

新能源同步机对光伏发电系统静态电压稳定性的提升作用研究

邓宏远¹, 黄永章^{1,2}, 王哲凡¹, 钟威凯¹, 李晨阳¹, 赵海森¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 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 264006)

摘要:传统同步电源被电力电子并网变流器大量替代导致新能源电网无功裕度不足、静态电压稳定性降低,并网点电压失稳甚至崩溃的现象愈发明显。针对上述问题,本文以光伏发电系统为例,研究其采用新能源同步机(motor-generator pair, MGP)的并网方式对系统静态电压稳定性的提升作用。首先介绍了 MGP 系统的原理并分析其功率传输特性;然后,基于能够反映节点电压和潮流关系的 V-Q 和 P-V 曲线法从理论上揭示了 MGP 系统能够增加无功裕度以提高静态电压稳定性;最后,在 PSCAD/EMTDC 软件中分别建立了光伏直接带负载和经 MGP 带负载的电磁暂态仿真模型,通过在相似的网络结构下设置不同典型功率因数的负荷变化,结合 V-Q/P-V 的响应特性对比得出两类系统的失稳电压、无功/电压裕度和电压降落等典型指标。结果表明光伏采用 MGP 系统并网后,系统的静态电压稳定性得到了显著提升。

关键词:新能源电网;新能源同步机;V-Q 曲线;P-V 曲线;静态电压稳定

Research on Improvement of Static Voltage Stability of Photovoltaic Power Generation System by New Energy Synchronous Machine

DENG Hongyuan¹, HUANG Yongzhang^{1,2}, WANG Zhefan¹, ZHONG Weikai¹,

LI Chenyang¹, ZHAO Haisen¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. NCEPU(Yantai) Power Semiconductor Technology Research Institute Co., Ltd., Shandong Yantai 264006, China)

Abstract: The traditional synchronous power supply has been replaced by a large numbers of power electronic based grid-connected converters, resulting in insufficient reactive power margin of new energy power grid, reduced static voltage stability, and more and more obvious voltage instability or even collapse at the grid-connected point. Aiming at the above problems, the photovoltaic power generation system is used as an example in this paper to study the improvement of the static voltage stability of the system by using the new energy synchronous machine (motor-generator pair, MGP) grid-connected method. Firstly, the principle of MGP system is introduced and its power transmission characteristics are analyzed. Then, based on the V-Q and P-V curve methods that can reflect the relationship between node voltage and power flow, it is theoretically revealed that MGP can increase the reactive power margin to improve the static voltage stability. Finally, the electromagnetic transient simulation models of photovoltaic with load directly and via MGP were established respectively in the PDCSA/EMTDC software. By setting the load variation of different typical power factors with the similar system structure and combining with the V-Q/P-V response characteristics comparison, such typical indicators as unstable voltage, reactive power/voltage margin and voltage drop of the two systems are obtained. The results show that the static voltage stability of the original

system can be significantly improved after the photovoltaic is integrated to the grid via MGP.

Keywords: new energy grid; motor-generator pair; V-Q curve; P-V curve; static voltage stability

0 引言

近年来,在“双碳”目标的引导下,我国确立了以可再生能源为主导的电力发展方向,光伏和风能为代表的新能源得到了迅猛发展^[1]。然而,由于电网中电力电子变流器对传统同步电源的替代作用以及我国不断呈现增长趋势的全社会用电需求^[2],导致新能源电网的静态电压稳定性不断降低^[3],新能源场站并网电压失稳、崩溃导致的重大停电事故时有发生^[4]。因此,电压稳定成为研究新能源电网稳定性的重要方向之一。

静态电压稳定裕度(static voltage stability margin, SVSM)是衡量电力系统静态电压稳定性的重要指标,其数值表征电网在稳态情况下维持电压稳定运行的能力,通常定义为当前运行点至稳定边界的距离^[5]。系统 SVSM 不足时,运行点将更接近稳定极限。当运行点处于静态电压稳定极限点附近时,负荷的突然增加可能会引起系统发生电压失稳,严重时可进一步引起电压崩溃事故,造成严重经济损失^[6]。以煤炭、石油等化石燃料为能源的传统电网由于大量装设同步机设备,无功裕度充足,仅需在部分静态电压稳定薄弱点安装部分无功补偿设备即可解决 SVSM 不足的问题。以风、光等为输入的新能源电网由于电力电子变流器的无功容量受限、电压/电流耐受能力不足,其静态电压稳定裕度不足的问题随着新能源接入比例的提高将会将更加严重。

为提高新能源电网的静态电压稳定裕度,文献[7]提出了一种新的变流器控制策略,该策略能够在外界电压信号突变时,以低于传统变流器的延迟时间短时提高电网的无功补偿能力以提高 SVSM,但其未考虑变流器存在无法同时进行无功补偿和故障抑制的问题。文献[8]提出的变流器控制策略兼顾了无功补偿和故障抑制的能力,但改进控制策略本质上无法改变系统的无功储备能力,对 SVSM 的提升作用有限。文献[9-10]提出了两种改进的变流器结构,通过模块化使用或切换运行方式以实现电网无功的补偿。但这种改进对控制系统提出了更高的要求,增加成本且设计较复杂。文献[11]通过使用 V-Q 曲线法分析了天津电网某 500 kV 母线的 SVSM 情况,并提出加装动态无功

补偿装置以增强电网的静态电压稳定性。文献[12-13]通过使用 P-V 曲线法分析了系统稳定性最薄弱的区域,并提出相应增加电压稳定性的措施。文献[14-16]对比研究了目前应用广泛的(static synchronous compensator, STATCOM)静止同步补偿器、(static var compensator, SVC)静止无功补偿器和同步调相机(synchronous condenser, SC)对电网的无功补偿效果,STATCOM 和 SVC 等电力电子设备的无功响应慢于具有电磁耦合效应的同步调相机,且其无功补偿能力受设备过载能力的限制,对系统 SVSM 的提升能力逊于同步调相机,但同步调相机目前仅用于无功补偿,设备造价高昂的问题也亟待解决。

基于同步发电机对电网稳定性的提升作用,有学者提出了一种基于同步电机对(motor-generator pair, MGP)的新型新能源并网方式,通过在新能源并网环节中引入同步机,使得新能源并网端口具有了同步机属性。目前已有研究提出了适用于该系统的并网控制策略^[17-18],并从理论和实验的角度验证了该系统在惯量、阻尼、故障隔离和振荡抑制等方面的作用^[19-24]。目前,尚未有研究分析 MGP 系统对新能源发电系统静态电压稳定性的影响。

因此,本文基于 SVSM 的定义,研究 MGP 系统对新能源静态电压稳定性的提升作用。本文结构如下:首先分析了 MGP 系统的原理及其功率传输特性;然后说明了 MGP 系统对新能源无功支撑的提升作用,并结合 V-Q、P-V 曲线法从理论上分别分析了 MGP 系统对新能源静态电压稳定性的提升效果;最后在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中分别建立了光伏和光伏经 MGP 带负载的电磁暂态仿真模型,在不同工况下验证了 MGP 对新能源系统静态电压稳定性的提升作用。

1 MGP 系统的原理和功率传输特性

1.1 MGP 系统的结构和原理

MGP 系统由具有机械轴系耦合的两台同步机构成,其用于光伏并网的结构见图 1。光伏机组输出的电能汇聚后通过变流器驱动电动机,电动机通过机械轴带动发电机,由发电机实现并网,在此环节中完成电能-机械能-电能的转化过程。MGP 系统为光伏并网增加了转动惯量,且发电机具有电

压源特性,能够有效提升电网的无功裕度和电压稳定性。

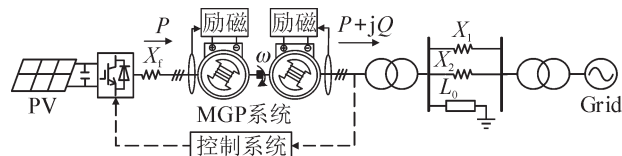


图1 光伏经MGP并网结构图

Fig. 1 Diagram of photovoltaic grid-integration via MGP

当光伏采用 MGP 系统并网时,通过控制光伏输出电压以调节 MGP 系统的功角,实现对新能源功率的跟随。图 1 中所示的逆变器-MGP 控制系统输出电压的频率表达式为

$$f_{\text{ref}} = k_p(u_{\text{dc}} - u_{\text{MPPT}}) + k_i \int (u_{\text{dc}} - u_{\text{MPPT}}) dt \quad (1)$$

式中: f_{ref} 是逆变器输出电压的频率参考值, u_{dc} 是直流侧参考电压, u_{MPPT} 是光伏最大功率跟踪控制得到的电压,采用扰动观察法; k_p 与 k_i 分别是 PI 控制器的比例参数与积分参数。

相关测算表明,考虑机械损耗、基本铁耗及励磁损耗后一台 200 MW 的同步发电机额定效率可达 98%,同容量的 MGP 系统效率将略低于 96%^[25]。尽管采用 MGP 并网后系统的运行效率有所降低,但需要说明的是:一方面,MGP 系统可由新能源电网中退役的同步发电机组改造再利用;另一方面,MGP 系统仅作为未来高比例新能源电网并网方式之一,为其提供同步电源所具有的惯性、阻尼和本文将叙述的无功支撑等各类服务。综上,可以通过降低造价和调节 MGP 系统使用比例的手段来控制成本限定在可接受的范围内。

1.2 MGP 系统的功率传输特性

1.2.1 有功传输特性

以隐极机为例,MGP 系统传输有功功率的变化量可表示为

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{Me}} = \frac{E_M U_M}{X_{\text{Md}}} \cos \delta_{\text{M0}} \Delta \delta_{\text{M}} \\ \Delta P_{\text{Ge}} = \frac{E_G U_G}{X_{\text{Gd}}} \cos \delta_{\text{G0}} \Delta \delta_{\text{G}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_M 与 E_G 分别为电动机和发电机 q 轴合成电动势向量幅值; U_M 与 U_G 分别为电动机和发电机机端电压向量幅值; X_{Md} 与 X_{Gd} 分别为电动机和发电机的直轴同步电抗; δ_{M0} 与 δ_{G0} 分别为电动机和发电机的功角; $\Delta \delta_{\text{M}}$ 与 $\Delta \delta_{\text{G}}$ 分别为电动机和发电机的功角的变化量。

由上式可得出 MGP 系统的功角特性,如图 2

所示。

当 MGP 系统并网运行且电网电压恒定时,则可知:MGP 系统中电动机的电磁转矩由于新能源输出有功功率的增加而增加,电动势 U_M 的旋转速度增加也拉大同步机的功角,然后随之同步发电机的功角将增大,其馈入电网的功率也将增加,MGP 系统进入新的稳态,功角特性主导了 MGP 的有功传输过程。

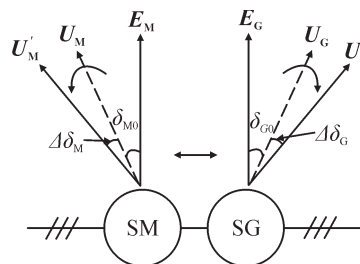


图2 MGP系统的功角关系向量图

Fig. 2 Power angle vector diagram of MGP system

1.2.2 无功传输特性

当 MGP 处于并网或负载运行状态时,网端运行状态变化瞬间可将机械轴认为是刚性轴,此时对电网的无功支撑作用主要由发电机来提供,其无功功率可表示为

$$Q_{\text{Ge}} = \frac{E_G U_G}{X_{\text{Gd}}} \cos \delta_{\text{G0}} - \frac{U_G^2}{X_{\text{Gd}}} \quad (3)$$

结合式(2)、(3)可得出 MGP 系统的无功传输特性,如图 3 所示。

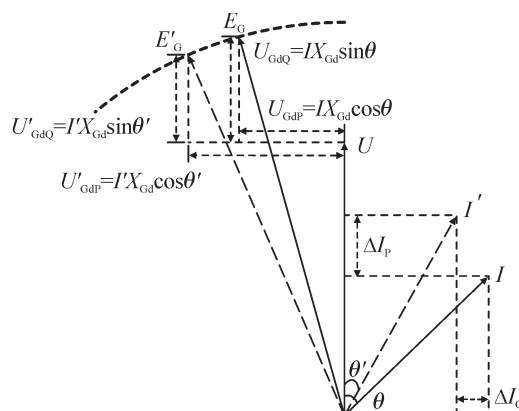


图3 励磁恒定时MGP系统向量图

Fig. 3 Vector diagram of MGP system at constant excitation

当 MGP 系统采用恒定励磁方式并网且电网电压恒定时,即 MGP 系统中同步发电机 q 轴合成电动势 E_G 数值恒定,可按图 3 分析:当 MGP 系统输出的有功功率由于新能源输出功率的增加而增加,输出电流 I 的有功分量的增量 ΔI_p 为正,相应地,有功

分量在 X_{Gd} 上的压降 U_{GdP} 增大至 U'_{GdP} ; 由于 E_G 数值恒定, 即向量轨迹为一圆心不变, 以 E_G 数值为半径的圆弧, 此时无功分量在 X_{Gd} 上的压降 U_{GdQ} 减小至 U'_{GdQ} , 故无功分量降低, I 的无功分量的增量 ΔI_Q 为负, 即 MGP 系统输出的无功功率将减小。同理, 当新能源出力减小时 MGP 提供无功功率将增大。

2 MGP对系统静态电压稳定性提升的机理分析

2.1 基于V-Q曲线法的静态电压稳定裕度分析

基于连续潮流法的 V-Q 曲线法, 对于收敛性差或发散问题的处理性较好, 其具体绘制方法为: 从系统某状态运行点开始, 在被测试的节点处加装一台无功功率无穷大的虚拟调相机以保持该节点电压, 同时不断加重该节点处的负荷情况直至此点出现电压崩溃。并根据 V 所代表的测试点的节点电压值和 Q 所代表的虚拟调相机的无功功率注入值获得完整的 V-Q 曲线^[26]。V-Q 曲线法的优点在于通过表示出被测试节点的节点电压同该节点无功功率之间的关系, 可以在考虑负荷电压特性及源端无功极限、变压器励磁饱和等非线性环节下, 获得被测试节点的无功裕度、电压失稳点和无功灵敏度等一系列特性。

基于 V-Q 曲线法并结合 MGP 系统的特性, 本文采用如图 4 所示系统用于对比研究 MGP 系统对静态电压稳定性的影响。在此系统中, 光伏可采用逆变器直接带载或经 MGP 系统带载两种方式运行, 光伏均采用最大功率点跟踪控制, 逆变器采用 dq 矢量控制策略, 调相机的容量设置为无穷大, 可变负荷采取恒功率因数增长方式。

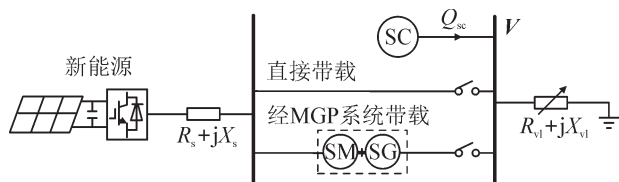


图4 基于V-Q曲线法的光伏系统结构图
Fig. 4 Structural diagram of PV system based on the V-Q curve method

采用矢量控制的逆变器, 其无功输出为

$$Q_{inv} = \frac{3}{2}(v_{gq}i_{gd} - v_{gd}i_{gq}) \quad (4)$$

式中: Q_{inv} 为逆变器输出无功功率; v_{gd} 、 v_{gq} 、 i_{gd} 、 i_{gq} 分别为解耦控制下逆变器 d 轴、 q 轴电压、电流。

当采用 d 轴电压定向的控制方式时, 逆变器的无功输出为

$$Q_{inv} = -\frac{3}{2}v_{gd}i_{gq} \quad (5)$$

结合本文 1.2.2 节的 MGP 系统无功传输特性对比可知, 逆变器无功输出与其 q 轴上的电流成比例, 因此在可变负荷以恒功率因数增长时, 直接采用逆变器带载, 无功功率将直接占用逆变器容量; 然而, 采用逆变器通过 MGP 系统带载, 无功功率将由 MGP 系统的励磁系统提供。

实际上, 逆变器在提供无功支撑时所受约束较多。除了容量约束, 还受最大电流、最大逆变电压及功率因数约束等。由于电力电子元件的耐压/耐流能力远低于同步机, 仅以功率因数约束为例, 根据 GB/T 29321-2012《光伏电站无功补偿技术规范》的规定, 光伏逆变器应满足额定有功出力下功率因数在超前 0.95 至滞后 0.95 的范围内动态可调; 但根据同步机 P-Q 运行极限图可知, 同步机在满足额定有功出力下功率因数在超前 0.90 至滞后 0.85 的范围内动态可调, 远宽于光伏逆变器的调节范围。

综上所述可知, 光伏通过 MGP 并网的 V-Q 特性将优于光伏直接并网系统。

2.2 基于P-V曲线法的静态电压稳定裕度分析

类似 V-Q 曲线法, P-V 曲线法也是静态电压稳定分析的一种常用方法。P-V 曲线法的具体绘制方法为: 从系统某状态运行点开始, 不断加重被测试节点处的负荷情况直至此点出现电压崩溃。并根据 P 所代表的有功负荷值和 V 所代表的测试点的节点电压值获得完整的 P-V 曲线^[26]。

基于 P-V 曲线法并结合 MGP 系统的特性, 本文采用如图 5 所示系统用于对比研究 MGP 系统对静态电压稳定性的影响。该系统除去不加装虚拟调相机, 其余设置与图 4 所示的光伏系统相同。



图5 基于P-V曲线法的光伏系统结构图
Fig. 5 Structural diagram of PV system based on the P-V curve method

对图 5 所示的系统进行分析, 可变负荷上的电压可表示为

$$U_{vl} = E - (R_s + jX_s)I \quad (6)$$

设逆变器端出口电压 $\dot{E} = E\angle 0^\circ$, 可变负荷电压为 $U_{vl} = U_{vl}\angle \theta^\circ$, 可变负荷所吸收的功率可表示为

$$S_{vl} = U_{vl} \left(\frac{E - U_{vl}}{R_s + jX_s} \right)^* \quad (7)$$

进一步,可变负荷所吸收的功率可得

$$S_{vl} = (U_{vl} \cos \theta + j U_{vl} \sin \theta) \times \left(\frac{E - U_{vl} \cos \theta + j U_{vl} \sin \theta}{R_s - j X_s} \right) \quad (8)$$

可变负荷所吸收的有功、无功功率分别为

$$P_{vl} = \frac{U_{vl} E (R_s \cos \theta - X_s \sin \theta) - U_{vl}^2 R_s}{R_s^2 + X_s^2} \quad (9)$$

$$Q_{vl} = \frac{U_{vl} E (R_s \sin \theta + X_s \cos \theta) - U_{vl}^2 X_s}{R_s^2 + X_s^2} \quad (10)$$

对式(9)、(10)进行移项及联立消去 θ 后可得

$$\left(P_{vl} + \frac{U_{vl}^2 R_s}{R_s^2 + X_s^2} \right)^2 + \left(Q_{vl} + \frac{U_{vl}^2 X_s}{R_s^2 + X_s^2} \right)^2 = \frac{U_{vl}^2 E^2}{R_s^2 + X_s^2} \quad (11)$$

忽略内阻 R_s ,由式(11)可得关于 U_{vl}^2 的二阶方程为

$$(U_{vl}^2)^2 + (2Q_{vl}X_s - E^2)U_{vl}^2 + X_s^2(Q_{vl}^2 + P_{vl}^2) = 0 \quad (12)$$

式(12)具有至少一个可行解的条件为

$$-4X_s^2(Q_{vl}^2 + P_{vl}^2) + (2Q_{vl}X_s - E^2)^2 \geq 0 \quad (13)$$

在式(13)满足的条件下,可得出可变负荷处电压与其所吸收的有功、无功功率的关系式为

$$U_{vl} = \sqrt{\pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X_s^2 P_{vl}^2 - X_s E^2 Q_{vl}} + \frac{E^2}{2} - Q_{vl} X_s} \quad (14)$$

当可变负荷的功率因数角为 φ 时,即 $Q_{vl} = P_{vl} \tan \varphi$,可得出P-V关系式为

$$U_{vl}^2 = \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X_s^2 P_{vl}^2 - X_s E^2 P_{vl} \tan \varphi} + \frac{E^2}{2} - P_{vl} \tan \varphi X_s \quad (15)$$

因此该系统的P-V特性由式(15)约束,此约束关系的图像近似于抛物线,分别考虑逆变器和MGP系统的功率传输特性可以获得两系统的P-V关系,并通过第3节中的仿真得以进一步分析。

3 MGP系统提升新能源静态电压稳定性的仿真验证

3.1 模型建立

为验证MGP系统对新能源静态电压稳定性的提升作用,本文基于PSCAD/EMTDC仿真软件搭建了如图4所示的光伏系统模型用于V-Q曲线的分析;并搭建了如图5所示的光伏系统模型用于P-V曲线法分析。其中, V 为负载母线电压幅值标么值; Q_{sc} 为外接并联无穷大调相机向负载母线注入的无功功率; P_{vl} 为负载母线的有功潮流。仿真系统主要参数如表1所示。

表1 仿真模型主要参数

Table 1 Main parameters of simulation model

项目	参数名称	取值
系统	额定容量/kVA	250
	调相机容量/kvar	6 600
	光照强度/W/m ²	800
	直流侧电容/F	0.1
	电压等级/kV	0.38
	额定频率/Hz	50
	温度/°C	25
逆变器	MPPT点电压/kV	0.55
	外环控制参数 k_p/k_i	1.08/0.177
	q轴控制参数 k_p/k_i	0.105/0.24
MGP	d轴控制参数 k_p/k_i	0.002/0.028
	励磁电压/p.u.	1.0
	控制参数 k_p/k_i	10/0.001
	电抗参数/p.u.	0.92
	发电机额定电压/kV	0.38

3.2 V-Q特性分析

通过设置系统内可变负荷的功率因数,得到负荷连续增大时功率因数 $\cos \varphi = 1$ 、0.95和0.85的两类系统各3组共6条V-Q曲线,如图6所示。

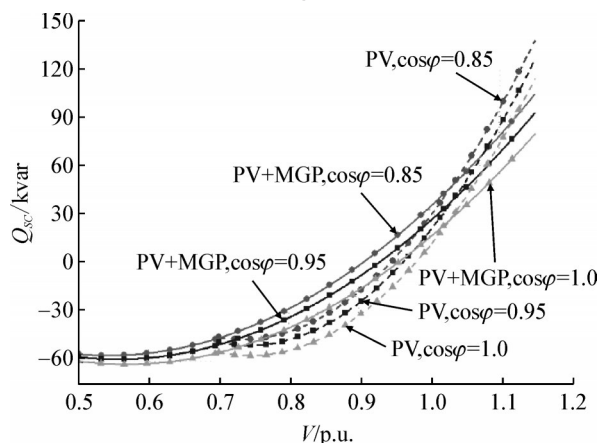


图6 不同负荷功率因数时两类系统的V-Q曲线
Fig. 6 V-Q curve of two types of systems at different load power

图中横坐标为负载母线的电压幅值标么值,纵坐标为外接并联无穷大调相机向负载母线注入的无功功率。V-Q曲线斜率小于零时,即 $dQ_{sc}/dV < 0$,系统为失稳状态;曲线最低点,即 $dQ_{sc}/dV = 0$,系统为临界稳定状态,该点横坐标为系统失稳电压幅值标么值,该点纵坐标为系统无功裕度值;曲线斜率大于零时,即 $dQ_{sc}/dV > 0$,系统为稳定状态,该状态下曲线斜率的倒数反映了系统无功灵敏度的程度,斜率倒数小的系统刚性好,反之则较软。由图6可见,同一系统不同负荷增长方向的V-Q曲线大体趋势相同。为便于分析,以 $\cos \varphi = 0.95$ 的两条曲

线为例进行分析,如图7所示。

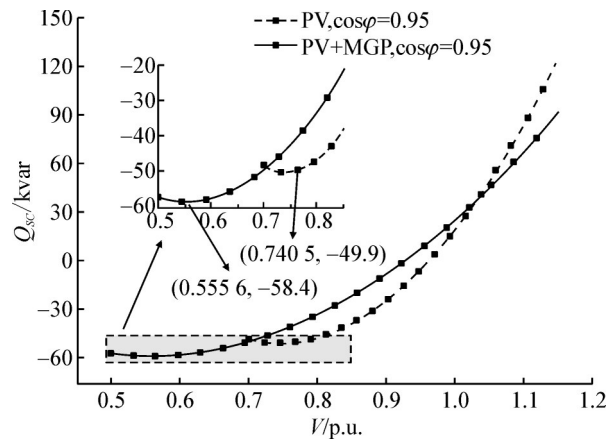


图7 $\cos \varphi=0.95$ 时系统的V-Q曲线
Fig. 7 V-Q curves of two types of systems with $\cos \varphi=0.95$

当 $\cos \varphi=0.95$ 时,光伏直接带载系统的失稳电压幅值明显高于光伏经 MGP 带载系统;光伏直接带载系统的无功裕度明显低于光伏经 MGP 带载系统。但通过曲线可观察到,加装 MGP 系统后,无功灵敏度较原系统提高,刚性变差。

本文通过计算两系统的静态电压稳定裕度和无功裕度来进一步分析。静态电压稳定裕度 k_v 的定义为

$$k_v = \frac{U_0 - U_{\text{uns}}}{U_0} \times 100\% \quad (16)$$

式中: U_0 为系统正常运行时的电压标么值; U_{uns} 为失稳点电压,即失稳点横坐标。

根据 GB 38722-2019《电力系统安全稳定导则》的规定,在正常运行方式下,电力系统的无功电压判据的静态电压稳定裕度系数 k_v 应大于 15%。因此,选择系统正常运行时的电压标么值 $U_0=1$ 。无功裕度 Q_m 的定义为

$$Q_m = Q_{\text{uns}} \quad (17)$$

式中, Q_{uns} 为系统无功裕度值,即失稳点纵坐标。

图7得: $U_{\text{pvuns}}=0.7405 \text{ p.u.}$, $U_{\text{mgpuns}}=0.5556 \text{ p.u.}$, $Q_{\text{pvuns}}=49.9 \text{ kvar}$, $Q_{\text{mgpuns}}=58.4 \text{ kvar}$ 将以上各组数据分别带入式(16)、(17)中,求得 $k_{\text{mgp}}=44.44\%$, $k_{\text{pv}}=25.95\%$; $Q_{\text{mpv}}=49.9 \text{ kvar}$, $Q_{\text{mmgp}}=58.4 \text{ kvar}$ 。相比于未加装 MGP 系统的光伏带载系统,加装 MGP 系统后静态电压稳定裕度系数提高了 18.49%,无功裕度提高了 17.03%。

为更直观分析不同负荷功率因数时 MGP 对光伏系统静态电压稳定性的提升效果,表2、表3计算了两类系统在不同负荷功率因数时的静态电压稳定裕度系数和无功裕度值。

表2 两类系统静态电压稳定裕度值
Table 2 Static voltage stability margin for two types of systems

功率因数	静态电压稳定裕度		MGP改善效果/%
	光伏直接带载	光伏经 MGP 系统带载	
$\cos \varphi=1$	25.76	43.13	17.37
$\cos \varphi=0.95$	25.95	44.44	18.49
$\cos \varphi=0.85$	26.85	45.66	18.81

由表2可知,光伏采用 MGP 系统后,可显著提高系统的静态电压稳定裕度系数,并且改善效果随负荷功率因数的降低而更加明显。

表3 两类系统无功裕度值
Table 3 Reactive power margin for two types of systems

功率因数	无功裕度值/kvar		MGP提升效果/%
	光伏直接带载	光伏经 MGP 系统带载	
$\cos \varphi=1$	56.1	61.5	9.63
$\cos \varphi=0.95$	49.9	58.4	17.03
$\cos \varphi=0.85$	46.2	56.0	21.21

由表3可知,光伏采用 MGP 系统后,可显著提升系统无功裕度值,并且提升效果随负荷功率因数的降低而更加明显。

综上,从系统的V-Q曲线可以看出,光伏采用 MGP 系统带载后,系统的失稳电压值减小,无功裕度增大,也就意味着 MGP 系统可显著提高新能源电网的静态电压稳定性。实际上,由于电力系统中的负载为感性负载,我国电网中用电负荷的功率因数一般在 0.85~0.90 之间。在此范围内 MGP 对新能源电网的静态电压稳定裕度系数和无功裕度值的提升效果也较好。

3.3 P-V 特性分析

通过设置系统内可变负荷的功率因数,得到负荷增大时功率因数 $\cos \varphi=1$ 、0.95 和 0.85 的两类系统各 3 组共 6 条 P-V 曲线,如图8所示。

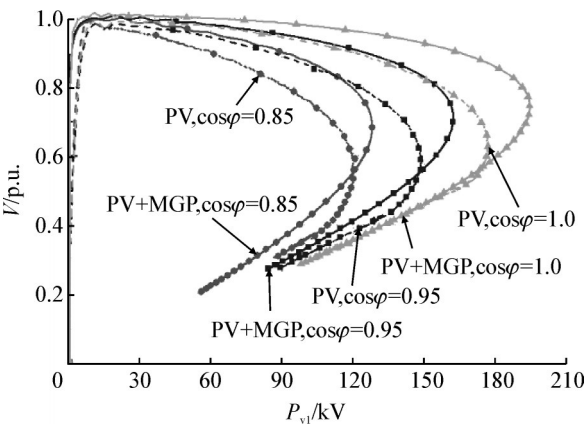


图8 不同负荷功率因数时两类系统的P-V曲线
Fig. 8 P-V curves of two types of systems with different load power factors

图中横坐标为负载母线的有功潮流,纵坐标为负载母线电压幅值标么值。P-V 曲线斜率大于零时,即 $dV/dP_{vi}>0$,系统为失稳状态,对应图中 P-V 曲线的下半支;曲线拐点,即 $dV/dP_{vi}=0$,系统为临界稳定,该点横坐标为系统有功功率负荷极限值,该点纵坐标为系统失稳电压幅值标么值;曲线斜率小于零时,即 $dV/dP_{vi}<0$,系统为稳定状态,对应图中 P-V 曲线的上半支,该状态下曲线斜率绝对值的大小反映了系统有功灵敏度的程度,斜率绝对值小的系统刚性好,反之刚性则较弱。由图 8 可见,同一系统不同负荷增长方向的 P-V 曲线大体趋势相同。为便于分析,以负荷增长方向为 $\cos\varphi=0.95$ 的两条曲线为例进行分析,如图 9 所示。

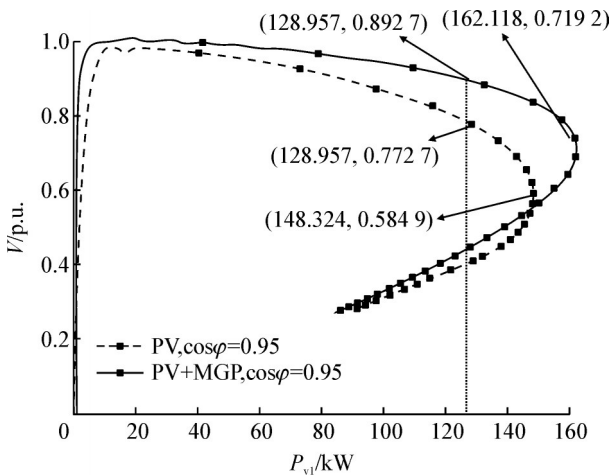


图9 $\cos\varphi=0.95$ 时两类系统的P-V 曲线图
Fig. 9 P-V curves of two types of systems with $\cos\varphi=0.95$

当 $\cos\varphi=0.95$ 时,通过 P-V 曲线的上半支可知:
1) 光伏采用 MGP 的系统曲线斜率绝对值明显小于光伏直接带载系统,说明加装 MGP 后,有功灵敏度较原系统降低,刚性变好;
2) 加装 MGP 系统后,虽然失稳点电压标么值低于原系统,但是系统传输的功率极限高于光伏逆变器。

因此,仅通过观察系统失稳电压标么值来评估两系统的静态电压稳定性不够全面,可以通过计算两系统的静态电压稳定裕度和电压降落范围来进一步分析。静态电压稳定裕度 k_p 的定义为

$$k_p=\frac{P_{\max}-P_0}{P_0}\times100\%$$

(18)

式中: $P_{\max}$ 为 P-V 曲线上系统有功功率负荷极限值,即失稳点横坐标; P_0 为当前运行点有功功率值。

类似本文 3.2 节中所述,在正常运行方式下,电力系统的静态电压稳定裕度系数 k_p 应满足 15%~20%。因此选取光伏直接带载系统有功功率负荷极限值

$P_{pv\max}$ 的 1/1.15 为两系统当前运行点有功功率值 P_0 ,即观察满足 $k_{grid}=15\%$ 时,加装 MGP 系统后静态电压稳定裕度的变化情况。电压降落范围 ΔU_{span} 的定义为

$$\Delta U_{span}=U_0-U_{uns}$$

(19)

式中: U_0 为系统当前运行点的电压标么值; U_{uns} 为失稳点电压。

由图 9 得: $P_{pv\max}=148.324\text{ kW}$, $P_0=128.957\text{ kW}$, $P_{mgp\max}=162.118\text{ kW}$; $U_{mgp0}=0.8927\text{ p.u.}$, $U_{pv0}=0.7727\text{ p.u.}$, $U_{mgpuns}=0.7192\text{ p.u.}$, $U_{pvuns}=0.5849\text{ p.u.}$, 将以上各组数据分别带入式(18)、(19)中,求得 $k_{mgp}=25.71\%$, $k_{pv}=15\%$; $\Delta U_{mgpspan}=0.1735\text{ p.u.}$, $\Delta U_{pvs\text{pan}}=0.1878\text{ p.u.}$ 。相比于未加装 MGP 系统的光伏带载系统,加装 MGP 系统后静态电压稳定裕度提高了 10.71%,电压降落范围减小了 7.61%。

为更直观分析不同负荷功率因数时 MGP 对光伏系统静态电压稳定性的提升效果,表 4、表 5 计算了两类系统在不同负荷功率因数时静态电压稳定裕度值和电压降落范围。

表4 两类系统静态电压稳定裕度值

Table 4 Static voltage stability margin for two types of systems

功率因数	静态电压稳定裕度		%
	光伏直接带载	光伏经 MGP 系统带载	MGP 提升效果
$\cos\varphi=1$	15	26.80	11.80
$\cos\varphi=0.95$	15	25.71	10.71
$\cos\varphi=0.85$	15	22.57	7.57

由表 4 可知,光伏采用 MGP 系统后,可显著提升系统静态电压稳定裕度值,并且随负荷功率因数的增大而提升效果更加明显。

表5 两类系统电压降落范围

Table 5 Voltage drop scope for two types of systems

功率因数	电压降落范围/p.u.		MGP 提升
	光伏直接带载	光伏经 MGP 系统带载	效果/%
$\cos\varphi=1$	0.191 3	0.177 6	7.16
$\cos\varphi=0.95$	0.187 8	0.173 5	7.61
$\cos\varphi=0.85$	0.179 7	0.160 7	10.57

由表 5 可知,光伏采用 MGP 系统后,可显著减小系统电压降落范围,并且在负荷功率因数较小时改善效果更加明显。

综上,由作为静态电压稳定性评估指标的静态电压稳定裕度值和电压降落情况来看,加装 MGP 系统可显著提高新能源电网的静态电压稳定性。

4 结语

本文基于 V-Q 和 P-V 曲线法,主要通过静态

电压裕度、无功裕度及电压降落范围3个关键指标,对比分析了MGP系统对光伏发电系统静态电压稳定性的提升作用。得到如下结论:

1)光伏采用MGP并网后,能够具备近似于同步调相机或同步发电机的无功特性,为系统提供有效的无功支撑,降低了对光伏逆变器无功调节容量的要求;

2)通过理论推导和仿真分析,验证了光伏发电系统采用MGP后,可显著提高原系统的静态电压稳定裕度和无功裕度,改善效果分别达到18.81%和21.21%,且在功率因数较低时具有更好的效果;

3)类似地,验证了光伏发电系统采用MGP后,可显著提高原系统的静态电压稳定裕度并减小电压降落范围,改善效果分别可达到11.80%和10.57%。

参考文献

- [1] Mallapaty Smriti. How China could be Carbon neutral by mid-century[J]. Nature, 2020, 586(7830):482-483.
- [2] 黄强,郭烽,江建华,等. “双碳”目标下中国清洁电力发展路径[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1499-1509.
Huang Qiang, Guo Yi, JIANG Jianhua, et al. Development pathway of China's clean electricity under Carbon peaking and Carbon neutrality goals[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(12): 1499-1509.
- [3] 刘运鑫,姚良忠,廖思阳,等. 光伏渗透率对电力系统静态电压稳定性影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2021: 1-13.
LIU Yunxin, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Study on the impact of photovoltaic penetration on power system static voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2021: 1-13.
- [4] 刘道伟,张东霞,孙华东,等. 时空大数据环境下的大电网稳定态势量化评估与自适应防控体系构建[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 268-276.
LIU Daowei, ZHANG Dongxia, SUN Huadong, et al. Construction of stability situation quantitative assessment and adaptive control system for large-scale power grid in the spatio-temporal big data environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 268-276.
- [5] 李京,刘道伟,安军,等. 基于强化学习理论的静态电压稳定裕度评估[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5136-5148.
LI Jing, LIU Daowei, AN Jun, et al. Static voltage stability margin assessment based on reinforcement learning theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5136-5148.
- [6] YUN Zhihao, CUI Xinhui. Online preventive control method for static voltage stability of large power grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6):4689-4698.
- [7] 杨达亮,路耕,吴宁. 具有无功补偿功能的单相并网变流器矢量控制方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(6):96-100.
YANG Daliang, LU Geng, WU Ning. Vector control method of single-phase grid-connected converter with reactive power compensation[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2018, 55(6): 96-100.
- [8] 游建章,郭谋发. 集成无功补偿和故障抑制功能的一体化变流器及其控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4186-4195.
YOU Jianzhang, GUO Moufa. Integrated converter with reactive power compensation and fault suppression and its control strategy[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4186-4195.
- [9] 熊博,李达义,周峰,等. 新型模块化多电平变流器在电力系统无功补偿中的应用研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(17): 100-105.
XIONG Bo, LI Dayi, ZHOU Feng, et al. The application research of reactive power compensation in power system based on new modular multilevel converters[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2015, 52(17): 100-105.
- [10] 涂春鸣,黄泽钧,郭祺,等. 一种具备单相接地故障调控与无功补偿能力的多功能并网型变流器[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4286-4295.
TU Chunming, HUANG Zejun, GUO Qi, et al. Multifunctional grid-connected converter with capabilities of single-phase grounding fault regulation and reactive power compensation[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4286-4295.
- [11] 程临燕,李哲,童琴,等. 基于V-Q曲线的天津电网电压稳定分析及改进措施[J]. 华北电力技术, 2017(5): 32-36.
CHENG Linyan, LI Zhe, TONG Qin, et al. Research on voltage stability in tianjin power grid based on V-Q curve[J]. North China Electric Power, 2017(5): 32-36.
- [12] 闫群民,申卓群,马永翔,等. 基于P-V曲线法的光伏电源系统电压稳定性分析[J]. 现代电子技术, 2020, 43(6): 110-114.
YAN Qunmin, SHEN Zhuoqun, MA Yongxiang, et al. Analysis of voltage stability of photovoltaic power system based on P-V curve method[J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(6): 110-114.
- [13] 陈博,李兴源,井艳青,等. 基于灵敏度方法的四川电网的电压稳定分析[J]. 华东电力, 2011, 39(10): 1638-1642.
CHEN Bo, LI Xingyuan, JING Yanqing, et al. Voltage stability analysis of Sichuan power grid based on sensitivity method[J]. East China Electric Power, 2011, 39(10): 1638-1642(in Chinese).
- [14] 刘炳辰. 高比例新能源送出系统动态无功补偿方案研究[D]. 北京:华北电力大学, 2021.

- [15]金一丁,于钊,李明节,等.新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术,2018,42(7):2095-2102.
- JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2095-2102.
- [16]许国瑞,范士雄,罗超龙,等.用于直流换流站动态无功补偿的调相机与SVC运行特性对比[J]. 华北电力大学学报,2019,46(1):47-53.
- XU Guorui, FAN Shixiong, LUO Chaolong, et al. Operation characteristic of synchronous condenser and SVC for dynamic reactive power compensation of DC converter station[J]. Journal of North China Electric Power University, 2019, 46(1):47-53.
- [17]李晨阳,黄永章,周莹坤.逆变器并联驱动MGP的矢量控制策略[J]. 大电机技术,2019(6):35-40.
- LI Chenyang, HUANG Yongzhang, ZHOU Yingkun. Vector control strategy of parallel inverters for driving MGP[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2019(6): 35-40.
- [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 Wenqi, YANG Xin, GUAN Fei, 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.
- [19]谷昱君,黄永章,杨鑫,等.新能源采用同步电机对MGP并网暂态稳定性研究[J]. 南方电网技术,2021,15(3):32-38.
- GU Yujun, HUANG Yongzhang, YANG Xin, et al. Transient stability research on renewable energy adopting motor-generator pair (MGP) for grid-connection under grid fault[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(3): 32-38.
- [20]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):12-17.
- ZHOU Yingkun, XU Guorui, HUANG Yongzhang. Experiment analysis on motor-generator pair system for providing inertia for power system with renewable energy[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2018(6): 12-17.
- [21]管飞,黄永章,杨鑫,等.光伏经新能源同步机并网小干扰模型及次同步振荡抑制作用[J]. 华北电力大学学报,2022,49(1):58-67.
- GUAN Fei, HUANG Yongzhang, YANG Xin, et al. Small signal model of photovoltaic grid-connected via motor-generator pair and the mechanism of restraining subsynchronous oscillation[J]. Journal of North China Electric Power University, 2022, 49(1):58-67.
- [22]谷昱君,黄永章,付文启,等. MGP系统参与新能源电网调频的实验研究[J]. 大电机技术,2020(1):38-42.
- GU Yujun, HUANG Yongzhang, FU Wenqi, et al. Experiment analysis on motor-generator pair system for participating in frequency modulation of power system with renewable energy[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2020(1):38-42.
- [23]HUANG Yongzhang, WANG Yuxuan, LI Chenyang, et al. Physics insight of the inertia of power system and methods to provide inertial response[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(2):559-568.
- [24]杨鑫,黄永章,管飞,等. 新能源同步机对新能源多场站短路比的提升作用[J]. 华北电力大学学报,2022,49(3):75-83.
- YANG Xin, HUANG Yongzhang, GUAN Fei, et al. Research on motor-generator pair improving multiple renewable energy stations short circuit ratio[J]. Journal of North China Electric Power University, 2022, 49(3):75-83.
- [25]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.
- WU Qianyu, HUANG Yongzhang, ZHOU Yingkun, 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.
- [26]赵俊楷. 特高压接入后河北南网电压稳定性分析[D]. 北京:华北电力大学,2017.
- 作者简介:
- 邓宏远(1996—),男,硕士研究生,研究方向为高渗透率新能源电力系统稳定与控制。E-mail:dhy_em@163.com。
- 黄永章(1962—),男,教授,研究方向为新能源电力系统稳定性、大功率电力电子器件的可靠性测试装备和测试技术等。
- 王哲凡(1999—),男,硕士研究生,研究方向为高渗透率新能源电力系统稳定与控制。
- 钟威凯(1998—),男,硕士研究生,研究方向为高渗透率新能源电力系统稳定与控制。
- 李晨阳(1996—),男,博士研究生,研究方向为高渗透率新能源电力系统稳定与控制、电力电子及电机控制等。E-mail:lichenyang1996@qq.com。
- 赵海森(1982—),男,副教授,从事高效低振动电机理论研究与设计、电机系统节能及无线电能传输等方面的研究等。