

电梯节能能量自动回馈控制系统软硬件设计研究

谭力龙*, 兀光波, 聂朝瑞

陕西职业技术学院 陕西西安

【摘要】随着现代城市的智能便捷发展,电梯成为各类建筑服务人们生活的必需品,而随着电梯数量急剧增加,其能量消耗显著提升了城市用电需求。在节能环保理念指引下,如何减少电梯能量消耗成为重要的研究课题。电梯节能能量自动回馈控制系统作为电梯能量回收再利用的重要途径,不仅可以有效降低电梯能量消耗,而且可以减少供电需求,降低电梯运行成本。本文即以此为研究背景,通过阐述能量回馈装置的技术原理,分别提出电梯节能能量自动回馈控制系统的软硬件设计方案。

【关键词】电梯; 自动回馈控制系统; 软硬件设计; 节能

【基金项目】课题“基于电网阻抗在线辨识的电梯能量回馈装置的研究”(项目编号: 22JK0340)

【收稿日期】2025 年 2 月 15 日

【出刊日期】2025 年 3 月 31 日

【DOI】10.12208/j.sdr.20250017

Research on software and hardware design of elevator energy saving automatic feedback control system

Lilong Tan*, Guangbo Wu, Chaorui Nie

Shaanxi Vocational and Technical College, Xi'an, Shaanxi

【Abstract】 With the intelligent and convenient development of modern cities, elevators have become necessities for all kinds of buildings to serve people's lives, and with the sharp increase in the number of elevators, their energy consumption has significantly increased the urban electricity demand. Under the guidance of the concept of energy conservation and environmental protection, how to reduce the energy consumption of elevators has become an important research topic. As an important way of elevator energy recovery and reuse, elevator energy saving automatic feedback control system can not only effectively reduce elevator energy consumption, but also reduce power demand and reduce elevator operating costs. Based on this background, this paper expounds the technical principle of energy feedback device, and puts forward the hardware and software design scheme of elevator energy-saving energy automatic feedback control system respectively.

【Keywords】 Elevators; Automatic feedback control system; Software and hardware design; Energy conservation

在城市化发展与高层建筑持续建设进程中,电梯成为建筑物垂直运输的关键工具,不仅已经完全融入人们的工作生活,而且成为不可或缺的核心器械。尽管每台电梯的规格、使用频率等数据不同,但根据相关统计,我国每台电梯每日耗电量平均在 30-40kW·h 之间。虽然每台电梯的耗电量较低,但由于电梯数量巨大,其累计消耗的能量成为不可忽视的能耗窗口。因此,研究与开发电梯节能能量自动回馈控制系统成为利国利民、获取良好社会效益的

重要举措。

1 能量回馈装置的技术原理分析

从本质上分析,曳引驱动电梯是一个不平衡系统,主要通过轿厢与对重的不平衡关系,达到控制轿厢升降的目的与效果。因此该系统属于位势能负载特征,当轿厢载荷不断变化时,负载力矩的方向也会随之改变。常见的电梯运行状态可以从三个方面展开分析,一是电梯满载下行模式,二是电梯空载上行模式,三是电梯平层前减速停靠。在以上三

*通讯作者: 谭力龙(1988-)男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向自动化控制领域、职业教育领域。

个运行状态下, 电梯驱动电机一直保持发电状态, 因此可以利用该环节变频器中的续流二极管, 将驱动电机生成的能量进行回馈传输, 并最终导入变频器直流侧电容。通过该方式, 变频器直流侧电压会有所升高, 进而提供一定的泵升电压, 从而通过大功率电阻将其转化为热能(巩盛, 2024)。该技术有着成本低、简单便捷、容易控制的优势, 因此在中低速曳引驱动电梯中有着较为广泛的应用, 但是该方法也存在不可避免的缺陷, 即其无法将回收能量直接转化为电能进行再生利用, 反而还会增加机房的温度, 对机房环境产生负面影响。

“变频器+独立能量回馈装置技术”是传统电梯能量回馈装置技术的优化方案, 主要用于解决中低速变频调速电梯能量回收中遇到的问题。该技术可以将驱动电机生成的再生电能转换成同频同相的交流电, 进而将该电能传输回电网系统, 可以供其他设备用电(聂小金, 王世涛, 徐义军, 李家乐, 邱达&刘嵩, 2024)。DSP 处理器是该装置系统的核心模块, 该模块可以实时监测直流母线电压, 并根据该电压值的大小控制能量回馈动作的开关以及回馈能量的大小。具体来说, 其能量回馈一方面要检测交流侧电网的相位及大小, 另一方面要同时控制交流电流的相位和大小, 进而通过软件操作与矢量变换, 保证交流输出回馈电流与交流侧电网形成一致, 以此在回馈交流功率因子为 1.00 的前提下达成最佳回馈效果。

本研究以设计一套电梯能量反馈装置为目标, 并基于装置系统选择合适的辨识方法, 能够准确识别电网模型参数, 从而建立接近真实的控制模型, 以此尽可能控制电流输出谐波达到最小。具体来说, 研究目标可以分为四个层面, 第一, 保证电容电压在高于工作电压(650V-700V)时, 能量回馈装置即可进入运行状态, 并将其电能回馈到电网系统。第二, 要确保逆变过程与电网相位的同步关系, 既要符合并网要求, 又要选择电网电压高压段作为电网回馈能量的切入点。第三, 要求逆变电流与回馈功率之间形成适配关系, 但其电流必须限制在逆变电路电流上限之内。第四, 有效降低逆变过程对电网产生的污染, 尤其注入的谐波含量必须控制在总谐波含量的 3%以内。

2 电梯节能能量自动回馈控制系统硬件设计

本研究围绕能量管理装置硬件系统的设计展开, 其硬件设计主要围绕处理器、电网电压检测、输出电流检测、直流母线电压检测、IGBT 输出控制、输出电量显示和远端信息传输等组件展开。

2.1 总体架构

电梯节能能量回馈控制系统的硬件总体构架如图 1 所示。该系统主要由三部分模块构成, 其中电梯系统控制器是电梯的核心控制单元, 其中主要包括 PLC、传感器、读卡模块等硬件以及运行控制及授权系统等软件, 该模块主要用于接收乘客指令、调度电梯运行、确保安全及权限管理。双向节能转换器是一个支持电能双向流动的特殊模块, 其主要功能包括交流电(AC)与直流电(DC)的双向转换、动态调整电压/频率并适配不同设备需求、支持可再生能源系统的高效充放电等。DC/DC 变换器通常用于用于直流电压的升降转换, 其主要由降压(Buck)、升压(Boost)及升降压(Buck-Boost)结构组成, 具备高效转换、多应用场景、多类型区分的优势。

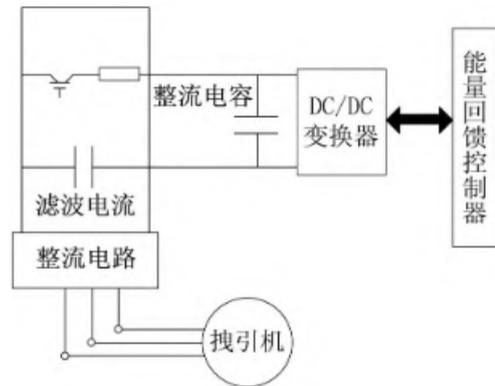


图 1 电梯节能能量回馈控制系统的硬件总体构架

在电梯运行时, 电梯节能能量回馈装置系统会处于工作状态, 并完成充电操作。在该过程中, 系统两端电压值可能会出现瞬间升高的问题。当电压增长过程中, 一旦达到某个限值, 电梯系统会借助双向节能转换器模块进行处理, 将电梯节能装置多余的能量进行转化(李秋颖, 王茜尧, 孙天梅, 韩迪&刘奕巧, 2023)。在电梯出现故障时, 电梯节能装置可以将提前存储的能量进行释放, 以此作为备用电源的形式辅助电梯临时运行, 既可以保证电梯的安全制动, 又可以充分发挥其能量回收的价值。

2.2 DC/DC 变换器

在电梯节能能量回馈控制系统中, DC/DC 变换

器电路结构图如图 2 所示。具体来看, 该系统结构将降压 (Buck) 等效电路中的升压 (Boost) 变换器进行了优化改进, 通过其二极管开关的置换处理, 实现了开关管替代效果。在系统模块改进后, 表现出结构简单、效率提升等优势, 成为电梯节能能量回馈控制系统中的关键模块。但在实际应用中, 该模块也会出现一定的问题, 对整个节能能量回馈控制系统产生影响。主要表现为当电梯节能能量回馈控制系统处于大功率运行状态时, 开关管不可避免地会对 DC/DC 变换器产生应力影响, 其应力主要来源于其中的电压和电流。而在为了降低该影响时, 需要进一步提升 DC/DC 变换器的功率密度, 并由此构建新的并联结构。

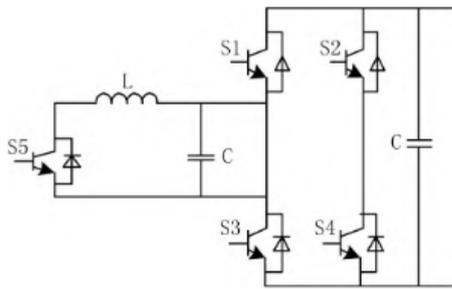


图 2 DC/DC 变换器电路结构图

2.3 能量回馈控制器

根据电梯节能能量回馈的不确定性特征, 本文研究采用模拟的方式推导其能量回馈的原理, 并以此设计电梯节能能量回馈控制器的硬件结构体系, 具体原理图如图 3 所示。

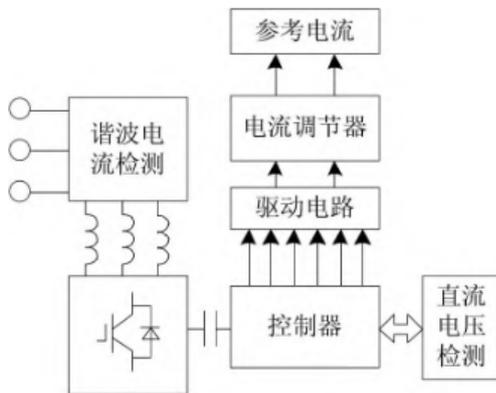


图 3 电梯节能能量回馈控制器设计原理

根据上图显示, 该电梯节能能量回馈控制系统呈现出闭环控制的设计思路。为了实现能量回馈控

制效果, 需要对无功电流进行设定管理, 本文采用 $i_Q=0$ 表示无功电流的分量值。

与此同时, 为了进一步提升该系统表现出的整体性能, 一方面需要建立信号实时响应机制, 确保电梯节能能量回馈系统发出的信号可以实时接收并形成回馈。另一方面要快速完成电压矢量与作用时间的计算, 并由此控制六个功率管的开关, 从而更合理、科学、高效地控制电梯节能能量回馈系统。

3 电梯节能能量自动回馈控制系统软件设计

在软件设计中, 本研究着重解决系统参数辨识问题, 即通过神经网络的自适应算法, 进行系统辨识, 从一类模型中确定一个与所测系统拟合得最好的模型, 再次进行模型校验, 提高 IGBT 在逆变状态下的转化效率 (石荣亮, 邓臣权, 黄冀, 张晓斌, 兰才华, 王国斌 & 张烈平, 2023)。通过超级电容快速吸回收馈能量, 在这种前提下, 本项目的设计目标为转化效率至少 70% 制动能量。

3.1 匹配能量回馈系数

根据当前电梯设备系统及其节能装置的基本架构, 可以推导出电梯节能装置的一般储能公式:

$$E_j = \frac{1}{2} C_j (U_{\max}^2 - U_{\min}^2)$$

在上式中, E_j 表示节能装置模块实时存储的能量总值, C_j 表示节能装置模块的电容, U_{\max} 表示节能装置模块工作电压的上限, U_{\min} 则表示节能装置模块工作电压的下限。根据公式可以推导发现, 节能装置回馈系数的确定建立在其回馈能量基础之上, 因此需要先分析并测量回馈能量的大小, 而后利用 DC/DC 变换器电路辅助完成降压处理, 从而确保节能装置的输出电压与其能量值形成适配关系。

具体来说, 首先需要确保节能装置参数与电梯运行时的发电情况处于平衡状态, 以此可以推导出一个工况周期中的节能能量计算方式, 具体公式如下:

$$\frac{1}{2} C_j \cdot (U_{\max}^2 - U_{\min}^2) \cdot \eta \geq k_c \cdot W_j$$

公式中 η_d 表示电梯节能能量放电效率, 特指经过 DC/DC 变换器处理后的节能装置系统。 K_c 表示电梯节能的系数指标, W_j 表示当前电梯在保持运行状态并进入下一个工况周期时, 节能装置所生成的

能量值。

根据上述公式与计算情况, 即可匹配推导电梯节能能量回馈系数 ϕ , 具体步骤分为以下五步:

第一步: 分析电梯节能能量的供应情况, 并确定电梯节能装置的能量数值, 推导对应的功率指标, 在此基础上计算能量回馈系数 ϕ 。

第二步: 建立明确的电梯节能装置工作电压标准。在电梯运行过程中, 节能装置的输出电压会直接对双向 DC/DC 变换器产生影响, 从而干扰其工作效率与质量 (王婧怡, 翁绍捷 & 张国健, 2021)。具体来说, 电压比率越高, DC/DC 变换器的运行效率反而越低, 呈现出负增长效应特征。因此, 在电梯节能装置电压设定与选择时, 必须优先考量其对 DC/DC 变换器的影响作用, 进而选择影响最小、效率最佳且电压输出最稳定的情况。

第三步: 基于确定后的工作电压, 需要对电梯节能装置的能量进行约束控制, 一方面要基于约束条件计算节能装置的电流值; 另一方面要结合电容与电压关系, 分析其分支数情况, 并由此固定电梯节能装置能量值定额。

第四步: 在电梯节能装置正常运行过程中, 计算其运行功率, 同时利用双向 DC/DC 变换器转换器额定功率。在此过程中, 还需要进一步计算节能能量回馈控制系统的高低压侧电压, 而这一步需要通过电流工作范围的功率进行推导。

第五步: 全面计算和整理电梯在正常运行过程中的成本, 进而完成匹配能量回馈系数的流程。

通过上述提出的五个环节, 即可完成电梯节能能量回馈系数的匹配工作。

3.2 设计能量回馈控制算法

采用 SVPWM 逆变控制算法, 可以提高逆变电压的利用率, 同时利用可变 PI 参数闭环调节算法, 可以有效减少电梯在发电开始以及发电停止过程中对电网的冲击。而采用逻辑分析法对电梯运行中节能装置的能量回收损耗展开分析, 并根据能量回馈控制系统建立暂态等效模型 (张帆, 2019)。一方面要确保电梯节能能量回馈模式稳定实施, 另一方面要对电梯运行中的能量损耗进行细化分解。在电梯常态化运行中, 可以将等效电阻 R_{mse} 生成的能量累加到漏电节能 R_{mpe} 之上, 以此建立电梯总节能概念。在此前提下, 电梯的节能能量回馈损耗即等

同于 R_{mse} 与 R_{mpe} 造成的能量损耗之和。因此可以判断, 当通过电阻 R_{mse} 的电流变大时, 其电阻反而会降低, 由此可以获得良好的节能效果。而在 R_{mpe} 出现增长状态时, 其流通的电流则会变小, 同样可以获得良好的节能效果。结合上述模型分析即可发现, 通过计算可以推导出电梯节能能量的等效电压 V_{sc} 与 I_{sc} 公式, 具体如下所示:

$$V_{sc} = \left(1 + \frac{R_{mse}}{R_{mpe}}\right) V_{DC} + \frac{P_{DC}}{V_{DC}} R_{mse}$$

$$I_{sc} = \frac{P_{DC}}{V_{DC}} + \frac{V_{DC}}{R_{mse}} + \frac{P_{DC}}{R_{mse}}$$

式中, P_{DC} 表示电梯节能装置支持下 DC 母线的运行功率, V_{DC} 表示电梯节能装置支持下 DC 母线的运行电压。因而可以由此计算其等效电压 V_{sc} , 同时也可以计算其等效电流 I_{sc} , 而后可以推导出量回馈控制系统的瞬时节能效率 (梁树栋, 2018)。此外, 由于电梯节能装置与母线两方面的电压值差值较小, 并且已知 R_{mpe} 比 R_{mse} 大得多, 因此还可以进一步推算能量回馈系统的瞬时效率:

$$\eta = \frac{P_{DC} R_{mpe}^2 V_{DC}^2}{(V_{DC}^2 + P_{DC} R_{mpe})(R_{mse} + R_{mpe}) V_{DC}^2}$$

式中, P_{SC} 表示电梯节能装置的运行功率, P_{DC-DC} 表示双向 DC-DC 转换器的运行功率, P_{bpq} 表示节能能量回馈控制器的运行功率 (余宗胜, 2017)。根据公式可以了解到, 节能能量回馈控制系统在高功率状态运行时, 不等式 $P_{bpq} > 2P_{yz}$ 成立, 而此时电梯节能装置与双向 DC-DC 转换器必须同时处于运行状态, 以此保证电梯节能装置与 P_{yz} 处于恒定关系。该阶段的功率表示如下:

$$P_{SC} \approx P_{bpq} - P_{yz}$$

$$P_{DC} \approx P_{yz}$$

当节能能量回馈控制器在低功率状态运行时, 不等式 $P_{bpq} < 2P_{yz}$ 成立, 此时电梯节能装置与双向 DC-DC 转换器同样处于同步工作状态, 而该阶段的功率表示如下:

$$P_{SC} = P_{bpq}$$

$$P_{DC-DC} = 0$$

通过交替控制的方式调节节能能量回馈控制系统,不仅可以提升电梯节能装置与控制器系统之间的协同性特征,而且能够显著提升整个系统的工作效率,以此达到提升和获取更多电梯制动回馈能量的效果和目的。

4 结语

综上所述,在现代城市建设中,随着电梯数量急剧扩增,其电能消耗量成为城市电力支出的重要缺口。为进一步提升电梯的节能效果,本研究提出构建电梯节能能量自动回馈系统的解决策略,并提出了基础的硬件与软件设计方案,以此尽可能提高其能量回馈效果。但本研究还有诸多缺陷与不足,需要在后续的研究中不断完善,进一步降低其能耗损失和回收效果。

参考文献

- [1] 巩盛.电梯节能能量自动回馈控制系统研究[J].自动化技术与应用,2024,43(07):66-70..
- [2] 聂小金,王世涛,徐义军,李家乐,邱达,刘嵩.基于能量回馈的充电器老化测试系统[J].机电工程技术,2024,53(04):205-208.
- [3] 李秋颖,王茜尧,孙天梅,韩迪,刘奕巧.电梯能量回馈装置的应用实例分析[J].中国设备工程,2023,(21):231-234.
- [4] 石荣亮,邓臣权,黄冀,张晓斌,兰才华,王国斌,张烈平.基于VSR-VSI的电梯能量回馈系统建模与控制[J].桂林理工大学学报,2023,43(01):148-154.
- [5] 王婧怡,翁绍捷,张国健.超级电容驱动的电梯制动能量回馈损耗控制[J].计算机仿真,2021,38(05):219-222+291.
- [6] 张帆.电梯能量回馈技术及研究[D].长春工业大学,2019.
- [7] 梁树栋.电梯能量回馈并网系统研究与设计[J].自动化应用,2018,(04):15-16.
- [8] 余宗胜.基于启停系统汽车节能减排及制动能量回馈研究[D].华东交通大学,2017.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS