

适用于微电网的 MGP 协调运行方法及装置研究

侯健生¹, 陈新斌¹, 王赢聪¹, 李晨阳^{2*}, 王岳³, 王哲凡³, 赵海森³

(1. 国网浙江省电力有限公司金华供电公司, 浙江 金华 321017;

2. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

3. 华北电力大学 电气与工程学院, 北京 102206)

Research on the Coordinated Operation Method and Devices of MGP Suitable for Microgrid

HOU Jiansheng¹, CHEN Xinbin¹, WANG Yingcong¹, LI Chenyang^{2*}, WANG Yue³,
WANG Zhefan³, ZHAO Haisen³

(1. Jinhua Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jinhua 321017, China;

2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Beijing 102206, China)

Abstract: In response to the challenges posed by the weak support of power electronics based renewable energy systems and the resulting decrease in the stability of high-proportion renewable energy power grids, the grid integration technology for synchronous motor-generator pair (MGP) is proposed, which enables renewable energy units to integrate into the grid via a real synchronous machine interface and actively provide frequency and voltage support to the grids. While some theoretical and experimental research has been conducted on MGP system, there remains a lack of actual operation experience and complete equipment. Addressing the operational issues of MGP systems integrated into actual microgrids, based on a practical MGP application case, investigates the coordinated operation methods and hardware for MGP. A coordinated control method in microgrids for MGP system is proposed, which can achieve control of power transmission and stable grid integration of MGP. Furthermore, a 10 kW integrated MGP grid integration device is developed, and through experiments, feasibility of the developed device is validated.

Key words: high proportion of renewable energy grid; photovoltaic integration; synchronous motor-generator

pair; grid stability; grid integration device

摘要: 针对新能源电力电子并网方式的弱支撑性造成的高比例新能源电网稳定性下降等问题,提出了同步电动机-发电机对(MGP)的并网技术,使得新能源机组以真实的同步机接口并网,并能主动为电网提供频率和电压支撑。尽管目前针对 MGP 已进行了一些理论和试验研究,但仍缺乏现场运行经验和成套装置。针对 MGP 系统接入实际微电网的运行问题,基于一个实际的 MGP 开发应用案例,针对特定的微网结构和运行模式,研究了 MGP 接入该微电网的协调运行方式和硬件装置,提出了 MGP 系统在微网中的协调控制方法,实现了对 MGP 传输功率的控制和稳定并网运行。此外,还开发了一套额定容量为 10 kW 的一体化 MGP 并网装置,通过试验验证了所研发的 MGP 并网装置的可行性。

关键词: 高比例新能源电网; 光伏并网; 同步电动机-发电机对; 电网稳定性; 并网装置

0 引言

随着“双碳”战略目标的实施,新能源发电占比逐渐提高,高比例电力电子设备为电力系统带来了新的挑战,如低惯量、欠阻尼、电压稳定问题突出与无功支撑能力不足等^[1-2]。

新能源并网逆变器可分为电流源和电压源模式。常规并网逆变器等效为电流源,通过锁相环

基金项目: 微网集群省地县三级协同控制示范工程

Microgrid Cluster Provincial, Prefecture and County
Three-Level Collaborative Control Demonstration Project

(Phase-Locked Loop, PLL) 与电网电压保持同步^[3]。当电网强度较低或电压波动时, 常规并网逆变器的稳定裕度降低, 甚至出现一系列稳定性问题, 如产生谐振等负面影响^[4]。针对电流源型逆变器在弱电网和大扰动下的失稳问题, 有学者提出了逆变器的电压源控制模式, 如下垂控制^[5]和虚拟同步发电机^[6] (Virtual Synchronous Generator, VSG) 控制。电压源型逆变器不依赖 PLL 跟随电网相位, 在弱电网下也可以保持良好的稳定性^[7]。但该控制仍有缺点, 在大扰动情况下会出现更复杂的同步暂态失稳现象^[8], 同时与储能装置之间的协调控制较为复杂。文献[9]提出了一种双模式并网逆变器控制策略, 根据电网强度自动在电压源控制和电流源控制间进行切换, 对于单台逆变器的电网阻抗适应性与稳定性有所提升, 但逆变器在控制模式自动切换时, 容易对负载和电网造成冲击, 对电网的稳定性仍然存在不利影响^[10]。

上述解决方案均从新能源并网逆变器的控制改进着手, 但仅通过控制方式的改进本质上无法避免并网逆变器自身存在的控制复杂、过电压/电流耐受能力差及响应延时等不足。为使新能源以同步机接口并网, 并真正具备部分传统机组的优良属性, 有学者提出了一种基于同步电动机-发电机对 (Motor-Generator Pair, MGP) 的并网技术^[11], 也称新能源同步机。MGP 对高比例新能源电网稳定性的提升作用已开展了一定研究。文献[12]对 MGP 应用于高比例新能源电力系统的小信号稳定性进行研究, 并通过实验证明 MGP 较传统同步发电机具有更强的小干扰稳定性。文献[13]通过实验证明 MGP 相比同步发电机有更高的阻尼水平, 并能更好抑制系统频率波动, 为系统提供足够的真实惯性响应。文献[14]通过仿真和实验研究了 MGP 系统对光伏并网低电压穿越能力的提升作用, 证明了 MGP 相比于逆变器直接并网能够提供更有用的电压/无功支撑。文献[15]通过仿真对比 MGP 并网与电压源型逆变器并网两种方式, 证明了在考虑逆变器电流限制和同步机的原动机响应延时的情况下, MGP 相比于常规同步发电机和 VSG 能够更有效地提高电网的暂态频率稳定性。针对光伏等新能源接入 MGP 并网的控制方法, 相关学者也开展了研究。

文献[16]提出了一种基于有功功率反馈的控制方式, 通过以发电机的并网功率为目标调节电动机定子电压频率, 实现了 MGP 系统传输指定的功率; 文献[17]提出了一种基于直流电压反馈的控制方法, 通过以光伏直流电压为目标实现将光伏功率并入电网; 进一步, 文献[18]通过结合直流电压反馈控制和光伏功率备用提出了 MGP 参与一次频率调节的控制方法, 所提控制提高了电网的频率稳定性。但上述控制方法均针对单机并网系统, 未充分考虑到实际运行中与新能源和电网的协调互动。

从 MGP 的研究背景可以看出, 目前尚未有关于该技术的示范应用, 相关运行控制技术的研究也缺少面向工程化的应用, 仅局限于实验室样机。因此亟需研究适用于实际微电网中的 MGP 运行控制方法, 开发相应的并网装置。本文通过一个实际微电网的案例, 分析了适用于新能源同步机接入的协调控制方法, 并以此为基础开发了额定容量 10 kW 的 MGP 一体化并网装置。

1 MGP 的运行原理

1.1 MGP 系统结构

MGP 系统由两台同步电机的转子同轴连接而构成的。新能源机组经过逆变器驱动同步电动机旋转, 机械轴带动同步发电机并网发电。MGP 系统并网的结构如图 1 所示。

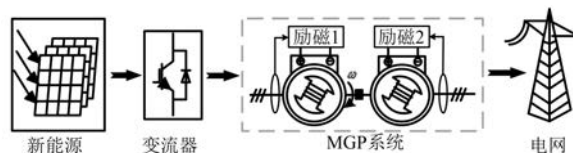


图 1 MGP 系统的并网结构

Fig. 1 Grid integration structure of MGP

稳态时, 不考虑轴系扭转刚度, 两个转子以相同的速度旋转, 通过控制 MGP 系统的功角调节并网的输出功率。

1.2 MGP 功角特性

MGP 系统由两台同步电机构成, MGP 系统的功角特性如图 2 所示。

图 2 中: E_G 为同步发电机内电势; E_M 为同步电动机内电势; U_M 为逆变器出口侧电压; U_G 为电网电压; δ_M 为 E_M 和 U_M 的相位差, 即电动机功角; δ_G 为 E_G 和 U_G 的相位差, 即发电机功角;

δ_{MG} 为 U_M 和 U_G 的相位差,称为 MGP 系统的源-网相位差,也称广义上 MGP 的功角,可表示为

$$\delta_{MG} = \delta_M + \delta_G \quad (1)$$

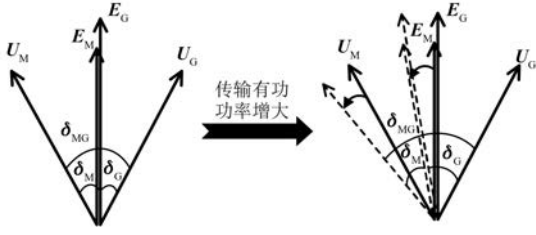


图2 MGP系统的功角特性

Fig. 2 Power angle characteristics of MGP

同步电动机和同步发电机输出的有功功率 P_M 、 P_G 可以分别表示为

$$P_M = -\frac{U_M E_M}{X_M} \sin \delta_M \quad (2)$$

$$P_G = -\frac{U_G E_G}{X_G} \sin \delta_G \quad (3)$$

式中: X_M 为电动机定子同步电抗; X_G 为发电机定子同步电抗。

稳态运行时,两同步机的转速相同,在相量图上表现为 E_G 和 E_M 同速旋转,如图2所示。由式(2)、式(3)可得,当MGP传输的有功增大时, δ_M 和 δ_G 会同时增大,逆变器出口侧电压 U_M 相位增大,使得MGP功角 δ_{MG} 增大。由此可得,控制逆变器出口侧电压向量 U_M 即可控制 δ_{MG} ,进而实现MGP有功功率的调节。

1.3 有功功率反馈控制

在上一节分析中可以得到,MGP并网后通过调节逆变器输出电压的相位,即可控制MGP功角的变化,因此考虑用频率差控制有功功率传输。

当MGP系统实际传输功率 P_g 小于设定参考功率 P_g^* 时,控制器使逆变器输出电压频率增大, δ_{MG} 增大,传输有功增大;反之则使逆变器电压频率减小,传输功率减小。根据上述分析,MGP功率反馈控制的原理如图3所示。

将MGP中发电机的并网功率 P_g 与设定的参考功率 P_g^* 作差,经过比例-积分(Proportional-Integral, PI)控制器控制逆变器输出电压频率 f_{ref} ,通过调节频率来调节相位差,从而实现MGP系统输出功率的闭环控制。

1.4 直流电压反馈控制

MGP功率反馈控制是在新能源直流母线端

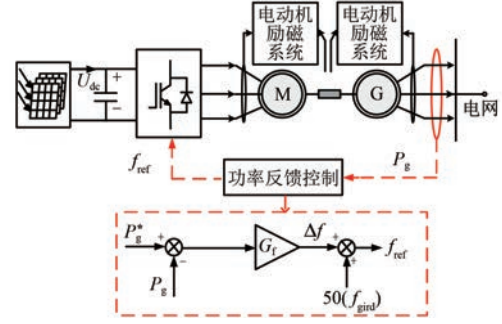


图3 基于有功功率反馈控制

Fig. 3 Feedback control based on the active power

电压恒定时的控制策略。当新能源机组外部环境条件发生变化时,其与逆变器的传输功率不匹配,新能源直流侧电容的充、放电电流将不平衡,会引起直流母线电压的改变,进而MGP的功率也会受到影响。以光伏为例,在光伏稳定运行区间内,光伏电池板的输出功率与端电压成反比关系,直流侧电压的变化能够直接反映光伏输出功率的变化。调整逆变器传输功率使其与光伏的输出功率相匹配时,直流侧电容电压 U_{dc} 便能保持稳定,系统可以稳定运行。MGP直流电压反馈控制的原理如图4所示。

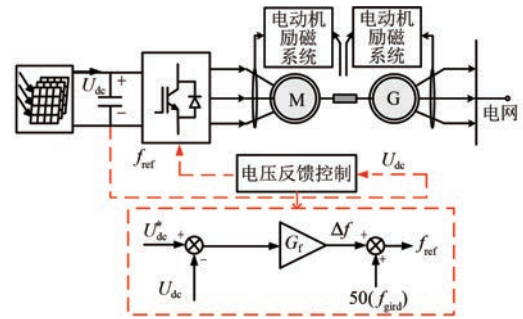


图4 基于直流电压反馈控制

Fig. 4 Feedback control based on the DC voltage

根据直流侧电压的变化,调节逆变器输出电压的频率,从而调节电动机与发电机端电压之间的相位差,实现对MGP输出功率的控制。当光伏电压的实际值 U_{dc} 小于设定参考电压值 U_{dc}^* 时,电压偏差经PI调节器减小逆变器输出电压的频率,从而减小MGP的源-网相位差和输出的有功功率,使得直流电容的放电电流小于充电电流、直流侧电容电压 U_{dc} 升高到设定参考值 U_{dc}^* ,系统达到稳态。

2 MGP接入微电网的协调运行方法

为了将 MGP 接入微电网参与系统的协调运行,需要研究适合 MGP 的运行方式。本文研究的微电网部分拓扑如图 5 所示,MGP 拟接入直流母线和交流母线之间,用于将新能源电力送入交流电网。MGP 直流侧接 765 V 直流母线、交流侧接 380 V 交流母线,直流母线接光伏电池输出支路、储能及负荷等装置,如图 5 所示。

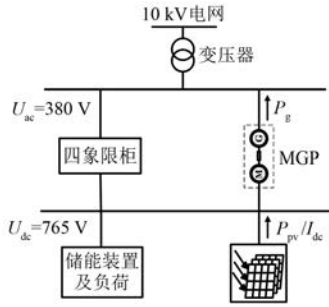


图 5 MGP 接入微电网的拓扑

Fig. 5 Topology of the MGP connected to a microgrid

为实现 MGP 接入微网运行并满足协调控制,需要采用功率反馈或电压反馈控制,并在此基础上结合微电网中光伏的发电情况。由于微网内直流母线电压原先由四象限柜控制,因此直流侧电压通常是较为稳定的。当直流母线电压稳定时,MGP 采用与微网协调配合的改进功率反馈控制,该控制原理如图 6 所示。

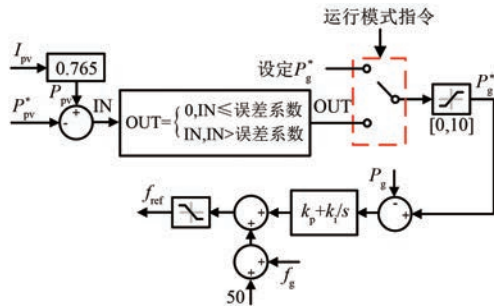


图 6 改进功率反馈控制图

Fig. 6 Diagram of the improved power feedback control

图 6 中: k_p 为比例系数; k_i 为积分系数; f_g 为电网电压频率; P_g 为并网功率; I_{dc} 为光伏电流; U_{dc} 为光伏电压; P_{pv} 为光伏功率。当 MGP 并网后,测量发电机输出有功功率 P_g 并与设定的功率参考值 P_g^* 进行对比,生成频率指令信号 f_{ref} 并输出到变频器的通讯端口,调节变频器输出电压的频率。

在该系统中, k_p 、 k_i 、误差系数、 P_g^* 和 P_{pv}^* 需

手动输入。 P_g^* 有手动模式和自动模式两种设置方式。手动模式即手动输入 P_g^* ;自动模式的设置方式如下:预先设定光伏输出功率阈值 P_{pv}^* (kW)与误差系数,光伏实际输出功率 P_{pv} 由实际测量和计算得到。当光伏输出功率 $P_{pv}-P_{pv}^* \leq$ 误差系数时,取 $P_g^* = P_{pv} - P_{pv}^*$;当 $P_{pv}-P_{pv}^* \geq$ 误差系数时,取 $P_g^* = 0$ 。结合上述运行模式,当微网内能够全额消纳光伏功率时,系统运行于自动模式,这也是通常运行采用的模式;如果微网内不需要光伏满发(例如微网独立运行且储能满电),系统运行于手动模式;或者 MGP 处于调试或检修状态时,也需要系统运行于手动模式。以上两种模式依据微网能量管理系统 (Energy Management System,EMS)下光伏功率是否充足和能量平衡情况进行切换,调节光伏输出功率。

当直流电压不稳定时,需要首先保证直流电压稳定,此时 MGP 采用与微网协调配合的改进电压反馈控制,如图 7 所示。MGP 并网运行后,通过测量光伏端电压 U_{dc} 并与设定的电压参考值 U_{dc}^* 进行对比,生成频率指令信号 f_{ref} ,输出到变频器的通讯端口,调节变频器输出电压的频率。

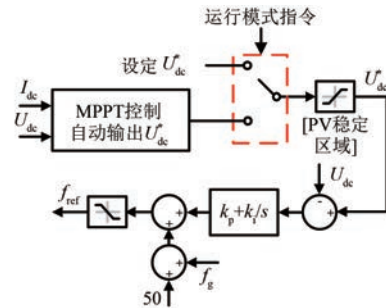


图 7 改进直流电压反馈控制图

Fig. 7 Diagram of the improved DC voltage feedback control

在该系统中, k_p 、 k_i 和误差系数需手动输入。电压参考值 U_{dc}^* 有手动模式和自动模式两种设置方式。手动模式即手动输入光伏正常工作电压范围内的直流电压参考值 U_{dc}^* ;自动模式将最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制输出的电压 U_{MPPT} 直接定为 U_{dc}^* ,让系统运行在光伏满发的状态。

3 MGP 并网装置开发与试验验证

3.1 并网装置开发

根据微网的运行要求,所开发的一体化 MGP 并网装置的样机如图 8 所示,装置内部由控制面板、操作面板与 MGP 系统进行一体化封装而成。控制面板主要包括可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC)、变频器、变压器和不间断电源 (Uninterruptible Power Supply, UPS) 等;操作面板主要包括微机综合保护装置、准同期并网装置、智能励磁控制器和触摸屏。各部分相互配合,共同实现对 MGP 系统的调节。



图 8 一体化 MGP 并网装置

Fig. 8 Integrated MGP grid integration device

PLC 的输入端口通过传感器可以获取 MGP 传输的有功功率、并网点电压和频率以及光伏输出功率等数据,通过对上述数据进行处理,计算输出变频器的电压频率参考值,实现第 2 节中所述的控制算法。

变频器直流侧连接光伏电池汇流箱的直流输出,交流侧连接电动机的定子绕组。变频器通过获取 PLC 输出的频率指令,控制 MGP 中电动机端电压的频率,进而改变 MGP 的输出功率。调压器与 UPS 从直流母线取电,共同为控制面板与操作面板的各装置供电。

控制柜的操作面板如图 9 所示。其中智能励磁控制器自动调节励磁电流以维持同步机电电压幅值的恒定;微机综合保护装置可以对 MGP 系统相关的电气量进行判断,在系统出现电气故障时自动将 MGP 从电网中切除;智能准同期并网控制器可以自动检测发电机电压与电网电压安全高效地实现自动并网;触摸显示屏为上述模块提供集中控制的窗口,并实时监测系统各电气量的变化,将整个系统相关电气量反馈给操作人员。

一体化 MGP 并网装置的操作步骤如下:(1)



图 9 控制柜的操作面板

Fig. 9 Control panel of the control cabinet

将控制面板中直流母线开关闭合,变频器、PLC 及准同期等装置控制启动,触摸屏亮起。(2)在触摸屏中选择 MGP 运行方式(功率控制/电压控制),并输入对应的有功功率参考值或直流电压参考值。

MGP 启动运行,自动执行并网操作,根据设置的参考值输出相应功率。当系统出现过载、失步等故障时,变频器和微机保护装置工作,将 MGP 从系统中切除。

3.2 试验验证

为验证 MGP 接入微电网协调运行的可行性,按照图 5 所示搭建试验平台用于模拟 MGP 在实际微电网中的运行情况。为简化试验,直流母线处仅模拟了光伏发电系统。试验相关参数如表 1 所示,本文分别进行了并网和负载试验测试。

由于文献[15-17]已单独研究了 MGP 系统对光伏并网系统频率和电压稳定性的提升,因此本文主要是验证所开发的 MGP 并网装置的有效性。其中,并网试验是通过操作一体化 MGP 并网装置完成的。带负载试验中,设定微网的直流母线电压维持恒定,故采取如图 6 所示的改进功率反馈控制的手动模式,通过手动设置系统功率参考值和比例积分系数来验证 MGP 接入微电网协调运行的可行性。

表 1 试验相关参数

Tab. 1 Parameters of the experiment

参数名称	参数值
交流系统电压/V	380
直流母线电压/V	765
光伏最大容量/kW	12
变频器容量/kW	10

MGP 额定容量/kW	10
额定电压频率/Hz	50
MGP 比例系数/(Hz·W ⁻¹)	2
MGP 积分系数/(Hz·W ⁻¹ ·s ⁻¹)	10

3.2.1 并网

并网试验中,MGP 平稳启动后,给定合闸指令后准同期装置检测 MGP 中发电机的机端电压与电网电压的差值在允许范围内时实现自动并网。并网前后发电机机端电压和电网电压相位变化如图 10 所示。

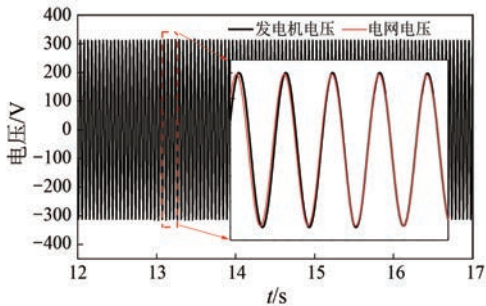


图 10 发电机机端电压和电网电压

Fig. 10 Generator terminal voltage and grid voltage

由图 10 可知,MGP 系统并网后,发电机机端电压跟随电网电压变化。试验结果表明,一体化 MGP 并网装置可以实现 MGP 系统的自动准同期并网。

3.2.2 并网加负载

MGP 系统并网成功后,系统进入稳态运行。设定微网的直流母线电压维持恒定,采用图 6 所示的有功功率反馈控制 MGP 系统输出功率,试验过程中手动将功率参考值 P_g^* 从 1 400 W 调整为 2 800 W,MGP 系统中发电机输出的功率如图 11 所示。

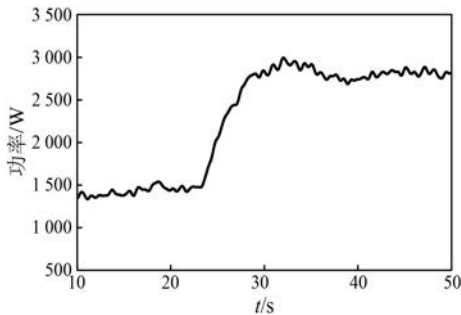


图 11 MGP 系统的输出有功功率

Fig. 11 Active power output of the MGP system

由图 11 可知,试验初始阶段,MGP 系统输出

功率稳定在 1 400 W 左右;调整功率设定值后,MGP 输出功率经过短暂波动到达新的设定值 2 800 W。试验结果表明,MGP 系统采用所提出的改进控制可以稳定调节向电网输送的功率。

4 结语

本文针对项目中微电网存在的稳定性不足问题,提出了适用于山区微网的新能源同步机并网技术。分析了 MGP 的功角特性及其控制方式的基本原理,在常规功率反馈和电压反馈控制的基础上,结合山区微网的运行情况提出 MGP 系统的协调控制方法,并开发了 10 kW 的一体化 MGP 并网装置。最后通过试验验证了所开发 MGP 并网装置和控制方法的可行性。

参考文献

[1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Z Y, ZHANG N, XIE X R, et al. Key technologies and development challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.

[2] 袁小明,张美清,迟永宁,等. 电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1904-1917.
YUAN X M, ZHANG M Q, CHI Y N, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1904-1917.

[3] 张兴. PWM 整流器及其控制策略的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
ZHANG X. Research on PWM rectifier and its control strategy [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003.

[4] ZHOU S, ZOU X, ZHU D, et al. An improved design of current controller for LCL-type grid-connected converter to reduce negative effect of pll in weak grid [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(2): 648-663.

[5] 庄慧敏,巨辉,肖建. 高渗透率逆变型分布式发电

- 对电力系统暂态稳定和电压稳定的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 84-89.
- ZHUANG H M, JU H, XIAO J. Impacts of inverter interfaced distributed generations with high penetration level on power system transient and voltage stability [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 84-89.
- [6] 李智, 刘辉, 刘明波, 等. 虚拟同步发电机并网稳定性与控制技术研究综述[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 1-10.
- LI Z, LIU H, LIU M B, et al. Research overview of grid-connected virtual synchronous generator stability and control technologies [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 1-10.
- [7] LI M, ZHANG X, ZHAO W. A novel stability improvement strategy for a multi-inverter system in a weak grid utilizing dual-mode control [J]. Energies, 2018, 11(8): 2144.
- [8] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-360.
- LV Z P, SHENG W X, LIU H T, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [9] 李明. 高渗透率新能源发电并网逆变器阻抗自适应双模式控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- LI M. Research on impedance adaptive dual-mode control of the grid-connected inverter for high-penetration new energy generation [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [10] 咸瑞雪, 韩子娇, 董雁楠, 等. 电压单相跌落下VSG输出平衡电流控制策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(10): 39-45.
- XIAN R X, HAN Z J, DONG Y N, et al. Virtual synchronous generator output balance current control strategy under single-phase voltage drop [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(10): 39-45.
- [11] 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): 93-100.
- [12] WU Q, HUANG Y, LI C, et al. Small signal stability of synchronous motor-generator pair for power system with high penetration of renewable energy [J]. IEEE Access, 2019, 7: 166964-166974.
- [13] 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): 80-86+151.
- WU Q Y, HUANG Y Z, ZHOU Y K, et al. Damping characteristics of synchronous motor-generator pair system for integration of new energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 80-86+151.
- [14] 陈巨龙, 薛毅, 王健, 等. 采用同步电机对系统提升新能源电网低电压穿越能力的仿真与试验[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(5): 47-52.
- CHEN J L, XUE Y, WANG J, et al. Simulation and experimental study on improving low voltage ride-through capability of new energy grid via motor-generator pair system [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(5): 47-52.
- [15] LI C, HUANG Y, DENG H, et al. A novel grid-forming technology for transient stability enhancement of power system with high penetration of renewable energy [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 143(2): 1519-1531.
- [16] ZHOU Y, XU G, WEI S, et al. Experiment study on the control method of motor-generator pair system [J]. IEEE Access, 2017, 6: 925-936.
- [17] ZHOU Y, HUANG Y, GU Y, et al. A control scheme based on motor-generator pair for photovoltaic power to integrate into the grid [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021.
- [18] 付文启, 杨鑫, 管飞, 等. 光伏减载驱动新能源同步机参与电力系统调频的研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(5): 79-85.
- FU W Q, YANG X, GUAN F, et al. Research on photovoltaic driving motor-generator pair to participate in frequency regulation under load shedding control [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(5): 79-85.

收稿日期: 2024-02-26

收到修改稿日期: 2024-04-26

com;

作者简介:

* 通信作者: 李晨阳(1996—), 男, 博士, 讲师, 研究方向
为高比例新能源电网稳定性, lichenyang1996@qq.com。

侯建生(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电
力系统规划、综合能源系统等领域研究, 513669861@qq.

Research on the Coordinated Operation Method and Devices of MGP Suitable for Microgrid

HOU Jiansheng¹, CHEN Xinbin¹, WANG Yingcong¹, LI Chenyang^{2*}, WANG Yue³,
WANG Zhefan³, ZHAO Haisen³

(1. Jinhua Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jinhua 321017, China;

2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Key words: high proportion of renewable energy grid; photovoltaic integration; synchronous motor-generator pair; grid stability; grid integration device

With the advancement of the goal of carbon peak and carbon neutrality, the installed capacity and proportion of renewable energy resources (RES) in power grids continue to increase. The high proportion of power electronics integrated reduces the inertia, damping and short-circuit capacity, thus brings great challenges to the stable operation of power systems.

Although improvements in control strategy of converters can improve grid stability, it cannot avoid the inherent control complexity, poor voltage/current tolerance, and control delay. To allow RES to be integrated to grids with a real synchronous machine interface and possess some excellent characteristics of traditional power units, some scholars have proposed a grid intergration technology based on a synchronous motor-generator pair (MGP). Considering the previous research is limited within the control method and stability in a single-machine system, coordinated operation and devices of MGP. The coordinated operation and device for the MGP are studied in this paper based on an actual microgrid, as shown in Fig.1.

Firstly, based on the traditional power and DC voltage feedback control, two improved control methods are proposed, and the two control modes are further switched by

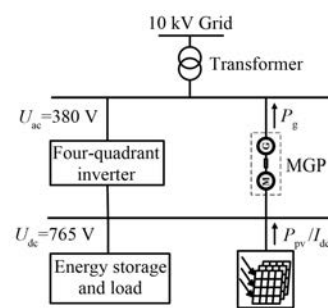


Fig. 1 Grid intergration structure of MGP

considering whether the DC bus

voltage in the microgrid is stable, so that it can be better applied to the microgrid and operate in parallel with other sources.

Then, a 10 kW grid integration device for MGP is developed. The frequency converter, programmable logic controller, excitation controller, transformer, and protection are integrated in the control cabinet, which can realize the start-up, grid connection, and operation of the MGP.

Finally, the device and control strategy by building an experimental platform to simulate the microgrid is verified at paper. Through grid-connected testing, it is verified that the device can realize the start-up and automatic grid-connection of the MGP; and through load testing, it is verified that the power integrated into the grid by MGP system can be controlled by the proposed method when the DC bus voltage is stable.