

一种具有高电压传输比的新型 Cuk 矩阵变换器

张小平^{1,2}, 朱建林³, 唐华平², 张炳根⁴, 柳莎莎³

(1. 湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南湘潭 411201;

2. 中南大学机电工程学院, 长沙 410083; 3. 湘潭大学信息工程学院, 湖南湘潭 411105;

4. 湖南交通职业技术学院机电工程系, 长沙 410004)

[摘要] 对传统矩阵变换器存在电压传输比低的缺陷进行研究, 提出一种新型的称为 Cuk 矩阵变换器的电路拓扑结构。介绍了该拓扑结构的基本构成及其工作原理, 推导了其电压传输比与占空比之间函数关系的解析表达式, 阐述了所采用的双闭环控制策略的基本设计方法, 并通过仿真对其有效性和可行性进行了验证。结果表明: 该拓扑结构能实现输出电压和频率的任意调节, 其电压传输比可大于 1, 也可小于 1, 且直接输出标准的正弦波而无需滤波环节, 有效地解决了传统矩阵变换器电压传输比低的难题, 具有一定的应用价值。

[关键词] Cuk 矩阵变换器; 电路拓扑; 电压传输比; 双闭环控制; 仿真

[中图分类号] TM46 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)04-0078-06

1 前言

矩阵变换器因具有输入功率因数可调, 无中间储能环节, 输入电流与输出电压为高品质正弦波等许多优点^[1,2], 而一直成为电力电子领域研究的热点。经过多年来的研究和发展, 其基本理论和实用技术都取得了巨大进步。然而目前它还未得到广泛应用, 电压传输比低是其根本原因之一^[3]。为此国内外研究者从改变控制策略入手进行了系列研究, 提出了一些可提高电压传输比的方法^[4-8], 但效果不够理想, 如过调制法虽可将电压传输比提高到 1.0, 但存在输出谐波过大等问题。

从改变矩阵变换器主电路拓扑结构出发进行研究, 提出一种新型的称为 Cuk 矩阵变换器 (CMC, Cuk matrix converter) 的电路拓扑结构, 可有效解决传统矩阵变换器电压传输比低的难题。

2 CMC 基本工作原理

三相-三相 CMC 的拓扑结构如图 1 所示。该

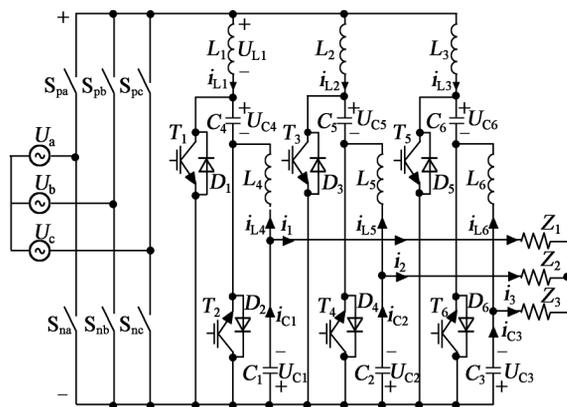


图 1 三相-三相 CMC 拓扑结构

Fig. 1 The topology of three phase - three phase CMC

结构和常规交直交矩阵变换器的拓扑结构相似, 也采用 AC-DC-AC 两级变换器的结构形式。其整流级和常规交直交矩阵变换器的整流级相同, 为一个 3/2 相矩阵变换器, 它将三相交流整流成 PWM 调制的直流电压。逆变部分采用三相 Cuk 逆变器,

[收稿日期] 2007-03-09; **修回日期** 2007-08-09

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50575228)

[作者简介] 张小平(1966-), 男, 湖南株洲市人, 湖南科技大学教授, 中南大学博士生, 研究方向: 电力电子与电力传动, E-mail: zxp836@163.com

由三个电流可双向流动的 Cuk DC - DC 变换器组成,其主要特点是通过调节占空比,可实现其交流输出电压的任意调节,即其交流输出电压既可高于、也可低于其直流输入电压;该逆变器的另一特点是其输入、输出电流连续,有利于滤波。三相阻抗负载采用 Y 型连接,跨接于三相逆变器的输出端。在实际应用中,每相 Cuk DC - DC 变换器的参考电压设置为具有相同直流偏置的正弦信号,且正弦信号的幅值和频率相同,相位差互为 120° 。由于在负载两端产生的电压其直流成分具有相同量值而相互抵消,因而在三相负载上得到的就是三相对称的正弦交流电压。

CMC 的整流部分采用无零矢量的空间矢量调制策略^[9]。

设三相输入电源电压为

$$\begin{aligned} u_a &= U_m \cos \theta_a = U_m \cos \omega_i t, \\ u_b &= U_m \cos \theta_b = U_m \cos (\omega_i t - 2\pi/3), \\ u_c &= U_m \cos \theta_c = U_m \cos (\omega_i t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 ω_i 为输入角频率, U_m 为相电压幅值。

根据文献[9],在保证单位输入功率因数的条件下,在一个 PWM 开关周期内整流输出电压的局部平均值为

$$\bar{U}_{dc} = 3U_m/2 \cos \theta_{in} \quad (2)$$

其中 $\cos \theta_{in} = \max(|\cos \theta_a|, |\cos \theta_b|, |\cos \theta_c|)$ 。

逆变部分为三相 Cuk 逆变器。对于每相 Cuk DC - DC 变换器(以第一相为例,其他两相相同),利用局部平均值的概念,可得其输出输入电压关系式为

$$U_{C1}/\bar{U}_{dc} = d/(1-d) \quad (3)$$

式中 U_{C1} 为电容 C_1 两端的电压,即单相 Cuk DC - DC 变换器的输出电压; d 为占空比,有 $0 \leq d < 1$ 。

由于电压 U_{C1} 为具有直流偏置的正弦电压,可设: $U_{C1} = U_{DC} + U_{O1}$,其中 U_{DC} 为 U_{C1} 的直流分量, U_{O1} 为 U_{C1} 的正弦分量,则有

$$U_{O1} = U_{C1} - U_{DC} \quad (4)$$

根据文献[10],可得单相 Cuk DC - DC 变换器交流输出电压相对于其直流输入电压的增益为

$$U_{O1}/\bar{U}_{dc} = (2d - G_m(1-d))/(2(1-d)) \quad (5)$$

式中 $G_m = U_{op}/\bar{U}_{dc}$, U_{op} 为单相 Cuk DC - DC 变换器交流输出电压峰 - 峰值。

将式(2)代入式(5)中,得 CMC 交流输出相电压相对于其输入相电压幅值的增益为

$$U_{O1}/U_m = 3(2d - G_m(1-d))/(4(1-d) \cos \theta_{in}) \quad (6)$$

可见在输入电压固定的情况下,通过调节占空比,即可调节输出电压,达到改变电压传输比的目的。

该拓扑结构虽较传统矩阵变换器复杂,但它可有效解决传统矩阵变换器电压传输比低的难题,同时也可为进一步研究提高其电压传输比拓展思路,提供参考。

由于每相 Cuk DC - DC 变换器均工作于变工作点工况,使其难以控制。采用双闭环控制策略对其进行控制,取得了很好的控制效果。

3 双闭环控制策略^[11, 12]

双闭环控制策略的主要优点在于它通过对电感电流的直接控制而使它具有很强的抗干扰能力,即使在负载发生突变等恶劣情况下也能保证系统的稳定运行,因而具有极高的可靠性。

为简化分析,以第一相 Cuk DC - DC 变换器为例进行说明(其他两相的情况相同)。

对于电压关系,在 1 个 PWM 开关周期内,利用局部平均值的概念,有

$$U_{L1} = \bar{U}_{dc} - (1-d_1)U_{C4} \quad (7)$$

其中 $U_{C4} = d_1(U_{C1} + U_{L4}) + (1-d_1)(\bar{U}_{dc} - U_{L1})$ 。式中 U_{C1} 和 U_{C4} 分别为电容 C_1 和 C_4 的电压, U_{L1} 和 U_{L4} 分别为电感 L_1 和 L_4 的电压, \bar{U}_{dc} 为直流输入电压, d_1 为占空比,下标 1 表示第一相 Cuk 变换器。

由于在 1 个开关周期内,电感 L_4 的能量变化较小, U_{L4} 的积分近似为零,因而可将其忽略,则 $U_{C4} \approx d_1 U_{C1} + (1-d_1)(\bar{U}_{dc} - U_{L1})$ 。将其代入式(7)中,得

$$1-d_1 = (\bar{U}_{dc} - U_{L1})/(U_{C1} - (\bar{U}_{dc} - U_{L1})) \quad (8)$$

对于电流关系,在输出端利用 KCL,有

$$i_1 + i_{L4} - i_{C1} = 0 \quad (9)$$

式中 i_1 为第一相 Cuk 变换器的输出电流, i_{L4} 和 i_{C1} 分别为流过 L_4 和 C_1 的电流。

同理,在 1 个 PWM 开关周期内,可设 $i_{C4} \approx 0$, 即 $d_1(-i_{L4}) + (1-d_1)i_{L1} \approx 0$, 则

$$i_{L4} = i_{L1}(1-d_1)/d_1 \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)中,得

$$i_{L1} = d_1(i_{C1} - i_1)/(1-d_1) \quad (11)$$

另外,电感 L_1 和电容 C_1 的伏安特性为

$$U_{L1} = r_{L1}i_{L1} + L_1 di_{L1}/dt \quad (12)$$

$$i_{C1} + r_{C1}C_1 di_{C1}/dt = C_1 du_{C1}/dt \quad (13)$$

其中 L_1, C_1 分别为电感、电容值, r_{L1}, r_{C1} 分别为电感

和电容的等效电阻。

上述数学模型准确地描述了 Cuk DC - DC 变换器的动态特性。为了在变工作点的情况下实现对系统的有效控制,采用双闭环控制策略,它由以电感电流 i_{L1} 为被控量的控制内环和电容电压 U_{C1} 为被控量的控制外环组成。

电感电流控制内环如图 2 所示。该控制环通过调节占空比,实现了对电感电流的直接控制,从而使系统具有很高的可靠性。由于采用了闭环控制,使电感电流能准确地跟踪其参考值的变化,而参考值由电压控制外环产生并限制了其取值范围,因而即使在系统出现异常情况时也不会产生过流。为简化控制方案,该控制环以电感电压作为控制变量,即作为 PID 控制器的输出。

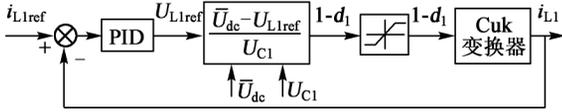


图 2 电感电流控制内环

Fig. 2 The control inner-loop of inductor current

由图 2 可见,将电感电流的参考值与其实际值的偏差作为 PID 控制器的输入,由 PID 控制器产生电感电压的参考值 U_{L1ref} ,再经实时检测 U_{C1} ,便可由式(8)算出占空比 $(1 - d_1)$ 。在仿真时发现,若将公式(8)进行简化,即以公式 $(1 - d_1) = (\bar{U}_{dc} - U_{L1})/U_{C1}$ 来近似计算占空比,同样获得了很好的控制效果。其原因在于:在 1 个 PWM 开关周期内,电感 L_1 的能量变化较小,即 U_{L1} 的局部平均值与 \bar{U}_{dc} 相比可忽略,因而 $\bar{U}_{dc} - U_{L1}$ 近似等于 \bar{U}_{dc} ,若将其从式(8)分母中略去,虽会使得到的 d_1 产生一些偏差,但通过闭环控制与 PID 控制器的自动调节作用,可通过调整 U_{L1ref} 来弥补,因而能获得较好的控制效果。将 $1 - d_1$ 经限幅后作为 Cuk 变换器的输入信号,控制其功率开关 T_1 和 T_2 的导通时间,从而调节电感电流使其按参考值变化。控制环中的 PID 控制器可按常规方法设计,限幅环节的作用在于避免电感电流出现异常值。

电容电压控制外环如图 3 所示。该控制环的作用在于使电容电压按设定的参考值变化,从而获得所需的输出电压。同样,为简化控制方案并实现外环与内环之间的解耦控制,该控制环以电容电流作为控制变量,即作为 PID 控制器的输出。

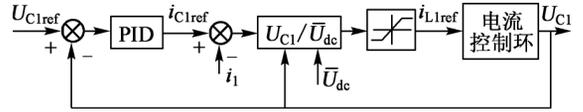


图 3 电容电压控制外环

Fig. 3 The control outer-loop of capacitor voltage

电容电压的参考值(即单相 Cuk DC - DC 变换器的参考输出电压)与其实际值的偏差作为 PID 控制器的输入,由其产生电容电流的参考值 i_{C1ref} ,再经实时检测输出电流 i_1 ,便可由式(11)得到内环电感电流的参考值 i_{L1ref} 。但式中占空比 d_1 由控制内环确定,为实现外环与内环之间的解耦控制,可用 U_{C1}/\bar{U}_{dc} 近似代替 $d_1/(1 - d_1)$,即 $d_1/(1 - d_1) \approx U_{C1}/\bar{U}_{dc}$ 。这种近似在电感 L_1 较小、其能量变化可忽略时是允许的,并且得到了较好的控制效果。将产生的电感电流参考值经限幅后作用于控制内环,进而通过改变占空比 d_1 调节电感电流和电容电压,使电容电压按设定的参考值变化,从而达到控制输出电压的目的。

4 仿真分析

采用 Matlab/Simulink 及 S 函数对图 1 所示基于双闭环控制的 CMC,用电阻、感性、容性负载进行仿真,并以电阻负载为例^[13]。假设三相输入电源,功率开关,电感及电容等均为理想元件。仿真参数设置如下:

输入为对称三相电源,其相电压有效值与频率分别取 220 V, 50 Hz;电感与电容分别取 $L_i = 100 \mu\text{H}$, $C_i = 54 \mu\text{F}$,其中 $i = 1, 2, \dots, 6$;三相电阻负载 $R_i = 50 \Omega$ ($i' = 1, 2, 3$);电压控制环中 PID 控制器的参数取比例系数 $k_p = 5.5$,积分系数 $k_i = 4.9 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,微分系数 $k_d = 1 \times 10^{-5} \text{ s}$;电流控制环中 PID 控制器的参数取比例系数 $k'_p = 10$,积分系数 $k'_i = 1.24 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,微分系数 $k'_d = 9 \times 10^{-5} \text{ s}$;PWM 开关频率取 25 kHz。为验证 CMC 变压变频的性能,仿真分稳态分析和动态分析两种情况。

4.1 稳态分析

稳态分析在于验证系统对频率和幅值固定的参考信号的跟踪情况。仿真时任取参考信号分别为 400 V/60 Hz, 311 V/50 Hz, 200 V/40 Hz (相电压幅值/频率)。仿真波形如图 4 所示,仿真结果见表 1。

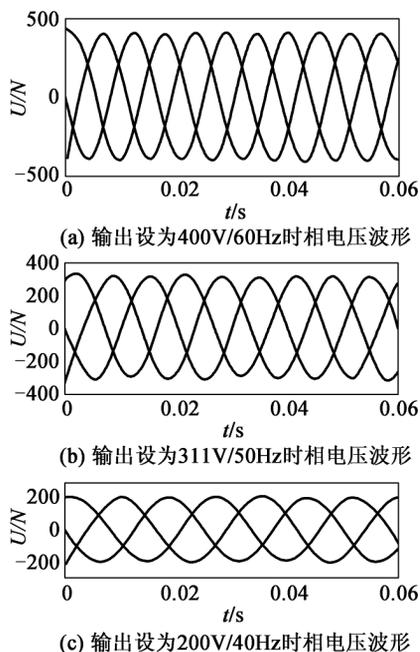


图4 稳态时三相输出相电压的仿真波形

Fig. 4 The simulation waveforms of three - phase output voltage for steady - state analysis

表1 稳态分析的仿真结果

Table 1 The simulation results for steady - state analysis

电压/V	频率/Hz	THD* /%
399.4	60	0.47
311.2	50	0.32
199.5	40	0.37

* THD 为总谐波失真度。

4.2 动态分析

动态分析在于验证系统在运行过程中当参考信号或负载发生突变时的运行情况,仿真分两种情况。

第一种情况,参考信号发生突变,负载不变。如取参考信号由 400 V/60 Hz 突变至 311 V/50 Hz 又回到 400 V/60 Hz,其仿真波形如图 5 所示。

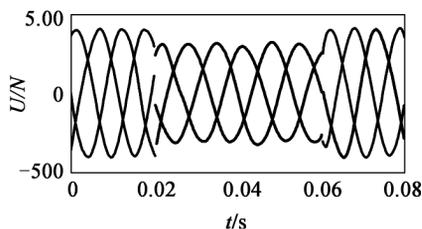


图5 参考信号发生突变时的三相输出电压波形

Fig. 5 The simulation waveforms of three - phase output voltage for a sudden change in the reference signal

第二种情况,负载发生突变,参考信号不变。如取参考输出相电压幅值与频率为 311 V/50 Hz,负载由 50 Ω 突变至 25 Ω 又回到 50 Ω ,相应的输出相电压与相电流波形如图 6 所示。

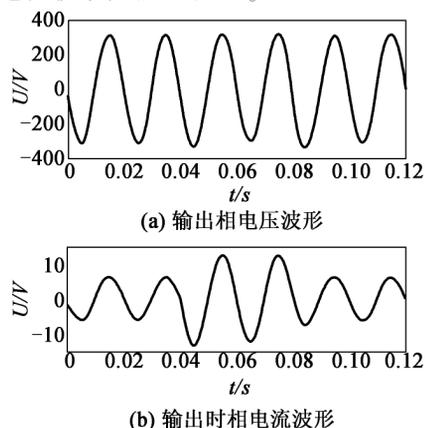


图6 负载发生突变时的仿真波形

Fig. 6 The simulation waveforms of single - phase voltage and current for a sudden change in the load

4.3 仿真结果

由仿真波形及表 1 可见:

1) CMC 能实现输出电压的任意调节,且输出电压能较准确地跟踪其参考值变化,对应于图 4a、图 4b、图 4c 的电压传输比分别约为 1.28, 1.00, 0.64,即电压传输比可大于 1、等于 1 及小于 1,实现了电压传输比的任意调节;

2) CMC 能实现输出频率的任意调节,且输出频率和设定的参考值一致;

3) CMC 可直接输出高品质的三相对称正弦波而无需滤波环节,波形失真度小;

4) 从动态仿真波形可见,系统在运行过程中若参考信号发生突变,系统可迅速进入新的稳态,过渡过程很短;当负载发生突变时,输出电压几乎不受影响,可见系统具有很好的动态性能。

5 结语

提出了一种具有高电压传输比的新型 Cuk 矩阵变换器(CMC)的电路拓扑结构。介绍了该拓扑结构的基本构成及其调节电压传输比的工作原理,阐述了电压 - 电流双闭环控制策略的基本设计方法,并通过仿真对其有效性和可行性进行了验证。结果表明,基于双闭环控制策略的 CMC 具有良好的动态和稳态性能,能实现输出电压和频率的任意调节,其电压传输比既可大于、也可小于 1.0,且直接

输出高品质的正弦波而无需滤波环节,谐波含量小,从而有效解决了传统矩阵变换器电压传输比低的难题,具有较好的应用价值。下一步的工作是进一步研制这种新的电路拓扑结构并进行实验,为矩阵变换器在工业领域的应用提供依据。

参考文献

- [1] Huber L, Borojevic D. Space vector modulated three - phase to three - phase matrix converter with input power factor correction [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1995, 31(6): 1234 - 1246
- [2] Casadei D, Grandi G, Serra G, et al. Space vector control of matrix converters with unity input power factor and sinusoidal input/output waveforms [A]. Fifth European Conference on Power Electronics and Applications [C]. Brighton, UK, 1993, 7: 170 - 175
- [3] Alesina A, Venturini M G B. Analysis and design of optimum - amplitude nine - switch direct AC - AC converters [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1989, 4(1): 101 - 112
- [4] Ziogas P D, Khan S I, Rashid M H. Some improved forced commutated cycloconverter structures [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1985, IA - 21(5): 1242 - 1253
- [5] Ziogas P D, Khan S I, Rashid M H. Analysis and design of forced commutated cycloconverter structures with improved transfer characteristics [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1986, 33(3): 271 - 280
- [6] Wiechmann E P, Garcia A R, Salazar L D. High performance direct frequency converters controlled by predictive current loop [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1997, 12(3): 547 - 557
- [7] Chang Jie, Sun T, Wang Anhua. Highly compact AC - AC converter achieving a high voltage transfer ratio [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2002, 49(2): 345 - 352
- [8] 张小平, 唐华平, 朱建林, 等. 矩阵变换器的电压传输特性 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 194 - 199
- [9] 邓文浪, 杨欣荣, 朱建林, 等. 18 开关双级矩阵变换器的空间矢量调制策略及其仿真研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 84 - 90
- [10] Vazquez N, Cortes D, Hernandez C, et al. A new non - linear control strategy for the boost inverter [A]. IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference [C]. PESC 03, 2003, 3: 1403 - 1407
- [11] Sanchis P, Ursua A, Gubia E, et al. Buck - boost DC - AC inverter: proposal for a new control strategy [A]. IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference [C]. PESC 04, 2004, 5: 3994 - 3998
- [12] Sanchis P, Ursa A, Gubia E, et al. Boost DC - AC inverter: a new control strategy [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20(2): 343 - 353
- [13] 兰志勇, 朱建林. 三相稀疏矩阵变换器仿真研究 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 2005, 27(3): 110 - 115

New Cuk Matrix Converter with High Voltage Transfer Ratio

Zhang Xiaoping^{1, 2}, Zhu Jianlin³, Tang Huaping²,
Zhang Binggen⁴, Liu Shasha³

(1. College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 3. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China; 4. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Communication Polytechnic, Changsha 410004, China)

[Abstract] The drawback of classical matrix converter having low voltage transfer ratio is studied and a topology of a new matrix converter called as a Cuk matrix converter is proposed. The basic configuration of this new topology and its fundamental are firstly introduced, the analytic expression concerning functions relation of voltage transfer ratio to duty cycle is deduced, and the basic design method of double - loop control strategy is expounded. Finally the validity and feasibility of the new topology are tested by simulation. The results show that the output voltage and frequency can be modulated optionally by the new converter, of which the voltage transfer ratio can be

greater than 1, or lower than 1, and an ideal sine wave can be directly obtained without filtering. Thus the inherent problem of classical matrix converter having low voltage transfer ratio is effectively solved by this study, which is of certain practical importance.

[**Key words**] Cuk matrix converter; circuit topology; voltage transfer ratio; double-loop control; simulation

(上接 59 页)

PSD Analysis on Track Irregularity of Railway Line for Passenger Transport

Chen Xiufang, Jin Shouhua, Zeng Hualiang

(*School of Civil Engineering and Architecture, Central South
University, Changsha 410075, China*)

[**Abstract**] The track irregularity which is the main vibrating resource of the vehicles and one of the main factors to limit the train highest speed, plays a very important part in the safety, stabilization and comfort of the trains. The statistic samples used by this paper are collected by track geometry inspection car from Qin-shen special line for passenger transport. Based on the stationary character test of the samples, FFT method was used to evaluate the spectrum of the statistical sample space, and MATLAB soft was used to get the PSD (power spectral density) of track irregularities. Based on statistical average of the samples of the track irregularities, frequency smoothing of the PSD and compare with PSD of the main-line of Chinese railway were made. The curve to the PSD was fit. Then the track state of Qin + shen special line for passenger transport was evaluated.

[**Key words**] railway line for passenger transport; track irregularity; power spectral density; stationary character test