

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.002

## 构网型储能PCS变流器控制策略及发展趋势综述

李振, 曲玉珊, 周喜超, 彭勇, 杨斌, 王楠

(国网综合能源服务集团有限公司, 北京 100053)

**摘要:** 作为未来电力系统的重要供能来源,以风光为主的新能源发电给电力系统带来了波动性和间歇性等诸多困扰,储能装置具有平抑新能源出力波动,维持电网稳定的功能,其中,储能功率转换系统(PCS)即储能变流器,作为储能设备的并网接口,其控制特性显著影响储能单元的并网特性。传统跟网型控制变流器存在功率调节能力低、缺乏电网支撑能力等问题,研究中陆续提出了构网型(grid-forming, GFM)变流器的控制模式,储能单元结合构网型控制策略可有效改善电网侧的动态性能和稳定性。文中阐述了构网型储能变流器的结构和特点,以及常用的VF控制、基于PSL的GFM控制、VOC和匹配控制的构网型控制模式,并就存在的变流器过流保护和同步稳定性进行了讨论,分别介绍了面对小干扰和大干扰时变流器的同步稳定方式。最后介绍了构网型控制在储能上的应用以及未来发展方向。

**关键词:** 储能变流器; 跟网型(GFL)控制; 构网型(GFM)控制

### Review of Control Strategies and Development Trends for Grid-forming Energy Storage PCS Converters

LI Zhen, QU Yushan, ZHOU Xichao, PENG Yong, YANG Bin, WANG Nan

(State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd., Beijing 100053, China)

**Abstract:** As a critical energy source for future power systems, renewable energy generation, primarily based on wind and solar power, has brought about numerous challenges such as volatility and intermittency to the power system. Energy storage devices play a key role in smoothing out fluctuations in renewable energy output and maintaining grid stability, in which, the power conversion system(PCS), known as the energy storage converter, serves as the grid interface for energy storage equipment, and its control characteristics significantly influence the grid-connected performance of the energy storage unit. The traditional grid-following control converter has such issues as low power regulation and a lack of grid support capacity, the control mode of grid-forming(GFM) converter is successively proposed in the study. The energy storage unit in combination with grid-forming control strategy can effectively improve dynamic performance and stability of the grid side. In this paper the structure and characteristics of grid-forming converter and the grid-forming control mode of the commonly used VF control, GFM control based on PSL, VOC and matching control are described. The overcurrent protection and synchronization stability of the existing converter are also discussed. The synchronization stability methods of converter under small and large disturbances are introduced respectively. Finally, the application and future development trends of grid-forming control in energy storage are introduced.

**Key words:** power conversion system; GFL control; GFM control

## 0 引言

中国大力发展新能源,以实现碳达峰、碳中和能源绿色低碳转型为战略目标背景下,可再生能源成为未来能源发展的主力,风电<sup>[1-3]</sup>、光伏<sup>[4-5]</sup>等新增能

源已超过传统化石能源,成为满足日益增长用电需求的关键<sup>[6]</sup>。旨在更好地维持电网运行安全性和稳定性运行而提出的构网型控制策略,在储能变流器的应用中随着研究的不断进行逐渐得到广泛应用。

工程中并网变流器广泛使用跟网型(grid-

收稿日期:2025-12-03; 修回日期:2026-01-23

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2400104);国网综合能源服务集团有限公司科技项目(527899230002)。

Project Supported by National Key R & D Program of China(2021YFB2400104), Science and Technology Project of State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd.(527899230002).

following, GFL)控制,即根据一定的功率特性控制变流器的输出电流,即控制馈入电网的有功/无功功率。跟网型变流器等效为被控制电流源,其稳定运行需要电压源为其并网点提供电压支撑。传统电力系统采用同步发电机/同步调相机提供电压值乘。随着新能源大规模接入电网,同步发电机占比逐渐降低,电网强度不断下降,从而为新能源大规模并网持续稳定运行带来了挑战。未来新型电力系统中发电单元均由变流器构成时,若均采用跟网型控制,则系统无法正常运行。为保证新型电力系统的稳定运行,需要将并网变流器呈现为电压源而非电流源,提供对系统电压支撑,即形成了构网型变流器控制。

近年来,构网型变流器在并网应用中得到了广泛的关注。部分试点工程和一些国家已经开始对构网型变流器的应用进行了规划。德国电网公司 Amprion 规划 2035 年构网型变流器占比达 35% 的目标,每年新接入电网的变流器中,50% 以上需采用构网型控制<sup>[7]</sup>。为了给构网型变流器大规模工程应用提供理论基础支撑,需要对构网型变流器进行全方面的理论分析。构网型变流器的控制借鉴了同步发电机的部分机理,但不能直接套用同步发电机的相关结论,需展开深入的研究。目前,构网控制技术发展还在快速发展阶段,诸多实际工程问题亟需解决。

构网型变流器通过控制有功功率实现并网同步,尽管其数学模型已知,但其控制参数的选取具有较高的灵活性,也增加了其分析的复杂度。当构网型变流器外环控制策略为控制直流电压时,如柔直换流站,其模型架构则与同步发电机差异较大,从而导致其稳态和暂态特性产生显著差异。此外,构网型变流器过流能力有限,故障下运行能力受限,其故障穿越和故障响应能力亟需完善。目前,国内外学者提出了多种不同的控制策略及改进方法,其中下垂控制和虚拟同步机控制的应用较为广泛。

文中对储能变流器首先进行了概述,针对跟网型和构网型储能 PCS 控制,由于具备优秀的稳定性、弹性以及高渗透性,构网型控制策略在系统强度低以及物理惯性低的电网中拥有更好的适用性<sup>[8]</sup>。因此文中对构网型控制策略进行了具体的介绍。构网型控制具体包括电压频率控制、基于功率同步回路的构网型控制、以及非线性的虚拟振荡控制和匹配控制在内的多种方式<sup>[9]</sup>。文中也阐述了构网型储能变流器的应对方式,以及构网型控制模式在储能领域的应用和未来发展方向。

作为一项新兴技术,构网型变流器在储能领域拥有极大的应用空间和需求度,它可以提升系统的稳定性,为电力系统提供更为稳定可靠的电压频率支撑,为储能的发展带来极大的进步空间。

## 1 储能变流器概况

储能技术在电力系统能量管理、调节负荷、频率调节响应等方面的重要作用也日渐凸显,它能够与可再生能源结合,维持系统的稳定性。根据能量的存储方式,又可以将储能技术继续细分为机械储能、电磁储能以及电化学储能<sup>[10]</sup>。在储能系统中作为关键环节的电池储能系统(battery energy storage system, BESS)由电池管理系统、功率转换系统和能量管理系统构成。其中电池通过功率转换系统(PCS)实现与电网的能量双向交换,即储能变流器,其系统结构见图 1。

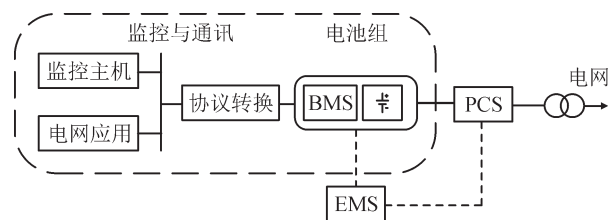


图1 电池储能系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of BESS

目前大容量 PCS 包括低压模块化并联结构与链式多电平(cascaded multilevel converter, CMC)两种结构,其中 CMC 可分为含有 DC/DC 单元变换器与标准单元变换器两种结构。另外,还有一种基于模块化多电平(modular multilevel converter, MMC)的高压储能拓扑,需要大量储能元件串联成 MMC 高压直流母线。储能变流器的作用见表 1<sup>[11]</sup>。

表 1 储能变流器作用

Table 1 Function of PCS

应用	功能
调峰	实现削峰填谷,平抑电网负荷
一次调频	电力系统频率偏离目标频率时,通过储能变流器调整有功出力,减少频率偏差
二次调频 (AGC 调频)	跟踪电力调度指令,按照一定调节速率实现调整储能变流器出力,以满足电力系统频率及联络线功率需求
电压调节	通过控制无功功率控制电压,提高电压稳定性
备用容量	作为备用容量在常规电源故障期间保持在线,时刻准备放电的热备用状态
黑启动	在无外界电源的情况下,作为具备自启动能力的储能系统为电网提供恢复供电

### 1.1 储能变流器分类

功率转换系统(power conversion system, PCS)的

实质就是储能变流器,是连接于电池系统和电网或负荷之间的电能双向转换装置,是电网能量和信息转换的枢纽,可以通过控制策略实现对电池系统的充放电及功率控制、对网侧负荷功率跟踪以及控制离网运行下的网侧电压等功能<sup>[12]</sup>。

根据控制模式的不同,储能变流器可以分为跟网型储能变流器和构网型(grid-forming, GFM)储能变流器。其中,跟网型储能变流器可以看作是一个并联高阻抗的理想电流源;而构网型储能变流器可以看作是一个带有低输出阻抗的理想交流电压源,构网型储能变流器依靠控制回路设置所需的电压幅值和频率,以达到功率控制等目的<sup>[13]</sup>。二者的简化模型见图2。GFL和GFM储能变流器本质上都是在考虑变流器内部电流电压限制的基础上,依据实际运行条件来控制电网的有功和无功功率注入,且可通过在控制回路增加合适的外环控制来实现电压和频率的调节,来修改实际有功和无功的设定值。

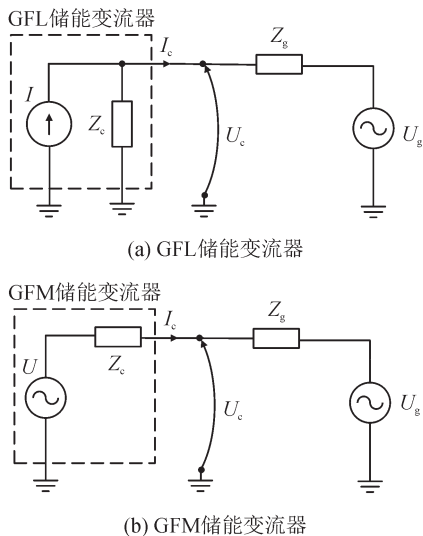


图2 GFL、GFM储能变流器简化模型

Fig. 2 Simplified model of GFL and GFM converter

不过两种变流器并不是简单的戴维南或者诺

顿变换,跟网型储能变流器是通过控制注入电流来控制功率;而构网型储能变流器是通过控制输出端电压来控制功率<sup>[14]</sup>。在面对电压突变时,由于电压源的固有特性,构网型的快速反应是优于跟网型单元的,但在扰动的大小以及系统特性的不同条件下,电流的跃升也会产生过流风险,进而影响到变流器的硬件安全<sup>[15]</sup>。此外,它们的同步机制也有所区别,跟网型储能变流器主要利用PLL锁相环与交流电网同步,而构网型储能变流器采用功率控制来实现同步功能,不过目前也存在利用PLL同步的构网型控制<sup>[16]</sup>。构网型储能变流器的功率控制的同步机制,使其在弱电网中能够更加稳定。在电网出现波动时,可以通过改变电压相位和幅值的方式来调节输出的有功和无功功率,在电网功率调节中更加灵活,也更利于维持系统的稳定性<sup>[17]</sup>。

### 1.2 构网型储能变流器

构网型储能变流器作为能提供电压幅值和频率的电压源,其结构见图3,主要包括DC/DC变换器、DC/AC变换器以及相应的构网型控制环节。其中构网型控制主要是利用交流母线功率以及功率给定输入,进行相应的构网型策略控制,再经过内环闭环控制及PWM调制,最终完成对储能变流器输出电压和频率的控制作用。由于构网型变流器的输出阻抗很低,需要一个非常精准的同步控制系统来帮助其与电网其他变流器并联运行,这也是目前需要对其控制环节进行不断深入研究的原因之一。

## 2 构网型储能变流器控制策略

由于构网型储能变流器存在多种应用场景,及在不同运行模式下的多种控制需求,其控制模式主要分为以下几种:VF控制、基于PSL的GFM控制、非线性的VOC控制和匹配控制,见图4,文中将以上述几种控制模式作为重点介绍。

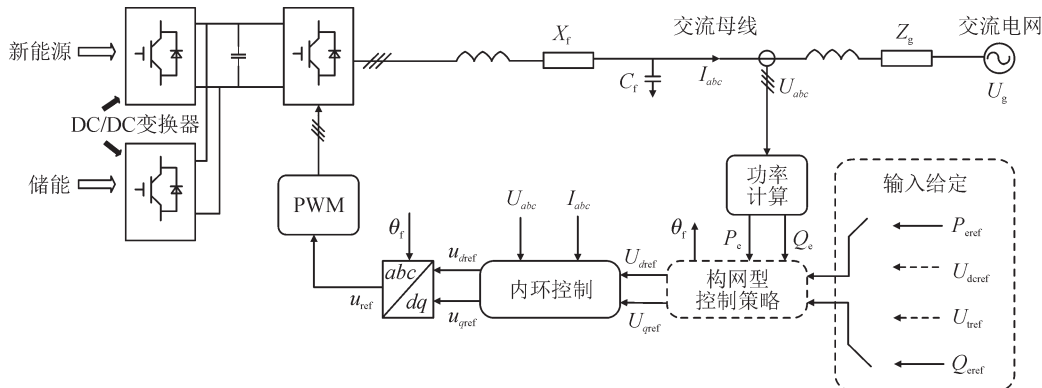


图3 构网型变流器的典型结构

Fig. 3 Typical structure of grid-forming converter

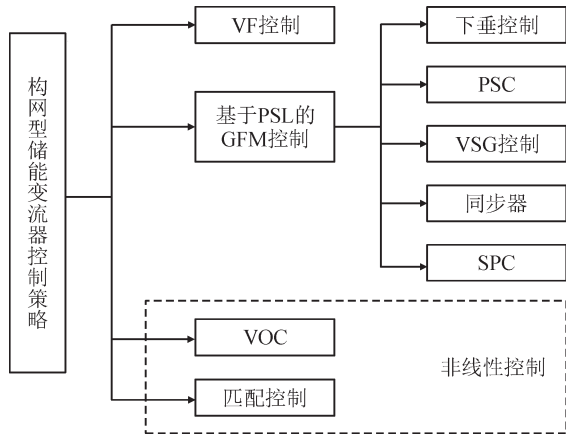


图4 构网型控制策略分类

Fig. 4 Classification of grid-forming control strategies

2.1 VF控制

电压频率(voltage/frequency, VF)控制是基于电压电流双闭环的控制模式,其控制策略框图见图5,通过控制环节保证最后变流器的电压和频率恒定<sup>[18]</sup>。

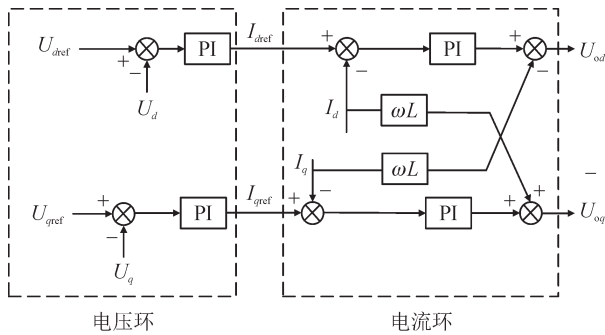


图5 VF控制策略

Fig. 5 VF control strategies

从上述的控制流程中可以看出, VF控制是通过闭环控制保持输出电压幅度和频率的恒定,这种闭环控制通常应用于无源电网,如孤岛电网或UPS系统。然而,由于恒压电源的特性, VF控制的转换器没有功率共享能力,无法在有源电网中运行。

2.2 基于PSL的GFM控制

由于构网型储能变流器在孤岛运行模式之外,也需要进行并网工作,因而其需要具备一定的并网能力。基于功率同步回路(power synchronization loop, PSL)的构网型控制策略是在VF控制的基础上,模拟同步机的转子特性提出,其具有功率控制、电网支持以及电网自同步等功能<sup>[19]</sup>。基于PSL的GFM控制的一般结构见图6。

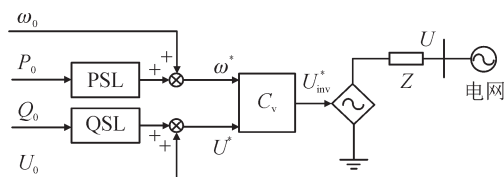


图6 基于PSL的GFM控制一般结构

Fig. 6 PSL-based GFM control

根据不同的PSL结构,又可以具体分为一阶系统的非惯性控制的下垂控制和PSC,以及拥有二阶系统的惯性控制的VSG控制、同步器、PSC等多种控制模式。

2.2.1 下垂控制

下垂控制(droop control)是模拟与同步发电机相似的下垂特性曲线作为PCS的控制方式,它是根据电网频率和变流器的端电压,通过下垂特性获得所需的电压和频率,然后反向调整输出电压的相位和幅值,最终达到合理控制有功和无功功率的目的。其控制结构见图7。

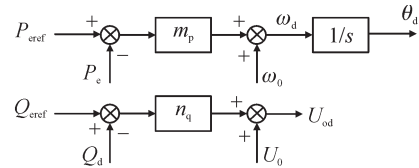


图7 下垂控制策略

Fig. 7 Droop control strategies

下垂控制是目前较为常见、也是广泛应用的控制策略之一,具有控制简单,可以在不使用通讯的情况下,通过给定适合的下垂系数来实现功率分配等诸多优势。但下垂控制也存在由于不具备同步发电机的惯性和阻尼特性,容易引起电网电压和频率振荡等问题,降低了系统对于扰动的敏感程度,对功率的精准分配也有很大的影响,因此为了改进下垂控制的精准程度,基于虚拟频率和改进型下垂控制等技术有了发展<sup>[20-21]</sup>。

为了消除由负载不平衡引起的测量功率分量波动,目前也有在功率控制回路中添加低通滤波器(low-pass filter, LPF),从而形成了LPF下垂控制模式<sup>[22]</sup>。LPF下垂控制可以提供惯性支持,以抑制电网的频率波动,见图8。

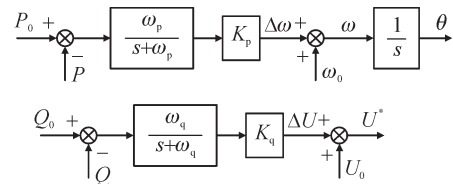


图8 LPF下垂控制策略

Fig. 8 LPF droop control strategies

2.2.2 功率同步控制(PSC)

功率同步控制(power synchronization control, PSC)最初是基于高压直流输电(high-voltage direct current, HVDC)的应用提出,为了应对弱电网条件下运行的传统矢量控制电压源变流器(voltage-source converter, VSC)的限制。其同步策略是模拟同步机的功率同步机制,旨在用过功率同步环路(即有功

率环路)使VSC与电网同步,通过瞬时功率的传输来实现<sup>[23]</sup>。PSC控制策略见图9。

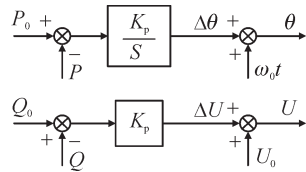


图9 PSC控制策略

Fig. 9 PSC control strategies

### 2.2.3 虚拟同步机(VSG)控制

虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制是模拟同步发电机摇摆方程的方式来实现电网型控制,同步发电机通过控制输出机械功率来稳定输出功率和频率,通过改变励磁电流产生的电磁功率来控制输出电压。因此在虚拟同步控制中要加入电压、频率和功率的闭环控制来模拟同步发电机<sup>[24]</sup>,见图10。基于VSG的储能变流器控制拥有和传统同步发电机相同的稳定特性,对于改善系统的惯性,稳定输出功率以及维持电网稳定和平滑运行有很大的意义。

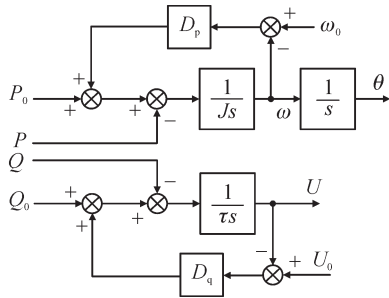


图10 VSG控制策略

Fig. 10 VSG control strategies

对于虚拟同步机的内环控制可以仅使用电流控制<sup>[25]</sup>,也可以使用电压电流双闭环控制;亦可省去电流环,改为将电压相位信号直接合成为调制波<sup>[26]</sup>。除此之外,无功控制环节也可以使用下垂控制、积分控制、比例—积分控制等多种控制方式<sup>[26-27]</sup>。对于传统VSG控制带来的电流不平衡和功率振荡问题,也有学者提出通过加权控制的方式实现对功率波动和电能质量的综合控制<sup>[28]</sup>。

### 2.2.4 同步器

同步器(synchronverter)是在VSG的基础上,在变流器的设计中进一步考虑了同步机的励磁特性,更全面地模拟了同步机的操作特性<sup>[29-30]</sup>。无论是正常操作还是预同步,同步器都能很好地满足同步单元的要求,见图11。

同步器的同步过程与标准PLL的同步过程原理相似,受控制带宽和自由度等限制,因此有文章

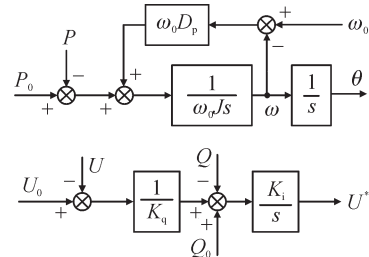


图11 同步器控制策略

Fig. 11 Synchronverter control strategies

提出修改同步器的结构以提高系统控制的动态响应,同时保持相同的稳态下垂特性<sup>[31]</sup>。

### 2.2.5 同步功率控制器(SPC)

同步功率控制器(synchronous power controller, SPC)通过将功率控制系统设计为二阶过阻尼系统,以克服电网扰动下的同步机固有的功率振荡问题<sup>[32-33]</sup>。其控制框图见图12。

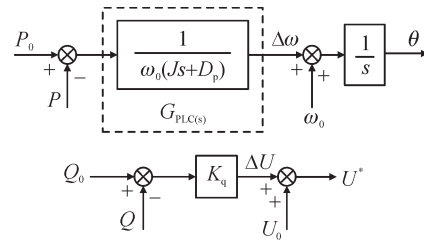


图12 SPC控制策略

Fig. 12 SPC control strategies

同时,当图11中的  $G_{PLC(s)} = 1/[\omega_0(Js + D_p)]$  为一阶传递函数,则可得图13所示的闭环有功功率控制。

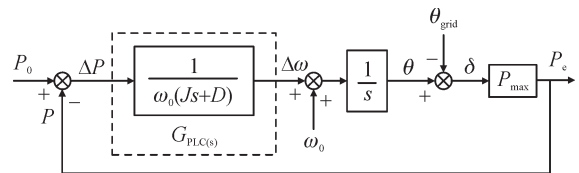


图13 闭环有功功率控制

Fig. 13 Closed loop active power control

闭环有功功率控制可设计为过阻尼系统,以减少同步机的固有功率振荡。此外,由于其控制结构类等效于LPF下垂控制,SPC还具有惯性支持能力<sup>[19]</sup>。

### 2.3 虚拟振荡控制(VOC)

虚拟振荡控制(virtual oscillator control, VOC)是一种非线性控制策略,其允许变流器从任意初始条件开始同步,且无需依赖通讯手段。通过调整VOC的控制参数,可以使其转换为经典的下垂控制,VOC的优势之一是其工作原理是基于瞬时域信号,而不是电量相量,因此与传统下垂控制相比,VOC控制更具优越性。当频率的调节范围高于特定阈值时,VOC相比下垂控制具有更好的动态特性,但对于较低的频率调节范围则会呈现相反的趋势。

常用的VOC基于范德波尔振荡器(Van der Pol oscillator)<sup>[34]</sup>, 见图14。

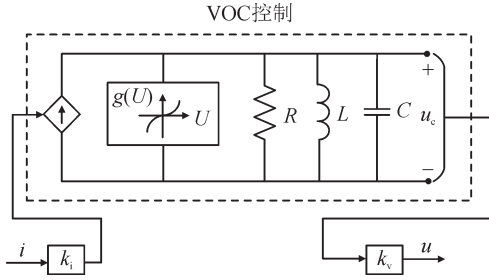


图14 VOC控制策略

Fig. 14 VOC control strategies

图14中所示VOC不能调节输出功率, 因此为了克服这个问题, 需要在VOC中添加附加控制回路。可采用两个PI控制器通过控制输出电流来调节输出功率<sup>[35]</sup>, 也可引入分层控制实现<sup>[36]</sup>。此外, 一些文献中还提出可调度型VOC(dVOC)控制方式, 对振荡器输入电流幅值和相位进行控制<sup>[37-38]</sup>。

#### 2.4 匹配控制

基于同步发电机和变流器模型之间的结构相似性, 变流器直流母线电压与同步发电机转子角频率、变流器直流电流与同步电机机械转矩之间拥有匹配关系, 与同步发电机吸收和释放转子动能的方式类似, 提出了匹配控制(matching control)策略, 见图15。通过匹配控制改变直流电流实现有功功率的跟踪, 需要对直流和交流侧的功率损耗进行补偿, 同时也需要对交流侧的恒定电压幅值进行设定。

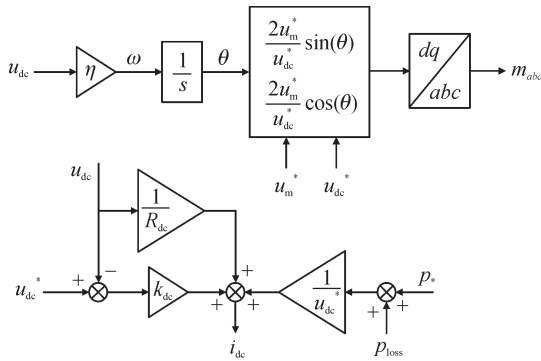


图15 匹配控制策略

Fig. 15 Matching control strategies

由控制流程中可知, 这种控制方式不需要进行交流侧的变量参数采样测量, 只需要检测直流母线电压。这种检测方式消除了交流侧采样和信号变换的时间延迟问题, 且不要求直流侧和交流侧控制在时间尺度上的分离, 因而避免了直流侧和交流侧的相互作用<sup>[39]</sup>。

以上按照基本分类分别介绍了构网型储能变流器的多种控制策略, 对于它们的基本结构、优缺

点以及各种控制模式现有的研究成果进行了总结, 对其总结见表2。

表2 构网型储能变流器控制策略

Table 2 Control of grid-forming converter

GFM控制模式	特点
VF控制	通过闭环控制保持电压幅值和频率恒定, 通常应用于无源电网。
下垂控制	通过下垂特性获得电压和频率, 反向调整输出电压的相位和幅值, 其控制简单但不具备同步发电机的惯性和阻尼特性, 易引起电压和频率振荡等问题。
基于PSL的GFM控制	PSC 模拟同步机的功率同步机制, 通过瞬时功率的传输实现与电网的同步。
VSG控制	通过加入电压、频率和功率的闭环控制来模拟同步发电机, 进而模拟同步发电机摇摆方程来实现构网型控制。
同步器	在VSG的基础上考虑同步机的励磁特性, 更全面地模拟同步机的操作特性。
SPC	通过将功率控制系统设计为二阶过阻尼系统, 以克服电网扰动下的同步机固有的功率振荡问题。
VOC	常用的VOC基于范德波尔振荡器, 作为一种非线性控制, 允许变流器从任意出事条件开始同步, 无需依赖通讯手段。
匹配控制	基于变流器直流母线电压与同步发电机转子角频率、变流器直流电流与同步电机机械转矩之间拥有的匹配关系, 通过匹配控制改变直流电流实现有功功率的跟踪。

### 3 构网型储能变流器面临的问题和解决方案

构网型控制技术能够有效地提升电网电压和频率的稳定性, 为电网提供支撑作用, 在未来电力系统具有广阔的应用前景。但随着构网型控制方案在储能变流器中使用的不断增加, 其面临的挑战也在增多, 包括面对电网扰动时的限流保护, 在大小干扰中不同的同步稳定性等等。并且尽管现阶段针对以上问题均有一定的解决方案, 目前仍有若干问题都有待进一步研究。

#### 3.1 限流保护

由于电压源的固有特性, 构网型储能变流器在面对大电网扰动时, 可能会产生过电流问题, 从而导致电力电子器件过载而损坏。

为了应对在过电流时导致的器件损坏问题, 可以选择在电网故障时改变构网控制方式, 采用与跟网型控制方式类似的矢量控制模式, 限制注入变流器的电流, 以达到限流的目的<sup>[40]</sup>。或者也可以采用虚拟阻抗控制, 依靠虚拟可变阻抗来限制变流器的端电压幅值, 来避免变流器内部产生过高的电流信

号。除此之外还有两种经典的故障限流策略,即瞬时饱和限制器和锁存限制器<sup>[41]</sup>,通过在电压和电流控制之间添加限流块来实现故障限流。

### 3.2 小干扰同步稳定性

在弱有源电网中,构网型变流器的小信号稳定性由于其电压调节能力而有所增强,因此当与弱有

源电网集成时,构网型变流器被广泛用于克服小信号不稳定性,具体分析见表3<sup>[8]</sup>。通常为了进行稳定性分析会采用状态空间和阻抗分析法是常用的稳定性分析方法,最近还提出了考虑电网基频动力学的终端特性分析方法,这些方法可以反映低频稳定性<sup>[42]</sup>。

表3 构网变流器小信号稳定性分析

Table 3 Analysis of small signal stability in GFM converter

分类	失稳机理	电压电流双闭环控制	电压幅值控制
低频振荡	变流器阻尼不足	失稳风险低	失稳风险低
工频振荡	构网型变流器攻角到其输出有功功率传函中未阻尼的谐振峰	失稳风险低	失稳风险高
高频振荡/谐波振荡	控制延时的输出阻抗高频处负阻尼	失稳风险高;可采用减少控制延迟,加入有源阻尼或无源阻尼	失稳风险低
次同步振荡	强电网下电压源直接并联;串补线路自然谐振频率在变流器低频负电阻区域内	强电网可采用加入虚拟电阻来提高变流器输出阻抗;串补电网采用有源阻尼控制,减小变流器次同步频率处负阻尼	强电网失稳风险低;串补电网可采用有源阻尼控制

不过与跟网型控制所采用的PLL不同,基于功率控制的构网型变流器在强有源电网中难以调节公共耦合点(PCC)电压,容易引起振荡和小信号不稳定,即变流器在受到小扰动时没有自动返回到初始操作状态,而自发振荡或出现非周期性失步。为了应对这种不稳定性就需要可靠的阻尼控制方式,如控制器参数整定和附加阻尼。

### 3.3 暂态稳定性

构网型储能变流器的暂态稳定主要是指在变流器受到大干扰扰动,比如电力线路的短路故障等,仍需维持变流器与电网同步的稳定能力。由于构网型储能变流器具有与同步机类似的同步特性,因此在大干扰下也会出现暂态失稳现象。具体暂态稳定性情况见表4<sup>[8]</sup>。

表4 暂态稳定性分析

Table 4 Transient stability

分类	故障后存在平衡点	故障后不存在平衡点	
		触发限流	未触发限流
基于有功功率同步	过阻尼响应,不存在暂态稳定问题	极限切除角固定,故障切除时间大于极限切除时间时,变流器也可重新同步	极限切除角受限流参数影响,故障切除时间大于极限切除时间时,变流器也可重新同步
	欠阻尼响应,可能存在暂态稳定问题	故障切除时间大于极限切除时间,则系统失步	
基于直流电压同步	欠阻尼响应,可能存在暂态稳定问题	故障切除时间大于极限切除时间,则系统失步	
基于PLL同步	暂态稳定性分析结果与跟网型类似		

为了应对这种失稳现象,考虑到虚拟惯量导致二阶动态控制特性,可以通过调节系统输入给定、阻尼系数以及惯性系数,有效提升变流器的大干扰稳定性,增强变流器的运行可靠性。除此之外较大的线路阻抗会降低系统的稳定裕度,同时也可以考虑无功功率控制的副作用,无功功率控制回路会在瞬态期间通过 $Q-U$ 下降曲线降低逆变器的内部电压,这可能会使系统陷入不稳定状态,可以通过近似李雅普诺夫方法预测系统的暂态稳定性,而通过在故障期间降低参考有功功率或提高无功功率,可

以提高瞬态稳定裕度<sup>[43]</sup>。

## 4 构网型控制在储能上的应用及未来发展方向

构网型储能变流器作为功率转换系统的重要模式之一,无论是在并网还是孤岛运行模式下,都可以很好地实现对电压和频率的控制,并能够实现并/离网的平滑切换,有效提高了系统的安全性和可靠性。且随着构网型储能变流器的发展和其技术优势的不断体现,未来构网型储能变流器必然会大量接入电网,如何实现多机并联的协调稳定也成为

储能变流器控制的一项重点研究方向。从多台变流器的集成、控制、能量管理等多方面考虑,有学者提出了无源型、有源型阻尼控制策略,以及离网运行环流抑制策略,来有效增加多机并联运行的稳定性<sup>[44]</sup>。此外,必要的通信技术也是维持系统稳定和复杂系统优化控制的关键手段。可以借鉴微电网中的分布式优化管理策略,将系统进行分层管理,以达到优化控制的目的。但目前构网型储能变流器的多机并联系统仍存在较大的技术缺口,由于大规模储能变流器接入电网导致的复杂动态特性,其稳定控制以及功率分配问题都值得在未来更进一步研究。

此外,在研究工作中,构网型储能变流器的控制通常通过简单的直接连接到直流侧的理想电压源两端来实现,但实际上,能量存储系统(ESS)也应当参与构网型储能变流器的控制环节,来实现更好地与电网同步并提供电网支持。然而ESS在构网型储能变流器中的应用和协调控制仍存在一定的技术壁垒,需要综合考虑ESS中的储能单元的性能、复杂程度以及成本来进行单元选择,二者的协调控制也是需要在日后进行重点研究的方向。

## 5 结语

构网型储能变流器作为近些年提出的概念,为变流器市场拓宽了新的研究思路,也为维持电网稳定发展带来了新的方法。文中首先介绍了储能变流的概念,并对跟网型储能变流器和构网型储能变流器做出了区别介绍,同时具体介绍了构网型储能变流器的一般结构,确定了组成它的系统和具体用途。

此外,文中对构网型储能变流器的几种控制方式进行了讨论,介绍了其基本控制原理,并引述了许多更为具体和优化的控制方式。同时还就变流器普遍会遇到的过流保护和同步稳定性问题进行了具体分析,介绍了构网型储能变流器在这方面的优势和相应的解决方法。最后重点介绍了构网型控制模式在储能方面的应用以及其未来发展趋势。对比起由于电流源特性而相对稳定性较差的跟网型储能变流器,作为替代方案的构网型储能变流器控制模式拥有更好的电网友好特性,也必将会在未来得到更多用户的青睐和长足发展。

## 参考文献:

[1] 韩 喆, 邓钰婷, 耿子越, 等. 大规模风电场协调控制架构及算法综述[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 1-18.

HAN Ji, DENG Yuting, GENG Ziyue, et al. Review of coordinated control architectures and algorithms for large-scale wind farms[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2025, 40(1): 1-18.

[2] 陈继开, 王润灏, 初 壮, 等. 风电直流外送系统的故障恢复分析与控制优化策略[J]. 智慧电力, 2025, 53(5): 82-89.

CHEN Jikai, WANG Runhao, CHU Zhuang, et al. Fault recovery analysis and control optimization strategy for wind power DC transmission systems[J]. *Smart Power*, 2025, 53(5): 82-89.

[3] 唐冬来, 李欢欢, 徐小云, 等. 基于微时空网格的复杂地形风电功率预测方法[J]. 供用电, 2025, 42(6): 104-113.

TANG Donglai, LI Huanhuan, XU Xiaoyun, et al. Wind power forecasting method for complex terrain based on microspatiotemporal grid[J]. *Distribution & Utilization*, 2025, 42(6): 104-113.

[4] 叶欢欢, 曾林俊, 颜 勤. 基于时变Copula函数的分布式光伏接入配电网薄弱点辨识及风险评估[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(6): 101-108.

YE Huanhuan, ZENG Linjun, YAN Qin. Weak point identification and risk assessment of distributed photovoltaic access to distribution network based on time-varying Copula function[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2025, 40(6): 101-108.

[5] 林 江, 蔡晓龙, 周剑桥. 基于Transformer模型的光伏系统故障分类与预测方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(4): 96-102.

LIN Jiang, CAI Xiaolong, ZHOU Jianqiao. Transformer model-based fault classification and prediction method for photovoltaic systems[J]. *Smart Power*, 2025, 53(4): 96-102.

[6] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.

XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 461-474.

[7] POPELLA H, HENNIG T, KAISER M, et al. Necessary development of inverter-based generation with grid forming capabilities in Germany[C]//20th International Workshop on Large-scale Integration of Wind Power into Power Systems as Well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants(WIW 2021). Germany: IET, 2021: 125-129.

[8] 詹长江, 吴 恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2359.

ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2339-2359.

[9] WANG Xiongfei, TAUL M G, WU Heng, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources—an overview[J]. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 2020(1): 115-134.

[10] 张文亮, 丘 明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.

ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(7): 1-9.

- [11] 张翔,陈自祥,王琨,等. 电网侧电化学储能经济性分析方法[J]. 中外能源, 2023, 28(3): 84-89.  
ZHANG Xiang, CHEN Zixiang, WANG Kun, et al. Economic analysis of grid-side electrochemical energy storage[J]. Sino-global Energy, 2023, 28(3): 84-89.
- [12] 陈亚爱,林演康,周京华. 用于微电网的储能变流器控制策略综述[J]. 电气传动, 2021, 51(21): 3-13.  
CHEN Yaai, LIN Yankang, ZHOU Jinghua. Review of power conversion system control strategies for microgrid[J]. Electric Drive, 2021, 51(21): 3-13.
- [13] 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.
- [14] ROSSO R, WANG Xiongfei, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: Control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021(2): 93-109.
- [15] 许洁翊,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.
- [16] 屈子森. 高比例新能源电力系统电压源型变流器同步稳定性分析与控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.  
QU Zisen. Synchronizing stability analysis and control technology of voltage source converters in power system with high-penetration renewables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [17] ROSSO R, WANG X, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: An overview of control approaches and future trends[C]// Proceedings of the 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). USA: IEEE, 2020: 9236211.
- [18] 徐少华,李建林. 光储微网系统并网/孤岛运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013(34): 25-33.  
XU Shaohua, LI Jianlin. Grid-connected/island operation control strategy for photovoltaic/battery micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013(34): 25-33.
- [19] ZHANG Haobo, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: Control strategy, stability, application, and challenges[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1239-1256.
- [20] ZHANG Weiyi, CANTARELLAS A M, ROCABERT J, et al. Synchronous power controller with flexible droop characteristics for renewable power generation systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1572-1582.
- [21] 刘彦呈,庄绪州,张勤进,等. 基于虚拟频率的直流微电网下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1693-1702.  
LIU Yan Cheng, ZHUANG Xuzhou, ZHANG Qinjin, et al. A virtual current-frequency droop control in DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1693-1702.
- [22] 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.
- [23] ZHANG Lidong, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.
- [24] 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 virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [25] 曾正,邵伟华. 基于线性化模型的虚拟同步发电机惯性和阻尼辨识[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 37-43.  
ZENG Zheng, SHAO Weihua. Estimation of inertia and damping for virtual synchronous generator based on linearized model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 37-43.
- [26] ZHENG T, CHEN L, GUO Y, et al. Comprehensive control strategy of virtual synchronous generator under unbalanced voltage conditions[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(7): 1621-1630.
- [27] 宋琼,张辉,孙凯,等. 多微源独立微网中虚拟同步发电机的改进型转动惯量自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 412-423.  
SONG Qiong, ZHANG Hui, SUN Kai, et al. Improved adaptive control of inertia for virtual synchronous generators in islanding micro-grid with multiple distributed generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 412-423.
- [28] LI Fen, LIU Guihua, ZHU Kai, et al. An improved control strategy of virtual synchronous generator under unbalanced conditions[C]// Proceedings of the 2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference(SPEC). Singapore: IEEE, 2018: 8636005.
- [29] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [30] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z, et al. Self-synchronized synchronverters: Inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [31] DONG Shuan, CHEN C. Adjusting synchronverter dynamic response speed via damping correction loop[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 608-619.
- [32] REMON D, CANTARELLAS A M, RAKHSHANI E, et al. An active power synchronization control loop for grid-connected converters[C]//2014 IEEE PES General Meeting, Conference & Exposition. USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [33] RODRÍGUEZ P, CITRO C, CANDELA J I, et al. Flexible grid connection and islanding of SPC-based PV power converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(3): 2690-2702.
- [34] 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.
- [35] HAZRA P, HADIDI R, MAKRAM E. Dynamic study of virtual oscillator controlled inverter based distributed energy source[C]//Proceedings of the 2015 North American Power Symposium (NAPS).

- [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [26] 邓军, 肖遥, 郝艳捧. 新型同塔双回高压直流输电线路分布参数测量方法及工程应用[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 154-158.  
DENG Jun, XIAO Yao, HAO Yanpeng. Measuring of distributed parameter and its application for dual-loop HVDC transmission lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 154-158.
- [27] 肖遥, 邓军, 夏谷林, 等. 高压直流输电线路分布参数测量新方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5375-5383.  
XIAO Yao, DENG Jun, XIA Gulin, et al. A novel distributed parameters measurement method of HVDC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5375-5383.
- [28] 高海龙, 卿俊杰. 高压直流电力线路分布参数计算分析[J]. 电气技术, 2019, 20(9): 69-72.  
GAO Hailong, QING Junjie. Analysis on distributed parameter calculation of high voltage direct current transmission line[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(9): 69-72.
- [29] 张凤鸽, 文明浩, 刘铁, 等. 特高压三端直流输电线路的动态物理模拟[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2064-2071.  
ZHANG Fengge, WEN Minghao, LIU Tie, et al. Establishment of dynamic physical model of three-terminal UHV DC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2064-2071.
- [30] 谢惠藩, 李桂源, 徐光虎, 等. 大容量特高压多端混合直流实际运行关键特性分析[J]. 南方电网技术, 2022, 16(2): 50-57.  
XIE Huifan, LI Guiyuan, XU Guanghu, et al. Analysis of key operation characteristics of high-capacity multi-terminal hybrid UHVDC[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(2): 50-57.
- [31] 王加磊, 黄剑湘, 赵世伟, 等. 昆柳龙直流工程大地回线—金属回线转换研究与分析[J]. 电工技术, 2021(11): 96-99.  
WANG Jialei, HUANG Jianxiang, ZHAO Shiwei, et al. Research and analysis of ground loop-metal loop conversion in Kunliulong DC project[J]. Electric Engineering, 2021(11): 96-99.
- [32] 吕金壮, 陈兵, 张长虹, 等. 特高压直流高速开关研发关键技术研究[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 9-18.  
LYU Jinzhuang, CHEN Bing, ZHANG Changhong, et al. Research on key technology of ultra high voltage DC high speed switch[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 9-18.
- [33] 李兴文, 朱凯, 郭泽, 等. SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>混合气体电弧开断特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3315-3322.  
LI Xingwen, ZHU Kai, GUO Ze, et al. Experimental study on arc interruption characteristics of SF<sub>6</sub> and its mixtures with CF<sub>4</sub>[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3315-3322.

张长虹(1983—), 男, 教高, 研究方向为高压直流输电核心装备研发、高压开关设备智能化运维(E-mail: 183048839@qq.com)。

李明洋(1991—), 男, 高级工程师, 研究方向为高压交直流开关设备试验、运维与研发(通信作者)(E-mail: limydq@qq.com)。

(上接第 20 页)

- USA: IEEE, 2015: 7335221.
- [36] RAISZ D, THAI T T, MONTI A. Power control of virtual oscillator controlled inverters in grid-connected mode[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5916-5926.
- [37] SEO G S, COLOMBINO M, SUBOTIC I, et al. Dispatchable virtual oscillator control for decentralized inverter-dominated power systems: Analysis and experiments[C]//2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). USA: IEEE, 2019: 561-566.
- [38] AWAL M A, YU Hui, TU Hao, et al. Hierarchical control for virtual oscillator based grid-connected and islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 988-1001.
- [39] TAYYEBI A, DÖRFLER F, KUPZOG F, et al. Grid-forming converters-inevitability, control strategies and challenges in future grid applications[C]//CIRED Workshop. Ljubljana: CIRED, 2018: 0236.
- [40] ZHANG Lidong, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.
- [41] BOTTRELL N, GREEN T C. Comparison of current-limiting strategies during fault ride-through of inverters to prevent latch-up and wind-up[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3786-3797.
- [42] WANG Shike, LIU Zeng, LIU Jinjun, et al. Small-signal modeling and stability prediction of parallel droop-controlled inverters based on terminal characteristics of individual inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 1045-1063.
- [43] 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, 2019, 10(4): 4648-4661.
- [44] 李建林, 徐少华, 惠东. 百 MW 级储能电站用 PCS 多机并联稳定性分析及其控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4034-4046.  
LI Jianlin, XU Shaohua, HUI Dong. A review of stability analysis and control strategy of multi-parallel PCS for hundred MW level energy storage power station[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4034-4046.
- 李振(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为综合能源系统优化、储能系统调试运行技术及在电源调频中的应用(通信作者)(E-mail: lizhen@sgecs.com.cn)。