

基于 HIL 仿真试验平台的动车组电机 缺相故障研究

郭 洋, 任宝珠, 姚大顺, 于晓蔓, 姜宋阳
(中车大连电力牵引研发中心有限公司, 辽宁 大连 116052)

摘 要: 牵引控制系统中异步电机定子绕组发生故障, 导致定子绕组不对称连接, 严重影响动车组 (EMU) 牵引控制系统的安全稳定运行。针对牵引控制系统中异步电机定子一相绕组缺相故障, 考虑端电压约束条件, 推导电机一相缺相的数学模型, 并基于硬件在环 (HIL) 仿真试验平台对数学模型进行验证。详细阐述了 HIL 测试平台的系统框架, 设计实现方法, 软硬件连接配置。将 Xilinx 软件下搭建的电机缺相数学模型下载至 dSPACE 仿真机上运行, 与牵引控制单元 (TCU) 连接, 进行 HIL 仿真, 通过检测算法对电机缺相故障作出判断与处理。结果表明该仿真测试平台的有效性, 可提供接近真实的测试环境, 为牵引控制系统电机缺相故障诊断与算法功能开发提供了理论基础和设计依据。

关键词: 动车组; 硬件在环仿真; 电机缺相; 电力牵引控制系统

中图分类号: TM307.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)11-0048-07

doi: 10.12177/emca.2022.125

Research on Motor Open Phase Fault of EMU Based on HIL Simulation Test Platform

GUO Yang, REN Baozhu, YAO Dashun, YU Xiaoman, JIANG Songyang
(CRRC Dalian R&D Co., Ltd., Dalian 116052, China)

Abstract: When the stator winding of asynchronous motor fails in the traction control system, the stator winding is asymmetrically connected, which seriously affects the safe and stable operation of the traction control system of electric locomotive. Aiming at the open phase of the stator phase winding of the asynchronous motor in the traction control system, considering the terminal voltage constraint, the mathematical model of the motor open phase circuit is derived, and the mathematical model is verified based on the hardware-in-the-loop (HIL) simulation test platform. The system framework, design and implementation method, hardware and software connection configuration of HIL test platform are described in detail. The motor open phase mathematical model built under Xilinx software is downloaded to the dSPACE simulator for operation, connected with the traction control unit (TCU), and the HIL simulation experiment is carried out. The motor open phase is judged and handled through the detection algorithm. The experimental results verify the effectiveness of the simulation test platform. In a near real test environment, a theoretical basis and design basis for the motor open phase diagnosis and algorithm function development of the traction control system is provided.

Key words: electric multiple units (EMU); hardware-in-the-loop (HIL) simulation; motor open phase; electric traction control system

收稿日期: 2022-09-05; 收到修改稿日期: 2022-09-26

作者简介: 郭 洋 (1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力电子与电力传动半实物仿真。

0 引言

电力牵引传动系统是动车组(EMU)重要的核心组成部分,其高可靠性是高速列车稳定运行的重要保障。牵引电机作为电力牵引系统中能量转换的载体,工作环境存在大量的电磁耦合,导致牵引电机故障率较高,因此完善牵引电机故障检测算法变得至关重要。牵引变流系统的功率等级较高,需要到具有资质的特定试验场所进行试验,考虑到试验场地造价高,同时也存在安全隐患,耗费大量的人力物力资源,因此在项目建立初期,优化故障检测算法尤为重要。通过硬件在环(HIL)仿真平台^[1]搭建牵引电机故障工况,模拟电机定子绕组缺相时的故障状态和特征,在项目初期及时发掘软件在设计实现中存在的缺陷,对故障检测算法进行测试优化,节省了大量的人力物力资源。因此,设计EUM牵引电机缺相故障HIL仿真测试平台是十分有必要的。

近年来,诸多学者对电机缺相故障及诊断技术进行了一系列研究。文献[2]提出了一种不降阶方式建立多相感应电机模型,研究了多相感应电机在不同缺相工况下的电流特性,由于多相电机具有冗余特性,发生故障后仍可以运行。文献[3]在异步电机基本结构及运行原理的基础上,分析了异步电动机常见的电气故障和机械故障以及发生的原因,对转子断条、定子绕组断路及电源缺相故障进行分析。于明星等^[4]通过对电机温度场模型做出合理假设,定义温度场边界条件,建立定子绕组等效热模型,计算正常运行和缺相运行时的温度场分布,分析缺相后各相绕组温度变化情况。文献[5-6]基于感应电机的数学模型,以MATLAB/Simulink为工具对电机定子绕组故障瞬态过程进行了建模仿真。

综上所述,基于异步电动机在静止坐标系下的数学模型,根据缺相故障下定子绕组的接线,推导出端电压的约束条件,基于MATLAB/Simulink中Xilinx软件建立异步电机定子绕组缺相数学模型,并采用dSPACE实时仿真器对电力牵引控制系统进行了HIL仿真,对实时仿真系统的构成进行了分析,通过电机缺相实时模型与牵引控制单元(TCU)连接,用于牵引系统电机缺相故障诊断与算法功能的开发测试和验证。

1 异步电机数学模型的建立

HIL实时仿真器是半实物仿真测试平台的核心,包括四象限模型、逆变器模型和电机模型,为了使实时仿真系统更加贴近EMU真实的工作环境,对仿真模型的精度提出了更高的要求。

1.1 正常状态下异步电机数学模型的建立

本文先介绍电机在正常工况时,电机模型建立的过程^[7],图1为对称的三相三线制电路结构图。设定子边电源电压为 e_{ag} 、 e_{bg} 、 e_{cg} ,为了能用电源电压来表示定子的各相电压,假设电机定子中点 o 与定子边电源中点 g 间电压为 u_{og} ,定子各相端电压约束条件可表示为

$$\begin{cases} u_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} = e_{ag} - u_{og} \\ u_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} = e_{bg} - u_{og} \\ u_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} = e_{cg} - u_{og} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{as} 、 u_{bs} 、 u_{cs} 为定子绕组三相相电压; R_s 为定子绕组电阻; i_{as} 、 i_{bs} 、 i_{cs} 为定子三相绕组电流; φ_{as} 、 φ_{bs} 、 φ_{cs} 为定子三相磁链; e_{ag} 、 e_{bg} 、 e_{cg} 为定子边三相电源电压; u_{og} 为电机定子中点 o 与定子边电源中点 g 间电压。

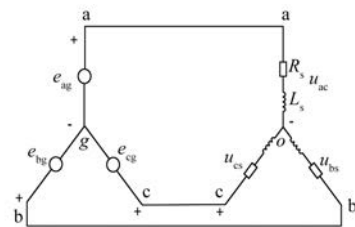


图1 三相异步电机定子绕组示意图

为了求解出 u_{og} ,可以将式(1)的3个方程式相加:

$$u_{as} + u_{bs} + u_{cs} = R_s (i_{as} + i_{bs} + i_{cs}) + \frac{d}{dt}(\varphi_{as} + \varphi_{bs} + \varphi_{cs}) = e_{ag} + e_{bg} + e_{cg} - 3u_{og} \quad (2)$$

对于三相三线制连接方式,则:

$$i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad (3)$$

进一步还可以证明:

$$\varphi_{as} + \varphi_{bs} + \varphi_{cs} = 0 \quad (4)$$

则有:

$$u_{as} + u_{bs} + u_{cs} = 0 \quad (5)$$

故,可得:

$$u_{og} = \frac{1}{3}(e_{ag} + e_{bg} + e_{cg}) \quad (6)$$

将定子各相电压写成矩阵形式,如下:

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ag} \\ e_{bg} \\ e_{cg} \end{bmatrix} \quad (7)$$

异步电机三相原始模型相当复杂,通过坐标变换能够简化数学模型,便于分析和计算。本文介绍了静止两相 α - β - n 正交坐标系中的数学模型,包括端电压约束条件、电磁方程、电磁转矩和机械运动方程。

端电压约束条件为

$$\begin{cases} u_{\alpha} = \frac{2}{3}e_{ag} - \frac{1}{3}e_{bg} - \frac{1}{3}e_{cg} \\ u_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(e_{bg} - e_{cg}) \end{cases} \quad (8)$$

电磁方程式为

$$\begin{cases} \varphi_{\alpha s} = \int \left[u_{\alpha} + \frac{R_s}{L_{ls}}(\varphi_{m\alpha} - \varphi_{\alpha s}) \right] dt \\ \varphi_{\beta s} = \int \left[u_{\beta} + \frac{R_s}{L_{ls}}(\varphi_{m\beta} - \varphi_{\beta s}) \right] dt \\ \varphi_{\alpha r} = \int \left[-\omega\varphi_{\beta r} + \frac{R_r}{L_{lr}}(\varphi_{m\alpha} - \varphi_{\alpha r}) \right] dt \\ \varphi_{\beta r} = \int \left[\omega\varphi_{\alpha r} + \frac{R_r}{L_{lr}}(\varphi_{m\beta} - \varphi_{\beta r}) \right] dt \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\varphi_{\alpha s}$ 、 $\varphi_{\beta s}$ 分别为定子静止坐标系 α 轴、 β 轴磁链; $\varphi_{\alpha r}$ 、 $\varphi_{\beta r}$ 分别为转子旋转坐标系 α 轴、 β 轴磁链; R_r 为转子绕组电阻; ω 为转子角速度; L_{ls} 、 L_{lr} 分别为定子漏感和转子漏感; $\varphi_{m\alpha}$ 、 $\varphi_{m\beta}$ 分别为 α 轴、 β 轴互感磁链。

定义 $\varphi_{m\alpha}$ 、 $\varphi_{m\beta}$ 为 α 轴、 β 轴互感磁链:

$$\begin{cases} \varphi_{m\alpha} = \frac{L_m^*}{L_{ls}}\varphi_{\alpha s} + \frac{L_m^*}{L_{lr}}\varphi_{\alpha r} \\ \varphi_{m\beta} = \frac{L_m^*}{L_{ls}}\varphi_{\beta s} + \frac{L_m^*}{L_{lr}}\varphi_{\beta r} \end{cases} \quad (10)$$

电磁转矩方程如下:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\varphi_{\alpha s} i_{\beta s} - \varphi_{\beta s} i_{\alpha s}) \quad (11)$$

机械运动方程如下:

$$\omega = \frac{p}{2J} \int (T_e - T_L) dt \quad (12)$$

式中: p 为电机的极对数; J 为转动惯量。

1.2 异步电机断路时电机数学模型建立

图 2 所示为异步电机工作在缺相工况下的定子绕组断路示意图。假设当 $t > 0$ 时,开关由位置 1 断开,发生了电源 A 相对电机中点缺相故障。缺相后, A 相电流为 0,即:

$$i_{as} = 0 \quad (13)$$

考虑端电压约束条件,有:

$$\begin{cases} u_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} = \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\ u_{bs} = e_{bg} - u_{og} \\ u_{cs} = e_{cg} - u_{og} \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)的 u_{bs} 和 u_{cs} 相加,并求解出电机定子中点 o 与定子边电源中点 g 间电压 u_{og} 为

$$\begin{cases} u_{og} = \frac{1}{2} [(e_{bg} + e_{cg}) - (u_{bs} + u_{cs})] = \\ \frac{1}{2} \left\{ (e_{bg} + e_{cg}) - \left[R_s(i_{bs} + i_{cs}) + \frac{d}{dt}(\varphi_{bs} + \varphi_{cs}) \right] \right\} \end{cases} \quad (15)$$

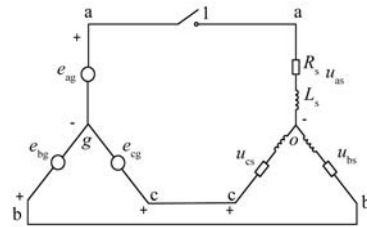


图 2 三相异步电机定子绕组断路示意图

通过对 o 点运用节点电流法,则有:

$$i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad (16)$$

通过上述分析可知,当电机 A 相发生缺相后, A 相的电流为 0, B 相和 C 相的电流互为反相。

如果将 a-b-c 变量形式的电流变换到静止坐标系 α - β - n 坐标系下,则有:

$$\begin{cases} i_{\alpha s} = \frac{2}{3}i_{as} - \frac{1}{3}i_{bs} - \frac{1}{3}i_{cs} = 0 \\ i_{ns} = \frac{\sqrt{2}}{3}(i_{as} + i_{bs} + i_{cs}) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

如果用 $\alpha\text{-}\beta\text{-}n$ 变量形式的磁链表示 a-b-c 变量形式的磁链,同时考虑式(17)所示的 α 轴电流与 n 轴电流间的关系,可以化简 b、c 磁链之和,可得:

$$\begin{aligned} \varphi_{bs} + \varphi_{cs} = & -\varphi_{\alpha s} + \sqrt{2}\varphi_{ns} = \\ & -(L_{ls} \cdot i_{\alpha s} + \varphi_{m\alpha}) + \sqrt{2} \cdot L_{ls} \cdot i_{ns} = -\varphi_{m\alpha} \end{aligned} \quad (18)$$

将式(18)代入式(15)中得到:

$$u_{og} = \frac{1}{2} \left[(e_{bg} + e_{cg}) + \frac{d}{dt}\varphi_{m\alpha} \right] \quad (19)$$

在各相磁链的逆变换中可以求得:

$$\begin{aligned} \varphi_{as} = & \varphi_{\alpha s} + \frac{1}{\sqrt{2}}\varphi_{ns} = \\ (L_{ls}i_{\alpha s} + \varphi_{m\alpha}) + & \frac{1}{\sqrt{2}}L_{ls}i_{ns} = \varphi_{m\alpha} \end{aligned} \quad (20)$$

所以:

$$\begin{cases} u_{as} = \frac{d}{dt}\varphi_{m\alpha} \\ u_{bs} = \frac{1}{2} \left(e_{bg} - e_{cg} - \frac{d\varphi_{m\alpha}}{dt} \right) \\ u_{cs} = \frac{1}{2} \left(e_{cg} - e_{bg} - \frac{d\varphi_{m\alpha}}{dt} \right) \end{cases} \quad (21)$$

变换到 $\alpha\text{-}\beta\text{-}n$ 坐标系下:

$$\begin{cases} u_{\alpha s} = \frac{d\varphi_{m\alpha}}{dt} \\ u_{\beta s} = \frac{1}{\sqrt{3}}(e_{cg} - e_{bg}) \\ u_{ns} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

式(22)为异步电机定子绕组 A 相发生故障时的数学模型。

2 半实物仿真平台设计

2.1 EMU 牵引系统主电路及缺相故障诊断

本文基于复兴号 CR200J EMU 项目进行半实物仿真,如图 3 所示为动力集中 EMU 的牵引变流器主电路图,该牵引变流器从牵引变压器二次侧引出 2 组分别供给 2 组四象限整流器,2 组四象限整流器并联后向中间直流环节供电,直流环节后端带有 2 组牵引逆变器,2 组牵引逆变器分别向 1 个转向架上的 2 台异步电机供电。

当 EMU 牵引电机发生缺相故障时,软件程序能够识别出故障,并采取相应的保护策略。电力机车在启动阶段,低速无牵引力的情况下,首先要

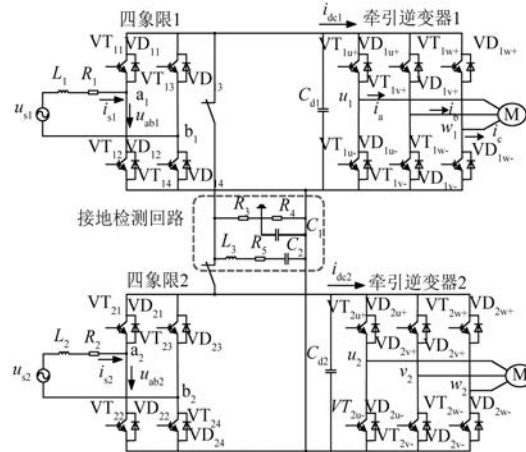


图 3 动力集中 EMU 的牵引变流器主电路图

经过预励磁,即建立转子磁场,励磁功率为电机功率的 3%~5%,以复兴号动力集中 EMU 的牵引电机为例,额定功率为 1 250 kW,则励磁功率为 37.5~62.5 kW,励磁电流为 17~29 A。因为牵引变流器的功率等级较高,长期运行在高负荷高温的恶劣环境中,所以启动电流不能低于 17 A,同时为了防止电机低速小电流工况误报缺相故障,根据工程经验设置缺相电流为 25 A。电机缺相时,会出现三相不平衡的状态,根据国家标准定义三相不平衡度的标准是 $\geq 10\%$,由三相不平衡度的公式,即三相不平衡度 = (三相电流平均值 - 任一相电流) $\times 100\%$ / 三相电流平均值,选择电机缺相时,任两相电流绝对值大于 55 A。故电机缺相故障检测逻辑:若 TCU 检测到方向手柄处于非零位且车速 v 小于 0.1 km/h,任意两相电流绝对值大于 55 A,其余一相电流绝对值小于 25 A,持续 1 s,报电机缺相故障。故障后,逆变器封锁脉冲,检测流程图如图 4 所示。

2.2 基于 dSPACE 实时仿真系统构成

dSPACE 实时系统具有实时性强、可靠性高、扩充性好等优点。目前在汽车、电力传动行业得到了广泛应用。本文所采用的系统是基于 DS1006 处理器板卡系统开发平台,DS1006 处理器板卡具备极强的处理计算能力,适用于有复杂计算需求的 HIL 测试应用。通过 dSPACE 的 PHS 总线,DS1006 可与 dSPACE 的其他 I/O 板卡连接以扩展系统。基于串行处理器的半实物仿真步长一般为 50 μs 左右,即频率为 20 kHz,接近开关器件脉冲频率,仿真结果将会出现失真的情况。为

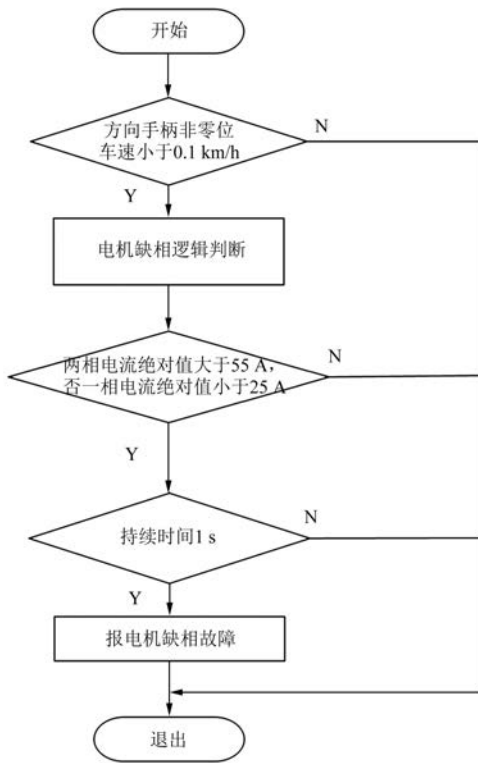


图4 EMU 电机缺相故障检测流程图

了解决这一问题,引入仿真步长能够达到 10 ns 级的 FPGA 并行处理芯片,使得系统更加适合高开关频率的电力电子电路仿真。

dSPACE 软件环境的功能强大且使用方便,拥有简便实用的自动代码生成/下载和试验/调试的整套工具软件。dSPACE 在 MATLAB 中集成了代码生成及下载软件,完全可以达到与 MATLAB 无缝衔接,这样可以使用户更方便地在 MATLAB 中直接调用 dSPACE 的各种库。同时 dSPACE 还为用户提供了软件组合工具包 CDP,主要包括 RTI、ControlDesk 等。这样在 MATLAB/Simulink 支持下可以实现从控制系统的分析、设计、建模、离线仿真、设置 I/O 参数,生成代码连接编译及下载到试验的全过程。

3 半实物仿真验证

3.1 仿真系统设置

为了验证本文方案的有效性,基于 dSPACE 实时系统对 CR200J 型 EMU 牵引系统的主电路拓扑进行实时数字模型模拟。采用 CR200J 型 EMU TCU 进行程序设计,两者通过脉冲光纤线、硬线及连接器实现信号交互,构成 HIL 平台。平台结构如图 5 所示,TCU 采用 TMSF28335 主处理器。其中,DL850 示波器在 dSPACE 仿真机后端分线端子排上采集信号,中间电压信号变比为 50 mA/4 000 V,逆变器电机电流信号变比为 250 mA/1 000 A。

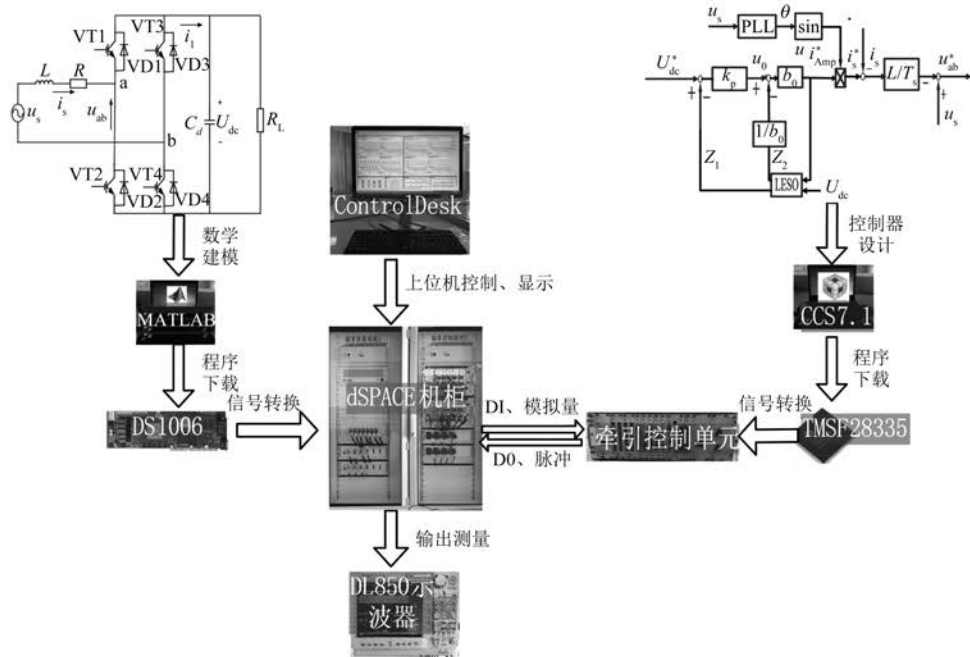


图5 HIL 实时仿真系统结构

采用 MATLAB/Simulink 软件搭建复兴号动车集中 EMU 牵引逆变器主电路模型,如图 6 所示。主要分为三部分:第一部分是弓网、四象限模

型;第二部分是 2 组逆变器及电机缺相模型;第三部分为处理器接口模型。其中,牵引变流器参数如表 1 所示。

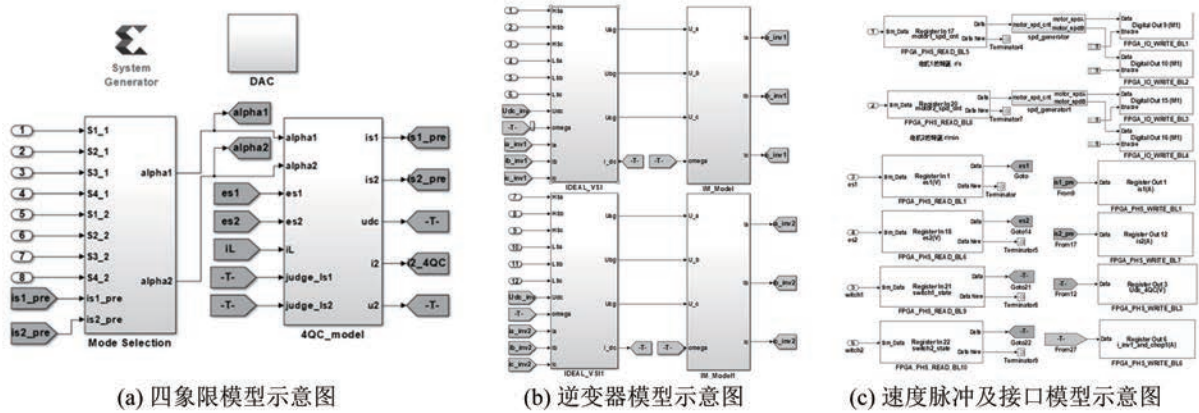


图 6 牵引主回路模型示意图

表 1 仿真模型参数表

参数名称	参数值
充电电阻 R_{ch}/Ω	10.4
变压器漏感 L_s/H	0.918×10^{-3}
线路电阻 R_{line}/Ω	1×10^{-3}
支撑电容 C_d/F	9.8×10^{-3}
转子电阻 R_r/Ω	0.032 96
定子电阻 R_s/Ω	0.041 95
转子漏感 L_{lr}/H	$1.439 8 \times 10^{-3}$
定子漏感 L_{ls}/H	$0.839 6 \times 10^{-3}$
互感 L_m/H	$38.648 3 \times 10^{-3}$

将模型编译下载到 dSPACE 仿真机中,在上位机控制软件中向 TCU 下发合主断控制指令,启动 TCU 运行,TCU 将接触器指令状态实时反馈给仿真机,形成闭环系统仿真,在进行仿真时,将第一组逆变器的牵引电机模型设置为电机缺相模型,第二组逆变器的牵引电机则为正常电机模型。

3.2 仿真结果

通过示波器观测波形,图 7 所示为逆变器 1 启动运行时的电流波形。从图 7 中波形参数得到逆变器 1 的 U 相电流幅值为 ± 12.5 A,V 相电流和 W 相电流幅值均大于 55 A,通过电机缺相故障诊断逻辑可知,此时逆变器 1 发生了电机缺相故障。

图 8 所示为逆变器 1 的启动运行电流波形和电机线电压波形,由于线电压的数值与绝缘栅极型晶体管(IGBT)的开通关断状态有关,当线电压

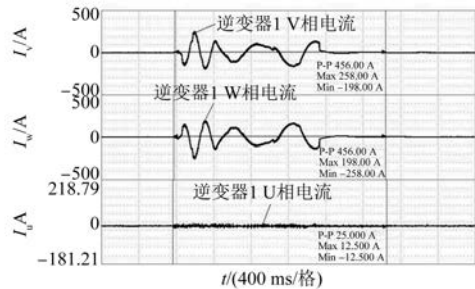


图 7 牵引逆变器 1 的电流波形图

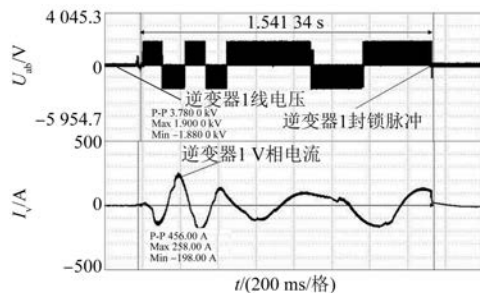


图 8 牵引逆变器 1 的线电压及相电流波形图

减小到 0 时,即代表逆变器开始封锁脉冲,从逆变器 1 启动运行到封锁脉冲,共用时约 1.5 s,即电机故障诊断逻辑在 0.5 s 内检测到任意两相电流绝对值大于 55 A,另一相电流绝对值小于 25 A,并且持续 1 s,与电机缺相故障诊断逻辑相符,即判断为电机缺相故障,为了保证电力机车安全运行,需要封锁逆变器 1 的脉冲,停止运行。

图 9 所示为逆变器 2 的电机电流波形。逆变

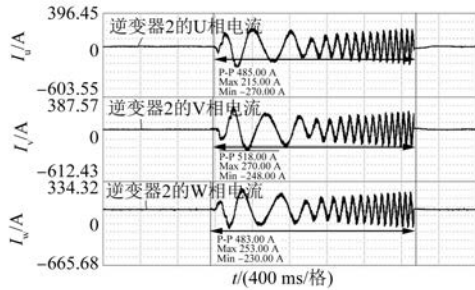


图9 牵引逆变器2电流波形图

器1与逆变器1同时启动,U相电流最大值为215 A,V相电流有效值为270 A。从电流的波形参数可知,逆变器2未发生电机缺相故障。

如图10所示,由于线电压的数值与IGBT的开通关断状态有关,当线电压减小到0时,即代表逆变器2开始封锁脉冲,通过逆变器2运行结果可知,当TCU检测到逆变器1停机时,在逆变器2启动后的2 s内,封锁脉冲,停止运行。

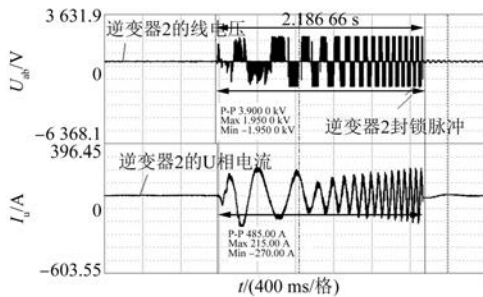


图10 牵引逆变器2线电压及相电流波形图

3.3 仿真结果分析

通过逆变器1仿真结果可知,当电机发生缺相时,发生缺相的一相电流绝对值为0 A。模型输出的信号经过仿真机后存在微小的零漂误差,仿真机输出给调理板卡时,误差被相应地放大,所

以示波器在分线端子排采集到断相电流为12.5 A,另外两相电流幅值大小相等,符号相反,与理论分析结果基本一致。

4 结 语

本文设计了一套电力机车牵引控制系统中异步电机一相缺相的半实物仿真系统,该系统能准确描述电机发生缺相故障时的瞬态响应,为缺相故障诊断逻辑优化及算法开发提供了有力的支持,在牵引控制系统研发初期,可以使用该系统进行仿真验证,从而避免牵引控制产品在地面试验阶段才发现设计上的潜在问题,大大缩短了项目开发周期,提高了牵引控制系统的可靠性。

【参考文献】

- [1] TABBACHE B, ABOUB Y, MAROUANI K, et al. A simple and effective hardware-in-the-loop simulation platform for urban electric vehicles[C]// 2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology, 2012: 251.
- [2] 薛玉洁,康敏.多相感应电机缺相故障建模及仿真[J].电气自动化,2021,43(4): 11.
- [3] 宋苏臣.鼠笼式异步电动机故障检测系统研究[D].西安:长安大学,2017.
- [4] 于明星,焦志刚,辛大志.鼠笼型异步电机断相故障温度场的数值分析与计算[J].沈阳理工大学学报,2017,36(4): 28.
- [5] 王强,王晓恩.感应电机定子绕组缺相故障的模型仿真[J].电力科学与工程,2008,24(9): 1.
- [6] 邓建国,罗德荣,杨德志.感应电动机定子缺相故障动态过程仿真研究[J].电机与控制学报,2002(4): 265.
- [7] 贺益康.交流电机的计算机仿真[M].北京:科学出版社,1990.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部