第49卷 第22期 2025年11月25日
DOI：10.7500/AEPS20250324004
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 49 No. 22 Nov. 25，2025

构网型变流器技术发展现状与工程应用

郭贤珊[1]，张国华[1]，李健栋[1]，黄沁心[2]
（1. 国家电网有限公司直流技术中心，北京市 100052；2. 四川大学电气工程学院，四川省成都市 610065）

摘要：随着中国新型电力系统建设的持续推进，能源绿色低碳转型加速升级，新能源装机容量占比大幅提高，大量电力电子设备接入电网，电力系统的电源侧、负荷侧、电网侧出现转动惯量降低、无功支撑能力变弱等深刻变化。在此背景下，电力系统要求设备具备新的特性，即同步机相应的特性和主动承担支撑电网等能力。文中从新型电力系统需求、构网型变流器技术、典型设备与工程应用3个方面阐述了新型电力系统的主要特点，并对构网型变流器工作原理与不同拓扑结构进行了分析。随后，结合现有研究与实际工程，介绍了构网型柔性直流、构网型静止调相机、构网型静止无功发生器、构网型储能这4种典型构网型变流器的工程应用案例。最后，针对构网型技术研究现状提出发展建议及展望，为进一步的工程应用提供参考。

关键词：新型电力系统；构网型变流器；工程应用；转动惯量；构网型柔性直流；构网型静止调相机；构网型静止无功发生器；构网型储能

0 引言

近年来，为应对温室气体排放增加、全球气温上升、极端天气频发的趋势，且随着技术进步和成本下降，中国实现了风电、光伏等新能源技术的跨越式发展，新能源发电产业逐渐规模化[1-6]。截至2024年6月底，全国发电装机容量达3 070 GW，其中，新能源装机容量为1 653 GW，占比为53.8%，首次超过煤电装机规模[7]。大规模新能源通过电力电子变流器接入电网，其随机性、低惯量、弱阻尼等特性对电力电量平衡提出新的要求，同时给电力系统安全运行带来了巨大挑战[8-13]。传统电力系统中，系统电压源的构建主要由同步机提供，但随着同步机在系统中的占比逐渐减小，电力系统的强度也将不断降低[14-17]。新型电力系统中电力电子高渗透率情况下，若缺少电压源构建电压，系统的惯量水平将显著降低、稳定性问题将更加凸显[18]。

新能源通过并网变流器接入电网，变流器的控制架构广泛采用跟网型（grid-following，GFL）控制，其本质上具有电流源特性，通过控制变流器输出电流，进而控制有功功率和无功功率的输出，实现分布式电源的高效利用[18-19]。跟网型控制与电网同步需要锁相环（phase-locked loop，PLL）测量并网点（point of common coupling，PCC）的相位信息，通过控制自身的输出功率或直流电压来同步，正常运行时需要通过系统中的电压源来为其连接点建立电压，缺乏频率和电压支撑能力[20-21]。为保证未来新型电力系统的安全稳定运行，提升变流器对系统的支撑能力，通过借鉴同步机的物理机理，国内外学者在不同时期、从多个维度提出了构网型（grid-forming，GFM）变流器的概念[22-28]，使得控制器本身模拟同步机实现电压源的特性，主动参与电网调节[29-31]。构网型变流器控制在具体实现上有所差别，但整体遵循着相同的特点：1）将变流器控制成电压源特性；2）通过控制变流器自身输出功率（或直流电压）而非仅采样外部交流电网电压来实现同步；3）可实现电网频率和电压支撑[32-37]。由于上述特点，近年来构网型变流器在电力系统中的应用得到了广泛关注。

2024年7月25日，国家发展改革委、国家能源局、国家数据局印发《加快构建新型电力系统行动方案（2024—2027年）》[38]，明确指出“推进构网型技术应用。根据高比例新能源电力系统运行需要，选择典型场景应用构网型控制技术，具备主动支撑电网电压、频率、功角稳定能力，提升系统安全稳定运行水平”。构网型技术的应用将是中国高比例新能源接入电网后，保障电力安全稳定运行的重要举措。本文以新型电力系统发展为背景，对构网型技术特

收稿日期：2025-03-24；修回日期：2025-08-21。
上网日期：2025-10-09。
国家电网有限公司总部科技项目（5100-202422368A-3-1-DG）。

点进行了梳理分析，结合构网型技术原理和类型，总结了构网型变流器应用案例，并为下一步推广提供了思路。

1　新型电力系统深刻变革下的挑战与需求

1.1　电力系统电源特性显著转变

在电源侧，新能源装机容量占比大幅提高，传统能源装机容量占比下降，不同电源间呈现深度耦合，极大地增加了电源侧的不可控性，需综合考虑外部环境和内层机理等复杂因素的影响[2-4]。新能源发电出力与气象条件密切相关，具有间歇性、随机性和波动性，对电网整体运行影响较大，极端天气对新能源出力影响极大，风速、辐照度等气象因素直接影响风电和光伏发电量，且预测困难[2,9]。电力系统在新能源出力波动下，尖峰功率更大，传输负担增加，要保证尖峰出力消纳，需调动巨大的灵活性资源，电力系统在供需平衡、运行控制、技术创新等方面面临挑战[5-6]。同时，新能源机组通过变流器与主网连接，这使得其对输出电气量的控制能力更强，反应更加灵敏，但故障耐受能力变差，电源侧不确定性增加。

1.2　电力系统负荷特性加速改变

在负荷侧，电能替代快速增长，负荷结构更加多元，用电设备总量持续发展，新型用电模式不断涌现，各行业化石能源消费向电力消费转移，需求总量持续上升，进一步影响电力系统负荷特性曲线。电网与用户互动持续深入，用户侧储能持续推广，负荷侧分布式电源、新型储能等对电力系统特性的影响加剧，配电网不再是单纯从主网获取电能的消费者，而是具有一定电力生产和自平衡能力的“产消者”[10]，负荷从“单一能量流向”向“双向能量互动”发展。第二产业用电占比逐步降低，第三产业和居民生活用电占比不断提升，导致日负荷率更低、负荷侧峰谷差拉大，用电高峰集中，用电可靠性、绿色化要求提高，电力系统调节需求增大，尖峰净负荷时域分布由“双驼峰曲线”转为“鸭子曲线”特征。

1.3　电力系统电网特性深刻变化

在电网侧，沙漠、戈壁、荒漠等形成的多个新能源大基地规模化开发，通过特高压直流输送至中东部地区，大量风电、光伏、储能基于集中汇集方式经变流器接入电力系统，“直流＋新能源”对常规机组替代明显，大电网之间形成电磁强耦合，系统稳定性问题显著。送端系统中，新能源具有“昼发夜歇”的特性，加之其普遍位于骨干网架未延伸的电网末端，电力汇集范围广泛，缺乏主力电源的有功和无功支撑[39]，电压、频率稳定等弱系统问题突出。受端系统中，直流集中馈入，外来电占比高，对以同步发电机为主体的电源结构产生影响，电源“空心化”问题突出，稳定运行压力增大[11]，送端电源大幅波动后产生的电力电量平衡问题日益凸显。

1.4　电力电子设备大量接入使得系统日趋复杂

常规直流、柔性直流、并网变流器等电力电子设备的广泛应用，对电力系统产生重大影响。一方面，电力电子设备大量替代常规发电机组，其物理特性和控制机理与常规发电机组存在本质区别，导致系统转动惯量降低，频率调节能力下降。另一方面，电力电子设备在系统中的渗透率不断提升，其输出特性由控制系统主导，打破了原来由电磁-机械物理过程决定的时间尺度解耦格局，转变为多时间尺度耦合的复杂格局[40]，系统的动态行为和稳态特性更加多变[41]，电网与电力电子设备电磁耦合特性导致宽频振荡问题突出[11,42]，电网与电力电子设备非线性耦合使得高频谐波日益显著，电网故障形态和连锁反应特性日趋复杂[42-43]。

1.5　电力系统以交流同步发电机为主的基础未变

新能源接入比例不断提高，但交流同步发电机作为传统发电设备，仍然承担着基础保障的重任。首先，同步发电机通过物理旋转部件提供真实转动惯量，能够在电网频率波动时自然释放或吸收动能，抑制电网频率的变化；其次，同步发电机励磁系统能够动态调节无功功率，系统故障时可为系统提供强大的电压支撑能力。此外，同步发电机在设计、制造、运维等方面的技术成熟度高，在电力系统中有着广泛适用性，具备其他同类设备无法完全替代的作用。同时，受电力保供和系统安全约束，传统同步发电机组仍然占据基础作用，电力系统总体以交流同步发电机为主的运行机制没有改变，电力系统的安全稳定运行仍是以传统同步发电机安全稳定运行为边界条件。因此，新型电力系统构建是一个渐进演变的过程[44]，必须在现有交流同步系统上发展。

1.6　新型电力系统构建需要新的设备特性

新型电力系统构建是实现“碳达峰”和“碳中和”目标的关键途径，以新能源为主要能源的本质特征，标志着能源结构从传统化石能源主导向清洁化、低碳化和可持续化的根本性转变[10]，但其通过电力电子设备接入系统的主动支撑能力不足，难以承担电力系统的频率调节、电压支撑和惯性响应等关键能力，给系统的安全稳定运行带来巨大挑战[45-47]。依靠扩建同步发电机、同步调相机机组增强系统的方式并非以系统根本需求为导向的解决方案，且代价巨大。因此，电力电子设备在实现自身功能的前提下，应具备为系统提供支撑的能力，即具备与同步机相应的电压源特性，主动承担起系统的支撑作用。

2　构网型变流器技术

2.1　并网变流器特性

并网变流器是一种特殊的电力电子装置，其主要功能是将直流电能转化为与电网同频率、同相位的交流电能，实现与电网的无缝对接。并网变流器广泛应用于太阳能、风能等新能源发电系统中，是连接新能源与电网的关键接口设备。并网变流器控制结构一般可分为跟网型和构网型这2种结构，如图1所示。图中：U_g为电网电压；Z_g为电网等效阻抗；Z_c为构网型变流器等效阻抗。

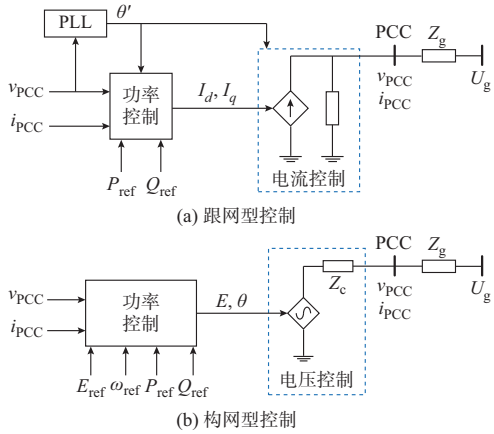


图1　并网变流器控制结构

Fig. 1　Control structures of grid-connected converter

跟网型变流器通过PLL获取PCC电压相位θ'，并测量PCC电压v_{PCC}和电流i_{PCC}，根据有功功率参考值P_{ref}和无功功率参考值Q_{ref}生成d、q轴电流指令I_d和I_q，保持与电网同步，同时控制自身输出电流，实现有功功率与无功功率的输出。跟网型变流器正常运行时需要由系统中存在的电压源为其PCC构建电压，依赖电网提供稳定电压和频率参考。从本质上讲，跟网型变流器是具有电流源特性的变流器。

构网型变流器基于PCC测量的v_{PCC}和电流i_{PCC}，通过内电势参考值E_{ref}、角频率参考值ω_{ref}、有功功率参考值P_{ref}、无功功率参考值Q_{ref}，模拟同步发电机功率同步环节和励磁环节，产生输出电压指令E和相位指令θ，可不依赖电网状态，能够提供惯量和阻尼。从本质上讲，构网型变流器可以等效为一个含内阻的、幅值相位均受控的电压源[20,48]。

2.2　构网型变流器控制技术

构网型变流器需将直流侧能量通过“变流器＋控制”自主拟合出同步发电机特性，输出能够支撑交流系统的波形，一般是以全控型功率半导体器件为基础的变流器才能实现，变流器的支撑能力取决于直流侧储能和器件的过载能力。以半控型器件为基础的变流器依赖电网（系统）进行换相，一般只能构建跟网型变流器。常用的构网型控制主要有虚拟同步机（virtual synchronous generator，VSG）控制、下垂控制、匹配控制、功率同步控制（power synchronization control，PSC）、虚拟振荡器控制（virtual oscillator control，VOC）等[20-21,49]，每种控制策略各有特点，适用于不同的应用场景。

1）VSG控制

VSG控制通过模拟同步发电机的转子运动方程（考虑阻尼作用），将其核心算法嵌入变流器控制中，通过采集端口电压、电流计算功率，利用核心算法生成电压幅值与相位参考[20-22]，将变流器端口特性塑造为类似同步发电机特性，可在并网功率跟踪的同时具备频率异常事件处理能力[50-51]，通过有功调节，降低PCC频率的偏差。VSG控制数学模型如式（1）所示。

$$\begin{cases} T_J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=T_m-T_e-T_d=\dfrac{P_m}{\omega}-\dfrac{P_e}{\omega}-D(\omega-\omega_0) \\ \dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\omega \end{cases} \tag{1}$$

式中：T_J为虚拟转动惯量；ω为虚拟角频率；T_m为虚拟机械转矩；T_e为虚拟电磁转矩；T_d虚拟阻尼转矩；P_m为虚拟机械功率；P_e为虚拟电磁功率；D为阻尼系数；ω_0为额定角频率。

VSG控制结构如图2所示。图中：P_s为有功功率测量值；Q_s为无功功率测量值；U_{ref}为输出电压参考值；U_{srms}为并网母线电压有效值；k_Q为无功下垂控制系数；E_0为空载电动势；s为拉普拉斯算子；PI表示比例-积分控制器。

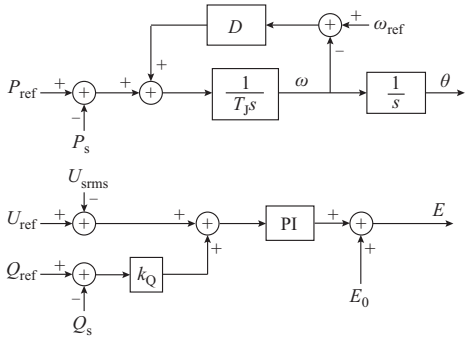


图2　VSG控制结构

Fig. 2　Structure of VSG control

2）下垂控制

下垂控制模拟同步机的有功-频率和无功-电压下垂特性，实现自主的功率分配和频率/电压调节，是构网型控制最典型的策略之一[20-21]。下垂控制因其控制相对简单可靠而被广泛应用，但其控制受负

荷变动的影响较大，无法为系统提供惯性与阻尼，控制结构如图3所示。图中：$U_{d\mathrm{ref}}$、$U_{q\mathrm{ref}}$分别为输出电压d、q轴分量参考值。

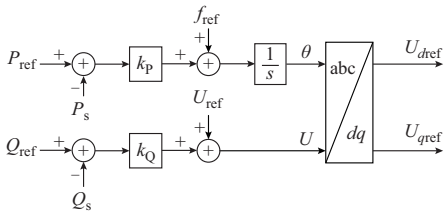


图3　下垂控制结构
Fig. 3　Structure of droop control

有功-频率下垂控制：通过调节频率实现有功功率的分配，如式(2)所示。

$$f=f_{\mathrm{ref}}-k_{\mathrm{P}}(P_{\mathrm{s}}-P_{\mathrm{ref}}) \tag{2}$$

式中：f为输出频率；f_{ref}为参考频率；k_{P}为有功下垂系数。

无功-电压下垂控制：通过调节电压实现无功功率的分配，如式(3)所示。

$$U=U_{\mathrm{ref}}-k_{\mathrm{Q}}(Q_{\mathrm{s}}-Q_{\mathrm{ref}}) \tag{3}$$

式中：U为输出电压。

3)匹配控制

匹配控制基于同步发电机释放或吸收转子动能的调频原理，通过变流器直流母线电容能量来模拟同步发电机转子能量。变流器与同步发电机在结构上存在一定的对偶性，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发电机机械转矩之间具有匹配关系[21,52]。匹配控制具备调节交流侧电压和频率的能力，控制结构如图4所示。直流母线电压U_{dc}按直流电压额定值U_{dcn}进行标幺化处理，直流电压标幺值与额定角频率ω_{n}相乘得到内生角频率ω，通过积分环节生成电压相位θ；U_{dc}与幅值调制比m相乘，得到参考电压幅值E[53]，其中，调制比由无功控制环路生成。

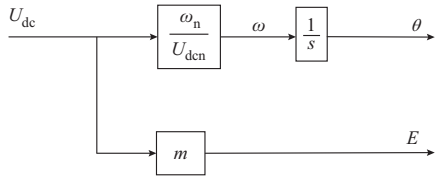


图4　匹配控制结构
Fig. 4　Structure of matching control

与VSG控制和下垂控制相比，匹配控制只需测量直流母线电压，因而其具有低时延的优势。另外，VSG控制和下垂控制都要求交流量和直流量的控制在时间尺度上相互独立，而匹配控制不存在此要求，其规避了交流端和直流端之间的交互作用。

4)功率同步控制

功率同步控制通过模拟同步机的功率同步机制，采用以有功功率为中间环节的控制方法保持变流器与电网的同步。此时，变流器可等效为发电机，产生的电能经过滤波电抗输送至电网侧，通过功率与相角之间的耦合交互，实现两者之间的同步[53-54]，其控制结构如图5所示。在同步过程中，变流器的输出功率P_{s}作为反馈状态量，与有功功率参考值P_{ref}作差后经过积分环节(积分系数为k_{i})得到参考相位变化量$\Delta\theta$，与参考相位θ_{ref}叠加得到变流器输出电压相位θ。

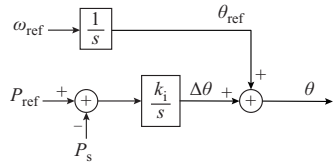


图5　功率同步控制结构
Fig. 5　Structure of power synchronization control

功率同步控制的有功环节与VSG和下垂控制具有相似的控制结构[55]，但功率同步控制采用瞬时功率转移机理，功率控制误差转换为频率偏差，积分为角度增量，输出信号。

5)虚拟振荡器控制

虚拟振荡器控制通过模拟耦合非线性振荡器的物理特性，即弱非线性极限周期振荡的动力学特性，采用数字控制器构造虚拟LC振荡回路，将谐振产生的正弦电压信号作为调制电压参考值[56]，进而调节电力系统中的电压和频率，实现系统的正常稳定运行。典型的范德波尔振荡电路结构如图6所示。图中：R_{os}、L_{os}和C_{os}分别为电阻、电感和电容，共同构成RLC线性谐振单元；i为虚拟振荡器的输入电流；U_{oso}为虚拟振荡器电容电压；非线性压控电流源输出电流为aU_{oso}^3，其中，a为三次多项式系数；K_{U}和K_{I}分别为电压和电流幅值变换系数；ADC表示模数转换环节；PWM表示脉宽调制环节。

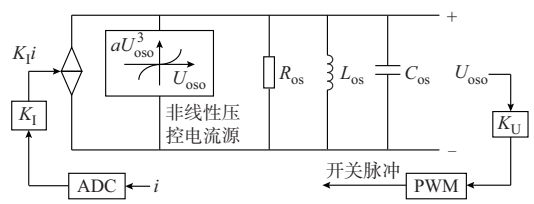


图6　虚拟振荡器控制结构
Fig. 6　Structure of virtual oscillator control

由于虚拟振荡器利用逆变器瞬时输出电流作为反馈量，无须计算平均功率，也无须进行闭环控制，故在响应速度上具有优势[57]。

综上,目前构网型控制有多种类型,且实现方式上有各种差异,但都是通过对同步机特性进行适当选取和模拟,以适应不同的应用场景和工程需求。因此,构网型控制技术的本质是对基于同步机特性的延续和拓展[58]。表1给出了构网型变流器不同控制方式的对比结果[21,49]。工程应用中,VSG控制具备惯量阻尼配置灵活、功率响应速度快等优势[59-61],目前在构网型变流器工程中有较多应用。传统下垂控制缺乏惯量阻尼支撑特性,电网频率、电压稳定裕度受限[62-64],多用于存在外部同步机电源支撑场景。匹配控制中的惯量响应特性通常依赖于机侧附加控制实现,动态特性弱于VSG控制,多用于风机并网场景。功率同步控制结合电压控制可提供一定的系统阻尼,场景适应性弱于VSG控制,常用于解决弱网下的同步问题。虚拟振荡器控制无需闭环控制和功率计算,动态响应速度要优于其他控制,但输出电压存在较大的谐波含量[57],不适用于对电能质量要求较高的并网场景。

表1　构网型变流器不同控制方式对比

Table 1　Comparison of various control methods for grid-forming converter

构网型控制方式	关键技术	自同步方式	模拟同步机特性相似度	工程应用特性[65-69]					
				惯量特性	阻尼特性	电压支撑	动态响应	复杂度	应用场景
VSG控制	虚拟惯量控制,阻尼控制	有功功率同步	高	具备	具备	强	较慢	高	弱网/离网
下垂控制	有功-频率下垂控制, 无功-电压下垂控制	有功功率同步	低	无	无	中	快	低	并网/微网
匹配控制	功率平衡控制, 附加惯量传递控制	直流电压同步	中	可配置	可配置	较强	较快	中	弱网
功率同步控制	功率同步算法	有功功率同步	低	可配置	可配置	中	较快	低	弱网
虚拟振荡器控制	谐振电压控制	非线性振荡电压同步	低	可配置	可配置	中	快	高	离网

2.3　构网型变流器主要功能

构网型变流器实现支撑系统功能一般有3个条件,即硬件的短时过载能力、直流侧的持续能量供给、控制软件的主动支撑设计。系统支撑特性主要分为以下4个方面:

1)功率响应方面。外部负载发生变化时,构网型变流器的功率由控制决定,可维持不变。端口电压的幅值由电压-电流双环控制决定,用以维持电压幅值稳定。

2)频率响应方面。构网型变流器具备一次调频功能,也可通过二次调频控制维持频率稳定。外部发生频率扰动时,其惯量特性由控制决定,可提供惯量支撑。惯量系数由控制系统决定,可灵活设置。

3)电压调节方面。系统发生电压扰动或明显跌落时,构网型变流器可通过控制维持内电势稳定,提供无功电流支撑系统电压,电流大小取决于变流器设备过载能力。

4)过载能力方面。构网型变流器由于实际内阻抗很小,暂态过程中电力电子器件通常承受短时高倍过载电流且过载能力相对较弱,一般通过预留器件裕度实现。

相比于构网型变流器,同步发电机的一次设备本身具备支撑系统条件,主要有以下特点:

1)功率响应方面。当外部负载发生变化时,同步发电机的转子惯量特性可以维持其内电势的频率不变。转子绕组次暂态特性可以维持内部次暂态电压幅值不变。

2)频率响应方面。同步发电机具备一次调频功能,同时,也可以通过二次调频控制维持频率稳定。外部发生频率扰动时,发电机转子释放动能,提供惯量支撑,惯性时间常数由机械特性决定。

3)电压调节方面。系统发生电压扰动时,同步发电机通过强励磁瞬时向系统注入超过额定电流数倍的短路电流,以恢复机端电压(提供电网强度)。

4)过载能力方面。故障暂态过程中呈现的内阻抗主要为暂态电抗,标幺值一般为0.3 p.u.左右,承受短时高倍过载电流的部件是定子绕组和转子绕组,过载能力强。

表2给出了构网型变流器与同步发电机主要特性[58,64]对比。

2.4　构网型变流器主要结构

大电网的系统惯量和频率、电压支撑需要具备更好响应和支撑特性的高电压、大容量变流器。目前,功率半导体器件耐压通流能力弱,超级电容、电池等储能容值低、储能时间常数小,基于现有元器件构建高电压、大容量、强支撑能力的变流器,需要采用复杂的结构。以下从拓扑类型、主接线方式、接入系统方式、储能接入方式4个方面介绍构网型变流器在工程应用上的主要结构。

表2　构网型变流器与同步发电机特性对比
Table 2　Comparison of characteristics between grid-forming converter and synchronous generator

类型	构网型变流器（含储能）特性	同步发电机（含原动机）特性
物理本质	电气系统	机电混合系统
工作原理	电力电子器件和控制策略模拟电压源特性	转子机械旋转自然产生同步电压和频率
惯量支撑	通过控制算法模拟惯量，惯量系数可灵活在线调整	转动惯量固定，根据不同原动机类别，惯性时间常数可取2～10 s
频率响应	具备一、二次调频能力，响应特性由控制参数决定，响应时间可达毫秒级	具备一、二次调频能力，响应特性由调速、调频系统决定，响应时间达秒级
电压调节	通过控制维持内电势稳定，提供无功电流支撑系统电压	内电势稳定，强励向系统注入短路电流以恢复机端电压
动态响应速度	电力电子控制，瞬时响应	机械惯性，实时响应
短路电流约束	半导体器件耐流能力限制	励磁系统和机械应力限制
对电网的依赖性	可无依赖运行	完全独立，仅需原动机驱动
故障穿越能力	具备主动限流、虚拟阻抗控制，支持低/高电压穿越	依靠机械惯性，但可能失步
振荡抑制	可优化阻抗特性，抑制次/超同步振荡	提供自然阻尼，但可能引发次同步振荡
维护与寿命	无转动部件，寿命长，维护成本低	机械磨损大，维护成本高
应用场景	高比例新能源电网、微电网、储能电站	传统火电、水电等同步机主导电网

1）拓扑类型

构网型变流器常用拓扑类型主要有模块化多电平拓扑和两/三电平拓扑这2种，分别如图7和图8所示。图中：U_{sa}、U_{sb}、U_{sc}为并网端三相电压；I_{sa}、I_{sb}、I_{sc}为并网端三相电流；R_0为变流器充电电阻；U_{SM}为子模块端口电压；T_1～T_4为绝缘栅双极型晶体管（IGBT）；D_1～D_6为二极管；C_0为子模块电容；C_1、C_2为变流器直流侧电容；L_0为变流器桥臂电抗；I_{dc}为变流器直流侧电流。

模块化多电平拓扑由多个结构相同或不同的全桥或半桥子模块级联构成，具有高度模块化和可靠性、可接入高电压等级、谐波含量较低、冗余特性好、可以集成储能元件等优势，但存在体积大、重量大、成本高、电容电压不平衡等问题。

两/三电平拓扑由2个/3个电平（正负）的电压输出组成，具有结构简单、控制简单、运维方便的优势，但电压等级受限、可靠性低、损耗高、谐波含量

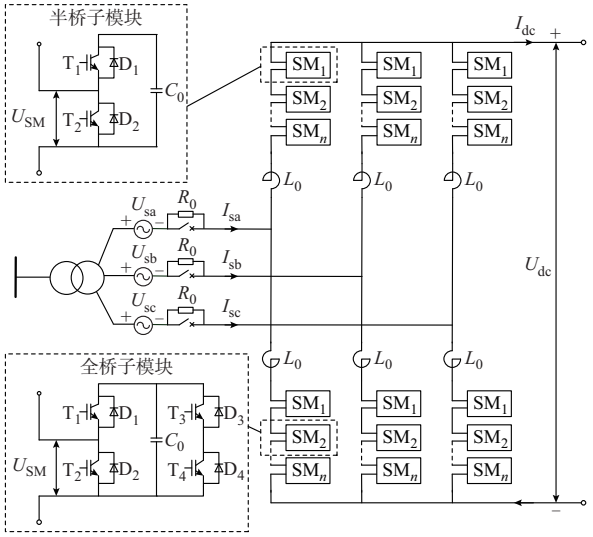


图7　模块化多电平变流器拓扑
Fig. 7　Topology of modular multilevel converter

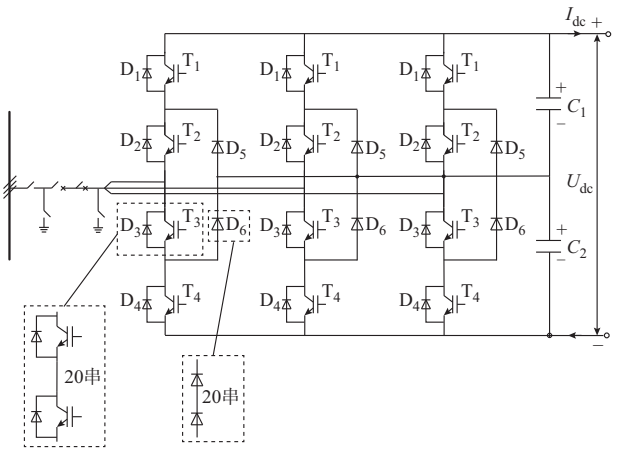


图8　两/三电平变流器拓扑
Fig. 8　Topology of two- and three-level converter

高，不能集成储能元件。构建高电压需多级器件串联，需解决器件的一致性和失效后的长期通流运行能力问题。

2）主接线方式

构网型变流器主接线方式主要有角接方式和直流方式这2种，分别如图9和图10所示。图中：QD_A、QD_B、QD_C为变流器充电电阻旁路开关；R_J为子模块放电电阻。

角接方式采用子模块级联，储能集成在子模块中，具备拓扑成熟的优势，但储能配置不灵活、利用率低，且受限于接口电路的熔丝和开关选型，难以采用耐压通流能力强的IGBT器件，启动电阻复杂、容量总体受限、可靠性不高。

直流方式采用与柔性直流相同的拓扑，可实现交流接入电压与储能解耦，具备拓扑成熟、储能配置

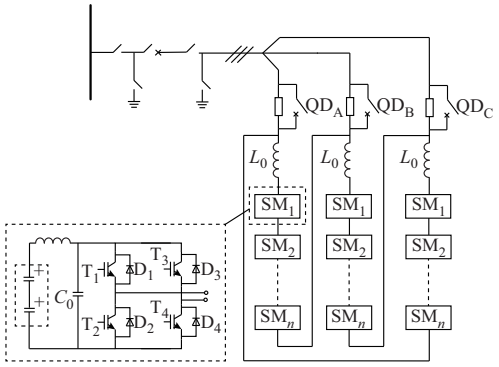


图9　角接方式变流器拓扑
Fig. 9　Topology of delta-connected converter

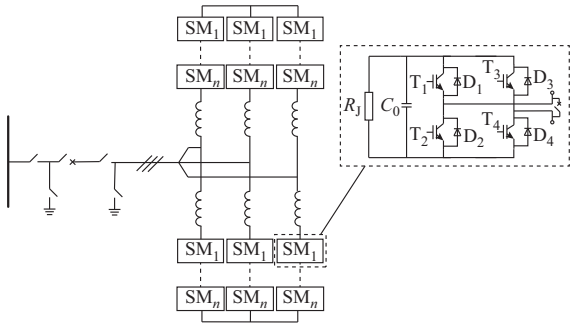


图10　直流方式变流器拓扑
Fig. 10　Topology of DC converter

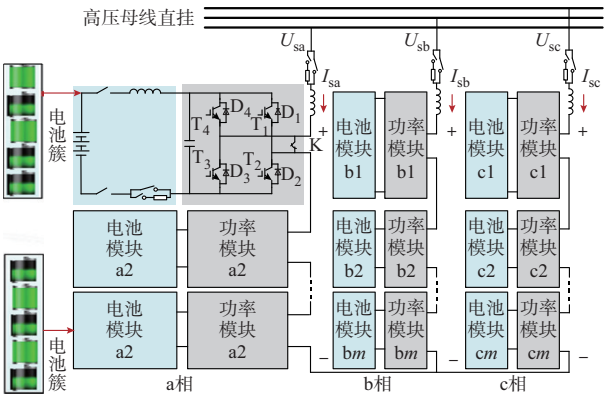


图11　高压直挂变流器拓扑
Fig. 11　Topology of high-voltage transformerless converter

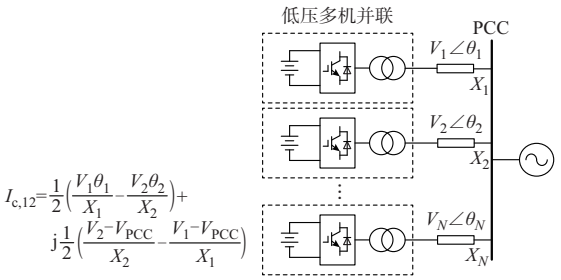


图12　低压升压变流器拓扑
Fig. 12　Topology of low-voltage boost converter

灵活、储能利用率高、IGBT选型灵活、启动电阻大幅简化、可靠性高等优势，但直流侧储能配置及电压范围与柔性直流阀IGBT器件选型强耦合，需反复迭代才能实现设计方案的最优化。

3）接入系统方式

构网型变流器接入系统方式主要有高压直挂方式和低压升压后接入方式这2种，分别如图11和图12所示。图中：K为子模块旁路开关；$V_N\angle\theta_N$为变流器N经升压变压器后连接至电网的端口电压；X_N为变流器N的等效阻抗；$I_{c,12}$为变流器1与变流器2之间的环流；V_{PCC}为PCC电压幅值。

高压直挂方式是指变流器直接接入高压电网，无须通过额外的转换设备或降压设备，具备电气距离短、损耗小、暂态支撑能力强、设备容量大、电池分散布置而冗余可靠性高、电池单簇管理而无簇间环流等优势，但投资成本高、结构复杂、电池绝缘设计困难。

低压升压后接入方式是指变流器经变压器升压并入电网，具备投资成本低、结构简单、运维难度小等优势，但损耗大、单体容量小、环节多而响应特性差、多组协同控制难度大、变压器易损坏，且电池集中布置，存在环流。

4）储能接入方式

构网型变流器的储能接入方式主要有储能与子模块融合方式和储能通过直流母线直挂接入方式这2种，分别如图13和图14所示。图中：QF为交流进线开关；SC为超级电容器；CM为超级电容模块。

储能与子模块融合方式是指储能设备通过接口电路直接与子模块相连，具备子模块和接口电路较为成熟、工程经验丰富等优势，但受直流电压限制，能量利用率较低，且难以应用耐压通流能力强的电力电子器件，换流阀消防需慎重设计，充电过程复杂，需考虑同时为子模块电容和储能两极回路充电。

储能通过直流母线直挂接入方式是指储能设备连接至直流母线上，具备模块化多电平器件选择与储能接口电路参数限制解耦、直流侧输出电压灵活调节，储能利用率高、储能与换流阀独立布置、储能模块无二倍频谐波、无需二次谐波滤波电路，消防设计方便，无须单独考虑启动电阻为储能充电的优势，但变流器直流电压和有功输出由储能变流器控制，控制系统较为复杂，子模块电容充放电与储能充放电需要统筹协同，控制策略复杂，储能与交流侧换流阀需增加穿墙套管。

综上，构网型变流器结构的本质是对现有电力电子变流器结构的延续和拓展。拓扑类型上，模块

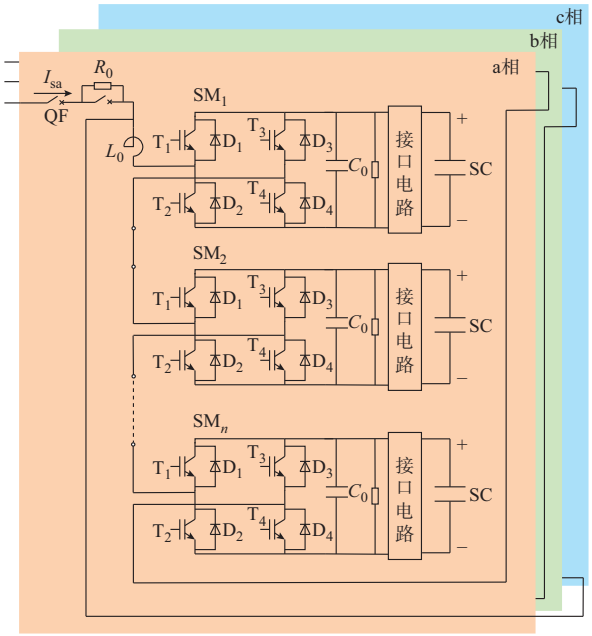


图 13　储能与子模块融合变流器拓扑
Fig. 13　Topology of converter with fusion of energy storage and sub-module

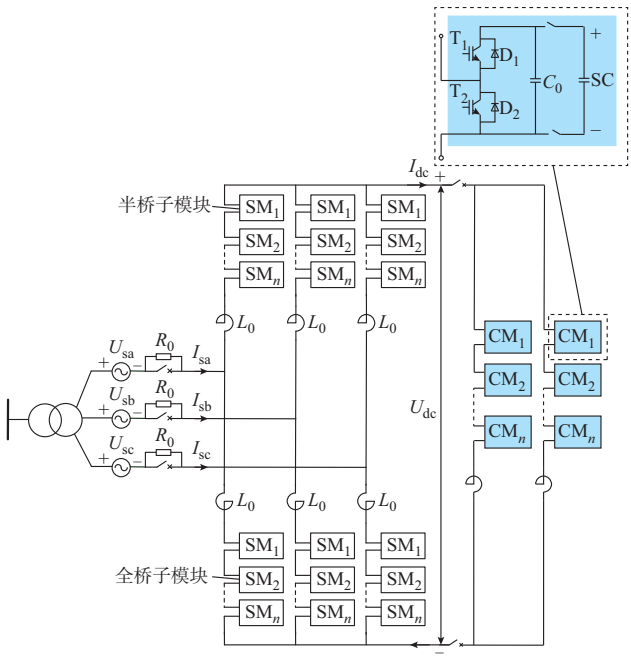


图 14　储能通过直流母线直挂变流器拓扑
Fig. 14　Topology of converter with energy storage directly connected through DC bus

化多电平拓扑具备高可靠性、高电压适应性、储能配置灵活性等综合优势，在 35 kV 及以上电网中应用广泛；两/三电平拓扑受输出电压小、容量小、可靠性低等限制，多用于低电压等级电网。主接线方式上，角接拓扑具有成熟性、简单性、高效性以及储能配置不灵活等特点，多用于不需要有功支撑或较少有功支撑需求的电网中；直流方式拓扑具有高可靠性、高电压适应性、储能配置灵活等特点，多用于较高电压等级电网和有一定有功支撑需求的电网中。接入系统方式上，高压直挂方式多与模块化多电平拓扑类型结合配置；低压升压方式多与两/三电平拓扑类型结合应用，且为多台构网型变流器并联的结构。储能接入方式上，储能与子模块融合方式受电压低、容量小、利用率低、消防配置难等限制，多用于低电压等级电网；储能通过直流母线直挂方式具有利用率高、消防配置独立等特点，多用于高电压等级电网或低电压等级电网的两/三电平拓扑中。

3　构网型变流器典型设备与工程应用及定量计算

基于电力电子的构网型变流器的能量来源可以是电容器、超级电容器、电化学电池、新能源机组或直流系统，根据其能量来源分为以下几种：构网型柔性直流、构网型静止调相机、构网型静止无功发生器（static var generator，SVG）、构网型储能等，变流器的支撑能力（能量）来源于直流侧的能量。表 3 给出了构网型变流器典型设备与工程应用的情况。

3.1　构网型柔性直流

该设备通过先进电力电子设备和控制技术，将模块化多电平柔性直流换流器拟合出同步发电机特性，具备类似于同步发电机的惯量支撑、暂态和稳态无功-有功支撑能力，可实现联网或孤岛运行。

1）张北柔性直流工程

张北柔性直流工程为世界首个柔性直流电网工程，存在送端纯新能源孤岛、100% 纯新能源供电需求。风机、柔性直流、弱交流构成的是典型的高比例新能源、高比例电力电子设备电力系统，系统同步特性弱、转动惯量小、系统阻尼弱，新能源和柔性直流阻抗特性优化无法达到彻底抑制振荡的效果，各种扰动下易发生低频和宽频振荡等系统稳定问题。

张北柔性直流工程于 2023 年 7 月完成构网控制改造并投入运行，是目前世界上最大的构网型柔性直流工程，改造后其控制策略采用 VSG 控制技术，通过模拟同步发电机转子运动方程，自产相位，为系统提供电压、频率支撑，有效解决新能源大功率情况下引起的系统振荡问题，实现新能源满功率输送。该工程构网型控制技术框架如图 15 所示[70]。图中：E_g为电网电压；I_g为电网电流；R_g为电网电阻；L_g为电网电感；R_v和L_v分别为构网型柔性直流换流器等效电阻和等效电感；U_c为控制电压；$\boldsymbol{U}_{sabc}$和$\boldsymbol{I}_{sabc}$分别为三相交流电压和电流；$U_{s,d}$、$U_{s,q}$和$I_{s,d}$、$I_{s,q}$分别为输出电压和电流在 dq 坐标变换后的 d、q 轴分

表3　构网型变流器的典型设备与工程应用情况
Table 3　Typical equipment and engineering applications of grid-forming converters

类型	工程名称	投运时间	接入电压等级/kV	额定容量	主要结构				主要解决问题
					拓扑类型	主接线方式	接入系统方式	储能接入方式	
构网型柔性直流	张北柔性直流工程	2023年7月构网改造	230	4 500 MW	模块化多电平	直流	高压直挂	无	新能源消纳能力弱、孤岛方式低频和宽频振荡问题
	渝鄂直流背靠背联网工程	2022年4月、2023年4月构网改造	525	2 500 MW	模块化多电平	直流	高压直挂	无	弱系统下近区故障时的系统稳定性问题
构网型静止调相机	西藏构网型静止调相机工程	2024年10月	35	150 MW/150 Mvar	模块化多电平	直流	高压直挂	直流母线直挂	新能源消纳能力弱、弱系统下的稳定问题
构网型SVG	成都构网型SVG工程	2024年7月	66	300 Mvar	模块化多电平	角接	高压直挂	无	电源“空心化”、暂态电压支撑不足
构网型储能	青海宝库高压直挂构网型储能工程	2024年9月	35	108 MW/430.5 MW·h	模块化多电平	角接	高压直挂	储能与子模块融合	新能源消纳能力弱、弱系统下稳定性问题
	西藏拉果错构网型低压升压储能工程	2024年3月	35	一期65 MW/130 MW·h	三电平	直流	低压升压	直流母线直挂	新能源消纳能力弱、孤岛方式下的供电及稳定性问题
		2024年7月	35	二期127.75 MW/409.9 MW·h					

量；k_U为电压下垂控制系数；$I_{s,d,ref}$和$I_{s,q,ref}$分别为$I_{s,d}$和$I_{s,q}$的参考值；$U_{c,d,ref}$和$U_{c,q,ref}$分别为dq坐标系中d轴和q轴控制电压的参考值；NLM表示最近电平逼近调制环节。

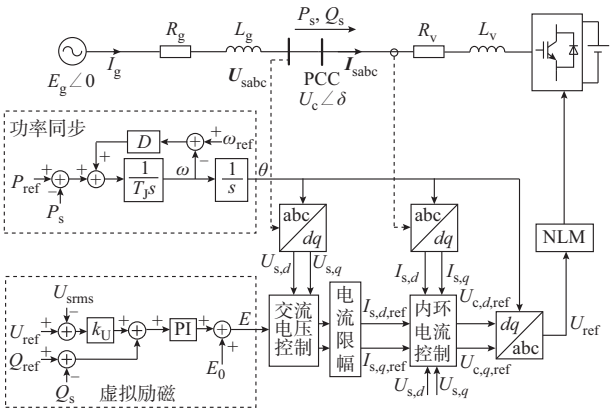


图15　张北柔性直流工程的构网型控制技术框架
Fig. 15　Technical framework of grid-forming control in Zhangbei flexible DC project of China

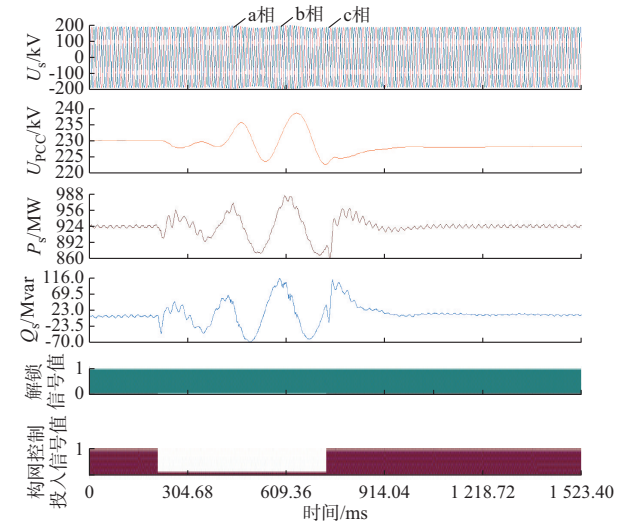
张北柔性直流工程大功率跟网切换构网控制模式试验波形如图16(a)所示。图中：U_s为交流电压；U_{pcc}为PCC电压。跟网型控制维持500 ms，柔性直流系统有功和无功功率出现约5 Hz的振荡，功率波动幅值最大约±60 MW。切换至构网型控制后，实现有效振荡抑制，柔性直流恢复稳定运行，有效验证了构网型控制能够抑制大功率引起的系统振荡问题。张北柔性直流工程远端人工短路接地试验波形如图16(b)所示。图中：I_{arm}为桥臂电流，6个桥臂对应6条不同颜色的曲线。故障发生后10 ms内，柔性直流系统向交流系统提供了最大780 Mvar的无功功率支撑，且在故障期间无功输出约为600 Mvar，充分体现了构网型控制在电网电压跌落后对系统电压的支撑能力。

2)渝鄂直流背靠背联网工程

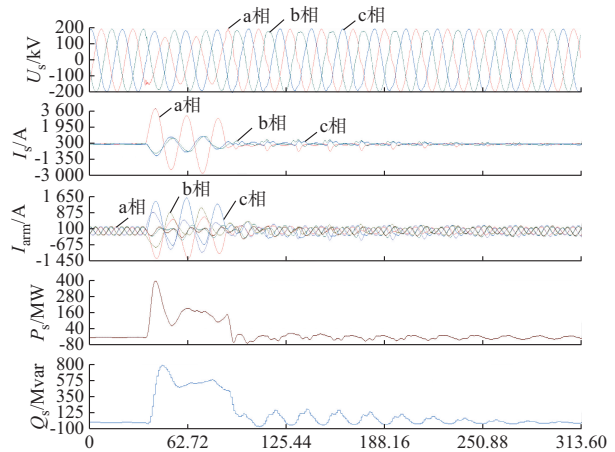
渝鄂直流背靠背联网工程是目前世界上换流器电压等级最高、输送容量最大的背靠背柔性直流工程。由于在两端电网末端，接入系统较弱，近区线路、机组故障或检修可能导致系统极端弱化，各种扰动下易发生系统不稳定问题。

渝鄂直流背靠背联网工程的构网型控制是在柔性直流控制器中建立发电机摇摆方程、励磁控制方程，将换流器转变为“传统发电机”的“高惯量”特性，使其由交流电网的“负担”升级为“支柱”，能够向电网提供惯量，解决了近区极弱系统条件下的柔性直流稳定运行难题。该工程构网型技术框架如图17所示。图中：I_s为输出电流，I_{sref}为其参考值；U_{cref}为控制电压参考值；R为虚拟电阻；X为虚拟电抗。

渝鄂直流背靠背联网工程单相短路接地试验波形如图18所示。图中：f_{grid}为电网频率；f_{VSC}为换流器控制频率。交流单相接地故障后，交流电压出现跌落，线电压有效值跌落至368.9 kV，此时，换流器快速发出无功功率支撑交流电压，8.1 ms后输出无功功率达到峰值，约为373.5 Mvar，抑制了交流电压进一步跌落，充分说明了构网型控制在无功控制响应方面较为及时。交流单相接地故障后，功率输出受



(a) 大功率跟网切换构网控制模式试验波形



(b) 远端人工短路接地试验波形

图 16　张北柔性直流工程试验波形

Fig. 16　Test waveforms in Zhangbei flexible DC project of China

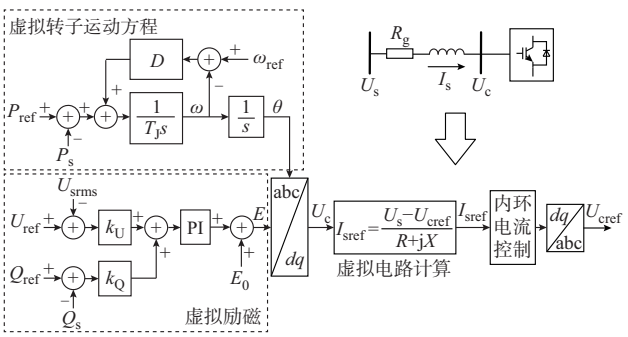


图 17　渝鄂直流背靠背联网工程的构网型控制技术框架

Fig. 17　Technical framework of grid-forming control in Chongqing-Hubei back-to-back HVDC project of China

限，换流器盈余功率增加，交流电网频率由 50 Hz 升高至 50.08 Hz，通过减小 VSG 控制生成的相位，降低有功输出，控制生成的频率保持 50 Hz 不变，维持交流电网的频率稳定，充分说明了构网型柔性直流的频率调节和惯性响应能力。

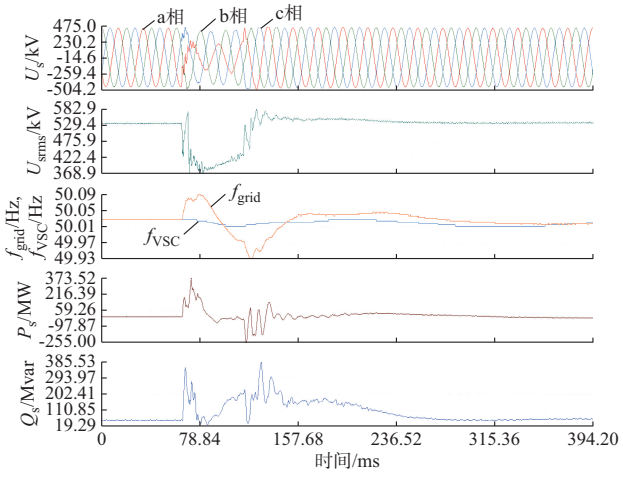


图 18　渝鄂直流背靠背联网工程单相短路接地试验波形

Fig. 18　Waveforms of single-phase short-circuit grounding test in Chongqing-Hubei back-to-back HVDC project of China

3.2　构网型静止调相机

构网型静止调相机通过先进电力电子设备和控制技术将静止无功设备和超级电容拟合出同步调相机特性，具备类似于同步调相机的惯量支撑、暂态有功支撑和暂态无功补偿、稳态无功补偿能力[71]。构网型静止调相机在构网型 SVG 的基础上，通过在直流侧增加超级电容，使其能量增加了数百倍，外特性可对标常规分布式调相机。

西藏构网型静止调相机工程是在西藏网源结构极为薄弱、稳定问题十分突出的背景下，为解决西藏电力保供难题而建造的工程。该工程在拉萨 110 kV 当雄站、日喀则 220 kV 萨嘎站、阿里 110 kV 加木站各加装 1 套额定容量为 50 Mvar、10 s 过载容量为 150 Mvar、瞬时有功功率超 150 MW、释放能量超 15 MJ 的构网型静止调相机。工程配置的超级电容直连直流母线，实现了动态无功支撑和短时惯量支撑，提升了相关主网断面的受电能力。

西藏构网型静止调相机工程控制技术框架如图 19 所示。图中：$U_{dc,ref}$ 为直流侧电压参考值；K_u 为电压偏差积分调节系数；ΔU 为电压参考值与电压实际值的差值。该工程有功控制基于 VSG 控制技术，包含转子运动方程及励磁控制，当直流电压、有功功率等有功控制参量变化时，通过惯性环节调节输出频率，进而改变输出相角，实现对有功参量的调节；无功控制类似同步机内电势励磁调节过程，通过调节构网型 SVG 输出电压幅值，实现对无功功率的控制，无功控制依据控制目标的不同，包括定交流电压控制和定无功功率控制 2 种模式。

西藏构网型静止调相机工程单相人工短路接地

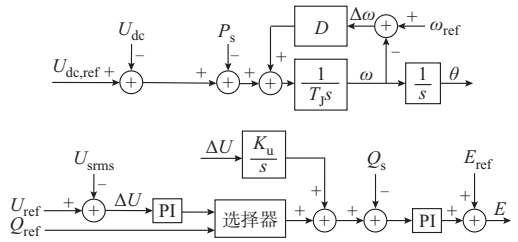


图 19　西藏构网型静止调相机工程的控制技术框架
Fig. 19　Control technology framework of Xizang grid-forming static compensator project of China

试验波形（单套）如图 20 所示。交流系统故障发生后，构网型静止调相机基本可以无延时响应交流系统故障，瞬时输出有功、无功功率，7.5 ms 后有功功率输出达到 27 MW，约 20 ms 后无功功率输出达到 24.5 Mvar，充分说明了构网型静止调相机暂态过程中有功和无功的支撑能力。

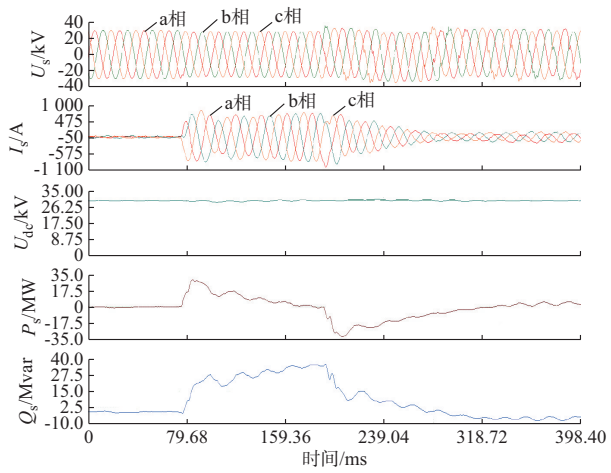


图 20　西藏构网型静止调相机工程单相人工短路接地试验波形（单套）
Fig. 20　Waveforms of single-phase artificial short-circuit grounding test in Xizang grid-forming static compensator project of China (single set)

3.3　构网型 SVG

构网型 SVG 是在常规 SVG 的基础上，通过提高器件的过载能力、增大电容能量、采用构网型控制策略实现的一种同步无功补偿设备。构网型 SVG 作为一个相对独立的同步电压源，当系统故障发生时，其电势幅值不突变，瞬时提供快速无功支撑，在响应速度和过载能力上均优于常规 SVG[72]。

成都构网型 SVG 工程是在成都电网源荷逆向分布明显、外送电比例超过 70%、西南部地区存在“电源空心化”问题[73]，且暂态电压支撑不足的背景下建造的工程。该工程通过在四川电网的负荷中心成都地区加装 5 套 66 kV 构网型 SVG（单套 SVG 静态无功容量为 60 Mvar、动态无功容量为 450 Mvar），具备 10 s 过流 7.5 p.u. 的能力，可实现德宝直流送电容量提升 1 000 MW。

成都构网型 SVG 工程控制技术框架如图 21 所示。图中：U_{avg} 为子模块平均电压；$U_{avg,ref}$ 为子模块平均电压参考值；U_{crms} 为并网母线电压有效值（66 kV/220 kV/500 kV 可选）；K_q 为无功积分调节系数。成都构网型 SVG 控制的主要目标是无功控制，包括无功环和电压环。无功环控制为积分环节，调节较慢，在稳态运行情况下发挥作用；电压环控制为比例环节，调节较快，在暂态期间维持电压不变，自然地向系统输出一定无功功率，从而起到动态电压支撑的效果。

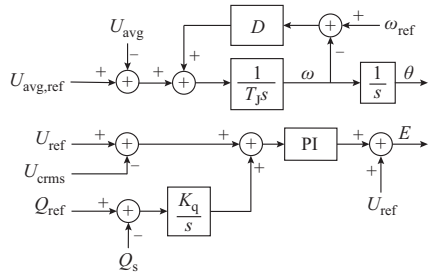


图 21　成都构网型 SVG 工程控制技术框架
Fig. 21　Control technology framework of Chengdu grid-forming SVG project of China

成都构网型 SVG 工程单相人工短路接地试验波形（单套）如图 22 所示。接地故障时，c 相电压跌落至 23 kV，持续约 50.7 ms，SVG 立即无延时响应，维持自身阀端电动势基本不变。当故障发生、电压变化时，SVG 自然无延时地响应后输出无功功率，电流在 5 ms 内即达到峰值，三相桥臂电流峰值为 2 648 A，约为 6.18 p.u.；故障切除后，系统电压恢复正常，SVG 无功输出快速降低，充分说明构网型 SVG 的暂态电压支撑能力。

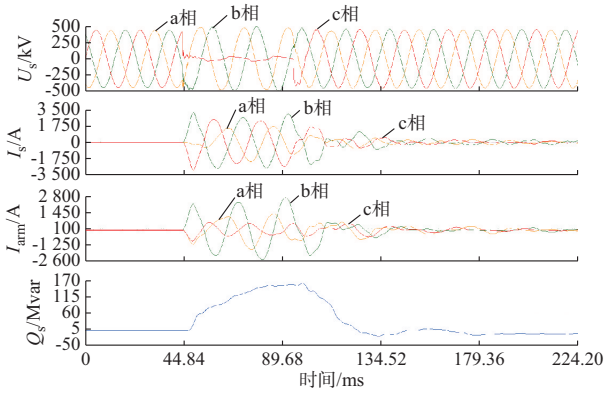


图 22　成都构网型 SVG 工程单相人工短路接地试验波形（单套）
Fig. 22　Waveforms of single-phase artificial short-circuit grounding test in Chengdu grid-forming SVG project of China (single set)

3.4　构网型储能

与构网型静止调相机相比，构网型储能配置的能量来源一般是电化学储能电池或电化学储能与超级电容相结合。采用超级电容储能的静止调相机一般是功率型，功率密度大、总能量小，适合暂态惯量支撑。采用电化学储能电池的构网型储能的能量密度大，适合相对较长时间的电压支撑和频率调节[74-76]。相比于常规储能，构网型储能采用构网型控制技术，具备更强的系统支撑能力、更高的过载能力和故障穿越能力。

1)青海宝库高压直挂构网型储能工程

青海宝库高压直挂构网型储能工程拓扑结构如图23所示。图中：DS为储能接口开关。该工程单机容量约为13.5 MW/53.8 MW·h，全站共8套，总容量为108 MW/430.5 MW·h，采用35 kV直挂，具备10 s过流3 p.u.的能力，实现构网型技术在高压直挂储能的首次工程应用，主要用于解决青海海西电网常规电源少、电压支撑不足的问题。

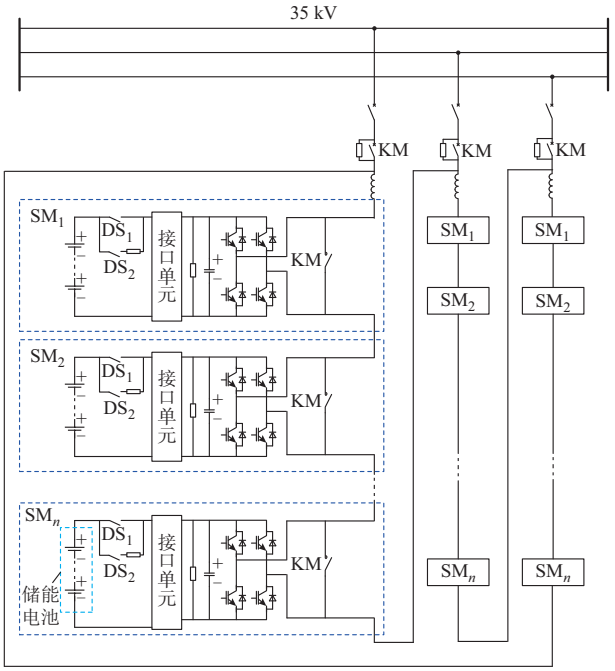


图23　青海宝库高压直挂构网型储能工程拓扑结构
Fig. 23　Topology of Baoku high-voltage transformerless grid-forming energy storage project in Qinghai Province of China

2)西藏拉果错构网型低压升压储能工程

西藏拉果错构网型低压升压储能工程框架如图24所示，项目位于西藏阿里地区，海拔为4 600 m，暂态总支撑容量达290 MW，具备10 s过流1.5 p.u.的能力，是目前全球最大的离网型新能源电力系统项目。该项目基于源网荷储一体化解决方案，有效解决了矿用负荷经济、优质、清洁、可靠供电的行业难题。

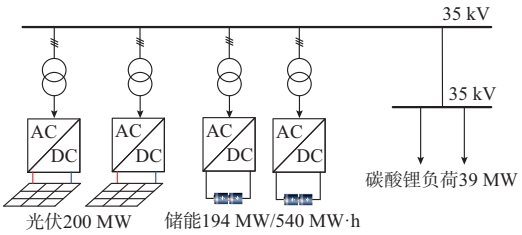


图24　西藏拉果错构网型低压升压储能工程框架
Fig. 24　Framework of Laguocuo grid-forming low-voltage boost energy storage project in Xizang autonomous region of China

3.5　构网型变流器有功支撑能力定量计算

为分析构网型变流器在实际工程应用中支撑特性的约束边界，探究构网型变流器有功支撑能力影响因素，本文按照典型35 kV构网型变流器的参数配置，构建支撑能力量化表征模型，计算构网型变流器暂态过程中的有功支撑能力，并通过仿真验证了计算结果的正确性，可为进一步的工程应用提供理论参考。

1)有功过载需求理论计算

通过分析电力系统支撑能力需求和同步发电机组特性，以构网型变流器实现类比等容量同步机外特性系统为算例(不含一次调频)，计算构网型变流器有功支撑能力的量化指标。图25给出了基于VSG控制的构网型变流器系统结构图。图中：u_a、u_b、u_c和i_a、i_b、i_c分别为构网型变流器三相输出电压和电流；e为调制电压信号；e_{aref}、e_{bref}、e_{cref}为三相电压参考值；ω_g为电网PCC处角频率；SPWM表示正弦脉宽调制环节。

根据文献中已有的一套成熟的理论计算体系[22,77]，对本文所研究构网型变流器并网系统的有功-角频率响应特性进行小信号建模。其中，构网型控制结构中有功、无功控制环路基于以下方程搭建：

$$\begin{cases} 2H\dfrac{\mathrm{d}\omega^*}{\mathrm{d}t}=P_{\mathrm{ref}}^*-P_{\mathrm{s}}^*-D(\omega^*-\omega_{\mathrm{g}}^*) \\ E=\left[(Q_{\mathrm{ref}}^*-Q_{\mathrm{s}}^*)\left(K_{\mathrm{p}}+\dfrac{K_{\mathrm{i}}}{s}\right)+U_{\mathrm{ref}}\right]E_0 \end{cases} \tag{4}$$

式中：H为惯量系数；K_p、K_i分别为无功环PI调节器比例增益和积分系数；δ为变流器功角；上标“*”代表标幺值。

VSG控制下系统有功功率和无功功率表达式如式(5)[78]所示。

$$\begin{cases} P_{\mathrm{s}}=\dfrac{EU_{\mathrm{s}}\cos(\alpha-\delta)}{Z}-\dfrac{U_{\mathrm{s}}^2\cos\alpha}{Z} \\ Q_{\mathrm{s}}=\dfrac{EU_{\mathrm{s}}\sin(\alpha-\delta)}{Z}-\dfrac{U_{\mathrm{s}}^2\sin\alpha}{Z} \end{cases} \tag{5}$$

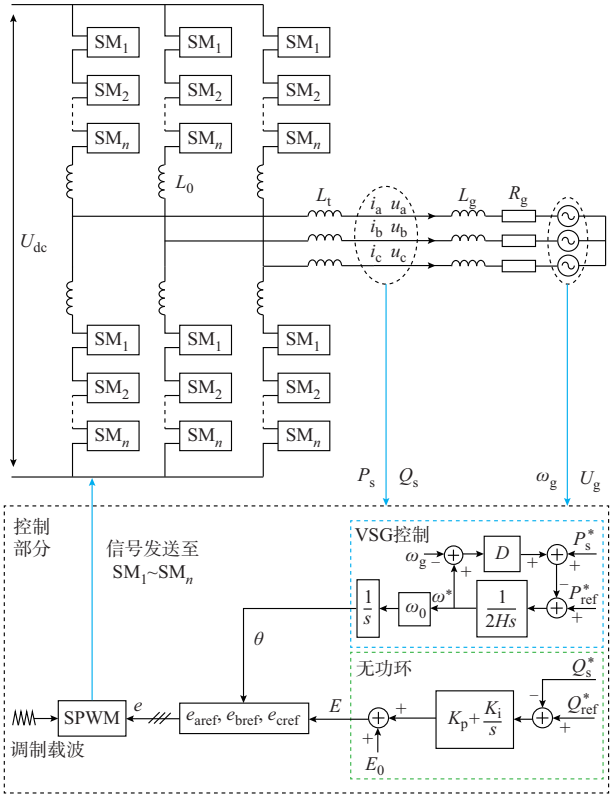


图 25　基于 VSG 控制的构网型变流器系统结构图
Fig. 25　System structure diagram of grid-forming converter based on VSG control

式中：α 为系统阻抗角；Z 为从桥臂子模块至交流电网的总连接阻抗，表达式见式(6)。

$$Z=-\sqrt{R_{\mathrm{g}}^{2}+\left[\left(\omega L_{\mathrm{g}}+L_{\mathrm{t}}+\frac{L_{0}}{2}\right)\right]^{2}} \tag{6}$$

式中：L_{t} 为换流变压器感抗。

根据式(5)中输出有功功率的表达式，可以得到有功功率变化量 $\Delta P_{\mathrm{s}}^{*}$ 与功角间的小信号关系如下：

$$\Delta P_{\mathrm{s}}^{*}=\frac{EU_{\mathrm{s}}}{S_{\mathrm{n}}Z}\left[\cos(\alpha-\delta-\Delta\delta)-\cos(\alpha-\delta)\right] \tag{7}$$

式中：S_{n} 为构网型变流器额定容量；Δ 表示相应变量的变化量，下同。

令 $P_{\mathrm{s}}=P_{\mathrm{ref}}$、$Q_{\mathrm{s}}=Q_{\mathrm{ref}}$，并代入式(5)，则稳态工作点处 VSG 的电势 E_{s}、功角 δ_{s} 可表示为：

$$\begin{cases}E_{\mathrm{s}}=\dfrac{Q_{\mathrm{ref}}Z+U_{\mathrm{s}}^{2}\sin\alpha}{U_{\mathrm{s}}\sin(\alpha-\delta_{\mathrm{s}})}\\ \delta_{\mathrm{s}}=\alpha-\arctan\left(\dfrac{Q_{\mathrm{ref}}+(U_{\mathrm{s}}^{2}\sin\alpha)/Z}{P_{\mathrm{ref}}+(U_{\mathrm{s}}^{2}\cos\alpha)/Z}\right)\end{cases} \tag{8}$$

令 S_{E} 为变流器同步功率，计算式如下：

$$S_{\mathrm{E}}=Q_{\mathrm{ref}}^{*}+\frac{U_{\mathrm{s}}^{2}\sin\alpha}{ZS_{\mathrm{n}}} \tag{9}$$

设定系统发生频率阶跃工况，此时，系统输出有功功率的变化量可表示为：

$$\Delta P_{\mathrm{s}}^{*}(s)=-\frac{2Hs\omega_{0}S_{\mathrm{E}}}{2Hs^{2}+Ds+\omega_{0}S_{\mathrm{E}}}\frac{\Delta\omega_{\mathrm{g}}^{*}}{s} \tag{10}$$

根据式(10)，极点不同情况可分为 3 种模式，即欠阻尼模式(2 个共轭复数根)、临界阻尼模式(2 个相等负实根)、过阻尼模式(2 个不等负实根)。以欠阻尼模式为例进行有功过载需求分析计算，图 26 给出了欠阻尼模式下理论分析响应图。图中：有功响应曲线的峰值 $\Delta P_{\mathrm{s,max}}$ 即为构网型变流器要表现相应惯量、阻尼特性时，必须具备的功率过载最大峰值；阴影部分面积 ΔE 为构网型变流器所需的暂态总能量；Δt 为构网型变流器有功功率过载持续时间。

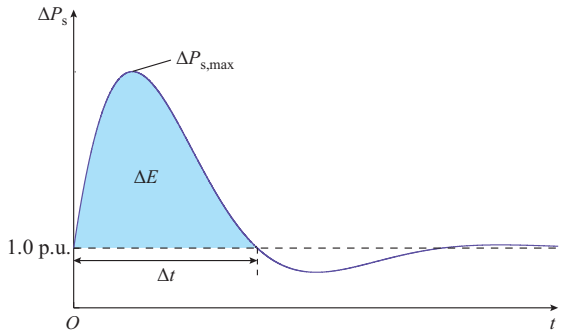


图 26　欠阻尼模式下的理论分析响应图
Fig. 26　Theoretical analysis response diagram in underdamping mode

当传递函数极点为 2 个共轭复数根时，对式(10)进行拉普拉斯反变换可得：

$$\Delta P_{\mathrm{s}}^{*}(t)=-\frac{4H\omega_{0}S_{\mathrm{E}}\mathrm{e}^{-\frac{D}{4H}t}\Delta\omega_{\mathrm{g}}^{*}}{\chi}\sin\left(\frac{\chi}{4H}t\right) \tag{11}$$

式中：$\chi=\sqrt{8H\omega_{0}S_{\mathrm{E}}-D^{2}}$。

当 $t=4H\arctan(\chi/D)/\chi$ 时，可得：

$$\Delta P_{\mathrm{s,max}}^{*}=-\sqrt{2H\omega_{0}S_{\mathrm{E}}}\,\mathrm{e}^{-\frac{D\arctan(\chi/D)}{\chi}}\Delta\omega_{\mathrm{g}}^{*} \tag{12}$$

积分可得阴影部分的面积为：

$$\Delta E^{*}=-2H\left(1+\mathrm{e}^{-\frac{\pi D}{\chi}}\right)\Delta\omega_{\mathrm{g}}^{*} \tag{13}$$

根据上述储能功率和能量物理约束的数学表达式，定量计算了 VSG 控制参数对惯量支撑期间有功过载的影响。表 4 给出了构网型变流器的主要参数(算例)，VSG 控制部分惯量系数 H 取 5 s，阻尼系数 D 取 40。考虑系统频率发生较为严苛的波动情况，经过上述理论计算可得：系统有功功率最大过载倍数约为 1.41，持续时间约为 530 ms，所需暂态总能量为 6.74 MJ。图 27 给出了在表 4 配置的系统参数下，发生 0.5 Hz 频率阶跃时构网型变流器的理论动态响应图。

表4　构网型变流器主要参数(算例)
Table 4　Main parameters of grid-forming converter in this case

参数	数值	参数	数值
额定容量 S_n	50 MV·A	变流器桥臂电抗 L_0	0.2 p.u.
网侧交流电压 U_s 峰值	28.577 kV	变压器总阻抗 Z_T	0.1 p.u.
额定角频率 ω_0	314 rad/s	变压器变比	35 kV/35 kV
电网角频率变化量 $\Delta\omega_g^*$	−0.01 p.u.	惯量系数 H	5 s
电网等效阻抗 Z_g	0.333 p.u.	阻尼系数 D	40

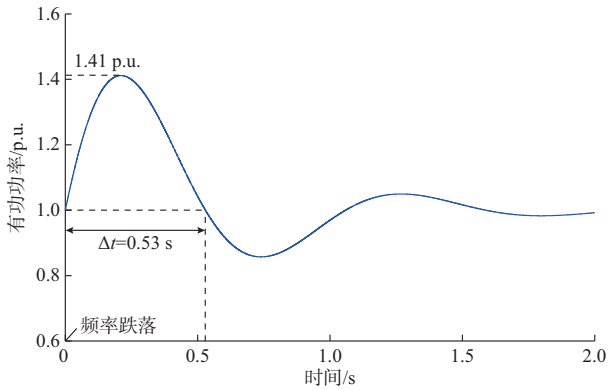


图27　系统发生0.5 Hz频率阶跃下构网型变流器的理论动态响应图
Fig. 27　Theoretical dynamic response diagram of grid-forming converter with system frequency step being 0.5 Hz

2)仿真验证

为了验证上述理论计算的准确性,在PSCAD中建立了如图25所示的构网型变流器仿真模型,主拓扑及控制部分建模保持与图中一致。变流器控制部分主要包含有功VSG控制和无功PI控制等,仿真模型中影响构网变流器有功响应特性的关键参数取值如表4所示。

设置系统10 s时交流电网侧频率由50 Hz阶跃跌落至49.5 Hz,图28、图29分别给出了构网型变流器的有功和无功功率响应仿真波形、动态响应仿真波形。

表5给出了本算例理论计算与仿真结果对比。可见,在现有系统配置参数下交流电网发生0.5 Hz频率阶跃时,构网型变流器输出有功功率最大过载倍数可达1.46。考虑到理论计算部分认为系统输出无功功率保持不变,而仿真中暂态有功响应过程存在小幅无功波动,故仿真结果与理论分析计算过载倍数1.41基本吻合。此外,仿真配置工况下有功功率暂态响应曲线第1摆过零时刻间隔为0.53 s,与理论计算完全吻合;计算此时暂态总能量需求为7.75 MJ,与理论计算基本吻合。

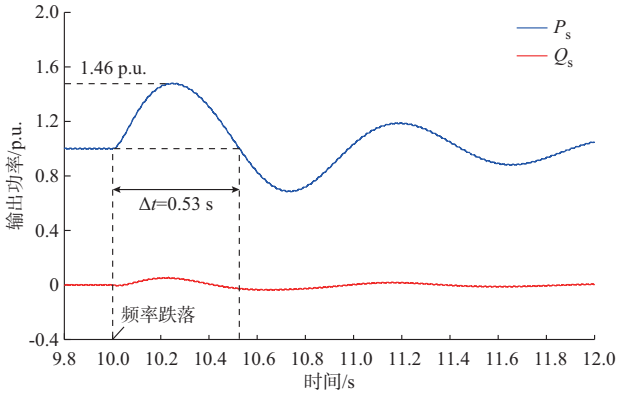


图28　构网型变流器有功和无功功率响应仿真波形
Fig. 28　Simulation waveforms of active and reactive power response of grid-forming converter

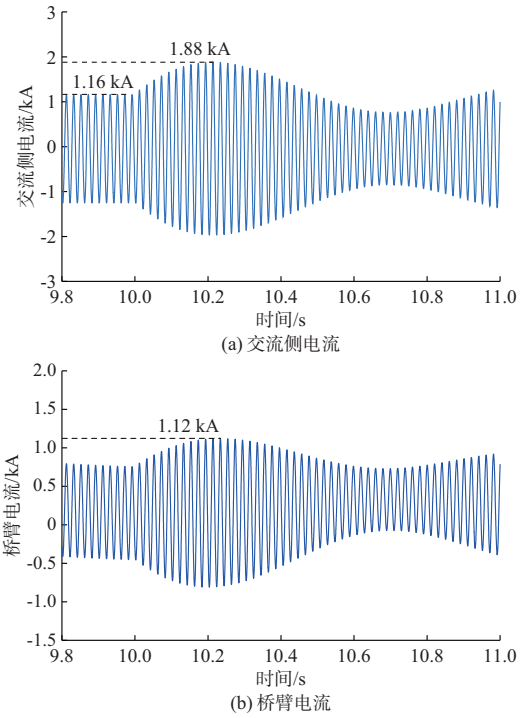


图29　构网型变流器动态响应仿真波形
Fig. 29　Simulation waveforms of dynamic response of grid-forming converter

表5　本算例理论计算与仿真结果对比
Table 5　Comparison between theoretical calculation and simulation results of this case

类型	有功功率最大过载倍数	暂态总能量/MJ	持续时间/s
理论计算	1.41	6.74	0.53
仿真结果	1.46	7.75	0.53

3.6　新型构网型设备

构网型风/光储同步机方案如图30所示,是一种结合了风力发电/光伏发电和储能系统的设备。该设备配置电化学储能电池+新能源,在直流侧耦

合，通过新能源与储能协调控制，将新能源发电单元和储能单元拟合出同步发电机特性，为系统提供暂态和稳态有功/无功支撑。该设备不仅可以解决新能源的不稳定问题，还可以降低能源成本，提高能源利用效率，减少对环境的影响，是未来新型电力系统建设和新能源发展的重要方向之一。

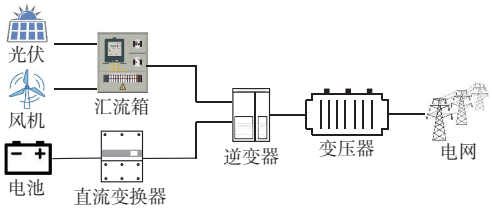


图30　构网型风/光储同步机方案

Fig. 30　Grid-forming synchronous machine scheme with wind power, photovoltaic and energy storage

4　展望

新能源的快速发展为基于电力电子技术的变流器应用带来巨大机遇，也使新型电力系统面临惯量降低、频率/电压支撑能力减弱等问题，构网型变流器技术是新型电力系统提高系统支撑能力的有效方法。本文结论及未来展望如下：

1）构网型柔性直流、构网型静止调相机、构网型SVG、构网型储能等构网型变流器技术的实际工程应用，验证了其电网主动支撑能力强、弱系统适应性好等优势，有望在送端新能源大基地、受端电网等不同电网场景下获得推广应用。

2）构网型变流器技术仍处于发展阶段，各种类型构网型变流器在拓扑结构、运行机理、控制保护参数选取与策略设计等方面仍需优化和提升。构网型变流器特性与复杂混联电网在各种方式下的支撑能力需求如何精准仿真与匹配仍需深入分析。

3）已开发和应用的构网型变流器存在设备类型多样、设备配置与要求各异等情况。同时，构网型设备缺乏系统化和规范化的功能要求、性能指标及测试依据，导致部分功能和性能参数无法考核，亟须开展构网型设备标准策划与编制。

4）构网型变流器技术在理论分析、工程实用化、规模化应用等方面，存在暂态条件下设备过载大、惯量和阻尼支撑有限、控制策略复杂等挑战，不同拓扑、不同容量构网型变流器大量接入电网后的系统特性变化机理需进一步深入探究。

5）多类型构网型变流器的稳定运行机理、不同构网型变流器之间的协调控制、构网型与跟网型变流器之间的协调控制、构网型变流器与常规机组之间的协调控制等策略需进一步研究。

6）构网型变流器在新型电力系统中应用并不断迭代改进升级，可有效提高系统的新能源消纳能力，提升能源利用效率，进一步推动经济绿色低碳转型，助力“碳达峰”和“碳中和”目标的实现。

参考文献

[1] 中国能源中长期发展战略研究项目组．中国能源中长期（2030、2050）发展战略研究：综合卷[M]．北京：科学出版社，2011.
Research Group of Chinese Energy Development Strategy. Research on the medium and long term (2030, 2050) energy development strategy of China: comprehensive volume [M]. Beijing: Science Press, 2011.

[2] 张智刚，康重庆．碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]．中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.

[3] 舒印彪，张智刚，郭剑波，等．新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]．中国电机工程学报，2017，37(1)：1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.

[4] 舒印彪，陈国平，贺静波，等．构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]．中国工程科学，2021，23(6)：61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.

[5] 陈国平，李明节，董昱，等．构建新型电力系统仿真体系研究[J]．中国电机工程学报，2023，43(17)：6535-6551.
CHEN Guoping, LI Mingjie, DONG Yu, et al. Research on the simulation technology architecture for the new-type power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6535-6551.

[6] 陈国平，董昱，梁志峰．能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]．中国电机工程学报，2020，40(17)：5493-5506.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.

[7] 刘念，蒋凯．新型电力系统：清洁高效又智能[N]．光明日报，2024-09-19(16).
LIU Nian, JIANG Kai. New power system: clean, efficient, and intelligent [N]. Guangming Daily, 2024-09-19(16).

[8] 李明节，陈国平，董存，等．新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]．电网技术，2019，43(11)：3979-3986.
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system [J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.

[9] 董昱，孙大雁，许丹，等．新型电力系统电力电量平衡的挑战、应对与展望[J]．中国电机工程学报，2025，45(6)：2039-2057.
DONG Yu, SUN Dayan, XU Dan, et al. Challenges, response and prospects for power balance in new power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(6): 2039-2057.

[10] 郭剑波，王铁柱，罗魁，等．新型电力系统面临的挑战及应对思考[J]．新型电力系统，2023(1)：32-43.
GUO Jianbo, WANG Tiezhu, LUO Kui, et al. Development

of new power systems: challenges and solutions[J]. New Type Power Systems, 2023(1): 32-43.

[11] 郭贤珊,刘泽洪,李云丰,等.柔性直流输电系统高频振荡特性分析及抑制策略研究[J].中国电机工程学报,2020,40(1):19-29.
GUO Xianshan, LIU Zehong, LI Yunfeng, et al. Characteristic analysis of high-frequency resonance of flexible high voltage direct current and research on its damping control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 19-29.

[12] 郭贤珊,厉璇,王庆,等.特高压直流输电技术发展现状与思考[J].新型电力系统,2024(3):237-250.
GUO Xianshan, LI Xuan, WANG Qing, et al. Status and thoughts on the development of ultra high voltage direct current (UHVDC) transmission technology [J]. New Type Power Systems, 2024(3): 237-250.

[13] 袁小明,张美清,迟永宁,等.电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线[J].中国电机工程学报,2022,42(5):1904-1917.
YUAN Xiaoming, ZHANG Meiqing, CHI Yongning, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1904-1917.

[14] 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):2339-2358.
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): 2339-2358.

[15] WANG X F, TAUL M G, WU H, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources—an overview [J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, 1: 115-134.

[16] ZHOU J Z, DING H, FAN S T, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.

[17] WANG X F, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.

[18] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.

[19] 徐政.电力系统广义同步稳定性的物理机理与研究途径[J].电力自动化设备,2020,40(9):3-9.
XU Zheng. Physical mechanism and research approach of generalized synchronous stability for power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 3-9.

[20] 迟永宁,江炳蔚,胡家兵,等.构网型变流器:物理本质与特征[J].高电压技术,2024,50(2):592-606.
CHI Yongning, JIANG Bingwei, HU Jiabing, et al. Grid-forming converters: physical mechanism and characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 592-606.

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

[22] 袁敞,刘昌,赵天扬,等.基于储能物理约束的虚拟同步机运行边界研究[J].中国电机工程学报,2017,37(2):506-516.
YUAN Chang, LIU Chang, ZHAO Tianyang, et al. Research on operating boundary of virtual synchronous machine based on physical constraint of energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 506-516.

[23] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine[C]// 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, October 9-11, 2007, Barcelona, Spain.

[24] GUERRERO J M, DE VICUNA L G, MATAS J, et al. A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1205-1213.

[25] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.

[26] 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.

[27] ZHANG L D, 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.

[28] JOHNSON B B, SINHA M, AINSWORTH N G, et al. Synthesizing virtual oscillators to control islanded inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 6002-6015.

[29] NDREKO M, RÜBERG S, WINTER W. Grid forming control scheme for power systems with up to 100% power electronic interfaced generation: a case study on Great Britain test system[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(8): 1268-1281.

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

[31] MATEVOSYAN J, MACDOWELL J, MILLER N, et al. A future with inverter-based resources: finding strength from traditional weakness[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2021, 19(6): 18-28.

[32] ROSSO R, WANG X F, 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.

[33] ZHANG H B, XIANG W, LIN W X, 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.

[34] National grid：grid code [EB/OL]. (2022-06-16) [2024-12-21]. http://www.nationalgrideso.com/electricity-transmission/industryinformation/codes/grid-code/code-documents.

[35] RATHNAYAKE D B，AKRAMI M，PHURAILATPAM C，et al. Grid forming inverter modeling，control，and applications[J]. IEEE Access，2021，9：114781-114807.

[36] MARINAKIS P，SCHOFIELD N. Grid forming control for power systems with up to 100% inverter based generation[C]// The 9th Renewable Power Generation Conference (RPG Dublin Online 2021)，March 1-2，2021：143-148.

[37] TENG Y T，DENG W，PEI W，et al. Review on grid-forming converter control methods in high-proportion renewable energy power systems [J]. Global Energy Interconnection，2022，5(3)：328-342.

[38] 国家发展改革委，国家能源局，国家数据局.关于印发《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》的通知[EB/OL]. (2024-07-25) [2024-12-21]. https://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/ 202408/content_6966863.htm.
National Development and Reform Commission，National Energy Administration，National Data Administration. Notice on issuing "Action Plan for Accelerating the Construction of a New Power System (2024—2027)" [EB/OL]. (2024-07-25) [2024-12-21]. https:// www. gov. cn/zhengce/zhengceku/ 202408/content_6966863.htm.

[39] 孙华东，王宝财，李文锋，等.高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J].中国电机工程学报，2020，40(16)：5179-5192.
SUN Huadong，WANG Baocai，LI Wenfeng，et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics [J]. Proceedings of the CSEE，2020，40(16)：5179-5192.

[40] 范越，李永莱，舒印彪，等.新型电力系统平衡构建与安全稳定关键技术初探[J].中国电机工程学报，2025，45(1)：14-25.
FAN Yue，LI Yonglai，SHU Yinbiao，et al. Preliminary study on key technologies of balancing and stabilizing of renewable-energy-dominated power system[J]. Proceedings of the CSEE，2025，45(1)：14-25.

[41] 孙华东，徐式蕴，许涛，等.电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J].中国电机工程学报，2022，42(21)：7796-7809.
SUN Huadong，XU Shiyun，XU Tao，et al. Research on definition and classification of power system security and stability [J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(21)：7796-7809.

[42] 薛翼程，张哲任，徐政，等.构网型变流器对交流系统低频振荡的影响分析与阻尼控制[J].电力系统自动化，2023，47(16)：103-113.
XUE Yicheng，ZHANG Zheren，XU Zheng，et al. Impact analysis and damping control of grid-forming converter for low-frequency oscillation of AC system [J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(16)：103-113.

[43] 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.

[44] 曾鸣，许彦斌.综合能源系统要义：源网荷储一体化＋多能互补[N].中国能源报，2021-04-12(4).
ZENG Ming，XU Yanbin. Essentials of integrated energy system：integration of source，network，load and storage＋multi-energy complementarity[N]. China Energy News，2021-04-12(4).

[45] 卓振宇，张宁，谢小荣，等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化，2021，45(9)：171-191.
ZHUO Zhenyu，ZHANG Ning，XIE Xiaorong，et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems，2021，45(9)：171-191.

[46] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A，GÓMEZ-LÁZARO E，MULJADI E，et al. Power systems with high renewable energy sources：a review of inertia and frequency control strategies over time [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2019，115：109369.

[47] 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.

[48] MARARAKANYE N，BEKKER B. Renewable energy integration impacts within the context of generator type，penetration level and grid characteristics [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2019，108：441-451.

[49] 刘辉，于思奇，孙大卫，等.构网型变流器控制技术及原理综述[J].中国电机工程学报，2025，45(1)：277-297.
LIU Hui，YU Siqi，SUN Dawei，et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters [J]. Proceedings of the CSEE，2025，45(1)：277-297.

[50] 刘思佳，刘海涛，张隽，等.基于等效阻抗的虚拟同步机电压支撑影响因素分析与改进控制策略研究[J].电工技术学报，2025，40(9)：2738-2751.
LIU Sijia，LIU Haitao，ZHANG Jun，et al. Research on the analysis of virtual synchronous generator voltage support influence factors and improvement control strategies based on equivalent impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2025，40(9)：2738-2751.

[51] 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.

[52] 刘子文，苗世洪，范志华，等.基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J].电工技术学报，2019，34(4)：795-806.
LIU Ziwen，MIAO Shihong，FAN Zhihua，et al. Accurate power allocation and zero steady-state error voltage control of the islanding DC microgrid based on adaptive droop characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2019，34(4)：795-806.

[53] 黄萌，舒思睿，李锡林，等.面向同步稳定性的电力电子并网变流器分析与控制研究综述[J].电工技术学报，2024，39(19)：

5978-5994.
HUANG Meng, SHU Sirui, LI Xilin, et al. A review of synchronization-stability-oriented analysis and control of power electronic grid-connected converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(19): 5978-5994.

[54] 黄萌,凌扬坚,耿华,等.功率同步控制的构网型变流器多机交互分析与稳定控制研究综述[J].高电压技术,2023,49(11):4571-4583.
HUANG Meng, LING Yangjian, GENG Hua, et al. An overview on multi-VSCs interaction analysis and stability controls of grid-forming converters with power synchronization control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4571-4583.

[55] 侯川川,刘澳,朱淼,等.基于功率同步控制的逆变器并网相位误差机理[J].中国电机工程学报,2024,44(5):1962-1974.
HOU Chuanchuan, LIU Ao, ZHU Miao, et al. Phase error features of grid-tied inverter based on power synchronization control[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1962-1974.

[56] 林燎源,柯全,李平.面向逆变器并联的虚拟振荡器控制技术综述[J].电力自动化设备,2022,42(11):147-158.
LIN Liaoyuan, KE Quan, LI Ping. Review of virtual oscillator control techniques for parallel operation of inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 147-158.

[57] 史亚帆,许寅,吴翔宇,等.面向构网逆变器的虚拟振荡器控制技术:统一设计框架与关键问题探讨[J].电网技术,2024,48(6):2251-2261.
SHI Yafan, XU Yin, WU Xiangyu, et al. Virtual oscillator control for grid forming inverters: unified design framework and discussion for key issues[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2251-2261.

[58] 王伟,周少泽,黄萌,等.构网型技术:演进历程、功能定位与应用展望[J].电力系统自动化,2025,49(1):1-13.
WANG Wei, ZHOU Shaoze, HUANG Meng, et al. Grid-forming technologies: evolution history, function, and application prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 1-13.

[59] 潘子迅,杨晓峰,赵锐,等.不平衡电网下虚拟同步机的多模式协调策略[J].电工技术学报,2023,38(16):4274-4285.
PAN Zixun, YANG Xiaofeng, ZHAO Rui, et al. Multi-mode coordination control of virtual synchronous generator under unbalanced power grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4274-4285.

[60] 纪君奇,杨黎晖,马西奎.基于虚拟同步发电机控制的并网逆变器切换型振荡及其非光滑分岔特性[J].电工技术学报,2024,39(24):7860-7873.
JI Junqi, YANG Lihui, MA Xikui. Switched oscillation and its non-smooth bifurcation characteristics in grid-connected inverter based on virtual synchronous generator control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(24): 7860-7873.

[61] 年珩,教焕宗,孙丹.基于虚拟同步机的并网逆变器不平衡电压灵活补偿策略[J].电力系统自动化,2019,43(3):123-129.
NIAN Heng, JIAO Yingzong, SUN Dan. Flexible compensation strategy of unbalanced voltage for grid-connected inverter based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 123-129.

[62] 查雨欣,林健,王悦,等.基于广义下垂控制的光伏发电系统的惯量特性分析[J].智慧电力,2021,49(2):54-59.
ZHA Yuxin, LIN Jian, WANG Yue, et al. Analysis of inertia characteristics of photovoltaic power generation system based on generalized droop control[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 54-59.

[63] 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.
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, 40(12): 117-123.

[64] DU W, CHEN Z, SCHNEIDER K P, et al. A comparative study of two widely used grid-forming droop controls on microgrid small-signal stability[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 963-975.

[65] 周京华,李津.构网型储能变流器国内外技术标准对比与分析[J].电力系统自动化,2025,49(11):14-28.
ZHOU Jinghua, LI Jin. Comparison and analysis of domestic and international technical standards for grid-forming energy storage conversion system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(11): 14-28.

[66] TAYYEBI A, DORFLER F, KUPZOG F, et al. Grid-forming converters—inevitability, control strategies and challenges in future grids application[C]// CIRED Workshop, June 7-8, 2018, Ljubljana, Slovenia.

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

[68] JOUINI T, ARGHIR C, DÖRFLER F. Grid-friendly matching of synchronous machines by tapping into the DC storage[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(22): 192-197.

[69] MENG X, LIU J J, LIU Z. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.

[70] 马秀达,卢宇,田杰,等.柔性直流输电系统的构网型控制关键技术与挑战[J].电力系统自动化,2023,47(3):1-11.
MA Xiuda, LU Yu, TIAN Jie, et al. Key technologies and challenges of grid-forming control for flexible DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 1-11.

[71] 张家玮,张琛,史先强,等.储能型静止无功发生装置及其自同步电压源控制[J].高电压技术,2023,49(1):61-71.
ZHANG Jiawei, ZHANG Chen, SHI Xianqiang, et al. Energy-storage-type static var generator and its autonomous-synchronization voltage source control [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 61-71.

[72] 邱硕,庄可好,汤波,等.基于直流电容自同步的构网型SVG暂态同步稳定分析与提升策略[J].电网技术,2025,49(9):3633-3642.
QIU Shuo, ZHUANG Kehao, TANG Bo, et al. Transient synchronous stability analysis and enhancement strategy for DC capacitor self-synchronisation-based constructed grid type SVGs

[J]. Power System Technology, 2025, 49(9): 3633-3642.
[73] 边宏宇，徐友平，邵德军，等. 直流馈入受端电网“空心化”形势下的稳定特性分析及解决措施[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(18)：164-170.
BIAN Hongyu, XU Youping, SHAO Dejun, et al. Analysis of stability characteristics and solutions with the hollowing of a DC feed power grid [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 164-170.
[74] 李建林，丁子洋，游洪灏，等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. 高压电器，2023，59(7)：1-11.
LI Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, et al. Research on stable operation of new power system supported by grid-forming energy storage system [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 1-11.
[75] 王宏霞，张万年. 他们为新能源发展研发“助推器”——走进公司大型新能源基地多元储能技术实验室[N]. 国家电网报，2023-07-25(8).
WANG Hongxia, ZHANG Wannian. They are developing a “booster” for the development of renewable energy—entering the laboratory on multi-energy storage technology of large-scale renewable energy base in State Grid Corporation of China [N]. State Grid News, 2023-07-25(8).
[76] 本报评论员. 坚持系统观念和问题导向　扎实推动新型电力系统安全稳定发展[N]. 国家电网报，2024-10-22(1).
Commentator of State Grid News. Adhere to the systematic perspective and problem-oriented approach to steadily promote the safe and stable development of renewable power system [N]. State Grid News, 2024-10-22(1).
[77] D' ARCO S, SUUL J A. Virtual synchronous machines—Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids [C]// 2013 IEEE Grenoble Conference, June 16-20, 2013, Grenoble, France.
[78] 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.

郭贤珊(1972—)，男，通信作者，硕士，教授级高级工程师，主要研究方向：高压直流输电技术与工程运行管理。E-mail：xianshan-guo@sgcc.com.cn

张国华(1979—)，男，博士，教授级高级工程师，主要研究方向：高压直流输电及柔性直流输电。E-mail：guohua-zhang@sgcc.com.cn

李健栋(1992—)，男，硕士，工程师，主要研究方向：柔性直流输电及新能源并网技术。E-mail：jiandong-li@sgcc.com.cn

（编辑　蔡静雯）

Development Status and Engineering Application of Grid-forming Converter Technology

GUO Xianshan[1], *ZHANG Guohua*[1], *LI Jiandong*[1], *HUANG Qinxin*[2]
(1. DC Technology Center of State Gird Corporation of China, Beijing 100052, China;
2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: With the ongoing advancement of new power system construction in China, the green and low-carbon transformation of energy is accelerating and upgrading. The proportion of renewable energy installed capacity has significantly increased, and a large number of power electronic devices have been integrated into the power grid. Great changes, including reduced moment of inertia and weakened reactive power support capabilities, have taken place on the source, load, and grid sides of the power system. In this context, the power system requires equipment to possess new characteristics, namely corresponding features of synchronous machines and the ability to actively support the power grid. This paper elaborates on the main characteristics of the new power system from three aspects: demands of the new power system, grid-forming converter technology, and typical equipment and engineering applications. In addition, the working principle and various topologies of grid-forming converters are analyzed. Subsequently, based on the existing research and practical projects, the engineering application cases of four typical grid-forming converters, namely grid-forming flexible DC, grid-forming static compensator, grid-forming static var generator, and grid-forming energy storage, are described. Finally, development suggestions and prospects are proposed based on the current research status of grid-forming technology, providing references for further engineering applications.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5100-202422368A-3-1-DG).

Key words: new power system; grid-forming converter; engineering application; moment of inertia; grid-forming flexible DC; grid-forming static compensator; grid-forming static var generator; grid-forming energy storage