



西南交通大学-  
牵引逆变器开路故障诊断算法及低转矩波动容错策略

## 用户与研究成果简介：

西南交通大学刘志刚教授的科研团队提出了一种基于电压残差的牵引逆变器 IGBT 开路故障诊断算法以及相应的低转矩波动容错策略。诊断算法通过观测得到感应电机的相电压，在不增加额外成本的条件下实现了多工况下 IGBT 开路故障的快速诊断。容错策略将三相四开关容错方式和改进的三相六开关容错方式相结合，实现了牵引逆变器故障条件下的低转矩波动容错控制。研究利用上海远宽的 StarSim 电力电子小步长实时仿真器进行实验，通过实验结果验证了所提出的诊断算法和容错策略的有效性，并把成果总结发表于

《IEEE Transactions on Transportation Electrification》：

Keting Hu, Zhigang Liu, Ibrahim Adamu Tasiu, Tao Chen. Fault Diagnosis and Tolerance with Low Torque Ripple for Open-Switch Fault of IM Drives[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(1): 133-146.

## 课题研究背景

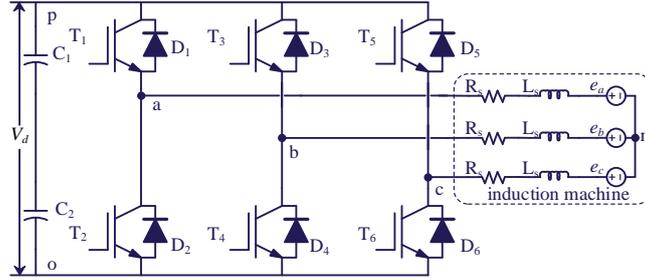
### IGBT 开路故障诊断研究意义与现状

变频调速感应电机传动系统广泛应用于工业领域，如电动汽车、高速铁路和风力发电等。对于这些领域，可靠性是一个关键问题。依据问卷调查，功率器件(本文主要针对绝缘栅双极型晶体管，Insulated gate bipolar transistor, IGBT)故障是传动系统故障的主要原因之一。为此，学者们对其进行了大量的研究，提出了各类的故障诊断算法和容错控制方法，保证系统在功率器件失效后可以及时、准确进行故障识别，并投入容错控制，实现系统的继续运行。故障诊断方面，基于电压的诊断算法检测速度较快，但是通常需要增加额外的传感器来检测电压；故障容错方面，三相四开关拓扑是主要的容错方式，但是存在着转矩波动随着转矩增大、速度减小而增大的问题。

## 研究重要内容和创新点

### IGBT 故障诊断方法设计

简化的传动系统示意图如下图所示，主要包括直流侧支撑电容，IGBT，续流二极管以及感应电机。



利用互补开关函数对 IGBT 进行建模，可以得到依赖 IGBT 健康状态、电流、驱动信号的开关行为描述：

$$S_{ck} = [h_k + S_k \wedge (i_k > 0)] \vee [h_k - \bar{S}_k \wedge (i_k < 0)] \quad k \in \{a, b, c\}$$

进而得到逆变器的输出电压：

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2v_{ao} - v_{bo} - v_{co} \\ 2v_{bo} - v_{ao} - v_{co} \\ 2v_{co} - v_{bo} - v_{ao} \end{bmatrix} = \frac{V_d}{3} \begin{bmatrix} 2S_{ca} - S_{cb} - S_{cc} \\ 2S_{cb} - S_{ca} - S_{cc} \\ 2S_{cc} - S_{cb} - S_{ca} \end{bmatrix}$$

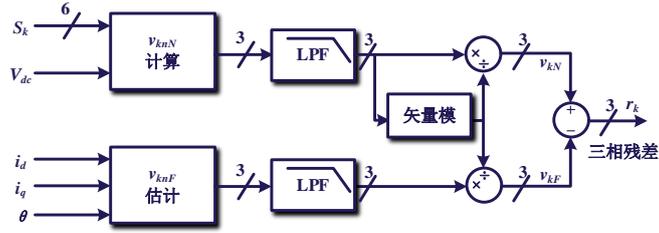
最终得到  $T_1$  故障状态下的残差：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} r_a \\ r_b \\ r_c \end{bmatrix} &= \frac{V_d(S_{ca} - S_{caf})}{3} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{V_d([S_a \wedge (i_a > 0)] \vee [\bar{S}_a \wedge (i_a < 0)] - 0 \vee [\bar{S}_a \wedge (i_a < 0)])}{3} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

依据推导结果，可以发现  $r_a \geq 0$  且  $r_a = -2r_b = -2r_c$ 。类似地，对于  $T_2$  故障来说，残差满足  $r_a \leq 0$  且  $r_a = -2r_b = -2r_c$ 。其余 B 相以及 C 相故障分析类似。

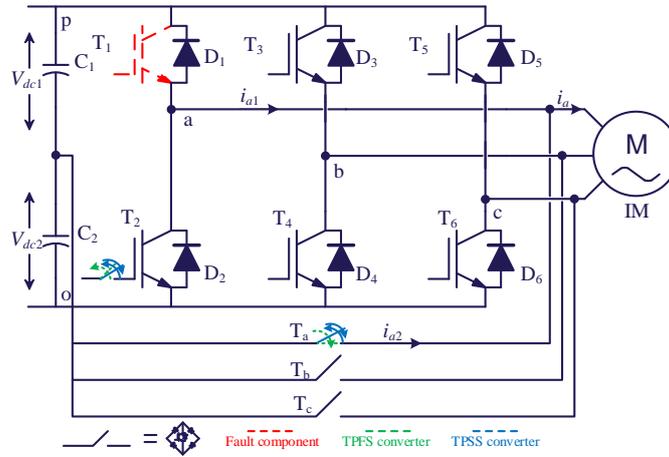
依据上述分析，可以得到诊断流程和诊断框图如下：

1. 读取逆变器的所有 IGBT 驱动信号  $S_1 \sim S_6$  以及直流侧电压  $V_{dc}$ ，计算  $v_{knV}$ 。同时，从控制部分读取  $i_d, i_q$  以及  $\theta$ ，计算  $v_{knF}$ 。
2. 利用低通滤波器滤除  $v_{knV}$  的高频分量。为了完全滤除高频分量，滤波器截止频率设为定子侧频率的  $2/5$ 。为了保持一致，同时对  $v_{knF}$  进行低通滤波。
3. 分别对  $v_{knV}$  和  $v_{knF}$  进行归一化，使检测算法能在不同工况下保持良好的检测性能。
4. 由  $v_{knV}$  和  $v_{knF}$  产生残差，对故障 IGBT 进行检测定位。
5. 在检测到故障之后，锁存检测信号，避免检测信号的震荡。

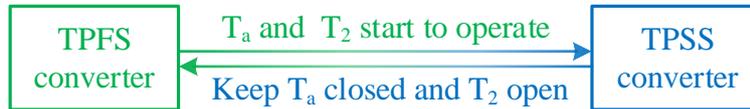


### 容错策略设计

为了解决三相四开关容错方式下转矩波动随着转矩增大、速度减小而增大的问题，提出了拓扑自适应的容错策略，如下图所示：

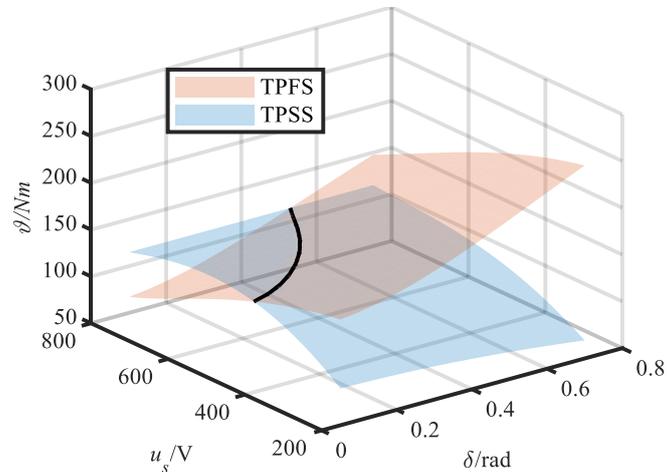


(a) 容错拓扑

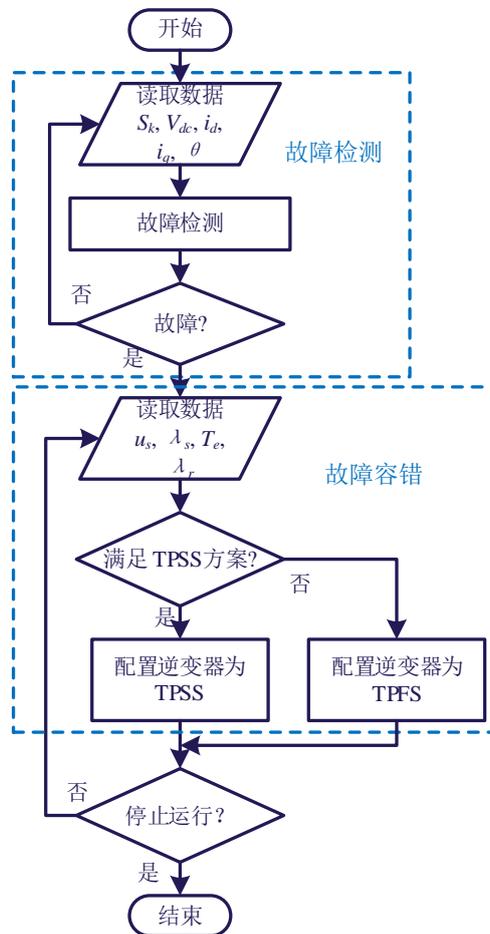


(b) 拓扑切换方法

结合所用感应电机具体参数进行转矩波动分析，可得不同工况下三相四开关和三相六开关容错方式下的转矩波动如下：



以两个面的截线作为判断依据,将系统配置为转矩波动较低的方式,实现感应电机的平稳运行。  
具体流程图如下:



## 基于实时仿真器的算法验证

### 基于任意拓扑小步长实时仿真的故障诊断方法验证

研究在实验验证阶段,模拟了在负载转矩突变、转速指令突变以及不同 IGBT 故障情况下,采集了电流、转速、转矩的信号,并验证了所提诊断方法的可行性和鲁棒性。IGBT 故障的实物实现存在一定的危险性,纯软件仿真又有无法验证实际控制器的缺陷,较难反应出算法在实际控制器中的性能。实时仿真器可以同真实控制器连接,同时又避免了故障实验危险的问题,是 IGBT 故障诊断方法验证的理想测试设备。

### 任意拓扑小步长实时仿真对于 IGBT 故障诊断方法验证的重要性

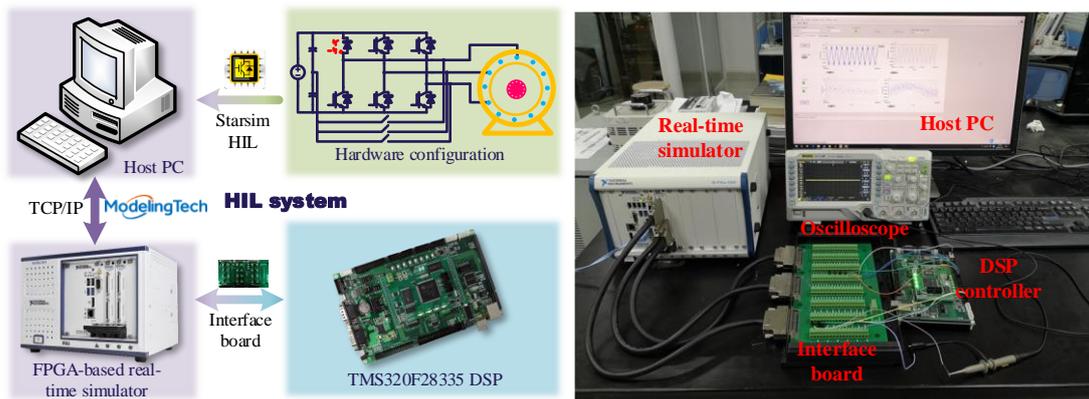
电力电子系统通常含有高速动作的开关元件,其实时仿真有一定挑战,通常有两种方法来实现电力电子系统的实时仿真,一种是基于 PWM 占空比测量的平均值大步长方法,一种是基于细

节模型的小步长实时仿真。

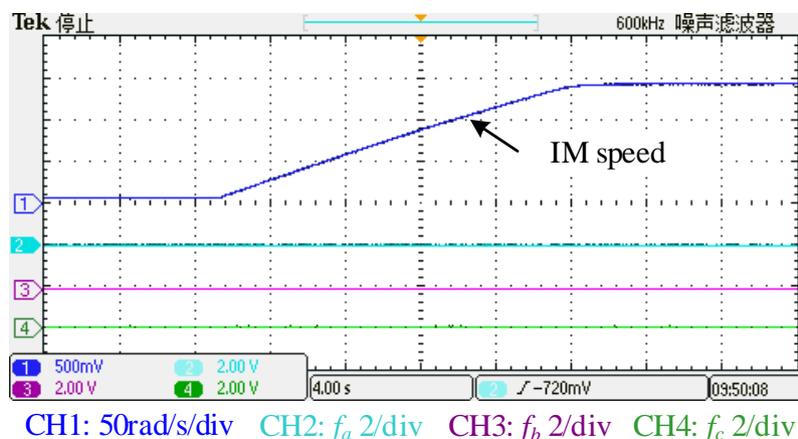
对于 IGBT 开路故障检测来说，它需要检测到瞬时电路反应，而不是经过大步长平均的信号，因此基于 PWM 占空比的平均值大步长方法不适用于此研究。同时实时仿真器要能够仿真各种故障工况，或者说任意的拓扑组合；一些只能仿真正常工况的实时仿真器也不适用。

远宽能源 (www.modeling-tech.com) 提供的 StarSim 实时仿真器，基于电力电子器件的细节模型，利用最新的 FPGA 技术，可以实现 1 微秒步长、任意拓扑、任意工况的电力电子系统实时仿真，被广泛应用于牵引供电系统故障诊断、控制策略验证、可再生能源并网、电机驱动等的实时仿真中；西南交通大学的科研团队就采用了 StarSim 电力电子实时仿真器来进行所提出的双重化脉冲整流器多管开路故障快速诊断方法的试验验证。

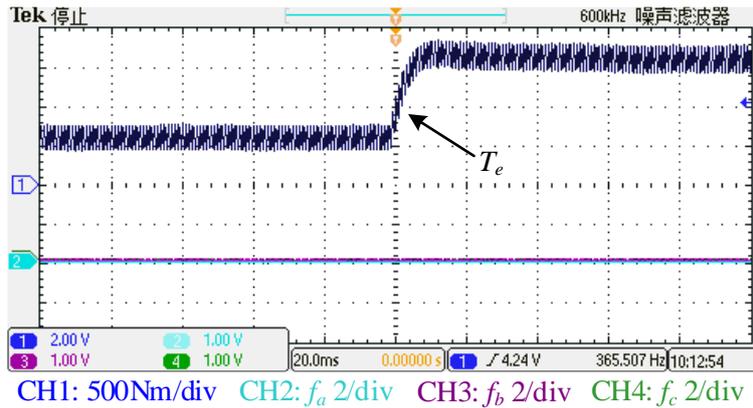
下图是 HIL+RCP 测试平台示意图，其包括实时仿真系统 HIL 和 DSP 控制器，其中电力电子系统是利用 StarSim FPGA Solver 按 1 微秒的步长实时仿真；控制算法模型运行在 DSP 控制器上，实时仿真器和 DSP 控制器通过真实的物理 IO 互连。



下图为在小步长实时仿真实验平台上在正常条件下转矩、负载转矩变化时的诊断输出。可以发现动态条件下，诊断不输出故障信号，不发生误诊断。

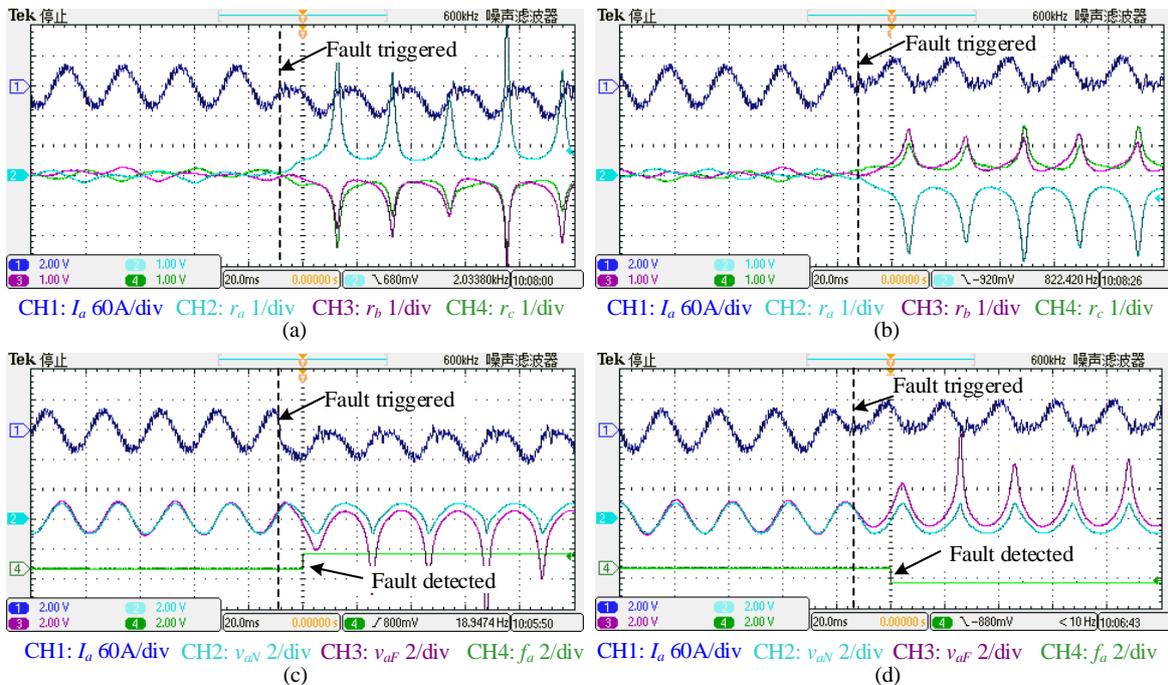


(a) 正常条件下转速变化结果



(b) 正常条件下负载转矩变化结果

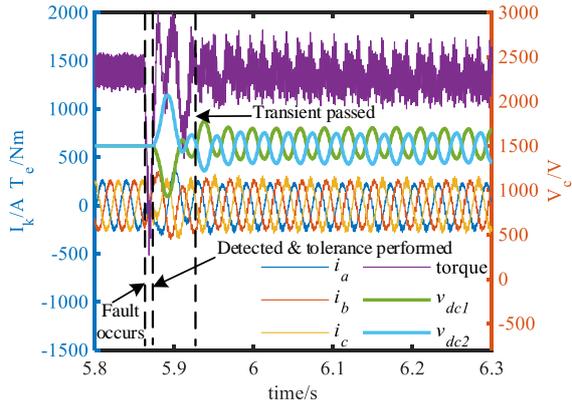
下图为在小步长实时仿真实验平台上  $T_1$ 、 $T_2$  故障条件下的三相残差和诊断输出。可以发现在故障后残差表现与分析一致，诊断输出正确，可以实时在线实现故障的检测与识别。



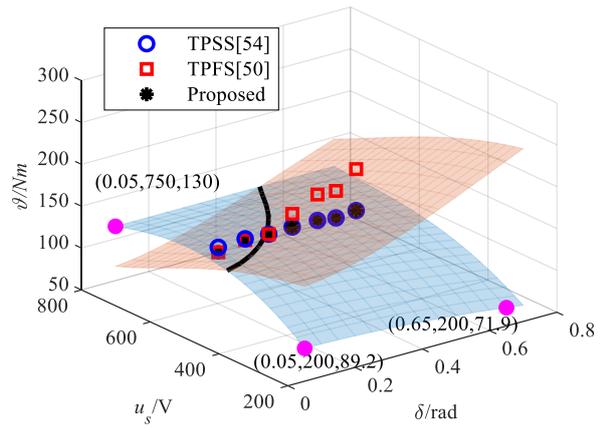
(a) T1 故障时三相残差; (b) T2 故障时三相残差;

(c) T1 故障时 A 相诊断信号; (d) T2 故障时 A 相诊断信号

下图为在小步长实时仿真实验平台上故障容错波形与转矩波动对比。故障发生之后，诊断算法及时对故障进行检测定位，同时触发容错方案，选择合适的容错拓扑，实现感应电机的低转矩波动运行。



(a) 故障前后电流、转矩、电容电压波形



(b) 所提方法与其余文献方法结果对比