屋顶光伏发电系统优化设计

文/光伏发电系统控制与优化湖南省工程实验室　刘偲艳

在度电补贴大环境下，光伏发电系统效率直接影响光伏电站的收益，成为光伏类企业最关注的问题。

光伏发电系统评估方法

以湖南理工职业技术学院实训楼屋顶20 kW光伏发电系统为实例，采用基于发电量和辐照度的系统性能比*PR*（Performance Ratio）评价方法对光伏电站进行发电效率评估。系统性能比*PR*表示一段时间内，并网光伏发电系统最终并网发电量与光伏电站倾斜面接收太阳辐后的理论发电量之比，反映整个并网光伏电站对于单位入射辐射能量的最终利用效率。

计算公式为

$$PR_T = \frac{E_T}{P_e h_T} \tag{1}$$

式中，E_T为最终并网发电量；P_e为光伏电站额定功率；h_T为光伏电站倾斜面有效日照时数。

记录2016年全年并网电量如表1所示，根据系统辐照监测可得，光伏电池板倾斜面辐照量为1 185 kW·h/m^2。

表1　2016年1～12月并网电量

月份	并网电量/kW·h	月份	并网电量/kW·h
1	761	7	2 157
2	1 720	8	2 068
3	1 519	8	1 959
4	1 502	10	1 021
5	1 642	11	928
6	1 775	12	1 265
合计		18320	

因此可计算得到光伏电站全年系统*PR*值为77.3%，即光伏发电系统每年损失率高达22.7%。

光伏发电系统损耗主要集中在光伏阵列损耗、直流线路损耗、逆变器损耗和交流线路损耗。经现场测试数据显示：直流侧线路损耗1%左右，交流侧线路损耗0.5%左右，目前逆变器效率普遍在95%以上，那么光伏发电系统损耗主要集中在光伏阵列，根源在于光伏组件功率不匹配，即组件木桶效应。本文重点分析局部阴影条件下的组件功率输出及优化方法。

失配条件下光伏阵列功率分析

屋顶电站使用的光伏组件数据如表2所示，倾角设计16°。

表2　光伏组件参数

参数	数值
短路电流/A	7.44
开路电压/V	35.4
MPP功率/W	200
MPP功率电压/V	28.8
MPP功率电流/A	6.94

本文采用{3×3}阵列为分析对象，图1为光伏阵列结构图。三组组件串分别为C_1～C_3。

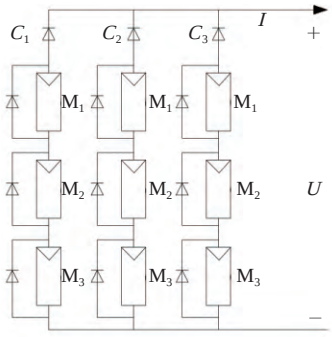


图1　光伏阵列结构

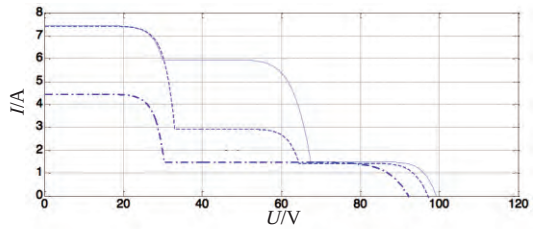
图1中，M_1～M_3表示组件1～3，U为阵列电

基金项目：重大招标课题，项目编号（lgy17gz002）

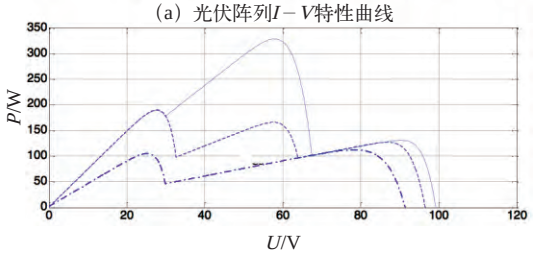
压输出。假设组件串的光照分布不均匀，光照分布见表3，且负载较轻。利用Matlab/simulink进行仿真可得各组串$I-V$，$P-V$特性曲线如图2所示。

表3　光伏组件串光照情况

组件串	各组串光照情况/（W/m²）		
	G_1	G_2	G_3
C_1	1 000	800	200
C_2	1 000	400	200
C_3	600	200	200



（a）光伏阵列$I-V$特性曲线



（b）光伏阵列$P-V$特性曲线

图2　光伏阵列输出特性曲线

从图2可得，组件参数不匹配时光伏阵列输出特性曲线变得更加复杂，$I-V$曲线表现为阶梯型，$P-V$曲线表现为多峰值，且并联组件串的U_m值各不同。

根据光伏组串参数不匹配时组件$I-V$曲线和$P-V$曲线的理论计算公式，可以根据检测的实时光照幅值，计算出组件串对应的U_m，P_m值。

经过代入计算可得组件串C_1、C_2、C_3对应的U_m，P_m值分别为（57.8 V，328.6 W）（27.6 V，189 W）（79V，111.7 W）。

并联阵列电压补偿法

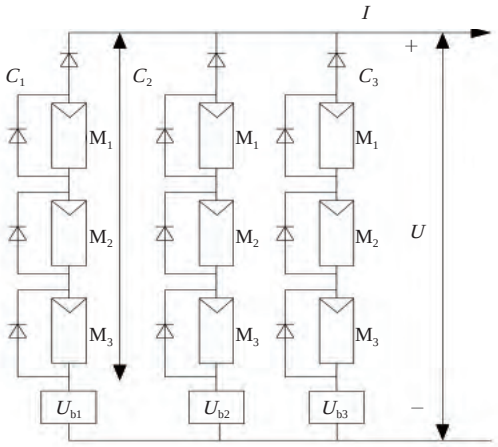
从图2可知，不同光照条件失配光伏并联各组件串MPP电压均不同，利用传统单路MPPT法无法获得全局最大功率点，而采用多路MPPT将大大增加逆变器硬件成本。

在实际应用过程中，光伏组件经常处于失配情况，并联阵列组串电压很难做到相等。针对这种情况，本文提出了基于MPP电压补偿控制算法，算法内容如下。

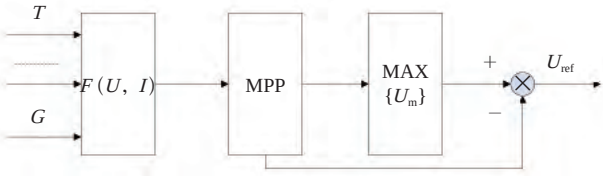
并联阵列组串C_3电压最大值为U_m，定义为U_{mmax}。假如设定光伏系统MPP电压为U_{mmax}，则C_1、C_2组串就不能工作在MPP电压。为了实现全局MPPT，使光伏阵列各组串均工作在最大功率点，本文设计对C_1、C_2组串进行支路电压补偿。

如图3所示，图3a假定在各支路增加补偿电压源，增加后支路电压为U_{mmax}，则有

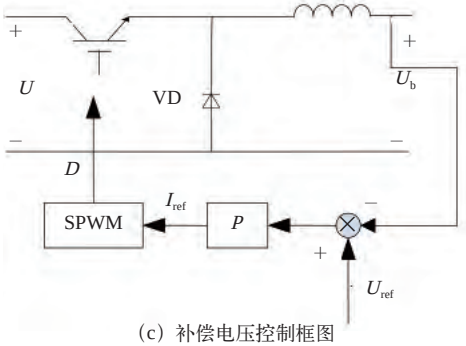
$$\begin{cases} U_{max}=U_{mc3}+U_{b3} \\ U_{max}=U_{mc2}+U_{b2} \\ U_{max}=U_{mc1}+U_{b1} \end{cases} \tag{2}$$



（a）并联阵列电压补偿系统结构图



（b）补偿电压给定值生成控制框图



（c）补偿电压控制框图

图3　光伏阵列补偿电压控制框图

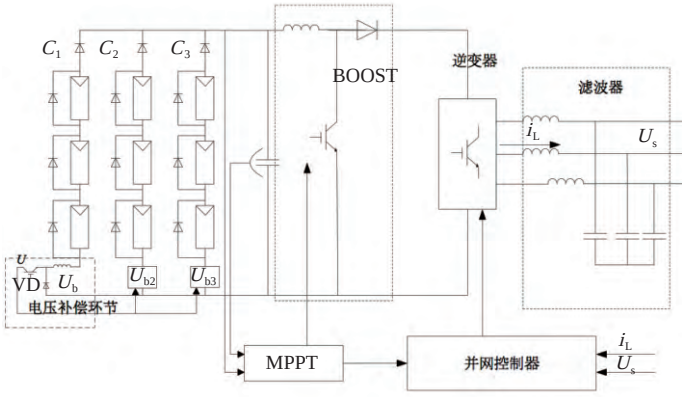
由式（2）可得支路电压补偿量$U_{bx(x=1,2,3)}$为U_{mmax}与对应支路MPP电压$U_{mcx(x=1,2,3)}$的差值。系统补偿后3条支路并联电压均为U_{mmax}，如图3b所示，光伏控制器根据采集得到的温度T，辐照量G，以及电压U，电流I，通过MPPT算法$F(U,I)$，计算得出各条支路最佳MPP电压。

补偿电压源$U_{bx(x=1,2,3)}$的设计如图3c所示，

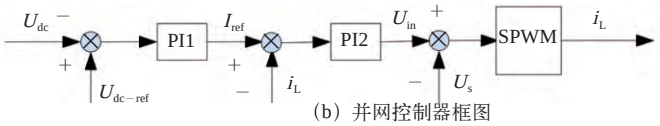
由于补偿电压$U_{bx}<U_{mmax}$，因此仅需采用简单的BUCK电路即可。利用传感器获得支路实际补偿电压U_b并与给定电压值U_{ref}进行比较，并经过PI调节器，即可实现无静差跟踪。该方法虽然在光伏组件支路上增加了串联电压源，但与采用多路MPPT逆变器相比，具有简化逆变器算法与降低逆变器成本等优势，并且效率与逆变器多路MPPT相差无几。

仿真与实验

通过Matlab/simulink仿真软件对本文所提出的光伏发电系统优化设计方案的有效性进行验证。系统控制框图如图4所示。



（a）光伏发电系统并网结构图



（b）并网控制器框图

图4　光伏发电系统并网控制框图

可知优化后光伏发电系统主要由光伏组件阵列，并联阵列电压补偿装置、MPPT控制器，并网逆变器、滤波装置组成。

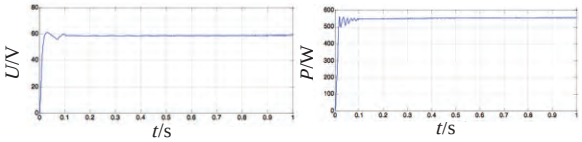
系统参数设定如表4所示。

表4　系统参数值

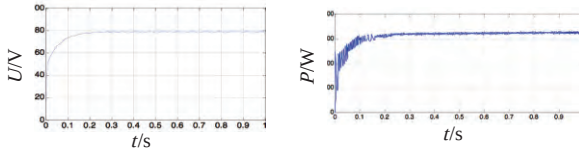
参数	数值
光伏阵列并联电容/ μF	1
斩波电感/mH	10
逆变器直流侧电容/ μF	1 000
滤波电感/mH	5
滤波电容/ μF	90

仿真参数设计如并网控制器电压环参数为$K=0.5$，$K_i=10$电流环参数$K_p=1.2$，$K_i=25$。

光伏阵列不匹配情况下，传统光伏阵列进行多峰值MPP功率跟踪，仿真图如图5a所示，经过优化设计后的仿真如图5b所示。



（a）传统控制方法系统电压、功率输出



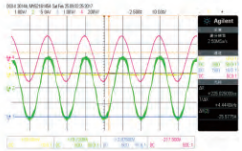
（b）并联阵列电压补偿法系统电压、功率输出

图5　光伏阵列系统电压、功率输出仿真对比图

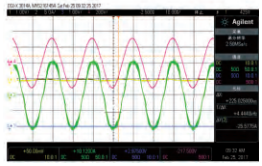
通过对比可得采用传统控制方法时，光伏阵列输出功率在0.1 s时达最大功率值，为580 W，采用并联阵列补偿电压法时，光伏阵列输出功率在0.15 s时跟踪最大功率值，为628 W。所以采用并联阵列电压补偿法使功率输出提高48 W，约8.3%，说明该方法能有效提高光伏阵列的功率输出。

图6a为光伏发电系统实物平台，采用现有的光伏电站其中2串C_1、C_2进行并网，功率4 kW，每块组件200W，每串10块。试验过程中遮挡一部分光伏组件，试验结果如图6b、6c所示，由试验结果分析可得，传统控制方法系统输出功率为3.1 kW，进行并联阵列电压补偿后系统输出功率为3.27 kW，功率提升170 W。

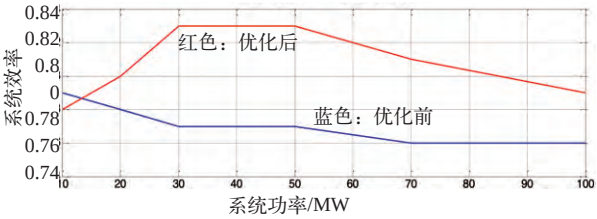
（a）光伏发电系统实物平台



（b）传统控制方法并网波形



（c）并联阵列电压补偿并网波形



（d）效率对比

图6　光伏发电系及并网波形

结束语

本文针对光伏发电系统效率偏低的现象研究了光伏阵列功率不匹配情况时的输出特性，并提并联阵列电压补偿法。通过MATLAB仿真试验对比，得出该方法能有效提高光伏阵列功率输出，试验结果进一步表明了该观点。EA