

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

张仰光,李凯.
基于变压恒频的电梯电机软起动机
谐波分析与补偿.
电机与控制应用,2021,48(9):48.

MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



Tz型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI
上電科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.seari.com.cn

基于变压恒频的电梯电机软起动器谐波分析与补偿

张仰光¹, 李 凯²

(1. 哈尔滨医科大学附属第四医院 房产科, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘 要: 电梯设备中的感应电机通常采用三相六支反并联晶闸管为驱动装置的软起动器来实现电机软起动和能耗降低。在晶闸管强迫换流作用下, 定子电压和电流产生大量谐波, 会给电机带来损耗甚至影响电梯运行。针对这一问题, 以晶闸管驱动感应电机系统为研究对象, 建立了该对象的电路数学模型, 采用变压恒频(VVCF)模式, 计算了各次谐波频谱特性, 设计了新的补偿控制律。计算结果和补偿结果通过计算机仿真加以验证, 最终试验证明这一方法是有效的。

关键词: 变压恒频; 电梯电机; 软起动器; 谐波补偿

中图分类号: TM 343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)09-0048-07

doi: 10.12177/emca.2021.082

Harmonics Analysis and Compensations of Elevator Motor Soft-Starter Based on VVCF

ZHANG Yangguang¹, LI Kai²

(1. Department of Real Estate, The Fourth Affiliated Hospital of Harbin Medical University, Harbin 150001, China;

2. School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

Abstract: Induction motors in elevator equipment usually use a soft starter with three-phase six anti-parallel thyristors as the driving device to achieve soft start of the motor and to reduce energy consumption. Under the forced commutation of the thyristor, the stator voltage and current produce certain amounts of harmonics, which bring losses to the motor and even affect the operation of the elevator. Aiming at this problem, taking the thyristor-driven induction motor system as the research object, the circuit mathematical model of this object is established, the variable voltage constant frequency (VVCF) mode is adopted, the harmonic spectrum characteristics of each order are calculated, and a new compensation control law is designed. The calculation results and compensation results are verified by computer simulation, and the experiment proves that this method is effective.

Key words: variable voltage constant frequency (VVCF); elevator motor; soft starter; harmonics compensation

0 引 言

在医院、学校和商场等公共场所, 载人电梯的有效安全运行是极为重要的, 电机是电梯的核心

组成部分, 同步电机调速和定位指标高, 在厢式客货梯中占据主要份额; 感应电机以其控制简单、稳定可靠、能耗较小而成为开放式滚梯运行中的首选电机^[1]。鉴于感应电机自身的结构特点, 直接

收稿日期: 2021-05-14; 收到修改稿日期: 2021-08-10

作者简介: 张仰光(1964—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电梯控制, 楼宇自动化技术。

李 凯(1979—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为精密运动控制, 伺服系统优化。(通信作者)

起动或关停大功率感应电机时,电机瞬时定子电流将会达到额定电流的 5~7 倍^[2],长期反复直接起停电机将严重影响其运行性能甚至会对并联在同一电网上的其他用电设备产生冲击^[3]。鉴于此种情况,通常采用软起动和软停车装置驱动电机可靠运行。

以医用载人滚梯为例,人员和物流呈现出潮汐式负载的特性,滚梯通常运行在轻载甚至空载的状态,此时运行效率和节能是首要考虑的目标。在这种应用要求驱使下,驱动装置的软起动器显得极为重要。通常以三相六支反并联的晶闸管作为拓扑结构的软起动器,由于晶闸管的非强制换流作用,斩波产生的电压电流谐波会给电机带来损耗并影响轿厢稳定性^[3]。基于上述问题,本文建立了该装置的电路模型,采用变压恒频(VVCF),只控制电压,不调整频率的控制方式,给出了不同控制律下的定子电压和定子电流谐波幅值与相位,并据此设计了三相电力谐波补偿器,补偿结果通过计算机仿真验证,并在实际电梯运行中提供了技术保障。

1 电路理论分析

1.1 装置电路模型

VVCF 感应电机控制原理如图 1 所示。

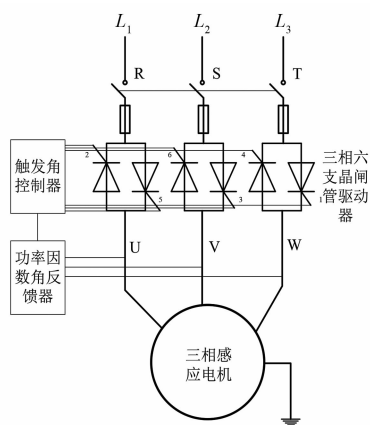


图1 VVCF 感应电机控制原理图

忽略铁损、磁饱和以及空间谐波。单相的晶闸管驱动感应电机的电路模型可用 T 型等效电路来表示^[4-8],如图 2 所示。

图 2 的电路根据 Thevenin 等效原则可以转化为如图 3 所示的电路。

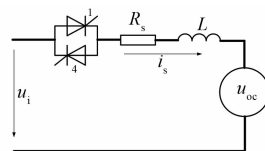


图2 单相的晶闸管驱动感应电机电路模型

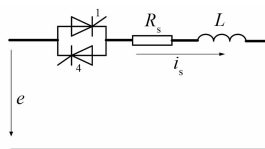


图3 单相晶闸管驱动感应电机 Thevenin 电路模型

由图 2 和图 3 即可获得整个电梯电机软起动器的等效电路图,如图 4 所示。

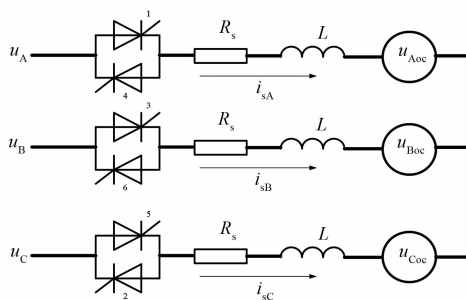


图4 电梯电机软起动器电路模型

图 2~图 4 中, u_i 为电源电压; u_o 为电机端电压; R_s 为定子电阻; L 为等效电感; u_{oc} 为等效开路电压; e 为合成端电压; i_s 为定子电流。

1.2 电机的电压电流表达式

当 $\omega t = \alpha$ 时刻,图 2 所示的单相电路应满足如下的电流微分方程式和初始条件^[9-12]:

$$\begin{cases} L \frac{di_s}{dt} + R_s i_s = \sqrt{2} U_i \sin \omega t \\ i_s |_{\omega t = \alpha} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

根据 Laplace 变换及其反变换解得该方程:

$$i_s = \frac{\sqrt{2} U_i}{Z} [\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{\alpha - \omega t}{\tan \varphi}}],$$

$$\alpha \leq \omega t \leq \alpha + \theta \quad (2)$$

式中: L 为等效定子电感; i_s 为定子电流瞬时值; R_s 为等效定子电阻; U_i 为输入电压有效值; ω 为交流电角频率; α 为晶闸管触发角; Z 为负载阻抗的有效值; φ 为负载的功率因数角; θ 为晶闸管导通角。

根据式(1)和式(2),获得端电压有效值 U_o 和定子电流有效值 I_s 表达式:

$$U_o = U_i \sqrt{\frac{\theta}{\pi} + \frac{1}{\pi} [\sin 2\alpha - \sin(2\alpha + 2\theta)]} \quad (3)$$

$$I_s = \frac{U_i}{\sqrt{2\pi Z}} \sqrt{\theta - \frac{\sin \theta \cos(2\alpha + \varphi + \theta)}{\cos \varphi}} \quad (4)$$

式中: U_o 为端电压有效值; I_s 为定子电流有效值。

1.3 电压和电流谐波分析

电梯电机软起动器在三相动力电源供电下,采用 VVCF 模式(即 $f=50$ Hz),由于晶闸管的非强迫换流作用,负载端电压和负载电流呈现非线性规律。以单相为例,仿真计算条件: $f=50$ Hz, $R_s=3.1 \Omega$, $L_s=0.096$ H, $R_r=1.33 \Omega$, $L_r=4.3$ H, $L_m=0.090$ H, $U_A=380$ V, $\alpha=100^\circ$ 。波形如图 5 和图 6 所示。

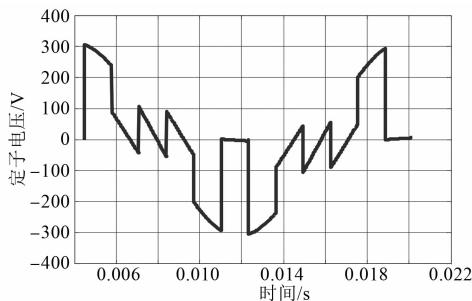


图 5 触发角为 100° 时定子电压仿真波形

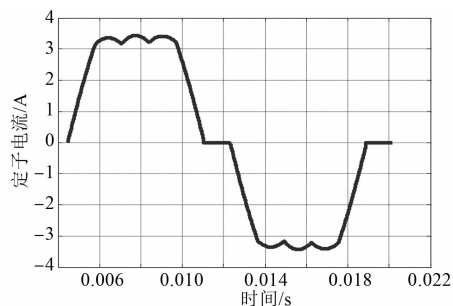


图 6 触发角为 100° 时定子电流仿真波形

对图 5 和图 6 对其进行谐波分析,获得频率特性如图 7 和图 8 所示。

同样可获得 $\alpha=130^\circ$ 的情况,其余仿真计算条件同上,计算结果如图 9~图 12 所示。

图 5~图 12 的仿真曲线中,计算条件相同,通过对频率特性图的分析可知,无论在 α 较大的情

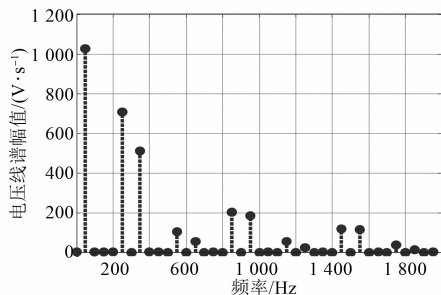


图 7 触发角为 100° 时定子电压频率特性

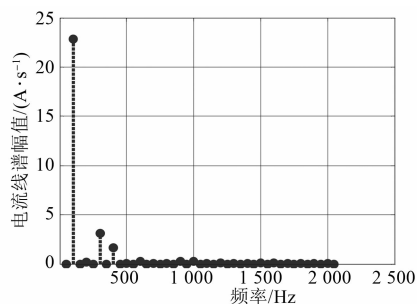


图 8 触发角为 100° 时定子电流频率特性

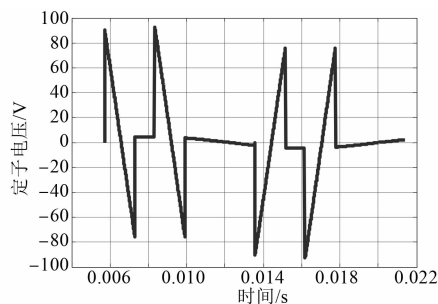


图 9 触发角为 130° 时定子电压仿真波形

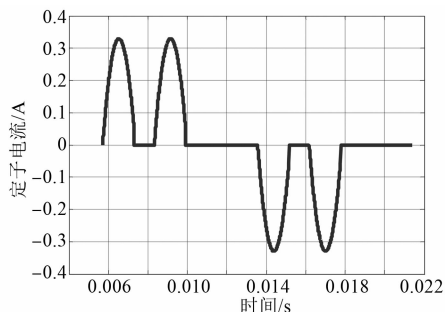


图 10 触发角为 130° 时定子电流仿真波形

况还是较小的情况, u_o 和 i_s 的谐波分量均为 $6n \pm 1$ 次。对频率特性进行谐波分离,即可获得不同次谐波的幅值和相位。相应的计算公式如下:

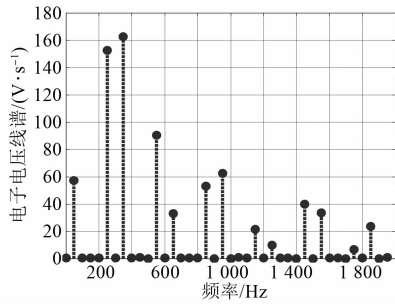


图 11 触发角为 130°时定子电压频率特性

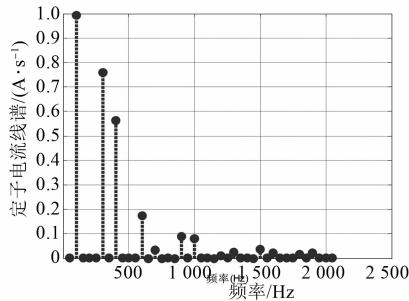


图 12 触发角为 130°时定子电流频率特性

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} y_i \\ a_n = \begin{cases} \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} y_i \cos \frac{2\pi ni}{m}, & \left(n < \frac{m}{2}\right) \\ \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} y_i \cos \pi i, & \left(n = \frac{m}{2}\right) \end{cases} \\ b_n = \begin{cases} \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} y_i \sin \frac{2\pi ni}{m}, & \left(n < \frac{m}{2}\right) \\ 0, & \left(n = \frac{m}{2}\right) \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \tan \varphi_n = \frac{a_n}{b_n} \end{cases} \quad (6)$$

式中: α_0 为直流分量幅值; n 为谐波阶次; m 为一个周期的等分数; i 为采样点个数; y_i 为第 i 个采样点的测量值; a_n 为第 n 次谐波余弦分量; b_n 为第 n 次谐波正弦分量; c_n 为第 n 次谐波幅值; φ_n 为第 n 次谐波相位。

在实际中选取 12 个采样点, 简易算法如下。

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{12}(y_0 + y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + y_9 + y_{10} + y_{11}) \\ a_1 = \frac{1}{6} \left[y_0 - y_6 + \frac{\sqrt{3}}{2}(y_1 - y_5 - y_7 + y_{11}) + \frac{1}{2}(y_2 - y_4 - y_8 + y_{10}) \right] \\ a_2 = \frac{1}{6} \left[y_0 - y_3 + y_6 - y_9 + \frac{1}{2}(y_1 - y_2 - y_4 + y_5 + y_7 - y_8 - y_{10} + y_{11}) \right] \\ a_3 = 1/6(y_0 - y_2 + y_4 - y_6 + y_8 - y_{10}) \\ a_4 = \frac{1}{6} \left[y_0 + y_3 + y_6 + y_9 - \frac{1}{2}(y_1 + y_2 + y_4 + y_5 + y_7 + y_8 + y_{10} + y_{11}) \right] \\ a_5 = \frac{1}{6} \left[y_0 - y_6 - \frac{\sqrt{3}}{2}(y_1 - y_5 - y_7 + y_{11}) + \frac{1}{2}(y_2 - y_4 - y_8 + y_{10}) \right] \\ a_6 = \frac{1}{12}(y_0 - y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8 - y_9 + y_{10} - y_{11}) \\ b_1 = \frac{1}{6} \left[y_3 - y_9 + \frac{1}{2}(y_1 + y_5 - y_7 - y_{11}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(y_2 + y_4 - y_8 - y_{10}) \right] \\ b_2 = \frac{1}{6} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}(y_1 + y_2 - y_4 - y_5 + y_7 + y_8 - y_{10} - y_{11}) \\ b_3 = 1/6(y_1 - y_3 + y_5 - y_7 + y_9 - y_{11}) \\ b_4 = \frac{1}{6} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}(y_1 - y_2 + y_4 - y_5 + y_7 - y_8 + y_{10} - y_{11}) \\ b_5 = \frac{1}{6} \left[y_3 - y_9 + \frac{1}{2}(y_1 + y_5 - y_7 - y_{11}) - \frac{\sqrt{3}}{2}(y_2 + y_4 - y_8 - y_{10}) \right] \end{cases} \quad (7)$$

2 控制方法设计

2.1 触发角为参数的控制方法

根据以上分析,选取 α 作为控制参数,设计递减触发角的控制算法如下:

$$\alpha(k+1) = \alpha(k) - \Delta\alpha \quad (8)$$

式中: $\Delta\alpha$ 为触发角增量; k 为采样点数。

根据1.3节电机参数计算,可以获得触发角增量 $\Delta\alpha$ 的变化仿真曲线,如图13所示。

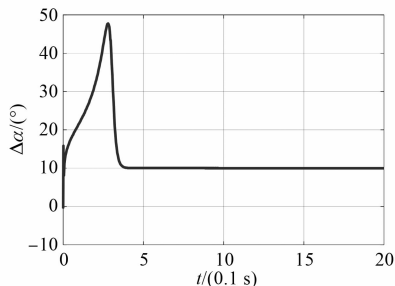


图13 触发角增量变化仿真曲线

此方法的仿真曲线如图14和图15所示。

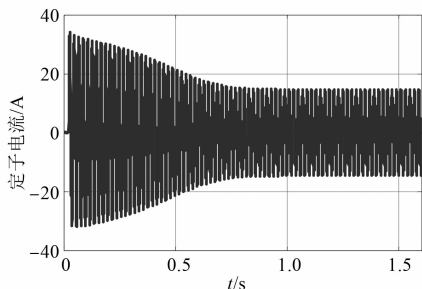


图14 触发角控制律下定子电流仿真曲线

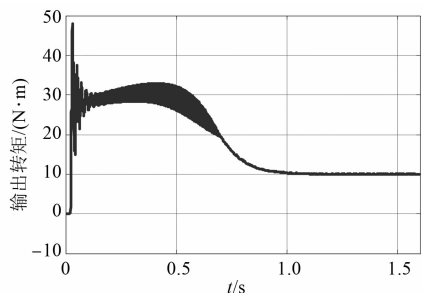


图15 触发角控制律下输出转矩仿真曲线

电机软起动的暂态阶段($t < 1$ s),定子电流和输出转矩的波形,高频分量成分较多,波形振荡剧烈,波形幅值变化快。选取暂态阶段特定周期

[0.004 s, 0.024 s]的定子电流波形,此时触发角初始值为 130° ,定子电流频谱图如图16所示。

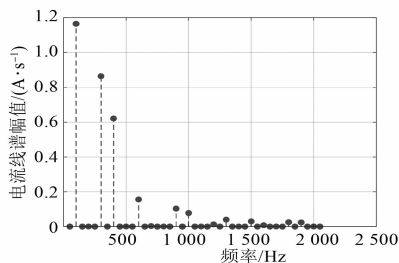


图16 触发角控制律定子电流频谱图

图16可以看出,定子电流瞬时冲击的幅值相较于额定值减小;定子电流所含高频分量多。该控制方法虽然能够实现电梯电机的软起动,但由于输出转矩的波动作用,尽管持续时间短仍会对滚梯产生“晃动”的影响,因此该算法存在一定弊端。

2.2 功率因数角为参数的控制方法

电流的谐波与负载功率因数有关,软起动算法应含有功率因数信息,本文设计了基于功率因数反馈的控制方法,如:

$$\alpha(k+1) = \alpha(k) - K[\varphi(k) - \varphi(k-1)] \quad (9)$$

式中: K 取决于限定时段长度和算法收敛速度。

根据电机参数计算得到的功率因数变化仿真曲线如图17所示。

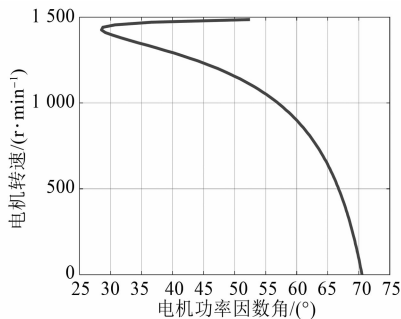


图17 功率因数角随转速变化仿真曲线

图17中,电机参数与1.3节完全相同。此算法下定子电流和输出转矩仿真曲线分别如图18和图19所示。为了进行定量分析,同样针对电机软起动暂态阶段($t < 1$ s),选取特定周期[0.004 s, 0.024 s]的定子电流波形做频谱分析,其中触发角初始值为 130° ,定子电流频谱图如图20所示。

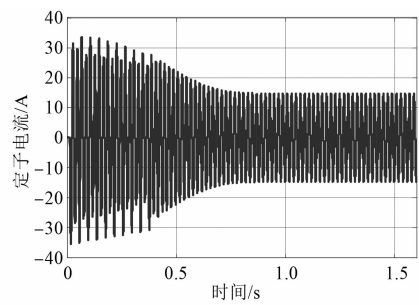


图 18 功率因数角控制律下定子电流仿真曲线

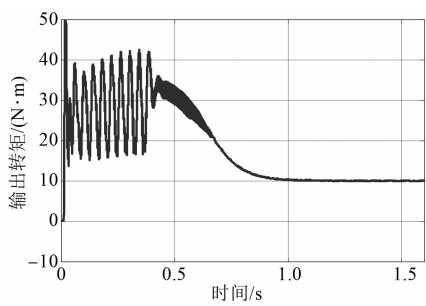


图 19 功率因数角控制律下输出转矩仿真曲线

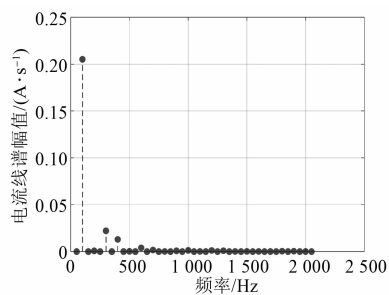


图 20 功率因数角反馈控制律定子电流频谱图

图 13~图 20 的仿真平台为 MathWorks 公司的 MATLAB2019b,所选工具箱为 Simulink 中的子工具箱 Simscape-Electrical Three Phase,仿真算法为系统默认算法。

图 20 分别与图 16、图 12 对比,可以看出定子电流的高频分量有明显降低,说明新的控制方法有明显抑制高频谐波的作用。2 种算法的定量计算结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,电机额定电流为 11 A,根据图 16 和图 20 的频谱图计算,2 种算法的启动电流分别只占额定电流的 11% 和 2.3%。高频分量(超过 1 000 Hz)的谐波次数(各线谱幅值与基频幅值之比大于 1% 的个数),2 种算法分别减

小到 40% 和 20%。低频分量(小于 1 000 Hz)的谐波次数(各线谱幅值与基频幅值之比大于 5% 的个数),2 种算法分别减小到 25% 和 20%。基频幅值为线谱谐波分析中最高幅值。

表 1 2 种控制方法对比

控制方式	触发角控制法	功率因数角控制法
瞬时冲击	1.2 A/11 A=11%	0.25 A/11 A=2.3%
高频分量	4/10=40%	2/10=20%
低频分量	5/20=25%	4/20=20%

3 试验研究

在整个控制过程中,功率因数角定义为实际加载到电机某一相的定子电压和同相电机定子电流的相位角差。实际控制过程中,定子电压波形的相角可以通过光耦利用触发角的关系计算得到,在同相的负载端,采用电流互感器获得定子电流的波形,并获得其相角。两者相减即为实时的功率因数角。光耦和电流互感器的响应时间为微秒级与触发角和功率因数角的毫秒级作用时间相差 3 个数量级,不影响最终功率因数角的计算结果,且相角算法固化于控制器中。

试验硬件为光耦 MOC3023(6 支),电流互感器 LZZBJ9-10C(2 支),晶闸管 KP20A(6 支),感应电机 Y112M-4(1 台),STM32F103C(1 台)最小系统板为控制器。

试验软件为 Keil-C5(1 套)。

为了验证理论计算和计算机仿真的结果,以医院某型医用载人滚梯软起动器作为试验对象,分别采用 2 种控制方法进行了测试,试验波形分别如图 21 和图 22 所示。

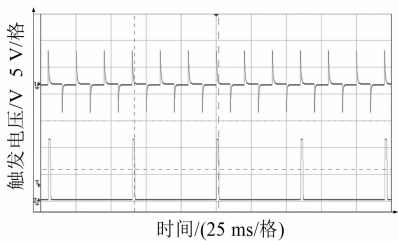


图 21 触发角和功率因数角脉冲波形

图 21 纵轴为触发电压波形。图 22 纵轴为经过光耦隔离后的稳态情况下的定子电流波形,上部波形为功率因数角控制法,下部波形为触

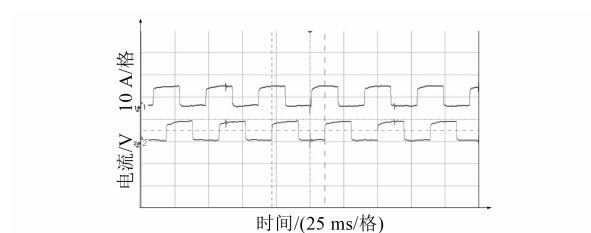


图 22 电梯电机软起动器定子电流波形

发角法。可以看出 2 种控制方法均有效抑制了电流瞬变,尤其是在一定的起动时间内,功率因数法更优。

4 结 语

本文以电梯电机软起动器为研究对象,通过电路计算构建了系统的电路模型,采用 VVCF 的方式进行了计算机仿真,获得了不同条件下的定子电压和电流谐波,采用 12 个点的谐波分离方法获得了各次谐波的幅值与相位,分别设计了基于功率因数角和基于触发角的控制方法。仿真和试验说明功率因数角控制法可以更有效抑制谐波,从而有效维护电梯安全运行。

【参考文献】

- [1] 高昕. 浅析电梯电机控制的现状和发展[J]. 科技创新导报,2015,12(15): 208.
- [2] 张靖辉,赵鹏飞. 伺服电机控制技术在电梯维修中的重要性[J]. 设备管理与维修,2021(2): 89.

- [3] 张有东. 电机功率因数控制器的控制算法[J]. 电机与控制应用,2012,39(7): 32.
- [4] 赵子健,黄礼坤,江景成,等. 定子鼠笼式智能多相电机绕组交流损耗研究[J]. 电机与控制应用,2020,47(10): 46.
- [5] 陈君,孟彦京,段明亮,等. 一种高起动转矩的感应电机起动方法[J]. 电工技术学报,2017,32(9): 32.
- [6] 童军,吴伟东,王悦,等. 异步电机软起动与谐波抑制一体化控制[J]. 微电机,2020,53(8): 70.
- [7] 汤蕴璆. 电机学[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社,2011.
- [8] 李有法,李晓勤. 数值计算方法[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社,2005: 128-133.
- [9] 常志拓,高浩. 高压大功率异步电机启动方式研究[J]. 电工技术,2020(21): 168.
- [10] BRAGARD M, CONRAD M, VAN HOEK H, et al. The integrated emitter turn-off thyristor (IETO): an innovative thyristor based high power semiconductor device using MOS assisted turn-off [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(5): 2175.
- [11] 张邦富. 电梯用初级永磁型直线电机及其控制系统研究[D]. 南京: 东南大学,2019.
- [12] RIYAZ A, IQBAL A, MOINODDIN S, et al. Comparative performance analysis of thyristor and IGBT based induction motor soft starters [J]. International Journal of Engineering, Science and Technology, 2009, 1(1): 90.



[主要栏目]

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| • 控制与应用技术 | • 研究与设计 | • 故障诊断与保护 |
| • 新能源发电与局域电网 | • 新能源汽车技术 | • 发电机组及其控制 |
| • 测试技术与测控系统 | • 材料与工艺 | • 电机生产及质量管理 |
| • 电力电子变流器技术 | • 智能制造 | • 节能应用 |
| • 实用技术成果 | | |