

构网型新能源系统的自适应虚拟阻抗限流控制研究

戴俊雄 旃宝林 周青竹

云南电力技术有限责任公司 云南 昆明 652701

【摘要】：针对构网型逆变器在单相接地故障下出现的电流不平衡与环流放大问题，本文提出一种基于环流检测的自适应虚拟阻抗控制方法。该方法以环流均方根值为反馈信号，实时调整虚拟阻抗，实现故障初期快速限流与恢复期电压支撑的协调控制。仿真结果表明，该策略能有效抑制故障电流峰值和环流振荡，为不对称故障下的稳定运行提供高效方案。

【关键词】：构网型逆变器；自适应虚拟阻抗；环流；故障穿越

DOI:10.12417/3083-5526.25.08.002

引言

随着高比例新能源接入，构网型逆变器逐渐成为维持系统电压与频率稳定的重要设备^[1-3]。但在单相接地等不对称故障下，逆变器输出电压畸变，相间电流严重不平衡，导致环流放大与故障电流急剧上升^[4-5]。传统定值虚拟阻抗参数固定，在单相故障下难以兼顾快速限流与稳态电压支撑，易引起额外的电流振荡^[6]。现有自适应虚拟阻抗方法大多针对三相平衡场景，对不对称故障下的环流抑制研究仍不充分。为此，本文提出一种基于环流检测的自适应虚拟阻抗控制方法，通过实时监测环流变化实现阻抗自调节，兼顾限流与电压支撑。

1 构网型新能源主电路及控制结构

本文研究的系统主电路控制结构如图1所示，本文所提双机并联虚拟同步系统的等效模型，由两台构网型逆变器并联组成。每台逆变器均含LC滤波器、电压外环与电流内环控制，外环采用虚拟同步发电（Virtual Synchronous Generator, VSG）控制实现惯量与阻尼支撑。两机通过公共母线（Point of Common Coupling, PCC）并联至电网侧，PCC处电压、电流信号用于检测并联系统的动态特性与环流变化。图1中： U_{dc} 为模拟直流侧分布式电源电压，可以是风力发电设备或者光伏设备。 L_f 和 C 分别为滤波电感和滤波电容，PCC为逆变器接入微电网的公共耦合点，逆变器线路阻抗记为 Z_{line} 。 P_0 和 Q_{ref} 分别为有功和无功功率的参考值， P_{out} 和 Q_{out} 分别为VSG系统所输出的有功和无功功率的实际值。

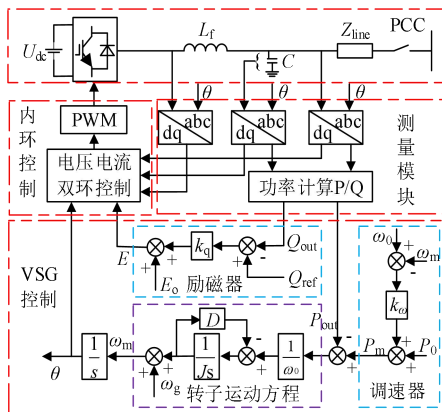


图1 VSG主电路及控制结构

VSG通过模拟同步发电机转子动态过程实现惯量与阻尼支撑，其控制结构包括虚拟同步控制环、电压内环和电流内环。风电机组、光伏阵列及储能系统等新能源装置可视为驱动同步发电机的原动机，而DC/AC逆变器在采用VSG控制策略后，其运行特性可等效为同步发电机。同时，逆变器的输出阻抗特性与同步发电机的电气阻抗特性相近。虚拟惯性控制下变频器的有功-频率和无功-电压控制方程为：

$$\begin{cases} J \frac{d^2 \theta_{ref}}{dt^2} = P_{ref} - P_c - D(\omega - \omega_N) \\ \frac{d(E_{ref} - U_0)}{dt} = k_q (Q_{ref} - Q_c) \end{cases} \quad (1)$$

式中： θ_{ref} 为虚拟内电势相位角； E_{ref} 为虚拟内电势幅值； D 为阻尼系数，对振荡具有阻尼作用； J 为转子惯量或惯量参数； P_c 、 P_{ref} 分别为有功实际值和参考值； Q_c 、 Q_{ref} 分别为无功实际值和参考值； U_0 为电压基础值； ω_N 和 ω 分别为VSG虚拟转速额定值与实际值； k_q 为无功-电压下垂系数。

在VSG控制框架中，虚拟阻抗型故障穿越方法通过调节电压内环参考值来实现故障限流，电压内环参考电压由功率外环输出的指令电压与虚拟阻抗压降共同决定。降低电压参考值能够在故障期间抑制过电流，当电压参考过高时，系统通过脉宽调制环节自动调节逆变器输出以限制电流。虚拟阻抗限流一般分为固定值与自适应值两种，其中定值虚拟阻抗通过固定阻抗产生电压跌落，自适应虚拟阻抗则依据电流变化实时调整，其取值按式确定：

$$\begin{cases} R_{VI} = m_R (\sqrt{i_d^2 + i_q^2} - I_{th}) = m_R (\sqrt{2} I_k - I_{th}) \\ X_{VI} = n_{X/R} R_{VI} \end{cases} \quad (2)$$

式中： i_d 、 i_q 为d轴、q轴电流值、 I_{th} 、 I_k 分别为所设定的电流阈值和短路电流有效值； $n_{X/R}$ 为所投入虚拟阻抗的阻抗比； m_R 为虚拟阻抗系数。

在构网型逆变器的故障穿越控制中，传统虚拟阻抗方法通常通过在电压控制环中引入附加阻抗，以限制故障期间的短路

电流并增强系统阻尼。该方法在对称三相短路故障条件下能够有效抑制电流上升速度，保持一定的电压支撑能力。然而，当系统发生单相接地故障等不对称工况时，由于故障仅发生在单相，系统内部电压、电流的不平衡导致负序电压分量增加，逆变器输出端出现电流畸变及环流波动。此时，传统的定值虚拟阻抗无法针对电压与环流的动态变化进行实时调节，其限流和电压支撑效果均受到明显限制。

定值虚拟阻抗的参数通常在额定稳态条件下设定，难以兼顾不同故障深度和不平衡程度下的动态特性。当单相故障较轻时，较大的虚拟阻抗会使逆变器输出电压显著下降，削弱电压支撑能力；而当故障严重时，较小的阻抗又难以及时限制故障电流上升，易造成装置过流与并系统环流恶化。此外，定值虚拟阻抗在故障解除后无法自适应回落，造成系统在恢复过程中的稳态偏差与动态迟滞。由此可见，传统固定参数的虚拟阻抗在不对称故障尤其是单相故障下存在调节刚性强、动态响应不足的问题，难以同时满足系统的限流与电压稳定需求。

针对上述不足，本文提出一种基于环流检测的自适应虚拟阻抗控制方法。该方法以系统环流变化作为反馈信号，通过计算环流的实时均方根值(Root Mean Square,RMS)并与设定阈值比较，动态调整虚拟阻抗大小。当检测到环流幅值超过设定值时，系统自动增大虚拟阻抗以增强阻尼，从而有效限制电流冲击；故障解除后，阻抗参数平滑回落至正常值，确保电压支撑能力与功率分配精度不受影响。该控制策略能够根据单相故障的严重程度实现阻抗的自适应调节，在提高动态限流性能的同时，显著改善系统在不对称工况下的暂态稳定性。

2 基于环流的自适应虚拟阻抗法

在双机并联构网型逆变器系统中，由于每台逆变器存在独立的控制器及采样环节，当输出电压幅值、相角或频率存在细微差异时，PCC 处将产生环流。环流不仅导致功率分配偏差，还可能在系统出现单相故障时显著放大，使得逆变器输出电流不平衡、暂态恢复过程振荡加剧。因此，对环流的实时检测与动态抑制是实现多机协同控制与系统稳定运行的关键环节。

双逆变器系统的输出电流分别记为 i_{abc} 、 i_{abc} ，其在同步旋转坐标系 d_q 下的等效表达式为：

$$\begin{cases} i_{12d} = \frac{i_{1d} - i_{2d}}{2} \\ i_{12q} = \frac{i_{1q} - i_{2q}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

环流的瞬时幅值可表示为：

$$i_{12} = \sqrt{i_{12d}^2 + i_{12q}^2} \quad (4)$$

通过 RMS 算法可获得环流在一定时间内的平均有效值：

$$I_{12,rms}(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=k-N+1}^k i_{12}^2(n)} \quad (5)$$

该信号经过低通滤波后作为自适应控制的输入，以减少采样噪声对调节环节的影响。为了抑制由逆变器间电流差异引起的环流问题，常在控制策略中引入虚拟阻抗。虚拟阻抗的设计思想是在控制环节人为增加等效阻抗，从而改善系统的电气特性和稳定性。当环流 RMS 值超过设定阈值 I_{th} 时，系统判定为故障或暂态不平衡工况，自适应虚拟阻抗模块启动调整过程。

在此基础上定义自适应虚拟阻抗：

$$\begin{cases} R_v^{cmd} = R_{v,min} + k_r \cdot \tilde{I}_{12} \\ R_v = \text{sat}(R_v^{cmd}, R_{v,min}, R_{v,max}) \end{cases} \quad (6)$$

其中，

$R_{v,min}$: 虚拟电阻下限，用于保证基本阻尼；

$R_{v,max}$: 虚拟电阻上限，防止过补偿；

k_r : 比例系数，决定环流与虚拟电阻之间的灵敏度。

虚拟阻抗注入的电压补偿量为：

$$\begin{cases} \Delta u_d = R_v i_{d,ac} - \omega L_v i_{q,ac} \\ \Delta u_q = R_v i_{q,ac} + \omega L_v i_{d,ac} \end{cases} \quad (7)$$

得到新的电压参考值为：

$$\begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d^{ref} \\ u_q^{ref} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

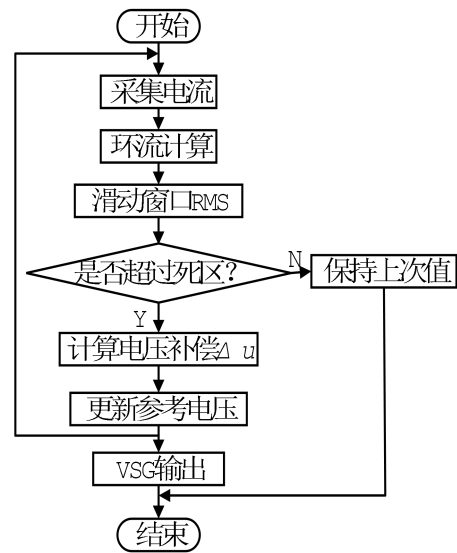


图 2 自适应虚拟阻抗控制流程

根据上述控制逻辑，本文提出的基于环流检测的自适应虚

拟阻抗控制策略，其具体实现流程如图 2 所示。该方法通过实时采集并联逆变器电流信号，计算系统环流并经滑动窗口均方根算法提取有效幅值。当检测到环流超过设定死区阈值时，启动虚拟电阻自适应调节模块，根据环流变化计算电压补偿量并修正参考电压，从而动态调整虚拟阻抗，实现对环流的快速抑制和电压支撑。当环流处于死区范围内时，保持前一时刻参考值不变，避免频繁调节导致的系统震荡。

3 仿真结果与分析

为验证所提出的控制策略在单相电网故障条件下的动态响应特性与电压支撑能力，本文在 Matlab2024a 软件版本 Simulink 中搭建了基于图 1 的两台构网型逆变器并联系统的仿真模型。系统直流侧电压设定为 800 V，两台逆变器经滤波器与线路阻抗耦合后并联至 PCC 点，并在该点接入阻性负载，以分析单相不对称故障下系统的电气动态特性。为全面评估控制策略对系统稳态与暂态性能的影响，本文设置了 A 相接地故障工况，通过调整故障电阻模拟不同故障强度，研究了在电网单相故障下由电压不平衡与环流变化引起的动态电流响应过程。

其具体参数如下表 1 所示：

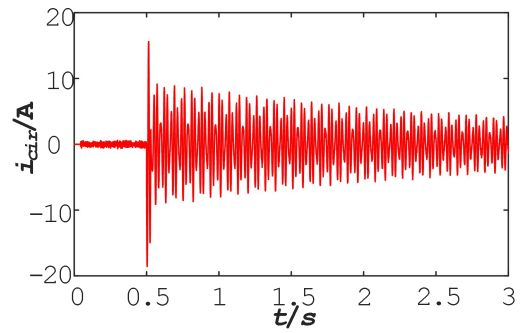
表 1 两台变流器组成微电网的实验参数

参数	数值
直流侧电压 U_{dc} , V	800
滤波电感 L_f , mH	3
滤波电容 C_f , μF	50
线路电阻 R_l , Ω/km	0.642
线路电抗 X_l , Ω/km	0.083
PCC 点阻性负载 R_1 , Ω	15

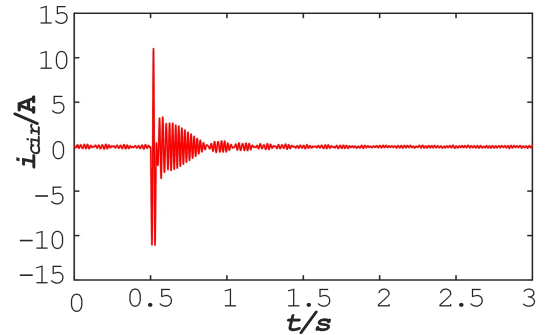
本次实验中，两台并联变流器的额定容量设置为 1:1，均采用基于自适应虚拟阻抗的下垂控制策略。在 PCC 处接入两组阻性负载 R_1 和 R_2 ，其等效阻值为 15 Ω 。系统的下垂系数及虚拟阻抗相关参数如表 2 所示。

表 2 两台相同容量的并联变流器下垂系数与虚拟电感参数

变流器	参数	数值	单位
变流器 1	P- ω 下垂系数 m_1	1.56×10^{-3}	rad/s/W
	Q-v下垂系数 n_1	7.75×10^{-4}	V/Var
	虚拟电感 L_{v1}	2.7	mH
变流器 2	P- ω 下垂系数 m_2	1.56×10^{-3}	rad/s/W
	Q-v下垂系数 n_2	7.75×10^{-4}	V/Var
	虚拟电感 L_{v2}	1.6	mH



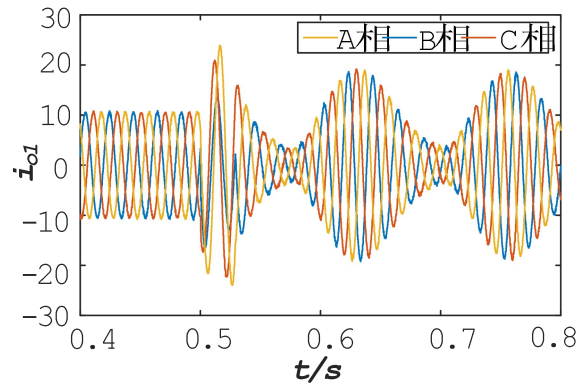
(a)定值虚拟阻抗



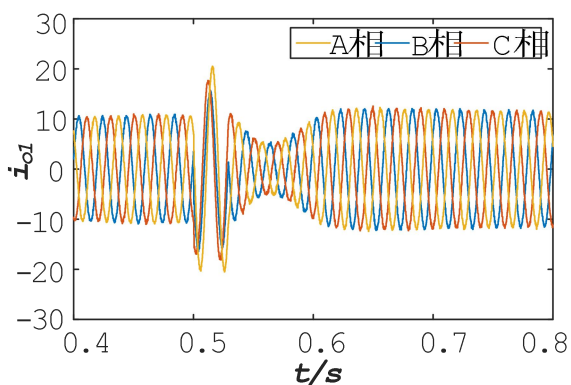
(b)自适应虚拟阻抗

图 3 双机并联自适应虚拟阻抗控制环流波形

图 3 展示了在单相接地故障条件下，双机并联系统分别采用定值虚拟阻抗控制和自适应虚拟阻抗控制时的环流波形。从图 3(a)中可以看出，当故障发生后，系统输出电流迅速上升，环流幅值明显增大。采用定值虚拟阻抗控制时，由于阻抗参数固定不变，无法根据电流变化进行动态调节，导致故障初期环流峰值较大、衰减速度较慢，系统在暂态过程中存在显著的电流振荡现象，稳态恢复时间较长。而在图 3(b)中，自适应虚拟阻抗控制能够根据环流变化实时调整阻抗大小，故障发生瞬间虚拟电阻迅速增大，有效抑制了电流峰值；随着故障解除，阻抗参数逐步回落，系统电流平稳恢复至正常值。结果表明，所提出的自适应虚拟阻抗控制方法在单相不对称故障下具有更强的限流与抑振能力，显著改善了系统的动态响应特性和电压支撑性能。



(a)定值虚拟阻抗



(b)自适应虚拟阻抗

图4 逆变器在不同控制策略下的输出电流波形

图4展示了在单相接地故障条件下，两台逆变器分别采用定值虚拟阻抗控制与自适应虚拟阻抗控制时的输出电流波形。从图4(a)中可以看出，当故障发生后，A相电流出现明显畸变，B、C两相电流波形也受到不同程度影响，系统整体呈现不对称特性。采用定值虚拟阻抗控制时，由于阻抗参数固定，系统无法根据环流与电流变化进行动态调节，导致故障相电流峰值较大，振荡持续时间较长，暂态恢复过程较慢。相比之下，采用自适应虚拟阻抗控制后，系统能够实时根据环流变化自动调整等效阻抗，故障初期电流峰值显著降低，振荡幅度减小且衰减速度明显加快；同时，三相电流逐渐恢复平衡，稳态波形更加平滑。结果表明，所提出的基于环流检测的自适应虚拟阻抗控制策略可在单相接地故障下有效抑制故障相电流冲击，提升系统的动态稳定性与电压支撑能力。

参考文献：

[1] 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(09):3586-3595.
 [2] 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(06): 2339-2359.
 [3] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(02): 336-349.
 [4] 王德胜, 颜湘武, 贾焦心, 等. 永磁直驱风机基于虚拟同步技术的高、低电压连续故障穿越策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2164-2174.
 [5] 祝迪,唐楚杰,熊凯,等.不对称故障下构网变流器故障电流解析计算[J/OL].电力系统及其自动化学报,1-15[2026-03-25].(网络首发)
 [6] 苏匀, 李宾宾, 李少华, 等. 柔性直流输电高频振荡及抑制策略研究[J]. 电工技术, 2021(13): 44-47.

4 结论

本文针对构网型逆变器并联系统在单相接地故障下出现的电流不平衡与环流放大问题，提出了一种基于环流检测的自适应虚拟阻抗控制方法。该方法通过实时检测并联系统的环流变化，根据其均方根值动态调整虚拟阻抗参数，从而实现故障期间快速限流与系统稳定支撑。基于 MATLAB/Simulink 平台搭建的双机并联系统仿真模型验证了该策略的有效性。

仿真结果表明，在单相故障发生初期，自适应虚拟阻抗能够根据电流突变迅速提高阻抗值，有效抑制故障电流峰值和环流振荡，显著降低暂态冲击；在故障解除后，虚拟阻抗参数平滑回落至正常工作值附近，系统输出电压与电流波形迅速恢复平稳，避免了定值虚拟阻抗在故障后期因参数固定导致的电压支撑不足和稳态误差问题。与传统定值虚拟阻抗相比，本文提出的自适应策略在单相不对称工况下表现出更优的动态响应与稳态恢复性能。

此外，该控制方法结构简单，仅依赖现有电流采样信号实现环流检测与参数调节，无需增加额外传感器或通信链路，具有良好的工程可行性与推广价值。研究表明，基于环流检测的自适应虚拟阻抗控制能够在单相故障下有效实现限流、抑振与电压支撑的协调控制，为构网型逆变器在不对称故障条件下的稳定运行提供了一种切实可行的技术方案。

未来工作可在以下方向进一步深入：

- (1) 结合实际电力电子硬件平台开展实验验证；
- (2) 研究自适应参数优化算法以提升系统在多场景下的兼容性；
- (3) 扩展控制策略至多机多节点微电网结构，验证其在大规模并联系统中的可扩展性。