

SVPWM 策略在新型能量回馈并网系统中的应用*

贾爱民, 王玉芬*, 苏祥伟

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对传统电梯变频器端可再生电能的浪费问题,依据能量回馈再次利用的思想,设计了一种新型能量回馈并网系统。阐述了新型能量回馈并网系统的工作原理,在此基础上为提高逆变器直流电压利用率,拓展系统的适用范围,引入了空间矢量脉宽调制(SVPWM)策略。开展了 SVPWM 策略的原理及实现方法分析,并搭建了一台 15 kW 新型能量回馈并网系统进行实验研究。实验结果表明该系统具有较高的直流电压利用率,并网电流 THD 低至 3.3%,对外电磁干扰较弱。系统试用于西子奥的斯电梯期间,运行结果表明其工作稳定可靠,节电效果显著。

关键词:空间矢量脉宽调制;能量回馈;逆变器;并网

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)09-1136-04

Application of SVPWM algorithm in new grid-connected energy regenerative system

JIA Ai-min, WANG Yu-fen, SU Xiang-wei

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the wasting of regenerative electric energy, which was accumulated on frequency converter of elevator, a new grid-connected energy regenerative system was designed. The working principle of the system was investigated. Further more, in order to improve the DC voltage availability and expand the applicable scope of the system, the space vector pulse width modulation (SVPWM) algorithm was adopted. After the analysis of the principle and implement method of the SVPWM algorithm, a 15 kW grid-connected energy regenerative system was built for experiment. The experimental results show that the DC voltage availability is high and the current thd is low to 3.3% with a small quantity of electromagnetic interference. During applied in the OTIS elevator, the application results show that the system is stable and reliable with remarkable energy saving effect.

Key words: space vector pulse width modulation(SVPWM); energy regenerative; inverter; grid-connect

0 引 言

由于全球性的能源紧缺,新能源的发展以及节能技术的应用日益成为人们所关注的焦点问题。电梯是一种高耗能的特种设备,从 21 世纪初我国开始了对电梯节能技术的研究工作。文献[1]分析了电梯的能耗方式和部件,并提出电梯的变频驱动系统和曳引系统是能耗的主要部分;文献[2]提出了电梯可再生电能的评估方案,并阐述了电梯节能技术的可行性和可观

性;文献[3]阐述了节能电梯的节能原理,并提出达到节能效果的两种途径:①对电机拖动系统进行技术改造,如采用变频调速技术和永磁同步无齿轮曳引技术等;②通过能量回馈器将机械能转换成电能(再生电能)的方法达到节能的目的。但是,均未给出具体的实现方案。

本研究通过综合分析电梯的结构以及电梯可再生电能的表现形式,依据能量回馈的思想,设计并搭建一台 15 kW 新型能量回馈并网系统,将电梯的可再生电

收稿日期:2011-01-10

基金项目:浙江省科技厅公益技术研究资助项目(2009c31043)

作者简介:贾爱民(1966-),男,浙江东阳人,副教授,主要从事电工理论与新技术方面研究。E-mail:amjia123@163.com

通信联系人:王玉芬,女,副教授,硕士生导师。E-mail:wfwang@zju.edu.cn

能回馈到电网再次利用。同时,分析 SVPWM 的原理以及实现方法,并在此基础上将其控制策略应用于新型能量回馈并网系统中提高系统的直流电压利用率,拓展系统的适用范围。

1 新型能量回馈并网系统的工作原理

电梯系统主要是由轿厢、曳引机以及对重等组成,电梯运行过程中重载下行或者轻载上行时,曳引机工作在二、四象限,处于发电状态,能量累积在变频器直流母线侧电容上,使母线电压不断上升,这部分能量叫做可再生电能。目前,工业上主要是通过直流母线侧并联制动电阻的形式释放这部分电能,带来了能量的浪费以及发热等问题。

新型能量回馈并网系统是利用逆变技术将这部分可再生电能以并网发电的形式回馈到电网中再次利用。新型能量回馈并网系统的结构框图如图 1 所示。电动机处于发电状态时变频器的直流母线侧电容上积累电能,电压不断上升。当智能主控制单元检测到直流母线电压达到回馈电压值时输出 PWM 驱动信号,控制三相桥式逆变电路正常工作,逆变桥的输出经三相滤波电路后转变成符合电网标准的三相交流电注入到电网中,该系统所设计的回馈电压值为 600 V ~ 750 V。新型能量回馈并网系统的主电路原理图如图 2 所示,其中 1 为直流输入二极管和直流滤波电路,二极管可防止电流反灌提高系统的安全性,母线电容起到稳压和滤波作用提高系统的稳定性,直流滤波电感能够抑制直流侧串入的共模干扰;2 为三相桥式逆变主电路,在智能主控制单元的控制下将直流电能逆变为交流电能;3 为三相交流滤波器,包括三相滤波电感和交流 EMI 滤波器,滤除开关次谐波及高次谐波分量,降低并网电流 THD,抑制 EMI,提高并网电能质量;4 为智能主控制单元,系统中使用的是 TI 的 TMS320F2801 数字信号处理器,功能强大、稳定可靠。

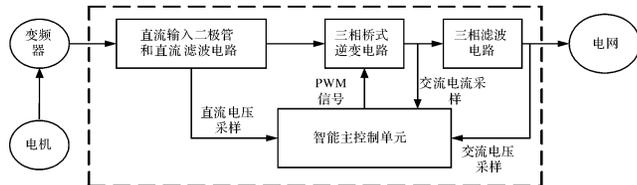


图 1 新型能量回馈并网系统结构框图

2 空间矢量脉宽调制原理与实现

不同电梯变频器的制动电阻工作电压点不同,例如西子奥的斯的 OVF-30 变频器的制动电阻工作点在

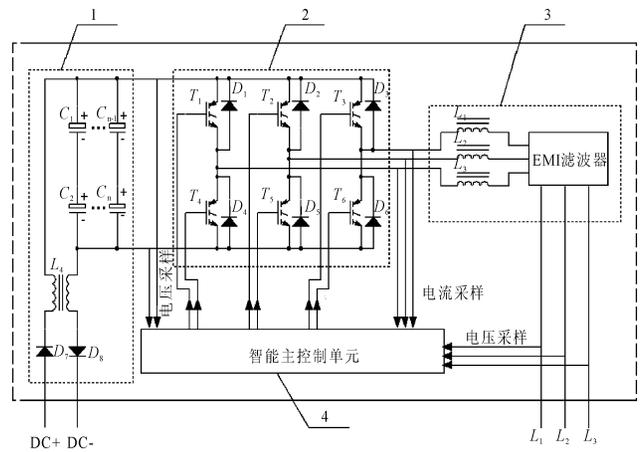


图 2 新型能量回馈并网系统主电路原理图

610 V ~ 630 V,因此对于传统的正弦波脉宽调制(SPWM),由于其直流电压利用率较低而受到很大的限制。为了提高直流电压利用率,该系统采用了空间矢量脉宽调制策略。

空间矢量脉宽调制技术最早应用于交流电机的控制中,它是以控制交流电机磁链空间矢量轨迹逼近圆形为目的,以减小电机的转矩脉动、改善电机的运行性能^[4]。假设交流电机由理想的三相对称正弦电压供电,如下式所示:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = U_m \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \cos (\omega t - 2\pi/3) \\ \cos (\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

可定义定子电压空间矢量为^[5-6]:

$$u_s = \frac{2}{3}(u_a + u_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + u_c e^{j\frac{4\pi}{3}}) \quad (2)$$

式中: U_m —电压幅值, ω —电压的角频率。

空间矢量的概念可以应用在逆变电路中。对于三相逆变电路,每相的上桥臂与下桥臂的开关动作相反,则三相逆变电路共有 8 种开关组合,将其代入式(2)中可得到对应的 8 种输出电压状态,即 8 个基本电压矢量,如表 1 所示。其中, V_0 和 V_7 由于输出电压为零,称为零矢量。 $V_1 \sim V_6$ 为 6 个非零矢量,其幅值均为 $2U_d/3$,空间位置依次相差 60° 。这 8 个基本电压空间矢量如图 3 所示,其中 6 个非零矢量分别位于一个正六边形的 6 个顶点位置,它们将空间划分为 I ~ VI 共 6 个扇区,而两个零矢量位于原点^[7-9]。

由于逆变器输出电压空间矢量只可能位于 8 个离散的状态,无法产生真正的连续电压空间矢量运行轨迹。对于给定的输出电压矢量指令 u_s ,只能通过这 8 个电压矢量的合成来实现。最常用的是所谓的 7 段式组合,如表 2 所示。

表 1 开关状态所对应的基本电压矢量

开关状态 (a b c)	基本电压矢量	空间位置
(0 0 0)	V_0	
(1 0 0)	V_1	e^{j0}
(1 1 0)	V_2	$e^{j\pi/3}$
(0 1 0)	V_3	$e^{j2\pi/3}$
(0 1 1)	V_4	$e^{j\pi}$
(0 0 1)	V_5	$e^{j4\pi/3}$
(1 0 1)	V_6	$e^{j5\pi/3}$
(1 1 1)	V_7	

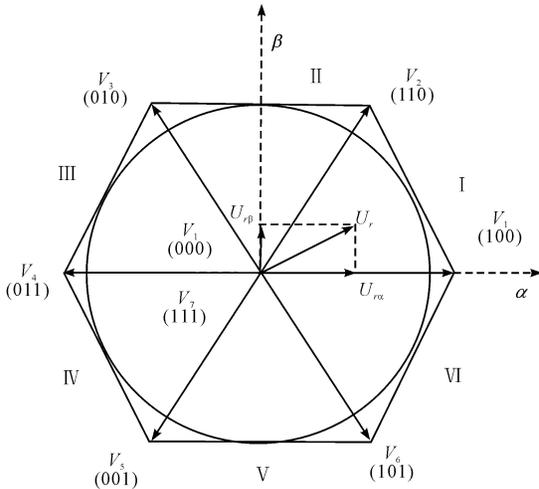


图 3 基本电压空间矢量图

表 2 输出电压矢量的 7 段式组合

u_r 所在扇区	SVPWM 的 7 段式组合
I	$V_0 V_1 V_2 V_7 V_2 V_1 V_0$
II	$V_0 V_3 V_2 V_7 V_2 V_3 V_0$
III	$V_0 V_3 V_4 V_7 V_4 V_3 V_0$
IV	$V_0 V_5 V_4 V_7 V_4 V_5 V_0$
V	$V_0 V_5 V_6 V_7 V_6 V_5 V_0$
VI	$V_0 V_1 V_6 V_7 V_6 V_1 V_0$

以第一扇区为例,三相上桥臂的驱动信号时序如图 4 所示,其中 T_0 、 T_1 和 T_2 分别为半个开关周期内零矢量、 V_1 和 V_2 的作用时间。由等效作用原理可得:

$$\int_0^{T_s/2} u_r dt = \int_0^{T_0/2} V_0 dt + \int_{T_0/2}^{T_0/2+T_1} V_1 dt + \int_{T_0/2+T_1}^{T_0/2+T_1+T_2} V_2 dt + \int_{T_0/2+T_1+T_2}^{T_s/2} V_7 dt \quad (3)$$

$$T_0 + T_1 + T_2 = \frac{T_s}{2} \quad (4)$$

由此,可推导出各基本矢量的作用时间。对于任一扇区内的电压指令 $u_r = u_{ra} + ju_{rb}$,两个相邻非零矢量 V_k 和 V_{k+1} ($k=1,2,\dots,6;k=6$ 时, V_{k+1} 为 V_1) 的作用时间 T_k 和 T_{k+1} 分别为:

$$\begin{pmatrix} T_k \\ T_{k+1} \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{T_s}{U_d} \begin{bmatrix} \sin \frac{k\pi}{3} & -\cos \frac{k\pi}{3} \\ -\sin \frac{(k-1)\pi}{3} & \cos \frac{(k-1)\pi}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_{ra} \\ u_{rb} \end{pmatrix} \quad (5)$$

零矢量的作用时间为:

$$T_0 = \frac{T_s}{2} - (T_k + T_{k+1}) \quad (6)$$

在 SVPWM 的具体实现时,通常先要计算电压指令所在的扇区,再根据表 2 选择恰当的基本电压矢量,然后由式 (5) 和式 (6) 计算各基本矢量的作用时间^[10]。

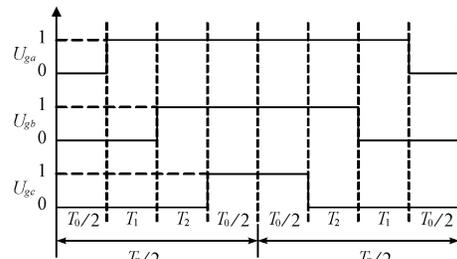


图 4 扇区 I 内输出电压矢量工作时序图

根据空间矢量变换的可逆性,空间电压矢量的顶点轨迹越趋近于圆,则原三相电压越趋近于三相对称正弦波^[11]。因此,本研究通过对逆变器的适当控制,使逆变器输出的空间电压矢量的运动轨迹趋近于圆,则逆变器交流输出电压趋近于三相对称正弦波。

3 实验结果及分析

本研究根据以上分析对 SVPWM 策略进行了 Matlab 仿真,在仿真的基础上以 DSP 为主控制器搭建了一台 15 kW 的新型能量回馈并网系统,将空间矢量脉宽调制策略应用到系统中进行实验研究。

在调制比 $m=1$,直流电压 $U_d=540$ V,开关频率为 10 kHz,不考虑死区的情况下分别对 SVPWM 和 SPWM 进行仿真分析。SVPWM 方式下逆变器输出电压谐波分布如图 5 所示,SPWM 方式下逆变器输出电压谐波分布如图 6 所示。由图 5、图 6 可知,SVPWM 方式下直流电压利用率比 SPWM 方式下提高了 15.5%。三相并网电流波形如图 7 所示,由图 7 可知逆变器输出的并网电流波形为良好的正弦波,在并网电流为 15 A 时测量电流 $THD=3.3\%$ 。在此电流下对系统进行传导干扰测试,测试报告如图 8 所示,由图 8 可知该系统符合我国电磁兼容性(EMC)标准。

产品在西子奥的斯电梯工地(工况下)试用一年的平均节电率统计数据如表 3 所示。由表 3 表明新型

能量回馈并网系统节电效果显著,平均节电率为25.2%。

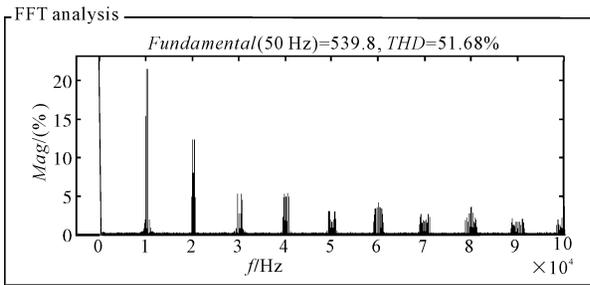


图5 SVPWM方式下逆变器输出电压谐波分布

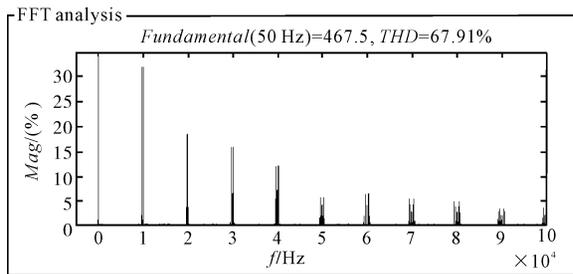


图6 SPWM方式下逆变器输出电压谐波分布

表3 平均节电率统计数据

电梯类型	宾馆 / (%)	小区 / (%)	学校 / (%)	医院 / (%)
无齿轮电梯	31.84	32.71	36.36	40.63
有齿轮电梯	19.45	20.36	24.60	29.63

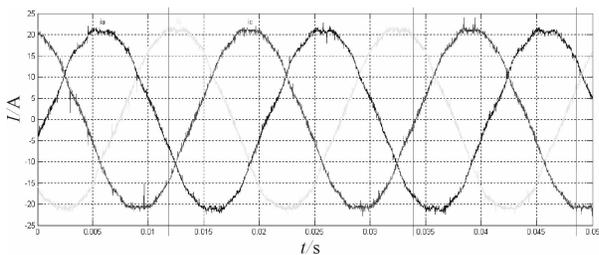


图7 三相并网电流

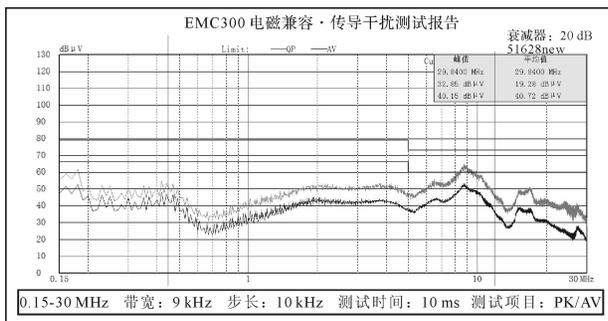


图8 新型能量回馈并网系统传导干扰测试报告

4 结束语

本研究阐述了我国电梯节能技术的研究现状,设

计并搭建一台15 kW新型能量回馈并网系统,将SVPWM策略应用到系统中进行并网实验研究,实验结果表明并网电流THD小于5%满足国标要求,采用SVPWM方式后逆变器直流电压利用率比传统的SPWM方式高15.5%,拓展了系统的适用范围,回馈电压下限为600 V。新型能量回馈并网系统适用环境广,工作稳定,节电效果显著,对外电磁干扰较少,在节约能源和改善机房环境方面具有重大的意义和价值。

参考文献 (References):

- [1] 金建峰,朱昌明,张鹏,等. 动态测量建立曳引电梯的能耗仿真模型[J]. 机械设计与研究,2009,25(2):112-120.
- [2] 张红兵,徐向东,华源明,等. 电梯可再生电能评估与节电效果研究[J]. 中国电梯,2010,21(13):46-60.
- [3] 孙关林,沈晓宇. 节能电梯及节能效果分析[J]. 浙江建筑,2007,24(4):51-55.
- [4] 杜飞,杜欣. 电力电子应用技术的Matlab仿真[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [5] IQBAL A, LAMINE A, ASHRAF I, et al. Matlab/Simulink Model of Space Vector PWM for Three-Phase Voltage Source Inverter[C]// Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference 2006. Newcastle, England: [s. n.], 2006: 1096-1100.
- [6] YUAN Deng-ke, XU Guo-qing, HU Bo, et al. Research on a Novel SVPWM for Three-Phase VSI[C]// Proceedings of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Harbin, China: [s. n.], 2008: 1-5.
- [7] MAAMONUN A, SOLIMAN A M, KHEIRELDIN A M. Space-Vector PWM Inverter Feeding a Small Induction Motor [C]// Proceedings of International Conference on Mechatronics. Kumamoto, Japan: [s. n.], 2007: 1-4.
- [8] ZHAI Li, LI He-fei. Modeling and Simulating of SVPWM Control System of Induction Motor in Electric Vehicle[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Qingdao, China: [s. n.], 2008: 2026-2030.
- [9] JIA Gui-xi, ZHAO Hui-chao, SHAO Hong-jun. Simulation Research on PMSM Vector Control System Based on SVPWM [C]// Proceedings of 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering. Wuhan, China: [s. n.], 2010: 1936-1940.
- [10] 杨贵杰,孙力,崔乃政,等. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 电机工程学报,2001,21(5):79-83.
- [11] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社,2005. [编辑:李辉]