

基于统一离散时域建模法的晶闸管串联运行暂态仿真

王 毅, 石新春, 李和明, 朱 凌, 杜海江

(华北电力大学电力工程系, 河北省保定市 071003)

摘要: 现有晶闸管仿真模型虽能较准确地模拟单只晶闸管开通和关断的动态过程, 却较少涉及多只器件的串并联仿真。文中在分析晶闸管开关过程中动态特性的基础上, 利用统一离散时域建模法建立了包含开关动态过程的晶闸管数学模型。由于该模型采用时变电阻来描述晶闸管工作过程中电压、电流的变化关系, 因此适用于晶闸管串联电路的暂态仿真分析。仿真和实验结果表明所建立的晶闸管数学模型可较为准确地描述串联运行的晶闸管开关过程中电压的动态分配, 从而为需晶闸管串联运行的大型电力电子装置的动静态均压电路设计提供了依据。

关键词: 晶闸管; 串联; 仿真; 模型

中图分类号: TM76; TN34

0 引言

目前在电力电子技术领域高压大容量功率变换技术越来越受到人们的关注。线路电压高而元件耐压低成为制约其发展的主要矛盾, 解决这一矛盾的方案有 3 种: ①采用多个低耐压值开关器件串联; ②在交流输入侧和输出侧分别采用变压器进行降压和升压, 中间环节仍然采用低压变换器; ③应用多电平技术获得高压大功率。这里, 只有方案①无需笨重、昂贵、耗能的变压器, 且电路的拓扑结构简单。但由于电力电子器件参数的分散性, 这种方案存在着静态和动态均压问题。

由晶闸管串联组成的阀器件在高压直流 (HVDC) 输电、静止无功补偿、大功率直流电源以及高压变频调速等领域应用广泛, 例如在三峡工程中 8 kV/3 kA 的晶闸管阀用于 HVDC。随着单只晶闸管耐压值的提高, 对动、静态均压器件的选择提出了更高的要求, 仅凭一些简单的经验公式计算势必存在较大误差, 而且元件在伏安特性、开通时间、恢复电荷等方面的分散特性又难以通过实验模拟。因此, 晶闸管开通、关断过程的暂态仿真对合理设计晶闸管的均压电路、确定器件需满足的动态要求及安全工作条件将提供重要依据。

本文在分析了晶闸管开通、关断及其过渡过程等不同区段的特性基础上, 利用统一离散时域建模法^[1,2]建立了晶闸管的数学模型, 并将其应用于晶闸管串联电路的仿真中, 仿真结果与实验结果相符。

1 适用于串联过程暂态分析的晶闸管模型

电力电子器件的建模是进行仿真的首要问题, 虽然国内外已发表多篇相关论文, 提出了多种建模方法, 但要建立一个完整模拟电力电子器件内外特性的模型仍然是个难题^[3]。一般需根据不同的应用场合、不同的技术要求选取不同结构、不同精度的模型。从工程实际应用的角度考虑, 一般不从器件的内在物理特性出发来建立模型, 因为涉及较多的内部物理特性参数和复杂的物理微分方程组, 应用难度较大。仅从外部特性出发设计出能模拟其外特性的集中参数电路或解析表达式更具工程实用价值。

晶闸管串联电路的拓扑结构并不复杂, 但需要准确描述开通和关断过程中电压的动态分配。采用集中参数电路模拟, 虽然易于与面向电路的通用仿真软件相结合^[4], 但不易把握多只晶闸管串联运行时的电压电流的动态变化, 另外, 模型参数的提取也难以找到确定的规律。同时, 为了能较准确地验证晶闸管动态均压器件选取是否合适, 本文建立了包含开通和关断过程的晶闸管非线性时变模型, 并采用统一离散时域建模法将描述开关变换的分段状态方程写成一个完整的数学表达式, 这样可以简化公式推导及方程求解。如图 1 所示, 可以把晶闸管的一个工作周期分为 6 个区段来分析其电压的分配情况^[5]。下面对晶闸管串联运行在不同时段的电压分配进行完整的分析, 并建立其在一个周期内各区段的模型。

1.1 正向阻断区 $[t_0, t_1)$

晶闸管在此区间承受正向稳态压降, 由正向伏

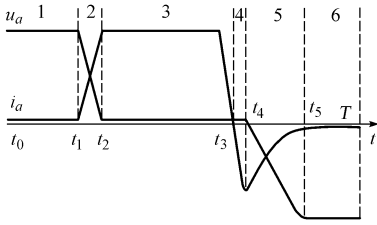


图1 晶闸管电压与电流在一个工作周期中的变化
Fig. 1 Voltage and current variation of thyristor in a period

安特性来决定其电压分配,存在稳态均压问题。同一漏电流下,不同正向伏安特性的晶闸管会有不同的电压分配,可用固定阻值的电阻来模拟:

$$R_{SCR1}(t) = \frac{U_{DRM}}{I_{DRM}} = R_{DRM} \quad (1)$$

式中: U_{DRM} 为正向重复峰值电压; I_{DRM} 为对应于 U_{DRM} 的额定重复峰值漏电流; R_{DRM} 为正向阻断区漏电阻。

1.2 开通过程区 $[t_1, t_2]$

在此区间,晶闸管的阳极电压和阳极电流都处于动态过程中,如果开通时间不一致,则后开通的器件就会承受严重的过电压,所以在此区间存在着开通过程的动态均压问题。依据晶闸管导通时的电导调制作用,可把晶闸管的导通过程等效成一个指数规律变化的时变电阻:

$$R_{SCR2}(t) = R_{DRM} e^{-\frac{t-t_1}{t_{on}} \ln \frac{R_{DRM}}{R_{on}}} \quad (2)$$

式中: t_{on} 为开通时间; $R_{on} = U_T / I_T$, 为正向平均电阻; U_T 为正向平均电压; I_T 为正向平均电流。

1.3 正向导通区 $[t_2, t_3]$

晶闸管开通过程结束后进入正向导通区,在此区间其阳极电压为通态压降,由于通态压降很小,故不存在均压问题,在此区间:

$$R_{SCR3}(t) = R_{on} \quad (3)$$

1.4 反向导通区 $[t_3, t_4]$

当外电路施加反向电压后,大量未被复合的载流子在反向电压的作用下仍会形成较大幅值的反向电流,由于晶闸管的阻断特性尚未恢复,并且线路中存在电感,其两端电压仍然为正,且电压值很小,故此区间也不存在均压问题,伏安特性可认为与1.3节相同。

1.5 反向恢复区 $[t_4, t_5]$

在此区间晶闸管的反向电流值逐渐减小,两端的反向电压开始建立,如果串联晶闸管的反向恢复电荷不一致,首先恢复反向阻断的晶闸管就会受到过电压,因此本区间存在着关断过程的瞬态均压问题,仍然用指数规律变化的时变电阻来模拟其动态电压分配:

$$R_{SCR5}(t) = R_{RRM} + R_{on} - R_{RRM} e^{-\frac{t-t_4}{t_{tr}} \ln \frac{R_{RRM}}{R_{on}}} \quad (4)$$

式中: R_{RRM} 为反向阻断区漏电阻; t_{tr} 为反向阻断恢复时间。

1.6 反向阻断区 $[t_5, T]$

与正向阻断区情况相似,本区间存在反向的稳态均压问题,在此区间:

$$R_{SCR6}(t) = \frac{U_{RRM}}{I_{RRM}} = R_{RRM} \quad (5)$$

式中: U_{RRM} 为反向重复峰值电压; I_{RRM} 为对应于 U_{DRM} 的反向重复峰值漏电流。

综合式(1)~式(5),利用统一离散时域建模法,得到晶闸管在一个周期内的非线性时变数学模型:

$$R_{SCR}(t) = \sum_{i=1}^6 h_i(t') R_{SCRi}(t') \quad (6)$$

$$h_i(t') = \begin{cases} 1 & t_{i-1} \leq t' < t_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中: $t' = t - nT$, $n = [t/T]$, $[]$ 表示向 0 方向取整, T 为周期,即以上 6 个时间段之和; $i = 1, 2, \dots, 6$ 。

这样, $t' \in [0, T)$, $R_{SCR}(t)$ 为周期为 T 的函数,其在一个周期内的波形如图 2 所示。

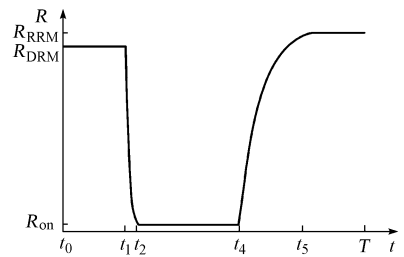


图2 晶闸管模型 $R_{SCR}(t)$ 的波形
Fig. 2 Waveform of the thyristor model $R_{SCR}(t)$

2 晶闸管串联电路的时域仿真

在晶闸管模型建立的基础上,就可对其串联电路进行仿真分析。包含动、静态均压元件的 n 只晶闸管串联电路如图 3 所示。

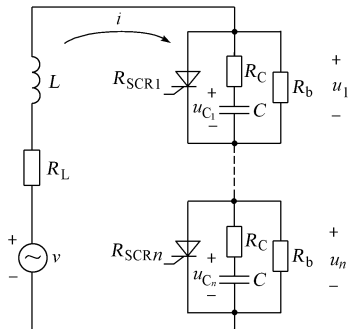


图3 含动、静态均压元件的晶闸管串联电路
Fig. 3 Cascaded thyristors circuit with buffer devices

选择 $i, u_{C1}, u_{C2}, \dots, u_{Cn}$ 作为状态变量,可推导出状态方程(7):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= -\frac{1}{L} \left(R_L + R_C \sum_{j=1}^n R_{aj} \right) i - \frac{1}{L} \sum R_{aj} u_{C_j} + \frac{v}{L} \\ \frac{du_{C_1}}{dt} &= \frac{R_{a1}}{C} i + \frac{1}{CR_C} (R_{a1} - 1) u_{C_1} \\ &\vdots \\ \frac{du_{C_j}}{dt} &= \frac{R_{aj}}{C} i + \frac{1}{CR_C} (R_{aj} - 1) u_{C_j} \\ &\vdots \\ \frac{du_{C_n}}{dt} &= \frac{R_{an}}{C} i + \frac{1}{CR_C} (R_{an} - 1) u_{C_n} \\ u_1 &= R_{a1} u_{C_1} + R_C R_{a1} i \\ &\vdots \\ u_j &= R_{aj} u_{C_j} + R_C R_{aj} i \\ &\vdots \\ u_n &= R_{an} u_{C_n} + R_C R_{an} i \end{aligned} \right. \quad (7)$$

当只考虑最不利也是最简单的情况,即仅有一只晶闸管的参数与其他晶闸管不同,设其为 SCR1,则: $u_{C_2} = u_{C_3} = \dots = u_{C_n}$, $u_2 = u_3 = \dots = u_n$, 上述状态方程可化简为方程组(8):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= -\frac{1}{L} [R_L + R_C R_{a1} + (n-1) R_{a2}] i - \frac{1}{L} R_{a1} U_{C_1} - (n-1) \frac{1}{L} R_{a2} U_{C_2} + \frac{v}{L} \\ \frac{du_{C_1}}{dt} &= \frac{R_{a1}}{C} i + \frac{1}{CR_C} (R_{a1} - 1) u_{C_1} \\ \frac{du_{C_2}}{dt} &= \frac{R_{a2}}{C} i + \frac{1}{CR_C} (R_{a2} - 1) u_{C_2} \\ u_1 &= R_{a1} u_{C_1} + R_C R_{a1} i \\ u_2 &= R_{a2} u_{C_2} + R_C R_{a2} i \end{aligned} \right. \quad (8)$$

式中: $R_{aj} = \frac{1}{1 + \frac{R_C}{R_{SCRj}} + \frac{R_C}{R_b}}$

因此,晶闸管串联电路的仿真分析就是对上述状态方程的求解问题。虽然状态方程中含有时变系数和开关函数,但利用 MATLAB 等数值计算软件可以很容易得到其数值解及仿真图形。

3 仿真及实验结果

基于上述模型编制了 MATLAB 仿真程序,对晶闸管参数不一致和触发不同步的串联运行进行了仿真分析,并且对后者进行了实验验证。仿真电路的结构如图 3 所示。电路参数如下:电压源 $v = 6\,000\sqrt{2}\sin 314t$ V, $L = 0.5$ mH, $R_L = 20$ Ω , $R_C = 10$ Ω , $C = 0.47$ μ F, $R_b = 4\,000$ Ω 。晶闸管阀为 7 只 3 kV 的晶闸管串联,晶闸管参数为:正向平均电流 $I_T = 200$ A,正反向重复峰值电压 $U_{DRM} = U_{RRM} =$

3 kV,正向平均电压 $U_T = 2$ V, $t_{on} = 2$ μ s, $t_{rr} = 100$ μ s,漏电流 $I_{DRM} = I_{RRM} = 30$ mA。

图 4 为当其中一只晶闸管 SCR1 的开通和关断时间与其他晶闸管不同时的仿真波形。取 $t_{on1} = 10$ μ s, $t_{rr1} = 30$ μ s,触发角 $\alpha = 90^\circ$,自然关断。

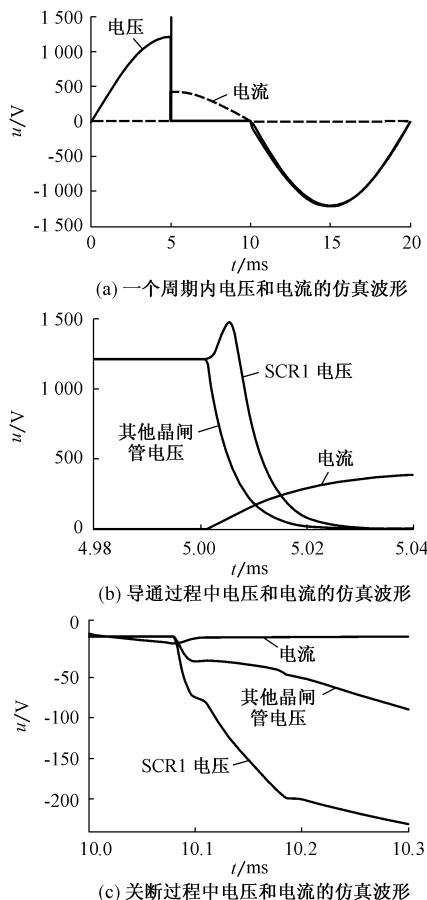


图 4 晶闸管的开通和关断时间不一致时的仿真波形
Fig. 4 Simulation wave while the thyristors with different forward and reverse recovery time

图 5(a)和图 6(a)为其中一只晶闸管 SCR1 的触发信号比其他触发信号有延迟时的开通过程仿真波形,延迟时间分别为 2 μ s 和 4 μ s,图 5(b)和图 6(b)为实验波形。取电压源 $v = 450\sqrt{2}\sin 314t$ V, $L = 0.05$ mH,触发角 $\alpha = 40^\circ$,其他参数不变。

4 结语

有关晶闸管等电力电子器件的模型很多,但大多都无法用于器件的串联仿真。因为很多宏模型是在已有的电感和受控源等元件模型基础上建立的,虽然可以准确模拟单个器件的开关过程,但却无法模拟串联器件在动态过程中的分压特性。本文建立的晶闸管非线性时变电阻模型,刚好可以解决这个问题。目前,晶闸管串联电路的动静态均压电路参数的选择大多仅凭经验,所以本文对其建立的仿真

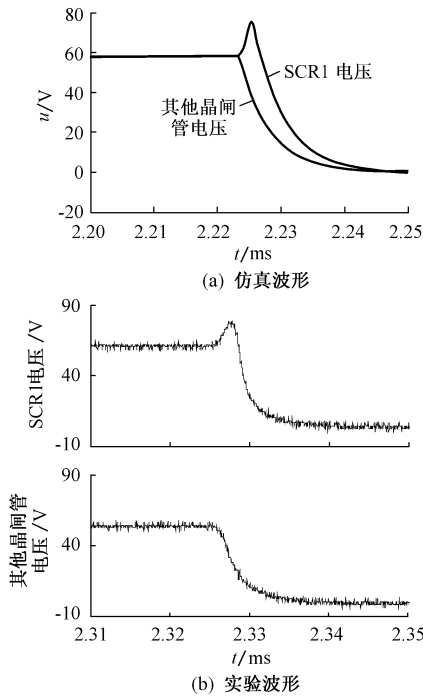


图5 SCR1的触发信号延迟2 μ s时的开通过程电压波形

Fig. 5 Voltage waves of switch-on process while SCR1 trigger signal with 2 μ s delay

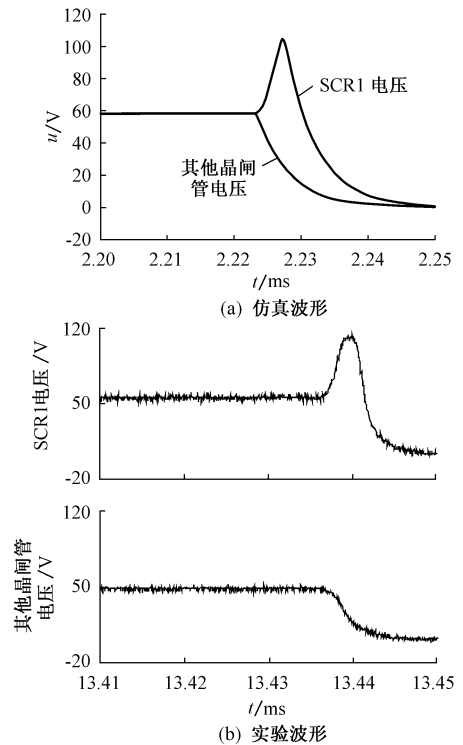


图6 SCR1的触发信号延迟4 μ s时的开通过程电压波形

Fig. 6 Voltage waves of switch-on process while SCR1 trigger signal with 4 μ s delay

模型,可用于均压电路器件参数的优化设计。

参考文献

- 1 Krein P T, Bass R M. Geometric Formulation, Classification and Methods for Power Electronic Systems. In: Proceedings of the 1990 IEEE PESC Annual Meeting, Vol 1. Piscataway (NJ): IEEE, 1990
- 2 Burdío José M, Martínez Abelardo. A Unified Discrete-time State-space Model for Switching Converters. IEEE Trans on Power Electronics, 1995, 10(6): 694~707
- 3 温郑铨, 陈玉燕(Wen Zhengquan, Chen Yuyan). 适用于 Pspice 的晶闸管开关模型(The Switch Models of Thyristors for Pspice). 电力电子技术(Power Electronics), 1995(2): 37~42
- 4 邹刚, 陈祥训, 郑健超, 等(Zou Gang, Chen Xiangxun, Zheng Jianchao, et al). 用于电力电子系统暂态过程分析的晶闸管宏模型(Macro-model of Thyristor for Transient Analysis in Power

Electronic System). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1999, 19(6): 1~5

- 5 王兆安, 张明勋(Wang Zhao'an, Zhang Mingxun). 电力电子设备设计 and 应用手册(Design and Application Manual of Power Electronics Equipment). 北京: 机械工业出版社(Beijing: China Machine Press), 2002

王毅(1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动. E-mail: eagleyi@263.net

石新春(1951—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用、交流电机调速、高频感应加热电源等。

李和明(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电机建模、设计及监测与诊断等。

CASCADED THYRISTORS SIMULATION BASED ON UNIFIED DISCRETE TIME-DOMAIN MODELING

Wang Yi, Shi Xinchun, Li Heming, Zhu Ling, Du Haijiang
(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The forward and reverse recovery process of the single thyristor can be exactly simulated using the existing models, but the simulation of the cascaded thyristors is seldom, if ever, involved. Based on an analysis of the dynamic performance of the thyristor switching process, a thyristor model including the transient process is developed with the unified discrete time-domain modeling in this paper. As this model adopts time-variable resistance for describing the variable relation between voltage and current, it is suitable for series thyristor circuit simulation. The simulation and experimental results show that the voltage distribution in the transient process of the cascaded thyristors operation can be accurately described. Therefore, it can provide a basis for the design of large power electronic devices that require thyristors operating in series.

Key words: thyristor; cascaded; simulation; model