

构网型储能变流器及控制策略研究

李建林¹, 丁子洋¹, 刘海涛², 杨夯³

1. 北方工业大学储能技术工程研究中心, 北京市 石景山区 100144;
2. 南京工程学院智能电网产业技术研究院, 江苏省 南京市 211167;
3. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东省 济南市 250000)

Research on Grid-Forming Energy Storage Converters and Control Strategies

LI Jianlin¹, DING Ziyang¹, LIU Haitao², YANG Hang³

- (1. Energy Storage Technology Engineering Research Center, North China University of Technology, Shijingshan District, Beijing 100144, China; 2. Smart Grid Industry Technology Research Institute, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, 211167, China; 3. Shandong Power Economic Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250000, Shandong Province, China)

摘要: 具有高比例新能源和高比例电力电子设备的新型电力系统是实现“双碳”目标的重要手段,但新型电力系统也会带来一系列不稳定的问题。在新型电力系统中,构网型控制技术(grid-forming control technology, GFM)具有电压支撑和主动惯量特性,以此替代同步机实现电网支撑,并维持电力系统稳定性,因此GFM具有广阔的发展和前景。基于此,首先,对储能变流器的拓扑进行简要介绍,并针对GFM技术的控制特点为其选型;其次,对于现有的构网型控制策略进行总结分析;最后,提出当前研究难点以及发展过程中所面临的问题和挑战,为构网型控制技术今后的发展建设提供思路。

关键词: 新型电力系统; 构网型; 变流器; 拓扑; 控制策略

ABSTRACT: The new power system with high proportion of new energy and power electronic equipment is an important means to achieve the goal of “double carbon”, but the new power system will also bring a series of unstable problems. In the new power system, grid-forming control technology (GFM) has the characteristics of voltage support and active inertia, which can replace synchronous machine to realize grid support and maintain power system stability. Therefore, GFM has a broad development and application

基金项目: 北京市自然科学基金项目(21JC0026); 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金项目(XTCX202208); 国网山东省电力公司科技项目(52062522000D)。

Project was Supported by the Natural Science Foundation of Beijing (21JC0026); Open Research Fund of Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network (XTCX202208); Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power (52062522000D).

prospect. Based on this, this paper first briefly introduced the topology of energy storage converter, and selected its type according to the control characteristics of GFM technology. After that, a reasonable summary and analysis of the existing control strategies of GFM was made, the current research difficulties, problems and challenges in the development process and the research prospects were put forward, and the ideas for the construction of grid-forming construction were provided.

KEY WORDS: new power system; grid-forming; converter; topology; control strategy

0 引言

随着“双碳”目标推进,新型电力系统加速建设,新能源和电力电子器件在电力系统中占比不断增加,新能源取代传统能源也是发展的必然趋势。然而,在此发展过程中也面临诸如系统强度削减、稳定性降低等问题。而构网控制技术的出现能够极大程度避免此类情况的发生,其在“双高”新型电力系统中,具有电压支撑和主动惯量支持特性,可代替同步机实现电网支撑,且具备在无需外电网的情况下带负荷运行的能力,进而维持电力系统稳定性。从结构上看,构网型变流器从本质上是直流侧电压可保持恒定的电压源换流器,在孤岛模式和并网模式下皆可运行并提供黑启动,且能实现100%新能源接入,因此在新型电力系统领域发挥着越来越大的作用。

目前已有学者针对构网型变流器展开相关研究,文献[1]对基础的双级式储能功率变换系统(power conversion system, PCS)拓扑结构进行简要对比分析。文献[2]主要介绍了级联式储能PCS拓扑结构,并对其控制策略进行了总结。文献[3]对构网控制技术的现状进行总结,并指出其现存的研究难点。目前,构网控制技术发展还在初期阶段,上述文献对于构网型变流器的选型和具体控制策略的优劣并无针对性的解答。

本文首先简要介绍基础的储能变流器拓扑结构,再对结构相对复杂的级联H桥和模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑进行总结,通过对储能PCS的对比分析,进而为构网型变流器的选型提供合理建议。其次,对构网型控制技术的现有控制策略进行介绍,得出各自控制特点和使用场景。最后,分析构网控制面临的问题和挑战,并对其发展提供合理性建议。

1 构网型储能PCS拓扑结构

1.1 基础的储能PCS拓扑

1.1.1 单级式储能PCS拓扑

图1为单级式储能PCS拓扑结构图。其核心环节仅由一脉宽调制(pulse width modulation, PWM)变换器组成。其工作原理如下:首先由高压蓄电池组输出电能,通过PWM变换器进行逆变,再由LCL滤波和升压变压器调节控制,使输出电压和电网适配,并最终回馈于电网。反之,电网中的交流电也可通过PWM变换器整流形成直流电,并最终存储于高压蓄电池组中。其特点是:拓扑结构相对简单,技术较为成熟,转换效率高。但需要较高的直流母线电压,且由于过多的电池组串并联导致储能电池的管理难度提升,

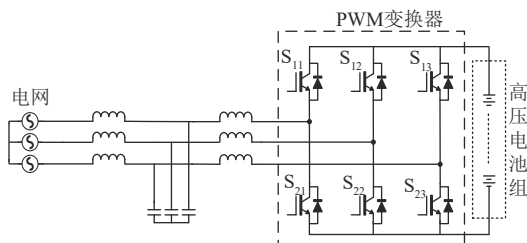


图1 单级式储能PCS拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of single-stage energy storage PCS

因此其难以适用于较高电压等级的储能系统。

1.1.2 双级式储能PCS拓扑

双级式储能PCS拓扑比单级式增加了一个双向DC/DC变换器环节充当控制调节电压等级的作用,如图2所示。由于单双级式储能PCS两者拓扑结构相似,因此工作原理也大体一致。加入双向DC/DC变换器后减轻了高压蓄电池组的运行压力,使其容量配置更为灵活,一定程度上增大了工作电压范围。但与此同时,加入双向DC/DC变换器后能量损耗增加,不易于后续的控制。

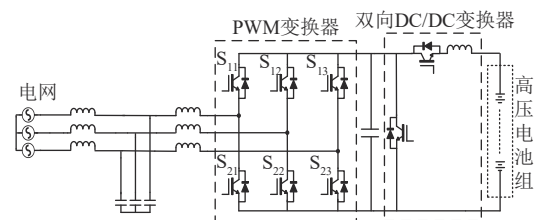


图2 双级式储能PCS拓扑结构图

Fig. 2 Topology diagram of bipolar energy storage PCS

1.1.3 三电平储能PCS拓扑

图3为三电平储能PCS拓扑图,其为典型的三电平中点钳位型拓扑,相较于上述两拓扑能输出更高的电平,有效提高变换器并网电流质量,降低系统共模电压对电池储能系统的冲击,但作为构网型PCS用在新型电力系统中电压等级相对较低。

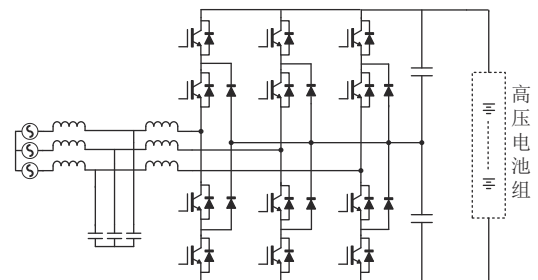


图3 三电平储能PCS拓扑图

Fig. 3 Topology diagram of three-level energy storage PCS

1.2 结构相对复杂的储能PCS拓扑

1.2.1 级联型储能PCS拓扑

图4为级联型储能PCS拓扑图,相较于上述拓扑结构,其拓扑开关管数量增加,呈现为模块化结构,在构网型构建和新型电力系统建设领域受到广泛关注^[4-7]。级联型储能PCS拓扑由功率转换系统和电池管理系统组成,其中PCS控制能量

的双向流动, 实现从直流到交流、交流到直流的转变, 以及从低压到高压、高压到低压的转变; 且实现储能系统的相间、相内功率控制, 平衡各桥臂各模块间的输出功率, 以此控制每个单元内电池荷电状态的均衡。储能单元接在每个H桥的直流侧, 桥臂采用星型连接, 经过滤波电感与电网相连。通过脉冲宽度调制技术控制交流侧电压矢量的大小与方向, 进而间接控制网侧电流的大小, 实现储能变换器的功率控制。另外, 系统电压等级方面可通过串联H桥模块来提高, 可有效规避大规模储能电池的串联。由于系统中每个模块可以独立工作且互不影响, 因此也极大方便了直流储能单元的功率控制和系统的容错控制^[8-10]。

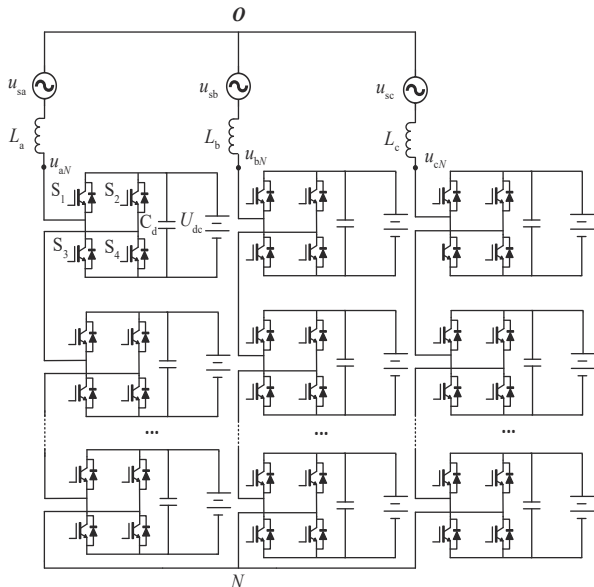


图4 级联型储能PCS拓扑图

Fig. 4 Topology diagram of cascade energy storage PCS

1.2.2 MMC拓扑

典型的MMC桥臂拓扑结构由多个功率单元和2个桥臂电感依次串联构成, 如图5所示, 拓扑一共有三相, 每一相上下2个桥臂可合并为一个相单元, 而每个桥臂都对应包含有 N 个子模块(sub-module, SM)。与级联型H桥拓扑不同, MMC存在公共的直流母线, 由此可大大减小储能单元中的纹波电流, 进而提高储能系统的运行稳定性, 且能提升MMC在电池储能应用的多样性^[11]。但与此同时, 也使得系统中的功率器件承受更高的关断电压, 此外还会导致各相环流问题。

和级联型拓扑一样, 模块化的设计可大大提升系统的电压等级。而在众多MMC子模块类型中, 半桥型子模块的运用最为广泛, 如图6所示。其中包含了4种工作模式, 表1给出了在不同工作模式下MMC子模块的状态。通过控制内部开关管的开通和关断, 就能达到对子模块输出电压及其工作状态调节变换的控制效果, 操作简单有效, 故适用于构网型及新型电力系统的构建^[12]。

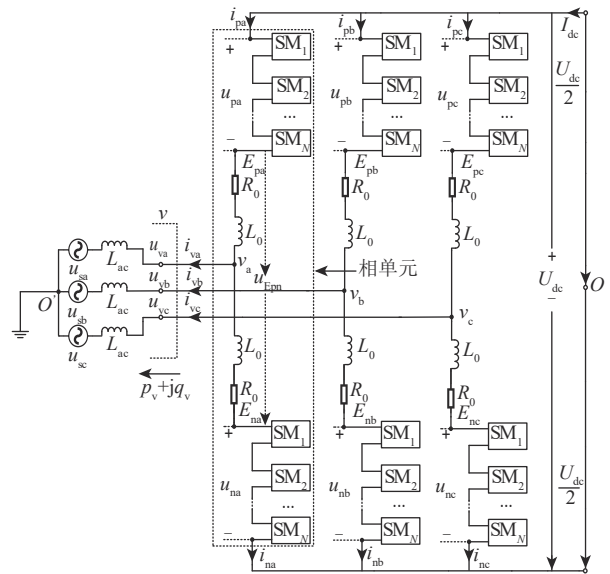


图5 MMC拓扑结构

Fig. 5 Topology of MMC

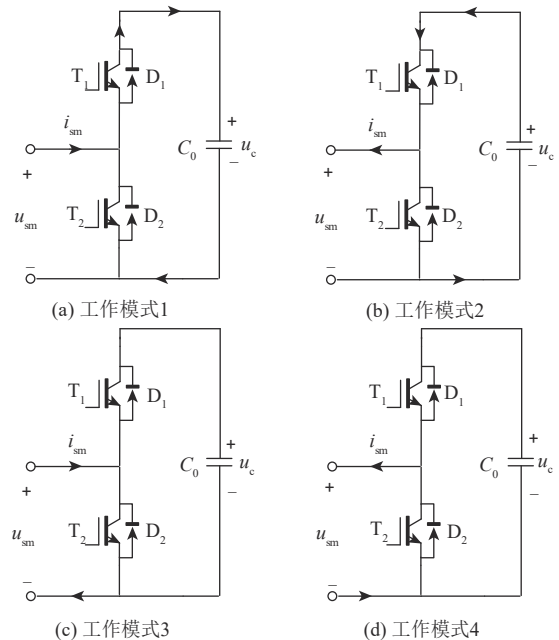


图6 MMC子模块的拓扑结构

Fig. 6 Topology of an MMC submodule

表1 MMC中不同工作模式对比

Tab.1 Comparison of different working modes in MMC

工作模式	开关管T1状态	开关管T2状态	电压 u_{sm}	子模块状态
1	导通	关断	u_c	充电
2	导通	关断	u_c	放电
3	关断	导通	0	切除
4	关断	导通	0	切除

1.3 储能PCS对比分析

储能PCS拓扑对比分析如表2所示。由表2可知，随着开关管的增加，拓扑结构变得复杂，随之系统的电压等级范围进一步提升。与此同时，控制难度和成本也随之增加。单级式和双级式储能PCS相比于模块化拓扑，结构相对简单，因此体积小、重量轻，控制难度上也相对容易。另外，在双级式储能PCS上增设的双向DC/DC变换器，在一定程度上使得容量配置更加灵活，因此可在后续的构网型拓扑构件中加入此方面设计。总体而言，单双级式PCS仅适用于电压等级比较低的储能系统，故此类储能PCS结构不宜使用在新型电力系统中。

三电平PCS拓扑相较于单级式和双级式储能

表2 储能PCS对比

Tab.2 Comparison of PCS energy storage

类型	开关管数量	体积和重量	适用电压等级	控制难度	成本	注释
单级式储能PCS	较少	较小	较低	较易	较低	容量配置缺乏一定灵活性，难以适用于较高电压等级的储能系统
双级式储能PCS	较少	较小	较低	较易	较低	容量配置相较于单级式拓扑更为灵活，但能量损耗增加
三电平储能PCS	中等	中等	中等	较易	中等	相较于单双级式拓扑，能输出更高的电平，有效提高变换器并网电流质量
级联型储能PCS	较多	较大	较高	较难	较高	有效规避了大规模储能电池的串联，系统中每个模块可以独立工作且互不影响
MMC储能PCS	较多	较大	较高	较难	较高	MMC存在公共的直流母线，可大大减小储能单元中的纹波电流

PCS能输出更高的电平。但受限于电压等级，因此也不适宜作为构网型变流器主体结构运用在新型电力系统中。

而级联型储能PCS和MMC拓扑结构相似，都是基于模块化的设计，因此大大提升了系统的电压等级范围。级联型储能PCS的优点在于无环流隐患，且串联H桥的设计可有效规避大规模储能电池的串联。MMC和级联型储能PCS相比，由于公共直流母线的存在，可使储能单元中的纹波电流大大减小，使其在电池储能应用更具多样性和灵活性，故较为适宜以级联H桥和MMC拓扑为思路应用于构网型变流器和新型电力系统建设。与此同时，模块化的拓扑结构也就意味着电池数目增多，导致成本较高，且控制策略变得复杂困难，因此选取对于构网型最优的控制策略就显得至关重要。

2 构网控制策略

构网控制技术从实现原理看，是通过变流器经过阻抗向系统并网点提供一个具有一定维持能力的电压源。其本质上是功率同步的过程，可实现等效惯量和系统强度支撑，具备100%新能源接入能力，强弱电网自适应，在并网和孤网情况下皆可运行。总体而言，对于系统中出现的功率波动，采用构网控制的储能和传统的同步发电机一样的功率分配机制，进而为系统调频/调压。

2.1 下垂控制

构网型控制策略在本质上就是保持功率同步的过程，作为最常用控制策略之一的下垂控制，其选择与传统同步发电机相似的频率下垂特性曲线作为源控制方式。通常情况下，同步发电机包含一次调频和二次调频过程，下垂控制则与此类似，并从中加以改进形成自身控制特点。同步机的一次调频是通过对外界功率的检测，来调整输出的有功及无功功率。而下垂控制则是根据输出有功功率的变化来对频率进行调整，省去对外界检测的过程^[13-15]。同步机的二次调频是通过调频器作用，使静态频率特性曲线发生平移，进而实现无差调节。而下垂控制不依靠调频器的作用，通过调节空载运行频率来实现二次调频，进而达到

和同步发电机一样的效果，如图 7 所示。其中， ω_{ref} 和 V_{ref} 分别为频率和电压参考值， $P(P^*)$ 和 $Q(Q^*)$ 分别为有功功率检测值(参考值)和无功功率检测值(参考值)，两者相减为有功(无功)功率偏差，功率偏差和下垂系数 $D_f(D_q)$ 相乘为频率(电压)调节项，即可视为系统调频/调压。频率和电压的控制方式为：

$$\begin{cases} \omega = \omega_{ref} + D_f(P^* - P) \\ E = V_{ref} + D_q(Q^* - Q) \end{cases} \quad (1)$$

这种控制方法分别对输出的有功功率和无功功率进行控制，省略了机组间相互协调的过程，且控制相对简单可靠。但下垂控制也有明显的缺点，虽然模拟了同步机的一次和二次调频过程，但不具备同步机的惯性和阻尼特征，因此易造成系统频率振荡，稳定性大打折扣。

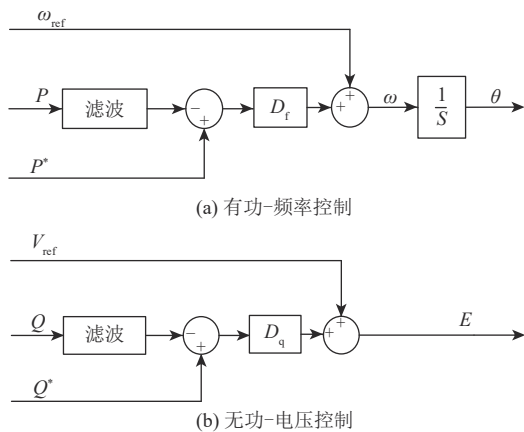


图 7 下垂控制

Fig. 7 Droop control

2.2 虚拟同步发电机控制

对于电力系统而言，用于维持其稳定的旋转惯性和阻尼分量是必不可少的，因此从构网型控制策略角度出发，需要着重考虑通过何种设计提升系统的惯性和阻尼特征，虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制应运而生。虚拟同步发电机控制策略就是模拟参考同步发电机的电磁方程和机械方程，进而替代其作用的过程，并以此为逆变器增加了惯性支撑。在VSG控制策略支撑下，并网逆变器能够参与电网电压和频率的调节。图8(a)为VSG控制的有功-频率控制，其模拟了同步发电机的一次调频过程，其中 J 为虚拟转动惯量， D 为阻尼系数。 J 和 D 的

存在使VSG具备了和同步发电机相同的特性，补充了维持系统稳定所需的惯量和阻尼系数，体现了构网支撑控制实现等效惯量和系统强度支撑的价值^[16]。

VSG的无功-电压控制框图如图8(b)所示。暂态时，输出功率比参考值大，其中功率差额为频率辅助服务提供功率，该功率一般由电池储能提供。VSG调节输出电压的方式和传统同步发电机有些区别，VSG通过对无功功率以及电压的检测，进而对输出电压进行控制。总体而言，以VSG控制策略为主体架构的构网型控制技术可安装在网侧变换器上，由于旋转惯性和阻尼分量得到了补充，可大大增强系统稳定性，因此适用场景也很广泛，但其也有缺点，即直流电压不可控。

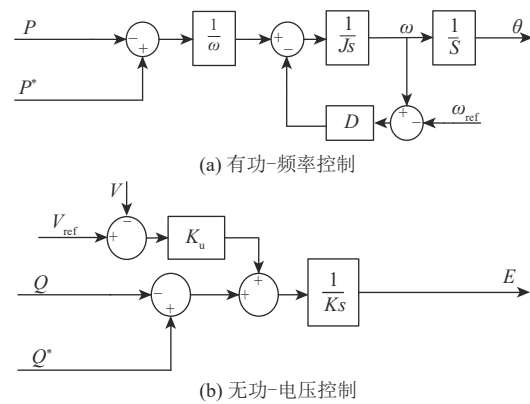


图 8 虚拟同步发电机控制

Fig. 8 Virtual synchronous generator control

2.3 匹配控制

匹配控制可视为是将VSG继续发展延伸的一种控制策略。与传统的同步发电机与VSG控制不同，匹配控制利用直流电容电压代替同步机中转子的作用，进而实现功率和电压同步。因此匹配控制也被称为直流电容电压控制，其直流侧电容电压暂态与同步机摇摆方程具有一定相似性。图9为匹配控制框图。其中， v_{dc} 为直流母线电容电压； μ 和 η 为匹配系数，两系数的取值和具体所涉及的电力系统结构相关，在系统不变的情况下此系数不变。与此同时，直流母线电压的改变并不能引起两系数的变化，因此 μ 和 η 为常系数。文献[17]详细说明了两个匹配系数的确定过程，由直

流母线电容电压与其相乘，分别可得到频率和参考电压幅值，并通过对频率的积分形成变流器输出电压的相位参考值，进而对输出电压进行控制，形成功率同步。另外，匹配控制中惯量能量来自电容电压降低时的能量释放，故可保证构网控制策略中必要的惯性支撑及系统稳定。采用匹配控制的优点在于和VSG控制相比，其直流电压可控，但有所欠缺的是其值不恒定。且该控制策略需要足够的直流电容容量，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。

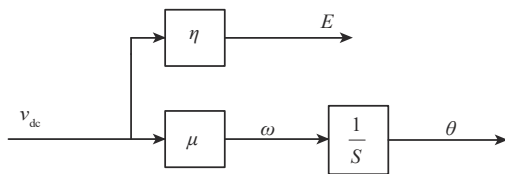


图9 匹配控制

Fig.9 Matching control

2.4 构网控制策略的比较分析

从实现原理方面分析，构网控制技术是通过变流器经过阻抗向系统并网点提供一个具有一定维持能力的电压源，以上3种构网控制策略也是在此基础上延伸发展，逐渐形成自身的控制特色。对于下垂控制，其优点是响应速度较快，且控制策略相对简单，但下垂控制也有明显的缺点，即不具备同步机的惯性和阻尼特征，易造成系统频率振荡。与之相对应的虚拟同步发电机控制则弥补了这一缺陷，旋转惯性和阻尼得到补充，但直流电压不可控。匹配控制是在VSG控制原理基础上加以改动调整，其不必在时间尺度上对于交流量和直流量控制严格独立，只需要测量直流母线电压，这也使其具备了低时延的优势。利用直流电容电压代替同步机中转子的作用，进而实现功率和电压同步，因此使得直流电压可控。总体而言，当前构网型控制技术路线众多，以虚拟同步技术为基础的路线占主导地位。对于系统中出现的功率波动，采用构网控制和传统的同步机一样具有功率分配机制，可在扰动前、中、后各阶段构建起电力系统稳定运行必须的电势，真正起到“支撑

性”作用。

3 构网控制面临的问题和挑战

随着新型电力系统的快速建设发展，构网型变流器将逐步替代同步发电机支撑起维持电网稳定的作用。虽然构网控制技术前景广阔，但也面临着一些问题和关键技术尚待解决完善^[18]。

3.1 限流保护

当电网发生短路故障时，构网型变流器极有可能因此产生很大的短路电流，严重危害变流器装置和电网安全运行。因此如何做到限流保护成为了构网型变流器亟待解决的问题。

最简单直接的方法是采用构网型控制的矢量控制方式，限制变流器的电流输入，但从电压电流双闭环控制方面分析，电流内环调整后达到饱和状态会导致电压外环失去了控制作用，而电压外环失去控制后则会导致一整个功率控制环稳定性遭到破坏，进而影响功率同步过程，最终影响系统稳定运行。故电流内环饱和会对功率环的同步控制稳定性乃至电力系统正常工作造成巨大影响，因此应对构网型控制策略的限流保护机制和功率控制环稳定性进行进一步的研究。

3.2 同步稳定性

构网型控制和跟网型控制的区别在于跟网型控制采用的是矢量控制，其依赖于电网电压锁相环。而构网型控制则采用功率同步控制。在弱电场景下对于维持微干扰下的同步稳定，构网型控制比跟网型控制效果要好。但在强电网的工作场景下，电网和变流器之间微小的相位差都会被急剧放大，引起功率波动，同步稳定性受到影响。目前，有效提高同步稳定性的措施包括控制器的参数整定和附加阻尼。因此，对于构网型控制策略的参数整定(如下垂控制中的下垂系数、虚拟，同步发电机控制中的惯量和阻尼系数)和阻尼比设定方面，应有更严谨的分析设定。

4 结论

基于“双高”新型电力系统建设需要，对构

网控制技术进行了归纳总结。级联H桥和MMC拓扑结构采用模块化设计,使得电压等级进一步提升,且电池无环流问题,利用更加灵活,故相较于其他拓扑而言更适用于新型电力系统和构网型控制。

对于构网型控制技术,后续可从以下方面攻关:

1) 构网控制技术具备类似常规同步发电机的电压源+自功率同步控制特性,其参与电网功率分配机制可继续沿用传统大电网的分析思路;

2) 积极探索能够稳定提供转动惯量和阻尼的控制策略机制;

3) 积极探索构网型变流器的应急处理措施,当电网发生短路故障时,既能保证实现限流保护,又能保证输出功率不受影响。

4) 为了使构网型变流器能够在不同的电压等级下都能被广泛应用,有必要对于其控制策略的参数整定和阻尼比设定方面多加分析,以此减小不必要的功率波动,进而保证同步稳定性。

参考文献

- [1] 马凌怡,肖珩,李雅欣,等. 电化学储能双级式PCS对比分析[J]. 电气应用, 2022, 41(3): 15-21.
MA L Y, XIAO H, LI Y X, et al. Comparative analysis of two-stage PCS for electrochemical energy storage[J]. Electrical Application, 2022, 41(3): 15-21.
- [2] 陈亚爱,洪忆南,周京华,等. 级联型储能功率变换系统控制策略综述[J]. 电气传动, 2021, 51(7): 3-11.
CHEN Y A, HONG Y N, ZHOU J H, et al. Overview of control strategy of cascaded energy storage power conversion system[J]. Electrical Transmission, 2021, 51(7): 3-11.
- [3] 许诒翊,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): 3586-3595.
XU Q Y, LIU W, LIU S, et al. Current situation and development trend of power system converter network control technology[J]. Power Grid Technology, 2022, 46(9): 3586-3595.
- [4] CATALIN A, TAOUBA J, FLORIAN D. Grid-forming control for power converters based on matching of synchronous machines[J]. Automatica, 2018, 95: 1-13.
- [5] 李建林,朱颖,胡书举,等. 风力发电系统中大功率变流器的应用[J]. 高电压技术, 2009, 34(1): 169-175.
LI J L, ZHU Y, HU S J, et al. Application of high-power converter in wind power generation system[J]. High Voltage Technology, 2009, 34(1): 169-175.
- [6] 李建林,樊辉,徐少华. 大容量级联式电池储能功率调节系统中多脉冲驱动技术研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2121-2126.
LI J L, FAN H, XU S H. Research on multi-pulse drive technology in large-capacity cascaded battery energy storage power regulation system[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(7): 2121-2124.
- [7] 彭志强,卜强生,袁宇波,等. 电网侧储能电站监控系统体系架构及关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 61-70.
PENG Z Q, BU Q S, YUAN Y B, et al. Architecture and key technologies of a monitoring and control system for an energy storage power station[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 61-70.
- [8] 李建林,马会萌,袁晓冬,等. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.
LI J L, MA H M, YUAN X D, et al. Review of key application technologies of large-scale distributed energy storage[J]. Power Grid Technology, 2017, 41(10): 3365-3375.
- [9] 陈晓光,杨秀媛,卜思齐,等. 考虑经济功能性的风电场储能系统容量配置[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 341-352.
CHEN X G, YANG X Y, BU S Q, et al. Capacity allocation of wind farm energy storage system considering economic function[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 341-352.
- [10] 李靖,王志和,倪浩. 基于改进下垂控制的直流微网运行研究[J]. 发电技术, 2021, 42(6): 765-774.
LI J, WANG Z H, NI H. Research on DC microgrid operation based on improved droop control[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(6): 765-774.
- [11] 杨继鑫,王久和,王勉,等. 基于无源控制的光储直流微网虚拟惯性控制策略研究[J]. 发电技术, 2021, 42(5): 576-584.
YANG J X, WANG J H, WANG M, et al. Research on virtual inertial control strategy of DC microgrid with photovoltaic and storage system based on passivity-

- based control[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 576-584.
- [12] 黄思林, 肖华宾, 黄常抒, 等. 高压级联式储能系统在火储联合调频中的应用及实践[J/OL]. 储能科学与技术: 1-13[2022-07-22]. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0241.
HUANG S L, XIAO H B, HUANG C S, et al. Application and practice of high-voltage cascade energy storage system in combined frequency modulation of fire storage[J/OL]. Energy Storage Science and Technology: 1-13[2022-07-22]. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0241.
- [13] 徐政, 肖晔庆, 张哲任. 模块化多电平换流器主回路参数设计[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2514-2527.
XU Z, XIAO H Q, ZHANG Z R. Design of main circuit parameters of modular multilevel converter[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(8): 2514-2527.
- [14] 罗朝旭, 刘洋, 罗钦, 等. 基于动态下垂系数的低压微电网无功控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 78-86.
LUO Z X, LIU Y, LUO Q, et al. Reactive power control strategy of low-voltage microgrid applying dynamic droop coefficient[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 78-86.
- [15] 王素娥, 吴永斌, 熊连松, 等. 基于功频下垂控制的光伏并网发电系统惯量阻尼机理研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 20-25.
WANG S E, WU Y B, XIONG L S, et al. Research on inertia and damping mechanism of grid-tied photovoltaic power generation system based on power frequency droop control[J]. Smart Power, 2020, 48(12): 20-25.
- [16] 许建中, 李承昱, 熊岩, 等. 模块化多电平换流器高效建模方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3381-3392.
XU J Z, LI C Y, XIONG Y, et al. Review of high-efficiency modeling methods for modular multilevel converters[J]. Journal of CSEE, 2015, 35(13): 3381-3392.
- [17] 周京华, 汪凡, 籍祥, 等. 级联型H桥储能功率变换系统关键控制策略综述[J]. 电器与能效管理技术, 2018(1): 8-17.
ZHOU J H, WANG F, JI X, et al. Summary of key control strategies of cascaded H-bridge energy storage power conversion system[J]. Electrical Appliance and Energy Efficiency Management Technology, 2018(1): 8-17.
- [18] 张颖, 李崇坚, 朱春毅, 等. 三电平H桥级联型逆变器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 78-82.
ZHANG Y, LI C J, ZHU C Y, et al. Three-level H-bridge cascaded inverter[J]. Journal of Electrical Technology, 2011, 26(5): 78-82.

收稿日期: 2022-08-26。

作者简介:



李建林

李建林(1976), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事大规模储能技术的研究工作, dkyjl@163.com;



丁子洋

丁子洋(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为构网型储能, m15321693356@163.com;



杨旻

杨旻(1990), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电网接入系统设计及分析、新能源及储能并网技术、输变电工程设计, yh19901018@126.com。

(责任编辑 辛培裕)