

文章编号: 1005—0523(2009)01—0043—04

基于 Simulink 单相矩阵变换器畸变的改进措施研究

王建华, 高海生

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:基于单相矩阵变换器原理图得到产生畸变的输出波形,并进一步分析了输出波形畸变的原因,提出了改进思路以及改进电路图,最终通过 Simulink 的建模仿真得到了单相矩阵变换器理想的输出波形,并发现这种变换器具有输出频率连续可调、输入输出电流接近正弦波等优点,发展前景大,值得进一步研究。
关 键 词:单相矩阵变换器;畸变;建模与仿真
中图分类号: TM406 **文献标识码:** A

矩阵式变换器是一种崭新形式的、具有通用性的电力电子变换器,可以实现对交直流电诸要素(相位、幅值、频率)进行交换,即通过矩阵变换器可以实现由 n 相、频率 f_i 、电压 V_i 、初相位 ϕ 的交流电到 p 相、频率 f_o 、电压 V_o 、初相位 θ 交流电的变换,所以矩阵变换器又被称为“万能”变换器。目前研究的矩阵变换器多集中在三相,但是由于目前偏远地区、小型工业部门和家庭等小容量电力用户,基本采用单相供电;甚至在轨道交通的电力牵引中也采用单相供电^[1]。所以本文主要是针对单相矩阵变换器输出波形畸变改进进行相关的理论研究。

1 单相矩阵变换器的拓扑结构与仿真结果

单相—单相矩阵式变换电源的电路拓扑结构^[2]如图 1 所示。图中 $S_{11} \sim S_{22}$ 为 4 只双向开关,由两只 IGBT 与二极管反并联构成。双向开关又称四象限开关,能流过双向电流,阻断双向电压。通过一组开关函数将输入的工频交流电转换成输出电压和频率可调的单相交流电。

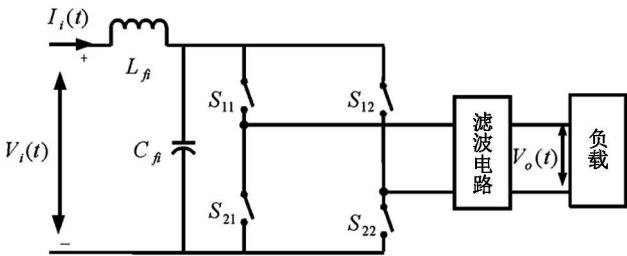


图 1 单相矩阵变换器拓扑结构

通过对单相矩阵变换器的理论研究可得出输出电压与输入电压之间的关系如下

$$\begin{aligned} v_o(t) &= \alpha_1 \cdot \sqrt{2}V_i \sin(w_i t) - \alpha_2 \cdot \sqrt{2}V_i \sin(w_i t) \quad \alpha_1 = \alpha_{11} = \alpha_{22} = \frac{1}{2} \left[1 + m \cdot \frac{\sin(w_o t + \varphi)}{\sin(w_i t)} \right] \\ \alpha_2 &= \alpha_{12} = \alpha_{21} = \frac{1}{2} \left[1 - m \cdot \frac{\sin(w_o t + \varphi)}{\sin(w_i t)} \right] \end{aligned}$$

式中： $m = \frac{V_o}{V_i}$ (电压传输比) α_{11} 为双向开关 S_{11} 的占空比,其他以此类推。

实时求解式上式中 m 的变化并用 α_{ij} 控制对应得矩阵开关 S_{ij} 在每个周期内得占空比,即可实现 AC—AC

的转换.

采用 Simulink 仿真软件从传递函数角度去反映单相矩阵变换器的解析特性中可得到占空比和输出波形如图 2、3 所示.

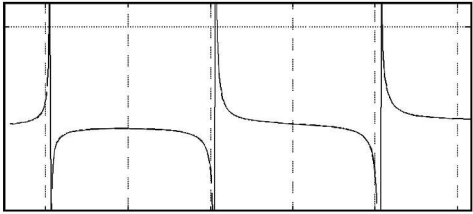


图 2 占空比 α_{11} 波形图

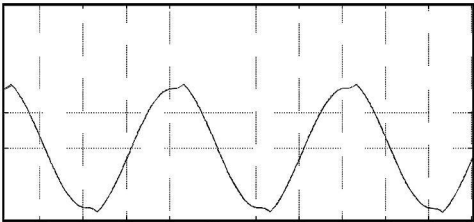


图 3 单相矩阵变换器输出波形

2 单相矩阵变换器输出波形畸变的原理分析

通过对单相矩阵变换器的仿真研究发现:单相矩阵变换器能实现交流到交流的变频与变压的功能.输出波形在一个周期内出现了两次“内凹”,即出现 2 次畸变,而且每次都是在输出波形峰值处.该畸变与输入电压过零有关,对照仿真的 α 瞬时波形图,其瞬时值超出约束条件,出现 $\alpha > 1$ 和 $\alpha < 0$ 就会出现畸变^[3];如果做成产品的话,这会是一个很不利因素.因为在每个周期内输出波形会有两次畸变,利用该产品去生产的时候就很有可能带来很大的危险.所以要想方法去改进波形,消除畸变,最终得到完美的波形,从而使得生产出来的产品处在一个最佳的工作状态.要想达到这个目的,那么首先要分析出产生输出波形畸变的原因.

根据对单相矩阵变换器的研究分析,以及开关矩阵中占空比的定义和输入端不可短路、输出不可断路的约束条件可知

$$0 \leq \alpha_i \leq 1, \text{ 且 } \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) = 1$$
$$V_o(t) = \alpha^T V_i(t)$$

由上面两个式子可推得

$$\min_{i=1,2,\dots,n} V_{i1}(t) \leq V_o(t) \leq \max_{i=1,2,\dots,n} V_{i1}(t)$$

上式就是保证输出波形不发生畸变的必要条件,即在任时刻 t 必须保证各输入电压合成的输出波形 $V_o(t)$, 处于各输入分量的绝对值包络线范围内.

单相矩阵变换器输出波形畸变主要是从两个方面进行分析:一是从输入电压 输出电压的波形来分析,二是从能量的角度来分析.

(1) 从输入电压 输出电压的波形来分析

输出电压 $V_o(t)$ 波形不畸变的时候应始终在输入电压 $V_i(t)$ 包络线范围之内.而从图 4 波形中可看出输出电压波形出现畸变的区间正是输出电压超出输入电压的包络线的区间.

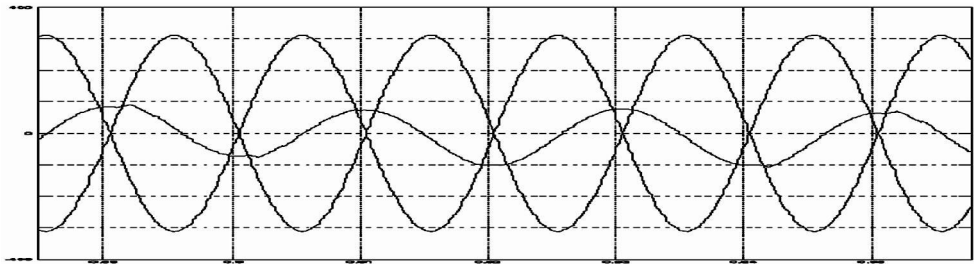


图 4 单相矩阵变换器输入 输出波形图

(2) 从能量角度去分析

从能量守恒原则上得知:当输入电压 $V_i(t)$ 过零时,输出电压 $V_o(t)$ 必为零.而当 w_o 、 w_i 不相关时,此时期望输出 $V'_o(t)$ (通过矩阵开关调制,期望矩阵变换器输出无畸变正弦电压)并不一定为零,此时矩阵变换器

能够实际传输的能量少于通过输出期望波形计算所必须的能量. 因此产生输出波形畸变.

用一句话总结单相矩阵变换器出现畸变的原因就是输入的瞬时能量达不到期望的输出能量,所以要想改变输出波形的畸变,就要使输出波形出现畸变的时候的输入能量增加,使其达到期望的输出能量即可.

3 改进电路拓扑结构和工作原理

单相矩阵变换器输出波形出现畸变的原因在于输入电压经过开关矩阵变换后的实际输出达不到期望输出值,输入能量瞬时值达不到理论计算所需的期望输出能量值. 因此只有在单相矩阵变换器的拓扑结构上有所改变,才可能减小和消除输出波形畸变^[4].

在单相矩阵变换器中,当输出频率与输入频率不相关时,期望输出波形是由被输入波形的包络线所包含的时间段和超出包络线的时间段组成,也就是存在输入能量满足期望输出能量和输入能量少于期望输出能量的两个时间区间.

所以通过上面的分析,采取的思路是:在输出波形包含在输入波形包络线内的时间区段中,开关矩阵正常工作,并充分利用输入电压,在储能元件中积蓄一定的能量;当期望输出电压超出输入包络线时,将储能释放出来,弥补期望输出能量和实际输出能量之间的差. 通过这种方法减小或消除输出波形的畸变.

根据上述的思路,画出能够补充能量,具有校正波形畸变的单相矩阵变换器结构如图 5 所示.

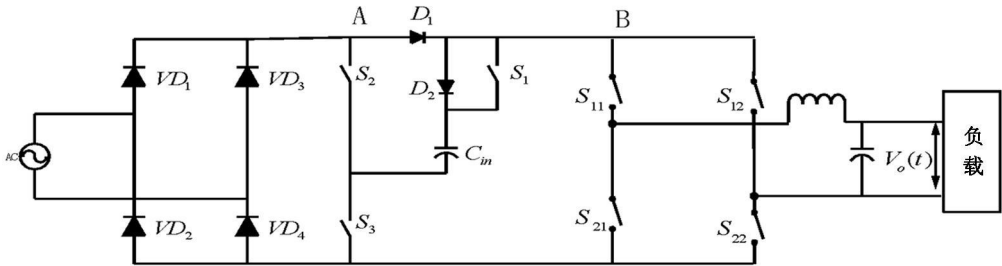


图 5 具有校正波形畸变的单相矩阵变换器结构

该电路由三部分组成:二极管组成的整流电路, C_n 的吸收和释放能量的电路, 双向开关矩阵电路. 下面来具体介绍一下各部分的电路功能.

(1) 整流电路:主要功能就是为了简化拓扑结构和控制方案. 通过桥式整流将输入的交流正弦波变为直流的脉动波形, 单向脉动输入能够使用单极性电容, 减少装置体积, 提高功率密度. 如果不采用桥式整流则需要两组电容吸收和释放能量的电路.

(2) C_n 的吸收和释放能量的电路:用于改善和弥补单相矩阵变换器输出波形的畸变. 从图中可看出, 它由三个开关 S_1 、 S_2 和 S_3 两个二极管 D_1 、 D_2 和能量吸放电容 C_n 组成.

(3) 双向开关矩阵电路是单相矩阵变换器的主体部分.

4 仿真研究的结果

利用仿真软件 Simulink 对该电路进行建模仿真^[5,6], 仿真的主电路图如图 6 所示.

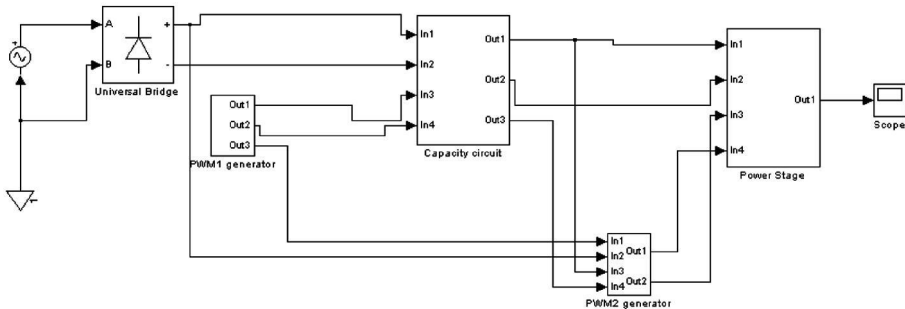


图 6 具有校正输出波形畸变功能的单相矩阵变换器的仿真模型

从图上看,模型中总共包括了 5 个子系统, Universal Bridge、Capacity circuit Power Stage、PWM¹ generator、PWM² generator 其中的 Universal Bridge 是将输入的交流电压源整流成单相脉动波形, Capacity circuit 中用来模拟电容充放电, Power Stage 是用来模拟主电路中的四个双向开关,对于这个模型最关键的还是驱动脉冲的生成.这个电路中总共有两部分,一部分就是要产生驱动电容充放电电路中的开关的驱动脉冲,也就是图中的 PWM¹ generator 环节,它的作用就是要产生所需要的脉冲,脉冲产生的一个关键依据就是输入电压和输出电压的差值,通过上面的分析知道,当输出电压小于输入电压时,开关 S_3 导通, S_1 、 S_2 截止,所以要给 S_3 一个开通脉冲而给 S_1 、 S_2 一个截止脉冲.当输出电压大于输入电压时,开关 S_3 截止, S_1 、 S_2 导通,所以要给 S_3 一个截止脉冲而给 S_1 、 S_2 一个开通脉冲.另一部分驱动脉冲就是针对主电路双向开关的.具有校正输出波形畸变的单相矩阵变换器的主要仿真波形图如图 7~10 所示.

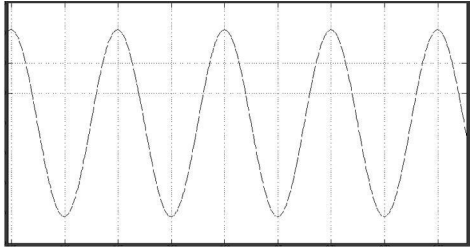


图 7 输入波形图

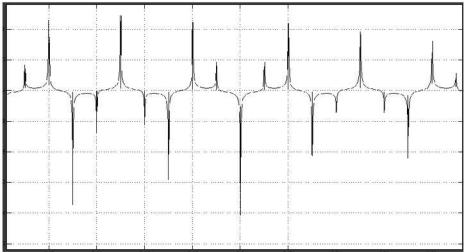


图 8 占空比波形图

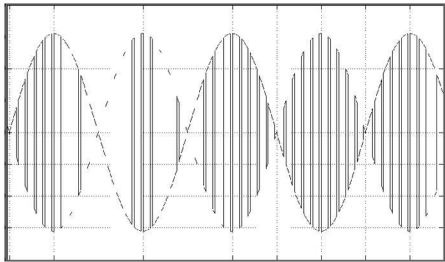


图 9 滤波前的输出电压波形图

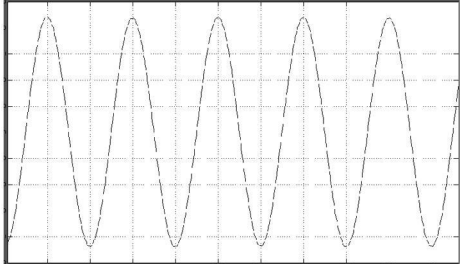


图 10 滤波后输出电压波形图

从波形图中可看出,对于 α_1 的值都控制在 0~1 之间,没有大于 1 或者小于 0 的情况,曲线比较光滑,基本接近理想的正弦波,与给定的期望输出电压波形接近,达到了预期的效果,所以经过研究发现单相矩阵变换器拓扑结构简单,理论上,一定范围内的输出电压,整个范围内的输出频率连续可调,输出波形完美,并能够完全传递电源电压的有效值.另外它在具有本身不产生谐波污染的同时,又能够对电网进行无功补偿能力,其总体性能高于其他变换器,在日益关注可持续发展问题,大力推行电力环保、绿色电源的今天,研究与开发这种变换器就特别具有现实意义,发展前景良好.

参考文献:

[1] 陈伯时. 矩阵变换器: 技术评述 [J]. 电力电子, 2003, (1): 57—58.
[2] 孟庆宗. 交—交矩阵变换器 [J]. 电力电子, 2003, (1): 21—45.
[3] 康现伟. 基于双空间矢量调制的矩阵变换器的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
[4] 万 衡. 单相矩阵式变换器的研究与应用 [D]. 上海: 华东理工大学, 2001.
[5] 陆治国. 电源的计算机仿真技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 122—124.
[6] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 230—252.

(下转第 70 页)

参考文献:

[1] 陈伯时,陈敏逊.交流调速系统(第 2 版)[M].北京:机械工业出版社,2005.169—209.
[2] 白继荣,李桥梁,黎志光.带转矩和磁链内环的交流异步电机矢量控制系统仿真[J].电机技术,2008,(2):1—4.

Simulation of SF Vector Control

PENG Wei-fa, XU Xiao-ling, ZOU Juan

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on the rotor flux-oriented coordinate simulation model of AC motor control system without flux closed-loop is established and its decoupling control is realized. The PI controller with limited amplitude is adopted in speed loop. Hysteretic-current-loop PWM inverter is its main circuit. A promising result has been testified of this system by the simulation result.

Key words: AC motor; slip frequency vector control; decoupling control

(责任编辑:王建华)

(上接第 46 页)

Improvem ent of Single-phase M atrix Converter Based on Sim ulink

W ANG Jian-hua, GAO Hai-sheng

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The output wave shape is obtained based on the single-phase matrix converter principle. Reasons of the output wave shape distortion are analyzed. The improving methods and the improving circuit diagram are proposed. Finally the output wave shape of single-phase matrix converter ideal is obtained by the simulink modeling simulation. It is shown that the AC-AC converter has good features such as unlimited output frequency, input and output electrical current approach sine wave etc. With good developing foreground, it deserves further researching.

Key words: single-phase matrix converter; distortion; modeling and simulating

(责任编辑:吴泽九)