

# 电网故障情况下构网型换流器过电流抑制策略

石 桢<sup>1</sup>, 陈来军<sup>1,2</sup>, 苏小玲<sup>1</sup>, 赵正奎<sup>1</sup>, 梅生伟<sup>1,2</sup>

(1. 青海大学能源与电气工程学院新能源电力系统智慧运行教育部重点实验室, 西宁 810016; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘要:** 构网型换流器具有电压源特性, 可主动支撑电网。但在电网故障情况下, 为保持其输出电压的稳定, 极易导致换流器过电流而触发过流保护, 甚至损坏电力电子器件。为此, 基于故障电流动态响应机理, 建立了故障电流解析表达式, 该故障电流解析表达式由随时间衰减的暂态电流分量和随时间周期性变化的稳态电流分量组成, 根据不同分量特点, 分析其关键影响参数, 提出一种分别对针对过电流稳态分量和暂态分量进行抑制的构网型换流器过电流抑制策略。仿真和实验结果表明, 所提策略可使故障期间构网型换流器保留电压源特性, 主动支撑电网电压, 同时抑制稳态过电流和暂态过电流, 使电流始终保持在安全阈值之内, 并保持功角稳定。

**关键词:** 电网故障; 构网型换流器; 过电流抑制; 虚拟阻抗; 电压支撑

## Overcurrent Suppression Strategies for Grid-forming Converters Under Power Grid Fault

SHI Zhen<sup>1</sup>, CHEN Laijun<sup>1,2</sup>, SU Xiaoling<sup>1</sup>, ZHAO Zhengkui<sup>1</sup>, MEI Shengwei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Intelligent Operation of New Energy Power System of Ministry of Education, School of Energy and Electrical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Grid-forming converters possess the characteristics of a voltage source and can actively support the power grid. However, in the event of a power grid fault, in order to maintain the stability of its output voltage, the converter is highly susceptible to overcurrent, which can trigger overcurrent protection and potentially damage power electronic components. To address this problem, based on the dynamic response mechanism of fault current, an analytical expression for fault current has been established. This analytical expression of fault current is composed of a transient current component that decays over time and a steady-state current component that varies periodically with time. Based on the characteristics of different components, key influencing parameters are analyzed, and a grid-forming converter overcurrent suppression strategy is proposed, which targets the suppression of both the steady-state and transient components of the overcurrent. Simulation and experimental results demonstrate that the proposed strategy allows the grid-forming converter to retain its voltage source characteristics during fault periods, actively support the grid voltage, and simultaneously suppress both steady-state and transient overcurrents, ensuring that the current remains within safe thresholds and maintaining the stability of the power angle.

**Key words:** power grid fault; grid-forming converter; overcurrent suppression; virtual impedance; voltage support

## 0 引言

在新能源大规模并网环境下<sup>[1]</sup>, 电力系统惯量持续下降, 支撑电网安全稳定的传统设备也随之减少<sup>[2]</sup>, 电力电子设备过流耐受能力差, 极易引发继电保护装置动作, 甚至发生脱网等连锁故障<sup>[3]</sup>。换流器作为未来电网安全稳定运行的责任主体, 需保证故障期间不脱网并提供电压支撑。构网型换流器

具有与同步发电机类似的电压源特性, 可以主动参与电网调节, 为电力系统提供一定的惯量、频率、无功电压支撑而引起广泛关注及工程应用<sup>[4-6]</sup>。

根据新能源并网标准要求<sup>[7]</sup>, 为满足电网电压跌落期间换流器设备为电力系统提供电压支撑要求, 换流器应向电网注入无功功率。构网型换流器可在电网电压跌落期间增发无功功率, 迅速支撑电

**基金项目:** 国家自然科学基金(52167022); 青海省基础研究计划项目(2022-ZJ-935Q)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52167022), Natural Science Foundation of Qinghai (2022-ZJ-935Q).

网电压，虽有利于电网电压稳定，但通过提高无功电流注入支撑电压必然带来过电流、瞬时输出功率波动增大等问题。与传统同步发电机可短暂承受高达7倍的额定电流的特性不同，换流器受电力电子器件约束<sup>[8-9]</sup>，通常仅能承受1.2~1.5倍过电流能力<sup>[10]</sup>。为此，需解决构网型换流器故障期间过电流问题。通过电力电子器件选型等方式从设备层面提高换流器的过流能力，则会增加设备成本，且面临设计方案优化等技术难题。因此，发挥构网型换流器灵活可控的优势，通过控制策略抑制过电流是更合理的选择<sup>[11]</sup>。

目前针对构网型换流器过电流抑制方法主要有电流限幅模块直接限流、切换为跟网运行、虚拟阻抗等<sup>[12-27]</sup>。最便捷的方法为电流瞬时值限幅<sup>[13]</sup>，即在电压电流环间设置限流模块，使电流饱和，但该方法会导致电流波形失真<sup>[14]</sup>。为此，有学者提出使用有效值限幅<sup>[15]</sup>，即当电流越限时，将电流按比例缩减。但在此类限流方式下，容易引起暂态稳定性问题，稳定裕度降低，输出阻抗角不易控制等问题<sup>[16]</sup>。为解决上述问题，文[17-18]在故障期间将构网型换流器控制策略切换为跟网型控制，直接抑制换流器输出电流，但故障期间改变了原本的电压源特性，难以发挥其支撑能力。于是，又有学者提出虚拟阻抗来抑制电流，该方法不依赖于电流内环的存在，通过在电压内环前，引入虚拟阻抗，来调整电压内环参考值间接抑制电流。由于该方法在故障期间可保留电压源特性，也使得该方法能够得以广泛应用<sup>[19]</sup>。按虚拟阻抗值可分为自适应虚拟阻抗和定值虚拟阻抗。文[20-21]分别提出了一种依据短路电流越限程度和电压跌落曲线自适应生成虚拟阻抗来

抑制过电流，但自适应算法复杂不适用于工程，且虚拟阻抗频繁变化导致系统阻抗特性频繁变化，不利于系统整体稳定。文[22]采用定值虚拟阻抗抑制电流，但该方法的虚拟阻抗取值很重要，若虚拟阻抗投入过小则无法抑制过电流，若虚拟阻抗投入过大则会造成能量利用率低，在虚拟阻抗切除时又会造成过电流。为了不过分依赖虚拟阻抗，可在虚拟阻抗基础上，加入其他的控制策略。文[23-24]分别提出将虚拟电阻与相量限流相结合的方法和内电势重塑方法，来减小换流器与电网间电压差从而抑制过电流，但所提方法无法用于含电压电流内环的构网型控制。文[25]设计虚拟阻抗抑制电流，为保证故障期间功角稳定，实施功率悬停控制使换流器有功功率及无功功率偏差均保持为0。文[26]在虚拟阻抗限流的基础上，动态限制功率外环参考值，但未考虑故障期间暂态功角稳定性问题。文[27]在有功功率控制环中引入功角动态补偿控制，并在故障期间整定无功功率控制环指令值，但控制死区导致该方法的暂态过电流抑制效果不佳。该类方法需要综合考虑过电流稳态分量和暂态分量特点，与此同时还需兼顾功角稳定性问题。

基于此，文中首先分析了构网型换流器故障电流特性以及过电流产生机理，建立了故障电流解析表达式，分别分析了过电流的稳态分量和暂态分量的关键影响因素，根据各分量关键影响因素分别提出对应的过电流抑制策略。仿真和实验结果表明，所提策略可有效抑制稳态及暂态过电流至安全范围内，且在电网电压跌落情况下可增发无功有效支撑电网，并保持功角稳定。

## 1 构网型换流器故障特性

## 1.1 构网型换流器并网模型及工作原理

构网型换流器并网模型见图 1，如图 1 所示，构网型换流器通过有功/频率控制(有功环)、无功/电压控制(无功环)构成功率控制环节，形成内电势的相位 $\delta$ 和幅值 $E$ ，后经三相正弦发生器、电压电流

双闭环及坐标变换等环节最终形成电力电子变换器所需的正弦脉宽调制信号(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)，最后电力电子器件触发脉冲，控制换流器输出频率恒定、幅值稳定的电压。

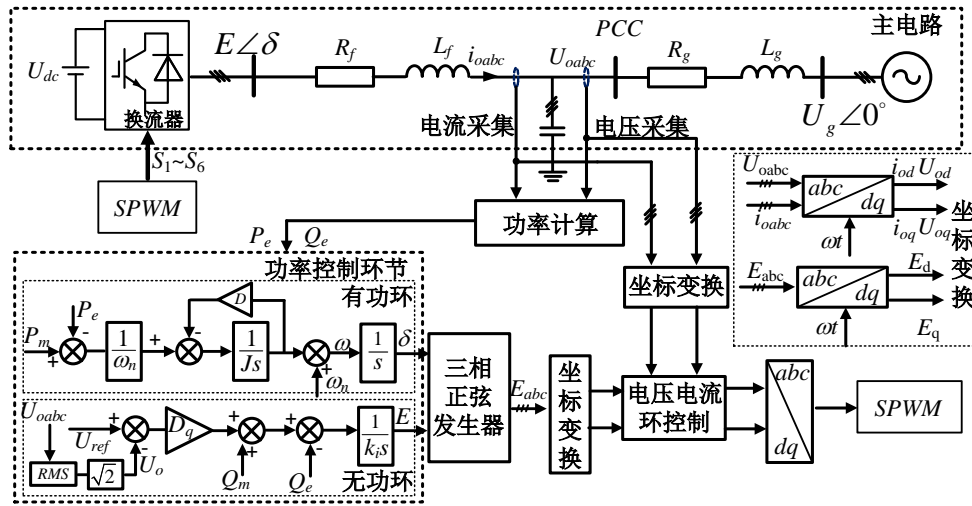


图 1 构网型换流器并网模型

Fig. 1 Grid-forming converter grid-connection model

根据同步发电机转子运动特征，用转动惯量  $J$  和阻尼系数  $D$  来表征控制环内部的惯性和阻尼环节，有功功率控制环可表示为

$$\begin{cases} \frac{P_m - P_e}{\omega_n} - D(\omega - \omega_n) = J \frac{d(\omega - \omega_n)}{dt} \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_n \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中： $\omega$ 、 $\omega_n$ 分别为构网型换流器的实际角频率和额定角频率； $P_m$ 、 $P_e$ 分别为给定有功功率和实际输出功率， $\delta$ 为换流器输出功角。

构网型换流器通过调节虚拟内电势  $E$  来控制输出无功功率及端电压，同时根据端电压参考值与实际端电压幅值的差值对无功功率指令值进行调整，以更好实现无功功率指令跟踪，无功功率控制环可表示为

$$E = \frac{1}{K_i s} [Q_m + D_q (U_{ref} - U_o) - Q_e] \quad (2)$$

式(2)中： $Q_m$ 、 $Q_e$ 分别为无功功率参考设定值和输出值； $U_{ref}$ 为端电压指令值(一般设为额定电压  $U_n$ )； $U_o$ 为端电压实际输出值； $D_q$ 和  $K_i$ 分别为无功一电压下垂系数与积分系数； $E$ 为虚拟内电势，其可与有功一频率控制所获得的角度  $\delta$  共同合成三相内电势。

## 1.2 故障电流特性

设  $t=t_0$  时刻电网发生故障，三相电压对称跌落。以电网电压相量为参考，故障全电流为  $i_F$ ，构网型换流器等效电路见图 2(a)。

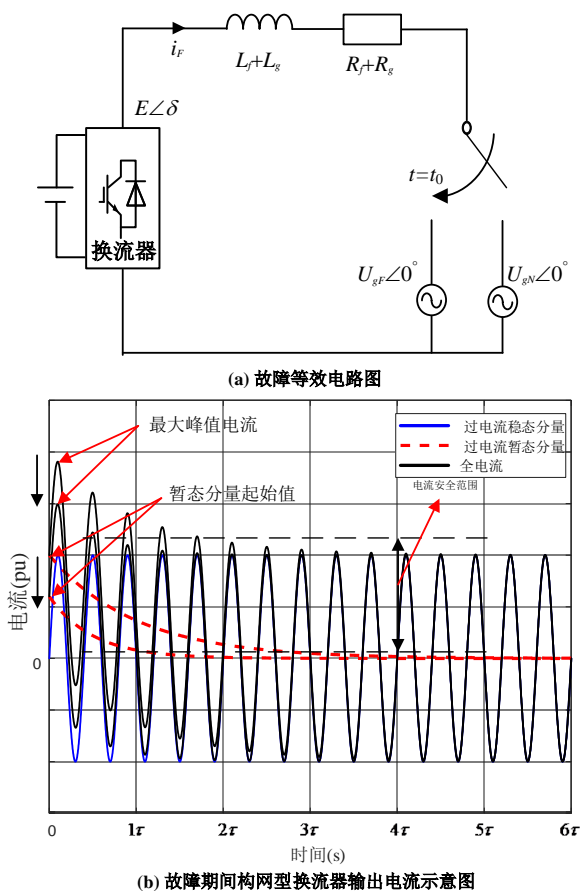


图 2 故障动态响应分析图

Fig. 2 Dynamic fault response analysis diagram

图 2 中： $L_f$ 、 $L_g$  分别为换流器滤波电感和网侧电感； $R_f$ 、 $R_g$  分别为内电阻和网侧电阻。以电网电压相量为参考相量， $U_{gN}\angle 0^\circ$ 、 $U_{gF}\angle 0^\circ$  分别为故障前、后的电网电压， $E\angle\delta$  为构网型换流器内电势。

由图 2 可知故障电流微分方程为

$$L_F \frac{di_F}{dt} + R_F i_F = E \sin(\omega t + \delta) - U_{gF} \sin(\omega t) \quad (3)$$

式(3)中， $L_F$ 、 $R_F$  分别为故障期间换流器与电网之间的电感和电阻。结合一阶电路在正弦激励下的时域求解公式可得

$$f(t) = f_1(t) + [f(0_+) - f_1(0_+)] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

式(4)中： $f_1(t)$  为故障期间的稳态响应； $f(0_+)$  是故障后稳态响应的初始值； $f(0_+)$  为故障前初始值； $\tau$  为指数衰减分量的时间常数。

$$i_F(t) = i_{sF} \sin(\omega t - \varphi) + [i_0 \sin(\omega t_0 - \varphi_0) - i_{sF0} \sin(\omega t_0 - \varphi)] e^{-t/\tau} \quad (5)$$

式(5)中： $i_{sF}$  为稳态故障电流幅值； $i_{sF0}$  为稳态故障电流初始幅值； $i_0$  为额定电流幅值； $\varphi_0 = \arctan(\omega L_0/R_0)$ ； $\varphi = \arctan(\omega L_F/R_F)$ ；若故障期间系统阻抗不变，则有  $\varphi = \varphi_0$ ， $U_{gN}$  为额定电网电压； $\tau = L_F/R_F$  为指数衰减分量的时间常数。 $L_0$ 、 $R_0$ 、 $L_F$ 、 $R_F$  分别为故障前后电感电阻。

### 1.3 故障过电流机理分析

由图 2(b)可知，电网故障发生瞬间，电流暂态分量与稳态分量叠加，电流大于换流器安全阈值；随后暂态分量迅速衰减到 0，换流器进入故障稳态阶段，电流仍然大于安全阈值。

过电流稳态分量为  $i_{sF} \sin(\omega t - \varphi)$ ，其幅值  $i_{sF}$  可表示为

$$i_{sF} = \frac{\sqrt{U_{gF}^2 + E_F^2 - 2U_{gF}E_F \cos \delta_F}}{|Z|} \quad (6)$$

式(6)中： $E_F$  为故障期间换流器内电势； $\delta_F$  为故障期间功角； $Z$  为换流器与电网间的总阻抗。

当电网发生对称故障并进入故障稳态阶段时，若阻抗  $Z$  不变，由式(6)可知，稳态过电流大小与电网电压  $U_{gF}$ 、换流器输出内电势  $E_F$ 、功角  $\delta_F$  均有关。

以电网电压为参考相量。稳态过电流相量分析图见图 3，由图 3 可知，当正常运行时(黑色向量)，功角、内电势、电网电压分别为  $\delta_0$ 、 $E_0$ 、 $U_{g,0}$ ，内电势与电网电压差为  $\Delta U_0$ ，设系统阻抗特性在故障前后未发生变化，电压差相量  $|\Delta U_0|$  (蓝色向量)可表征换流器输出电流大小。

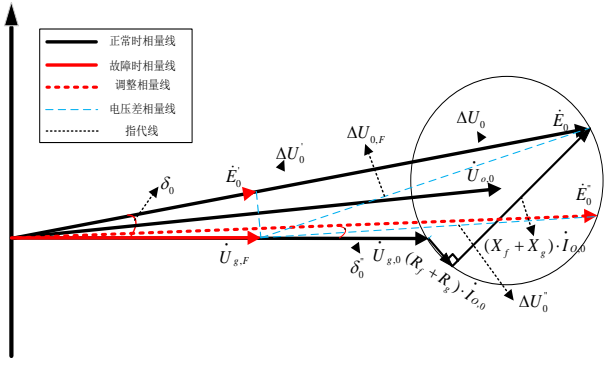


图3 稳态过电流相量分析图

Fig. 3 Steady-state overcurrent phasor analysis diagram

故障稳态期间，电网电压从  $U_{g,0}$  变为  $U_{g,F}$ 。为定性分析功角与内电势对于构网型换流器过电流影响，可分为以下两种场景：

1) 功角保持不变，内电势  $E_0$  调整为  $E_0'$ ，电压幅值差记为  $|\Delta U_0'|$ ；

2) 内电势幅值保持不变，功角  $\delta_0$  调整为  $\delta_0''$ ，电压幅值差记为  $|\Delta U_0''|$ 。

由图3可知， $|\Delta U_0'| < |\Delta U_0''|$ ，则场景2换流器输出电流大于场景1换流器输出电流，即内电势幅值变化对过电流抑制效果更为明显，而功角对过电流抑制作用相对较小。但是功角过大必然会导致功角失稳，影响构网型换流器的支撑效果。

过电流暂态分量为式(5)等式右边第二项。

$[i_0 \sin(\omega t_0 - \varphi_0) - i_{sF0} \sin(\omega t_0 - \varphi)]$  为过电流暂态分量起始值，其值越大，则暂态过电流越大，其衰减所需时间由衰减系数  $\tau$  决定，过电流暂态分量通常可以在  $3\tau \sim 5\tau$  衰减到0。

其中， $i_0 \sin(\omega t_0 - \varphi_0)$  为故障前瞬时电流值。与电网故障发生时间和故障前构网型换流器的运行工况有关。

$$i_0 = \frac{|\dot{E}_0 - \dot{U}_{g,0}|}{\sqrt{(R_f + R_g)^2 + (\omega L_f + \omega L_g)^2}} \quad (7)$$

$i_{sF0} \sin(\omega t_0 - \varphi)$  为过电流稳态分量起始值，由稳态过电流幅值、故障时刻、以及故障期间阻抗角决定。

## 2 稳态故障电流影响因素分析

### 2.1 因素1-功角分析

构网型换流器功角曲线见图4，由图4可知，构网型换流器正常运行时，功角曲线为  $P_1$ ，a点为稳定平衡工作点，有功功率平衡 ( $P_e = P_m$ )，功角为  $\delta_0$ 。若电网电压跌落，功角曲线变为  $P_2$ 。换流器有功功率不平衡 ( $P_e < P_m$ )，不平衡转矩导致加速面积增加、功角增大。 $P_m$  与功角曲线无交点，没有减速面积，造成系统功角存在失稳风险。

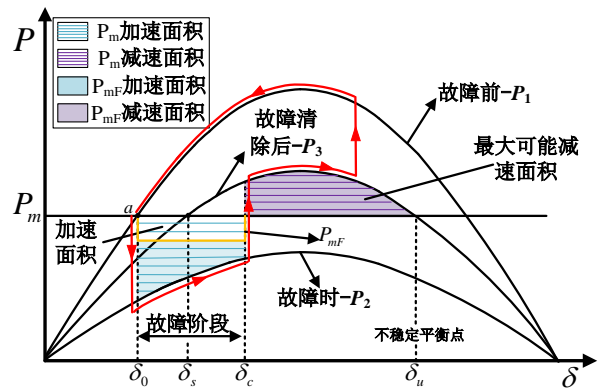


图4 构网型换流器功角曲线

Fig. 4 Grid-forming converter power angle curve

根据等面积定则，调整构网型换流器有功功率指令，可改变加速面积和减速面积，若加速面积小于最大可能减速面积，则可保证系统功角稳定，系统达到新的平衡点，故障切除后，系统进入故障恢复阶段，功角曲线由  $P_3$  恢复到  $P_1$ ，系统回到原来的平衡点。

合理调整构网型换流器有功功率指令  $P_m$  一方面可保证构网型换流器功角不失稳，另一方面可调

整功角大小，减小构网型换流器与电网间角度差。

功角变化是影响构网型换流器故障期间稳态过电流的重要因素之一。由式(1)可得

$$J \frac{d(\omega - \omega_0)}{dt} + D(\omega - \omega_0) = \frac{\Delta P}{\omega_0} \quad (8)$$

令  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ ，角速度偏差微分方程为

$$\Delta\omega = \frac{\Delta P}{D\omega_0} (1 + Ce^{-\frac{D}{J}t}) \quad (9)$$

由初始开始同步，则  $C=-1$ ，式(9)整理为

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0 = \frac{\Delta P}{D\omega_0} (1 - e^{-\frac{D}{J}t}) \quad (10)$$

对两边积分得

$$\Delta\delta = \int \Delta\omega dt = \int \frac{\Delta P}{D\omega_0} (1 - e^{-\frac{D}{J}t}) dt = \frac{\Delta P}{D\omega_0} (t + \frac{J}{D} e^{-\frac{D}{J}t} + C_1) \quad (11)$$

构网型换流器启动时功角为 0，则  $C_1 = -J/D$ ；

由  $\Delta P = P_m - P_e$  得

$$\Delta\delta = \frac{P_m - P_e}{D\omega_0} (t + \frac{J}{D} e^{-\frac{D}{J}t} - \frac{J}{D}) \quad (12)$$

构网型换流器功率输出公式

$$\begin{cases} P_e = \frac{3 U_g E \sin \delta}{2 X} \\ Q_e = \frac{3 E^2 - U_g E \cos \delta}{2 X} \end{cases} \quad (13)$$

由式(12)知，功角的变化由不平衡有功  $\Delta P$  所产生。由式(13)知，故障时刻  $U_g$  瞬间跌落， $P_e$  瞬间减小， $P_m$  若不调整，则会产生不平衡有功  $\Delta P$ ，功角  $\delta$  会增大，直到有功功率达到平衡，功角不再增大。

此外，除消除不平衡有功  $\Delta P$ ，适当调节  $J$  和  $D$  等参数也能起到抑制功角  $\delta$  增大的效果。

## 2.2 因素 2-内电势幅值分析

构网型换流器输出电流幅值满足

$$|i| = \frac{|\Delta U|}{|Z|} = \frac{|E \angle \delta - U_g|}{|Z|} \quad (14)$$

电网电压  $U_g$  跌落时，由式(13)可得输出无功功率  $Q_e$  会瞬间增大并伴随着一定的功率波动，若无功参考值令  $Q_m$  不变，由式(2)知，内电势幅值因无功控制环节的下垂特性而降低，虽略有减小内电势与电网电压幅值差，但换流器输出电流仍然较大。参考图 3 中场景 1 对内电势幅值影响的分析，要想抑制过电流，需进一步结合无功控制环特点灵活调节内电势幅值缩减内电势与电网电压幅值差。此外，根据式(13)可知  $P_e$  在此期间将会减小，但为跟踪有功指令，功角将增大，进一步增大换流器输出电流，所以在具体抑制过程中还需同时考虑功角因素，才能实现最佳的抑制效果。

## 3 故障过电流抑制

### 3.1 故障稳态过电流抑制

由 2.1 节分析，电网电压跌落时，调节给定有功功率  $P_m$  有助于消除不平衡功率  $\Delta P$ ，减小功角变化，进而减小稳态过电流。具体调节原则如下：

记故障期间调节给定有功功率为  $P_{mF}$ ，构网型换流器输出有功功率为  $P_{eF}$ ，正常、故障稳态运行时，功角与有功分别满足表达式

$$\begin{cases} P_e = \frac{3E_0 U_g}{2X} \sin \delta_a = P_m \\ P_{eF} = \frac{3E_F U_{gF}}{2X} \sin \delta_F = P_{mF} \end{cases} \quad (15)$$

换流器稳定运行时，功角较小，一般小于  $30^\circ$  [28]，在给定有功功率  $P_m$  的调节下，换流器稳定运行满足上述条件并适当在故障期间降低功角，近似认为  $\delta_a \approx \delta_F$  联立式(15)，得稳态故障期间有功参考指令可调整为

$$P_{mF} = P_m k \frac{E_F}{E_0} \quad 0.2 < k < 0.9 \quad (16)$$

根据国标规定 [7]，电网电压允许变化范围为

$\pm 10\%$ , 20%~90%则属于电压跌落。记  $k=U_{gF}/U_{gN}$  为电网电压跌落深度。

电网发生故障,上述方法可保证不出现功角失稳,并在一定程度上抑制稳态过电流。但仍然需要改进控制系统,改善稳态过电流抑制效果。

由 2.2 节分析可知,电网电压跌落,构网型换流器内电势幅值依然可以快速跟踪电压参考指令  $U_{ref}$ 。因此,可通过  $U_{ref}$  改变内电势,减小换流器输出电压与电网电压幅值差,减小稳态故障电流,具体调节原则如下。

由式(2)可知,无功—电压下垂关系可调整内电势幅值,会阻碍构网型换流器故障期间支撑特性,因此设  $Q_m=Q_e$ 。

参考图 3,在正常运行和故障稳态期间由余弦定理可得功角与输出电压电流分别满足:

$$\begin{cases} \cos \delta_a = \frac{U_{ref}^2 + U_{gN}^2 - (|Z||i_N|)^2}{2U_{ref}U_{gN}} \\ \cos \delta_F = \frac{U_{F-ref}^{*2} + U_{gF}^2 - (|Z||i_F|)^2}{2U_{F-ref}^*U_{gF}} \end{cases} \quad (17)$$

同理,若  $\delta_a \approx \delta_F$ 。联立式(17),得

$$U_{F-ref}^* = \frac{Ak \pm \sqrt{A^2k^2 - 4(U_{gN}^2k^2 - |Z|^2|i_N|^2)}}{2} \quad (18)$$

式(18)中,  $A=(U_{ref}^2+U_{gN}^2-|Z|^2|i_N|^2)/U_{ref}$

设定换流器的稳态过流耐流系数为  $n_c$ ,则有

$$\sqrt{2}I_{sF} = \sqrt{2}n_c I_N \quad (19)$$

带入式(18),舍去数值较小根,以保证故障期间换流器的电源支撑效果,则电压参考指令值调整为

$$U_{F-ref}^* = \frac{Ak + \sqrt{A^2k^2 - 4(U_{gN}^2k^2 - |Z|^2|n_c i_N|^2)}}{2} \quad (20)$$

### 3.2 故障暂态过电流抑制

暂态过电流只在出现在故障发生和故障恢复的极短时间内。持续时间短、冲击性强,极易引发过电流保护动作。可引入虚拟阻抗,限制暂态过电流冲击、加速短路电流衰减,见图 2(b)。

一方面虚拟阻抗改变了输入电压电流控制环路的参考电压,通过改变换流器与电网侧间的压差限制暂态过电流。即

$$\begin{cases} U_{dref} = E_d - L_v \frac{di_d}{dt} - R_v i_d + \omega_n L_v i_q \\ U_{qref} = E_q - L_v \frac{di_q}{dt} - R_v i_q + \omega_n L_v i_d \end{cases} \quad (21)$$

另一方面虚拟阻抗改变了暂态分量的衰减时间常数,从而快暂态分量的衰减速度。即

$$\tau_F = (L_f + L_g + L_v) / (R_f + R_g + R_v) \quad (22)$$

为保证暂态过电流不超过安全阈值,可在故障暂态期间加入虚拟阻抗。由式(5)计算最大峰值电流,理论上可采用导数法求其峰值,但会导致求解困难。由 1.3 节分析过电流暂态分量起始值,其值与故障发生时间和相位有关,具有随机性。为此进行简化,由式(5)联立式(19)可得全电流为

$$i_F(t) = \sqrt{2}n_c I_N \sin(\omega t - \varphi) + [\sqrt{2}I_N \sin(\omega t_0 - \varphi_0) - \sqrt{2}n_c I_N \sin(\omega t_0 - \varphi)] e^{-\frac{\omega t}{\tan \varphi}} \quad (23)$$

$i_0$  与  $i_{sF0}$  分别出现于正弦函数的波峰波谷时,过电流暂态分量起始值最大。且认为暂态过电流的最大值出现在电压跌落半个周期时,则有

$$i_{Fm} \approx \sqrt{2}I_N \left[ n_c + (1+n_c)e^{-\frac{\pi}{\tan \varphi}} \right] \quad (24)$$

为保证暂态过电流不损坏换流器,设定换流器暂态过流耐流系数为  $n_t$ ,应有:

$$\sqrt{2}I_N \left[ n_c + (1+n_c)e^{-\frac{\pi}{\tan \varphi}} \right] \leq \sqrt{2}n_t I_N \quad (25)$$

$$\frac{\pi}{\omega \ln \left( \frac{1+n_c/n_t}{n_t-n_c} \right)} \geq \frac{L_0+L_v}{R_0+R_v} \quad (26)$$

故障恢复与故障时刻均会产生暂态过电流，由于故障恢复后的稳态过程为正常状态，电流按照额定电流输出，由式(4)及式(5)知，暂态过电流会比之前小很多，此时再次引入虚拟阻抗抑制暂态过电流，电流更加不会超过安全阈值。

虚拟阻抗限流法通过合理地设置虚拟电阻与虚拟电感参数抑制暂态过电流。虚拟阻抗会改变系统阻抗特性，在故障电流进入稳态阶段时虚拟阻抗不作用，仅在电压跌落与恢复暂态期间起作用，以避免稳态下的虚拟阻抗电压降。此外，虚拟阻抗的阻感比会影响暂态电流衰减的速率<sup>[18]</sup>和系统的阻尼特性<sup>[29]</sup>，虚拟阻抗阻感比  $X_v/R_v$  不宜过小。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真参数及工况描述

为验证上述所提的过电流抑制策略，在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建了构网型换流器并网模型。仿真参数见表 1。

表 1 参数表

Table 1 Parameter table	
参数	数值
直流电压 $U_{dc}/V$	800
电网电压 $U_g/V$	380
阻尼系数 $D/(N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1})$	10
无功环下垂系数 $D_q$	1 000
稳态过流耐流系数 $n_c$	1.2
暂态过流耐流系数 $n_t$	1.5
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.2
网侧电阻 $R_g/\Omega$	0.2
网侧电感 $L_g/mH$	4.0
滤波电阻 $R_f/\Omega$	0.1
滤波电感 $L_f/mH$	3.2
虚拟电阻 $R_v/\Omega$	3.0
虚拟电感 $L_v/mH$	9.0

初始时刻构网型换流器并网运行于额定状态，

设定输出有功功率 20 kW，无功功率为 0 var。0.5 s

时刻，电网电压跌落 50%；2 s 时刻，故障清除。

### 4.2 仿真结果对比

1)无抑制策略运行。未采用抑制措施的输出电流见图 5，从图 5 中可以看出在 0.5~2 s 故障期间电流远超正常额定时候运行期间电流，稳态过电流为 103.6 A，暂态过电流高达 185.2 A。

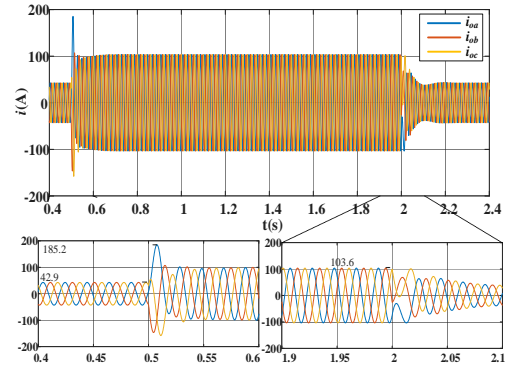
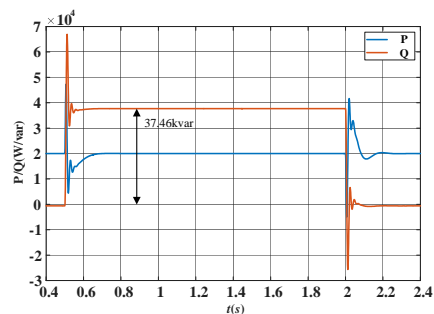


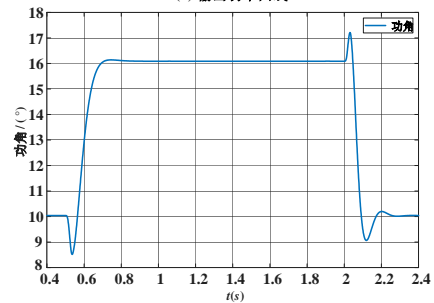
图 5 未采用过电流抑制措施输出电流

Fig. 5 Output current without overcurrent suppression

未采用抑制措施的输出功率见图 6，换流器输出无功功率在故障期间增发 37.46 kvar，对电网电压进行有效的无功电压支撑，但这样也会造成换流器输出过电流，其有功功率、无功功率在故障发生和恢复时刻均出现较大波动与超调，同时功角在故障期间升高，同 2.1 节分析一致。



(a) 输出功率曲线



(b) 输出功角曲线

图 6 未采用过电流抑制措施输出功率及功角

**Fig. 6 Output power and angle without overcurrent suppression**

2)加入稳态过电流抑制策略。采用稳态过电流抑制策略后的输出电流见图 7，额定正常运行情况下，电流为 42.9 A，暂态过电流为 154.96 A，一定程度上抑制了暂态过电流，但暂态过电流仍然超过安全阈值，稳态过电流为 53.87 A，限制稳态过电流在额定电流约 1.2 倍。

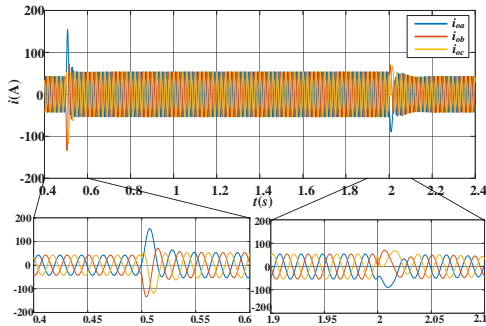
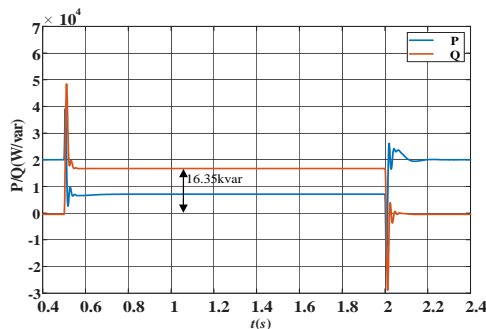


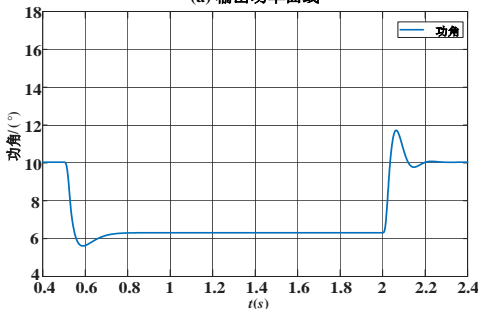
图 7 采用稳态过电流抑制策略后的输出电流

**Fig. 7 Steady-state overcurrent suppression strategy for current output**

采用稳态过电流抑制策略后的输出功率见图 8，换流器在故障期间增发 16.35 kvar 保障了对于电网的无功支撑作用，一定程度上缓解了功率波动。



(a) 输出功率曲线



(b) 输出功角曲线

图 8 采用稳态过电流抑制策略输出功率及功角

**Fig. 8 Steady-state overcurrent suppression strategy for**

**power and angle output**

3)加入稳态+暂态过电流抑制策略。加入稳态+暂态抑制策略后的输出电流见图 9，无暂态过电流，稳态过电流为 51.64 A，即限制了故障过电流在安全阈值内。

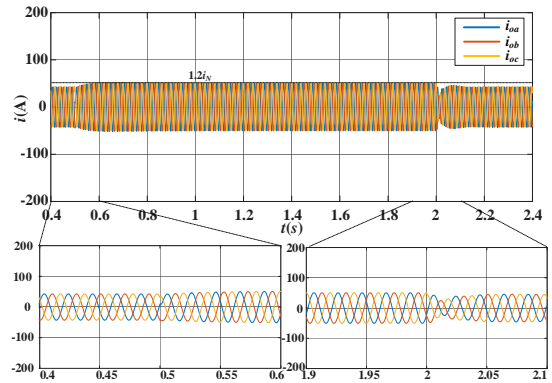
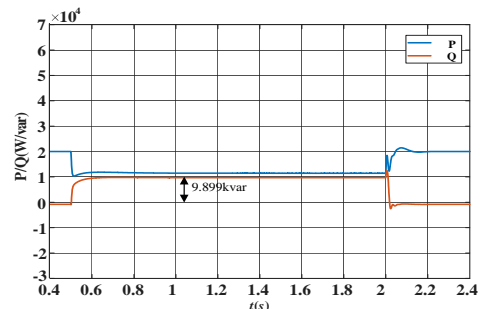


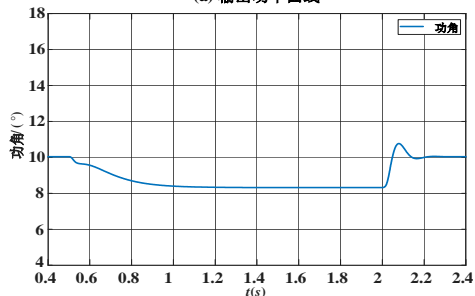
图 9 采用稳态+暂态过电流抑制策略输出电流

**Fig. 9 Steady-state and transient overcurrent suppression strategy for current output**

加入稳态+暂态抑制策略后的输出功率见图 10，换流器在故障期间增发 9.899 kvar，保障了对于电网的无功支撑作用，因故障期间电流得到改善，极大程度改善了故障及恢复时刻期间的功率波动，同时故障期间相较于正常运行期间未发生明显变化，满足  $\delta_a \sim \delta_F$  条件。



(a) 输出功率曲线



(b) 输出功角曲线

图 10 采用稳态+暂态过电流抑制策略输出功率及功角  
Fig. 10 Steady-state and transient overcurrent suppression strategy for power and phase angle output

## 5 实验验证

### 5.1 实验平台介绍

为进一步验证文中控制策略，基于实验平台搭建如图 1 所示的构网型换流器并网系统模型，实验平台由上位机、StarSim MT6020 仿真器、NI PXle-1071 控制器、I/O 接线口箱、信号交换机等部分组成，实验平台照片见图 11。

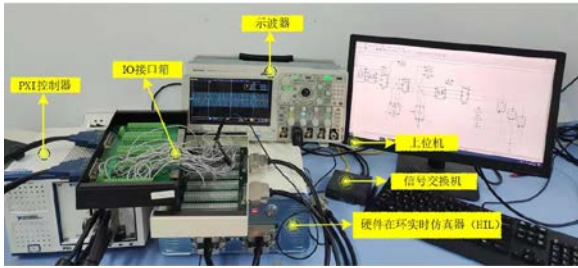


图 11 StarSim 实验平台

Fig. 11 StarSim experiment platform

在该平台中，所建模型经过信号交换机加载到 StarSim MT6020 仿真器中，控制策略由 NI PXle-1070 控制器实现，StarSim MT6020 仿真器与 NI PXle-1070 经 IO 接线箱连接，所产生的模拟信号经硬件在环测试平台进行实时仿真。

### 5.2 实验参数及工况描述

具体运行工况为：构网型换流器并网运行，设定输出有功功率为额定功率 20 kW，无功功率为 0 var；故障设置为电网电压跌落 50%；故障持续时间为 2 s，同时为进一步验证本文控制策略对于不同电网强度的适应性，通过线路参数的改变来模拟不同电网强度，实验参数见表 2。

表 2 实验参数表

参数	数值
直流电压 $U_{dc}/V$	800
电网电压 $U_g/V$	380
阻尼系数 $D/(N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1})$	4 000
无功环下垂系数 $D_q$	350
稳态过流耐流系数 $n_c$	1.2
暂态过流耐流系数 $n_t$	1.5
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.08
网侧电阻 $R_g/\Omega$	0.1
网侧电感 $L_g/mH$	1.5
滤波电阻 $R_f/\Omega$	0.1
滤波电感 $L_f/mH$	3.2
虚拟电阻 $R_v/\Omega$	1.5
虚拟电感 $L_v/mH$	3.5

### 5.3 实验结果对比

对比未采用抑制策略、采用稳态抑制策略、采用稳态+暂态抑制策略的换流器输出电流见图 12(a)-(c)。由实验结果可知，电网电压发生跌落时，稳态抑制策略对于故障期间稳态过电流有较为明显的抑制效果，对于暂态过电流峰值有一定的效果但不明显；加入暂态抑制策略后暂态过电流得到明显抑制，稳态过电流能够有效抑制在预期设定的  $n_c=1.2$  倍额定电流以内，暂态过电流也得到有效抑制，抑制在电流安全阈值内。

对比未采用抑制策略、采用稳态抑制策略、采用稳态+暂态抑制策略的换流器输出功率和功角分别见图 12(d)-(f)和图 12(g)-(i)。由于故障期间电流得到抑制，换流器输出功率的功率波动也有所缓解，并增发无功支撑电压，同时从功角曲线来看，满足抑制策略功角假设。

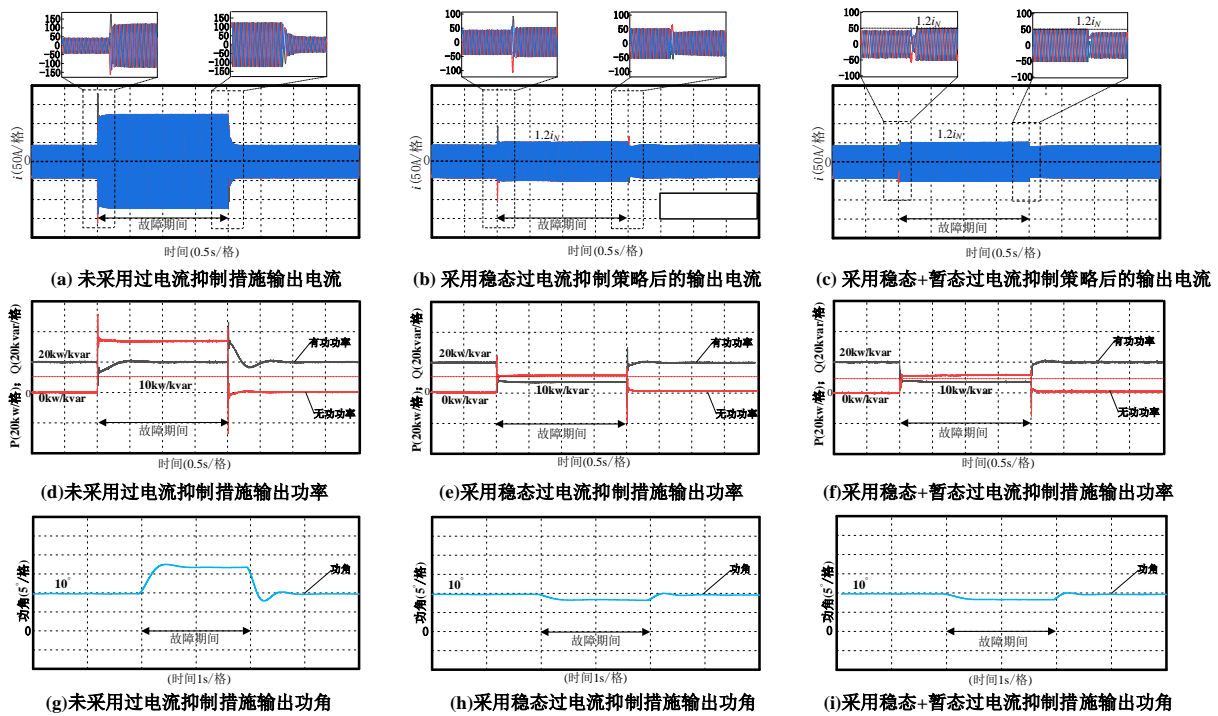


图 12 不同策略下输出对比

Fig. 12 Comparison of output under different strategies

## 6 结论

文中针对电网电压跌落引起构网型换流器的过电流问题,提出一种构网型换流器过电流抑制方法,对该抑制策略进行理论分析与仿真实验验证,最终得出结论如下:

1)构网型换流器具备良好的主动支撑特性,但与此同时在电网故障期间不可避免地造成过电流问题并伴随着功角增大,增加系统功角失稳风险。

2)电流解析表达式及图像分析表明:过电流稳态分量主要取决于构网型换流器内电势幅值;过电流暂态分量主要取决于衰减时间常数和暂态分量初始值;功角变化主要由有功不平衡导致,并与转动惯量、阻尼系数存在一定关系。

3)文中通过引入虚拟阻抗改变时间常数和系统阻抗特性抑制暂态过电流并加快其衰减;通过整定电压参考指令和有功参考指令抑制稳态过电流并保

证功角不失稳,故障期间保留了构网型换流器主动支撑特性,给予系统一定的无功电压支撑,改善了故障期间功率波动。

### 参考文献:

- [1] 刘瀚琛, 王冲, 鞠平. 双碳背景下综合能源电力系统弹性分析与提升研究综述[J]. 电气工程学报, 2023, 18(2): 108-124.  
LIU Hanchen, WANG Chong, JU Ping. Review on resilience analysis and enhancement of integrated energy power systems considering dual Carbon goal[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(2): 108-124.
- [2] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.  
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.
- [3] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.  
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system

- towards a Carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818
- [4] 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): 3586-3594.
- XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3594.
- [5] 罗家林, 陈超, 黄梅, 等. 弱电网矿区下构网型储能控制技术[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 95-103.
- LUO Jialin, CHEN Chao, HUANG Mei, et al. Research on grid-forming energy storage control technology in weak network mining area[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 95-103.
- [6] 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.
- [7] 光伏电站接入电力系统技术规: GB/T 19964—2024[S].2024.
- Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2024[S].2024.
- [8] 李奕杰, 陈良亮, 孔庆朝, 等. 新型耦合电感阻抗源逆变器应力简化分析方法[J]. 电气工程学报, 2022, 17(3): 138-146.
- LI Yijie, CHEN Liangliang, KONG Qingchao, et al. A simplified stress analysis method for coupled-inductor impedance-source inverters[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(3): 138-146.
- [9] 张长春, 赵尚, 杨弘诚, 等. 光伏并网逆变器内部短路故障耐受性能试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 28-33.
- ZHANG Changchun, ZHAO Shang, YANG Hongcheng, et al. Research on withstand performance test of internal short circuit fault of photovoltaic grid connected inverter[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 28-33.
- [10] 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): 2339-2359.
- 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): 2339-2359.
- [11] 王闰南, 谢帆, 张波. 基于神经网络方法的峰值电流控制 Boost 变换器数据驱动建模[J]. 电气工程学报, 2022, 17(2): 142-150.
- WANG Runnan, XIE Fan, ZHANG Bo. A data-driven model of peak current control boost converter based on neural network method[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(2): 142-150.
- [12] 董广凯, 黄嵩, 董佳林, 等. 定功率跟踪控制的光伏并网低电压穿越策略[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 93-98.
- DONG Guangkai, HUANG Song, DONG Jialin, et al. Low voltage ride-through strategy of grid-connected photovoltaic Generation with constant power tracking control[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 93-98.
- [13] FAN Bo, LIU Teng, ZHAO Fangzhou, 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.
- [14] WU Heng, WANG Xiongfei. Design-oriented transient stability analysis of grid-connected converters with power synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6473-6482.
- [15] 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.
- [16] ZHANG Haobo, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1239-1256.
- [17] 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.
- [18] SHUAI Zhikang, HUANG Wen, SHEN Chao, et al. Characteristics and restraining method of fast transient inrush fault currents in synchronverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7487-7497.
- [19] 范宸琛, 秦晓辉, 齐磊, 等. 构网型下垂控制中虚拟阻抗的作用、改进及研究前景分析[J]. 电网技术, 2024,

- 48(6): 2237-2250.
- FAN Chenhui, QIN Xiaohui, QI Lei, et al. Analysis of the role, improvement, and research prospects of virtual impedance in grid-forming droop control[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2237-2250.
- [20] WU Heng, WANG Xiongfei. Small-signal modeling and controller parameters tuning of grid-forming vscs with adaptive virtual impedance-based current limitation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 7185-7199.
- [21] 贾科, 刘芸, 毕天姝, 等. 基于自适应虚拟阻抗的构网型新能源电源不对称故障穿越控制[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-11[2025-03-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240307.1048.002.html>.
- JIA Ke, LIU Yun, BI Tianshu, et al. Asymmetric fault ride through of grid-forming control of renewable energy based on adaptive virtual impedance[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-11[2025-03-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240307.1048.002.html>.
- [22] WANG Y, KUANG Y, XU Q. A current-limiting scheme for voltage-controlled inverter using instantaneous current to generate virtual impedance[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2023, 13(2): 524-535.
- [23] 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): 403-411.
- 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): 403-411.
- [24] 杜毅, 孙华东, 郑超. 系统强度支撑型可塑变流器(一): 暂态电流安全及电磁暂态验证[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 8693-8706.
- DU Yi, SUN Huadong, ZHENG Chao. System strength supported flexible converter (I): transient current safety and electromagnetic transient verification[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8693-8706.
- [25] 高长伟, 黄翀阳, 郑伟强, 等. 虚拟阻抗制动可再生能源机组低电压穿越控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 142-152.
- GAO Changwei, HUANG Chongyang, ZHENG Weiqiang, et al. Low voltage ride-through control of a renewable energy unit with virtual impedance braking[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 142-152.
- [26] 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 Shenguang, et al. Dynamic current-limiting control strategy of grid-forming inverter under grid faults[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3829-3837.
- [27] 张余余, 赵晋斌, 李芬, 等. 基于功角动态补偿的VSG故障穿越方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3667-3673.
- ZHANG Yuyu, ZHAO Jinbin, LI Fen, et al. VSG fault crossing method based on dynamic compensation of power angle[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3667-3673.
- [28] 江世明, 唐杰. 基于暂态阻尼增强的改进VSG控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 144-154.
- JIANG Shiming, TANG Jie. Improved VSG control strategy based on transient damping enhancement[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 144-154.
- [29] PAQUETTE A D, DIVAN D M. Virtual impedance current limiting for inverters in microgrids with synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1630-1638.
- 石楨(1999—), 男, 硕士, 主要研究方向为新能源电力系统稳定与控制(E-mail: [shizhen1501@163.com](mailto:shizhen1501@163.com))。
- 陈来军(1984—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为综合能源系统, 新能源电力系统稳定与控制等(通信作者)(E-mail: [chenlaijun@tsinghua.edu.cn](mailto:chenlaijun@tsinghua.edu.cn))。
- 苏小玲(1986—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源发电并网优化控制、综合能源系统(E-mail: [suxiaoling@qhu.edu.cn](mailto:suxiaoling@qhu.edu.cn))。