

一种新型能量回馈并网系统的设计与应用*

苏祥伟¹, 贾爱民¹, 吕晓东²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州浙大太阳电气有限公司, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对传统电梯采用制动电阻耗能方式所造成的能量浪费的问题,设计了一种新型能量回馈并网系统。开展了新型能量回馈并网系统的结构、工作原理及应用领域的分析,并在传统的三相桥式电路结构的基础上,通过软件锁相环和直流电压外环与并网电流内环组成的双闭环调节器,实现了对电网的能量回馈控制。为了提高直流电压利用率,拓展系统的适用环境,将空间矢量脉宽调制(SVPWM)控制策略应用到系统中。设计并搭建的 22 kW 新型能量回馈并网系统成功地应用于电梯上并进行相关的实验研究。实验结果表明,系统运行效率高达 97%,并网电流 THD 低至 3.2%,并具有良好的动态特性,在实际应用中系统工作稳定、节能效果显著。

关键词:能量回馈;并网;空间矢量脉宽调制;直流电压利用率;总谐波失真

中图分类号:TM464;TE08

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)09-1140-04

Design and application of new grid-connected energy regenerative system

SU Xiang-wei¹, JIA Ai-min¹, LV Xiao-dong²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Hangzhou Zheda Sun Electric Co., Ltd., Hangzhou 310027, china)

Abstract: Aiming at the loss of energy of the traditional elevator, which using brake resistor, a new grid-connected energy regenerative system was designed. The new grid-connected energy regenerative system, including its structure, working principle and application field, was comprehensively analyzed and investigated. Based on traditional three-phase bridge circuit and double closed-loop control algorithm, the control of grid-connected energy regenerative system was carried out. Further more, in order to improve the DC voltage availability and expand the applicable scope of the system, the space vector pulse width modulation algorithm was adopted. At last, a 22 kW grid-connected energy regenerative system was designed and built, and was successfully applied to the OTIS elevator. The experimental results show that the current THD is low to 3.2%, and the system efficiency reaches as high as 96% with better dynamic response. In the practical application, the system is robust and energy saving effect is remarkable.

Key words: energy regenerative; grid-connected; space vector pulse width modulation (SVPWM); DC voltage availability; total harmonic distortion (THD)

0 引 言

能源问题已经成为我国经济发展中普遍关注的焦点问题。据统计数据表明,工业中电动机拖动负载所消耗的电能占总耗电量的 70% 以上^[1]。变频调速技术的发展为工业节能降耗带来了前所未有的变革,但是对于需要快速启动、制动和频繁正反转的调速系统,如高速电梯、提升机等,由于通用变频器的能量不可逆性,将不

可避免地在直流母线侧电容上产生较高的泵升电压。目前,工业中主要是通过直流母线侧并联制动电阻的形式来解决上述问题,但是这种方式带来了能量的浪费以及发热等问题^[2]。采用并网发电技术对该部分能量回馈后再次利用具有重要的意义和价值。

电梯是一种高耗能的特种设备,如何让能量回馈并网系统代替制动电阻工作,将电阻上以热量消耗的电能回馈到电网、再次利用是人们所关注的焦点。不

收稿日期:2010-12-17

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:苏祥伟(1986-),男,山东枣庄人,主要从事并网逆变器方面的研究。E-mail:sxw1986sxw@163.com

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 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限制。

依据上述情况,本研究采用三相桥式逆变电路,通过软件锁相环和电压电流双闭环调节,设计并搭建一台 22 kW 新型能量回馈并网系统,采用空间矢量脉宽调制提高了直流电压利用率。该系统成功应用于西子奥的斯电梯,设计方案的可行性及系统的良好性能得到验证。

1 系统原理与结构分析

以电梯系统为例,简单的电梯系统是由轿厢、曳引机以及对重等组成,通常对重的重量是电梯满载时的 47% 左右,因而当电梯运行在空载或者轻载时轿厢的重量小于对重,电梯运行在重载或者满载时轿厢的重量大于对重,这就造成了曳引机始终在耗电做功状态与发电运行状态之间切换。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,能量累积在直流母线侧电容上形成较高的泵升电压。通过合理地设计逆变器可以将这部分能量通过并网发电的形式回馈到电网中再次利用。

电机处于发电状态时变频器直流母线侧电容上积累电能,电压不断上升,当检测到直流母线电压达到回馈电压值时输出 PWM 信号,逆变单元开始工作,该系统设计的回馈电压值为 600 V ~ 750 V。能量回馈装置的结构框图如图 1 所示。图中直流输入二极管可防止电流反灌,提高系统的安全性;直流滤波电路包括电容和电感,起到稳压和滤波作用,提高系统稳定性和抑制 EMI;智能主控制单元使用 DSP 芯片,全数字化设计可靠性高;三相滤波电路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,提高了并网电能质量。能量回馈装置的主电路原理图如图 2 所示。

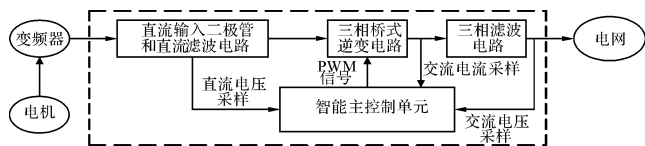


图 1 能量回馈装置结构框图

2 系统控制环路分析

系统中并网逆变器主要控制环路包括:①软件锁相环,其功能是快速准确地锁定电网电压的相位角并

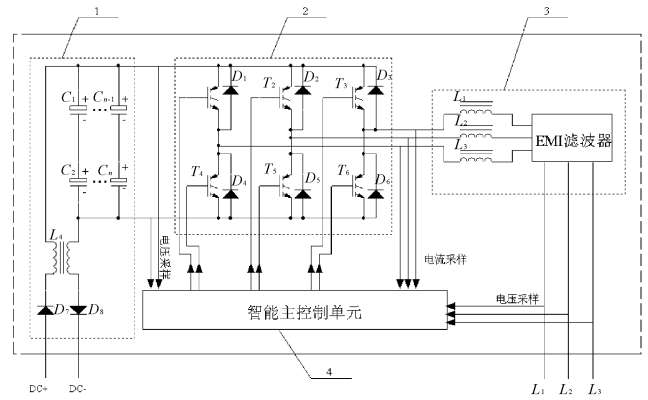


图 2 能量回馈装置主电路原理图

1—直流输入二极管和直流滤波电路;2—三相桥式逆变电路;3—三相滤波电路;4—智能主控制单元

应用于并网电流控制实现单位功率因数;②电压控制外环,其功能是控制三相逆变器直流侧电压幅值并为电流内环提供控制参考^[3];③电流控制内环,其功能是跟踪电压外环输出的电流指令,进行并网电流控制,降低 THD,提高并网电能质量。

2.1 软件锁相环

文献[4]中提出的数字锁相环方案是通过检测电网电压过零点来实现电网频率和相位的锁定。该方案每工频周期修正频率和相位角,因而锁相速度较慢。电网电压过零点畸变等情况也会影响到该方案锁相的精确度。另外,由于该方案检测的是单相电网电压的零点,对于三相电压不平衡的情况,则无法准确地跟踪电网电压基波正序分量。为解决上述问题,该系统采用了一种基于瞬时无功功率理论的软件锁相方案。

软件锁相环的控制框图如图 3 所示。对电网电压进行采样处理,经过 Clarke 坐标变换将三维静止坐标系中的三相电压标量 U_a, U_b, U_c 转换成二维静止坐标系中的 U_α, U_β 矢量,再经过 Park 坐标变换转换成二维旋转坐标系中的 U_d, U_q 矢量,利用 PID 控制算法控制 $U_q = 0$,从而使得电网电压与并网电流同频同相,达到锁定电网电压频率与相位角的目的^[5]。该软件锁相环是基于瞬时无功功率理论^[6-7]。设三相对称正弦波电压为 $v_a = U_m \cos \omega t, v_b = U_m \cos(\omega t - 2\pi/3), v_c = U_m \cos(\omega t + 2\pi/3)$ 。经过 Clark 和 Park 坐标变换后可得:

$$u_d = \sqrt{\frac{3}{2}} U_m \cos(\omega t - \theta) \tag{1}$$

$$u_q = \sqrt{\frac{3}{2}} U_m \sin(\omega t - \theta) \tag{2}$$

式中: θ —Park 坐标变换中所需的锁相角, u_d —三相电压有功分量, u_q —三相电压无功分量。

如果锁相角与电网电压相位角同步则 $\omega t = \theta$,即 $u_q = 0$,因而控制 $u_q = 0$ 可间接地实现电网电压频率和相位的锁定。对于三相非对称正弦电压而言,经过旋转坐标变换后只有正序分量转化为直流分量,而负序及零序分量转化为倍频分量,经过积分环节滤波后,软件锁相环的输出跟踪的是基波正序分量,将不受负序及零序分量的影响。因此,该软件锁相环能够准确、快速地锁定电网电压基波正序分量的频率和相位。

2.2 电压电流双闭环控制

电压电流双闭环包括电压外环和电流内环,其中电压外环主要是控制三相电压型逆变器直流侧电压幅值,而电流内环主要是按照电压外环输出的电流指令进行电流控制。电压外环和电流内环均采用 PI 调节器,在控制系统 PI 参数整定时,电压外环着重考虑其抗扰动能力,要求有较好的静态性能,电流内环需获得较快的电流跟随性能,要求有较好的动态响应。电压电流双闭环控制框图如图 4 所示^[8-9]。对于电压外环,直流母线电压采样值 v_{dc} 与母线电压参考值 v_{ref} 比较后,其误差经 PI 调节器 H_v 调节,输出 i_{dref} 并将其作为电流内环有功分量的参考基准。对于电流内环,三相并网电流采样后经 Clarke 变换和 Park 变换分解为旋转坐标系中的有功分量 i_d 和无功分量 i_q , i_d 与 i_{dref} 比较后其误差经 H_{id} 调节,输出用以控制并网电流的幅值, i_q 与 0 比较后其误差经 H_{iq} 调节,输出用以控制并网电流相位,实现单位功率因数。二者的输出量经 Park 反变换后控制 SVPWM 模块产生相应的 PWM 信号。该控制算法中,将三维静止坐标系中 50 Hz 交流电流标量转换成二维旋转坐标系中的直流矢量 i_d 、 i_q ,对于积分环节,直流量处增益为无穷大,因而可以实现电流的无静差控制。

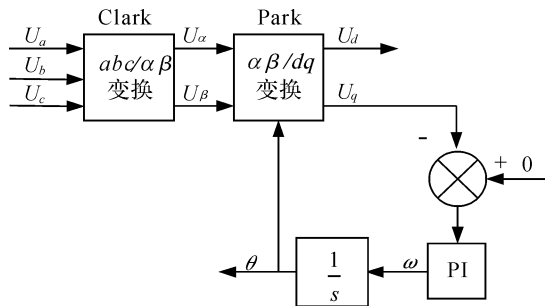


图 3 软件锁相环控制框图

2.3 空间矢量脉宽调制

空间矢量脉宽调制是依据变流器空间电压(电流)矢量切换来控制变流器的一种控制策略。该系统通过对逆变器进行适当的控制,使逆变器输出的空间

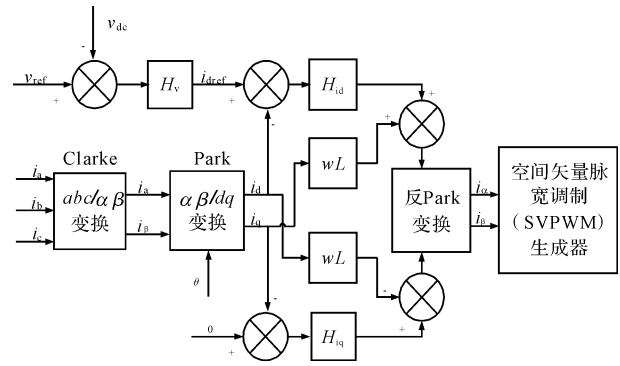


图 4 电压电流双闭环控制框图

电压矢量的运动轨迹趋近于圆^[10]。根据空间矢量变换的可逆性,空间电压矢量的顶点的轨迹越趋近于圆,则原三相电压越趋近于三相对称正弦波。空间矢量脉宽调制方式提高了电压型逆变器的直流电压利用率,与传统的正弦波脉宽调制方式相比提高了 15.5%,拓展了能量回馈并网系统的适用环境^[11-12]。空间矢量脉宽调制策略的控制原理图如图 5 所示。依据当前电网电压的相位角,本研究将控制环输出的单一空间矢量分解成三相控制信号 T_a 、 T_b 、 T_c ,再根据其矢量合成法生成 3 组互补的门极脉冲信号,分别控制三相半桥的上、下桥臂开关管的开通与关断,图中 U_{g2} 、 U_{g1} 为 A 相上、下桥臂开关管的驱动信号, U_{g4} 、 U_{g3} 为 B 相上、下桥臂开关管的驱动信号, U_{g6} 、 U_{g5} 为 C 相上、下桥臂开关管的驱动信号。

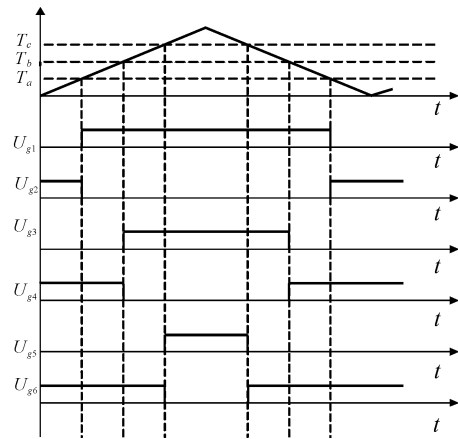


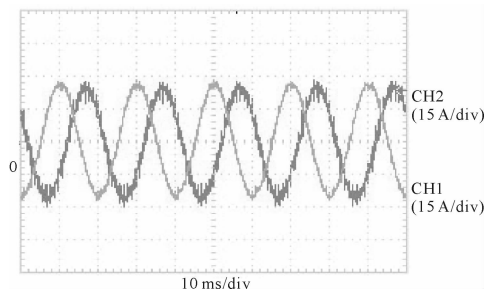
图 5 空间矢量脉宽调制策略控制原理图

3 实验结果及分析

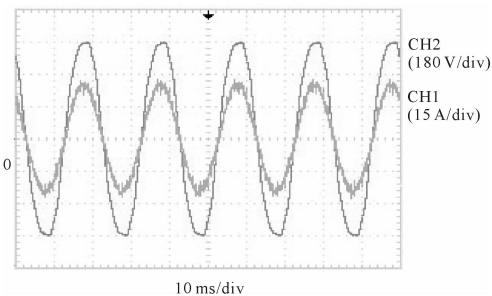
根据以上设计方案,以 TMS320F2801 为主控制器,本研究搭建了一台额定功率为 22 kW 的新型能量回馈并网系统并进行实验。

逆变器并网电流波形如图 6(a) 所示。由图可知,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 19 A 时测量电流 $THD = 3.2\%$ 。A 相并网电流与 A 相电网电压波形如图 6(b) 所示, CH1 为 A 相并网电流波形, CH2 为 A 相电网电压波形。由图可知, A 相电网电压与 A 相并网电流频率和相位相同, 锁相环工作良好, 经测量逆变器的并网功率因数为 0.99。本研究使用直流源模拟变频器直流母线, 分别在 5 kW、10 kW、15 kW 以及 18 kW 的并网功率下进行并网实验, 并网实验数据如表 1 所示。由表 1 得出系统效率大于 96%, 直流电压利用率为 92%。目前, 该产品已经应用于西子奥的斯电梯, 工作稳定可靠。该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 2 所示。由表 2 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%。



(a) 逆变器并网电流



(b) A 相电网电压与并网电流

图 6 逆变器并网电流及 A 相电网电压、并网电流

表 1 并网实验数据

直流功率 /kW	并网功率 /kW	系统效率 /(%)	直流电压 利用率/(%)
5.27	5.10	96.8	92
10.58	10.18	96.22	92
16.05	15.50	96.57	92
18.88	18.15	96.13	92

表 2 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

4 结束语

本研究阐述了新型能量回馈并网系统的结构、工作原理, 提出了主要控制环路的设计方案。依据该设计方案, 搭建了一台 22 kW 的新型能量回馈并网系统, 并应用于西子奥的斯电梯进行实验。实验结果表明, 该设计能够满足并网电流 THD 小于 5% 的国标要求, 直流电压利用率高, 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, 在节约能源方面具有重大的意义和价值。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [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] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 蒋燕君, 张超, 何湘宁. 基于 DSP 的光伏并网发电系统数字锁相技术[J]. 电源技术应用, 2007, 10(2): 29-32.
- [5] CHUNG S K. Phase - locked loop for grid - connected three - phase power conversion systems[J]. **IEEE Proceedings Electric Power Applications**, 2000, 147(3): 213-219.
- [6] 曹世华, 张维娜, 沈鸿, 等. 新型软件锁相环三相电压型 PWM 整流器的控制[J]. 电力电子技术, 2008, 42(5): 72-73.
- [7] NAIDU S R, MASCARENHAS A W, FERNANDES D A. A Software Phase-Locked Loop for Unbalanced and Distorted Utility Conditions [C]// Proceedings of 2004 International Conference on Power System Technology-POWERCON 2004. Singapore: [s. n.], 2004: 1055-1060.
- [8] WANG Zi-tao, CHANG Liu-chen. A Novel Vdc Voltage Monitoring and Control Method for Three-Phase Grid-Connected Inverter[C]// Proceedings of Power Electronics Specialists Conference 2007. Orlando, FL: [s. n.], 2007: 1221-1226.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.

[编辑: 李 辉]