



## 西南交通大学- 双重化脉冲整流器多管开路故障快速诊断方法

## 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双重化脉冲整流器多管开路故障快速诊断方法，该方法将门极信号与交流侧电压的变化情况作为故障特征信号生成的依据，可迅速实现功率管单管、双管及多管故障的准确定位，且不受负载突变影响；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 IGBT 开路故障诊断方法的正确性，并把成果总结发表于《电工技术学报》：

陈涛，刘志刚，胡轲琰，张雨婷. 一种双重化脉冲整流器多管开路故障快速诊断方法[J]. 电工技术学报. 已录用。

## 课题研究背景

### IGBT 开路故障诊断研究意义与现状

随着我国高速铁路的迅速发展，动车组的安全稳定运行显得尤为重要。一般来说，CRH3 型动车组（Electric Multiple Units, EMUs）牵引传动系统中整流部分均采用双重化脉冲整流器拓扑结构，其主电路功率管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）是电力电子装置系统中最脆弱的结构。由于双重化脉冲整流器中的 IGBT 长期在电磁干扰、多种恶劣环境下运行，极易发生故障。而 IGBT 作为核心部件，其故障主要分为短路故障和开路故障。现有的 IGBT 模块驱动电路针对短路故障已集成了硬件保护和监控装置，但是开路故障会导致网侧电流畸变、直流侧电压幅值降低和波动增大，从而引发二次故障。为提高系统的可靠性，实现对 IGBT 开路故障的有效诊断十分重要。

现有研究中很少对多个 IGBT 开路故障进行关注，而对于双重化脉冲整流器来说，其相比单重化两电平脉冲整流器增加了一个整流单元，故障情况较多，故障定位的难度有所加大，故对于双管、多管故障的诊断也不可忽视。

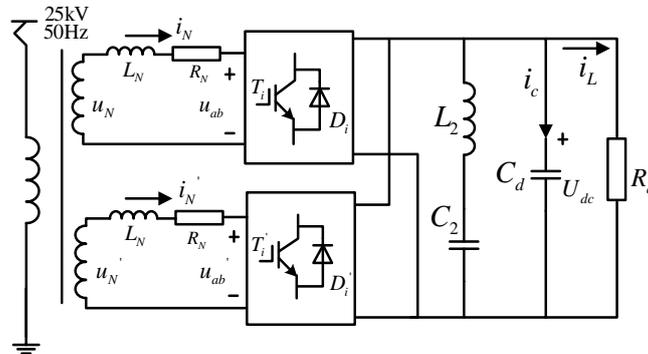
## 研究重要内容和创新点

### 双重化脉冲整流器拓扑结构与原理

双重化脉冲整流器是通过变压器耦合的方式将两个相同结构的整流单元按并联的方式组合，其原理为：各单元整流器采用共同的调制波，将两个整流器的三角载波相位相互错开  $\pi/2$  的相位角。这样做的好处是，可使脉冲整流器输入电流的高次谐波互相错开，并在变压器一次电流的谐波总量中部分谐波相互抵消，在铁路系统得以广泛应用。

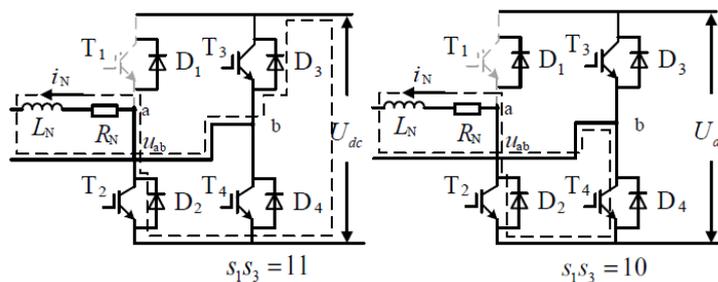
瞬态直接电流控制(transient current control strategy, TCCS)具有拓扑简单、能够有效抑制二次牵引绕组的谐波电流, 直流侧纹波电压较小, 且动态响应好等优点, CRH3 型动车组通常采用该方法。

在此研究中, 主电路模型如图所示:

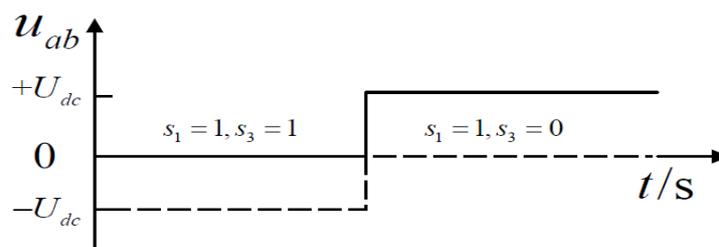


### 故障诊断方法设计与结果

传统的单相脉冲整流器 IGBT 开路故障诊断中一般只考虑单管或双管故障, 对于多管故障研究很少涉及, 西南交大刘志刚团队提出的故障诊断方法综合考虑了多种功率管开路故障情况, 通过对脉冲整流器正常模式和多种功率管开路故障情况下的 IGBT 门级脉冲信号和交流线电压  $U_{ab}$  进行分析, 构建故障特征向量表达式。



在门级脉冲  $s_1s_3$  都为高电平时, 交流电流为负的情况, 正常  $U_{ab}$  电压应该为 0; 但当 T1 管故障时,  $U_{ab}$  将为  $-U_{dc}$ ; 在脉冲  $s_1$  高  $s_3$  低时, 交流电流为负的情况, 正常交流电压应该为  $+U_{dc}$ , 但当 T1 管故障时,  $U_{ab}$  将为 0。具体如下图所示, 下图实线为正常的  $U_{ab}$  波形, 虚线为 T1 管故障时的  $U_{ab}$  波形。



其它的故障情况和特征向量表达式详细推导详见西南交通大学科研团队发表的文章。

## 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，模拟了在负载突变、不同 IGBT 故障情况下，网侧电压、电流、直流侧电压及故障特征信号的变化情况，并验证了所提诊断方法的可行性和鲁棒性。一般来说，IGBT 故障这种实验一般较难在实物系统上实现；纯软件仿真又有无法接入真实控制器的缺点，较难反应出真实控制器中的延迟和有限精度。实时仿真器可以同真实控制器连接，又不会有故障实验危险的问题，是 IGBT 开路故障诊断方法验证的理想测试设备。

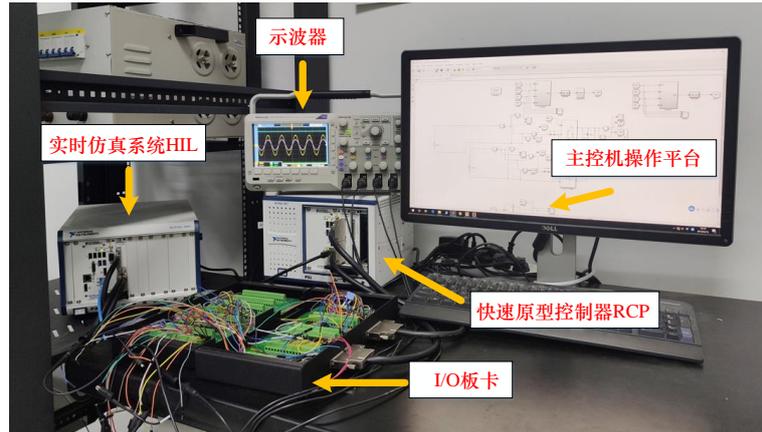
### 任意拓扑小步长实时仿真对于 IGBT 故障诊断方法验证的重要性

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。

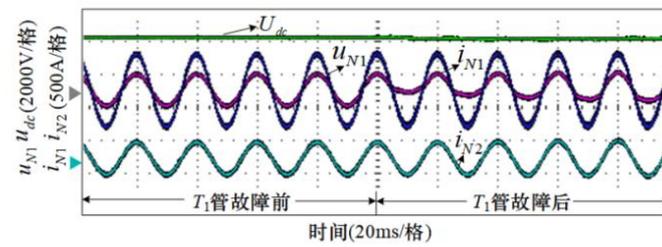
对于 IGBT 开路故障检测来说，它需要检测到瞬时电路反应，而不是经过大步长平均的信号，因此基于 PWM 占空比的平均值大步长方法不适用于此研究。同时实时仿真器要能够仿真各种故障工况，或者说任意的拓扑组合；一些只能仿真正常工况的实时仿真器也不适用。

远宽能源 ([www.modeling-tech.com](http://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。

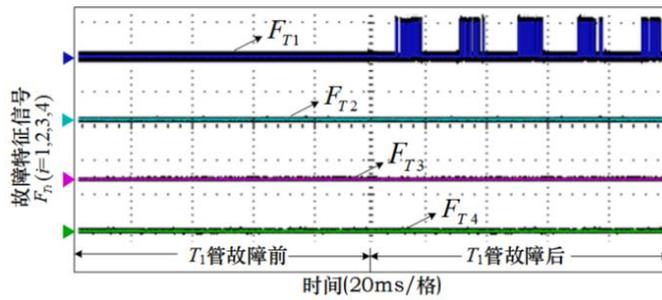
下图是 HIL+RCP 测试平台示意图，其包括实时仿真系统 HIL 和快速原型控制器 RCP，其中电力电子系统是利用 StarSim FPGA Solver 按 1 微秒的步长实时仿真；控制算法模型运行在 RCP 控制器上，实时仿真器和快速原型控制器通过真实的物理 IO 互连。



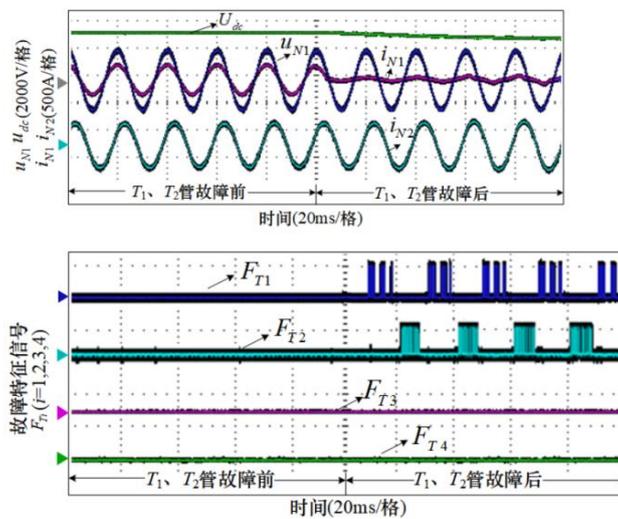
下图为在小步长实时仿真实验平台上不同 IGBT 故障情况下的网侧电压电流、直流侧电压以及故障特征信号的实验波形。



(a) 上整流单元  $T_1$  单管故障



(b) 上整流单元  $T_1 T_2$  双管故障



由图(a)和(b)可以看出，网侧电压电流、直流侧电压波形在故障前后符合理论分析结果，且故障特征信号会迅速反应故障和准确地定位到故障 IGBT，验证了故障诊断方法的有效性。