



混合动力牵引系统模式开关失效的诊断及保护研究

蒋奉兵, 李学明, 饶艺伟, 董康泽, 陈志博
(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 针对混合动力牵引系统的模式转换开关在极端工况下失效引发的安全隐患, 文章首先分析了该开关的结构原理与失效机制; 其次深入研究了模式转换开关在不同失效状态下的故障特征及其对系统安全的影响, 并提出一套保障混合动力牵引系统安全运行的故障诊断与保护方法; 最后, 通过仿真验证了该方法的准确性与有效性。文章所提方法可为后续混合动力牵引系统的设计提供参考。

关键词: 牵引系统; 模式配置; 故障诊断; 极端工况失效; 混合动力; 电力机车

中图分类号: U264.2*32

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)05-0190-08

0 引言

鉴于不同国家或同一国家不同地区(尤其是欧美)的轨道交通线路供电制式存在差异, 为使列车适配多种供电制式, 主流的解决方案是采用混合动力牵引系统^[1-3]。混合动力牵引系统具有适用性强、经济性良好的优势, 可有效满足跨区域、跨国运输等需求, 因此具有广阔的应用前景^[4-5]。混合动力牵引系统通常在主电路中设置模式转换开关, 以满足不同供电制式的使用条件。若模式转换开关出现异常, 且未能被及时诊断与保护, 则可能对列车运行安全造成严重影响。因此, 本文将针对混合动力牵引系统在不同供电制式下的模式开关配置异常问题展开危害分析, 研究并探讨开关配置异常时的故障特征, 同时根据模式开关的不同配置失效情况, 提出相应的故障诊断与保护方法, 以保障混合动力牵引系统的安全运行; 最后, 将通过仿真验证所提方法的有效性。

1 混合动力牵引系统主电路

欧洲轨道交通干线铁路供电制式多样, 欧洲西部、

南部和东部普遍采用DC 1.5 kV和DC 3 kV供电, 英国南部采用DC 750 V第三轨供电, 而欧洲中部采用AC 15 kV/16.7 Hz供电; 此外, 新建电气化铁路多采用AC 25 kV/50 Hz供电。为保障列车在整个欧洲自由运行, 欧盟颁布的《欧盟铁路信号系统互联互通技术规范》明确规定, 欧洲干线铁路的标准供电制式为AC 25 kV、AC 15 kV、DC 1.5 kV和DC 3 kV^[6-7]。本文针对某典型混合动力牵引系统进行研究分析, 该系统具备AC 25 kV/50 Hz、AC 15 kV/16.7 Hz以及直流供电等模式。

本文研究的混合动力牵引系统的主电路如图1所示。交流电网供电时, 主电路采用“交-直-交”拓扑结构。为同时适用AC 15 kV/16.7 Hz和AC 25 kV/50 Hz两种供电制式, 牵引变压器二次侧绕组设计了分抽头结构, 以保证牵引变压器在两种电源制式下向牵引变流器输入的电压一致; 同时, 设计了不同的漏感值使变流器的四象限脉宽调制(pulse width modulation, PWM)控制电路在AC 15 kV、AC 25 kV供电制式下保持较低的电流谐波。牵引变流器的输入侧设有切换开关, 用于匹配牵引变压器分抽头的输出; 中间环节的二次谐振电路同样设有切换开关, 用于匹配两种供电制式下不同的二次谐振频率。直流供电时, 主电路

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(N2024J032-B(JB))

通信作者: 董康泽, 男, 博士, 主要从事轨道交通车载动力电池机理研究与应用工作; E-mail: dongkangze@csrzc.com

引用格式: 蒋奉兵, 李学明, 饶艺伟, 等. 混合动力牵引系统模式开关失效的诊断及保护研究[J]. 机车电传动, 2025(5): 190-197.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.05.021.

Citation: JIANG Fengbing, LI Xueming, RAO Yiwei, et al. Diagnosis and protection of mode configuration switch failures in hybrid-power traction system[J]. Electric drive for locomotives, 2025(5): 190-197.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.05.021.

采用“直-交”结构, 变流器经过预充电回路后, 可根据直流电源的电压等级及系统设计的最大功率目标等确定具体的供电方式, 如通过四象限模块二极管整流

直接为中间回路供电, 或利用四象限模块进行升压斩波供电 (斩波电抗器为牵引变压器二次侧绕组, 斩波开关器件为四象限模块的 IGBT 元件)。

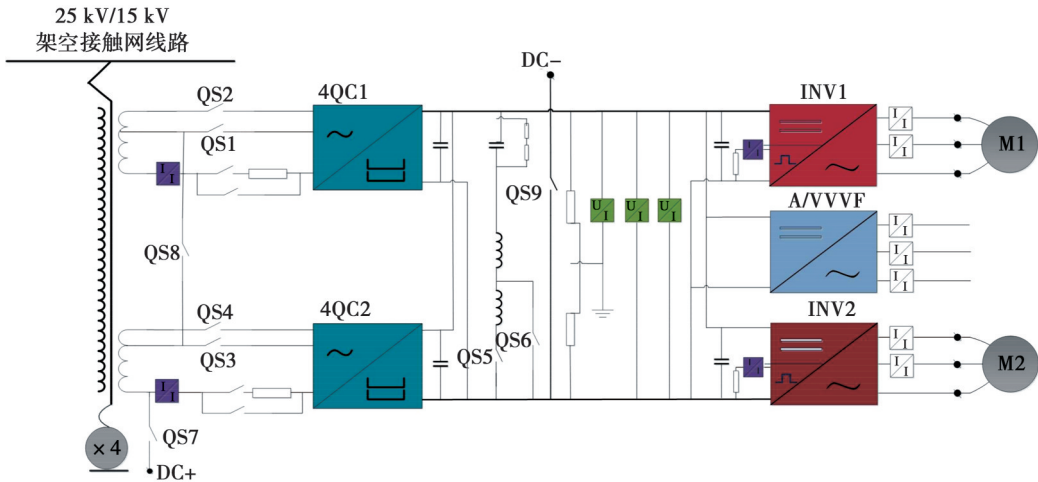


图1 混合动力牵引系统主电路
Fig. 1 Main circuit of hybrid-power traction system

不同供电制式之间的切换通过多级电动模式转换开关实现, 各模式下的开关配置情况如表1所示。表1中, 主触头的标注“√”与辅助触头的标注“1”表示

在该供电制式下对应的主触头与辅助触头闭合, “×”与“0”表示断开。

表1 不同模式下的触头隔离接触

Table 1 Contact isolation under different modes

供电制式	主触头										辅助触头		
	QS1	QS2	QS3	QS4	QS5	QS6	QS7	QS8	QS9		FZ1	FZ2	FZ3
25 kV/50 Hz	√	×	√	×	×	√	×	×	×		1	0	0
15 kV/16.7 Hz	×	√	×	√	√	×	×	×	×		0	1	0
直流	×	×	×	×	×	×	√	√	√		0	0	1

2 模式转换开关失效分析

2.1 模式转换开关结构原理

为节约变流器内部空间、减小质量, 混合动力牵引系统通常采用多级开关组件来将内部多个配置开关集成为一体, 如图2所示。开关组件的主体结构由主触头接点部位及主触头凸轮、辅助触头接点部位及辅助触头凸轮、电机、齿轮组件等构成, 开关动作时, 电

机通过齿轮组驱动凸轮转动, 凸轮上的凹凸结构使主/辅助触头接点在特定角度处于规定的闭合状态 (当凸轮转至有凹槽部位时, 主触头接点为闭合状态; 转至其他部位时, 主触头接点为断开状态)。

为提高操作可靠性, 设计时将主触头凸轮与辅助触头凸轮同轴转动, 中间无任何转接传动部件; 同时, 主触头凸轮与转动轴采用方孔-方杆配合, 辅助触头凸轮与转动轴采用键-键槽配合, 以防止凸轮与转动轴之间发生相对转动。但在极端情况下 (如凸轮转动轴断裂、接点部件接触不良及受到严重外力撞击等), 仍可能出现以下失效情况:

- ①辅助触头接点状态异常;
- ②辅助触头接点状态正常, 主触头接点本应闭合但实际为断开状态 (主触头卡分故障);
- ③辅助触头接点状态正常, 主触头接点本应断开但实际为闭合状态 (主触头卡合故障)。

2.2 模式转换开关失效危害分析

2.2.1 辅助触头接点状态异常

基于模式转换开关的结构原理^[8], 控制系统通过采集辅助触头接点的状态来识别模式转换开关的真实配

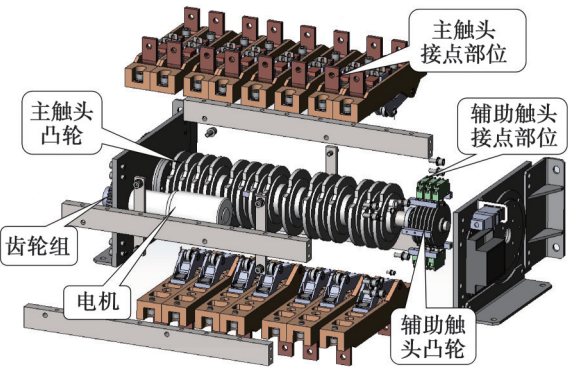


图2 多级电动隔离开关结构
Fig. 2 Structure of multi-stage electric disconnecter

置状态,并将给定的模式命令与辅助触点状态进行对比。若两者不一致,则判定为模式配置异常,此时混合动力牵引系统将禁止高压设备投入运行,系统整体处于安全状态。因此,模式转换开关辅助触点状态失效不会造成严重的安全风险。

2.2.2 主触头接点状态异常

主触头接点状态异常可分为主触头卡分故障与主触头卡合故障。当主触头接点状态出现异常,同时辅助触头接点状态也异常时,控制系统可有效诊断出故障,不会产生严重的安全风险;当主触头接点状态出现异常,但辅助触头接点状态正常时,控制系统将无法及时诊断出故障,如果此时高压设备投入运行将产生严重安全隐患,因此需对此进行深入研究。

3 模式转换开关失效诊断

考虑到 AC 15 kV/16.7 Hz 和 AC 25 kV/50 Hz 两种供电制式的主电路结构对称,本文仅对 AC 25 kV/50 Hz 供电与直流供电两种制式下配置开关主触头的异常状态进行分析,AC 15 kV/16.7 Hz 制式的相关结论可参考 AC 25 kV/50 Hz 的分析得出。

3.1 AC 25 kV/50 Hz 供电制式下开关失效

由图 1 可知,在 AC 25 kV/50 Hz 供电制式下,

QS7、QS8 与外部直流电路连接。由于外部直流电源通常会设置主断路器或接触器进行隔离,因此仅 QS7、QS8 出现卡分或卡合故障不会对电路造成任何影响,本文也不针对 QS7、QS8 故障展开具体分析。

3.1.1 QS1 或 QS3 卡分故障(S1 类故障)

QS1 与 QS3 分别为四象限整流模块 1 和 2 的输入隔离开关, QS1 或 QS3 卡分故障属于同一类故障。以 QS1 卡分故障为例,其等效主电路如图 3 所示。由于 QS1 处于卡分状态,四象限整流模块 1 的输入回路开路,在系统完成预充电且短接接触器闭合的工作状态下,四象限整流模块 1 的输入电流为 0。正常情况下,四象限整流模块 1 和 2 的输入回路应具有一致的电流响应特性。基于两重四象限整流模块输入电流的对比关系,可构建 QS1 或 QS3 卡分故障的判别准则。该故障诊断的实现方法为:

①当两重充电接触器闭合时,在预设时间 T 内,本重四象限整流模块的电流峰值小于阈值 T_{h_lth1} , 它重四象限整流模块的电流峰值大于阈值 T_{h_lth1} 。

②当两重短接接触器闭合时,在预设时间 T 内,本重四象限整流模块的电流峰值小于阈值 T_{h_lth2} , 它重四象限整流模块的电流峰值大于阈值 T_{h_lth2} 。

当①、②条件均成立时,即可判定为 S1 类故障,此时执行隔离本重四象限整流模块的操作,牵引变流器降功率运行。

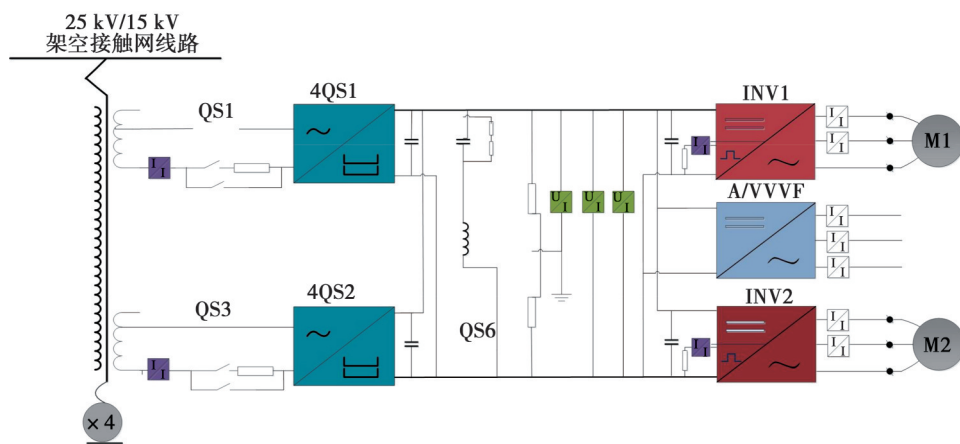


图 3 S1 类故障等效主电路

Fig. 3 Equivalent main circuit for S1 faults

3.1.2 QS2 或 QS4 卡合故障(S2 类故障)

QS2 或 QS4 卡合故障属于同一类故障。以 QS2 卡合故障为例,其典型特征为牵引变压器二次侧短路,该故障的等效主电路如图 4 所示。QS2 卡合故障将导致牵引变压器二次侧形成短路回路,一次侧电流持续异常升高。为实现对该类故障的可靠识别,本文构建了基于一次侧电流滞环比较器与时间窗累计判据的诊断逻辑,其原理如图 5 所示。通过对一次侧电流设置合理的上/下限阈值电流值 I_{th+}/I_{th-} , 同时引入时间窗口 T 、比较器输出累计次数 N 及累计次数阈值 Z , 来识别

QS2 卡合故障进而实现诊断,诊断方法为:

①主断路器已闭合,充电接触器、短接接触器均未闭合。

②设置变压器一次侧电流滞环比较器,当一次侧电流值 I_{net} 大于上限阈值电流值 I_{th+} 时,将比较器输出 T_x 置为 1;当一次侧电流值 I_{net} 小于下限阈值电流值 I_{th-} 时,将比较器输出 T_x 置为 0,当比较器输出变化沿的累计次数满足 $N > Z$ 且同时满足阈值电流判据时,判定 QS2 出现卡合故障。

设一次侧电压为 U_N , 变压器 15 kV 侧绕组的电压

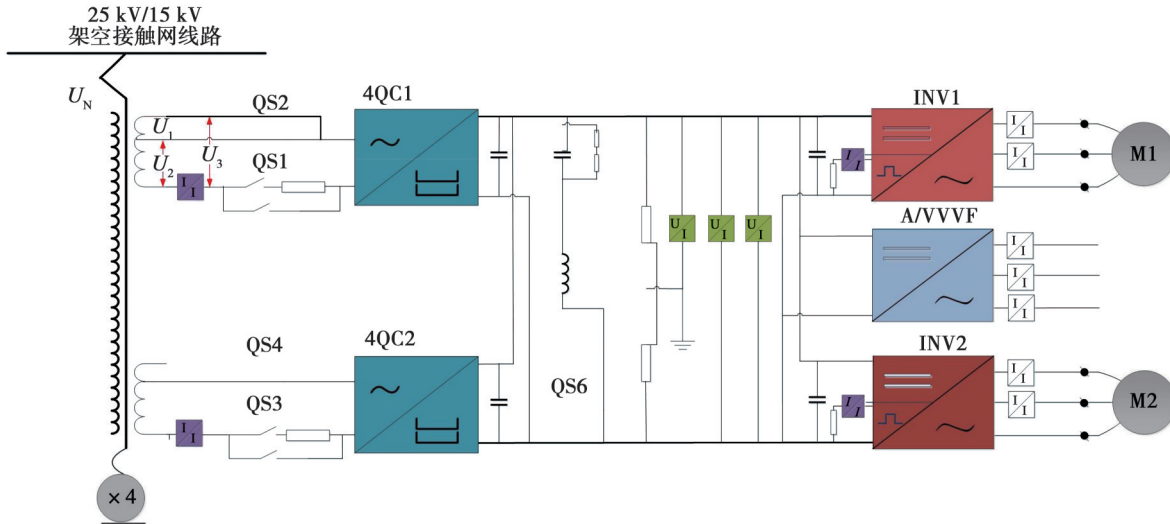


图4 S2类故障主等效电路

Fig. 4 Equivalent main circuit for S2 faults

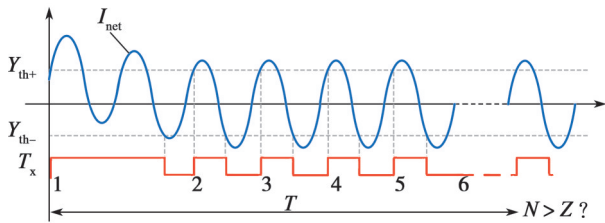


图5 一次侧电流滞环比较原理

Fig. 5 Schematic diagram of primary-side current hysteresis comparison

变比为 n , 15 kV 供电制式下等效漏感为 L_1 , 25 kV 供电制式下等效漏感为 L_2 , 25 kV 供电制式下四象限整流模块的输入电流为 I_3 , 则有公式如下:

$$I_{net} = \frac{I_3}{n} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 + U_2 &= U_3 \\ \frac{U_2}{U_3} &= \frac{15}{25} \\ U_3 &= \frac{U_N}{n} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$U_1 \approx j\omega LI_3 = j(2\pi f)(L_1 - L_2)I_3 \quad (3)$$

式中: f 为频率; ω 为电流角频率。

联立式(1)~式(3)可得

$$I_{net} \approx \frac{2U_N}{5(2\pi f)(L_1 - L_2)n^2} \quad (4)$$

设置 Y_{th+} 、 Y_{th-} 阈值时, 可参照式(4)进行选取。

通过计数器对滞环比较器在预设时间 T 内的输出变化次数进行累计得到 N , 将 N 与预设阈值比较; 若 N 大于该阈值, 则判定当前故障为S2类故障。该故障会影响行车安全, 因此混合动力牵引系统将禁止高压设备投入运行。

3.1.3 QS5卡分或QS6卡合故障(S3类故障)

QS5卡分或QS6卡合故障会导致中间直流电压出现较大波动, 这是因为四象限PWM脉冲整流控制引入

的二倍频分量无法得到有效抑制。

针对该故障, 本文通过检测与判断中间直流电压的特征次谐波分量实现诊断, 具体方法如下:

①通过带通滤波器对中间直流电压 U_d 滤波, 提取50 Hz、100 Hz及16.7 Hz分量, 分别记为 U_{d50} 、 U_{d100} 、 $U_{d16.7}$ 。

②将 U_{d50} 、 U_{d100} 和 $U_{d16.7}$ 分别做绝对值处理后再进行低通滤波, 得到其直流分量 U_{d50_dc} 、 U_{d100_dc} 和 $U_{d16.7_dc}$ 。

③设 $\lambda_1 = \frac{U_{d100_dc}}{U_{d50_dc}}$, $\lambda_2 = \frac{U_{d16.7_dc}}{U_{d50_dc}}$ 。当QS5存在卡分故障时, λ_1 将明显超出正常运用值; 当QS6出现卡合故障时, λ_2 将明显低于正常运用值。通过设置合理阈值 T_{h_Uth1} 与 T_{h_Uth2} 可进行故障诊断, 即 $\lambda_1 > T_{h_Uth1}$ 时, 判定QS5卡分故障; 当 $\lambda_1 < T_{h_Uth2}$ 时, 判定QS6卡合故障。

该故障不会对牵引系统运行造成严重危害, 因此可实时监控中间直流电压波动范围, 当电压处于允许波动区间时维持列车继续运行, 以提高列车的可用性。

3.1.4 QS8卡合故障(S4类故障)

当四象限整流模块1单独启动, 四象限整流模块2仅进行二极管整流时, 分别针对QS8断开与闭合两种情况下的主电路进行分析。当QS8断开时, 其等效电路如图6(a)所示。由图6(a)可知, 无论四象限整流模块1的IGBT中S1a、S2a如何动作, 四象限整流模块2仅通过二极管不可控整流与中间支撑电容形成回路。当四象限整流模块1启动时, 由Boost升压原理可知 $U_d > U_n$ (U_n 为电网电压), 而二极管无法反向导通, 因此四象限整流模块2输入电流 $I_2 \approx 0$ 。当QS8闭合时, 其等效电路如图6(b)所示。由图6(b)可知, 假设四象限整流模块1中IGBT的S2a闭合, 此时 U_n 直接施加于牵引变压器漏感 L_N 并对其进行充电, 电压矢量平衡方程为

$$U_n = L_N \cdot \frac{di_n}{dt} \quad (5)$$

式中: i_n 为四象限整流模块的输入电流。

此时,虽然四象限整流模块2未启动,但受四象限整流模块1中IGBT动作影响,四象限整流模块2的输入电流 $I_2 \gg 0$ 。

根据以上分析得出的诊断方法如下:

- ① 当两重充电接触器闭合时,两重四象限整流模块电流单周期峰值均大于阈值 T_{h_1th1} 。
- ② 当两重短接接触器闭合时,两重四象限整流模块电流单周期峰值均大于阈值 T_{h_1th2} 。
- ③ 当仅四象限整流模块1启动时,对四象限整流模块2输入电流做绝对值处理得到电流绝对值 I_{2_abs} ,并设置电流绝对值异常的判定阈值 K_{th} , $I_{2_abs} > K_{th}$ 时计数1次,若在预设时间 T 内累计计数次数大于预设门限值,则判定故障类型为S4类故障。

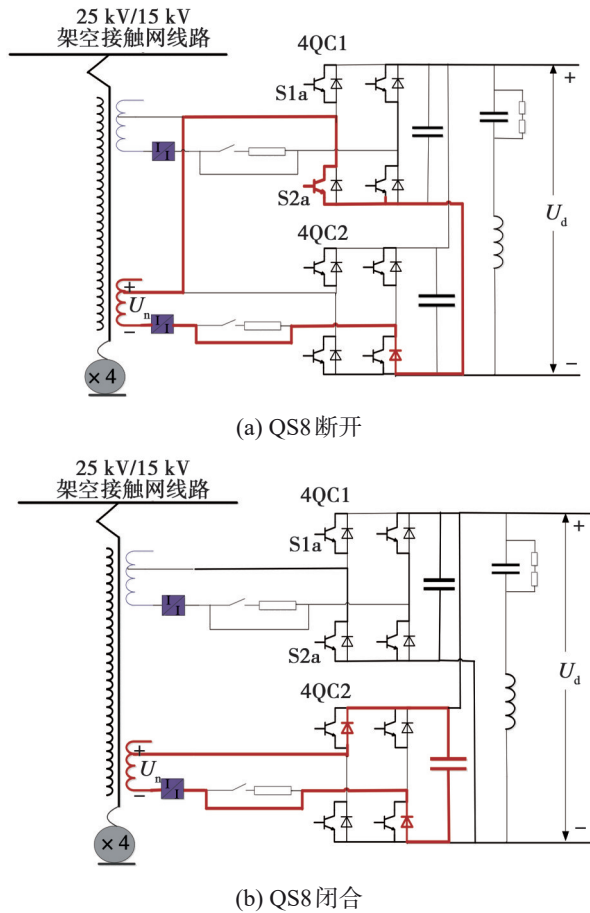


图6 S4类故障等效主电路

Fig. 6 Equivalent main circuit for S4 faults

3.2 直流模式下开关状态异常

3.2.1 QS1、QS2、QS3、QS4卡合故障(K1类故障)

在直流供电制式下, QS7、QS8、QS9闭合,主电路中能量流动路径如图7(a)红色线条所示:直流电源通过牵引变压器两个二次侧绕组串联,经第一重预充电及短接接触器后,再通过四象限整流模块1的二极管不控整流或DC/DC升压斩波来实现为中间直流回路供电。当QS1、QS2、QS3或QS4中任意一个出现卡合故障时,直流电源的能量流动路径将改变。假设QS1卡合,

此时主电路能量流动路径如图7(b)所示:直流电源通过牵引变压器第二个二次侧绕组后,经QS1直接连接四象限整流模块1,为中间直流回路供电,不再经过第一重预充电及短接接触器。此类故障可导致中间直流回路电压异常,从而影响系统保护及控制逻辑。基于该电路特征确定的诊断方法如下:

- ① 计算电压 U_d 达到最大电压所需的理论时间。

典型LRC回路网络方程为

$$E(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (6)$$

式中: $E(t)$ 为直流电源电压; $i(t)$ 为线路电流; L 为变压器等效漏感,其值根据QS1、QS2、QS3、QS4闭合状态选取; C 为中间直流环节电容; R 为变压器等效直流内阻,其值近似取变压器二次侧绕组电阻值。

由电路原理可知,电容电压 U_d 由两部分组成,一部分为直流电源电压,另一部分为符合指数函数规律的余弦振荡电压。设LRC电路的谐振频率为 ω ,当 $\omega t = \pi$ 时 U_d 达到最大值,该最大值通常为直流电源电压的1.5~1.8倍^[9]。

谐振频率 ω 的表达式为

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{C}\right)^2} \quad (7)$$

U_d 达到最大值的理论时间为

$$t_1 = \frac{\pi}{\omega} \quad (8)$$

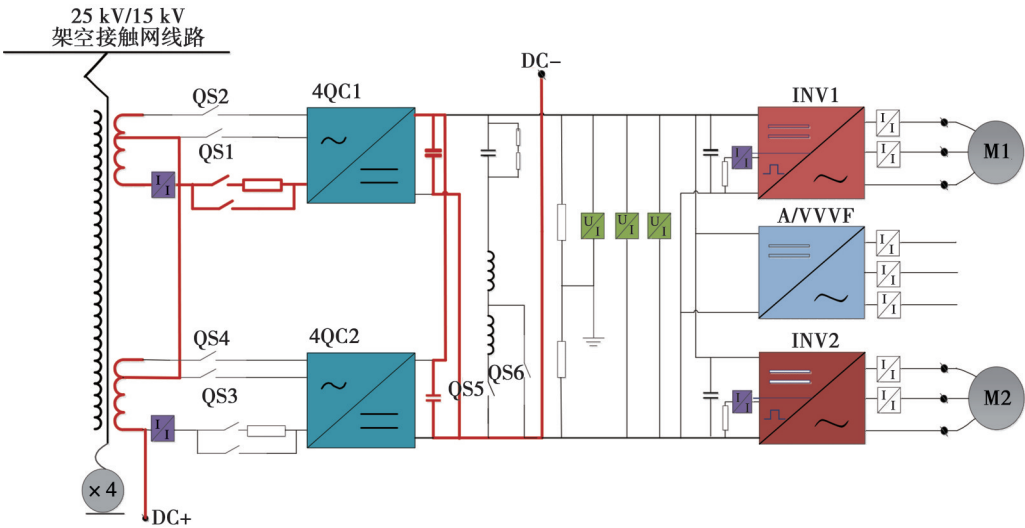
- ② 计算从直流供电模式转换开关闭合开始,在预设时间内中间电压 U_d 达到最大电压的实际所需时间 t_2 ;若 $|t_2 - t_1|$ 小于一定门限值,则判定故障类型为K1类故障。在此类故障条件下,若系统出现严重故障,无法依靠短接接触器实现主动保护,则存在安全风险,需切除对应变流器。

3.2.2 QS5或QS6卡合故障(K2类故障)

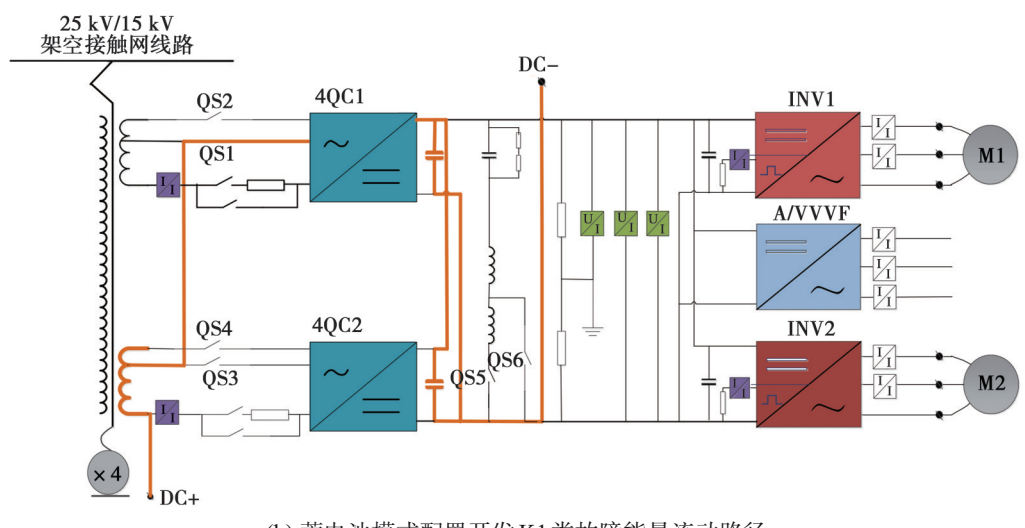
直流供电模式下,由于直流电源无特定次谐波分量,通常不设置LC谐振回路。当QS5或QS6出现卡合故障时,中间直流回路将引入100 Hz或33.4 Hz谐振。此类故障在电压波动允许范围内不会对牵引系统运行造成严重危害,为提升列车可用性,系统可实时监控中间电压波动范围;若电压处于允许波动区间,则维持列车继续运行;若电压波动范围超过设定门限值,则执行牵引封锁保护。

4 仿真实验

基于某典型混合动力牵引系统电路搭建仿真模型,对本文提及的AC 25 kV/50 Hz与直流两种供电制式下模式转换开关的不同失效类型进行仿真验证^[10]。仿真时的主要参数设置如下:25 kV制式下牵引变压器变比 $\eta = 25000 : 2121$,单二次侧绕组漏感 $L_1 = 3.45$ mH;15 kV制式下单二次侧绕组漏感 $L_2 = 7.9$ mH,预充电电阻 R'



(a) 蓄电池模式正常时能量流动路径



(b) 蓄电池模式配置开发K1类故障能量流动路径

图7 K1类故障主电路能量流动对比

Fig. 7 Comparison of energy flow in the main circuit for K1 faults

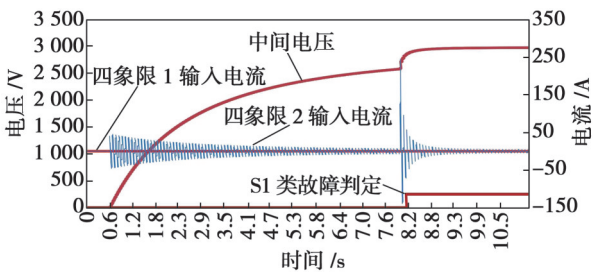
$=65\ \Omega$; 四象限整流后中间电压 $U_d=3\ 600\ \text{V}$, 直流电源电压 $U_{\text{DC}}=950\ \text{V}$ 。

4.1 AC 25 kV/50 Hz 模式

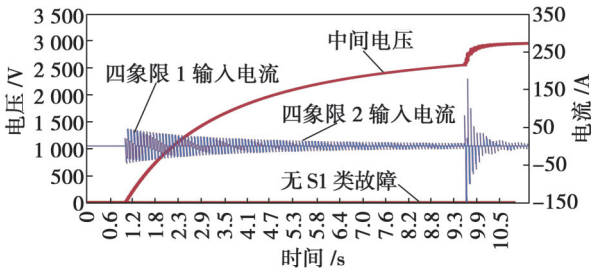
①S1类故障。假设QS1卡分, 预充电与短接接触器闭合过程中的中间电压及四象限整流模块1、2的输入电流波形如图8(a)所示。由图8(a)可见, 四象限整流模块1输入电流始终为0; 正常工况下, 预充电与短接接触器闭合过程如图8(b)所示, 四象限整流模块1、2的输入电流单周期峰值均大于0。

②S2类故障。假设QS2卡合, 主断路器闭合后的网压及一次侧电流波形如图9所示。将 $n=15000:2121$ 、 $L_1=3.45\ \text{mH}$ 、 $L_2=7.9\ \text{mH}$ 代入式(4)可得: $I_{\text{net}}\approx 146\ \text{A}$, $I_{\text{net_max}}\approx 206\ \text{A}$, 可见理论计算结果与仿真结果基本一致。

③S3类故障。分别对中间直流回路有二次谐振回路与无二次谐振回路两种场景进行仿真, 并对结果进行快速傅里叶变换对比分析, 结果如图10所示。结果



(a) S1类故障预充电过程参数波形



(b) 正常工况与充电机参数波形

图8 S1类故障仿真对比分析

Fig. 8 Comparative analysis of S1 fault by simulation

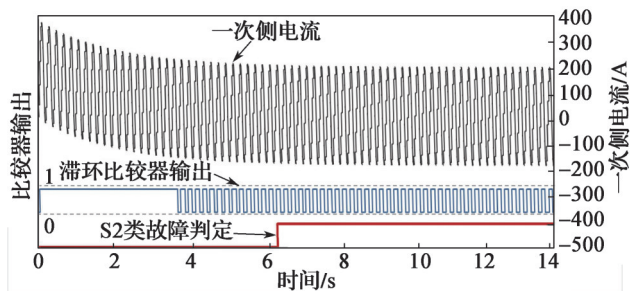
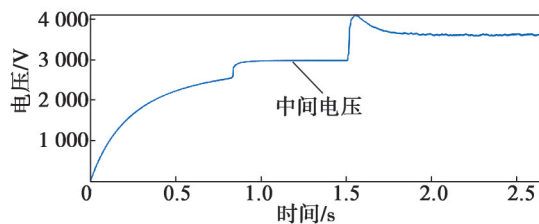


图9 S2类故障仿真结果

Fig. 9 Simulation results of S2 faults

显示, 在无二次谐振回路时, 100 Hz 分量占比远大于正常工况。



(a) 时间-电压响应曲线

Sampling time = 4e-05 s			
Samples per cycle = 500			
DC component = 3558			
Fundamental = 1.257 peak (0.889 rms)			
THD = 1075.34%			
0 Hz (DC):	283024.72%	90.0°	
25 Hz	495.54%	-56.4°	
50 Hz (Fnd):	100.00%	33.5°	
75 Hz	70.16%	237.1°	
100 Hz (h2):	9.21%	-9.6°	
125 Hz	80.94%	212.2°	
150 Hz (h3):	177.48%	192.2°	
175 Hz	329.78%	-24.5°	
200 Hz (h4):	915.23%	268.4°	
225 Hz	108.63%	53.4°	
250 Hz (h5):	37.78%	1.3°	
275 Hz	95.18%	30.0°	
300 Hz (h6):	188.63%	10.0°	
325 Hz	18.68%	-77.2°	
350 Hz (h7):	25.09%	-1.5°	
375 Hz	27.72%	26.4°	
400 Hz (h8):	30.50%	219.6°	
425 Hz (h9):	9.63%	-50.0°	
450 Hz	20.58%	-7.8°	
475 Hz (h10):	11.22%	35.6°	
500 Hz	19.76%	213.1°	
525 Hz	13.71%	-18.3°	
550 Hz (h11):	16.01%	-6.5°	
575 Hz	4.50%	-75.2°	
600 Hz (h12):	199.16%	87.1°	
625 Hz	38.00%	-0.1°	
650 Hz (h13):	11.91%	20.3°	
675 Hz	25.39%	-46.5°	
700 Hz (h14):	215.34%	-64.6°	

(b) 正常工况

Sampling time = 4e-05 s			
Samples per cycle = 500			
DC component = 3623			
Fundamental = 2.714 peak (1.919 rms)			
THD = 496.46%			
0 Hz (DC):	133495.19%	90.0°	
25 Hz	521.89%	28.1°	
50 Hz (Fnd):	100.00%	-38.4°	
75 Hz	43.72%	88.2°	
100 Hz (h2):	418.75%	102.6°	
125 Hz	24.18%	-78.4°	
150 Hz (h3):	22.78%	8.7°	
175 Hz	11.89%	3.8°	
200 Hz (h4):	202.96%	-72.5°	
225 Hz	15.03%	-10.5°	
250 Hz (h5):	15.02%	2.7°	
275 Hz	12.52%	-11.8°	
300 Hz (h6):	56.04%	2.5°	
325 Hz	12.84%	-5.1°	
350 Hz (h7):	9.18%	-1.5°	
375 Hz	11.29%	8.8°	
400 Hz (h8):	6.75%	252.9°	
425 Hz	7.48%	16.8°	
450 Hz (h9):	7.06%	10.1°	
475 Hz	10.98%	16.7°	
500 Hz (h10):	22.89%	182.9°	
525 Hz	6.23%	28.5°	
550 Hz (h11):	7.73%	10.3°	
575 Hz	8.47%	-0.7°	
600 Hz (h12):	89.61%	79.4°	
625 Hz	7.77%	17.8°	
650 Hz (h13):	6.98%	-13.6°	
675 Hz	1.96%	95.9°	
700 Hz (h14):	99.47%	-68.5°	

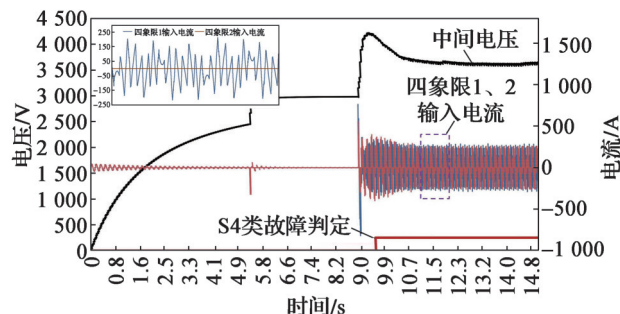
(c) S3类故障

图10 S3类故障中间电压FFT对比

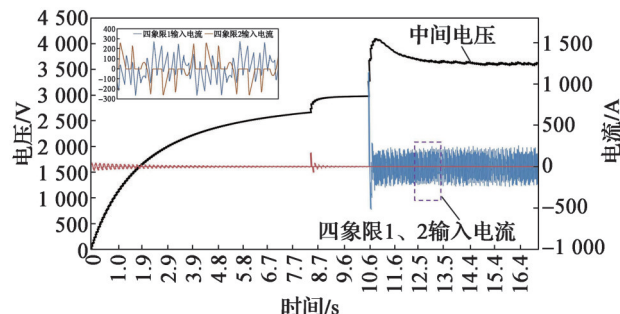
Fig. 10 FFT comparison of intermediate voltage for S3 faults

④S4类故障。当仅启动四象限整流模块1时, 正常工况与QS8卡合(即S4类故障)工况的仿真波形如图11

所示。在正常工况下, 四象限整流模块1启动、四象限整流模块2未启动时, 模块2输入电流为0; 而QS8卡合时, 四象限整流模块2的输入电流不再恒定为0。



(a) 正常工况四象限整流模块1启动



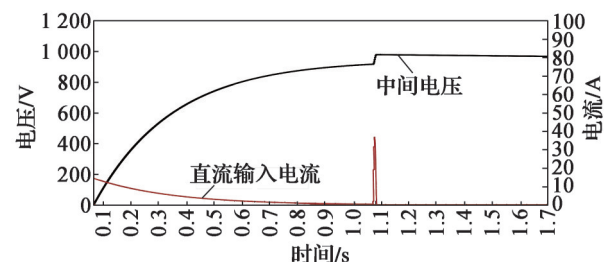
(b) S4类故障四象限整流模块2启动

图11 S4类故障仿真对比

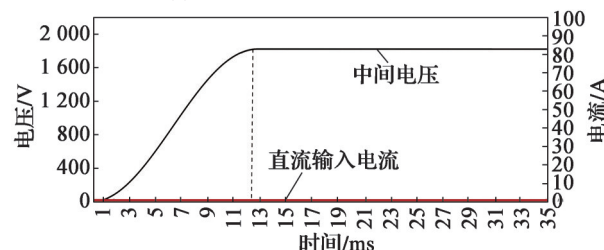
Fig. 11 Comparison of S4 faults by simulation

4.2 直流模式

①K1类故障。在直流供电模式下, 正常预充电与短接接触器闭合过程的仿真波形, 以及发生K1类故障(假设QS1卡合, L 值取3.45 mH, R 值取33.6 m Ω)工况的仿真波形如图12所示。



(a) 直流模式正常工况预充电



(b) 直流模式K1类故障充电

图12 K1类故障仿真对比

Fig. 12 Comparison of K1 fault by simulation

②K2类故障。K2类故障的故障特征与S3类故障类似, 本文不再进行仿真验证。

5 结束语

多级模式转换开关不仅能实现不同供电制式之间的配置切换, 而且能通过集成多个开关, 在质量与体积方面形成显著优势。但是, 在极端失效情况下, 若未能及时诊断与保护, 则可能对牵引系统造成严重的安全风险。为此, 本文针对多级模式转换开关的极端失效情况开展了以下工作:

①基于多级模式转换开关的结构原理, 分析了其可能出现的3类失效情况: 辅助触点状态异常, 辅助触点状态正常、主触头卡分故障, 辅助触点状态正常、主触头卡合故障。

②对3类失效情况进行失效危害分析得知, 当主触头出现卡分或卡合故障, 但辅助触点状态正常时, 系统存在严重安全隐患, 需针对该情况开展深入的诊断与保护研究。

③针对主触头出现卡分或卡合故障但辅助触点状态正常的情况进行故障分类, 深入研究不同故障下牵引系统的故障特征, 并提出对应的保护措施。

④通过仿真验证了本文所提方法的有效性, 该方法可有效规避混合动力牵引系统因极端模式转换开关失效引发的安全风险, 对后续混合动力牵引系统设计具有重要的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 蒋奉兵, 张宾, 李学明, 等. 储能式多流制机车蓄电池对地电压与中间电压关系研究[J]. 机车电传动, 2020(4): 76-80. JIANG Fengbing, ZHANG Bin, LI Xueming, et al. Research on the relationship of multi-current locomotives with energy storage battery voltage to ground and intermediate circuit voltage[J]. Electric drive for locomotives, 2020(4): 76-80.
- [2] HU Haitao, LIU Yunjiang, LI Yong, et al. Traction power

- systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends[J]. Railway engineering science, 2024, 32(1): 1-19.
- [3] HAŁADYN Szymon. The problem of train scheduling in the context of the load on the power supply infrastructure. a case study[J]. Energies, 2021, 14(16): 4781.
- [4] 刘长青, 王雷. 400 km/h 跨国互联互通高速动车组[J]. 机车电传动, 2020(2): 1-6. LIU Changqing, WANG Lei. 400 km/h transnational inter-connection high-speed EMU[J]. Electric drive for locomotives, 2020(2): 1-6.
- [5] 李鹏, 高首聪, 梁兴元. 20E型双流制电力机车电气牵引及控制系统[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(1): 10-16. LI Peng, GAO Shoucong, LIANG Xingyuan. Electric traction and control system of South African 20E dual system electric locomotive[J]. Railway locomotive & car, 2016, 36(1): 10-16.
- [6] BAKRAN M M, 曹霄. 大功率多流制机车牵引变流器的比较[J]. 变流技术与电力牵引, 2006(1): 18-22. BAKRAN M M, CAO Xiao. Comparison of multi-system traction converters for high-power locomotives[J]. Converter technology & electric traction, 2006(1): 18-22.
- [7] DA S B, ERICK M, LADOUX P, et al. Reinforcement of DC electrified railways by a modular battery energy storage system[J]. Electronics, 2024, 13(10): 1933.
- [8] SHI Zhongsheng, DRUZHININ Zumrat. Development of 3-phase fault detection, protection, and automation application with the present of DG in AC power system using GOOSE protocol [J]. Heliyon, 2024, 10(6): e27482.
- [9] 王胜. 串联谐振式高压电容器充电电源研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. WANG Sheng. Research on series resonant high voltage capacitor charging power supply[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [10] ZOU Ziyu, ZHENG Mengfei, LU Qinfen. Modeling and simulation of traction power supply system for high-speed maglev train[J]. World electric vehicle journal, 2022, 13(5): 82.

Diagnosis and protection of mode configuration switch failures in hybrid-power traction system

JIANG Fengbing, LI Xueming, RAO Yiwei, DONG Kangze, CHEN Zhibo

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: This paper addresses safety hazards caused by mode configuration switch failures in hybrid-power traction systems under extreme conditions. It begins by analyzing the structure principle and failure mechanism of this switch type. Their fault characteristics under different failure states and resulting impacts on system safety are then investigated. Based on these results, a set of fault diagnosis and protection methods are devised to ensure the safe operation of hybrid traction systems. The proposed methods are validated through simulation, demonstrating their accuracy and effectiveness and providing a reference for future designs of thus hybrid systems.

Keywords: traction system; mode configuration; fault diagnosis; failure in extreme condition; hybrid-power; electric locomotive