

# 牵引整流器谐振电感短路故障诊断与容错控制

党忆涵,徐传芳,王绍祖

(大连交通大学 自动化与电气工程学院,辽宁 大连 116000)

**摘要:**牵引整流器直流侧通常需要串联LC谐振电路以滤除2倍电网频率的脉动分量。当直流侧谐振电感出现短路故障时,该脉动分量会被传递到电机侧,导致牵引电机出现转矩脉动和噪声等问题。为此,针对牵引整流器谐振电感短路故障,提出了相应的故障诊断与容错控制方法。首先,在建立牵引整流器数学模型及分析二次谐波产生机理的基础上,引入了基于陷波器的故障诊断方法;其次,提出了电压动态补偿与低通滤波器相结合的容错控制算法。最后,通过仿真对所提出的故障诊断与容错控制方法进行研究。结果表明所提出的故障诊断方法能够准确并快速发现故障,且容错控制算法可有效降低谐振电感短路时直流侧输出电压二次谐波的含量,提高故障时系统的稳定性。

**关键词:**牵引整流器;谐振电感;电压动态补偿;低通滤波器;故障诊断与容错控制

**中图分类号:**TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25949

## Traction Rectifier Resonant Inductance Short Circuit Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control

DANG Yihan, XU Chuanfang, WANG Shaozu

(School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116000, Liaoning, China)

**Abstract:** Usually, the DC side of the traction rectifier requires a series LC resonant circuit to filter out the pulsating component of 2 times the grid frequency. When the resonant inductor on the DC side had a short-circuit fault, the pulsating component would be transferred to the motor side, the problems such as torque ripple and noise would occur in traction motor. Therefore, aimed at the short-circuit fault of traction rectifier resonant inductor, the corresponding method of fault diagnosis and fault-tolerant control was proposed. First, on the basis of establishing the mathematical model of traction rectifier and analyzing the second harmonic generation mechanism, the fault diagnosis method based on notch detector was introduced. Secondly, the fault-tolerant control algorithm of combining voltage dynamic compensation with low-pass filter was proposed. Finally, the proposed fault diagnosis and fault-tolerant control method was studied by simulation. The results show that the fault can be found accurately and quickly by the fault diagnosis method, the second harmonic content of the output voltage on the DC side also can be reduced effectively by the fault-tolerant control algorithm and improve system stability in case of failure.

**Key words:** traction rectifiers; resonant inductance; voltage compensation; low-pass filter; fault diagnosis and fault-tolerant control

近年来,中国高速铁路系统经历了非常快速的发展。由于在性能、可靠性、低损耗等方面的优势,交流电驱动系统得到了广泛的应用,并且在高速铁路牵引系统中已应用数十年之久<sup>[1-2]</sup>。图1为电气化铁路牵引系统中牵引变流器的结构图,该变流器主要由电网侧牵引整流器和电机侧牵引逆变器组成<sup>[3-4]</sup>。

高速铁路电气牵引系统的可靠性和安全性

攸关乘客生命财产安全,系统发生意外故障可能会造成非常严重的后果。列车状态检测单元可以通过在线监测状态变量的幅度或对称性来对系统进行保护,如直流链路电压传感器可以通过检测电压幅值,在幅值超过最大限制时检测故障<sup>[5]</sup>。

由于交直流变换器的单相配置,直流电压中含有2倍电网频率的纹波分量<sup>[6]</sup>。因此,牵引整流

基金项目:辽宁省交通科技项目(202318)

作者简介:党忆涵(2000—),男,硕士,主要研究方向为整流器故障诊断与容错控制,Email:13273860751@163.com

通讯作者:徐传芳(1978—),女,博士,副教授,主要研究方向为电力牵引与传动控制系统,Email:xuchuanfang@126.com

器直流侧常加入LC谐振电路来消除纹波电压。当谐振电感短路时,该脉动分量会被传至电机侧,引起电机拍频等现象。且由于该故障特征幅值较小,列车状态检测单元无法检测出相应的故障部位。这些潜在的故障可能会由于故障传播引起灾难性的后续故障。因此,对牵引系统,特别是故障频率较高的电力牵引变换器,进行故障诊断和容错控制是非常有必要的。

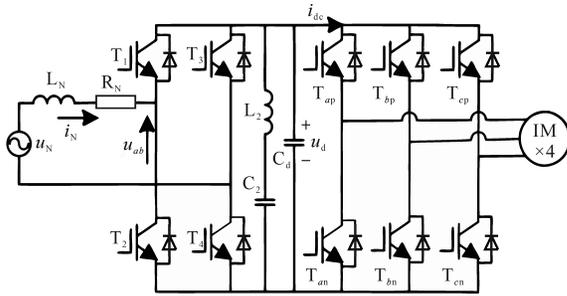


图1 牵引变流器系统的结构

Fig.1 The structure of the traction converter system

对于牵引整流器,大量文献通过基于模型、信号和知识的方法对绝缘栅双极晶体管(IGBT)以及传感器的故障诊断方法进行了系统的总结并进行验证。比如文献[7]针对单相三电平整流器,利用开路故障开关函数建立故障状态下的自适应滑模观测器实现故障开关管精确定位;文献[8]提出了一种基于状态观测器的整流器系统传感器故障诊断方法,能够对网侧电流传感器和直流电压传感器故障进行诊断;文献[9]提出了一种高速列车牵引整流器多类故障联合诊断方法,即基于故障观测器区分功率器件开路故障和网侧电流传感器故障。然而,目前对于直流侧谐振电路故障的关注较少。文献[10-12]分析了二次谐波会导致感应电机定子电压和电流中产生额外的谐波,从而导致功率损耗增加、转矩脉动、速度抖动、严重的机械振动和难以忍受的噪声等许多有害特性。文献[13]分析了直流侧谐振电感短路的故障特征,表明当谐振电感短路时,电压波动幅值较小,TCU无法检测到故障位置,在此基础上进行故障诊断,并采用基于频率补偿的容错控制方法来降低该故障对系统的影响。文献[14]对电压环及电流环的控制方法进行改进,其中电压环采用陷波器与低通滤波器相结合的方法,电流环嵌入奇次谐波重复控制器来抑制低次谐波对系统的影响,该方法对谐振电感短路故障的容错控制有一定借鉴意义。

为此,本文对牵引整流器谐振电感短路故障

诊断与容错控制算法进行了研究。首先引入基于陷波器的谐振电感短路故障诊断方法。然后采用电压动态补偿与低通滤波器结合的方法进行容错控制。结果表明该方法可以检测出故障电路,且可以使牵引整流器继续保持良好的运行性能。

## 1 牵引整流器数学模型

本文牵引整流器的控制系统采用直流侧电压与网侧电流双闭环控制。由于瞬态电流控制能够使网侧功率因数接近于1,而且具有直流侧电压稳定、网侧电流谐波分量小等优点,因此电流内环采用瞬态电流控制;电压外环则采用适用范围广、稳定性较好的PI控制器。

### 1.1 数学建模

牵引整流器主电路如图2所示。其中, $i_N$ 与 $u_N$ 分别为网侧电流与网侧电压; $i_{dc}$ 与 $u_d$ 分别为整流器直流侧输出电流与电压; $i_{dc2}$ 为谐振电路电流。

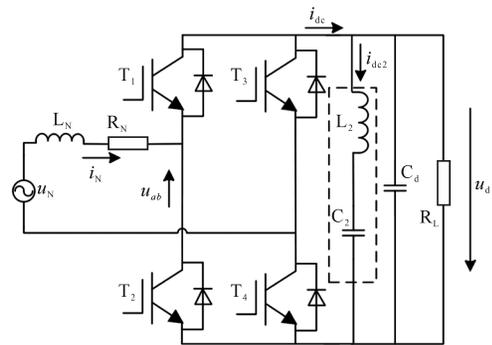


图2 牵引整流器主电路原理图

Fig.2 The main circuit schematic diagram of traction rectifier

牵引整流器网侧能量的存储与释放通过网侧电感 $L_N$ 实现,直流侧电容 $C_d$ 用于稳定电压;LC谐振电路用于滤除直流侧输出电压中的100 Hz谐波; $R_L$ 为等效负载阻抗。定义开关函数如下:

$$\begin{cases} S_A = \begin{cases} 1 & T_1 \text{导通} \\ 0 & T_2 \text{导通} \end{cases} \\ S_B = \begin{cases} 1 & T_3 \text{导通} \\ 0 & T_4 \text{导通} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

则用状态空间表达式表示的牵引整流器数学模型为<sup>[15]</sup>

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_N \\ \dot{u}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_N}{L_N} & \frac{S_0}{L_N} \\ \frac{S_0}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_N \\ u_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u_N + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \frac{u_d}{R_L} \quad (2)$$

其中

$$S_0 = S_A - S_B$$

式中: $C$ 为直流侧支撑电容与LC谐振电路的并

联等效电容。

### 1.2 二次谐波产生原理

牵引整流器在列车牵引工况下起整流作用,将单相交流电转换成直流电。通过设计合适的控制算法,在网侧电压或者负载变化时,其能够维持直流侧输出电压的稳定,同时使电网功率因数为1或接近于1<sup>[16]</sup>。

图2中虚线框内的滤波电感 $L_2$ 和滤波电容 $C_2$ 组成串联谐振回路。由于该电路的工作特性,通过调整可使交流侧功率因数为1或近似为1,在开关器件为理想器件的条件下,交流侧输入功率应当与直流侧输出功率近似相等,即

$$u_{ab}i_N = i_{dc}u_d \quad (3)$$

式中: $u_{ab}$ 为 $a$ 点、 $b$ 点之间的电压。

网侧电压为

$$u_N = \sqrt{2} U_N \sin(\omega_N t) \quad (4)$$

式中: $U_N$ 为网侧电压 $u_N$ 的有效值; $\omega_N$ 为基波角频率; $t$ 为时间常数。

当牵引整流器功率因数接近于1时,则其网侧电流可表示为

$$i_N = \sqrt{2} I_N \sin(\omega_N t) \quad (5)$$

式中: $I_N$ 为网侧电流 $i_N$ 的有效值。

由于直流母线电压幅值远大于二次脉动电压变化幅值,因此可假定直流侧输出电压 $u_d$ 为一恒定直流量 $U_d$ ,即

$$u_d = U_d \quad (6)$$

图3为牵引整流器的向量关系图,其中, $\varphi$ 为调制电压 $U_{ab}$ 与网侧电压 $U_N$ 的夹角。

根据图3可知:

$$\begin{aligned} u_{ab} &= \sqrt{2} U_{ab} \sin(\omega_N t - \varphi) \\ &= \sqrt{2} U_N \sqrt{1 + (\text{tg}\varphi)^2} \sin(\omega_N t - \varphi) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $U_{ab}$ 为 $a$ 端、 $b$ 端电压 $u_{ab}$ 中基波有效值。

由式(3)~式(7)可以推导出:

$$\begin{aligned} i_{dc}(t) &= \frac{U_{ab} \times I_N}{U_d} [\cos \varphi - \cos(2\omega_N t - \varphi)] \\ &= I_{d0} - i_{dc2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$I_{d0} = \frac{U_{ab} \times I_N}{U_d} \cos \varphi \quad (9)$$

$$I_{dc2} = -\frac{U_{ab} \times I_N}{U_d} \cos(2\omega_N t - \varphi) \quad (10)$$

从式(8)可以看出,牵引整流器的输出电流包含两部分,一部分为直流分量 $I_{d0}$ ,另一部分为交流分量 $i_{dc2}$ ,其频率为电网频率的2倍。由于交

流分量 $i_{dc2}$ 的存在,整流器的输出电压将会产生频率为电网频率2倍的脉动电压。该脉动电压会导致电机功耗增加,机械振动以及噪声等有害特性,此时通常采用谐振电路来降低该脉动电压的影响。

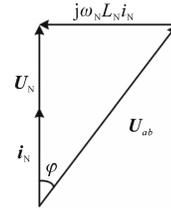


图3 牵引整流器的向量关系图

Fig.3 Vector diagram of a traction rectifier

## 2 谐振电感短路故障诊断与容错控制

近年来,牵引整流器在拓扑结构、调整策略、控制方法与电流电压谐波抑制等方面的研究取得了快速的发展。然而,由于器件老化及不可预测的外界环境等影响,牵引整流器中间谐振电路可能出现各种故障,如谐振电容短路或断路、谐振电感短路或断路等。谐振电容断路、短路以及谐振电感的断路由于其故障特征明显,牵引控制单元能够检测出故障发生,但是当谐振电感短路时,由于电压脉动较小,牵引控制单元不能立即检测出系统发生故障,从而可能引发更为严重的后果。因此,本文对谐振电感短路时的影响进行了分析,并针对该故障,提出了基于电压动态补偿的在线故障诊断与容错运行方法。

### 2.1 谐振电感短路影响分析

为了分析谐振电感短路对系统的影响,利用Matlab/Simulink对发生该故障时的情况进行仿真,图4为谐振电感 $L_2$ 发生短路的仿真模型。设置谐振电感在1s时发生短路,此时直流侧电压

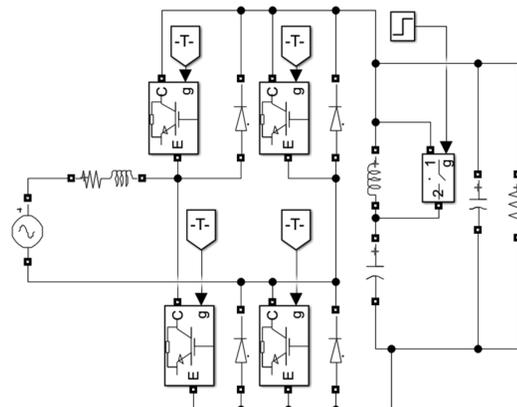


图4  $L_2$ 短路时的仿真模型

Fig.4 The simulation model of  $L_2$  short-circuit

的仿真结果如图5所示,图6为 $L_2$ 短路时直流侧电压局部放大波形,图7为 $L_2$ 短路时直流侧电压频谱分析。

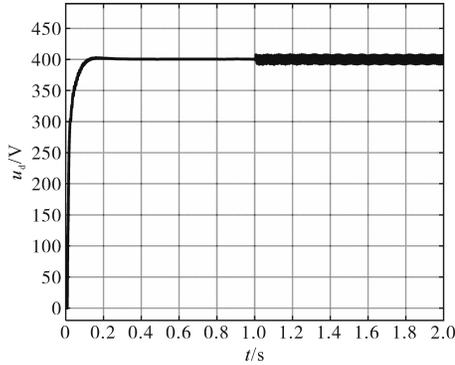


图5  $L_2$ 在1 s短路时直流侧电压波形

Fig.5 The waveform of the DC-link voltage when  $L_2$  is short-circuited and at 1 s

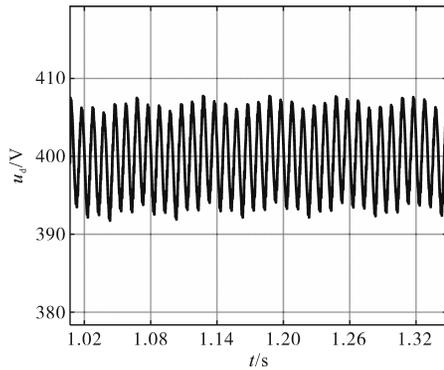


图6  $L_2$ 短路时直流侧电压局部放大波形

Fig.6 The partially amplified waveform of the DC-link voltage when  $L_2$  is short-circuited

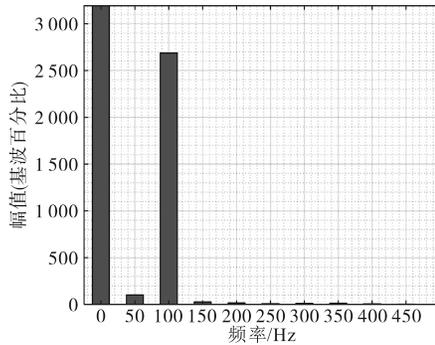


图7  $L_2$ 短路时直流侧电压频谱分析

Fig.7 The frequency spectrum analysis of DC voltage when  $L_2$  short is circuited

由图5~图7可以看出,1 s谐振电感短路时,直流侧输出电压的二次谐波含量较高,导致直流电路电压幅值波动增加。此时谐振电容 $C_2$ 与直流侧支撑电容 $C_d$ 并联,脉动电压相对较小。因为故障特征不是特别明显,牵引控制单元可能无法对于该故障及时检测到,从而导致潜在故障,甚至会导致更加严重的后果。

## 2.2 谐振电感短路故障诊断方法

基于陷波器故障诊断方法的基本思想是对直流侧输出电压经过陷波器后得到的脉动电压与实际输出电压进行比较,当两者的差值超过设定的阈值后,故障诊断单元就能够检测到该故障。陷波器也称之为带阻滤波器,它是阻止某些特定频率的信号通过的器件,而对于其它频率则类似直通。二阶陷波器的典型传递函数为

$$G(s) = A_0 \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + \omega_n s/Q + \omega_n^2} \quad (11)$$

式中: $A_0$ 为陷波器的增益; $\omega_n$ 为特征角频率,即消除谐波的频率; $Q$ 为品质因数,即陷波器的频率特性。

为了实现数字化设计,采用双线性变换将式(11)从 $s$ 域的表达式转为 $z$ 域的表达式。双线性变换的表达式为

$$s = \frac{2z - 1}{Tz + 1} \quad (12)$$

式中: $T$ 为离散时间的控制周期。

将式(12)代入式(11),得到陷波器在 $z$ 域的传递函数为

$$G(z) = A_0 \frac{1 + \frac{2\omega_n^2 T^2 - 8}{\omega_n^2 T^2 + 4} z^{-1} + z^{-2}}{1 + \frac{2\omega_n T}{Q(\omega_n^2 T^2 + 4)} + \frac{2\omega_n^2 T^2 - 8}{\omega_n^2 T^2 + 4} z^{-1} + [1 - \frac{2\omega_n T}{Q(\omega_n^2 T^2 + 4)}] z^{-2}} \quad (13)$$

然后,可以通过直流侧电路电压与经过陷波器输出的电压差值 $\tilde{U}_d$ 获得脉动电压。从而可以通过监测脉动电压的幅值来检测谐振电感是否发生短路故障。图8为故障诊断结构框图。其中, $E$ 为使能信号, $d$ 为所设定的阈值。

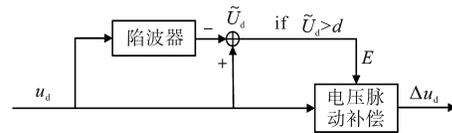


图8  $L_2$ 短路故障诊断结构

Fig.8 The structure of circuit fault diagnosis when  $L_2$  is short-circuited

## 2.3 谐振电感短路容错控制

基于2.2节所设计的谐振电感短路故障诊断方法可知,当脉动电压幅值达到诊断阈值,系统就能够自动检测出谐振电感短路,同时激活容错控制方法。本文采用电压动态补偿结合低通滤波器的控制方法。该方法结合两个控制方法的优点,既能利用动态补偿保持系统的动态特性,

又能利用低通滤波器提升滤波范围,达到很好的容错效果。

### 2.3.1 电压脉动补偿控制原理

系统实际运行时,由于网侧电容的存在,网侧电流  $i_N$  会滞后网侧电压  $u_N$ ,即

$$i_{N1} = \sqrt{2} I_N \sin(\omega t - \theta) \quad (14)$$

式中:  $i_{N1}$  为网侧滞后电流;  $\theta$  为网侧电流  $i_N$  滞后网侧电压  $u_N$  的相位角。

根据网侧电压  $u_N$ 、网侧滞后电流  $i_{N1}$  可以得到网侧输入功率:

$$P_{in} = u_N i_{N1} = 2U_N I_N \sin(\omega t) \sin(\omega t - \theta) \quad (15)$$

当整流器工作在整流模式时,电流滞后于电压的相位角为  $0^\circ$ ; 在再生制动模式下工作时,滞后的相位角为  $180^\circ$ 。因此,式(15)可简化为

$$P_{in} = U_N I_N \cos\theta - U_N I_N \cos(2\omega t) \cos\theta \quad (16)$$

采用平均等效模型可以得到直流侧输出的瞬时功率,即

$$P_{out} = \bar{U}_d \bar{I}_{dc} + C_d \bar{U}_d \frac{d\Delta u_d}{dt} \quad (17)$$

式中:  $\bar{U}_d, \bar{I}_{dc}$  分别为输出电压  $u_d$  平均值、输出电流  $i_{dc}$  平均值;  $\Delta u_d$  为输出电压的波动值。

假设开关器件在换相时功率损耗为零,且忽略网侧电阻的功率损耗以及电感的能量储存,如下式所示:

$$P_{in} = P_{out} \quad (18)$$

则输入、输出功率对应的稳态分量和波动分量相等。联立式(16)~式(18)可得:

$$\begin{cases} \bar{U}_d \bar{I}_{dc} = U_N I_N \cos\theta \\ C_d \bar{U}_d \frac{d\Delta u_d}{dt} = -U_N I_N \cos(2\omega t) \cos\theta \end{cases} \quad (19)$$

由式(19)可得:

$$\Delta u_d = -\frac{\bar{U}_d \sin(2\omega t)}{2\omega C_d R_L} \quad (20)$$

进一步简化为

$$\Delta u_d = -\frac{\bar{I}_{dc} \sin(2\omega t)}{2\omega C_d} \quad (21)$$

综上所述,该脉动电压的大小与直流侧平均电压、支撑电容及负载有关。由于牵引整流器系统中,直流侧电压及支撑电容为定值,故该脉动电压仅与负载有关。

### 2.3.2 电压动态补偿与低通滤波器相结合

为了消除直流电压所含的脉动分量,较为直接的方法是利用低通滤波器。但低通滤波器会

使系统的动态性能有所下降,影响整个系统的控制精度<sup>[17]</sup>。因此,本文利用电压动态补偿控制来对系统的动态性能进行改善,同时也可以通过低通滤波器来提升滤波范围,使脉动电压达到较好的抑制效果。

本文采用直流电压动态补偿与低通滤波器相结合的方法对牵引整流器系统进行容错控制,具体框图如图9所示。其中,  $I_N^*$  为电流内环的输入指令电流幅值,  $U_d^*$  为直流侧给定电压, LPF 表示传统的二阶低通滤波器,其表达式为

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2} \quad (22)$$

式中:  $\omega_n$  为特征角频率;  $Q$  为二阶低通滤波器的品质因数。

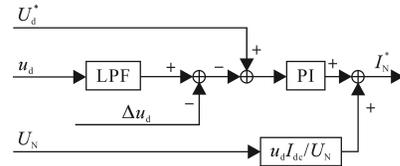


图9 直流电压动态补偿与低通滤波器相结合的控制框图

Fig.9 The control block diagram of DC voltage dynamic compensation combined with low-pass filter

根据上文设计的牵引整流器谐振电感短路故障诊断与容错控制方法,可总结为如图10所示的牵引整流器谐振电感短路故障诊断与容错控制系统框图。在故障诊断模块中,当直流侧输出电压与经过陷波器后输出电压的差值超过阈值时,故障诊断单元将检测到谐振电感短路;然后,系统将直流侧电压的反馈值经低通滤波器,再结合电压脉动补偿的控制方法来完成容错控制。

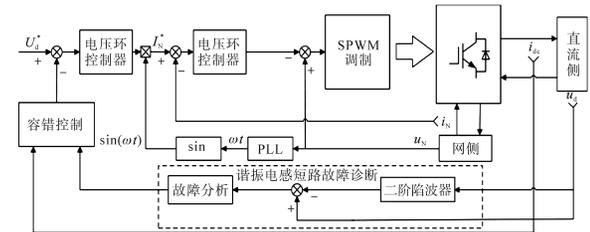


图10 谐振电感短路故障诊断与容错控制系统框图

Fig.10 Block diagram of fault diagnosis and fault-tolerant control system when resonant inductor is short-circuited

## 3 仿真验证

在 Matlab/Simulink 环境下搭建牵引整流器仿真模型,模拟谐振电感短路故障以证明所提出容错控制算法的有效性。整流器采用单极性 SP-

WM控制算法,在其控制系统稳定运行后,假设1 s时发生谐振电感短路故障。图11为谐振电感短路故障诊断与容错控制仿真模型。牵引整流器参数如下:网侧电感 $L_N=5$  mH,网侧电阻 $R_N=0.2$

$\Omega$ ,直流侧支撑电容 $C_d=3\ 000$   $\mu\text{F}$ ,等效负载电阻 $R_L=20$   $\Omega$ ,直流侧滤波电感 $L_2=0.99$  mH,直流侧滤波电容 $C_2=2\ 340$   $\mu\text{F}$ ,网侧电压有效值 $u_N=220$  V,直流侧给定电压 $u_d^*=400$  V,开关频率 $f_s=1$  kHz。

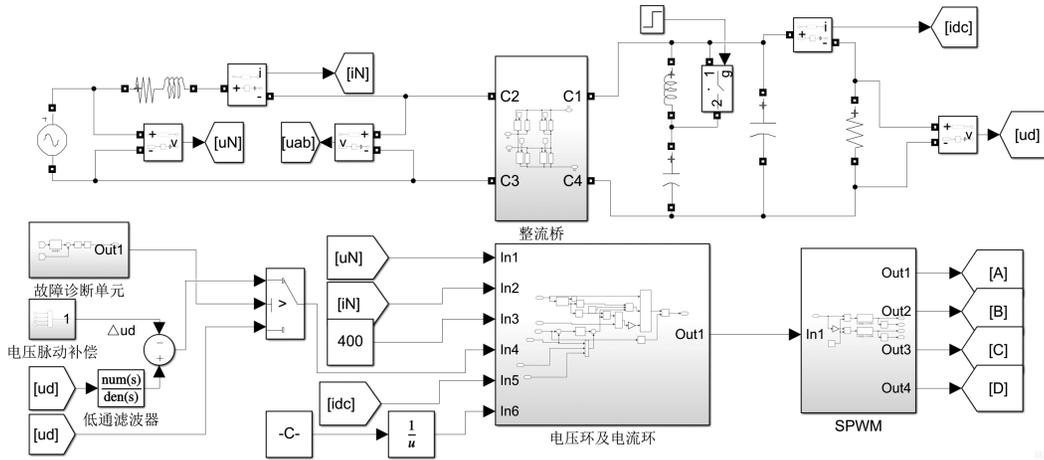


图11 谐振电感短路故障诊断与容错控制仿真模型

Fig.11 The simulation model of resonant inductor short-circuit fault diagnosis and fault-tolerant control

系统正常工作下直流侧输出电压波形如图12所示,图13为系统正常工作时直流侧电压的频谱分析。由图12可以看出,整流器的输出电压能够保持在400 V左右,且波动较小;由图13可以看出,此时输出电压中二次谐波的含量较低。仿真结果说明基本控制策略可行有效。

为验证本文所提出的故障诊断与容错控制算法的有效性,对谐振电感1 s时发生短路故障的情况进行仿真。图14为谐振电感短路故障标志。加入容错控制算法后,系统直流侧输出波形如图15所示,直流侧输出电压的频谱分析如图16所示。

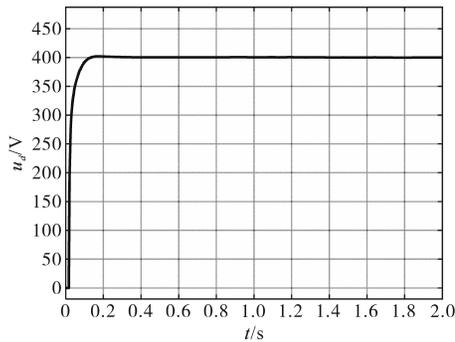


图12 系统正常工作时直流侧电压波形

Fig.12 Waveform of DC voltage when the system is working normally

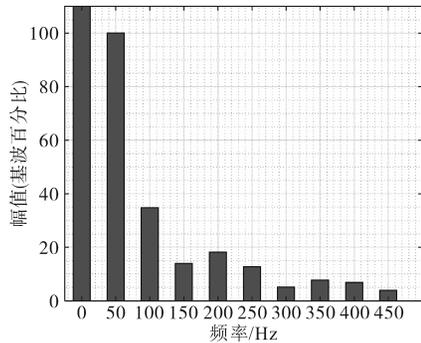


图13 系统正常工作时直流侧电压频谱分析

Fig.13 The frequency spectrum analysis of DC voltage when the system is working normally

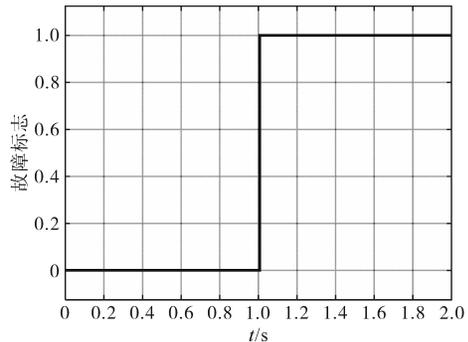


图14 谐振电感短路故障标志

Fig.14 The short circuit fault of resonant inductor

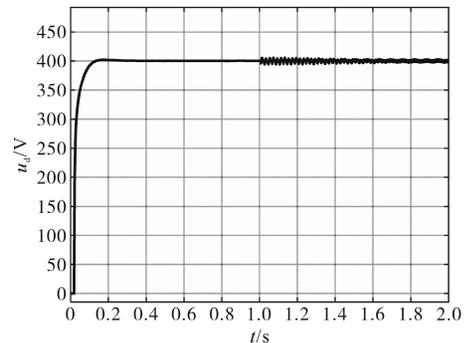


图15 加入容错控制后直流侧电压波形

Fig.15 The voltage waveform of DC side after adding fault-tolerant control

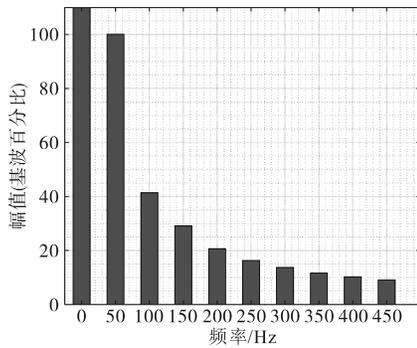


图16 加入容错控制后直流侧电压频谱分析

Fig.16 The frequency spectrum analysis of DC voltage after adding fault-tolerant control

由图15及图16可以看出,加入故障诊断与容错控制算法后,在谐振电感短路时,系统能够及时检测到故障发生并自动触发故障容错控制算法,且能够有效降低直流侧输出电压中脉动电压的幅值。将图16与图7和图13对比可以看出,相对于故障时二次谐波的含量,在采用本文所提出的容错控制算法后,二次谐波含量明显下降,基本与系统正常工作时二次谐波的含量相同。

## 4 结论

本文针对牵引整流器谐振电感短路故障对系统的影响,对其故障特征、故障诊断方法和容错控制方法进行了系统研究,研究结论如下:

1)通过理论分析及仿真表明发生该故障时,直流侧输出电压二次谐波的含量较高,且电压脉动峰值较小;

2)基于陷波器的故障诊断方法,只需阈值即可检测谐振电感短路故障,且能够快速准确诊断出谐振电感短路故障;

3)提出的电压补偿与低通滤波器相结合的容错控制方法,能够有效降低谐振电感短路故障时直流侧输出电压的二次谐波分量,实现系统在故障条件下仍然能够维持较为稳定运行状态的目的,但对于其余次谐波分量不能起到较好的抑制效果。

### 参考文献

- [1] CHEOK A D, KAWAMOTO S, MATSUMOTO T, et al. High power AC/DC converter and DC/AC inverter for high speed train applications[C]//2000 TENCON Proceedings Intelligent Systems and Technologies for the New Millennium, IEEE, 2000, 1: 423-428.
- [2] GONG Z, HUANG D, MA L, et al. Grid voltage sensor fault-tolerant control for single-phase two-level PWM rectifier[J]. IET Electric Power Applications, 2022, 16(7): 776-788.
- [3] GONG Z, HUANG D, JADOON H U K, et al. Sensor-fault-estimation-based tolerant control for single-phase two-level PWM rectifier in electric traction system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12274-12284.
- [4] XIE D, PU J, GE X. Current residual-based method for open-circuit fault diagnosis in single-phase PWM converter[J]. IET Power Electronics, 2018, 11(14): 2279-2285.
- [5] 苟斌. 电力牵引变流器故障诊断与容错控制技术[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [6] GOU Bin. Research on fault diagnosis and fault tolerance control technology of electric traction converter[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [7] SONG W, SMEDLEY K, FENG X. One-cycle control of induction machine traction drive for high speed railway part II: square wave modulation region[C]//2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE, 2011: 1003-1009.
- [8] 许水清, 王健, 胡友强, 等. 基于自适应滑模观测器的高铁牵引系统单相三电平整流器开路故障诊断[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(11): 1920-1930.
- [9] XU Shuiqing, WANG Jian, HU Youqiang, et al. Open-circuit fault diagnosis of single-phase three-level rectifier in high-speed train traction system based on adaptive sliding mode observer[J]. Control Theory & Technology, 2023, 40(11): 1920-1930.
- [10] GOU Bin, PU Junkai, GE Xinglai, et al. A fault diagnosis and fault-tolerant control method based on state observer for sensors in single-phase PWM rectifiers[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(2): 44-51.
- [11] 陶宏伟, 彭涛, 杨超, 等. 高速列车牵引整流器多类故障联合诊断方法[J]. 自动化学报, 2019, 45(12): 2294-2302.
- [12] TAO HongWei, PENG Tao, YANG Chao, et al. Joint fault diagnosis method of multiclass faults for traction rectifier in high-speed train[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(12): 2294-2302.
- [13] KLIMA J, CHOMAT M, SCHREIER L. Analytical closed-form investigation of PWM inverter induction motor drive performance under DC bus voltage pulsation[J]. IET Electric Power Applications, 2008, 2(6): 341-352.
- [14] LI H B, ZHANG K, ZHAO H. DC-link active power filter for high-power single-phase PWM converters[J]. Journal of Power Electronics, 2012, 12(3): 458-467.
- [15] LIU J L, ZHANG Y. Current pulsation suppression method based on power current closed-loop control for a PMSM under fluctuating DC-link voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 37(1): 761-770.
- [16] GOU B, GE X, PU J, et al. A fault diagnosis and fault tolerant control method for DC-link circuit using notch filter in power traction converter[C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), IEEE, 2016: 3230-3235.

- [14] 刘通,刘文生,赵卫. 单相 PWM 整流器低次电流谐波抑制方法研究[J]. 微电机,2018,51(4): 55-61.  
LIU Tong, LIU Wensheng, ZHAO Wei. Research on low-order harmonic current elimination method of single-phase PWM rectifiers[J]. Micromotors, 2018, 51(4): 55-61.
- [15] 夏金辉,郭源博,张晓华. 单相脉宽调制整流器传感器故障诊断与容错控制[J]. 电工技术学报,2017,32(20): 160-170.  
XIA Jinhui, GUO Yuanbo, ZHANG Xiaohua. Sensor fault diagnosis and fault tolerant control for single-phase PWM rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 160-170.
- [16] SHIMIZU T, WADA K, NAKAMURA N. Flyback-type single-phase utility interactive inverter with power pulsation decoupling on the DC input for an AC photovoltaic module system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5): 1264-1272.
- [17] 张东林. 牵引变流器中间环节直流电压脉动抑制方法的研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.  
ZHANG Donglin. The research on the method of suppressing the ripple of DC-Link voltage for the middle term of traction converter[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2016.
- [18] 张承畅,罗建昌,张华誉,等. 基于滑模电压控制的级联 H 桥整流器研究[J]. 电气传动,2018,48(11): 34-38.  
ZHANG Chengchang, LUO Jianchang, ZHANG Huayu, et al. Research on cascaded H-bridge rectifier based on sliding mode voltage control[J]. Electric Drive, 2018, 48(11): 34-38.
- [19] 熊成林,宋智威,黄路,等. 基于谐波补偿的单相 PWM 整流器虚拟磁链模型预测算法[J]. 电机与控制学报,2020,24(11):93-101.  
XIONG Chenglin, SONG Zhiwei, HUANG Lu, et al. A virtual-flux-linkage model predictive control of single-phase PWM rectifier based on harmonic compensation[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(11): 93-101.
- [20] CHEN H, JIANG B. A review of fault detection and diagnosis for the traction system in high-speed trains[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 21(2): 450-465.
- [21] CHEN H T, JIANG B, DING S X, et al. Data-driven fault diagnosis for traction systems in high-speed trains: a survey, challenges, and perspectives[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 23(3): 1700-1716.
- [22] 宋玉明,宋文胜,余彬. 基于单周期控制的牵引电机拍频抑制算法数字化实现[J]. 中国电机工程学报,2019,39(10): 3007-3015.  
SONG Yuming, SONG Wensheng, YU Bin. Digitized implementation of beat-frequency suppression algorithm based on one-cycle control for traction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 3007-3015.

收稿日期:2024-05-20

修改稿日期:2024-08-29