构网型逆变器电应力分析及其主动限流控制

李星彤[1*]，杨昊[2]，王红斌[3]，王志宽[1]，赵凯[3]
1. 中国电力建设工程咨询有限公司，北京 100120
2. 中国能源建设股份有限公司，北京 100022
3. 北京电力设备总厂有限公司，北京 102401
DOI:10.61369/ETQM.2026090041

摘　　要： 构网型逆变器在电网故障期间需提供电压和频率支撑。暂态电流冲击和直流母线过电压会对功率器件造成显著的电应力。现有依赖虚拟阻抗或模式切换的限流方法存在局限性。本文以虚拟同步发电机控制的构网型逆变器为研究对象，提出一种基于电流矢量幅值限制的主动限流控制策略。该策略通过调节电压外环输出的 d 轴和 q 轴电流参考值，在保持相位信息的同时直接减轻器件的电流应力。仿真结果表明，该策略可将故障电流峰值从约 1.45 标幺值降至约 1.14 标幺值，并将直流母线电压波动限制在5.1% 以内。该方案是一种简洁、无需额外硬件的工程优化方法，有助于改善电网支撑性能。

关 键 词： 构网型逆变器；虚拟同步发电机；暂态电应力；主动限流；暂态分析

Electrical Stress Analysis and Active Current Limiting Control of Grid Inverter

Li Xingtong[1*], Yang Hao[2], Wang Hongbin[3], Wang Zhikuan[1], Zhao Kai[3]
1. China Power Construction Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing 100120
2. China Energy Construction Corporation Limited, Beijing 100022
3. Beijing Power Equipment General Plant Co., Ltd., Beijing 102401

Abstract: Grid-forming inverters are obliged to provide voltage and frequency support during grid faults. Transient current surges and DC-link over voltage impose significant stress on power devices. Current-limiting approaches, such as those relying on virtual impedance or mode-switching, exhibit limitations. This paper centers on virtual synchronous generator virtual synchronous generator controlled grid-forming inverters and proposes an active current-limiting control strategy based on current vector amplitude limitation. By modulating the d-axis and q-axis current references at the output of the outer-voltage loop, it directly alleviates the current stress on devices while maintaining phase information. Simulation results demonstrate that this strategy can reduce the fault-current peak from approximately 1.45 per unit to around 1.14 per unit and restrict the DC-link voltage fluctuation within 5.1%. It represents a straightforward, hardware-independent enhancement in engineering, contributing to improved grid-support performance.

Keywords: grid-forming inverter; virtual synchronous generator; transient electrical stress; active current limiting; transient analysis

引言

随着可再生能源发电渗透率的持续提高，现代电力系统呈现典型的“双高”特征，即高可再生能源渗透率与高比例电力电子设备接入。该趋势大幅降低了系统的固有惯性与阻尼能力，给电网频率和电压稳定性带来显著风险[1]。构网型逆变器能够自主构建电网电压与频率，并模拟同步发电机的惯量支撑及无功电压调节行为，因而成为以新能源为主体的新型电力系统中维持稳定的核心装备。

当发生三相电压跌落等严重电网扰动时，构网型逆变器会瞬时注入大幅值的暂态电流[2]。该电流尖峰使 IGBT（绝缘栅双极型晶体管）等功率器件承受远超额定值的峰值电流，易触发过流保护并导致结温急剧升高，加速器件老化甚至造成永久性损坏。同时，瞬时功率不平衡还会引发电容过充，造成直流母线电压剧烈振荡，增加电容击穿风险[3]。上述累积性电热应力已成为制约构网型控制技术大规模工程推广的关键瓶颈。

针对构网型逆变器的故障穿越问题，现有研究主要沿三个方向展开：一是集中于弱电网下的振荡抑制与惯量支撑，但对器件级暂态

基金项目：中国能源建设股份有限公司重大科技项目（CEEC2025-KJZX-05）。
作者简介：李星彤（1999-），男，中国吉林吉林人，满族，硕士，工程师，从事电力电子技术行业。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

电应力关注不足[4]；二是采用虚拟阻抗或构网 / 跟网模式切换等手段进行限流，但虚拟阻抗会削弱暂态电压支撑能力，而模式切换则逻辑复杂且易引发二次冲击[5]；三是初步开展了故障应力评估，但缺乏对电流尖峰及直流电压波动机制的定量刻画，亦缺少针对性的抑制策略[6]。

为此，本文以 VSG（虚拟同步发电机）控制的构网型逆变器为研究对象，定量推导电网电压跌落下的暂态电热应力产生机理，并提出一种基于电流矢量幅值限制的主动限流控制策略。该策略通过等比例调节 dq 轴电流参考值，在保持并网点相位信息的同时抑制逆变器输出电流幅值，主动限流控制方法为实际工程提供了一种无需额外硬件、计算量小且易于实现的改进控制方法。

一、暂态电应力产生原理

（一）故障电流冲击原理

故障深度 λ 如公式（1）：

$$\lambda = \frac{U_{g,N} - U_g}{U_{g,N}}, \quad 0 \le \lambda \le 1 \tag{1}$$

式中：$U_{g,N}$ 为电网额定电压幅值，U_g 为逆变器输出电压幅值。

当 PCC 点（公共连接点）发生三相金属性短路时，电网电压跌落，而 VSG 内电势在第一个工频周期内几乎保持不变。

忽略线路电阻，设 L_{eq} 为系统输出总等效电感，瞬时故障电流满足公式（2）：

$$L_{eq}\frac{di}{dt} = E - U_g \tag{2}$$

在一个基波周期内，有功环带宽远低于电流环，因此 E 近似恒定，电流呈现指数变化规律，如公式（3）所示：

$$i(t) = \frac{E - U_g}{Z}\cos(\omega t + \theta) + \frac{U_g}{Z}\cos\theta \times e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{3}$$

式中：Z 为系统总阻抗，τ 为系统时间常数。

第一项为稳态基波分量，第二项为取决于故障初相角的衰减直流偏置。在最恶劣的过零故障条件下，直流偏置等于基波幅值，导致最大峰值电流如公式（4）：

$$I_{peak} = \frac{E + U_g}{Z} \tag{4}$$

带入公式5整理，可得峰值电流与 λ 的关系如公式（5）：

$$I_{peak} = \frac{E + (1-\lambda)U_{g,N}}{Z} \tag{5}$$

可见，PCC 点电压跌落加深、逆变器为支撑电压提高内电势，都会显著抬升峰值电流，加剧功率开关管承受电应力。

（二）直流母线电压偏移机理

直流母线电压波动源于交流输出与直流输入之间的瞬时功率不平衡，可由电容能量守恒公式（6）描述：

$$\frac{1}{2}C_{dc}\frac{d}{dt}(U_{dc}^2) = P_{dc} - P_{out} \tag{6}$$

式中：为 C_{dc} 直流母线电容，U_{dc} 为瞬时直流母线电压。

电网电压跌落导致交流功率突然减小，而直流侧功率无法瞬时平衡，造成电容过充电和电压升高如公式（7）：

$$\Delta U_{dc} = \frac{1}{C_{dc}U_{dc}}\int (P_{dc} - P_{ac})\,dt \tag{7}$$

式中：为 P_{dc} 直流输入功率，P_{ac} 为交流输出功率。

分析以上公式，直流母线电压波动由以下两个原因引起：1）虚拟转动惯量大，引起交直流之间功率长时间不平衡；2）短路状态下，电流环 PI 控制器达到幅值，调制比达到上限，逆变器失去调节能力。

功率不平衡的持续时间由故障清除时间和控制器饱和恢复速度共同决定。

二、主动限流控制策略

为抑制上述暂态电应力，本文提出一种基于电流矢量幅值钳位控制策略。电压外环输出的 dq 轴电流参考构成合成电流矢量，其幅值定义如公式（8）：

$$I_{mag} = \sqrt{i_{dref}^2 + i_{qref}^2} \tag{8}$$

式中：I_{ref} 为参考幅值，i_{dref} ，i_{qref} 为原始 dq 轴电流参考值。

主动限流控制策略预设电流限幅阈值 $I_{\lim}$ ，若变流器输出适量幅值超过 $I_{\lim}$ ，则进行等比例缩放，同时保留原始相位；若未超过，则直接采用未经修改的原输出值，公式（9）以 d 轴电流参考值为例，q 轴电流计算公式可参照公式（9）：

$$\begin{cases} i_{dref} = \dfrac{I_{\lim}}{\sqrt{(i_{dref}^*)^2 + (i_{qref}^*)^2}} \times i_{dref} & I_{ref} \ge I_{\lim} \\ i_{dref} = i_{dref} & I_{ref} < I_{\lim} \end{cases} \tag{9}$$

式中：i_{dref}^* 为 d 轴逆变器计算参考值。

经主动限流控制策略缩放后，电流矢量相位保持不变，VSG 仍按原始功率因数输出有功 / 无功功率，避免了原工程简单硬截断引起的相位偏移和二次暂态。主动限流控制策略如图2所示。

限幅阈值的设计准则需兼顾半导体 SOA（安全工作区）和电网支撑裕度，下式以 IGBT 为例，如公式（10）：

$$I_{\lim} = \min\left\{I_{IGBT,\max},\ k_{safe} \cdot I_n\right\} \tag{10}$$

式中：$I_{IGBT,\max}$ 为 IGBT 允许重复峰值电流，I_n 为逆变器额定输出电流，k_{safe} 为为暂态电网支撑预留的安全裕度。

三、仿真验证

（一）仿真系统参数

在 MATLAB/Simulink 中搭建一台500 kVA 三相两电平 VSG 构网型逆变器模型进行性能验证。逆变器通过 LC 滤波器和升压变压器接入11 kV 配电网。关键系统参数见表1。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

表1　系统仿真参数

Table 1　System simulation parameters

参数 / 单位	数值
直流母线额定电压 /V	1100
额定容量 /kVA	500
额定电压 /V	415
额定频率 /Hz	50
电网电压 /kV	11
系统短路比	2.5
电网负载	0.5+j0.3pu
限流参数	1.2pu

总仿真时间设为4 s，在 t=3.0 s 时，于图3中 K 点触发三相金属性短路故障。设置三种对比测试工况：

工况1：传统虚拟阻抗限流；工况2：所提矢量比例主动限流策略。

主电路拓扑图如图3所示：

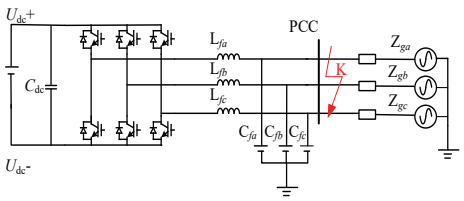


图3　主电路拓扑图

Fig. 3 Main Circuit Topology

图3为典型构网型逆变器拓扑图，图中 L_{fa} 为 a 相滤波电感；C_{fa} 为 a 相滤波电容；Z_{ga} 为 a 相电网阻抗。

（二）仿真波形及分析

图4为传统虚拟阻抗限流方法的仿真波形。故障电流峰值被抑制至1.44 pu，较无限流情况降低33.6%。直流母线电压最大偏差为额定值的5.8%。在故障投入和清除时刻均出现明显的电流尖峰，且暂态过程中输出电压幅值略有衰减。

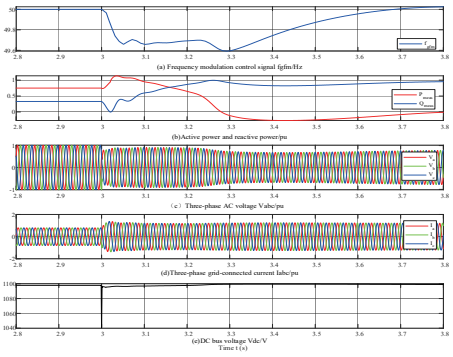


图4　虚拟阻抗策略波形图

Fig. 4 Simulation waveforms of virtual-impedance current-limiting strategy

图5展示了所提主动限流控制获得的波形。全周期故障电流幅值被稳定限制在1.14 pu，较工况1降低21.1%，较虚拟阻抗方案降低16.8%。直流母线电压波动控制在额定值的5.1% 以内。无功功率和频率输出曲线保持平滑变化，整个故障期间无明显畸变。

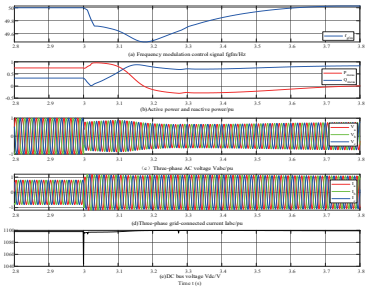


图5　虚拟阻抗策略波形图

Fig. 5 Simulation waveforms of the proposed active current-limiting strategy

图6为两种限流策略在电流阈值从1.1 pu 变化至1.3 pu 时的峰值电流值。在每个相同的限流系数下，所提方案的故障电流峰值均低于虚拟阻抗方法。

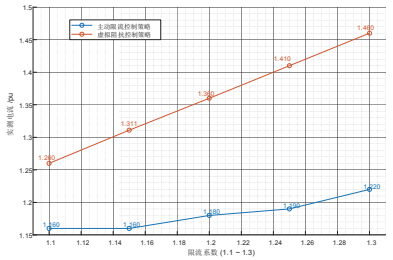


图6　不同限流系数下电流峰值对比图

Fig. 6 Comparison of current peak values under different current-limiting coefficients.

表2为三种控制工况的核心性能指标分析，包括峰值电流、直流母线波动范围、振荡持续时间和电压支撑性能。

表2　控制策略对比表

Table 2　Comparison of control strategies

性能指标 / 单位	虚拟阻抗策略	主动限流策略
并网电流峰值 /pu	1.44	1.14
直流母线电压	跌落5.8%	跌落5.1%
暂态持续时间	中	短
电压支撑能力	有效支撑但略有弱化	有效支撑

仿真结果验证了第2章推导的应力产生机理。在三相金属性短路故障期间，VSG 控制器提升内电势以维持电网电压，使逆变器电动势和 PCC 电压之间形成较大压差，叠加衰减直流磁链引起的电流分量，无约束系统产生的故障峰值电流振荡峰值高达2.17 pu。同时，交流输出功率与直流输入功率的瞬时不匹配导致直流母线电容过充电，引发剧烈电压振荡。虚拟惯量能量交换、PI 闭环调节器饱和以及功率不平衡时间延长这三个耦合因素共同加剧了功率半导体器件电应力和直流电容的电热负荷。

与广泛采用的虚拟阻抗限流相比，所提主动限流控制策略在构网型逆变器工程应用方面具有两个突出的实用优势：第一，在相同的限流阈值下，所提方案在不牺牲暂态电压相位和频率调节性能的前提下实现了更优的峰值电流抑制。相比之下，虚拟阻抗在故障期间引入额外压降，对电网电压支撑能力略有削弱。第二，主动限流控制策略无需额外硬件，仅需对原始 dq 轴电流参考进行等比例缩放，无需辅助阻抗计算或模式切换逻辑，有效降低了逆变器嵌入式控制芯片的计算负担。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

四、结论及展望

本文以 VSG 控制的构网型逆变器为研究对象，围绕三相金属性短路故障下的暂态电应力问题，完成了故障电流冲击及直流母线电压偏移机理的定量推导，并提出了一种基于电流矢量幅值限制的主动限流控制策略。主要取得以下结论性成果：

（1）理论推导表明，电网电压跌落越深或 VSG 为支撑电压而抬升内电势时，故障电流峰值显著增大；虚拟惯量能量交换与 PI 控制器饱和共同作用，会加剧直流母线电压的暂态抬升，对功率器件和直流电容构成电热累积损伤风险。

（2）所提主动限流策略通过等比例缩放 dq 轴电流参考值，在保持电流矢量相位不变的前提下将故障电流限制在预设阈值以内。与传统虚拟阻抗方案相比，该策略将故障电流峰值从 1.44 pu 进一步降至 1.14 pu，并将直流母线电压波动控制在 5.1% 以内，且控制结构简洁、无需额外硬件，便于嵌入式工程实施。

参考文献

[1] 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.

[2] 厉璇，刘永慧，赵月杭，等 . 基于电压源等效的构网型储能变流器幅值饱和限流模式暂态稳定性分析 [J]. 高电压技术 ,2026,52(5):2172-2184.

Li Xuan, Liu Yonghui, Zhao Yuehang, et al. Voltage-source-model-based Transient Stability Analysis of Grid-forming Convertersin Current Saturation Limiting Mode[J], High Voltage Engineering, 2026, 52(5): 2172-2184.

[3] 吴西奇，王晗，黄鹭鹭，等 . 构网型变流器内环构造方法及暂态特性分析 [J/OL]. 中国电机工程学报 ,1-15[2026-08-14].

[4] 赵博元，陈磊，闵勇，等 . 跟网与下垂构网变流器混联带负荷系统稳定域与稳定形态 [J]. 电力系统自动化 ,2026,50(6):16-34.

Zhao Boyuan, Chen Lei, Min Yong, et al. Stability Region and Stability State of Load -carrying Hybrid System with Grid-following Converter and Grid-forming Converter with Droop Controller[J], Automation of Electric Power Systems, 2026, 50(6): 16-34.

[5]Z. Wang et al.. Transient Synchronization Stability of Grid-Tied Multi-VSCs System Considering Nonlinear Damping and Transient Interactions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(12):16775-16791.

[6]A. H. Okilly, C. Kim and J. Baek. Experimental Implementation of a 3-Level TNPC-IGBT Inverter for Uniform Stress Distribution and THD Mitigation: MPC-Driven Switching Optimization, LCL Filter Integration, and Real-Time Stress Monitoring[J]. IEEE Access, 2025, 13:152762-152781.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.