

光伏减载驱动新能源同步机参与电力系统调频的研究*

付文启¹, 杨鑫¹, 管飞¹, 谷昱君¹, 黄永章^{1,2}

[1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 华电(烟台)功率半导体技术研究院有限公司, 山东 烟台 264000]

摘要: 大规模新能源发电并网降低了系统惯性和一次调频能力。新能源同步机(MGP)可以提供无延时的、真实的旋转惯量。介绍了新能源经 MGP 并网的系统结构和惯量水平, 计算了 MGP 对初始频率变化率(ROCOF)的抑制作用。然后基于光伏(PV)驱动 MGP 并网的直流电压反馈控制策略, 提出了一种定减载率控制算法, 并引入频率反馈环, 形成 PV 调用有功储备驱动 MGP 参与电力系统调频的综合控制策略。通过 3 机 9 节点仿真系统对减载控制算法进行验证, 并进一步对比了源、网两端功率波动下 PV 采用不同方式并网参与系统一次调频的效果。结果表明, 在综合控制策略下 PV 经 MGP 并网能为系统提供更强的频率支撑。

关键词: 新能源电网; 新能源同步机; 一次调频; 减载控制

中图分类号: TM 341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)05-0079-07

doi: 10.12177/emca.2020.239

Research on Photovoltaic Driving Motor-Generator Pair to Participate in Frequency Regulation Under Load Shedding Control*

FU Wenqi¹, YANG Xin¹, GUAN Fei¹, GU Yujun¹, HUANG Yongzhang^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. NCEPU (Yantai) Power Semiconductor Technology Research Institute Co., Ltd., Yantai 264000, China]

Abstract: The integration of large-scale renewable energy source reduces the rotational inertia and primary frequency regulation capability of power systems. Motor-generator pair (MGP) system can provide the real rotational inertia without delay. The system structure and inertia level of a renewable energy integration MGP are introduced. The damp effect of MGP on the initial rate of change of frequency (ROCOF) is calculated. Based on the DC voltage feedback control strategy of MGP driven by photovoltaic (PV) integration, a constant load shedding control algorithm is proposed. A frequency feedback loop is introduced, and then the integrated control strategy of MGP driven by PV participating in power system frequency regulation is formed. Finally, through a 3-bus-9-node simulation system, the load shedding control algorithm is verified. The system primary frequency regulation effect of PV integration by different methods is compared in the conditions of the power fluctuating of source side and grid side. The result shows that under the integrated control strategy, PV integration driving MGP can supply stronger frequency support to the system.

Key words: new energy grid; motor-generator pair; primary frequency regulation; load shedding control

收稿日期: 2020-12-17; 收到修改稿日期: 2021-03-14

* 基金项目: 贵州电网公司科技项目(067600KK52180007)

作者简介: 付文启(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统稳定与控制。

0 引言

随着新能源机组发电量的不断上升,同步电机电源数量急剧下降,电网呈现空心化态势^[1]。由于电力电子换流器是新能源机组与大电网的能量交互节点,受限于换流器的物理特性,新能源机组无法为系统提供足够的惯性,且通常运行在最大功率点跟踪(MPPT)模式,不参与电力系统调频。因此,新能源装机容量的扩大持续降低了电网的频率稳定性^[2-3]。

传统的同步机组参与电力系统调频可以划分为2个阶段:(1)基于电磁耦合特性的发电机组释放转子转动惯量的自发性惯性响应阶段,该阶段出现的频率变化率(ROCOF)最大值,是频率保护装置动作的指标之一^[4],因此具备足够无延时的、真实的转动惯量是系统稳定运行的必备条件;(2)基于能量守恒定律的发电机组增发有功功率的主动性功率响应阶段,该阶段中的频率最低点(NF),同样是频率保护装置动作的指标之一^[5],因此系统具备足够的功率备用容量和快速的功率响应能力是降低频率偏差幅值、进而增强电网频率支撑能力的关键因素。

目前研究主要通过对电力电子换流器控制进行改造来“补充”光伏(PV)系统惯量,采用减载控制^[6]或配置储能^[7]与虚拟惯量相结合^[8]的方法。虽然是借鉴同步电机的惯性响应理论,但是虚拟惯量不同于真实旋转惯量,并非基于电磁耦合特性的自发响应,而是基于检测偏差信号进行反馈控制的主动功率响应,响应存在计算时延^[9],即使采用虚拟同步发电机控制能消除计算时延,受制于电力电子换流器的开关频率物理限制,其模拟的惯性响应依旧存在数十毫秒的时延,无法对ROCOF最大值起到有效的抑制作用,因而并未满足系统的真正需求。为此,文献[10]根据同步电机理论,提出了新能源驱动新能源同步电机(MGP)并网的新型并网方式,使MGP成为电网与新能源机组的能量交互节点,利用同步电机的优良属性提升新能源电网安全稳定运行的能力。文献[11]提出了MGP的源-网相位控制策略,并通过仿真和试验验证了MGP可以追踪电网功率,安全有效并网。文献[12]证明MGP能提供比同容量火电机组更多的阻尼,增强新能源电网的功

角稳定性和频率稳定性。文献[13]证明MGP系统具备无延时的、真实的转动惯量,能够为PV机组提供惯性支持,并且其惯性响应能力比同质量块的同容量火电机组更强。因此,PV驱动新能源并网是一种解决高比例新能源电网惯量不足的有效办法。

PV驱动MGP并网能增强电网的真实惯性,从而有效减小ROCOF的幅值。与此同时,若PV机组能预留一定减载储备,并凭借电力电子换流器的快频响应能力参与系统调频,则可提高频率调节第2阶段的NF,进一步增强电力系统的频率调节能力。在减载控制方面,文献[14]在仿真中通过控制直流参考电压高于最大功率点电压的方式实现PV减载运行,但由于控制简单,存在误差较大的问题。文献[15]考虑温度和光照强度的影响,采用拟合二次多项式方法估算最大功率,据此控制PV变减载运行,但由于需要进行二次拟合,结果依然存在实际减载率与给定减载率误差较大的问题。

综上,本文基于MGP的直流电压反馈控制策略,提出了一种PV定减载率算法用于控制PV出力,并引入频率反馈环,形成了MGP综合控制策略,从而能调用PV减载有功储备配合转动惯量参与电力系统调频。在电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC的3机9节点仿真模型中对该综合控制策略的有效性进行了验证。

1 MGP系统结构与惯性作用

1.1 MGP系统

MGP系统的结构如图1所示。MGP系统由2台相同容量的同步电机组成,由于同轴相连,2台电机始终保持在同转速、同转向的运行状态。MGP系统工作方式:新能源发电(PV、风电)经电力电子换流器驱动MGP系统的同步电动机(SM),再由同步电动机带动同步发电机(SG)发电并网。



图1 新能源经MGP并网的系统结构

MGP的主体为2台同步电机,能够为新能源

电网提供真实的旋转惯性。可以通过定义相同容量下 MGP 机组与火电机组的转动惯量之比 η 对比 MGP 的惯性:

$$\eta = \frac{(m_{SG} + m_{SM} + 2m_{exciter})r^2}{(m_G + m_{exciter} + m_{LP} + m_{HP})R^2} \quad (1)$$

式中: m_{SG} 和 m_{SM} 为 MGP 中 SG 和 SM 的转子质量; $m_{exciter}$ 为励磁机质量; r 为 MGP 转子截面半径; m_G 为火电机组同步发电机电机质量; m_{LP} 和 m_{HP} 为火电机组低压缸和高压缸质量; R 为火电机组同步发电机的转子截面半径。

假设 MGP 与火电机组的转子截面半径相同, 参考文献[13], 对比同容量下的 MGP 与火电机组的转子总质量, 可得转动惯量比 η 约为 0.66。

1.2 MGP 的真实惯量水平提升作用

电力系统发生功率扰动后, 电网功频动态过程的最初阶段为惯性响应阶段。MGP 无延时的、真实的惯性作用可以降低电网频率的变化速率, 延缓频率抵达最低点的时间, 间接减小最大频率偏差, 并为一次调频动作争取时间。

对于新能源占比为 k 的电网, 由于其模拟的惯性响应存在时延, 假设其对初始时刻频率变化的抑制不作贡献, 则初始时刻的 ROCOF 表达式为

$$\frac{df}{dt_{0+}} = f_N \frac{\Delta P}{(1-k)MS_B} \quad (2)$$

式中: f_N 为额定频率; ΔP 为功率不平衡量; M 为系统等效惯性时间常数; S_B 为系统额定容量。

由式(2)可知, 随着新能源渗透率的不断加大, 相同功率缺额下电网的初始 ROCOF 不断恶化。若新能源中有占比为 R 的机组经 MGP 并网, 则式(2)变换为

$$\frac{df}{dt_{0+}} = f_N \frac{\Delta P}{[1-k(1-R\eta)]MS_B} \quad (3)$$

由式(3)可知, 新能源经 MGP 并网提升了电网的真实惯量水平, 因而可以减小初始 ROCOF, 进一步提高新能源电网的最大渗透率。

2 减载控制算法

2.1 直流电压反馈控制策略

由 2 台电机组成的 MGP 系统, 其功角特性会呈现新的特点。在 MGP 并网运行后, 同步电动机

和同步发电机将产生 2 个功角 δ_M 和 δ_G , MGP 传输有功功率与 2 台电机功角密切相关。当新能源端输出有功功率发生变化时, 相应地改变 MGP 两端电压的相位差, 就能实现 MGP 对新能源端输出功率的跟踪。

当新能源端为 PV 系统时, 由 PV 特性可知, 控制 PV 阵列直流母线电容电压就能控制 PV 输出有功功率变化, 并根据文献[11], 可得图 2 所示的基于 PV 系统的 MGP 直流电压反馈控制策略。控制实现步骤为: (1) 给 PV 阵列设定一个直流母线电容电压参考值 U_{ref} , 以此来控制 PV 输出参考对应的有功功率; (2) 采集实际直流电压 U_{dc} , 将二者差值经 PI 调节得到换流器的相位偏差信号作为频率调节信号, 通过脉宽调制 (PWM) 来控制 MGP 输出的有功功率。

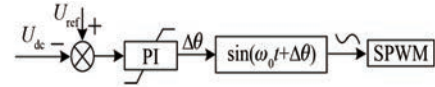


图 2 直流电压反馈控制策略

2.2 减载运行算法

在实际运行过程中, PV 系统受到环境温度和光照强度不断变化的影响, 输出有功功率呈现波动性特点。在 PV 运行曲线随机变动情况下, 保证减载率始终维持在某一数值, 是定减载控制策略的实现目标。

PV 系统的减载率表达式可定义为

$$d = k_G \frac{\Delta f}{f_N} \times 10\% \quad (4)$$

式中: k_G 为功频静态特性系数; Δf 为电网频率偏差; f_N 为电网额定频率。

电力系统中频率变化的允许范围通常为 ± 0.2 Hz, k_G 取 50, 则可计算得 d 为 20%, 即 PV 系统输出有功功率为额定功率的 80%。

由 MGP 直流电压反馈控制策略可知, 给定 PV 直流母线电容电压, 就能控制 PV 系统输出功率, 由此将减载算法的控制目标转化为对 PV 直流母线电容电压 U_{ref} 的控制。

本文采用文献[16]中的 PV 电池模型, 并以该 PV 电池为单位搭建了模拟 PV 电站的 PV 阵列模型, 其关键参数如表 1 所示。

以该 PV 阵列为例, 不同光照强度和温度下的 PV P - U 曲线如图 3 所示。

表 1 PV 阵列模型参数

参数名称	参数值
PV 阵列最大电压/kV	18.26
PV 阵列最大电流/kA	20.49
PV 系统容量/MW	425

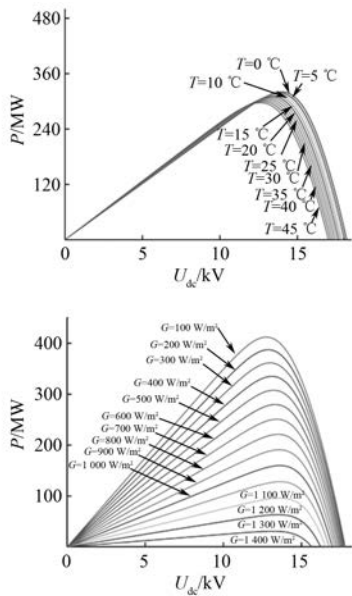


图 3 不同温度和光照强度对应的 P-U 曲线

由于环境温度和光照强度对 PV 输出功率的影响是解耦的,可以分别求解不同光照强度和温度在对应减载率下 PV 直流电压的离线表达式,最后再将两式的乘积作为定减载率下的直流参考电压拟合表达式。

分析光照强度的影响,设定环境温度恒定为 25 °C,以每秒上升 100 W/m² 为间隔,记录 100 ~ 1 400 W/m² 区间的 PV 阵列在 20% 减载率下对应的 PV 直流电压 U_{dc} ,如图 4 所示。

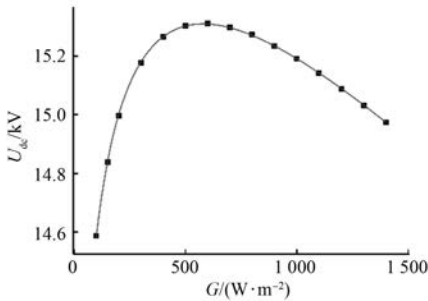


图 4 不同光照强度对应的 U_{dc}

根据图 4 拟合曲线,可设光照强度与直流电

压的拟合表达式为

$$U_{dc} = a_0 G^{0.4} + b_0 G^{0.3} + c_0 \tag{5}$$

式中: G 为光照强度; a_0 、 b_0 和 c_0 为拟合系数。

代入表达式求得各项拟合系数: $a_0 = -1.380\ 1$, $b_0 = -3.476\ 6$, $c_0 = 9.449\ 8$, 残差平方和、 R 判定系数、调整 R 系数分别为 0.000 6、0.999 9、0.999 8。

分析光照强度的影响,设定光照强度恒定为 1 000 W/m²,在 PV 阵列中以每 5 °C 为间隔,记录 0~45 °C 区间的 PV 阵列在 20% 减载率下对应的 PV 直流电压 U_{dc} ,如图 5 所示。

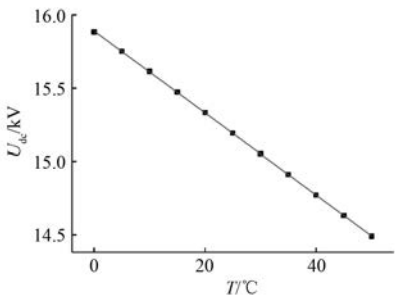


图 5 不同温度对应的 U_{dc}

根据图 5 拟合曲线,设拟合表达式为

$$U_{dT} = a_1 T + b_1 \tag{6}$$

式中: T 为环境温度; a_1 和 b_1 为拟合系数。

代入表达式求得各项拟合系数: $a_1 = -0.028\ 0$, $b_1 = 15.889\ 8$,残差平方和、 R 判定系数、调整 R 系数分别为 0.185 4、0.999 8、0.999 6。

最后联立式(5)和式(6)可得不同光照强度和温度对应于 20% 减载率下 PV 直流母线电容电压的拟合函数表达式为

$$U_{ref}^* = \frac{0.038\ 6TG^{0.4} - 0.097\ 3GT^{0.3} - 0.264T}{15.191\ 1} + \frac{-21.929G^{0.4} + 55.242G^{0.3} + 150.155}{15.191\ 1} \tag{7}$$

随机选取 6 个温度和光照强度,与该 PV 阵列的实际最大功率进行比较,结果如表 2 所示。

由表 2 可以得出,本文选取的拟合函数表达式计算得到的 PV 曲线减载 20% 情况下的 U_{ref} ,其对应的输出功率与目标减载输出功率间的差值最大不超过 0.5 MW,说明选取的曲线拟合表达式能较为准确地估算出该 PV 阵列减载率为 20% 时对应的直流母线电压参考值。

表 2 估算结果对应的实际减载率

温度/ 光照强度/ ℃ (W·m ⁻²)	实际最大功率/ MW	估算 U_{ref} 对应功率/MW	估算减载率 $d/\%$
42 828	251.36	200.66	20.2
41 1 112	328.75	263.23	19.9
38 1 266	369.80	296.33	19.9
32 1 289	379.63	304.03	19.9
28 1 356	399.05	319.32	20.0
18 1 444	428.00	341.79	20.1

3 频率反馈控制环的引入

电网处在功率不平衡状态时,减载运行下的 PV 系统可以释放有功储备,配合 MGP 的惯性响应参与电力系统调频。参考常规发电机组的功-频静态特性曲线与 MGP 的直流电压反馈控制策略,只要建立电网频率变化量与 PV 直流母线参考电压之间的耦合关系,PV 系统的输出功率就能响应电网的频率变化,由此可得频率反馈控制系数的表达式:

$$k_f = \frac{\Delta U_{dc} f_N}{\Delta f} \tag{8}$$

式中: Δf 为电网频率偏差量; ΔU_{dc} 为直流母线电压参考值改变量; f_N 为额定频率。

MGP 的频率反馈控制框图如图 6 所示。为使 PV 板一直处在稳定运行范围内,需要对最终输出到 SPWM 控制中的电压信号进行限幅处理。

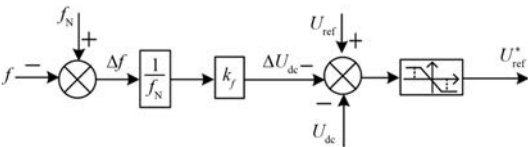


图 6 频率反馈控制框图

在基于 PV 系统驱动 MGP 并网的直流电压反馈控制策略基础上引入减载控制和频率反馈控制,可得图 7 所示的 MGP 综合控制策略。

由综合控制策略的控制逻辑可知,正常运行状态时,PV 系统跟随环境温度和光照强度变化驱动 MGP 输出额定减载下的有功功率,当电网频率波动时,MGP 触发无延时惯性响应,与此同时频率反馈控制动作,根据频率变化量修改直流母线电压参考值,释放减载储备响应电网频率变化,配

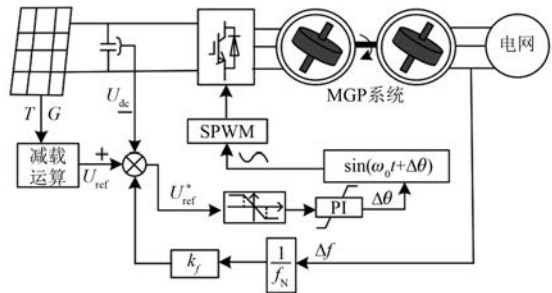


图 7 MGP 的综合控制策略

合 MGP 的惯性响应参与电力系统调频。

4 仿真算例分析

为验证本文所提综合控制策略的有效性,在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建了图 8 所示的 3 机 9 节点系统进行算例验证。系统中 PV 渗透率约为 44%,火机组 G1/G2/G3 共出力 260 MW,惯性时间常数 H 取 10 s,PV 机组出力 200 MW,MGP 惯性时间常数 H_{MGP} 取 6.6 s。仿真中,在母线 4 节点可以切换 PV 并网和 PV 经 MGP 并网 2 种方式。仿真分为 2 部分:第 1 部分验证减载运行算法,第 2 部分对比 PV 经采用综合控制策略的 MGP 并网和 PV 直接并网在源、网两端功率波动下的系统频率稳定能力。

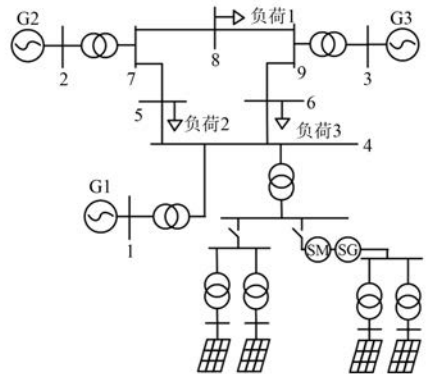


图 8 3 机 9 节点系统

4.1 减载运行算法验证

在图 8 所示 3 机 9 节点系统中 BUS4 切换到 PV 经 MGP 并网,设置的仿真场景中温度、光照强度变化曲线如图 9 (a)、图 9(b)所示,测量的 PV 系统直流电容电压和 MGP 输出功率的变化情况如图 9(c)、图 9(d)所示。

对比图 9 设定光照强度变化曲线和温度变化曲线可知,直流电压反馈控制能较为迅速准确地

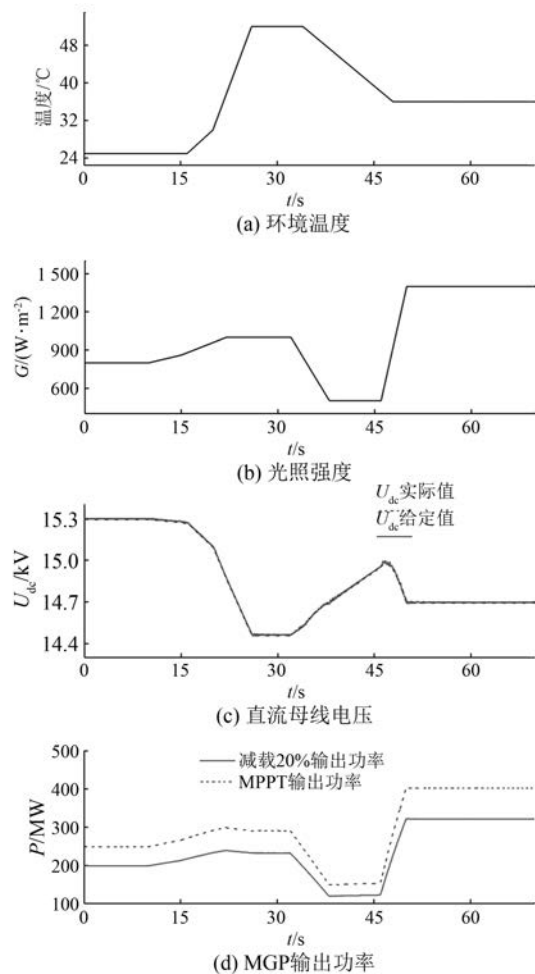


图9 减载算法的验证结果

追踪拟合曲线得出给定直流电压值的结果, MGP 输出功率曲线表明 MGP 能按给定减载率输出有功功率, 实现在环境光照强度和温度变化情况下 PV 系统的定减载运行。

4.2 不同并网方式的调频能力对比

综合控制策略下的 PV 经 MGP 并网, PV 本身出力随机波动或电网出现功率不匹配时, MGP 均能释放无延时惯性响应。在电网频率变化时, MGP 还能调用 PV 有功储备参与电力系统一次调频。相比之下, 由于 PV 直接并网不参与电网调频, 电网频率稳定性会随 PV 渗透率增加而变差。

4.2.1 负荷突变

为对比不同并网方式对系统频率稳定的影响, 忽略 MGP 的内部损耗, 在仿真系统中设置 BUS6 在 50 s 时负荷突增/减 40 MW, 观测系统响应情况, 仿真结果如图 10 与图 11 所示。

由图 10 和图 11 可知, PV 经 MGP 并网可以

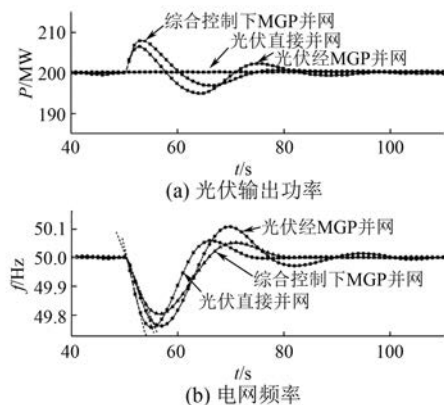


图10 负荷突增下的电网响应情况

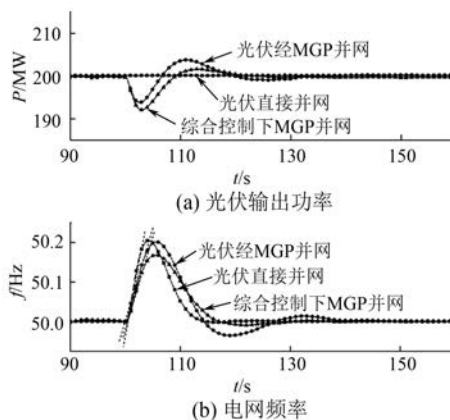


图11 负荷突降下的电网响应情况

为系统提供惯性响应, 采用综合控制后还能调用 PV 减载储备参与系统调频。对比电网频率改善情况可知, PV 采用 MGP 并网可以减小系统的初始 ROCOF, 进而延迟频率偏差最大点到来, 并间接减小最大频率偏差。在采用综合控制策略后, 由于存在控制时延, 系统初始 ROCOF 并未得到明显改善, 但 PV 减载储备触发的功率响应能参与系统一次调频, 较大幅度地减小了系统频率偏差, 进一步提升电网的频率支撑能力。

4.2.2 PV 随机波动

在 PV 实际运行中, 光照强度和温度变化会导致出力水平改变。为探究 PV 出力随机波动对系统频率变化的影响, 在仿真系统中设置光照强度随机变动, 观察电力系统的频率变化情况, 光照强度变化曲线和系统响应情况如图 12 所示。

由图 12 可知, 在光照强度随机波动的情况下, PV 出力也会不断变动。在 PV 经 MGP 并网的情况下, MGP 的惯性响应会对 PV 输出功率的

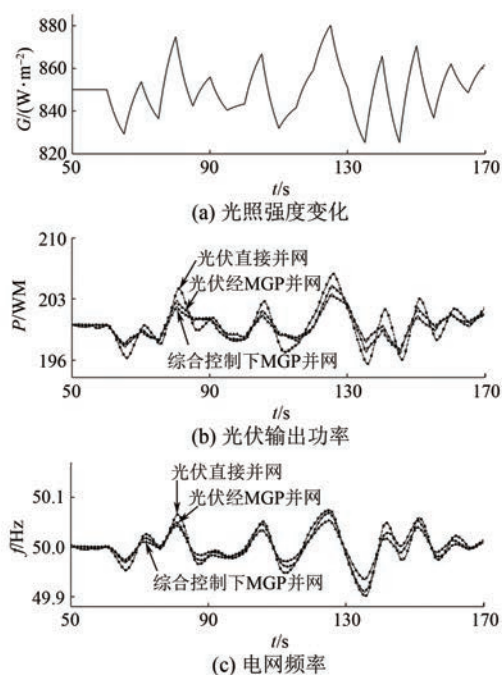


图12 PV出力波动下的电网响应情况

变化起“削峰填谷”的作用,使得电网频率波动明显减小。而MGP采用综合控制策略后,PV功率响应的动作可以进一步减小PV出力波动的幅度,增强系统的频率稳定性。

5 结 语

本文提出了一种考虑PV出力波动性的PV系统定减载率驱动MGP并网的综合控制策略,该控制策略可根据光照强度和温度变化调整PV系统的直流母线电压,保持减载率始终处于特定值。在MGP的直流电压反馈控制中引入频率反馈环,当电网频率波动时,PV系统可以因此释放减载备用容量参与一次调频。最后在3机9节点仿真系统中验证了在源、网两端发生功率波动情况下,PV经采用综合控制策略的MGP并网均能为系统提供更强有力的频率支撑。

【参考文献】

[1] 陈国平,董昱,梁志峰. 能源转型中的中国特色

新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493.

[2] EKANAYAKE J, JENKINS N. Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network

frequency [J]. IEEE Transactions on Energy conversion, 2004, 19(4): 800.

[3] 霍现旭,陈培育,徐科,等. 限制转子电流的双馈风电机组虚拟同步控制策略[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(9): 83.

[4] 王波,张保会,郝治国. 基于功率监测和频率变化率的孤岛微电网紧急切负荷控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 33.

[5] 王路平,谢小荣,刘颖,等. 多直流馈入受端电网短期频率稳定性的实时协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2205.

[6] 姜莹,边晓燕,李东东,等. 基于可变减载率超速控制的双馈异步风机参与微电网调频研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(9): 118.

[7] 王晓东,李凯凯,刘颖明,等. 基于状态观测器的风电机组单机储能系统虚拟惯量控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1257.

[8] 徐力,王刚,侍乔明,等. 直驱永磁风力发电机组的通用平均模型及在虚拟惯量控制中的应用[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(6): 54.

[9] 王济崧,陈明亮. 虚拟惯量配合变桨控制的风机一次调频实验研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 18.

[10] WEI S, ZHOU Y, LI S, et al. A possible configuration with motor-generator pair for renewable energy integration [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(1): 93.

[11] 周莹坤,卫思明,许国瑞,等. 电机串联新能源并网系统的控制方法及其运行模式[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊2): 159.

[12] 武倩羽,黄永章,周莹坤,等. 新能源同步机并网系统的阻尼特性[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 80.

[13] 周莹坤,许国瑞,黄永章. MGP系统为新能源电网提供惯性的实验研究[J]. 大电机技术, 2018(6): 12.

[14] 李旭涛,贾祺,项丽,等. 双级式光伏发电主动参与电网频率调节[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 100.

[15] 徐放,钟诚,王昱博. 基于实时最大功率估计的光伏系统参与电网调频的控制策略[J]. 广东电力, 2019, 32(6): 1.

[16] LIU S, DOUGAL R A. Dynamic multi-physics model for solar array [J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(5): 66.