第 50 卷 第 2 期：590-604 高电压技术 Vol.50, No.2: 590-604
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231776

构网型变流器：物理本质与特征

迟永宁[1]，江炳蔚[1]，胡家兵[2]，林伟芳[1]，刘宏志[1]，范译文[1]，
马士聪[1]，姚　骏[3]
（1. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；2. 华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430074；
3. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学)，重庆 400044）

摘　要：全球能源产业变革促进了电力系统电力电子化转型，以新能源为主体的电力电子化电力系统中同步机占比低，系统呈现低惯量、弱阻尼特征，引发了一系列运行问题。构网型变流器本质为电压源，能够主动构建电压频率，为系统提供惯量支撑，有利于改善系统稳定性，是提高新能源主动支撑能力的有效手段，近年来成为研究热点。该文从电力电子化电力系统的运行问题出发，梳理了下垂控制、虚拟同步机控制等典型构网型控制策略的实现原理及内在联系，建立构网型控制策略的统一数学模型；通过类比稳态条件下同步机与构网型变流器的电压频率构建原理，揭示了构网型变流器的物理本质，从电压频率构建、惯量阻尼支撑、同步机制等角度解释了构网型变流器的内涵与特性，可为构网型变流器的稳定与控制提供理论参考。

关键词：构网型控制；新能源并网；变流器；物理本质；电压频率构建；稳定控制；电力电子化电力系统

Grid-forming Converters: Physical Mechanism and Characteristics

CHI Yongning[1], JIANG Bingwei[1], HU Jiabing[2], LIN Weifang[1], LIU Hongzhi[1], FAN Yiwen[1],
MA Shicong[1], YAO Jun[3]
(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The evolution of global energy industry has promoted the transformation of power electronics in the power system. The proportion of synchronous machines in renewable-rich power system is low, and the system shows low inertia and weak damping characteristics, causing a series of operational issues. The grid-forming converter is a voltage source in essence, which can actively construct voltage frequency, provide inertia for the system, consequently, improve system stability. It is an effective means to improve the power ability of new energy and has become a research hotspot in recent years. Starting from the operational issues of renewable-rich power system, this article summarizes the implementation principles and internal connections of grid-forming control strategies such as droop control and virtual synchronous generator control, and establishes a unified mathematical model for grid-forming strategies; by comparing the voltage and frequency construction principles of synchronous generator and grid-forming converters under steady-state conditions, the physical essence of grid-forming converters is revealed. The characteristics of grid-forming converters are explained from the perspectives of voltage and frequency construction, inertia damping support, synchronization mechanism, etc., providing theoretical reference for the stability and control of grid-forming converters.

Key words: grid-forming; grid connection; converter; mechanism and characteristics; voltage and frequency construction; stability control; power-electronized power system

0　引言

随着“碳达峰、碳中和”战略的提出，能源转型速度加快，电力系统新能源占比逐渐提升，预计2060 年我国新能源装机量将突破 70 亿 kW，占比将突破 90%，发电量超过 65%[1]。新能源在我国能源转型中起到了关键作用，但同时其随机性、低惯量、弱阻尼等特性，也给电力系统的安全运行带来了巨大挑战。

基金资助项目：国家自然科学基金委员会–国家电网公司智能电网联合基金(U1966208)。
Project supported by Joint Research Fund in Smart Grid Under Cooperative Agreement Between the National Natural Science Foundation of China and State Grid Corporation of China (U1966208).

新能源发电设备一般运行在最大效率跟踪模式，对外输出有功功率，不主动参与系统的电压调节[2]，并网特性很大程度上由变流器主导，而变流器特性由其控制策略决定，根据控制机理的差异，可划分为跟网型、构网型两类[3-4]。目前国内[5-7]、国外[8-10]的新能源并网工程大多采用跟网型变流器并网，由于变流器自身存在不足，因此引发了一系列电力系统事故。例如，英国“8.9”大停电[11]，美国加州“8.14”大停电[12]，南澳大利亚“9.28”、“2.8”大停电[13]等。此外，变流器控制环节存在耦合导致系统振荡，引发如哈密[14]、上海南汇、广东南澳[15]、河北沽源[16]等风电场的次同步振荡现象。

为解决新能源大量接入所导致的“低惯量”、“弱阻尼”问题，国内外研究团队提出了构网型控制策略[17-20]，使变流器模拟同步发电机特性，主动参与电网调节，部分文献对近期的构网型研究进展进行了总结。文献[20]对构网型控制进行了详细分类，给出了各类构网型控制的数学模型及应用场景。文献[21]针对虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制，将 VSG 控制分为电压支撑及功率支撑两类模型，并从数学模型、控制效果等层面分析了各类 VSG 控制的异同，研究了控制参数对控制效果的影响。文献[22-24]基于电力电子化电力系统背景，总结归纳了 VSG 控制在电力电子化电力系统中的优势，并给出了具体的应用场景。

本文以电力电子化电力系统为背景，首先归纳总结了大规模跟网型变流器并网后带来的问题，阐明了构网型变流器应用的重要性与必要性。接着，对比分析了下垂控制、VSG 控制等典型构网型控制策略，提出了构网型控制的统一表达式。最后，明确了构网型变流器的物理本质及其内涵，针对构网型变流器的不同应用场景，总结了构网型变流器的典型特征。

1 构网型变流器原理及其控制

1.1 电力电子化电力系统的运行问题

传统变流器采用跟网型控制策略，该策略基于锁相环(phase-locked loop, PLL)跟随电网运行，在大电网中能够获得较好的运行效果，是应用最早、最广泛的新能源并网设备。然而，随着并网规模的提升，跟网型变流器并网规模增加，电力系统电力电子化程度大幅提升，导致系统出现一系列新问题。

1）系统惯量水平下降

惯量来源于动力学概念，惯量为描述物体惯性大小的量值，表现为物体对当前运动状态变化的抵抗程度。传统同步机转子作为旋转元件，自身具备惯量，从能量角度看，能够存储与释放动能。

变流器作为电力电子设备，不具备旋转部件，且响应速度很快。传统跟网型控制策略通过 PLL 获取公共连接点(point of common coupling，PCC)处电压相角，通过电压电流双闭环控制实现 *dq* 分量的解耦控制。控制原理与物理运动不存在关联性，在没有附加控制的情况下，控制策略本身不具备惯量特性。

随着新能源机组的大量接入，同步机数量的减少直接导致系统惯量降低，故障情况下，系统频率迅速跌落，如图 1 所示。对比变流器接入前后系统的频率响应曲线可知，大规模接入变流器后，由于惯量降低，系统发生频率扰动时，频率变化率较大，频率跌落较深，系统频率稳定性变差。该特性直接导致新能源机组保护机制动作，进而引发了如英国、美国得州、南澳大利亚等地区的大停电事故，如表 1 所示。

2）系统电压稳定性降低

根据电网短路比水平，将短路比小于 3 的电网归类为弱电网[24]。新能源场站处于电网末端，短路容量小，属于弱电网工况，线路阻抗与变压器漏抗等参数将不可忽略。同时，PCC 点处电网脆弱，可能导致三相电压不平衡的情况。

变流器控制环节引入的有源阻尼与弱电网的系统阻抗耦合，将产生负阻尼[25]，且弱电网阻抗在宽范围变化时，阻抗间谐振频率存在差异，电网稳定性差，从而引发例如哈密、沽源等新能源场站的次同步振荡事故。由于跟网型变流器基于 PLL 跟踪电压相位，因此在弱电网工况下，PLL 与系统阻抗间存在耦合关系，且随着 PLL 带宽的增加，耦合程度随之增强，从而导致 PCC 处电压畸变，进而引起系统失稳[26]。

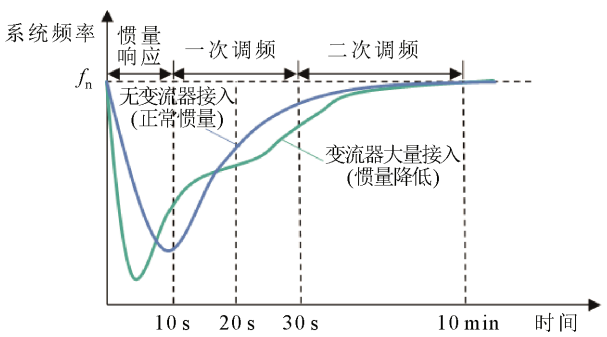


图 1 电力系统频率响应曲线

Fig.1 Frequency response of power system

3）变流器同步效果不佳

传统同步机内电势相位由转子运动方程决定，并网时内电势幅值相位与电力系统电压保持同步。跟网型控制策略基于 PLL 获取电网电压相位，与电网保持同步，自身无法构建电压与频率，需要跟随参考电压源/电网运行，且构建的电压与频率稳定性依赖于电网强度及锁相环稳定性。

随着惯量水平的下降，系统出现扰动时，电压与频率极易产生波动，传统跟网型变流器难以在电压跌落时主动支撑电压，进而导致更为严重的电网事故。该特性也导致在 100%新能源孤岛微网中，仅依靠跟网型变流器无法构建稳定的电压与频率，从而无法实现离网运行[27-28]。

电力电子化系统的特点及产生原因总结于图 2。

1.2 构网型变流器控制策略

变流器并网结构如图 3(a)所示，跟网型控制利用 PLL 获取相位[29]，如图 3(b)所示。而构网型控制无需依赖 PLL，通过功率有差流动即可实现电压与频率控制，如图 3(c)所示。构网型控制的核心在于功率控制环，该环节也是实现构网功能、区分各类构网型控制的关键。

根据功率控制环节的差异，构网型控制可划分为下垂控制、VSG 控制、虚拟振荡器控制等。其中下垂控制与 VSG 控制特性与传统同步机类似，是应用最为广泛的两类构网型控制策略[30]。本文以下垂控制与 VSG 控制为研究对象，对比分析 2 类控制策略的异同。

表 1 国内外部分电网事故总结

Table 1 Summary of domestic and overseas grid accidents

区域	电网事故	事故原因
国外	英国“8.9”大停电	• 弱电网次同步振荡 • 系统惯量支撑能力不足 • 系统保护配置不合理
	美国加州“8.14”大停电	• 极端天气耐受能力不足 • 电源储备容量不足
	南澳大利亚“9.28”“2.8”大停电	• 系统缺乏惯量支撑 • 无功支撑能力不足 • 风机缺乏低压穿越能力
国内	哈密风电场次同步振荡	• 系统存在 Hopf 分岔 • 动力系统存在周期解
	上海南汇、广东南澳风电柔直并网振荡	• 柔直送出系统鲁棒性低 • 阻尼控制器配置不佳
	河北沽源风电场振荡	• 串补引发风机次同步振荡

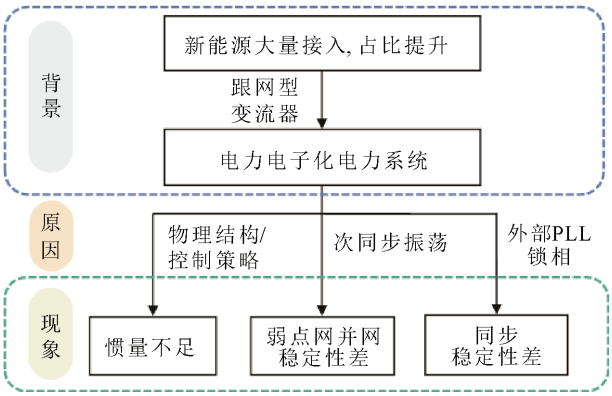
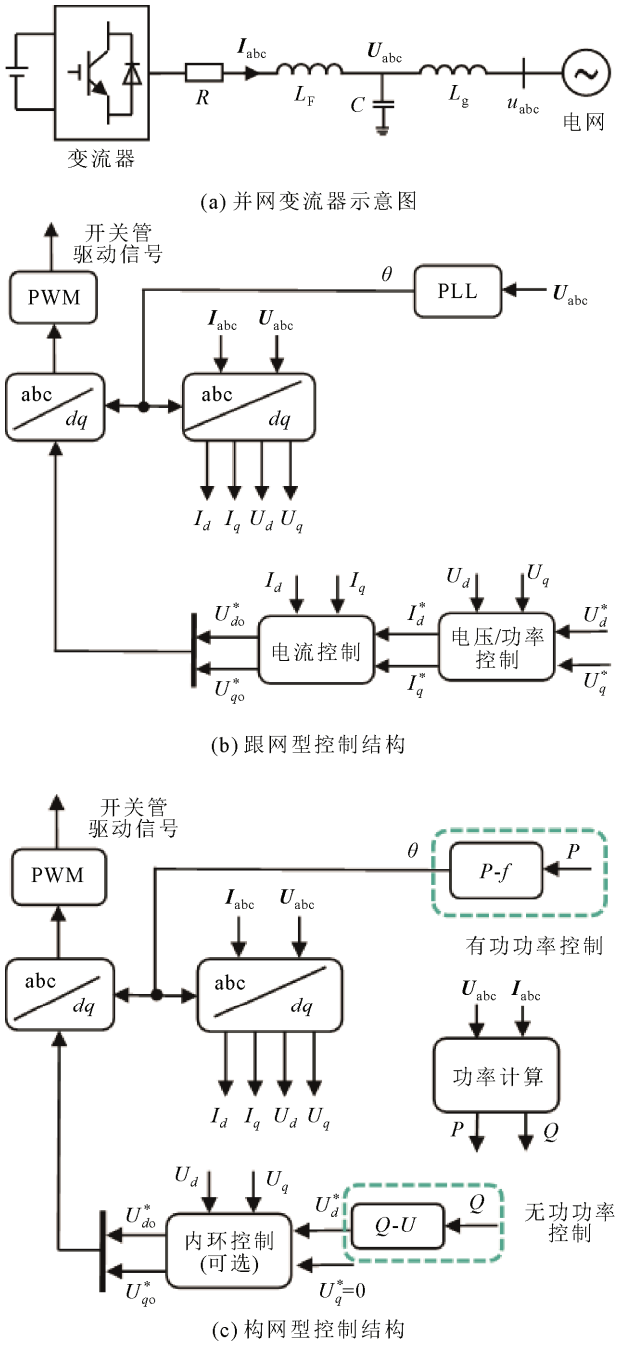


图 2 电力电子化电力系统的特点及产生原因

Fig.2 Characteristics and its causes of power-electronized power system



(a) 并网变流器示意图

(b) 跟网型控制结构

(c) 构网型控制结构

图 3 不同控制器的结构

Fig.3 Structures of different controller

1.2.1 下垂控制

下垂控制通过模拟发电机的一次调频特性，依据有功-频率(*P-f*)、无功-电压(*Q-U*)下垂特性[31]，实现构网型控制，是最简单常见的构网型控制策略。同步发电机的下垂特性表达式如式(1)所示，下垂控制结构如图 4 所示，数学表达式如式(2)所示。

$$\begin{cases}\omega^{*}=\omega_0+K_{\mathrm{p}}(P_0-P)\\ U^{*}=U_0+K_{\mathrm{q}}(Q_0-Q)\\ \theta^{*}=\int\omega^{*}\mathrm{d}t\end{cases}\tag{1}$$

$$\begin{cases}K_{\mathrm{p}}=(\omega-\omega_{\mathrm{ref}})/(P_{\mathrm{ref}}-P)\Leftrightarrow\Delta\omega=-K_{\mathrm{p}}\Delta P\\ K_{\mathrm{q}}=(U-U_{\mathrm{ref}})/(Q_{\mathrm{ref}}-Q)\Leftrightarrow\Delta U=-K_{\mathrm{q}}\Delta Q\end{cases}\tag{2}$$

式中：P_0、Q_0 是基于新能源设备最大效率跟踪等算法给定的有功、无功参考值；K_{p}、K_{q} 分别为有功、无功支路下垂系数；ω_0、U_0 分别为角频率、电压幅值的额定值；ω^*、U^*、θ^*分别为角频率、电压幅值、功角的输出值。

以图 4 中 *P-f* 下垂为例，通过采样 PCC 点电压、电流，计算有功功率 P，与给定值 P_0 作差，根据下垂特性计算角频率差值 $\Delta\omega$，与额定值 ω_0 相加，输出 ω^*。同理，通过无功-电压下垂特性，输出 U^*。

由式(1)可知，下垂控制不具有惯量，容易引起电压与频率振荡[32]，但下垂控制结构简单，控制响应速度快[33]，应用场景主要集中于微网工况[34-35]。

1.2.2 VSG 控制

VSG 控制通过模拟同步发电机转子运动的 2 阶方程，相比下垂控制能够更为精确地模拟同步机的运行特性[21]。同步机转子运动 2 阶方程为：

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{e}}-D_{\mathrm{p}}(\omega-\omega_0)\approx\frac{P_0}{\omega_0}-\frac{P}{\omega_0}-D_{\mathrm{p}}(\omega-\omega_0)\tag{3}$$

式中：J 为同步机转动惯量；T_{m}、T_{e} 分别为机械转矩与电磁转矩；D_{p} 为阻尼系数。

基于 *P-f* 控制支路，VSG 变流器可实现自同步。VSG 控制结构如图 5 所示，该控制策略的 *P-f* 支路模拟同步机转子运动方程，生成系统频率；*Q-U* 控制支路可以采用下垂控制结构，但难以实现无差跟踪[36]，文献[36]在 *Q-U* 支路中引入反馈回路，控制结构与 *P-f* 支路具有一致性，使得 *Q-U* 支路呈现 2 阶特性，同时具备一定的惯量特性，其中 τ 为 *Q-U* 支路比例系数，D_{q} 为 *Q-U* 支路阻尼系数。VSG 控制表达式为：

$$\begin{cases}\omega^{*}=\dfrac{1}{Js}\left(D_{\mathrm{p}}(\omega_0-\omega^{*})+(P_0-P)\right)\\ U^{*}=\dfrac{1}{\tau s}\left(D_{\mathrm{q}}(U_0-U^{*})+(Q_0-Q)\right)\end{cases}\tag{4}$$

1.2.3 下垂控制与 VSG 控制的关联性

为避免电网谐波对变流器的影响，实际工程应用中，通常在下垂控制前端加入低通滤波器(low-pass filter, LPF)滤除瞬时功率中的高阶项[37]，如图 6 所示。低通滤波器的传递函数为：

$$G(s)=\frac{K\omega}{s+\omega}\tag{5}$$

式中：K 为低通滤波器比例系数；ω 为低通滤波器截止角频率。

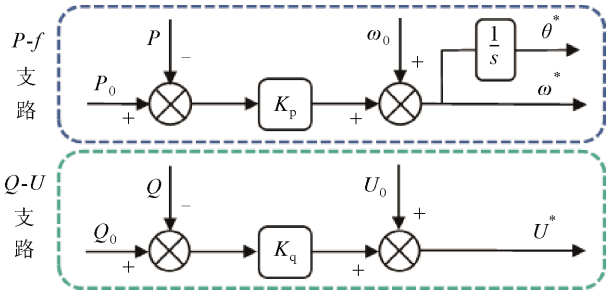


图 4 下垂控制结构

Fig.4 Chart of droop controller

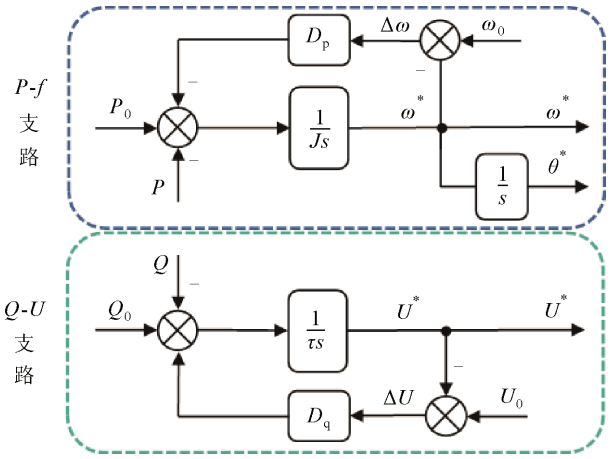


图 5 VSG 控制结构

Fig.5 Chart of VSG controller

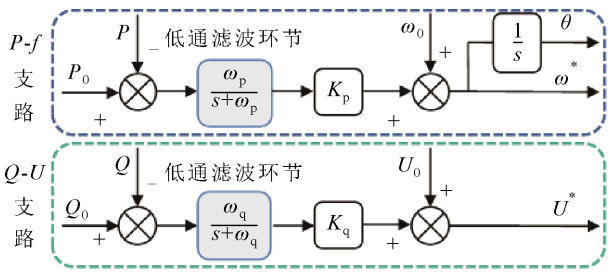


图 6 LPF 下垂控制

Fig.6 Chart of LPF droop controller

$$\begin{cases}\omega^* = \dfrac{K_\mathrm{p}\omega_\mathrm{p}}{s+\omega_\mathrm{p}}(P_0 - P) + \omega_0 \\ U^* = \dfrac{K_\mathrm{q}\omega_\mathrm{q}}{s+\omega_\mathrm{q}}(Q_0 - Q) + U_0\end{cases} \tag{6}$$

式中：K_p、K_q 分别为 *P-f*、*Q-U* 支路下垂系数；ω_p、ω_q 分别为 *P-f*、*Q-U* 支路 LPF 截止角频率。

LPF 下垂控制数学表达式如式(6)所示，当 $\omega_\mathrm{p} = \omega_\mathrm{q} = \infty$，低通滤波器特性失效，LPF 下垂控制退化为经典下垂控制。

将 VSG 控制中式(4)变形得：

$$\omega^* = \frac{1}{Js + D_\mathrm{p}}(P_0 - P) + \frac{D_\mathrm{p}}{Js + D_\mathrm{p}}\omega_0 \tag{7}$$

式中：ω_0 前的拉氏表达式恰好与 LPF 数学表达式类似，呈现等效 LPF 特性。由于 ω_0 为参考值，是一个常数量，因此 LPF 特性失效，则式(7)可简化为：

$$\omega^* = \frac{1}{Js + D_\mathrm{p}}(P_0 - P) + \omega_0 \tag{8}$$

对比式(6)与式(8)可知，传统下垂控制加入 LPF 环节后，系统传递函数形式与 VSG 控制相同。令：

$$\begin{cases}K_\mathrm{p} = 1/D_\mathrm{p} \\ \omega_\mathrm{p} = D_\mathrm{p}/J\end{cases} \tag{9}$$

则可实现下垂控制与 VSG 控制的转换。

构网型控制数学模型总结如表 2 所示，VSG 控制基于同步发电机的 2 阶模型，能够模拟同步发电机的惯性特性、阻尼特性及一次调频调压特性，而下垂控制仅仅模拟了同步发电机的一次调频调压特性，不具有惯量特性。加入 LPF 环节，使得下垂控制具有惯量特性。传统同步机、传统下垂控制、LPF 下垂控制以及 VSG 控制的关联关系如图 7 所示。

提取传统下垂控制、LPF 下垂控制、VSG 控制数学表达式的共性，构建构网型控制的统一表达式如式(10)所示，控制结构如图 8 所示。

$$\begin{cases}\omega^* = \omega_0 + \dfrac{A}{s+B}(P_0 - P) \\ U^* = U_0 + \dfrac{C}{s+D}(Q_0 - Q)\end{cases} \tag{10}$$

式中：*A*、*B*、*C*、*D* 为控制器参数，参数选取的 3 种形式如表 3 所示。

当控制参数 *A*、*B*、*C*、*D* 符合情况 1 时，控制策略退化为 1 阶环节，控制器为经典下垂控制；当控制参数符合情况 2 时，控制器为 LPF 下垂控制；当控制参数符合情况 3 时，控制器为 VSG 控制；情况 2、情况 3 这 2 种参数工况下，控制策略均为 2 阶环节，具备惯量特性，动态特性优于传统下垂控制。

表 2 构网型控制数学表达式对比

Table 2 Comparison of equation in different grid-forming controller

控制策略	*P-f* 支路	*Q-U* 支路
传统下垂控制	$\omega^* = \omega_0 + K_\mathrm{p}(P_0 - P)$	$U^* = U_0 + K_\mathrm{q}(Q_0 - Q)$
LPF 下垂控制	$\omega^* = \dfrac{K_\mathrm{p}\omega_\mathrm{p}}{s+\omega_\mathrm{p}}(P_0 - P) + \omega_0$	$U^* = \dfrac{K_\mathrm{q}\omega_\mathrm{q}}{s+\omega_\mathrm{q}}(Q_0 - Q) + U_0$
VSG 控制	$\omega^* = \dfrac{1}{Js + D_\mathrm{p}}(P_0 - P) + \omega_0$	$U^* = \dfrac{1}{\tau s + D_\mathrm{q}}(Q_0 - Q) + U_0$

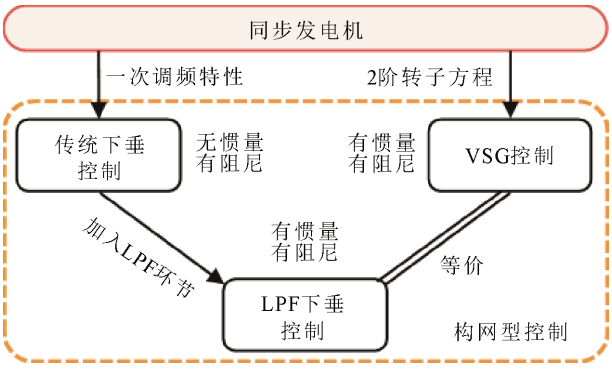


图 7 下垂控制与 VSG 控制的关系

Fig.7 Relations among droop control, LPF control and VSG control

表 3 式(10)参数取值情况

Table 3 Parameter values in equation (10)

参数	情况 1	情况 2	情况 3
参数 *A*	$K_\mathrm{p}\cdot\infty$	$K_\mathrm{p}\omega_\mathrm{p}$	$1/J$
参数 *B*	∞	ω_p	D_p/J
参数 *C*	$K_\mathrm{q}\cdot\infty$	$K_\mathrm{q}\omega_\mathrm{q}$	$1/\tau$
参数 *D*	∞	ω_q	D_q/τ

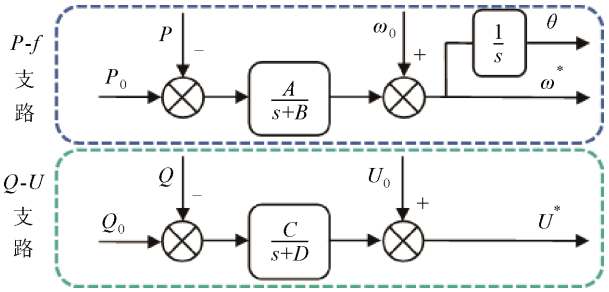


图 8 构网型统一控制模型

Fig.8 Universal model of grid-forming controller

2 构网型控制的物理本质与内涵

2.1 物理本质：构网型变流器本质是电压源

构网型变流器模拟传统同步机，使其呈现与传统同步机类似的特性。同步机、跟网型与构网型变流器等效电路如图 9 所示。同步机机端电压与定转子绕组的绕制匝数与绕制方式有关，同步机定子感应基波电动势表达式为：

$$E_0 = 4.44 f N k_{\mathrm{N}} \Phi_0 \tag{11}$$

式中：f 为频率；N 为绕组匝数；k_{N} 为饱和系数；Φ 为磁通量。

传统同步机电压的构建是依靠定转子间的相对旋转切割磁场产生的，在不考虑磁路饱和的情况下，同步机机端电压与同步机磁路存在强关联性。同步机输出电流频率与转子转速 n、极对数 p 存在如式(12)所示的关系。由此可见，同步机的机端电压/频率主要与定转子结构(极对数、绕制方式)、定转子动态特性(旋转速度)有关，在稳态运行情况下能够保持恒定。

$$f = np / 60 \tag{12}$$

同步机在稳态运行情况下，输出幅值恒定、频率恒定的电压，本质为电压源。

跟网型变流器前级电压控制环输出电流参考值，后级电流控制环跟踪该参考值，以保证输出电流幅值恒定；电流角度由 PLL 锁相 PCC 点处电压相位获得，频率跟随电网本质为幅值恒定、频率跟随电网的电流源。构网型变流器功率控制环节模拟同步机的一次调频特性、转子运动方程等物理过程，通过有功无功的有差流动，自主获取频率(相角)、电压幅值的参考值。电压控制环节通过比例积分(proportional-integral, PI)控制(dq 坐标系)或比例谐振(proportional-resonant, PR)控制($\alpha\beta$ 坐标系)实现对参考值的跟踪，使得变流器输出幅值恒定、频率恒定的电压。因此，构网型变流器的本质为电压源，与同步机具有一致性，在系统潮流控制方面具有一定的优势[38]。根据跟网型与构网型物理本质的差异，文献[39]测量了变流器端口处等效阻抗，根据阻抗大小可判别变流器的控制策略：构网型变流器本质为电压源，等效阻抗小，而跟网型变流器本质为电流源，等效阻抗大。

2.2 构网型变流器的内涵

2.2.1 自主构建内电势

构网型变流器的电压源本质决定了其能够自主构建内电势。内电势的幅值、频率与电网当前状态解耦，仅由有功无功的有差流动决定。

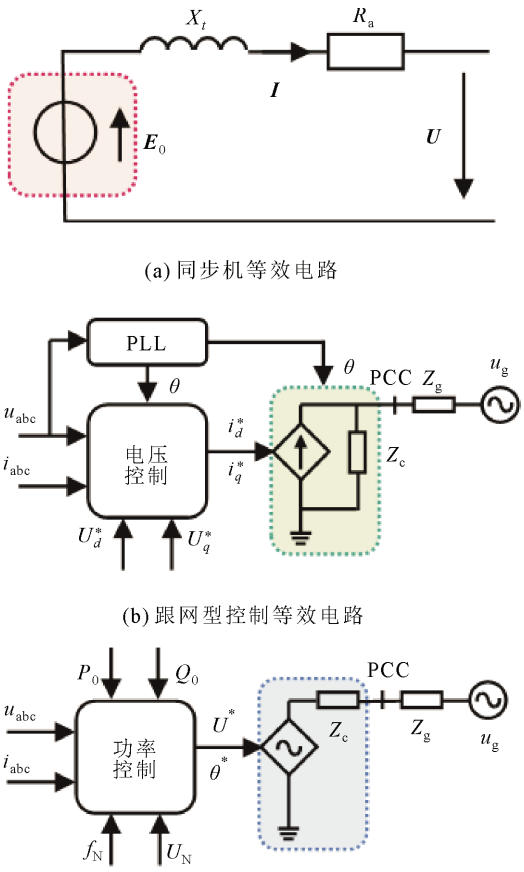


图 9 不同控制策略等效电路

Fig.9 Equivalent models of different control strategies

稳态情况下，构网型变流器与同步机运行特性类似，电网频率发生扰动时，由于变流器频率与电网频率解耦，通过改变输出频率，调节有功输出，来对系统提供频率支撑。在发生电压跌落时，构网型变流器的电压源特性将保持内电势 E 的恒定，在一定程度上有利于维持系统电压的稳定，但可能导致故障电流的升高。

对比构网型变流器与传统同步机的电压频率构建原理，虽然构网型控制策略模拟了传统同步机特性，但由于变流器与同步机物理构造存在本质差别，其导致构建机理不同。构网型变流器基于无功/电压、有功/频率的耦合特性，可实现电压幅值与频率的跟踪，但在电压控制环节中，两条控制支路可能存在交叉耦合，基于控制器小信号模型，合理设计控制参数，可实现支路控制环节的解耦[40-42]。

跟网型变流器本质上等效为电流源，其内电势

大小与变流器等效阻抗有关。内电势频率由 PLL 锁相得到，与电网保持一致。当电网频率出现扰动时，变流器频率也将随之波动，无法维持恒定。电压跌落时，跟网型变流器的电流源本质将保持输出电流恒定，可能导致输出电压发生变化。

构网型控制策略自主构建内电势的优势在弱电网中将得以体现，文献[43]研究表明，在跟网型变流器主导的系统中，增加构网型变流器有助于提升系统的稳定性；文献[44]指出，在无传统同步电源的微网中，由于缺乏电压频率的参考，因此至少需要 1 台构网型变流器提供频率、电压参考以构建网络。

2.2.2 具备自同步性

同步机与电网的同步运行包括如下内涵：波形相同、频率相同、幅值相同、相位相同、相序相同。同步机通过合理设计电机结构，选择合理的并网时刻实现同步机与电网的同步并网运行。

构网型变流器与同步机类似，也需要满足并网条件。其中，变流器输出波形、相位、相序通过合理设计变流器开关管的驱动信号得以保证。并网电压、频率相同的并网条件，需通过功率控制、电压电流控制环节保证。

1）频率同步过程

变流器输出功率为：

$$P=\frac{U_{\mathrm{g}}U_{\mathrm{o}}}{X}\sin\delta \tag{13}$$

式中：U_{g}为 PCC 点处电压；U_{o}为变流器端口电压；X为线路阻抗；δ为阻抗角。

根据式(10)及电压相角与频率之间的关系得：

$$f=\frac{\omega}{2\pi}=\frac{\dot{\theta}}{2\pi}=\frac{1}{2\pi}\left(\omega_0+\frac{A}{s+B}(P_0-P)\right) \tag{14}$$

式中：$\dot{\theta}$表示静止坐标系下电压向量旋转角度的导数。

经电压电流采样及功率计算，当 PCC 点处$P_0>P$时，$\dot{\theta}$为正，变流器输出电压的相角增大，导致输出有功增加，使得(P_0-P)的差值减小。直至$P_0=P$，电压相角达到稳定状态，实现功率同步。

2）电压幅值同步过程

设定 PCC 点处电网电压为 U_{g}，构网型变流器出口处电压为 U_{out}，构网型变流器输出无功功率为：

$$Q=\frac{U_{\mathrm{g}}^2}{X}-\frac{U_{\mathrm{g}}U_{\mathrm{out}}}{X}\cos\delta \tag{15}$$

根据构网型控制 Q-U 支路的表达式(式(16))调节系统无功功率 Q，跟踪给定值 Q_0，当$Q_0=Q$时，电压幅值达到稳定状态，实现电压同步。

$$U^*=U_0+\frac{C}{s+D}(Q_0-Q) \tag{16}$$

3 构网型变流器的特征

变流器的特性由其控制策略决定，构网型控制的物理本质决定了变流器具有一系列类似于传统同步机的特性。

3.1 惯量支撑特征

同步机内部含有巨大的转子，从机械角度看，同步机的惯量表现为转子的转动惯量，惯量大小与转子的质量 m 以及转动半径 r 有关，如式(17)所示。从动力学角度看，同步机惯量 J 表现为对转速变化的抵抗程度，惯量越大，对外界干扰的响应越不明显。从能量角度看，转动惯量与转子储存的动能大小 E 有关，其中 ω 为转子机械角速度，对于额定运行的同步机，转子动能仅取决于转动惯量的大小，转子储存的动能越大，为等额负荷提供能量的持续时间越长，为系统提供的能量支撑越强[45]。

$$\begin{cases}J=\int r^2\mathrm{d}m\\ E=0.5J\omega^2\end{cases} \tag{17}$$

随着同步机被新能源机组取代，跟网型变流器占比增加，而传统跟网型变流器不具备惯量，导致电力电子化电力系统惯量大幅下降。

在风电场并网场景中，常见的风机类型有双馈异步风机、永磁直驱风机等，结构如图 10 所示。双馈风机中虽然存在双馈式(异步发电机)结构，且其转子中存储了一部分动能，但是转子励磁电流由转子侧变流器控制，自由度高，响应时间短，实现了转子与定子间的解耦，因此风机转子中存储的电能与定子输出功率之间耦合关系很弱，常规风电机组的惯量在扰动情况下几乎不会表现出支撑电网运行的特性[46-47]。永磁直驱风机转子转速与电网频率呈现完全解耦的状态，在不改变控制的情况下不具备向电网提供惯量支撑的条件。

在式(10)中代入传统下垂控制、LPF 下垂控制、VSG 控制的参数可知，由于传统下垂控制中 A 的取值趋近于无穷，变流器的虚拟惯量很小，因此可以认为传统下垂控制不具有惯量支撑能力。而 LPF 下垂控制、VSG 控制统一表达式中 A 的取值与控制参数相关，能够为系统提供一定的惯量支撑。

文献[48]考虑电力电子化电力系统源网荷储各

方面的惯量特性，提出了系统广义惯量的概念，在不同时间尺度下，惯量响应存在差异性。同时，通过增加惯量控制环节，也可以使得跟网型控制具备惯量支撑特性，但该惯量控制依赖于延时实现，瞬时支撑能力不足。文献[49]提出变虚拟惯量系数控制策略，根据电网与风机运行状态，实时调整虚拟惯量系数以适应不同运行工况。但对于控制环节来说，虚拟惯量参数的频繁变化可能导致控制效果不佳，使得控制器稳定性变差，导致实际工程应用中无法达到预期效果。文献[50]指出控制系统的惯量与实际物理储能间的联系，惯量控制的功率来源为直流侧储能设备，惯量系数的选择需要与储能的配备情况协同考虑。

3.2 阻尼特性

在扰动情况下，传统同步机电磁转矩包括同步转矩和阻尼转矩 2 个部分，其中阻尼转矩 T_d 与转子角速度差相关，是由角速度偏移引起的转矩分量，如式(18)所示。阻尼转矩与系统稳定性有关，可避免扰动后系统产生振荡现象。

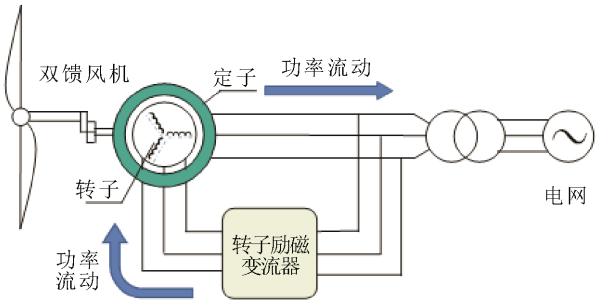
$$\begin{cases} T_d = D_p(\omega - \omega_0) \\ P - P_0 = T_d\omega_0 \end{cases} \tag{18}$$

传统跟网型变流器存在控制延时与交流电流控制的频带充电效应，可能导致系统呈现容性负阻尼，与感性电网产生谐振，从而易引发次同步振荡问题[51]。通常可以通过增加阻抗反馈支路来调节控制环节的阻尼水平，但该策略在一定程度上增加了控制环节的复杂性，增加了控制环节的延时，进而会引发其他问题。

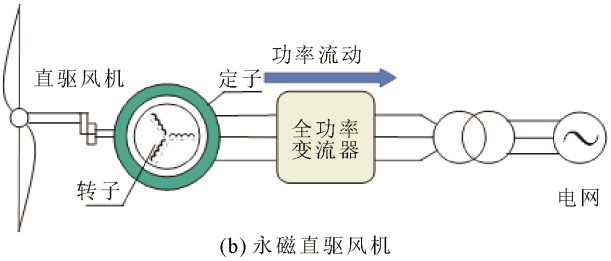
构网型控制策略模拟了同步机的阻尼特性，该特性在转子运动方程中得以体现，如图 11 所示。同步机的阻尼转矩与同步机有功输出有关，如式(18)所示。对应至转子运动方程中，阻尼体现为控制器的下垂系数，因此构网型控制具有一定的阻尼特性。

变流器的阻尼水平与小扰动稳定性存在强关联性。根据振荡频率的大小，依次划分为低频振荡、次同步振荡、高频振荡，如表 4 所示。跟网型变流器并网时，当跟网型变流器阻尼水平不足时，容易引起高频振荡。在弱电网工况下，容易产生次同步振荡现象[52]。可以通过引入有源阻尼，采用分布式调相机来提升短路比水平，从而达到减少跟网型变流器振荡风险的目的。

构网型变流器自身功率环具备较强的阻尼特性，当构网型后级控制中不包含电流环(不采用电压电流双闭环)时，不容易发生高频振荡[53]。由于电流环具有时延，可能导致整体呈现负阻尼，因此可以通过减小控制时延，来增加有源阻尼方法减少高频振荡风险[54]。当构网型变流器接入弱电网时，几乎



(a) 双馈风机



(b) 永磁直驱风机

图 10 2 种常见的风机结构简图

Fig.10 Simplified structure of two normal kinds of wind turbines

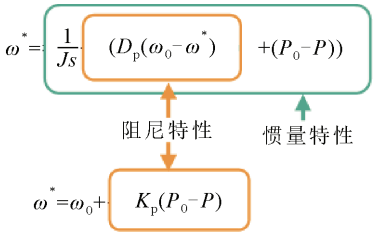


图 11 下垂/VSG 控制阻尼与惯量特性

Fig.11 Inertia and damping characteristics in droop and VSG controller

表 4 跟网型、构网型宽频振荡风险总结

Table 4 Risk of wide-band oscillation of grid-following and grid-forming converter

类型	低频振荡 (0.2~3 Hz)	次同步振荡 (2~100 Hz)	高频振荡 (300~1500 Hz)
跟网型	风险低	• 强电网下风险低 • 弱电网下风险大	阻尼欠缺时存在风险
构网型	阻尼欠缺时存在风险	风险低	• 有电流环时存在风险 • 无电流环时几乎无风险

不存在次同步振荡风险，而接入强电网时，其稳定裕度随着电网强度的增加而降低。构网型变流器本质为电压源，同时强电网也可以被等效为电压源，因此并网模型可等效为 2 个电压源并联，电压源间的联络阻抗越小，失稳风险越高[55]。

在传统电力系统中，由于同步机的快速励磁会引入负阻尼转矩，当同步机自身的正阻尼无法抵消该负阻尼时，可能会导致低频振荡的发生[56]。而构网型变流器模拟同步发电机的运行特性，无功控制环模拟同步机的励磁特性，在重负荷下可能引入负阻尼转矩，理论上会出现低频振荡现象[57]。通过选取较大的阻尼系数，能够在一定程度上降低变流器低频振荡的风险[58]。

3.3 同步稳定特征

传统同步机在满足并网要求的情况下，即使与电网存在微小的相角差异，在并网时也能依据转子运动，被电网拖入同步速运行。而传统跟网型变流器依赖外部 PLL 获取电压相位，从而实现与电网的同步。同步效果由 PLL 直接决定，若系统频率发生扰动，PLL 锁相失败，将导致跟网型变流器不满足并网要求，进而被保护装置切出电网，引发事故。

构网型变流器基于 *P-f* 下垂或转子运动方程自主确定相角，通过无功功率流动确定电压幅值，通过有功无功功率的自然流动实现同步。文献[59-62]从同步性角度出发，将构网型变流器称之为自同步电压源型变流器。文献[63]提出了一种通过 PLL 实现预同步的构网型控制方案，如图 12 所示，与经典构网型控制策略表达式的对比情况如表 5 所示。预同步构网型控制表达式与经典构网型控制表达式结构类似，仅在参考频率存在差别。经典构网型控制以给定 ω_0 为基准，叠加 *P-f* 控制，而预同步构网型控制在 *P-f* 支路中引入电网的实际频率 ω_g(由 PLL 锁相得到)，消除了相角差周期跳变带来的频率波动问题。该改进型控制策略使得构网型变流器频率稳定性提升，但 PLL 可能会引入延时，从而使得变流器特性变差[64]。

4 应用与展望

4.1 构网型新能源并网

新能源按照聚集程度，可以划分为集中式、分布式 2 类，包括光伏、风电、储能等[65]。新能源以电压源型变流器为接口，接入电网。

风电场风机主要有永磁直驱式、双馈式两类，如图 10 所示。永磁直驱式风机定子为永磁体，转子经背靠背变流器与电网连接。背靠背变流器包括连接发电机转子的机侧变流器与连接电网的网侧变流器，常用的构网型控制策略包括 VSG 控制、下垂控制和直流电容惯性同步控制[66]。VSG 控制与下垂控制使用与变流器直流侧为恒定电压源的工况，变流器控制目标位输出设定的有功、无功功率；直流电容惯性同步控制适用于控制目标为维持变流器直流侧电压恒定的工况。直流电容惯性同步控制的原理是将电容的动态方程与同步机转子方程类比，通过控制电容电压达到对虚拟同步机转子励磁的调节效果[67]，控制结构如图 13 所示，控制表达式如式(19)所示。

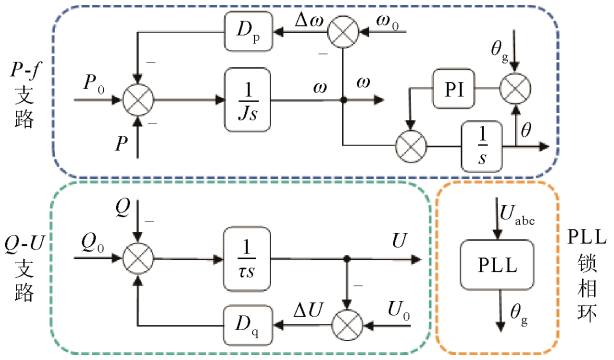


图 12 预同步构网型控制

Fig.12 Structure of pre-synchronization grid-forming controller

表 5 经典构网和预同步构网控制数学表达式对比

Table 5 Comparison of classical and pre-synchronization grid-forming controller in equation

构网类型	下垂控制有功支路	VSG 控制有功支路
经典构网	$\omega^*=\omega_0+K_p(P_0-P)$	$\omega^*=\frac{1}{Js+D_p}(P_0-P)+\omega_0$
预同步构网	$\omega^*=\omega_g+K_p(P_0-P)$	$\omega^*=\frac{1}{Js+D_p}(P_0-P)+\omega_g$

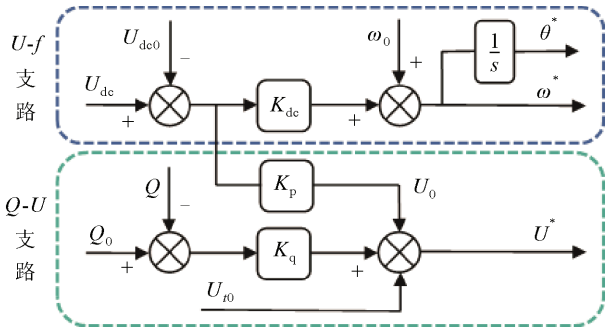


图 13 直流电容惯性同步控制

Fig.13 DC capacitor inertial synchronous control

$$\begin{cases}\theta^{*}=\dfrac{1}{s}\left(\omega_0+K_{\mathrm{p}}(P_{\mathrm{ref}}-P)\right)\\ U^{*}=U_0+K_{\mathrm{q}}(Q_{\mathrm{ref}}-Q)\end{cases}\tag{19}$$

当网侧变流器采用 VSG 控制(下垂控制)时，机侧变流器需要维持直流电压恒定。当机侧变流器采用直流电容惯性同步控制时，机侧变流器需要控制风机转速，捕获最大功率。

与永磁直驱式风机不同，双馈式风机定子直接连接电网，网侧变流器控制直流电压恒定，机侧变流器控制转子励磁，实现机组的变速运行及并网。文献[67]对比背靠背变流器分别采用不同控制策略时的性能指标，得出机侧变流器采用 VSG 控制，网侧变换器采用直流电容惯性同步控制时，最利于并网稳定。

光伏发电系统中不涉及电磁环节，相较于风机并网，控制环节较为简单。光伏并网时一般需要在直流侧配备储能以维持直流侧电压的恒定，因此通常将光伏与储能视为整体，认为变流器直流侧不存在波动，通过构网型变流器实现光伏与储能电站的并网[68]。

目前，构网型变流器在部分示范工程中投入应用，主要为储能电站并网[69]，其本质是利用构网型变流器实现储能电站的并网运行[70]。表 6 结了国内外构网型储能的示范工程的发展情况[71-73]。

4.2 弱同步支撑下的直流输电

柔性直流输电基于电压源型变流器，采用全控型电力电子器件，以直流的方式实现电能的传输，控制自由度高，是一种新型直流输电形式。柔性直流输电两端分别建设换流站(本质为电压源性变流器)，变流器采用跟网型控制时，系统面临着惯量水平下降的风险。文献[74]基于 VSG 控制策略，利用直流侧电容存储的能量进行多端直流输电系统的能量交换，实现交直流系统的解耦运行。

然而，柔性直流输电系统存在造价高、容量小的缺陷，目前直流输电技术的研究热点是混合直流输电系统，如图 14 所示，通过融合传统高压直流输电系统容量大成本低的优势，实现直流输电工程的降本增效。混合直流输电技术已经在“昆柳龙”直流工程[75]、“白鹤滩—江苏”直流工程[76]中得以应用。但以上应用均基于水电外送的强同步支撑场景，对于弱同步支撑场景的混合直流外送仍有待进一步研究。

表 6 国内外构网型储能示范工程

Table 6 Domestic and foreign grid-forming energy storage

区域	示范工程	建设时间	功率等级
国外	加勒比海海岛 Saint Eustatius 柴光储混合能源电站	2017	5 MW/5.9 MWh
	德国 Bordesholm 独立电网储能电站	2019	15 MW/15 MWh
	澳大利亚 Jabiru 柴光储混合能源电站	2023	3 MW/5 MWh
	南澳 Dalrymple 储能电站	2022	30 MW/8 MWh
	澳大利亚 Torrens 岛电池储能系统	2023	250 MW/250 MWh
国内	湖北荆门新港构网型储能电站	2022	12.6 MW/26.8 MWh (一期)；50 MW/100 MWh (总设计)
	山东莱芜电厂构网型储能电站	2023	100 MW/200 MWh
	江苏盱眙构网型示范储能电站	2023	10 MW/20 MWh
	西藏扎布耶构网型储能电站	建设中	20 MW/40 MWh
	青海格尔木构网型储能电站	建设中	50 MW/100 MWh
	宁夏采煤沉陷区复合光伏项目配套储能电站	建设中	100 MW/200 MWh

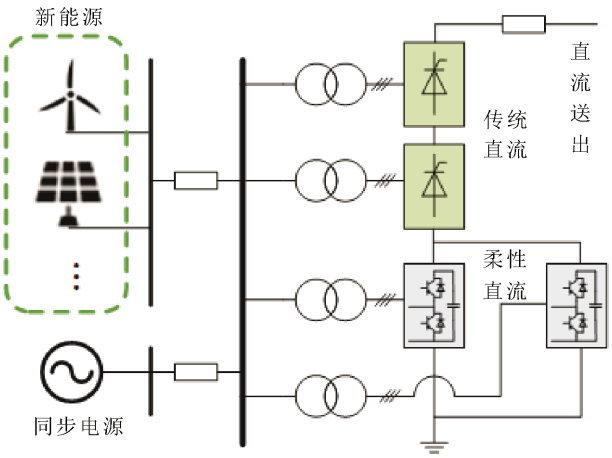


图 14 混合直流输电系统

Fig.14 Hybrid DC transmission system

4.3 构网型跟网型变流器混联并网

随着基于电源型变流器的并网设备占比逐渐提升，变流器的设备级问题将演变为系统级问题。系统中变流器控制策略将不再具有单一性，构网型、跟网型变流器存在混联并网的情况，如图 15 所示。构网型与跟网型变流器控制环节存在时间尺度的重合，两者控制环节存在交互耦合特性[77]，如图 16 所示。

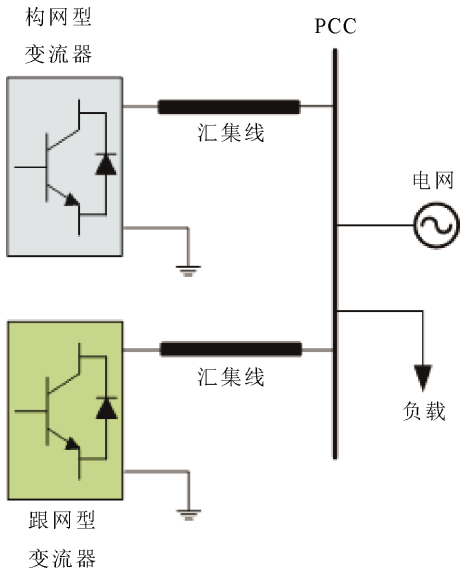


图 15 构网型跟网型变流器混联系统

Fig.15 Hybrid system of grid-forming and grid-following converters

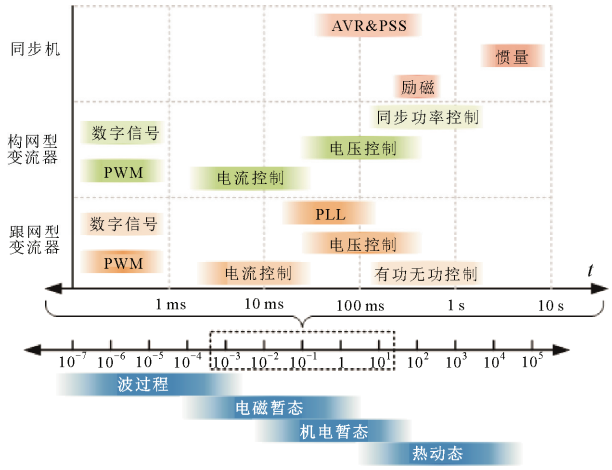


图 16 控制环节多时间尺度特性

Fig.16 Multi-time-scale characteristics of control loops

由于构网型与跟网型变流器间耦合关系复杂，解耦较为困难，因此目前研究主要集中于两机混联工况。文献[78]基于开环振荡模态理论，得出跟网型控制的电流内环与构网型控制电压环间及跟网型控制 PLL 与构网型控制功率环间存在相似的振荡模态。通过定性分析得出，跟网型与构网型控制间的主要耦合作用存在于跟网型控制的电流内环与构网型控制电压环之间。文献[79]提出通过提升构网型变流器输出电压，减小跟网型变流器输出电流，使得构网型变流器尽可能多地分担负荷功率，能够在一定程度上提升系统的稳定性。

构网型与跟网型变流器混联并网工况下，设备间的交互作用可能会引发级联型故障，系统的小扰动、大扰动稳定性随之发生改变[53]。文献[80]以两机系统(单构网型与单跟网型变流器混联并网)为例，研究得出混联系统中构网型变流器暂态稳定性取决于变流器的输出功率，跟网型变流器暂态稳定性取决于输出端口电压的 q 轴分量。文献[81]在总结构网型与跟网型交互特性的基础上得出，跟网型变流器输出的无功电流有助于增强系统稳定性。

5 结论

传统电力系统存在同步机等旋转原件，电压频率构建机理明确；构网型变流器通过模拟转子运动方程，使得变流器具有与同步机相似的特性。而变流器不含电磁元件，电压频率构建机理与传统同步机存在较大差异，对构网型控制机理与本质的认识对于电力电子化电力系统的构建与稳定运行具有重要的意义，通过本文研究，得出以下结论：

1）大量同步机被新能源并网机组替代，系统呈现低惯量、弱阻尼的趋势，构网型变流器能够自主构建电压频率，提供惯量支撑，成为解决稳定性问题的重要手段。

2）不同构网型控制间存在差异，下垂控制仅具备阻尼特性，而 LPF 下垂控制、VSG 控制同时具备阻尼与惯量特性。LPF 下垂控制与 VSG 控制在数学模型上具有类似的特性，从而可总结归纳出构网型控制的统一数学表达式。

3）构网型控制的理论基础是模拟同步发电机的转子运动方程，通过 *P-f*、*Q-U* 控制实现与电网同步；具体而言，*P-f* 支路实现频率构建，*Q-U* 支路实现电压构建；*P-f*、*Q-U* 两条控制支路共同提供惯量阻尼支撑。

4）基于构网型控制策略的物理本质研究，总结得出构网型变流器的特性为：外特性等效为电压源，与电网实现自同步，不依赖电网运行状态等。

本文在电力电子化电力系统的背景下，从物理本质与特性的角度对构网型变流器展开论述。虽然构网型变流器从原理上模拟了传统同步机的稳态特性，但与传统同步机在动态/暂态特性有许多不同之处，仍存在着大量的动态与暂态稳定问题，有待进一步研究与总结。此外，随着新能源场站规模扩大，在构网型变流器协同并网控制、变流器集群间交互特性等大规模并网控制层面仍存在研究空间。

参考文献 References

[1] 全球能源互联网发展合作组织. 中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望[R]. 北京：全球能源互联网发展合作组织.
Global Energy Internet Development Cooperation Organization. Research on China's 2030 energy and electricity development plan and prospects for 2060[R]. Beijing, China: GEIDCO, 2021.

[2] 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)：1904-1916.
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): 1904-1916.

[3] PATTABIRAMAN D, LASSETER R H, JAHNS T M. Comparison of grid following and grid forming control for a high inverter penetration power system[C] // 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Portland, USA: IEEE, 2018: 1-5.

[4] 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.

[5] 高明杰，惠 东，高宗和，等. 国家风光储输示范工程介绍及其典型运行模式分析[J]. 电力系统自动化，2013，37(1)：59-64.
GAO Mingjie, HUI Dong, GAO Zonghe, et al. Presentation of national wind/photovoltaic/energy storage and transmission demonstration project and analysis of typical operation modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 59-64.

[6] 彭 克，张 聪，徐丙垠，等. 多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备，2017，37(6)：3-10.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10.

[7] 李建林，王上行，袁晓冬，等. 江苏电网侧电池储能电站建设运行的启示[J]. 电力系统自动化，2018，42(21)：1-9，103.
LI Jianlin, WANG Shangxing, YUAN Xiaodong, et al. Enlightenment from construction and operation of battery energy storage station on grid side in Jiangsu power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 1-9, 103.

[8] BIALEK J W. European offshore power grid demonstration projects[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, USA: IEEE, 2012: 1-6.

[9] UTSUNOMIYA T, SHIRAISHI T, SATO I, et al. Floating offshore wind turbine demonstration project at Goto Islands, Japan[C]//OCEANS 2014 - TAIPEI. Taipei, China: IEEE, 2014: 1-7.

[10] XUE Y L, WANG W. Research and application of Chunchangba hydropower station dam power network load and storage integration demonstration project[C]//2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE). Chengdu, China: IEEE, 2023: 1865-1872.

[11] 孙华东，许 涛，郭 强，等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报，2019，39(21)：6183-6191.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191.

[12] 何 剑，屠竞哲，孙为民，等. 美国加州“8·14”、“8·15”停电事件初步分析及启示[J]. 电网技术，2020，44(12)：4471-4478.
HE Jian, TU Jingzhe, SUN Weimin, et al. Preliminary analysis and lessons of California power outage events on August 14 and 15, 2020[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4471-4478.

[13] 曾 辉，孙 峰，李 铁，等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化，2017，41(13)：1-6.
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of "9·28" Blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.

[14] 张剑云. 哈密并网风电场次同步振荡的机理研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(18)：5447-5460.
ZHANG Jianyun. Research on the mechanism of sub synchronous oscillations of wind farms in Hami[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5447-5460.

[15] 马宁宁，谢小荣，贺静波，等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40(15)：4720-4731.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4731.

[16] 董晓亮，田 旭，张 勇，等. 沽源风电场串补输电系统次同步谐振典型事件及影响因素分析[J]. 高电压技术，2017，43(1)：321-328.
DONG Xiaoliang, TIAN Xu, ZHANG Yong, et al. Practical SSR incidence and influencing factor analysis of DFIG-based series-compensated transmission system in Guyuan Farms[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 321-328.

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

[18] 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).[S. l.]: IET, 2021: 143-148.

[19] 赵炳洋，赵 波，张 芳，等. 构网型逆变器技术综述[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版)，2022，37(4)：57-67.
ZHAO Bingyang, ZHAO Bo, ZHANG Fang, et al. Overview of grid forming inverter technology[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2022, 37(4): 57-67.

[20] 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.

[21] 刘钊汛，秦 亮，杨诗琦，等. 面向新型电力系统的电力电子变流器虚拟同步控制方法评述[J]. 电网技术，2023，47(1)：1-15.
LIU Zhaoxun, QIN Liang, YANG Shiqi, et al. Review on virtual synchronous generator control technology of power electronic converter in power system based on new energy[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 1-15.

[22] 曹 炜，钦焕乘，陆建忠，等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化，2023，47(4)：190-207.
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.

[23] 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.

[24] IEEE. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities: IEEE Std 1204-1997[S]. New York, USA: IEEE, 1997.

[25] 晏夏瑜. 弱电网下 LCL 型并网逆变器的控制策略研究[D]. 徐州：

中国矿业大学，2019.
YAN Xiayu. Research on control strategy of LCL grid connected inverter in weak grid[D]. Xuzhou, China: China University of Mining and Technology, 2019.

[26] 胡宇飞，田 震，查晓明，等. 构网型与跟网型变流器主导孤岛微网阻抗稳定性分析及提升策略[J]. 电力系统自动化，2022，46(24)：121-131.
HU Yufei, TIAN Zhen, ZHA Xiaoming, et al. Impedance stability analysis and promotion strategy of islanded microgrid dominated by grid-connected and grid-following converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 121-131.

[27] 马 进，赵大伟，钱敏慧，等. 大规模新能源接入弱同步支撑直流送端电网的运行控制技术综述[J]. 电网技术，2017，41(10)：3112-3120.
MA Jin, ZHAO Dawei, QIN Minhui, et al. Reviews of control technologies of large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized sending-end DC power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3112-3120.

[28] WU H, WANG X F. Design-oriented transient stability analysis of grid-connected converters with power synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6473-6482.

[29] MAHMOUD K, ASTERO P, PELTONIEMI P, et al. Promising grid-forming VSC control schemes toward sustainable power systems: comprehensive review and perspectives[J]. IEEE Access, 2022, 10: 130024-130039.

[30] 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.

[31] 张明锐，杜志超，王少波. 微网中下垂控制策略及参数选择研究[J]. 电工技术学报，2014，29(2)：136-144.
ZHANG Mingrui, DU Zhichao, WANG Shaobo, et al. Research on droop control strategy and parameters selection of microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 136-144.

[32] 张明锐，黎 娜，杜志超，等. 基于小信号模型的微网控制参数选择与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2012，32(25)：9-19.
ZHANG Mingrui, LI Na, DU Zhichao, et al. Control parameter selection and stability analysis of microgrid based on small-signal model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 9-19.

[33] 支 娜，张 辉，肖 曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报，2016，31(3)：31-39.
ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi. Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39.

[34] 刘海涛，吕志鹏，苏 剑，等. 具有功率精确分配能力的逆变器电压谐波分频下垂控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制，2015，43(19)：9-14.
LIU Haitao, LÜ Zhipeng, SU Jian, et al. Inverter's frequency dividing droop controller with accurate load sharing ability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 9-14.

[35] 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 microgird based on adaptive droop characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 795-806.

[36] PAN D H, WANG X F, LIU F C, 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.

[37] LIU T, WANG X F. Transient stability of single-loop voltage-magnitude controlled grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6158-6162.

[38] LI Y T, GU Y J, ZHU Y, et al. Impedance circuit model of grid-forming inverter: visualizing control algorithms as circuit elements[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3377-3395.

[39] LI Y T, GU Y J, GREEN T C. Revisiting grid-forming and grid-following inverters: a duality theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4541-4554.

[40] 吴 恒. 三相四线制虚拟同步发电机控制技术的研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2015.
WU Heng. Control strategy for three-phase-four-wire virtual synchronous generator[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[41] WU H, RUAN X B, YANG D S, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4292-4303.

[42] 吴 恒，阮新波，杨东升，等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报，2015，35(24)：6508-6518.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.

[43] NGUYEN X H, NAKAJIMA T, OTA Y. Performance comparison between GFM and GFL inverters in 100% inverter-based power systems[C]//2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). Brisbane, Australia: IEEE, 2021: 1-5.

[44] YANG C R, HUANG L B, XIN H H, et al. Placing Grid-Forming Converters to Enhance Small Signal Stability of PLL-Integrated Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3563-3573.

[45] 辜承林，陈乔夫，熊永前. 电机学[M]. 4 版. 武汉：华中科技大学出版社，2018.
GU Chenglin, CHEN Qiaofu, XIONG Yongqian. Electrical machinery[M]. 4th ed. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology Press, 2018.

[46] 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)：5179-5191.
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): 5179-5191.

[47] 王 博，杨德友，蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术，2020，44(8)：2998-3006.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3006.

[48] 王宝财，孙华东，李文锋，等. 考虑频率稳定的电力电子电源频率控制参数优化方法[J]. 电网技术，2023，47(5)：1751-1761.
WANG Baocai, SUN Huadong, LI Wenfeng, et al. Frequency control parameter optimistic method of converter-interfaced generation considering frequency stability[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1751-1761.

[49] 兰 飞，潘益丰，时 萌，等. 双馈风电机组变系数虚拟惯量优化控制[J]. 电力系统自动化，2019，43(12)：51-59.
LAN Fei, PAN Yifeng, SHI Meng, et al. Optimal variable-coefficient

virtual inertia control for DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 51-59.

[50] 闵 勇，陈 磊，刘瑞阔，等. 电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析[J]. 中国电机工程学报，2023，43(3)：853-867.
MIN Yong, CHEN Lei, LIU Ruikuo, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power system frequency dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 853-867.

[51] 王伟胜，李光辉，何国庆，等. 新能源并网系统宽频振荡分析与抑制[M]. 北京：中国电力出版社，2022.
WANG Weisheng, LI Guanghui, HE Guoqing, et al. Analysis and mitigation of broadband oscillation in renewable energy generation and AC/DC transmission systems[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2022.

[52] 刘佳宁. 高比例风光并网系统稳定机理与功率振荡分析[D]. 杭州：浙江大学，2022.
LIU Jianing. Stability mechanism and power oscillation analysis of power system with high-penetration wind power and photovoltaic generation[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2022.

[53] ROSSO R, ENGELKEN S, LISERRE M. Robust stability investigation of the interactions among grid-forming and grid-following converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 991-1003.

[54] HARNEFORS L, RAHMAN F M M, HINKKANEN M, et al. Reference-feedforward power-synchronization control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 8878-8881.

[55] LIAO Y C, WANG X F, LIU F C, et al. Sub-synchronous control interaction in grid-forming VSCs with droop control[C]//2019 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID). Xiamen, China: IEEE, 2019: 1-6.

[56] 倪以信，陈寿孙，张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京：清华大学出版社，2002.
NI Yixin, CHEN Shousun, ZHANG Baolin. Theory and analysis of power system dynamics[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2002.

[57] 马铱林，杨 欢，屈子森，等. 改善虚拟同步发电机阻尼特性的设计方法[J]. 电网技术，2021，45(1)：269-275.
MA Yilin, YANG Huan, QU Zisen, et al. Design method for improving damping characteristics of virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 269-275.

[58] HUANG L B, XIN H H, WANG Z. Damping low-frequency oscillations through VSC-HVDC stations operated as virtual synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5803-5818.

[59] 徐思莹，王 晗，曹云峰，等. 稳定边界及多目标约束下自同步电压源双馈风电机组参数整定[J]. 电力系统自动化，2023，47(11)：18-28.
XU Siying, WANG Han, CAO Yunfeng, et al. Parameter tuning for self-synchronous voltage source doubly-fed wind turbines with stability boundary and multi-objective constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 18-28.

[60] 李 威，朱 玲，祁晓婧，等. 新能源自同步电压源接入电力系统频率特性分析[J]. 电力系统自动化，2023，47(17)：38-46.
LI Wei, ZHU Ling, QI Xiaojing, et al. Frequency characteristic analysis for power system with integration of renewable energy by self-synchronous voltage source[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 38-46.

[61] 蔡 旭，秦 垚，王 晗，等. 风电机组的自同步电压源控制研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2478-2490.
CAI Xu, QIN Yao, WANG Han, et al. Review of self-synchronous voltage source control for wind turbine generator[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2478-2490.

[62] 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(01): 61-71.

[63] 兰 征，刁伟业，曾进辉，等. 含异构微源孤岛微电网内虚拟同步发电机预同步控制策略[J]. 电力系统自动化，2022，46(19)：154-161.
LAN Zheng, DIAO Weiye, ZENG Jinhui, et al. Pre-synchronization control strategy of virtual synchronous generator in islanded microgrid with heterogeneous distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 154-161.

[64] 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.

[65] 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)：1-11.
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): 1-11.

[66] 秦 垚，王 晗，邓桢彦，等. 自同步电压源永磁直驱风电机组的直流电压同步机制及其统一控制结构[J]. 高电压技术，2023，49(1)：31-41.
QIN Yao, WANG Han, DENG Zhenyan, et al. Synchronization mechanism and unified control structure for PMSG-based WTGs by using the DC-link voltage to realize self-synchronous voltage source control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 31-41.

[67] STALLMANN F, MERTENS A. Sequence impedance modeling of the matching control and comparison with virtual synchronous generator[C] // 2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Dubrovnik, Croatia: 2020: 421-428.

[68] 李 怡，李永丽，李 松，等. 基于 VSG 的光伏及混合储能系统功率分配与虚拟惯性控制[J]. 电力自动化设备，2023，43(7)：27-34.
LI Yi, LI Yongli, LI Song, et al. Power distribution and virtual inertia control of photovoltaic and hybrid energy storage system based on VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 27-34.

[69] 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.

[70] 闫 昊. 构网型储能变流器控制策略研究[D]. 北京：北方工业大学，2023.
YAN Hao. Research on control strategy of grid- forming of power conversion system[D]. Beijing, China: North China University of Technology, 2023.

[71] 林 楚. 储能即服务 金风科技锚定储能市场未来需求方向[N]. 机电商报，2023-08-21(A06)，doi:10.28408/n.cnki.njdsb.2023.000376.
LIN Chu. Energy storage as a service: goldwind technology anchors the future demand direction of the energy storage market[N]. Electromechanical Business Daily, 2023-08-21(A06), doi:10.28408/n.cnki.njdsb. 2023.000376

[72] 卢奇秀. 构网型储能缘何“走红”[N]. 中国能源报，2023-08-14(001)，doi:10.28693/n. cnki. nshca. 2023.001366.
LU Qixiu. Why grid energy storage becomes popular[N]. China Energy News, 2023-08-14(001), doi: 10.28693/n. cnki. nshca. 2023.001366

[73] 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(008)，doi:10.28266/n. cnki. ngjdw. 2023.001666.
WANG Hongxia, ZHANG Wannian. They are developing "boosters" for the development of new energy-entering the company's large-scale new energy base diversified energy storage technology laboratory[N]. State Grid News, 2023-07-25(008), doi: 10.28266/n. cnki. ngjdw. 2023.001666.

[74] ZHU J B, GUERRERO J M, HUNG W, et al. Generic inertia emulation controller for multi-terminal voltage-source-converter high voltage direct current systems[J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(7): 740-748.

[75] 付 超，邱 建，李诗旸，等. 昆柳龙多端直流稳定控制策略设计及系统构建[J]. 南方电网技术，2022，16(1)：33-40.
FU Chao, QIU Jian, LI Shiyang, et al. Stability control strategy and system design for Kunliulong multi-terminal HVDC transmission[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 33-40.

[76] 董芷函，王国腾，徐 政，等. 白鹤滩—江苏特高压混合级联直流系统运行特性分析方法[J]. 电力自动化设备，2022，42(6)：118-125.
DONG Zhihan, WANG Guoteng, XU Zheng, et al. Operation characteristic analysis method of Baihetan-Jiangsu hybrid cascaded UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 118-125.

[77] 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, China: Zhejiang University, 2021.

[78] SUN P, XU H, YAO J, et al. Dynamic interaction analysis and damping control strategy of hybrid system with grid-forming and grid-following control modes[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(3): 1639-1649.

[79] TIAN Z, LI X L, ZHA X, et al. Transient synchronization stability of an islanded AC microgrid considering interactions between grid-forming and grid-following converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(4): 4463-4476.

[80] LI M F, QUAN X J, WU Z J, et al. Modeling and transient stability analysis of mixed-GFM-GFL-based power system[C]// 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Nanjing, China: IEEE, 2021: 2755-2759.

[81] 耿 华，何长军，刘浴霜，等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3367-3383.
GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367-3383.



迟永宁
1973—，男，博士，教授级高工，博导，国际电工委员会 IEC SC 8A“可再生能源接入电网”技术分委会秘书
主要研究方向为新能源并网技术及电力系统稳定分析
E-mail: chiyn@epri.sgcc.com.cn

CHI Yongning
Ph.D, Professor



江炳蔚(通信作者)
1996—，男，博士生
主要研究方向为新能源并网技术
E-mail: bingwei_jiang@yeah.net

JIANG Bingwei
Ph.D. candidate
Corresponding author

收稿日期 2023-09-27 修回日期 2023-12-17 编辑 何秋萍