

矩阵式单相电源调压技术

曹以龙, 龚幼民, 杨喜军, 陈伯时

(上海大学, 上海 200072)

摘要: 提出了一种矩阵式单相电源调压技术, 并分析了其工作原理, 给出了一种安全的换流策略。仿真结果表明这种变换器输出电压在宽范围内连续可调, 而且具有高正弦度的输入电流波形。

关键词: 单相电源; 矩阵式电源变换; 安全换流策略

Matrix Single-phase Power Supply Conversion Technique

CAO Yi-long, GONG You-min, YANG Xi-jun, CHEN Bo-shi

Abstract: A matrix single-phase power supply conversion technique is analyzed and a safety current commutation strategy is given. The simulation results show that it can output variable voltage continuously over a wide range and its input current wave is sinuous.

Keywords: Single-phase power supply; Matrix SVR; Safety commutation strategy

中图分类号: TN86 文献标识码: A 文章编号: 0219-2713(2003)04-0156-04

1 引言

单相交流电源的应用是非常广泛的, 比如在农村、轻工业、家用电器等小功率传动领域以及电力机车供电系统。对于单相交流电源, 调压和稳压是最为普遍的要求。目前能够实现这一要求的调压器有下面三种。

1) 磁饱和式调压器该调压器通过控制主电路中电感的饱和程度, 以改变电抗值以及其上的电压, 实现对输出电压的调节。这种调压器具有一定的动态性能, 但输出电压的调节范围小, 体积和重量较大。

2) 机械式调压器机械式调压器由电动机带动碳刷实现输出电压的调节。这种调压器输出波形较好, 但体积、重量大, 动态性能差。

3) 电子式调压器这种调压器采用电力电子器件实现。目前有晶闸管调压器和逆变式调压器两种。晶闸管调压器采用的是相控方式, 因此其输出波形差; 逆变式调压器采用的是斩波控制方式, 其输出波形和动态响应较好。

从上面可知, 逆变式电子调压器具有最好的性能。逆变式电子调压器的结构不仅具有调压、稳压的能力, 而且还可以实现频率的变换。它是通过AC/DC/AC变换实现的。具有中间直流环节——储能电容和变换效率低是它的不足。随着现代电力电子技术的发展, 单相电源变换技术也有了很大

的进步，先后出现了多种利用全控器件的交-交直接变换方案。例如Han-Wood Park等提出了一种新颖的高性能单相交流调压器^[1]；Douglas Giardini等提出了一种用于机场的航空照明矩阵式单相降压变换器^[2]；Zuckerberger等提出了一种具有输出电压调幅调频能力的单相-单相矩阵式变换技术^[3]。本文基于矩阵式变换理论，提出一种矩阵式单相电源变换电路，该电路只使用两个双向开关管，可以实现输出电压连续可调及获得高正弦度的输入电流波形。

2 矩阵式单相电源调压原理

单相-单相矩阵式电力变换的典型拓扑如图1所示。通过一组开关函数可以将输入的工频交流电压转换成幅值与频率可调的单相交流电压，其中 $S_{11} \sim S_{22}$ 为4只双向可控开关。

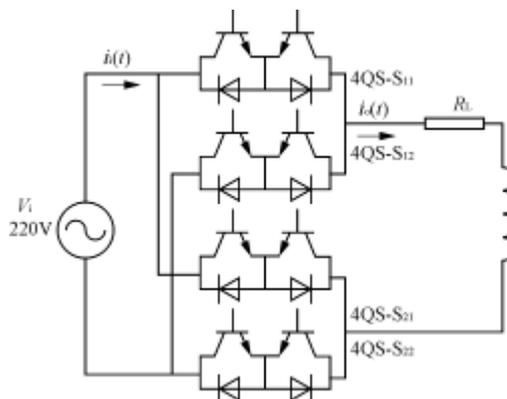


图1 单相-单相矩阵式电力变换器拓扑

将单相电源视为两相电源，单相-单相矩阵式变换器期望输出两相余弦电压 $v_{o1}(t)$ 和 $v_{o2}(t)$ ，包含输出0 Hz，其中四象限开关（4QS） S_{11} 与 S_{12} 负责产生 $v_{o1}(t)$ ， S_{21} 与 S_{22} 负责产生 $v_{o2}(t)$ 。输出目标函数为两相正弦函数，这种方法可以称为SPWM法。

令输出目标函数为

$$\begin{cases} e_1 = \sin(\omega t) \\ e_2 = \sin(\omega t - \pi/2) \end{cases} \quad (1)$$

设电源电压为 $v_1(t) = \sqrt{2} V_1 \sin(\omega_1 t)$ ，则期望输出电压为

$$\begin{cases} v_{o1}(x) = \sqrt{2} V_{o1} u_{o1}(x) \\ v_{o2}(x) = \sqrt{2} V_{o2} u_{o2}(x) \end{cases} \quad (2)$$

式中： V_{o1} 与 V_{o2} 分别为 $v_{o1}(t)$ 与 $v_{o2}(t)$ 的有效值。

可得开关函数矩阵

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}, \begin{cases} h_{11} = \frac{1}{2} \left(1 + q_{o1} \frac{u_{o1}(x)}{u_{o1}(x)} \right) \\ h_{12} = \frac{1}{2} \left(1 - q_{o1} \frac{u_{o1}(x)}{u_{o1}(x)} \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} h_{21} = \frac{1}{2} \left(1 + q_{o2} \frac{u_{o2}(x)}{u_{o2}(x)} \right) \\ h_{22} = \frac{1}{2} \left(1 - q_{o2} \frac{u_{o2}(x)}{u_{o2}(x)} \right) \end{cases}$$

式中： h_{ij} 代表对应双向可控开关的瞬时占空比， $0 \leq h_{ij} \leq 1$ ， $i, j=1, 2$ ， $h_{11} + h_{12} = 1$ ， $h_{21} + h_{22} = 1$ ；

q_{o1} 与 q_{o2} 为电压变比；

$$\theta \in [0, 2\pi]。$$

注意当输入电压过零时，开关函数不再收敛，需要利用L' hospital法则处理。这种控制方法有以下优点：

- 1) q_{o1} 与 q_{o2} 独立可调，则输出电压范围扩大；
- 2) 开关利用率大大增强；
- 3) 三次谐波注入PWM、开关损耗最小PWM、基于开关函数SVPWM等方法能够直接采用。

通过对上述变换器拓扑的分析，对于单相输出可以简化电路的结构。将双向开关 $4Q_S - S_{22}$ 短接、 $4Q_S - S_{12}$ 开路。

3 简化的矩阵式单相电源调压器

简化后的单相电源变换电路如图2所示。其工作原理为：利用固定占空比的PWM脉冲波驱动 SB_1 ，将等宽的电源脉冲电压施加到变压器的原边，同时利用上述PWM脉冲的补脉冲驱动 SB_2 ，实现变压器的原边电流续流。只要输出滤波器参数设计合理，就可以得到高正弦度的输出电压波形，开关

频率越高效果越好。上述 SB_1 与 SB_2 之间的换流方式由一步完成，简称一步换流方式。

由图2，这种变换器的设计难点在于双向可控开关 SB_1 与 SB_2 之间的是否能够安全切换。因为开关非理想特性，在二者之间换流时存在电源直通与变压器原边开路的可能性，而这两点是不期望的。为此必须在二者切换时采取安全换流策略。

下面给出一种四步换流方式。这是一种根据电源电压极性而确定的换流方式。根据电源电压极性的不同将一个电源电压周期划分为两个扇区，电源电压正极性时定为扇区1，电源电压负极性时定为扇区2。

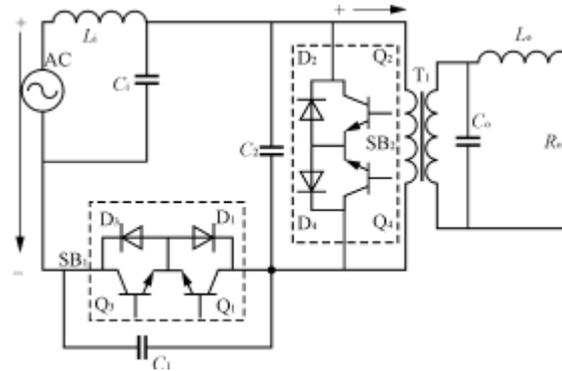


图2 简化的单相电源变换电路

1) 扇区1内开关动作规则

(1) 预备

开关状态为 Q_2 、 Q_4 断， Q_1 、 Q_3 断，工作状态为等待。

(2) 正半周供电状态

按照期望开关周期与占空比使 Q_1 、 Q_3 开通， Q_2 、 Q_4 断，工作状态为供电。

(3) 由供电状态切换到续流状态

Q_4 开通，延时 $\rightarrow Q_1$ 关断，延时 $\rightarrow Q_2$ 开通，延时 $\rightarrow Q_3$ 关断，工作状态为续流。

(4) 由续流状态切换到供电状态

Q_3 开通，延时 $\rightarrow Q_2$ 关断，延时 $\rightarrow Q_1$ 开通，延时 $\rightarrow Q_4$ 关断，工作状态为供电。

2) 扇区2内开关动作规则

(1) 预备

开关状态为 Q_2 、 Q_4 断， Q_1 、 Q_3 断，工作状态为等待。

(2) 负半周供电状态

按照期望开关周期与占空比使 Q_1 、 Q_3 开通， Q_2 、 Q_4 断，工作状态为供电。

(3) 由供电状态切换到续流状态

Q_2 开通，延时 $\rightarrow Q_3$ 关断，延时 $\rightarrow Q_4$ 开通，延时 $\rightarrow Q_1$ 关断，工作状态为续流。

(4) 由续流状态切换到供电状态

Q_1 开通，延时 $\rightarrow Q_4$ 关断，延时 $\rightarrow Q_3$ 开通，延时 $\rightarrow Q_2$ 关断，工作状态为供电。

在每个扇区内部，这种换流方式是安全的，只需要利用电压传感器准确快速地检测电源电压极性来确定扇区，而不需要电流传感器检测变压器原边电流的极性。当然，传感器要有良好的线性度、快速性和光电隔离，由于电源电压很稳定，其过零点的检测比较准确可靠。扇区之间的切换不需要特别考虑，因为切换点只出现在电源电压过零点，切换时只要保证变压器的原边续流有路径即可。为此可以采取下述方法，即不论变压器原边电流与各开关此时处于什么状态，首先开通 Q_2 和 Q_4 ，进行续流，短暂延时后，再关闭 Q_1 和 Q_3 ，然后再按照四步换流流程进行即可。

4 仿真结果

采用PSPICE对采用四步换流方式的矩阵式单相电源调压器进行仿真，为增强效果，仿真电路在变压器原边增加了一个滤波器，其中电感为1mH，电容为1 μ F。变压器原边电感为100mH，原边电阻为2 Ω ，副边为100mH，电压变比为1。电源侧滤波电容为2 μ F，滤波电感为2mH。负载电阻 $R_o=5\Omega$ ，输出滤波电容 $C_o=10\mu$ F，输出滤波电感 $L_o=20$ mH。电源为单相工频交流电源，开关频率为10kHz，功率开关为IGBT。图4、图6、图8与图10为占空比100%、95%、50%与7.5%时变压器输出电压与负载电流波形，图3、图5、图7与图9为占空比100%、95%、50%与7.5%时电源电压与电流波形。仿真表明，开关频率越高，输出电压与电流波形正弦度越好；占空比越大，输出电压幅值越高；输入电流波形的正弦度很高，对电网几乎无谐波电流污染。

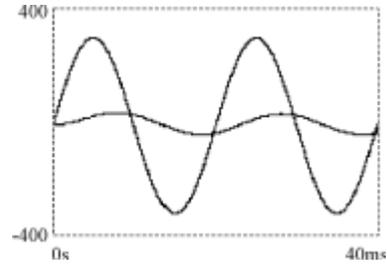


图3 电源电压与电流波形($D=100\%$)

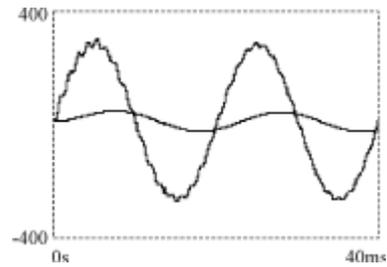


图4 变压器输出电压与负载电流波形($D=100\%$)

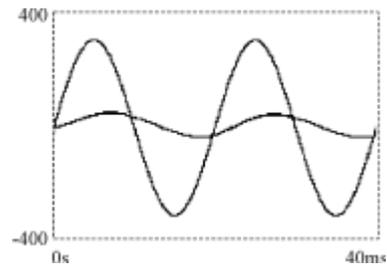


图5 电源电压与电流波形($D=95\%$)

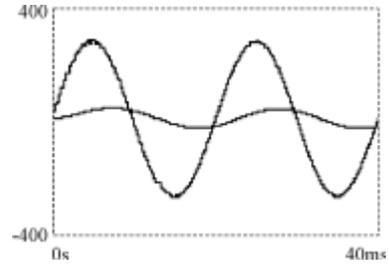


图6 变压器输出电压与负载电流波形($D=95\%$)

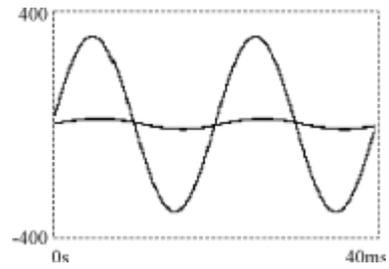


图7 电源电压与电流波形($D=50\%$)

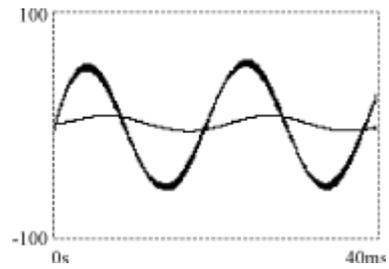


图8 变压器输出电压与负载电流波形($D=50\%$)

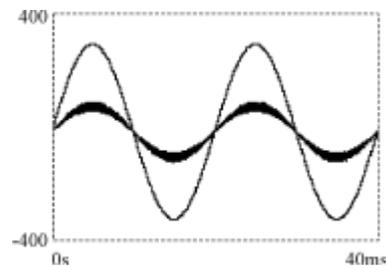


图9 电源电压与电流波形($D=7.5\%$)

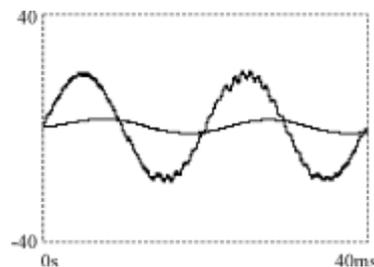


图10 变压器输出电压与负载电流波形($D=7.5\%$)

5 结语

本文所提的矩阵式单相电源变换器具有开关器件数量少、中间无需储能电容、输出电压连续可调、高正弦度输入电流等特点，适用于恒频调压调速、UPS、工业加热、调光器等应用场合。仿真结果验证了四步换流策略是矩阵式单相电源变换器的一种安全换流技术。矩阵式单相电源变换器是电力电子技术与变压器技术相结合的产物，当开关频率很高时，变压器体积和整机体积可以做得很小，这是一种有前途的单相电源变换装置。

参考文献

- [1] Han-Wood Park, Jin-Gil Park, Cheul-U Kim. A novel high-performance voltage regulator for single-phase AC sources[J]. *IEEE IE*, 2001, 48(3): 554— 562.
- [2] Douglas Giardini, James H. Galloway. A single phase matrix down-converter for airport lighting regulation[C]. *IEEE PESC*, 1999:1153— 1156.
- [3] A. Zuckerberger, D. Weinstock, A. Alexandrovitz. Singlephase Matrix Converter[J]. *IEE Proc. EPA*, 1997, 144(4):235— 240.

作者简介

曹以龙（1965—），男，工学博士，上海大学控制理论与控制工程专业副教授。研究方向为电力电子技术与电力传动自动化，发表论文二十余篇。

收稿日期：2003—01—02