

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.04.004

储能型柔性互联设备的构网运行与故障过流抑制策略

朱恩泽^{1,2}, 张国驹^{1,2}, 葛雪峰³, 王鑫达³, 裴玮^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100190;
3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:随着新能源发电技术的不断发展与应用,配电网逐渐成为具备传输、分配、存储与交易功能的枢纽平台,运行压力日益增大。柔性互联设备(flexible interconnected device, FID)为配电网互联提供了一种解决方案,可以增强配电网的潮流调控能力和故障隔离能力。但以光伏为代表的新能源发电接入和传统大惯性转子电机退网导致的电网整体惯性降低、频率稳定性差等问题日益凸显,目前的FID无法满足电网惯性支撑的需求。为解决上述问题,文中将储能型FID与以虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)为代表的构网型控制相结合,在满足配电网灵活调控的基础上,实现对交流电网的惯性支撑,揭示VSG控制与下垂控制的内在联系。同时,考虑到故障工况下VSG策略易产生过电流的特性,提出一种构造虚拟电压的前馈抑制策略,能够基于功率前馈、电压前馈实现故障状态下FID的过电流抑制。最后通过MATLAB/Simulink仿真,验证策略的功率调配控制以及在单相故障和三相故障时过电流抑制策略的有效性。

关键词:储能型柔性互联设备(FID); 低压配电网; 虚拟同步机(VSG); 电网故障; 过电流抑制; 虚拟电压

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)04-0033-09

0 引言

在城市电网中,一般通过布局数个核心变电站向不同区域供电以满足生产和生活用电的需求。在各个区域边缘的配电网末端,电网强度往往较弱,导致分布式新能源发电消纳困难。利用配电网柔性互联技术,将来自不同变电站的配电网馈线进行连接,实现潮流互济,是提升配电网系统整体强度的有效途径^[1-5]。

柔性互联设备(flexible interconnected device, FID)通常采用背靠背电压源变换器的方式,结合电力电子柔性控制技术与配电网网架优化设计,能够在配电网线路间和台区间提供快速、准确的有功无功控制和失电支援、电能质量治理功能,为挖掘配电网供电潜力和提高供电可靠性提供有效的技术支持^[6-7]。

结合英国大停电事故报告与城区馈线间运行特性分析^[8],使用构网型变流器能够根据所支撑馈线的电压频率状态动态调节交流侧输出功率,从而为城区不同变电站引出的馈线互联提供频率支撑和电压基准。同时,在新能源电网出现故障解裂后,构网型变流器的惯性能够匹配其他支撑型电力的功率支撑曲线。构网型变流器与跟网型变流器的

区别在于:构网型变流器对外表现为串联低阻抗可控电压源;而跟网型变流器对外表现为并联高阻抗可控电流源^[9-12]。文献[13]进一步完善构网型变流器的概念,将是否能够为电网提供惯性支撑和是否能够离网运行作为构网型变流器的评判标准。构网型变流器主要有功率同步控制、下垂控制、虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制以及虚拟振荡器控制,其中VSG控制作为能为系统注入惯性和阻尼的典型控制策略而受到广泛关注^[14-18]。

随着配电网中分布式电源的渗透率逐渐增高,配电网柔性互联结合构网控制策略形成具有惯性支撑的微电网互联结构^[19]。但此控制结构在故障穿越时仅通过无功来调节电压,在无功支撑达到FID的输出上限后,三相以及单相故障过程中的无功净差会产生过电流,严重时可能会损坏开关管。同时,现有的VSG研究大多关注VSG的小干扰稳定性分析,只有少量文献研究大扰动故障下VSG的故障穿越^[20-22]。

目前针对VSG电压穿越的方法主要集中在增加限流硬件^[23]、正负序分离^[24]、前馈补偿^[25]、虚拟阻抗^[26-27]等方面。其中,增加限流硬件会影响整个系统的功率密度,同时会额外产生不必要的损耗;采用正负序分离的方式会引入延迟,使得双闭环控制稳定性下降;虚拟阻抗控制的阻抗值参数设计较为复杂,对电网大扰动适应性较差;前馈抑制无须增加限流硬件且调参方便,同时对电网的大扰动具

收稿日期: 2025-02-28; 修回日期: 2025-05-25

基金项目: 国家重点研发计划资助项目“配电网高功率密度柔性互联技术和装备”(2023YFB2407400)

有优秀的抑制功能,因此采用前馈抑制的低电压穿越策略能够使现有设备在尽可能小的改动条件下实现大扰动下的过电流抑制,使得 FID 能更稳定、经济、高效地运行。

基于以上分析,文中针对城市配电网负载波动大、时空不均衡以及检修、故障情况下跨区转供负荷的需求,基于储能型 FID 单相接地等极端运行工况,提出一种基于虚拟电压的过电流抑制 FID-VSG 控制策略,通过直流侧储能设备提供能量,能够为两侧电网提供稳定的惯性支撑,有效抑制过电流,实现 FID 的平稳电压穿越。

1 储能型背靠背 FID 潮流控制原理

1.1 储能型 FID 拓扑

目前的 FID 以背靠背电压源型变换器和统一潮流控制器两类拓扑为主^[28-31],其中二端口背靠背 FID 两侧可相互隔离、独立运行,也可动态调整交互功率,均衡各单元负载水平。为阻断 FID 与交流电网中的共模零序分量,一般低压 FID 采用隔离变压器连接至配电网,这种情况下可以采用 750 V (± 375 V) 的直流母线电压,更适用于传输功率为数百千瓦到数兆瓦的低压配电互联场景。

为方便阐述控制策略机理,文中参考二端口背靠背拓扑,方案典型设计如图 1 所示。其中,中压交流母线 1 和 2 均通过工频联接变压器与 AC/DC 变流器相连,直流母线通过 buck-boost 变换器连接储能和光伏等直流设备。当直流电网有能量返送时,优先使用新能源消纳模式,通过 DC/DC 变换器维持直流母线电压;当新能源不满足能量返送条件时,使用交流侧端口维持直流母线电压。其中,工频联接变压器通常用于阻断零序分量在交直流间的传递,同时还能实现匹配电网电压的功能,可将不同电压等级的中压配电网馈线进行异步互联。同时,公共直流母线的结构还具备较强的扩展能力,可用于接入更多中压交流馈线,以及直接或通过 DC/DC 变换器接入直流配电线路和光伏、储能、充电桩等直流设备。以图 1 所示背靠背 FID 为研究对象,设交流侧系统电压为 E_1 、 E_2 ,直流侧系统电压为 U_{dc} ,变流器侧的端口电压为 V_1 、 V_2 ,流经变流器的电流为 I_1 、 I_2 ,变流器的等效内阻、交流线路和变压器的电阻之和分别为 R_1 、 R_2 ,交流侧端口电感为 L_1 、 L_2 ,角频率为 ω ,流经变流器的有功功率为 P_1 、 P_2 ,无功功率为 Q_1 、 Q_2 ,流经直流侧端口的能量为 P_{dc} 。

1.2 潮流控制原理

通过对各接口的电流或者电压进行控制,可实

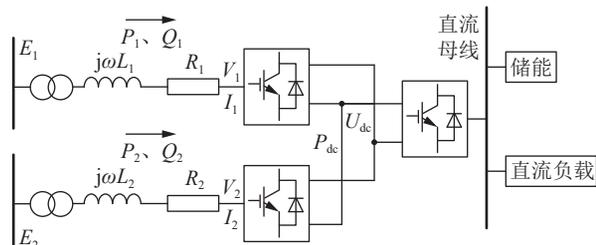


图 1 储能型背靠背 FID 简化模型

Fig.1 Simplified model of energy storage-based back-to-back FID

现对交流接口有功、无功功率以及直流接口有功功率的控制。针对图 1 所示模型,交流母线 1 和 2 上传输的有功功率和无功功率分别为:

$$P_i = \frac{E_i V_i (R_i \cos \delta_i + \omega L_i \sin \delta_i) - R_i V_i^2}{R_i^2 + (\omega L_i)^2} \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{E_i V_i (\omega L_i \cos \delta_i - R_i \sin \delta_i) - \omega L_i V_i^2}{R_i^2 + (\omega L_i)^2} \quad (2)$$

式中: $i=1,2$; δ_i 为电网电压与电流相角差。

在不考虑 FID 自身损耗的情况下,由于中间直流母线的存在,系统具备有功约束:

$$P_1 + P_2 + P_{dc} = 0 \quad (3)$$

在系统正常运行时,如果储能设备处于放电状态,则两侧交流端口均工作在 PQ 模式;如果储能设备处于充电状态,则背靠背 FID 一端口工作在直流母线电压控制模式,即 $U_{dc}Q$ 工作状态,另一端口工作在频率支撑的构网模式,中间储能设备处于充电或能量支援状态,结合式(1)~式(3)可实现交流端口的有功功率控制、无功功率控制,从而实现配电网馈线的潮流控制和无功补偿。

2 储能型 FID-VSG 控制策略

将 VSG 控制方法应用于 FID,结合外环切换环节与故障切换环节,可以得到储能型 FID-VSG 的控制结构,如图 2 所示。该控制结构不仅可以实现不同变电站馈线的潮流互济,还能提升系统极端故障时的过电流抑制能力。

其中, L_{g1} 为 FID 端口 1 所连交流母线处的传输线等效电感; PCC_1 为交流母线 1 的公共连接点(point of common coupling, PCC); v_{g1} 、 i_{g1} 分别为 PCC_1 处测得的三相电压、电流; L_{g2} 为交流母线 2 处的传输线等效电感; PCC_2 为交流母线 2 的 PCC; v_{g2} 、 i_{g2} 分别为 PCC_2 处测得的三相电压、电流; ω_g 为电网的角频率; V_g^{ref} 为标准电网电压有效值,恒定为 220 V; V_1 为标准三相对称电压; V_2 为根据实时采集的电网电压有效值构造的等效前馈电压; V_{ref} 为端口输出电压参考值; V_g 为实时采集电网电压有效值; Q_{set} 为

低 VSG 内环的惯性,即减小惯性系数 M 的值使内环调控速度与外环速度相匹配。当降低整流侧系统的惯性参数时,理想情况下有 $M=0$,则可以得到:

$$P_{\text{ref}} - P_g = D(\omega_m - \omega_g) \quad (8)$$

根据式(8)可知,在消除惯性参数项后,摇摆方程在形式上会转变为有功下垂控制的内环结构,整体系统在本质上相当于比例环节。但由于 M 在控制器中表现为分母,无法真正减小到 0,因此只能将部分惯性环节等效为积分环节。在此情况下,可通过调整阻尼系数,在切换控制指令的同时,实现从功率控制向直流母线电压控制的过渡。

3 储能型 FID-VSG 的故障过电流抑制策略

如图 2 所示,文中所提过电流抑制策略由功率前馈环节和电压前馈环节两部分组成,两者共同作用,实现储能型 FID 的控制功能。当系统逆变侧出现接地故障或电压跌落故障时,功率前馈环节会根据此时系统需要的功率自动调节系统有功、无功给定值,防止出现由静差导致的过电流;电压前馈环节能够抑制电压突变时导致的过电流,使系统始终运行在稳定状态。当系统整流侧出现接地故障时,FID 逆变端口会切换为整流模式,原整流端口会切换为逆变模式并重复逆变侧故障时的操作。

3.1 VSG 过电流产生原因

针对传统 VSG 电压跌落以及恢复过程,故障发生时有电压变化值 $\Delta V_g = V_{\text{ref}} - V_g$ 。由于 VSG 的惯性特性,角频率变化速度很慢,摇摆方程和角频率变化可以忽略不计,对电流 i_g 进行 dq 坐标变换,可得式(9)。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_{dg} \\ \Delta i_{qg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_i}{L_i} & \omega_g \\ -\omega_g & -\frac{R_i}{L_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{dg} \\ \Delta i_{qg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta_m - 1}{L_i} \\ \frac{\sin \theta_m}{L_i} \end{bmatrix} \Delta V_g \quad (9)$$

式中: Δi_{dg} 、 Δi_{qg} 分别为故障期间电感电流的直轴分量和交轴分量。

由 ΔV_g 组成的乘积项为瞬态电压分量,而瞬态过电流产生的根本原因是存在瞬态电压,因此增加给定电压前馈,通过抑制 ΔV_g 能够实现对瞬态电流分量的抑制。

3.2 功率给定值抑制

针对电力系统,过流故障一般发生在三相故障以及单相故障中。由于构网型变流器的外环采用

功率控制,根据 $P=UI$,当外环功率保持恒定时,对于重负荷运行下的 FID,一旦发生电压跌落故障,必然会引发过电流。因此,有必要在 VSG 外环增加功率补偿,以抑制电压跌落期间产生的过电流。根据功角公式可得:

$$\begin{cases} P_{\text{out}} = \frac{V_{\text{out}} V_g}{X} \sin \delta_i \\ Q_g = \frac{V_{\text{out}}(V_{\text{out}} - V_g \cos \delta_i)}{X} \end{cases} \quad (10)$$

式中: V_{out} 为逆变端口处电压; X 为输出端口等效电抗。

由于逆变端口电压与电网电压的有效值接近,可以近似得到:

$$\begin{cases} P_{\text{out}} \approx \frac{V_g^2}{X} \sin \delta_i \\ Q_{\text{out}} \approx \frac{V_g^2(1 - \cos \delta_i)}{X} \end{cases} \quad (11)$$

当 P_{out} 与 V_g^2 成比例时,有功给定值 P_{ref} 与 V_g^2 相乘可以得到新的有功给定值 P'_{ref} 。当系统稳态运行时, $P_{\text{ref}} = P'_{\text{ref}}$;当故障发生时, P'_{ref} 能够跟随跌落电压响应,降低参考值,实现对电压跌落时过电流的抑制。

当电压跌落发生时,如果仍通过无功控制环路调节电压幅值,由于无功控制始终存在较大的静差,会导致 VSG 输出电压升高到无穷大,从而引发电流激增。与有功前馈抑制同理,无功前馈需要同时作用在无功控制环路中的电压控制环与无功给定环。

3.3 过电流抑制

当电压跌落故障结束后,电压恢复时产生的过电流需要通过电压前馈策略来抑制突变电压。同时,采用双同步旋转坐标系法提取电网电压的幅值与相位。相较于文献[25]中的 $T/4$ 延时相消法,双同步旋转坐标系无须将相位滞后 $T/4$ 就可以更实时地跟踪故障,有助于系统平滑处理故障发生过程中的响应曲线。

构造参考电压以及电网电压:

$$V_1 = \sqrt{2} V_g^{\text{ref}} \begin{bmatrix} \sin \theta_m & \sin \left(\theta_m - \frac{2}{3} \pi \right) & \sin \left(\theta_m + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$V_2 = \sqrt{2} V_g \begin{bmatrix} \sin \theta_m & \sin \left(\theta_m - \frac{2}{3} \pi \right) & \sin \left(\theta_m + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

将 VSG 输出的参考电压 V_{vsg} 、电网构造电压 V_2 以及参考电压 V_1 共同作用产生的电压作为逆变器的给定输入电压 V_v^{ref} ,则有:

$$V_v^{\text{ref}} = V_{\text{vsg}} + V_2 - V_1 \quad (14)$$

忽略通信延迟,在理想情况下有 $V_2 = V_g$,即通

过构造与电网电压 V_g 方向相反的电电压, 等效抵消电网电压波动带来的冲击。 V_1 的主要作用是防止电网构造电压前馈作用导致 VSG 环节产生过电压, 前馈控制结构简化模型如图 4 所示。

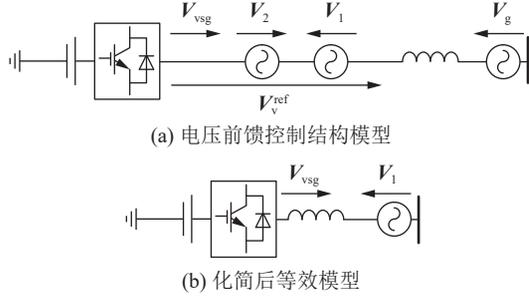


图 4 电压前馈控制结构简化模型
Fig.4 Simplified model of voltage feedforward control structure

当电网发生故障时, 电网构造电压 V_2 与电网电压 V_g 相抵消, 系统中只剩 VSG 输出电压和构造参考电压的作用, 此时系统方程为:

$$L_i \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ai} \\ i_{bi} \\ i_{ci} \end{bmatrix} = -R_i \begin{bmatrix} i_{ai} \\ i_{bi} \\ i_{ci} \end{bmatrix} + \frac{V_{gp.u}}{L_i} \begin{bmatrix} \sin \theta_m - \sin \theta_g \\ \sin \left(\theta_m - \frac{2}{3} \pi \right) - \sin \left(\theta_g - \frac{2}{3} \pi \right) \\ \sin \left(\theta_m + \frac{2}{3} \pi \right) - \sin \left(\theta_g + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: θ_g 为电网电压此时的相位; i_{ai} 、 i_{bi} 、 i_{ci} 分别为电网侧的 a、b、c 相电流。

由式(15)可得, 瞬态电压分量已经被消除, 不会产生瞬态电流分量, 电感上的压降只有 VSG 输出电压和构造参考电压之差的稳态电压成分。因此, 不论是三相故障还是单相故障, 都能够在保证 VSG 惯性运行的前提下, 避免瞬态电压分量出现, 保证系统的平滑稳定运行。

4 仿真分析

为验证所提策略的正确性和有效性, 搭建 MATLAB/Simulink 仿真模型。模型采用中性点直接接地的方式, 仿真参数见表 1。

4.1 潮流互济

为分析惯性支撑型 FID 在不同外环模式下的切换特性, 验证极端工况下直流电压外环的控制能力, 设计仿真方案如下: 初始运行时系统处于储能充电模式, 整流端口电压为 750 V, 逆变端口功率给定值为 -0.4 p.u.。2 s 时, 整流端口发生故障离网, 逆变侧外环切换至直流电压控制。切换过程中馈线

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
端口1交流侧线电压/V	311
端口1侧滤波器电阻/ Ω	0.003
端口1侧滤波器电感/mH	1
端口1侧滤波器电容/ μF	5
端口1额定功率/kW	150
端口1阻尼系数/p.u.	130
PWM开关频率/kHz	10
直流母线额定电压/V	750
端口2侧滤波器电阻/ Ω	0.01
端口2侧滤波器电感/mH	2
端口2侧滤波器电容/ μF	5
端口2惯性系数/p.u.	10
端口2阻尼系数/p.u.	120

功率以及跟踪情况如图 5 所示, 储能设备与直流母线的电压波动情况如图 6 所示。

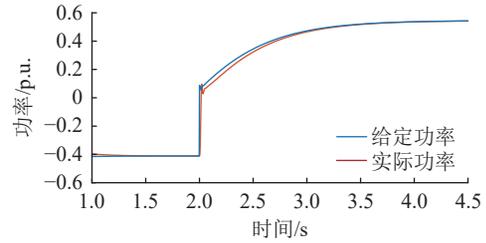


图 5 切换过程中的有功内环跟踪情况
Fig.5 Active power inner loop tracking during switching

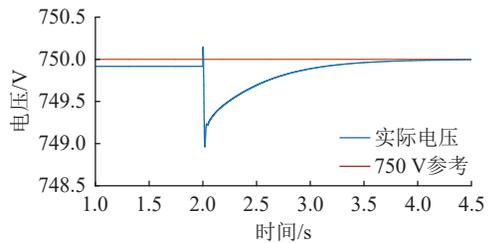


图 6 切换过程中的储能设备与直流母线电压波动情况
Fig.6 Voltage fluctuation of energy storage equipment and DC bus during switching

由于此时为硬切换, 优先保证接有储能设备的直流母线电压稳定, 因此功率在 2 s 瞬间由 -0.4 p.u. 降低至 0, 切换为 $U_{dc}Q$ 控制后支撑母线电压功率由 PI 控制器调节。系统即使从 P_{ref} 改变为 U_{dc} , 仍然要经过摇摆方程的惯性环节, 因此响应仍然是惯性上升。

4.2 过电流抑制控制

4.2.1 仅 VSG 控制效果

为验证故障时虚拟功率前馈控制和虚拟电压前馈控制的有效性, 设计如下仿真: 系统初始运行

在柔性互联状态,且满载运行;1 s时,逆变交流侧发生三相接地故障,交流侧三相电压跌落至 0.2 p.u.,故障持续 1 s;2 s时,电压恢复至 1 p.u.。

图 7 为三相对称故障时的交流侧电流响应。当三相电压同时跌落,仅通过传统 VSG 控制时,交流侧电流波动最大达到 2 p.u.,且在功率控制环的作用下呈电流上升趋势,不断逼近功率给定值。在 2 s 电压恢复时,由于 VSG 惯性以及阻尼的作用,频率无法快速恢复,功率瞬间差额过大,导致交流电流远远超出变流器电流承受水平。图 8 为单相不对称故障时的交流侧电流响应。当不对称故障发生时,交流侧电流幅值达到±2 p.u.。图 7、图 8 表明传统的 VSG 控制策略在电网侧发生故障时不具备过电流抑制功能。

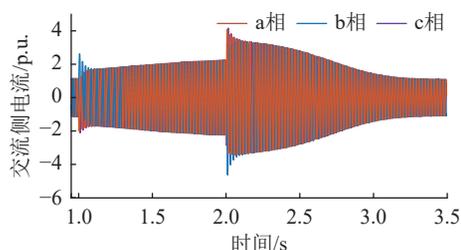


图 7 三相故障时交流侧电流响应
Fig.7 AC-side current response during the three-phase fault

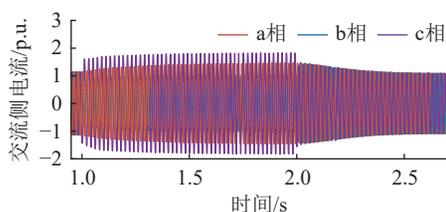


图 8 单相故障时交流侧电流响应
Fig.8 AC-side current response during the single-phase fault

4.2.2 虚拟功率前馈抑制环作用

图 9、图 10 分别为增加虚拟功率前馈抑制后三相故障和单相故障时的交流侧电流响应。根据式(10)可知,当电压跌落时,三相功率给定值将会同比例跌落,在跌落期间交流电流幅值为 0.21 p.u.,相较于图 8,有效抑制了电压跌落时的过电流。但根据式(9),由于存在扰动项,在电压恢复过程中仍然会产生一定时间的过电流,且电流峰值仍然能超过 1.5 p.u.。

4.2.3 虚拟电压前馈抑制环作用

图 11、图 12 分别为增加电压前馈抑制后三相故障和单相故障时的交流侧电流响应。在功率前馈的基础上采用虚拟电压前馈抑制后,不论是三相故障还是单相故障,电压跌落和恢复过程中几乎不会出现过电流的现象,能够符合系统在 2 ms 内,不超

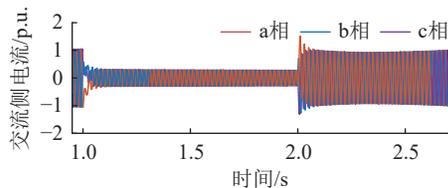


图 9 功率前馈的三相故障电流响应

Fig.9 Three-phase fault current response based on power feedforward

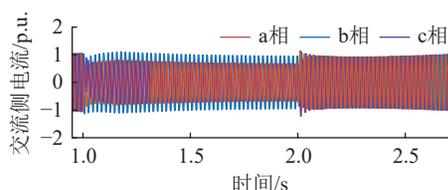


图 10 功率前馈的单相故障电流响应

Fig.10 Single-phase fault current response based on power feedforward

过额定最大电流值 1.5 倍的要求。同时,由于 VSG 特性,电流的过渡过程平滑,为保护动作提供充足的时间,充分体现了惯性支撑作用。

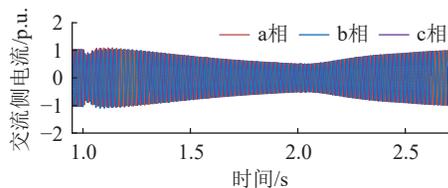


图 11 具备过电流抑制功能的三相故障电流响应
Fig.11 Three-phase fault current response with overcurrent suppression

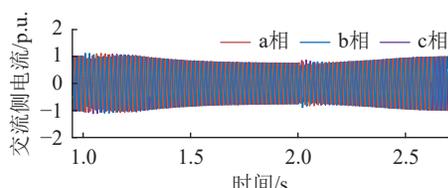


图 12 具备过电流抑制功能的单相故障电流响应
Fig.12 Single-phase fault current response with overcurrent suppression

图 13—图 15 分别反映了在逆变侧发生故障时整流侧电流和电压的响应情况。不论逆变侧发生单相故障还是三相故障,整流端口都能在保证保护不误动的情况下正常传递能量。

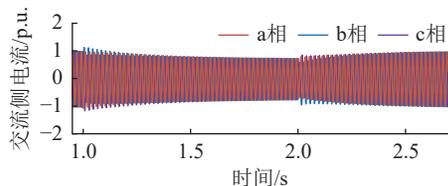


图 13 单相故障时具备过电流抑制功能的整流侧电流响应
Fig.13 Rectifier-side current response during single-phase voltage fault with overcurrent suppression

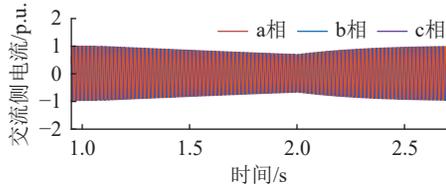


图 14 三相故障时具备过电流抑制功能的整流侧电流响应

Fig.14 Rectifier-side current response during three-phase voltage fault with overcurrent suppression

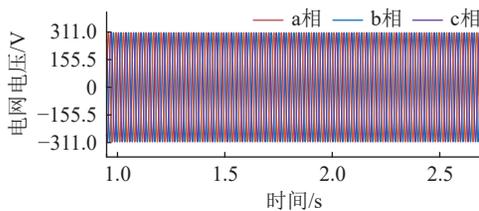


图 15 故障时具备过电流抑制功能的整流侧电压响应

Fig.15 Rectifier-side voltage response during the fault with overcurrent suppression

5 结论

文中提出了一种 FID-VSG 控制策略,在逆变侧发生接地或短路故障时,构网型 FID 无功支撑达到最大值后,为保证设备的完好运行,根据电网电压自动调节功率给定值,有效抑制了通过功率器件的电流,保证了 FID 的运行可靠性和电网惯性的增强作用,得到如下结论:

(1) 当系统检测到一侧整流器发生故障离网时,另一侧换流器能够根据优先级顺序,迅速响应,切换自身运行模式,且状态切换过程中的冲击处于变流器可以接受的水平。

(2) 当逆变侧电网发生电压跌落故障时,所提控制策略能够有效避免惯性支撑型 FID 因电压跌落产生的过电流,减少了系统运行的不安定因素。

参考文献:

- [1] 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):461-475.
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): 461-475.
- [2] 史明明,刘瑞煌,张宸宇,等.考虑输电网与柔性互联配电网交互影响的可靠性评估方法[J].电力工程技术,2024,43(4):77-87.
SHI Mingming, LIU Ruihuang, ZHANG Chenyu, et al. Analytical evaluation method of reliability considering interaction between transmission network and flexible interconnected distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 77-87.
- [3] 侯婷,刘涛,杨柳,等.新一代高性能柔性直流背靠背技术及工

程应用[J].南方能源建设,2023,10(5):1-8.

HOU Ting, LIU Tao, YANG Liu, et al. New generation high-performance VSC-HVDC back-to-back technology and application in project[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(5): 1-8.

[4] 苏成,简翔浩,孔志达,等.基于IGCT器件的配电网柔性直流互联策略[J].南方能源建设,2024,11(6):183-190.

SU Cheng, JIAN Xianghao, KONG Zhida, et al. Flexible interconnection strategy of distribution network based on IGCT[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(6): 183-190.

[5] 邓超平,晁武杰,戴立宇,等.基于MMC-BESS和MMC-MVDC的柔性直流互联系统运行控制[J].供用电,2023,40(7):41-47.

DENG Chaoping, CHAO Wujie, DAI Liyu, et al. Operation control of flexible DC interconnection system based on MMC-BESS and MMC-MVDC[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(7): 41-47.

[6] 张国驹,裴玮,杨鹏,等.中压配电网柔性互联设备的电路拓扑与控制技术综述[J].电力系统自动化,2023,47(6):18-29.

ZHANG Guojun, PEI Wei, YANG Peng, et al. Review on circuit topology and control technology of flexible interconnection devices for medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 18-29.

[7] 胡益菲,钱峰,李海龙,等.基于储能型柔性互联装置的配电网孤岛恢复方法[J].供用电,2024,41(2):21-27.

HU Yifei, QIAN Feng, LI Hailong, et al. Island fault recovery method of distribution network based on flexible interconnection device with energy storage[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(2): 21-27.

[8] National Grid ESO. Interim report into the low frequency demand disconnection (LFDD) following generator trips and frequency excursion on 9 Aug 2019[R]. National Grid ESO, 2019.

[9] 许洁翊,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.

[10] 阮亮,王杨,肖先勇,等.跟网型和构网型变流器动态交互特性分析[J].智慧电力,2024,52(7):103-110.

RUAN Liang, WANG Yang, XIAO Xianyong, et al. Dynamic interaction control characteristic analysis of grid following and grid-forming inverters[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 103-110.

[11] 刘彦军,何维,朱东海,等.基于二阶VSG的变换器频率支撑能力评估及提升方法[J].电力建设,2024,45(11):102-113.

LIU Yanjun, HE Wei, ZHU Donghai, et al. Evaluation and improving method of frequency support of converters based on second-order VSG section[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 102-113.

- [12] ROSSO R, WANG X F, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends: a review[J]. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 2021, 2: 93-109.
- [13] 梁军, 李传玥. 并网换流器控制模式发展及弱电网稳定研究[J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 3703-3712.
LIANG Jun, LI Chuanyue. Recent development of grid-connected inverters and weak-grid stabilization[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(10): 3703-3712.
- [14] 唐英杰, 查晓明, 田震, 等. 弱电网条件下虚拟同步机与SVG并联系统的暂态稳定性分析[J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 4020-4034.
TANG Yingjie, ZHA Xiaoming, TIAN Zhen, et al. Transient stability analysis of virtual synchronous generator and SVG parallel system under weak grid conditions[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(10): 4020-4034.
- [15] 范利, 刘惠康, 柴琳, 等. 虚拟同步机控制策略下的STATCOM相间电容电压平衡方法研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2024, 45(2): 44-51.
FAN Li, LIU Huikang, CHAI Lin, et al. Research on inter-phase capacitive voltage balance method of STATCOM under virtual synchronous machine control strategy[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2024, 45(2): 44-51.
- [16] 王吉利, 占领, 张钢, 等. 提高构网型储能系统功角稳定性的附加阻尼方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(4): 75-81,103.
WANG Jili, ZHAN Ling, ZHANG Gang, et al. Additional damping method for improving the power angle stability of grid-forming energy storage system[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(4): 75-81,103.
- [17] YANG Y Q, XU J Z, LI C, et al. A new virtual inductance control method for frequency stabilization of grid-forming virtual synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(1): 441-451.
- [18] 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.
- [19] 杨万里, 涂春鸣, 兰征, 等. 基于储能型柔性多状态开关的直流微电网与交流配电网柔性互联策略[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(5): 254-260.
YANG Wanli, TU Chunming, LAN Zheng, et al. Flexible interconnection strategy between DC microgrid and AC distribution grid based on energy storage flexible multi-state switch[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(5): 254-260.
- [20] 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.
- [21] 李立, 王佳明, 张青蕾, 等. 兼顾系统频率稳定性和小干扰稳定性的构网型储能参数优化方法[J]. *电力建设*, 2023, 44(12): 125-135.
LI Li, WANG Jiaming, ZHANG Qinglei, et al. Parameter optimization method of grid-forming energy storage considering system frequency stability and small signal stability[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(12): 125-135.
- [22] 陈杰, 程静, 王维庆, 等. 应用多参数协同自适应方法的虚拟同步发电机控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(23): 74-85.
CHEN Jie, CHENG Jing, WANG Weiqing, et al. Control strategy for a virtual synchronous generator using a multi-parameter cooperative adaptive method[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(23): 74-85.
- [23] SUN K, YAO W, WEN J Y, 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.
- [24] 董纪清, 潘佳清, 毛行奎. 自适应正负序复合控制的VSG低电压穿越策略[J]. *电网技术*, 2023, 47(2): 815-822.
DONG Jiqing, PAN Jiaqing, MAO Xingui. Low voltage ride-through strategy of VSG based on adaptive positive and negative sequence composite control[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(2): 815-822.
- [25] KOIWA K, INOO K, ZANMA T, et al. Virtual voltage control of VSG for overcurrent suppression under symmetrical and asymmetrical voltage dips[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(11): 11177-11186.
- [26] LIANG X D, ANDALIB-BIN-KARIM C, LI W X, et al. Adaptive virtual impedance-based reactive power sharing in virtual synchronous generator controlled microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(1): 46-60.
- [27] 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.
- [28] 张彬隆, 郭谋发, 简玉婕. 具备接地故障电流转移功能的配电网柔性多状态开关设计方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(24): 8910-8921.
ZHANG Binlong, GUO Moufa, JIAN Yujie. Research on design method of flexible multi-state switch with ground fault current transfer function for distribution networks[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(24): 8910-8921.

- [29] 周剑桥, 张建文, 施刚, 等. 应用于配电网柔性互联的变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 277-288, 342.
ZHOU Jianqiao, ZHANG Jianwen, SHI Gang, et al. Exploration on power converter topologies applied in flexible interconnection of distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 277-288,342.
- [30] 李正天, 叶雨晴, 王子璇, 等. 基于柔性多状态开关互联的微配网一体化规划及运行评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 487-495, 516.
LI Zhengtian, YE Yuqing, WANG Zixuan, et al. Integrated planning and operation evaluation of micro-distribution network based on flexible multi-state switch interconnection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 487-495,516.

- [31] WU W H, CHEN Y D, ZHOU L M, et al. Sequence impedance modeling and stability comparative analysis of voltage-controlled VSGs and current-controlled VSGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6460-6472.

作者简介:



朱恩泽

朱恩泽(1997), 男, 博士在读, 研究方向为高功率密度柔性互联设备、软开关调制技术 (E-mail: zhuenze@mail.iee.ac.cn);

张国驹(1984), 男, 博士, 副研究员, 教授级高级工程师, 研究方向为柔性互联设备、电力电子设备在电网中的应用;

葛雪峰(1990), 男, 博士, 工程师, 从事光伏并网技术、STATCOM 运行与控制等工作。

Grid forming operation and fault overcurrent suppression strategy of energy storage-based flexible interconnection device

ZHU Enze^{1,2}, ZHANG Guoju^{1,2}, GE Xuefeng³, WANG Xinda³, PEI Wei^{1,2}

- (1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the continuous development and application of new energy power generation technologies, distribution networks are gradually becoming a hub platform with functions of transmission, distribution, storage, and trading. The operating pressure on distribution networks is increasing. Flexible interconnected devices (FIDs) provide a solution for interconnection of distribution networks, enhancing the power flow regulation capability and fault isolation capability of distribution networks. However, the integration of new energy power generation represented by photovoltaics, along with the retirement of traditional large-inertia synchronous generators, has led to increasingly prominent issues such as reduced overall grid inertia and poor frequency stability. The existing FIDs do not meet the demand for grid inertia support. To address the above issues, this paper proposes a solution based on energy storage-based FIDs combined with grid-forming control represented by virtual synchronous generators (VSG). On the basis of meeting the flexible regulation requirements of distribution networks, this solution realizes inertia support for the AC grid and reveals the intrinsic relationship between virtual synchronous generator control and droop control. Considering that the VSG strategy is prone to overcurrent during fault conditions, a feedforward suppression strategy based on virtual voltage construction is proposed. This strategy can achieve overcurrent suppression in FIDs under fault conditions through power feedforward and voltage feedforward. Finally, the effectiveness of the proposed strategy in power allocation control and low-voltage ride-through is verified through MATLAB/Simulink simulation.

Keywords: energy storage-based flexible interconnected device (FID); low-voltage distribution network; virtual synchronous generator (VSG); grid fault; overcurrent suppression; virtual voltage

(编辑 陆海霞)