

# 构网型变流器：控制与稳定特性

迟永宁<sup>1</sup>, 江炳蔚<sup>1</sup>, 范译文<sup>1</sup>, 胡家兵<sup>2</sup>, 林伟芳<sup>1</sup>, 刘宏志<sup>1</sup>, 马士聪<sup>1</sup>, 姚 骏<sup>3</sup>

(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:** 随着新能源渗透率的不断提升, 电网强度减弱, 惯量阻尼水平低, 系统抗扰动能力弱, 使得具有惯量阻尼支撑能力的构网型变流器优势凸显, 成为最具应用前景的一类并网变流器。变流器作为新能源与电网之间的并网接口, 将电能安全稳定高效输送至电网, 其控制稳定性很大程度上决定了新能源并网系统的稳定性。为此, 从构网型变流器扰动模型的构建策略及扰动分析方法出发, 分析控制环节与动态特性间的联系, 在惯量动态、故障电流、宽频振荡 3 个方面揭示了构网型变流器的动态与稳定特性, 进而在大电网条件下明确了构网型变流器稳定控制的关键问题, 展望了构网型变流器稳定控制的后续研究方向, 为构网型变流器的进一步研究与应用提供参考。

**关键词:** 新能源并网; 构网型变流器; 控制环节; 稳定机制; 动态特性; 物理本质

## Grid-forming Converters: Control and Behavior of Stability

CHI Yongning<sup>1</sup>, JIANG Bingwei<sup>1</sup>, FAN Yiwu<sup>1</sup>, HU Jiabing<sup>2</sup>, LIN Weifang<sup>1</sup>, LIU Hongzhi<sup>1</sup>,

MA Shicong<sup>1</sup>, YAO Jun<sup>3</sup>

(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:** Power system shows new characteristics such as weak grid strength, low inertia and damping level, and weak anti-disturbance ability due to the increasing proportion of renewable energy. Grid-forming converters which offers inertia and damping supports to renewable energy power system become prominent, making them the most promising type of converters. Converters play an important role in transmitting electricity to the grid safely, stably, and efficiently as the interface between renewable energy and the power system. The stability of converters greatly affects power system with high proportion of renewable energy. In this article, we first focus on the modeling strategy and disturbance analysis method of grid-forming converters and summarize the stability control strategies of grid-forming converters. Then, on the basis of the relations between controller and stability, we reveal the dynamic and transient characteristics of grid-forming converters in three aspects: inertia dynamics, fault current, and broadband oscillation. Furthermore, we clarify the key issues of stable control for grid-forming converters under large-scale power grid, put forward to the future research directions of stability for grid-forming converters, and provide a reference for further research and application of grid-forming converters.

**Key words:** renewable energy; grid-forming converter; control performance; stability; dynamic characteristics; physical mechanism

## 0 引言

随着我国“双碳”战略的实施和推进, 以风电、光伏为代表的新能源设备并网需求大幅增加, 电力系统新能源占比大幅提高, 呈现“双高”特性<sup>[1-2]</sup>。

新能源经电力电子变流器并网, 变流器的并网性能很大程度上影响着系统的稳定性, 保障变流器的稳定运行成为新型电力系统研究的关键问题之一<sup>[3-5]</sup>。

在新能源发展初期, 并网规模不大, 同步机占比及装机容量远高于新能源, 小规模新能源接入后, 对电网稳定性影响不大。初期并网变流器通常控制新能源跟随电网运行<sup>[6-9]</sup>, 称之为跟网型控制。该策略控制变流器紧密地跟随电网运行, 在强电网中具

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(U23B20120)。

Project supported by Joint Research Fund in Smart Grid Under Cooperative Agreement Between National Natural Science Foundation of China and SGCC (U23B20120).

有较好的运行特性<sup>[10]</sup>。然而,随着新能源并网规模及占比的大幅提高,跟网型变流器无法为系统提供支撑,电网惯量与阻尼水平下降明显,抗扰动力降低,此时要求新能源为电网提供一定的支撑<sup>[11-12]</sup>,因此具有惯量与阻尼特性的构网型控制策略逐渐成为研究热点,并已初步在示范工程中投入应用<sup>[13-14]</sup>。

构网型控制策略通过模拟传统同步机的下垂特性、转子运动方程等,使得变流器能够自主构建电压<sup>[15-18]</sup>。构网型控制策略主要包括经典下垂控制、虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制、带低通滤波器的(low-pass filter, LPF)下垂控制等,其控制结构与稳态特性在文献[12]中作了较为详细的分析与研究。

构网型变流器系列文章的目的是探讨构网型变流器的物理本质及其动态特性,文献[12]以同步机的视角,剖析了构网型变流器的物理本质,并研究了构网型变流器的惯量支撑、阻尼以及同步稳定等特性。本文聚焦于扰动工况下构网型变流器控制环节与稳定特性的关联性,研究构网型变流器振荡、扰动失稳机理及稳定控制策略。

新能源经变流器连接至电网公共连接点(point of common coupling, PCC),在高比例新能源接入工况下,该处电网阻抗高,电网强度弱,具有丰富的背景谐波,同时可能存在电压波动、频率偏移、电网故障等扰动,动态过程复杂<sup>[19-22]</sup>。根据扰动程度的不同,可划分为小扰动、大扰动2类。小扰动指电压、频率的小范围波动,影响因素包括控制参数设置不合理、元件参数偏差、外部负荷变化或线路开合等。大扰动指电网故障如三相短路、电网相位跳变等,并网系统可能出现暂态失稳现象<sup>[23-25]</sup>。

作为新能源与电网交互的桥梁,变流器的稳定性对系统稳定起到至关重要的作用。由于构网型变流器的本质及特性与传统跟网型变流器存在较大差别,动态特性也不尽相同<sup>[26-29]</sup>,因此亟需对构网型变流器的控制环节及稳定特性开展系统研究与讨论。本文以构网型变流器为研究对象,针对变流器控制环节及稳定特性的联系开展研究。本文从构网型变流器的建模策略及分析方法出发,基于扰动模型分析了构网型变流器扰动特性与控制环节的关联性,探究了构网型变流器的稳定机制;接着,分析了控制环节引起的构网型变流器稳定特性变化,并在新能源大规模并网工况下,分析了构网型变流器稳定控制中的关键问题;最后,总结了现有研究的

主要结论,并针对研究和应用中存在的问题,讨论了现有构网型变流器稳定性研究的不足,为构网型变流器稳定运行提供指导。

## 1 构网型变流器模型与分析方法

### 1.1 变流器本体模型

变流器由电力电子器件构成,承担着连接新能源与电网的作用,呈现典型的非线性特性<sup>[30-32]</sup>,结构及其与同步机的等效关系如图1所示。

图1中, $U_{dc}$ 为变流器直流侧电压, $e_i(i=a, b, c)$ 表示三相)为变流器桥臂中点电压, $L_s$ 、 $C_s$ 为变流器输出端LC滤波电路, $u_{ti}$ 为变流器端电压, $L_{gi}$ 为变流器至PCC点的线路阻抗, $u_{gi}$ 为电网电压。

新能源侧并联大电容,以变流器为研究对象时,不考虑新能源侧波动,用恒定电压源等效。PCC点至电网部分的电路模型及相量关系如附录A图A1所示, $I_g$ 为电网电流, $U_t$ 为PCC点电压, $U_g$ 为电网电压,以电网电压角度定向, $\delta$ 为PCC点电压与电网电压间的夹角,称之为功角, $Z_g$ 为线路阻抗, $\alpha$ 为阻抗角。传输有功、无功分别为 $P_e$ 、 $Q_e$ 。

由PCC点流入电网的有功、无功功率为:

$$\begin{cases} P_e = \frac{U_t^2 \cos \alpha - U_t U_g \cos(\alpha + \delta)}{Z_g} \\ Q_e = \frac{U_t^2 \sin \alpha - U_t U_g \sin(\alpha + \delta)}{Z_g} \end{cases} \quad (1)$$

若不考虑传输线上的电阻,则式(1)可进一步简化为:

$$\begin{cases} P_e = \frac{U_t U_g \sin \delta}{X_g} \\ Q_e = \frac{U_t^2 - U_t U_g \cos \delta}{X_g} \end{cases} \quad (2)$$

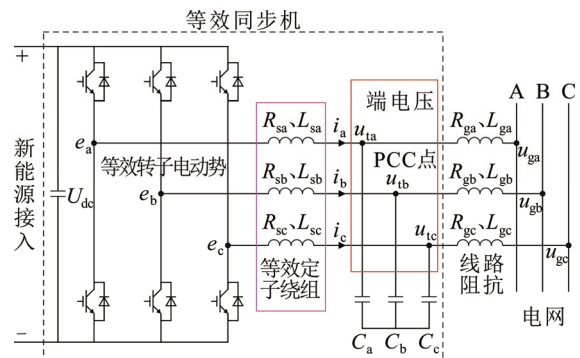


图1 变流器等效示意图

Fig.1 Equivalent topology of converter

以同步机定子侧方程为原型, 建立构网型变流器的电气方程, 如式(3)所示。

$$u_i = e_i - R_s i_i - L_s \frac{di_i}{dt} \quad (3)$$

为简化控制环节, 将变流器的方程关系从静止 abc 坐标系转化至旋转 dq 或静止 αβ 坐标系, abc 坐标系与 dq、αβ 坐标系的空间关系如附录 A 图 A2 所示, 其中 ω 为坐标系旋转角速度。旋转 dq 坐标系以电网电压  $u_g$  为 d 轴定向, 将物理量分解的 dq 分量作为直流量, 便于控制。同理, 也可将物理量分解至静止 αβ 坐标系, 所得 αβ 分量为交流量, 将被控量减少至 2 个。

转换至 dq、αβ 坐标系中的变流器电气方程如式(4)、(5)所示。

$$\begin{cases} L_s \frac{di_d}{dt} = L_s \omega i_q - R_s i_d + e_d - u_g \\ L_s \frac{di_q}{dt} = -L_s \omega i_d - R_s i_q + e_q \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} L_s \frac{di_\alpha}{dt} = -R_s i_\alpha + e_\alpha - u_{o\alpha} \\ L_s \frac{di_\beta}{dt} = -R_s i_\beta + e_\beta - u_{o\beta} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $i_d$ 、 $i_q$  分别为电流的 d 轴、q 轴分量。

在 dq 坐标系中, 控制量均为直流量, 便于设计 PI 控制器, 但 dq 控制环节间存在耦合, 需要附加控制环节, 实现 dq 环节解耦控制<sup>[33-34]</sup>。

## 1.2 构网型控制策略模型

构网型变流器的总体控制逻辑如图 2 所示。将并网系统中的电流(并网变流器在 abc 坐标系下的输出电流)与公共连接点(point of common coupling, PCC)电压作为功率计算环节输入, 实时计算功率, 在功率同步环节中对设定值的跟踪, 输出电压幅值与相位的参考值。内环控制实现对电压的控制, 经脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)生成开关管驱动信号, 最终实现对变流器的控制。构网型的典型特征在于功率同步环节, 该环节也是区分构网型与跟网型控制的关键<sup>[35-36]</sup>。

文献[12]提出了构网型变流器功率同步环节的统一表达式, 如式(6)所示。其中,  $\Delta\omega$ 、 $\Delta U$ 、 $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  分别表示对立变量实际值与参考值的偏差。基于该统一表达式, 对构网型变流器大扰动性能作进一步分析。

$$\begin{cases} \Delta\omega = \frac{A}{s+B} \Delta P \\ \Delta U = \frac{C}{s+D} \Delta Q \end{cases} \quad (6)$$

式中: 参数 A、B、C、D 的取值及同步环节对应关系如表 1 所示; 其中,  $K_p$ 、 $K_q$  为下垂系数;  $\omega_p$ 、 $\omega_q$  为 LPF 截止频率; J、 $D_p$  分别为有功控制环节的惯量、阻尼控制系数;  $\tau$ 、 $D_q$  分别为无功控制环节的比例、反馈控制系数; s 为拉氏微分算子。

经典下垂控制, 有功同步控制环表达式:

$$\Delta\omega = K_p \Delta P \quad (7)$$

角速度与虚拟功角之间存在微分关系, 转换至频域得:

$$\Delta\omega = \Delta\delta s \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得:

$$\Delta\delta = K_p \Delta P / s \quad (9)$$

由式(9)可知, 经典下垂控制呈现 1 阶特性。不同参数取值下, 控制系统阶跃响应如附录 A 图 A3 所示, 动态过程无超调。

对于 LPF 下垂控制与 VSG 控制, 参数取值均为实数, 具有类似的响应特性。

将式(9)代入式(8)得:

$$\Delta\delta = \frac{A}{s^2 + Bs} \Delta P \quad (10)$$

控制环节传递函数为:

$$G(s) = \frac{A}{s^2 + Bs} \quad (11)$$

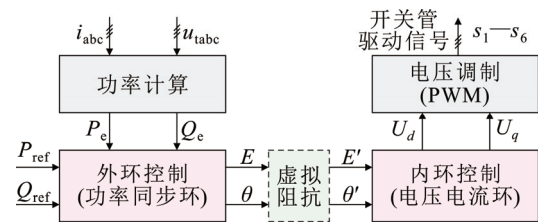


图 2 构网型变流器控制环节简图

Fig.2 Simplified topology of controller in grid-forming converter

表 1 式(6)中参数取值

| 参数 | 取值                 |                |            |
|----|--------------------|----------------|------------|
|    | 经典下垂               | LPF 下垂         | VSG 控制     |
| A  | $K_p \cdot \infty$ | $K_p \omega_p$ | $1/J$      |
| B  | $\infty$           | $\omega_p$     | $D_p/J$    |
| C  | $K_q \cdot \infty$ | $K_q \omega_q$ | $1/\tau$   |
| D  | $\infty$           | $\omega_q$     | $D_p/\tau$ |

控制系统呈现 2 阶特性，其动态响应特性与系统阻尼比、自然振荡角频率有关。不同参数取值下，系统阶跃响应如附录 A 图 A4 所示，可见动态响应与控制系统参数取值有关，欠阻尼下系统存在超调。

1.3 扰动分析方法

变流器呈现多尺度、高阶、切换特征<sup>[37-39]</sup>，在不同程度的扰动下，需采用合适的分析方法。不同分析方法的适用场景及优缺点对比如表 2 所示。

小扰动情况下，由于各控制环节之间的耦合，变流器常出现宽频振荡现象。针对宽频振荡现象，通常采用状态空间法<sup>[40-41]</sup>、阻抗法<sup>[42-43]</sup>等进行分析，其中状态空间法在静态工作点处将系统近似线性化，但面对大规模变流器并网工况时，会引起“维数灾”<sup>[41,44]</sup>。阻抗法通过构建电压、电流小信号传递模型，在一定程度上降低了分析难度，但难以反映变流器内部特征，精度受建模颗粒度的影响较大<sup>[45-46]</sup>。

系统大扰动情况下，暂态行为复杂，分析方法主要包括时域仿真法与解析法。时域仿真法借助 PSCAD、Matlab/Simulink、PSASP、DIgSILENT 等仿真工具，划分为多个步长，在单步长内对系统分析，简化了分析过程，但分析结果与步长大小及模型精细度有很大关系<sup>[29,47]</sup>。解析法主要包括能量分析法与相轨迹法。能量函数法通过构建能量函数求解系统的暂态稳定特性<sup>[48-50]</sup>，但求解高阶能量函数存在难度，分析的精确性仍有待提高。相轨迹法构建了功角变化率与功角之间的关系式，由相轨迹可画出系统的稳定运行域<sup>[51-52]</sup>，但对于高阶系统，相轨迹表达式复杂，难以获得解析解。

2 构网型变流器控制作用分析

2.1 同步控制环节分析

构网型功率同步环节的惯量特性反映到并网系统的大扰动稳定性上，使得不同类型的构网型(1 阶、2 阶)变流器暂态特性产生差异。

1 阶构网型变流器的相轨迹如图 3(a)所示，描述的是功角  $\delta$  与功角变化率  $\dot{\delta}$  之间的关系。故障 I 存在平衡点  $c$  与  $c'$ ( $c$  为稳定平衡点， $c'$  为不稳定平衡点)，故障 II 不存在稳定运行点，故障深度高于故障 I。

故障发生前系统稳定运行在  $a$  点，发生故障 I 时，由于系统存在惯性， $\delta$  不发生突变，运行点由  $a$  点切换至  $b$  点。随后，沿着相轨迹无超调地收敛至稳定运行点  $c$ ，达到新稳态。发生故障 II 时，运行

表 2 扰动分析方法及其特性对比

Table 2 Analysis method and its characteristics in different disturbing conditions

| 工况  | 分析方法  | 优点                                         | 缺点                                    |
|-----|-------|--------------------------------------------|---------------------------------------|
| 小扰动 | 状态空间法 | 模型详细；<br>状态空间矩阵能够反映系统的有关特征                 | 模型复杂；<br>难以应用于大规模并网场景分析；<br>容易引起“维数灾” |
|     | 阻抗法   | 模型简单；<br>仅关注端口特性，建模过程简单；<br>可用于多变流器系统小扰动分析 | 模型精确度不高；<br>无法反映系统内部特征                |
| 大扰动 | 时域仿真法 | 能够定性分析高阶非线性系统的稳定性                          | 分析精度受建模精度与仿真步长影响较大                    |
|     | 能量分析法 | 数学上易于判断系统稳定性                               | 能量函数构建困难                              |
|     | 相轨迹法  | 直观反映系统相位与频率变化轨迹                            | 基于数值分析方法，<br>计算量庞大；<br>高阶系统解析计算困难     |

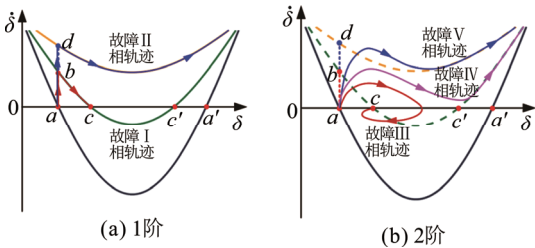


图 3 构网型变流器故障相轨迹

Fig.3 Phase locus of grid-forming converter

点由  $a$  切换至  $d$ ，故障严重导致系统不存在平衡点，系统发散而无法稳定运行。

2 阶构网型变流器的相轨迹如图 3(b)所示。图中实线为 2 阶相轨迹，虚线为 1 阶相轨迹。故障 III、IV 中，虽然故障相轨迹趋向于平衡点  $c$ ，但动态过程中  $\delta$  存在超调，若  $\delta$  超调量未越过  $c'$  点(对应于故障 III)，则系统动态过程后将稳定运行于  $c$  点；若  $\delta$  超调量越过  $c'$  点(对应于故障 IV)，系统发散，无法稳定运行。若故障后不存在平衡点(对应于故障 V)，则系统将有超调地趋近 1 阶相轨迹，但由于缺乏平衡点，因此最终无法稳定运行。

综上，功率同步环节的惯量特性会影响构网型变流器的暂态特性。不具有惯量的传统下垂控制不存在超调，扰动后若存在稳定平衡点，则系统将稳定运行于新的平衡点上，若不存在平衡点，则在极

限切除角前切除故障, 系统将回到稳定运行点。具有惯量的 LPF 下垂及 VSG 控制在扰动情况下存在超调。故障后即使存在平衡点, 也可能因为超调量越过不稳定平衡点而导致系统无法稳定运行。

## 2.2 电流限幅环节分析

当电网遭受大扰动, 电网电压  $U_g$  跌落瞬间, 构网型变流器端口电压  $U_t$  不发生突变, 导致功角  $\delta$  增大, 产生不平衡功率, 进而引起故障电流急剧升高, 如图 4 所示。变流器完全由电力电子器件构成, 过电流能力一般为额定电流的 1.3~1.5 倍<sup>[53]</sup>, 故障电流的瞬时冲击极易损坏变流器, 需要通过控制手段加以限制<sup>[12,54-55]</sup>。

常见的电流限幅策略如附录 A 图 A5 所示, 图中  $E$  为内电势幅值,  $\delta$  为功角, 电压限幅在功率环出口处直接限制电压参考值, 但该策略只限制稳态分量, 需要与其他限幅策略配合使用<sup>[56]</sup>。虚拟阻抗限幅通过改变变流器的输出阻抗来限制输出电流, 但虚拟阻抗影响变流器动态特性, 可能引起振荡<sup>[54]</sup>。电压电流双闭环控制存在电流环, 可以实现输出电流的控制, 一般采用电流限幅策略。电流限幅法简单直观, 控制简单, 响应速度快, 是目前应用最为广泛的一种电流限幅策略<sup>[57-59]</sup>。常见的 3 类限幅控制策略对比如表 3 所示。

电流限幅控制施加在内环控制中, 与内环控制策略相匹配<sup>[55]</sup>, 以直接电流限幅为例分析, 故障情况下电流限幅控制流程图如附录 A 图 A6 所示。直接电流限幅控制的数学关系如式(12)所示, 当电流幅值高于设定值, 限定电流控制环的输入。

$$\begin{cases} I'_{dref} = \min(I_{\max}, I_{dref}) \\ I'_{qref} = \min(\sqrt{I_{\max}^2 - I_{dref}^2}, I_{qref}) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\min(\cdot)$  表示取最小值;  $I_{\max}$  为电流限幅环节设定的  $d$  轴电流上限;  $I_{dref}$ 、 $I_{qref}$  分别为电流限幅环节前端输入电流;  $I'_{dref}$ 、 $I'_{qref}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电流限幅环节后输出的电流值。

当内环控制含有电流环时, 可直接在电流环前端设置电流限幅环节; 当内环控制不含电流控制环节时, 无电流环结构难以实现电流控制, 可采用电压限幅或虚拟阻抗限幅。

电流限幅环节动作前后, 构网型变流器输出有功分别:

$$P_e = \frac{EU_g \sin \delta}{X_s} = P_{em} \sin \delta \quad (13)$$

$$P_s = U_g I_{\max} \cos \delta = P_{sm} \cos \delta \quad (14)$$

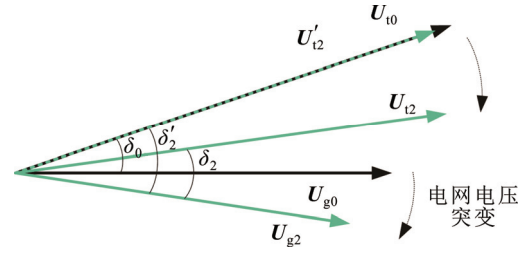


图 4 电压突变瞬间相量图

Fig.4 Phase diagram at the moment of sudden voltage change

表 3 构网型变流器电流限幅控制策略对比

Table 3 Comparison of current limiter in grid-forming converter

| 限幅控制策略 | 匹配的内环控制策略                     | 限幅策略优缺点                                            |
|--------|-------------------------------|----------------------------------------------------|
| 电压限幅   | 直接电压控制<br>单电压环控制<br>电压电流双闭环控制 | 优点: 适用范围广<br>缺点: 只能限制故障电流的稳态分量; 一般需要与其他限幅控制配合使用    |
| 虚拟阻抗限幅 | 单电压环控制<br>电压电流双闭环控制           | 优点: 适用范围广<br>缺点: 引入虚拟阻抗导致控制的动态特性变化; 对故障电流测量精确度要求较高 |
| 直接电流限幅 | 电压电流双闭环控制                     | 优点: 控制简单、可靠性高<br>缺点: 导致稳定裕度降低                      |

式中:  $P_e$  为电流限幅未动作时有功功率;  $P_s$  为电流限幅动作后有功功率;  $\delta$  为功角;  $E$  为变流器内电势;  $U_g$  为电网电压;  $X_s$  为输出端阻抗;  $P_m$  为有功幅值。

电流限幅动作后, 变流器输出电流被钳位, 本质上为定电流控制, 等效为电流源, 功角关系由正弦变为余弦<sup>[60]</sup>, 如附录 A 图 A7 所示。其中,  $\delta_0$  为正常运行时的功角,  $\delta_{cr}$  为临界角,  $S_1$  为电流限幅后最大可能减速面积,  $S_2$  为未触发电流限幅时最大可能减速面积。

电流限幅环节动作后, 最大可能减速面积明显减小, 导致构网型变流器的暂态稳定裕度下降。文献[61]研究表明电流限幅环节降低了故障期间构网型变流器的有功输出, 对暂态稳定性不利。

故障情况下构网型变流器的功角( $P$ - $\delta$ )曲线如图 5 所示。对于 1 阶构网型控制, 假设故障电流达到限幅环节设定值( $I_{dref} \geq I_{lim}$ ), 故障前后系统功角曲线如图 5(a)所示, 其中  $P_n$  为系统额定功率。假设故障发生前系统稳定运行在  $a$  点, 故障发生后触发电流限幅, 运行点突变至  $b$  点, 功角与有功呈现余弦关系, 如式(14)所示, 使得运行点沿限幅曲线无超

调地移动至  $c$  点。此时切除故障，运行点突变至  $d$  点，通过同步环节调整功角，系统稳定于新的运行点  $e$ 。

2 阶构网型变流器功角( $P$ - $\delta$ )曲线如图 5(b)所示。点  $d$ 、 $e$ 、 $f$ 、 $g$  围成的面积为  $S_1$ ，点  $a$ 、 $b$ 、 $c$  围成的面积为  $S_4$ 。 $S_1$ 、 $S_2$  分别为无限幅状态下减速、加速面积， $S_3$ 、 $S_4$  分别为限幅状态下减速、加速面积； $\delta_{c.\lim 1}$ 、 $\delta_{c.\lim 2}$  分别为无限幅、限幅状态下的极限切除角。其中，在极限切除角处满足加速面积等于减速面积，即  $S_1=S_2$ ， $S_3=S_4$ 。故障切除时，只有当切除时刻功角小于等于极限切除角时，系统才能维持暂态稳定。

不同类型的构网型变流器大扰动稳定特性及故障切除时刻对暂态稳定性的影响总结见表 4。

2.3 控制环节阻抗特性

当构网型变流器遭受小扰动时，控制环节的耦合关系容易引起宽频振荡。按照宽频振荡发生的频段，可划分为低频振荡(0.1~2.5 Hz)、次同步振荡(2.5~50 Hz)、工频振荡(50 Hz 附近)、超同步振荡(50~100 Hz)、高频振荡(100 Hz 以上)<sup>[44,62]</sup>，如附录 A 图 A8 所示。

利用阻抗法对宽频振荡现象分析，变流器的阻抗模型可理解为同步环节阻抗及其他环节阻抗(包括虚拟阻抗、电压环阻抗、电流环阻抗等)共同作用，控制环节总阻抗等效为多部分阻抗串并联<sup>[63]</sup>。附录 A 图 A9 展示了电压小信号  $\hat{u}$  至电流小信号  $\hat{i}$  的传递过程，传递关系由小信号间的阻抗反映，通过阻抗特性反映系统宽频振荡风险。其中， $H_1(s)$  为电压扰动及忽略同步环节动态时的传递函数，产生功率小信号  $\hat{P}$ ， $H_2(s)$ 、 $H_4(s)$  为同步环节传递函数，功率小信号经过同步环节产生同步角小信号  $\hat{\theta}$ ，经过  $H_3(s)$  坐标变换与  $H_5(s)$  电压环控制叠加得到电压环输出小信号  $\hat{u}_i$ ，最终经过  $H_6(s)$  电流环控制，得到电流小信号  $\hat{i}$ 。

跟网型、构网型变流器的阻抗特性对比如图 6 所示。从幅频特性看，低频段及中频段跟网型的幅频特性高于构网型，而在高频段由于滤波环节作用明显，使得两者的幅频特性相近。从相频特性看，跟网型低频段与次同步频段呈现感性，但超同步与高频段呈现容性；构网型在低频段与次同步频段呈现弱容性，超同步与高频段呈现感性，与跟网型特性呈现迥异的相频特性。1 阶构网型与 2 阶构网型阻抗特性类似，仅在工频段附近存在差异。

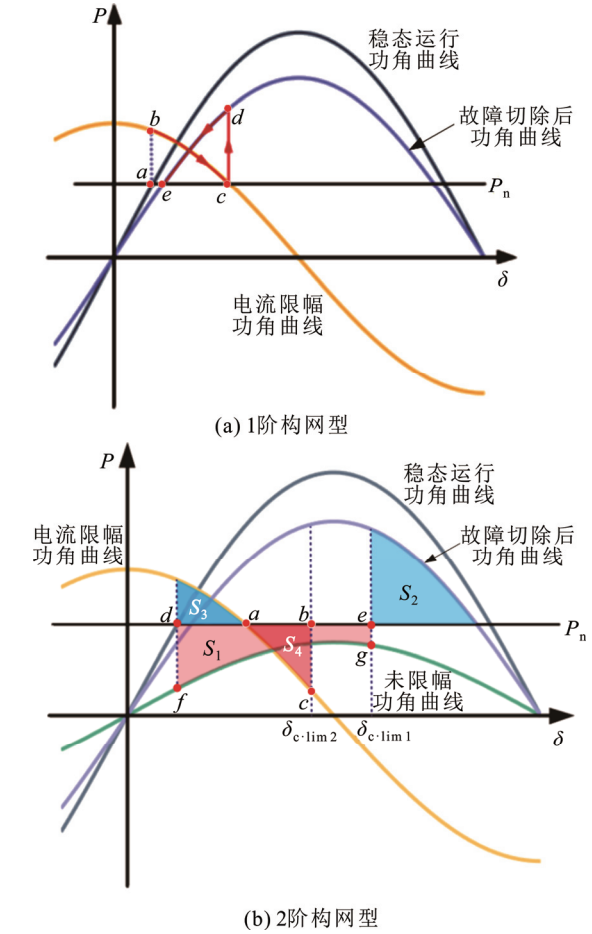


图 5 电流限幅动作条件下构网型变流器暂态过程  
Fig.5 Transient response of grid-forming converter under faults when current limiter works

表 4 构网型变流器大扰动稳定特性

| Table 4 Stability behavior of grid-forming converter under big disturbance |                        |                 |                 |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|
| 控制类型                                                                       | 未触发电流限幅时的稳定特性          |                 | 触发电流限幅时的稳定特性    |
|                                                                            | 有平衡点                   | 无平衡点            |                 |
| 1 阶构网型控制                                                                   | 不切除故障能够稳定运行于新的平衡点      | 可能失稳(需要合适的切除时机) | 稳定运行            |
| 2 阶构网型控制                                                                   | 可能失稳(超调量越过不稳定平衡点会引起失稳) | 可能失稳(需要合适的切除时机) | 可能失稳(需要合适的切除时机) |

变流器控制环节的阻抗特性受控制参数的影响，文献[64]通过优化有功控制环阻尼参数，防止系统呈现负阻尼特性。同时，构网型变流器的内环控制(电压环)响应速度也影响系统的阻尼特性，文献[65]通过提升电压环响应速度，降低了系统低频段的负阻尼特性。文献[66]研究表明，将电压环引入电压等级低、电网强度低的系统中，有利于提升次同步频段稳定性。通过增大电压环 PI 比例系数、

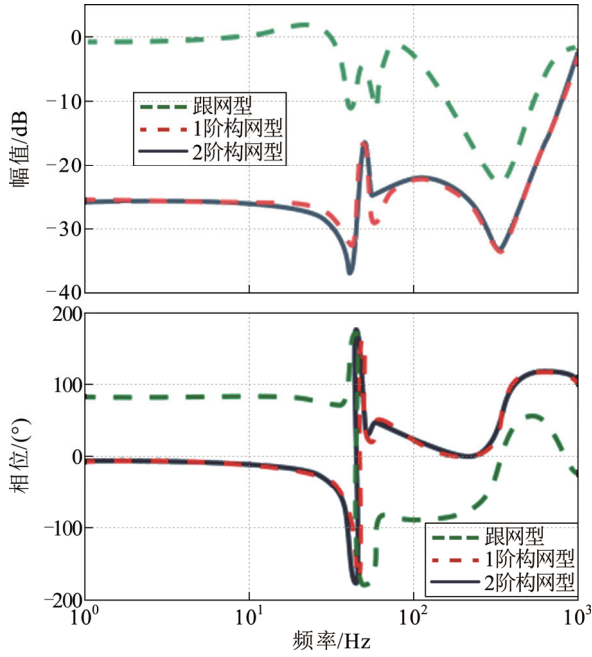


图6 跟网型、构网型总体阻抗特性对比

Fig.6 Impedance characteristics of grid-following and grid-forming converters

减小控制环节积分系数, 可以提升系统低频段的稳定性<sup>[67]</sup>。

### 3 构网型变流器动态与稳定特性

#### 3.1 惯量动态特性

当同步机机端电压与系统电压恒定时, 机端电压与系统电压存在角度  $\delta$ , 称为功角, 传统同步机向系统输送的有功功率如式(15)所示。

$$P_e = \frac{E_0 U_g}{X_g} \sin \delta \quad (15)$$

式中:  $E_0$  为同步机机端电压;  $U_g$  为电网电压;  $X_g$  为电网阻抗。

在相量图中, 功角  $\delta$  反映了同步机转子与系统等效同步机转子之间的相对位置。在系统平衡状态下, 同步机转子与系统等效转子间保持相对静止, 角度差为  $\delta$ , 同步机与系统保持同步状态运行。同步机内部结构及其对应的时-空矢量图如附录 A 图 A10 所示, 施加在同步机转子上的原动机机械转矩为驱动转矩, 而定转子之间的电磁转矩为制动转矩, 在忽略其他附加转矩的情况下, 同步机转子上的机械转矩与电磁转矩平衡。

当系统出现频率扰动时, 同步机功角特性如图 7(a)所示。系统电压由  $U_{g0}$  变化至  $U_{g1}$ , 由于同步转子具有惯量, 短时间内无法对功角变化作出响应,

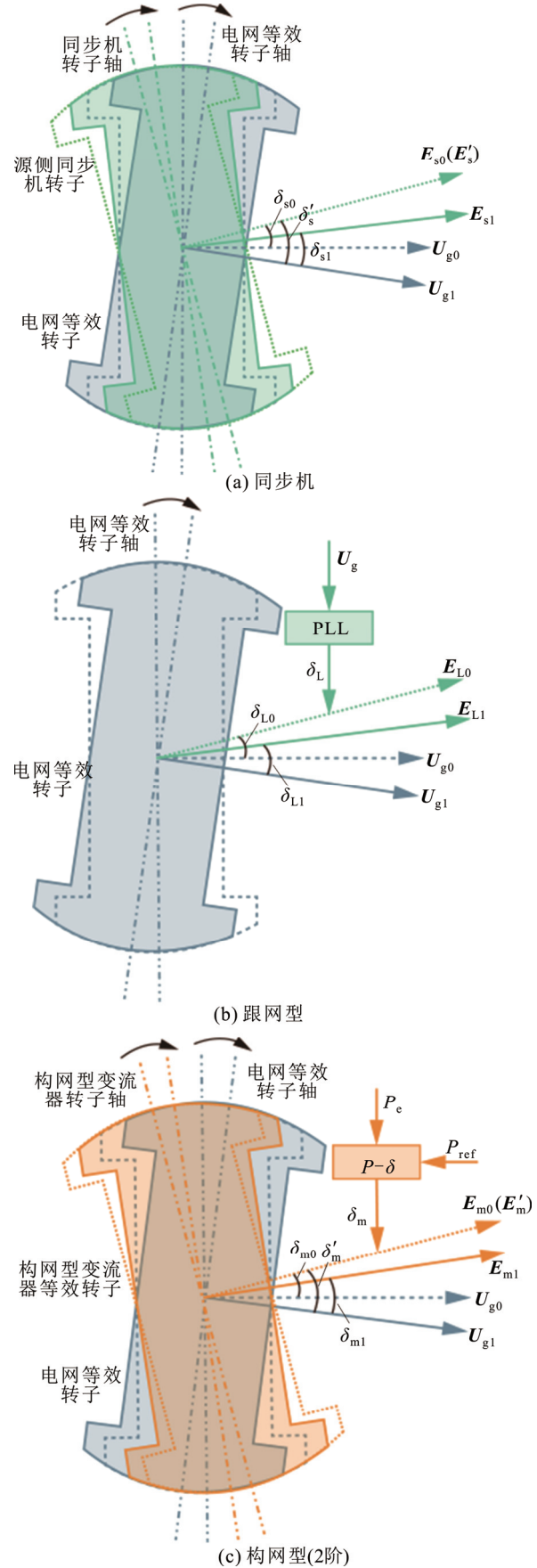


图7 电网电压突变时变流器端口电压暂态响应

Fig.7 Transient response of terminal voltage in converter under the condition of sudden change in grid voltage

电动势  $E'_s$  仍然保持不变, 导致系统功角增大为  $\delta'_s$ , 而电网电压跌落对功率变化影响大于功角变化, 进而引起同步机电磁功率  $P_e$  减小, 即电磁转矩  $T_e$  减小。而此时原动机输入功率  $P_m$  不变, 即机械转矩  $T_m$  不变, 从而导致同步机转子加速, 直至机械转矩与电磁转矩平衡, 此时功角  $\delta_{s1} = \delta_{s0}$ , 系统重新回到平衡状态。

变流器由电力电子器件构成, 与同步机相比不具有旋转机械部分, 其功角特性由控制环节模拟。其中, 跟网型依赖锁相环(phase-locked loop, PLL), 不具备惯量特性, 紧紧跟随电网电压变化; 而构网型变流器模拟同步机的有关特性, 其中 1 阶构网型控制不具备惯量特性, 暂态过程极短, 可近似忽略。2 阶构网型控制模拟同步机转子 2 阶运动方程, 具备同步机的惯量特性, 存在暂态过程, 功角不完全跟随电网状态变化<sup>[12]</sup>。

跟网型、构网型变流器的暂态响应过程分别如图 7(b)、(c)所示, 稳态工况下电网电压为  $U_{g0}$ , 跟网型变流器内电势为  $E_{L0}$ , 功角为  $\delta_{L0}$ ; 构网型变流器内电势为  $E_{m0}$ , 功角为  $\delta_{m0}$ 。

当系统出扰动时, 在跟网型控制下, PLL 跟踪电网电压变化, 使得功角  $\delta_L$  保持恒定, 如图 7(b)所示, 电网电压由  $U_{g0}$  变化为  $U_{g1}$  时, 跟网型变流器内电势随之由  $E_{L0}$  变化为  $E_{L1}$ , 功角  $\delta_{L1} = \delta_{L0}$ , 暂态过程很短, 几乎不存在功率不平衡状态。

构网型变流器由于惯量特性的作用, 在电网电压发生突变的瞬间, 内电势仍然保持在  $E'_m$ , 此时功角增大为  $\delta'_m$ , 导致变流器有功输出减小, 功率平衡性被打破。功率同步环节调节有功输出直至满足  $P_e = P_{ref}$ , 功角  $\delta_{m1} = \delta_{m0}$ , 并网系统重新达到功率平衡。

与同步机相比, 虽然构网型变流器不具备机械转子, 但同步环节的模拟惯量使得构网型变流器与即同步机的功角动态行为类似, 通过改变控制参数, 可灵活调节惯量响应速度。与跟网型变流器相比, 构网型变流器的惯量特性使得电网电压突变时, 内电势无法跟随电网电压变化, 存在过渡过程<sup>[18,68-69]</sup>。

3.2 故障电流特性

同步机在短路发生瞬间维持各相绕组磁链不变, 在复杂的电磁感应作用下, 定子绕组中存在基频、二倍频以及直流 3 类短路电流分量, 如附录 A 图 A11 所示。

其中, 直流分量是由转子绕组自由直流所产生的磁通在定子绕组中感应生成, 倍频分量是为了补

偿转子旋转所产生的等效磁阻变化而生成的。基频分量中包括一部分衰减分量与一部分周期分量, 衰减基频分量、直流分量与倍频分量统称为同步机短路电流的自由分量, 呈现指数级衰减, 衰减时间常数由定子电感与电阻之比决定。

变流器由电力电子器件构成, 不含电磁元件, 几乎不存在电磁感应现象, 故障电流产生机制与同步机存在本质差别。

跟网型变流器通过 PLL 与电网保持同步, 外特性等效为电流源, PLL 与电流环动态特性对跟网型变流器短路电流特性存在较大影响。在不考虑 PLL 动态时, 跟网型变流器短路电流分量如式(16)所示, 短路电流包括工频周期分量与工频衰减分量。当考虑 PLL 动态响应时, 短路电流如式(17)所示, 衰减分量不再为工频, 而是转变为谐波衰减分量, 谐波频率与 PLL 参数有关<sup>[70-71]</sup>。其中,  $m$  为各分量幅值,  $\omega$  为各分量的角速度(包括工频分量与谐波分量),  $\theta$  为各分量的初相位,  $\tau$  为自由分量的衰减时间常数。

$i_{k1-GFL} = m_0 \sin(\omega_0 t + \theta_0) + m_1 \sin(\omega_0 t + \theta_1)e^{-t/\tau_1}$  (16)

$i_{k2-GFL} = m_0 \sin(\omega_0 t + \theta_0) + m_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1)e^{-t/\tau_1}$  (17)

构网型变流器机端短路情况下, 短路电流表达式由文献[72]给出, 如式(18)所示。

$i_{k-GFM} = m_0 \sin(\omega t + \theta_0) + m_1 e^{-t/\tau_1} + m_2 \sin(2\omega t + \theta_1)e^{-t/\tau_1} + m_3 \sin(\omega t + \theta_2)e^{-t/\tau_2}$  (18)

同步机、构网型变流器、跟网型变流器短路电流分量总结如表 5 所示。构网型变流器的短路电流分量与同步机类似, 存在基频、倍频以及直流等 3 类分量, 其中, 基频分量包括衰减的基频分量以及周期性基频分量。衰减的基频分量、倍频分量及直流分量统称为非周期分量。其中, 直流分量与二倍频交流分量以相同的时间常数衰减, 而工频分量的衰减时间常数与之存在差异。

表 5 短路电流分量对比

| Table 5 Comparison of short-circuit current components |                                 |                       |                                 |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 指标                                                     | 同步机                             | 跟网型变流器                | 构网型变流器                          |
| 短路电流分量及特性                                              | 基频分量(衰减、周期), 直流分量(衰减), 倍频分量(衰减) | 基频分量(周期、衰减), 谐波分量(衰减) | 基频分量(衰减、周期), 直流分量(衰减), 倍频分量(衰减) |
| 自由分量衰减时间                                               | 由定子绕组阻感比决定, 一般不可调节              | 由 PLL 控制参数决定, 可调节     | 由惯量、阻尼等控制参数决定, 可调节              |
| 各分量幅值                                                  | 由同步机制造参数决定, 一般不可调节              | 由控制参数决定, 可调节          | 由控制参数决定, 可调节                    |

同步机的短路电流分量及衰减时间常数由同步机的定转子物理量决定, 在同步机制造时已经决定, 难以轻易更改。而构网型变流器短路电流各分量的幅值及自由分量的衰减时间常数与控制参数密切相关, 通过改变控制参数可对自由分量衰减时间以及所有分量的幅值进行调节<sup>[73]</sup>。

3.3 宽频振荡特性

同步环节阻抗特性如图 8(a)所示, 从幅频特性来看, 跟网型幅值远高于构网型变流器, 这是由于跟网型反映  $d$  轴电压至同步角的传递关系, 构网型

反映功率至同步角的传递关系, 两者幅值差近似等于电流大小<sup>[63]</sup>。同步环节均在  $f_n \pm f_c$  处出现谐振峰, 关于工频对称, 其中  $f_n$  为工频,  $f_c$  为谐振峰。从相频特性来看, 跟网与构网特性相反, 1 阶、2 阶构网的相频特性相近, 但 2 阶构网型的变化幅度更小。

电压电流环阻抗特性如图 8(b)所示。从幅频特性来看, 由于交流电压环的存在, 导致构网型阻抗小于跟网型。随着频率的提高, 电压环特性减弱, 电流环作用明显, 使得构网型与跟网型阻抗幅频特性相近。从相频特性来看, 由于交流电压环的叠加作用, 构网型在次同步频段呈现容性, 在超同步频段呈现感性, 恰好与跟网型特性相反。跟网型、构网型变流器典型环节阻抗特性总结如表 6 所示。

将构网型变流器阻抗特性近似分解为阻抗支路 I 与阻抗支路 II 并联, 如附录 A 图 A12 所示。1 阶、2 阶构网型控制支路的阻抗特性分别如图 9(a)、(b)所示。可以看出, 2 类构网型控制阻抗支路 II 特性一致, 阻抗支路 I 相位与幅值存在差异, 但总体趋势保持一致。从图 9 可以看出, 构网型控制同步环节阶数差异主要影响容性负阻尼范围与曲线的凹陷程度。

变流器的宽频振荡不仅可能由自身控制环节引起, 还可能在接入电网后与电网线路、串补设备等动态交互产生振荡。构网型变流器并网简化模型如附录 A 图 A12 所示, 并网工况下全频段阻抗特性见图 10。

构网型变流器并网模型可简化为电压源  $U_s$  与变流器等效阻抗  $Z_{GFM}$  串联, 电网可等效为电压源

表 6 跟网型、构网型各环节阻抗特性

Table 6 Impedance characteristics of controller in grid-following and grid-forming converters

| 控制策略 | 同步环节                                        |                                                            | 电压电流环                 |                                  |
|------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
|      | 幅频特性                                        | 相频特性                                                       | 幅频特性                  | 相频特性                             |
| 跟网型  | 幅值高于构网型; 关于工频对称; 对称谐振峰                      | 低频段呈现感性; 高频段呈现容性; 关于工频对称; 谐振峰处出现相位突变                       | 低频段幅值高于构网型; 高频段两者幅值相近 | 低频段呈现感性; 超同步呈现容性; 高频段趋势与构网型相近    |
| 构网型  | 幅值低于跟网型; 关于工频对称; 对称谐振峰; 1 阶构网型幅值略高于有 2 阶构网型 | 低频段呈现容性; 高频段呈现感性; 关于工频对称; 谐振峰处出现相位突变; 2 阶构网型相位变化远小于 1 阶构网型 | 低频段幅值低于跟网型; 高频段两者幅值相近 | 低频段呈现弱容性; 超同步频段呈现感性; 高频段趋势与跟网型相近 |

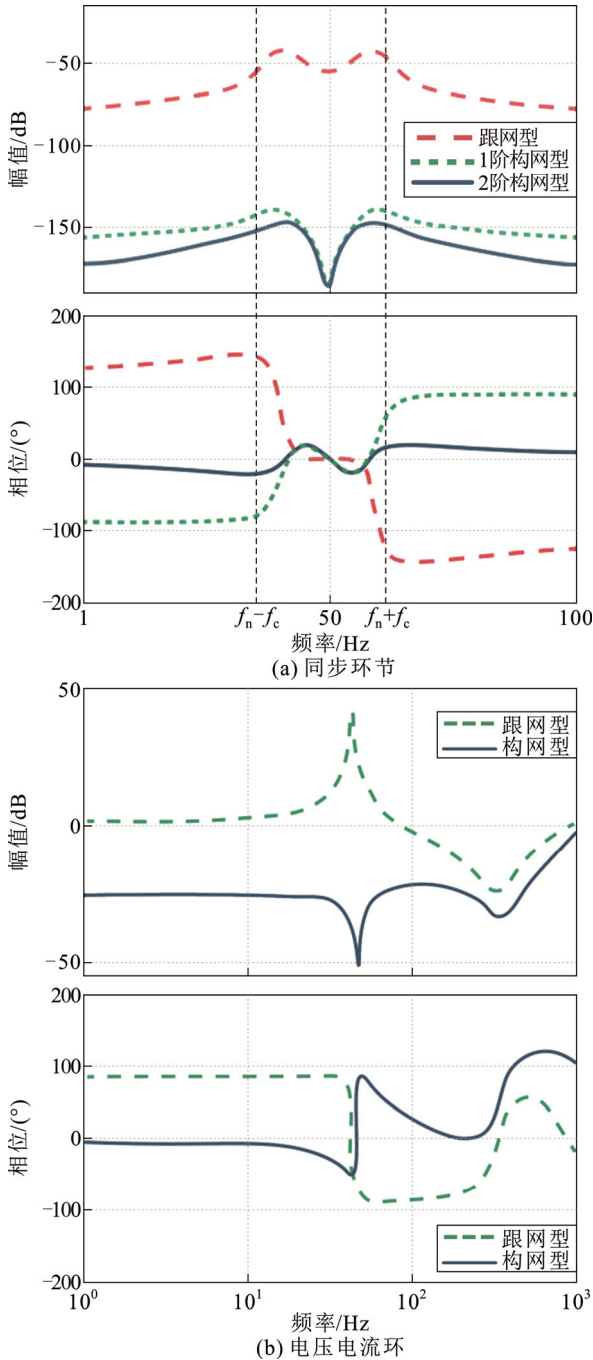


图 8 典型控制环节阻抗特性

Fig.8 Impedance characteristics of typical controller

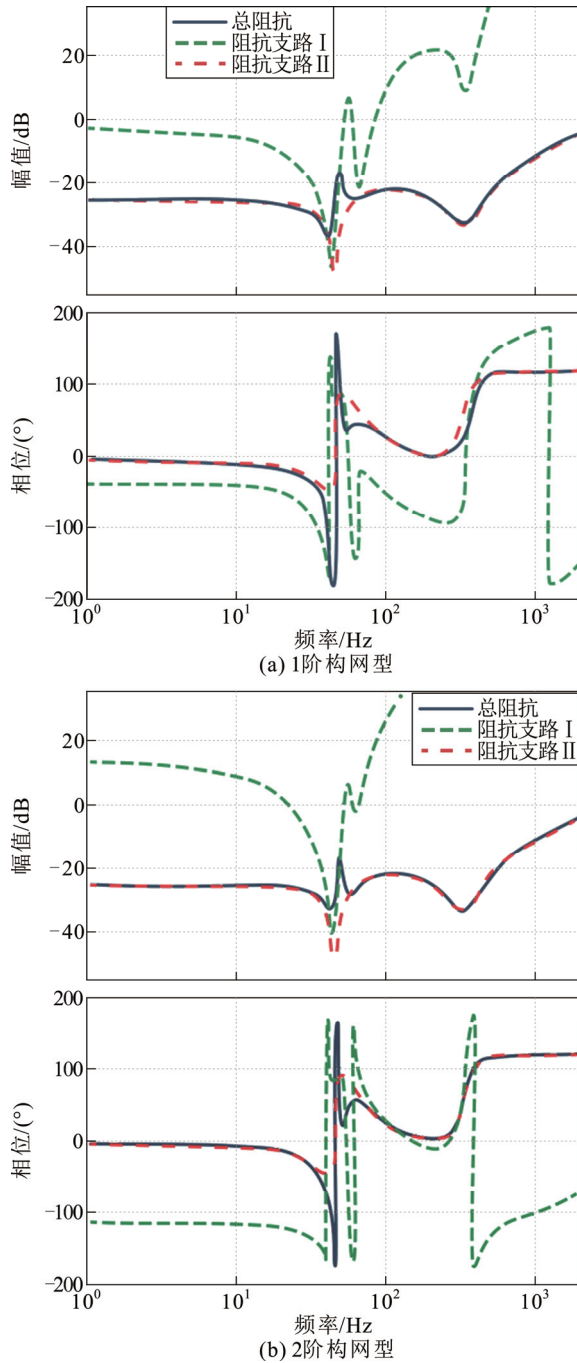


图9 1阶、2阶构网型阻抗特性对比

Fig.9 Impedance characteristics of first and second order grid-forming converter

$U_g$ 与电网阻抗 $Z_g$ 串联。电网短路比(short circuit ratio, SCR) $k$ 反映了电网强弱, SCR与电网阻抗之间的关系如式(19)所示。随着电网阻抗的减小, 电网强度随之增加, 对应于图10中的 $Z_{gI}$ — $Z_{gIII}$ 。IEEE标准中根据电网SCR的大小划分电网强度, 认为 $SCR > 3$ 的为强电网,  $SCR < 3$ 的为弱电网。

$$k = \frac{1}{Z_g} \quad (19)$$

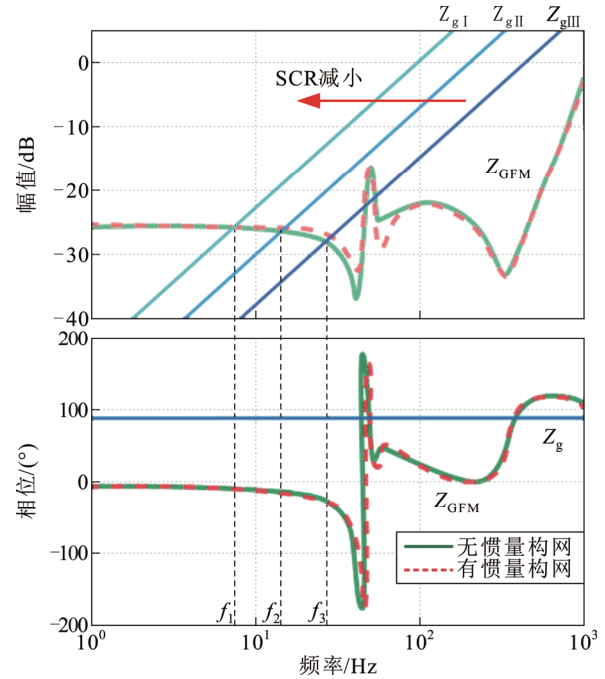


图10 构网型等效阻抗波特图

Fig.10 Bode plot of controller in grid-forming converter

构网型变流器输出电流表达式为:

$$I_s = \frac{U_s - U_g}{Z_g} \cdot \frac{1}{1 + Z_{GFM} / Z_g} \quad (20)$$

由式(20)可知, 并网稳定的条件为 $Z_{GFM}/Z_g$ 满足Nyquist判据, 即 $|Z_{GFM}/Z_g| \leq 1$ 。图10中, 随着SCR的降低,  $Z_g$ 随之左移, 与 $Z_{GFM}$ 的交点也随之左移, 满足Nyquist判据的区域逐步增大, 表明构网型变流器在弱电网的稳定特性优于强电网工况。无论电网强度如何, 构网型变流器低频段阻抗始终高于电网阻抗, 无法满足Nyquist稳定判据, 因此构网型变流器低频振荡风险较高。

在实际并网系统中, 文献[74]研究表明, 较小的惯性时间系数以及阻尼系数会使得连接至串补线路的构网型变流器产生次同步振荡。通过电压补偿和附加阻尼控制, 在不改变原有控制基本特性的情况下, 提升电网次同步频段阻尼, 能够降低系统次同步振荡风险[74-75]。功率环有功、无功的耦合, 降低了系统的增益裕度, 通过增大无功环系数、增加有功环惯量, 可以减小功率环的耦合效应, 从而提升工频段稳定性[76]。

## 4 构网型变流器大规模并网应用

### 4.1 不同电网强度下适应性

相较于网型变流器, 构网型变流器在弱电网下

的稳定性较好, 次同步振荡风险不高, 弱电网下具有较好的稳定性。然而构网型变流器在强电网下低频振荡风险高, 跟网型变流器在强电网下稳定性较好。文献[77]在传统跟网型新能源场站中增加构网型配比, 提升弱电网下的稳定性。文献[78]提出评估并网稳定性的临界短路比指标, 通过合理配置跟网型与构网型变流器, 实现不同电网强度下并网系统小扰动稳定性的提升。

在全跟网型新能源场站中部分跟网型变流器不改变变流器结构的情况下, 通过更改控制策略将其转变为构网型变流器。混合并网系统示意图及等效三端口网络如附录 A 图 A13 所示。对比全跟网型变流器(0%)及不同构网型变流器占比(20%、50%)情况下新能源场站的总阻抗特性, 对比结果如图 11 所示。将构网型变流器阻抗与电网阻抗并联等效, 如图 11 中虚线所示。可以看出, 构网型变流器的接入改变了电网阻抗在次、超同步频段的阻抗特性。随着构网型变流器比例的增加, 等效阻抗的曲线更为接近构网型阻抗曲线, 使得超同步频段和高频段的阻抗幅值明显下降, 与跟网型变流器的焦点右移或消失, 降低了新能源场站的振荡风险<sup>[63]</sup>。

#### 4.2 计及耦合的控制稳定性

控制环节的耦合在变流器控制环节内部、并网设备间、多变流器间均存在。在并网系统中, 构网型变流器在某些频段下的阻抗特性可能与电网中的设备产生谐振, 引发振荡。文献[79]指出构网型变流器工频振荡产生的原因是构网型变流器的闭环增益包含一对共轭极点, 而极点位置与电网阻抗有关, 在共轭节点附近将会出现谐振峰并引起相位跳变, 进而在工频附近发生振荡现象<sup>[79]</sup>。而有功无功控制支路的耦合关系增强了谐振现象, 降低了系统增益裕度。

文献[80]通过阻抗法研究表明, 相较跟网型单机并网系统, “跟网+构网”混联并网系统的次同步振荡风险明显降低。构网型变流器具有“正电阻+电感”特性, 与跟网型变流器的“负电阻+电容”特性相消, 避免了变流器与电网构成负阻尼振荡电路。对比不同构网型变流器占比的混联系统阻抗特性, 发现构网型变流器占比提升将改善次同步频段下系统振荡阻尼, 但对系统振荡频率几乎无影响。文献[78]从控制环节层面对变流器稳定性作出分析, 系统低频振荡模态由电流环状态变量造成, 跟网型变流器占比升高时, 不利于系统的稳定, 本质是因为过大的电流引发了 PLL 失稳。同时, 文献[82]

提出适当提高构网型变流器的阻尼与惯量系数, 能够改善系统的小扰动稳定性。

#### 4.3 多变流器稳定性问题

大电网中构网型与跟网型变流器混联工况下, 各变流器通过网络耦合, 网络中任何单一元素的变化, 都有可能影响变流器的控制稳定性, 使得变流器的稳定特性发生变化。变流器稳定性分析层级关系及主要耦合关系如图 12 所示。

文献[81]研究表明跟网型变流器在故障期间注入大量  $d$  轴电流, 会降低跟网型变流器的暂态同步

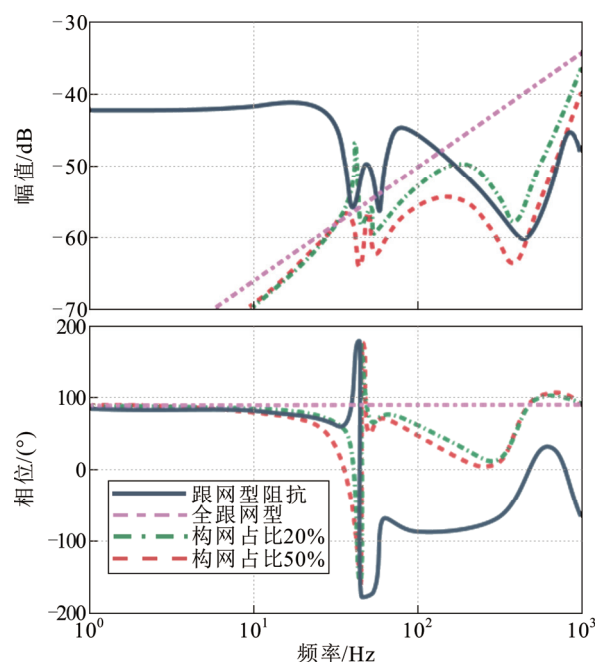


图 11 不同构网型占比下系统阻抗特性

Fig.11 Impedance characteristics of system under different proportion of grid-forming converter

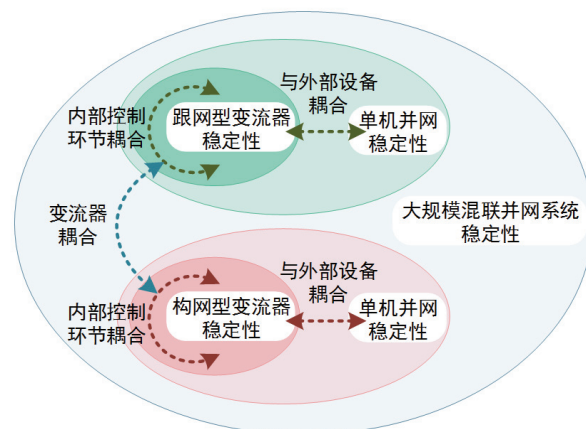


图 12 稳定性分析层级关系

Fig.12 Different aspects of stability analysis in grid-connected converter

稳定性。此外,减少构网型变流器的有功注入,也能够改善混联系统同步稳定性。

文献[82]研究了配备构网型储能的跟网型风机同步稳定性,研究表明构网型储能能够在故障期间牵引跟网型风机的频率,保持系统频率同步,但在电压大幅跌落时,跟网型风机向构网型储能注入有功,可能造成构网型储能功角失稳。

文献[83]指出混联系统中,构网型变流器端电压越高,跟网型与构网型变流器的耦合程度越强,有利于系统的功率同步。而故障情况下,跟网型变流器注入纯无功电流将提升构网型变流器输出功率,进而提升构网型变流器的暂态稳定性,但会使得跟网型变流器自身的暂态稳定性变差。因此,需要合理调配故障情况下跟网型变流器注入的有功无功电流的配比。

由于故障情况下,构网型变流器无法对输出电流控制,导致故障电流增加,进而威胁变流器的安全。文献[84-86]提出在故障情况下,由构网型控制切换为低电压穿越控制。以上文献中所提的低电压穿越控制本质上是一种电流控制策略,能够有效减小故障冲击电流。但控制策略切换时,需要保证切换前后输出相位同步,文献[84]采用预同步控制策略,实现正常/故障两种控制策略的平滑切换。

## 5 结论

构网型变流器的物理本质为电压源,能够为系统提供惯量与阻尼支撑,具有广阔的应用前景。本文针对扰动情况下,构网型变流器的控制性能与稳定特性进行综述与研究,主要结论如下:

1) 构网型控制模型可用统一表达式阐述,其中1阶构网型控制环节无超调,不存在惯量,2阶构网型有超调,存在惯量,两者惯量特性导致暂态功角特性存在差异。

2) 控制环节决定了构网型变流器的稳定性,内环控制策略与电流限幅策略相匹配,电流限幅环节动作导致系统功角关系由正弦切换至余弦特性,功角稳定裕度减小。变流器宽频振荡特性由控制环节的阻抗特性决定。

3) 惯量特性使得构网型变流器与同步机具有相似的功角特性,与跟网型变流器呈现不同的功角特性。构网型变流器故障电流分量与同步机类似,但衰减时间常数及各分量幅值与控制参数相关,自由度相对较高。

4) 构网型变流器短路电流分量与同步机类似,由周期分量与自由分量构成。通过改变控制环节参数,可调节构网型变流器自由分量衰减速度及短路电流各分量幅值。

5) 构网型变流器在弱电网下稳定性较好,在强电网下稳定性较差,而跟网型变流器可与之互补。但控制环节及多变流器间的耦合使得系统的稳定分析更为复杂。

通过增大变流器短路容量,改善器件短时过流能力可实现构网型变流器稳定性的提升。工程上推荐变流器短路容量为额定容量的3倍。此外,随着构网型变流器的大量投用,大规模场站内部各变流器间的耦合作用更为复杂,考虑变流器动态交互的大规模场站级稳定特性仍有待进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

## 参考文献 References

- [1] 辛保安. 加快建设新型电力系统 助力实现“双碳”目标[J]. 国家电网, 2021(8): 10-12.  
XIN Baoan. Accelerate the construction of a new power system to help achieve the “dual carbon” goal[J]. State Grid, 2021(8): 10-12.
- [2] 辛保安. 为实现“碳达峰、碳中和”目标贡献智慧和力量[J]. 国家电网, 2021(3): 2-3.  
XIN Baoan. Contribute wisdom and strength to achieve the goal of “Carbon Peak and Carbon Neutrality”[J]. State Grid, 2021(3): 2-3.
- [3] 辛保安, 李明节, 贺静波, 等. 新型电力系统安全防御体系探究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5723-5731.  
XIN Baoan, LI Mingjie, HE Jingbo, et al. Research on security defense system of new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5723-5731.
- [4] 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.
- [5] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.  
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 许诒翊, 刘 威, 刘 树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3595.  
XU 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张祥宇, 胡剑峰, 付 媛, 等. 风储联合系统的虚拟惯量需求与协同支撑[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 672-685.  
ZHANG Xiangyu, HU Jianfeng, FU Yuan, et al. Virtual inertia demand and collaborative support of wind power and energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 672-685.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 刘 倪, 张昌华, 廖 丽, 等. 计及无功电压环节的 VSG 虚拟转矩及振荡失稳机理分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 107-115.  
LIU Ni, ZHANG Changhua, LIAO Li, et al. Analysis on virtual torque and oscillation instability mechanism of virtual synchronous generator with reactive power-voltage controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 107-115.
- [20] 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.
- [21] WANG J S, MA K. Inertia and grid impedance emulation of power grid for stability test of grid-forming converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 2469-2480.
- [22] HARNEFORS L, HINKKANEN M, RIAZ U, et al. Robust analytic design of power-synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 5810-5819.
- [23] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析-上[M]. 4版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016.  
HE Yangzan, WEN Zengyin. Power system analysis(1)[M]. 4th ed. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology Press, 2016.
- [24] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析-下[M]. 4版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016.  
HE Yangzan, WEN Zengyin. Power system analysis(2)[M]. 4th ed. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology Press, 2016.
- [25] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2007.  
LI Guangqi. Transient-state analysis of power system[M]. 3rd ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2007.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] ROKROK E, QORIA T, BRUYERE A, et al. Transient stability assessment and enhancement of grid-forming converters embedding current reference saturation as current limiting strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1519-1531.
- [30] 黄 萌, 刘浴霜, 付熙坤, 等. 电力电子并网变流器非线性行为机理与安全运行边界研究综述[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(11): 1380-1392.  
HUANG Meng, LIU Yushuang, FU Xikun, et al. A review of nonlinear behavior mechanism and safety operation boundary for power electronics grid-connected converters[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(11): 1380-1392.
- [31] 周 高. 变速恒频双馈风电机组变流器非线性控制研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.  
ZHOU Gao. Research on nonlinear control of variable speed constant frequency doubly-fed wind turbine converter[D]. Chongqing, China: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [32] LI Y H, WANG H, YAN J, et al. Ultra-short-term wind power forecasting based on the strategy of “dynamic matching and online modeling”[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2025, 16(1): 107-123.
- [33] 刘 秉, 宋文胜. 基于虚拟信号反馈算法的单相 PWM 整流器 DQ 电流解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4504-4513.

- LIU Bing, SONG Wensheng. DQ current decoupling control of single-phase PWM rectifiers based on virtual signal feedback algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4504-4513.
- [34] 杨达亮, 彭祖文, 刘金宝, 等. 一种无延时单相并网变换器 dq 电流解耦控制方法[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1585-1593.
- YANG Daliang, PENG Zuwen, LIU Jinbao, et al. d-q Current decoupling for single-phase grid-connected converter based on non-delay[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1585-1593.
- [35] 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.
- [36] ROSSO R, WANG X F, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: an overview of control approaches and future trends[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, USA: IEEE, 2020: 4292-4299.
- [37] 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.
- 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.
- [38] 黄林彬, 辛焕海, 鞠平, 等. 电力电子并网装备的同步稳定分析与统一同步控制结构[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 10-25.
- HUANG Linbin, XIN Huanhai, JU Ping, et al. Synchronization stability analysis and unified synchronization control structure of grid-connected power electronic devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 10-25.
- [39] 杭丽君, 闫东, 胡家兵, 等. 电力电子系统建模关键技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 2965-2979.
- HANG Lijun, YAN Dong, HU Jiabing, et al. Review and prospect of key modeling technologies for power electronics system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 2965-2979.
- [40] 孙鹏. 不同同步方式新能源并网系统小干扰稳定性分析及其控制技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- SUN Peng. Small signal stability analysis and control technology of renewable energy grid-connected system with different synchronous modes[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2022.
- [41] 许津铭, 凌子涵, 程成, 等. 并网逆变器非线性特性建模及稳定性研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 370-385.
- XU Jinming, LING Zihan, CHENG Cheng, et al. Overview on non-linear modeling and stability analysis of grid-tied inverters[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 370-385.
- [42] 陈新, 王赞程, 龚春英, 等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2082-2094.
- CHEN Xin, WANG Yuncheng, GONG Chunying, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094.
- [43] 刘镇湘. 多变流器馈入系统的小干扰稳定性分析[D]. 上海: 上海电力大学, 2023.
- LIU Zhenxiang. Small-signal stability analysis of multi-converter feed system[D]. Shanghai, China: Shanghai University of Electric Power, 2023.
- [44] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 电力系统新型振荡问题浅析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2821-2828.
- XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. On new oscillation issues of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2821-2828.
- [45] RYGG A, MOLINAS M, ZHANG C, et al. A modified sequence-domain impedance definition and its equivalence to the dq-domain impedance definition for the stability analysis of AC power electronic systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1383-1396.
- [46] 周琰. 构网型换流器同步频率振荡特性分析及抑制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- ZHOU Yan. Analysis and suppression strategy of synchronous frequency resonance for grid-forming converter[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2023.
- [47] 杜毅, 郑超, 孙华东. 构网型 VSC 暂态稳定机理及改进限幅策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 3753-3765.
- DU Yi, ZHENG Chao, SUN Huadong. Transient stability mechanism analysis of the grid forming voltage source converter and the improved limiting method[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3753-3765.
- [48] 纪泰鹏, 赵伟, 李永达, 等. 基于能量函数法的含虚拟惯性控制直驱风电场内部暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 38-48.
- JI Taipeng, ZHAO Wei, LI Yongda, et al. Transient synchronization stability analysis of PMSG-based wind farm with virtual inertial control based on an energy function method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 38-48.
- [49] 纪泰鹏. 基于暂态能量函数法的风电系统同步稳定性分析[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.
- JI Taipeng. Synchronization stability analysis of wind power system based on transient energy function method[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2022.
- [50] 徐耀, 朱玲, 吕振宇, 等. 虚拟同步机孤岛并联系统暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 1-11.
- XU Yao, ZHU Ling, LYU Zhenyu, et al. Transient synchronization stability analysis of a virtual synchronous machine isolated island parallel system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 1-11.
- [51] 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.
- [52] HUANG Y H, YUAN X M, HU J B, 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.
- [53] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- ZHANG Xing, ZHANG Chongwei. PWM rectifier and its control[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2012.
- [54] 彭放, 高厚磊, 郭一飞, 等. 构网型逆变器故障穿越控制策略及其对保护影响的研究综述[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3673-3685.
- PENG Fang, GAO Houlei, GUO Yifei, et al. A review of fault ride-through control strategies of grid-forming inverter-based resources and the influence on protection[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3673-3685.
- [55] 刘宝. 电力电子化电网中构网型换流器的限流控制策略研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2022.
- LIU Bao. Research on current limiting control strategy of grid forming converters in power-electronized power system[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2022.

- [56] 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.
- [57] HUANG L B, XIN H 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.
- [58] ROY S, VILLEGAS PICO H N. Transient stability and active protection of power systems with grid-forming PV power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 897-911.
- [59] FAN B, LIU T, ZHAO F Z, et al. A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2022, 3: 955-969.
- [60] 姜卫同. 考虑电流限幅控制的组网型逆变器暂态稳定分析及其控制策略改进[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- JIANG Weitong. Transient stability analysis and control strategy improvement of grid-forming VSC considering current limiting control[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2022.
- [61] 高凯, 肖凡, 葛平娟, 等. 计及电流限幅环节影响的虚拟同步发电机暂态稳定区间分析[J/OL]. 电网技术, 2023: 1-12 [2024-12-18]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0365>.
- GAO Kai, XIAO Fan, GE Pingjuan, et al. Transient stability interval analysis of a virtual synchronized generator considering fault current limitation[J/OL]. Power System Technology, 2023: 1-12[2024-12-18]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0365>.
- [62] 徐政, 罗惠群, 祝瑞金. 电力系统次同步振荡问题的分析方法概述[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 36-39.
- XU Zheng, LUO Huiqun, ZHU Ruijin. Review on methods of analysis for subsynchronous oscillations of power systems[J]. Power System Technology, 1999, 23(6): 36-39.
- [63] 雷雨, 李光辉, 王伟胜, 等. 跟网型和构网型新能源并网控制阻抗对比与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 150-162.
- LEI Yu, LI Guanghui, WANG Weisheng, et al. Comparison of impedance characteristics and oscillation mechanism for grid following and grid forming renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 150-162.
- [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] 姜鑫, 易皓, 卓放, 等. 基于直流电压同步的构网型变流器低频振荡分析与阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16): 30-39.
- JIANG Xin, YI Hao, ZHUO Fang, et al. Low-frequency oscillation analysis and damping control for grid-forming converters based on DC voltage synchronization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 30-39.
- [66] 刘辉, 孙大卫, 宋鹏, 等. 电压环对光伏虚拟同步机系统稳定性的影响[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 311-318.
- LIU Hui, SUN Dawei, SONG Peng, et al. Influence of voltage loop on stability of photovoltaic virtual synchronous generators[J]. Acta Ener-giae Solaris Sinica, 2021, 42(3): 311-318.
- [67] 王光宇, 付立军, 胡祺, 等. 计及电压环影响的虚拟同步发电机低频振荡阻尼分析与控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 177-184.
- WANG Guangyu, FU Lijun, HU Qi, et al. Analysis and control of low-frequency oscillation damping of virtual synchronous generator considering influence of voltage loop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 177-184.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] 贾科, 杨彬, 刘浅, 等. 基于逆变型电源暂态电流回代的系统级故障暂态解析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 113-120.
- JIA Ke, YANG Bin, LIU Qian, et al. Transient analysis of system-level fault based on transient current back-substitution of inverter interfaced generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 113-120.
- [71] 贾科, 刘浅, 杨彬, 等. 计及锁相环动态特性的逆变电源故障暂态电流解析[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4242-4250.
- JIA Ke, LIU Qian, YANG Bin, et al. Transient fault current analysis of the inverter-interfaced renewable energy sources considering the dynamic characteristics of the phase-locked loop[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4242-4250.
- [72] 郑涛, 王子鸣, 邹芃莹, 等. 电网对称短路故障时虚拟同步机电流解析计算及影响因素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1460-1469.
- ZHENG Tao, WANG Ziming, ZOU Pengying, et al. Fault current calculation and influencing factors analysis of virtual synchronous generator under symmetrical short circuit fault[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1460-1469.
- [73] 王盼宝, 王鹏, 李坤光, 等. 电网故障下构网型逆变器动态限流控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3829-3837.
- WANG Panbao, WANG Peng, LI Shengguang, et al. Dynamic current-limiting control strategy of grid-forming inverter under grid faults[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3829-3837.
- [74] 张澳, 代林旺, 马政阳, 等. 电压源型双馈风电机组次同步振荡抑制方法[J]. 电气传动, 2022, 52(23): 11-17, 27.
- ZHANG Ao, DAI Linwang, MA Zhengyang, et al. Voltage source double-fed wind turbine sub-synchronous oscillation suppression method[J]. Electric Drive, 2022, 52(23): 11-17, 27.
- [75] 张雅阁. 电压源型双馈风电机组并网次同步振荡分析与抑制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- ZHANG Yage. Analysis and suppression on sub-synchronous oscillation of voltage source doubly-fed wind turbine[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [76] 李武华, 王金华, 杨贺雅, 等. 虚拟同步发电机的功率动态耦合机理及同步频率谐振抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 381-391.
- LI Wuhua, WANG Jinhua, YANG Heya, et al. Power dynamic coupling mechanism and resonance suppression of synchronous frequency for virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 381-391.
- [77] 余光正, 胡越, 刘晨曦, 等. 含跟网/构网型混联多馈入系统协调优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(2): 588-600.
- YU Guangzheng, HU Yue, LIU Chenxi, et al. Research on the coordinated optimization configuration method for hybrid multi-infeed systems with grid-following or grid-forming[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 588-600.
- [78] 马子涵, 黄萌, 付熙坤, 等. 构网型电源接入下新能源场站的稳

- 定运行能力评估[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 38-46.
- MA Zihan, HUANG Meng, FU Xikun, et al. Stable operation capability evaluation for renewable energy station with grid-forming power sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 38-46.
- [79] 彭茂兰, 许诒翊, 严喜林, 等. 大规模光伏经柔直送出系统的近工频耦合振荡机理与特性分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(8): 70-76.
- PENG Maolan, XU Jieyi, YAN Xilin, et al. Mechanism and characteristics analysis of near-fundamental frequency coupled oscillations caused by large-scale PV integrated to flexible DC sending system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8): 70-76.
- [80] 刘朋印, 谢小荣, 李 原, 等. 构网型控制改善跟网型变流器次/超同步振荡稳定性的机理和特性分析[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 990-997.
- LIU Pengyin, XIE Xiaorong, LI Yuan, et al. Mechanism and characteristics of grid-forming control for improving sub/super synchronous oscillation stability of grid-following-based grid-connected converter[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 990-997.
- [81] 黄 森, 姚 骏, 钟勤敏, 等. 含跟网和构网型新能源发电单元的混联电力系统暂态同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8378-8391.
- HUANG Sen, YAO Jun, ZHONG Qinmin, et al. Transient synchronization stability analysis of hybrid power system with grid-following and grid-forming renewable energy generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8378-8391.
- [82] 张 宇, 张 琛, 鲍颜红, 等. 电网短路故障下风电场内跟-构网电源瞬时频率交互影响机理[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(12): 1903-1914.
- ZHANG Yu, ZHANG Chen, BAO Yanhong, et al. Transient frequency interaction between grid-following and grid-forming sources in wind-farm under severe grid fault[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024, 58(12): 1903-1914.
- [83] 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.
- [84] 李 华, 高怀正, 郝 悦, 等. 基于虚拟同步发电机低电压穿越的无缝切换控制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 114-120.
- LI Hua, GAO Huaizheng, HAO Yue, et al. Seamless switching control strategy for low voltage ride-through based on virtual synchronous generator[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(3): 114-120.
- [85] 孙艺鹤. 电网对称故障下构网型并网逆变器低电压穿越控制技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- SUN Yihe. Research on the low voltage ride through control technology for grid-forming converters under symmetrical grid faults[D]. Xuzhou, China: China University of Mining and Technology, 2023.
- [86] 陈天一, 陈来军, 郑天文, 等. 基于模式平滑切换的虚拟同步发电机低电压穿越控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2134-2140.
- CHEN Tianyi, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. LVRT control method of virtual synchronous generator based on mode smooth switching[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2134-2140.



CHI Yongning  
Ph.D., Professor



JIANG Bingwei  
Ph.D. candidate  
Corresponding author

#### 迟永宁

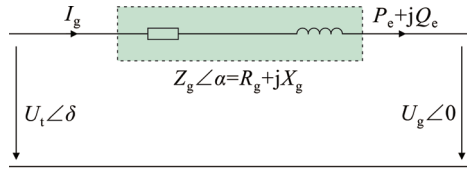
1973—, 男, 博士, 教授级高工, 博导, 国际电工委员会 IEC SC 8A “可再生能源接入电网”技术分委会秘书  
主要研究方向为新能源并网技术及电力系统稳定分析  
E-mail: chiyn@epri.sgcc.com.cn

#### 江炳蔚(通信作者)

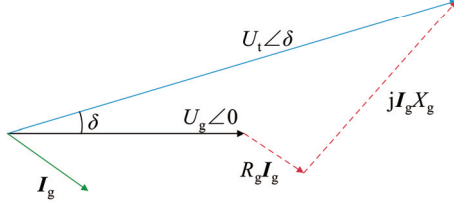
1996—, 男, 博士生  
主要研究方向为新能源并网技术  
E-mail: bingwei\_jiang@yeah.net

收稿日期 2024-07-15 修回日期 2025-01-05 编辑 何秋萍

## 附录 A



(a) 等效电路图



(b) 相量图

图 A1 PCC 点至电网等效电路及相量图

Fig.A1 Equivalent circuit and phasor diagram of grid-connected circuit

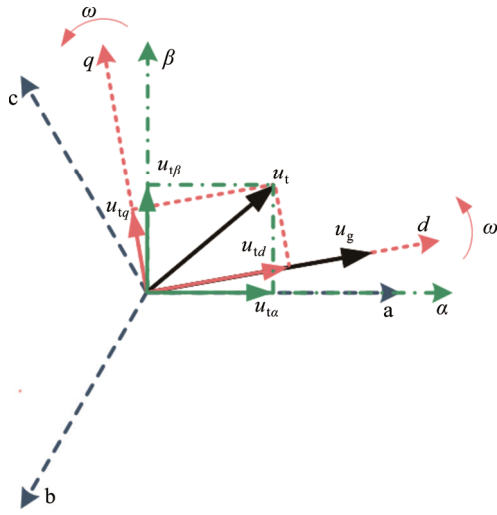


图 A2 不同坐标系转换关系

Fig.A2 Relationships between different coordinate system conversions

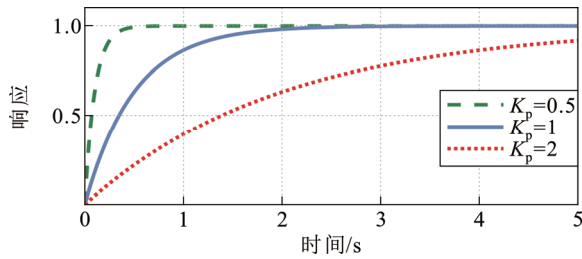


图 A3 不同参数取值下下垂控制阶跃响应

Fig.A3 Step response of droop control in different value

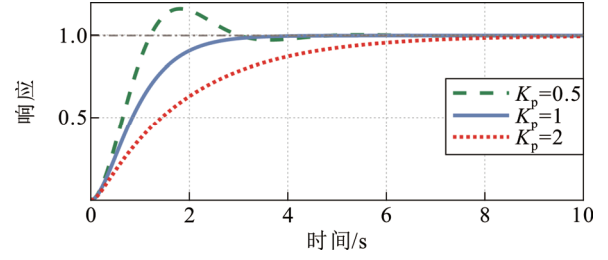
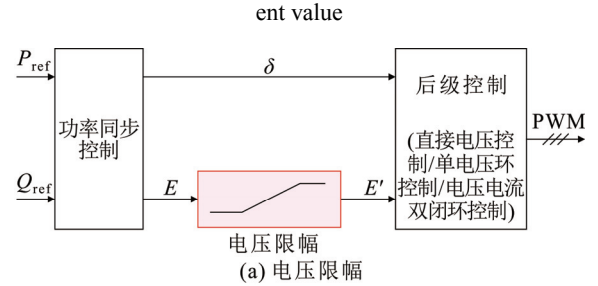
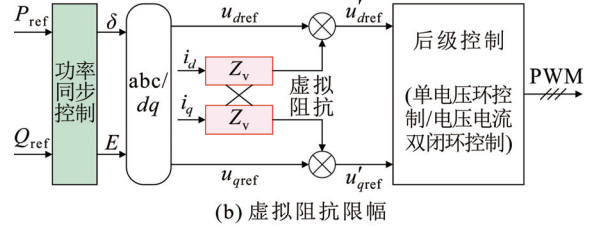


图 A4 不同参数取值下 LPF 下垂、VSG 控制阶跃响应

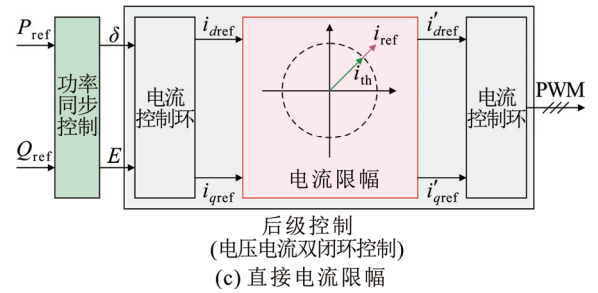
Fig.A4 Step response of LPF droop & VSG control in different value



(a) 电压限幅



(b) 虚拟阻抗限幅



后级控制  
(电压电流双闭环控制)  
(c) 直接电流限幅

图 A5 不同限幅策略控制框图

Fig.A5 Simplified topology of different current limiter

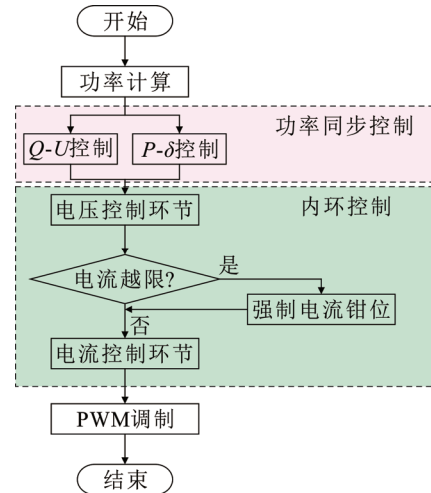


图 A6 电流限幅控制流程图

Fig.A6 Flowchart of current limiter

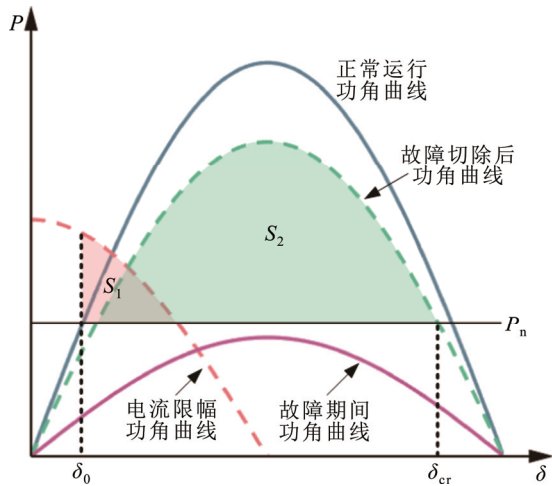


图 A7 电流限幅前后最大可能减速面积对比

Fig.A7 Comparison of largest probable decelerate area before  
& after current limiter works

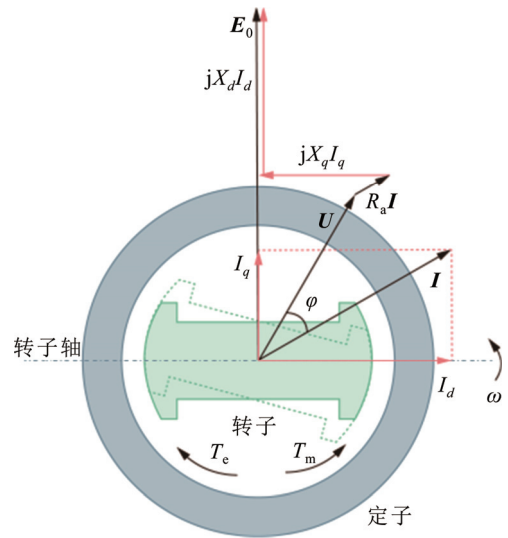


图 A10 同步机内部功角特性

Fig.A10 Power--angle characteristics of synchronous machine

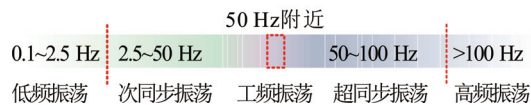


图 A8 变流器宽频振荡分类

Fig.A8 Classification of broadband oscillation in converter

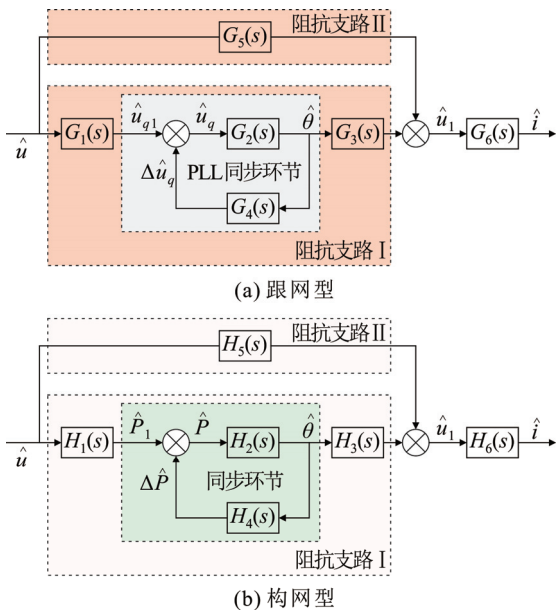


图 A9 变流器控制环节阻抗模型

Fig.A9 Impedance model of controllers in converter

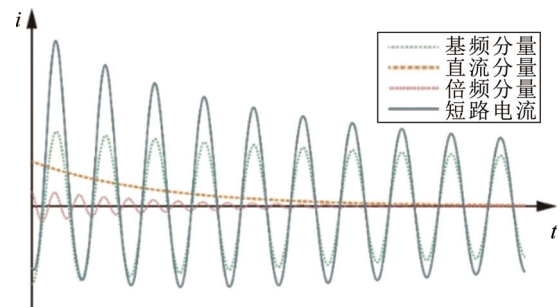


图 A11 同步机机端短路电流及分量

Fig.A11 Components of short-circuit current in Synchronous  
machine

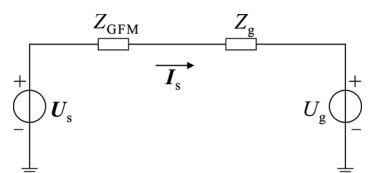
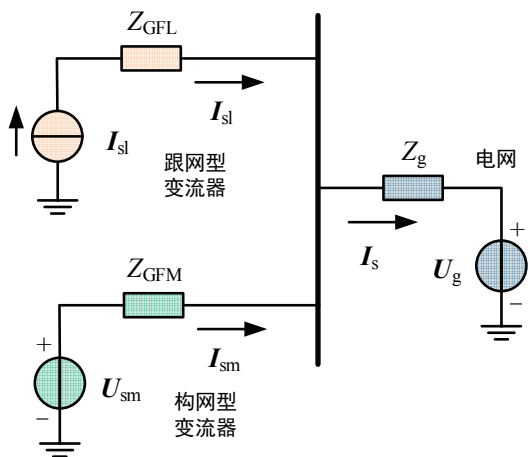
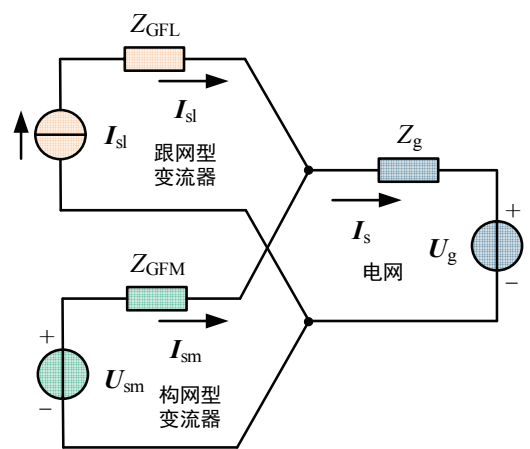


图 A12 构网型变流器并网简化示意图

Fig.A12 Simplified topology of grid-forming converter when  
connected to power grid



(a) 混合并网示意图



(b) 三端口等效网络

图 A13 混合并网系统示意图及等效网络

Fig.A13 Hybrid grid-connected system schematic and equivalent circuit