

同步发电机在变频启动柴油机中的应用研究^{*}

聂成¹ 景万鹏¹ 罗紫元¹ 郑守海¹ 王金玉²

(1. 中车永济电机有限公司技术中心 西安 710016; 2. 东北石油大学电气信息工程学院 大庆 163318)

摘要: 现有的内燃机车柴油机启动方式存在设备空间占用率高、传递效率不高、故障率高等特点,在内燃机车升级换代的技术背景下,提出利用同步发电机与柴油机同轴且可以运行在电动机工况这一特点来启动柴油机,并对其电动机工况下的转速特性进行研究。通过对变频启动柴油机的工作原理及启动工况的边界条件进行分析,推导出发电机启动工况的状态方程组。为了缩短求解时间,提高求解精度,引入龙格库塔法求解上述方程组。通过编写仿真分析软件对发电机启动工况进行仿真分析,分析结果表明,同步电机启动时的机械转矩大于柴油机最大阻力转矩 12 000 N·m,可在 12 s 的时间内达到 210 r/min,满足启动工况的需求;该分析过程也可以用来校验柴油发电机组的控制策略和启动能力。

关键词: 内燃机车;牵引发电机;三相同步电机;变频启动柴油机;龙格库塔法

中图分类号: U262.41;TM341;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.3030;470.4024

Research on application of synchronous alternator in variable frequency starting diesel engine

Nie Cheng¹ Jing Wanpeng¹ Luo Ziyuan¹ Zheng Shouhai¹ Wang Jinyu²

(1. Technical Center, CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710016, China;

2. School of Electrics and Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: The existing starting mode of diesel locomotive has the characteristics of high equipment space occupancy, low transmission efficiency and high failure rate. Under the technical background of upgrading of diesel locomotive, this paper proposes to use synchronous generator to start diesel engine, which is coaxial with diesel engine and can run in the motor condition, and studies the speed characteristics of the motor condition. Based on the analysis of the working principle and the boundary conditions of the starting condition of the variable frequency diesel engine, the state equations of the starting condition of the motor are derived. In order to shorten the solving time and improve the solving precision, Runge-Kutta method is introduced to solve the above equations. The simulation analysis software is written to analyze the starting condition of the alternator. The results show that the mechanical torque of synchronous motor is greater than the maximum resistance torque of diesel engine 12 000 N·m, and can reach 210 r/min in 12 s, which can meet the requirements of starting conditions. The analysis process can also be used to check the control strategy and start-up capability of the diesel generator set.

Keywords: diesel locomotive; traction alternator; three-phase synchronous machine; variable frequency starting diesel engine; Runge-Kutta method

0 引言

柴油发电机组作为内燃机车的动力来源,要操纵和运用机车,首先要做的就是启动柴油机,通俗的讲就是给柴油机曲轴施加一个启动转矩,使曲轴带动连杆活塞组在气

缸内点火爆发^[1]。随着内燃机车传动系统技术的发展,柴油机的启动方式也在不断更新,下面针对国内主型内燃机车的启动方式进行简述^[2]。

东风系列内燃机车通过蓄电池给直流启动电动机供电的方式来启动柴油机,直流启动电动机的机械转矩通过

收稿日期:2024-09-04

^{*} 基金项目:中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(N2020J032)项目资助

“变速箱—万向轴”方式将启动转矩传递到柴油机曲轴,从而实现柴油机的启动^[3]。这种启动方式结构复杂,传递效率不高。

和谐系列内燃机车的技术引进,开启了我国内燃机车由直流传动向交流传动的升级换代之路。该车型利用空气压缩机提供动力来启动马达,通过齿轮将扭矩传递至柴油机飞轮侧,从而启动柴油机^[4]。这种启动方式与“蓄电池—启动电动机”方式相比,有效地利用了空气能,降低了机车能耗;但是这种结构对空气管路系统的密封性要求很高,在实际运用中此处的故障率也较高^[5]。

综上,在升级换代车型复兴系列内燃机车的研制之初,就提出在降低启动柴油机设备故障率的前提下,有效减少机车能耗^[6]。为此,研制一种新型的柴油机启动方式显得尤为迫切。通过对产品技术迭代的梳理和故障分析,提出一种简化结构^[7],结合柴油机和同步发电机在结构上同轴,利用牵引变流器和同步发电机,并依靠蓄电池供电实现柴油机的变频启动,在车内空间利用和整车能耗成本控制方面有较大的优势^[8],是一种值得研究的柴油机启动方案。

本文以 FXN3C 型内燃机车为技术背景,为了满足同步发电机具有启动柴油机的工况需求,研究所设计的同步发电机电磁参数是否满足启动柴油机的功能,以及启动阶段的响应时间和最大转矩等参数,需对同步发电机变频启动工况进行分析研究。

1 变频启动柴油机的工作原理

变频启动柴油机利用了柴油机与同步发电机同轴的机械特性,通过机车的网络控制,控制外电路保持变频启动状态,利用蓄电池提供中间直流侧电压^[9],同步发电机转子励磁绕组所需要的励磁电流由机车蓄电池通过励磁斩波器提供^[10],发电机定子绕组所需要的三相交流电由牵引变流器控制逆变器输出提供^[11]。此时,同步发电机处于电动机工作状态,拖动柴油机曲轴与其同步工作。直至速度超过发动机点火转速,机车微机控制蓄电池断开供电,由主逆变器调节牵引电机,从而完成了启动工作向牵引工况的转换。同步发电机变频启动柴油机的拓扑结构如图1所示。

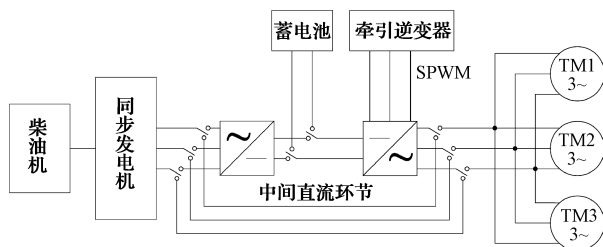


图1 变频启动柴油机的拓扑结构

Fig. 1 Topological structure diagram of variable frequency starting diesel engine

2 变频启动柴油机仿真分析的边界条件和同步发电机的数学模型

2.1 变频启动仿真分析的要求和边界参数

为了对同步发电机启动柴油机的能力和过程进行分析计算和动态仿真分析,首先需要对柴油机启动阶段的边界条件和相关参数进行分析介绍。同时,为了尽可能准确地模拟启动过程,得出启动过程的转矩特性^[12],需对同步发电机的等效电路进行参数设置及分析,如图2所示。

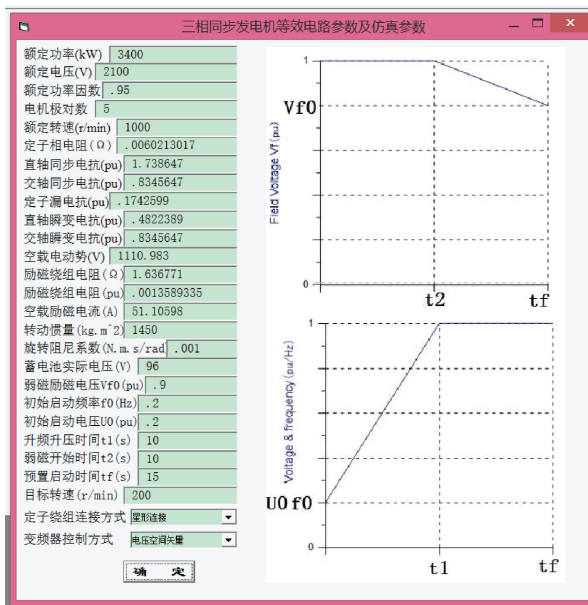


图2 等效电路参数输入界面

Fig. 2 Input interface of equivalent circuit parameters

1) 转速范围,电机拖动柴油机从静止达到柴油机点火转速 120 r/min。

2) 负载特性,负载最大转矩(柴油机最大阻力转矩)为 12 000 N·m,负载转矩特性(柴油机阻尼转矩与转速的曲线)的简化方程式为:

$$y = 0.0017x^3 - 0.0927x^2 - 98.411x + 12214 \quad (1)$$

式中: x 为转速; y 为转矩。

3) 励磁电流,小于 200 A。励磁电源由机车 96 V 蓄电池经过励磁斩波器分别给同步电机定子绕组和转子励磁绕组供电;由于蓄电池提供的电压比较低,在同步电机转速达到柴油机点火转速之前,就已经出现逆变器输出电压饱和的现象,因此需要进行弱磁控制^[13],使电机转速继续上升到目标转速^[14]。

4) 定子绕组输入电流,小于 600 A。

5) 转动惯量,电机转动惯量为 350 kg·m²,柴油机转动惯量 1 100 kg·m²,仿真分析时转动惯量按 1 450 kg·m² 计算。

6) 启动时间,仿真分析应优化启动方案,求出最短启

动时间。根据国家标准及机车对供电系统启动阶段的需求,要求柴油发电机组在 15 s 内向负载供电,故仿真分析所设定的启动时间应小于 15 s。

2.2 同步发电机的数学模型

FXN3C 型机车所装配的发电机为三相凸极同步发电机,在 d - q 坐标系中,同步电机的磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + M_{af} i_f \\ \psi_q = L_q i_q \\ \psi_f = \frac{3}{2} M_{af} i_d + L_{ff} i_f \end{cases} \quad (2)$$

电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + M_{af} \frac{di_f}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r (L_d i_d + M_{af} i_f) \\ u_f = R_f i_f + \frac{3}{2} M_{af} \frac{di_d}{dt} + L_{ff} \frac{di_f}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω_r 为电角速度; R_s 为定子绕组电阻; L_d 、 L_q 分别为直、交轴同步电感; M_{af} 为励磁绕组与直轴绕组的互感; L_{ff} 为励磁绕组的自感; R_f 为励磁绕组的电阻。

将电压方程变化为状态方程如下:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{di_f}{dt} \end{cases} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{B_d} & \frac{\omega_r L_q}{B_d} & \frac{M_{af} R_f}{B_d L_{ff}} \\ -\frac{\omega_r L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} & -\frac{\omega_r M_{af}}{L_q} \\ \frac{3M_{af} R_s}{2A_f L_d} & -\frac{3\omega_r M_{af} L_q}{2A_f L_d} & -\frac{R_f}{A_f} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{u_d - \frac{M_{af} u_f}{L_{ff}}}{B_d} \\ \frac{u_q}{L_q} \\ \frac{u_f - \frac{3M_{af} u_d}{2L_d}}{A_f} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中: $B_d = L_d - \frac{3M_{af}^2}{2L_{ff}}$; $A_f = L_{ff} - \frac{3M_{af}^2}{2L_d}$ 。

电机的运动方程为:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{T_e - T_L}{J} - \frac{B_0 \Omega}{J} \quad (5)$$

式中: Ω 为机械角速度,与电角速度 ω_r 的关系为 $\Omega = \frac{\omega_r}{p}$;

B_0 为旋转阻尼系数,一般取 0 即可。

电磁转矩为:

$$T_e = \frac{3}{2} p [M_{af} i_f i_d + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

式(4)~(6)构成了同步发电机启动柴油机工况的状态方程组。

3 基于龙格库塔法的变频启动柴油机仿真分析

在分析计算中,直接求解上述状态方程组,计算复杂,很难得到精确结果。在实际求解工程中,为了尽可能趋近精确函数解,并缩短仿真计算时间,通常采用数值分析法求解状态方程组^[15]。

3.1 龙格库塔法

龙格库塔法是一种在工程应用中广泛使用的高精度数值分析法^[16],该方法属于迭代计算的一种,通过在每个时间步中计算不断用自变量的旧值递推得到新值,并在多个中间节点加权的方式逼近数值解,最终得到误差较小的函数解^[17]。

对于状态方程组 $\dot{x} = f(x, t)$, 采用四阶龙格库塔法求解,其本质是求出满足初始条件的特解(某一时刻的近似值)来代替微分方程的精确函数值。其中 x 为变量组,即状态向量, $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ 。设 i 是时间离散点 t_i 的序号, $i = 0, 1, 2, \dots$, 时间步长为 h , 若第 i 步($t = t_i$)的状态向量的值为 x_i , 则 $t_{i+1} = t_i + h$ 时, x_{i+1} 为:

$$x_{i+1} = x_i + \frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (7)$$

$$K_1 = h \cdot f(x_i, t_i) \quad (8)$$

$$K_2 = h \cdot f(x_i + 0.5K_1, t_i + 0.5h) \quad (9)$$

$$K_3 = h \cdot f(x_i + 0.5K_2, t_i + 0.5h) \quad (10)$$

$$K_4 = h \cdot f(x_i + K_3, t_i + h) \quad (11)$$

由式(1)可知, $t=0$ 时刻的状态向量 $x_0=0$ 可作为已知条件,以此为起点,就能得到整个启动过程的状态向量值。

3.2 同步发电机启动工况仿真分析软件

同步发电机启动仿真分析是通过蓄电池给变频器供电,采用变频启动方式启动柴油发电机组的过程,从而校验柴油发电机组的启动能力,确定适当的启动策略。

仿真分析软件采用 VB6 开发菜单,使用 Visual Fortran 语言编写仿真计算程序,并生成可执行文件,由 VB6 调用。仿真所需的系统数据、同步发电机的电路参数等,通过 VB6 菜单输入,形成 Fortran 语言所需的数据文件,等效电路等参数也可通过校核计算模块直接生成数据文件。仿真计算完成后,形成动态特性数据,由 Grapher 软件绘制特性曲线。

为了保证获得足够大的转矩,仿真开始时,应使励磁电流达到稳态最大, $i_{f0} = \frac{V_{dc}}{R_f}$ 。 i_d 、 i_q 、 ω_r 的初始值均为 0。根据矢量控制的原理,可以随时检测出转子磁场轴线(d 轴),如图 3 所示。在仿真时,可以保持电压矢量与转子磁极轴线的夹角成固定角度,即功率角一定,使同步电机启动。

3.3 仿真分析结果

仿真分析参数及其预置的启动时序如图 4 所示,首先对同步发电机通以 96 V 的励磁电压,待励磁电流稳定、同步发电机建立主磁场后,再通过变频变压法来启动电机。

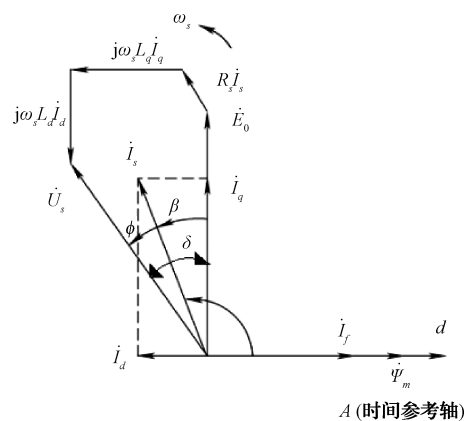


图3 同步电机的相量图

Fig. 3 Phasor diagram of synchronous motor

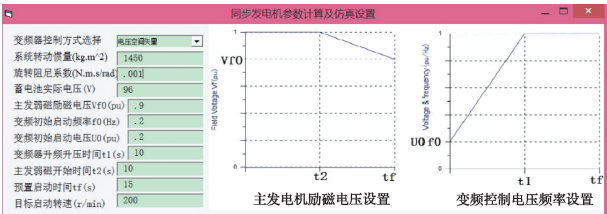


图4 同步发电机组启动仿真参数

Fig. 4 Simulation parameters of synchronous generator startup

考虑蓄电池电压只有 96 V,为了充分利用直流母线电压,变频器采用 SVPWM 控制算法,使逆变后的线电压幅值与直流母线电压相等。仿真时间为 15 s,对应柴油机启动时间不超过 15 s 的要求。

1)不同功率角下的启动转速特性对比分析

为了对比不同功率角对启动转速的影响,仿真分析对比了功率角分别为 10°、20°、30°和 40°时的启动转速特性。负载特性方程及功率角的输入界面如图 5 所示。

不同功率角下的转速特性曲线如图 6 所示。不同功

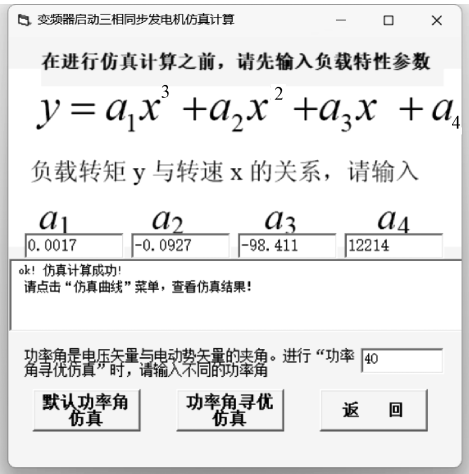


图5 负载特性方程及功率角参数输入界面

Fig. 5 Input interface of load characteristic equation and power angle parameter

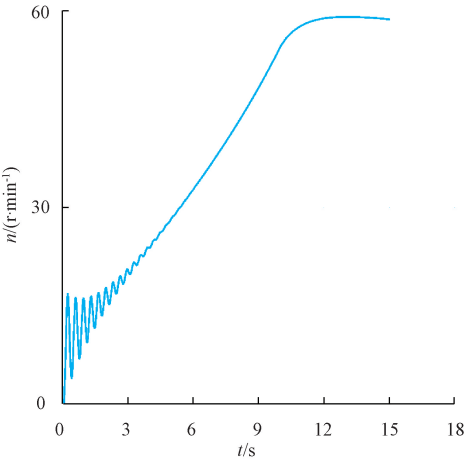
率角时的启动情况对比如表 1 所示。

由图 6 可知,在功率角为 10°时,在 12 s 内转速达到约 60 r/min,此后转速不再增长,不满足柴油机点火所需的转速要求;功率角为 20°时,在 15 s 时转速达到 190 r/min,

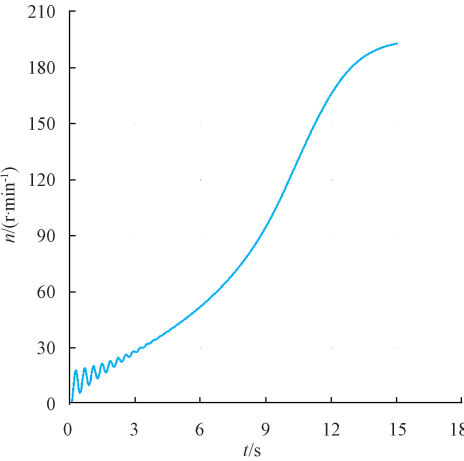
表 1 不同功率角时的启动情况对比

Table 1 Comparison table of startup conditions at different power angles

功率角/(°)	启动时间/s	最高转速/(r·min ⁻¹)	转速增长趋势
10	12	60	趋于稳定
20	15	190	继续增长
30	12	200	趋于稳定
40	10	210	趋于稳定



(a) 功率角为10°时转速特性
(a) Speed characteristics when the power angle is 10°



(b) 功率角为20°时转速特性
(b) Speed characteristics when the power angle is 20°

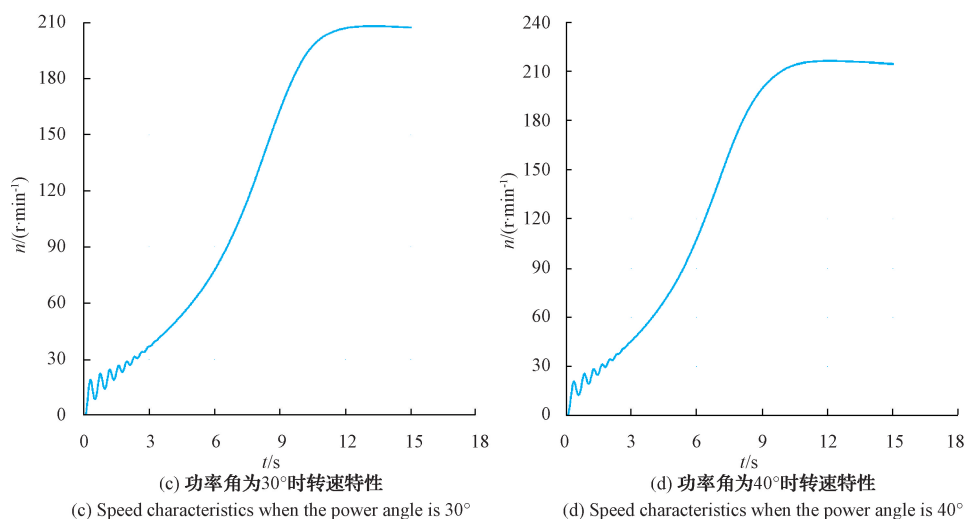
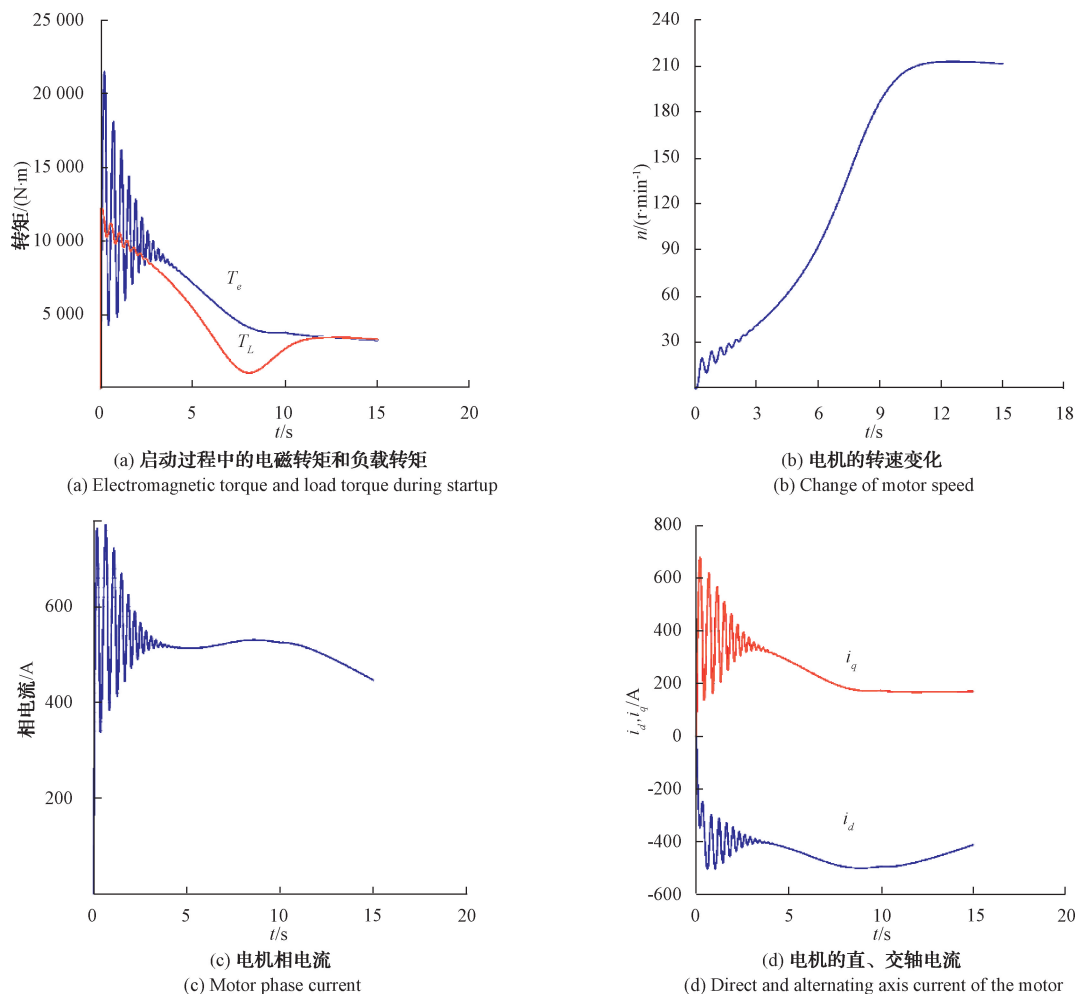


图6 不同功率角下的转速特性曲线

Fig. 6 Speed characteristic curves at different power angles

从趋势上看,转速还可继续增长;功率角为 30° 时,转速在12 s时达到200 r/min,从趋势看,此后不再增长;功率角为 40° 时,转速在10 s时,到达210 r/min,此后不再增长。

可见,功率角不能太小,但当功率角的取值增大到一定程度之后,启动时间变化不大,结合柴油机点火转速120 r/min的目标值,以及启动时间尽可能短的实际需求,因此取功率角 35° 是一个较合理的选择。



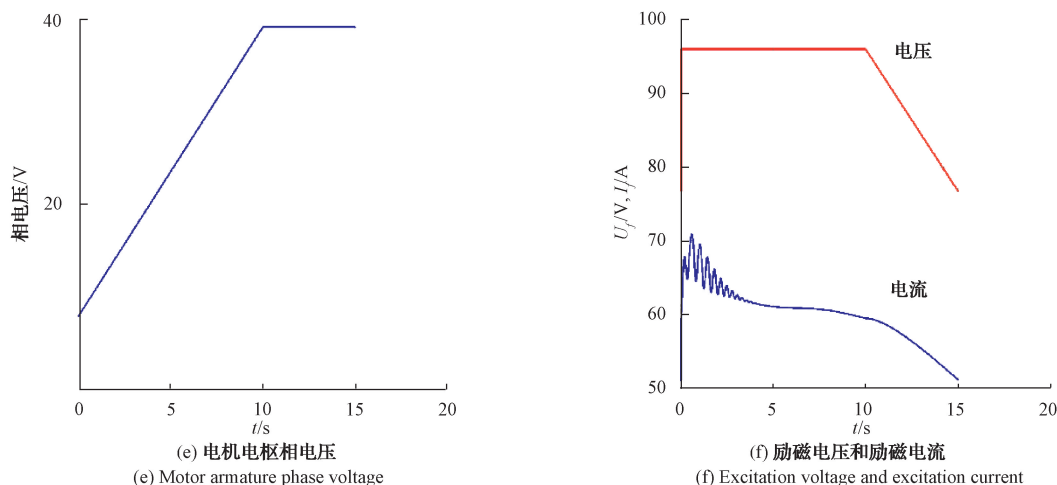


图7 35°功率角时启动过程仿真分析波形

Fig. 7 Waveform diagram of simulation analysis of start-up process at 35° power angle

2) 功率角为 35°时,启动过程的仿真分析

保持电压空间矢量与转子磁极轴线夹角为 35°电角度时,启动过程的仿真结果如图 7 所示。可见,同步电机启动时的机械转矩大于柴油机最大阻力转矩 12 000 N·m,可在 12 s 的时间内达到 210 r/min,电机在启动工况下的电压、电流、励磁电压、励磁电流均在限制范围内,满足设计需求。

4 结 论

通过对变频启动柴油机的工作原理进行研究,梳理启动工况的边界条件,推导出同步电机启动工况的状态方程。然而,直接求解状态方程,耗时较长,也很难得到精确解。为此,利用龙格库塔法快速准确的特点求解上述状态方程,将求解过程编写成仿真分析软件,对变频启动柴油发电机组的过程进行模拟分析。通过对比不同功率角工况下电机启动特性,最终确定选取 35°功率角时进行仿真分析;通过检测电机启动特性曲线和各项参数,得出电机的电磁参数可以满足启动柴油机的需求。本研究可以分析校验柴油发电机组的启动能力,确定适当的启动策略,具有一定的参考价值和工程指导价值。

参 考 文 献

- [1] 邓国璋. 内燃机车柴油机常见故障及应对策略[J]. 内燃机与配件, 2021(6):101-102.
DENG G ZH. Common faults of diesel locomotive diesel engines and countermeasures [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021(6):101-102.
- [2] 何林军. 内燃机车柴油机启动方式比较[J]. 南方农机, 2018, 49(9):192.
HE L J. Comparison of starting modes of diesel engines[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2018, 49(9):192.
- [3] 杨卫. 东风 4B 内燃机车柴油机运转故障的分析与处理[J]. 长春大学学报, 2019, 29(6):6-9, 14.
YANG W. Analysis and treatment of diesel engine running faults of Dongfeng 4B diesel locomotives [J]. Journal of Changchun University, 2019, 29(6):6-9, 14.
- [4] 文庆. HXN3B 型机车柴油机无法启机的故障原因及处理[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(6):112-114.
WEN Q. Failure analysis and solution of HXN3B locomotive diesel engine failure to start [J]. Railway Locomotive & Car, 2020, 40(6):112-114.
- [5] 许昕, 韩慧苗, 潘宏侠, 等. 基于多特征提取和 KECA 柴油机关键部件故障识别[J]. 电子测量技术, 2021, 44(19):63-68.
XU X, HAN H M, PAN H X, et al. Fault identification of key components of diesel engine based on multi feature extraction and KECA [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(19):63-68.
- [6] 钱铭, 张大勇, 廖洪涛. 复兴号高原双源动力集中动车组关键技术[J]. 中国铁路, 2022(6):1-9.
QIAN M, ZHANG D Y, LIAO H T. Key technologies of Fu Xing plateau dual-source power centralized EMU [J]. China Railway, 2022(6):1-9.
- [7] 孟凡顺. 内燃机车永磁同步电机牵引系统的改进[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.
MENG F SH. Improvement of traction system of permanent magnet synchronous motor for diesel locomotive [D]. Dalian: Dalian Jiao tong University, 2020.
- [8] 王金. FXN3 型客运内燃机车车体设计与分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
WANG Q. Carbody design and analysis of FXN3 passenger locomotive [D]. Dalian: Dalian University

- of Technology, 2019.
- [9] 蔡志伟,杨曦亮.三相桥式逆变蓄电池充电装置[J].铁道机车与动车,2014(6):45-48,7.
CAI ZH W, YANG X L. Three-phase bridge inverter battery charging device[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2014(6):45-48,7.
- [10] 宋杨,周庆强,陆璐,等.主发励磁斩波器在柴油机变频起动控制中的应用[J].铁道机车与动车,2016(12):14-16.
SONG Y, ZHOU Q Q, LU L, et al. Application of main generator excitation chopper in variable frequency starting control of diesel engine [J]. Railway Locomotive and Motor Car,2016(12):14-16.
- [11] 李娟虹,李硕,张冠男.内一电双动力机车的电传动系统拓扑方案研究[J].铁道机车与动车,2022(9):14-16,5.
LI J H, LI SH, ZHANG G N. Research of electric drive system topology scheme for dual-mode locomotives [J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2022(9):14-16,5.
- [12] 谷志锋,朱长青,呼树杰,等.机电复合调速系统反演自适应L2增益控制[J].仪器仪表学报,2017,38(7):1723-1730.
GU ZH F, ZHU CH Q, HU SH J, et al. Back-stepping adaptive L2-gain control of electromechanical governed system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(7):1723-1730.
- [13] 刘洋,王帅,杨晓霞,等.一种永磁同步电动机的宽调速范围控制方法[J].国外电子测量技术,2016,35(4):50-54.
LIU Y, WANG SH, YANG X X, et al. Wide speed range control method of permanent magnet synchronous motor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016,35(4):50-54.
- [14] 张勇,谭南林.基于遗传算法的内燃机车优化操纵研究[J].电子测量与仪器学报,2013,27(7):604-609.
ZHANG Y, TAN N L. Study on locomotive optimizing control based on genetic algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013,27(7):604-609.
- [15] 韦昌,樊昱晨,周永清,等.基于龙格库塔法的多输出物理信息神经网络模型[J].力学学报,2023,55(10):2405-2416.
WEI CH, FAN Y CH, ZHOU Y Q, et al. Multi-output physics-informed neural networks model based on the runge-kutta method [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023,55(10):2405-2416.
- [16] 户永清,陈正文.一种二阶常微分方程的数值解法[J].四川文理学院学报,2023,33(5):39-44.
HU Y Q, CHEN ZH W. A numerical method for solving second order ordinary differential equations[J]. Sichuan University of Arts and Science Journal,2023,33(5):39-44.
- [17] 张萍,田丰源,赵新贺,等.精细龙格库塔法计算变压器绕组的过电压分布[J].中国测试,2022,48(9):133-139.
ZHANG P, TIAN F Y, ZHAO X H, et al. Precise Runge-Kuta method to calculate overvoltage distribution of transformer windings [J]. China Measurement & Test, 2022,48(9):133-139.

作者简介

聂成(通信作者),硕士研究生,工程师,主要研究方向为交流同步电机的设计研发。

E-mail:niecnepu2015@163.com

王金玉,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为电气自动化技术。