

# 增强同步稳定的构网型变流器 虚拟惯量限流方法

孙东伟 张 旻 温步瀛 王怀远

(福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350116)

**摘要** 在弱过电流能力的构网型变流器中, 一般需要引入电流限幅以保证故障限流。然而, 电流限幅触发后系统同步稳定性遭到削弱, 现有研究鲜有对此问题进行综合考虑并加以解决。为此, 本文首先利用相量图法揭示了故障电流特性; 接着, 基于功角特性曲线和扩展等面积准则分析了电流限幅对变流器同步稳定性的不利影响。由此, 本文提出一种增强同步稳定的构网型变流器虚拟惯量限流方法, 通过定量控制虚拟惯量同时解决了变流器的故障限流和同步稳定问题。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真实验验证了理论分析的正确性和所提方法的有效性。

**关键词:** 故障限流; 同步稳定性; 构网型变流器; 虚拟惯量; 电流限幅

## Virtual inertia current limiting method for grid-forming converters with enhanced synchronous stability

SUN Dongwei ZHANG Yang WEN Buying WANG Huaiyuan

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116)

**Abstract** In grid-forming converters with weak overcurrent capability, it is generally necessary to introduce the current limiter to ensure fault current limiting. However, the synchronization stability of the system is weakened after triggering the current limiter, which is seldom comprehensively considered and addressed in existing studies. To this end, the phasor diagram method is used to reveal the fault current characteristics in this paper. Then, the adverse impact of the current limiter on the synchronization stability of the converter is analyzed based on the power angle characteristic curves and the extended equal area criterion. Thus, a virtual inertia current limiting method for grid-forming converters with enhanced synchronous stability is proposed, which simultaneously solves the fault current limiting and synchronous stability problems of converters by quantitatively controlling the virtual inertia. Finally, the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the proposed method are verified by Matlab/Simulink simulation experiments.

**Keywords:** fault current limiting; synchronous stability; grid-forming converter; virtual inertia; current limiter

## 0 引言

在推进落实“双碳”目标的背景下, 新型电力系统正在加速构建<sup>[1-2]</sup>。随着新能源及其接口变流器在电网中的渗透率持续攀升, 电网在大扰动下愈发脆弱<sup>[3-4]</sup>, 提高新能源并网的故障穿越能力势在必行。

跟网型 (grid-following, GFL) 控制和构网型

(grid-forming, GFM) 控制是当前主流的新能源并网技术<sup>[5]</sup>。GFL 控制依赖锁相环获取公共耦合点 (point of common coupling, PCC) 的相位信息来与电网保持同步, 需要外部电网提供电压支撑, 在弱电网中稳定性较差<sup>[6]</sup>。GFM 控制则具备电压和频率的主动支撑能力, 能够通过功率同步自主生成端口电压并实现并网同步运行。构网型变流器 (grid-forming converter, GFC) 的提出解决了大规模新能

源并网带来的惯性、阻尼弱化问题<sup>[7]</sup>,提高了系统鲁棒性,得到了业内的广泛认可。

GFC 由于具有电压源特性导致其输出电流受外部系统条件的高度影响,在面临电网扰动时极易引发过电流。但是,电力电子变流器的载流能力远不及传统同步机,通常只能承受 1.2p.u.~2.0p.u.的最大电流<sup>[8]</sup>,必须设置额外的过电流保护方案在故障时进行干预。考虑到电力供应的可靠性,GFC 必须具备与电网保持同步并穿越电网故障的能力<sup>[9]</sup>,频繁跳闸以防设备过电流并不是好的选择。此外,通过提高变流器的物理过电流能力或增加额外的故障限流器等硬件方案<sup>[10]</sup>也可应对故障过电流,但这些做法并不经济。因此,需要进一步考虑更为合理的故障限流方法。

目前,学者们针对 GFC 限流控制已进行了一定程度的探索,主要侧重于两种解决方案。第一种是直接对内部电流环采取电流限幅。文献<sup>[11]</sup>指出,变流器在电流饱和状态下将作为恒流源工作,其电压跟踪和功率同步控制被破坏,易与电网失去同步。文献<sup>[12]</sup>通过调用一个备用锁相环将变流器切换为 GFL 控制,但如何安全退出并恢复功率同步的问题依然存在。文献<sup>[13]</sup>探讨了不同的限幅策略,表明电流限幅策略均会损害系统的暂态稳定裕度。因此,电流限幅下 GFC 不具备电压支撑和功率同步能力,其同步稳定性被削弱。

第二种是通过虚拟阻抗来降低变流器的基准电压,间接实现限流。该方案模拟了过电流时阻抗的作用,但其性能受矢量电压环的控制带宽限制<sup>[14]</sup>。此外,短路比的改变可能会使其失效<sup>[15]</sup>。文献<sup>[16]</sup>指出虚拟阻抗会影响 GFC 的动态性能,导致临界切除时间减少。文献<sup>[17]</sup>通过分析证明了虚拟阻抗会导致功率耦合加剧,降低变流器同步稳定裕度。故虚拟阻抗限流方案的应用也面临同步稳定问题。

综上所述,故障限流是保证变流器安全稳定运行的必要条件,但现有的限流控制方案往往无法兼顾变流器的同步稳定性。若只保证限流而忽略同步稳定问题,则 GFC 将面临更大的失步和脱网风险,这显然违背了控制的初衷。

为此,本文对 GFC 故障限流和同步稳定问题综合加以考虑。首先,介绍 GFC 系统模型的相关结构。其次,探讨 GFC 故障电流特性,借助相量图表明故障电流幅值与暂态功角的定性关系。然后,基于功角特性曲线分析电流限幅对 GFC 同步稳定性的不

利影响。由此,本文提出一种增强同步稳定的构网型变流器虚拟惯量限流方法,以在满足 GFC 限流需求的同时确保其同步稳定。

## 1 GFC 系统模型

GFC 并网系统主电路和控制结构如图 1 所示。图 1 中, $i$  和  $u$  为 GFC 输出电流和输出电压; $L_f$ 、 $R_f$ 、 $C_f$  和  $L_g$  分别为滤波电感、滤波电阻、滤波电容和线路电感; $u_g$  为电网电压。GFC 通过功率同步控制生成公共耦合点的电压参考值,并由电压电流双闭环进行跟踪。以电网电压相位为基准,GFC 输出电压的相位  $\delta$  可定义为 GFC 的功角。

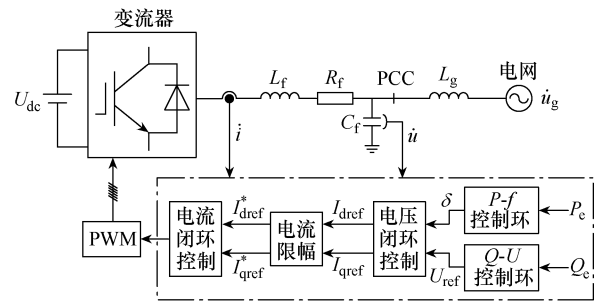


图 1 GFC 并网系统主电路和控制结构

GFC 的功率同步控制可用摇摆方程和无功-电压方程表示,分别为

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

$$U_{ref} = k_q(Q_{ref} - Q_e) + U_n \quad (2)$$

式中: $P_{ref}$  和  $P_e$  分别为 GFC 的有功功率参考值和实际值; $Q_{ref}$  和  $Q_e$  分别为 GFC 的无功功率参考值和实际值; $\omega_n$ 、 $\omega$  分别为额定角频率和实际角频率; $U_n$  和  $U_{ref}$  分别为 GFC 的额定电压幅值和参考电压幅值; $J$ 、 $D$  分别为 GFC 的虚拟惯量、阻尼系数; $k_q$  为无功-电压下垂系数。

由于线路阻抗可近似认为是纯电感,因此 GFC 向电网输送的有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} P_e = \frac{3U_g U}{2X_g} \sin \delta \\ Q_e = \frac{3U}{2X_g} (U - U_g \cos \delta) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $X_g = \omega L_g$  为线路电抗； $U_g$ 、 $U$  分别为电网电压幅值、GFC 输出电压幅值。

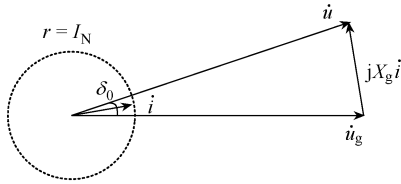
## 2 计及电流限幅的 GFC 暂态特性分析

### 2.1 GFC 故障电流特性分析

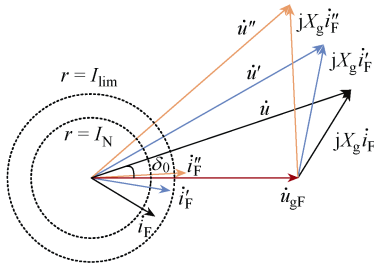
根据图 1，忽略 GFC 输出电流非周期分量的衰减过程，其输出电流始终满足

$$\dot{i} = \frac{\dot{u} - \dot{u}_g}{jX_g} \quad (4)$$

因此，GFC 的输出电流大小受电网电压和输出电压相量的幅值、相位所影响。可进一步绘出正常工况和故障工况下的电压电流相量图如图 2 所示。图 2 中， $\delta_0$  为正常运行下的功角， $I_N$  为额定电流幅值， $I_{lim}$  为电流限幅值； $\dot{u}_{gF}$  为电网故障电压， $\dot{u}'$  和  $\dot{u}''$  分别为不同功角下的 GFC 输出电压， $\dot{i}_F$ 、 $\dot{i}'_F$ 、 $\dot{i}''_F$  分别为不同功角下的故障电流。



(a) 正常工况



(b) 故障工况

图 2 不同工况下的电压电流相量图

图 2 (a) 为正常工况下的相量图，此时的电流幅值为  $I_N$ 。图 2 (b) 刻画了故障工况下的相量关系。当电网电压发生跌落时，电流幅值首先会在故障初始时刻突增，如图 2 (b) 中相量  $\dot{i}_F$  所示。随后，故障引起功角增大，导致相量  $\dot{u}$  与  $\dot{u}_{gF}$  之间的相位差变大，进而使电流幅值继续增大，如图 2 (b) 中相量  $\dot{i}'_F$ 、 $\dot{i}''_F$  所示。因此，在电压跌落故障下，故障电流首先在电网电压骤降时刻突增，然后随功角增大而增大。

考虑电流限幅作用下，当故障电流幅值增至电

流限幅值  $I_{lim}$  时将被强制限流。基于上述分析可知，通过限定暂态功角可有效抑制故障电流的增大，从而避免限幅触发。

### 2.2 电流限幅对 GFC 同步稳定性的影响

当 GFC 处于电流限幅状态时，其有功功率将被电流限幅值  $I_{lim}$  所约束，即

$$P_e = \frac{3}{2} U_g I_{lim} \cos \delta \quad (5)$$

限幅作用前后 GFC 的  $P_e$ - $\delta$  曲线如图 3 所示。可以看出，在限幅作用后，GFC 所能输出的最大有功功率显著降低，稳定平衡点也偏离图 3 所示范围。

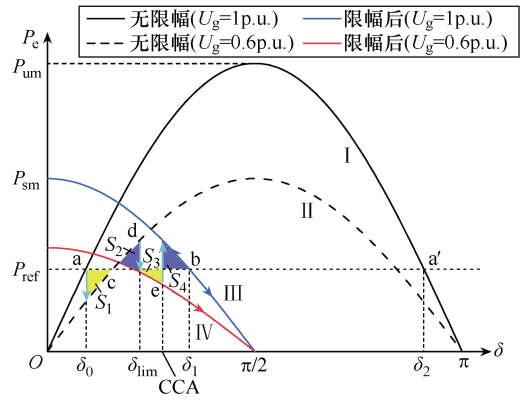


图 3 限幅作用前后 GFC 的  $P_e$ - $\delta$  曲线

图 3 绘出了 GFC 系统发生电网电压跌落故障时的功角特性曲线。正常工况下，工作点在曲线 I 上的稳定平衡点 a 处稳定。当故障发生后（以  $U_g$  跌落至 0.6p.u. 为例），工作点沿曲线 II 变化，GFC 的虚拟转子开始加速，从而引起功角增大；当工作点越过 c 点后，虚拟转子减速，功角将继续增大。

若故障未能被及时清除，在无限幅作用时 GFC 最后仍可在稳定平衡点 c 处稳定；而在有限幅作用时，GFC 会在功角到达限幅触发角  $\delta_{lim}$  时引起限幅，工作点转而落到曲线 IV 上。因故障未及时清除，GFC 很可能在曲线 II 上还未完全减速时便转为沿曲线 IV 一直加速，功角将失稳。

若在限幅作用后故障被及时清除，因限幅无法立即随之退出，导致工作点将落在曲线 III 上。由于 b 点为不稳定平衡点，功角稳定区间将由无限幅下的  $[\delta_0, \delta_2]$  缩小为  $[\delta_0, \delta_1]$ 。一旦功角超过  $\delta_1$ ，GFC 会沿曲线 III 一直加速，导致功角失稳。

根据扩展等面积准则<sup>[18]</sup>可知，保持系统同步稳定要求加速面积应等于减速面积。由图 3 可知，限幅触发后导致 GFC 可用的最大减速面积减少，甚至可能带来额外的加速面积  $S_3$ 。此时，欲避免功角失

稳, 须满足  $S_1+S_3 \leq S_2+S_4$ 。当等号成立时, 所对应功角为临界清除角 (critical clearing angle, CCA)  $\delta_{CCA}$ 。这意味着故障必须在  $\delta \in [\delta_0, \delta_{CCA}]$  范围内被清除。若没有及时控制干预, 故障清除角极可能超过 CCA, 导致 GFC 无法恢复正常运行。

### 3 增强同步稳定的 GFC 虚拟惯量限流方法

据第2节的分析可知, 当故障触发电流限幅时, GFC 除了需要承受故障所带来的冲击, 其功角稳定区间还会因限幅作用而严重缩减。因此, 须在满足限流需要的同时确保系统同步稳定。

故障电流特性分析中指出, 限定暂态功角可有效抑制故障电流的增大。结合图3可知, 通过施加控制将故障清除角限制在  $\delta \in [\delta_0, \delta_{lim}]$  范围内, 足以保证电流不越限。重要的是, 此举既可规避限幅及其不利影响, 又可确保系统的同步稳定。

为此, 本节引入虚拟惯量定量控制, 通过表征出故障电流幅值、功角和虚拟惯量三者之间的定量关系, 得出一种增强同步稳定的 GFC 虚拟惯量限流方法。

#### 3.1 故障电流幅值与功角的定量关系表征

根据图2并借助余弦定理可得故障电流幅值  $I_F$  的表达式为

$$I_F = \frac{1}{X_g} \sqrt{U_{gF}^2 + U^2 - 2U_{gF}U \cos \delta} \quad (6)$$

式中,  $U_{gF}$  为电网故障电压幅值。

当发生电网电压跌落后, 由式(3)可知, GFC 无功功率输出增加。由于 GFC 中存在无功-电压下垂特性, 若在定量分析中忽略无功环的影响可能导致分析结果误差较大。因此, 为缩小量化误差, 需将 GFC 电压变化纳入考虑。

由于电压、电流控制环的响应时间尺度远远小于功率外环<sup>[19]</sup>, 可近似认为  $U=U_{ref}$ 。通过将式(2)代入式(3)中, 建立关于  $U$  的二次方程, 即

$$U^2 + \left( \frac{2X_g}{3k_q} - U_{gF} \cos \delta \right) U - \frac{2X_g}{3k_q} (U_n + k_q Q_{ref}) = 0 \quad (7)$$

求解该二次方程得

$$U = \sqrt{m^2 + \frac{2X_g}{3k_q} (U_n + k_q Q_{ref})} - m \quad (8)$$

式中,  $m = \frac{2X_g/3k_q - U_{gF} \cos \delta}{2}$ 。

整合式(6)和式(8), 进一步得到故障电流幅值与功角的定量关系式为

$$I_F = \frac{1}{X_g} \left[ U_{gF}^2 + \left( \sqrt{m^2 + \frac{2X_g}{3k_q} (U_n + k_q Q_{ref})} - m \right)^2 - 4 \left( \frac{X_g}{3k_q} - m \right) \left( \sqrt{m^2 + \frac{2X_g}{3k_q} (U_n + k_q Q_{ref})} - m \right) \right]^{1/2} \quad (9)$$

式(9)量化了故障期间的暂态功角增大对电流幅值的影响。在已知电网故障电压和电流限幅值的前提下, 可由此确定限幅触发角。

#### 3.2 故障清除角与虚拟惯量的定量关系表征

由于虚拟惯量与功角之间的动态响应关系由式(1)所决定, 因此虚拟惯量的改变将产生不同的功角动态, 控制虚拟惯量有助于限定故障清除角。将式(3)代入式(1), 可得故障期间的功角动态方程为

$$J_F \omega_n \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \omega_n \frac{d\delta}{dt} + \frac{3U_{gF}U}{2X_g} \sin \delta - P_{ref} = 0 \quad (10)$$

式中,  $J_F$  为故障期间的虚拟惯量。

考虑到 GFC 在实际中的暂态功角通常较小, 可将  $\sin \delta$  近似为  $\delta$ , 得到简化后的功角动态方程为

$$J_F \omega_n \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \omega_n \frac{d\delta}{dt} + \frac{3U_{gF}U}{2X_g} \delta - P_{ref} = 0 \quad (11)$$

动态方程简化前后的相平面图如图4所示, 表明了上述简化的合理性。

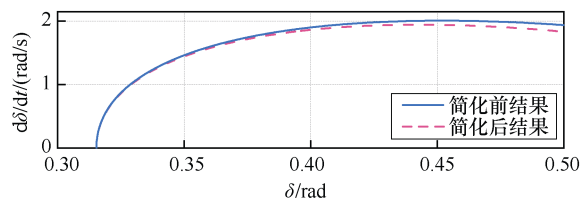


图4 无电流限幅下动态方程简化前后的相平面图

由式(11)求解得到故障清除角  $\delta_c$  的解析式为

$$\delta_c = \frac{2X_g P_{ref}}{3U_{gF}U} + C_1 e^{-\frac{T_c \left[ \sqrt{\omega_n (D^2 \omega_n - 6J_F U_{gF} U / X_g)} + D \omega_n \right]}{2J_F \omega_n}} + C_2 e^{-\frac{T_c \left[ \sqrt{\omega_n (D^2 \omega_n - 6J_F U_{gF} U / X_g)} - D \omega_n \right]}{2J_F \omega_n}} \quad (12)$$

式中： $C_1$ 和 $C_2$ 为常数，由方程初始条件所确定； $T_c$ 为故障清除时间，通常可依据继电保护的响应时间而定。

式(12)表征了故障清除角 $\delta_c$ 与虚拟惯量 $J_F$ 的定量关系，可进一步为故障限流所需的虚拟惯量定量控制提供指导。

### 3.3 增强同步稳定的 GFC 虚拟惯量限流方法

为解决 GFC 因功角增大而引起的过电流问题，本小节基于上述定量关系对限流所需的虚拟惯量进行量化，并进一步定量控制虚拟惯量来限定故障清除角，从而实现故障限流。

所提方法的执行流程如图 5 所示。首先，当检测到系统存在电网电压跌落故障后，进入对当前故障下采取虚拟惯量限流的相关计算。将已知的电网故障电压 $U_{gF}$ 和电流限幅值 $I_{lim}$ 代入式(9)，可计算得到限幅触发角 $\delta_{lim}$ 。然后，以 $\delta_{lim}$ 为故障清除角的限定目标，将 $\delta_{lim}$ 代入式(12)即可得到所需的故障期间虚拟惯量值 $J_F$ 。最后，参照上述计算结果对故障期间的虚拟惯量进行控制。

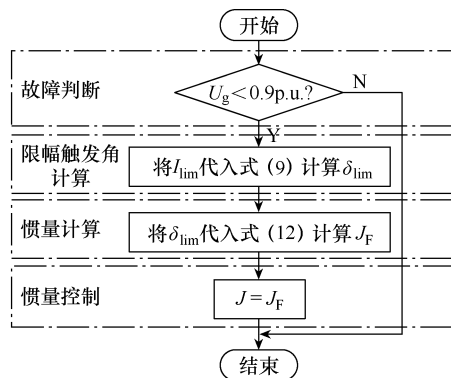


图 5 所提虚拟惯量限流方法流程

## 4 仿真验证

为验证本文理论分析和所提方法的正确性，基于 Matlab/Simulink 仿真软件搭建如图 1 所示的 GFC 系统模型。主要仿真参数见表 1。

表 1 主要仿真参数

参数	数值
直流电压 $U_{dc}/V$	800
额定电压幅值 $U_n/V$	311
电网电压幅值 $U_g/V$	311
额定角频率 $\omega_n/(\text{rad/s})$	$100\pi$
有功功率参考值 $P_{ref}/kW$	60
无功功率参考值 $Q_{ref}/kvar$	0

(续表 1)

参数	数值
线路电感 $L_g/mH$	2.5
滤波电感 $L_f/mH$	1
滤波电阻 $R_f/\Omega$	0.6
滤波电容 $C_f/\mu F$	200
虚拟惯量初始值 $J_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1
阻尼系数 $D/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad})$	40
无功-电压下垂系数 $k_q$	$3\times 10^{-5}$

### 4.1 GFC 虚拟惯量限流方法验证

仿真测试在无限幅作用下电网电压发生对称故障时 GFC 的性能。设置故障工况为：电网电压在 2s 时刻跌至 0.5p.u.，持续 0.5s。假设 GFC 输出电流的安全阈值为 1.8p.u.

无附加控制时 GFC 暂态响应过程如图 6 所示。输出电流首先在故障初始时刻突增，在经过短暂非周期分量衰减后，电流逐渐增大，至故障清除时刻达到 2.06p.u.。此外，有功功率因电压跌落而迅速降低，但故障期间功角显著增大，进而使有功功率随之升高。此仿真结果与前述故障电流特性分析结果相符。

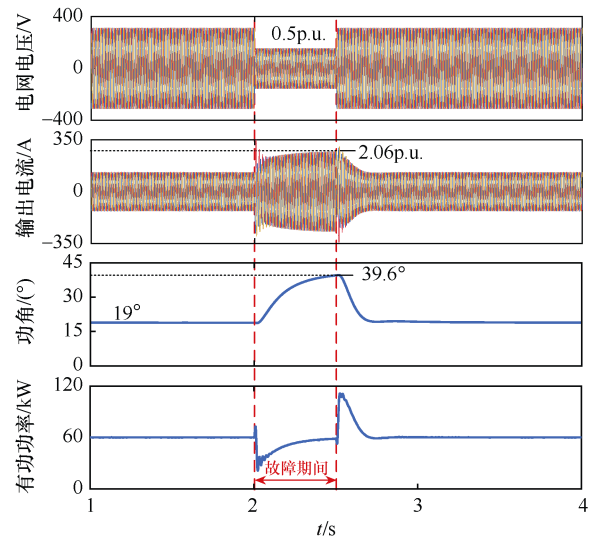


图 6 无附加控制时 GFC 暂态响应过程

在相同故障工况下引入所提虚拟惯量限流方法进行测试。依据电流安全阈值进行计算，得出相应的故障清除角为  $26.8^\circ$ ，所需虚拟惯量为 71.5p.u.，得到仿真结果如图 7 所示。故障清除角被限定在  $26.0^\circ$ ，同时输出电流被合理地限制在 1.77p.u. 内，有功功率在故障期间和故障清除后的波动均减小。可见，所提方法可实现按需限制输出电流和暂态功角，起到

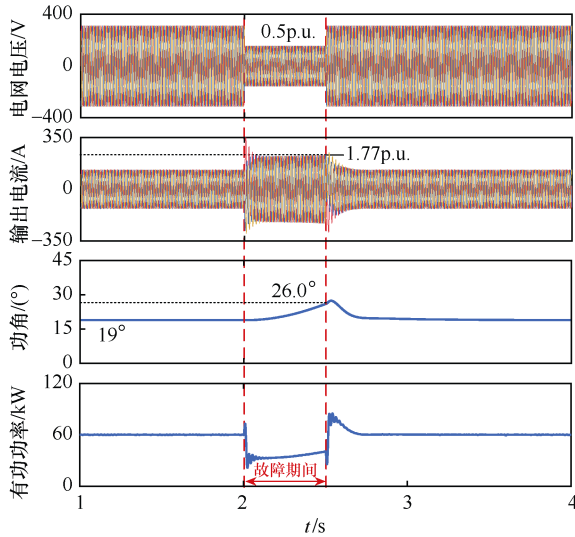


图7 引入所提虚拟惯量限流方法时GFC仿真结果兼顾故障限流和同步稳定的效果。

值得说明的是,对于上述两种情形,若考虑限幅作用(电流限幅值按照电流安全阈值取为 $1.8\text{p.u.}$ ),无附加控制时GFC需进入电流限幅状态,而采取所提虚拟惯量限流方法时则可以规避限幅触发。因此,所提方法可阻止限幅对系统同步稳定性造成损害。

#### 4.2 虚拟惯量限流方法与电流限幅对比验证

为进一步验证本文所提限流方法相较于电流限幅的同步稳定性优势,仿真在更恶劣的故障条件下进行测试:电网电压在 $2\text{s}$ 时刻跌至 $0.5\text{p.u.}$ ,持续 $0.8\text{s}$ 。所得仿真结果见表2。可以看出,电流限幅和虚拟惯量限流方法均能有效限制故障电流。但电流限幅下功角波动较大,故障清除后无法恢复,最终导致系统失去同步;而在虚拟惯量限流下,因其限制了故障清除角,系统仍保持同步稳定。

表2 电压跌落故障持续 $0.8\text{s}$ 的仿真结果

方法	最大电流幅值/p.u.	故障清除角/(°)	系统状态
无附加控制	2.08	41.1	同步稳定
电流限幅	1.80	71.2	失去同步
虚拟惯量限流	1.76	25.9	同步稳定

## 5 结论

针对GFC在故障限流下存在的同步稳定问题,本文借助相量图揭示了故障电流特性;进一步地,基于功角特性曲线和等面积准则分析了电流限幅下的功角稳定区间,由此提出了一种增强同步稳定的

GFC虚拟惯量限流方法,同时解决了GFC故障限流和同步稳定问题。本文得出的结论如下:

1) 故障电流首先在电网电压骤降时刻突增,然后随功角增大而增大。电流限幅会牺牲GFC的同步稳定性,表现为:有功功率输出能力降低、稳定平衡点偏离、功角稳定区间缩减、最大减速面积减少。

2) 限定暂态功角可有效抑制故障电流的增大。基于故障电流幅值、功角和虚拟惯量之间的定量关系,引入虚拟惯量定量控制,可同时实现对故障清除角和故障电流的限制,规避限幅触发及其不利影响,提升GFC同步稳定性。

需要说明的是,本文的定量关系模型均基于电压对称跌落故障推导得到,故所提方法仅适用于电压对称跌落故障,针对其他类型的故障仍需进一步研究。

## 参考文献

- [1] 杜步阳,邵德军,朱建行,等.电压源型变流器并网系统多时间尺度间相互作用[J].电工技术学报,2023,38(20):5547-5559.
- [2] 刘伟,刘欣悦.基于能量函数和改进虚拟同步控制的低频振荡抑制策略[J].电气技术,2024,25(9):1-8.
- [3] 熊小玲,李昕悦,周琰,等.基于陷波器的构网型换流器同步频率谐振抑制策略[J].电工技术学报,2024,39(12):3827-3839.
- [4] 魏译帆,邢建春.基于虚拟同步发电机双模式切换的柴储微电网无差调频控制策略[J].电气技术,2022,23(11):13-20.
- [5] 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.
- [6] ZHU Donghai, ZHOU Shiying, ZOU Xudong, et al. Improved design of PLL controller for LCL-type grid-connected converter in weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 4715-4727.
- [7] 胡石阳,刘国荣.基于虚拟同步机的新能源并网智能控制研究[J].电气技术,2022,23(10):10-17.
- [8] LI Zilin, CHAN K W, HU Jiefeng, et al. An adaptive fault ride-through scheme for grid-forming inverters under asymmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 12912-12923.
- [9] 杨欢红,焦伟,黄文焘,等.考虑暂态功角稳定和故

(下转第60页)

## 参考文献

- [1] 刘炜, 娄颖, 张戩, 等. 计及城市轨道交通逆变回馈装置的交直流统一供电计算[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4381-4391.
- [2] 潘雷, 苟浩. 地铁再生制动回馈装置分站设置研究[J]. 电气技术, 2020, 21(10): 59-62.
- [3] 黄德胜, 张巍. 地下铁道供电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 于松伟, 杨兴山, 韩连祥, 等. 城市轨道交通供电系统设计原理与运用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
- [5] 李昕, 范庆平. 地铁牵引供电直流设备框架保护系统改进[J]. 铁道技术监督, 2023, 51(1): 50-54.
- [6] 刘建华. 一起牵引变电所框架保护跳闸事故的分析[J]. 机电工程技术, 2021, 50(4): 263-264.
- [7] 王小峰. 地铁直流框架泄漏保护的优化设计[J]. 电气化铁道, 2015(2): 31-34.
- [8] 陈民武, 赵鑫, 丁大鹏, 等. 城市轨道交通供电系统钢轨电位限制装置操作过电压研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(6): 94-98.
- [9] 地下铁道工程施工质量验收标准: GB/T 50299—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [10] 张征, 杨少兵, 吴命利, 等. 一种用于钢轨电位评估的回归建模方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊 1): 31-39.
- [11] 刘炜, 杨龙, 李国玉, 等. 计及回流系统设备行为过程的钢轨电位动态仿真[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 1000-1009.
- [12] 金文辉. 地铁车辆段杂散电流分析与防护方案[J]. 电气技术, 2023, 24(2): 11-17.
- 
- 收稿日期: 2024-11-21  
修回日期: 2025-01-17  
作者简介  
沈赐奎(1985—), 男, 福建龙岩人, 本科, 主要从事轨道交通供电设备运维工作.
- 
- (上接第6页)
- 障限流的并网逆变器下垂暂态控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 59-70.
- [10] JIANG Fei, CHENG Siju, TU Chunming, et al. Design consideration of a dual-functional bridge-type fault current limiter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 3825-3834.
- [11] CHEN Junru, PRYSTUPCZUK F, O'DONNELL T. Use of voltage limits for current limitation in grid-forming converters[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(2): 259-269.
- [12] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen, 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.
- [13] SAFFAR K G, DRISS S, AJAEI F B. Impacts of current limiting on the transient stability of the virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 1509-1521.
- [14] LIU Teng, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. A current limiting method for single-loop voltage-magnitude controlled grid-forming converters during symmetrical faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4751-4763.
- [15] TAUL M G, WANG Xiongfei, 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.
- [16] SUN Kun, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. A two-stage simultaneous control scheme for the transient angle stability of VSG considering current limitation and voltage support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2137-2150.
- [17] 付熙坤, 黄萌, 凌扬坚, 等. 功率耦合和电流限幅影响下构网型逆变器的暂态同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2815-2825.
- [18] 张海. 基于扩展等面积法的电力系统暂态稳定分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
- [19] 葛平娟, 肖凡, 涂春明, 等. 考虑故障限流的下垂控制型逆变器暂态控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(14): 3676-3687.
- 
- 收稿日期: 2024-11-25  
修回日期: 2024-12-25  
作者简介  
孙东伟(2000—), 男, 福建省泉州市人, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源与储能应用技术.