

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.01.006

# 变流器辅助换流的柔性切换开关拓扑与控制

方仍存<sup>1</sup>, 雷何<sup>1</sup>, 杨东俊<sup>1</sup>, 庄凯勋<sup>2</sup>, 查晓明<sup>2</sup>, 孙建军<sup>2</sup>

(1. 水火电资源优化配置与仿真技术实验室(国网湖北省电力有限公司经济技术研究院), 湖北 武汉 430077; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 分布式新能源渗透率的快速提高, 在提升配电网灵活性的同时也加大了其运行调控难度。为此, 文中提出一种新型配电网柔性切换开关设备, 开关由集成门极换流晶闸管(integrated gate-commutated thyristor, IGCT)与并联电压型变流器组成, 其中针对并联电压型变流器采取虚拟同步发电机控制, 可实现负载在不同馈线间的平稳切换。文中首先将所提柔性切换开关与柔性多状态开关及机械开关的主要特征进行比较; 然后, 分析柔性切换开关在故障前、故障中和故障后的工作模式, 并研究在3种工作模式间进行柔性切换时的切换逻辑; 最后, 通过基于RT-Lab的控制, 在环实验模拟开关在不同馈线间切换的过程, 获得不同工作模式下和柔性切换过程中的电压电流波形。实验结果表明柔性切换开关具有短时电压支撑能力, 在不同馈线间切换的过程中不产生电压电流冲击。

**关键词:** 柔性切换; 集成门极换流晶闸管(IGCT); 虚拟同步发电机; 电压支撑; 预同步策略; 柔性并网

**中图分类号:** TM46

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)01-0043-07

## 0 引言

大规模分布式新能源电源<sup>[1-3]</sup>及以新能源汽车为首的新型用电负荷<sup>[4-5]</sup>使得配电网潮流分布呈现强随机波动性<sup>[6-8]</sup>, 导致传统的配电网控制手段难以适用, 因此越来越多研究聚焦于具备灵活调控能力的智能配电技术<sup>[9-10]</sup>。

近年来, 为提升配电网调控灵活性, 国内外学者提出了柔性多状态开关<sup>[11-12]</sup>。柔性多状态开关具备灵活的潮流调节能力<sup>[13]</sup>, 可有效优化配电网潮流, 由于其控制方式多样且响应速度快, 在提高分布式电源消纳水平<sup>[14]</sup>、平衡馈线负荷<sup>[15]</sup>、快速恢复供电<sup>[16]</sup>等方面具有巨大的潜力。现有柔性多状态开关可根据不同故障类型下的电气特征给定故障判别指标, 在配电网对称故障<sup>[17]</sup>及不对称故障<sup>[18-19]</sup>中快速隔离故障。在此基础上, 采用多端口柔性多状态开关<sup>[20]</sup>有利于实现故障馈线供电恢复及馈线间电能的灵活转供。然而, 柔性多状态开关常采用背靠背电压型变流器, 其拓扑所需器件和成本随开关端口数成比例增加, 且运行损耗高、占地面积大。且现有柔性多状态开关采用的控制策略对连接母线电压的支撑能力较弱, 因此文献[21-22]采用虚拟同步技术等组网型变流器控制策略, 同时向电网提供惯量支撑, 提高故障暂态下的功率支撑能力。

基于上述问题, 文中提出了基于并联电压型变流器与集成门极换流晶闸管(integrated gate-commutated thyristor, IGCT)的柔性切换开关拓扑, 相较于

柔性多状态开关, 其功率变换单元更少、运行损耗更低, 因而具有更好的经济性。并联电压型变流器能在IGCT分断时辅助电流换相, 实现不同馈线间的切换, 稳态时可实现无功、三相不平衡等电能质量问题的补偿, 配合大容量储能电池还可实现配电网削峰填谷。文中在并联电压型变流器中引入虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)策略<sup>[23]</sup>, 以提升其在稳态和暂态下的电压支撑水平<sup>[24]</sup>。同时为提高切换速度、降低电流波动, 文中在VSG控制的基础上通过对比变流器输出与电网电压 $dq$ 分量的偏差, 快速实现并网同期条件判别。通过基于RT-Lab的控制, 在环实验开展了相关策略验证, 结果表明柔性切换开关具有优异的暂态电压支撑能力及灵活的切换能力, 验证了所提开关在快速故障隔离方面的有效性。

## 1 柔性切换开关的基本工作原理

### 1.1 柔性切换开关的结构与对比

现有柔性多状态开关的结构如图1(a)所示, 其主要由2台变流器组成, 每台变流器的交流侧均连有一组馈线, 由此保证2组馈线实现互联。但随着相连接数增多、馈线传输容量增大, 柔性多状态开关的成本及体积正面临挑战。而文中所提柔性切换开关的结构如图1(b)所示, 其包含2个以上IGCT、吸收电路, 1台采用VSG控制的并联电压型变流器以及对应的LC滤波电路。其中,  $L$ 为变流器交流侧滤波电感;  $R$ 为电感内阻及线路等效电阻之和;  $C$ 为滤波电容;  $C_{dc}$ 为直流侧电容;  $U_{s1}$ 、 $U_{s2}$ 、 $U_g$ 、 $U_c$

分别为馈线 1 电压、馈线 2 电压、变流器并网处电压和变流器交流侧电压。

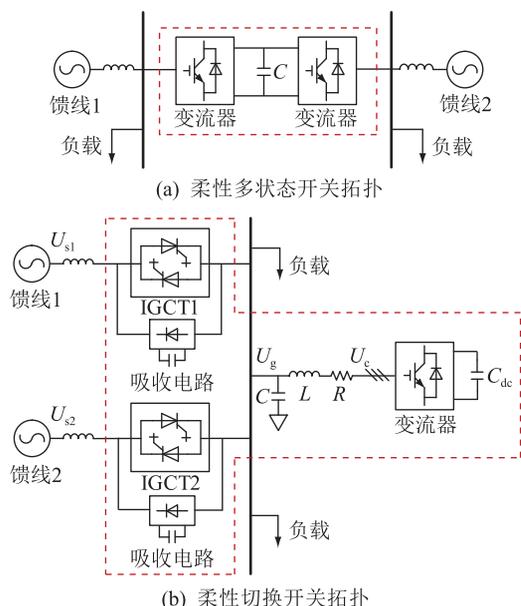


图 1 柔性多状态开关和柔性切换开关拓扑

Fig.1 Flexible multi-state switch and flexible switch topologies

机械开关、柔性多状态开关和柔性切换开关的主要特征如表 1 所示。

表 1 3 种开关的主要特征

Table 1 Main characteristics of three types of switches

特征	机械开关	柔性多状态开关	柔性切换开关
开关原理	机械式分闸 合闸动作	电力电子 半导体开关	电力电子 半导体开关
动作时间	时间长、难以 频繁倒闸	毫秒级	毫秒级
控制状态	仅具备通 态及断态	通态、断态和 连续可控态	多条馈线间 灵活切换
切换过程冲击	电流冲击大	电流冲击较小	平滑过渡、 无电流冲击
变流器容量	无	与馈线传输 容量一致	仅须提供故障暂 态下的负载功率
运行效率	低	低	高

综合对比 3 种开关的主要特征,可得变流器辅助换流的柔性切换开关具有以下 3 个特点:

(1) 采用 IGBT 进行馈线投切,具备响应速度快、容量大、通态损耗低和可靠性高等优点,与采用普通断路器相比,在低频大功率应用领域具有良好的经济性。

(2) 变流器以并联形式与电网相连,仅须按照功率平衡关系在故障暂态提供负载功率。此外,还可根据不同的电压等级选择变流器拓扑,在运行效率方面远高于以串联形式接入电网的柔性多状态开关。

(3) 变流器采用 VSG 控制,为独立电压源,在 IGBT 强迫关断过程及馈线切换过程中辅助换流,提供短时电压及功率支撑,有利于实现馈线间平滑、快速切换,在应对馈线故障、实现快速故障隔离方面有着卓越表现。

### 1.2 柔性切换开关的工作模式分析

馈线发生故障后,变流器辅助换流的柔性切换开关在馈线切换的过程中存在图 2 所示 3 种工作模式,即故障前变流器与馈线 1 并网运行模式(模式 I)、故障中变流器独立供电运行模式(模式 II)、故障后变流器与馈线 2 并网运行模式(模式 III)。

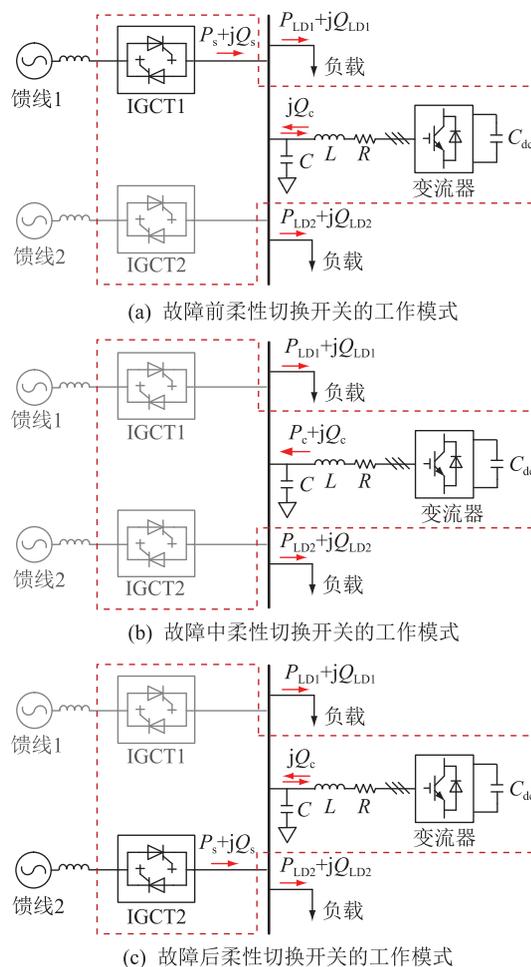


图 2 故障前、中、后柔性切换开关的工作模式

Fig.2 The working modes of the flexible switch before, during and after a feeder fault

故障前柔性切换开关的工作模式见图 2(a)。其中,  $P_s$ 、 $Q_s$  分别为馈线提供的有功和无功功率;  $P_c$ 、 $Q_c$  分别为变流器提供的有功和无功功率;  $P_{LD1}$ 、 $Q_{LD1}$  分别为负载 1 消耗的有功和无功功率;  $P_{LD2}$ 、 $Q_{LD2}$  分别为负载 2 消耗的有功和无功功率。馈线 1 经 IGCT1 为交流母线上的负载供电, IGCT2 处于断开状态,此时变流器作为备用电源空载并网,不提供功率。

在馈线 1 发生故障后,柔性切换开关快速切除馈线 1,IGCT1 和 IGCT2 均处于断开状态,变流器从空载并网运行模式过渡到独立供电运行模式,此时变流器输出功率由负载决定,如图 2(b)所示。

采用 VSG 控制的变流器只能作为短期的供电电源,因此必须重新接入馈线向负载供电。投入馈线 2 后,IGCT1 保持断开,变流器过渡到与模式 I 相同的空载并网运行模式,如图 2(c)所示,负载功率由馈线 2 提供,变流器作为无功补偿设备。

在 3 种不同运行状态下,为保证负载的供电可靠性,馈线 1、馈线 2 和变流器需要在不同时段内向负载提供功率。根据功率平衡关系,分别列出馈线 1、馈线 2 和变流器在不同状态下的功率流动模式,如表 2 所示。

表 2 不同运行状态下的功率平衡关系

Table 2 The power balance relationship under different modes

运行状态	馈线 1	馈线 2	变流器
故障前	提供有功、无功功率	断开	提供无功功率
故障中	断开	断开	提供有功、无功功率
故障后	断开	提供有功、无功功率	提供无功功率

### 1.3 基于 VSG 的并联变流器端口电压控制策略

柔性切换开关的总体控制策略如图 3 所示。并联电压型变流器采用电压电流双环控制方式,其中电压环指令值由 VSG 控制模块和预同步控制模块得到。VSG 控制模块结合电压电流双闭环控制器,产生参考电压,最后通过正弦脉冲宽度调制 (sinusoidal pulse-width modulation, SPWM) 输出信号,实现对变流器的控制。

图 3 中, $U_g$  为变流器并网处电压, $U_{gd}$ 、 $U_{gq}$  分别

为该电压经由  $dq$  变换后的  $d$ 、 $q$  轴分量; $U_s$  为馈线电压, $U_{sd}$ 、 $U_{sq}$  分别为该电压经由  $dq$  变换后的  $d$ 、 $q$  轴分量; $\Delta U_d = U_{gd} - U_{sd}$ ;  $\Delta U_q = U_{gq} - U_{sq}$ ;  $\varepsilon$  为预同步控制模块电压比较系数; $K_w$ 、 $K_Q$  分别为预同步控制环节中有功和无功功率修正比例系数; $P_{mod}$ 、 $Q_{mod}$  分别为修正有功、无功功率; $P_0$ 、 $Q_0$  分别为有功、无功功率指令; $K_v$  为无功-电压下垂系数; $U_{m0}$  为额定电压; $U_m$ 、 $P_m$ 、 $\omega$ 、 $\theta$  分别为 VSG 输出电压幅值、虚拟机械功率、角频率和相位; $U_{ref}$  为 SPWM 的调制电压; $S_1$  为有功修正功率开启信号; $S_2$  为无功修正功率开启信号; $S_3$  为有功功率外环闭锁信号; $S_4$  为无功功率外环闭锁信号; $SW_1$ 、 $SW_2$ 、 $g_{sw}$  分别为 IGCT1、IGCT2、变流器的控制信号; $\omega_0$  为额定角频率; $K_r$  为有功-频率下垂系数; $\Delta P$  为有功-频率下垂控制输出功率偏差值; $J$  为 VSG 虚拟惯量; $D$  为 VSG 虚拟阻尼。

在变流器辅助换流的柔性切换开关中,变流器以并联形式接入交流系统,并对交流侧端口特性进行 VSG 控制。文中采用有功-频率控制以实现一次调频和有功输出控制,并结合转子运动方程,引入虚拟惯量及阻尼系数,如式 (1) 所示。在系统负荷发生变化时,变流器输出频率不会发生突变且频率变化范围较小,确保了系统的稳定运行。

$$\begin{cases} J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_0} - \frac{P_c}{\omega_0} - D\Delta\omega \\ P_m = P_0 + \Delta P = P_0 + \frac{1}{K_r}(\omega_0 - \omega) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 。

无功-电压控制通过模拟同步发电机的无功功率下垂特性,实现对变流器输出无功功率和调节变流器端口电压幅值,具体公式为:

$$U_m = U_{m0} + \Delta U = U_{m0} + \frac{1}{K_v}(Q_0 - Q_c) \quad (2)$$

式中: $\Delta U$  为无功-电压下垂控制输出电压偏差值。

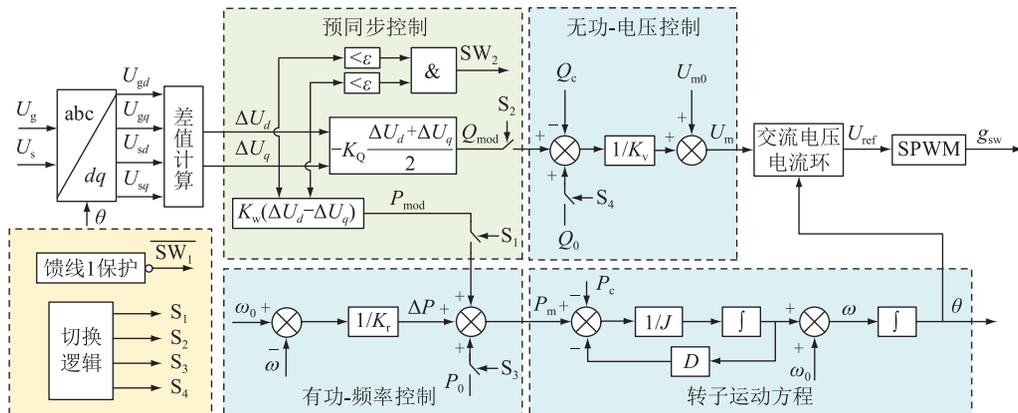


图 3 柔性切换开关的总体控制策略

Fig.3 The overall control strategy of the flexible switch

通过 VSG 控制将并联电压型变流器模拟成具有物理同步发电机惯量、阻尼特性的 VSG,使得故障过程中变流器可作为独立的电压源,同时具备电压和功率支撑能力,以确保柔性切换开关在工作模式切换过程中的稳定运行。

将上述 VSG 控制得到的变流器端口电压幅值和相位进行组合,经坐标变换得到以变流器端口电压相位为参考的  $dq$  旋转坐标系下的电压分量  $U_{gd}$  和  $U_{gq}$ 。为消除  $d, q$  轴变量的相互耦合以及电网电压的波动,在柔性切换开关控制内环采用前馈解耦控制策略,如图 4 所示。其中,  $U_{gd}^*, U_{gq}^*$  分别为变流器并网处电压的  $d, q$  轴分量的参考值;  $C_1$  为直流侧电容;  $I_d^*, I_q^*$  分别为变流器交流侧输入电流的  $d, q$  轴分量的参考值;  $I_d, I_q$  分别为变流器交流侧输入电流的  $d, q$  轴分量;  $L_1$  为滤波电感;  $U_{md}^*, U_{mq}^*$  分别为 SPWM 调制电压的  $d, q$  轴分量。

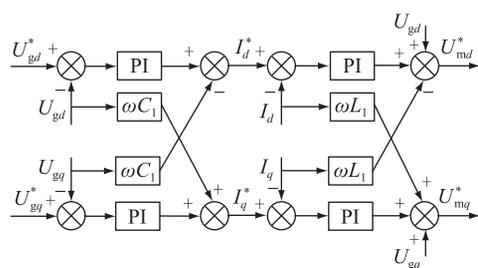


图 4 交流电压电流环控制框图  
Fig.4 The control block of the AC voltage and current loop

## 2 柔性切换开关的切换策略

在 1.2 节所述的 3 种工作模式之间存在 2 段切换过程,如图 5(a)所示。其中切换过程 I 为柔性切换开关将馈线 1 切除到变流器开始独立提供负载功率之间的暂态过程,切换过程 II 为变流器经过预同步控制满足并网条件后与馈线 2 并网的暂态过程。图 5(b)为柔性切换开关在进行馈线切换时的切换逻辑,其中低电平表示闭锁该控制环节,高电平表示开启该控制环节。

### 2.1 切除故障馈线过程

故障发生前,变流器处于空载并网状态,不提供有功功率,交流母线上负载功率仅由馈线 1 提供。因此在功率控制环节对变流器输出功率进行跟踪,设定有功功率指令为 0,按照需求设定无功功率指令,此时预同步控制环节闭锁,即图 3 中  $S_1$  和  $S_2$  对应开关断开,  $S_3$  和  $S_4$  对应开关闭合。

柔性切换开关切除馈线 1 后,变流器进入独立供电运行模式,其输出功率由负载决定,有功功率、

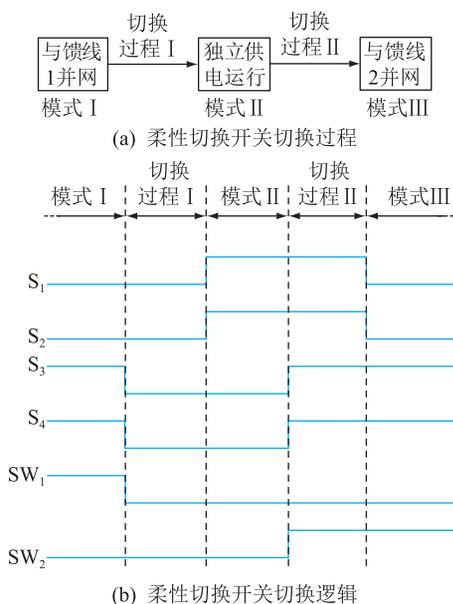


图 5 柔性切换开关切换过程及逻辑

Fig.5 The switching process and logic of the flexible switch

无功功率控制环节闭锁,预同步控制环节保持闭锁,即图 3 中  $S_1$ — $S_4$  对应开关均断开。

### 2.2 预同步并网过程

变流器独立供电一段时间后,柔性切换开关启动预同步控制,对变流器输出电压幅值、频率和相位进行修正,此时功率控制环节仍处于闭锁状态,即图 3 中  $S_1$  和  $S_2$  对应开关闭合,  $S_3$  和  $S_4$  对应开关断开。

确保馈线电压  $U_s$  与并联电压型变流器并网处电压  $U_g$  的同步是实现变流器快速并网的核心。现有预同步控制大多采用对多电压进行锁相的方法,但该方法运算量大且控制结构复杂,预同步速度和精度受到各锁相环互相干扰。针对上述问题,文中采用一种无锁相环的预同步控制方法,以 VSG 生成的角度作为  $dq$  旋转坐标轴的参考相位,并在此基础上引入修正有功功率,缩短并网所需时间。当两侧电压不满足合闸条件时,引入修正有功功率  $P_{mod}$  和修正无功功率  $Q_{mod}$  对变流器输出电压的幅值、频率和相位进行修正,其表达式如式(3)、式(4)所示。

$$P_{mod} = K_w (\Delta U_d - \Delta U_q) \quad (3)$$

$$Q_{mod} = -K_Q \frac{\Delta U_d + \Delta U_q}{2} \quad (4)$$

具体预同步过程为:以 VSG 输出电压相位为坐标变换基准角,分别对 IGCT 两侧电压  $U_g$  和  $U_s$  进行坐标变换,得到  $U_g$  在  $d, q$  轴上的分量  $U_{gd}$  和  $U_{gq}$ ,  $U_s$  在  $d, q$  轴上的分量  $U_{sd}$  和  $U_{sq}$ 。当两侧电压相位不相等,如  $U_g$  超前于  $U_s$  时,可得  $\Delta U_d < 0$  且  $\Delta U_q > 0$ ,两者

差值小于0,即 $P_{\text{mod}} < 0$ 。通过VSG控制中的有功-频率控制环节降低 $U_g$ 频率来对变流器交流侧输出电压相位进行修正,直到相位关系满足合闸条件。当两侧电压幅值不相等时,如 $U_g > U_s$ ,则 $\Delta U_d > 0$ 且 $\Delta U_q > 0$ ,两者平均值大于0,得到 $Q_{\text{mod}} < 0$ 。通过引入该无功功率,结合VSG控制中的无功-电压控制环节减小 $U_g$ 幅值,直到幅值关系满足合闸条件。

经过上述预同步过程,当变流器输出电压与馈线2的电压幅值、相位、频率均满足合闸条件时,IGCT2导通,实现并网,变流器进入空载并网运行模式。过程中为抑制 $q$ 轴电流波动,在并网后的一段时间内预同步控制环节持续工作,同时启动功率外环,即图3中 $S_1$ — $S_4$ 对应开关均闭合。

待并网稳定后,闭锁预同步控制环节,图3中 $S_1$ 和 $S_2$ 对应开关断开, $S_3$ 和 $S_4$ 对应开关闭合,VSG过渡到空载并网运行状态,负载功率由馈线2提供,最终完成馈线1向馈线2的柔性切换。

### 3 实验验证

为验证所提拓扑及控制策略的正确性,文中对所提拓扑及控制系统的模型进行RT-Lab控制在环实验。实验平台由基于TMS320F28335的主控板、电脑、RT-Lab仿真器与示波器构成。其中主控板负责根据控制策略生成SPWM信号;RT-Lab负责主电路仿真,并通过IO接口输出电压电流模拟信号,以用于信号反馈与示波器观察。实验参数如下:线电压 $U_g$ 为10 kV,相电压 $U_c$ 为220 V,直流侧电压 $U_{\text{dc}}$ 为700 V,负载功率为100 kW,滤波电感 $L_1$ 为3 mH,直流侧电容 $C_1$ 为75 mF,开关频率为10 kHz。

为验证控制策略的可行性,设置馈线1在2 s时发生故障,3 ms后IGCT1切除故障,变流器进入独立运行模式。

图6为所提拓扑在切除故障过程、变流器独立供电运行模式、变流器预同步并网过程及并网后稳定运行模式的负载线电压 $u_{gAB}$ 、负载a相交流电流 $i_{La}$ 与变流器输出a相电流 $i_a$ 的实验波形。可以看出,在切除故障时,母线电压在瞬间波动后迅速稳定,负载电流未有明显波动,变流器则迅速输出有功电流;在变流器独立供电运行模式下, $u_{gAB}$ 稳定为10 kV, $i_{La}$ 稳定为7 A, $i_a$ 稳定为190 A;在并网过程中,变流器未产生较大的冲击电流,说明所提控制策略实现了母线与电网的柔性并网;在并网后稳定运行模式下, $i_a$ 稳定为0,说明控制策略能够灵活调控变流器的功率。

图7为所提拓扑采用不同预同步控制策略进行

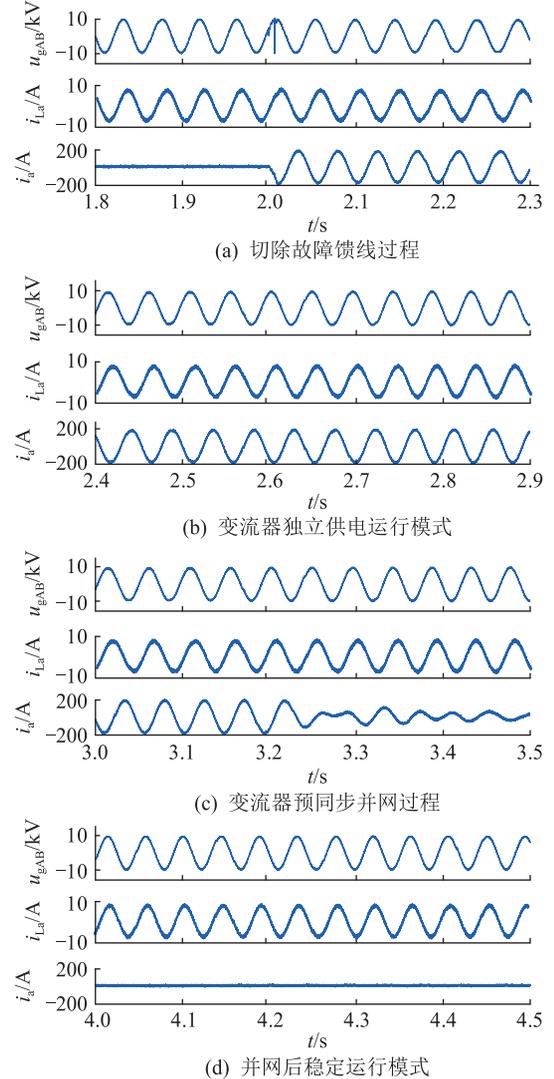


图6 各过程电压电流实验波形

Fig.6 Voltage and current waveforms in each process

馈线柔性切换全过程的负载线电压 $u_{gAB}$ 、直流侧电压 $U_{\text{dc}}$ 、负载a相交流电流 $i_{La}$ 与变流器输出a相电流 $i_a$ 的实验波形,其中图7(a)采用改进前预同步控制策略,图7(b)采用改进后预同步控制策略。改进前预同步控制采用对多电压进行锁相的方法,对电网依赖性高、运算量大且控制结构复杂。对比两幅图可以看出,采用改进前控制策略在并网时会产生较大的冲击电流,而采用改进后的预同步控制策略,母线负载电压在整体运行过程中并未有明显变化,电流也无明显变化,说明所提拓扑及其控制策略能够在馈线切换期间对母线的电压支撑功能。在独立运行期间,变流器对母线提供功率,直流侧电压下降但差值不大,说明变流器超级电容能在故障隔离至并网期间向母线负载提供稳定的有功功率。所提拓扑在1 s左右实现预同步并网,说明了所提控制策略的正确性。

上述实验表明,柔性切换开关拓扑能在文中所

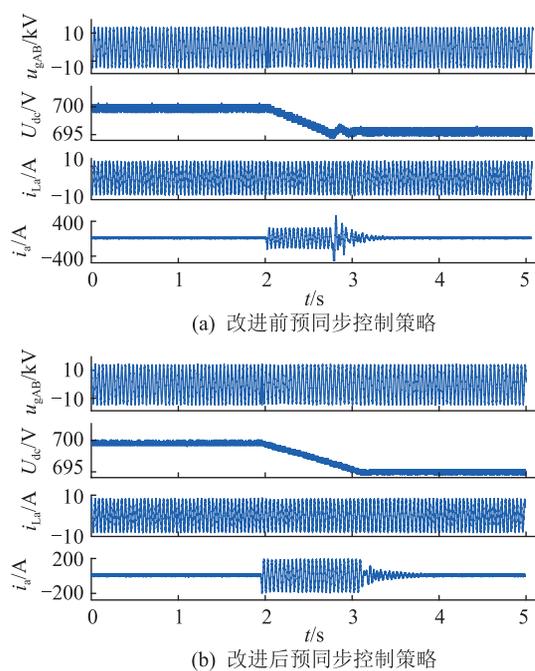


图7 改进前后整体运行的电压电流实验波形

Fig.7 Experimental waveforms of voltage and current for overall operation before and after improvement

提控制策略下稳定运行,且能实现馈线间的柔性切换与母线的电压支撑功能,与理论分析一致。

#### 4 结语

文中提出了一种基于并联电压型变流器与IGCT相配合的柔性切换开关拓扑,该拓扑具有器件使用量少、控制简单、效率高的优点。文中详细阐述了柔性切换开关在应对馈线故障时的切换逻辑及不同运行状态下的控制策略。以2组馈线为例,通过基于RT-Lab的控制在线实验验证了所提拓扑及其控制策略在故障隔离后具有功率支撑的优异表现,且经由预同步控制后,变流器与馈线2并网的过程中不会产生冲击电流。该拓扑及其控制策略的应用场景不限于文中所述的双馈线系统,在多馈线接入的配电网系统中同样具有良好的适用性。文中所提柔性切换开关也适用于对供电可靠性和成本要求高的配电网系统。

#### 致谢

本文得到国网湖北省电力有限公司科学技术项目(52153820000H)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

[1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):171-191.  
ZHUO Zhenyu,ZHANG Ning,XIE Xiaorong,et al. Key technologies and developing challenges of power system with high pro-

portion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(9):171-191.  
[2] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术,2021,47(9):3021-3035.  
DONG Xuzhu,HUA Zhuhu,SHANG Lei,et al. Morphological-characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering,2021,47(9):3021-3035.  
[3] 任冲,柯贤波,王吉利,等. 高比例新能源电网新能源功率优化分配方法[J]. 电力工程技术,2022,41(3):110-117.  
REN Chong,KE Xianbo,WANG Jili,et al. New energy power optimal distribution method for high proportion new energy power grid[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(3):110-117.  
[4] 李骁,赵曦,刘志美,等. 含电动汽车充电的配电网运行可靠性评估算法[J]. 电气自动化,2021,43(5):7-8,94.  
LI Xiao,ZHAO Xi,LIU Zhimei,et al. Operation reliability evaluation algorithm of distribution network with electric vehicle charging[J]. Electrical Automation,2021,43(5):7-8,94.  
[5] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.  
ZHANG Zhigang,KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(8):2806-2819.  
[6] 叶琳浩,刘泽槐,张勇军,等. 智能用电技术背景下的配电网运行规划研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):154-163.  
YE Linhao,LIU Zehuai,ZHANG Yongjun,et al. Review on operation and planning of distribution network in background of smart power utilization technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(5):154-163.  
[7] 田野,朱义东,刘一涛,等. 配电网运行情况分析及智能运维决策生成研究[J]. 供用电,2021,38(2):26-32.  
TIAN Ye,ZHU Yidong,LIU Yitao,et al. Research on distribution network operation analysis and intelligent maintenance decision generation[J]. Distribution & Utilization,2021,38(2):26-32.  
[8] 白浩,袁智勇,周长城,等. 计及新能源波动与相关性的配电网最大供电能力调度方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(8):66-73.  
BAI Hao,YUAN Zhiyong,ZHOU Changcheng,et al. Dispatching method of maximum power supply capacity of a power distributed network considering fluctuation and correlation of renewable energy[J]. Power System Protection and Control,2021,49(8):66-73.  
[9] 张勇军,刘子文,邓丰强. 柔性互联配电网研究现状综述及其发展探索[J]. 广东电力,2020,33(12):3-13.  
ZHANG Yongjun,LIU Ziwen,DENG Fengqiang. Review on research status and development of flexible interconnected distribution networks[J]. Guangdong Electric Power,2020,33(12):3-13.

- [10] 秦红霞,王成山,刘树,等. 智能微网与柔性配网相关技术探讨[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(20):17-23.  
QIN Hongxia, WANG Chengshan, LIU Shu, et al. Discussion on the technology of intelligent micro-grid and flexible distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20):17-23.
- [11] 董旭柱,刘志文,李鹏,等. 基于多端柔性多状态开关的智能配电网调控技术[J]. 中国电机工程学报,2018,38(S1):86-92.  
DONG Xuzhu, LIU Zhiwen, LI Peng, et al. Intelligent distribution network control technology based on multi-terminal flexible distribution switch [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1):86-92.
- [12] 贾冠龙,陈敏,赵斌,等. 柔性多状态开关在智能配电网中的应用[J]. 电工技术学报,2019,34(8):1760-1768.  
JIA Guanlong, CHEN Min, ZHAO Bin, et al. Application of flexible multi-state switch in intelligent distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8):1760-1768.
- [13] 赵国鹏,刘思远,周昕炜,等. 基于柔性多状态开关的配电网电压波动平抑策略[J]. 高电压技术,2020,46(4):1152-1160.  
ZHAO Guopeng, LIU Siyuan, ZHUO Xinwei, et al. Voltage fluctuation suppression strategy based on the flexible multi-state switch in distribution network [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4):1152-1160.
- [14] 孙峰洲,马骏超,于森,等. 含多端柔性多状态开关的主动配电网日前-日内协调能量管理方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(3):778-790.  
SUN Fengzhou, MA Junchao, YU Miao, et al. A day-ahead and intraday coordinated energy management method for active distribution networks based on multi-terminal flexible distribution switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3):778-790.
- [15] 张国荣,彭勃,朱一鸣,等. 馈线失电情况下基于柔性多状态开关的供电恢复策略[J]. 高电压技术,2020,46(8):2723-2731.  
ZHANG Guorong, PENG Bo, ZHU Yiming, et al. Power supply restoration strategy based on flexible multi-state switch in case of loss of feeder power[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8):2723-2731.
- [16] 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, LYU 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.
- [17] 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.
- [18] AITHAL A, LI G, WU J Z. Grid side unbalanced fault detection using soft open point in an electrical distribution network [J]. Energy Procedia, 2017, 105:2859-2864.
- [19] AITHAL A, LI G, WU J Z, et al. Performance of an electrical distribution network with soft open point during a grid side AC fault [J]. Applied Energy, 2018, 227:262-272.
- [20] 曾永浩,叶家雄,潘志图,等. 含多端柔性多状态开关的主动配电网动态潮流[J]. 广东电力,2020,33(5):60-67.  
ZENG Yonghao, YE Jiaxiong, PAN Zhitu, et al. Dynamic power flow analysis of active distribution network with multi-terminal flexible distribution switch [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(5):60-67.
- [21] 杨欢,蔡云旖,屈子森,等. 配电网柔性开关设备关键技术及其发展趋势[J]. 电力系统自动化,2018,42(7):153-165.  
YANG Huan, CAI Yunyi, QU Zisen, et al. Key techniques and development trend of soft open point for distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7):153-165.
- [22] 蔡云旖,屈子森,杨欢,等. 柔性多状态开关改进型下垂控制策略[J]. 电网技术,2019,43(7):2488-2497.  
CAI Yunyi, QU Zisen, YANG Huan, et al. Research on improved droop control strategy for soft open point [J]. Power System Technology, 2019, 43(7):2488-2497.
- [23] 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.
- [24] 何伟,熊俊杰,赵伟哲,等. 一种虚拟同步发电机的附加阻尼控制策略研究[J]. 电气传动,2022,52(2):18-24.  
HE Wei, XIONG Junjie, ZHAO Weizhe, et al. Research on an additional damping control strategy for virtual synchronous generator [J]. Electric Drive, 2022, 52(2):18-24.

## 作者简介:



方仍存

方仍存(1980),男,博士,高级工程师,从事配电网规划、能源经济分析工作(E-mail: eptrifrc@163.com);

雷何(1985),男,博士,高级工程师,从事配电网规划、柔性互联技术工作;

杨东俊(1975),男,博士,研究员级高级工程师,从事电网规划、电力系统稳定控制技术工作。

## Localization for MMC submodule open-circuit fault based on Pauta criterion

WANG Bao'an, ZHANG Hanlu, DENG Fujin

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The modular multilevel converter (MMC) is widely used in the field of high-voltage and high-power transmission due to its advantage of modular structure. As a large number of submodules (SM) are contained in the MMC, the switch failure of SM is one of the key issues affecting the reliability of MMC. The switch open-circuit fault is usually hard to be detected immediately, which threatens the normal operation of the system. A SM open-circuit fault localization method based on Pauta criterion is proposed in this paper. Firstly, the open-circuit fault characteristics of SM are analyzed in this paper. The SM open-circuit fault causes the abnormal changes of the SM capacitor voltage, which can be judged by the Pauta criterion. Then, a confidence interval is constructed by the average SM capacitor voltage and three times of the standard deviation of SM capacitor voltages in an arm. The SM open-circuit fault can be located through judging whether the SM capacitor voltage exceeds the confidence interval or not for a certain time. The proposed method does not require additional sensors, creation of accurate mathematical models and manual setting of empirical thresholds, and its algorithm is quite simple. Finally, a three-phase MMC is simulated with PSCAD/EMTDC and a single-phase MMC prototype is built in the laboratory to verify the proposed method. The simulation and experimental results both confirm that the proposed Pauta criterion based SM open-circuit fault localization method can locate the SM open-circuit faults effectively and quickly.

**Keywords:** modular multilevel converter (MMC); submodule (SM) fault; insulated gate bipolar transistor (IGBT) open-circuit fault; fault localization; Pauta criterion; capacitor voltage

(编辑 方晶)

(上接第 49 页)

## A converter-assisting flexible switch topology and its control strategy

FANG Rengcun<sup>1</sup>, LEI He<sup>1</sup>, YANG Dongjun<sup>1</sup>, ZHUANG Kaixun<sup>2</sup>, ZHA Xiaoming<sup>2</sup>, SUN Jianjun<sup>2</sup>

(1. Hydrothermal Power Resource Optimization and Simulation Laboratory (State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Economic and Technical Research Institute), Wuhan 430077, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The rapid development of new energy in the distribution network increases its flexibility while making it more complicated to operate and manage the network. For this reason, a novel flexible switch, which is composed of integrated gate-commutated thyristors (IGCT) and parallel voltage converters, is proposed in this paper. Applying virtual synchronous generator (VSG) control on the parallel voltage converter ensures smoothness and steadiness while switching from one feeder to another. Firstly, the proposed flexible switch is compared with the flexible multi-state switch and the mechanical switch on their main characteristics. Then, the operating features of the flexible switch before, during, and after feeder fault are analyzed, as well as its switching logic. Finally, the switching process between different feeders is simulated on a control in-the-loop experiment based on RT-Lab. The voltage and current waveforms are obtained under different operating modes and during flexible switching. The experiment results show that the flexible switch has short-term voltage support capability and does not generate voltage and current impulses during the switching process.

**Keywords:** flexible switching; integrated gate-commutated thyristor (IGCT); virtual synchronous generator (VSG); voltage support; pre-synchronization grid-connection; flexible grid-connection

(编辑 陆海霞)