

运用检修

HXd2型电力机车主变流器 中间直流环节短路故障分析

韩建宁, 王 彬, 杨丽辉

(永济新时速电机电器有限责任公司 技术中心电子一所,

陕西 西安 710018)

摘 要: 以HXd2型电力机车为例, 针对其主变流器中间直流环节短路建立了等效数学模型, 并进行了理论推导和理论分析。最后基于 MATLAB/Simulink 仿真平台建立了主变流器中间直流环节短路仿真模型, 通过仿真试验进一步验证了理论分析的正确性和可靠性。

关键词: HXd2型电力机车; 主变流器; 短路故障; 中间直流环节; 仿真

中图分类号: U264.3+7

文献标识码: B

文章编号: 1000-128X(2013)01-0094-03

随着国民经济持续快速发展, 货物运输量逐年增加, 尤其是煤炭, 每年铁路运煤量始终占据全国铁路货运量的40%以上^[1], 因此需要更进一步提高铁路运输的运能和运量。为满足中国铁路重载运输牵引动力的需求, 在铁道部统一战略的部署下, 铁路装备制造企业加快了大功率交流传动电力和内燃机车技术跨越和平台建设步伐, 大幅度提升了铁路货物的运输能力。

机车主变流器可以说是电力机车整车系统的核心, 因此, 对于主变流器的研究来说, 针对主变流器故障分析是非常关键的环节。本文以HXd2型机车为例进行分析。

1 机车电传动系统简介

HXd2型机车是针对中国大秦铁路牵引2万t重载货运列车而设计的一种新型大功率交流电传动机车, 其中机车的牵引电传动系统由网侧电路、牵引变压器、主变流器和牵引电机等组成。HXd2型机车主变流器装置是由1个单相四象限变流器、中间直流环节和1个三相逆变器组成, 每一套主变流器装置驱动1台三相异步牵引电机, 最终实现整车轴控驱动、牵引重载货物列车稳定运行。本文将主要针对主变流器中间直流环节短路问题进行分析探讨。

1.1 主变流器工作原理

主变流器主电路工作原理如图1所示, 其中 U_s 为牵引变压器二次侧等效电源, C(PC)PMCF、R(PC)PMCF和C(IS)PMCF分别为预充电接触器、预充电电阻和主接触

器, C_{CAP} 为中间直流环节支撑电容, L_{2F} 、 C_{2F} 分别为中间直流环节二次滤波电感和二次滤波电容, CA(I)DIFF为接地电流传感器。牵引额定工况工作时, 牵引变压器二次侧绕组 U_s 输出单相AC 950 V/50 Hz交流电, 首先通过C(PC)PMCF、R(PC)PMCF预充电回路给中间直流侧电容充电; 当直流侧电压达到一定阈值后, 闭合C(IS)PMCF启动四象限变流器继续抬升中间直流侧电压, 稳定至约1 800 V; 最后启动牵引逆变器输出可变频的三相交流电来驱动三相异步牵引电机, 最终实现电力机车的牵引。

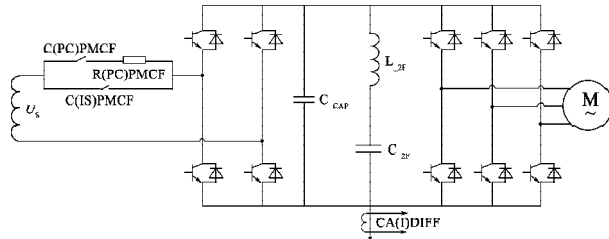


图1 主变流器主电路工作原理图

1.2 主变流器中间直流环节短路故障等效模型

由图1观察分析可知, 当主变流器中间直流环节发生短路故障时, 中间支撑电容支路和二次滤波支路分别形成一个短路电路, 并且2个短路电路的模型都是等效RLC回路。

如图2所示, 其中 R 、 L 、 C 为短路等效模型的等效电阻、电感和电容, E 为等效电容 C 的短路初始电压, i 为通过等效电容 C 的短路电流。

根据图2短路故障等效模型, 建立RLC短路电路的数学模型时域函数方程, 进行分析讨论, 具体如下:

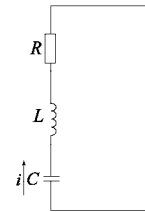


图2 短路故障等效模型

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = 0 \quad (1)$$

边界条件: $i(0)=0, \frac{1}{C} \int idt|_{t=0} = E$, 其中 E 为常数。

由于直接求解多阶微分方程较为困难, 为了简化求解过程, 将式(1)进行拉普拉斯变换可得:

$$sLI(s) + RI(s) + \frac{1}{sC} I(s) = -\frac{E}{s} \quad (2)$$

整理可得

$$I(s) = -\frac{E}{L} \cdot \frac{1}{(s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC})} \quad (3)$$

求解 $s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} = 0$ 方程的根 p_1 和 p_2 得到

$$p_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

$$p_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

$$\text{故 } I(s) = -\frac{E}{L} \cdot \frac{1}{(s-p_1)(s-p_2)} = -\frac{E}{L} \cdot \frac{1}{(p_1-p_2)} \left(\frac{1}{s-p_1} - \frac{1}{s-p_2} \right) (p_1 \neq p_2) \quad (4)$$

由拉普拉斯逆变换可得

$$i(t) = -\frac{E}{L(p_1-p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \quad (5)$$

$$\text{令 } \alpha = \frac{R}{2L}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

则

$$p_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

$$p_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

1.3 主变流器中间直流环节短路故障定性分析

本文将针对 α, ω_0 的4种取值关系进行定性分析, 具体如下:

①当 $\alpha=0$, 即 $R=0$ 。短路电流函数 $i(t)$ 为:

$$i(t) = -\frac{E}{L} \cdot \frac{1}{2j\omega_0} [e^{j\omega_0 t} - e^{-j\omega_0 t}] = -\frac{E}{L\omega_0} \sin(\omega_0 t) \quad (6)$$

此时, $R=0$, 短路故障回路为 LC 无损耗的正弦振荡回路。

②当 $\alpha > \omega_0$ 时

$$\text{令 } \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}, \text{ 则 } p_1 = -\alpha + j\omega_d,$$

$p_2 = -\alpha - j\omega_d$ 。短路电流函数为:

$$i(t) = -\frac{E}{L} \cdot \frac{1}{2j\omega_d} [e^{(-\alpha+j\omega_d)t} - e^{(-\alpha-j\omega_d)t}] = -\frac{E}{L\omega_d} e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t) \quad (7)$$

此时, R 较小, 短路故障回路为 LC 正弦振荡衰减回路。

③当 $\alpha = \omega_0$ 时, 即 $\frac{R}{2L} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, 则 $p_1 = p_2 = -\alpha$ 。

$$I(s) = -\frac{E}{L} \cdot \frac{1}{(s-p_1)(s-p_2)} = -\frac{E}{L} \cdot \frac{1}{(s+\alpha)^2}$$

由拉普拉斯逆变换可得, 短路电流函数 $i(t)$ 为:

$$i(t) = -\frac{E}{L} \cdot t e^{-\alpha t} = -\frac{E}{L} \cdot t e^{-\frac{R}{2L}t} \quad (8)$$

此时, 由于 R 较大, 短路故障回路为 LC 的一个临界阻尼状态回路, 且不产生振荡。

④当 $\alpha < \omega_0$ 时, 短路电流函数 $i(t)$ 为:

$$i(t) = -\frac{E}{L} \cdot \frac{1}{2\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} \cdot e^{-\alpha t} (e^{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} t} - e^{-\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} t}) = -\frac{E}{L} \cdot \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} \cdot e^{-\alpha t} \sin(\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} t) \quad (9)$$

此时, 由于 R 很大, 短路故障回路为双曲线特性电路。

由以上主变流器中间直流环节短路故障等效数学模型的建立和分析讨论可知, 在设计电路系统时, 针对电路中所涉及到的器件参数的选择尤为重要。接下来, 本文将针对HXD2型机车主变流器的器件参数进行定量分析探讨。

1.4 主变流器中间直流环节短路故障定量分析

①中间支撑电容支路

由HXD2型电力机车主变流器设计给定的器件参数可知, 主变流器中间直流环节发生短路时, 中间支撑电容支路形成的短路等效模型中的器件参数为: $R = 0.7 \text{ m}\Omega$, $L = 50 \text{ nH}$, $C = 3 \text{ mF}$ 。下面针对以上具体数据进行分析讨论。

$$\alpha = \frac{R}{2L} = \frac{0.7 \times 10^{-3}}{2 \times 50 \times 10^{-9}} = 7000$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{50 \times 10^{-9} \times 3 \times 10^{-3}}} \approx 81650$$

由 α, ω_0 的数值比较可知 $\alpha < \omega_0$, 因此中间支撑电容支路形成的短路回路为 RLC 正弦振荡衰减回路。

②二次滤波支路

二次滤波支路形成的短路等效模型中的器件参数为: $R=8.4 \text{ m}\Omega$, $L=0.507 \text{ mH}$, $C=5 \text{ mF}$ 。

$$\alpha = \frac{R}{2L} = \frac{8.4 \times 10^{-3}}{2 \times 0.507 \times 10^{-3}} \approx 8.284$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0.507 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-3}}} \approx 628.074$$

由 α, ω_0 的数值比较可知 $\alpha < \omega_0$, 因此二次滤波支路形成的短路回路为 RLC 正弦振荡衰减回路。

③短路冲击峰值电流的定量计算

在主变流器中间直流环节短路故障的分析中, 非常关注的一个问题就是短路冲击峰值电流的问题, 因此接下来文中将针对短路冲击峰值电流 $i(t)_{\max}$ 进行计算分析。

求解短路冲击峰值电流 $i(t)_{\max}$ 的问题, 其实质就是求解式(7)短路电流函数 $i(t)$ 的极大值问题。由函数 $i(t)$ 随时间正弦振荡衰减的特点很容易得到短路冲击峰值电流 $i(t)_{\max}$ 的关系:

$$i(t)_{\max} = -\frac{E}{L\omega_d} e^{-\pi \times \alpha / (2 \times \omega_d)} \quad (10)$$

假设 $E=1802 \text{ V}$, 将 $E=1802 \text{ V}$ 及已知器件参数代入式(10)可得

中间支撑电容支路的短路冲击峰值电流为:

$$i(t)_{\max} \approx -3.870 \times 10^5 \text{ A}$$

二次滤波支路的短路冲击峰值电流为:

$$i(t)_{\max} \approx -5543 \text{ A}$$

2 仿真分析

为了更好地了解主变流器的工作原理及特性,进一步验证主变流器中间直流环节短路故障等效数学模型理论分析的正确性和可靠性,本文将基于MATLAB/Simulink 仿真软件建立主变流器中间直流环节短路故障仿真模型。

2.1 仿真模型

该系统仿真模型如图3所示,其中仿真模型主要由单相AC 950 V/50 Hz交流电源、牵引变压器等效电阻及漏感、预充电接触器、预充电电阻、主接触器、一个单相四象限变流器和中间直流环节组成。

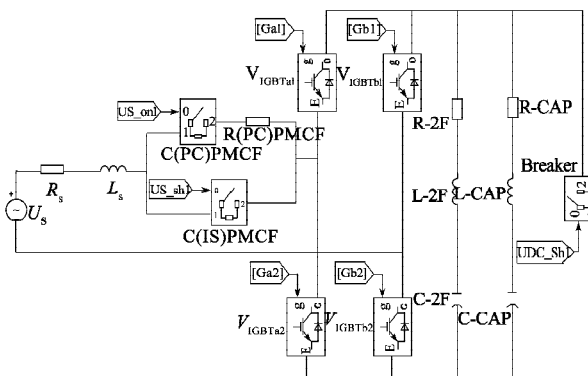


图3 仿真模型

2.2 仿真结果

图4是主变流器中间直流母线电压在预充电、四象限整流充电以及中间直流环节发生短路故障时的变化曲线图。其中在0~2 s时间内是主变流器预充电和四象限整流充电建立中间直流环节的过程,第2 s时刻中间直流母线电压达到1 802 V,并且在此时刻中间直流环节发生短路故障。

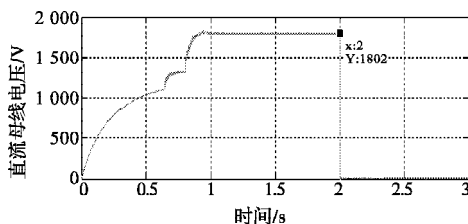


图4 直流母线电压

图5、图6是主变流器中间直流环节发生短路故障时,中间支撑电容支路和二次滤波支路的短路电流变化曲线图。从图中可以看到,在中间直流环节发生短

路故障情况下中间支撑电容支路和二次滤波器支路的短路电流都随时间正弦振荡衰减,其中中间支撑电容支路短路冲击峰值电流 $i(t)_{\max} \approx -3.857 \times 10^5 \text{ A}$,二次滤波器支路短路冲击峰值电流 $i(t)_{\max} = -5\,538 \text{ A}$ 。因此仿真结果同上面的理论分析结果基本相符。

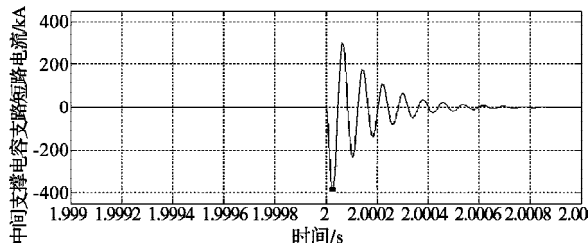


图5 中间支撑电容支路短路电流

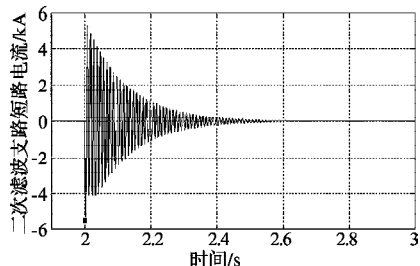


图6 二次滤波支路短路电流

3 结语

仿真试验表明,本文建立的主变流器中间直流环节短路故障数学模型以及理论分析结果是正确的,从而为主变流器中间直流环节短路故障分析、主变流器中间直流环节设计和主变流器装置参数的优化设计提供一定的理论基础。

参考文献:

- [1] 孙永才,孙喜运,梁圣童,高洪光. 基于HXD3 机车技术平台的6轴交流传动电力机车系统化研究[J]. 铁道机车车辆, 2009, 29(4): 1-5.
- [2] 陈坚. 电力电子学——电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [3] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 张崇巍,张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

(上接第93页)

自动判断自动转换,并切除故障速度传感器,这样,不影响其他速度传感器的工作,减少故障处理时间,同时LKJ采用的2路速度信号总是保持相位关系,从而保证机车相位防溜功能的实现,确保列车正常运行。

参考文献:

- [1] 列车运行监控装置(LKJ)技术规范(V1.0)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [2] 杨志刚. LKJ2000型列车运行监控记录装置[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [3] 黄建文. 微电子电路设计原理及应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.

