

变压器漏感对整流电路影响的讲解方法

杨玲玲, 张 祺, 赵 曜

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

[摘 要]整流电路是电力电子电路中出现最早的一类电能变换电路, 应用十分广泛。在实际应用中, 由于交流侧电感的影响, 整流电路的换流过程不能瞬时完成。如何分析变压器漏感对整流电路的影响是一个教学难点。课程组依据由浅入深、有简单到复杂的渐进式教学模式, 以经典的桥式整流电路为分析对象, 从单相全控桥入手, 分析影响换流过程的根本因素, 得到电路分析中最基本的电压方程式, 然后推广至三相全控桥。教学实践表明, 这种讲解方法思路清晰, 重点突出, 学生更容易理解和接受。

[关键词]电力电子技术; 变压器漏感; 教学方法

[中图分类号] G641 [文献标识码] A [文章编号] 1647-9514(2024)-0034-21 [收稿日期] 2024-09-30

在“电力电子技术”课程中, 整流电路是出现最早的电力电子电路^[1]。整流电路的功能是将交流电变为直流电, 教学重点是相控整流电路的分析。其中, 变压器漏感对整流电路的影响是教学中的难点。

实际电路中不可避免地存在包括变压器漏感在内的交流侧电感, 由于电感对电流的变化起阻碍作用, 电感电流不能突变, 因此换流过程不能瞬时完成, 而是会持续一段时间。在变压器漏感对整流电路的影响这部分内容中, 需要解决的主要问题是: 换流过程持续的时间有多长, 怎样计算? 在换流过程中, 整流电路的工作状态发生怎样的变化? 换流过程对电源侧电流、输出侧电压会有怎样的影响?

在王兆安主编的《电力电子技术》(第 5 版) 中, 以三相半波电路为例, 分析了考虑

变压器漏感时的换流过程以及有关参量的计算, 然后将结论推广到其他的电路形式。此部分的计算推导比较简化, 学生在学习过程中难以理解公式的来龙去脉, 看不懂、学不会, 从而影响对课程的学习兴趣。另外, 书中提供的表格把计算结论推广到其他的电路形式^[2], 但是如何分析常见电路的换流过程, 如单相全控桥或三相全控桥, 需要在教学过程中进一步展开讲解。

参考程汉湘主编的《电力电子技术》(第 3 版) 教材, 对变压器漏感对整流电路的影响部分, 采用以下讲解方法: 从单相全控桥入手, 对电路原理图进行分析, 找出引起换流的根本原因, 得到最基本的电压方程式, 然后进行数学推导, 得到相关参数的计算结果; 三相全控桥的分析方法同上, 在分析过程中注意与单相全控桥的差别。

一、单相全控桥的换流过程分析

图 1(a)为单相全控桥的电路原理图，其中变压器漏感等效为电源侧电感 L_s ，变压器副边电压等效为电压源电压 $u_s(t)$ ，电源侧电流记为 $i_s(t)$ ；将阻感负载等效为恒流源负载 I_d ，直流侧电压记为 $u_d(t)$ 。

图 1(b)为换流过程的等效电路。以晶闸管 T_3 、 T_4 关断， T_1 、 T_2 导通为例进行分析。由于电感对电流的变化起阻碍作用，所以在电源侧电感 L_s 的影响下，换流不能瞬时完成。也就是说， T_3 、 T_4 需要一段时间才能完全关断，同样的， T_1 、 T_2 需要一段时间才能完全导通，这段时间记为换流重叠时间 t_γ ，对应的电角度记为换流重叠角 γ ，如图 1(c)和图 1(d)中的①。

在换流过程中， T_1 、 T_2 和 T_3 、 T_4 全部导通，输出电压 $u_d(t)$ 为零，但此时电源并没有短路，是因为电源侧电感 L_s 承担了电源电压，即

$$u_{L_s}(t) = L_s \frac{di_s(t)}{dt} = u_s(t) \quad (1)$$

整理式(1)，等式两边同时乘以角频率 ω ，得到

$$\omega L_s di_s(t) = u_s(t) d\omega t \quad (2)$$

根据图 1(c)和图 1(d)确定等式左右的积分限，

$$\int_{-I_d}^{i_s(t)} \omega L_s di_s(t) = \int_{\alpha}^{\omega t} \sqrt{2}U_s \sin \omega t d\omega t \quad (3)$$

可以得到电源侧电流 $i_s(t)$ 的解

$$i_s(t) = \frac{\sqrt{2}U_s}{\omega L_s} (\cos \alpha - \cos \omega t) - I_d \quad (4)$$

当 $\omega t = \alpha + \gamma$ 时， $i_s(t) = I_d$ ，于是得到

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2\omega L_s I_d}{\sqrt{2}U_s} \quad (5)$$

由于换流过程中输出电压 $u_d(t)$ 为零，导致其平均值降低，平均电压降用 ΔU_d 表示。由图 1(d)可见，一个周期有两次换流，所以

$$\Delta U_d = \frac{A_\gamma}{\pi} \quad (6)$$

$$A_\gamma = \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \sqrt{2}U_s \sin \omega t d\omega t = 2\omega L_s I_d \quad (7)$$

于是得到

$$\Delta U_d = \frac{2\omega L_s I_d}{\pi} \quad (8)$$

晶闸管 T_1 、 T_2 关断， T_3 、 T_4 导通的情况如图 1(c)和图 1(d)中的②，分析过程同上。至此，单相全控桥在一个周期内的两次换流过程分析完毕，换流重叠角和电压降的计算公式分别见式(5)和式(8)。

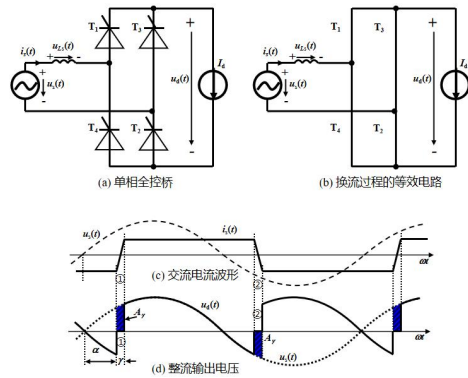


图 1 单相全控桥的换流过程^[3]

二、三相全控桥的换流分析

在图 2(a)中，以晶闸管 T_3 关断、 T_5 导

通的换流过程为例进行分析。由于电源侧电感 L_{sb} 、 L_{sc} 的影响, T_3 需要一段时间才能完全关断, T_5 需要一段时间才能完全导通, 换流过程如图 2(b)和图 2(c)。此时导通的三个晶闸管是 T_3 、 T_4 和 T_5 。由图 2(a)可知

$$\begin{cases} u_d(t) = u_{sc}(t) - L_{sc} \frac{di_{sc}(t)}{dt} - u_{sa}(t) \\ u_d(t) = u_{sb}(t) - L_{sb} \frac{di_{sb}(t)}{dt} - u_{sa}(t) \end{cases} \quad (9)$$

注意到 $\frac{di_{sb}(t)}{dt} = -\frac{di_{sc}(t)}{dt}$,

$L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} = L_s$, 得到

$$L_s \frac{di_{sc}(t)}{dt} = \frac{u_{sc}(t) - u_{sb}(t)}{2} = \frac{u_{cb}(t)}{2} \quad (10)$$

整理式(10), 等式两边同时乘以角频率 ω , 得到

$$\omega L_s di_{sc}(t) = \frac{u_{cb}(t)}{2} d\omega t \quad (11)$$

根据图 2(c)确定等式(11)中的积分限,

$$\int_0^{i_{sc}(t)} \omega L_s di_{sc}(t) = \int_{\alpha}^{\omega t} \sqrt{2}U_{LL} \sin \omega t d\omega t \quad (12)$$

可以得到电源侧电流 $i_{sc}(t)$ 的解

$$i_{sc}(t) = \frac{\sqrt{2}U_{LL}}{\omega L_s} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (13)$$

式中, U_{LL} 指三相交流电源的线电压有效值。

当 $\omega t = \alpha + \gamma$ 时, $i_{sc}(t) = I_d$, 于是得到

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2\omega L_s I_d}{\sqrt{2}U_{LL}} \quad (14)$$

由式(9)可见, 换流过程中输出电压 $u_d(t)$ 减小, 原因是电源侧电感 L_{sb} 、 L_{sc} 的影响。根据图 2(c)可知, 输出电压 $u_d(t)$ 减小的部分 A_γ 为

$$A_\gamma = \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} u_{ca}(\omega t) d\omega t = \omega L_s I_d \quad (15)$$

因为一个周期有六次换流, 所以输出电压 $u_d(t)$ 的平均电压降

$$\Delta U_d = \frac{3\omega L_s I_d}{\pi} \quad (16)$$

一个周期内, 每个晶闸管都会有一次换流, 分析过程同上。至此, 三相全控桥在一个周期内的两次换流过程分析完毕, 换流重叠角和电压降的计算公式见式(14)和式(16)。

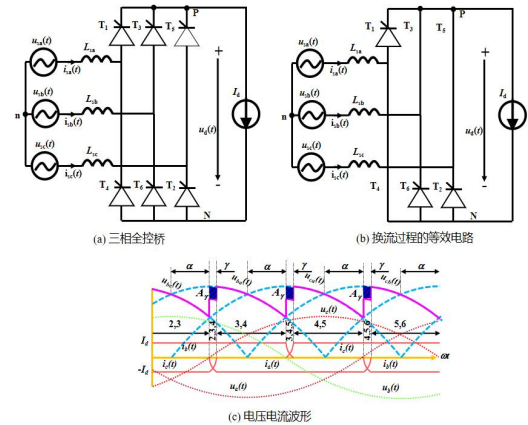


图 2 三相全控桥的换流过程^[3]

三、结束语

变压器漏感对整流电路影响是电力电子技术课程中的教学重点和难点。包括变压器漏感在内的交流侧电感, 增加了整流电路的工作状态, 使整流电路的波形分析和参数计

算变得更加复杂。

为了帮助学生更好地理解和掌握这部分内容，课程组采用渐进式教学方法，首先针对最基本的单相全控桥整流电路，重点分析其换流过程，找到引发换流过程变化的首要因素，得到最基本的电压方程式；然后根据换流过程中电压、电流参数的变化情况，推导出换流重叠角、输出平均电压降等重要参数的计算公式；最后把这种分析方法推广到三相全控桥整流电路。

教学实践表明，上述讲解方法重点突出、循序渐进，能够帮助学生较好地理解这一教学难点。课后进一步配合书面作业和 Matlab 仿真作业的练习，学生能够很好地掌握换流过程的参数分析和计算。

基金项目：教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会教育教学改革研究课题（2024047）；广东工业大学本科教学工程项目（广工大教字[2024]75 号）

作者简介：杨玲玲（1978—），女，博士，副教授，主要从事电力电子技术的教学和科研工作。

参考文献：

- [1] 林维明. “电力电子技术”课程整流电路的教学方法研究[J]. 电气电子教学学报, 2021, 43(5): 102-107.
- [2] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术（第5版）[M]. 北京：机械工业出版社，2019.
- [3] 程汉湘, 周永旺, 黄德梅. 电力电子技术（第3版）[M]. 北京：科学出版社，2019.

Explanation Method for the Influence of Transformer Leakage Inductance on Rectifier Circuits

Yang Lingling, Zhang Qi, Zhao Yao

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Rectifier circuits are among the earliest types of power conversion circuits in power electronics and are widely used. In practical applications, due to the influence of inductance on the AC side, the commutation process of the rectifier circuit cannot be completed instantaneously. Analyzing the impact of transformer leakage inductance on the rectifier circuit is a teaching challenge. The course team, based on a progressive teaching model that gradually deepens from simple to complex, uses the classic bridge rectifier circuits as the analysis objects. Starting with the single-phase fully controlled bridge, the fundamental factor affecting the commutation process is analyzed, the most basic voltage equation is obtained, and then the analysis to the three-phase fully controlled bridge is extended. Teaching practice has shown that this method of explanation is clear in thought, with a focus on key points, making it easier for students to understand and accept.

Key words: power electronics technology; transformer leakage inductance; teaching metho