

微电网中分布式光伏电源孤岛及切换控制

微电网既突破了分布式能源的发展瓶颈，又增强了大电网的末端供电能力，已经受到了广泛关注。我国对微电网并网发电提出相关国家标准，规范其并网运行，这也为光伏逆变器控制提出了更高的要求。针对微电网并网/孤岛运行能量控制的变化要求，提出微电网中分布式光伏(PV)的孤岛控制策略，并基于储能技术解决了切换过程中拖动性负荷引起的逆变失败问题。仿真结果证明了所提控制策略的正确性和有效性。

汤卫东¹ 周 玮² 米为民³ 于文娟¹ 蒋国栋³/1.国家电力调度控制中心华中分中心 2.大连理工大学电气工程学院 3.南京南瑞集团公司(北京)

0 引言

微电网技术可使分布式光伏更好地接入大电网运行。微电网即插即用，既能并网运行，也可以脱离大电网孤岛运行。并网运行时，大电网稳定公共连接点处的电压，光伏逆变器控制策略相对成熟。孤岛运行时，逆变器需要转变控制策略，稳定母线电压，为其他微电源稳定运行提供支撑^[1-3]。

孤岛运行时，光伏电源以逆变器输出电能，其电压频率由控制策略决定，电压幅值则由直流侧电容电压和逆变控制共同实现。因此，微电网能量管理系统与光伏逆变器的合理配合尤为重要，否则会造成电能质量下降，能量输出混乱，系统运行瓦解^[4-7]。文献[6]提出的纯下垂控制简单、可靠，但光伏逆变器相互配合相对困难，且没有考虑电压恢复问题；文献[7]中提出的基于功率管理模式的逆变控制加入了频率恢复算法，但

微电网内负荷变动较大时，会出现光伏设备上限运行或下限运行，缺乏和常规发电机的配合；此外，微电网在并网/孤岛运行状态切换过程中，会出现电压暂降现象，由此引发的电动机群起效应会导致运行切换失败，可见维持逆变器直流侧电压稳定有着非常重要的意义^[8-10]。

综合以上分析，本文提出分布式光伏孤岛运行时，逆变器采用基于主从模式的下垂控制策略。对于并网/孤岛转换过程中，拖动性负荷带来的电压稳定控制问题，提出基于储能技术的闭环控制方法，为切换过程提供能量支撑。仿真结果证实了所提方法的正确性和有效性。

1 分布式光伏的孤岛控制

基于分布式光伏提出的微电网拓扑结构图，如图1所示。微电网通过静态开关与大电网相连，分布式光伏等微电源经本地控制器接入微电网。微电网中心控制器(Micro Grid Control Center, MGCC)安装在公共连接点附近，其电源由光伏电源直流母线提供。MGCC负责管理逆变控制器并接收其发出的信



汤卫东/高级工程师

关键词/Keywords

微电网 ·
分布式光伏发电 ·
储能技术 ·
孤岛控制 ·

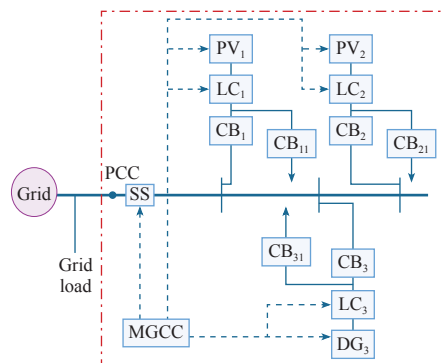


图1 微电网拓扑结构图

辽宁省博士启动基金计划(20121023)，国家电力调度控制中心华中分中心2015科技项目。

息, 维持微电网内的能量平衡。

孤岛运行时, 微电网能量管理系统要求分布式光伏以电压源形式运行, 呈现类似同步机的下垂特性, 动态维持微电网内能量平衡。关于下垂控制策略推导部分, 笔者在文献[5]中已详细论述, 这里不再赘述。

在其建模推导基础上, 给出控制器设计。以功率控制器为例, 引入PI环节, 实现无差控制, 结构框图如图2所示。

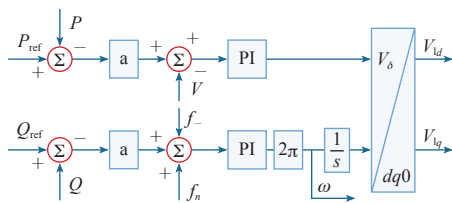


图2 功率控制器结构框图

双闭环有以下优点: ①响应速度快; ②自动限流; ③并联运行时减小冲击。同时注意到受控量所受的扰动, 将这些扰动量加入控制系统可使受控量控制更加快速、准确。

2 切换过程中PV逆变器直流侧电压控制

实际应用的微电网中, 孤岛检测由MGCC完成。由于算法本身相对复杂和有线传递的延时, 孤岛转换时间一般为50~100 ms。国际标准关于孤岛检测时间的规定如表1所示。

表1 IEEE Std 1547 推荐的孤岛检测时间

状态	孤岛时电压	最大检测时间/s
A	$0.5U_g$	0.16
B	$0.5U_g \sim 0.88U_g$	2
C	$1.1U_g \sim 1.2U_g$	1
D	$>1.2U_g$	0.16

显然, 主动孤岛检测时间符合IEEE标准, 但往往其切换过程中会出现一定幅度的电压暂降。对于电动机类负载, 其转矩与端口电压成正比, 切换过程中的电压暂降会造成电动机群起现象, 将再次拉低母线电压, 同时过大的电流将造成保护装置动作, 引起光伏运行状态切换失败, 如图3所示(以冲击性负载表征电动机的群起效应)。

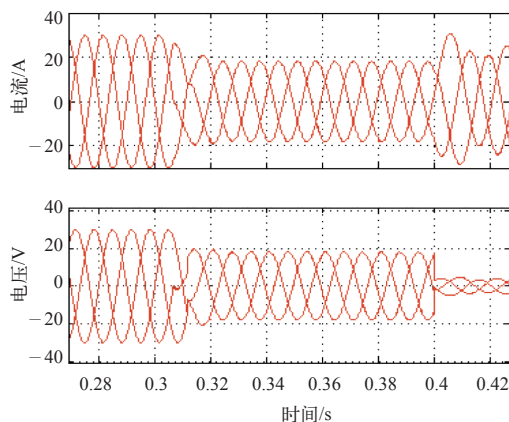


图3 电动机负载群起时母线电压、电流波形图

结合微电网中分布式光伏的运行特点, 引入储能装置为分布式光伏运行状态切换提供能量支撑、稳定母线电压。考虑到运行状态切换时间通常在毫秒级, 因此储能装置的响应时间成为首要考虑因素。超级电容器具有能量密度高、充放电速度快等优点, 能够满足本文能量控制目标, 通过DC/DC斩波电路实现其稳压特性。

对于DC/DC斩波电路建模后直接给出求解其稳态工作点, 即

$$X = \begin{pmatrix} \frac{V_1 - (d_2 + d_3)V_2}{R_{s1} + (d_2 + d_3)^2 R_{s2}} \\ \frac{(d_2 + d_3)^2 R_{s2} V_1 + (d_2 + d_3) R_{s1} V_2}{R_{s1} + (d_2 + d_3)^2 R_{s2}} \\ \frac{R_{s1} V_2 + (d_2 + d_3) R_{s2} V_1}{R_{s1} + (d_2 + d_3)^2 R_{s2}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

令 $d_1 + d_4 = D$; $d_2 + d_3 = 1 - D$ (D 为占空比) 则

$$X = \begin{pmatrix} \frac{V_1 - (1-D)V_2}{R_{s1} + (1-D)^2 R_{s2}} \\ \frac{(1-D)^2 R_{s2} V_1 + (1-D) R_{s1} V_2}{R_{s1} + (1-D)^2 R_{s2}} \\ \frac{R_{s1} V_2 + (1-D) R_{s2} V_1}{R_{s1} + (1-D)^2 R_{s2}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

进一步分析可知

$$I_L = \frac{V_1 - (1-D)V_2}{R_{s1} + (1-D)^2 R_{s2}} \quad (3)$$

此时电感电流和占空比还不能满足PI控制条件, 接下来控制器设计过程中, 需要进行降阶线性处理, 关于经典PI控制这里不再赘述。

在电压外环计算出电流参考值基础上给出核心电流环设计，两个开关管产生互补的占空比来控制电感电流，控制器如图4所示。

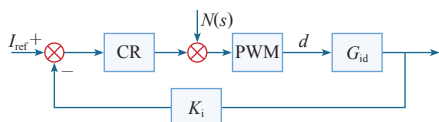


图4 DC/DC斩波器电感电流闭环控制框图

这样储能装置可以在微电网运行状态切换过程中快速提供能量支撑，稳定逆变器直流侧母线电压，使切换过程快速、平稳。

3 仿真及结果分析

3.1 两台PV并列运行下垂控制仿真

基于主从模式的下垂控制可以使微电网预置容量最大的光伏以下垂控制方式运行。在电能质量越限时，中央管理器再启动第二台光伏，并列运行。

仿真参数设置如下。负荷有功功率为7 kW，无功功率为1 kW，在0.3 s和1.2 s分别启动、停止第二台光伏，0.6 s切除负荷2 kW，0.5 kvar，0.9 s增加相同切除负荷。

如图5所示，0~0.3 s预置光伏承担微电网内所有负荷，0.3 s时MGCC启动第二台光伏，两台光伏平均分配负荷，在负荷发生波动过程中，两台光伏均等出力，整个过程中微电网内能量动态平衡。

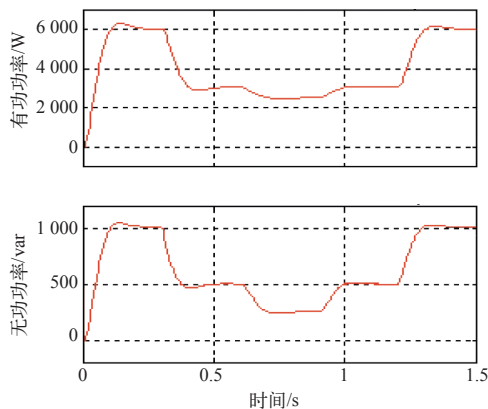


图5 主光伏输出有功功率、无功功率波形图

3.2 基于储能技术的PV并网/孤岛切换控制

仿真参数设置如前，在0.3 s时微电网发生孤岛运行，在电动机类负载比例过高时会出现切换失败。本质原因在于光伏电池板源侧能量不足，逆变器直流侧电压被拉低。

添加储能装置后，暂态切换过程中，直流母线电压维持恒定。这时，光伏逆变器的输出电压、电流波形图如图6所示，显然电压、电流基本无波动，实现了光伏逆变器运行状态无缝切换，为微电网稳定运行提供了有力保障。

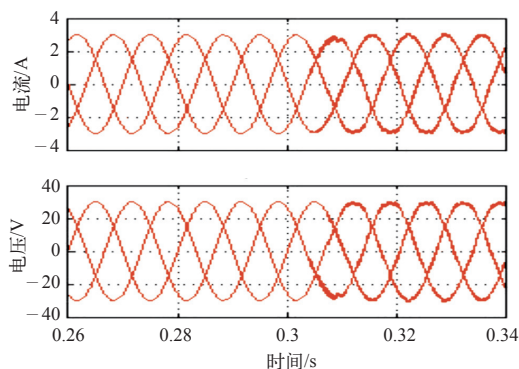


图6 并网转孤岛电压、电流波形图

4 结束语

微电网孤岛运行时，其能量管理系统要求光伏电源以电压源形式运行，平衡微电网内能量，稳定母线电压。本文提出光伏逆变器采用基于主从模式的下垂控制策略，仿真表明该方法可以使光伏逆变器动态维持能量平衡，稳定母线电压，为其他微电源稳定运行提供支撑。为了解决微电网并网/孤岛切换过程中，母线电压被电动机类负荷拉低，运行切换失败的问题，本文提出采用超级电容器和DC/DC斩波电路作为储能装置，提供能量支撑。仿真结果表明，该方法可以使得逆变器直流侧电压稳定，运行切换过程快速、平稳。

参考文献

- [1] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2):

- 10-14.
- [2] Laaksonen H, Saari P, Komulainen R. Voltage and frequency control of inverter based weak LV network microgrid [C]. Amsterdam, 2005.
- [3] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 微网研究中的关键技术 [J]. 电网技术, 2009, 33 (11): 6-11.
- [4] Ashabani S, Mohamed Y. A flexible control strategy for grid-connected and islanded microgrids with enhanced stability using non-linear microgrid stabilizer [J]. IEEE Transactions Smart Grid, 2012, 3 (3): 1291-1301.
- [5] 张富宏, 周玮, 孙辉, 等. 微电网孤岛运行时光伏发电控制策略研究 [J]. 可再生能源, 2014, 32 (7): 933-938.
- [6] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (7): 98-103.
- [7] Elmitwally A, Rashed M. Flexible operation strategy for an isolated PV-diesel microgrid without energy storage [J]. IEEE Transactions Energy Converse, 2011, 26 (1): 235-244.
- [8] 黄晓东, 郝木凯, 陈柔伊, 等. 微网中储能系统的控制与分析 [J]. 可再生能源, 2012, 30 (2): 23-27.
- [9] Mishra S, Sekhar P. Sliding mode based feedback linearizing controller for a PV system to improve the performance under grid frequency variation [C]. International Conference on Energy, 2011: 1-7.
- [10] 李福东, 吴敏. 微网孤岛模式下负荷分配的改进控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (13): 18-25.

(收稿日期: 2015-07-20) **EA**



Weidmüller 

魏德米勒风电箱体成套解决方案 —— 个性化的一站式服务

魏德米勒为全球客户和合作伙伴提供高品质的风电箱体成套解决方案。

魏德米勒深耕风电应用, 立足客户的实际需求和产品特性, 针对性的提供个性化的创新解决方案, 依托丰富的产品线、长期的运行经验和专业技术, 整合众多产品和零部件, 为客户提供一站式箱体成套服务, 箱体品质优良、性能可靠, 满足风电客户实际应用中的高标准需求。

扫一扫, 关注魏德米勒官方微信



Let's connect.