

高频直流变换器的仿真研究

祝晓辉

(空军工程大学, 陕西 西安 710038)

Simulated Research on High-frequency DC/DC Converter

ZHU Xiao-hui

(Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

摘要:基于 Matlab/Simulink 软件平台,建立了一种 Buck 型并联交错正激式直流变换器的 Simulink 模型.模型反映了系统的各种不同工作模式,仿真结果与理论分析基本吻合,为其应用于单向电压源高频环节静止变流器提供了快捷、简便的控制电路优化设计和关键电路参数整定的途径与方法.

关键词:高频直流变换器;并联输出;参数整定; Matlab/Simulink

中图分类号: TM461

文献标识码: A

文章编号: 1001-2257(2005)09-0017-03

Abstract: Based on Matlab/Simulink software platform, a simulink model of Buck interleaving forward DC/DC converter is developed. A characteristic of this model is the general reflection of all kinds of different working modes of the system which provides a fast and convenient method for the design of control circuit and the key parameters when used in single direction voltage source high-frequency link static converter.

Key words: high-frequency link DC/DC converter; parallel output; parameter adjustment; Matlab/Simulink

0 引言

随着电力电子技术的迅猛发展以及全控型自关断器件性能的不提高,静止变流器的研究与开发进入了蓬勃发展的时期.作为从传统的低频环节逆变技术向现代高频环节逆变技术过渡的一个关键环节,高频直流变换器的研究日益突显其重要地位.由

于直流变换器的开关器件和无源器件构成一个整体,对它的研究不能用理想开关模型建立等价的外部输入输出函数进行描述,而只能采用诸如分段线性化状态方程法、符号法以及状态平均法这样一些传统的方法进行分析与设计^[1],但是随着电路拓扑结构的复杂化、状态的增多以及开关转换时刻确定的困难,使其应用受到限制,并且这些方法本身的特点决定了其更加偏重于电路稳态特性的研究.

1 直流变换器的工作原理

Buck 型并联交错正激式直流变换器的电路拓扑如图 1 所示^[2].针对航空外场修理的实际需要,

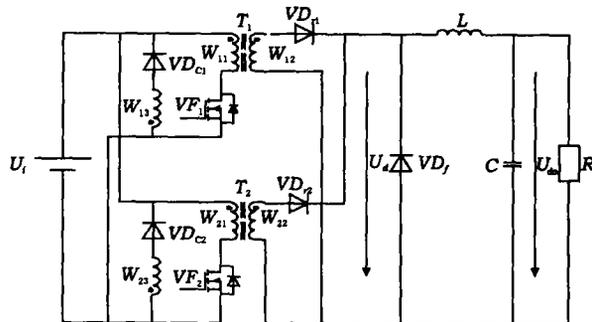


图 1 Buck 型并联交错正激式高频直流变换器

该变换器将 100 V 直流电转换为 28 V 直流电,为后续三相静止变流器的逆变环节提供电压.其中 VD_{c1} , VD_{c2} , W_{13} , W_{23} 为高频变压器磁芯提供磁复位通路,它们对变换器的工作性能没有影响,建模时可忽略.

该变换器由 2 路单管正激 Forward 变换器分别在输入与输出端并联而成,具有很强的带负载能力.其中功率开关管 VF_1 滞后 VF_2 半个开关周期导通或关断.按照滤波器电感电流 i_{LF} 的工作情况,它可分为电感电流连续 CCM、电感电流临界连续 CCM 和电感电流断续 DCM 3 种工作模式.为了减小功率开关和整流二极管的电压压力,通常取 N_{13}

收稿日期: 2005-04-16

《机械与电子》2005(9)

= N_{11} , $D_{max} = 0.5 (N_{13}, N_{11}$ 为变压器匝数, D_{max} 为最大占空比)。

2 直流变换器的建模^[3]

2.1 两路单管正激 Forward 变换器的组合分析与建模

忽略功率开关管关断时的磁复位效应, 输入与输出向量分别为 $[V_{in} \ I_{in}]^T$ 和 $[V_o \ I_o]^T$ 。由于两路变换器在输入端并联, 因此其开关频率为单路变换器的 2 倍。它的稳态工作波形如图 2a 和图 2b 所示。建模时的控制变量意义如表 1 所示。

表 1

| 控制变量 | 0 | 1 |
|------|--------|--------|
| d | 功率开关关断 | 功率开关导通 |
| s | 电感电流连续 | 电感电流断续 |

则直流高频环节开关网络的输入输出关系可用下式表示:

$$I_{in} = ndI_o$$

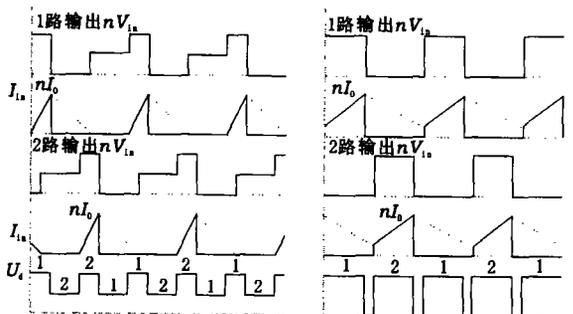
$$V_o = ndV_{in} + SV_c$$

式中 n —— 变压器的变比

V_c —— 开关网络输出滤波电容两端电压

s —— 模拟系统的全状态工作模式

上式在 Simulink 环境下的模型如图 2c 所示。



(a) 电感电流断续

(b) 电感电流连续

(c) Simulink 模型

图 2 DC/DC 开关网络组合建模

单路变换器的开关频率为 100 kHz, 第 2 路输出滞后第 1 路输出 1/2 个周期 (5 μ s), 为了全面模

拟系统 3 种工作模式, 建立模型时在并联输出端引入比较器进行选择输出, 这样就保证了该模型能全面反映电感电流连续与断续时的实际工作情况。

2.2 输出滤波器建模

滤波器的等效电路如图 3 所示。这里考虑电

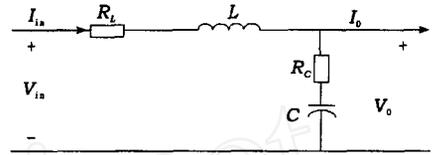


图 3 滤波器等效电路

感、电容的非线性以及功率开关器件所消耗的功率, 引入补偿电阻 R_L 和 R_C , 分别串联在回路中。滤波器网络可由状态方程表示如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_c \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{R_L + R_C}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & \frac{R_C}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ I_o \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_o \\ I_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -R_C \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ I_o \end{bmatrix}$$

滤波器的仿真参数如下: $L = 170 \mu\text{H}$, $C = 470 \mu\text{F}$, $R_L = 0.02$, $R_C = 0.03$ 。它的 Simulink 模型由控制工具箱中的“状态空间”封装块进行描述。

2.3 控制电路建模

直流变换器的控制电路采用电流电压双闭环 PWM 控制, 为了达到稳定输出电压的目的, 反馈电压 V_f 经 PI 调节器作为电流内环的给定, 电流内环同样采用 PI 调节器进行信号的调理, 这样整个系统具有二阶阻尼特性, 适当设置参数, 可使系统工作于欠阻尼状态, 稳态误差小、跟踪性能好。控制电路的 Simulink 模型如图 4 所示。

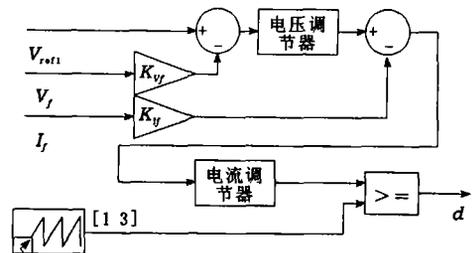


图 4 控制电路的仿真模型

控制回路的仿真参数如下:

$$K_{Vf} = 0.3, K_{If} = 1, V_{ref} = 8.5$$

电压调节器

$$G_v(s) = 1 + 10/s$$

电流调节器

$$G_i(s) = (8.6e^{-4}s + 1) / (e^{-9}s^2 + e^{-3}s)$$

3 系统的仿真模型

根据以上的分析,可以得到整个系统的 Simulink 仿真模型,如图 5 所示。额定负载为 8.8

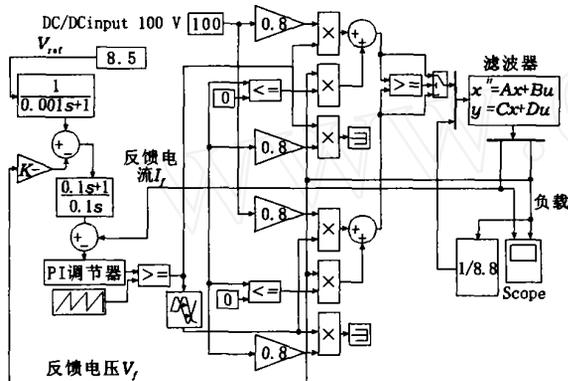


图 5 Simulink 仿真模型

系统在输入端并联的实现用一延迟环节表示,滞后时间为 $5 \mu\text{m}$;输出端并联的实现引入了输出比较器和双路选择开关,完全根据瞬时电路的工作情况确定,使这一模型具有通用性。参考电压 V_{ref} 后的惯性环节是用来模拟实际变换器的软启动过程。

4 仿真结果与分析

对此仿真模型设置仿真时间为 0.1 s,在输入电压为 100 V,负载为满载的情况下,启动仿真可得到稳态输出电压波形如图 6 所示,可以看出系统在很短的时间内达到恒定电压 28 V。系统过载时的仿真输出电压波形如图 7 所示,此时系统的稳态输出出现震荡,对应滤波电感工作在电流断续状态,启动仿真可得到电流波形如图 8 所示,这与上述理论分析得出的结论完全吻合。

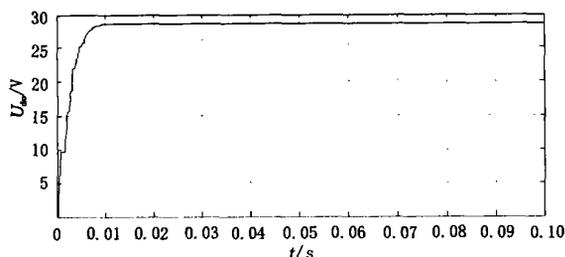


图 6 满载条件下输出电压仿真波形

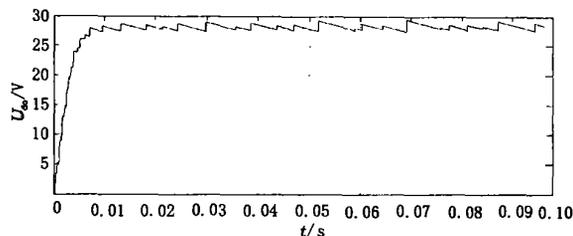


图 7 过载条件下输出电压仿真波形

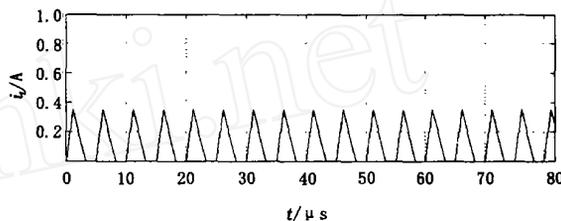


图 8 电感电流断续时的仿真波形

直流变换器控制电路与系统参数的整定是设计阶段的一个重要环节,借助于仿真模型可以极大地提高系统设计的效率,并且可以分析选定参数对系统性能的影响以及该参数是否对系统具有鲁棒性。

5 结束语

利用 Matlab6.5 中的 Simulink 工具箱,结合一种极具实用价值的具体电路,建立了该直流变换器的 Simulink 模型,并进行了仿真分析,当选择仿真时间为 0.1 s,完成仿真只需要大概 1 min,不仅提高了仿真速度,而且具有很高的可靠性。通过对模型的适当修改,可以对推挽式、全桥式等其它形式的高频直流变换器进行仿真分析。该模型克服了以往研究只注重于单一工作模式的局限性,全面模拟了系统的 3 种工作模式,为研究系统的动静态特性,以及进行控制电路的优化设计和关键参数的整定提供了一条快捷简便的途径。

参考文献:

- [1] 陈建业. 电力电子电路的计算机仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [2] 陈道炼. DC-AC 逆变技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [3] 朱成花,等. 基于 Matlab/Simulink 单相航空静止逆变器的建模与仿真[J]. 计算机仿真,2004,21(1):64-67.

作者简介:祝晓辉 (1977-),男,吉林长春人,空军工程大学工程学院硕士研究生,研究方向为机电检测与电力电子技术。