第 49 卷 第 6 期：2478-2490 高电压技术 Vol.49, No.6: 2478-2490
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230724

风电机组的自同步电压源控制研究综述

蔡 旭，秦 垚，王 晗，邓桢彦，徐思莹
（上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室，上海 200240）

摘 要：电力系统正朝着高比例新能源和高比例电力电子装置的“双高”特征方向发展，电压源风电机组具备建立电压、自主快速支撑电网电压和频率的能力，有助于“双高”电力系统的安全稳定运行，为“双高”电力系统的构建提供了一种可能的电源侧解决方案。文章依照电压源控制方法发展的脉络，首先阐述了并网变换器的电压源控制方法，进而针对风电变流器的双变换器特征，总结了电压源控制在两种主流风电机组中的应用，包括稳态频率响应和电网故障下的限流控制及暂态电压支撑等，给出了风电机组自同步电压源技术的现状。最后，对电压源风电机组大规模应用面临的技术挑战进行了展望，指出了技术攻关的方向。

关键词：电压源风电机组；下垂控制；虚拟同步控制；直流电容惯性同步控制；限流控制；暂态电压支撑

Review of Self-synchronous Voltage Source Control for Wind Turbine Generator

CAI Xu, QIN Yao, WANG Han, DENG Zhenyan, XU Siying
(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The power system is developing in the direction of “double high” characteristics, which is represented by a high proportion of renewable energy sources and a high proportion of power electronics. Voltage source controlled wind turbine generators (WTGs) have the ability of establishing voltage and supporting the grid voltage and frequency independently and quickly, which contribute to the safe and stable operation of the “double high” power system. Therefore, this paper provides a possible power-side solution for the construction of “double high” power systems. In accordance with the development of voltage source control methods, this paper firstly describes the voltage source control methods for grid-side converters. Then, according to the dual-converter characteristics of WTGs, the applications of voltage source control methods in two mainstream WTGs are summarized, including steady-state frequency response and current-limiting control and transient voltage support under grid faults. And the current status of research on self-synchronization voltage source technology for WTGs are given. Finally, the technical challenges that we will face in the large-scale application of voltage source controlled WTGs are put forward, and the direction of technical research is pointed out.

Key words: voltage source controlled wind turbine generator; droop control; virtual synchronous control; DC-link capacitor based inertia synchronization control; current limiting method; transient voltage support

0 引言

为解决能源危机和环境污染等问题，风光等可再生能源得到快速发展，截至 2022 年底，全国累计发电装机容量约 25.6 亿 kW，其中，风电装机容量约 3.7 亿 kW，太阳能发电装机容量约 3.9 亿 kW，风光电源占比 29.7%，预计到 2030 年占比将达 49.1%[1]，风电将成为主体电源之一。

当前风光电源尚不能担负起主体电源的责任。这是因为目前风电机组、光伏发电单元均采用锁相并网点电压控制输出电流的方式接入电网，对外呈现为电流源特性，需依赖电网建立电压，不能主动响应负荷的变化，电网故障时不能提供强大的暂态电流支撑电压，仅适用于以同步发电机为主导的电网环境[2-3]。这类电源的大量接入，导致系统频率和电压稳定裕度急剧下降，造成区域大停电、宽频振荡和新能源直流外送通道容量大幅限制等一系列问题[4-6]。随着风光电源装机占比的进一步提升，这些问题将更加严峻。

可见，风电机组亟需从“电网跟随型电源”经“电网支撑型电源”向“电网构建型电源”转变，主动承担起电力系统主体电源的责任。使风电机组

基金资助项目：国家重点研发计划(2022YFB2402703)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2022YFB2402703).

具备自同步电压源特性是实现这种转变的有效途径，借助于并网变换器的高可控性，风电机组的电压源控制技术成为当前研究的前沿和热点问题。

本文系统地梳理了风电机组电压源控制理论方法和研究现状，以及在全功率变换型和双馈异步型两种典型风电机组中的技术应用情况，论述风电机组自同步电压源控制技术的发展趋势，最后对电压源风电机组的暂态电流提升、风电场构建等关键技术问题进行展望。

1　并网变换器的自同步电压源控制

并网变换器是风光新能源接入电网的接口，将同步发电机的运动方程或电磁方程内嵌至并网变换器中，在变换器直流侧功率不受限制的假设条件下，可使变换器具有类似同步发电机的外特性，可不依赖于锁相环和电流信息主动构建输出端口的电压和频率，从而使并网变换器自主同步电网运行，且具备自主响应电网频率和电压的能力。

基于上述原理，已有学者提出了多种实现电压源控制的方法，主要包括下垂控制、功率同步控制、虚拟同步机控制、直流电容惯性同步控制和虚拟振荡器控制，控制结构图如图 1 所示。

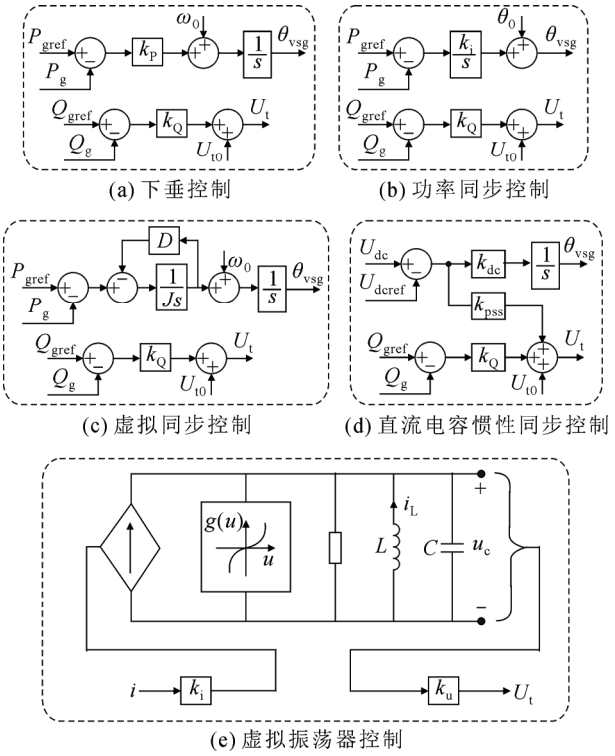


图 1　电压源控制结构图

Fig.1　Structure diagram of voltage source control

1.1　下垂控制

文献[7]针对独立微电网提出了一种下垂控制策略，用于实现多并联逆变器系统的无通讯有功功率自主分配，其控制框图如图 1(a)所示，通过模拟同步发电机的有功−频率和无功−电压下垂曲线，生成变换器的内电势幅值和频率[8-9]，其实现方式为

$$\begin{cases}\theta_{\mathrm{vsg}}=\dfrac{1}{s}\left(\omega_0+k_{\mathrm{P}}(P_{\mathrm{gref}}-P_{\mathrm{g}})\right)\\ U_{\mathrm{t}}=U_{\mathrm{t0}}+k_{\mathrm{Q}}(Q_{\mathrm{gref}}-Q_{\mathrm{g}})\end{cases}\tag{1}$$

式中：θ_{vsg} 为并网变换器的相角；s 为微分算子；ω_0 为系统角频率基准值；k_{P} 为有功环下垂系数；U_{t0} 为调制电压基准值；U_{t} 为并网变换器的电压；k_{Q} 为无功环下垂系数；P_{gref} 和 Q_{gref} 为并网变换器的有功功率和无功功率给定值；P_{g} 和 Q_{g} 为并网变换器的有功功率和无功功率实际值。

可见，下垂控制不能使并网变换器具备惯量阻尼作用，对电网暂态过程无法起到支撑作用。

1.2　功率同步控制

功率同步控制与下垂控制具有相似的控制结构，其控制框图如图 1(b)所示，该控制方式模拟了同步发电机在忽略阻尼时有功功率与转子角度之间的关系，通过控制有功功率的偏差实现对并网相位的控制[10]，实现方式为

$$\begin{cases}\theta_{\mathrm{vsg}}=\theta_0+\dfrac{k_{\mathrm{i}}}{s}(P_{\mathrm{gref}}-P_{\mathrm{g}})\\ U_{\mathrm{t}}=U_{\mathrm{t0}}+k_{\mathrm{Q}}(Q_{\mathrm{gref}}-Q_{\mathrm{g}})\end{cases}\tag{2}$$

式中：θ_0 为并网初始相角；k_{i} 为有功环控制系数。

1.3　虚拟同步机控制

下垂控制和功率同步控制均无法实现并网变换器对电网的惯量阻尼支撑，在此基础上，提出了适用于并网变换器的虚拟同步控制[11-13]，其控制框图如图 1(c)所示，通过模拟同步发电机的转子运动方程使并网变换器具备惯量阻尼特性，实现方式为

$$\begin{cases}\theta_{\mathrm{vsg}}=\dfrac{1}{s}\left(\omega_0+\dfrac{1}{Js+D}(P_{\mathrm{gref}}-P_{\mathrm{g}})\right)\\ U_{\mathrm{t}}=U_{\mathrm{t0}}+k_{\mathrm{Q}}(Q_{\mathrm{gref}}-Q_{\mathrm{g}})\end{cases}\tag{3}$$

式中：J 为虚拟惯量系数；D 为虚拟阻尼系数。

采用虚拟同步控制的并网变换器能够阻尼系统频率变化率，等效于提升了系统的惯量水平，相比下垂控制和功率同步控制更有利于系统的频率稳定。此外，下垂控制在实际使用中会串联一个低通滤波器来降低功率信号中的谐波，有文献指出加入低通滤波器的下垂控制与虚拟同步控制具有等价的数学模型[14]，这意味着加入低通滤波器的下垂控制

也可以使并网变换器具备惯量阻尼特性。

1.4 直流电容惯性同步控制

功率同步控制、下垂控制及虚拟同步控制适用于变换器直流侧为恒定电压源(即假设功率不受限制)的情况，此时并网变换器的控制目标为输出有功功率和无功功率。但是，当并网变换器的控制目标是维持直流侧电压恒定时，为了能够实现并网变换器的电压源特性，有学者提出适用于这类场景的控制方法，即直流电容惯性同步控制[15-17]。

直流电容惯性同步控制通过将变换器直流电容电压的动态方程与同步发电机的转子运动方程类比，使得控制直流电容电压可以实现与转子转速(对应电网频率)一样的效果，从而生成并网变换器的相角，其控制框图如图 1(d)所示，实现方式为

$$\begin{cases}\theta_{\mathrm{vsg}}=\dfrac{1}{s}\left(\omega_0+k_{\mathrm{dc}}(U_{\mathrm{dc}}-U_{\mathrm{dcref}})\right)\\ U_{\mathrm{t}}=U_{\mathrm{t0}}+k_{\mathrm{Q}}(Q_{\mathrm{gref}}-Q_{\mathrm{g}})\end{cases}\tag{4}$$

式中：U_{dcref}和 U_{dc}分别为直流电压给定值和实际值。

基于直流电容惯性的同步控制模拟了同步发电机转子的惯性特征，在实际控制中为了保证系统运行稳定，需要增加阻尼环路来模拟同步发电机的阻尼特性[18]。

1.5 虚拟振荡器控制

虚拟振荡器控制[19-21]的原理图如图 1(e)所示，通过将正弦电压给定值加在模拟的振荡电路上，利用电路的共振原理实现变换器的电网同步功能，该控制方式与上述 4 种方法的外特性有一定区别，呈现振荡器的物理特性。虚拟振荡器控制实现方式为

$$\begin{cases}Lsi_{\mathrm{L}}=\dfrac{u_{\mathrm{c}}}{\kappa_{\mathrm{u}}}\\ Csu_{\mathrm{c}}=g(u_{\mathrm{c}})-\kappa_{\mathrm{u}}i_{\mathrm{L}}-\kappa_{\mathrm{u}}\kappa_{\mathrm{i}}i\end{cases}\tag{5}$$

式中：L 和 C 分别为虚拟振荡器的电感和电容；i 为输入电流；κ_{u}和 κ_{i}分别为电压和电流幅值变化倍数；$g(u)$为关于电压 u_{c}的非线性控制函数。

虚拟振荡器控制在一个周波内的动力学特性与下垂控制相似，相比下垂控制或者虚拟同步控制，其响应速度更快，但实现形式较为复杂。

通过对图 1 中的控制框图进行分析可知，目前并网变换器的电压源控制方法根据控制目标的不同可分为两大类：一类是基于有功功率构造同步环路的控制方法，其建立在直流侧电压恒定的基础上(直流侧为理想电压源或直流侧电压由前级变换器控制恒定)，以控制交流侧有功功率输出为目标；另一类是基于直流侧电压构造同步环路的控制方法，此时直流侧为有限功率源，直流侧电压由并网变换器本身来控制。

2 风电机组的自同步电压源控制

主流风电变流器均采用背靠背双脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)变换器结构，机侧变换器控制机组的转速，实现风能的最大功率跟踪，网侧变换器控制直流母线电容电压恒定。基于这种双变换器系统，风电机组如何实现其电压源控制是需要解决的问题之一。此外，风电机组作为自同步电压源运行，必然要考虑对风力原动机的控制，才能实现对电网频率的完整响应。

当前，多位学者已经对风电机组的电压源控制进行了深入的研究，本章将分别论述永磁风电机组和双馈风电机组电压源控制技术的现有研究成果。

2.1 永磁风电机组的自同步电压源控制

永磁直驱风电机组采用背靠背变换器全功率变换结构，目前主流的电压源控制策略主要分为 2 种：一种是网侧变换器采用虚拟同步控制的技术路线(需注意这里换用下垂控制或者功率同步控制均可，为了方便陈述，以虚拟同步控制为例进行说明)；另一种是网侧变换器采用直流电容惯性同步控制的技术路线。

当网侧变换器采用虚拟同步控制时，需要机侧变换器来维持直流电压恒定，从而会改变目前风电变流器机侧变换器控转速、网侧变换器控直流母线电压的策略。文献[22]在网侧变流器采用虚拟同步控制的基础上，由机侧变流器控制直流电压以生成 dq 轴电流指令值，此时机侧变换器的控制结构仍基于矢量控制架构。而文献[13]将直流电压控制环路与虚拟同步控制环路串联起来，由直流电压控制生成转矩或功率指令值，其机侧变换器也采用了虚拟同步控制结构。网侧变换器采用虚拟同步控制有功功率，机组控制直流电压的控制逻辑与传统的控制逻辑完全不同，这种控制逻辑下机组运行的稳定性及其对轴系载荷的影响还需要进一步研究，对现有机组进行改造时也要深入分析其可行性和经济性。

当网侧变换器采用直流电容惯性同步控制时，机侧变换器仍以控制风力机转速捕获功率为目标。文献[23]采用超前滞后环节对直流母线电压进行控制，可以实现并网变换器自主并网，但仅适用于柔性直流输电等直流电容较大的电力电子装置，且需

要提前获知电网频率来弥补直流母线电压波动过大的问题。文献[24]在网侧变换器控制直流电压的基础上，在机侧变换器功率外环中引入了直流电压的微分控制，实现了风力机惯量的提取；并应用复转矩系数法揭示了系统失稳的机理，提出了通过致稳控制策略来增强机组的惯量提取能力。直流电容惯性同步控制将直流电容电压作为控制量来实现并网变流器交流侧的电压源控制，适用于风电机组等需要将直流母线电压作为控制目标的新能源发电装置，这种方法主要改变网侧变换器的控制结构，对机侧变换器仅需叠加惯量传递环节，使其初步具备了同步机电源自主电压源、自主惯量响应的外特性，但如需要参于电网的一次调频，则要进一步引入变桨控制环节，并保持一定的功率备用。

综上所述，永磁风电机组当前有 4 种可实现电压源控制的技术路线：第 1 种是网侧惯性同步−机侧矢量控制的方式，如图 2(a)所示；第 2 种是机侧控制直流电压−网侧虚拟同步的方式，如图 2(b)所示；第 3 种是网侧功率虚拟同步−机侧直流电压虚拟同步，如图 2(c)所示；进而派生出第 4 种方案，网侧惯性同步−机侧虚拟同步的方式，如图 2(d)所示。

2.2　双馈风电机组的自同步电压源控制

双馈风电机组与永磁风电机组最大的不同在于定子侧直接与电网相连，风电变流器控制转子侧，实现机组的变速运行及并网控制。

文献[25]将变换器的虚拟同步控制应用于双馈风电机组中转子侧变换器，模拟了同步发电机的有功功率控制和无功功率控制特性。文献[26-27]采用下垂控制/虚拟同步控制和电压电流环的级联控制结构，实现了双馈风电机组的电压源控制。文献[28]提出了双馈风电机组的机侧虚拟同步控制和网侧惯性同步控制的方法，该方法利用直流母线电容动态特性类比同步发电机的转子运动方程，以实现网侧变换器的电网自主同步，并最早将这种控制命名为“惯性同步控制”，该方法使得直流母线电压可动态映射电网频率的变化并实现惯量响应，同时并网变换器自身也维持了较高的稳定性。文献[29-31]对比了双馈风电机组分别采用不同控制策略时的性能指标，指出机侧变换器采用虚拟同步控制，网侧变换器采用惯性同步控制策略最有利于系统稳定。

目前共有 3 种实现双馈风电机组电压源控制的技术路线，分别为：1）机侧变换器采用矢量控制，叠加惯量控制环节，网侧变换器采用惯性同步控制，如图 3(a)所示；2）机侧变换器采用虚拟同步控制，网侧变换器采用矢量控制维持直流电容电压恒定，如图 3(b)所示；3）机侧变换器采用虚拟同步控制，网侧变换器采用惯性同步控制，如图 3(c)所示。

3　自同步电压源风电机组的暂态电流控制

大量研究表明电压源控制在新型“双高”电力系统中的优势，但实际的电网中总会发生各种低电压故障，受限于电力电子器件的过流能力，其在电网故障情况下的应对方式尚存在不足之处，因此对电网故障情况下电压源控制风电机组的暂态特性进行研究并保证其安全稳定运行十分必要。据此，大量学者对故障下电压源控制的运行特性进行了研究，并提出了一系列控制方法来应对电网故障。

3.1　控制模式切换

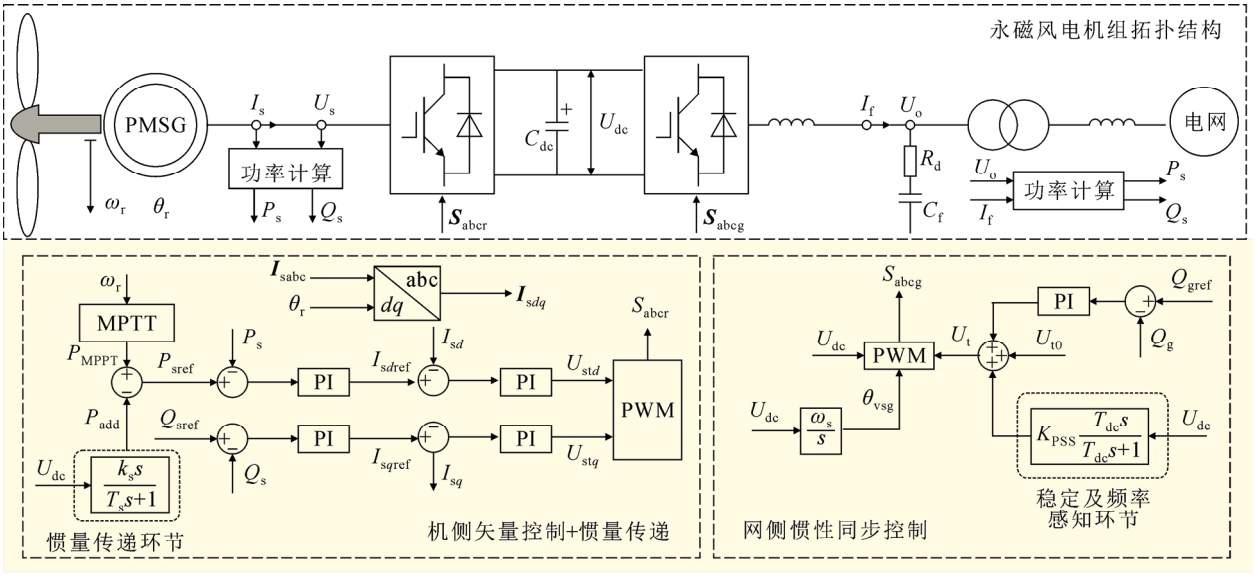
通常情况下，并网变换器中电力电子器件的电流过载能力是有限的(一般只有额定电流的 1.2 倍)，在故障期间将变换器的电压源控制转变为锁相同步的电流源控制[10,32]是一种能够有效保证电力电子器件安全的方案。采用该方案能够直接限制并入电网的电流幅值，并且利用现有的无功电流注入公式，能够满足故障下电网所需的无功电流，但毫无疑问这失去了电压源外特性的优势，无法在暂态下为电网频率提供支撑，且在弱电网下仍有运行失稳的风险。

3.2　直接电压式控制结构

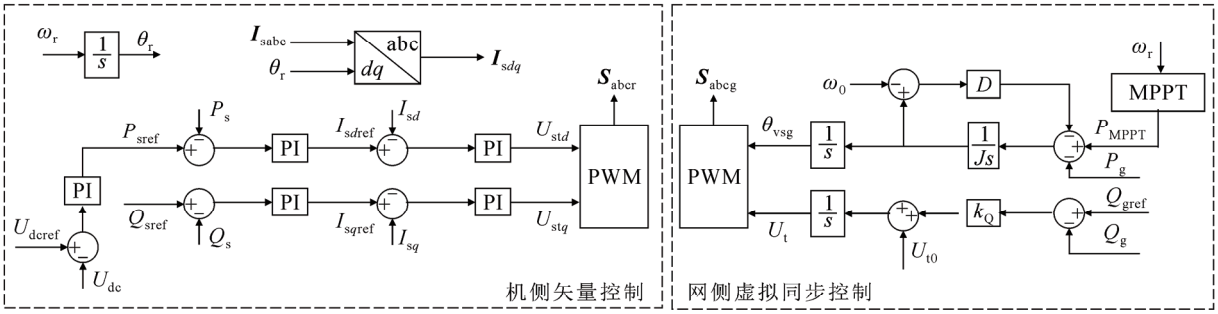
针对采用直接电压式控制结构的电压源控制策略，研究者多采用加入虚拟阻抗的方式来抑制暂态过电流，文献[33]采用虚拟阻尼和相量补偿相结合的控制方法，抑制了电网对称故障下直接电压式虚拟同步机的暂态电流越限，但在故障清除后存在有功功率倒吸及阻尼不足的问题；文献[34]在直接电压式控制结构中加入了电网电压前馈、有功功率指令调节和虚拟惯量阻尼，有效限制了变流器的短路电流，并提高了系统的暂态稳定性。但上述文献均缺乏对电流的直接控制，不能最大程度利用无功电流以支撑电网故障电压。

3.3　电压电流内环控制结构

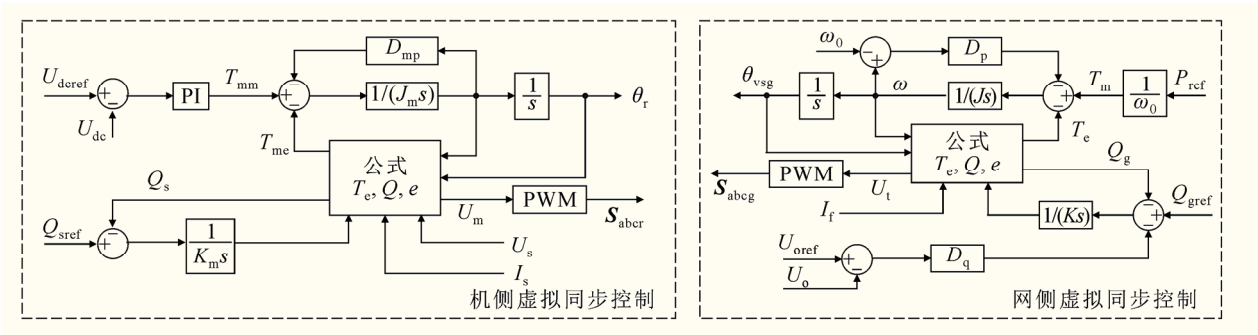
针对采用电压电流内环控制结构的电压源控制策略，目前有 3 种方案来限制故障发生时的暂态过电流。第 1 种是直接对电压环输出的参考电流幅值进行限制，如图 4(a)所示。文献[35-37]对变换器的电流幅值进行饱和限制，可以限制故障下的电流，但却导致电压外环由于饱和失去了作用，从而不具



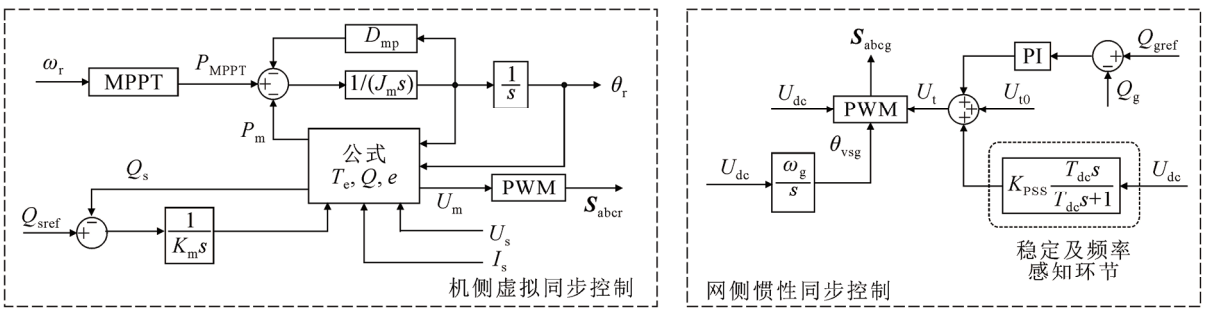
(a) 方法1: 机侧功率矢量控制+网侧惯性同步控制



(b) 方法2: 机侧直流电压矢量控制+网侧功率虚拟同步控制



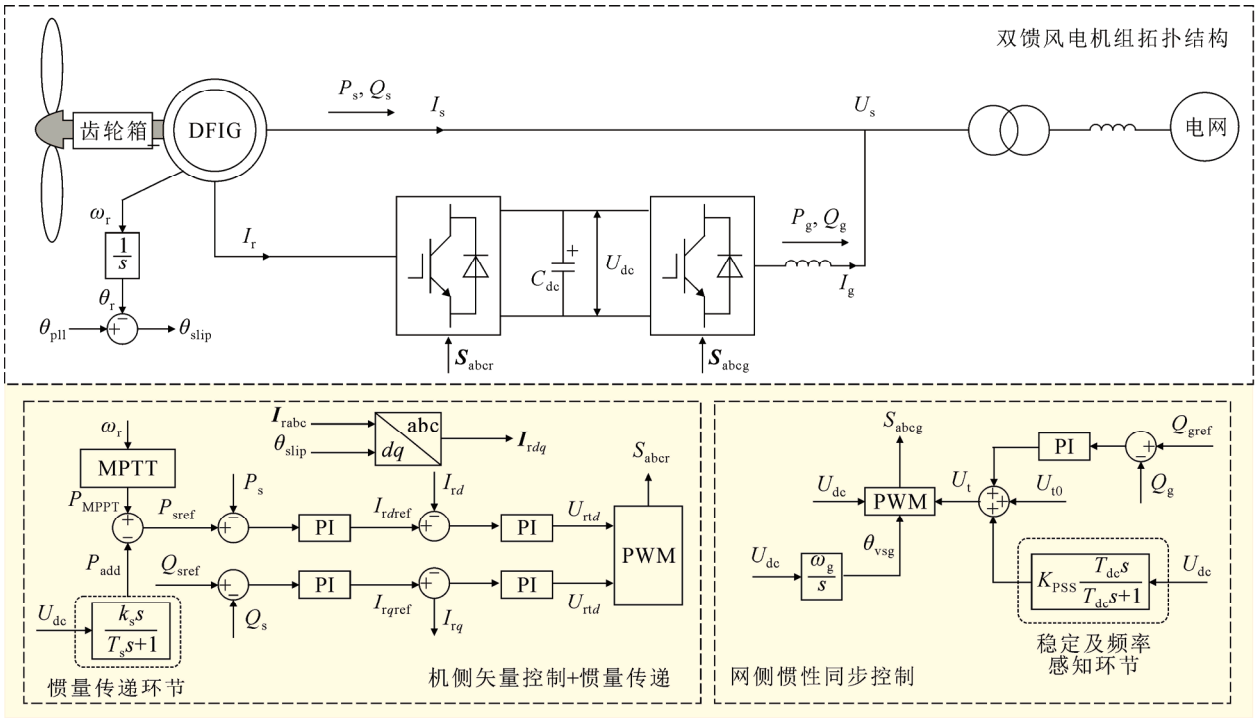
(c) 方法3: 机侧直流电压虚拟同步控制+网侧功率虚拟同步控制



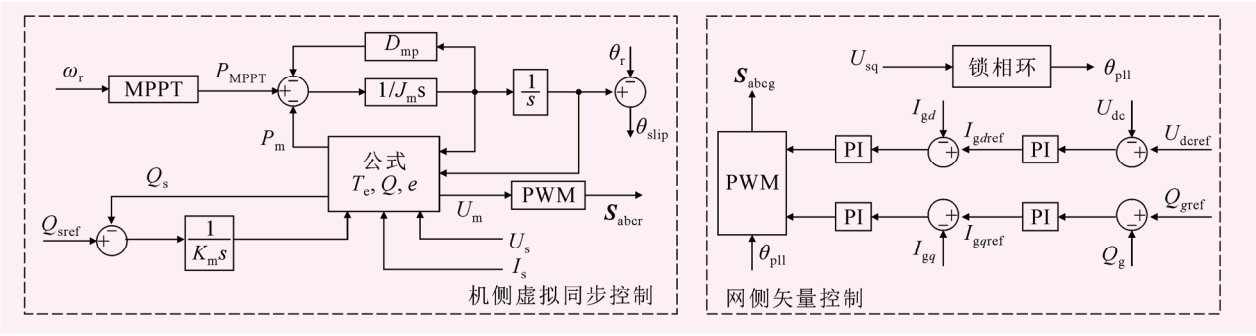
(d) 方法4: 机侧功率虚拟同步控制+网侧惯性同步控制

图 2 永磁风电机组电压源控制框图

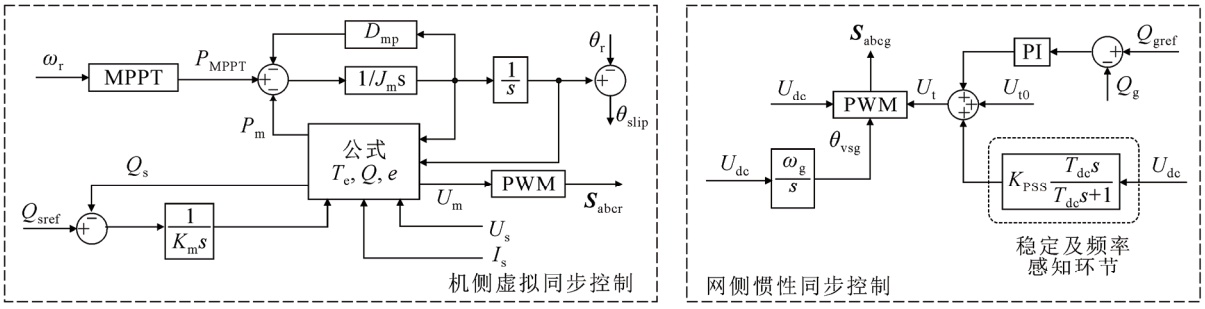
Fig.2 Block diagrams of voltage source control for PMSG-based WTG



(a) 方法1: 机侧功率矢量控制+网侧惯性同步控制



(b) 方法2: 机侧虚拟同步控制+网侧矢量控制



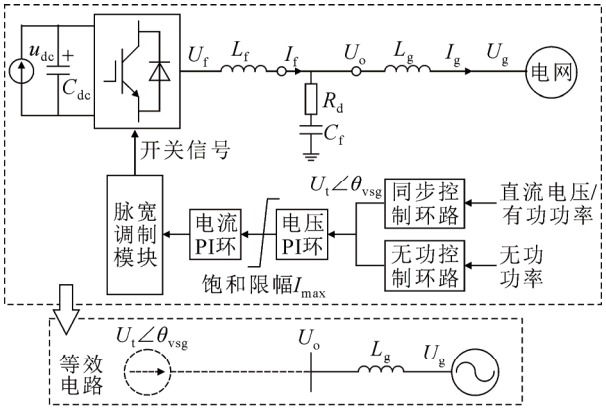
(c) 方法3: 机侧虚拟同步控制+网侧惯性同步控制

图 3　双馈风电机组电压源控制框图

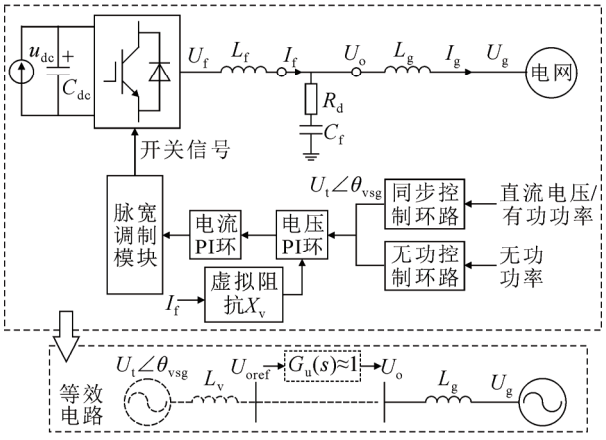
Fig.3　Block diagram of voltage source control for DFIG-based WTG

备维持电压源外特性的能力，且容易发生失稳现象。第 2 种是利用虚拟阻抗来限制电压环的电压指令值，以实现对并网电流的间接控制，如图 4(b)所示。文献[38]通过同时考虑功角稳定与虚拟阻抗限流方法，增强了变换器的暂态功角稳定，维持了故障发生时刻、故障过程和故障恢复时刻较优的电流特性。文献[39-41]通过加入虚拟阻抗来限制交流电压参考值，使得电压外环仍然具备调节作用，但电流在故

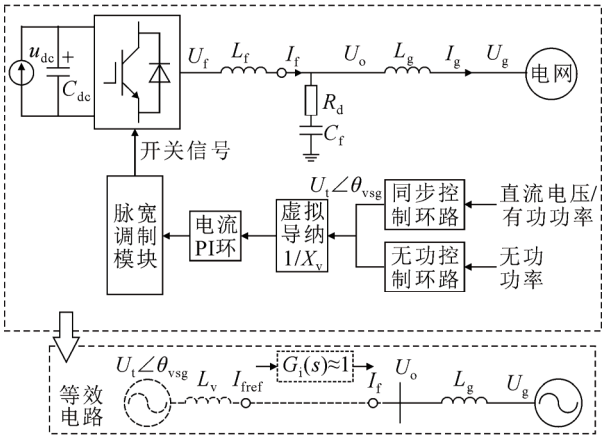
障发生或恢复时刻仍存在一定的冲击。第 3 种是采取虚拟导纳的电压环控制结构，通过修改故障下的虚拟导纳大小，实现对电流指令值的限制，如图 4(c)所示。文献[42-44]采用电压环虚拟阻抗和电流环比例积分的控制结构，能够保持电压源特性，具备较优的故障电流控制能力。



(a) 电压环输出限幅方法



(b) 虚拟阻抗限制电压指令方法



(c) 虚拟导纳限制电流指令方法

图 4 电压源控制下电流限制方法图

Fig.4 Control block diagram of current-limiting method for voltage source control

4 自同步电压源风电机组的暂态电压主动支撑控制

在新型“双高”电力系统中，高比例新能源和电力电子设备使得电网电压呈现弱支撑特性。在新能源出力波动性和随机性的影响下，电网中无功功率不平衡度会因有功功率的变化而更加敏感，导致“双高”电力系统面临严重的暂态电压稳定问题。而借助于新能源机组控制灵活的特点，通过设计合理的控制环路，可实现对并网点电压的有效支撑。电压源风电机组作为新型“双高”电力系统的主力电源，其对电网电压的有效支撑可以提高电力系统的稳定运行能力。本章分别就低电压故障、高电压故障和连锁故障对电压源风电机组的动态无功控制进行论述，探讨新型“双高”电力系统电压稳定支撑技术的发展概况。

4.1 电网低电压故障

当前新能源场站的暂态电压支撑能力主要由附加无功补偿装置提供，如静止无功补偿器、静止无功发生器和调相机等设备。在“双高”电力系统中，应主动发挥风电机组等新能源设备的暂态电压支撑能力。在电网电压故障时，风电机组当前的应对策略是在能够成功穿越故障的前提下，按照相关标准要求给电网提供与电压跌落深度成比例的无功电流，并且无功电流输出时间与电网电压跌落时间相关联，这在一定程度上有助于提升故障下电网的电压水平，而这样的方案是否充分发挥了风电机组的无功支撑能力，且是否能够最大程度提升电力系统的暂态电压水平和恢复特性值得进一步探讨。文献[45]为应对电网低电压故障，提出了适用于电压源风电机组的暂态控制策略，可在故障下发出无功功率支撑故障电压，但仍局限于风电机组能够成功穿越故障。文献[43]在分析电压源并网变换器的暂态输出特性的基础上，研究了最有利于电网电压恢复的短路电流形式，指出当变换器输出电流相角与故障点阻抗相角相同时，能最大程度提升故障点的电压水平。文献[46]对比了采用不同无功/电压控制环路时风电机组对故障点电压的支撑能力，得出当采用电压下垂和相角优化控制时，能最大程度发挥电压源风电机组的电压支撑能力。文献[47]针对新能源场站的暂态电压支撑问题，协同控制受控电压源和受控电流源，提升了混合多机系统的暂态电压稳定性。虽然电压源风电机组可增强电力系统的电

压支撑能力，但暂态条件下受限于电力电子器件，并网变换器只能多发出额定电流 20%~40%的电流，无法具备与同步发电机一样提供数倍短路电流的能力。为此，部分学者聚焦于提升电压源变换器过流能力的相关研究，现有研究思路多从降低变换器开关器件的热损耗出发。从散热角度，文献[48]从提升功率器件散热能力出发，通过加入新型相变材料提升其短时电流耐受能力，得出变换器可在 1.5 倍短路电流下运行 30 s，在 3 倍短路电流下运行 3 s 的结论。从控制角度，文献[49]分析了构网型变流器负载以及输出电压对于器件发热的影响，并提出了针对负载条件的输出电压实时调节控制以实现变流器的主动热控制。因此，可从硬件设计和控制角度提升风电变流器短路电流输出能力，目前针对该方向的研究尚需更加深入的探索。

4.2　电网高电压故障

当前暂态过电压对风电机组的影响主要包括两方面：一方面是过电压可能会危害电力电子器件的安全；另一方面是引发变流器直流母线电压的大幅波动，这是由于变换器调制度不够造成的。因此，当前常规电流控制型风电机组在高电压穿越下的控制思路是，在提高直流母线电压参考值的基础上尽可能让风电机组吸收无功功率，从而降低并网点电压幅值[50-51]。电压源型风电机组的高穿控制策略可以借鉴电流源风电机组的控制思路，只需提升直流母线电压和吸收无功功率即可。

4.3　电网高低电压连锁故障

在常规电流控制型新能源经常规高压直流外送(line-commutated converter based high voltage direct current，LCC-HVDC)的场景下，高/低电压连锁故障发生的概率大大增加。在直流系统连续换相失败导致风机交流端电压波动后，由于机组无功功率的收发不及时，会造成母线电压与风电机组发出的无功不相匹配，这进一步加剧了暂态过电压，导致机组大规模脱网。低电压与高电压故障交替的时间尺度在数十毫秒级别，而电压检测延时和场站下发指令的延迟时间约为 30 ms[52]，因此迫切需要一种能够有效提高机组无功响应速度的控制策略，电压源控制方法是解决这一问题的有效途径。文献[53]提出一种基于虚拟同步机控制技术的风电机组高/低电压连锁故障穿越策略，能够提升机组对电网暂态电压的支撑能力，大大提高机组的穿越时间和穿越次数指标。

5　技术展望与热点问题讨论

目前，基于惯性同步控制策略的自同步电压源永磁直驱风电机组已分别于 2011 年、2022 年开展了长期运行实证，并通过了第三方测试，1 年多的运行时间也说明了机组运行的稳定性和可靠性。自同步电压源双馈风电机组的短期实证工作也有相关报道。但自同步电压源风电机组在电力系统中的大规模应用尚需更加完善的理论和多场景、更大规模应用的实践验证。理论上，亟需完善自同步电压源风电机组构建风电场运行的稳定性分析方法与镇定控制，控制参数整定与优化，电网谐波及三相不平衡背景下的适应性，大规模异构机组的运行控制及电网强度自适应控制等。亟需研究提高自同步电压源风电机组暂态电流支撑能力的经济可行技术，积极推动新能源直流外送场景下大规模自同步电压源风电机组运行实证、规模化电压源机组与常规电流控制型机组的异构运行实证等。积极推进自同步电压源风电机组相关标准的制订工作。

5.1　背景谐波对自同步电压源风电机组的影响

电网中非线性负载和新能源发电单元均会产生谐波电流，进而通过线路阻抗产生谐波压降，使得公共耦合点处出现电压背景谐波。由于自同步电源风电机组并网变换器的等效输出阻抗低，因此电网背景谐波可能会激励出较大的谐波电流，从而存在降低电能质量、恶化发电单元运行性能的风险。文献[54]针对 2 个变换器并联系统，推导出下垂控制下变换器的多谐波动态相量模型，并指出 6 倍开关谐波和不平衡对下垂控制动态特性影响不明显，而当下垂系数过大、功率滤波时间常数过小或者变换器之间连接电感较小时，系统会受直流偏置或二次谐波的影响而激发振荡。针对非线性负载引入的谐波电流，采用相同幅度和相反相位的电流控制谐波抑制法被认为是一种方便且高效的方案[55-57]。另一种方案是加入虚拟阻抗以形成谐波电流通路，包括与新能源并网变换器输出阻抗串联的负相位虚拟阻抗[58-59]，以及与并网变换器输出阻抗并联的虚拟阻抗[60]。文献[61]提出了应对非理想电网条件的虚拟同步发电机控制变换器谐波电流和故障冲击电流协调抑制策略，包括无源支路、有源支路和改进型虚拟同步发电机。当前，由于电压源风电机组在电网中的应用还较少，其在电网含不同频次背景谐波情况下的响应特性还未得到充分的分析，此外，承担主

力电源身份的电压源风电机组也应当起到抑制“双高”电力系统中谐波的作用，提高系统的电能质量。

5.2 电网不平衡下自同步电压源风电机组的运行

受限于负荷的多变性和不平衡负载，电网电压极易发生不平衡现象。针对不平衡电网下的电压源控制策略研究，文献[41]采用自适应虚拟阻抗有效限制了正负序电流的幅值，但加入的多个选择器会降低变换器的动态响应速度。文献[62]采用电压前馈控制的电压相位补偿技术实现负序电流抑制，但该方法是将电压源虚拟同步机(virtual synchronous generator，VSG)改成电流源型并网逆变器控制，失去了 VSG 电压源控制的基本特性。文献[63]针对虚拟同步控制方法，提出了电网不平衡下抑制负序电流的控制方法。进一步地，文献[64]提出虚拟同步机的平衡电流控制方法，使虚拟同步机在不平衡电压下实现负序电流抑制，并且可以在不同工况下自适应切换。文献[65]提出一种基于模式平滑切换的虚拟同步机低电压穿越控制方法，在电网故障前采用虚拟同步机平衡电流控制方法，通过无差跟随控制实现控制模式的平滑切换；在电网故障期间采用传统并网控制进行限流，在电网电压跌落时提供无功支撑；在故障恢复时避免由于控制模式突变造成的暂态电流冲击，从而实现虚拟同步机在不同工况下的低电压穿越。文献[66]提出了一种改进型虚拟同步机控制策略，在不改变虚拟同步机控制机理的条件下保留虚拟同步机原有控制特性，实现了不平衡电网下输出电流的三相平衡，抑制有功或无功功率二倍电网频率波动的控制目标。文献[67]提出一种适用于虚拟同步控制的拓展功率理论，提出一种拓展功率谐振控制方法，使虚拟同步机在不平衡电网中可以实现对传统和拓展功率的精确控制，通过选择不同的功率组合作为控制变量，可实现不平衡电网下虚拟同步机的精准自同步并网和 3 种不同的功率控制模式。目前，已有不少文献研究了不平衡电网或不对称故障下电压源控制变换器的响应特性，实现方法包括对负序电流的直接控制或者通过功率指令值设置对负序电流进行间接控制，但现有研究多聚焦于实现风电机组对负序分量的控制目标，对于在不平衡电网或不对称故障下如何挖掘电压源风电机组的潜在支撑能力鲜有涉及。

5.3 风电场电网强度自适应与规模化异构机组的稳定运行

电压源控制策略摒弃了锁相环节被动跟随电网电压相位的特点，采取主动建立并网同步相位的方式，理论上在短路比较低的弱电网中仍具有较高的控制稳定性[68]，但机组的稳定性与惯量响应的强度密切相关，且实际电网的强度是变化的；为最大程度发挥电压源风电机组的优势，研究其对电网强度的适应性控制尤为重要。文献[24,69]分析了弱电网下电压源风电机组惯量系数过大时的失稳机理，并提出了致稳控制策略，从而极大地提升了风电机组的惯量响应能力，这有助于增强弱电网下风电机组的有功支撑能力。文献[31]建立了电压源双馈风电机组的小信号状态空间模型，研究了不同控制参数对系统稳定性的影响。文献[70-72]在不同电网运行条件下利用阻抗分析方法对比了虚拟同步控制与电网跟随型控制下变换器的运行特性，表明弱电网下电压源控制稳定性有优势，强网下电流型控制更适用于规模化机组的并网稳定运行。据此，风电机组采用电流型控制和电压型控制将长期共存，需要深入研究 2 种控制方式的平滑转换和规模化异构机组的稳定运行问题。

5.4 自同步电压源风电机组的暂态稳定运行分析与镇定控制

在电网发生大扰动的情况下，风电机组采用电压源控制亦或是电流源控制，均会面临暂态同步稳定性问题。此外，电压源风电机组在故障下采取的各类限流措施均会降低其暂态稳定性[73-74]，深入研究电压源风电机组的暂态同步稳定性，充分揭示电压源风电机组暂态失稳的机理，才能指导设计控制参数和优化控制策略，更好发挥其支撑电网的优势。

现有的大扰动稳定性分析方法包括等面积法、相平面法、能量函数法和非线性控制方法等[75-76]。等面积法可直观给出系统失稳的机理，但是无法分析阻尼参数对系统暂态稳定性的影响；相平面法则可以弥补这一缺点，利用数值分析处理系统的二阶非线性方程，相比能量函数法，该方法更直观且易实现，但其计算量要求较大。文献[77]总结了虚拟同步控制双馈风电机组的暂态同步稳定性分析方法。文献[36]和文献[37]利用等面积法对电流饱和的下垂控制并网变换器进行研究，揭示了暂态稳定的机理，但仅针对故障情况下不发出无功功率的情况。文献[74]针对功率同步控制下的并网变换器，采用相平面法阐述了暂态同步机理，指出了其具有一阶函数的特性。在此基础上，文献[78]进一步揭示了变换器采用虚拟阻抗的下垂控制在故障恢复期间的同步问题，并提出自适应修改下垂系数来提高极限

切除时间的方法。为提高电压源风电机组的暂态稳定性，保证暂态下控制目标的实现，目前主要有 3 类控制方法，包括：1）降低功率参考指令值或调节控制参数，从等面积法的角度看主要是减少加速面积来增大系统的稳定裕度[79-80]；2）改进控制回路，如引入 q 轴电压或无功功率暂态控制项来增加系统的阻尼[35-36]；3）添加虚拟阻抗控制环路，根据故障电流实时修改阻抗值，以避免控制环节饱和导致的失稳问题[39-41]。目前针对电压源风电机组的暂态稳定性研究多限于单机无穷大系统，与多机暂态稳定性问题的研究尚有很大差距。

风电机组的并网运行特性主要由电力电子变换器的控制方式主导，内部多级联控制环节带来了多时间尺度的运行特性[81-82]，主要包含转子动态、功率控制动态和电流控制动态时间尺度。电压源控制方式使得电网与风力机形成强耦合，动态行为更加复杂，学科深度交叉，分析难度更大。

6　结论

电压源风电机组具备主动支撑电网频率和电压的能力，可有效提高新型“双高”电力系统的电压和频率稳定性。目前，针对风电机组的电压源控制已经形成了一些策略和方法，并开展了机组级实证，给构建高比例新能源电力系统提供了一种可能的电源侧解决方案，但尚需在多机稳定运行理论、多场景运行、规模化运行实证、测试技术和相关标准制订上展开一系列攻关。

随着新型“双高”电力系统的发展，电压源风电机组将在未来电力系统中发挥重要作用，具体包括以下几个方面：

1）提供强大的暂态电流输出能力，支撑电网暂态电压水平和优化暂态电压恢复特性。

2）具备快速频率响应能力，主动阻尼频率波动，参于系统一次调频。

3）具备多机自主协同、异构运行能力，确保大规模机组稳定运行。

4）提高电能质量，降低电力系统中的谐波含量和不平衡度。

5）具备黑启动、离网运行和构网能力，为孤网运行和局部电网的恢复提供支撑电源。

参考文献　References

[1] 全球能源互联网发展合作组织. 中国“十四五”电力发展规划研究[R]. 北京：全球能源互联网发展合作组织，2015.
Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. China’s “14th Five-Year Plan” Electricity Development Planning Study[R]. Beijing, China: Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, 2015.

[2] ELKHATIB M E, DU W, LASSETER R H. Evaluation of inverter-based grid frequency support using frequency-watt and grid-forming PV inverters[C]// 2018 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Portland, USA: IEEE, 2018: 1-5.

[3] MARKOVIC U, STANOJEV O, ARISTIDOU P, et al. Partial grid forming concept for 100% inverter-based transmission systems[C]// 2018 IEEE Power Energy Society General Meeting. Portland, USA: 2018: 1-5.

[4] 王旭斌，杜文娟，王海风. 弱连接条件下并网 VSC 系统稳定性分析研究综述[J]. 中国电机工程学报，2018，38(6)：1593-1604，1895.
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1593-1604, 1895.

[5] HUANG Y, YUAN X, HU J, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1193-1204.

[6] 杨　苓，陈燕东，周乐明，等. 弱电网下锁相环对三相 LCL 型并网逆变器小扰动建模影响及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2018，38(13)：3792-3804，4020.
YANG Ling, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Effect of phase locked loop on the small-signal perturbation modeling and stability analysis for three-phase LCL-type grid-connected inverter in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3792-3804, 4020.

[7] POGAKU N, PRODANOVIC M, GREEN T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.

[8] 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.

[9] MENG X, LIU 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.

[10] 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.

[11] GAO F, IRAVANI M R. A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 850-859.

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

[13] ZHONG Q C, MA Z, MING W L, et al. Grid-friendly wind power systems based on the synchronverter technology[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 719-726.

[14] LIU J, MIURA Y, ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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(01)：61-71.
ZHANG Jiawei, ZHANG Chen, SHI Xianqiang. Energy-storage-type static var generator and its autonomous-synchronization voltage source control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(01): 61-71.

[18] 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 using the DC-link voltage to realize self-synchronous voltage source control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 31-41.

[19] JOHNSON B B, DHOPLE S V, HAMADEH A O, et al. Synchronization of parallel single-phase inverters with virtual oscillator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(11): 6124-6138.

[20] 屠 勇，苏建徽，杨向真，等. 虚拟振荡器控制的新型逆变器无线并联方案[J]. 中国电机工程学报，2016，36(15)：4184-4192.
TU Yong, SU Jianhui, YANG Xiangzhen, et al. A novel virtual oscillator control in wireless parallel connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4184-4192.

[21] GROß D, COLOMBINO M, BROUILLON J S, et al. The effect of transmission-line dynamics on grid-forming dispatchable virtual oscillator control[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2019, 6(3): 1148-1160.

[22] 王东泽，孙海顺，黄碧月，等. 基于虚拟同步控制的电压源型直驱风电机组并网稳定性分析[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3282-3294.
WANG Dongze, SUN Haishun, HUANG Biyue, et al. Analysis of grid-connected stability of voltage-sourcetype PMSG-based wind turbine based on virtual synchronous control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3282-3294.

[23] HUANG L, XIN H, ZHEN W, et al. A virtual synchronous control for voltage source converters utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1565-1577.

[24] 桑 顺，张 琛，蔡 旭，等. 全功率变换风电机组的电压源控制(一)：控制架构与弱电网运行稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2021，41(16)：5604-5616.
SANG Shun, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Voltage source control of wind turbines with full-scale converters (part I): control architecture and stability analysis under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5604-5616.

[25] WANG S, HU J B, YUAN X M. Virtual synchronous control for grid-connected DFIG-based wind turbines[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 932-944.

[26] 谢 震，李梦杰，张 兴，等. 基于下垂并网的双馈风力发电机谐波电压抑制策略[J]. 中国电机工程学报，2018，38(17)：5228-5237.
XIE Zhen, LI Mengjie, ZHANG Xing, et al. Harmonic-voltage suppress strategy of doubly-fed induction generators based on voltage source droop grid-connected output[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5228-5237.

[27] 王 磊，张 琛，李 征，等. 双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制，2017，45(13)：85-90.
WANG Lei, ZHANG Chen, LI Zheng, et al. Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation characteristics in weak grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 85-90.

[28] 张 琛，蔡 旭，李 征. 具有自主电网同步与弱网稳定运行能力的双馈风电机组控制方法[J]. 中国电机工程学报，2017，37(2)：476-486.
ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Control of DFIG-based wind turbines with the capability of automatic grid-synchronization and stable operation under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 476-486.

[29] 邵昊舒，蔡 旭，周党生，等. 风电机组虚拟同步及惯量控制方法分析与测试评估[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1528-1537.
SHAO Haoshu, CAI Xu, ZHOU Dangsheng, et al. Analysis and test evaluation of VSG and virtual inertia control method for wind turbine[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1528-1537.

[30] SHAO H, CAI X, ZHOU D, et al. Equivalent modeling and comprehensive evaluation of inertia emulation control strategy for DFIG wind turbine generator[J]. IEEE Access, 2019, 7: 64798-64811.

[31] SHAO H, CAI X, LI Z. Stability enhancement and direct speed control of DFIG inertia emulation control strategy[J]. IEEE Access, 2019, 7: 120089-120105.

[32] OUREILIDIS K O, DEMOULIAS C S. A fault clearing method in converter-dominated microgrids with conventional protection means[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 4628-4640.

[33] 尚 磊，胡家兵，袁小明，等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报，2017，37(2)：403-412.
SHANG Lei, HU Jiabing, YUAN Xiaoming, et al. Modeling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 403-412.

[34] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Voltage sag ride-through performance of virtual synchronous generator[C]// 2014 International Power Electronics Conference (IPEC). Hiroshima, Japan: IEEE, 2014: 14515798.

[35] 章雷其，黄林彬，黄 伟，等. 提高下垂控制逆变器虚拟功角暂态稳定性的控制方法[J]. 电力系统自动化，2017，41(12)：56-62，99.
ZHANG Leiqi, HUANG Linbin, HUANG Wei, et al. Control methods for improving virtual power angle transient stability of droop-controlled inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 56-62, 99.

[36] HUANG L, XIN H, WANG Z, et al. Transient Stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 578-591.

[37] XIN H H, HUANG L B, ZHANG L Q, et al. Synchronous instability mechanism of P-f droop-controlled voltage source converter caused by current saturation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5206-5207.

[38] 李清辉，葛平娟，肖 凡，等. 基于功角与电流灵活调控的 VSG 故障穿越方法研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(7)：2071-2080，2387.
LI Qinghui, GE Pingjuan, XIAO Fan, et al. Study on fault ride-through method of VSG based power angle and current flexible regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2071-2080, 2387.

[39] LU X, WANG J, GUERRERO J M, et al. Virtual-impedance-based fault current limiters for inverter dominated AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1599-1612.

[40] CHEN J, PRYSTUPCZUK F, O'DONNELL T. Use of voltage limits for current limitations in grid-forming converters[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(2): 259-269.

[41] ZAREI S F, MOKHTARI H, GHASEMI M A, et al. Reinforcing fault ride through capability of grid forming voltage source converters using an enhanced voltage control scheme[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 1827-1842.

[42] TAUL M G, WANG X F, DAVARI P, et al. Current limiting control with enhanced dynamics of grid-forming converters during fault conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1062-1073.

[43] LIU C, CAI X, LI R, et al. Optimal short-circuit current control of the grid-forming converter during grid fault condition[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(10): 1-10.

[44] 杨仁炘，张 琛，蔡 旭，等. 海上风电–柔直并网系统自同步电压源控制与电网故障穿越[J]. 中国电机工程学报，2022，42(13)：4823-4835.
YANG Renxin, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Voltage source control and fault ride-through of VSC-HVDC systems with offshore wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4823-4835.

[45] 秦　垚，王　晗，杨志千，等. 全功率变换风电机组的电压源控制(二)：电网故障穿越控制与保护[J]. 中国电机工程学报，2023，43(2)：530-543.
QIN Yao, WANG Han, YANG Zhiqian, et al. Voltage source control of wind turbine generators with full-scale converters (part II): control and protection of grid fault ride-through[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 530-543.

[46] DENG Z, WANG H, QIN Y, et al. An optimal short-circuit current control method for self-synchronization controlled wind turbines[C] // 2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Haining, China: IEEE, 2022: 1-6.

[47] 杨　铭，曹　武，赵剑锋，等. 受控电压/电流源型变流器混合多机暂态电压支撑策略[J/OL]. 电工技术学报，2023：1-18.[2023-05-30]. https://doi. org/10.19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 220669.
YANG Ming, CAO Wu, ZHAO Jianfeng, et al. Transient voltage support strategy for hybrid multi-converter of controlled voltage/current source converter[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023: 1-18.[2023-05-30]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces. 220669.

[48] SHAO W, KASTHA D, BAJPAI P, et al. A power module for grid inverter with in-built short-circuit fault current capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10), 10567-10579.

[49] ANDRESEN M, CARNE G D, LISERRE M. Load-dependent active thermal control of grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 2078-2086.

[50] 郑　重，耿　华，杨　耕. 新能源发电系统并网逆变器的高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报，2015，35(6)：1463-1472.
ZHENG Zhong, GENG Hua, YANG Geng. High voltage ride-through control strategy of grid-connected inverter for renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1463-1472.

[51] 王德胜，颜湘武，刘　辉，等. 基于动态无功支撑的全功率变流风电机组高电压穿越改进控制[J]. 中国电机工程学报，2022，42(3)：957-968.
WANG Desheng, YAN Xiangwu, LIU Hui, et al. High voltage ride through improved control of full power converter wind turbines based on dynamic reactive power support[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 957-968.

[52] 阳光电源. 创国内首例!阳光电源逆变器快速功率控制通过中国电科院权威检测[EB/OL]. (2019-11-11)[2022-08-15]. https://zhuanlan.zhihu. com/p/91196082.
Solar Power Supply. Create the first case in China! Sun power inverter power control quickly through the Chinese electricity authority testing research institute[EB/OL]. (2019-11-11)[2022-08-15]. https://zhuanlan.zhihu.com/p/91196082.

[53] 王德胜，颜湘武，贾焦心，等. 永磁直驱风机基于虚拟同步技术的高、低电压连续故障穿越策略[J]. 中国电机工程学报，2022，42(6)：2164-2175.
WANG Desheng, YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, et al. High/low voltage continuous fault ride through strategy of PMSGs based on virtual synchronization technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2164-2175.

[54] HART P J, GOLDMAN J, LASSETER R H, et al. Impact of harmonics and unbalance on the dynamics of grid-forming, frequency-droop-controlled inverters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 976-990.

[55] ZHOU H, LI Y, ZARGARI N R, et al. Selective harmonic compensation (SHC) PWM for grid-interfacing high-power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1118-1127.

[56] ZHANG Y, LI Y W, ZARGARI N, et al. Improved selective harmonics elimination scheme with online harmonic compensation for high-power PWM converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(7): 3508-3517.

[57] TAKESHITA T, MATSUI N. Current waveform control of PWM converter system for harmonic suppression on distribution system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 50(6): 1134-1139.

[58] WANG X, BLAABJERG F, CHEN Z. Synthesis of variable harmonic impedance in inverter-interfaced distributed generation unit for harmonic damping throughout a distribution network[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(4): 1407-1417.

[59] SREEKUMAR P, KHADKIKAR V. A new virtual harmonic impedance scheme for harmonic power sharing in an islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 936-945.

[60] ZHANG X, ZHONG Q, MING W. Stabilization of a cascaded dc converter system via adding a virtual adaptive parallel impedance to the input of the load converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 1826-1832.

[61] ZHOU L, LIU S, CHEN Y, et al. Harmonic current and inrush fault current coordinated suppression method for VSG under non-ideal grid condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 1030-1042.

[62] MASSOUD A M, AHMED S, FINNEY S J, et al. Inverter-based versus synchronous-based distributed generation; fault current limitation and protection issues[C] // 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, USA: IEEE, 2010: 58-63.

[63] 陈天一，陈来军，汪雨辰，等. 考虑不平衡电网电压的虚拟同步发电机平衡电流控制方法[J]. 电网技术，2016，40(3)：904-909.
CHEN Tianyi, CHEN Laijun, JIANG Yuchen, et al. Balanced current control of virtual synchronous generator considering unbalanced grid voltage[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 904-909.

[64] 万晓凤，胡海林，聂晓艺，等. 电网电压不平衡时的改进虚拟同步机控制策略[J]. 电网技术，2017，41(11)：3573-3581.
WAN Xiaofeng, HU Hailin, NIE Xiaoyi, et al. An improved control strategy for virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3573-3581.

[65] 王仰铭，孙　丹，年　珩，等. 不平衡电网下自同步虚拟同步机拓展功率控制策略研究[J]. 电网技术，2020，44(9)：3368-3375.
WANG Yangming, SUN Dan, NIAN Heng, et al. Extended power control strategy of self-synchronized virtual synchronous generator under unbalanced power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3368-3375.

[66] ZHENG X, WANG C, PANG S. Injecting positive-sequence current virtual synchronous generator control under unbalanced grid[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(1): 165-170.

[67] 房志学，苏建徽，王华锋，等. 微网逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化，2019，43(2)：143-149，161.
FANG Zhixue, SU Jianhui, WANG Huafeng, et al. Low voltage ride-through control strategy of microgrid inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 143-149, 161.

[68] 伍文华，周乐明，陈燕东，等. 序阻抗视角下虚拟同步发电机与传统并网逆变器的稳定性对比分析[J]. 中国电机工程学报，2019，39(05)：1411-1421.
WU Wenhua, ZHOU Leming, CHEN Yandong, et al. Stability comparison and analysis between the virtual synchronous generator and the traditional grid-connected inverter in the view of sequence impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1411-1421.

[69] 桑　顺，张　琛，蔡　旭，等. 计及内、外部交互模态的电压源型风电场−电网稳定性量化分析[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2840-2853.
SANG Shun, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Quantitative analysis of the voltage-source-type wind farm-weak grid's stability considering the internal and external interaction modes[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2840-2853.

[70] ASRARI A, MUSTAFA M, ANSARI M, et al. Impedance analysis of virtual synchronous generator-based vector controlled converters for weak AC grid integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1481-1490.

[71] 伍文华，陈燕东，周乐明，等. 虚拟同步发电机接入弱电网的序阻

抗建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2019，39(6)：1560-1571，1853.
WU Wenhua, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Sequence impedance modeling and stability analysis for virtual synchronous generator connected to the weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1560-1571, 1853.

[72] WU W, ZHOU L, CHEN Y, et al. Sequence-impedance-based stability comparison between VSGs and traditional grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 46-52.

[73] SHUAI Z, SHEN C, LIU X, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4648-4661.

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

[75] 张　宇，蔡　旭，张　琛，等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报，2021，41(5)：1687-1702.
Zhang Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1702.

[76] 张　宇，张　琛，蔡　旭，等. 并网变换器的暂态同步稳定性分析：稳定域估计与镇定控制[J]. 中国电机工程学报，2022，42(21)：7871-7884.
ZHANG Yu, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Transient grid-synchronization stability analysis of grid-tied voltage source converters: stability region estimation and stabilization control[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7871-7884.

[77] 程雪坤，刘　辉，田云峰，等. 基于虚拟同步控制的双馈风电并网系统暂态功角稳定研究综述与展望[J]. 电网技术，2021，45(2)：518-525.
CHENG Xuekun, LIU Hui, TIAN Yunfeng, et al. Review of transient power angle stability of doubly-fed induction generator with virtual synchronous generator technology integration system[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 518-525.

[78] QORIA T, GRUSON F, COLAS F, et al. Critical clearing time determination and enhancement of grid-forming converters embedding virtual impedance as current limitation algorithm[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1050-1061.

[79] SHUAI Z, SHEN C, LIU X, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4648-4661.

[80] XIONG X, WU C, BLAABJERG F. Effects of virtual resistance on transient stability of virtual synchronous generators under grid voltage sag[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 4754-4764.

[81] 胡家兵，袁小明，程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报，2019，39(18)：5457-5467，5594.
HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467, 5594.

[82] 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. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1904-1917.



蔡　旭
1964—，男，博士，教授，博导
研究方向为可再生能源功率变换与并网技术、大功率电力电子与电力系统控制
E-mail: xucai@sjtu.edu.cn

CAI Xu
Ph.D., Professor



秦　垚
1996—，男，博士生
研究方向为风力发电系统的电压源控制技术
E-mail: qy_dawn@sjtu.edu.cn

QIN Yao
Ph.D. candidate



王　晗(通信作者)
1982—，男，博士，助理研究员
研究方向为电力电子变换控制、可再生能源发电与并网控制
E-mail: wanghansjtu@sjtu.edu.cn

WANG Han
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期　2023-04-29　修回日期　2023-06-05　　编辑　何秋萍