

基于功率动态分配的自动驾驶机车 牵引电机节能控制

李学明, 徐绍龙, 蒋奉兵, 褚金鹏

(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为了降低大功率机车牵引电机运行能耗, 提出了一种基于牵引功率动态分配的机车牵引电机节能控制方法。首先, 结合现场运行数据, 建立牵引电机效率与其发挥牵引力及运行速度间的数学模型。然后, 利用机车自动驾驶系统规划的区间速度及牵引力运行曲线, 基于所建立的数学模型对不同牵引力分配策略下综合牵引电机能耗指标等进行计算, 并选择最小化目标函数值的牵引力功率分配方案, 控制机车各轴牵引力输出。最后, 基于 HX_D1 型自动驾驶机车现场某条线路各区间运行数据, 对所提方法进行仿真分析, 验证了该方法的有效性。

关键词: 牵引电机; 损耗模型; 节能控制; 功率动态分配

中图分类号: TM 922.71 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)03-0104-06

doi: 10.12177/emca.2020.215

Energy-Saving Control of Traction Motor for Automatic Driving Locomotive Based on Power Dynamic Distribution

LI Xueming, XU Shaolong, JIANG Fengbing, CHU Jinpeng

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: In order to reduce the operating energy consumption of high-power locomotive traction motor, an energy-saving control method for locomotive traction motors based on dynamic distribution of traction power is proposed. Firstly, based on field operation data, a mathematical model between traction motor efficiency and its traction effort and running speed is established. Then, using the interval velocity and traction operating curve planned by the automatic driving system, the traction motor energy consumption under different traction distribution strategies is calculated based on the mathematical model. The traction power distribution scheme with the minimum objective function value is selected to control the traction output of each axle of the locomotive. Finally, the proposed method is simulated and analyzed based on the operating data of a certain line and each section of the HX_D1 automatic driving locomotive, and the effectiveness of the method is verified.

Key words: traction motor; loss model; energy-saving control; power dynamic distribution

0 引言

列车自动驾驶技术作为轨道交通智能化的重要前沿技术之一, 已在行业内得到充分关注和应用^[1]。上海轨道交通 10 号线、北京燕房线等率先实现了城市轨道交通领域的列车全自动驾驶; 广

东惠莞线和京张高铁线分别建成了中国列车运行控制系统-2 级 (CTCS2) + 列车自动运行系统 (ATO) 的干线城际铁路和基于 CTCS3+ATO 的高速铁路自动驾驶试验^[2]。由中车株洲所研发的 HX_D1 型机车自动驾驶系统已累计安全运行 27 万多公里^[3]。随着轨道交通装备智能化程度的提

收稿日期: 2020-11-24; 收到修改稿日期: 2021-01-15

作者简介: 李学明 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为牵引系统控制、故障诊断与预测。

高,客户对设备运营的安全可靠、平稳、正点、节能、经济、高效等方面提出了更高的要求^[4]。

机车特别是大功率机车,其单轴牵引电机额定功率一般超过 1 000 kW,机车能耗绝大部分为牵引能耗,而牵引电机额定功率运行时的效率一般在 0.90~0.95 之间,在额定功率以下运行时则效率更低,且在同一速度下不同牵引力发挥时其效率相差较大。目前关于电机节能控制方法研究较多,主要有基于电机损耗模型的最优控制^[5-10],降压节电控制^[11],搜索控制^[12]、恒功率因数控制^[13]、最小励磁电流控制^[14]等。

综上所述,通常以单台电机为考虑对象,通过建立电机损耗模型或与损耗强相关的控制量,从而调整实时控制策略,实现当前工况下电机损耗优化控制。此类方法需对电机损耗模型进行深入研究并对成熟控制策略进行大量调整优化,工程实现较复杂。为此,本文考虑从整车系统出发,基于 HX_D1 自动驾驶机车自动驾驶装置的规划信息,提出了一种基于牵引功率动态分配的机车牵引电机节能控制方法。根据牵引吨位、线路约束的牵引功率需求等约束,实时计算未来规划区间内的功率需求,基于牵引电机效率最优进行各轴牵引力动态分配,在保证安全运用的条件下,实现牵引电机能耗最低。

1 机车牵引传动系统及其牵引力分配控制原理

1.1 机车牵引传动系统介绍

交流传动电力机车牵引传动系统典型主电路结构原理如图 1 所示。主要由牵引变压器、牵引变流器(包括充电回路、四象限整流器、中间直流环节、逆变器等)和牵引电机 3 部分组成。单相 25 kV 交流电经过受电弓、真空断路器 VCB 和牵引变压器一次侧进入车体,由牵引变压器二次侧绕组向变流电路提供单相交流电。交流电流在四象限整流器的作用下变换成脉动直流电,经中间直流环节滤波后,利用逆变器转换成频率和幅值可变的三相交流电驱动牵引电机,从而控制机车以不同速度和牵引力前进。以 HX_D1 机车为例,其机车轴式为 2(B₀-B₀),整个机车由 2 节完全相同的 4 轴电力机车通过固定重联方式构成。每节机车配置 1 台牵引变压器、1 台变流器和 4 台牵

引电机,每个牵引变流器配置 1 个传动控制单元(TCU)^[15],实现牵引传动系统的实时控制、诊断与保护及网络通信等功能。

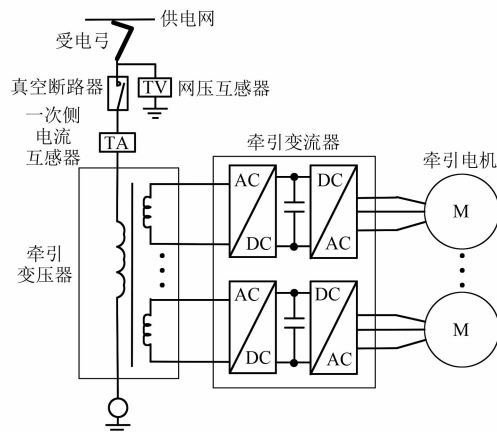


图1 机车牵引传动系统典型主电路结构原理

1.2 牵引力分配控制原理

HX_D1 型自动驾驶机车每节机车配置一套自动驾驶装置 ATO^[3],通过接收来自列车运行监控装置、网络中央控制单元(CCU)、制动控制单元及机车电台的数据,基于自动驾驶控制策略实现对机车牵引系统、制动系统的控制,最终实现机车的自动驾驶功能^[4]。

机车的牵引制动力分配控制流程如图 2 所示。ATO 装置结合列车运行线路数据、车辆数据、监控信号及机车牵引/制动特性,对列车运行行程进行评估,基于安全、平稳、正点、减负及节能等原则,自动规划机车在前方区间的最优化目标速度曲线和整车牵引制动力设定曲线,并以目标工况(牵引或制动)和目标级位(对应手柄级位)的形式发送给 CCU 装置。CCU 收到该信息后,结合目标工况,将级位信息进行转换成整车牵引制动力,并按各轴平均分配的方式将整车力分解成每轴牵引制动力,通过多功能车辆总线(MVB)通

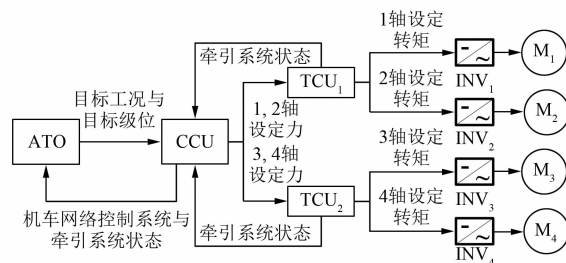


图2 机车牵引制动力分配控制流程

信方式发送给该节机车对应的 2 个 TCU。TCU 收到每轴设定力后,根据机车传动比和轮径信息将设定力转换成对应的设定转矩,并通过控制本轴牵引逆变器(INV)IGBT 脉冲,驱动牵引电机实现设定转矩的实时闭环控制。

2 牵引电机节能控制策略

2.1 算法基本原理

本文提出的基于功率动态分配的自动驾驶机车牵引电机节能控制算法如图 3 所示。

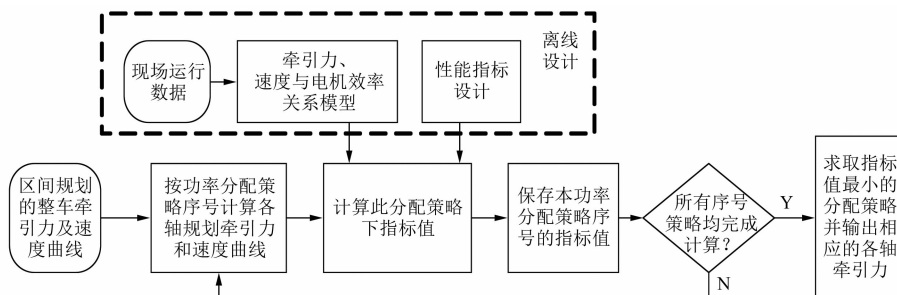


图3 基于功率动态分配的机车牵引电机节能控制算法流程图

整个算法分成离线设计与在线实现 2 部分。离线设计阶段,通过深入分析大量机车历史现场运用数据,基于数据驱动方法,建立牵引电机效率与牵引力、速度间的关系模型并确定评价策略优劣的性能指标。其中,性能指标综合考虑节能效果和各轴牵引力的均衡程度,采用带等式约束的多目标优化函数作为其评价指标,各目标间的权重系数根据用户需求可自定义。在线实现阶段,在每个运行区间初始位置,首先,读取区间规划的整车牵引力及速度曲线,根据策略序号计算每种牵引力分配策略下的规划牵引力和速度曲线。其次,基于离线设计得到的牵引电机效率模型以及性能指标计算式,计算各种牵引力分配策略下的指标值。最后,选定使目标函数最小的策略,并根据对应策略序号输出相应策略下的各轴牵引力进行牵引电机控制。下文对算法中涉及的各项功能单元设计原理进行了详细阐述。

2.2 电机效率建模

基于历史正常工况下运行数据中记录的一次侧电压、一次侧电流、机车牵引力、机车速度等信息,估计算机车效率与牵引力、速度间的关系,效率随牵引力和速度的分布三维图如图 4 所示。

分析图 4 可知,同一速度下不同牵引力发挥时效率相差较大,且效率与发挥牵引力不是单调线性关系,基于数据对其函数关系式以 1 km/h 为步长进行分段五阶多项式拟合,拟合式如下:

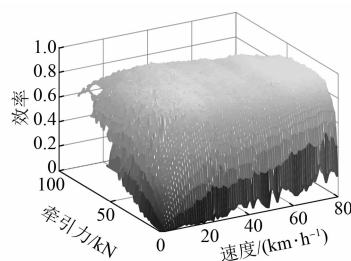


图4 牵引电机“牵引力-速度-效率”三维图

$$\eta = a_0(n) \cdot F^5 + a_1(n) \cdot F^4 + a_2(n) \cdot F^3 + a_3(n) \cdot F^2 + a_4(n) \cdot F^1 + a_5(n) \quad (1)$$

可得不同速度条件下全牵引力范围的效率关系式:

$$\eta = f_{\eta}(F, v) \quad (2)$$

式中: $a_0 \sim a_5$ 为多项式函数中的拟合系数; n 为第 n 个速度段,如第 1 个速度段包括的速度范围 v_1 为 $0 \text{ km/h} \leq v_1 < 1 \text{ km/h}$,第 n 个速度段包括的速度范围 v_n 为 $(n-1) \text{ km/h} \leq v_n < n \text{ km/h}$ 。

不同速度区间分段拟合的均方误差如图 5 所示。

由图 5 可以看出,最大拟合误差为 0.066 5,平均误差为 0.042 6,满足优化目标精度要求。

2.3 性能指标设计

假设规划的区间长度为 S_N ,则区间规划的速度、牵引力曲线分别为

$$v = f_v(s), 0 < s \leq S_N \quad (3)$$

$$F = f_F(s), 0 < s \leq S_N \quad (4)$$

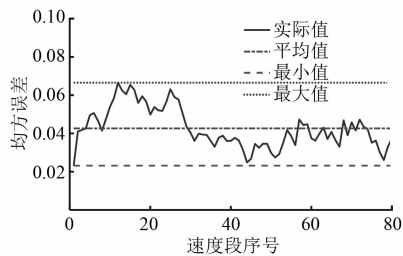


图5 拟合误差结果

各轴牵引力发挥存在较大偏差时会对列车平稳性等控制性能产生一定影响,因此为了兼固效率同时尽可能均衡各轴牵引力发挥,有效衡量牵引力分配好坏,构造如下优化指标,求解最优化问题求取各轴最佳分配牵引力曲线:

$$\begin{aligned} \min J &= k_1 \cdot J_{\eta} + k_2 \cdot J_B \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^4 F_i(s) &= F(s), 0 < s \leq S_N \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $J_{\eta} = \int_0^{S_N} \sum_{i=1}^4 \frac{F_i(s)}{\eta[F_i(s), v(s)]} ds$, $J_B = \int_0^{S_N} \frac{\sum |F_i(s) - F_j(s)|}{6} ds, i > j \text{ 且 } i, j = 1, 2, 3, 4$, J_{η} 、 J_B 分别为衡量牵引能耗以及每节机车 4 个轴牵引力 ($F_i, i = 1, 2, 3, 4$) 均衡程度相关的性能指标; k_1 、 k_2 为两者的权重系数,用来表征对 2 个指标的关注程度; $F(s)$ 和 $F_i(s) (i = 1, 2, 3, 4)$ 分别表示每个位移点对应的整节机车牵引力和机车 4 个轴对应的牵引力。

2.4 牵引力分配策略设计

在现有的电力机车自动驾驶牵引力分配中,通常采用均衡分配策略(表 1 中 TS1),原因是此种分配策略实现最为简单。为了在考虑工程实现方便的同时具备良好的节能效果,本文综合单轴牵引电机效率最优曲线以及惰行方案,增加 TS2~TS4 3 种分配策略,如表 1 所示。其中,分配策略 TS3 和 TS4 中惰行牵引电机数目根据本区间最大功率需求来确定。3 种牵引力分配策略均具有工程实现简单,物理意义清晰等优点。同时,为了在满足节能效果的同时避免频繁进行牵引力分配策略切换,考虑在同一个规划区间只采用一种分配策略,通过对整条线路上每个规划区间内均选择使能耗最小的策略来保证整条线路内节能效果最佳。

表 1 分配策略列表

序号	策略代号	策略说明
1	TS1	各轴牵引力均衡分配;可考虑默认状态或故障工况下采用此策略
2	TS2	尽可能多的轴效率最优,其余轴均衡分配
3	TS3	尽可能多的轴惰行,其他轴尽可能多的效率最优
4	TS4	尽可能多的轴惰行,其他轴均衡分配

整个机车牵引电机节能控制算法在线计算流程如图 6 所示。

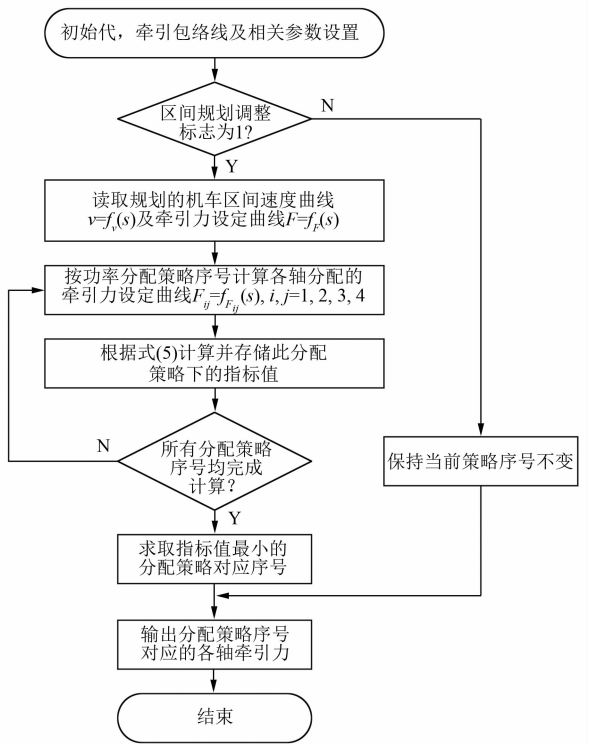


图6 牵引电机节能控制算法在线计算流程图

在进行初始化以及相关参数设置完成后,首先基于机车当前位移对其区间位置进行实时判断,当处于规划区间起始位置时,置区间规划调整标志为 1 并开始进行分配策略计算,否则保持当前分配策略不变。然后,当区间规划调整标志为 1 时,读取当前规划区间速度及牵引力规划曲线,并根据式(5)计算 4 种分配策略对应的指标值。最后,求取指标值最小的分配策略对应的各轴牵引力作为牵引电机的给定输出。图 6 中, F_{ij} 表示第 i 种分配策略下的第 j 轴牵引力设定曲线。牵引力分配计算举例说明:以 HX_D1 机车为例,该车

每个自动驾驶装置负责 4 个轴牵引力控制。假设某时刻整节车设定牵引力 F_T 要求为 150 kN,此速度下根据电机特性曲线求得的单轴最大允许发挥牵引力 $F_{\max}$ 为 60 kN,则根据表 1,不同策略下各轴发挥牵引力计算如表 2 所示。

表 2 机车功率分配策略数值算例	
策略序号	不同策略各轴牵引力分配结果
1	$F_{1i} = 150/4 = 37.5 \text{ kN} (i = 1, 2, 3, 4)$
2	$F_{21} = F_{22} = F_{\max}, F_{23} = F_{24} = (F_T - 2 \cdot F_{\max})/2 = 15 \text{ kN}$
3	$F_{31} = F_{32} = F_{\max}, F_{33} = 0, F_{34} = F_T - 2 \cdot F_{\max} = 30 \text{ kN}$
4	$F_{41} = 0, F_{42} = F_{43} = F_{44} = F_T/3 = 50 \text{ kN}$

3 算法现场数据验证

根据 HX_D1 机车记录的某趟两站点间实际线路自动驾驶运行数据,对上述牵引力分配控制策略的节能效果进行验证。性能指标函数中, k_1 与 k_2 分别取 1.0 和 0.2。

整个线路的区间序号以及整车规划牵引力和速度如图 7 和图 8 所示。由图 7、图 8 可知,此趟线路长度共约 56 km,整个运行线路包括 8 个规划区间,即在此线路上需根据优化指标式(5)对分配策略进行 8 次自动规划;机车运行速度在 0~80 km/h 间动态变化,整车规划牵引力在 0~465 kN 之间波动。

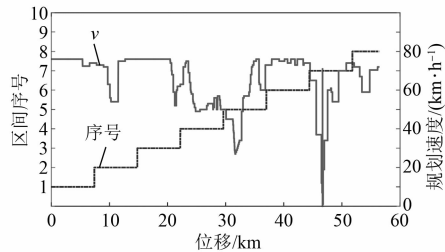


图 7 区间序号及速度对应图

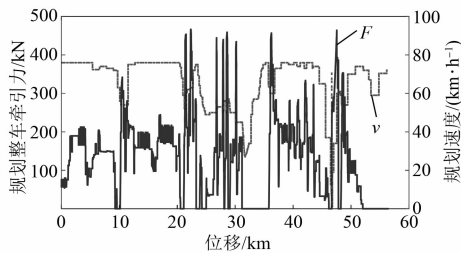


图 8 整趟线路区间规划整车牵引力及速度

不同策略下各轴分配牵引如图 9 所示。从图

9 可以看出,采用策略 1 时,其各轴牵引力均相等,策略 2 的 1 轴牵引力最大,策略 3 的 4 轴惰工况最多且 1 轴牵引力最大,策略 4 的 4 轴惰工况最多且 1,2 轴牵引力发挥较均衡,与表 1 中对应分配策略相符。

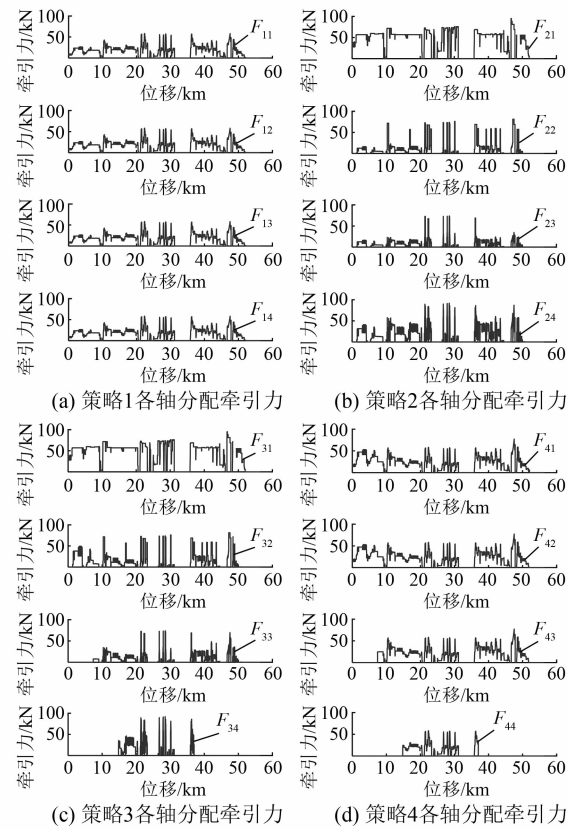


图 9 不同策略下各轴分配牵引力

各分配策略节能控制结果如图 10 所示。从图 10 可以看出,此趟线路的 8 个规划区间,不同分配策略节能效果不尽相同。其中,区间 3、4、5 采用策略 TS2 能达到最优节能效果,其余区间采用策略 TS3 节能效果最佳,而采用分配策略 TS1 能耗均最大。

不同策略下各区间能耗详细数据如表 3 所

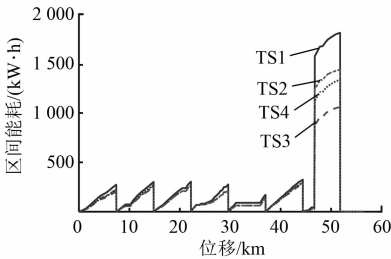


图 10 各分配策略节能控制结果

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 kW·h

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. 城轨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.