

光储微电网的低电压穿越控制策略研究

范柱烽¹, 毕大强², 任先文¹, 薛腾磊³, 陈宇刚¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 电力系统国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京 100084;
3. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 针对微电网低电压穿越问题, 基于光储微电网系统提出一种光储协调控制的低电压穿越策略。在低电压期间, 光伏系统采用最大功率跟踪控制, 储能系统采用恒压控制维持直流母线电压恒定, 在储能出力已达功率限值仍不能维持直流母线电压在允许范围内时, 光伏系统切换为恒压控制。考虑到光储微电网负荷波动性大的特点, 设计了一种适用于光储微电网并具有无功补偿功能的限流控制策略, 为电网提供电压支撑, 同时避免并网逆变器输出过电流。仿真结果表明, 控制系统能够充分利用光伏发电能量、维持直流母线电压的恒定、抑制并网电流过流并能发出无功功率支撑并网点电压, 实现了低电压穿越, 验证了该 LVRT 控制策略的有效性。

关键词: 微网; 低电压穿越; 光储协调控制; 负荷波动; 无功补偿

Low voltage ride-through control of the photovoltaic/battery micro-grid system

FAN Zhufeng¹, BI Daqiang², REN Xianwen¹, XUE Tenglei³, CHEN Yugang¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: For low voltage ride through issue of the micro-grid system, a coordinated control of low voltage ride-through (LVRT) is proposed for the photovoltaic/battery micro-grid system. During low voltage of the system, the photovoltaic system tracks maximum powerpoint of PV panels and the battery system maintains the constant of the DC bus voltage. When power output of the battery system has reached its limit, the photovoltaic system adopts the constant voltage control strategy to ensure a stable voltage. Considering the load fluctuation of micro grid, a current limit control strategy with the function of reactive compensation is proposed. This strategy can provide voltage support for grid side and avoid overcurrent of the converter output. The simulation results show that the solar energy is fully used, the DC bus voltage is maintained at a constant level, the overcurrent of the converter output is avoided and the system voltage is supported by the reactive power from the inverter. The aim of LVRT is realized and the effectiveness of the control strategy is verified.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA051201).

Key words: micro-grid system; low voltage ride-through (LVRT); coordinated photovoltaic/battery control; load fluctuation; reactive compensation

中图分类号: TM61 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0006-07

0 引言

随着分布式电源以及微网的发展, 光伏系统以其独特的优点在电网中所占的比例越来越高。2012年初公布的《太阳能发电发展“十二五”规划》中,

将 2015 年光伏装机规划目标上调至 20 GW^[1]。但太阳能资源具有随机性强、间歇性明显的特点, 其出力波动幅度大, 波动频率也无规律性^[2]。光储联合微电网能够实现光伏发电的平滑输出, 调节功率波动引起的光储微网中电压、频率及相位的变化, 这将有助于打破光伏发电的接入瓶颈, 降低配套输电线路的容量需求, 还可以缓解电网的调峰压力^[3], 建设电网友好型微电网。同时光储微电网也因易于

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2012AA051201)

建设而应用得越来越多。目前已在全国范围内建立了一系列的示范工程项目。例如南瑞集团承建的“扬州智能电网综合示范工程”以及“海西厦门五缘湾1号光储微电网试点工程”等。

光储微电网系统低电压穿越(LVRT)是指网侧故障引起并网点电压跌落时, 微电网能够在一定范围内继续保持并网甚至向电网提供一定的无功功率, 为电网电压提供支撑的能力^[4-5]。目前围绕光伏并网发电系统低电压穿越能力已开展了大量研究。文献[6]提出投入并联卸荷电阻限制直流侧电压的升高, 实现光伏电站的低电压穿越。文献[7]针对光伏并网发电系统低电压穿越能力提出一种无功补偿的控制策略, 有效抑制电压波动, 改善电能质量。文献[8]设计了光伏逆变器在三相电网电压正常运行和对称跌落两种运行工况下的 LVRT 控制策略。文献[9]提出系统在 LVRT 期间采用电流幅值控制的方法进行逆变器控制, 避免了输出过电流的产生。并且提出在网侧电压跌落时 DC-DC 变换器放弃最大功率跟踪控制, 能够有效稳定电压波动。上述研究主要针对大中型光伏电站的低电压穿越能力的研究, 对光储微电网的研究则没有提及。随着微电网研究的不断深入, 正在推动微电网向更高电压等级、更大容量发展, 光储微电网的低电压穿越能力研究具有实际意义。

本文针对光储微电网系统提出一种基于光储协调控制的 LVRT 策略。通过储能电池在网侧故障工况时的协调控制, 维持直流母线电压恒定, 使光伏阵列继续工作在 MPPT 模式, 充分利用光伏能量, 直到储能电池达到满充状态, 光伏阵列转为恒压控制以维持母线电压恒定。针对光储微电网设计了一种具有无功补偿功能的限流控制策略, 避免网侧输出过电流, 为网侧提供电压支撑。

1 光储微电网的拓扑

本文光储微电网采用两级式光伏并网结构, 其拓扑结构由光伏阵列 PV、防反二极管 Q1、单向变换电路 DC/DC、直流负载 Z_1 、直流负载 Z_2 、并网逆变器、电压跌落模拟器、滤波电感 L_1 、储能电池、双向 DC/DC 变换电路和控制系统构成。其拓扑结构图如图 1 所示。

光伏发电系统与储能系统经单向 DC/DC 升压, 并通过空间矢量脉宽调制(SVPWM)的逆变器逆变为三相交流电同电网相连。在联网时, 光伏系统采用最大功率跟踪控制; 储能电池采用充放电优先原则, 当光伏系统总能量大于负荷需求总能量, 优先对储能电池充电直到荷电状态达到设定值, 其设定

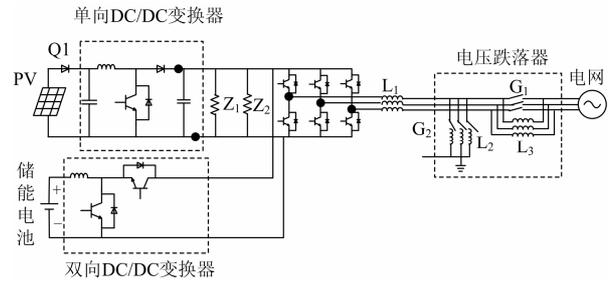


图 1 光储微电网拓扑结构图

Fig. 1 Structure of photovoltaic/battery micro-grid system

值与电池满充值应留有一定裕度; 当光伏系统总能量小于负荷需求总能量, 优先让储能电池放电以减少微电网与大电网的功率交换。在网侧故障工况下, 光伏阵列继续工作在 MPPT 模式, 逆变器控制采用单环限流控制, 利用储能电池维持直流母线电压的恒定; 当储能电池达到满充状态时, 光伏阵列转为恒压控制。

2 逆变器控制策略

通过判断电网电压实现网侧有功和无功功率的协调控制。当电网电压正常时, 为有功优先的逆变器控制, 即在对有功和无功电流限幅时, 首先输出有功电流。当电网电压发生跌落时, 由于网侧变流器的限流作用, 若继续执行有功优先控制, 则网侧变流器仅处于功率限幅状态, 无法对系统提供无功支持, 因此采用无功优先控制^[10]。

在同步旋转 $d-q$ 坐标系下, 光伏系统输出的电压和功率表达式为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2}(-e_d i_q + e_q i_d) \end{cases} \quad (1)$$

当电网电压三相对称时, 并进行 Park 变换, 可得到式(2)的结论, 其中 U 是电网相电压幅值。

$$\begin{cases} e_d = U \\ e_q = 0 \end{cases} \quad (2)$$

在系统正常运行时, 设置 q 轴参考电流为 0, 可得式(3)的结论。光储系统输出的功率因数就为单位功率因数。

$$\begin{cases} S = P = \frac{3}{2}e_d i_d \\ i_d = I \end{cases} \quad (3)$$

式中, I 为电网相电流幅值。

2.1 正常运行工况下的逆变器控制

系统正常运行时, 逆变器控制根据需求实现直

流母线电压的稳定并且按照功率因数输出功率。设计的逆变器控制器结构如图 2 所示。控制器采用电压电流双环控制。外环控制直流母线电压，给定的电压参考值与直流母线电压实际值的差值作为 PI 控制器的输入，输出作为内环电流控制的参考值。内环电流实际值为经过解耦得到的直轴电流。通过调节逆变器的输出有功功率维持直流母线电压工作在给定参考电压 U_{ref} 。同时对解耦得到的交轴电流进行单环限电流控制，为了控制逆变器按照功率因数输出功率，将交轴电流参考值设定为 0。

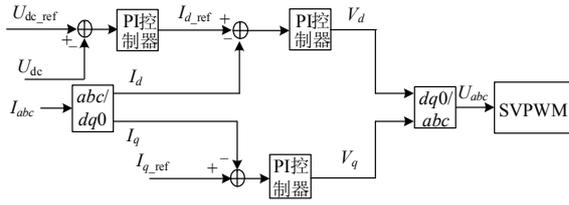


图 2 系统正常运行时逆变器控制结构图

Fig. 2 Control structure of inverter under the normal operation

2.2 网侧故障工况下的逆变器控制

网侧故障时的逆变器控制结构如图 3 所示。网侧故障时由于电压跌落，导致输出电流的升高，可能引起过电流，造成微电网脱网。因此需要对交流输出电流值进行限幅，以保护系统在电网跌落下不发生电流故障。

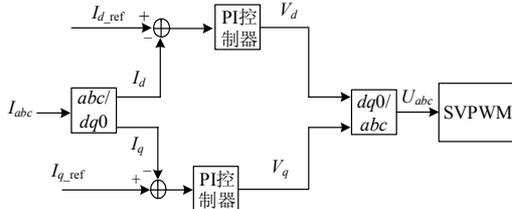


图 3 网侧故障时逆变器控制结构图

Fig. 3 Control structure of inverter under the voltage drop

根据网侧电流不能超过额定电流的 1.1 倍的规定，在网侧故障工况下逆变器输出视在功率应满足：

$$S = \frac{3}{2}UI \leq \sqrt{3}U_0 \times 1.1I_N \quad (4)$$

式中： U 为电网相电压幅值； I 为电网相电流幅值； U_0 为网侧线电压。

此时在网侧故障情况下若逆变器不改变控制策略，继续按照功率因数输出功率，则逆变器输出电流幅值 I_g 可根据式(3)得到

$$I_g = \frac{P_m}{\frac{3}{2}U} \quad (5)$$

式中， P_m 为光储系统并网功率。

在网侧电压跌落工况下，光储微电网应对系统提供一定的无功支持，改善电压跌落情况，提高光储微网的低电压穿越能力。由于微电网相关低电压穿越动态无功支撑能力标准还没有公布，参照光伏发电站接入电力系统技术规定 GB/T19964-2012 设定电力系统发生三相短路故障引起电压跌落时，光储微电网注入电网的动态无功电流标幺值需满足：

$$I_{q-ref} = 1.5 \times (0.9 - U_T) \quad 0.2 \leq U_T \leq 0.9 \quad (6)$$

$$I_{q-ref} = 1.05 \quad U_T < 0.2 \quad (7)$$

式中， U_T 为光储系统并网点电压标幺值。

需要注意的是微网内的负荷波动将导致输出有功电流的变化。若网侧故障期间微网内负荷需求功率较大，逆变器输出有功电流较小，此时依然以传统无功电流求解式(9)计算有功电流参考值将导致直流母线侧提供超额有功功率，导致储能电池不必要的放电提供能量，若储能电池放电完全后将导致直流母线电压降低，影响系统稳定。因此本文通过判断式(5)计算得到的 I_g 的大小来相应改变控制策略。

(1) 当光储微网系统向电网输送功率时，对于有功电流参考值 I_{d-ref}

若 $0 \leq I_g \leq \sqrt{(1.1)^2 - I_{q-ref}^2}$ ，则设定

$$I_{d-ref} = I_g \quad (8)$$

若 $I_g > \sqrt{(1.1)^2 - I_{q-ref}^2}$ ，则设定

$$I_{d-ref} = \sqrt{(1.1)^2 - I_{q-ref}^2} \quad (9)$$

(2) 当光储微网系统从电网吸收功率时，即 $I_g < 0$ 则立即断开与电网的连接，转为孤岛模式运行。

3 光伏 Boost 电路控制策略

对于 DC-DC 采取电压分层控制。本文采用的电压分层控制指的是系统根据直流电压的变化量将控制策略分为不同的控制层，在不同的控制层中合理调节变流器的工作方式以使系统在不同工况下都能稳定运行^[11]。电压分层方式如图 4 所示。本文采用了两层电压控制。为了避免电压波动导致控制策

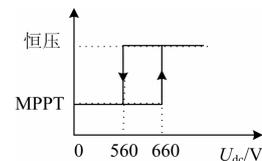


图 4 直流微网电压分层控制

Fig. 4 DC voltage layers for DC microgrid

略的频繁切换采用了电压滞环控制。第一层控制, 直流母线电压低于 560 V 时, 采用 MPPT 控制, 最大化地利用光伏能量。第二层控制, 直流母线电压高于 660 V 时放弃 MPPT 模式, 切换到恒压控制以防止过电压的产生。

3.1 第一层控制

直流母线电压低于 560 V, 此时控制系统工作在 MPPT 模式, 最大化的利用光伏能量。目前最常用的 MPPT 算法有扰动观测法、电导增量法、恒电压法, 由于扰动观测法算法简单且硬件容易实现, 所以应用广泛。扰动观测法的算法原理是: 在光伏阵列正常工作时, 以微小的电压波动不断扰动阵列的输出电压, 在电压变化的同时, 检测功率变化的方向, 从而确定寻优方向, 决定下一步电压参考值的大小^[12]。其控制流程图如图 5 所示。

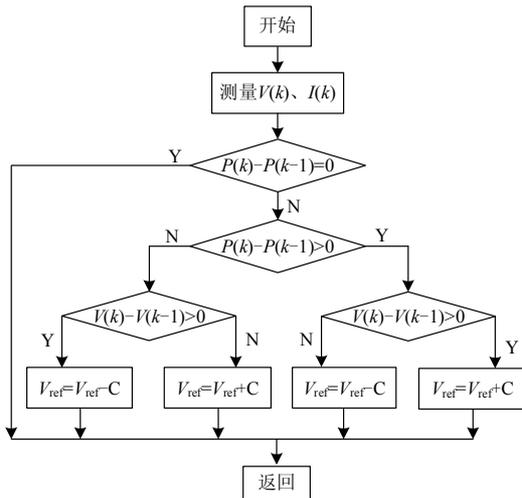


图 5 扰动观测法控制流程图

Fig. 5 Control flow chart of the disturbance observation method

3.2 第二层控制

直流母线电压高于 660 V 时, 此时系统工作继续工作 MPPT 模式将导致直流母线过电压的产生。因此需要控制单向 DC/DC 工作在恒压控制模式以维持直流母线电压的稳定。恒压控制结构图如图 6 所示。将直流母线电压给定值与实际值的差值作为 PI 的输入, 通过控制单向 DC-DC 的占空比维持直流母线电压的稳定, 减少光伏电池发出的能量。

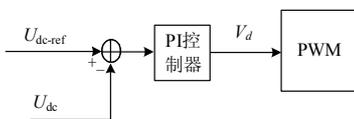


图 6 恒压控制结构图

Fig. 6 Constant voltage control structure

4 储能电池控制策略

逆变器采用单环限流控制后, 直流母线侧可能产生能量堆积并导致直流母线电压升高, 引起过电压。因此需要储能电池的协调控制以吸收多余的能量, 维持直流母线电压恒定。

4.1 未充满状态下

当储能出力未到功率限值时, 控制储能电池维持直流母线电压恒定。储能电池控制结构图如图 7 所示。外环为电压控制环, 控制直流母线电压, 将直流母线给定值与实际值的差值作为 PI 的输入。输出作为内环电流控制环的储能电流参考值, 与储能电流实际值的差值作为内环的输入。通过调节储能电池的充电功率维持直流电压的恒定。

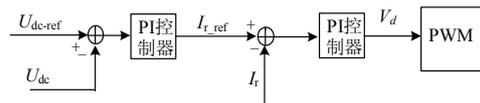


图 7 未充满状态下的储能控制

Fig. 7 Battery control under filling condition

4.2 满充状态下

当储能出力已达上限时, 通过给定储能充电电流参考值 I_{r-ref} , 对储能电池进行恒流充电, 避免储能电池过充。其控制结构图如图 8 所示。

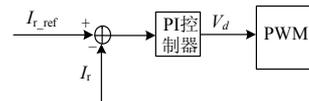


图 8 满充状态下的储能控制

Fig. 8 Battery control when filled

5 仿真验证

通过对系统正常运行、网侧电压跌落和网侧电压恢复三种工况下 LVRT 的仿真测试以验证所设计控制策略的可行性。本文假设光照强度不变。图 1 中光储微电网的系统参数如表 1 所示, 采用 Matlab/Simulink 对控制策略进行仿真分析。

算例 1: 负荷 1 在 0 s 时接入微网, 大电网在 0.05 s 前正常运行, 0.05 s 时发生故障电压跌落, 0.25 s 时负荷 2 接入微网, 0.45 s 后网侧电压恢复正常。对应仿真图形如图 9 所示。

从图 9(a)可以看出系统在 0.05~0.45 s 电压跌落模拟器动作, 网侧电压跌落, 跌落深度为 50%。

在图 9(b)中通过对比 0~0.05 s 和 0.45~0.5 s 两个系统正常运行时间段输出电流大小可以看出由于

表 1 光储微电网各部分组成参数
Table 1 Parameters of micro-grid system

组成部分	物理量	参数
光伏阵列	最大功率点电压(U_{pv})	480 V
	最大功率点电流(I_{pv_max})	36 A
锂电池组	最大充电电流($I_{r_max_ch}$)	15 A
	最大充电电压 (U_{r_max})	610 V
直流母线	额定电压(U_{dc})	600 V
交流母线	额定电压(U_g)	380 V
直流负载	负载 Z_1 额定功率(P_{load1}^*)	3 kW
	负载 Z_2 额定功率(P_{load2})	9 kW
	额定电压 (U_g^*)	600 V
	允许最大工作电压(U_{o_max})	660 V
	允许最小工作电压(U_{o_min})	560 V

只有负荷 1 并入光储微网, 在 0~0.05 s 系统正常运行期间, 逆变器输出电流较大。在 0.05~0.25 s, 网侧故障导致电压跌落, 逆变器输出电流迅速升高, 产生过电流。此时电流限幅控制动作, 限制输出电流在 $1.1I_N$ 的范围, 避免引起过电流导致设备损坏。在 0.25~0.45 s, 由于负荷 2 接入微网, 导致输出电流迅速减少, 输出电流不过流, 此时有功电流参考值 $I_{d-ref} = I_g$ 。

从图 9(c)和图 9(d)可以看出在 0.05~0.25 s 储能电池吸收功率不为 0, 表明由于电流限幅控制的作用使得输出有功功率降低, 直流母线由此产生的冗余能量被储能电池吸收。在 0.25~0.45 s 储能电池吸收功率为 0, 表明光伏系统在供给负荷消耗之后的剩余能量全部通过逆变器输送到电网中, 直流母线没有冗余的能量, 说明在此期间由于负荷需求能量较大, 逆变器输出电流并没有过电流。

图 9(e)给出了储能电池电压水平, 可以看出由于在 0.05~0.25 s 储能电池处于充电状态期间, 储能电池电压上升。

图 9(f)表明网侧电压跌落的情况下, 光伏系统具备向网侧输送无功功率的能力, 帮助网侧恢复电压。

从图 9(g)可以看出直流母线在网侧故障期间能够很好的维持稳定, 表明储能电池协调控制的有效性。

图 9(h)表明光伏阵列在本文控制策略的作用下在网侧跌落期间一直工作在最大功率跟踪模式, 充分利用了光伏能量。

算例 2: 负荷 1 在 0 s 时接入微网, 大电网在 0.05 s 前正常运行, 0.05 s 时发生故障电压跌落, 0.25 s 时负荷 1 断开, 0.45 s 后网侧电压恢复正常。对应仿真图形如图 10 所示。

从图 10(a)可以看出在 0.05~0.45 s 电压跌落期间微网内负荷变化并没有引起逆变器输出有功功率变化, 这是由于此期间电压跌落且负载较轻, 导致

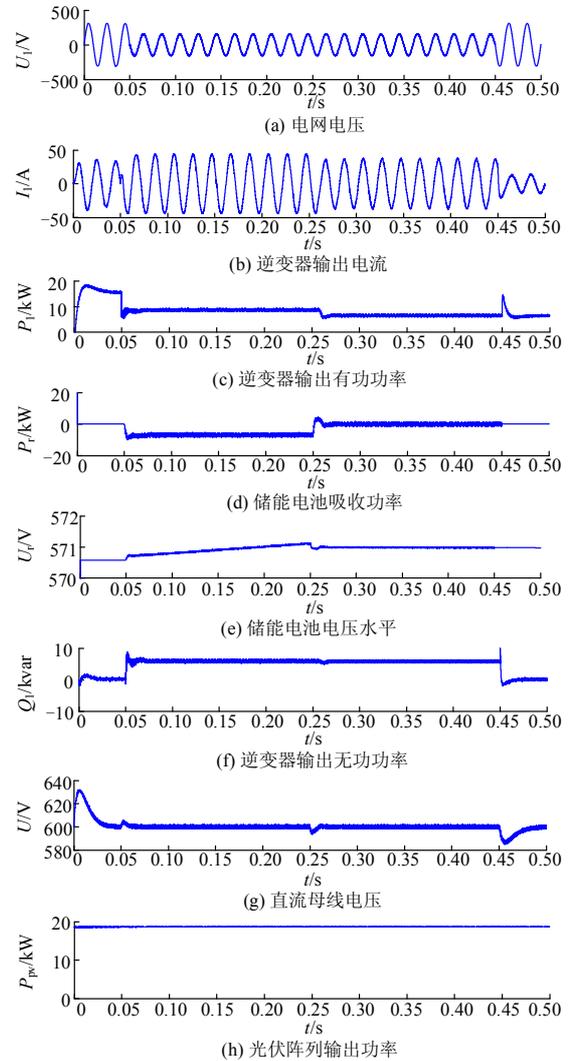


图 9 最大功率跟踪模式下的光储微网运行特性

Fig. 9 Operation results of photovoltaic/battery micro-grid system under MPPT control

输出电流较大, 触发逆变器一直工作在限流模式。

从图 10(b)可以看出储能电池在 0.25~0.45 s 的吸收功率大于 0.05~0.25 s 的吸收功率, 但在两个期间内储能电池吸收功率之差明显小于在 0.25 s 时切除微网的负荷 1 的功率。这是由于在 0.25 s 负荷 1 切除微网后, 储能电池已达到吸收功率上限, 不能完全吸收直流母线冗余能量。

图 10(c)给出了储能电池电压水平, 可以看出由于在 0.05~0.45 s 储能电池处于充电状态期间, 储能电池电压上升。

从图 10(d)可以看出逆变器输出无功功率同图 9(e)基本一致, 这是由于两种工况下电压跌落深度相同, 给定的动态无功电流参考值一致。

从图 10(e)可以看出在 0.25 s 时直流母线电压升

高, 攀升至 660 V 后电压开始下降并最终稳定在 600 V。这是由于负荷 1 在 0.25 s 切除微网, 储能电池吸收功率达到上限, 不能完全吸收因负荷 1 切除而产生的直流母线功率冗余, 导致直流母线电压攀升。0.33 s 上升到 660 V 后, 光伏 Boost 电路转为恒压控制,

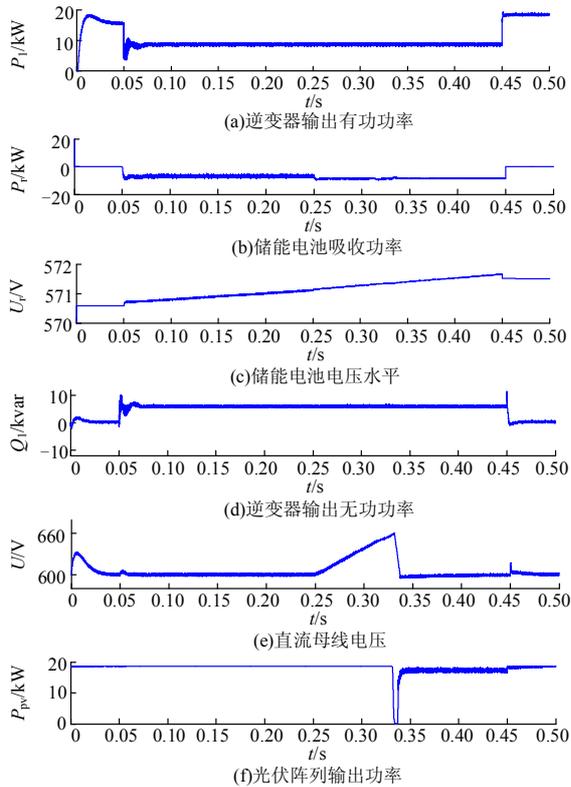


图 10 恒压模式下的光储微网运行特性

Fig. 10 Operation results of photovoltaic/battery micro-grid system under constant voltage control

减少光伏阵列出力, 使直流母线稳定在 600 V。例图表明光伏 Boost 电路恒压控制的正确性和有效性。

从图 10(f)可以看出在 0~0.334 s, 光伏系统处于最大功率跟踪模式。0.334~0.45 s 由于光伏 Boost 电路采用恒压控制, 光伏阵列出力较 0~0.334 s 有所降低。0.45 s 网侧电压恢复正常, 控制光伏系统重新工作于最大功率跟踪模式, 充分利用光伏能量。需要注意的是光伏阵列输出功率在 0.334~0.338 s 下降为 0, 这是由于 0.25~0.334 s 负荷 1 断开后储能出力达到上限, 但光伏阵列依然工作于最大功率跟踪模式, 导致直流母线侧在此期间冗余大量能量, 并引起直流母线电压的上升。在 0.334 s 时, 直流母线电压达到 660 V 后触发恒压控制, 通过降低光伏出力, 负荷需求功率改由直流母线冗余能量提供以消耗母线冗余能量, 维持直流母线电压恒定。0.338 s 直流

母线冗余能量消耗完全后, 光伏出力提升以供给负载需求功率。

6 结语

针对光储微电网系统低电压穿越能力的要求提出一种基于光储协调控制的 LVRT 策略, 在系统正常运行工况下, 光伏阵列工作在 MPPT 模式, 控制逆变器按照功率因数发出功率并维持直流母线电压稳定。在网侧故障工况下, 光伏阵列继续工作在 MPPT 模式, 逆变器控制采用单环限流控制, 利用储能电池吸收系统冗余的能量。当储能电池达到充满状态时, 停止对储能电池充电, 光伏阵列放弃 MPPT 控制, 转为恒压控制降低输出功率。充分利用了光伏能量, 并维持网侧故障工况下直流母线电压的恒定。考虑到光储微电网输出功率波动性大的特点, 设计了一种适用于光储微电网的具有无功补偿功能的限流控制策略, 避免网侧输出过电流, 为网侧提供电压支撑。通过算例仿真, 验证了控制策略的正确性与有效性, 为后续实验平台的建立奠定了基础。

参考文献

- [1] 徐少华, 李建林. 光储微网系统并网/孤岛运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 25-33.
XU Shaohua, LI Jianlin. Grid-connected/island operation control strategy for photovoltaic/battery micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 25-33.
- [2] 蔡国伟, 孔令国, 潘超, 等. 风光储联合发电系统的建模及并网控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 196-203.
CAI Guowei, KONG Lingguo, PAN Chao, et al. System modeling of wind-PV-ES hybrid power system and its control strategy for grid-connected[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 196-203.
- [3] 高志强, 孟良, 梁宾, 等. 光储联合发电系统控制策略[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(3): 300-306.
GAO Zhiqiang, MENG Liang, LIANG Bin, et al. Control strategies for a photovoltaic-energy storage hybrid system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(3): 300-306.
- [4] 吴杰, 孙伟, 颜秉超. 应用 STATCOM 提高风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 47-51.
WU Jie, SUN Wei, YAN Bingchao. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 47-51.

- [5] 毕天姝, 刘素梅, 薛安成, 等. 具有低电压穿越能力的双馈风电机组故障暂态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 26-31.
BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault analysis of doubly fed induction generator wind turbines with low-voltage ride-through capability[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 26-31.
- [6] 梁海峰, 冯燕闯, 刘子兴, 等. 基于无差拍控制的光伏电站低电压穿越技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 110-115.
LIANG Haifeng, FENG Yanchuang, LIU Zixing, et al. Research on low voltage ride through of photovoltaic plant based on deadbeat control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 110-115.
- [7] 张浙波, 刘建政, 梅红明. 两级式三相光伏并网发电系统无功补偿特性[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 242-246.
ZHANG Zhebo, LIU Jianzheng, MEI Hongming. Study of reactive power compensation characteristics on a three-phase double-stage grid-connected photovoltaic power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 242-246.
- [8] 郑飞, 张军军, 丁明昌. 基于 RTDS 的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 19-24.
ZHENG Fei, ZHANG Junjun, DING Mingchang. Low voltage ride-through modeling and control strategy for photovoltaic generation system based on RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 19-24.
- [9] 党克, 胡金, 严干贵. 光伏逆变器低电压穿越控制策略的研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(11): 22-24.
DANG Ke, HU Jin, YAN Gangui. Research on low voltage ride through control strategy of photovoltaic inverter[J]. Power Electronics, 2013, 47(11): 22-24.
- [10] 袁建华. 分布式光伏发电微电网供能系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
YUAN Jianhua. Research on micro-grid based on distributed photovoltaic generation systems[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [11] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 16-24.
WANG Yi, ZHANG Lirong, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 16-24.
- [12] 李和明, 董淑惠, 王毅, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.
LI Heming, DONG Shuhui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81.

收稿日期: 2014-05-05; 修回日期: 2014-06-17

作者简介:

范柱烽(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为光储微电网综合控制; E-mail: 543114109@qq.com

毕大强(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术在电力系统中的应用;

任先文(1954-), 男, 硕士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、微机在电力系统中的应用。