基于构网型变流器频率控制策略应用

尹翔，张效俊，冯鑫佳，程石，陶宇鑫，夏远德
（国网新疆电力有限公司，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘要：随着新能源和电力电子设备渗透率增加，电力系统的惯性和阻尼减小，稳定性降低。构网控制技术通过变流器构建起支撑大电网稳定运行的电压源，以起到快速调频调压、增加惯量和短路容量支撑、抑制宽频振荡等作用，因此逐渐受到重视。首先，通过跟网型变流器和构网型变流器的对比，说明构网控制技术更适合新型电力系统；其次，根据构网型变流器4类不同的控制策略，从原理上对这些策略的控制机理进行了分析；最后，通过采用同样的初始参数，仿真电网受到常见的扰动后不同构网控制策略对电网频率影响，验证了VSG控制策略的优越性，然后探讨VSG虚拟转动惯量和阻尼系数对系统输出频率响应的影响，为进一步深入研究提供参考。

关键词：新型电力系统；构网控制；变流器；构网储能；构网控制策略；电力系统稳定

中图分类号：TM46　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.19457/j.1001-2095.dqcd25563

Application of Frequency Control Strategy Based on Grid-forming Converter

YIN Xiang，ZHANG Xiaojun，FENG Xinjia，CHENG Shi，TAO Yuxin，XIA Yuande
（*State Grid Xinjiang Power Corporation*，*Urumqi* 830000，*Xinjiang*，*China*）

Abstract: As the penetration rate of new energy and power electronic equipment increases，the inertia and damping of the power system decrease，and the stability decreases. The grid-forming control technology builds a voltage source to support the stable operation of the large power grid through the converter，so as to play the role of rapid frequency and voltage regulation，increase inertia and short-circuit capacity support，and suppress broadband oscillation，so it has gradually attracted attention. Firstly，the differences between the grid-following converter and the grid-forming converter were compared，and the grid-forming control technology was more suitable for the new power system. Secondly，according to the four different control strategies of the grid-forming converter，the control mechanism of these strategies was analyzed in principle. Finally，by using the same initial parameters and simulating the influence of different control strategies on the power grid frequency after the power grid was disturbed by common disturbances，the superiority of VSG control strategy was verified，and the influence of VSG virtual moment of inertia and damping coefficient on the output frequency response of the system was discussed，which provides a reference for further in-depth research.

Key words: new power system; grid-forming control; current converter; grid energy storage; grid-forming control strategy; power system stability

在第七十五届联合国大会上，我国明确提出“力争于2030年前实现碳达峰”和“努力争取2060年前实现碳中和”[1]。“双碳”目标的提出，能源低碳转型将显著加快，高比例的可再生新能源和高比例电力电子设备（即“双高”）的渗透率将呈现爆发式增长。储能技术在可再生能源产业发展中占据重要地位，是支撑其可持续发展的重要技术保障，为调节这些分布式能源（distributed energy resource，DER）的运行特性，进行符合并网标准要求的功率转换，变流器是这些系统中最关键的接口[2]。DERs的高渗透率带来了潮流灵活性、辅助服务和调峰等诸多效益，但具有的间歇性、波动性等特征给电网的稳定性带来了一定挑战[3]。

传统DER变流器通常是跟网（grid-following，GFL）变流器，用于最大限度地提高DER发电量，

作者简介：尹翔（1986—），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为电网规划设计、储能及新型电力系统，Email：yinxiang524@sina.com

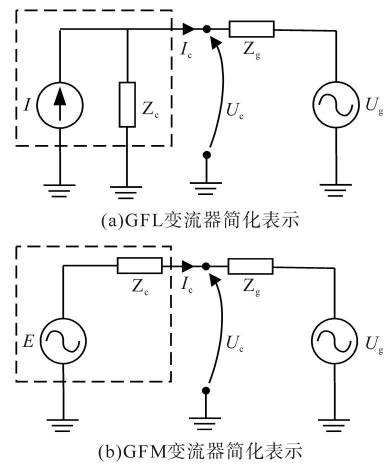
并向主电网提供高质量的电能[4]。由于缺乏对电网运行的考虑，这些传统的GFL变流器带来了系统稳定性和可靠性问题，以及由于其零惯性特性，会降低电力系统的总体惯性，使其容易受到电网变化的影响。特别是当未来新型电力系统中的电力电子变流器渗透率更高的情况下，若变流器均采用GFL控制，则系统中不存在电压源构建电压，显然该系统无法正常运行。

因此，为了保证具有“双高”和电力储能结合的新型电力系统稳定运行，需要更多的电压源型变流器控制，而非电流源变流器控制[5]。随着越来越多的同步机（synchronous machine，SM）被取代，这一问题可能会越加频繁出现。除此之外，GFL变流器所利用的锁相环（phase locked loop，PLL）对新型电力系统的稳定性有负面影响。于是构网（grid-forming，GFM）控制技术被提出。GFM变流器一般设计为电压源通过各种GFM功能与电网协同调节电压与频率，也是为了增强电力系统运行而设计的。GFM控制换流通过储能系统以及相应的控制策略，自主地建立电压以及频率，达到其GFM的功能，另外，GFM控制增加系统阻尼，提高了系统的稳定性，减少了对系统机械惯性的依赖。目前，国内外学者提出了多种GFM控制策略，如下垂控制[6]、虚拟同步发电机（virtual synchronous generator，VSG）控制[7]、匹配控制[8]、虚拟振荡器控制（virtual oscillator control，VOC）[9]等控制方法。但在新能源构网后，哪种控制策略适应性更好、受干扰能力较强的问题目前研究较少。

为了研究GFM变流器并网后对电网频率的影响以及哪种控制策略适应性更好、受干扰能力较强的问题，本文主要目标如下：首先，讨论了GFL与GFM变流器之间的差异；然后，介绍了4种GFM控制策略，并分别介绍了这4种GFM控制策略的控制机理；最后，通过基于Matlab/Simulink仿真，探讨当电网受到负荷增加和不同短路（单相短路、两相短路和三相短路）影响时，不同的GFM控制策略对电力系统频率的影响，最终得到更具有鲁棒性的构网策略。

1 GFL与GFM变流器对比

向电网提供有功和无功功率是所有变流器的共同目标。根据与电网的交互、控制器的实现和对电网变化的响应，变流器主要有两种控制技术，即GFM和GFL，两种变流器的等效结构如图1所示。



(a)GFL变流器简化表示

(b)GFM变流器简化表示

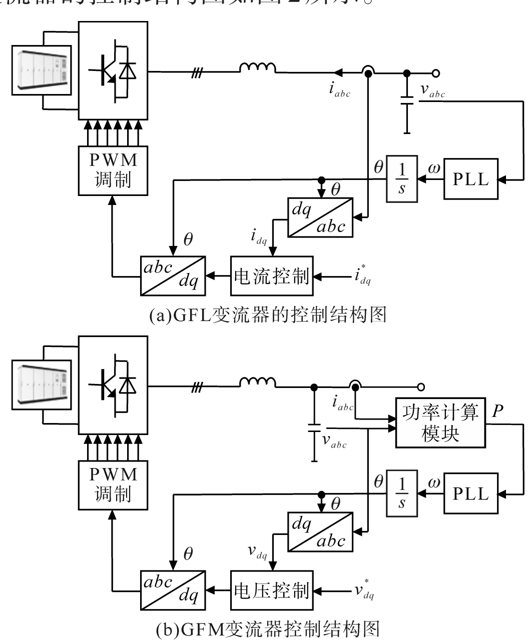
图1　GFL与GFM变流器简化表示

Fig.1　Simplified representation of GFL and GFM converters

如图1所示，GFL变流器可以简化为并联高阻抗连接到电网的理想电流源，通过直接控制输出端的电流来调节功率，而GFM变流器可以表示为一个理想电压源，通过直接控制输出端的电压来调节功率。GFL变流器依赖于电网，必须并网运行，自身无法提供电压和频率支撑，而GFM变流器可并网运行，也可离网运行，还能为系统提供虚拟阻尼和惯性。

1.1 控制方式

GFL和GFM变流器在控制方式上不同，两种变流器的控制结构图如图2所示。



(a)GFL变流器的控制结构图

(b)GFM变流器控制结构图

图2　GFL和GFM变流器控制结构图

Fig.2　GFL and GFM converter control structure diagram

典型的GFL控制包括用于与电网同步的PLL

和用于调节输出功率的矢量电流控制。GFL变流器的控制结构图如图2a所示。它主要控制交流侧电流，通过PLL跟踪电网电压相位角，随后经过坐标变换及PWM调制环节后形成控制信号反馈回开关管。GFM变流器是一种可控电压源，具有自主产生交流电压的能力。GFM变流器的一种控制结构图如图2b所示。不同于GFL变流器控制利用锁相环对电网进行同步，GFM变流器在内部设定电压参考信号，经过功率计算模块及频率下垂控制后与电网的其余部分同步。

1.2　对电网事件响应

当电网发生电压波动、短路故障等事件时，GFL与GFM变流器响应方式不同。图3以图形方式展示了电网电压扰动下这2种变流器的响应。图中虚线表示突变前的向量关系，实线表示突变后的向量关系。

当电网受到扰动后，GFL变流器由于其固有的电流源特性，保持电流向量$\boldsymbol{I}_g$在幅度和相位上恒定，因此导致变流器电压向量$\boldsymbol{V}_c$不可避免地发生变化。为了计算新的电流设定值，需要检测向量$\boldsymbol{V}_g$的新相角；GFM变流器由于其固有的电压源特性，保持电压向量$\boldsymbol{E}$在幅度和相位上恒定，因此导致电流向量$\boldsymbol{I}_g$瞬间变化，从而危及变流器组件。

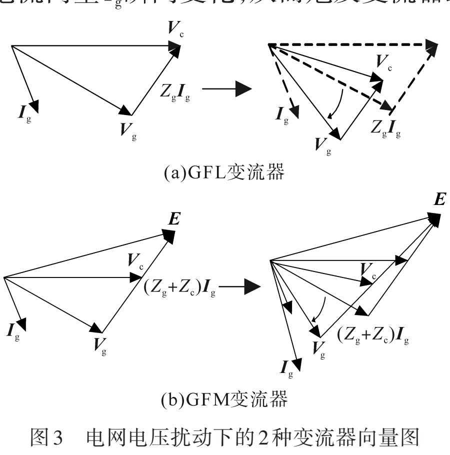


图3　电网电压扰动下的2种变流器向量图

Fig.3　Phasor diagram of two converters under voltage disturbance of power grid

1.3　同步策略

与电网同步时，GFL与GFM变流器所采用的策略不同：GFL变流器利用PLL来实现与电网同步，而GFM变流器一般采用功率控制实现与电网同步。两种变流器同步策略如下：

1.3.1　GFL变流器同步策略

GFL变流器需要通过安装PLL测量电网电压以及相位信息，然后与电网同步。GFL变流器需要PLL来实现与电网的同步，则GFL换流器不可以接入无源系统，不能工作在孤岛模式。

1.3.2　GFM变流器同步策略

对于GFM变流器，扰动开始时的功率传递用下式表示：

$$P = \frac{V_s V_r}{X}\sin\Delta\delta \tag{1}$$

式中：V_s为发送端或内部电压；V_r为接收端或电网电压；X为耦合阻抗；$\Delta\delta$为内部电压与电网电压相位角差，也称作虚拟功角。

对于式（1）中的$\Delta\delta$可以用下式表示：

$$\mathrm{d}\Delta\delta/\mathrm{d}t = k_p(P^* - P) \tag{2}$$

根据式（1）和式（2）得到GFM变流器的功率同步过程。若初始时$P^*<P$，则有$\mathrm{d}\Delta\delta/\mathrm{d}t<0$，$\Delta\delta$呈减小趋势，$P$减小，$P^*$与$P$的差值增加，持续到$P^*=P$，$\Delta\delta$不再变化，变流器完成同步。

1.4　适用场景

如前文所述，GFL变流器所采用的锁相环控制方式虽技术相对成熟，但在电网强度相对较弱的环境下，容易和电网中的电抗产生强耦合，导致对电力电子装置占比较多的新型电力系统稳定性产生较大影响，更不易于和储能部分装置的耦合。与GFL变流器不同，GFM变流器呈现为电压源特性，且放弃了锁相环的控制模式，使得在弱电网条件下更加稳定。GFM变流器所采用的功率同步控制策略在发电侧输出波动时，直接对于有功功率及无功功率进行调整同步，相比于锁相环需测量电网频率及其输出相位才能实现控制同步更为有效且灵活。因此在新型电力系统中电网强度相对传统电网相对较弱的大背景下，GFM储能技术是比GFL技术更好的选择。

此外，GFL变流器需要安装PLL来检测电网电压及频率，以实现与电网同步。GFM变流器无需依赖外部所传输相位信息，即可自行进行功率控制同步，因此与GFL变流器相比适用场景更多，在孤岛和并网模式下均可工作。

通过控制方式、对电网事件响应、同步策略和适用场景这4个方面对比GFL与GFM变流器，得出GFM变流器更适用于新型电力系统，并对新型电力系统稳定运行提供有效支撑。

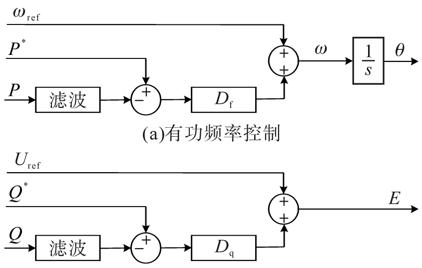
2　GFM控制策略

为了使GFM逆变器在不同工作条件下实现

期望的功能和性能，人们提出了多种GFM控制策略。本文介绍了4类常见的GFM控制策略，分别是：下垂控制、VSG控制、匹配控制和虚拟振荡器控制。

2.1　下垂控制

下垂控制概念源于使多台SM并联运行的调速器动作，是本文讨论的4类GFM控制策略中最简单、最常见的策略之一。下垂控制策略是在多个并联逆变器同时运行的情况下，根据一定的下垂曲线，调节GFM变流器在并网和孤网运行时的输出电压和频率，达到同步的目的。下垂控制的控制框图如图4所示。



(a)有功频率控制

(b)无功电压控制

图4　下垂控制框图

Fig.4　Droop control block diagram

首先，将设定值P^*（Q^*）与滤波后的测量功率P（Q）之间的差值通过比例增益D_f（D_q）后得到频率（电压）调节项；其次，将该量与参考值ω_{ref}（U_{ref}）相加，计算出GFM变流器内部ω（E）值，下垂控制方程用下式表示：

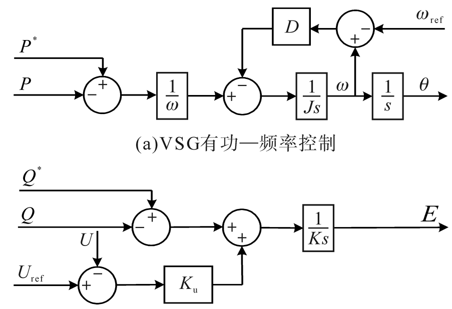
$$\begin{cases}\omega = \omega_{ref} + D_f(P^* - P) \\ E = D_{ref} + D_q(Q^* - Q)\end{cases} \tag{3}$$

在电网中有多个并联GFM变流器并网运行时，任何扰动或波动都可能引起工作点移位，从而导致并联变流器之间输出功率和功率分担发生变化。因此，P—f下垂控制函数用于调节变流器的输出频率，以防止系统进一步增加/减少其输出功率，类似于旋转SMs，这种频率调整改变变流器电压的相位角，从而调节其有功发电量；同时，Q—U下垂控制实现了防止并联GFM变流器内无功循环的功能，通过调整变流器输出电压的大小，为系统提供电压支撑。

下垂控制结构简单，控制响应速度快。但容易受到线路阻抗不匹配、负荷波动等因素的影响，导致逆变器间产生环流，难以实现功率的精确分配；并且下垂控制不具有惯性和阻尼特性，容易引起系统电压和频率振荡，应用场景主要集中于微网工况。

2.2　VSG控制

VSG控制是一种模拟同步电机的直接控制方法，可以模拟出同步电机的转动惯量和阻尼特性[10]。该控制模型是基于一个完整的双轴的同步电机模型，包括定子绕组、阻尼器绕组和励磁绕组。电机电流根据共耦合点测量电压后实时计算并提供给电网。VSG有功—频率（P—f）、无功—电压（Q—U）控制框图如图5所示。



(a)VSG有功—频率控制

(b)VSG无功—电压控制

图5　VSG控制框图

Fig.5　VSG control block diagram

VSG控制的P—f控制如图5a所示，通过构造一个虚拟调速器来模拟SMs的一次调频函数，其频率动态调节过程方程用下式表示：

$$J\omega = (P^* - P)/\omega - D(\omega_{ref} - \omega) \tag{4}$$

式中：J，D分别为虚拟转动惯量和阻尼系数。通过对ω进行积分，生成变流器输出电压相位参考值θ。

VSG的Q—U控制如图5b所示，VSG的Q—U控制环节类似于模拟SMs励磁调节效果的虚拟励磁控制器，其主要电压调节功能是在Q—U降压控制的基础上实现的，表达式用下式表示：

$$E = [(U_{ref} - U)K_u + (Q^* - Q)]/Ks \tag{5}$$

式中：E为通过Q—U控制得到的参考电压值，与通过P—f控制得到的θ合成为VSG参考电压；Q^*，U_{ref}，U，K_u，K分别为参考无功功率、参考电压、VSG输出电压、Q—U下垂系数和积分系数。

VSG控制策略具有良好的优越性，易于实现，并且以VSG为主题框架的控制技术可安装在网侧变流器上，补充系统的旋转惯量和阻尼，增强系统稳定性，因此适用场景广泛，但其直流电压不可控[11]。

2.3　匹配控制

考虑到变流器直流电压和SMs角速度、直流电流与SMs机械转矩之间存在匹配关系，因此有学者提出匹配控制。与传统的SMs控制不同，匹配控制将直流链路电容器视为同步电机惯性转

矩,用直流链路电压来匹配同步电机的机电能量传输,从而实现与电网的同步。匹配控制方法的控制框图如图6所示。

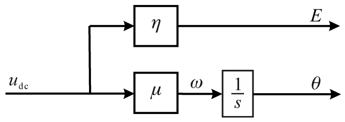


图6　匹配控制框图

Fig.6　Matching control block diagram

图中,u_{dc}为直流母线电压,μ和η为匹配系数,为常系数。将直流母线电压乘以匹配系数η得到参考电压幅值E;u_{dc}乘以匹配系数μ得到频率ω,然后再通过积分环节得到参考电压相位θ。

与前2种控制策略不同,匹配控制的直流电压可控,并具有低时延的优点。但匹配控制需要足够的直流电容容量,因此适用于多个风机直流端并联或直流电网系统,不适用于单个风机控制[11]。

2.4　虚拟振荡器控制

VOC是一种新的控制方法,通过模拟极限环振荡器(如死区振荡器和范德堡尔振荡器)的动态特性来输出电压相量。VOC控制框图如图7所示。图中,σ,R,L,C分别为虚拟电导、电阻、电感、电容,其中电阻$R=-1/\sigma$;α为非线性特性;k_v,k_i分别为电压和电流的比例因子。调制信号e直接由输出电容电压v_c适当地按k_v系数进行缩放得到。

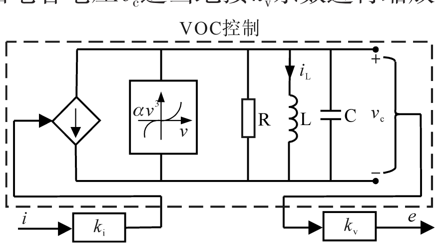


图7　VOC框图

Fig.7　VOC block diagram

图7所示的VOC中,不能满足功率的调节,因此不适合进行并网应用。因此有学者基于此做了改进,提出了可调度的虚拟振荡控制(dispatchable virtual oscillator control,dVOC)[12],实现了对变流器有功和无功的控制。

虽然有很多学者对VOC做了改进,但逆变器采用VOC策略时,输出的电压存在明显的3次谐波,因此,这种控制策略只适用于孤岛情况。

3　GFM控制策略实验验证及结论

为了验证当电网受到扰动(负荷增加和短路)后,不同GFM控制策略对电网稳定性影响,本文使用Matlab/Simulink对图8所示的IEEE 9节点系统电磁暂态仿真模型(以下简称"系统")进行仿真验证[13]。网络基本负荷在节点5、节点7和节点9均匀分布,数值为2(标幺值);而负荷增加仅作用于节点7,数值为0.75(标幺值)。

通过节点1处的频率来评估系统频率。all-SMs表示全同步电机系统;SM-Droop,SM-VSG,SM-Matching,SM-dVOC表示:节点1由1个SM馈入,两个变流器(图8中节点2和节点3)使用相同的控制策略,从而产生4种不同SM-GFM配对模型。本文的扰动包括节点7受负荷增加和节点6发生3种接地短路(0.15 s后短路切除)。

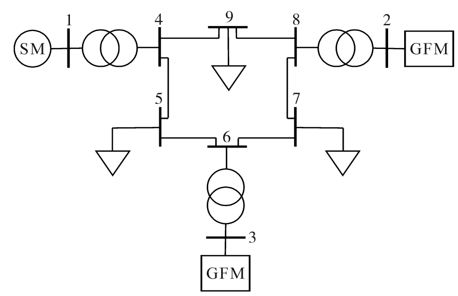


图8　IEEE 9节点系统电磁暂态仿真模型

Fig.8　IEEE 9-node system electromagnetic transient simulation model

3.1　系统受到扰动下的频率响应

作为基准,选取3个相同SMs的all-SMs系统,即节点1~节点3馈入3个SMs,系统在0.1 s受到扰动后系统频率影响如图9所示。

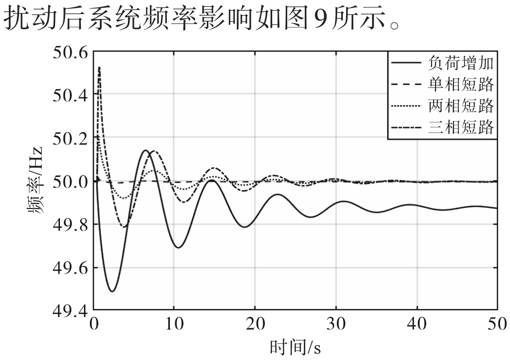


图9　系统受到扰动后,all-SMs对系统频率影响

Fig.9　The all-SMs affects the system frequency after the system is interfered

3.2　不同控制策略在系统受到扰动的频率响应

为了研究第2节中介绍的4种GFM控制策略在系统受到扰动后对系统频率的影响,将节点1馈入SM,节点2、节点3馈入GFM变流器,并使用相同的控制策略。系统负荷增加,不同控制策略对系统频率影响如图10所示。系统发生3种接地故障,不同控制策略对系统频率影响如图11~图13所示。

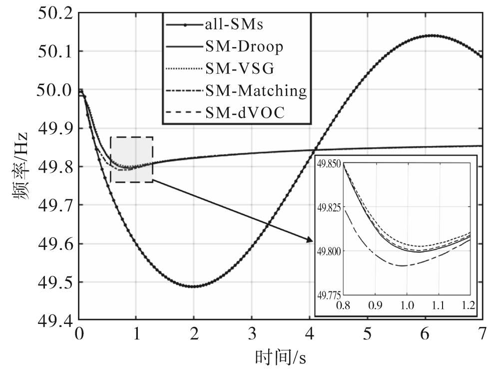


图10 系统负荷增加后,不同控制策略对系统频率的影响

Fig.10 Influence of different control strategies on system frequency after system load increases

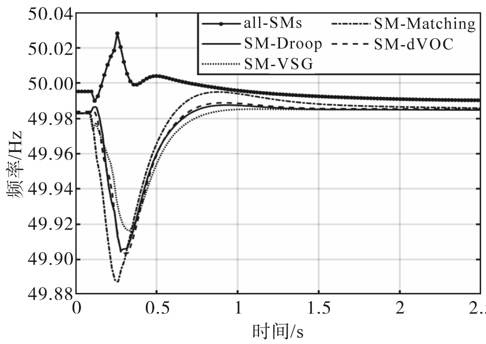


图11 系统发生单相短路,不同控制策略对系统频率的影响

Fig.11 Influence of different control strategies on system frequency when single-phase short circuit occurs in the system

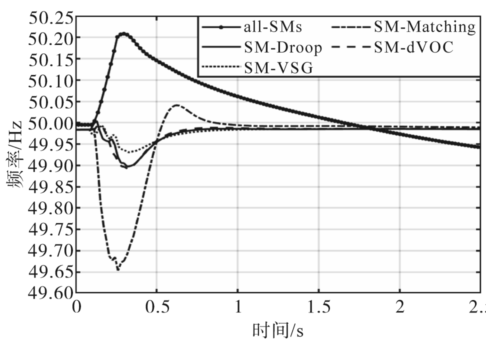


图12 系统发生两相短路,不同控制策略对系统频率的影响

Fig.12 Influence of different control strategies on the system frequency when two-phase short circuit occurs in the system

由图10~图13可知:当系统受到扰动(负荷增加和短路)情况下,无论选取哪种控制策略,与全同步电机(all-SMs)系统相比,GFM控制的存在改善了系统频率指标。对于系统负荷增加或发生任何短路,变流器能够比SMs更快地做出反应,这一结果表明,GFM控制策略具有快速响应。

对比4种控制策略,下垂控制和dVOC表现有相似的性能,证实了dVOC和下垂控制具有相似的下垂行为;相比其他控制策略,VSG的适应性、受干扰能力较强,更具有鲁棒性;使用匹配控

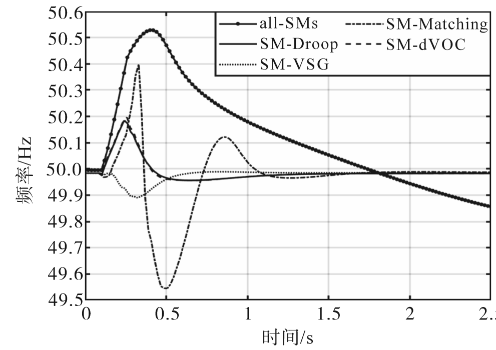


图13 系统发生三相短路,不同控制策略对系统频率的影响

Fig.13 The influence of different control strategies on the system frequency when three-phase short circuit occurs in the system

制的效果较差。

3.3 VSG虚拟转动惯量和阻尼系数对系统输出频率响应的影响

图14和图15为系统在0.1 s受到扰动后系统的变化曲线,其分析了VSG控制的虚拟惯量J和阻尼系数D对系统频率影响。阻尼系数保持为1(标幺值)时,虚拟惯量对系统频率影响如图14所示;虚拟惯性保持为1(标幺值)时,阻尼系数对系统频率影响如图15所示。图14和图15中的虚拟惯量J和阻尼系数D均为标幺值。

通过图14和图15可以看出:对VSG控制增加虚拟惯量和阻尼系数,系统的频率振荡和调节时间减少,加快系统进入稳态。因此,在一定范围内,可以通过适当调节VSG控制技术的虚拟惯量或阻尼系数,加快系统的响应速度,提高系统频率稳定性。

3.4 实验结论

针对4种常见的GFM控制策略,使用IEEE 9节点母线测试系统来研究不同控制策略的性能以及对电网频率的影响。最终实验结果得出:

1)与基准全部为SMs系统相比,GFM控制策略的存在改善了电网的频率稳定;

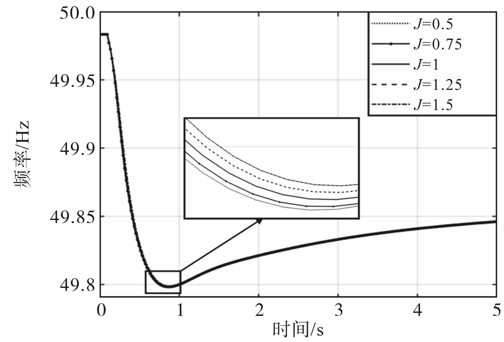
2)不同GFM控制策略对电网的影响有相似的性能;

3)变流器具有较SMs更快的快速响应速度;

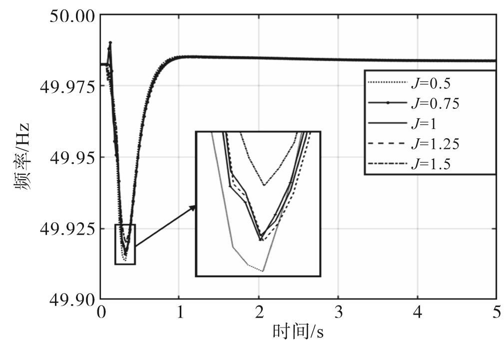
4)VSG与其他控制策略相比,适应性较好、受干扰能力较强,在电网中更具有鲁棒性;

5)当电力系统受到干扰时,在一定范围内,可以通过调节VSG控制策略的虚拟惯量和阻尼系数来提高系统频率稳定性。

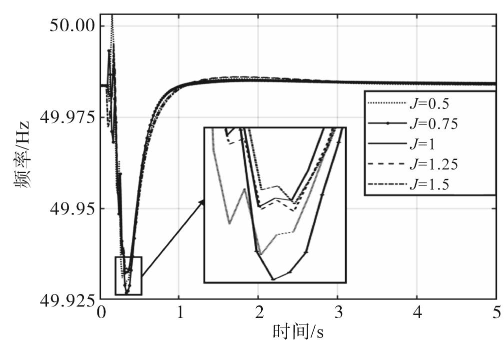
针对未来电力系统,在此基础上可做进一步深入研究:



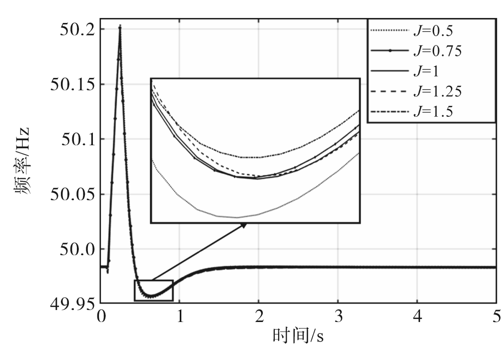
(a)系统负荷增加，不同虚拟惯量对系统频率的影响



(b)系统发生单相短路，不同虚拟惯量对系统频率的影响



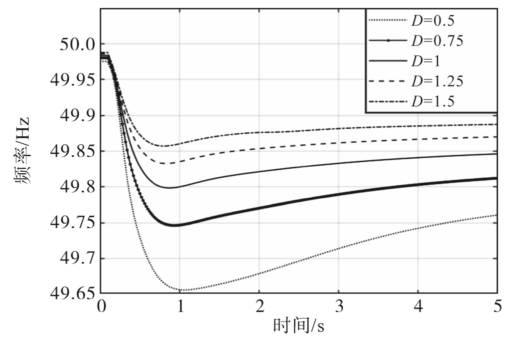
(c)系统发生两相短路，不同虚拟惯量对系统频率的影响



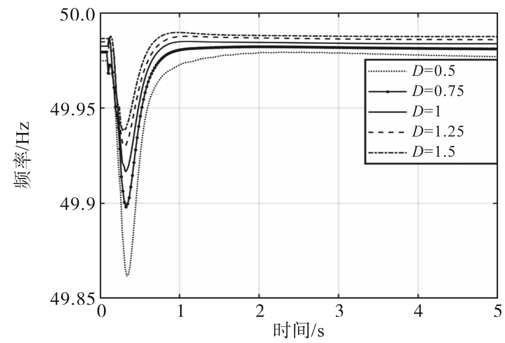
(d)系统发生三相短路，不同虚拟惯量对系统频率的影响

图14　系统受到扰动后，VSG控制策略的不同虚拟惯量对系统频率的影响

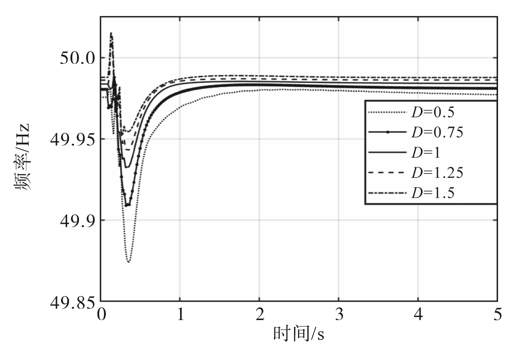
Fig.14　The different virtual inertia of VSG control strategy affects the system frequency after the system is disturbed



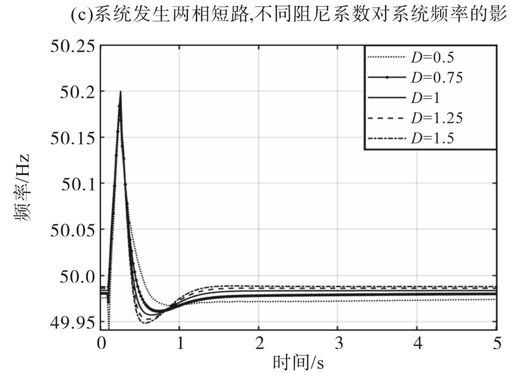
(a)系统负荷增加，不同阻尼系数对系统频率的影响



(b)系统发生单相短路，不同阻尼系数对系统频率的影响



(c)系统发生两相短路，不同阻尼系数对系统频率的影响



(d)系统发生三相短路，不同阻尼系数对系统频率的影响

图15　系统受到扰动后，VSG控制策略的不同阻尼系数对系统频率的影响

Fig.15　The different damping coefficients of VSG control strategy affect the system frequency after the system is disturbed

1）GFL与GFM操作之间的无缝过渡，然后根据不同控制策略的特点，将不同的控制策略混合成一个控制器，实现它们的互补优势；

2）针对VSG控制提出更有效的控制策略，使该策略对负荷波动所引起的过流和电网故障更具有鲁棒性。

参考文献

[1]　余果，吴军，夏热，等. 构网型变流器技术的发展现状与趋势研究[J]. 综合智慧能源，2022，44（9）：65-70.

YU Guo,WU Jun,XIA Re,et al. Study on the status quo and development trend of grid-forming converter technology[J]. Integrated Intelligent Energy,2022,44(9):65-70.

[2] 蔡文斌,程晓磊,南家楠,等.高比例新能源电力系统灵活性资源充裕性评估分析[J].电气传动,2022,52(20):57-62.
CAI Wenbin,CHENG Xiaolei,NAN Jianan,et al. Assessment and analysis of adequacy of flexibility resource of power system with high proportion new energy[J]. Electric Drive,2022,52(20):57-62.

[3] 王晓阳,赵晋斌,朱宇昕.多变流器并网系统小干扰稳定性分析综述[J].电气传动,2022,52(20):3-10,24.
WANG Xiaoyang,ZHAO Jinbin,ZHU Yuxin.Small-signal stability analysis of multiple-grid-connected-converter system:an overview[J]. Electric Drive,2022,52(20):3-10,24.

[4] ALAM M S,AL-ISMAIL F S,SALEM A,et al. High-level penetration of renewable energy sources into grid utility:challenges and solutions[J]. IEEE Access,2020,8:190277-190299.

[5] MATEVOSYAN J,BADRZADEH B,PREVOST T,et al. Grid-forming inverters:are they the key for high renewable penetration[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2019,17(6):89-98.

[6] CHANDORKAR M C,DIVAN D M,ADAPA R. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1993,29(1):136-143.

[7] VISSCHER K,DE HAAN S W H. Virtual synchronous machines(VSG's)for frequency stabilisation in future grids with a significant share of decentralized generation[C]//IET-CIRED Seminar 2008:Smart Grids for Distribution,Frankfurt,Germany,2008:334-337.

[8] ARGHIR C,JOUINI T,DÖRFLER F. Grid-forming control for power converters based on matching of synchronous machines[J]. Automatica,2018,95:273-282.

[9] SINHA M,DÖRFLER F,JOHNSON B B,et al. Uncovering droop control laws embedded within the nonlinear dynamics of van der pol oscillators[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems,2017,4(2):347-358.

[10] 许诘翊,刘威,刘树,等.电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J].电网技术,2022,46(9):3586-3594.
XU Jieyi,LIU Wei,LIU Shu,et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology,2022,46(9):3586-3594.

[11] 李建林,丁子洋,刘海涛,等.构网型储能变流器及控制策略研究[J].发电技术,2022,43(5):679-686.
LI Jianlin,DING Ziyang,LIU Haitao,et al. Research on grid-forming energy storage converters and control strategies[J]. Power Generation Technology,2022,43(5):679-686.

[12] COLOMBINO M,GRO D,BROUILLON J.Global phase and magnitude synchronization of coupled oscillators with application to the control of grid-forming power inverters[J]. IEEE Transations on Automatic Control,2017,64(11):4496-4511.

[13] TAYYEBI A,GROB D,ANTA A.Frequency stability of synchronous machines and grid-forming power converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2020,8(2):1004-1018.

收稿日期:2023-12-19
修改稿日期:2024-03-06

(上接第10页)

nent magnet synchronous motor of hybrid electric vehicle[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology,2013.

[6] 陈宇峥.永磁同步电机弱磁控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2018.
CHEN Yuzheng. Research on the flux-weakening control strategy of permanent magnet synchronous motor[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2018.

[7] 刘杰.永磁同步电机弱磁控制研究[D].天津:河北工业大学,2019.
LIU Jie. Research on flux-weakening control of permanent magnet synchronous motor[D]. Tianjin:Hebei University of Technology,2019.

[8] 谢明睿.永磁同步电机磁链辨识及弱磁控制研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
XIE Mingrui. Research on flux identification and flux-weakening control of permanent magnet synchronous motor[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2021.

[9] NICOLA B,SANDRO C,ROBERTO P. Analytical design and autotuning of adaptive flux-weakening voltage regulation loop in IPMSM drives with accurate torque regulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2020,56(1):301-313.

收稿日期:2024-04-30
修改稿日期:2024-08-12