

## “能量高效利用与管理”专栏

城市轨道交通牵引供电系统双向变流器  
直流侧短路保护方案

王 雄, 陈洁莲, 吴雪峰, 尹维恒  
(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘 要:** 采用双向变流器进行城市轨道交通牵引供电时, 传统 PWM 整流器无法满足提供 27 kA、持续 120 ms 的短路电流的直流馈线保护要求。为此, 文章提出了一种直流侧短路保护方法, 其可在接触网侧短路工况下实现故障点的有效隔离, 同时不影响双向变流器供电。文章构建了基于晶闸管旁路的双向变流器拓扑, 设计了短路旁路参数和短路电流分布参数, 提出了短路电流快速转移控制方案; 并基于双向变流器建立牵引供电系统仿真模型, 进行了系统仿真和试验验证。试验结果表明, 系统可耐受 27 kA 短路电流且持续时间达 146 ms; 在直流侧短路时, 系统可在 53  $\mu$ s 内快速将短路电流转移至晶闸管桥旁路, 保护了 IGBT 功率器件安全, 确保直流馈线断路器可靠断开。

**关键词:** 双向变流器; 短路保护; 直流侧短路; 晶闸管旁路; 电磁触发; 牵引供电系统

中图分类号: TP273<sup>+</sup>.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)03-0026-07

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.03.005

A Scheme of DC-side Short-circuit Protection for Bi-directional Converter  
in Urban Rail Traction Power Supply System

WANG Xiong, CHEN Jieliang, WU Xuefeng, YIN Weiheng  
( Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China )

**Abstract:** Using bi-directional converters for traction power supply in urban rail transit, traditional PWM rectifiers cannot meet the requirement of DC feeder protection for 27 kA short-circuit current with 120 ms continuous time. For this reason, this paper proposes a DC-side short-circuit protection method to adapt to the traditional subway DC feeder protection. The scheme realizes effective isolation of the fault point in the case of a catenary short-circuit without affecting the power supply of the bi-directional converter. A bi-directional converter topology based on thyristor bypass is constructed, and then short-circuit bypass parameters, short-circuit current distribution parameters and short-circuit current rapid transfer control schemes are designed. At the same time, a traction power supply system simulation model based on bi-directional converters is constructed. The test results show that the system can withstand 27 kA short-circuit current and last for 146 ms. When the DC-side circuit is short, the system quickly transfers the short-circuit current to the thyristor bridge to bypass within 53  $\mu$ s, which protects the safety of IGBT devices and ensures the reliability disconnection of the DC feeder circuit breaker.

**Keywords:** bi-directional converter; short-circuit protection; DC-side short-circuit; thyristor bypass; electromagnetic trigger; power supply system of electric traction

收稿日期: 2020-05-08

作者简介: 王雄 (1987—), 男, 工程师, 研究方向为轨道交通牵引供电系统。

基金项目: 系列化中国标准地铁列车研制及试验

0 引言

目前，城市轨道交通（简称“城轨”）牵引供电系统主要采用二极管整流机组模式，其具有可靠性高、结构简单等特点，但存在能量单向传输、输出特性不可控、线路损耗大、直流网压波动大、再生制动能量无法被有效利用等缺点<sup>[1]</sup>。双向变流器允许能量双向流动，可取代牵引供电系统中的二极管整流机组和再生制动能量利用装置，具有直流母线电压稳定、线路损耗小的特点，已成为未来城市轨道交通供电技术发展方向<sup>[2-4]</sup>。

针对城轨牵引供电系统中接触网侧短路故障，传统继电保护方案是通过直流馈线柜断路器进行大电流脱扣保护，就近切除短路故障点，然后进行大双边供电以确保供电安全<sup>[5-6]</sup>。单个直流馈线柜大电流脱扣保护值通常为 8~13 kA；为了保证故障时馈线柜能被可靠分开，双向变流器需提供 27 kA、持续 120 ms 的短路电流。由于该短路电流值远远超过 IGBT 器件所能承受的极限，双向变流器为保护装置自身安全，选择跳开直流开关柜方式退出供电；然而，因为地铁牵引供电系统通常采用双边供电，直流侧具有贯通特性，相当于多台双向变流器并联，其中、远端的短路电流仍会超过双向变流器 IGBT 器件的电流承受极限，进而引起多个站点双向变流器的跳闸，使故障保护失去选择性。可见。对于基于双向变流器的城轨牵引供电系统，传统的直流继电保护方法是无效的。

为此，本文提出一种基于晶闸管整流桥的双向变流器短路保护方法，其在双向变流器的 IGBT 整流桥

上并联一组或多组晶闸管整流桥，通过对晶闸管桥进行合理的参数设计、短路电流分布设计和控制器的快速驱动设计，实现直流侧短路故障保护。在双向变流器正常工作时，晶闸管整流桥处于截止状态；当发生直流侧短路故障时，短路电流被快速转移至晶闸管整流桥；由于晶闸管耐冲击能力（ $I_t^2$ ）强，因此晶闸管整流桥可为近端变电所提供直流馈线柜脱扣电流通路，中、远端变电所的短路电流达不到对应直流馈线柜脱扣电流值，通过大双边供电继续为列车供电，从而保证供电安全。

1 基于双向变流器的城轨牵引供电系统

1.1 系统工作原理

基于双向变流器的城轨牵引供电系统（图 1）是将地铁线路上各个牵引混合变电所中的 24 脉波整流机组和再生制动能量利用装置替换为双向变流器。通常为了确保供电系统可靠性，一个牵引混合变电所由两套双向变流器并联来承担供电和再生制动能量利用任务。双向变流器直流侧与直流母线相连，并通过直流母线与直流牵引网相连，正常工况下为双边供电模式；交流侧与 35 kV 环网相连。

双向变流器具有牵引整流和回馈逆变两种功能，如图 2 所示。在列车正常牵引启动及运行时，两套双向变流装置同时启用整流功能，将直流母线电压稳定在 1 700 V（可调），并向直流牵引网供电，给车辆提供牵引电能；在列车制动运行（电制动）时，牵引电机处于再生发电运行状态，将列车的动能和势能转换为电能并回馈到直流牵引网，这些能量一部分

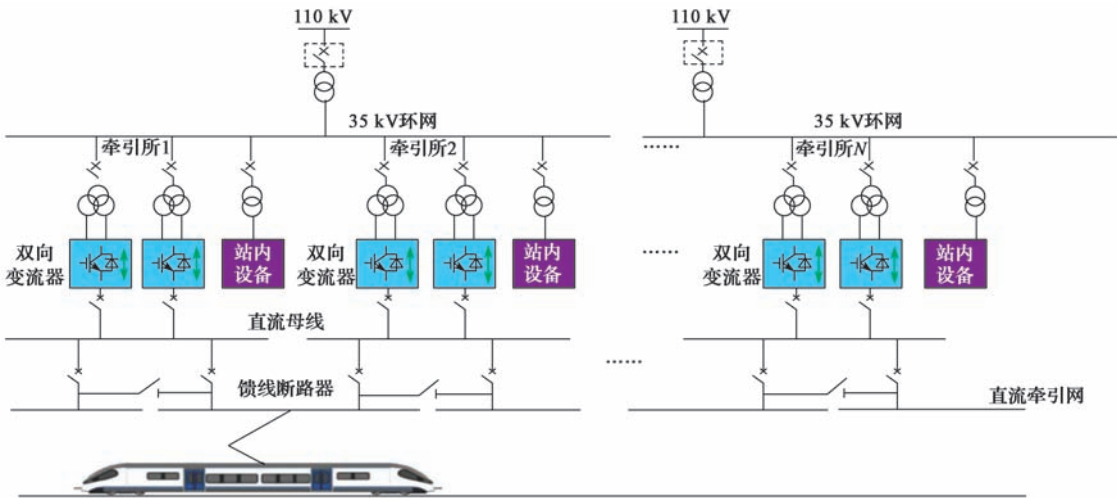


图 1 基于双向变流器的牵引供电系统拓扑  
Fig. 1 Topology of the traction power supply system with bi-directional converter

被线网中邻近启动车辆所吸收,另一部分则经双向变流器逆变后回馈到中压交流电网中<sup>[7]</sup>。

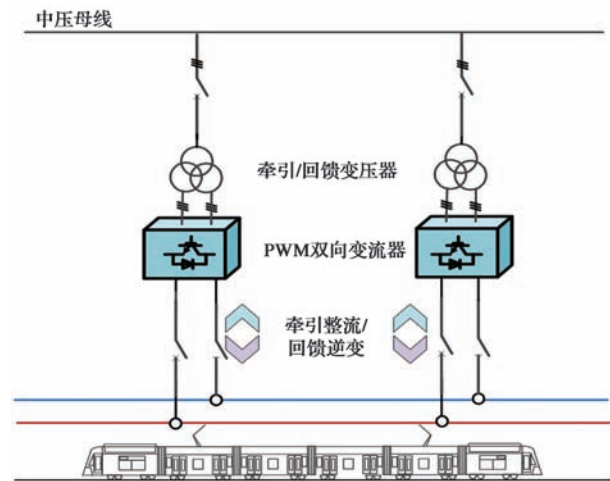


图2 双向变流器牵引供电/能量回馈系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the traction power supply/energy feedback system with bi-directional converter

## 1.2 双向变流装置电路拓扑

双向变流装置通常由交流开关柜、变压器柜、双向变流器柜、直流开关柜和负极柜组成,整体接线方案与现有二极管整流机组的相一致。其交流侧通过35 kV开关柜被接于牵引变电所内的35 kV母线段;直流侧正极通过1 500 V直流开关柜被接于牵引变电所内的直流母线段正极,负极仍保留直流控制柜内的隔离开关(QS1),且被接于牵引变电所内的直流母线段负极,具体如图3所示。

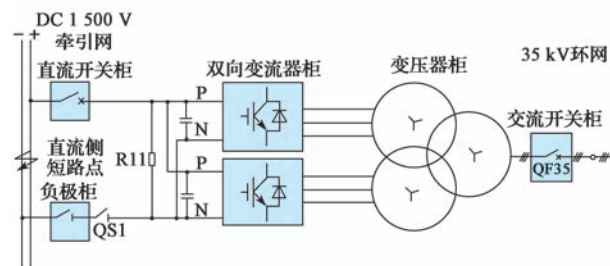


图3 双向变流器电路拓扑

Fig. 3 Topology of the bidirectional converter circuit

传统二极管整流机组牵引供电方式直流侧短路保护主要依赖直流进线柜和直流馈线柜的保护设施。直流进线柜保护包含大电流脱扣保护和逆流保护;直流馈线柜保护包含大电流脱扣保护、 $\Delta I$ 保护、 $di/dt$ 保护、过电流保护和双边联跳保护,各种保护相互配合,从而实现牵引网近、中、远端短路的全范围保护<sup>[8-9]</sup>。采用双向变流器后,直流系统保护配置方案维持与整流方式的保护配置方案一致。双向变流器采用PWM变流器,其中IGBT的短路电流承受能力远

不及整流机组的平板式二极管的。为了保证短路工况下保证双向变流器的安全,需要从短路电流的旁路、分流、快速转移控制以及旁通回路与IGBT回路互不干扰等方面进行设计。

## 2 双向变流器直流侧短路保护方案设计

采用双向变流器后,直流系统的保护配置方案需维持与整流方式的相同,双向变流器需耐受27 kA、持续时间达120 ms的短路电流,为此,需要在IGBT模块上并联晶闸管旁通回路(图4):双向变流器正常牵引供电/逆变回馈时,晶闸管旁通回路不工作;当直流侧发生短路时,快速触发晶闸管旁路导通,使大部分短路电流经过晶闸管旁通回路,IGBT模块只分担小部分短路电流,从而保证IGBT模块安全。若在120 ms内系统检测发现直流电压和直流电流已恢复至正常值,则停止晶闸管旁路导通,双向变流器继续正常工作;若持续120 ms后仍然检测到直流电压和直流电流异常,则双向变流器跳闸退出工作。

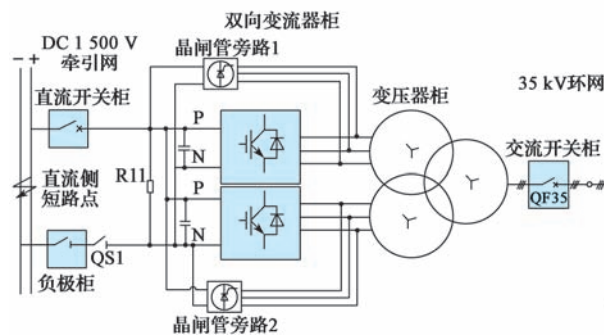


图4 基于晶闸管旁路的双向变流器电路拓扑

Fig. 4 Circuit topology of the bidirectional converter based on thyristor bypass

### 2.1 晶闸管整流桥旁路设计

假设所选择的能馈变压器的容量为2.2 MW,短路阻抗为8%,等效电感 $L=0.23$  mH,交流侧线电压 $U_{ac}=900$  V,角频率 $\omega=2\pi f$ ,其中 $f$ 为电网频率, $f=50$  Hz。在直流侧外部短路时,忽略线路阻抗,则短路电流峰值为

$$I_{\max} = 2 \times \sqrt{2} \times \frac{U_{ac}}{\sqrt{3}\omega L} \quad (1)$$

短路电流平均值为

$$I = 2 \times 1.35 \times \frac{U_{ac}}{\sqrt{3}\omega L} \quad (2)$$

利用式(1)和式(2)计算得到短路电流的峰值

为 11.7 kA，平均值为 11.16 kA，则每条支路的耐受电流值必须大于 5.85 kA，单个器件  $I^2t$  值必须大于  $410.67 \times 10^4 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ 。传统 IGBT 器件的  $I^2t$  值一般为  $59 \times 10^4 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ ，无法满足耐冲击能力要求；晶闸管和板式二极管器件的  $I^2t$  值都能满足耐冲击能力要求，但因二极管不受控，会影响双向变流器的正常运行，因此本文选择晶闸管作为短路电流旁通回路器件。晶闸管整流桥旁路拓扑如图 5 所示，在变流器模块两端并联晶闸管整流桥，实时检测直流侧电流。当电流大于保护值时，判断变流器模块为直流短路，并触发晶闸管使其导通，提供短路电流泄放通路。

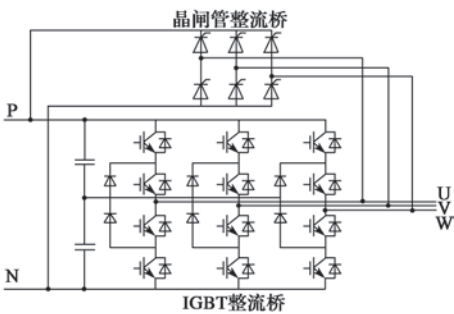


图 5 晶闸管整流桥旁路拓扑  
Fig. 5 Thyristor rectifier bridge bypass topology

在装置正常工作时，晶闸管承受反向的阳极与阴极间电压，并且不给晶闸管门极触发脉冲使其始终保持关断状态；当检测到直流侧短路时，晶闸管的阳极与阴极间存在正向电压，同时给门极触发脉冲使其导通，在撤掉脉冲后由于晶闸管内部强烈的正反馈仍然维持导通状态，直至直流断路器分断保护，主回路的电压减小至接近于零，晶闸管关断<sup>[10-12]</sup>。

2.2 短路电流分布设计

晶闸管整流桥和 IGBT 整流桥采用并联方式，两者电压相等，直流侧短路时，流经各支路的电流大小与该支路的阻抗有关。IGBT 模块支路和晶闸管旁路支路的阻抗都是由交流侧铜排阻抗、直流侧铜排阻抗和器件阻抗组成。经过计算，IGBT 模块支路阻抗与晶闸管旁路支路阻抗分布如表 1 所示。可以看出，75% 的短路电流经过晶闸管整流桥到短路点，IGBT 整流桥只需承受 25% 的短路电流。

表 2 双向变流器供电系统的变压器、接触网和钢轨参数  
Tab. 2 Parameters of the transformer, catenary and rail in bidirectional converter power supply system

| 变压器       |           |         |       | 接触网                                           |                                                 | 钢轨                                            |                                                 |
|-----------|-----------|---------|-------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 额定容量 /kVA | 变压器变比     | 全穿越短路阻抗 | 变压器结构 | 单位长度电阻 /<br>( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ) | 单位长度电感 /<br>( $\text{H} \cdot \text{km}^{-1}$ ) | 单位长度电阻 /<br>( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ) | 单位长度电感 /<br>( $\text{H} \cdot \text{km}^{-1}$ ) |
| 2 200     | 35000/900 | 8%      | 轴向双分裂 | 0.018 37                                      | $2.2 \times 10^{-6}$                            | 0.035                                         | $1.9 \times 10^{-6}$                            |

表 1 变流器内部等效阻抗  
Tab.1 Internal equivalent impedance of the converter

| 类别      | 等效阻抗 /mΩ              |                       |         |         |
|---------|-----------------------|-----------------------|---------|---------|
|         | 交流侧铜排                 | 直流侧铜排                 | 器件      | 合计      |
| IGBT 模块 | $3.6 \times 10^{-2}$  | $1.05 \times 10^{-2}$ | 0.551 7 | 0.598 2 |
| 晶闸管模块   | $1.28 \times 10^{-2}$ | $3.32 \times 10^{-2}$ | 0.153   | 0.199 7 |

2.3 短路电流计算

以直流侧电压为 1 500 V、额定容量 S 为 2.2 MW、交流侧电压为 900 V 的双向变流器供电系统为研究对象，分析直流侧短路时系统的安全性，其变压器、接触网和钢轨的参数如表 2 所示。

近端短路通常是指离牵引变电所 100 m 以内发生的接触网短路故障，为了方便计算，本研究中短路点定位于距离牵引变电所 100 m 处。从表 2 可知，此时接触网阻抗为 1.837 mΩ，钢轨阻抗为 3.5 mΩ，短路点等效短路电弧电阻为 4 mΩ。

在直流侧短路时，考虑变流器内部阻抗分布，其短路简化模型如图 6 所示。图中， $R_0$  为短路点等效短路电弧电阻，4 mΩ； $X_T$  为变压器等效阻抗，58.9 mΩ； $Z_{\text{直流电缆}}$  为直流电缆阻抗（接触网阻抗和钢轨阻抗之和），5.337 mΩ； $Z_{\text{IGBT}}$  为 IGBT 模块支路总阻抗，0.598 2 mΩ； $Z_{\text{旁路}}$  为晶闸管旁路总阻抗，0.199 7 mΩ； $I_{\text{总}}$  为稳态短路总电流。

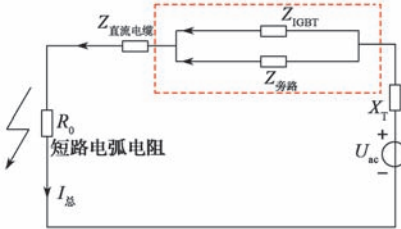


图 6 直流侧短路时线路阻抗模型  
Fig. 6 Line impedance model when the DC-side circuit is short

以短路电流最大的近端短路为例计算流经变流器的电流，其值主要由变压器的等效阻抗值、线路阻抗和变压器二次侧电压决定。

单重稳态短路电流为

$$I_{\text{总}} = \frac{U_{\text{ac}}}{\sqrt{3}(X_T + R_0 + Z_{\text{直流电缆}})} \times \frac{Z_{\text{IGBT}} \times Z_{\text{旁路}}}{Z_{\text{IGBT}} + Z_{\text{旁路}}} \quad (3)$$

将图6中相关参数代入式(3),得 $I_{\text{总}}=8\ 089\text{ A}$ 。由于双向变流器采用两重设计,因此总的稳态短路电流为 $16\ 178\text{ A}$ 。

## 2.4 短路旁路与 IGBT 回路互不干扰设计

晶闸管整流桥与 IGBT 整流桥直接并联, IGBT 正常工作时产生的电压变化率  $dv/dt$  对晶闸管的影响是设计的难点,  $dv/dt$  值过大, 容易导致晶闸管击穿<sup>[12-13]</sup>。采用图7所示测试主电路对晶闸管保护方案中的 IGBT 由开通到关断瞬间其反并联二极管的  $dv/dt$  值进行测试, 在直流母线正极和变流器交流侧间接入负载电感  $L$ , T1 和 T4 常关断, T2 常导通, 给 T3 双脉冲信号, 测试晶闸管两端间电压, 得到 D1 的反向恢复特性和 T3 的开关特性, 如图8所示。从图中可以看出, T3 的瞬时  $dv/dt$  值为  $1\ 000\text{ V}/\mu\text{s}$ 。因此, 选择断态电压临界上升率  $dv/dt$  值大于  $1\ 000\text{ V}/\mu\text{s}$  的晶闸管器件, 即可满足短路故障保护要求。

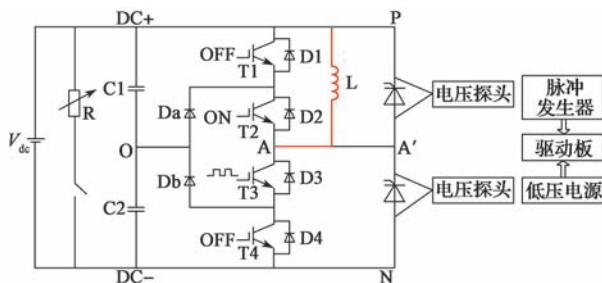


图7 测试主电路  
Fig. 7 Test circuit

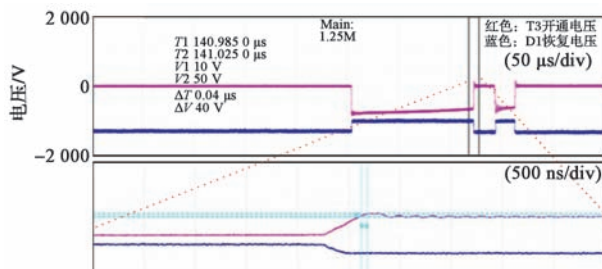


图8 双向变流器正常工作时晶闸管承受的  $dv/dt$  值  
Fig. 8  $dv/dt$  of the thyristor when the bi-directional converter is working normally

## 2.5 晶闸管旁路快速响应设计

当直流侧发生短路、直流电流升高至一定值时, 双向变流器测控保护单元会触发晶闸管整流桥旁通回路为短路点提供电流通路, 以保护 IGBT 的反并联二极管不受损坏, 触发脉冲宽度  $120\text{ ms}$ 。

为了实现2个三相整流桥共12只晶闸管的触发, 晶闸管之间电压差达到  $1\ 000\text{ V}$ , 晶闸管单次最长工作时间  $120\text{ ms}$ 。从体积、成本、性能方面考虑, 选择电磁触发方式, 其触发性能可达到电流上升沿小于  $2\ \mu\text{s}$ 、

同步性延迟小于  $1\ \mu\text{s}$ 、峰值电流  $1\text{ A}$ 、频率  $20\text{ kHz}$ 。

晶闸管整流桥旁路触发逻辑如图9所示。直流短路保护根据直流电流设定值启动保护, 给各晶闸管发送脉冲并同时启动计时, 当时间达到  $120\text{ ms}$  时, 封锁晶闸管脉冲。



图9 晶闸管整流桥旁路触发逻辑图  
Fig. 9 Thyristor rectifier bridge bypass trigger logic diagram

按照上述设计, 对晶闸管触发时间进行测试, 测量保护单元检测到直流母线短路到给出晶闸管触发脉冲的时间  $t_1$ , 测试结果如图10所示, 其中 CH1 为输入端电压, CH4 为晶闸管的驱动信号, 实测  $t_1$  值为  $25.53\ \mu\text{s}$ 。

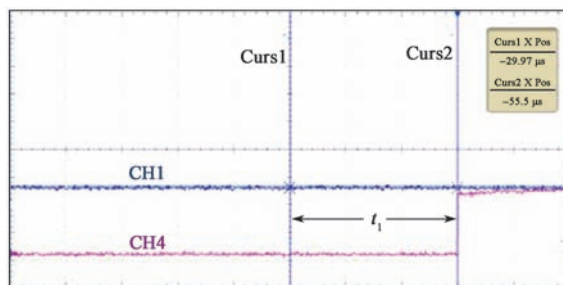


图10 测控保护单元响应时间  
Fig. 10 Response time of the measurement and control protection unit

从晶闸管门极脉冲信号给出到晶闸管实际导通的时间与门极脉冲的上升沿和触发电流有关, 本文所采用的电磁触发方案脉冲上升沿时间  $t_2$  约为  $2\ \mu\text{s}$  (所有晶闸管  $t_2$  均按  $2\ \mu\text{s}$  考虑), 触发电流峰值为  $1\text{ A}$  左右。

因此, 从直流母线短路到晶闸管旁路开通的时间 ( $t_1+t_2$ ) 大概为  $27.53\ \mu\text{s}$ , 即在  $27.53\ \mu\text{s}$  左右可实现短路电流的转移。

## 3 仿真实证

在 Matlab 上搭建基于晶闸管旁路保护方案的电网短路模型, 以验证晶闸管旁路保护的有效性, 如图11所示。图中, IGBT 模块和晶闸管模块支路阻抗参数参照表1, 变压器、接触网和钢轨的参数参照表2, 系统参数参照表3, 短路位置均设置为距离牵引变电所  $100\text{ m}$  的近端处。

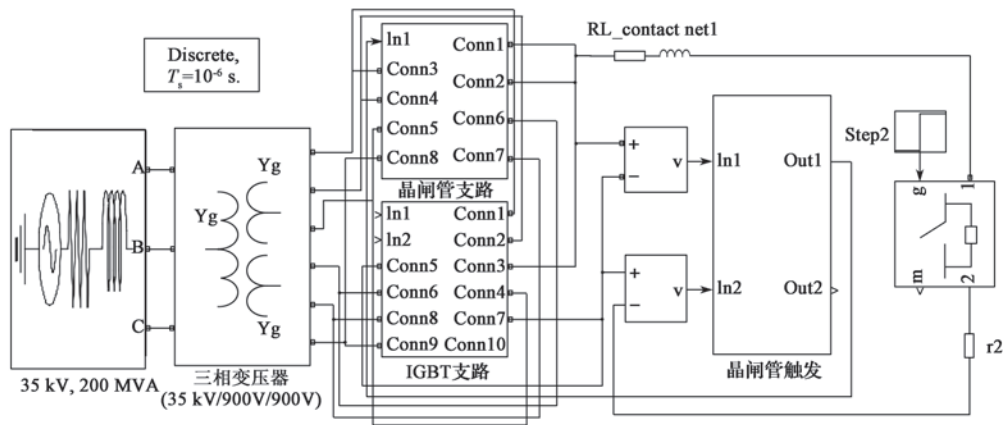


图 11 晶闸管旁路保护仿真模型

Fig. 11 Simulation model of the thyristor bypass protection

表 3 仿真模型参数

Tab. 3 Simulation model parameters

| 直流电压 /<br>V | 交流侧电压 /<br>kV | 短路电流转移时间 /<br>$\mu\text{s}$ | 等效短路电弧电阻 /<br>$\Omega$ | 仿真步长 /<br>$\mu\text{s}$ | IGBT 耐冲击性能 /<br>$(\text{A}^2 \cdot \text{s})$ | 晶闸管耐冲击性能 /<br>$(\text{A}^2 \cdot \text{s})$ |
|-------------|---------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1 700       | 35            | 32                          | 0.004                  | 1                       | $59 \times 10^4$                              | $1\,800 \times 10^4$                        |

在晶闸管旁路保护系统仿真模型中，假设在 0.1 s 时发生短路故障，故障持续时间 120 ms，测试通过旁路晶闸管、IGBT 反并联二极管的直流电流如图 12 所示，交流侧短路电流如图 13 所示。

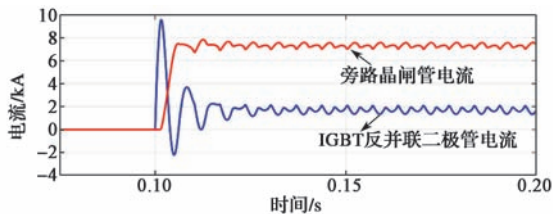


图 12 直流侧短路电流

Fig. 12 DC-side short-circuit currents

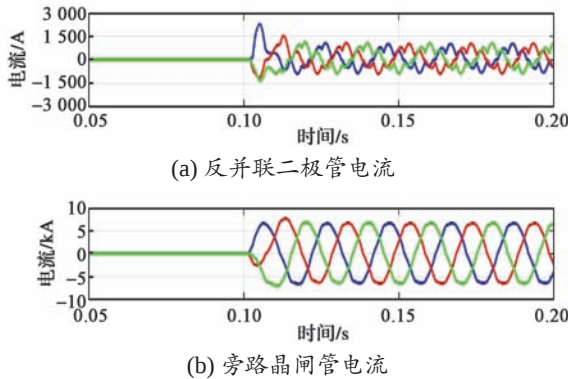


图 13 交流侧短路电流

Fig. 13 AC-side short-circuit currents

图 12 表明，当接触网发生短路故障时，由于电容器放电和晶闸管的导通延时，通过旁路晶闸管的瞬时直流短路电流峰值为 8 000 A，稳态直流短路电流峰值为 7 000 A；通过反并联二极管的瞬时直流短路电流峰值为 9 600 A，稳态直流短路电流峰值为 2 000 A；

IGBT 承受的短路电流占比为 22.2%，与理论计算值 25% 基本一致。

图 13 表明，直流短路时，旁路晶闸管交流侧进线稳态电流峰值为 7 500 A，反并联二极管的交流侧进线稳态电流峰值为 1 000 A。所选用 IGBT 的额定电流为 1 400 A，并且采用双管并联方式，因而短路电流在器件安全范围内，满足设计要求。

4 试验测试与分析

实物试验拓扑如图 14 所示，短接直流控制柜直流进线端，从交流开关柜一端给定一个交流电源，分别测试在该情况下双向变流器单重交流侧（1 号点）总电流、晶闸管交流回路（2 号点）电流、IGBT 交流回路（3 号点）电流和直流侧（4 号点）短路电流。

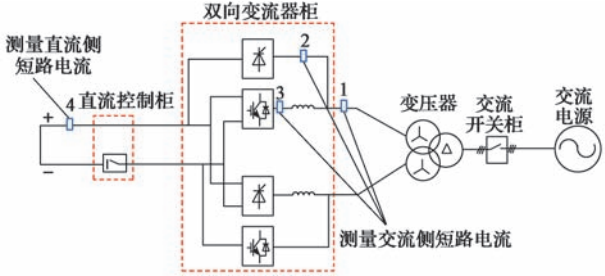


图 14 试验系统原理图

Fig. 14 Schematic diagram of the test system

在交流侧给定一个 726 V 的交流电压，持续时间为 146 ms。测试图 14 中的 1~4 号点位波形（图 15），其中 1 号点位电流  $I_1$  为 10.03 kA，2 号点位

电流  $I_2$  为 8.906 kA, 3 号点位电流  $I_3$  为 1.049 kA, 4 号点位电流  $I_4$  为 27.11 kA。

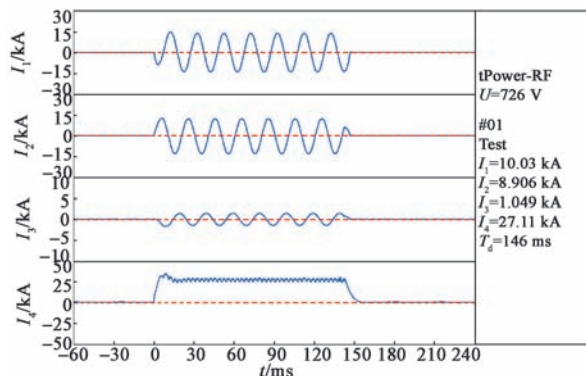


图 15 短路试验各支路电流值及晶闸管导通时间  
Fig. 15 Current values of each branch in the short-circuit test and conduction time of the thyristor

通过试验验证, 双向变流器旁路可承受 27.11 kA、持续 146 ms 的短路电流, 从检测到短路电流开始到晶闸管桥完全触发导通为止用时 53  $\mu$ s。在试验中测得的流经 IGBT 反并联二极管的短路电流大小为 1 049 A, 流经晶闸管桥的旁路电流为 8 906 A, IGBT 承受的短路电流占比为 10.5%。试验结果中 IGBT 支路的短路电流占比比仿真结果的更优, 其主要原因是仿真时忽略了螺栓接触电阻。试验后设备运行正常, 验证了该直流侧短路保护方案的合理性。

## 5 结语

本文提出了一种基于晶闸管整流桥旁路的城轨牵引供电系统双向变流器直流侧短路保护方案, 其既适应现有的地铁直流继电保护系统, 能确保接触网接地故障时系统实现就近保护, 从而保证供电安全; 同时又不影响双向变流器的正常工作。仿真分析以及试验验证表明, 该保护方案有以下特点:

(1) 晶闸管旁路提供短路电流能力强, 电磁触发速度快;

(2) 采用电磁触发技术, 使短路电流转移时间仅为 53  $\mu$ s;

(3) 双向变流器正常工作时, 晶闸管整流桥不导通, 两者相互不影响;

(4) IGBT 支路和晶闸管支路的阻抗设计差异实现了短路电流的合理分配 (IGBT 支路电流只占短路电流的 10.5%), 有效保护了设备安全。

本方案设计时忽略了晶闸管支路与 IGBT 支路母排刚性连接的接触电阻, 这影响了仿真结果的可信度。后续可以在母排刚性连接位置涂导电膏, 以增加导电性能, 减小接触电阻, 从而减小仿真误差。

## 参考文献:

- [1] 韩宝明, 陈佳豪, 杨运节, 等. 2019 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述 [J]. 都市快轨交通, 2020, 33(1): 4-8.  
HAN B M, CHEN J H, YANG Y J, et al. Statistical Analysis of Urban Rail Transit Operation in the World in 2019: A Review [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(1): 4-8.
- [2] 靳佩跃. 双向变流器在轨道交通牵引供电系统的应用研究 [J]. 电气化铁道, 2020 (增刊 1): 156-159.
- [3] 成吉安. 城市轨道交通双向变流器牵引供电技术的应用 [J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(12): 110-113.  
CHENG J A. Application of Traction Power Supply Technology with Bidirectional Converter for Urban Rail Transit [J]. Urban Rail Transit, 2019, 22 (12): 110-113.
- [4] 张刚, 刘志刚, 牟富强. 双向变流器在城轨牵引供电系统中的运用 [J]. 都市快轨交通, 2014, 27(4): 109-112.  
ZHANG G, LIU Z G, MOU F Q. Application of Bi-directional Converter in Urban Railway Traction Power Supply System [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27 (4): 109-112.
- [5] 陈德胜. 城轨新型能馈式牵引供电集成技术研究及实现 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.  
CHEN D S. Research and realization of integration technology for the new energy feedback traction power supply in the urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [6] 卢德祥, 杜伟. 双向 DC-AC 变流器及其运用综述 [J]. 电气开关, 2017, 55(3): 1-4.  
LU D X, DU W. Review of Bidirectional DC-AC Converter and Its Application [J]. Electric Switcher, 2017, 55(3): 1-4.
- [7] 张志学, 何多昌, 张铁军, 等. 城市轨道交通牵引供电系统采用 PWM 回馈电能方案研究 [J]. 铁路技术创新, 2011(5): 22-25.
- [8] 邸荣光. 地铁直流馈线保护方案及保护装置设计 [J]. 沈阳工程学院学报 (自然科学版), 2009, 5(4): 352-355.  
DI R G. The design of protection plan and protection device for DC feeder in subway [J]. Journal Of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2009, 5(4): 352-355.
- [9] 丁丽娜, 韩红彬. 地铁直流牵引供电系统馈线保护方法研究 [J]. 现代电子技术, 2005, 28(5): 87-89.  
DING L N, HAN H B. Research on Protection Method of Feeder Line in Subway DC Traction Supply System [J]. Modern Electronics Technique, 2005, 28(5): 87-89.
- [10] 师睿. 新型直流牵引供电系统可靠性技术的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [11] 张骥, 刘炜, 周瑞兵, 等. 基于双向变流装置的城市轨道交通牵引供电系统潮流计算 [J]. 中国铁道科学, 2020, 41(1): 92-98.  
ZHANG J, LIU W, ZHOU R B, et al. Power Flow of Traction Power Supply System for Urban Rail Transit Based on Bidirectional Converter Device [J]. China Railway Science, 2020, 41(1): 92-98.
- [12] 曾文彬, 任亚东, 张文浩, 等. 适用于高压软启动装置的双向晶闸管组件研制 [J]. 大功率变流技术, 2016(2): 35-40.  
ZENG W B, REN Y D, ZHANG W H, et al. Development of the Bidirectional Thyristor Assembly for High Voltage Soft Start Device [J]. High Power Converter Technology, 2016 (2): 35-40.
- [13] BHARATHI K, SASIKUMAR M. Power flow control based on bidirectional converter for hybrid power generation system using microcontroller [J]. Microprocessors and Microsystems, 2021, 82: 531-538.