

电力电子并网装备的同步稳定分析与统一同步控制结构

黄林彬¹, 辛焕海¹, 鞠平¹, 胡家兵²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:随着新能源、直流输电、储能等技术的发展,大规模电力电子装备接入电网并深刻地改变着现代电力系统的动态特性。与同步发电机不同,电力电子装备由半导体开关器件所构成,它与电网之间的同步特性不是由物理旋转的转子主导,而是由相应的控制策略决定,即电力电子装备的大规模渗透使得电力系统逐渐由同步发电机主导的“物理同步”转变为“控制同步”。电力电子装备的高可控性与灵活性为提高电力系统的同步稳定性和动态性能提供了可能,但目前由于对电力电子装备“控制同步”特性的认识尚未完全清晰,难以做到发挥电力电子装备的优势以提升系统动态性能,甚至在很多情况下还会因为同步控制设计的不合理而出现同步失稳现象,危及电力系统安全稳定运行。为此,简要回顾当前电力电子装备的同步稳定分析与控制设计等方面的成果,并基于现有的同步控制结构,提出一种涵盖了锁相环型控制与组网型控制的统一同步控制结构,通过将不同类型的同步控制结构解析为控制回路之间连接方式的不同,进而将不同的同步控制结构参数化,并以此探索更优的同步控制结构。最后,对现有的同步稳定分析方法、技术路线与物理认识进行总结,并从中凝练出未来可能的研究方向。

关键词:电力电子装备;同步稳定;控制同步;锁相环;组网型控制;统一同步控制结构

中图分类号:TM 34;TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009042

0 引言

(1)研究背景。

新能源、电动汽车、变频负荷以及电池储能技术的广泛应用使现代电力系统在源-网-荷-储各环节都包含高比例的电力电子装备^[1-8](本文中电力电子装备特指电压源型并网变流器VSC(Voltage Source Converter),为表述方便,后文将其简称为“变流器”)。电力电子装备无论是在物理结构方面还是在控制策略方面均与同步发电机的特性迥异^[9-10]:同步发电机的电压动态(含相位、频率和幅值)由大惯量转子的运动方程以及励磁绕组主导;而电力电子装备没有物理的转子,其电压动态由相应的控制策略主导。因此,高比例电力电子装备的渗透极大地改变了现代电力系统的动态特性。

在传统电力系统中,由于系统总是不断遭受到或大或小的扰动,因此各个同步发电机总是在一定程度上面临着失去同步的风险:因为阻尼转矩不足而引起同步机低频振荡,发电机之间无法良好同步,即小干扰功角失稳(小干扰同步失稳)^[11-14];受到大干扰时(如短路、直流闭锁等)同步机出现非周期性的同步失稳现象,即暂态失稳(或大干扰同步失

稳)^[14]。同步发电机的同步稳定也常被归类为功角稳定问题,目前已经得到了充分的研究,理论成果指导了电力系统的稳定控制设计和实时运行。然而,当电力系统中电力电子装备主导了系统的同步特性后,系统母线电压的相角和频率由电力电子装备的输出频率以及同步发电机的转速共同决定,这使现代电力系统的同步稳定分析与同步控制设计更为复杂。

(2)同步的定义。

在物理研究中,系统的同步主要可分为“频率同步”与“相位同步”^[3]。考虑一个含有 n 个振荡子的复杂系统,其中第 i 个振荡子(此处的振荡子可以理解为是系统中的源,如同步发电机、电力电子装备等)的相位是关于时间 t 的函数,记为 $\theta_i(t)$,相应的频率是 $\dot{\theta}_i(t)$,则系统的“频率同步”是指当 $t \rightarrow \infty$ 时,系统中每个振荡子的频率均收敛到一个恒定的共同频率值 ω_{sync} 。当系统实现频率同步后各振荡子之间的相位差 $|\theta_i(t) - \theta_j(t)|$ 将维持恒定(例如电力系统稳态下功角保持恒定),因此频率同步也称“相位锁定”。此外,系统的“相位同步”则是指当 $t \rightarrow \infty$ 时,系统中每个振荡子的相位一致,即振荡子之间的相位差为0(有些文献中则是把相位锁定也归类为相位同步)。当系统达到相位同步时,也达到了频率同步;反之,频率同步却不要求系统达到相位同步。

根据上述定义,电力系统的同步指的是“频率同步”(即“相位锁定”),此时每个电源之间的相位差保持恒定从而实现功率的平稳传输,且每个电源的稳

收稿日期:2020-07-24;修回日期:2020-08-14

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(适应高比例新能源接纳的电网强度评估及优化方法研究)(521104200031)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Power Company Limited(Power Grid Strength Evaluation and Optimization to Accommodate High-penetration Renewables)(521104200031)

态频率趋于一致,达到同步稳定。当然,电力系统还要求稳态频率达到其额定值,且暂态过程中各电源的频率应在一定的范围之内从而保证电网的频率稳定。下文中提及的“同步”均指的是系统的“频率同步”。

由于交流电网的固有特性,所以电力系统的功率传输过程实际上也是各台同步发电机实现同步的过程。多台同步发电机之间的同步实际上是由交流电网的功率传输特性以及发电机转子摇摆特性决定的,已有研究表明多台同步发电机的摇摆与同步过程实际上可以用Kuramoto耦合振荡子的同步过程来解释,这也是各台同步发电机可以维持同步的机理^[3,15]。

(3) 电力电子装备高渗透下系统同步特性的转变。

由于电力电子装备不具备物理的旋转结构,其输出频率由控制策略决定,因此电力电子装备的大规模渗透实际上使电力系统逐渐由同步发电机主导的“物理同步”转变为电力电子装备主导的“控制同步”。

这种同步方式的转变使现代电力系统的同步特性变得更加复杂,也会出现一些新的同步稳定问题。一方面,电力电子装备往往需要复杂的控制回路以实现多个控制目标,因此呈现出宽频带、非线性的动态特性,并且由于多控制回路之间往往呈现强耦合,控制参数众多难以整定,实际中易出现复杂的宽频带小干扰同步失稳现象^[16-19]。另一方面,由于电力电子器件无法承受较大的短路电流/暂态电流,因此在受到大干扰时可能需要复杂的控制切换/饱和环节以保护电力电子器件不因过流/过压而损坏,这些控制切换和饱和环节的存在使电力电子装备的动态特性更为复杂,并且在干扰下可能发生复杂的暂态失稳(或大干扰同步失稳)^[20-27]。

值得一提的是,传统电力系统的同步问题往往关注各台同步发电机内电势的相位(即转子的相位),该相位由摇摆方程直接决定,且是系统的状态变量。相比之下,当研究电力电子装备的同步问题时,常关注的是控制器 dq 坐标(用于Park变换的坐标)的相位,且该相位一般不等于电力电子装备内电势的相位。此时,电力电子装备的电压相位(内电势或端口电压相位)实际上可能是系统的输出变量而不是状态变量,该相位在扰动下由于控制的作用可以发生突变,即:随着电力电子装备的大规模渗透,电力系统的同步特性也逐渐从“状态同步”(状态变量之间的同步)转变为“输出同步”(输出变量之间的同步^[28]),系统的同步问题也逐渐转变为输出同步问题。

电力系统在同步特性方面虽然复杂,但往往具有可观性,所以系统的输出同步在很多情况下也可等价变换为状态同步。在电力电子装备的同步分析

过程中,可以选择不同的观察视角或建模方法,例如关注其同步环节的状态变量的同步。如此,高比例电力电子装备电力系统的同步过程实际上是由同步发电机的功角动态与电力电子装备的虚拟功角动态决定(虚拟功角是由同步控制环节决定的系统状态变量^[20,22],后文将进一步解释),系统的同步可建模和理解同步发电机的功角和电力电子装备的虚拟功角这些状态变量之间的同步,从而可借鉴传统电力系统的状态同步特性认识高比例电力电子装备电力系统的复杂同步问题。

虽然电力电子装备的大规模渗透给现代电力系统的建模和分析均带来了巨大的挑战,但与同步发电机相比,电力电子装备具有高度的可控性与灵活性,可以实现端口电压与频率的快速控制。具体而言,同步发电机的频率/相位响应通常较为缓慢,相比之下,电力电子装备由开关器件所构成,其频率完全由控制器决定,可实现对频率/相位的快速控制^[29]。因此,通过合理的控制,理论上电力电子装备可以克服由于自身多控制回路的强耦合、切换环节而引起的新同步稳定问题,并利用自身的高可控性帮助解决电力系统中同步发电机固有的同步稳定难题。

(4) 现有的同步控制结构的局限性。

目前电力电子装备的控制设计(包括控制结构设计以及参数整定)主要依靠工程经验以及对单机并网系统的分析,并非严谨地由系统科学或控制理论得到,这使得电力电子装备接入实际电网时,可能因为电网复杂的结构以及运行工况而出现各种各样的稳定问题^[30-31]。例如,在我国以及美国的风电场已经多次发生振荡现象;伦敦的“8·9”停电事故中,风电场发生振荡引发连锁事故^[32]。当前,众多研究表明在一些直驱风机的振荡问题中,风机的同步单元(即锁相环)动态参与度非常大,这类振荡问题也是电力电子装备的小干扰同步稳定问题,其振荡特性应该由相位回路动态主导^[33-34]。

锁相环是当前电力电子装备最常采用的并网同步单元,其结构简单,强电网下性能稳定,在单机系统下(特别是锁相环的测量点接近无穷大母线时)可以方便地实现装备的解耦控制^[35]。但锁相环是被动地跟踪电网频率,当电网中有多个锁相环设备时,设备与设备之间还可能存在控制回路之间的强耦合,特别是当远距离输电时,这种耦合关系还会加重,甚至使系统产生振荡而失稳^[16-17,36]。另一种常见的并网同步控制形式是组网型的同步控制单元(主要包括 P - f 下垂控制、虚拟同步机等控制方式),这类控制方式的特点是可以使电力电子装备主动地建立频率,避免了被动地跟随电网频率,但在大干扰下大多需要进行控制切换以避免与电网的失步^[22,37]。

上述这些同步控制器的设计主要是依靠长久以来在电机以及电力电子装备控制方面的工程经验,有些则是对现有设备动态的模拟(例如虚拟同步机^[38-46]),其控制结构的设计基于单机无穷大系统,很少考虑到电网中多机复杂耦合以及复杂的工况和各类扰动。而除了这些同步控制器之外,目前也无法回答“是否存在更优的同步控制结构”这一问题。

寻找更优的同步控制结构需要对系统的同步原理、稳定特性与动态特征具有清晰的理论认识,更需要在此基础上明确高比例电力电子装备下的电力系统在系统层面的需求与目标,并结合系统科学与控制理论进行优化与设计。但目前对于这种系统的同步特性未有清晰以及深刻的认识,很多研究尚处于起步阶段,难以做到为高比例电力电子装备电力系统的同步设计提供理论支撑。一方面,对于现有同步单元在复杂电网工况下的稳定性与动态特征缺乏全面的量化分析;另一方面,在一些复杂的场景与需求下现有的同步单元难以适用,但目前由于对稳定机理认识的局限性导致难以设计出更优的同步控制结构。

为了深化当前对高比例电力电子装备电力系统同步特性的认识,本文将简要地回顾当前电力电子装备主要的同步控制结构、同步稳定形态以及相应的同步稳定分析和控制设计方法,并在此基础上比较不同类型同步控制结构的优劣。本文着重于电力电子装备单机并网系统(即装备与电网电源之间)的同步稳定性,而关于电力电子装备与同步机电源以及多类型电力电子装备之间的同步特性则是未来需要研究的内容,文献^[10]对这些多类型装备之间的“广义同步稳定性”的研究途径进行了非常好的论述。值得一提的是,多机系统的同步问题关注于并网装备间的相位差能否收敛,此时如果选择某装备的相位为参考相位,则系统同步稳定问题就变为李雅普诺夫稳定问题。特别地,当研究单机系统的同步问题时,常将其简化为装备与无穷大母线的相位差能否稳定于其平衡点的问题。同时,本文提出一种统一同步控制结构,该结构涵盖了当前锁相环型控制和组网型控制的结构,并将不同类型同步单元的差异诠释为不同控制回路的连接方式,进而将不同的同步控制结构参数化。最后,对现有的同步稳定分析方法、技术路线与物理认识进行总结,并从中凝练出未来可能的研究方向。

1 电力电子装备的同步控制

本节将介绍当前一些常用的同步控制结构,并对其实现方式以及基本的同步原理进行简要的介绍。

1.1 同步控制结构分类

目前,电力电子装备常采用锁相环同步单元实

现并网,若忽略与其他回路的耦合,则锁相环可以近似为一个对电压相位进行跟踪的二阶环节^[35,46-47]。

除锁相环以外,还存在 P - f 下垂控制^[48]、虚拟同步机控制^[38-40]、直流电容自同步控制^[49-50]、虚拟振荡子控制^[51]等多种同步控制方式,这几类在许多文献中被归类为“组网型控制”(即 grid-forming control^[29,50,52-54],中文也译为“电网构造型控制”),这样归类的原因主要是考虑到采用这些控制的变流器具有孤岛运行/单机带负荷的能力,此时变流器直流侧电容电压通常需要由其他元件/设备来维持于额定值^[52]。组网型控制在物理上是通过“主动地”建立频率电压信号以实现并网同步,变流器可视为独立的振荡子且可以进行多装备组网运行。文献^[52]还指出采用电网跟踪型控制(grid-following control)策略的变流器表现为电流源特性,且必须接入到有源的交流电网中。

为方便叙述,下文用“锁相环型变流器”表示采用锁相环进行并网同步的变流器,而“组网型变流器”则特指采用 P - f 下垂、虚拟同步机这些同步方式的变流器。

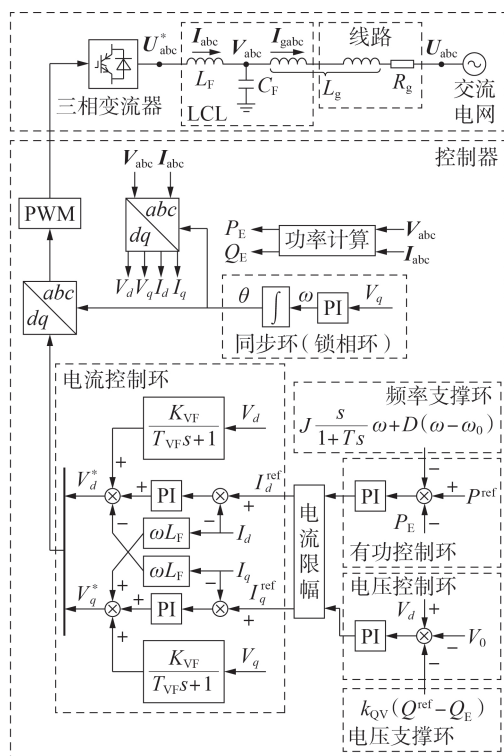
1.2 同步实现方式

图1给出了2种典型的锁相环型控制与组网型控制(以虚拟同步机为例, P - f 下垂控制等效为惯性极小的虚拟同步机)的基本实现框图。当基于锁相环并网同步时,变流器使用多个控制回路达到多个控制目标:锁相环用于并网同步,电流环用于输出电流的快速控制,功率环/直流电压环实现功率/直流电压的跟踪。该控制设计一般认为各控制回路可以独立完成各自的控制目标且相互之间弱耦合。但实际上,目前很多研究已经表明电网强度较低时各个回路的动态存在强耦合,并严重影响变流器的小干扰同步特性,这将在后文中进行详细介绍。

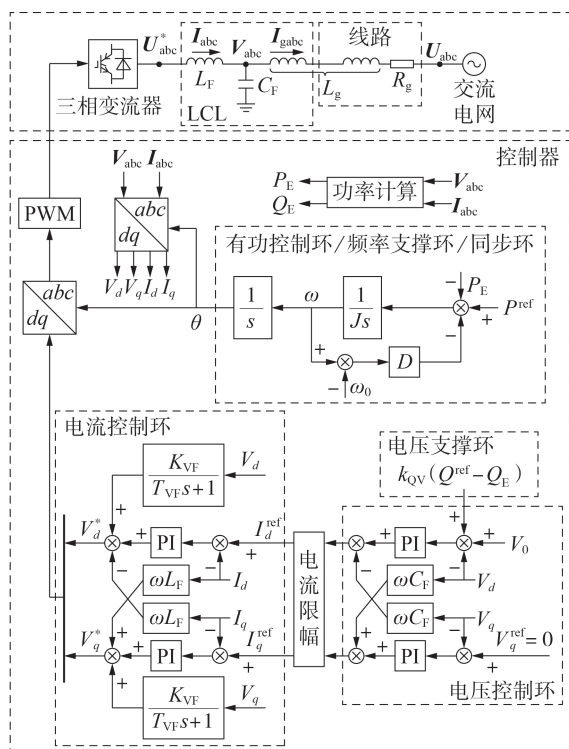
事实上,锁相环型变流器的动态与同步发电机大为不同:锁相环的输入为电压信号,输出为频率信号;同步发电机的频率由转子的摇摆方程决定,摇摆方程的输入可以认为是有功功率。即:虽然它们都是利用了电压相位信号,但锁相环型变流器是直接利用电压相位信号实现同步,而同步发电机则是直接利用功率信号(间接利用电压相位信号)实现同步。

当然,变流器也可以采用组网型同步方式,如利用虚拟同步机控制结构实现与同步发电机类似的特性。从现有研究看,虚拟同步控制方式在电网强度的鲁棒性方面优于锁相环控制方式^[49,53],但简单地模拟同步发电机并非完美,因为电力系统中同步发电机也存在各种稳定问题(如低频振荡和暂态失稳等),简单地模拟同步发电机也会使变流器存在这些问题。

还值得一提的是,锁相环型与组网型控制下装



(a) 锁相环型变流器



(b) 组网型变流器

图1 锁相环型与组网型变流器的典型控制框图

Fig.1 Control block diagram of phase locked loop based and grid-forming converters

备的频率支撑实现方式也是不同的。在组网型控制中,由于对转子摇摆方程的模拟,变流器具有一次调频特性以及惯量,因此在实现并网同步的同时也实

现了对电网的频率支撑。但在锁相环型变流器中,由于锁相环具有对于电网频率的快速跟踪特性,且在定功率控制下几乎不响应系统的频率事件,因此为了实现频率支撑需要附加频率支撑环(根据锁相环检测得到的电网频率调节有功功率的参考值),如图1(a)所示。

下面将从同步原理、回路结构和反馈特性3个方面进一步对比这2种同步控制的差异,以期从中了解不同的同步控制结构对系统动态的影响。

1.3 电力电子装备的虚拟功角

沿用文献[20,55]中“虚拟功角”的定义:变流器控制坐标系的 d 轴相对电网参考电压(如无穷大母线电压)之间的夹角。

相比之下,同步发电机的功角是其内电势与电网电压之间的夹角。电力电子装备的虚拟功角由其同步控制单元决定,例如在图1(a)、(b)中,虚拟功角是锁相环/模拟的摇摆方程产生的角度 θ 与电网电压角度 θ_g 之差。虚拟功角的运动变化决定了电力电子装备同步过程的动态特性。由于所定义的虚拟功角是状态变量,故电力电子装备的同步问题也是一种状态同步问题,而且虚拟功角和同步发电机功角在描述同步失稳时有类似的作用,这也是最初该定义的由来。

此外,由于变流器的控制中常将电压定向于 d 轴,因此在稳态下虚拟功角也是变流器机端电压与电网电压的夹角。但在暂态过程中,由于变流器电压的 q 轴分量不为0,故虚拟功角和变流器机端电压相角存在一个跟踪过程中的偏差,因此虚拟功角不等于机端电压与参考电压之间的夹角。此时可以发现,变流器的电压相位本身不是状态变量,而是虚拟功角的一个函数。考虑到虚拟功角也是状态变量,而变流器与电网之间的同步可以通过虚拟功角的动态来判别,从而借助于虚拟功角的概念,可将输出同步问题转化为状态同步问题,以方便理解和利用传统的方法进行理解和分析。此时“频率同步”(即“相位锁定”)要求虚拟功角在 $t \rightarrow \infty$ 时收敛到一个恒定的稳态值。

综上所述,通过虚拟功角的引入,含电力电子装备的电力系统的同步稳定问题可描述为“多同步发电机的功角和多电力电子装备的虚拟功角之间的同步稳定问题”,是一类状态同步稳定问题。此外,类似传统电力系统,同步稳定是全局稳定问题,因此在电力电子装备占比高时,未来电力系统也会存在涉及大范围而非局部的同步问题,例如,未来宽频振荡也可能出现区域振荡现象而不仅限于局部振荡。

1.4 同步原理对比

由图1(a)可知,锁相环型变流器中锁相环的输入一般为LCL电容点电压在控制坐标下的 q 轴分量

V_q ,其可以表示为:

$$V_q = -U \sin \delta + R_g I_{gq} + \omega L_g I_{gd} \quad (1)$$

其中, U 为电网电压幅值; δ 为虚拟功角; R_g 和 L_g 分别为线路的电阻和电感; I_{gd} 和 I_{gq} 分别为网侧电流在控制坐标下的 d 、 q 轴分量。

由于式(1)中 $R_g I_{gq} + \omega L_g I_{gd}$ 这一项在机电暂态时间尺度下可以认为在小范围内波动(稳态下为常数),因此同步时更关注 $U \sin \delta$ 的运动变化^[27,56-57]。锁相环控制下的虚拟功角动态可用数学公式描述为:

$$\delta = \frac{G_{PI}(s)}{s} V_q \quad (2)$$

其中, $G_{PI}(s)$ 为PI调节器的传递函数。

因为积分项的存在,稳态下有 $V_q = 0$ 。图2(a)给出了 $U \sin \delta$ 的曲线,可见系统有点A与点B这2个可能的平衡点,但结合式(1)、(2)可知仅有点A是稳定平衡点。变流器在式(1)、(2)这2个方程的作用下运行到达平衡点A,从而实现同步^[27,56]。此外,由于锁相环的输入为电压的 q 轴分量,因此其同步过程也可以认为是控制坐标的定向过程以及对电压相位的跟踪过程。

相比之下,组网型变流器则一般通过功率信号进行并网同步,如图2(b)所示。在感性电网下,变流器的输出功率 P_E 可以表示为:

$$P_E = \frac{UV}{X} \sin \delta \quad (3)$$

其中, V 为变流器电压幅值; X 为线路电抗。考虑到同步方程(不失一般性,这里考虑虚拟同步机,但也可以选择下垂控制、直流电容自同步控制等)为:

$$Js^2 \delta + Ds \delta = P^{\text{ref}} - P_E \quad (4)$$

其中, J 为虚拟惯量系数; D 为阻尼系数; P^{ref} 为功率参考值。由式(3)、(4)可知,系统存在2个平衡点,如图2(b)中的点A与点B所示,但其中仅有点A是稳定平衡点。组网型变流器在式(3)、(4)的作用下

运动到平衡点A的过程即是暂态下的同步过程。

需要指出的是,正是由于式(1)与式(3)中存在非线性项,才使锁相环型与组网型变流器在大扰动下均可能发生暂态失稳,且一些饱和限幅/切换环节和跟踪的动态还会使失稳过程更为复杂^[20,55],这一点将在下文中论述。

在多变流器的同步问题上,文献[3,23]中已经指出了组网型变流器的多机同步动态可等效于耦合振荡子模型Kuramoto模型。此外,由于电网的耦合和复杂系统中的通信耦合等价,在一些研究中还可借助多机的相位/频率同步实现优化运行^[15,58]。但在锁相环型变流器的多机同步特性以及组网型/锁相环型的混合多变流器同步问题上,据笔者所知,目前还没有对应的物理解释或是机理分析,也是未来需要研究的内容之一。

1.5 反馈特性对比

图1中2种同步控制结构实际上来源于对控制回路的不同连接方式。例如,在锁相环型变流器中,并网同步可以认为是由对 q 轴电压的反馈控制实现的;在组网型变流器中,并网同步则是由对有功功率信号的反馈控制实现的。

若这2种控制中有功和电压控制的目标相同,则系统将具有相同的潮流解(由频率下垂和电压下垂的稳态特性决定)。但由于各控制环的连接方式不同,变流器在扰动下具有完全不同的动态特性。例如,锁相环型变流器在弱电网下会由于锁相环与其他回路的相互作用而出现振荡失稳;组网型变流器在弱电网中具有良好的小干扰稳定性,但其稳定裕度可能因为电网强度的增加而减小^[59]。

由于锁相环型变流器运行需要电网中有频率参考,故只有锁相环型变流器的系统动态性能不佳,很多时候无法运行。相比之下,组网型变流器则具备较好的组网功能。但有一个亟需回答的问题是:电力系统中应该如何合理地配置这2种不同类型的变流器从而使系统达到好的动态特性^[53]。组网型变流器可以主动建立频率,但是否使所有变流器都为组网型就是最好的选择,或是2种类型的变流器呈一定的比例时系统动态特性才是最优;在电网中的落点和容量又该如何优化配置,这些问题到目前为止仍有待回答,文献[53]在此方面做了一些初步的探讨。

1.6 有功功率控制与直流电压控制

针对不同需求,变流器需要采用不同有功控制策略以实现有功功率或直流电压的跟踪。图1所示的2种控制方式可用于定有功功率需求的场合,例如储能的变流器等。在其他一些应用场合,例如在光伏、直驱风机或是多端直流的主换流站中,需要控制直流侧电容电压使其恒定,此时实际上是通过

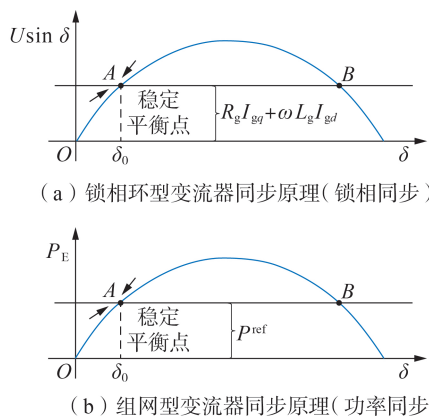


图2 锁相环型与组网型变流器的同步原理

Fig.2 Synchronization principle of phase locked loop based and grid-forming converters

调节变流器的有功功率以保证直流电容的功率平衡,从而实现直流电压的调节。相应地,变流器也可以采用锁相环型^[60-61]或是组网型^[49-50]的同步方式。由于直流电压控制可以认为是一种动态更为复杂的有功功率控制,即在考虑直流电容动态特性的前提下设计出可以平衡直流电压动态的有功控制,因此本文不失一般性地以图1所示的变流器为例研究电力电子装备的同步特性。

2 锁相环型变流器的同步稳定分析与控制

下面将对锁相环型变流器的同步稳定特性以及相应的同步稳定控制进行分析、梳理与讨论。

2.1 锁相环型变流器的大干扰同步稳定特性

锁相环作为一种经典的同步控制结构,已经在实际中得到了广泛的应用,其基本的同步原理如图1(a)所示,由于 q 轴电压分量 V_q 实际上是关于虚拟功角的非线性函数,因此在大干扰下,若虚拟功角越过非线性区域,则变流器也会发生大干扰同步失稳^[27,56]。

在正常工况下,由于锁相环具有快速跟踪特性,虚拟功角往往具有快速响应、吸引域大等动态特性,故锁相环型变流器在正常运行时具有良好的同步稳定裕度,实际非故障运行中也很少观察到锁相环发生失步的现象。当发生大扰动一些极端工况时,虚拟功角也可能越过不稳定平衡点而出现失稳。例如,在一些远距离输电的场景下,若系统发生严重的电压跌落,则锁相环也可能因为失去可达的稳定平衡点而发生同步失稳^[62-64]。

2.2 锁相环型变流器的小干扰同步稳定特性

当前,由锁相环在弱电网下引起的小干扰失稳/振荡现象已经引起了广泛的关注。本文将其归类为小干扰同步稳定问题是考虑到该失稳主要由锁相环的动态特性所主导,失稳过程的动态特征是虚拟功角发生持续性的振荡而无法收敛到稳态值。根据文献[10]中广义同步稳定性失步类型的分类,该稳定问题属于小扰动锁相失败导致的失步问题。

该稳定问题主要由锁相环在弱电网下与电流环的强耦合引起,不同的外环设计也会影响其振荡失稳特性^[17],例如,振荡频率与各控制回路的参数相关,既有可能出现次超同步振荡,也有可能出现2倍基波频率以上的高频振荡(此处也有文献归为谐波振荡)。下面总结分析该小干扰同步失稳的方法。

2.2.1 时域中的模态分析

在变流器的运行点对系统进行线性化可以建立其状态空间模型,并通过分析系统的特征结构用于判别系统的稳定特性(也可用于分析系统的稳定域^[65-66]),如在不同参数下的根轨迹、参与因子^[67-70]等。利用变流器的状态空间模型可以分析不同工

况、电网强度以及锁相环参数下变流器的失稳/振荡现象,还可以指导控制器的设计。

然而,模态分析方法很多时候难以直接揭示失稳机理,且在高维参数空间中难以遍历所有可能的不稳定参数集。也正是因为这一点,很多文献中可能出现一些相反的建议,例如,有的文献指出锁相环带宽越大系统越容易失稳,而有的文献则指出锁相环的带宽越小系统越容易出现失稳。实际上,这些结论都是在特定的参数集(如无功环参数、前馈参数等)下得到的,即锁相环的设计也与其他因素相关,这也是需要深入研究系统稳定机理的原因之一。

为了通过模态分析揭示失稳机理,文献[71]将系统划分为含锁相环动态的开环反馈子系统以及对对象子系统,并从开环模式谐振角度揭示直驱风机接入引发系统次同步振荡机理,该方法可以用于分析子系统间的次同步交互作用对系统稳定性的影响。

2.2.2 基于端口特性的频域分析

在电力电子装备的小干扰建模与频域稳定分析方面,阻抗分析方法占据着很重要的地位^[16,72-74]。阻抗法最先是应用于直流系统的分析与设计中,但与可建模成单输入单输出的直流系统不同的是,三相交流系统本质是多输入多输出系统,而且难以直接解耦,因此在阻抗建模与分析上比直流系统复杂得多。

阻抗建模在频域下用传递函数/传递函数矩阵表示并网设备的电压/电流接口特性。若选取电流为输入、电压为输出,则得到设备的 2×2 阻抗模型 Z ;若选取电压为输入、电流为输出,则得到设备的 2×2 导纳模型 Y ,如图3所示。通过主动注入电流或电压可以得到阻抗特性,因此,在控制结构或控制参数未知的前提下也可以得到装备外特性和模型并用于稳定性分析^[75]。

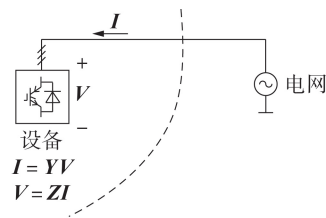


图3 电力电子装备并网系统

Fig.3 Grid-connected power electronic device system

当前已有许多文献利用阻抗分析方法分析锁相环对系统小干扰稳定性的影响,如文献[16]在 dq 坐标下建立系统的阻抗模型并指出锁相环在 $q-q$ 通道的阻抗上具有负电阻效应从而影响系统的稳定性。文献[73]研究了 dq 阻抗与正负序阻抗之间的联系,并指出由于锁相环的存在使正负序阻抗之间存在耦合。文献[74]研究了 dq 阻抗与 $\alpha\beta$ 静止坐标下阻抗的联系,并提出统一的阻抗模型用于分析稳定性。

文献[34]提出了基于极坐标的广义阻抗分析方法。文献[33]还给出阻抗法是否适用的评价方法:开环传递函数不存在右半平面极点且传递函数对不确定摄动的条件数要小。以此为基础,该文献说明了广义阻抗适合分析锁相环参与度较高的次超同步振荡且振荡机理、振荡特征是由电流相位动态主导。

阻抗分析的本质实际上是对系统选取电流/电压作为输入输出并在频域下建立系统元件的端口模型,再对元件模型进行连接从而建立系统闭环模型的过程。一方面,由于所选取的输入输出(电流/电压)均为物理量,因此阻抗模型具有可测量的特点。但另一方面,变流器的阻抗模型实际上将内部各个控制回路进行闭环,且同步单元(锁相环)的存在使闭环后得到的阻抗矩阵无法直观地体现各个控制回路的相互作用,也难以直接地指导同步单元的控制设计。为此,文献[76-77]在相互作用方面进行了非常有价值的探索,其思路是通过在直流电压控制时间尺度下进行建模与系统简化,将系统动态分解为独立的子系统分别用于分析变流器端口内电势的幅值和相位特性。该方法可以揭示系统的振荡机理,定位重要的影响因素和环节,并在分析过程中一定程度上保留了控制回路相互作用的物理意义。

2.2.3 基于同步主导回路的频域分析

电力电子装备的同步控制单元主导其同步特性,而其同步稳定则是由同步控制单元与系统其余部分的交互所决定。基于此,为了直观地揭示锁相环与系统之间的交互,文献[17]提出了一种基于同步主导回路的分析方法,用于分析锁相环与系统其他部分动态的相互作用并揭示锁相环在弱电网下是如何引起小干扰同步失稳的机理。该分析方法也可以用于组网型变流器的同步稳定分析。

基于同步主导回路的分析方法通过选择锁相环的输出相位 $\Delta\theta_{\text{PLL}}$ 与控制器中 q 轴电压 ΔV_q 分别作为系统的输入与输出,如图4所示。以此构建的同步主导回路模型的优点在于由于 ΔV_q 与 $\Delta\theta_{\text{PLL}}$ 正是锁相环的输入与输出,因此系统被天然地划分为2个子对象:锁相环回路动态 $f_{\text{PLL}}(s)$ 以及除锁相环以外的剩余系统动态 $f_{\text{sys}}(s)$ (这两部分动态的具体推导可见文献[17])。由于锁相环的动态仅包含在 $f_{\text{PLL}}(s)$ 中,因此可以直观地分析锁相环与系统的相互作用,并以此对锁相环进行回路整形从而提高系统的稳定性。该模型本质上是关注于虚拟功角(即图4中的

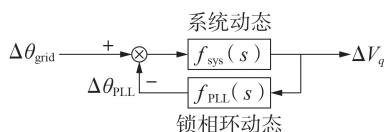


图4 同步主导回路模型

Fig.4 Synchronization-dominated loop model

$\theta_{\text{PLL}} - \theta_{\text{grid}}$)的小干扰同步动态特性。

从图4可知,系统的开环传递函数为:

$$L(s) = f_{\text{sys}}(s) f_{\text{PLL}}(s) \quad (5)$$

因此,系统的稳定性可以由奈奎斯特判据得到,并且系统的稳定裕度(奈奎斯特距离)为:

$$\varepsilon = \frac{1}{\|1/(1+L(s))\|_{\infty}} \quad (6)$$

其中, $\|\cdot\|_{\infty}$ 表示无穷范数。

基于该同步主导回路模型,文献[17]提出了同步稳定判据:若传递函数 $f_{\text{sys}}(s)$ 与 $f_{\text{PLL}}(s)$ 均没有不稳定极点,则当且仅当 $f_{\text{sys}}(s)$ 与 $1/f_{\text{PLL}}(s)$ 在增益交越频率(幅值相等处)的相位差小于 180° 时,系统稳定。该稳定判据的优势在于:通过直观地观测 $f_{\text{sys}}(s)$ 与 $f_{\text{PLL}}(s)$ 在波特图上的交互可以明确系统的小干扰同步失稳机理,且由于锁相环的动态完全包含在 $f_{\text{PLL}}(s)$ 中,因此可以直观地对 $f_{\text{PLL}}(s)$ 进行回路整形改变其与 $f_{\text{sys}}(s)$ 之间的相互作用,从而避免锁相环发生小干扰同步失稳。

该分析方法实际上与传统的复转矩系数分析方法具有一定的等价性,即两者都是围绕同步单元的动态并分析其与系统其余动态的交互(复转矩系数分析方法是将系统其余部分等价为转矩,并通过等效的转矩与频率/相位之间的角度判断其阻尼特性^[46])。复转矩系数分析方法在传统电力系统中常用于分析同步发电机轴系的次同步振荡问题。在分析锁相环引起的小干扰失稳/振荡问题时,通过建立锁相环同步单元所对应的等效转矩模型,也可以直观地研究锁相环的失稳特性^[78-79]。

为了分析多机小干扰稳定问题,文献[4,80]提出了基于广义短路比的分析方法。该方法通过将多机系统解耦为单机系统,将对于单机系统的分析结论移植到多机系统中(如下文3.4节中电网强度与控制结构匹配规律),还可以通过广义短路比定量地刻画电网强度从而表征多机系统的小干扰同步稳定裕度。

2.3 锁相环型变流器的小干扰同步稳定控制

针对锁相环型变流器在弱电网下的振荡失稳问题,目前文献中最常见的做法是通过锁相环参数的根轨迹分析,挑选出合适的锁相环控制参数并应用于系统,从而保证系统的小干扰稳定性^[16,67,81]。

除此之外,文献[82]提出通过对电网强度(线路阻抗)进行辨识,并通过辨识得到的电网强度值实时地调节锁相环的带宽从而保证系统的小干扰同步稳定裕度。文献[83]提出了一种对称的锁相环结构用于提升弱电网下的同步稳定性。文献[68]提出了一种阻抗补偿的控制方法,通过在电压检测信号中引

入负的阻抗,从而使锁相环虚拟地锁住一个更强的电压点,避免锁相环在弱电网发生失稳。

文献[17]基于锁相环型变流器的同步主导回路模型分析了锁相环在弱电网下与系统的闭环交互特性,提出锁相环的回路整形方法,即改变锁相环传递函数的幅相特性来提高装备在弱电网下的稳定性。该回路整形方法的控制实现如图5所示。图中 $H(s)$ 为与PI调节器串联的回路整形函数,该函数的选取可以改变锁相环传递函数的幅相特性,具体的设计流程可参考文献[17]。

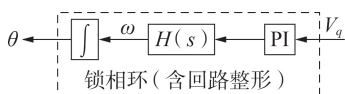


图5 锁相环的回路整形

Fig.5 Loop shaping of phase locked loop

3 组网型变流器的同步稳定分析与控制

下面将对组网型变流器的同步稳定特性以及相应的同步稳定控制进行分析、梳理与讨论。

3.1 组网型变流器的大干扰同步稳定特性

组网型变流器一般具有类似于同步发电机的同步特性,例如虚拟同步机是通过模拟同步发电机的转子运动方程实现并网自同步,因此,在大干扰下,组网型变流器也可能出现类似于同步发电机的同步失稳(即暂态失稳)现象。并且,由于电力电子装备具有自身的局限性(无法像同步发电机一样提供短路电流),因此在大干扰下会由于电流限幅使变流器的电压源特性切换为电流源特性,这种特性切换使变流器的同步稳定特性以及失稳过程更为复杂^[20]。根据文献[10]中广义同步稳定性的分类,该问题实际上属于大扰动功率同步环(PSL)失步。

式(3)可以认为是变流器在电流不饱和(不考虑电流限幅)时的虚拟功角特性,图6给出了相应的“不饱和虚拟功角曲线”,当变流器电流不饱和时,变流器运行于稳定平衡点 a ,但需要注意的是,图中虚拟功角曲线的虚线部分为不可达的区域,因为该区域中要求变流器的电流输出值大于电流限幅值。当

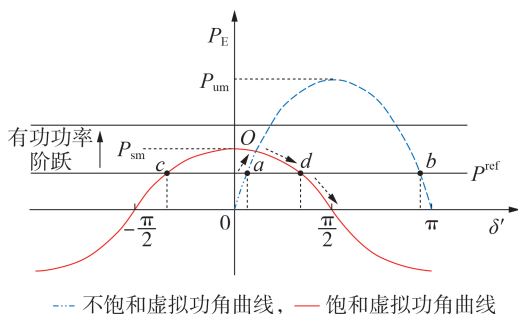


图6 变流器的虚拟功角曲线

Fig.6 Virtual power angle curves of converter

变流器在大十扰下电流发生饱和时,其运行点不再处于不饱和虚拟功角曲线上,而是运行于“饱和虚拟功角曲线上”,如图6中实线所示,相应的饱和虚拟功角特性的推导可以见文献[20]或文献[55]。文献[55]指出变流器的电流饱和特性使其大干扰同步稳定裕度大为降低,一个有功功率阶跃即可使变流器发生同步失稳(如图6中其运行点将由点 a 运动到点 O ,然后进入饱和虚拟功角曲线,再运动到点 d 且其功角将不断增大而失稳)。此外,文献[84]指出电压环与电流环在暂态过程中的动态还会使虚拟功角曲线发生偏移,并进一步降低系统稳定裕度。

文献[20]研究了在故障(电网电压跌落)场景下的
的大干扰同步稳定性,并指出系统存在临界切除点
和临界切除时间,且虚拟惯量的加入可能进一步降
低其同步稳定裕度。文献[22]进一步指出在不同程
度的电压跌落下系统可能出现多种失稳形态(如图
7所示):①系统可能因为在故障期间无可达的稳定
平衡点而失去同步稳定;②系统也可能因为进入不
期望的稳定平衡点(图7中点c)而使电流一直维持
在饱和状态,且即使故障切除后也无法返回到原来
的平衡点,该平衡点是不期望的,因为电压外环会
一直失效,此时无法实现对电压和功率的控制。

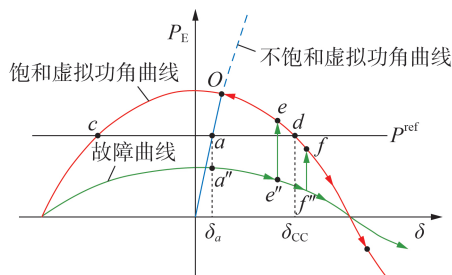


图7 暂态过程中的同步失稳形态

Fig.7 Synchronization instabilities during transient process

由上述分析可知,变流器的最大传输功率对其同步稳定裕度具有主导性的影响,此外,文献[85]利用相平面轨迹分析了虚拟同步机在不同惯量和阻尼系数的参数空间下的稳定性,并首次指出虚拟同步机在参数空间中的周期解吸引子是导致系统失稳的原因。当然,变流器控制中的其他回路也会影响其大干扰下的暂态行为以及同步稳定裕度,例如无功控制、电压前馈控制、电流环电压环的设计以及同步环节的设计等^[86-89]。

总体而言,组网型变流器由于具备良好的网源协调能力(频率支撑、电压支撑等),在高比例电力电子装备并网电力系统中的应用将越来越广泛,但是关于其大干扰同步特性的研究尚处于初步阶段,特别是在多变流器以及多类型设备的场景下,其大干扰下的暂态行为以及同步稳定裕度是未来需要研究

的内容。

3.2 组网型变流器的大干扰同步稳定控制

与同步发电机不同的是,组网型变流器在大干扰下的同步特性并非由固有的物理转子决定,而是由控制策略决定,这种“控制同步”的灵活性使设计相应的同步稳定控制成为可能。

一种常用的避免组网型变流器在大干扰下同步失稳的控制方法是进行控制切换,即在变流器检测到电压跌落的故障时,将组网型控制切换到锁相环型控制,并在故障过后再切换成组网型控制^[37]。但这种方法在实际中实现较复杂,其不仅难以保证切换过程的平滑,且难以设置合理的切换阈值以保证切换过程在多种故障特性下的有效启动。文献[25]提出了一种基于虚拟阻抗的故障限流方法使电压外环在故障下仍可以有效运行,但暂态过程中投入大阻抗极大地改变了变流器的运行特性,在一些严重的电压跌落下可能失效,且参数设计过程也较为复杂。针对无电压外环电流内环结构的虚拟同步机,文献[90]结合了虚拟电阻与向量限流方法提出了一种故障电流限制方法,从而保证虚拟同步机在故障过程中的稳定性。

文献[85]基于对虚拟同步机功角稳定的参数空间分析,提出了分岔轨迹塑性附加控制,通过在暂态过程中调整控制参数消除系统的周期解,以提高系统的稳定性。文献[87]提出了一种暂态同步控制策略,该控制策略在电流饱和的暂态过程中引入一个基于无功功率的暂态控制项,通过在暂态过程中设定一个可达的虚拟功角平衡点以防止变流器失去同步稳定。文献[86]基于李雅普诺夫分析,在暂态过程中引入一个基于电压偏移分量的转矩以提高系统的大干扰同步稳定性。文献[22]基于变流器的虚拟功角特性分析以及在故障下的暂态行为,提出了一种稳定增强型的下垂控制方法(也适用于虚拟同步机),该方法通过等效地改变组网型变流器在电流饱和下的虚拟功角特性以使变流器在暂态过程中具有稳定的可达平衡点,防止变流器失去暂态稳定。该控制策略的实现方式如图8所示。可以看出,该控制策略具有简单易实现的特点,不需要任何控制切换(V_q 的稳态值为0,故不会改变正常运行平衡点),且参数整定简单、稳定机理清晰(V_q 是关于虚拟功角的非线性函数,等效为改变了饱和虚拟功角特性)。

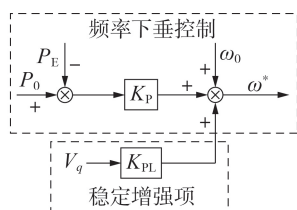


图8 稳定增强型下垂控制

Fig.8 Stability enhanced droop control

3.3 组网型变流器小干扰同步稳定特性

组网型变流器在合适的参数下通常具有良好的小干扰稳定特性,并且对电网强度具有良好的鲁棒性。已有研究表明,组网型变流器可以适应极弱电网运行,且稳定裕度对电网强度变化不敏感,这一优势使组网型变流器更适用于接纳大规模的新能源并网,特别是在一些并入弱电网的场合^[49,53]。文献[59]指出在电网强度较大时虚拟同步机控制会出现稳定裕度降低的情况,该问题可以通过增加虚拟阻抗或是自适应地调节虚拟惯量得以消除,因此相比于弱电网下锁相环引起的振荡问题较容易解决。

事实上,锁相环同步方式是否适用于接纳大规模的电力电子装备并网仍是一个待深入研究的问题,这主要是由于锁相环这种结构假设了其电压检测点接近于理想的电压源,而没有考虑这个电压源可能含有一些复杂的动态(例如该接入点可能是一个微电网或是风电场等易受扰动的场景),因此应用于实际电网时,锁相环可能因为一些多变的电网工况(如电网变弱)而出现一些意料之外的失稳/振荡问题,并且稳定形态各异,例如振荡频率差异大,与其他控制回路的作用机理也不一致等。

相比之下,组网型变流器的同步机理与同步发电机类似,对电网强度与工况的适应性与鲁棒性强,这一优势使组网型变流器可能适用于大规模新能源并入极弱电网的场合^[49,53]。而在电网强度较大时单机的小干扰稳定问题可通过增加虚拟阻抗或是自适应地调节参数来解决^[59]。因此在接纳大规模电力电子装备并网(特别是弱电网)方面具有一定的优势。

为综合这2种同步方式的优点,文献[53]研究了在大规模锁相环型变流器接入的系统中适当地配置组网型变流器的问题。研究表明,配置了组网型变流器等效于提高系统的强度,有利于提高系统整体的小干扰同步稳定性,其机理是组网型变流器增强了系统的广义短路比,从而提高了电网强度。文献[91]指出当变流器的动态特性不一致时,多样化变流器的接入后其整体动态特性可以看成被加权平均,系统的整体稳定裕度被中和。

需要指出的是,当组网型同步单元的参数设置不合理时,例如下垂控制中的下垂系数设置不合理或是虚拟同步机中虚拟惯量以及阻尼系数设置不合理时,变流器也可能出现小干扰失稳的现象^[92-95]。因此,在进行组网型变流器的参数整定时,也应该利用模态分析、(广义)阻抗法或是同步主导回路分析等方法使组网型变流器具有合适的阻尼比。

4 电力电子装备的统一同步控制结构

本节首先基于上述的分析对比了锁相环型变流

器与组网型变流器的适用性,然后提出一个统一的同步控制结构用于探索更优的同步控制结构。

4.1 不同电网强度下锁相环型与组网型变流器的适用性

上文中讨论了锁相环型变流器以及组网型变流器的同步稳定机理与动态特性,从这些分析中可以看出,这2种类型的变流器在小干扰稳定与大干扰稳定方面各有优缺点。锁相环作为应用最为广泛的控制单元,其控制结构简单,且可以方便地实现电压定向和解耦,在电网发生故障时也更容易控制(通常不需要复杂的切换或是辅助控制)。但如上文所指出的,在低短路比弱电网中锁相环的动态将与变流器其他控制动态之间强耦合,产生复杂的振荡问题,解决起来比较困难;相比之下,组网型变流器则对电网强度具有更好的鲁棒性,短路比较低时仍然可以具有良好的小干扰稳定特性,但在大干扰下由于电压源与电流源之间的特性切换则面临更为复杂的暂态稳定问题。表1总结了锁相环型与组网型变流器特性上的差异。

表1 锁相环型变流器与组网型变流器的特性对比

Table 1 Comparison of characteristics between phase locked loop based and grid-forming converters

特性	锁相环型变流器	组网型变流器
同步信号	电压信号进行同步	功率信号进行同步
频率支撑	需额外的辅助回路	同步单元含该功能
电网强度适应性	弱电网下易振荡	可适应极弱电网
小干扰同步稳定性	对电网强度敏感且失稳特性复杂	稳定裕度高
大干扰同步稳定性	稳定裕度高	暂态特性复杂易出现虚拟功角失步

从表1可以看出:在一些电网强度较弱的场合,例如送端的新能源基地中,可采用部分组网型控制以保证系统的稳定性,此时也需要应用合适的暂态稳定控制策略以保证在大干扰下组网型变流器的同步稳定。鉴于目前大多数的新能源设备已经采用锁相环型的控制策略,因此在这些设备中可以改造部分机组以提高稳定性。在一些强电网的场合,例如有大量火电机组支撑的受端地区,则可以采用锁相环型的控制以实现变流器有功功率与无功功率的快速调节,进而提升电力系统的动态特性。当然,在一些设备类型多、耦合强且电网结构和工况复杂的场合,这2种同步控制方式的适应性还需要进一步的研究。

4.2 统一同步控制结构

锁相环型控制与组网型控制的差异性本质上是由于采用了不同的控制结构导致的,不同的控制结构使变流器对电网呈现出不同的外特性,同时也使变流器具有不同的稳定特征。

锁相环的控制结构主要是通过电压定向的矢量

控制以及传统PI控制器的设计直观地得到,而一些组网型控制结构则是借鉴了同步发电机的动态得到。在系统性地获得鲁棒、镇定以及最优的控制结构方面,目前研究很少。事实上,在控制结构的设计方面,控制理论和系统科学并没有给出完美和系统性的答案。总体而言,基于 H_2 与 H_∞ 的控制设计在很多情况下可以得到满意的控制结构与控制器^[96],但通过 H_2 与 H_∞ 设计得到的控制器往往阶次过高,在满足最优性的同时也牺牲了控制的可解释性,特别是在同步控制方面,采用高阶控制器可能导致系统在复杂多变的工况下出现意料之外的振荡或稳定裕度下降的情况。

为了保证控制的低阶特性,可以使用定结构的方法求出鲁棒/最优同步控制器^[97],但此时需要先确定一个通用性强的控制结构以保证在一个足够大的可行域中求解最优或是鲁棒的同步控制器。为此,本文提出一个“统一同步控制结构”,该控制结构具有较好的通用性以涵盖传统的锁相环控制以及部分组网型控制,如图9所示。该结构将锁相环控制与组网型控制之间的差异量化为控制回路之间连接方式的不同,并进一步将其参数化以便于定量地研究同步控制结构之间的差异,从而为未来最优同步控制与鲁棒同步控制的设计奠定了一定的理论基础。

首先回顾图1中2种控制结构并找出其差别。图1(a)所示的锁相环型控制中:①频率信号由锁相环提供(这里实际上可以将其看成是 q 轴电压控制环);② d 轴电流参考值由有功控制环提供;③ q 轴电流参考值由电压控制环提供(这里实际上可以将其看成是 d 轴电压控制环,其用于实现机端交流电压幅值的控制)。相比之下,图1(b)所示的组网型控制(虚拟同步机)中:①频率信号由有功控制环提供;② d 轴电流参考值由 d 轴电压控制环提供;③ q 轴电流参考值由 q 轴电压控制环提供。即:图1中的锁相环型控制和组网型控制之间的主要差异在于各个控制回路之间连接方式的不同。

为了将这些控制回路连接的差异性参数化以定量地分析不同类型同步控制的特性,在统一同步控制结构中包含了 d 轴电压控制环、 q 轴电压控制环、有功控制环和无功控制环的子结构(包含了测量信号与参考信号的差及其相应的积分项,在有功环中还包含了代表虚拟惯量和阻尼的一阶环节),并将这些回路的输出记为 $y_1 \sim y_8$,如图9所示。如此, $y_1 \sim y_8$ (记其形成的矢量为 $\mathbf{y}$)和输入信号 $\omega, I_d^{\text{ref}}, I_q^{\text{ref}}$ (记其形成的矢量为 $\mathbf{u}$)之间存在结构参数矩阵 $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{3 \times 8}$ 的映射关系,即:

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}\mathbf{y} \quad (7)$$

其中,矩阵 $\mathbf{K}$ 中的元素是否为0代表相应的回路通道间是否是连接的。当 $K_{ij} = 0$ 时,说明从 y_j 到 u_i 之间

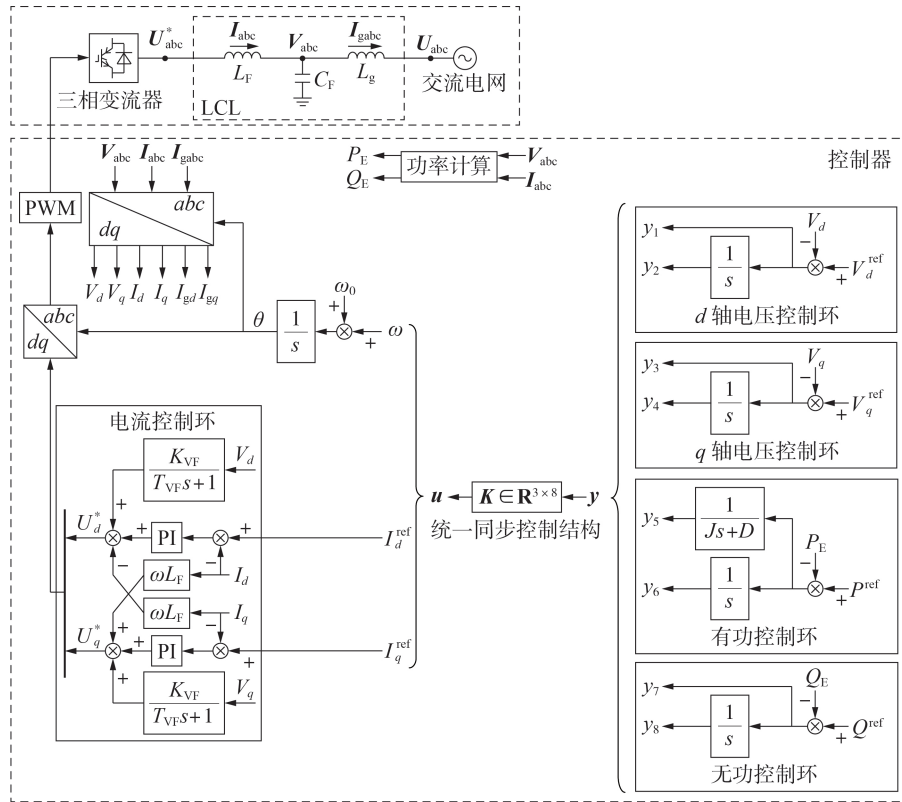


图9 统一同步控制结构

Fig.9 Unified synchronization control structure

是不连通的;当 $K_{ij} \neq 0$ 时,说明某个回路的输出信号 y_j 是反馈到输入 u_i 中的,且增益为 K_{ij} 。

因此,选择不同的控制矩阵将确定不同的回路连接,并获得不同的同步控制结构。例如当选择:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -k_p & -k_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{pp} & k_{pi} & 0 & 0 \\ -k_{vp} & -k_{vi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

则可获得一个典型的锁相环型控制结构。其中, k_p 和 k_i 为锁相环的PI参数, k_{pp} 和 k_{pi} 为有功控制环的PI参数(此处假定图9中有功控制环中 $J=0$ 且 $D=1$), k_{vp} 和 k_{vi} 为交流(d 轴)电压控制环的PI参数(也可以采用定无功功率的控制方式,本文不再展开描述)。

当选择:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ k_{vp} & k_{vi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{vp} & k_{vi} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

则得到一个典型的组网型控制结构。其中, k_{vp} 和 k_{vi} 为 d 轴(和 q 轴)电压控制环的PI参数(也可以加入相应的无功控制)。此处还需要进一步设定图9中有功控制环的参数 J 和 D 以调节虚拟惯量与阻尼。当然,还可以引入有功功率的积分作为反馈(相应的第6列元素设置为非零常数)以保证有功功率在频率偏移下的无差调节。

从上述2个例子可以清晰地看出,通过选择不

同形式的结构参数矩阵 K 可以得到不同的同步控制结构,故该统一同步控制结构具有较好的通用性,涵盖了现有的锁相环型结构和组网型结构。本文中的统一同步控制结构是文献[97]提出的 H_∞ 控制器的进一步扩展,并具有更强的通用性。并且,文献[97]指出并网同步这一控制目标可以诠释为:进入闭环系统的相位扰动将在同步控制与系统的闭环交互下被抑制,在此基础上可方便地通过设置合适的权函数对系统相应回路的灵敏度函数进行整形以实现该控制目标。当考虑多机之间的交互时,该文献还给出了一个分散式的小干扰稳定判据,揭示了如何通过变流器单机并网系统的同步控制进行设计以保证多机系统的稳定性。

当选择除式(8)与式(9)之外的控制矩阵时,该同步控制结构将具有新的同步特性。但亟需回答的一个问题是:电力电子装备具有怎样的同步特性才能使系统具有更优于同步发电机主导的系统动态特性?

笔者认为,深刻地解读交流电网在同步特性上的需求,并以此指导电力电子装备的同步控制设计将是未来需要研究的重要工作之一。只有如此,才能发挥电力电子装备的高可控性优势以提高未来电力系统的动态特性。而本文提出的统一同步控制结构实现了对不同类型同步结构的定量参数化,将复

杂的控制结构设计/优化问题转变为求解结构参数矩阵 K ,从而为寻求更优的同步控制器奠定了一定的数学基础。值得一提的是,该统一同步控制结构的结构参数矩阵 K 可以通过一些系统科学或控制理论中的方法得到,例如文献[97]通过求解 H_2 控制问题得到小干扰动态上最优的控制器,而未来的研究中可考虑更多的控制目标(大干扰同步稳定性、频率稳定性等)以及交流电网在系统层面的需求。

5 未来研究方向的展望

电力电子装备的高渗透使现代电力系统在可控性方面优势明显,但同时其复杂的动态也给安全稳定运行带来巨大挑战。电力电子装备控制回路多、耦合强、并网工况复杂且控制切换/饱和环节更是带来强非线性,因此其建模与稳定分析比传统电力系统更为复杂。当前,在描述装备间的相互作用、认识电力电子装备的稳定特性方面,已有的研究成果与同步机主导的传统电力系统相比尚未有成熟体系。

针对这些挑战,笔者从自身的观点与经验出发,总结了一些未来可能的研究方向。

(1)适用于同步稳定分析的建模方法。电力电子装备往往阶数高,因此考虑全阶模型将大幅地增大分析难度,特别在考虑多机系统时。另一方面,若只考虑同步控制环的动态而忽略其他控制环的动态则会使分析不准确。因此,如何平衡分析模型的低阶特性与精确性,提出适用于同步稳定分析的有效降阶模型,是未来需要研究的问题。

(2)多类型同步控制混合的多机同步稳定分析和仿真技术。未来电网中将存在多种同步控制结构的电力电子装备,如何分析和认识装备间的相互作用仍是未来需要研究的内容。在仿真方面,机电仿真模型不再适用^[10,52],此时如何处理由系统电磁暂态模型中多时间尺度导致的数值稳定性问题和由大规模高阶方程导致的仿真速度问题,也都需要进一步深入研究。

(3)多类型同步控制的配比、落点和网架规划。未来电网中,如何量化电网强度并根据电网强度选择适合的控制结构值得深入研究,包括控制结构的配比以及在电网中的落点。例如,文献[53]从电网强度角度探索了组网型装备在提升大规模锁相型装备接入系统的稳定性。此外,网架结构对电力系统的稳定特性也起着关键作用^[36],因此如何合理地规划网架以降低系统失稳风险也是需要研究的内容。

(4)最优同步控制结构的设计。目前电力电子装备的同步控制结构很多时候是借鉴工程经验以及物理直觉得到的,这也是导致一些典型结构在特定场景下容易失稳的重要原因。而含高比例电力电子装备的电力系统需要什么样的同步控制结构,如何

设计出最优的同步控制结构仍是有待解决的问题。

6 结语

高比例电力电子装备的渗透是电力系统在21世纪最大的变革之一,电力电子装备的控制设计决定了未来电力系统的动态特性与稳定形态。面对这样一个高维、多回路、强耦合、强非线性的系统,很多传统电力系统中的分析方法与模型已经不再适用。当前,在国内外专家学者的共同努力下,已经取得众多优秀的理论与实践成果,但未来仍有许多问题待以理解和解决。本文梳理了电力电子并网装备的同步稳定分析与控制设计方面的研究与成果,并探讨了后续可能的研究方向和思路。但由于笔者学识与经验有限,难免挂一漏万、不一而足。希望本文可以在未来电力系统稳定分析与控制设计方面提供有益参考,推进我国能源可持续发展以及能源互联的战略。

参考文献:

- [1] 陈国平,李明节,许涛,等. 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):20-26.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.
- [2] 黄林彬. 高比例电力电子装备电力系统的同步稳定分析与控制设计[D]. 杭州:浙江大学,2020.
HUANG Linbin. Synchronization stability and control of power systems with high-penetration power electronics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [3] DÖRFLER F, BULLO F. Synchronization and transient stability in power networks and nonuniform Kuramoto oscillators[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2012, 50(3): 1616-1642.
- [4] 辛焕海,董炜,袁小明,等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报,2016,36(22):6013-6027.
XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [5] 康重庆,姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [6] 徐政,肖晔庆,张哲任. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2017.
- [7] 袁小明,程时杰,胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [8] 李斌,宝海龙,郭力. 光储微电网孤岛系统的储能控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):8-14.
LI Bin, BAO Hailong, GUO Li. Strategy of energy storage con-

- trol for islanded microgrid with photovoltaic and energy storage systems[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(3):8-14.
- [9] 黄林彬, 辛焕海, 黄伟, 等. 含虚拟惯量的电力系统频率响应特性定量分析方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(8):31-38. HUANG Linbin, XIN Huanhai, HUANG Wei, et al. Quantified analysis method of frequency response characteristics for power systems with virtual inertia[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(8):31-38.
- [10] 徐政. 电力系统广义同步稳定性的物理机理与研究途径[J/OL]. *电力自动化设备*. (2020-07-10)[2020-08-13]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202008009>.
- [11] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(3):1387-1401.
- [12] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [13] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现[J]. *中国电机工程学报*, 2000, 20(6):1-4. XU Zheng. The complex torque coefficient approach's applicability analysis and ITS realizations by time domain simulations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000, 20(6):1-4.
- [14] KUNDUR P. *Power system stability and control*[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [15] XIN Huanhai, ZHANG Leiqi, WANG Zhen, et al. Control of island AC microgrids using a fully distributed approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(2):943-945.
- [16] WEN Bo, DONG Dong, BOROYEVICH D, et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(1):26-38.
- [17] HUANG Linbin, XIN Huanhai, LI Zhiyi, et al. Grid-synchronization stability analysis and loop shaping for PLL-based power converters with different reactive power control[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 11(1):501-516.
- [18] LIU Huakun, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6):4708-4720.
- [19] BAKSHSHIZADEH M, WANG Xiongfei, BLAAJERG F, et al. Couplings in phase domain impedance modelling of grid-connected converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(10):6792-6796.
- [20] 黄林彬, 章雷其, 辛焕海, 等. 下垂控制逆变器的虚拟功角稳定机理分析[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(12):117-123, 150. HUANG Linbin, ZHANG Leiqi, XIN Huanhai, et al. Mechanism analysis of virtual power angle stability in droop controlled inverters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 31(10):117-123, 150.
- [21] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(18):5457-5467. HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(18):5457-5467.
- [22] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 10(1):578-591.
- [23] SIMPSON-PORCO J, DORFLER F, BULLO F. Synchronization and power sharing for droop-controlled inverters in islanded microgrids[J]. *Automatica*, 2013, 49(9):2603-2611.
- [24] WANG Keyou, QI Chen, HUANG Xin, et al. Large disturbance stability evaluation of interconnected multi-inverter power grids with VSG model[J]. *The Journal of Engineering*, 2017(13):2483-2488.
- [25] PAQUETTE A, DIVAN D. Virtual impedance current limiting for inverters in microgrids with synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 51(2):1630-1638.
- [26] 朱蜀, 刘开培, 秦亮, 等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(14):3948-3962. ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: an overview[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(14):3948-3962.
- [27] WU Heng, WANG Xiongfei. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4):3573-3589.
- [28] QU Zhihua. *Cooperative control of dynamical systems: applications to autonomous vehicles*[M]. London, UK: Springer, 2009.
- [29] MILANO F, DORFLER F, HUG G, et al. Foundations and challenges of low-inertia systems[C]//*Power Systems Computation Conference (PSCC)*. Dublin, Ireland: IEEE, 2018:1-25.
- [30] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 电力系统新型振荡问题浅析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(10):2821-2828. XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. On new oscillation issues of power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10):2821-2828.
- [31] 王伟胜, 张冲, 何国庆, 等. 大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J]. *电网技术*, 2017, 41(4):1050-1060. WANG Weisheng, ZHANG Chong, HE Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4):1050-1060.
- [32] UK National Grid ESO. Technical report on the events of 9 August 2019[DB/OL]. [2020-07-24]. https://www.ofgem.gov.uk/system/files/docs/2019/09/eso_technical_report_-_final.pdf.
- [33] 杨超然, 辛焕海, 宫泽旭, 等. 变流器并网系统复电路分析与广义阻抗判据适用性探讨[J/OL]. *中国电机工程学报*. (2020-05-13)[2020-08-13]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.200135>.
- [34] 辛焕海, 李子恒, 董炜, 等. 三相变流器并网系统的广义阻抗及稳定判据[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(5):1277-1292. XIN Huanhai, LI Ziheng, DONG Wei, et al. Generalized-impedance and stability criterion for grid-connected converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(5):1277-1292.
- [35] GOLESTAN S, GUERRERQ J. Conventional synchronous reference frame phase-locked loop is an adaptive complex filter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 62(3):1679-1682.
- [36] HUANG Libin, XIN Huanhai, DONG Wei, et al. Impacts of grid structure on PLL-synchronization stability of converter-integrated power systems[DB/OL]. (2019-11-25)[2020-07-24]. <https://arxiv.org/abs/1903.05489>.
- [37] ZHANG Lidong. Modeling and control of VSC-HVDC links connected to weak AC systems[D]. Stockholm, Sweden: KTH, 2010.
- [38] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 58(4):1259-1267.

- [39] D'ARCO S, SUUL J, FOSSO O. A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in smartgrids[J]. *Electric Power Systems Research*, 2015, 122: 180-197.
- [40] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(21): 165-175.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of synchronous generator technologies[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(21): 165-175.
- [41] 张兴, 朱德斌, 徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J]. *电源学报*, 2012(3): 1-6, 12.
ZHANG Xing, ZHU Debin, XU Haizhen. Review of virtual synchronous generator technology in distributed generation[J]. *Journal of Power Supply*, 2012(3): 1-6, 12.
- [42] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(8): 89-93.
DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(8): 89-93.
- [43] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(19): 82-89.
CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(19): 82-89.
- [44] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2591-2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [45] 秦晓辉, 苏丽宁, 迟永宁, 等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(9): 36-43.
QIN Xiaohui, SU Lining, CHI Yongning, et al. Functional orientation discrimination of inertia support and primary frequency regulation of virtual synchronous generator in large power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(9): 36-43.
- [46] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen. Damping low-frequency oscillations through VSC-HVDC stations operated as virtual synchronous machines[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 34(6): 5803-5818.
- [47] HE Wei, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Inertia provision and estimation of PLL-based DFIG wind turbines[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 32(1): 510-521.
- [48] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [49] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen, et al. A virtual synchronous control for voltage-source converters utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 5(4): 1565-1577.
- [50] ARGHIR C, JOUINI T, DORFLER F. Grid-forming control for power converters based on matching of synchronous machines[J]. *Automatica*, 2018, 95: 273-282.
- [51] JOHNSON B, DHOPE S, HAMADEH A, et al. Synchronization of parallel single-phase inverters with virtual oscillator control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 29(11): 6124-6138.
- [52] 徐政. 高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战[J]. *南方电网技术*, 2020, 14(2): 1-9.
XU Zheng. Three technical challenges faced by power grids with high proportion of non-synchronous machine sources[J]. *Southern Power System Technology*, 2020, 14(2): 1-9.
- [53] YANG Chaoran, HUANG Linbi, XIN Huanhai, et al. Placing grid-forming converters to enhance small signal stability of PLL-integrated power systems[DB/OL]. (2020-07-08)[2020-07-24]. <https://arxiv.org/abs/2007.03997>.
- [54] ZHANG Lidong, HARNEFORS L, NEE H. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 25(2): 809-820.
- [55] XIN Huanhai, HUANG Linbin, ZHANG Leiqi, et al. Synchronous instability mechanism of P-f droop-controlled voltage source converter caused by current saturation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(6): 5206-5207.
- [56] HU Qi, HU Jiabing, YUAN Hao, et al. Synchronizing stability of DFIG-based wind turbines attached to weak AC grid[C]// *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Hangzhou, China: IEEE, 2014: 2618-2624.
- [57] 张琛, 蔡旭, 李征. 全功率变换风电机组的暂态稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(14): 4018-4026.
ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Transient stability analysis of wind turbines with full-scale voltage source converter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(14): 4018-4026.
- [58] ZHAO Changhong, TOPCU U, LI Na, et al. Design and stability of load-side primary frequency control in power system[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(5): 1177-1189.
- [59] HUANG Linbin, YANG Chaoran, SONG Meiyang, et al. An adaptive inertia control to improve stability of virtual synchronous machines under various power grid strength[C]// *Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. Atlanta, Georgia, USA: IEEE, 2019: 1-5.
- [60] ZHU Jiebei, BOOTH C, ADAM G, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 1277-1287.
- [61] HUANG Yunhui, YUAN Xiaoming, HU Jiabing, et al. DC-bus voltage control stability affected by AC-bus voltage control in VSCs connected to weak AC grids[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 4(2): 445-458.
- [62] YUAN Hui, XIN Huanhai, HUANG Linbin, et al. Stability analysis and enhancement of type-4 wind turbines connected to very weak grids under severe voltage sags[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, 34(2): 838-848.
- [63] HE Xiuqiang, GENG Hua, MA Shaokang. Transient stability analysis of grid-tied converters considering PLL's nonlinearity[J]. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2019, 4(1): 40-49.
- [64] HE Xiuqiang, GENG Hua, LI Ruiqi, et al. Transient stability analysis and enhancement of renewable energy conversion system during LVRT[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1612-1623.
- [65] PAN Yanfei, LIU Feng, SHEN Chen, et al. Robust small-signal stability region of power systems considering uncertain wind generation[C]// *Power & Energy Society General Meeting*. Denver, Colorado, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [66] PAN Yanfei, LIU Feng, CHEN Laijun, et al. Towards the robust small-signal stability region of power systems under perturbations such as uncertain and volatile wind generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(2): 1790-1799.
- [67] ZHOU J, DING Hui, FAN Shengtao, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. *IEEE Transac-*

- tions on Power Delivery, 2014, 29(5):2287-2296.
- [68] SUUL J, D'ARCO S, RODRIGUEZ P, et al. Impedance-compensated grid synchronisation for extending the stability range of weak grids with voltage source converters[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(6):1315-1326.
- [69] FAN Lingling. Modeling type-4 wind in weak grids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 10(2):853-864.
- [70] 王志文, 沈沉, 刘锋. 不同锁相机制的双馈电机对电力系统小干扰稳定的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34):6167-6176.
- WANG Zhiwen, SHEN Chen, LIU Feng. Analysis on impact of doubly fed induction generations with different phase lock mechanism on power system small signal stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34):6167-6176.
- [71] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 直驱风电并网系统中锁相环引起次同步振荡的开环模式谐振机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7):1935-1950, 2209.
- WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Mechanism analysis of open-loop modal resonance on subsynchronous oscillations caused by PLL in power systems with integrated PMSGs[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7):1935-1950, 2209.
- [72] SUN Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11):3075-3078.
- [73] RYGG A, MOLINAS M, ZHANG Chen, et al. A modified sequence-domain impedance definition and its equivalence to the dq-domain impedance definition for the stability analysis of AC power electronic systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4):1383-1396.
- [74] WANG Xiongfei, HARNEFORS L, BLAABJERG F, et al. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(2):1775-1787.
- [75] 伍文华, 蒲添歌, 陈燕东, 等. 兆瓦级宽频带阻抗测量装置设计及其控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14):4096-4106, 4314.
- WU Wenhua, PU Tiange, CHEN Yandong, et al. Megawatt wide-bandwidth impedance measurement device design and its control method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14):4096-4106, 4314.
- [76] YUAN Hao, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Modeling of grid-connected VSCs for power system small-signal stability analysis in DC-link voltage control timescale[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5):3981-3991.
- [77] HU Jiabing, YUAN Hao, YUAN Xiaoming. Modeling of DFIG-based WTs for small-signal stability analysis in DVC timescale in power electronized power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3):1151-1165.
- [78] 刘巨, 姚伟, 文劲宇. 考虑PLL和接入电网强度影响的双馈风机小干扰稳定性分析与控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11):3162-3173.
- LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu. Small signal stability analysis and control of double-fed induction generator considering influence of PLL and power grid strength[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11):3162-3173.
- [79] HU Jiabing, HU Qi, WANG Bo, et al. Small signal instability of PLL-synchronized type-4 wind turbines connected to high-impedance AC grid during LVRT[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(4):1676-1687.
- [80] DONG Wei, XIN Huanhai, WU Di, et al. Small signal stability analysis of multi-infeed power electronic systems based on grid strength assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2):1393-1403.
- [81] ZHU Donghai, ZHOU Shiyang, ZOU Xudong, et al. Improved design of PLL controller for LCL-type grid-connected converter in weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5):4715-4727.
- [82] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen, et al. An adaptive phase-locked loop to improve stability of voltage source converters in weak grids[C]//Power & Energy Society General Meeting(PESGM). Portland, Oregon, USA:IEEE, 2018:1-5.
- [83] YANG Dongsheng, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. Symmetrical PLL for SISO impedance modeling and enhanced stability in weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2):1473-1483.
- [84] HUANG Linbin, ZHANG Leiqi, XIN Huanhai, et al. Current limiting leads to virtual power angle synchronous instability of droop-controlled converters[C]//Power & Energy Society General Meeting(PESGM). Boston, MA, USA:IEEE, 2016:1-5.
- [85] 齐琛, 汪可友, 吴盼, 等. 虚拟同步机功角稳定的参数空间分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15):4363-4372.
- QI Chen, WANG Keyou, WU Pan, et al. Parameter space analysis of the rotor angle stability of virtual synchronous machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15):4363-4372.
- [86] SHUAI Zhikang, SHEN Chao, LIU Xuan, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(4):4648-4661.
- [87] 章雷其, 黄林彬, 黄伟, 等. 提高下垂控制逆变器虚拟功角暂态稳定性的控制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12):56-62, 99.
- ZHANG Leiqi, HUANG Linbin, HUANG Wei, et al. Control methods for improving virtual power angle transient stability of droop controlled inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):56-62, 99.
- [88] PAN Donghua, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2):1019-1033.
- [89] TAUL M, WANG Xiongfei, DAVARI P, et al. Current limiting control with enhanced dynamics of grid-forming converters during fault conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2):1062-1073.
- [90] 尚磊, 胡家兵, 袁小明, 等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):403-412.
- SHANG Lei, HU Jiabing, YUAN Xiaoming, et al. Modeling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):403-412.
- [91] 辛焕海, 甘德强, 鞠平. 多馈入电力系统广义短路比: 多样化新能源场景[J/OL]. 中国电机工程学报. (2020-08-06)[2020-08-13]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.200827>.
- [92] BARKLUND E, POGAKU N, PRODANOVIC M, et al. Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5):2346-2352.
- [93] PAN Yanfei, CHEN Laijun, LIU Xiaonan, et al. Stability region of droop-controlled distributed generation in autonomous microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(2):2288-2300.
- [94] MOHAMED Y, EI-SAADANY E. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled

inverters in distributed generation microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 2806-2816.

- [95] LIU Jia, MIURA Y, TOSHIFUMI L. Fixed-parameter damping methods of virtual synchronous generator control using state feedback[J]. IEEE Access, 2019, 7: 99177-99190.
- [96] SKOGSTAD S, POSTLETHWAIT I. Multivariable feedback control: analysis and design[M]. New York, USA: Wiley, 2007.
- [97] HUANG Linbin, XIN Huanhai, DORFLER F. H_∞ -control of grid-connected converters: design, objectives and decentralized stability certificates [J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid. (2020-04-01)[2020-08-13]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9052742>. DOI: 10.1109/TSG.2020.2984946.

作者简介:

黄林彬(1992—),男,广东揭阳人,博士,主要研究方



黄林彬

向为电力电子装备同步稳定分析、稳定控制设计与稳定在线监控(**E-mail**: huanglb@zju.edu.cn);

辛焕海(1981—),男,江西萍乡人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源电力系统稳定分析和控制(**E-mail**: xinhh@zju.edu.cn);

鞠平(1962—),男,江苏靖江人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统广义负荷建模与高效调控;

胡家兵(1982—),男,安徽六安人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力电子化电力系统稳定分析与控制。

(编辑 李玮)

Synchronization stability analysis and unified synchronization control structure of grid-connected power electronic devices

HUANG Linbin¹, XIN Huanhai¹, JU Ping¹, HU Jiabing²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the development of renewable energy, DC power transmission and storage technology, the large-scale power electronic devices are integrated into modern power grids, which significantly changes the characteristics of power systems. Different from conventional synchronous generators, power electronic devices that consist of semiconductor switching devices have no rotational part and their dynamics of synchronization are determined by the converters' control strategies. Hence, ever-increasing penetration of power electronic devices make the power system gradually change from physical synchronization dominated by synchronous generators to control synchronization. Although the high controllability and flexibility of power electronic devices can possibly improve the synchronization stability and dynamic performance of power system, control synchronization characteristics of power electronic device have not been fully understood. It is difficult to give full play to the advantages of power electronic devices to improve the dynamic performance of system. Even in many cases, synchronization instability will occur because of the unreasonable design of synchronization control, endangering the safe and stable operation of power system. So some research works on the synchronization stability analysis and control design of power electronic devices are briefly reviewed. Moreover, a unified synchronization control structure is proposed, which covers the structures of phase locked loop based control and some types of grid-forming control. This unified synchronization control structure quantitatively parameterizes different synchronization controls as different connections among control loops, which lays the foundations for searching optimal control structures. Finally, the possible future research directions are discussed based on existing analysis methods, technical solutions and intuitive understandings on the synchronization of power electronic devices.

Key words: power electronic devices; synchronization stability; synchronization of control; phase locked loops; grid-forming control; unified synchronization control structure