

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.04.005

基于零序抑制的柔性互联装置多工况控制切换策略

杨晓岚¹, 袁宇波², 陈星莺³, 余昆^{1,3}, 周琦², 刘瑞煌²

(1. 河海大学电气与动力工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 3. 江苏省配用电与能效工程技术研究中心, 江苏 南京 211100)

摘要: 柔性多状态开关 (flexible multi-state switch, FMSS) 作为新一代柔性互联装置, 可替代传统联络开关实现配电网不同馈线间的柔性互联。然而, 现有关于 FMSS 控制模式切换的研究未充分考虑不对称故障情况下零序电流对 FMSS 稳定运行的影响, 导致在不对称故障切除前直流侧电压出现交流波动。为此, 文中提出一种基于零序抑制的柔性互联装置多工况控制模式切换策略。首先, 引入稳态逆模型改进发生故障时 PQ 控制模式与 $U_{dc}Q$ 控制模式之间的平滑切换; 然后, 引入状态跟踪控制改进发生故障时 PQ 控制模式、 $U_{dc}Q$ 控制模式与 Vf 下垂控制模式之间的平滑切换; 最后, 引入基于比例谐振 (proportional resonant, PR) 调节器的零序电流抑制策略, 减少不对称故障发生时零序电流分量对直流侧电压的影响。在 MATLAB/Simulink 中搭建三端口 FMSS 仿真模型, 对所提控制策略进行仿真验证, 结果表明文中所提控制模式切换策略在多种故障工况下均能有效降低直流侧电压波动和交流侧电压电流相位偏移。

关键词: 柔性多状态开关 (FMSS); 稳态逆模型; 状态跟踪控制; 零序抑制; 平滑切换; 多故障工况

中图分类号: TM72

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)04-0042-10

0 引言

为实现国家“碳达峰、碳中和”的战略目标, 构建以分布式能源为主体的新型电力系统已成为能源结构转型的核心路径。这一转型对电力系统提出低碳化、高效化、智能化和信息化发展的多维要求。在此背景下, 分布式能源凭借其灵活性和可再生性优势得到广泛应用。然而, 分布式能源的渗透率提升导致配电网结构日益复杂, 电压越限和馈线功率失衡等电能质量问题愈加凸显。传统的调节手段在动态响应速度和控制精度方面已难以满足新型电网的调控需求^[1-2]。

柔性多状态开关 (flexible multi-state switch, FMSS) 作为新一代柔性互联设备的典型代表, 可替代传统联络开关实现配电网调控模式的革新。FMSS 不仅具备双向潮流灵活调控、动态无功补偿和故障快速隔离等核心功能, 其多端口拓扑更支持多种功能站的深度融合, 为配电网的网络重构、自愈控制及分布式能源的消纳提供关键技术支撑^[3-5]。FMSS 的基础控制策略主要包括 PQ 控制、 $U_{dc}Q$ 控制、 Vf 控制等^[6], 为实现 FMSS 潮流转供的功能, 研究人员进一步提出模型预测控制^[7-8]、滑模控制^[9]、无差拍控制^[10]等控制方法。然而, 当 FMSS 端口出

现故障时, 若无法实现控制模式的平滑切换, 将对直流侧电压的稳定控制产生影响, 从而影响重要负荷的供电和系统运行的稳定性^[11-12]。

针对多端口 FMSS 控制模式切换问题, 现有研究主要聚焦于提高切换过程的平滑性与系统稳定性。文献^[13]针对 FMSS 不同端口特性, 构建比例积分 (proportional-integral, PI) 调节器与稳态逆模型的复合控制器, 研究 $U_{dc}Q$ 端口馈线故障时的控制策略切换问题。文献^[14]基于状态跟踪控制方法, 研究 PQ 端口所连馈线故障情况下, 端口控制模式向下垂控制模式平滑切换的控制策略。文献^[15]基于状态跟踪控制方法, 进一步提出一种具有相位预同步控制的自适应控制策略。文献^[16]提出一种引入权值的控制策略, 可实现 PQ 控制和 $U_{dc}Q$ 控制之间的平滑过渡。为实现控制模式的平滑切换, 研究人员进一步引入虚拟同步机 (virtual synchronous generator, VSG) 控制^[17]、线性自抗扰控制^[18-19]、补偿控制^[20]等方法。然而, 现有研究在进行控制模式平滑切换时, 未考虑对零序电流进行抑制, 在不对称故障切除前, 直流侧电压将会出现工频交流波动。

零序电流抑制主要应用于非隔离型 FMSS, 该领域的研究已相对成熟。文献^[21]为一种非对称式 FMSS 拓扑分别设计交流向直流和直流向交流的零序抑制策略。文献^[22]通过对称分量法分析无变压器型电压源换流器 (voltage source converter,

收稿日期: 2025-05-09; 修回日期: 2025-06-30

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)

VSC)的回路特性,分别设计故障端和非故障端的零序抑制策略。文献[23]基于对称分量法对 FMSS 接入下的配电网短路故障电流进行分析,对配电网不对称故障期间 FMSS 故障侧端口出现的零序电流进行抑制。

基于以上研究现状,文中提出一种基于零序抑制的柔性互联装置多工况控制模式切换策略。引入稳态逆模型改进发生故障时 PQ 控制模式与 $U_{dc}Q$ 控制模式之间的平滑切换;引入状态跟踪控制改进发生故障时 PQ 控制模式、 $U_{dc}Q$ 控制模式与 Vf 下垂控制模式之间的平滑切换;为减少发生不对称故障时零序电流分量对直流侧电压的影响,引入基于比例谐振(proportional resonant, PR)调节器的零序电流抑制策略,从而实现多端口 FMSS 在多故障工况下不同控制模式间的平滑切换。

1 三端口柔性互联装置拓扑与模型

三端口 FMSS 装置拓扑如图 1 所示。三端口 FMSS 的交流侧分别接入配电网中 3 条独立馈线的末端节点,实现多馈线间的柔性互联。

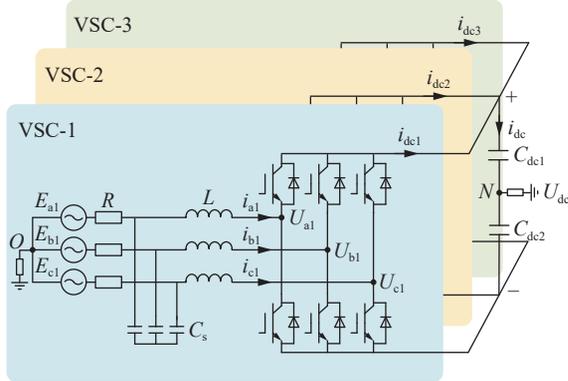


图 1 三端口 FMSS 装置拓扑

Fig.1 Three-port FMSS device topology

图 1 中, C_s 为交流侧电容; L 为线路等效电抗; R 为线路等效电阻; C_{dc1} 、 C_{dc2} 为直流侧电容; O 为 FMSS 端口变流器所连交流系统的中性点; i_{dc1} 、 i_{dc2} 、 i_{dc3} 分别为端口 1、2、3 直流侧电流; i_{dc} 、 U_{dc} 分别为直流侧电流、电压; N 为 FMSS 直流侧接地点; i_{a1} 、 i_{b1} 、 i_{c1} 为端口 1 交流侧输出的三相电流; E_{a1} 、 E_{b1} 、 E_{c1} 为端口 1 所连馈线三相电压; U_{a1} 、 U_{b1} 、 U_{c1} 为端口 1 交流侧三相电压。由基尔霍夫电压定律,建立三端口 FMSS 各端口回路方程,具体如下:

$$\begin{cases} L \frac{di_{ak}}{dt} + Ri_{ak} = E_{ak} - U_{ak} \\ L \frac{di_{bk}}{dt} + Ri_{bk} = E_{bk} - U_{bk} \\ L \frac{di_{ck}}{dt} + Ri_{ck} = E_{ck} - U_{ck} \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 为端口序号, $k=1, 2, 3$; i_{ak} 、 i_{bk} 、 i_{ck} 为端口 k 交流侧输出的三相电流,以流入直流侧为正方向; E_{ak} 、 E_{bk} 、 E_{ck} 为端口 k 所连馈线三相电压; U_{ak} 、 U_{bk} 、 U_{ck} 为端口 k 交流侧三相电压。

建立配电网向各端口注入有功功率 P_{sk} 及无功功率 Q_{sk} 方程,具体如下:

$$\begin{cases} P_{sk} = E_{ak}i_{ak} + E_{bk}i_{bk} + E_{ck}i_{ck} \\ Q_{sk} = \frac{(E_{ak} - E_{bk})i_{ck} + (E_{bk} - E_{ck})i_{ak} + (E_{ck} - E_{ak})i_{bk}}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (2)$$

abc 静止坐标系中的控制变量均为时变交流量,为进一步简化计算,利用 Park 变换将 abc 静止坐标系变换为 dq 旋转坐标系,建立三端口 FMSS 在同步旋转 dq 坐标系下的数学模型。具体如下:

$$\begin{cases} L \frac{di_{dk}}{dt} = E_{dk} - U_{dk} - Ri_{dk} + \omega Li_{qk} \\ L \frac{di_{qk}}{dt} = E_{qk} - U_{qk} - Ri_{qk} - \omega Li_{dk} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{sk} = \frac{3}{2} (E_{dk}i_{dk} + E_{qk}i_{qk}) \\ Q_{sk} = \frac{3}{2} (E_{qk}i_{dk} - E_{dk}i_{qk}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω 为 FMSS 各端口所连交流系统的角频率; i_{dk} 、 i_{qk} 分别为 FMSS 端口 k 输出电流的 d 、 q 轴分量; E_{dk} 、 E_{qk} 分别为 FMSS 端口 k 所连交流系统电压的 d 、 q 轴分量; U_{dk} 、 U_{qk} 分别为端口 k 交流侧电压的 d 、 q 轴分量。

根据三端口 FMSS 功率守恒定律,忽略 FMSS 损耗和线路损耗,建立功率守恒公式。

$$\begin{cases} P_{dck} = U_{dc}i_{dck} \\ \sum_{k=1}^3 P_{dck} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{dck} 为端口 k 变流器流入直流侧有功功率; i_{dck} 为端口 k 变流器流入直流侧电流。

2 三端口柔性互联装置控制策略

为实现三端口柔性互联装置故障态协同控制,文中采用 3 种 FMSS 控制方法。(1) PQ 控制对端口流过有功功率与无功功率进行单独控制;(2) $U_{dc}Q$ 控制给直流侧电压提供稳定支撑;(3) Vf 下垂控制在配电网失电情况下给失电端口提供电压与频率支撑。为简化控制方法的数学表述,下文省略表示不同端口的下标标识符 k ,但实际应用中各控制方法可分别应用于 FMSS 的不同端口。

2.1 PQ 控制

三端口 FMSS 的主要功能是在稳态运行中实现各端口之间的潮流互济。对于 PQ 控制,其控制

外环会根据 VSC 输出有功功率和无功功率的实际值与参考值之间的差值, 通过 PI 控制器输出内环控制的 d 轴和 q 轴电流分量, 其参考值如下:

$$\begin{cases} i_{dref} = \left(k_{p-P} + \frac{k_{i-P}}{s} \right) (P_{sref} - P_s) \\ i_{qref} = \left(k_{p-Q} + \frac{k_{i-Q}}{s} \right) (Q_{sref} - Q_s) \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{sref} 、 Q_{sref} 分别为 VSC 输出有功功率与无功功率参考值; P_s 、 Q_s 分别为 VSC 输出有功功率与无功功率实际值; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为内环控制 d 轴和 q 轴电流分量参考值; k_{p-P} 、 k_{i-P} 为有功 PI 控制器的调节参数; k_{p-Q} 、 k_{i-Q} 为无功 PI 控制器的调节参数。

2.2 $U_{dc}Q$ 控制

为保障 FMSS 可靠运行, 须维持 FMSS 直流侧电压在额定值附近。 $U_{dc}Q$ 控制的控制外环根据直流侧电压和无功功率的实际值与参考值之间的差值, 通过 PI 控制器输出内环控制的 d 、 q 轴电流分量, 其 d 轴电流分量参考值如式(7)所示, q 轴电流分量参考值与 PQ 控制中 q 轴电流分量参考值一致。

$$i_{dref} = \left(k_{p-U} + \frac{k_{i-U}}{s} \right) (U_{dref} - U_{dc}) \quad (7)$$

式中: U_{dref} 为直流侧电压参考值; k_{p-U} 、 k_{i-U} 为直流电压 PI 控制器的调节参数。

2.3 Vf 下垂控制

下垂控制借鉴同步机组调频调压原理, 通过功率环实时计算 VSC 的输出有功功率和无功功率, 将其代入 P/f 和 Q/V 下垂方程中, 计算得到 VSC 输出电压的参考幅值和参考频率^[24-26]。

$$\begin{cases} f_{ref} = f_0 - m(P_s - P_0) \\ V_{ref} = V_0 - n(Q_s - Q_0) \end{cases} \quad (8)$$

式中: f_{ref} 、 V_{ref} 分别为计算得到的 VSC 输出电压的参考频率、参考幅值; P_0 、 Q_0 分别为 VSC 输出有功、无功功率的额定值; f_0 、 V_0 分别为 VSC 输出电压的额定频率、额定幅值; m 、 n 分别为 P/f 、 Q/V 下垂系数。

3 三端口柔性互联装置故障工况下控制切换策略

文中基于零序抑制提出一种柔性互联装置多工况控制切换策略, 模式切换流程如图 2 所示。

(1) 定位故障馈线, 检测并确定发生故障的具体馈线;

(2) 若故障馈线连接的是 PQ 端口, 将该 PQ 端口由 PQ 控制(模式 I.i)切换为 Vf 下垂控制(模式 II), 其他端口控制模式不变;

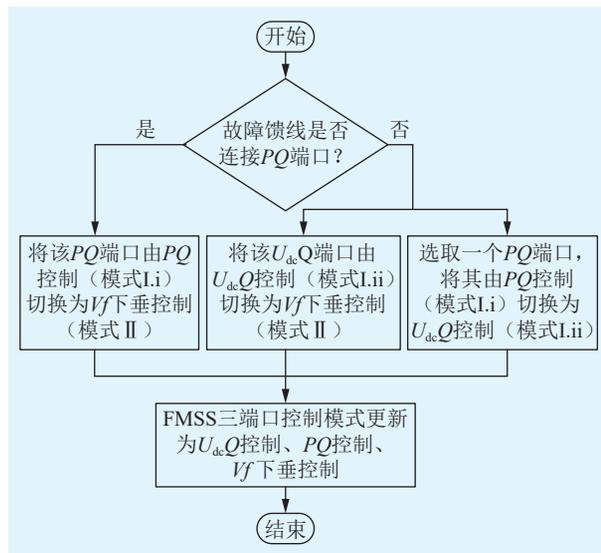


图 2 柔性互联装置控制模式切换流程

Fig.2 Flow chart of flexible interconnection device control mode switching

(3) 若故障馈线连接的是 $U_{dc}Q$ 端口, 将该 $U_{dc}Q$ 端口由 $U_{dc}Q$ 控制(模式 I.ii)切换为 Vf 下垂控制(模式 II), 并选取一个 PQ 端口, 将其由 PQ 控制(模式 I.i)切换为 $U_{dc}Q$ 控制(模式 I.ii)。

设计如图 3 所示三端口柔性互联装置多工况控制切换策略。图 3 中, u_{cd} 、 u_{cq} 分别为电容 C_s 电压的 d 、 q 轴分量; i_{cd} 、 i_{cq} 分别为电容 C_s 流入电流的 d 、 q 轴分量; U_{d_PU} 、 U_{q_PU} 和 U_{d_Droop} 、 U_{q_Droop} 分别为采用 PQ 控制($U_{dc}Q$ 控制)和 Vf 下垂控制时端口变压器的输出电压的 d 、 q 轴分量。

3.1 基于稳态逆模型改进的故障控制切换策略

故障状态下 VSC 实现控制模式平滑切换的关键在于使外环控制器切换时的输出尽量接近其稳态值, 以避免输出跌落或冲击, 缩短动态调节时间。因此在 PQ 控制的外环控制中, 引入由式(4)变换得到的逆稳态模型 i_{d_pq} 和 i_{q_pq} , 计算得到稳态预估值如下:

$$\begin{cases} i_{d_pq} = \frac{2}{3} \times \frac{E_d P_{sref} + E_q Q_{sref}}{E_d^2 + E_q^2} \\ i_{q_pq} = \frac{2}{3} \times \frac{E_q P_{sref} - E_d Q_{sref}}{E_d^2 + E_q^2} \end{cases} \quad (9)$$

考虑同步旋转坐标系基于电网电压矢量定向时满足 $E_q = 0$, 化简后可以得到:

$$\begin{cases} i_{d_pq} = \frac{2}{3} \times \frac{P_{sref}}{E_d} \\ i_{q_pq} = -\frac{2}{3} \times \frac{Q_{sref}}{E_d} \end{cases} \quad (10)$$

同理, 为 $U_{dc}Q$ 控制的外环控制引入逆稳态模型 i_{d_dc} , 其 d 轴稳态预估值如式(11)所示, q 轴稳态预估值与 PQ 控制中 q 轴稳态预估值一致。

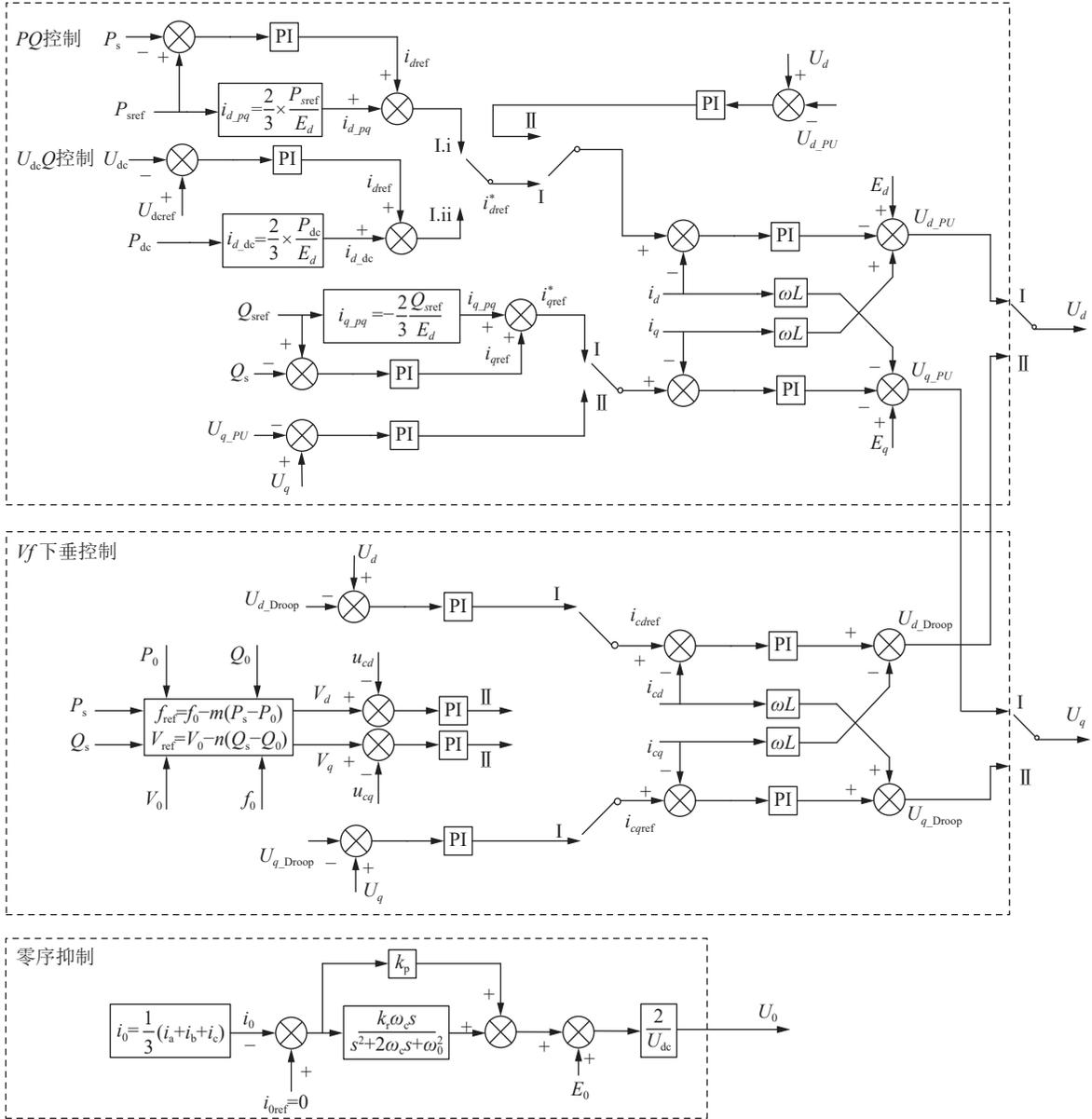


图3 三端口柔性互联装置多工况控制切换策略

Fig.3 Multi-condition control switching strategy for three-port flexible interconnection device

$$i_{d_dc} = \frac{2}{3} \times \frac{P_{dc}}{E_d} \quad (11)$$

式中: P_{dc} 为 $U_{dc}Q$ 端口的需求输出有功, 由 FMSS 实际运行状态决定, 其数值可由式(5)根据功率守恒定律计算得到。

由式(3)可知, FMSS 端口变流器的 dq 轴分量相互耦合, 采用前馈解耦控制进行解耦, 并采用 PI 控制器构建变量替换, 电流内环控制方程如下:

$$\begin{cases} U_d = -\left(k_{p_I} + \frac{k_{i_I}}{s}\right) (i_{dref}^* - i_d) + E_d + \omega L i_q \\ U_q = -\left(k_{p_I} + \frac{k_{i_I}}{s}\right) (i_{qref}^* - i_q) + E_q - \omega L i_d \end{cases} \quad (12)$$

式中: i_{dref}^* 、 i_{qref}^* 分别为引入稳态预估值后, 修正得到的内环控制 d 轴和 q 轴电流分量参考值; k_{p_I} 、 k_{i_I} 为电流 PI 控制器的调节参数。

3.2 基于状态跟踪控制改进的故障控制切换策略

进行 PQ 控制、 $U_{dc}Q$ 控制与 V_f 下垂控制切换时, 为减小输出不匹配, 防止发生跳变造成无法实现 2 种控制间的平滑切换, 采用一种控制器状态跟踪控制。当 VSC 工作在 PQ 控制或 $U_{dc}Q$ 控制时:

$$\begin{cases} U_d = U_{d_PU} \\ U_q = U_{q_PU} \end{cases} \quad (13)$$

此时, U_{d_Droop} 和 U_{q_Droop} 通过 PI 调节器分别实时跟踪 U_d 和 U_q , 保证 VSC 由 PQ 控制、 $U_{dc}Q$ 控制切换至 V_f 下垂控制时的输出电压匹配。

当 VSC 工作在 V_f 下垂控制时:

$$\begin{cases} U_d = U_{d_Droop} \\ U_q = U_{q_Droop} \end{cases} \quad (14)$$

此时, U_{d_PU} 和 U_{q_PU} 通过 PI 调节器分别实时跟

踪 U_d 和 U_q , 保证 VSC 由 Vf 下垂控制切换至 PQ 控制、 $U_{dc}Q$ 控制时的输出电压匹配。

$$\begin{cases} C_s \frac{du_{ca}}{dt} = i_{ca} \\ C_s \frac{du_{cb}}{dt} = i_{cb} \\ C_s \frac{du_{cc}}{dt} = i_{cc} \end{cases} \quad (15)$$

式中: i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 为流入电容 C_s 的三相电流; u_{ca} 、 u_{cb} 、 u_{cc} 为电容 C_s 的三相电压。经 Park 变换后得到图 3 中 u_{cd} 、 u_{cq} 、 i_{cd} 、 i_{cq} 。

$$\begin{cases} C_s \frac{du_{cd}}{dt} = i_{cd} + \omega C_s u_{cq} \\ C_s \frac{du_{cq}}{dt} = i_{cq} - \omega C_s u_{cd} \end{cases} \quad (16)$$

3.3 基于 PR 调节器的零序电流抑制策略

当某一交流侧发生不对称接地故障时, 产生的零序分量会导致直流侧电压 U_{dc} 波动^[22], 若正常侧的 VSC 同样只配置有正序和负序控制器, 该 VSC 的交流侧将出现零序分量, 故障范围扩大。

定义开关函数 $s_j \in \{-1, 1\}$ ($j = a, b, c$), 当上桥臂导通、下桥臂关断时, $s_j = 1$, 反之 $s_j = -1$, 建立 FMSS 交流侧电压与直流侧电压关系方程如下:

$$\begin{cases} U_{aN} = \frac{1+s_a}{2} u_{cp} + \frac{1-s_a}{2} u_{cn} \\ U_{bN} = \frac{1+s_b}{2} u_{cp} + \frac{1-s_b}{2} u_{cn} \\ U_{cN} = \frac{1+s_c}{2} u_{cp} + \frac{1-s_c}{2} u_{cn} \end{cases} \quad (17)$$

式中: U_{aN} 、 U_{bN} 、 U_{cN} 分别为变流器交流侧电压 U_a 、 U_b 、 U_c 与 N 点电压的差值; u_{cp} 为直流侧正极与 N 点间电压; u_{cn} 为直流侧负极与 N 点间电压。可知:

$$U_{dc} = u_{cp} - u_{cn} \quad (18)$$

根据图 1, 建立 FMSS 交流侧电压与直流侧电压回路方程如下:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = E_a - \left(\frac{1+s_a}{2} u_{cp} + \frac{1-s_a}{2} u_{cn} + U_{NO} \right) \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = E_b - \left(\frac{1+s_b}{2} u_{cp} + \frac{1-s_b}{2} u_{cn} + U_{NO} \right) \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = E_c - \left(\frac{1+s_c}{2} u_{cp} + \frac{1-s_c}{2} u_{cn} + U_{NO} \right) \end{cases} \quad (19)$$

式中: U_{NO} 为直流侧接地点 N 相对于交流系统的中性点 O 的电压。将式(18)代入式(19), 可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = E_a - \frac{1}{2} (u_{cp} + u_{cn}) - \frac{s_a}{2} U_{dc} - U_{NO} \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = E_b - \frac{1}{2} (u_{cp} + u_{cn}) - \frac{s_b}{2} U_{dc} - U_{NO} \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = E_c - \frac{1}{2} (u_{cp} + u_{cn}) - \frac{s_c}{2} U_{dc} - U_{NO} \end{cases} \quad (20)$$

基于对称分量法, 建立正序、负序、零序方程,

具体如下:

$$\begin{cases} L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 = E_1 - \frac{s_1}{2} U_{dc} \\ L \frac{di_2}{dt} + Ri_2 = E_2 - \frac{s_2}{2} U_{dc} \\ L \frac{di_0}{dt} + Ri_0 = E_0 - \frac{s_0}{2} U_{dc} - \frac{1}{2} (u_{cp} + u_{cn}) - U_{NO} \end{cases} \quad (21)$$

式中: i_1 、 i_2 、 i_0 分别为正序、负序、零序电流分量; E_1 、 E_2 、 E_0 分别为馈线电压的正序、负序、零序分量; s_1 、 s_2 、 s_0 分别为开关函数的正序、负序、零序分量。

对于 O 点和 N 点的电路特性, 可得 O 点电压 u_O 和 N 点电压 u_N 分别为:

$$\begin{cases} u_O = -(i_a + i_b + i_c)R_O = -3i_0R_O \\ u_N = (i_{cp} + i_{cn})R_N = M(i_a + i_b + i_c)R_N = 3Mi_0R_N \end{cases} \quad (22)$$

式中: R_O 为 O 点接地电阻; R_N 为 N 点接地电阻; i_{cp} 为注入电容 C_{dc1} 电流; i_{cn} 为注入电容 C_{dc2} 电流; $0 < M \leq 1$, 表示直流配电网中其他变流器端接地点对零序电流的分流作用^[22]。将式(18)、式(22)代入式(21), 可得:

$$u_{cp} = E_0 - L \frac{di_0}{dt} - R^* i_0 - \frac{s_0}{2} U_{dc} + \frac{1}{2} U_{dc} \quad (23)$$

式中: $R^* = R + 3R_O + 3MR_N$ 。对于传统 VSC 控制, 控制回路中只包含正序、负序分量控制的开关函数, 即 $s_0 = 0$, 当系统不存在零序分量时, $u_{cp} = U_{dc}/2$, 符合实际情况。但当系统出现零序分量时, 为保持 U_{dc} 稳定, 保证等式 $u_{cp} = U_{dc}/2$ 依然成立, 须满足:

$$E_0 - L \frac{di_0}{dt} - R^* i_0 - \frac{s_0}{2} U_{dc} = 0 \quad (24)$$

即受零序分量调控的开关函数须满足:

$$s_0 = \frac{2}{U_{dc}} \left(E_0 - L \frac{di_0}{dt} - R^* i_0 \right) \quad (25)$$

因为零序电流以工频交流电的形式存在, 与 PI 控制相比, PR 控制能够更有效地对交流量进行调节^[27]。考虑 PR 控制器振峰附近的带宽过于狭窄, 且谐振点处的极高增益会降低系统的稳定裕度, 为增强 PR 控制器对零序电流频率波动的鲁棒性, 采用准 PR 控制器对零序电流进行控制^[23]。根据式(25), 设计准 PR 控制器, 如式(26)所示。

$$U_0 = \frac{2}{U_{dc}} \left[E_0 + \left(k_p + \frac{k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \right) (i_{0ref} - i_0) \right] \quad (26)$$

式中: i_{0ref} 为交流电流零序分量参考值, 一般取值为 0; U_0 为直流侧电压零序分量; k_p 、 k_r 为 PR 控制器的调节参数; ω_0 为谐振频率; ω_c 为截止频率。

4 仿真实验

为验证所设计的多工况控制切换策略的有效

性, 在 MATLAB/Simulink 环境中搭建一套三端口 FMSS 系统模型, 并对其控制切换过程进行测试与分析, 仿真模型主要参数如表 1 所示, 其中 U_{ac} 为交流侧电压。

表 1 仿真模型主要参数

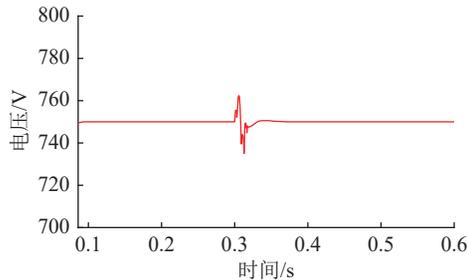
Table 1 Main parameters of the simulation model

参数	数值	参数	数值
U_{dc}/V	750	U_{ac}/V	380
f/Hz	50	C_f/F	0.001 5
L/H	0.004	$R/\mu\Omega$	0.5
C_{dc1}/F	0.007 5	C_{dc2}/F	0.007 5

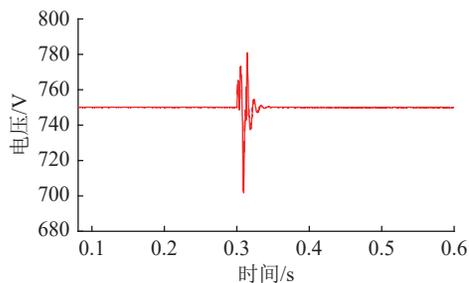
在模型中, 当馈线处于正常工作状态时, 端口 1 采用 $U_{dc}Q$ 控制模式, 以稳定直流电压; 端口 2 和端口 3 采用 PQ 控制模式, 对端口传输的有功和无功功率进行控制调节。为验证文中所提基于零序抑制的柔性互联装置多工况控制切换策略的有效性, 分别以三相短路与单相短路接地为对称故障与不对称故障的典型故障工况, 验证在 PQ 端口与 $U_{dc}Q$ 端口故障情况下, 柔性互联装置多工况控制切换策略的有效性。

4.1 三相短路故障

工况一: PQ 端口发生三相短路故障。端口 3 在 0.2 s 发生三相短路故障, 在 0.3 s 进行故障切除并进行控制模式切换。此时, 其他端口控制模式保持不变, 仅端口 3 由 PQ 控制转变为 Vf 下垂控制, 即端口 3 从模式 I.i 切换至模式 II。 PQ 端口发生三相短路故障时直流侧电压波形如图 4 所示。



(a) 添加平滑切换策略时直流侧电压

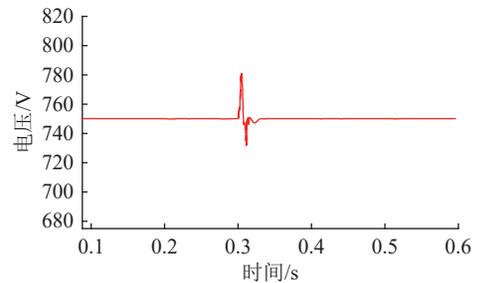


(b) 未添加平滑切换策略时直流侧电压

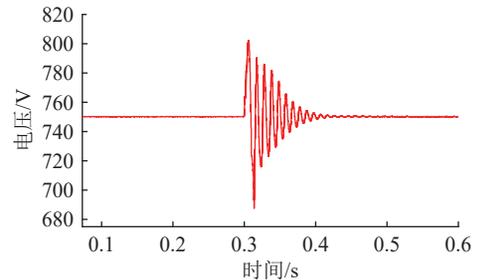
图 4 PQ 端口三相短路故障直流侧电压
Fig.4 DC-side voltage when PQ port three-phase short-circuit fault occurs

对比图 4(a)、(b)可知, 添加基于状态跟踪控制改进的平滑切换策略后, PQ 端口发生三相短路故障时三端口 FMSS 控制切换时间缩短约 0.02 s, 直流母线电压波动缩小约 60 V。

工况二: $U_{dc}Q$ 端口发生三相短路故障。端口 1 在 0.2 s 发生三相短路故障, 在 0.3 s 进行故障切除并进行控制模式切换。此时, 端口 1 由 $U_{dc}Q$ 控制转变为 Vf 下垂控制, 即端口 1 从模式 I.ii 切换至模式 II; 端口 3 由 PQ 控制转变为 $U_{dc}Q$ 控制, 即端口 3 从模式 I.i 切换至模式 I.ii。 $U_{dc}Q$ 端口发生三相短路故障时直流侧电压波形如图 5 所示。



(a) 添加平滑切换策略时直流侧电压



(b) 未添加平滑切换策略时直流侧电压

图 5 $U_{dc}Q$ 端口三相短路故障直流侧电压
Fig.5 DC-side voltage when $U_{dc}Q$ port three-phase short-circuit fault occurs

对比图 5(a)、(b)可知, 添加基于状态跟踪控制和稳态逆模型改进的平滑切换策略后, $U_{dc}Q$ 端口发生三相短路故障时三端口 FMSS 控制切换时间缩短约 0.96 s, 直流母线电压波动缩小约 60 V。

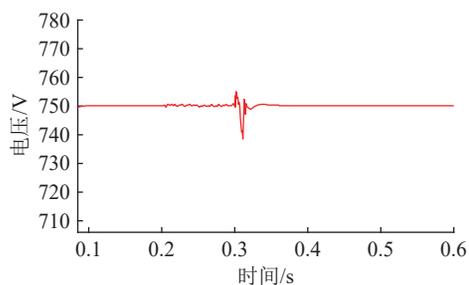
4.2 单相接地短路故障

4.2.1 PQ 端口故障

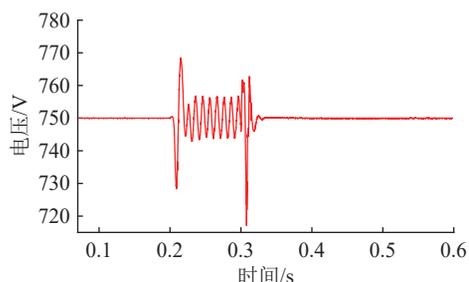
工况三: PQ 端口发生单相短路接地故障。端口 3 在 0.2 s 发生 a 相单相接地短路故障, 在 0.3 s 进行故障切除并进行控制模式切换。 PQ 端口发生单相接地短路故障时直流侧电压波形如图 6 所示。

观察未发生故障端口的电压与电流波形相位偏移, 端口 1 与端口 2 的 a 相电压与电流波形如图 7 所示。

由图 6、图 7 可知, 添加零序抑制策略后, 在



(a) 添加零序抑制策略时直流侧电压

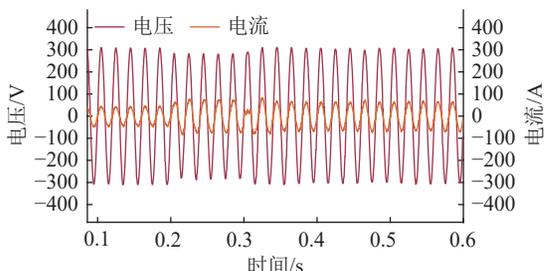


(b) 未添加零序抑制策略时直流侧电压

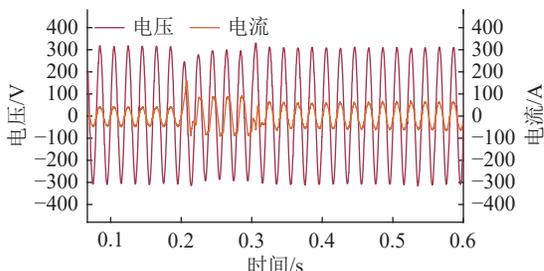
图6 PQ端口单相接地短路故障直流侧电压

Fig.6 DC-side voltage when PQ port single-phase short-circuit ground fault occurs

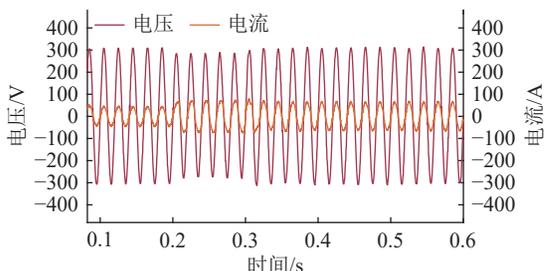
PQ 端口单相短路接地故障切除前, 直流侧电压交流波动得到有效抑制, 端口 1 及端口 2 的 a 相电压与 a 相电流相位偏移得到有效矫正, 具体定量比较如表 2 所示。



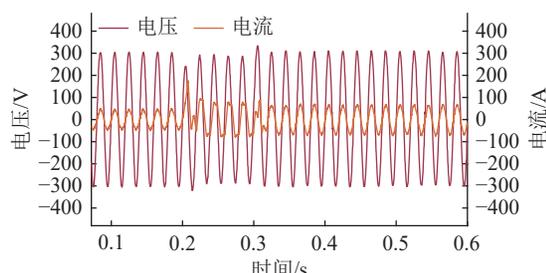
(a) 添加零序抑制策略时端口1 a相电压与电流



(b) 未添加零序抑制策略时端口1 a相电压与电流



(c) 添加零序抑制策略时端口2 a相电压与电流



(d) 未添加零序抑制策略时端口2 a相电压与电流

图7 端口 1 与端口 2 的 a 相电压与电流(工况三)

Fig.7 Port 1 and port 2 phase a voltage and current (case 3)

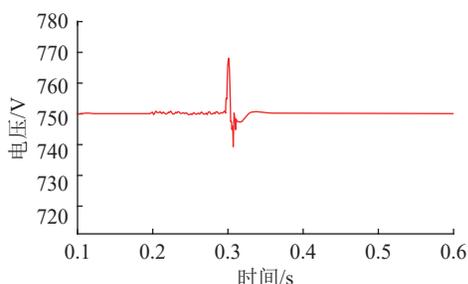
表 2 添加零序抑制策略前后波形参数对比(工况三)

Table 2 Comparison of waveform parameters before and after adding zero-sequence suppression strategy (case 3)

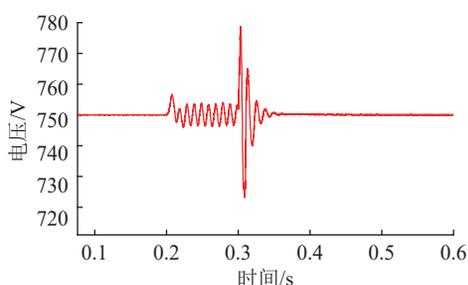
参数	添加前	添加后
直流电压波动/V	41	2
端口1相位偏移/(°)	58	2
端口2相位偏移/(°)	54	2

4.2.2 $U_{dc}Q$ 端口故障

工况四: $U_{dc}Q$ 端口发生单相接地短路故障。端口 1 在 0.2 s 发生 a 相接地短路故障, 在 0.3 s 进行故障切除并进行控制模式切换。 $U_{dc}Q$ 端口发生单相短路接地故障时直流侧电压波形如图 8 所示。



(a) 添加零序抑制策略时直流侧电压



(b) 未添加零序抑制策略时直流侧电压

图8 $U_{dc}Q$ 端口单相接地短路故障直流侧电压

Fig.8 DC-side voltage when $U_{dc}Q$ port single-phase short-circuit ground fault occurs

观察未发生故障端口的电压与电流波形相位偏移, 端口 2 与端口 3 的 a 相电压与电流波形如图 9 所示。

由图 8、图 9 可知, 添加零序抑制策略后, 在

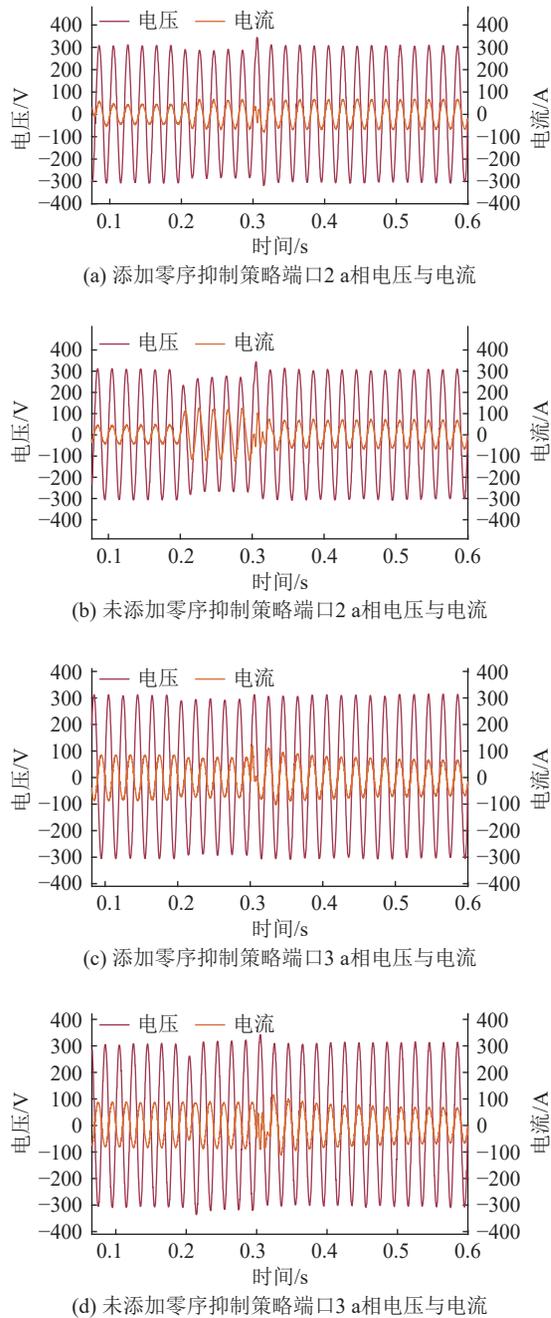


图9 端口2与端口3的a相电压与电流(工况四)

Fig.9 Port 2 and port 3 phase a voltage and current (case 4)

$U_{dc}Q$ 端口单相短路接地故障切除前, 直流侧电压交流波动得到有效抑制, 端口2及端口3的a相电压与a相电流相位偏移得到有效矫正, 具体定量比较如表3所示。

表3 添加零序抑制策略前后波形参数对比(工况四)

Table 3 Comparison of waveform parameters before and after adding zero-sequence suppression strategy (case 4)

参数	添加前	添加后
直流电压波动/V	13	2
端口2相位偏移/(°)	48	1
端口3相位偏移/(°)	23	1

5 结论

文中围绕柔性互联装置的多工况控制切换策略展开研究, 提出一种基于零序抑制的控制切换策略, 并在 MATLAB/Simulink 仿真平台上构建相应的控制策略切换模型。通过与未采用零序抑制控制策略的方案进行系统性对比, 得出以下结论:

(1) 通过结合稳态逆模型与状态跟踪控制方法, 可改善 PQ 控制、 $U_{dc}Q$ 控制与 Vf 下垂控制之间的平稳切换。仿真结果表明, 文中所提控制策略大大减小了控制切换时的电压波动与控制切换时间。

(2) 通过引入基于 PR 调节器的零序电流抑制策略, 改善发生非对称故障时的系统稳定性。仿真结果表明, 当 PQ 端口发生故障时, 在非对称故障切除之前, 直流侧电压的交流波动降低了 95.12%, 交流电压与交流电流波形之间的相位偏移平均降低了 96.43%; 当 $U_{dc}Q$ 端口发生故障时, 在非对称故障切除之前, 直流侧电压的交流波动降低了 84.62%, 交流电压与交流电流波形之间的相位偏移平均降低了 97.18%。直流侧电压的交流波动得到了显著抑制, 并有效减小了交流电压与交流电流波形之间的相位偏移。

后续研究将进一步考虑在光储直柔复杂系统中, 该控制切换策略与光储控制策略的协同控制与优化。

致谢

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“电容补偿型低压串联柔性互联装置技术研究”(J2024219)资助, 谨此致谢!

参考文献:

- [1] 李鹏, 王瑞, 冀浩然, 等. 低碳化智能配电网规划研究与展望[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(24): 10-21.
- [2] LI Peng, WANG Rui, JI Haoran, et al. Research and prospect of planning for low-carbon smart distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(24): 10-21.
- [3] SUN F Z, MA J C, YU M, et al. Optimized two-time scale robust dispatching method for the multi-terminal soft open point in unbalanced active distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(1): 587-598.
- [4] 胡鹏飞, 朱乃璇, 江道灼, 等. 柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 2-12.
- [5] HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 2-12.
- [6] 石铖, 安锐, 高红均, 等. 基于柔性多状态开关和动态重构的配电网灵活运行方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(22):

- 133-144.
SHI Cheng, AN Rui, GAO Hongjun, et al. Flexible operation method for a distribution network based on flexible multi-state switching and dynamic reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 133-144.
- [5] 王成山, 季节, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 1-14.
WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14.
- [6] JIANG X, ZHOU Y, MING W L, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 1899-1910.
- [7] 张国荣, 彭勃, 解润生, 等. 柔性多状态开关模型预测协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 123-129, 137.
ZHANG Guorong, PENG Bo, XIE Runsheng, et al. Predictive synergy control strategy for flexible multi-state switch model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 123-129, 137.
- [8] 王正齐, 盛柳森, 郝思鹏. 三端口柔性多状态开关有限集模型预测控制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(2): 88-98.
WANG Zhengqi, SHENG Liusen, HAO Sipeng. A finite control set model predictive control for three-port[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(2): 88-98.
- [9] 张国荣, 侯立凯, 彭勃, 等. 柔性多状态开关反馈线性化滑模控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 126-133.
ZHANG Guorong, HOU Likai, PENG Bo, et al. Feedback linearization sliding mode control strategy for soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 126-133.
- [10] 张国荣, 王泰文, 侯立凯, 等. 柔性多状态开关参数辨识无差拍控制[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 129-135, 165.
ZHANG Guorong, WANG Taiwen, HOU Likai, et al. Dead-beat control with parameter identification for soft open point[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 129-135, 165.
- [11] 沈聪, 张国荣, 彭勃, 等. 具备干扰抑制能力的柔性多状态开关直流电压控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1198-1205.
SHEN Cong, ZHANG Guorong, PENG Bo, et al. DC voltage control strategy of flexible multi-state switch with disturbance rejection[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1198-1205.
- [12] 任洁, 刘桂英, 粟时平, 等. 基于RBFNN稳态逆模型的多端柔性多状态开关平滑切换策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 167-174.
REN Jie, LIU Guiying, SU Shiping, et al. Smooth switching strategy of multi-terminal flexible multi-state switch based on RBFNN steady-state inverse model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 167-174.
- [13] 张国荣, 沈聪, 彭勃, 等. 馈线故障下柔性多状态开关的平滑切换策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3050-3058.
ZHANG Guorong, SHEN Cong, PENG Bo, et al. Smooth switching strategy of flexible multi-state switch in the case of feeder fault[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3050-3058.
- [14] 张国荣, 朱一鸣, 彭勃, 等. 基于三端口柔性多状态开关不同运行模式间的切换技术[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 1-8.
ZHANG Guorong, ZHU Yiming, PENG Bo, et al. Switching technology of different operating modes based on three-port flexible multi-state switch[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 1-8.
- [15] 李洋滨, 粟时平, 龙坤, 等. 配电网故障下柔性多状态开关平滑切换策略[J]. 现代电力, 2025, 42(1): 12-18.
LI Yangbin, SU Shiping, LONG Kun, et al. Smooth switching strategy for flexible multi-state switch during distribution network faults[J]. Modern Electric Power, 2025, 42(1): 12-18.
- [16] 张玺, 李岚, 霍群海, 等. 三端口柔性多状态开关多模式平滑切换控制策略[J]. 现代电力, 2024, 41(4): 775-785.
ZHANG Zan, LI Lan, HUO Qunhai, et al. A control strategy for smooth switching of three-port flexible multi-state switches[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(4): 775-785.
- [17] 段青, 沙广林, 盛万兴, 等. 配电网柔性互联系统多模式运行及其调控策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 9-24.
DUAN Qing, SHA Guanglin, SHENG Wanxing, et al. Multi-mode operation and its control strategy of flexible interconnected system for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 9-24.
- [18] 刘一琦, 孙明哲, 胡存刚, 等. 基于LADRC的柔性多状态开关平滑切换策略[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1663-1672.
LIU Yiqi, SUN Mingzhe, HU Cungang, et al. Smooth switching strategy for flexible multi-state switches based on linear active disturbance rejection control[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1663-1672.
- [19] 王正齐, 徐浩, 王德全. 基于线性自抗扰控制的柔性多状态开关直流电压控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(2): 107-116.
WANG Zhengqi, XU Hao, WANG Dequan. Flexible multi-state switch DC voltage control strategy based on linear active disturbance rejection control[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(2): 107-116.
- [20] 王杰, 黄文焘, 余墨多, 等. 柔性互联微网模式紧急切换平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7695-7706.
WANG Jie, HUANG Wentao, YU Moduo, et al. Smooth control strategy for emergency switching of interconnected microgrids via FMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7695-7706.
- [21] 许烽, 陆翌, 李继红, 等. 无变压器非对称式柔性多状态开关的零序抑制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3084-3091.
XU Feng, LU Yi, LI Jihong, et al. Zero-sequence suppression strategy of transformerless asymmetric flexible multi-state switch[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3084-3091.
- [22] 许烽, 陆翌, 黄晓明, 等. 基于无变压器型电压源换流器的柔

- 性多状态开关零序抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(14): 124-129.
- XU Feng, LU Yi, HUANG Xiaoming, et al. Zero-sequence suppression strategy of flexible multi-state switch based on transformerless voltage source converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(14): 124-129.
- [23] 马文忠, 吕清琛, 张彦, 等. 配电网故障状态下柔性多状态开关故障电流抑制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4251-4258.
- MA Wenzhong, LÜ Qingchen, ZHANG Yan, et al. Suppression strategy for fault current of flexible multi-state switch in distribution network fault state[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4251-4258.
- [24] 马文忠, 李文飞, 王玉生, 等. MMC-LCC 混合直流输电系统分段下垂控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 100-107.
- MA Wenzhong, LI Wenfei, WANG Yusheng, et al. Segmented droop control strategy of MMC-LCC hybrid DC transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 100-107.
- [25] LING Y H, LI Y J, XIANG J. Load support by droop-controlled distributed generations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8345-8355.
- [26] DENG W Y, DAI N Y, LAO K W, et al. A virtual-impedance droop control for accurate active power control and reactive power sharing using capacitive-coupling inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6): 6722-6733.
- [27] 张志坚, 荆龙, 赵宇明, 等. 低开关频率对并网逆变器控制环节的影响及补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 111-119.
- ZHANG Zhijian, JING Long, ZHAO Yuming, et al. Effect of low switching frequency on control link of grid-connected inverter and compensation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 111-119.

作者简介:



杨晓岚

杨晓岚(1999), 男, 硕士在读, 研究方向为柔性互联、光储直柔微电网(E-mail: 231606030071@hhu.edu.cn);

袁宇波(1975), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事继电保护、数字配电网相关工作;

陈星莺(1964), 女, 博士, 教授, 研究方向为智能配用电与能效的理论与应用。

Multi-condition control switching strategy for flexible interconnection devices based on zero-sequence suppression

YANG Xiaolan¹, YUAN Yubo², CHEN Xingying³, YU Kun^{1,3}, ZHOU Qi², LIU Ruihuang²

(1. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China; 3. Jiangsu Engineering Research Center for Distribution & Utilization and Energy Efficiency, Nanjing 211100, China)

Abstract: The flexible multi-state switch (FMSS), as a new generation of flexible interconnection device, enables flexible interconnection between different feeders in distribution networks by replacing traditional tie switches. However, the influence of zero-sequence current on the stable operation of the FMSS under asymmetrical fault conditions has not been fully considered in existing research on FMSS control mode transitions. This leads to AC oscillation in the DC voltage before the asymmetrical fault is cleared. To address this issue, a multi-mode control transition strategy based on zero-sequence suppression is proposed for flexible interconnection devices. Firstly, the smooth transition between PQ control mode and $U_{dc}Q$ control mode during faults is improved by the introduction of a steady-state inverse model. Subsequently, the smooth transition among PQ control mode, $U_{dc}Q$ control mode, and Vf droop control mode during faults is improved by the introduction of state tracking control. Finally, the impact of the zero-sequence current component on the DC voltage during asymmetrical faults is reduced by the introduction of a zero-sequence current suppression strategy based on a proportional resonant (PR) regulator. A three-port FMSS simulation model is established in MATLAB/Simulink to verify the proposed control strategy. Simulation results demonstrate that the proposed control mode transition strategy effectively reduces DC voltage fluctuation and AC voltage/current phase offset under various fault conditions.

Keywords: flexible multi-state switch (FMSS); steady-state inverse model; state tracking control; zero-sequence suppression; smooth switching; multi-fault conditions

(编辑 方晶)