



国家电网公司
电力科技著作出版项目

直流输电 控制保护系统 分析及应用

陶 瑜 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

直流输电 控制保护系统 分析及应用

主 编 陶 瑜

参 编 蒲 莹 李凤祁 马玉龙

杨一鸣 蒋为勇 聂定珍

郑 劲 吴方劼 孙仲明

曹燕明



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书紧密结合工程实际,以直流输电原理为基础,从工程成套设计的角度,综合交/直流系统性能和设备应力要求,系统地阐述了直流输电控制保护原理、控制保护系统的功能、性能设计原则、软硬件结构以及与主设备的接口要求等。

本书共分6章,具体包括直流输电控制保护系统概论、直流输电系统性能、直流输电系统主要设备应力分析、直流系统控制、直流系统保护、直流控制保护系统结构及性能。

本书可供从事直流输电工程科研、设计、制造、建设、运行等方面的技术人员使用,也可供大中专院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

直流输电控制保护系统分析及应用 / 陶瑜主编. —北京: 中国电力出版社, 2015. 7

ISBN 978-7-5123-7011-1

I. ①直… II. ①陶… III. ①直流输电-电流保护装置
IV. ①TM774

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 000867 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 7 月第一版 2015 年 7 月北京第一次印刷

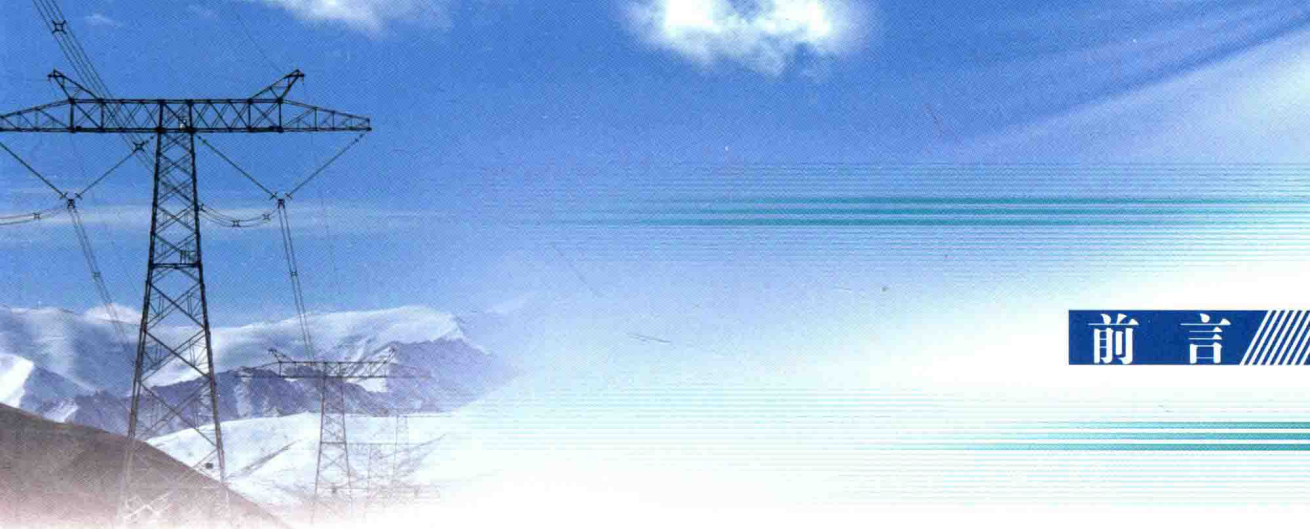
787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 446 千字

印数 0001—1500 册 定价 120.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

自三峡直流输电工程建设以来,我国直流输电技术高速发展,相继建成了数个世界上直流电压等级最高、输送容量最大、输送距离最长的特高压直流输电工程。我们作为技术工作者,得益于国家电力工业的发展、电网技术的进步,在直流输电工程技术领域获得更加深刻的认知。

直流输电工程是一项庞大的系统工程,直流输电控制保护技术是其关键技术之一,也是其一项复杂的子系统工程。本书作者团队多年扎根生产一线,总结了大量的工程建设和生产运行经验,积累了相关知识和研究成果,希望通过编写本书,与大家共同探讨、学习,进一步加深对直流输电控制保护技术原理和应用的认识,更好地为我国直流输电工程建设的持续发展服务。

本书第1章由陶瑜编写;第2章由蒋为勇、聂定珍、陶瑜编写;第3章由杨一鸣、郑劲、吴方劼、孙仲明、曹燕明编写;第4章由李凤祁、马玉龙、陶瑜编写;第5章由蒲莹编写;第6章由李凤祁、陶瑜编写。陶瑜对全书进行统稿、校核。

本书的编写是在国网北京经济技术研究院的直接领导和关怀下完成的,编写过程中得到国网直流建设分公司、国网运行分公司的大力支持,特别要感谢马为民专家的大力帮助,在全书的总体结构和技术关键点均给予了指导。同时本书的出版也得到了杨奇逊院士、徐政和曾南超等专家的帮助和鼓励,在此一并感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2014. 12

前言

第1章 直流输电控制保护系统概论	1
1.1 基于晶闸管器件换流技术的基本控制原理	1
1.2 交/直流系统相互影响对直流控制保护系统要求	17
1.3 直流控制保护系统设计原理	34
第2章 直流输电系统性能	44
2.1 直流输电系统稳态、动态、暂态性能分析	44
2.2 交/直流系统调制控制性能	50
2.3 直流输电系统过电压的控制保护	63
2.4 直流输电系统暂态电流的控制保护	69
第3章 直流输电系统主要设备应力分析	77
3.1 换流阀	77
3.2 换流变压器	93
3.3 换流站交流滤波器/无功补偿设备	106
3.4 直流滤波器	125
3.5 直流场主回路设备	131
3.6 直流线路、接地极引线及接地极	137
第4章 直流系统控制	142
4.1 直流系统控制设计	142
4.2 顺序控制及联锁	144
4.3 直流输电系统有功功率控制	155
4.4 触发脉冲锁相及产生的原理	176
4.5 换流站无功/交流电压/谐波控制	183

4.6	换流变压器分接开关控制	193
4.7	换流站辅助系统监控	196
第5章	直流系统保护	199
5.1	故障特性	199
5.2	保护设计原则及保护定值的确定方法	228
5.3	直流系统保护动作逻辑	231
5.4	直流系统保护的配置、原理及定值	242
5.5	换流变压器保护的典型配置、原理及定值	260
5.6	滤波器保护的典型配置、原理及定值	266
5.7	直流系统保护、直流系统控制、交流系统保护间的协调配合	276
第6章	直流控制保护系统结构及性能	279
6.1	直流控制保护硬件系统设计的基本原则	279
6.2	直流控制保护系统分层结构	281
6.3	直流控制保护装置的基本组成及性能	285
6.4	直流系统测量设备要求	296
6.5	辅助电源要求	299
6.6	换流站其他二次设备	302
参考文献		304
索引		307

直流输电控制保护系统概论

直流输电不仅可根据系统要求传输直流功率,还可利用直流的快速控制和调制功能提高交流系统的稳定性。直流输电系统主回路接线和运行方式灵活多样,换流站直流回路主设备繁多。这些均与直流输电控制保护系统(简称直流控制保护系统)的设计密切相关。

在直流输电技术中,直流控制保护系统是直流输电系统的中枢,它控制着交/直流功率转换和直流功率输送的全部过程,全天候地监控着整个直流系统、主辅设备,并快速应对交/直流系统的扰动和故障,保护换流站所有电气设备免受损坏。直流系统及其主辅设备的所有功能和性能均需通过直流控制保护系统得以实现。

为了正确设计工程用直流控制保护系统,必须以直流输电原理为基础,从直流系统成套设计的高度,紧密结合工程实际,综合交/直流系统性能和设备应力要求,系统、深入地认识直流输电控制保护原理、直流控制保护系统的功能/性能设计原则、软硬件结构以及接口要求。

1.1 基于晶闸管器件换流技术的基本控制原理

直流输电技术离不开换流、换相的基本概念。简言之,换流就是进行交流变换为直流、直流变换为交流的过程;换相就是分别、依次对交流的三相进行换流的过程。

换流、换相技术中,一次设备所涉及的主要器件是电力电子开关器件。作为电力系统输电用的电力电子开关器件需具备工程化的基本条件,主要包括具有足够的通流容量和电压耐受能力,具有可控导通及低的导通压降、最好具有可控的关断能力,能够灵活控制通流容量的大小等。目前,大容量直流输电工程(电网换相换流器技术,或称线电流换流器 LCC 技术)主要采用晶闸管器件。本书主要分析晶闸管器件组成换流器(简称换流器)的控制保护特性。

1.1.1 晶闸管的开通、关断特性

晶闸管器件的示意符号通常如图 1-1 所示。

晶闸管基本静态特性主要以图 1-2 伏安特性曲线表示。



图 1-1 晶闸管器件示意图

图 1-2 中 U_{AC} 为晶闸管阳极对阴极的电压， I_A 为流过晶闸管的电流（阳极电流）， I_G 为控制极至阴极的电流。解读该图，我们可以得到晶闸管的主要特性。

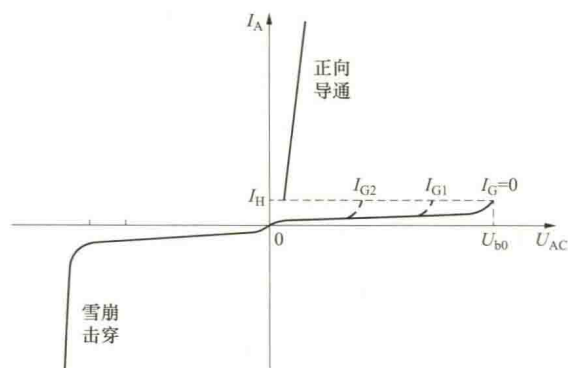


图 1-2 晶闸管伏安特性

当晶闸管所施加的阳极对阴极电压为正（称正向电压），但未向控制极注入电流，晶闸管处于正向阻断状态，当 U_{AC} 达到正向转折电压（ U_{b0} ）时，原本很小的漏电流急剧增大，导致晶闸管的非正常开通状态。

当晶闸管被施加正向电压且在控制极（门极）上注入合适的电流 I_G （如几百毫安），只要具备电流回路，则可产生阳极至阴极的正向导通电流 I_A ，形成晶闸管的正常导通状态；注

入控制极的电流越小，则所需正常导通的 U_{AC} 就越大；晶闸管一旦正常导通，器件上的电压降就很小，工程用 5 英寸晶闸管的导通压降约为 1.5V、6 英寸晶闸管导通压降约为 1.97V。

晶闸管须具有承受反向电压应力的能力，在允许的反向电压应力期间，晶闸管仅有很小的漏电流，但当反向电压达到至损的程度，即达到反向击穿电压时，晶闸管将被雪崩击穿。

晶闸管的动态特性主要体现为开通和关断过程中的特性。① 晶闸管的开通特性主要体现在开通时间（即控制极加入跃变电流的时间至晶闸管电流扩散达到稳定值的 90% 的时间，通常为 $1 \sim 5 \mu s$ ）；开通允许的电流跃变（如 6 英寸晶闸管约为 320A）等。② 只有当阳极电流 I_A 低于一定值时，即低于维持电流 I_H 时（如几百毫安），晶闸管才正常关断；要减小 I_A 则需要降低其正向电压，要维持晶闸管关断需维持晶闸管电压 U_{AC} 为零甚至为负一段时间。在晶闸管关断过程中，存在反向阻断恢复和正向阻断恢复时间，即阳极正向电流降低到零直至反向而后回到零的时间，以及此后晶闸管要恢复正向阻断能力所需的时间，否则在正向阻断能力恢复之前重新对器件施加正向电压时，晶闸管会重新非控导通。对于 6 英寸晶闸管，其关断时间可达 $400 \mu s$ 、其关断电压的临界上升率的最大临界值为 $12 kV/\mu s$ 。

晶闸管运行中的稳态、暂态特性，通常还包括额定结温、重复/非重复断态峰值电压、重复/非重复反向峰值电压等。



综上所述,晶闸管特性表明,晶闸管导通和关断过程直接与施加在器件上电压的正负、大小相关,正常导通时需要有正向电压的保证,并对晶闸管的控制极注入电流以控制器件的开通,但是不能通过外加强电控制信号令其正常关断,它的关断不可控,因此晶闸管属于半控电子开关器件。

直流输电实现换相、换流过程的关键设备之一是换流器,直流输电6脉动换流器的结构示意图如图1-3所示。换流器(也称换流单元)的构成包括换流阀及换流变压器。换流器为三相桥式结构,每一个桥臂(也可称为换流阀或阀)由串联的数十只晶闸管及均压阻尼回路组成,阀的整体开通和关断的同步性直接反映了晶闸管器件的特性。6个阀的桥式结构也可称为6脉动阀组。交流系统三相等值电动势 e_a 、 e_b 、 e_c ,称为换流器的换相电压,它经由换流变压器分别接入一上桥臂的阳极和对应的下桥臂阴极;6脉动换流器的M、N两端形成直流端。

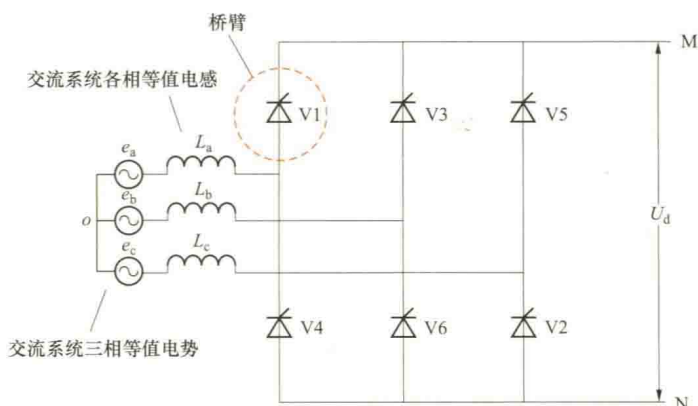


图1-3 直流输电6脉动换流器结构示意图

直流系统控制首先要正确判断施加于各换流阀电压的相位及幅值,确保触发脉冲发出时,相应阀上的所有晶闸管元件能同步导通。换流阀正常关断过程中,直流系统控制要保证换流阀在关断时应对晶闸管施加足够长时间的反向电压,使晶闸管充分恢复其对正向电压的阻断能力,否则将发生换相失败故障(见1.2.3)。

直流系统控制的核心任务是严格按照需要的时刻产生晶闸管的导通触发控制信号,它要与换流器的阀控系统正确接口,再通过换流阀及晶闸管的本体控制装置对晶闸管元件的控制极产生注入电流;按照需要的时刻产生换流器关断的必要条件。同时,直流控制保护系统要采取相应的控制策略和保护措施,使运行工况不超出晶闸管允许的应力范围。

1.1.2 6脉动换流器直流端电压的建立

换流器的直流端出口无论处于空载或带负载的工况,均存在一个回路。即使在空载状态时,也可将其出口视为一个并联电容的回路,换流器一旦被触发导通,可视为一个向电容充电的导通过程。

如图1-3所示,当a相电压为正半波时,阀1具备导通的电压条件,一旦注入控制极电流则阀1导通,阀的压降很小按不计考虑,则M点电压与 e_a 相等。当a相电压为负



半波时，阀 4 具备导通的电压条件，一旦注入控制极电流时阀 4 导通，则 N 点电压与 e_a 相等。同理，阀 3、阀 5 先后导通时，分别将 b 相和 c 相的正半波电压带至 M 点；阀 6、阀 2 先后导通时，分别将 b 相和 c 相的负半波电压带至 N 点。6 脉动换流器直流端电压等于 $U_M - U_N$ 。

直流系统控制需等距发出 6 个桥臂触发脉冲，对于 50Hz 换相电压，之间相隔 60° ；触发脉冲的顺序是 1-2-3-4-5-6-1……上半桥换相顺序是阀 1—阀 3—阀 5—阀 1……下半桥是阀 2—阀 4—阀 6—阀 2……直流系统控制发出的触发脉冲需保持 120° 宽，保证上半桥各阀和下半桥各阀分别导通 120° ，则完成一个周波的三相触发、换相过程。当上半桥阀 1 导通，施加在阀 3 阴极的电压为 e_a 、而其阳极的电压为 e_b ，此时只有 $e_b > e_a$ 且在其控制极注入电流时，阀 3 才具备导通的条件，其他阀同理类推。因此，当各阀顺序导通时，施加在阀上的换相电压是交流系统阀侧等值线电压，直流系统控制需以线电压过零点为计及触发脉冲发出时刻的起始点。图 1-4 中示意了交流三相相电压和线电压，6 个桥臂的触发脉冲，其触发时刻为换相电压线电压过零点，即触发角 $\alpha = 0^\circ$ 。同时，图中还示意了各阀的导通区域、上半桥阀 1、3、5 顺序导通 M 点的电压、下半桥阀 2、4、6 顺序导通 N 点的电压，以及 6 脉动换流器直流端的出口电压。图 1-4 所示为分析换相过程的一个理想工况，即 $\alpha = 0^\circ$ ，换相过程瞬时完成。

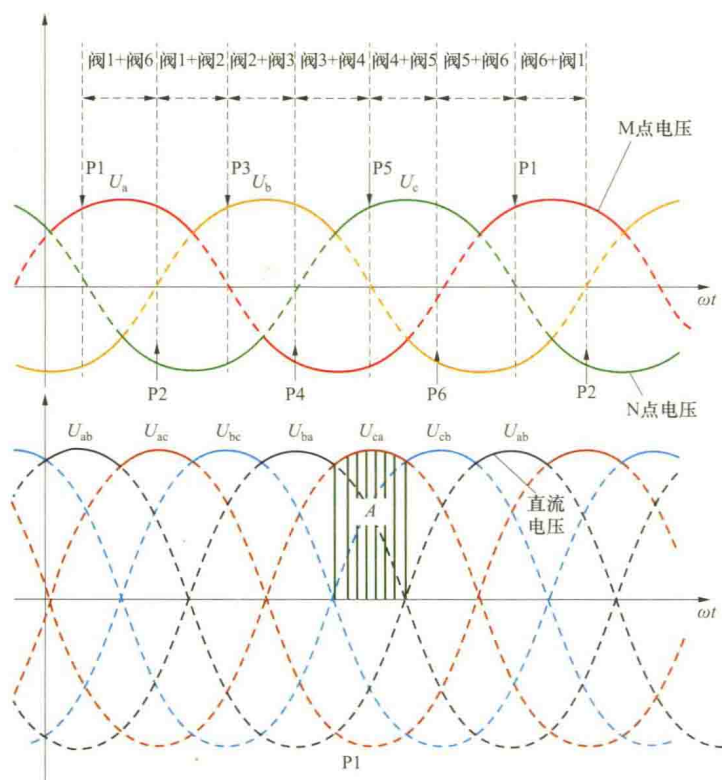


图 1-4 6 脉动换流器 $\alpha = 0^\circ$ 时直流电压示意图

注：P1~P6 表示触发脉冲，下同。



由于 $\alpha=0^\circ$ ，图 1-4 中所示面积 A 对横坐标 ωt 的比值，称为无相控的理想空载直流电压 U_{di0}

$$U_{di0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \approx 1.35E \quad (1-1)$$

式中 E ——换流变压器阀侧交流线电压的有效值。

以典型的两端直流系统进行分析。在直流输电技术中，理论上触发角的范围可为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。实际工程应用中，为了保证每阀串联的数十只晶闸管同步触发，必须保证每只晶闸管均处于正向电压作用下进行触发，因此选择触发时刻要滞后，一般触发角 α 不小于 5° 。当触发角 $5^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ 时，称为整流换流器（简称整流器），为电源端换流器；当 $\alpha > 90^\circ$ 时，称为逆变换流器（简称逆变器），为受端换流器。

图 1-5 ~ 图 1-8 中相电压的红色曲线所示为 6 脉动换流器直流端 M 点经阀 1、阀 3、阀 5 换相导通后得到的电压；各图中相电压的绿色曲线所示为 6 脉动换流器直流端 N 点经阀 2、阀 4、阀 6 换相导通后得到的电压。换流器直流端电压等于 $U_M - U_N$ 。

图 1-5 ~ 图 1-8 中，触发角均滞后于对应的线电压过零点，图中所示阴影面积 A 对横坐标 ωt 的比值，称为有相控的理想空载直流电压 U'_{di0}

$$U'_{di0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \cos \alpha = 1.35E \cos \alpha = U_{di0} \cos \alpha \quad (1-2)$$

图 1-5 所示为触发角 $\alpha \approx 37^\circ$ 时，直流电压的波形全部为正值，换流器的直流端电压

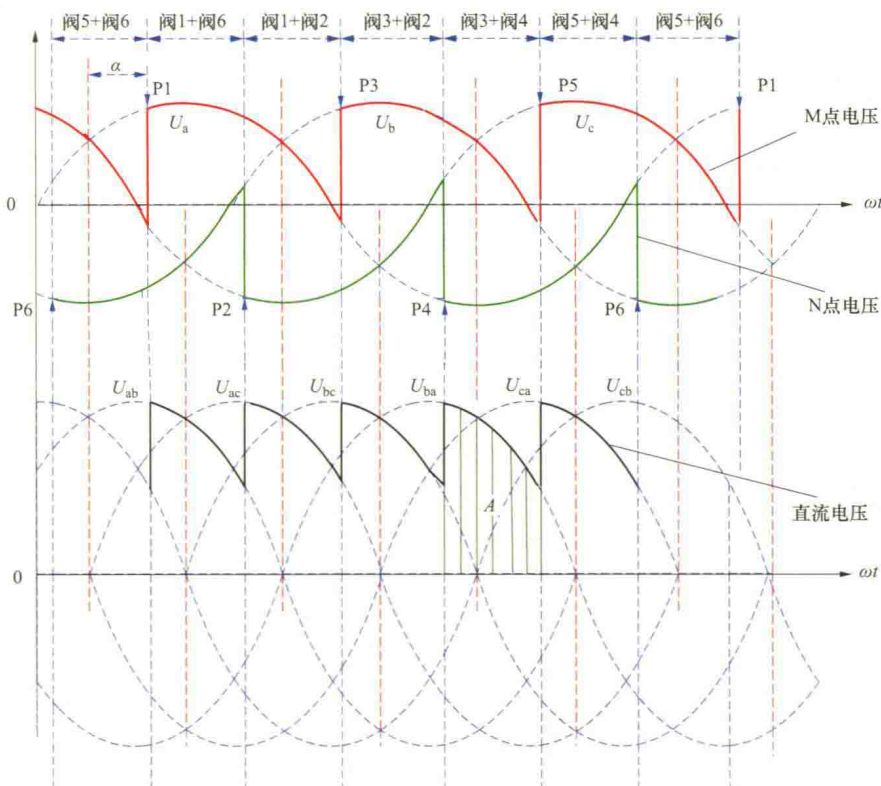


图 1-5 6 脉动桥触发角 $5^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ 时电压示意图



平均值为正；图 1-6 所示为 $\alpha = 60^\circ$ ，可以看出这是直流端电压波形全部为正的最大的触发角。据此类推，当 $60^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时，换流器的直流端电压会出现正负交替，但其平均值仍为正。

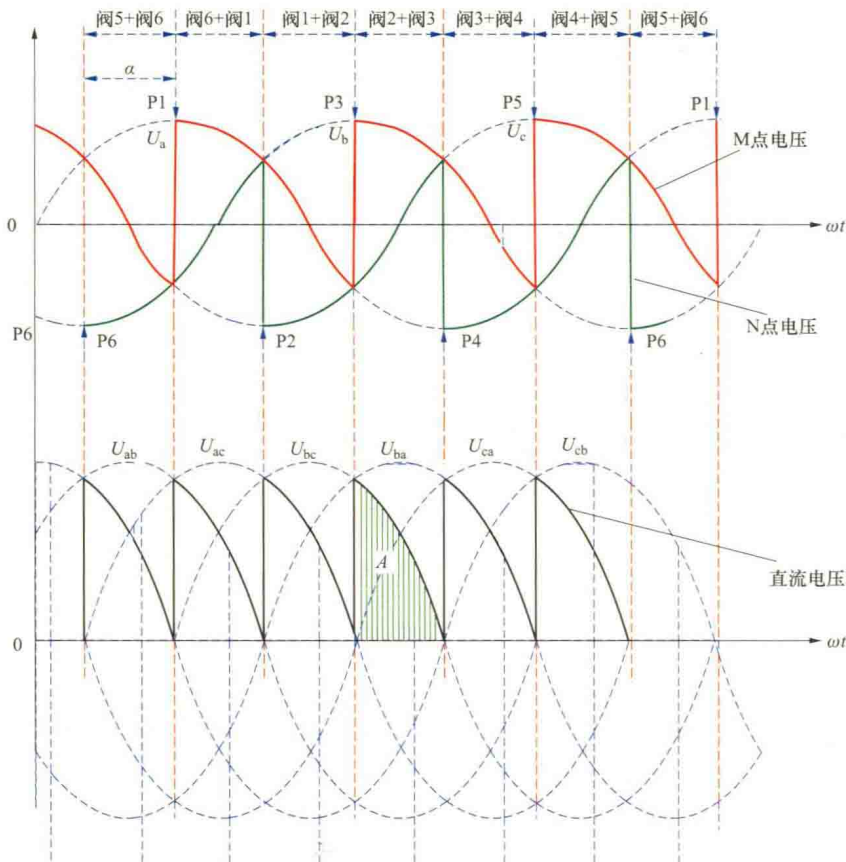


图 1-6 6 脉动桥触发角 $\alpha = 60^\circ$ 时电压示意图

图 1-7 所示为 $\alpha = 90^\circ$ 时，换流器的直流端电压平均值为零。

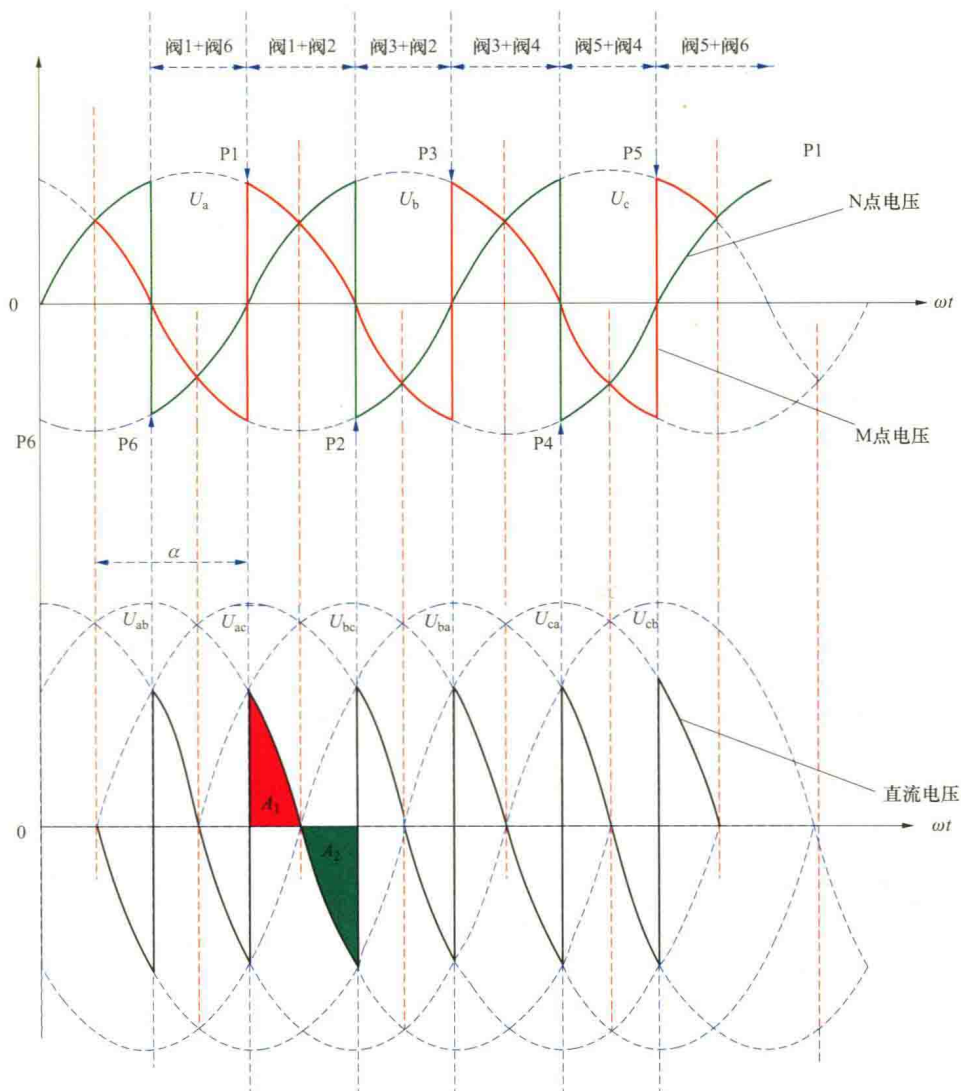
当 $90^\circ < \alpha < 120^\circ$ 时，换流器直流端电压仍是正负交替，但其平均值为负，与图 1-6 同理，当 $\alpha = 120^\circ$ 时，将是换流器直流端出口电压全部为负的最小触发延迟时刻。图 1-8 所示为 $\alpha > 120^\circ$ 时，直流电压波形全部为负值。

当换流器直流端电压平均值为正，即为整流状态，反之，当其为负则为逆变状态。

解读上述各图，直流系统控制产生触发脉冲的时刻不仅决定了换流器直流端电压的正与负，还决定了直流电压幅值的大小，这也是直流输电输送功率基本控制的关键所在。

1.1.3 两端直流系统直流电流的建立

对于 6 脉动换流器，一旦建立了直流端电压，如果在直流侧建立直流系统的运行回路，则可产生正常运行的直流电流。由于晶闸管的单向导电性，在整流换流器与逆变换流器相连时，必须将整流换流器的 M^+ 端与逆变换流器的 N^+ 端相连。图 1-9 所示为整流

图 1-7 6 脉动桥触发角 $\alpha = 90^\circ$ 时电压示意图

换流器阀 1 和阀 2、逆变换流器阀 5 和阀 6 导通工况下电流回路示意图。

要建立直流电流，只要整流端建立了电压、逆变侧建立相对整流侧稍低的电压并与整流侧形成回路即可。因此，直流系统控制必须确定整流侧的运行电压（额定或降压）、逆变侧换流器选取合适的、匹配的电压，则可形成额定（或整定）的直流电流。两端电压值的建立最终将由各自换流阀的触发时刻决定。极母线直流电压测量装置所测为极母线对地直流电压，因此在直流控制保护中，用于控制保护的直流电压应为所测的直流电压值减去所测的中性母线电压值。无论是整流侧还是逆变侧，对直流电压控制的结果都是保证整流侧直流电压为全压或降压整定运行值。

直流电流回路的基本组成形式可以是两端换流器直接相连形成背靠背形式，或高压端通过直流线路而低压端通过大地（或海水）作为返回线连接形成端对端大地（或

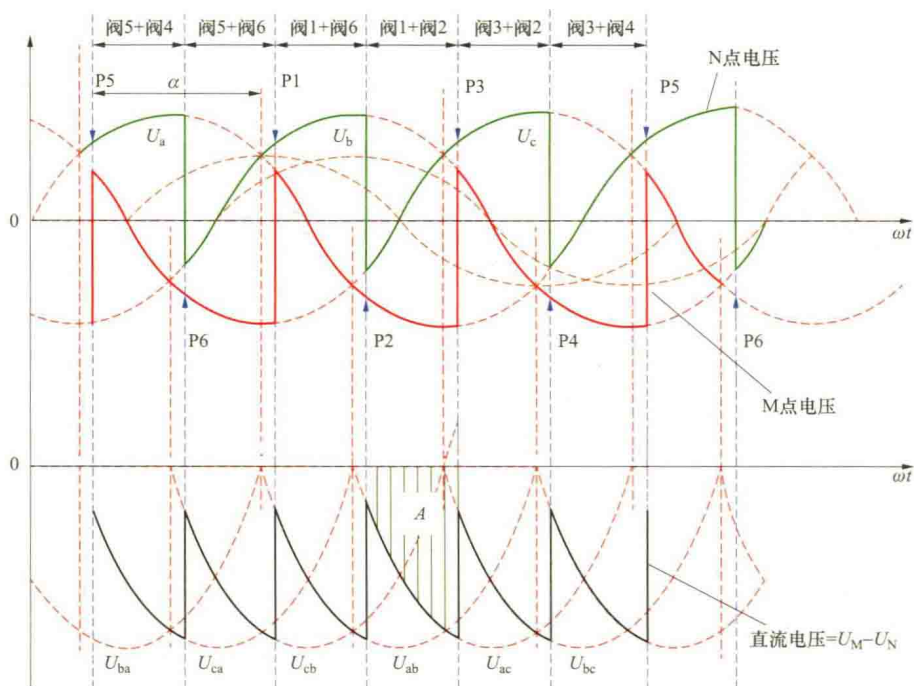


图 1-8 6 脉动桥触发角 $\alpha > 120^\circ$ 时直流电压示意图

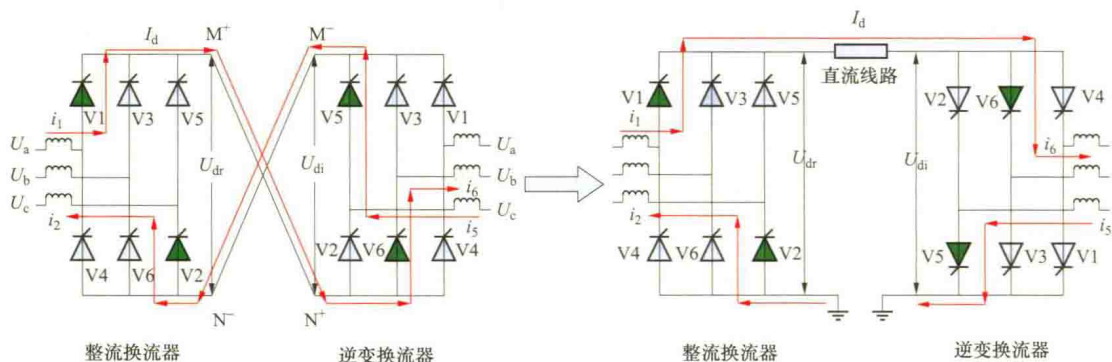


图 1-9 整流、逆变换流器电流回路

海水) 返回线形式, 或高压端通过直流线路而低压端通过金属导线作为返回线连接形成端对端金属返回线形式。由整流和逆变两端及返回连接形成一个电流回路的称为直流极。图 1-10 所示为直流双极大地回路主回路示意图, 双极 (正极和负极) 共用大地回路; 当单极运行时, 另一极直流线路导线可作为低压金属回路。

每极直流回路电流可表示为

$$I_d = \frac{U_{dR} - U_{dI}}{R_L} \quad (1-3)$$

式中 U_{dR} ——整流侧换流器高压端对换流器低压端间直流电压;

U_{dI} ——逆变侧换流器高压端对换流器低压端间直流电压;

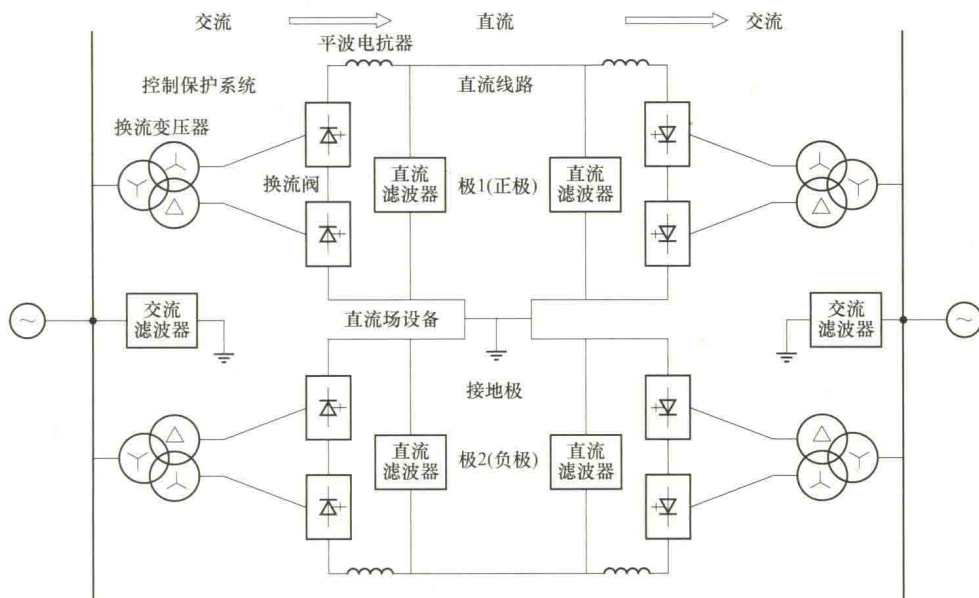


图 1-10 直流双极大地回线主回路示意图

R_L ——直流回路电阻。单极大地回路时, R_L 包括两站直流回路串联的平抗电阻、直流线路电阻、两站接地极线路和接地极电阻。金属回线时, R_L 包括两站直流极线串联的平抗电阻、两倍直流线路电阻。

其中, 下标 R 代表整流侧、下标 I 代表逆变侧。

在讨论直流电流建立时, 进一步注意到, 在每相电流回路中, 均存在着电感性质的元件, 其阻抗值即为换相电抗, 它主要由所连接交流系统的等值阻抗以及换流器与交流系统的之间的换流变压器漏抗组成。如果交流系统容量较换流器容量大许多倍, 或者在换流母线上装设完备的交流滤波器, 则通常将换流变压器漏抗视为换相电抗。电感元件具有阻止所流过电流变化的特性。因此, 在非换相过程中, 流过每个桥臂电流的变化率近乎为零, 换相电抗值可视为零; 但在换相过程中, 原先导通的阀要关断, 其电流要变化为零, 而下一个导通阀的电流由零升至整定值, 这一降一升的过程中, 换相电抗要起到阻止作用, 导致电流的变化要维持一段时间, 形成两阀同时导通的时间称为换相角。图 1-11 (a) 中 μ 角为整流器换相角。同理, 逆变器电流和直流电压也相应具有两阀换相同时导通的换相角, 如图 1-11 (b) μ 角所示。

除了触发角 α 和换相角 μ , 在图 1-11 (b) 中, 我们还引入了逆变侧换流器另一个重要的角度, 即关断角 γ 。

晶闸管正常关断时, 要求其电流过零, 且需保持一段时间使其承受反向电压, 达到彻底去游离, 否则它将重新导通。两桥臂换相结束后, 刚退出导通的阀在反相电压作用的一段时间内, 未能恢复阻断能力, 或者两桥臂换相一直未能结束, 其结果是预定开通的桥臂向预定关断的桥臂倒换相, 这是换相失败的基本定义。

从图 1-11 中, 我们可以看到, 6 脉动桥中, 各阀相隔 60° 触发, 上 (下) 半桥的各阀相隔 120° 触发; 每个阀收到触发脉冲后导通 $(120^\circ + \mu)$ 的时间。整流器阀在关断后,



其阀电压长时间处于负电压($240^\circ - \alpha - \mu$)，因此，整流器阀关断后，通常不会由于阀电压承受反向电压时间不足而导致换相失败。但是逆变侧阀在关断后，其阀电压承受反向电压的时间就等于关断角 γ ，当 γ 角不够大时，逆变侧阀就会发生换相失败。逆变侧易发生换相失败是晶闸管换流器存在的一项重要不足。逆变器发生换相失败时，例如阀1与阀3换相失败，阀1继续导通，当顺序发出的阀4触发脉冲到来并导通时，则形成阀1、阀4同时导通，造成直流系统受端直流端短路，受端交流系统收不到电能量，而直流电流瞬时增大，通常可致直流电流增大到 $2.5p.u.$ 左右。

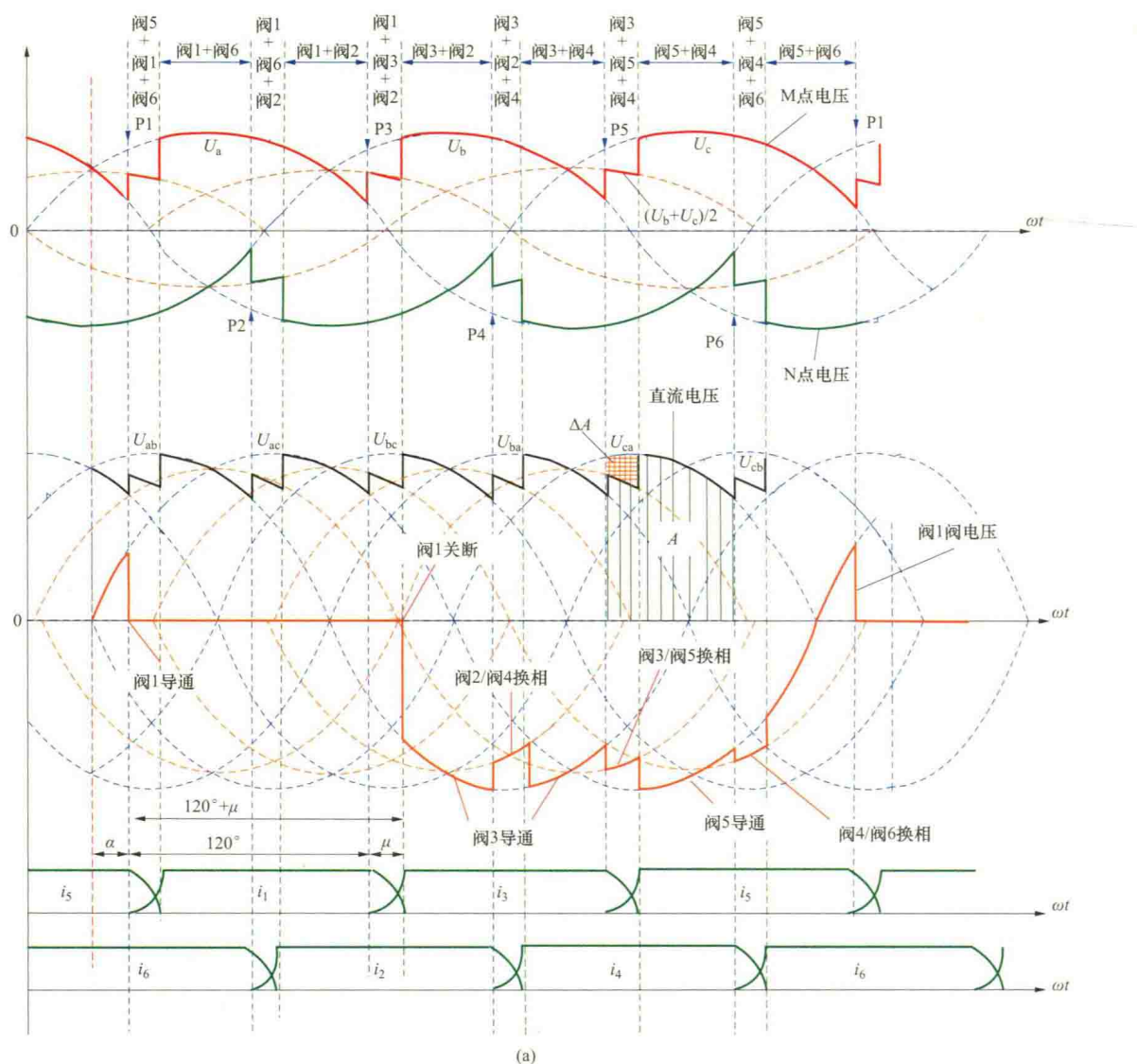


图 1-11 含换相角的直流电压及桥臂电压、电流波形示意（一）

(a) 整流侧

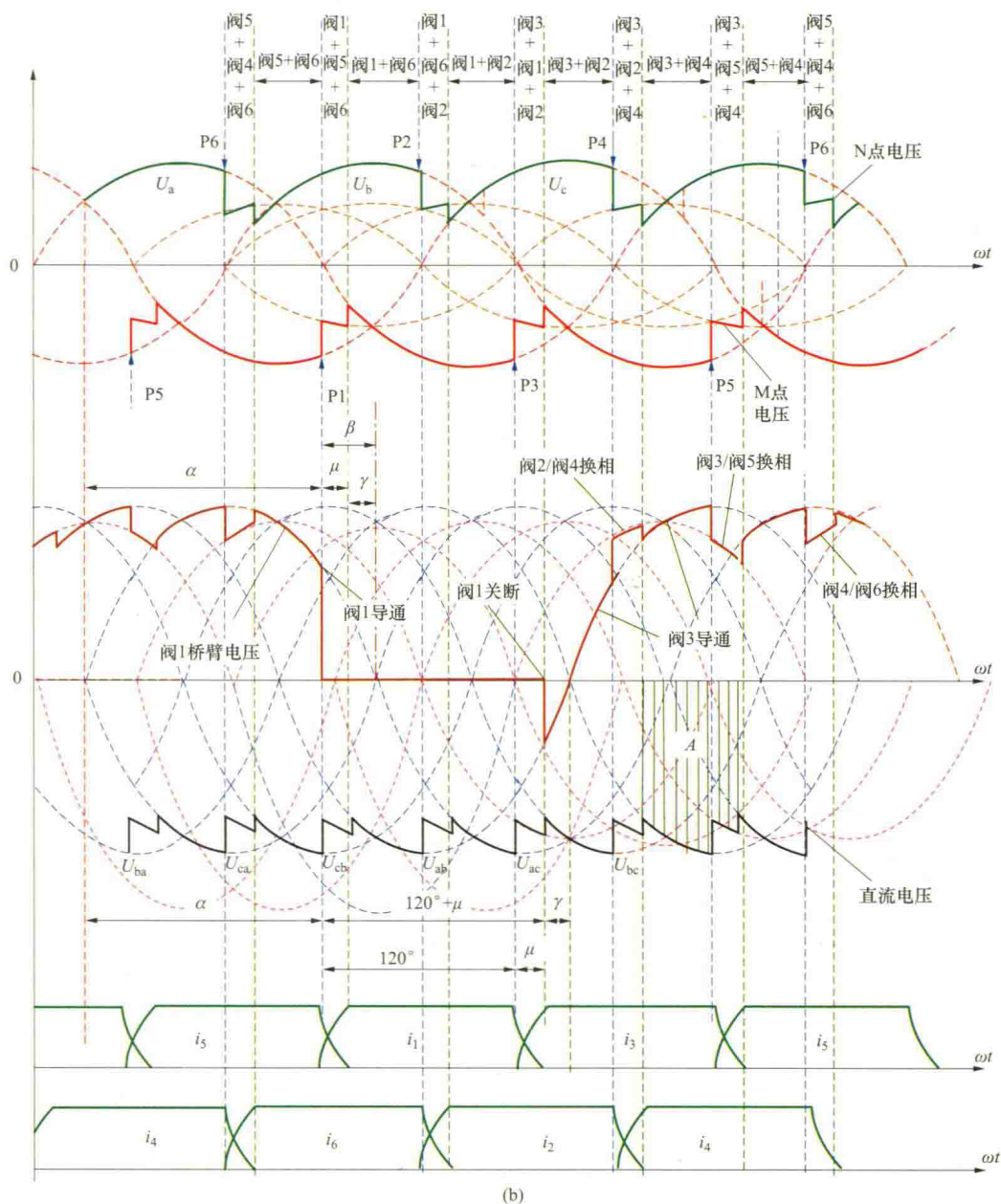


图 1-11 含换相角的直流电压及桥臂电压、电流波形示意（二）

(b) 逆变侧

影响 γ 角大小的因素包括：触发角（导通滞后角） α 角大小、换相角 μ 的大小，以及换相电压过零点是否畸变。引发换相失败的主要原因通常为：应导通的阀失去导通条件，如换相电压降低或失去触发脉冲；交流电压扰动形成畸变，导致过零点前移，从而关断角减小；直流电流瞬时大幅度增大，导致换相角增大从而关断角减小；触发角 α 过大导致 γ 减小。换流器的误开通也会造成无法正常换相。

直流输电工程应用中，通常采用两个 6 脉动换流器串联形成一端的单极换流器。