第49卷 第22期 2025年11月25日
DOI：10.7500/AEPS20241225006
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 49 No. 22 Nov. 25，2025

电网频率跌落下基于功角增量的构网型逆变器限流策略

王顺亮[1]，陈亚龙[1]，马俊鹏[1]，涂　皓[1]，史华勃[2]，滕予非[2]
（1. 四川大学电气工程学院，四川省成都市 610065；2. 国网四川省电力公司电力科学研究院，四川省成都市 610041）

摘要： 构网型(GFM)逆变器可以有效地缓解由于新能源发电渗透率提高导致的低惯性与弱网稳定性问题。然而，GFM逆变器的虚拟惯性也会引发电网频率跌落期间的过流问题。针对此问题，文中基于频率跌落期间的功角变化，揭示了GFM逆变器与电网之间的功角增量是电网频率跌落期间GFM逆变器过流的主导因素，需要投入限流策略来避免过流。为了避免限流策略的反复投切并实现快速过流保护，提出了一种基于事件触发的SR锁存器切换逻辑；该方法利用事件触发的逻辑实时响应过流事件，从而实现快速过流保护。然后，提出了一种基于功角增量的自适应频率追踪策略，并基于过流初始阶段的残余功角增量自适应计算虚拟阻抗。所提方法不仅抑制了电网故障期间的过流，增强了系统的同步稳定性，还具备故障恢复能力。此外，通过对自适应频率追踪策略的闭环传递函数的带宽分析，表明该策略具有良好的兼容性。最后，仿真和实验结果验证了所提方法的有效性与准确性。

关键词： 构网型逆变器；频率跌落；惯性；限流；功角增量；频率追踪；虚拟阻抗；过流保护

0　引言

近年来，为了实现“双碳”目标和应对日益增长的电力需求和环境压力，以高比例新能源与高比例电力电子设备为特点的新型电力系统正在逐渐形成[1-3]。其中，以风电、光伏发电为代表的新能源增长迅速，这些新能源机组都采用基于电力电子技术的逆变器作为并网接口。随着传统同步发电机的占比减少，以抽水蓄能和电化学储能为代表的储能逐步增加，全功率抽水蓄能电站和电化学储能电站也是以逆变器作为并网接口。然而，目前并网逆变器通常采用跟网型(grid-following，GFL)控制来调节并网电流。同时，由于GFL逆变器的源端输入功率与网侧电磁功率解耦，导致其普遍缺乏旋转备用容量和转动惯量，不能提供与传统同步发电机类似的惯性响应[4]。因此，以高比例新能源与高比例电力电子设备为特点的新型电力系统容易缺乏必要的惯性支撑与阻尼响应，从而影响电压与频率的稳定性。

此外，传统的GFL逆变器在弱网中还存在同步不稳定等问题。因此，为了给新型电力系统提供必要的电压和频率支撑，增强新型电力系统的系统稳定性，构网型(grid-forming，GFM)控制被提出。典型的GFM控制[5-6]方法包括下垂控制[7]、带有低通滤波器的下垂控制[8-9]、虚拟同步发电机控制[10-11]、功率同步控制[12]和虚拟振荡器控制[13]。

然而，在电网频率跌落期间，具有虚拟惯性的GFM逆变器频率变化会滞后于电网频率，即存在频率偏差，从而引起GFM逆变器与电网之间的功角增大，导致过流。因此，如何应对电网频率跌落引发的过流成为故障期间的关键问题，并且GFM逆变器还需要具备一定的故障恢复能力。此外，常用的限流策略还需要相应的投入与切出方法。然而，如何快速实现过流保护与限流策略的投入与切出，避免过流期间限流策略的反复投切和故障恢复后控制使能信号的复位也是切换策略的关键问题。

为了解决GFM逆变器在电网故障期间的过流问题，电力电子设备可以设定更高的额定功率，以承受更大的浪涌电流。然而，这种方法不可避免地增加了逆变器的成本。通过控制环节限流的方法不会增加硬件成本，主要有以下几种方法：

1)添加电流限制器。文献[14-16]提出了一种通过电流环限幅的方法来限制输出电流。然而，这种限流方法不仅会导致逆变器对外呈现电流源特性，还可能会导致电压外环饱和，以致电压控制回路在故障清除后难以恢复，逆变器的稳定运行无法得到保证，甚至可能出现暂态不稳定问题[15-16]。文献[17]通过限制逆变器输出功率来限制输出电流。然

收稿日期：2024-12-25；修回日期：2025-05-29。
上网日期：2025-08-14。
智能电网国家科技重大专项资助项目(2024ZD0801600)。

而，这种方法由于外部控制的低带宽会导致输出电流的动态响应特性变差。此外，该方法一般也难以给定合适的功率指令。

2）添加虚拟阻抗。该方法通过增加逆变器等效总输出阻抗来降低逆变器输出电流。在文献[18]中，基于虚拟阻抗的方法可以有效地抑制电网故障恢复过程中的故障电流和振荡。文献[19]提出了一种基于自适应虚拟阻抗的电流限制小信号建模和控制器参数整定方法。文献[20]提出了一种带有虚拟电阻的虚拟同步发电机的数学模型。在此基础上，利用相图和非线性系统的吸引域分析了非线性系统的暂态稳定性。文献[21]分析了由于功率过限引起的暂态同步不稳定问题，并采用动态限流策略对其进行抑制。由于虚拟阻抗的限流带宽小于内部控制回路带宽，可能导致虚拟阻抗无法限制故障初始阶段快速上升的暂态峰值电流。文献[22]阐述了虚拟电阻与暂态过流的关系，提出了相量限流与虚拟电阻相结合的限流方法。结果显示，增大虚拟电阻可以减小暂态电流，但是虚拟电阻增大不利于系统稳定与有功-频率、无功-电压的解耦。然而，当故障程度不同时，所需的虚拟阻抗并不相同，且在同一故障程度下，虚拟阻抗的精准设计也较为困难。

3）添加电压限制器[23-24]。该方法通过调节功率外环产生的参考电压幅值与相位来限制输出电流。为了保证该方法的故障恢复能力，需要对外环控制器进行适当的抗饱和设计。在文献[25]中，当限流器被触发时，电压控制器的积分器被设置为零，以提高GFM逆变器的故障恢复能力。在文献[26-27]中，外环控制器被重新设计为基于角度优先的电流限幅器，以避免电压控制器的饱和。然而，这些方法只适用于特定的内环和外环控制结构和系统参数；一旦控制结构或系统参数发生变化，这些方法就失去了有效性。

目前，针对GFM逆变器限流的文献大多停留在电网电压暂降导致过流的层面。针对电网频率跌落引发的过流问题并未得到广泛关注，机理分析也尚不清晰。因此，本文首先建立了带有低通滤波器的下垂控制模型，提出了基于SR锁存器的控制切换策略。其次，针对电网频率跌落引发的过流问题，基于功角变化情况分析了过流产生的机理，并据此提出了基于频率跌落的自适应频率追踪策略。该策略可以自适应地减小电网频率跌落期间GFM逆变器与电网之间的功角增量，从而达到限流的目的。此外，过流初始阶段由于过流阈值的存在会产生残余功角，从而导致输出电流一直维持在过流阈值大小。因此，提出一种基于残余功角的虚拟阻抗自适应计算方法，该方法可以保证输出电流接近额定电流。最后，通过仿真与实验验证了上述限流策略在快速过流保护与故障恢复能力方面的有效性与准确性。

1　基于下垂控制的GFM逆变器并网模型

1.1　拓扑结构及控制系统

典型的下垂控制型三相并网逆变器的拓扑结构与控制系统如图1所示。图中：V_{dc}为逆变器直流侧电压，一般由光伏或风机提供；逆变器交流侧通过滤波电感L_f与滤波电容C_f滤除高频谐波，最后通过公共连接点（point of common coupling，PCC）经网侧等效电感L_g与电网连接；$\boldsymbol{i}_{L\alpha\beta}$和$\boldsymbol{i}_{Ldq}$分别为$\alpha\beta$坐标系和$dq$坐标系下的电感电流；$\boldsymbol{v}_{o\alpha\beta}$和$\boldsymbol{v}_{odq}$分别为$\alpha\beta$坐标系和$dq$坐标系下的电容电压；$\boldsymbol{i}_{o\alpha\beta}$和$\boldsymbol{i}_{odq}$分别为$\alpha\beta$坐标系和$dq$坐标系下的输出电流；$P$和$Q$分别为GFM逆变器实际有功、无功功率；$U_{od}^{ref}$为下垂控制输出的电压参考值；$\boldsymbol{I}_{Ldq}^{ref}$为电压控制器输出的电流参考值；$G_V$和$G_C$分别为电压和电流比例-积分（proportional-integral，PI）控制器的传递函数；s为拉普拉斯变换的复数变量。

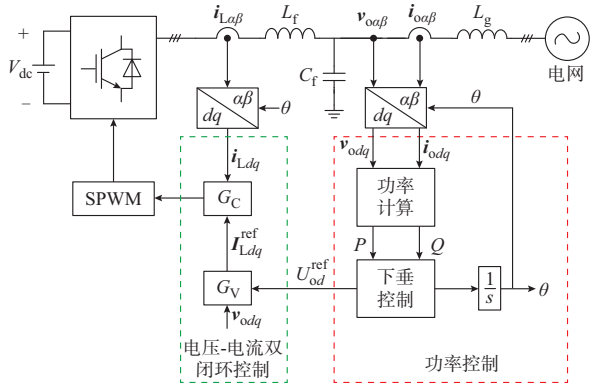

图1　下垂控制型三相并网逆变器的拓扑结构与控制系统

Fig. 1　Topology and control system of three-phase grid-connected inverter with droop control

GFM逆变器的控制系统包括功率控制、电压-电流双闭环控制和调制环节。其中，外环功率控制通过采集PCC处的电压和电流，计算有功功率和无功功率。有功-频率下垂控制得到用于dq变换的相位θ，无功-电压下垂控制得到电压控制器的d轴电压参考值U_{od}^{ref}，从而为受控电压源提供电压与相位参考，其等效控制结构如附录A图A1所示。电压环通过下垂控制的反馈量实现输出电压的恒定控制，电流环提供快速的动态响应和精确的电流控制，从而确保GFM逆变器输出的电能质量。因此，GFM逆变器对外呈现电压源特性。最后，通过正弦

脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)产生驱动开关管的脉冲信号。

1.2　功率控制

GFM逆变器的等效电路和矢量表示如图2所示。图中:V为GFM逆变器输出电压的有效值;I为GFM逆变器输出电流的有效值;φ为GFM逆变器输出电压与电流的相位差;E为电网电压的有效值;δ为GFM逆变器输出电压与电网电压之间的相位差,即功角;R和X分别为等效线路电阻和等效线路电抗。

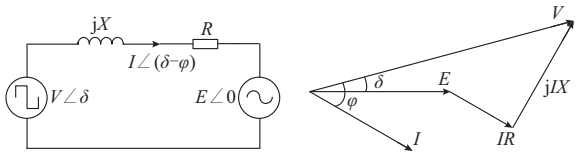

图2　GFM逆变器的等效电路和矢量图
Fig. 2　Equivalent circuit and vector diagram of GFM inverter

通过电网线路阻抗的有功功率和无功功率如式(1)所示。

$$\begin{cases} P=\dfrac{V}{R^2+X^2}\left[R(V-E\cos\delta)+XE\sin\delta\right] \\ Q=\dfrac{V}{R^2+X^2}\left[X(V-E\cos\delta)-RE\sin\delta\right] \end{cases} \tag{1}$$

在输电线路中线路阻感比较低($X\gg R$),故只考虑线路电感。此外,功角δ较小,可以假设$\sin\delta=\delta$,$\cos\delta=1$,则式(1)可化简如下:

$$\begin{cases} P=\dfrac{V}{X}E\delta \\ Q=\dfrac{V}{X}(V-E) \end{cases} \tag{2}$$

由式(2)中功角δ与有功功率P以及电压差$V-E$与无功功率Q的数学关系可知,可以通过控制GFM逆变器有功功率和无功功率的参考值来调节其输出的角频率ω和电压幅值V。因此,下垂控制的公式可以表示为式(3)[4]。

$$\begin{cases} \omega=\omega_{\mathrm{ref}}+D_{\mathrm{f}}(P^*-P) \\ U_{od}^{\mathrm{ref}}=U_{\mathrm{ref}}+D_{\mathrm{q}}(Q^*-Q) \end{cases} \tag{3}$$

式中:ω和U_{od}^{ref}分别为逆变器输出角频率和逆变器电压幅值;ω_{ref}和U_{ref}分别为额定角频率和电压的参考值;D_{f}和D_{q}分别为有功和无功下垂系数;P^*为逆变器输出有功功率的参考值;Q^*为逆变器输出无功功率的参考值。

低通滤波器通常用于抑制功率纹波,并在下垂控制环路中为系统频率稳定提供虚拟惯性[5]。低通滤波器不仅可以滤除高次谐波,还可以避免下垂控制器与内控制回路之间的相互作用。低通滤波器的传递函数如式(4)所示,带有低通滤波器的下垂控制框图如图3所示。

$$G_{\mathrm{LPF}}=\frac{\omega_{\mathrm{c}}}{s+\omega_{\mathrm{c}}}=\frac{1}{1+T_{\mathrm{f}}s} \tag{4}$$

式中:G_{LPF}为低通滤波器传递函数;ω_{c}为截止角频率;T_{f}为时间常数。

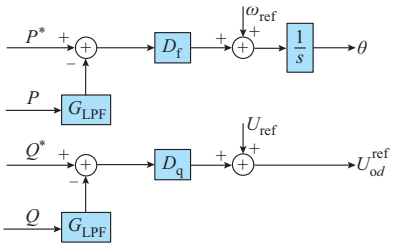

图3　带有低通滤波器的下垂控制框图
Fig. 3　Block diagram of droop control with a low-pass filter

通过图3中有功-频率控制环路可以建立如下等式:

$$P^*-\frac{1}{1+T_{\mathrm{f}}s}P=\frac{1}{D_{\mathrm{f}}}(\omega-\omega_{\mathrm{ref}}) \tag{5}$$

对式(5)进行移相变形化简,得到:

$$P=(1+T_{\mathrm{f}}s)\left[\frac{1}{D_{\mathrm{f}}}(\omega_{\mathrm{ref}}-\omega)+P^*\right]=$$
$$\frac{\omega_{\mathrm{ref}}-\omega}{D_{\mathrm{f}}}+\frac{T_{\mathrm{f}}s\omega_{\mathrm{ref}}}{D_{\mathrm{f}}}-\frac{T_{\mathrm{f}}s\omega}{D_{\mathrm{f}}}+P^*+T_{\mathrm{f}}sP^* \tag{6}$$

消除式(6)中只含有常数的导数项,可得:

$$T_{\mathrm{f}}\frac{1}{D_{\mathrm{f}}}s\omega=P^*-P-\frac{\omega-\omega_{\mathrm{ref}}}{D_{\mathrm{f}}} \tag{7}$$

式(7)在时域中的表达式如下:

$$T_{\mathrm{f}}\frac{1}{D_{\mathrm{f}}}\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=P^*-P-\frac{\omega-\omega_{\mathrm{ref}}}{D_{\mathrm{f}}} \tag{8}$$

式中:$T_{\mathrm{f}}/D_{\mathrm{f}}$表示虚拟同步发电机的虚拟惯量;$1/D_{\mathrm{f}}$表示虚拟同步发电机的阻尼系数。由此可知,带有低通滤波器的下垂控制可等效为虚拟同步发电机控制[5]。

1.3　基于SR锁存器的切换策略

限流策略的投切逻辑如下:正常工作时,限流策略不投入。当输出电流超过设定阈值时,切换限流策略抑制故障电流,其中,主限流措施为自适应频率追踪策略,辅助限流措施为自适应虚拟阻抗。当电网频率恢复后,切换回正常工作模式。此外,输出电流应限制在允许范围内,即输出电流的幅值应小于1.3 p.u.。因此,由电网频率跌落引起的电流变化应小于0.3 p.u.[22]。为了考虑工程实际应用与保留一

定的安全裕度，本文将过流阈值设置为1.2 p.u.。

本文提出了一种基于事件触发的数字SR锁存器来实现上述逻辑。所提出的切换控制框图如图4所示。图中：i_{abc}为逆变器三相输出电流；f为电网频率；S和R分别代表SR锁存器的置位和复位信号；Q代表SR锁存器输出端，$\overline{Q}$表示对Q端数值取反；ΔP为自适应频率追踪策略的输出功率增量；U_{cvd}和U_{cvq}分别为虚拟阻抗在d、q轴下的电压降落。首先，检测三相电流并与过流阈值进行比较。当检测到过流时，产生高电平信号。在电网频率跌落期间，一旦检测到过流，限流策略必须保持投入状态直至频率恢复。其次，当检测到电网频率回升至50 Hz时，即可切出限流策略。

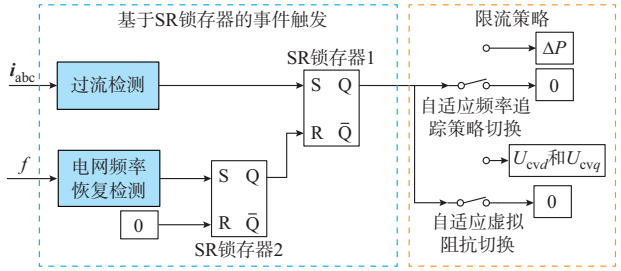

图4　基于SR锁存器的控制切换策略
Fig. 4　Control switching strategy based on SR latch

所提数字锁存器真值表如表1所示。当检测到过流时，SR锁存器1的置位信号S为1、复位信号R为0，此时SR锁存器1输出高电平，控制模式切换为限流模式。在限流策略投入后，SR锁存器1应保持高电平，从而避免限流策略的反复投切。

表1　SR锁存器真值表
Table 1　Truth table of SR latch

S	R	状态
1	0	1
0	1	0
0	0	保持

电网故障期间，SR锁存器2输出低电平信号。当电网频率恢复至50 Hz时，电网频率恢复检测输出高电平信号，SR锁存器2的Q等于SR锁存器1的R。因此，在电网频率恢复时，SR锁存器1的R（使能/禁用限流策略）将处于高电平，这意味着切出限流策略。在切出限流策略后，所有SR锁存器的R置1以清除当前状态，以便于后续过流使用。

在实际中，过流检测采用高速采样，检测到过流后直接触发保护逻辑，不按时序触发，即控制逻辑触发时间中断，保护逻辑触发事件中断。

2　基于功角增量的故障限流策略

2.1　基于频率跌落的自适应频率追踪策略

考虑式(1)中的功率与功角关系有：

$$\begin{cases} P=\dfrac{3VE}{2X}\sin(\delta_{inv}-\delta_{pcc}) \\ Q=\dfrac{3V^2}{2X}-\dfrac{3VE}{2X}\cos(\delta_{inv}-\delta_{pcc}) \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} \delta_{inv}=\omega_{inv}t \\ \delta_{pcc}=\omega_{pcc}t \end{cases} \tag{10}$$

式中：δ_{inv}和δ_{pcc}分别为逆变器输出的相位和电网电压相位；ω_{inv}和ω_{pcc}分别为逆变器和电网的角频率；t为时间。ω_{pcc}通过三相同步锁相环计算得到，当参数设计合适时，其测频后的调整时间可忽略不计，即测频时间只需考虑工频周期，不影响故障期间的控制策略。ω_{inv}通过式(11)所示的含低通滤波器的下垂控制的公式得到。

$$\omega_{inv}=D_f P^*-\frac{D_f}{1+T_f s}P+\omega_{ref} \tag{11}$$

电网频率跌落过程中功角增量$\Delta\delta$如图5所示。图中：ω_{ref}为额定角频率；$\omega_{pcc,min}$为最小角频率，也是低频减载的阈值；t_0为频率跌落的开始时间；t_{pcc}为电网频率跌落的结束时间；t_{inv}为GFM逆变器频率跌落的结束时间。在此期间，角频率下降到$\omega_{pcc,min}$。t_{pcc}的计算式为：

$$t_{pcc}=\frac{\omega_{pcc,min}-\omega_{ref}}{\mathrm{d}f/\mathrm{d}t}+t_0 \tag{12}$$

式中：$\mathrm{d}f/\mathrm{d}t$为频率变化率。

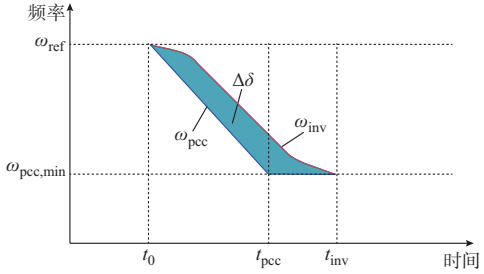

图5　电网频率跌落过程中的功角变化图
Fig. 5　Power angle variation diagram during grid frequency drop process

当电网频率以某一频率变化率下降时，由于逆变器内部存在虚拟惯性，逆变器角频率的变化速度滞后于电网角频率。功角δ由此增大，则功角增量$\Delta\delta$可通过对频率差的积分得到，即

$$\Delta\delta=(\delta_{inv}-\delta_{pcc})\Big|_{t_0}^{t_{inv}}=\int_{t_0}^{t_{inv}}(\omega_{inv}-\omega_{pcc})\mathrm{d}t \tag{13}$$

由式(13)可知，当GFM逆变器存在虚拟惯量时，逆变器与电网的功角增量随时间而缓慢增大。

考虑式(9),有功功率P将随着电网频率的下降而持续增加,从而引发过流。因此,频率跌落期间GFM逆变器过流的主要因素为逆变器与电网之间的功角增量。为保证GFM逆变器能够安全可靠地进行故障穿越,需要在故障期间进行限流,而限流的关键措施是减小电网频率跌落期间GFM逆变器与电网之间的功角增量。

根据式(9),额定功角δ_{rate}可表示为:

$$\delta_{\text{rate}}=\arcsin\left(P_{\text{rate}}\frac{2X}{3V_{\text{rate}}E_{\text{rate}}}\right) \tag{14}$$

式中:P_{rate}为额定功率;V_{rate}为逆变器额定电压;E_{rate}为电网额定电压。

其中,在PCC电压已知的情况下,一般可通过在线阻抗测量得到线路阻抗X[28]。此外,也可通过阻抗实测装置得到[29-30]。

将式(13)与式(14)结合,电网频率跌落后的功角可表示为:

$$\delta=\delta_{\text{rate}}+\Delta\delta \tag{15}$$

因此,基于功角增量$\Delta\delta$可以得到增发的有功功率ΔP_{δ},可以表示为:

$$\Delta P_{\delta}=\frac{3VE}{2X}\sin(\delta_{\text{rate}}+\Delta\delta)-P_{\text{rate}} \tag{16}$$

由于上述功率增量用于自适应减小功率指令,故实际中加入所提策略的GFM逆变器无须多增发有功功率。

基于频率跌落的自适应频率追踪策略如图6所示。该策略通过检测GFM逆变器与电网的角频率偏差计算得到相应的功角增量$\Delta\delta$,进而计算出由于功角增量而产生的功率增量。GFM逆变器在正常工作时,功率增量设置为0(即不投入限流策略);当检测到输出电流过流时,控制投入自适应频率追踪策略;当检测到电网频率恢复正常时,工作模式切换为正常工作状态。所提出的策略不仅可以根据角频率偏差自适应计算功率增量以更快追踪电网角频率,还可以使GFM逆变器在电网发生故障后能快速到达稳定的工作点,有效地提高了逆变器的动态性能。

图7为自适应频率追踪策略下的P-δ曲线。

当电网频率跌落时,由于输出电流尚未达到过流阈值,限流策略没有被触发,功角因而增大,GFM逆变器的工作点由a转移到b,此时达到限流阈值,限流策略触发。在b点加入自适应频率追踪策略后,由于不存在功角增量,即输出功率P_{b}不变。当系统稳定时,由于加入低通滤波前后的实际输出功率值不变,从而有:

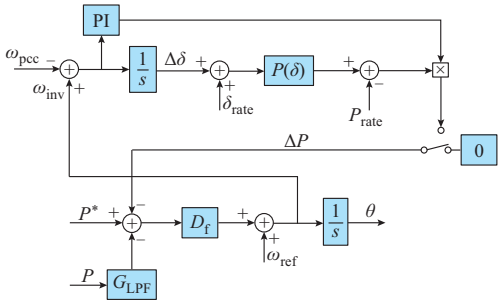

图6　基于频率跌落的自适应频率追踪策略

Fig. 6　Adaptive frequency tracking strategy based on frequency drop

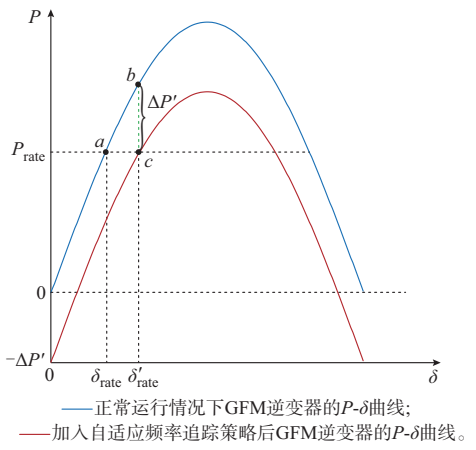

图7　自适应频率追踪策略的P-δ曲线

Fig. 7　P-δ curve of adaptive frequency tracking strategy

$$D_{\text{f}}(P_{\text{rate}}-\Delta P-P_{\text{b}})=\omega_{\text{pcc}}-\omega_{\text{ref}} \tag{17}$$

即存在:

$$P_{\text{b}}=P_{\text{rate}}+\frac{\omega_{\text{ref}}-\omega_{\text{pcc}}}{D_{\text{f}}}-\Delta P=P_{\text{rate}}+\Delta P' \tag{18}$$

式中:

$$\Delta P'=\frac{\omega_{\text{ref}}-\omega_{\text{pcc}}}{D_{\text{f}}}-\Delta P \tag{19}$$

式(17)—式(19)中,各变量关系可反映在附录A图A2所示的加入自适应频率追踪策略后的功角变化图中。

又因为存在:

$$P_{\text{b}}=\frac{3VE}{2X}\sin\delta'_{\text{rate}} \tag{20}$$

即可定义加入自适应频率追踪策略的P-δ公式如下:

$$P_{\text{rate}}=P-\Delta P'=\frac{3VE}{2X}\sin\delta-\Delta P' \tag{21}$$

因此,加入自适应频率追踪策略后系统的稳定情况可以定性转化为判断P_{rate}与加入自适应频率追踪策略的P-δ曲线存在交点即可。在投入所提自适应频率追踪策略后,GFM逆变器会自适应地减小因

功角增量而产生的功率增量，从而使工作点由 b 转移到 c，以匹配额定功率，此时 $\mathrm{d}\delta/\mathrm{d}t=0$，功角稳定在新功角点 δ'_{rate}，GFM逆变器可以稳定运行。

2.2　自适应频率追踪策略闭环传递函数分析

对图6中的自适应频率追踪策略框图进行线性化可以得到自适应频率追踪策略小信号框图，如图8所示。

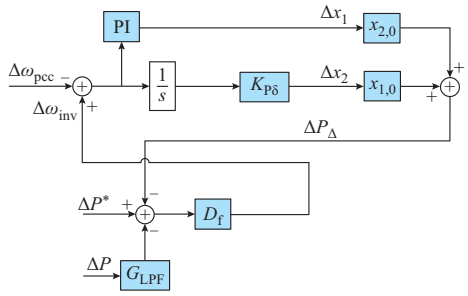

图8　自适应频率追踪策略小信号框图

Fig. 8　Small-signal block diagram of adaptive frequency tracking strategy

具体线性化过程如下。

对图6中 $P(\delta)$ 函数线性化，得到式(22)。

$$\Delta P=\left(\frac{3EV}{2X}\cos\delta_0\right)\Delta\delta=K_{\mathrm{P}\delta}\Delta\delta \tag{22}$$

式中：δ_0 为功角稳态值；$K_{\mathrm{P}\delta}$ 为功角与功率的线性化增益；ΔP 为实际输出有功功率的小信号值。

乘积项线性化有：

$$\Delta P_\Delta+P_{\Delta,0}=(\Delta x_1+x_{1,0})(\Delta x_2+x_{2,0}) \tag{23}$$

即功率增量线性化有：

$$\Delta P_\Delta=\Delta x_1x_{2,0}+\Delta x_2x_{1,0} \tag{24}$$

式中：$P_{\Delta,0}$ 为功率增量的稳态值；$x_{1,0}$ 为状态变量 x_1 的稳态值；$x_{2,0}$ 为状态变量 x_2 的稳态值；ΔP_Δ 为功率增量的小信号量；Δx_1 和 Δx_2 分别为状态变量 x_1 和 x_2 的小信号量，具体表达式如式(25)所示。

$$\begin{cases}\Delta x_1=G_{\mathrm{PI}}(\Delta\omega_{\mathrm{inv}}-\Delta\omega_{\mathrm{pcc}})\\ \Delta x_2=\dfrac{1}{s}(\Delta\omega_{\mathrm{inv}}-\Delta\omega_{\mathrm{pcc}})K_{\mathrm{P}\delta}\end{cases} \tag{25}$$

式中：$\Delta\omega_{\mathrm{inv}}$ 和 $\Delta\omega_{\mathrm{pcc}}$ 分别为 ω_{inv} 和 ω_{pcc} 的小信号量；G_{PI} 为PI控制器的传递函数。

考虑带低通滤波器的下垂环节线性化有：

$$\Delta\omega_{\mathrm{inv}}=(\Delta P^*-\Delta P-\Delta P_\Delta)D_{\mathrm{f}} \tag{26}$$

式中：ΔP^* 为有功功率指令的小信号值，因其为固定值，故为0。

最终，联立可解得 ΔP_Δ 关于 $\Delta\omega_{\mathrm{pcc}}$ 的闭环传递函数如式(27)所示。

$$\frac{\Delta P_\Delta}{\Delta\omega_{\mathrm{pcc}}}=\frac{x_{2,0}G_{\mathrm{PI}}K_{\mathrm{P}\delta}G_{\mathrm{LPF}}sD_{\mathrm{f}}+K_{\mathrm{P}\delta}x_{1,0}K_{\mathrm{P}\delta}G_{\mathrm{LPF}}D_{\mathrm{f}}-(s+K_{\mathrm{P}\delta}G_{\mathrm{LPF}}D_{\mathrm{f}})(sx_{2,0}G_{\mathrm{PI}}+K_{\mathrm{P}\delta}x_{1,0})}{s^2+K_{\mathrm{P}\delta}G_{\mathrm{LPF}}sD_{\mathrm{f}}+s^2x_{2,0}G_{\mathrm{PI}}D_{\mathrm{f}}+sK_{\mathrm{P}\delta}x_{1,0}D_{\mathrm{f}}} \tag{27}$$

锁相环的闭环传递函数如式(28)所示。

$$G_{\mathrm{PLL}}=\frac{sk_{\mathrm{pPLL}}+k_{\mathrm{iPLL}}}{s^2+V_dk_{\mathrm{pPLL}}s+V_dk_{\mathrm{iPLL}}} \tag{28}$$

式中：k_{pPLL} 为锁相环比例系数；k_{iPLL} 为锁相环积分系数；V_d 为电网电压 d 轴分量。

此外，锁相环进入稳态5%误差区的调整时间如下：

$$T_{\mathrm{s}}=\frac{3}{\zeta\omega_{\mathrm{n}}}=\frac{6}{V_dk_{\mathrm{pPLL}}} \tag{29}$$

式中：ζ 为阻尼比；ω_{n} 为自然频率。

附录A图A3为锁相环闭环传递函数Bode图，通过设计锁相环PI参数可以使锁相环带宽高达516 Hz，该带宽的响应速度很快。由式(29)可以得知，锁相环进入稳态5%误差区的调整时间约为0.001 96 s，该时间可忽略不计，实际测频时间还需加上工频周期。

在电网频率快速跌落时（如故障初期），实际功角增量会迅速增大，若自适应频率追踪策略响应速度不足，即带宽小且低于锁相环带宽（如附录A图A4所示），那么功角增量 $\Delta\delta$ 的计算会滞后于实际值，功率指令的调整速度将无法匹配实际功角增量的变化速率，会导致电流超出安全阈值，仿真结果如附录A图A5与图A6所示。因此，自适应频率追踪策略的闭环传递函数带宽需大于三相同步锁相环的带宽。

附录A图A7为自适应频率追踪策略闭环传递函数Bode图。可以发现，其幅频特性平坦，具有类似“全通”性质，理论带宽无穷大，明显高于锁相环带宽，说明自适应频率追踪策略响应速度快于锁相环的响应速度。因此，自适应频率追踪策略能很好地兼顾锁相环，从而锁相环能够测出电网频率且不影响自适应频率追踪策略。

2.3　基于残余功角的虚拟阻抗计算方法

考虑最大有功功率支持下电网侧无功电流为零时，输出电流最大，可得式(30)。

$$\frac{3}{2}E_{\mathrm{rate}}I_{\mathrm{max}}=P_{\mathrm{max}} \tag{30}$$

式中：电网额定电压 E_{rate} 等于PCC额定电压；P_{max} 为输出最大电流时的最大有功功率；I_{max} 为逆变器最大输出电流。

附录A图A8为最大有功功率支持下，电网侧无功功率为零的电压关系。电网电压、电网阻抗电

压与逆变器输出电压的关系可表示为：

$$V_{\mathrm{P}\max}^2 = E_{\mathrm{rate}}^2 + [(X + X_{\mathrm{vir}})I_{\max}]^2 \tag{31}$$

式中：V_{Pmax}为最大有功功率支持下逆变器输出电压；X_{vir}为虚拟阻抗。

由附录A图A8可知，当功角达到最大值时，线路阻抗和虚拟阻抗之间的电压降也达到最大值。为了限制电网频率跌落后的基波电流，线路电抗和自适应虚拟阻抗应满足：

$$X + X_{\mathrm{vir}} = \frac{E_{\mathrm{rate}} \tan \delta_{\Delta}}{I_{\max}} \tag{32}$$

式中：δ_{Δ}为过流初始阶段过流阈值的存在导致的残余功角。

因此，自适应虚拟阻抗应满足：

$$X_{\mathrm{vir}} = \frac{E_{\mathrm{rate}} \tan \delta_{\Delta}}{I_{\max}} - X \tag{33}$$

上述虚拟阻抗通过残余功角自适应计算得到，无须通过烦琐的限流设计即可自适应抑制过流阈值大小的输出电流，从而使输出电流接近额定电流。

在电网频率跌落的情况下，下垂控制无功电压环节参考电压U_{ref}可根据式(31)和式(33)计算为：

$$U_{\mathrm{ref}} = \sqrt{E_{\mathrm{rate}}^2 + (X_{\mathrm{vir}}I_{\max})^2} \tag{34}$$

此外，加入虚拟阻抗环节后的电压-电流双环控制框图如附录A图A9所示。图中：U_{cvd}和U_{cvq}为虚拟阻抗上dq分解后的电压降落，其计算公式如式(35)所示[21]。在dq旋转坐标系下添加虚拟阻抗环节，不仅可以利用GFM逆变器在dq旋转坐标系下解耦后输出电流，还可以削弱输出电流高次谐波对虚拟阻抗环节的影响，工程中易于实现。

$$\begin{bmatrix} U_{cvd} \\ U_{cvq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\mathrm{vir}} & -X_{\mathrm{vir}} \\ R_{\mathrm{vir}} & X_{\mathrm{vir}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \tag{35}$$

式中：i_d和i_q分别为输出电流的d、q轴分量；R_{vir}为虚拟电阻，$R_{\mathrm{vir}}=X_{\mathrm{vir}}/\sigma$，其中，$\sigma=X/R$。

3　仿真分析及实验验证

3.1　仿真分析

为了验证所提出的策略的正确性与有效性，本文首先在MATLAB/Simulink中搭建仿真模型，模拟GFM逆变器系统时间常数T_{J}为5 s的虚拟惯性。设置电网频率在0.6 s开始以2 Hz/s的速率跌落至49 Hz，在1.8 s时开始以2 Hz/s的速率回升至50 Hz。主要仿真参数如表2所示。

附录A图A10和图A11分别为不加任何限流策略的频率与功角增量波形及GFM逆变器输出波形。可以明显看出，由于GFM逆变器存在虚拟惯性，GFM逆变器频率的变化速度滞后于电网频率。

表2　主要仿真参数

Table 2　Main simulation parameters

参数	数值	参数	数值
直流母线电压U_{dc}	800 V	电压环积分系数k_{ui}	100
开关频率f_{s}	10 kHz	无功下垂系数D_{q}	3.333×10^{-4}
滤波电感L_{f}	10 mH	有功下垂系数D_{p}	3×10^{-4}
滤波电容C_{f}	25 μF	锁相环比例系数k_{pPLL}	9.7
网侧等效电感L_{g}	5 mH	锁相环积分系数k_{iPLL}	2 323
网侧等效电阻R_{g}	0.9 Ω	自适应频率追踪比例系数k_{p}	3 000
电流环比例系数k_{ip}	10	自适应频率追踪积分系数k_{i}	1
电流环积分系数k_{ii}	0	截止频率ω_{c}	600 rad/s
电压环比例系数k_{up}	0.5		

因此，两者之间的功角增量$\Delta\delta$缓慢增大。从图A11可以看出，在功角增大的过程中，GFM逆变器输出电流呈现斜坡上升并且已经过流，有功功率随功角增大而增大。

附录图A12与图A13为只投入自适应虚拟阻抗的频率与功角增量波形及GFM逆变器输出波形。由于虚拟阻抗限流是通过削减馈入电压控制器的电压参考值实现的，故虚拟阻抗限流难以从根本上改变GFM逆变器与电网之间的功角增量。一旦虚拟阻抗设置不当，GFM逆变器会出现暂态不稳定问题。因此，只投入虚拟阻抗难以限制由于频率跌落引起的过流问题。

图9为加入所提自适应频率追踪策略的GFM逆变器输出波形。可以看出，加入自适应频率追踪策略前，过流初始阶段过流阈值的存在导致功角增量残余；加入自适应频率追踪策略后，功角增量几乎不变，说明加入自适应频率追踪策略可以抑制频率跌落期间的功角增量。该残余的功角增量为频率跌落开始至检测到过流这段时间内累计的功角增量。因此，该功角增量会导致GFM逆变器输出电流维持在过流阈值的大小，但如果过流阈值设置越小，故障期间的输出电流也越小。

图10为加入所提自适应频率追踪策略与自适应虚拟阻抗限流策略的GFM逆变器输出波形。可以发现，当电网频率以2 Hz/s的速度下降时，逆变器的输出电流开始逐渐增加。当电流达到过流阈值时，SR锁存器的保护逻辑被触发，然后投入限流策略，实现了快速过流保护。其中，相比于图9，自适应频率追踪策略抑制了频率跌落期间的功角增量，基于残余功角设计的自适应虚拟阻抗抑制了过流阈值大小的输出电流，从而保证了输出电流接近额定电流。此外，由于自适应虚拟阻抗的存在，有功功率会略有下降，但实际有功功率在额定有功参考指令附近，从而提供有功功率支持。当电网频率恢复时，

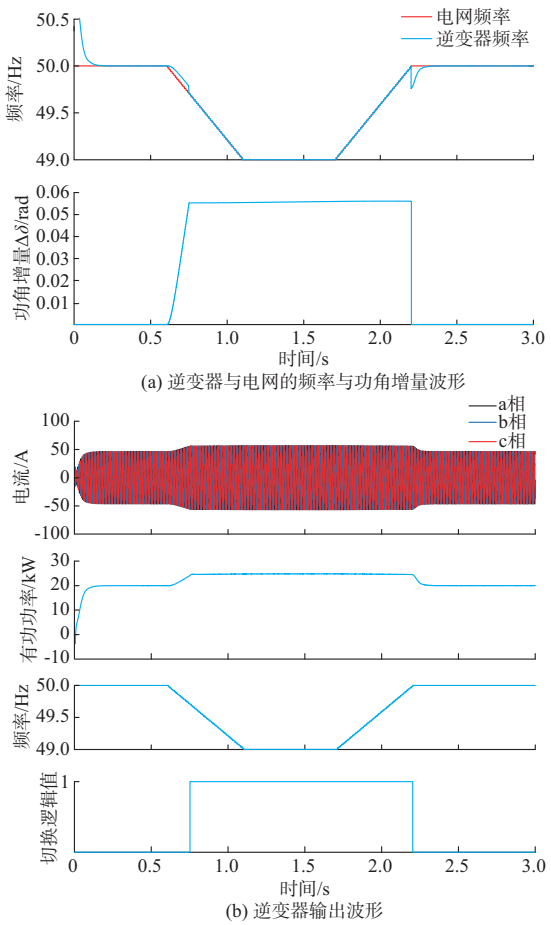

图9　加入所提自适应频率追踪策略的GFM逆变器输出波形

Fig. 9　Output waveforms of GFM inverter with proposed adaptive frequency tracking strategy

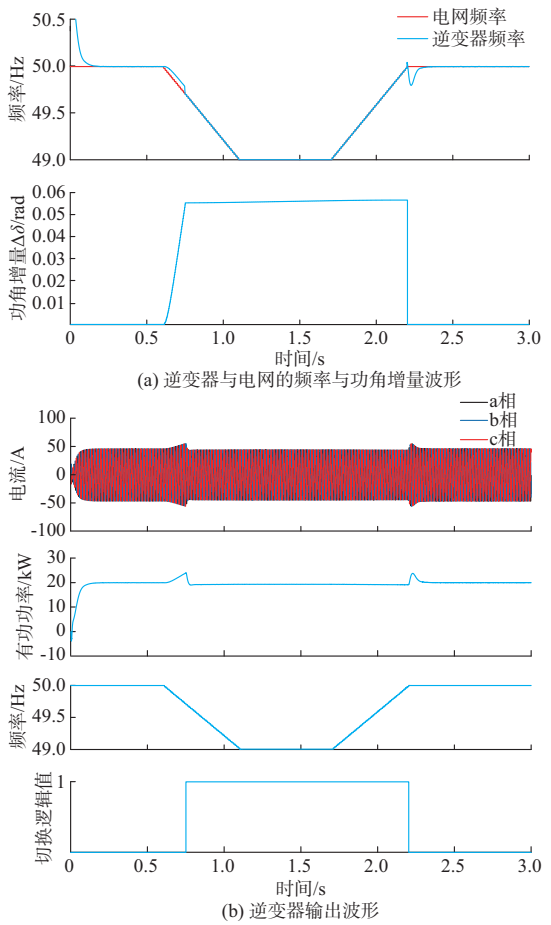

图10　加入所提限流策略的GFM逆变器输出波形

Fig. 10　Output waveforms of GFM inverter with proposed current-limiting strategy

限流策略被切出，并实现了较快的故障恢复。

3.2　实验验证

为了进一步验证基于功角增量的限流策略的准确性与有效性，在基于数字信号处理器(DSP)＋现场可编程门阵列(FPGA)的RTU-BOX205控制器和RTDS实时数字仿真机构建的硬件在环实验平台上进行了测试，实验平台如附录A图A14所示。其中，RTU-BOX205控制器采用TMS320C28346作为数字控制芯片，并在RTDS实时数字仿真机上对三相逆变器主电路进行了仿真。实验的主要参数列于表3。

附录A图A15为不加任何限流策略的GFM逆变器实验波形。可以发现，当电网频率以2 Hz/s的速度下降时，不加限流策略的逆变器的输出电流开始逐渐增加并且过流，直至达到示波器的限幅值。

附录A图A16为加入虚拟阻抗限流策略的GFM逆变器实验波形。可以看出，过流时只投入虚拟阻抗不仅无法抑制过流，反而会导致系统恶化，过流加剧，这与仿真分析一致。

表3　主要实验参数

Table 3　Main experimental parameters

参数	数值	参数	数值
直流母线电压U_{dc}	800 V	无功下垂系数D_q	3.333×10^{-4}
开关频率f_s	8 kHz	有功下垂系数D_p	3×10^{-4}
滤波电感L_f	5 mH	有功功率参考值P_{ref}	20 kW
滤波电容C_f	100 μF	电压环比例系数k_{up}	0.5
网侧等效电感L_g	10 mH	电压环积分系数k_{ui}	1
电流环比例系数k_{ip}	1.5	自适应频率追踪比例系数k_p	3 000
电流环积分系数k_{ii}	2.5	自适应频率追踪积分系数k_i	1

图11为将功率参考值降低为原始参考值的一半的实验波形。可以看出，降低的功率参考值难以与功角增量导致的功率增量相匹配，功角增量依旧持续增大，过流情况难以限制，甚至出现暂态同步失稳。

图12为加入所提限流策略的GFM逆变器实验波形。可以看出，加入所提限流策略的输出电流首先随电网频率下降而缓慢增大。当电流达到阈值

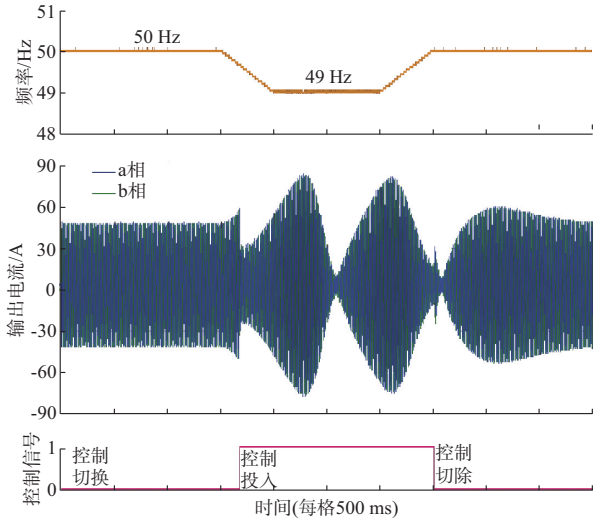

图11　加入功率指令限幅加虚拟阻抗限流策略的GFM逆变器实验波形

Fig. 11　Experimental waveforms of GFM inverter with power reference limiting and virtual impedance current-limiting strategy

时，SR锁存器的保护逻辑被触发，然后投入自适应频率追踪策略与自适应虚拟阻抗。可以看出，投入限流策略后输出电流瞬间被抑制下来，实现了快速过流保护。当电网频率恢复时，SR锁存器会切出限流策略，并恢复正常GFM控制。在此期间，输出电流接近额定电流，没有过流现象，这与仿真分析一致。

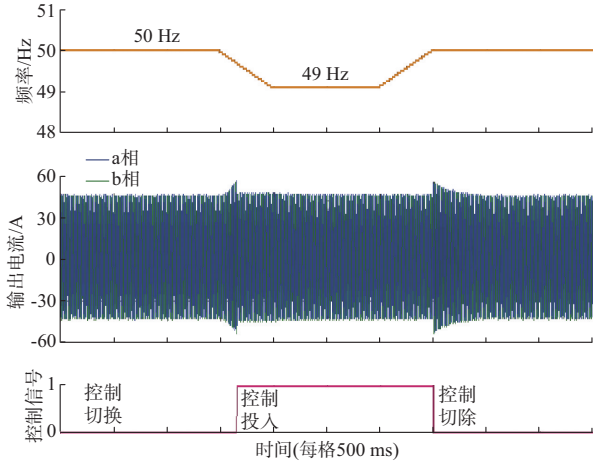

图12　加入所提限流策略的GFM逆变器实验波形

Fig. 12　Experimental waveforms of GFM inverter with proposed current-limiting strategy

4　结语

本文首先介绍了三相逆变器的GFM控制方案，并揭示了电网频率跌落下的GFM逆变器过流的机理。在此基础上，提出了电网频率跌落下GFM逆变器的自适应频率追踪策略与自适应虚拟阻抗计算方法。仿真和实验结果验证了该方法的有效性。可以得出以下结论：

1）所提出的自适应频率追踪策略与自适应虚拟阻抗计算方法，不仅可以抑制电网频率跌落期间的过流，还能实现故障清除后有功功率的快速恢复。

2）所提出的自适应频率追踪策略与自适应虚拟阻抗计算方法，增强了暂态同步稳定性，有效避免了电网故障下的暂态同步失稳。GFM逆变器在电网发生故障后能快速到达新的工作点，有效提高了逆变器的动态性能。

3）所提出的自适应频率追踪策略的闭环传递函数具有类似“全通”性质，可以很好地兼容锁相环带宽，实现电网频率跌落期间的过流保护。

4）所提出的控制切换方法类似于硬件SR锁存器，具有速度快且不受时间触发中断影响的优势，既考虑了SR锁存器的实时触发，又考虑了数字控制器的灵活性，通过数字控制实现逆变器控制和快速过流保护。

本文只考虑GFM逆变器在频率跌落下的自适应限流策略，该策略并不适用于电网电压暂降而引发的过流问题。此外，对于电网同时存在频率跌落与电压暂降故障，对系统进行有功与无功支撑时，还需要进一步探索有功指令与无功指令的合理分配，从而保证系统不过流。

附录见本刊网络版，点击http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20241225006，或扫描英文摘要后二维码，可阅读全文。

参考文献

[1] 郑外生，饶宏.新型电力系统柔性构网技术及其应用[J].电力系统自动化，2025，49(12)：1-10.
ZHENG Waisheng, RAO Hong. Flexible grid-forming technology and its application in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(12): 1-10.

[2] 舒印彪，陈国平，贺静波，等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学，2021，23(6)：61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.

[3] 任大伟，肖晋宇，侯金鸣，等.双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J].电网技术，2022，46(10)：3831-3839.
REN Dawei, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Construction and evolution of China's new power system under dual carbon goal[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3831-3839.

[4] 许诘翊，刘威，刘树，等.电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J].电网技术，2022，46(9)：3586-3595.
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): 3586-3595.

[5] 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.

[6] 刘辉，于思奇，孙大卫，等.构网型变流器控制技术及原理综述[J].中国电机工程学报，2025，45(1)：277-296.
LIU Hui, YU Siqi, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-296.

[7] 吴中东，丁石川，郭小璇，等.一种并联逆变器自适应下垂控制方法[J].电力系统保护与控制，2023，51(7)：84-94.
WU Zhongdong, DING Shichuan, GUO Xiaoxuan, et al. An adaptive droop control method for parallel inverters[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 84-94.

[8] 尚佳宇，虞家骏，刘增，等.构网型与跟网型逆变器并联系统精确频域建模及简化稳定判据[J].电力系统自动化，2025，49(2)：53-63.
SHANG Jiayu, YU Jiajun, LIU Zeng, et al. Accurate frequency-domain modeling and simplified stability criterion for parallel grid-forming and grid-following inverter system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(2): 53-63.

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

[10] 和萍，王明洋，文福拴，等.基于虚拟力矩补偿的储能虚拟同步发电机阻尼特性分析与控制[J].电力系统自动化，2025，49(11)：102-113.
HE Ping, WANG Mingyang, WEN Fushuan, et al. Damping characteristic analysis and control of energy storage virtual synchronous generator based on virtual torque compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(11): 102-113.

[11] 于晶荣，孙文，于佳琪，等.基于惯性自适应的并网逆变器虚拟同步发电机控制[J].电力系统保护与控制，2022，50(4)：137-144.
YU Jingrong, SUN Wen, YU Jiaqi, et al. Virtual synchronous generator control of a grid-connected inverter based on adaptive inertia[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 137-144.

[12] ZHANG L D, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.

[13] AWAL M A, RACHI M R K, YU H, et al. Double synchronous unified virtual oscillator control for asymmetrical fault ride-through in grid-forming voltage source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(6): 6759-6763.

[14] ZHAO X X, FLYNN D. Freezing grid-forming converter virtual angular speed to enhance transient stability under current reference limiting[C]// 2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), November 9-12, 2020, Aalborg, Denmark.

[15] 付熙坤，黄萌，凌扬坚，等.功率耦合和电流限幅影响下构网型变流器的暂态同步稳定分析[J].中国电机工程学报，2024，44(7)：2815-2825.
FU Xikun, HUANG Meng, LING Yangjian, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming converter influenced by power-coupling and current-limiting[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2815-2825.

[16] FAN B, WANG X F. Fault recovery analysis of grid-forming inverters with priority-based current limiters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(6): 5102-5112.

[17] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Active and reactive power strategies with peak current limitation for distributed generation inverters during unbalanced grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(3): 1515-1525.

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

[19] WU H, WANG X F. 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.

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

[21] 王盼宝，王鹏，李珅光，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.

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

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

[24] ERDOCIA J, URTASUN A, MARROYO L. Dual voltage-current control to provide grid-forming inverters with current limiting capability[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(4): 3950-3962.

[25] FAN B, WANG X F. Equivalent circuit model of grid-forming converters with circular current limiter for transient stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 3141-3144.

[26] 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.

[27] ZHUANG K H, XIN H H, HU P F, et al. Current saturation analysis and anti-windup control design of grid-forming voltage source converter [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2790-2802.
[28] BRACA V, PETRELLA R. An improved method for grid impedance estimation by digital controlled PV inverters suitable for ENS detection[C]// 4th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2008), April 4, 2008, York, UK: 386-390.
[29] MA J P, WANG W T, WANG S L, et al. Bidirectional power balance control of serial voltage injection converter for impedance measurement of grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(6): 7069-7078.
[30] MA J P, ZHANG C L, WANG P, et al. Series voltage injection impedance measurement device with resonance shunt [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(7): 7280-7289.

王顺亮(1987—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:直流输电与电力电子变流器拓扑、控制、调制、建模,新能源并网。E-mail:slwang@scu.edu.cn

陈亚龙(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源并网与控制、新能源构网逆变器限流策略。E-mail:chenyalong@stu.scu.edu.cn

马俊鹏(1990—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:新能源并网变换器建模及控制、微网逆变器协调控制。E-mail:jma@scu.edu.cn

(编辑　蔡静雯)

Current-limiting Strategy of Grid-forming Inverter Based on Power Angle Increment Under Power Grid Frequency Drop

WANG Shunliang[1], *CHEN Yalong*[1], *MA Junpeng*[1], *TU Hao*[1], *SHI Huabo*[2], *TENG Yufei*[2]
(1. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: Grid-forming (GFM) inverters effectively alleviate the issues of low inertia and weak grid stability caused by increasing renewable energy penetration. However, the virtual inertia of the GFM inverter may induce overcurrent during the power grid frequency drop. To address this issue, based on the power angle variation during the frequency drop, this paper reveals that the power angle increment between the GFM inverter and the power grid is the dominant factor causing the GFM inverter overcurrent during the power grid frequency drop, and a current-limiting strategy is required to avoid the overcurrent. To prevent repeated switching of the current-limiting strategy and achieve fast overcurrent protection, this paper proposes a switching logic based on an event-triggered SR latch. This method utilizes the event-triggered logic to respond to overcurrent events in real time, thereby achieving fast overcurrent protection. Then, an adaptive frequency tracking strategy based on power angle increment is proposed, and the virtual impedance is adaptively calculated based on the residual power angle increment in the initial phase of overcurrent. The proposed method not only suppresses the overcurrent during power grid faults, enhances the synchronous stability of the system, but also has fault recovery ability. In addition, the bandwidth analysis of the closed-loop transfer function of the adaptive frequency tracking strategy demonstrates that this strategy has good compatibility. Finally, simulation and experimental results verify the effectiveness and accuracy of the proposed method.

This work is supported by Smart Grid-National Major Science and Technology Project (No. 2024ZD0801600).

Key words: grid-forming (GFM) inverter; frequency drop; inertia; current-limiting; power angle increment; frequency tracking; virtual impedance; overcurrent protection