

# 基于MGP并网的新能源厂站无功 - 电压特性研究

张天宇<sup>1</sup>, 刘 聪<sup>1</sup>, 丁承第<sup>1</sup>, 徐 晶<sup>1</sup>, 黄永章<sup>2</sup>, 闫大威<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国网天津市电力公司经济技术研究院, 天津

<sup>2</sup>华北电力大学, 北京

Email: zhangtianyu@tju.edu.cn

收稿日期: 2021年3月5日; 录用日期: 2021年3月13日; 发布日期: 2021年3月31日

## 摘 要

新能源接入规模增大和直流输电馈入比例的增加使得电力系统的动态无功储备不足, 电压调节能力急剧下降, 同步电机对(Motor-Generator Pair, MGP)并网技术能够有效提高新能源机组对电网电压的支撑能力, 增大系统的无功调节能力。本文围绕MGP并网技术, 首先阐述了新能源采用MGP并网的基本原理, 分析了在电网暂态电压过程中MGP的无功响应和电压隔离特性, 并与同步调相机进行对比, 最后提出和分析了提升MGP对新能源电网电压支撑能力的方法。

## 关键词

电压稳定, 无功支撑, 同步电机对

# Research on Reactive Power-Voltage Characteristics of Renewable Energy Plants Based on the Motor-Generator Pair Grid Connected System

Tianyu Zhang<sup>1</sup>, Cong Liu<sup>1</sup>, Chengdi Ding<sup>1</sup>, Jing Xu<sup>1</sup>, Yongzhang Huang<sup>2</sup>, Dawei Yan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Economic and Technological Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin

<sup>2</sup>North China Electric Power University, Beijing

Email: zhangtianyu@tju.edu.cn

Received: Mar. 5<sup>th</sup>, 2021; accepted: Mar. 13<sup>th</sup>, 2021; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2021

## Abstract

The increase in the scale of renewable energy and the proportion of DC transmission feeds have made the dynamic reactive power reserve of the power system insufficient, and the voltage regulation capability also has dropped sharply. The MGP (Motor-Generator Pair) system can improve the voltage support ability of renewable energy units, and the regulation ability of reactive power can be also enhanced. Based on the MGP, firstly the grid integration of renewable energy via MGP is demonstrated in the paper, and then the reactive power response and voltage isolation characteristics during transient grid voltage is discussed, then MGP is compared with synchronous condenser. And finally the method of improving the voltage support of power grid for MGP is proposed and analyzed.

## Keywords

Voltage Stability, Reactive Power Support, Motor-Generator Pair

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 新能源发展及电压调节控制技术概述

随着新能源发电技术革新的不断涌现, 新能源产品成本持续降低, 高渗透率新能源发电并网将成为电网低碳化发展的重要趋势。当前新能源发电主要通过电力电子变换器并网, 高电力电子化将使电力系统的动态特性发生深刻变化。大规模依靠电力电子换流器并网的新能源其自身电压耐受能力和无功调节功能有限, 仅靠常规电源应对电网的暂态电压问题越来越困难, 电网的电压稳定问题突出[1]。

常规的新能源发电机组如光伏和风机, 其并网换流器虽然具备一定的无功调节裕度, 但是受限于容量而不得损失一定的新能源出力, 更关键的是电力电子换流器受限于功率器件固有的耐压和耐流能力限制, 因此其过载能力远低于传统机组, 无法为电网提供可靠的电压及无功支撑。针对并网换流器电压调节能力的改善问题, 国内外学者进行了广泛的研究。针对电网的暂态电压问题, 主要有两种改进措施, 一种是通过附加硬件补偿装置, 如静止同步补偿器, 动态电压恢复器以及超级电容等无功补偿装置, Crowbar 保护电路等辅助电路。另一种是控制策略的改进, 对于风机可以采用串联网侧变换器, 变阻尼和虚拟阻抗等技术[2]。对于光伏, 可以采用动态改变直流侧电压参考值的方法, 减小直流侧电压波动[3]。附加硬件设备的方式增加机组的体积和改造成本, 控制策略的改进虽然能利用并网换流器的一部分无功调节能力, 但是这种依靠新能源自身的调控和改造难以满足更高比例新能源电网的电压稳定需求。

与电力电子变换器相比, 传统的同步发电机在应对系统的电压波动以及进行无功 - 电压调节时具有较大的优势, 现有大多数基于电力电子控制的新能源并网控制技术也都希望变换器能够具备同步机的一些优良属性。虽然取得了一定的成效, 但不能发挥更好的效果的原因仍然归结到电力电子设备本身。未来随着新能源并网比例的进一步提升, 如何使新能源并网装置真正具有同步发电机的友好属性, 提升新能源的电压波动抗扰能力与故障穿越能力具有重要意义。基于同步电机对(Motor-Generator Pair, MGP)的并网技术[4] [5] [6]则可以使得新能源机组具有部分传统机组的优良属性, 增强新能源机组自身的电压支撑和无功调节能力, 在原理上具有类似调相机的无功响应过程, 因此可以有效提高系统的电压稳定性,

而对新能源采用 MGP 并网的无功 - 电压特性需要进一步对比分析和研究。

## 2. MGP 的基本原理和运行特性

### 2.1. MGP 的基本原理

作为一种全新的新能源并网方式，MGP 系统包括两台同步电机，两台电机共用同一个机械转子，并分别处于电动和发电运行状态。新能源采用 MGP 并网的结构如图 1 所示。新能源电力经电力电子换流器转换后驱动同步电动机运行，同步电动机同轴拖动同步发电机，发电机将旋转的机械能转化为电能输送至电网。

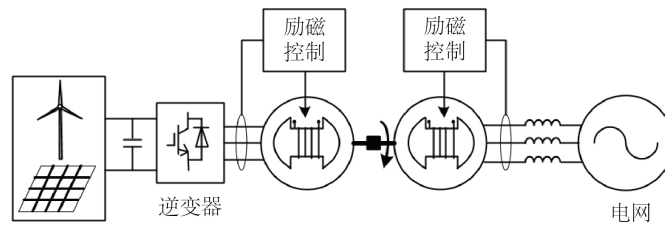


Figure 1. The structure diagram of grid-connected renewable energy via MGP

图 1. 新能源采用 MGP 并网结构示意图

### 2.2. MGP 的运行特性

采用这种并网方式，给新能源带来诸多好处，例如同步电机为电网提供了真实的惯性响应，而且两台电机的转动惯量和阻尼呈现出叠加效应，进一步增强了新能源的频率稳定性。

电动机和发电机具有相对独立的励磁系统，电动机侧的无功可以补偿新能源电场的无功，发电机侧的无功主要是为电网提供静态和动态无功支撑。励磁和阻尼绕组磁通不能突变这一特性使得 MGP 成为电压源型并网装置，且高于电力电子换流器的电压和电流耐受能力也有利于电网的电压稳定。

在电网频率波动情况下，MGP 凭借其电磁 - 机械耦合特性，可瞬间向电网提供惯性支撑，有效抑制电网频率的变化速率，提升新能源并网的惯性水平。在电网电压跌落情况下，MGP 中的发电机可瞬间发出/吸收 1.5 倍额定容量的无功功率，为电网电压恢复稳定提供有力支撑。

## 3. MGP 的无功 - 电压特性分析

分别从 MGP 的无功响应特性、电压隔离特性以及与调相机的对比分析 MGP 参与电网电压稳定的机理。

### 3.1. MGP 的无功响应特性

当电网电压波动时，由于励磁绕组、阻尼绕组会阻碍磁通的变化，首先 MGP 系统中同步发电机定子侧会感应出较大的定子电流。当同步发电机端电压突变了  $\Delta U$  时，其无功电流响应可表示为：

$$\begin{aligned} \Delta i_d = & \left[ \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left( \frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} \right] \Delta U \cos \delta_0 \\ & + \frac{\Delta U}{X_d} \cos \delta_0 - \frac{\Delta U}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_d''}} \cos(\omega t + \delta_0) \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $X_d''$ 、 $X_d'$ 、 $X_d$  分别为直轴次暂态电抗、暂态电抗和同步电抗;  $T_d''$ 、 $T_d'$  分别为直轴次暂态、暂态短路时间常数;  $T_a$  为定子绕组暂态时间常数;  $\omega$  为角速度;  $\delta_0$  为短路前发电机的功角。

由上式可知, 电网电压降低时, MGP 的发电机定子电流会瞬间感应出一个较大的无功分量, 该分量与电压变化和暂态电抗参数关系密切。其中次暂态过程会激发出 2~3 倍的定子电流, 通常在 2.5 s 后衰减到 10%。另外由于同步电机的惯性时间常数达到秒级, 此时发电机侧的电压变化会被机械系统隔离, 对电动机侧基本没有影响。因此, 发生电压故障时, MGP 能够提供足够的无功功率输出, 并且有效隔离新能源发电场和电网侧的故障, MGP 可以有效提高新能源机组的故障穿越能力。

### 3.2. MGP 与调相机的对比分析

调相机作为电网中专用的无功补偿设备, 近年来在电网也得到了了一定的应用。MGP 中发电机与调相机的定子电流响应机理是类似的, 不同之处在于, 电网电压变化时, 调相机增加的都是无功电流, MGP 由于稳态运行时带负载, 因此功角更大, 定子电流的有功和无功分量同时存在, 且不能忽略。因此对比调相机, MGP 的无功电流响应能力类似但稍弱于调相机, 考虑到调相机主要用作提供动态无功支撑, 而发电机具有一定的过载能力, 因此 MGP 的暂态时的无功支撑能力也是可以保证的。另外, 在电机参数上, 经过改进的新一代调相机具有更小的暂态电抗, 因此其无功支撑能力更强。

但是需要注意的是, 调相机固然具有对电压更强的支撑效果, 但是 MGP 作为一种并网方式, 不仅仅是支撑电压稳定, 传输新能源功率和电压隔离作用都是其应用的特点所在, 是针对新能源电网稳定的一种较为全面的解决方案。而调相机的一些功能改进同样可以应用于 MGP 的电压稳定功能中。

## 4. MGP 提升电网电压稳定性的方法

由 2、3 节的分析可知, MGP 具有和调相机相似的无功响应能力, 因此可以借鉴传统同步电机和调相机理论提升 MGP 对电网电压稳定的积极作用。

1) 从电机参数方面考虑, 由于公式(1)可知, MGP 发电机瞬时提供的无功电流与暂态电抗的倒数成正比, 因此通过电机制造工艺的改进适当降低暂态电抗可以增强 MGP 的无功响应。同时提高定子、转子绕组的过载能力和绝缘水平可以增加 MGP 峰值无功电流的输出时间。

2) 从励磁控制方面考虑, 除了自发响应外, 附加励磁控制可以提高励磁电流的响应速度, 充分利用 MGP 自身的无功支撑能力。提出如图 2 所示的有功 - 电压协调控制方法。由无功和电压环得到发电机励磁电压信号, 其中无功环较电压环响应更慢, 引入电压控制可以有利于维持电网电压, 同时无功调节发挥作用用于调节机端电压, 无功参考指令可以来自于上层的励磁控制器。无功环和电压环可以单独作用, 当侧重于维持机端电压时投入电压环即可, 当需要维持系统电压稳定时采用无功外环电压内环的方式可以取得更好的支撑效果。

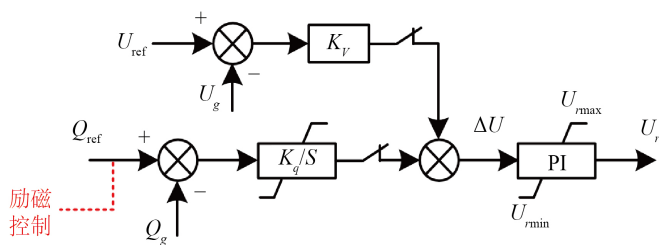


Figure 2. The advanced Q-V control of MGP

图 2. MGP 改进的无功 - 电压控制

## 5. 结束语

随着新能源并网规模的持续增加, 新能源机组的电压调节能力弱, 无功储备不足, 电网的电压稳定问题日益突出, 新能源采用 MGP 并网可以有效提高新能源机组的无功和电压支撑能力。对比发现, MGP 具有和调相机类似的响应特性, 不仅可以在电网电压波动瞬间为电网提供自发的无功响应, 而且由于其自身的机械隔离作用, 可以有效地隔离新能源和电网侧的故障, 保证了新能源机组在扰动发生时不脱网, 提高了新能源机组的电压穿越能力。并且通过适当改进 MGP 系统参数和励磁控制环节, 可以增强 MGP 对新能源电网的电压支撑能力。合理地配置 MGP 是解决未来高比例新能源电网电压稳定问题的有效方案。

## 参考文献

- [1] 陈国平, 李明节, 许涛, 刘明松. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-27.
- [2] 张兴, 张龙云, 杨淑英, 余勇, 曹仁贤. 风力发电低电压穿越技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008(2): 1-8.
- [3] 甄晓亚, 尹忠东, 王云飞, 孙舟. 太阳能发电低电压穿越技术综述[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(8): 65-68+73.
- [4] 卫思明, 黄永章. 风电采用 MGP 并网的小干扰建模和阻尼特性[J]. 电力系统自动化, 2017(22): 16-25.
- [5] Wei, S., Zhou, Y., Xu, G., *et al.* (2017) Motor-Generator Pair: A Novel Solution to Provide Inertia and Damping for Power System with High Penetration of Renewable Energy. *IET Generation Transmission & Distribution*, **11**, 1839-1847. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1894>
- [6] 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.