辐照度对本系统仿真结果的影响，决定采用1 200 W/m^2（红色），1 000 W/m^2（黑色），800 W/m^2（绿色）三种不同的辐照度进行仿真观察，首先对光伏系统所处的三种辐照度下的工作情况进行仿真，得到不同辐照度下光伏系统输出曲线$P-V$曲线和$I-V$曲线，然后对MPPT算法进行仿真得到不同辐照度下最大功率点跟踪情况，最后仿真得到不同辐照度下系统的各部分功率波形。因为双轨迹跟踪技术的核心在于由短路电流法来确定ITZ区域边界，这与系统的短路电流有关系，和受温度影响较大的开路电压[4]并无关系，所以仿真不需要对温度的影响进行考虑。三种辐照度下光伏输出曲线如图7、图8所示。

从图7、图8中可以得出在辐照度为800 W/m^{2}时，光伏电池的最大功率为860 W，短路电流I_{sc}为

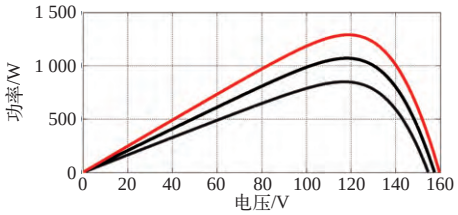


图7　三种辐照度下光伏输出$P-V$曲线

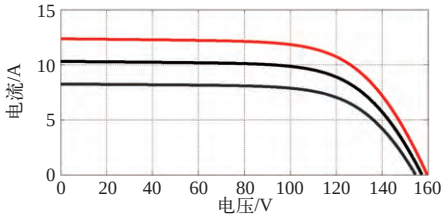


图8　三种辐照度下光伏输出$I-V$曲线

8.1 A；辐照度为1 000 W/m^{2}时，光伏电池的最大功率为1 100 W，短路电流I_{sc}为10.2 A；辐照度为1 200 W/m^{2}时，光伏电池的最大功率为1 450 W，短路电流I_{sc}为12.2 A。

3.2　双轨迹最大功率跟踪算法仿真

三种辐照度下光伏功率最大功率点功率值如图9所示。

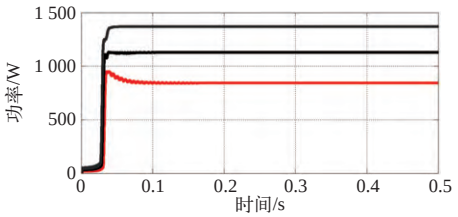


图9　三种辐照度下光伏功率最大功率点功率值

由图9可以观察发现三种辐照度下双轨迹跟踪技术都可以快速地找到最大功率点，并对其进行跟踪。仿真中三种辐照度下的最大功率处电流和光伏系统短路电流的关系如下表所示。观察最大功率点处电流I_{mpp}与光伏电源短路电流I_{sc}之间的关系，环境温度主要是影响光伏电源的开路电压值，对短路电流的影响几近为零。

表　不同辐照度下I_{mpp}与I_{sc}的关系表

辐照度/(W/m^2)	I_{mpp}/A	I_{sc}/A	温度/K	比例系数k
800	7	8.1	298	0.86
1 000	9	10.2	298	0.86
1 200	11	12.2	298	0.90

中国知网 https://www.cnki.net

可见不同辐照度下最大功率点处电流I_{mpp}与光伏电源短路电流I_{sc}仍然满足式（1）中的数量关系。

光伏离网系统应用双轨迹最大功率跟踪技术分别在辐照度为800 W/m^2（上），1 000 W/m^2（中），1 200 W/m^2（下）条件下对系统功率流向进行了仿真如图10所示。其中红色为负载功率波形，黑色为光伏系统输出功率波形，绿色线为蓄电池输出功率波形。

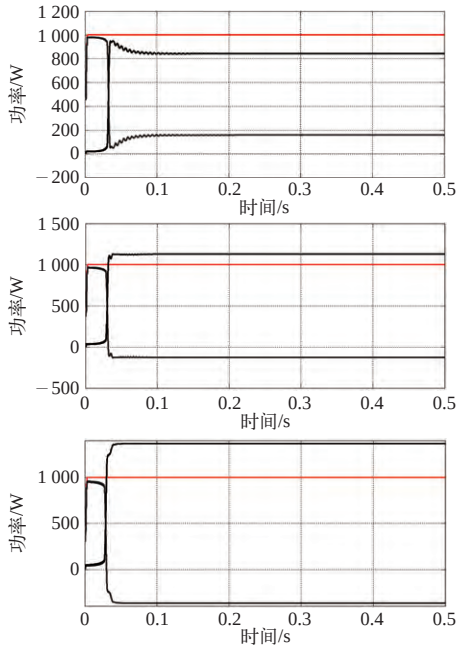


图10　三种不同辐照度下的系统功率流向图

由图10可知，光伏离网系统应用双轨迹最大功率跟踪技术分别在辐照度为800 W/m^2，1 000 W/m^2，1 200 W/m^{2}条件下仿真验证了系统的功率守恒。

4　结束语

本文提出的双轨迹最大功率跟踪技术是一种改良后的电导增量跟踪方法，该方法克服了电导增量法跟踪前期的缺点，加快了跟踪速度，同时兼具了电导增量法跟踪的准确度。随后对该算法在不同辐照度下的工作情况进行了仿真验证，最后仿真得出了系统在不同辐照度下的各部分功率波形，有效地验证了文中先前提出的关于系统在不同辐照度下的功率流向的观点，系统整体满足设计要求。

参考文献

[1] 张子鹤，梁亮．应用于机场航站楼的光伏－储能联合发电系统研究 [J]．电气应用，2011，30 (10)：90-93．

[2] 周林，武剑，栗秋华，等．光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述 [J]．高电压技术，2008，34 (6)：1145-1154．

[3] 肖俊明，贾良宝，余义华，等．基于改进电导增量法的光伏发电系统 MPPT 控制研究 [J]．中原工学院学报，2013 (1)：18-21．

[4] 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．

[5] Noguchi T，Togashi S，Nakamoto R．Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2002，49 (1)：217-223．

[6] Kollimalla S K，Mishra M K．Novel adaptive P&O MPPT algorithm for photovoltaic system considering sudden changes in weather condition [C]．2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)，IEEE，2013：653-658．

[7] 陈坚．电力电子学－电力电子变换和控制技术 [M]．北京：高等教育出版社，2002．

（收稿日期：2015－03－17）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

中国知网　https://www.cnki.net