

# 光伏 DG 接入配电网及微电网的过电压自动调节方法研究

李瑞生, 翟登辉

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 针对光伏 DG 接入配电网因过电压而导致渗透率低的问题、微电网离网运行期间过电压问题, 以及微电网在非计划孤岛状态下并网转离网暂态过电压问题, 提出一种 P/U 下垂调节方法。当光伏 DG 接入配电网, 该方法能避免光伏 DG 因过电压而退出运行。当光伏 DG 接入离网运行微电网, 因负荷减少、DG 出力增加等因素而导致过电压时, 该方法可以实现无通信互连线的稳态离网能量平衡。当含光伏 DG 的微电网在并网转离网期间, 该方法能够解决暂态过电压问题。首先推导电压偏差公式并分析过电压产生机理。其次介绍 P-U 下垂调节方法原理。最后为验证方法可行性, 以光伏 DG 接入配电网为算例分析对象, 搭建 Matlab/Simulink 仿真模型, 并在逆变器样机上进行试验验证。结果表明 P-U 下垂调节方法可行有效。

**关键词:** 渗透率; 分布式光伏发电; P-U 下垂; 配电网; 微电网

## Research on over-voltage automatic adjustment method of distributed photovoltaic source accessing to distribution network or microgrid

LI Ruisheng, ZHAI Denghui

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** For the problem of low capacity penetration caused by over voltage, over voltage during the operation of islanded DG and the transient over voltage between transition of DG both from islanded operation mode to grid-connected operation mode when photovoltaic DGs access to distribution network, this paper puts forward a kind of P/U droop control method, which can avoid photovoltaic DG exiting operation due to over voltage when it accesses to distribution network. When the load is reduced, the DG power increases and other factors causing over voltage in islanded DG including photovoltaic DG, the method can achieve the steady energy balance of islanded MG without control interconnections and also can solve the transient over voltage between transition of MG both from islanded mode to grid-connected mode. Firstly, the voltage deviation formula is given and over voltage generation mechanism is analyzed. Secondly, the P-U regulating method is introduced. And then in order to verify the feasibility of the method, taking photovoltaic DG accessing to distribution network as the object of analysis, the Matlab/Simulink simulation model and experiment are presented from the platform of photovoltaic inverter. The results show that P/U droop control method is effective.

**Key words:** capacity penetration; distributed photovoltaic generation; P-U droop; distribution network; microgrid

中图分类号: TM615

文章编号: 1674-3415(2015)22-0062-07

## 0 引言

分布式发电(Distributed generation, DG)接在用户侧附近, 采取就近发电, 就近并网, 就近使用的原则, 通过公共连接点(PCC)连接到一个区域电力系统(Area EPS 电网)的发电设施。分布式光伏发电是利

用太阳能的一种分布式发电(以下称光伏 DG), 采用就近将太阳能转换为电能, 就近并网, 是一种新型的、具有广阔发展前景的发电和能源综合利用模式<sup>[1]</sup>。光伏 DG 接入配电网会对配电网规划、配电网继电保护、电能质量、电压波动造成影响。尤其是电压电能质量是光伏 DG 技术应用中的一个主要难题, 是限制光伏 DG 接入的容量渗透率提高的主要障碍。光伏 DG 接入对于配电网来说是不可控的, 电网扰

基金项目: 国家能源应用技术研究及工程示范(NY20150302)

动及故障时造成电压频率异常, 要求光伏 DG 立刻退出运行, 避免光伏 DG 接入对配电网造成影响。

为解决光伏 DG 接入配电网的矛盾, 充分发挥光伏 DG 优势, Lasseter B 提出了微电网 (Micro-Grid, MG) 的概念<sup>[2]</sup>, MG 是指由 DG (含光伏、风机等 DG)、储能装置、负荷和控制装置等组成的具有自我控制、管理和保护的自治系统, 既可以与配电网并网运行, 也可以孤岛离网运行, MG 技术是有效利用光伏 DG 发电的技术途径。

光伏 DG 接入配电网时, 为尽可能的较多接入, 提出了光伏 DG 接入总容量与系统总负荷之比, 即渗透率 (Capacity Penetration, CP)<sup>[3-4]</sup>的技术要求。在即将完成的 IEEE1547.7 和 IEEE1547.8 标准中专门补充 IEEE1547.4 标准没有考虑光伏 DG 接入配电网对渗透率的要求, 开展高渗透率光伏 DG 接入对电网影响等方面研究<sup>[4]</sup>。德国采取的做法是: 充分考虑在光伏 DG 渗透率较高情况下, 光伏 DG 支撑配电网的可靠性和稳定性, 要求光伏 DG 应具有一定的有功和无功控制能力, 参与电网电压、频率调节<sup>[4]</sup>; 美国采取的做法是: 根据不同配电网架构, 其接纳光伏 DG 渗透率作为判断标准, 及时公布合理渗透率及剩余光伏 DG 接纳空间<sup>[5]</sup>; 日本采取的做法是: 确保光伏 DG 接入配电网安全运行情况下, 尽可能提高光伏 DG 渗透率, 并于 2004 年修订了《分布式发电并网关键技术指南》<sup>[6]</sup>, 2011 年, 日本福岛核电站危机发生后, 日本政府计划到 2030 年将可再生能源发电的比例提高到 30%。

我国对 DG 接入配电网制定并发布的主要标准是《GB/T 29319-2012 光伏发电系统接入配电网技术规定》、《NB/T 32015-2013 分布式电源接入配电网技术规定》、《NB/T 33011-2014 分布式电源接入电网测试技术规范》、《NB/T 33010-2014 分布式电源接入电网运行控制规范》, 分别从分布式电源的并网检测项目及方法、并网/孤岛运行控制应满足的要求等方面进行了相应的规范。由于我国配电网建设落后于电源点及变电站建设, 配电网设备及结构普遍比较薄弱, 配电网结构复杂, 环网联络节点较多, 造成目前光伏 DG 接入渗透率不高, 需要光伏 DG 适应我国配电网的状况, 以便提高光伏 DG 接入的渗透率。

当光伏 DG 接入配电网后, 传统配电网的潮流分布会发生改变甚至导致潮流方向相反<sup>[7-8]</sup>。光伏 DG 分布合理, 将对接入点稳态电压<sup>[9-10]</sup>会有一定程度的改善; 光伏 DG 无约束大规模接入以及负荷的多变性可能引起较大的电压偏差和波动, 甚至出现电压越限<sup>[11-12]</sup>现象, 最终导致逆变器因过电压而退

出运行, 从而无法保证光伏 DG 的正常接入, 降低了光伏 DG 的渗透率。

目前关于提高光伏 DG 接入渗透率的方法研究甚少, 文献[13]从接入点电抗器补偿、安装储能装置等方式来解决电压越限以提高渗透率, 但储能的寿命、成本因素降低了大规模分布式电源并网的灵活性。文献[14]采用负荷转移和储能技术来提高配电网的光伏接纳能力。文献[15]从光伏 DG 的容量以及接入位置的角度说明了对电网电压的影响, 但是由于呈辐射状配电网的网络结构复杂以及用户负荷的多变性使得最大接入限制容量的计算较为复杂, 而且也不一定准确。另外该文献还采用逆变器以超前功率因数运行的方式提高光伏 DG 渗透率, 但同时其缺点是增加了输电损耗。

MG 作为一种光伏 DG 接入的有效途径, 接入配电网的 MG, 在并网运行时可以通过储能装置调节电压, 提高光伏 DG 接入渗透率。MG 在离网运行期间, 光伏 DG 多余的发电, 储能及负荷不能消纳, 又会造成 MG 过电压, 采用分层通信控制<sup>[16]</sup>方法, 实时调节各光伏 DG 及储能的出力, 实现稳态的离网能量平衡, 保证 MG 在离网期间的稳定运行。此种方法有两个弊端: 一是需要各光伏 DG 与控制器之间有通信线路, 不能实现各光伏 DG 无互连线的即插即用, 一旦通信失败, MG 将无法正常工作; 二是在并网转离网期间, 并网时若 MG 处于功率过剩状态, 即光伏 DG 发电多余, 就地负荷若消纳不了, 多余的电能会通过 PCC 输送到配电网; 然而若 MG 在非计划孤岛状态下并网转离网运行时, 光伏 DG 多余的电能就会造成离网瞬间的暂态过电压, 稳态的离网能量平衡根本来不及调节, 会造成 MG 离网瞬间失败, 整个 MG 黑掉。

光伏 DG 接入配电网或其与储能构成 MG 接入配电网, 其逆变器接口的控制特性决定了接入配电网的渗透率及 MG 并网转离网的可靠性, MG 离网运行期间的稳态运行特性。本文关于光伏 DG 接入配电网因过电压而导致渗透率低的问题、离网运行期间过电压问题, 以及 MG 并网转离网暂态过电压问题, 提出了逆变器采用 P-U 下垂调节的控制方法来抑制过电压现象。

## 1 光伏 DG 接入电压分析

### 1.1 光伏 DG 接入配电网电压分析

图 1 为多个光伏 DG 接入配电网后的典型电压分布。为便于分析, 鉴于配电网电压等级较低以及线路较短, 忽略线路对地电容等因素, 只考虑线路自阻抗, 线路初始端电压为额定电压  $U_N$ 。其中,

线路上一共有  $n$  个用户负荷,  $P_k + jQ_k$  代表第  $k$  个用户负荷的有功功率和无功功率。  $R_k + jX_k$  代表第  $k$  段馈线阻抗。  $PV_k$  代表第  $k$  个光伏 DG, 其容量为  $P_{V_k}$ 。  $\Delta U_k$  为第  $k$  段馈线阻抗上的压降。

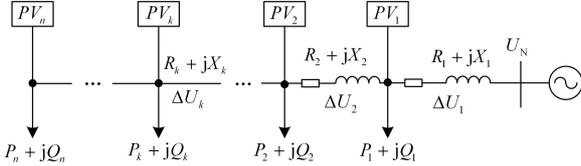


图 1 多个光伏 DG 接入配电网后的典型电压分布

Fig. 1 Typical line voltage distribution of distribution network with distributed photovoltaic DG

假设所有  $n$  个光伏 DG 都接入, 因线路电抗  $X_k$  小, 暂忽略无功功率影响, 则电压降<sup>[13]</sup>  $\Delta U_k$  的计算见式(1)。

$$\Delta U_k = U_k - U_{k-1} = - \frac{\left[ R_k \sum_{j=k}^n (P_j - P_{Vj}) \right]}{U_{k-1}} \quad (1)$$

$PV_k$  接入点的电压  $U_k$  为

$$U_k = U_N - \sum_{i=1}^k \left( \frac{\left[ R_i \sum_{j=i}^n (P_j - P_{Vj}) \right]}{U_{i-1}} \right) \quad (2)$$

由式(2)可知,  $U_k$  的大小与线路阻抗、光伏 DG 出力、接入位置以及线路初始端电压  $U_N$  有关。式(2)

中, 若  $\sum_{j=k}^n P_{Vj} > \sum_{j=k}^n P_j$ , 即光伏 DG 总容量大于总负荷功率时, 则  $U_k > U_N$ ; 若光伏容量过大, 则  $U_k$  会超过配电网电压偏差所允许的上限值  $U_{max}$ , 使得逆变器因电压异常退出运行, 从而降低了光伏 DG 接入配电网的渗透率。

### 1.2 光伏 DG 在 MG 离网运行时电压分析

图 2 为光伏 DG 在 MG 离网运行等效电路图,  $E\angle\delta$  是逆变器的开路电压,  $\dot{I}$  是逆变器的输出电流,  $U_N\angle 0$  是 MG 主电源电压, 由于在低压微电网中, 线路电阻  $R$  较大, 暂忽略感抗  $X$  影响。

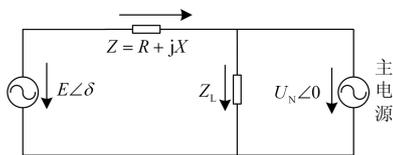


图 2 光伏 DG 在 MG 离网运行等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of PV island mode including photovoltaic generation

图 2 可得逆变器输出电流  $\dot{I}$  的表达式为

$$\dot{I} = \frac{E\angle\delta - U_N\angle 0}{R} = \frac{E}{R}\angle\delta - \frac{U}{R} \quad (3)$$

则逆变器的输出复功率  $\bar{S}$  为

$$\bar{S} = \dot{U}_N \dot{I}^* = P + jQ \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的表达式

$$P = \frac{U_N}{R} (E - U_N) \quad (5)$$

$$Q = \frac{U_N}{R} (-\delta E) \quad (6)$$

由式(5)可知, 电压  $E$  随着  $P$  的增加而升高。

与光伏 DG 接入配电网原理基本一样, 考虑微电网离网运行存在就地负荷, 分析光伏 DG 电压公式, 暂忽略无功功率的影响, 其实际潮流分布如图 3 所示。

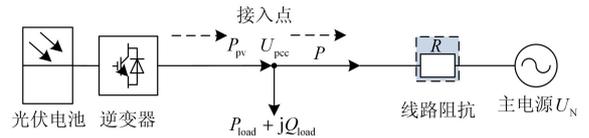


图 3 含光伏 DG 的离网 MG 线路图

Fig. 3 Line load distribution of off-grid MG including photovoltaic generation

图 3 中, 假定光伏逆变器以单位功率因数运行, 只发出有功功率  $P_{pv}$ , 则

$$P_{pv} = P_{load} + P \quad (7)$$

因光伏出力、负荷因素引起的接入点电压  $U_{pcc}$  变化的关系见表 1。

表 1 光伏出力、负荷引起的接入点电压变化

Table 1 Access point voltage change caused by photovoltaic power and load

$P_{pv}$ 与 $P_{load}$ 关系	$U_{pcc}$ 变化情况
$P_{pv} < P_{load}$	$U_{pcc} = U_N - \frac{ P R}{U_{pcc}}$
$P_{pv} > P_{load}$	$U_{pcc} = U_N + \frac{ P R}{U_{pcc}}$
	若 $P_{pv}$ 不变, $P_{load} \downarrow$ , 则 $P \uparrow$ , $U_{pcc} \uparrow$
	若 $P_{load}$ 不变, $P_{pv} \uparrow$ , 则 $P \uparrow$ , $U_{pcc} \uparrow$

由表 1 可知: 当  $P_{pv} < P_{load}$  时, 光伏 DG 和主电源同时向负荷供电, 则  $U_{pcc} < U_N$ , 此时不但不会产生过电压, 而且对  $U_{pcc}$  还有一定程度的改善; 当  $P_{pv} > P_{load}$  时, 表明光伏发电大于负载消耗, 则

$U_{pcc} > U_N$ , 此时接入点电压高于额定电压; 亦即在光伏发电突然增加或负载突然减小引起  $P_{pv} > P_{load}$  时, 可能引起过电压。

### 1.3 MG 并网转离网暂态过电压问题

如图 4 所示, 并网运行 MG 在非计划孤岛状态下的并网转离网瞬间, 若光伏 DG 发电过多, 就会出现暂态过电压现象。

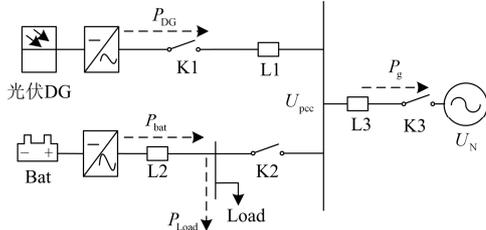


图 4 光伏 DG 接入并网运行 MG

Fig. 4 Photovoltaic generation access in grid-connected MG

图 4 中,  $P_{DG}$  为光伏 DG 出力;  $P_{Load}$  为负荷功率;  $P_g$  为 MG 与电网的交换功率, 定义 MG 向电网送电为正, 电网向 MG 送电为负;  $P_{bat}$  为蓄电池功率, 定义放电为正, 充电为负。

图 5 为 MG 在非计划孤岛下并网转离网的能量流向图。

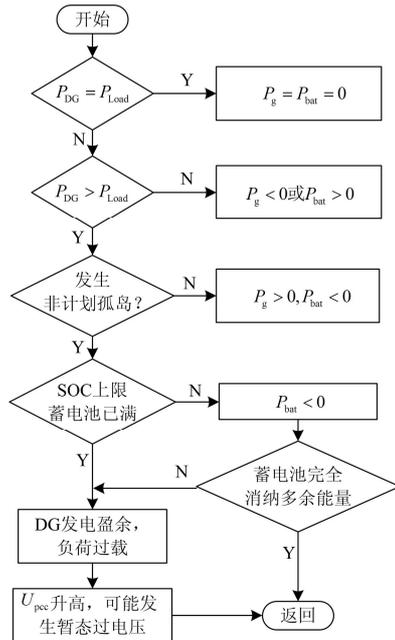


图 5 并网运行 MG 的能量流向图

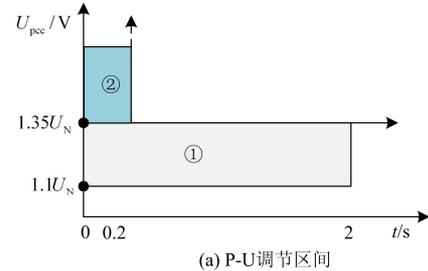
Fig. 5 Energy flow chart of grid-connected MG

## 2 P-U 下垂调节原理

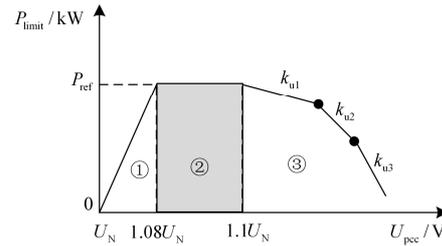
针对光伏 DG 接入配电网、MG 并转离及 MG 离网运行可能造成的过电压问题, 光伏逆变器采用

P-U 下垂调节方法以抑制过电压。

图 6 表示 P-U 下垂调节区间及控制折线,  $P_{limit}$  为参考功率限值,  $P_{ref}$  为参考功率,  $U_{pcc}$  为光伏 DG 接入点电压,  $k_u$  为下垂调节系数。



(a) P-U 调节区间



(b) P-U 调节折线

图 6 P-U 下垂调节控制折线及区间

Fig. 6 P-U curve and time zone of P-U regulation

图 6(a)中, 横轴为时间  $t$ , 纵轴为  $U_{pcc}$ , ① 和 ② 都为 P-U 下垂调节时间区间; 图 6(b)中, 横轴为  $U_{pcc}$ , 纵轴为  $P_{limit}$ , ① 区间表示正在进行 MPPT 跟踪, ② 区间表示 MPPT 停止跟踪, ③ 区间表示 P-U 下垂分段调节。

$U_{pcc}$  与  $P_{limit}$  关系满足式(8)。

$$\begin{cases} P_{limit} = P_{ref} & U_{pcc} \leq 1.08U_N \\ P_{limit} = P_{ref} & 1.08U_N < U_{pcc} < 1.1U_N \\ P_{limit} = P_{ref} - |k_u| \Delta U & U_{pcc} \geq 1.1U_N \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $\Delta U = U_{pcc} - 1.1 \times U_N$ ;  $k_u$  为下垂调节系数, 对于  $k_u$  取值说明, 若取值过大, 则光伏 DG 出力变化大, 能量损失多, 系统稳定性受到影响。若取值过小, 则调节速度过慢, 逆变器可能在标准要求的异常电压响应时间<sup>[17]</sup>内不能及时调节到正常范围而导致逆变器保护停机。

图 7 为 P-U 调节流程图,  $Flag\_CallMppt$  代表 MPPT 跟踪模块调用标志,  $Number$  代表过压次数。

## 3 算例仿真

为验证 P-U 下垂调节方法的可行性, 在 Matlab/Simulink 仿真平台下, 针对图 1 的配电网线路, 搭建了单相并网逆变器的仿真模型。

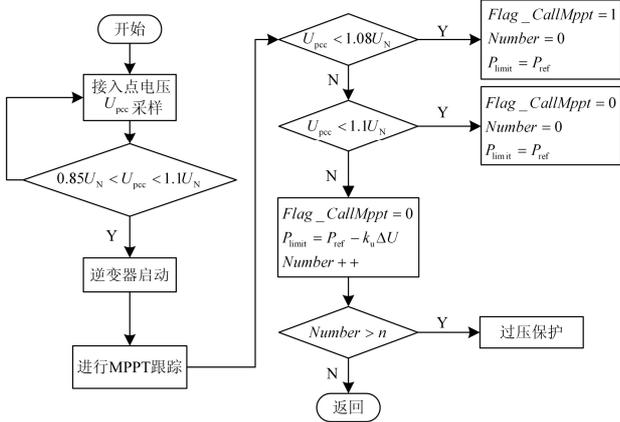


图 7 P-U 调节流程图

Fig. 7 Flow chart of P-U regulation

### 3.1 算例参数

相关仿真参数设置见表 2。

表 2 相关参数表

Table 2 Relevant parameters

参数类别	数值
开路电压/V	22
短路电流/A	5.3
光伏组件	
工作电压/V	17.5
工作电流/A	4.9
串联数	12
并联数	5
电网参数	
额定电压/V	230
线路电阻/ $\Omega$	1.5
负荷	
负荷/kW	5

主电路模型如图 8 所示。

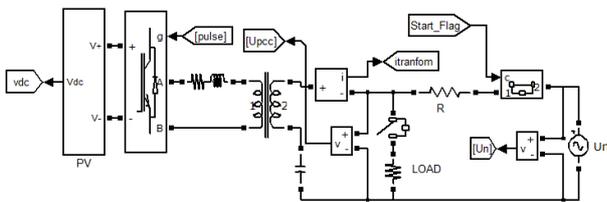


图 8 主电路仿真模型

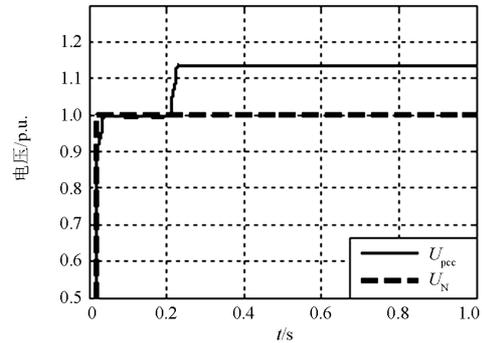
Fig. 8 Simulation model of main circuit

### 3.2 仿真结果

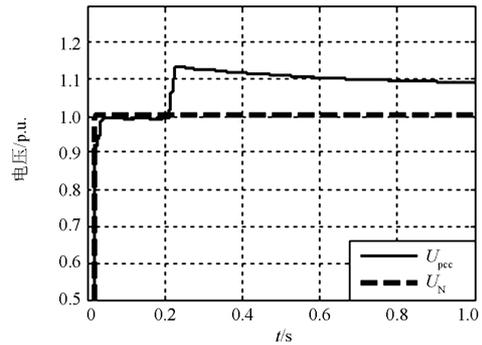
根据式(8)的 P-U 调节方法进行仿真分析, 波形如图 9 所示。

图 9 中, 光伏 DG 最大功率  $P_{pv}$  小于负荷功率  $P_{load}$ , 仿真过程如下: 0~0.2 s 时投入负荷, 此时  $U_{pcc} < U_N$ ; 0.2~1 s 时切断负荷, 此时  $U_{pcc} > 1.1U_N$ , 产生了过电压。图 9(a)表明无电压调节,  $U_{pcc}$  一直过电压; 图 9(b)~图 9(d)表明有电压调节, 下垂系数

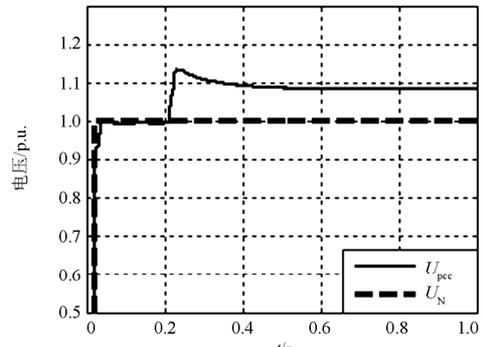
$k_u$  分别为 0.05、0.2、2, 调节时间  $\Delta t$  分别为 0.36 s、0.15 s、0.02 s。



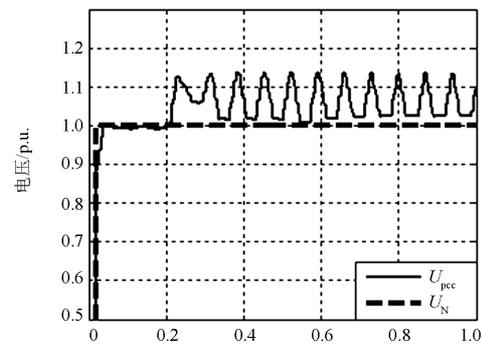
(a) 无电压调节



(b) 有电压调节,  $k_u=0.05$



(c) 有电压调节,  $k_u=0.2$



(d) 有电压调节,  $k_u=2$

图 9 接入点电压  $U_{pcc}$  与额定电压  $U_N$  波形

Fig. 9 Voltage wave of  $U_{pcc}$  and  $U_N$

仿真结果表明: P-U 下垂调节方法可行有效, 下垂系数  $k_u$  越大, 调节时间越短, 即调节速度越快; 若  $k_u$  过大, 系统会发生振荡。

#### 4 试验验证

为进一步验证 P-U 下垂调节方法的实用性搭建光伏逆变器样机试验平台, 直流侧采用 PV 模拟器, 负荷 Load1 用于功率消耗, Load2 用于负荷投切试验, 用于模拟过电压现象, 如图 10 所示。

表 3 试验主要参数

Table 3 Main parameters of test

项目	参数值
PV 侧最大功率	6.6 kW
线路模拟阻抗 R	1 $\Omega$ (1 kW)
主电源电压	230 V
Load1	10 kW
Load2	9 kW

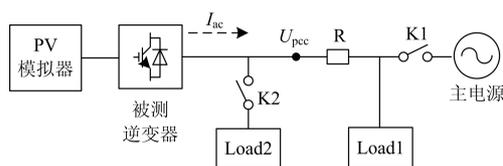


图 10 过电压试验平台

Fig. 10 Test platform of over voltage

(1) 试验工况 1, 闭合 K1、K2, 逆变器正常工作一段时间后断开 K2, 试验波形见图 11。

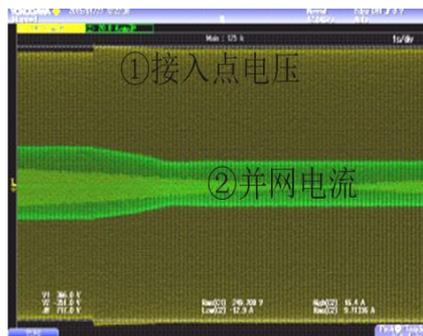


图 11 并网电流和并网点电压波形

Fig. 11 Waveform of grid-connected current and voltage

图 11 表明, 负荷 Load2 切除  $U_{pcc} = 256$  V, 发生了过电压现象, 逆变器进行下垂调节, 大约 1 s 后,  $U_{pcc} = 251$  V, 满足标准要求的正常范围, 逆变器继续并网运行。

(2) 试验工况 2, 闭合 K1、K2, 逆变器正常工作一段时间后断开 K2, 大致 40 s 后闭合 K2, 并网电流波形如图 12。

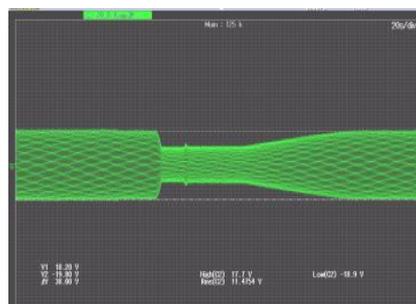


图 12 并网电流波形

Fig. 12 Waveform of grid-connected current

图 12 表明, 负荷 Load2 再次投入后, 逆变器进行 P-U 下垂调节, 恢复 MPPT 跟踪, 大约 25 s 后功率达到最大。

#### 5 小结

(1) 分析光伏 DG 接入配电网及 MG 离网运行过电压原理及影响因素, 给出 P-U 下垂调节方法;

(2) 通过 Matlab/Simulink 仿真及实验验证, 表明 P-U 下垂调节方法可靠有效;

(3) 针对光伏 DG 接入配电网后可能引起的过电压现象, 光伏逆变器采用基于 P-U 下垂的调节方法来抑制过电压, 在接入配电网时不会出现过电压使光伏 DG 退出运行, 提高光伏 DG 接入配电网的渗透率。

(4) 针对 MG 离网运行期间出现的过电压、非计划孤岛下 MG 并网转离网瞬间出现的暂态过电压, P-U 下垂调节方法同样适用, 尤其可以做到不依赖 MG 的能量管理系统来实现稳态电压的能量平衡, 做到 MG 无通信互连线的自主并联运行, 实现真正意义上的 MG 即插即用。

#### 参考文献

- [1] 撤奥洋, 邓星, 文明浩, 等. 高渗透率下大电网应对微电网接入的策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 78-82. HAN Aoyang, DENG Xing, WEN Minghao, et al. Strategy of large power system coping with accession of microgrid with high penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 78-82.
- [2] LASSETER B. Microgrids—distributed power generation[C] // Proceedings of the Power Engineering Society Winter Meeting: IEEE, 2001.
- [3] 程绳. 分布式电源接入配电网渗透率及运行协调优化研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2014. CHENG Sheng. Research on penetration ratio and coordinated optimization algorithm of distribution power system with distributed generations[D]. Beijing: China

- Electric Power Research Institute, 2014.
- [4] 鲍薇, 胡学浩, 何国庆, 等. 分布式电源并网标准研究[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 46-52.  
BAO Wei, HU Xuehao, HE Guoqing, et al. Study on standard for grid-integration of distributed resources[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 46-52.
- [5] 以渗透率为抓手 美国加速分布式光伏电源并网[EB/OL]. [2013-10-17]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20131017/465808.shtml>.
- [6] 韩民晓, 代双寅. 分布式电源并网中电能质量及相关标准探讨[J]. 中国标准化, 2010(12): 28-32.  
HAN Minxiao, DAI Shuangyin. Power quality in power grid and related standards in distributed resource[J]. China Standardization, 2010(12): 28-32.
- [7] 刘伟, 彭冬, 卜广全, 等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 1-6.  
LIU Wei, PENG Dong, BU Guangquan, et al. A survey on system problems in smart distribution network with grid-connected photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 1-6.
- [8] 王振树, 林梅军, 刘岩, 等. 考虑光伏并网的配电网潮流计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 178-185.  
WANG Zhenshu, LIN Meijun, LIU Yan, et al. Power flow algorithm for distribution network with photovoltaic system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 178-185.
- [9] 王艳玲, 韩学山, 周晓峰. 含分布式电源的主从联合系统扩展连续潮流计算[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 93-100.  
WANG Yanling, HAN Xueshan, ZHOU Xiaofeng. Expanded continuous power flow calculation of master-slave joint power system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 93-100.
- [10] 冯希科, 邵能灵, 宋凯, 等. DG 容量对配电网电流保护的影响及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 38(22): 156-165.  
FENG Xike, TAI Nengling, SONG Kai, et al. Research on the impact of DG capacity on the distribution network current protection and countermeasure[J]. Power System Protection and Control, 2011, 38(22): 156-165.
- [11] 许林, 曾意, 郭珂, 等. 具有电能质量调节功能的光伏并网系统研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 137-145.  
XU Lin, ZENG Yi, GUO Ke, et al. Development of photovoltaic grid-connected system with power quality regulatory function[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 137-145.
- [12] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 91-96, 101.  
ZHANG Limei, TANG Wei, ZHAO Yunjun, et al. Analysis of DG influences on system voltage and losses in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 91-96, 101.
- [13] 许晓艳, 黄越辉, 刘纯, 等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146.  
XU Xiaoyan, HUANG Yuehui, LIU Chun, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146.
- [14] 赵波, 张雪松, 洪博文. 大量分布式光伏电源接入智能配电网后的能量渗透率研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 95-100.  
ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, HONG Bowen. Energy penetration of large-scale distributed photovoltaic sources integrated into smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 95-100.
- [15] 范元亮, 赵波, 江全元, 等. 过电压限制下分布式光伏电源最大允许接入峰值容量的计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 40-44.  
FAN Yuanliang, ZHAO Bo, JIANG Quanyuan, et al. Peak capacity calculation of distributed photovoltaic source with constraint of over-voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 40-44.
- [16] 王成山. 微电网分析与仿真实论[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [17] NBT 32004-2013 光伏发电并网逆变器技术规范[S].  
NBT 32004-2013 technical specification of photovoltaic grid connected inverter[S].

收稿日期: 2015-04-20

作者简介:

李瑞生(1966-), 男, 硕士, 教授级工程师, 研究方向为继电保护、分布式发电接入及微电网稳定控制等; E-mail: ruishengl@xjgc.com

翟登辉(1984-), 男, 硕士, 工程师, 从事微电网系统研究及其关键电力电子设备的开发。

(编辑 姜新丽)