

浅析 HXD1 型电力机车牵引控制电源板启动时序优化

蒋振天

国能朔黄铁路发展有限责任公司车辆分公司 062350

【摘要】近年来,电力电子技术持续突破,控制理论不断完善,智能算法日新月异,这一系列的发展促使铁路机车领域掀起了一场技术革新风暴。在HXD1型电力机车的演进过程中,人们对其各个组成部件的性能表现提出了更为严苛的要求。牵引控制电源板在HXD1型电力机车中占据着关键地位,对其启动时序进行优化,已然成为提升机车整体性能的关键切入点。以往传统的启动时序设计方案,已无法契合现代铁路运输对于机车高效且稳定运行的现实需求。所以,本文将积极探索前沿的技术手段和先进的理念,针对HXD1型电力机车牵引控制电源板的启动时序开展优化工作,这既是顺应技术发展大势的必要之举,也是增强我国铁路运输行业竞争力的重要途径。

【关键词】 HXD1型电力机车;牵引控制;电源板;启动时序

Analysis on the optimization of starting timing of traction control power board for HXD1 electric locomotive

Jiang Zhentian

Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd. Rolling Stock Branch 062350

【Abstract】 In recent years, continuous breakthroughs in power electronics technology, continuous improvement of control theory, and rapid development of intelligent algorithms have sparked a storm of technological innovation in the field of railway locomotives. In the evolution process of the HXD1 electric locomotive, people have put forward more stringent requirements for the performance of its various components. The traction control power board plays a crucial role in the HXD1 electric locomotive, and optimizing its start-up timing has become a key entry point for improving the overall performance of the locomotive. The traditional start-up timing design scheme in the past can no longer meet the practical needs of modern railway transportation for efficient and stable operation of locomotives. Therefore, this article will actively explore cutting-edge technological means and advanced concepts to optimize the starting timing of the HXD1 electric locomotive traction control power board. This is not only a necessary measure to comply with the trend of technological development, but also an important way to enhance the competitiveness of China's railway transportation industry.

【Key words】 HXD1 electric locomotive; Traction control; Power supply board; Start timing

引言:

在我国,铁路运输事业正处于蓬勃发展的阶段,电力机车在整个铁路运输体系中所起到的作用日益关键。HXD1型电力机车作为我国自主研发的先进电力机车中的典型代表,凭借其强劲的牵引能力以及出色的运行性能,在重载货运铁路运输领域得到了广泛的应用。其高效、可靠的运行直接关系到整个铁路运输系统的效率 and 安全性。特别是在我国“西煤东运”、“北煤南运”等重大能源运输战略中, HXD1型电力机车以其强大的牵引力和稳定性,确保了重载货物列车的顺畅运行,极大地提升了运输效率,降低了运输成本。

牵引控制电源板是 HXD1 型电力机车牵引控制系统的核心组成部分,其主要功能是为牵引控制单元供应稳定且可靠的电源,一般安置于牵引变流器柜中,与电机控制有显著差异。功能上,前者为牵引控制系统提供稳定适配电源,保障相关设备与电路运转;后者聚焦牵引电机的启动、停止、调速、转矩控制等。涉及范围上,前者侧重电源供应,属硬件支持;后者涵盖硬件电路与软件算法策略,是软硬件融合

的完整控制系统。启动时序是否合理,会对电源板的性能以及整个牵引控制系统的稳定性产生直接影响。但在实际的运行过程中, HXD1 型电力机车牵引控制电源板的启动时序暴露出了一些问题,例如启动时间较长、启动稳定性欠佳以及功率出现波动等情况。当 HXD1 型电力机车牵引控制电源板启动时间过长且稳定性不足时,其内部的电子元件会在较长时段内遭受异常的电压与电流冲击。而功率出现波动的情况,极有可能对机车制动系统的正常运转产生不良影响。所以,对 HXD1 型电力机车牵引控制电源板的启动时序进行优化具有十分重要的现实价值。通过优化启动时序,能够提升电源板的启动性能和稳定性,降低功率波动,延长电源板的使用时长,进而提高 HXD1 型电力机车运行的可靠性和经济性。

一、HXD1 型电力机车牵引控制电源板概述

(一) HXD1 型电力机车简介

HXD1 型电力机车是一款八轴大功率交流传动电力机

车,其主要应用场景为重载货运领域。此机车运用了先进的交流传动技术、微机控制技术以及网络通信技术,具备功率强大、效率颇高、可靠性强等显著优势^[1]。HXD1 型电力机车的额定功率达到了 9600kW,最高运行速度能达到 120km/h,完全能够契合我国重载铁路运输的实际需求。该机车采用了模块化的设计理念,由两个四轴动力单元组合而成。每个四轴动力单元都配备了一套独立的牵引控制系统以及辅助系统,这一设计有效提升了机车的可靠性与可维护性。

(二) 牵引控制电源板的功能与结构

牵引控制电源板是牵引变流器系统中的一个组成部分,负责监测和控制牵引变流器的运行状态,其最核心的功能便是给牵引控制单元供应稳定、可靠的电力来源。在机车运行期间,牵引控制单元承担着精确调控牵引电机转速与转矩的关键任务,以此达成机车的牵引和制动功能。正因如此,牵引控制电源板必须具备提供高精度、高稳定性电源的能力,只有这样,才能确保牵引控制单元得以正常运作。不仅如此,牵引控制电源板还配备了过压保护、欠压保护、过流保护等一系列保护功能,这些功能就像一道道坚固的防线,能够切实有效地让牵引控制单元免受因电源故障带来的不良影响。

牵引控制电源板主要由多个关键部分共同构成,其中整流电路负责将输入的交流电转换为直流电,为 DC-DC 变换电路提供适配的输入电源,完成电流形式的转换。DC-DC 变换电路在整个电源板中扮演着极为重要的角色,能够把经过整流后的直流电,进一步转换为牵引控制单元所需要的不同电压等级的直流电,像常见的+5V、 $\pm 12V$ 、 $\pm 15V$ 等。输出滤波电路的职责是对 DC-DC 变换电路输出电压里的纹波和噪声进行有效滤除,进而保证输出电压处于稳定状态,满足牵引控制单元对电源稳定性的严格要求。控制电路主要负责监测电源板的工作状况,同时对 DC-DC 变换电路的输出电压和电流进行调节,以此实现电源板的保护和控制功能,保障整个电源系统的安全、可靠运行。

二、HXD1 型电力机车牵引控制电源板启动时序问题分析

(一) 启动时间长

HXD1 型电力机车牵引控制电源板启动耗时久,一般正常启动需几秒到十几秒。究其根源,主要是其启动流程繁杂以及电路自身特性所致^[2]。在开启运作时,电源板要按顺序完成多个关键步骤,包括输入滤波电路的充电工作、整流电路的启动、DC-DC 变换电路的初始化,还有输出电压的建立。输入滤波电路里的电容有着较大的容量,这就使得充电所耗费的时间偏长,进而造成整流电路启动滞后。与此同时,DC-DC 变换电路的初始化进程同样需要一定时长,尤其是当采用软启动技术时,输出电压需逐步攀升至设定数值,这无疑进一步拉长了整个启动时间。电源板启动时间长带来诸多弊端,不但减缓了机车的启动速度,还致使电源板

能耗增加、发热加剧,电源板的工作效率与可靠性也随之降低。

(二) 启动稳定性差

牵引控制电源板启动稳定性欠佳,主要体现为在启动进程中输出电压波动幅度大,以及启动失败的概率较高等状况。输出电压波动幅度大,究其原因,主要在于 DC-DC 变换电路的动态响应特性不理想。在启动阶段,该电路无法迅速对输出电压进行调整,致使输出电压出现超出正常范围的过冲或者低于正常范围的欠冲现象。启动失败率偏高,有可能是因为控制电路的参数设置缺乏合理性,或者电路元件出现老化、损坏等问题所引发的。启动稳定性差会对牵引控制单元的正常运行产生不良影响,进而造成机车的牵引和制动性能处于不稳定状态,严重时甚至可能引发安全事故。

(三) 功率波动问题

在启动阶段,牵引控制电源板会出现较为明显的功率波动情况,而这主要是由整流电路以及 DC-DC 变换电路的工作特点所决定的。具体来说,整流电路在启动的瞬间,会有较大的冲击电流产生,进而使得输入功率在瞬间大幅增大^[3]。另外,DC-DC 变换电路在输出电压的建立过程中,其负载电流并非稳定不变,而是会出现一定的变化,这种变化就会导致输出功率产生波动。功率波动幅度过大,会给电源系统以及电网带来诸多不良影响,一方面会使电源系统承受的负担加重,另一方面还会使电网的电能质量有所降低。

三、HXD1 型电力机车牵引控制电源板启动时序优化方案

(一) 确定优化目标

首先,缩短启动时间对于提升机车的启动效率而言是关键所在。目前,输入滤波电路的充电、DC-DC 变换电路的初始化以及输出电压的建立,所花费的时间都比较大,这就对电源板进入稳定工作状态的速度产生了影响。通过科学且合理地优化启动时序,可以精确调整各个环节的时间安排。其次,提高启动稳定性能够保证电源板可靠地启动。控制电路的参数设置不够合理,以及 DC-DC 变换电路的动态响应特性欠佳,会造成启动过程中输出电压出现较大波动,并且启动失败的概率升高。最后,减小功率波动对于提高电源系统的稳定性和电网的电能质量具有重大意义。整流电路产生的冲击电流以及 DC-DC 变换电路负载电流的变化率较大,是导致功率波动的主要原因。可以采用软启动技术,让整流电路和 DC-DC 变换电路在启动时更加平稳,从而降低冲击电流。同时,运用功率均衡控制策略,依据电路的实际工作状态动态地调整功率分配,使功率在不同的电路模块之间均匀分布。这样就能够有效地减小启动过程中的功率波动,提高电源系统的稳定性和电网的电能质量,确保机车在运行过程中不会对电网造成不利影响。

(二) 分析电源系统参数

首先是输入滤波电路参数。输入滤波电路在电源板中起

着过滤噪声、稳定电压的重要作用，而其中电容、电感等元件的参数对充电时间影响显著。电容的容量大小、电感的感值高低等都会影响充电的速度和效率。这就需要深入剖析这些参数与充电时间之间的内在联系，通过精确调整电容和电感的具体取值，来优化输入滤波电路的充电特性^[4]。其次是整流电路参数。整流电路负责将交流电转换为直流电，其工作原理和特性与启动电流和功率密切相关。整流二极管的导通压降、反向恢复时间等参数会直接影响整流电路的性能。导通压降过大，会导致功率损耗增加；反向恢复时间过长，则会产生较大的启动电流。其三是 DC-DC 变换电路参数。DC-DC 变换电路的拓扑结构、控制策略以及元件参数对输出电压建立时间和动态响应特性起着关键作用。不同的拓扑结构具有不同的优缺点，合理选择拓扑结构可以提高变换效率；先进的控制策略能够实现对输出电压的精确控制；而元件参数的优化则可以进一步提升电路的性能。通过对电路拓扑和控制策略进行优化，同时调整元件参数，能够加快输出电压的建立时间，改善动态响应特性，使 DC-DC 变换电路能够更好地满足牵引控制单元的需求。

（三）优化设计方案

1. 输入滤波电路的深度优化

首先，要选用新型的电容和电感元件。传统的电容和电感元件可能存在等效串联电阻（ESR）和直流电阻（DCR）较大的问题，这会导致在充电过程中产生不必要的能量损耗，延长充电时间。而新型的电容和电感元件经过特殊设计和制造，具有更低的 ESR 和 DCR。例如，采用低 ESR 的陶瓷电容或薄膜电容，以及采用高导磁材料和优化绕组设计的电感，能够显著降低电阻值。当电流通过这些元件时，能量损耗减小，充电效率得以大幅提升，从而有效缩短充电时间。与此同时，为了保证充电过程的稳定性，需要在输入滤波电路中增设阻尼电阻。在充电过程中，由于电路中的电容和电感等储能元件的存在，可能会引发振荡现象。这种振荡不仅会影响充电的稳定性，还可能对电路中的其他元件造成损害。阻尼电阻的作用就是消耗振荡能量，抑制振荡的产生。通过合理选择阻尼电阻的阻值和功率，能够使充电过程更加平稳，避免出现电压和电流的大幅度波动，增强充电的稳定性。

2. 整流电路的全面改进

整流电路的主要功能是将交流电转换为直流电，其性能

的好坏直接影响到电源板的效率和稳定性。为了降低整流电路的功率损耗和启动电流，要挑选导通压降小、反向恢复时间短的整流二极管。传统的整流二极管在导通时会产生一定的压降，这部分压降会转化为热能，造成能量损耗。而导通压降小的整流二极管能够减少这种能量损耗，提高整流效率。同时，反向恢复时间短的二极管能够更快地从导通状态转换到截止状态，减少反向电流的产生，进一步降低功率损耗。为了进一步减小整流电路启动时的冲击电流和功率波动，需要引入软启动电路。在整流电路启动的瞬间，如果输入电压突然施加到电路上，会产生较大的冲击电流，这不仅会对电路元件造成损害，还会引起功率的大幅度波动。软启动电路的作用就是在整流电路启动时，让输入电压逐渐升高，避免电压的突变。通过控制输入电压的上升速率，能够使整流电路平稳地启动，减小冲击电流，降低功率波动，提高电源板的可靠性和稳定性。

3. DC - DC 变换电路的高效优化

DC - DC 变换电路用于将整流后的直流电转换为不同电压等级的直流电，以满足不同负载的需求。为了提高变换效率和动态响应特性，要采用先进的 DC - DC 变换拓扑结构，如半桥变换器、全桥变换器等。这些拓扑结构具有更高的功率密度和变换效率，能够在相同的输入功率下输出更多的功率。除了采用先进的拓扑结构，还需要对控制策略进行优化。常见的控制策略有电压模式控制、电流模式控制或者混合控制策略。电压模式控制通过检测输出电压，并与设定值进行比较，然后调整开关管的导通时间，以实现输出电压的稳定控制。电流模式控制则是在电压模式控制的基础上，增加了对电感电流的检测和控制，能够更好地应对负载的变化，提高动态响应特性。混合控制策略则结合了电压模式控制和电流模式控制的优点，实现更加精确的控制。通过采用合适的控制策略，能够实现输出电压快速且稳定地建立以及精确控制。

综上所述，对 HXD1 型电力机车牵引控制电源板的启动时序予以优化，其意义非比寻常。借助科学且合理地启动时序做出调整，不但能够大幅缩短电源板的启动时间、提升启动的稳定性、降低功率波动，而且还能增强机车的启动效率以及运行的稳定性。从而为 HXD1 型电力机车的可靠运行提供坚实有力的保障。

参考文献

- [1]龙光海，龚事引.HXD1 型电力机车牵引控制电源板启动时序优化[J].科技创新与应用，2019（13）：142-143.
 - [2]惠勇.HXD2 型电力机车牵引控制电源板启动时序优化[J].铁道机车与动车，2019（2）：39-41.
 - [3]罗伟涛.HXD2 型电力机车牵引控制网关板电源监视功能优化[J].内蒙古科技与经济，2022（5）：85-86.
 - [4]刘鹏，王永刚.HXD2 型电力机车 MPU 电源控制板新设计[J].铁道机车与动车，2021（5）：28-29，43.
 - [5]罗伟涛.HXD2 型机车 TCU 电源板故障的原因分析与探讨[J].内蒙古科技与经济，2021（24）：84-85，87.
- 作者简介：蒋振天（1990.10-）男，河北沧州人，大学本科，助理工程师，研究方向：机车检修。