

基于 Super-Twisting 算法的内燃机车 永磁同步发电系统策略研究

汤 成, 胡继胜

(大连交通大学 机车车辆工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 为了使内燃机车永磁同步发电系统在内燃机全速范围内和突变性负载条件下均能稳定控制中间直流环节电压且减小电压的脉振, 采用 Super-Twisting 高阶滑模算法对电压外环进行控制得到给定转矩, 与传统 PI 外环控制相比, 中间直流环节电压开始的超调减小, 且电压跟随性、稳定性得到提升。同时, 为了提高发电系统变流器容量利用率, 在矢量控制的基础上, 提出改进的功率因数控制策略对电机进行控制。仿真试验表明, 所提发电系统在内燃机宽转速范围、突变性负载条件下, 可以得到平稳且能够快速恢复的中间直流电压。同时, 发电系统在切换转矩内无功功率基本能稳定在零附近, 超过切换转矩后无功功率依旧保持较低水平, 提高了变流器容量利用率。

关键词: 永磁同步发电机; 内燃机车; 改进功率因数控制; Super-Twisting 滑模控制

中图分类号: TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)03-0099-05

doi: 10.12177/emca.2020.200

Strategy of Permanent Magnet Synchronous Power Generation System for Diesel Locomotive Based on Super-Twisting Algorithm

TANG Cheng, HU Jisheng

(College of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028)

Abstract: The permanent magnet synchronous power generation system of diesel locomotive needs to stably control the intermediate DC link voltage, as well as reduce the voltage pulsation within the full speed range of the internal combustion engine and under sudden load conditions. To meet these requirements, the super-twisting high-order sliding mode algorithm is used to control the voltage of the outer loop to obtain a given torque. Compared with the traditional PI outer loop control, the overshoot of the intermediate DC link voltage is reduced, and the voltage following ability and stability are improved. At the same time, in order to improve the utilization rate of the converter capacity of the power generation system, an improved power factor control strategy is adopted to control the motor based on vector control. Simulation experiments show that the proposed power generation system can obtain a stable and fast-recoverable intermediate DC voltage under the conditions of a wide range of internal combustion engine speed and sudden load. At the same time, the reactive power of the power generation system below the switching torque can basically stabilize near zero. After the switching torque is exceeded, the reactive power remains at a low level, which improves the utilization rate of the converter capacity.

Key words: permanent magnet synchronous generator (PMSG); diesel locomotive; improved power factor control; super-twisting sliding mode control

收稿日期: 2020-11-23; 收到修改稿日期: 2020-12-29

作者简介: 汤 成(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨道车辆运行控制及自动化。

胡继胜(1966—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为轨道车辆运行控制及自动化。

0 引言

永磁同步发电机(PMSG)具有结构简单、效率高、体积小、损耗小等特点,因此在诸如电动汽车、风力发电等领域得到广泛运用^[1]。将其运用到内燃机车发电系统中,对于减少内燃机车体积与降低运营维护成本具有重要意义^[2]。在内燃机车永磁同步发电系统运行中,因为转速由内燃机提供,无法频繁改变转速,所以关键问题变为对电机输出电磁转矩进行高质量控制,以最终实现功率平衡,为后续用电系统提供高质量的中间直流环节电压。对于电磁转矩的控制归结于2点:(1)根据中间直流电压实际值调整转矩给定;(2)根据给定转矩得到dq轴电流给定以实现对电机的控制。

目前,Super-Twisting滑模控制已经在永磁同步电机速度控制、四旋翼控制器、逆变器等领域开展了算法应用研究^[3-5],但是在内燃机车永磁同步发电领域报道较少。本文主要对内燃机车永磁同步发电系统控制策略进行研究,提出改进的功率因数控制结合Super-Twisting高阶滑模控制器,在获得脉振更小品质更高的中间直流环节电压的同时保证了中间变流器容量得到充分利用。通过仿真试验验证整套控制系统在内燃机全速范围内的发电性能可靠性。

1 内燃机车发电系统功率匹配

内燃机车永磁发电系统受限于内燃机的有限功率输出,内燃机功率得到充分发挥显得尤为重要,同时为了保证用电系统的运行稳定,保证输出的中间直流环节电压稳定必不可少^[6]。因此,内燃机车永磁同步发电系统应满足:

- (1) 发电系统在内燃机额定转速时所能发出的最大功率能满足后面负载系统所需功率;
- (2) 发电系统能在内燃机全速范围内实现功率平衡,持续稳定的提供给定中间直流环节电压;
- (3) 当负载发生突变时,发电系统能够快速稳定至给定电压。

本文发电系统中内燃机不同转速所能发出功率及带动的等效负载电阻如表1所示。

表1 转速所对应功率及等效电阻

转速/(r·min ⁻¹)	内燃机输出功率/kW	负载等效电阻/Ω
650	45	13.40
800	113	5.30
900	217	2.80
1 400	452	1.30
1 800	580	0.98

2 内燃机车永磁同步发电系统控制策略

2.1 PMSG 数学模型

旋转坐标系下,电机电压方程为^[7]

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt}i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt}i_q + \omega_e (\Psi_f + L_d i_d) \end{cases} \quad (1)$$

电磁转矩方程为

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

电机输出功率为

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \omega_e [\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \\ Q_s = \frac{3}{2} \omega_e (L_d i_d^2 + \Psi_f i_d + L_q i_q^2) \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_q 、 u_d 为定子电压的d、q轴分量; i_d 、 i_q 为定子电流的d、q轴分量; ω_e 为电角速度; Ψ_f 为永磁体磁链; T_e 为电磁转矩; p 为极对数; P_s 为定子输出端有功功率; Q_s 为定子输出端无功功率。

2.2 改进的功率因数控制

对于内置式永磁同步电机,由于 $i_d=0$ 控制策略电磁转矩只包含了永磁转矩分量,未能充分利用磁阻转矩分量,且会导致一部分无功功率流过变流器,增加变流器容量等级。相比 $i_d=0$ 控制方法,单位功率因数控制策略产生相同电磁转矩所需的定子电流幅值较小,因此电机铜耗降低,效率提高^[8]。故本文通过单位功率因数控制策略对发电机进行控制。

采用单位功率因数控制时,永磁同步电机的空间矢量图如图1所示。通过对电机d、q轴电流的控制,使定子电压 u_s 滞后定子电流 i_s 相位 180° , u_s 与 $-i_s$ 重合,从而消除无功功率。由式

(3)可知,当令无功功率 $Q_s = 0$ 时,其在 dq 轴电流坐标系中为一个只与电机参数有关的,且过点 $(-\frac{\Psi_f}{L_d}, 0)$ 和零点的椭圆,如图 2 所示。当电机进行力矩控制时,只要力矩曲线与无功功率椭圆有合理的交点即可实现对电机的单位功率因数控制。因此通过计算,保证交点在极限电流圆与极限电压圆之内,同时选取电流最小的交点 A ,使电机工作在转矩曲线与无功功率曲线的一系列交点上,即可以实现对电机的单位功率因数控制。

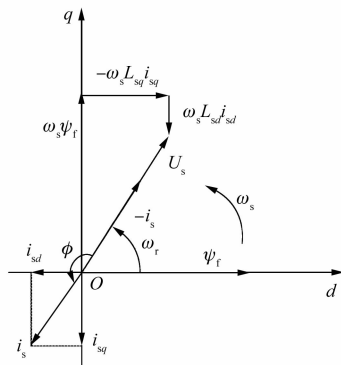


图 1 空间矢量图

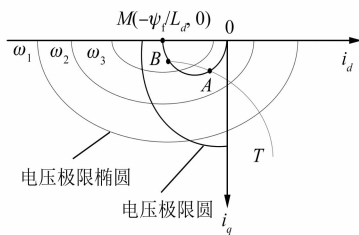


图 2 单位功率因数控制

但因为单位功率因数功率控制输出力矩能力有限,所以本文提出一种改进功率因数控制。即通过拉格朗日极值定理推导出给定转矩下输出无功功率的极小值。利用无功功率公式与转矩公式建立拉格朗日辅助函数:

$$H = L_d i_d^2 + \Psi_f i_d + L_q i_q^2 + \lambda \left\{ T_e - \frac{3}{2} p i_q [i_d (L_d - L_q) + \Psi_f] \right\} \quad (4)$$

式中: λ 为拉格朗日乘子。

对式(4)中的 i_d 、 i_q 、 λ 分别求偏导,并令其分别等于零,得:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial i_d} = 2L_d i_d + \Psi_f - \frac{3}{2} \lambda p i_q (L_d - L_q) = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial i_q} = 2L_q i_q - \frac{3}{2} \lambda p [i_d (L_d - L_q) + \Psi_f] = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial \lambda} = T_e - \frac{3}{2} p i_q [i_d (L_d - L_q) + \Psi_f] = 0 \end{cases} \quad (5)$$

进而得出转矩控制时输出最小无功功率时的给定 d 、 q 轴电流。

取切换转矩为单位功率因数控制的最大输出转矩,当转矩小于等于切换转矩时,采用单位功率因数控制;当转矩大于切换转矩时,采用改进的功率因数控制以得到最小的无功功率

2.3 电压外环 Super-Twisting 滑模控制的实现

PMSG 整流器脉宽调制(PWM)在 d - q 轴上数学模型^[9]可表示为

$$\begin{cases} e_d = -R i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega L_q i_q + S_d U_{dc} \\ e_q = -R i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega L_d i_d + S_q U_{dc} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (S_d i_d + S_q i_q) - i_L \end{cases} \quad (6)$$

式中: e_d 、 e_q 为感应电动势 d 、 q 轴分量; R 为定子电阻; L_d 、 L_q 为电机 d 、 q 轴电感; ω 为同步角速度; S_d 、 S_q 为开关函数 d 、 q 轴分量; U_{dc} 为中间直流环节电压; C 为直流环节支撑电容; i_L 为中间直流环节电流。

忽略滤波电感与开关损耗,PWM 整流器输入有功功率满足^[10]:

$$P_s = C u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} + u_{dc} i_L = T_e \omega_r \quad (7)$$

由式(7)可得:

$$\frac{C}{2} \frac{du_{dc}^2}{dt} = T_e \omega_r - p_0 \quad (8)$$

式中: ω_r 为机械角速度; p_0 为负载消耗功率, $p_0 = u_{dc} i_L$ 。

由式(8)可知,发电系统将电磁转矩作为控制输入量,当负载功率发生变化时,中间直流环节电压会受到影响而产生波动,因此电磁转矩的控制策略会直接影响中间直流环节电压的稳定性和稳定速度。

由以上分析可得该系统的电压外环子系统模

型为

$$\dot{x} = a_1 T_e - a_0 P_0 \quad (9)$$

式中: \dot{x} 为 u_{dc}^2 的导数值; $a_1 = \frac{2}{C}$; $a_0 = \frac{2\omega_r}{C}$ 。

根据式(9)可定义电磁转矩滑模面函数为

$$s = u_{dc}^{*2} - u_{dc}^2 \quad (10)$$

则:

$$\dot{s} = -\frac{du_{dc}^2}{dt} = -\dot{x} \quad (11)$$

式中: s 为电磁转矩滑模面; u_{dc}^* 为给定中间直流环节电压; u_{dc} 为中间直流环节电压实际值; \dot{s} 为电磁转矩滑模面的导数值; \dot{x} 为 u_{dc}^2 的导数值。

进而根据 Super-Twisting 高阶滑模控制理论可得转矩滑模控制律为

$$\begin{cases} T_e^* = K_p |s|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(s) + u + \frac{a_0 P_0}{a_1} \\ \frac{du}{dt} = K_i \text{sgn}(s) \end{cases} \quad (12)$$

式中: K_p 、 K_i 为正常数; u 为辅助控制变量。

3 仿真验证及结果分析

为了验证本文永磁同步发电系统的控制策略的正确性与有效性,基于 MATLAB/Simulink 搭建了 PMSG 矢量控制系统,如图 3 所示。其中,内燃机转速由转速给定模块代替,模仿了内燃机由怠速提速并最终稳定到额定转速的过程。Super-Twisting 模块为根据式(12)搭建的电压外环转矩给定模块,其中参数 $K_p = 1$ 、 $K_i = 100$ 。 d 、 q 轴电流给定由改进的功率因数控制模块给定。PMSG 参数如表 2 所示。

表 2 PMSG 参数

参数名称	参数值
额定功率 P/kW	580
极对数 p	4
定子电阻 R/Ω	0.001 3
磁链 ψ/Wb	0.259
d 轴电感 L_d/mH	0.12
q 轴电感 L_q/mH	0.26

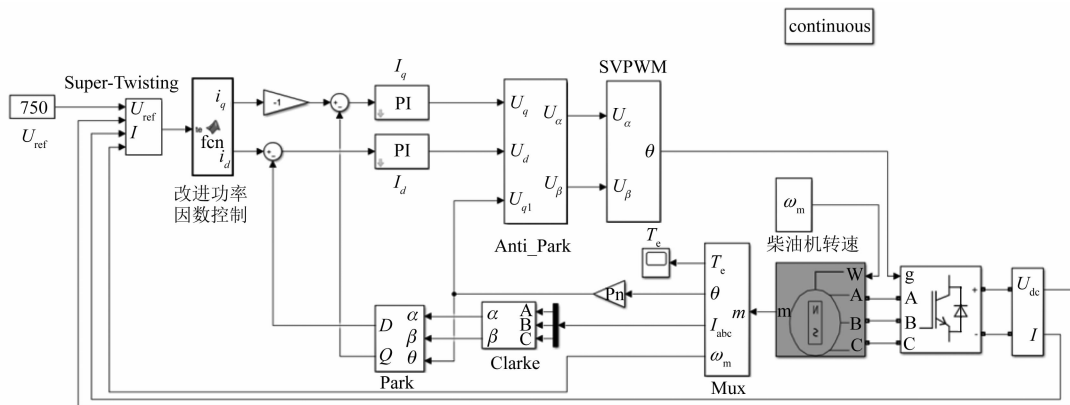


图 3 内燃机车永磁同步发电控制系统结构图

在内燃机给定转速模块给定转速由 650 r/min 提速到 1 800 r/min 的动态过程中,对系统施加如表 1 所示的等效负载电阻可得运行曲线如图 4 所示。起始施加负载电阻为 13.4 Ω 。比较图 4(a)和图 5(a)可知,与传统 PI 电压外环相比,Super-Twisting 滑模控制下电压超调量由 1 117 V 下降至 761 V。由图 4(b)和图 5(b)可知,施加相同突变负载下,Super-Twisting 滑模控制比传统 PI 控制电压值能更快地跟随在 750 V

附近,且满载时的电压波动减小了 34%。由图 4(d)可以观察到,电流轨迹确实沿着无功功率椭圆运行,直至运行至切换转矩处,开始沿最小无功功率曲线运行。比较图 4(c)和图 6 可知,与传统最大转矩电流比控制相比,本文所提的改进功率因数控制下的电机输出最大无功功率减少了约 50%,提高了变流器容量利用率的同时,补足了单位功率因数最大输出转矩以外的无功功率控制。

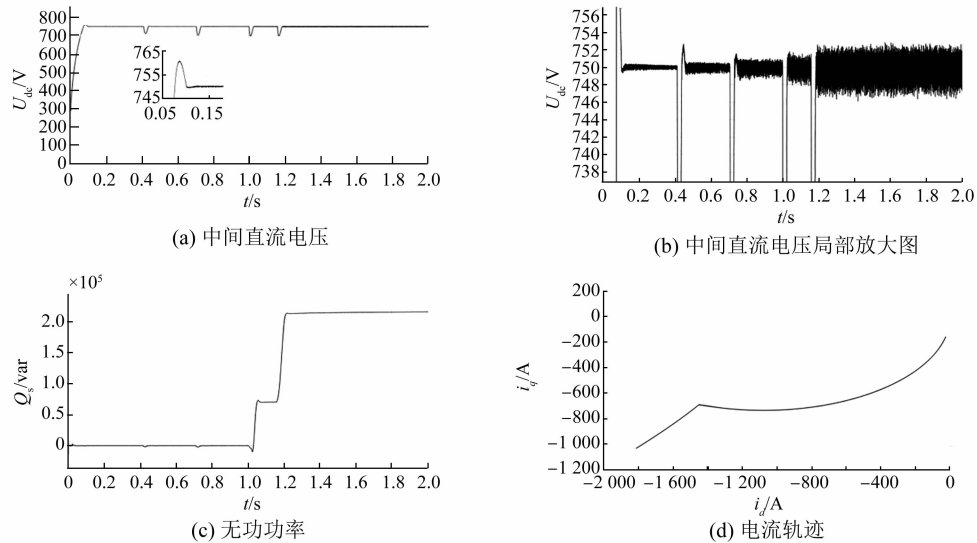


图4 Super-Twisting 滑模控制曲线

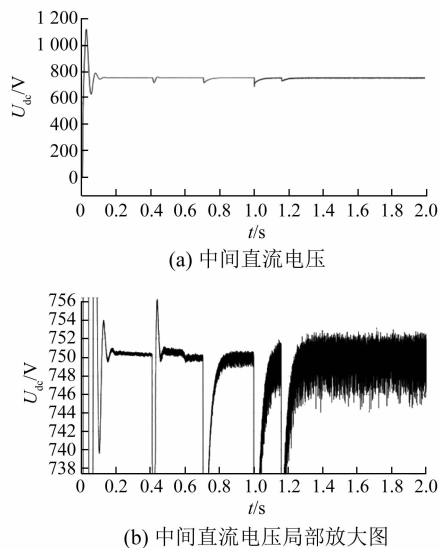


图5 PI 控制曲线

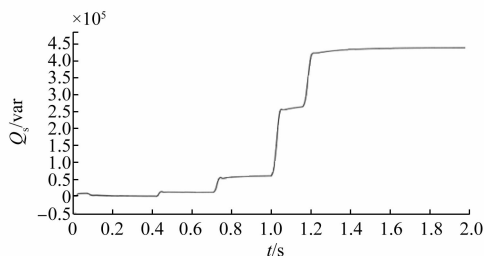


图6 最大转矩电流比控制无功功率图

4 结 语

本文以稳定中间直流环节电压与提高变流器容量利用率为目的,提出了一套结合 Super-Twisting 算法与改进的功率因数控制策略的内燃机车发电控制系统,仿真结果表明该控制策略有效可行。与传统 PI 电压环控制相比,对于提高全速范围内,突变负载下电压跟随速度与稳定性,Super-Twisting 滑模控制具有更优异的性能。同时,改进的功率因数控制弥补了单位功率因数控制的不足,使电机不仅能输出更大的转矩也能输出最小的无功功率,保证了变流器容量的利用率。

【参考文献】

- [1] 沈建新, 缪冬敏. 变速永磁同步发电机系统及控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 1.
- [2] 杨征. 柴油发电机组功率匹配优化设计[J]. 柴油机设计与制造, 2012, 18(1): 24.
- [3] 葛如愿, 邓福军. 基于 super-twisting 滑模的永磁同步电机转矩环控制器设计[J]. 微电机, 2018, 51(2): 51.
- [4] 石智梁, 林旭梅, 刘帅. 基于超扭曲算法的鲁棒自适应四旋翼控制器[J/OL]. 电光与控制 [2021-01-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.TN.20201016.1911.006.html>. (下转第 109 页)

示。从表 3 可以得出,所有区间若只采用单一的牵引力分配策略,则 4 种分配策略的能耗分别为

3 415.7、2 836.3、2 411.6、2 876.7 kW·h,比目前采用策略 1 的分配策略,约节能了 29.4%。

表 3 不同策略下各区间能耗详细数据

策略	区间1	区间2	区间3	区间4	区间5	区间6	区间7	区间8	总能耗
TS1	224.2	301.8	304.5	275.9	171.2	325.4	1 811.7	1.0	3 465.8
TS2	227.2	260.3	266.8	212.5	138.7	291.9	1 438.0	0.9	2 836.2
TS3	205.4	249.3	266.8	212.5	138.7	277.9	1 060.1	0.9	2 411.5
TS4	219.6	272.8	304.5	275.9	171.2	296.6	1 335.2	0.9	2 876.8

4 结 语

本文从整车牵引功率动态分配角度出发,提出了一种自动驾驶机车牵引电机节能控制策略。现场运行数据测试表明,与目前所用控制方法相比,本文所提动态功率分配策略,约节能了 29.4%。此外,该方法无需改造现有牵引系统硬件,仅需升级相关软件,工程实现简单,具有良好的应用前景。

【参 考 文 献】

- [1] 张友兵,陈志强,王建敏,等. 高速铁路 ATO 系统控车舒适度技术研究[J]. 铁道工程学报,2019,36(3): 67.
- [2] 王东方,李红侠. 京张高铁 CTCS-3+ATO 系统工程设计方案研究[J]. 铁道标准设计,doi: 10. 13238/j. issn. 1004-2954. 202006170008.
- [3] 肖勇,朱龙,吴军,等. HX_D1 型机车自动驾驶系统设计与应用[J]. 机车电传动,2020(1): 69.
- [4] 肖家博,尚敬. 货运机车自动驾驶系统研究与设计[J]. 控制与信息技术,2018(6): 38.
- [5] 张兴华,孙振兴,王德明. 电动汽车用感应电机直接转矩控制系统的效率最优控制[J]. 电工技术学报,2013,28(4): 255.

- [6] 左厚贝,张兴华. 考虑铁损的感应电机直接转矩控制的效率优化[J]. 微电机,2011,44(8): 51.
- [7] 吕刚,孙守光,马云双. 城市轨道交通中直线感应牵引电机的效率最优控制[J]. 电机与控制学报,2009,13(4): 490.
- [8] 金梅,侯楚林. 基于损耗模型的感应电机效率优化控制研究[J]. 电测与仪表,2010,47(12): 27.
- [9] 郭洪英. 基于直接磁链矢量的感应电机转矩效率最优控制[J]. 微特电机,2017,45(8): 68.
- [10] 张兴华,孙振兴,左厚贝. 感应电机空间矢量直接转矩控制系统的效率优化[J]. 电力自动化设备,2012,32(7): 52.
- [11] 徐燕,杨跃农. 异步电机相控优化节能控制技术分析[J]. 电机与控制应用,2012,39(11): 43.
- [12] 王爱元,李洁,任龙飞,等. 变频器供电的异步电机节能控制运行的研究进展[J]. 电机与控制应用,2010,37(1): 34.
- [13] 常进,张曾科. 感应电机恒功率因数控制的研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11): 71.
- [14] 丁宝. 基于矢量空间最小励磁电流的电机节能研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(1): 142.
- [15] 李学明,彭辉,谭永光,等. HXN6 型大功率混合动力内燃机车传动控制系统[J]. 机车电传动,2017(6): 41.

(上接第 103 页)

- [5] 滕青芳,佐俊,潘浩,等. 基于时变增益扩张状态观测器的逆变器系统自适应 super-twisting 电压鲁棒控制[J]. 控制理论与应用,2020,37(9): 1880.
- [6] 牛建民,卢亚辉,徐保荣. 基于永磁同步发电机可控整流稳压发电系统研究[J]. 机电工程技术,2020,49(7): 53.
- [7] 陈瑞培. 变速永磁同步发电机控制策略研究[D]. 厦门: 华侨大学,2019.

- [8] 张永刚. 大功率永磁同步电机发电运行状态下的单位功率因素控制研究[J]. 电气自动化,2017,39(6): 15.
- [9] 张越雷. 变速永磁同步发电系统关键技术研究[D]. 长沙: 湖南大学,2016.
- [10] 王久和. 电压型 PWM 整流器的非线性控制[M]. 北京: 机械工业出版社,2015: 90-94.