

目录

√ 什么是电力电子技术? 01.....	3
√ 电力电子技术的基础与核心分别是什么?02.....	3
√ 请列举电力电子技术的 3 个主要应用领域。03.....	3
√ 电能变换电路有哪几种形式? 其常用基本控制方式有哪三种类型? 04.....	3
√ 从发展过程看, 电力电子器件可分为哪几个阶段? 简述各阶段的主要标志。 05.....	3
√ 传统电力电子技术与现代电力电子技术各自特征是什么? 06.....	3
√ 电力电子技术的发展方向是什么? 07.....	4
√ 按可控性分类, 电力电子器件分哪几类? 11.....	4
√ 电力二极管有哪些类型? 各类型电力二极管的反向恢复时间大约为多少? 12.....	4
√ 在哪些情况下, 晶闸管可以从断态转变为通态? 维持晶闸管导通的条件是什么? 13.....	4
√ 已处于通态的晶闸管, 撤除其驱动电流为什么不能关断, 怎样才能使晶闸管由导通变为关断? 14.....	4
√ 根据 GTO 的关断原理, 说明: GTO 和普通晶闸管同为 PNP 结构, 为什么 GTO 能够通过门极控制关断, 而普通晶闸管不能? 16.....	4
√ 关于 GTR, 请回答如下两个问题: 1) 描述 GTR 的二次击穿特性。 2) 为什么 GTR 在开关瞬变过程中易被击穿?有什么预防措施? 17.....	5
√ 如何防止电力 MOSFET 因静电感应引起的损坏? 18.....	5
√ 比较电力 MOSFET 与 IGBT 内部结构, 说明电力 MOSFET 在开关特性上的优点。 19.....	5
√ 作为开关使用时, IGBT 有哪些优点? 110.....	5
√ 试说明 IGBT、GTR、GTO 和电力 MOSFET 各自的优缺点。 112.....	5
√ 试分析电力电子集成技术可以带来哪些益处。智能功率模块与功率集成电路实现集成的思路有何不同? 113.....	6
√ IGCT 与 GTO、IGBT 相比, 有哪些特点? 114△.....	6
√ 请说出 3 种硅材料制成的电流控制电力电子器件、3 种硅材料制成的电压控制电力电子器件和 3 种碳化硅材料制成的电力电子器件。 115△.....	6
√ 电力电子器件的驱动电路对整个电力电子装置影响有哪些? 21.....	6
√ 驱动电路的基本任务有哪些? 22.....	6
√ 为什么要对电力电子主电路和控制电路进行电气隔离? 其基本方法有哪些? 23.....	6
√ 由晶闸管构成的主电路对触发脉冲一般要求有哪些? 24.....	7
√ 画出 GTO 理想的门极驱动电流波形, 并说明门极开通和关断脉冲的要求。 26.....	7
√ 说明电力场效应晶体管栅极驱动电路的一般要求。 27.....	7
√ GTO、GTR、电力 MOSFET 和 IGBT 的驱动电路各有什么特点? 28.....	7
√ 电力电子器件过电压产生的原因有哪些? 29.....	7

√ 发生过电流的原因有哪些? 210	8
√ 电力电子器件过电压保护和过电流保护各有哪些主要方法? 211	8
√ 电力电子器件过热保护有哪些主要方法? 212.....	8
√ 电力电子器件缓冲电路是怎样分类的? 全控器件缓冲电路的主要作用是什么? 试分析 RDC 缓冲电路中各元件的作用。 213	8
√ 在高压变流装置中, 晶闸管串联使用以提高耐压, 其均压措施有哪些? 215.....	8
√ 电力 MOSFT、NPT 型 IGBT 易于并联使用的原因是什么? 并联使用时还应注意哪些事项? 216.....	8
√ (其它基本概念—比较杂)、电力电力电子器件工作状态、开关损耗、通态损耗、常用的器件、串并联、开关速度、器件内部 (PNPN 结构, MOSFET 与 IGBT), 晶闸管各电流名称、常用开关管的名称、晶闸管触发电路各环节名称 (脉冲宽度、锯齿宽度、移相范围) 以及要求。其它器件触发电路及其方式, 另外, 如贝克钳位、栅极电阻、电压值 217	9
√ 时间比控制有哪三种控制方式? 31.....	9
√ 试述脉冲宽度调制 (PWM) 基本原理。 32	9
√ 结合原理图, 简述降压斩波电路的工作原理。 33 Δ.....	9
√ 分别简述 Sepic 变换电路与 Zeta 变换电路的工作原理, 并写出输入输出电压关系。 314 Δ.....	9
√ 分析图 3-21a) 所示的电流可逆斩波电路, 并结合图 3-21b 的波形, 绘制出各个阶段电流通的路径并标明电流方向。 315 Δ	10
√ 多相多重斩波电路有何优点? 316.....	10
√ 为什么正激变换器需要磁场复位电路? 317.....	11
√ 试分析全桥, 半桥和推挽电路中的开关和整流二极管在工作时承受的最大电压, 输入输出电压关系。 320.....	11
√ 试分析全桥式变换器的工作原理。 321Δ	12
√ 开关电源与线性稳压电源相比有何优缺点。 322.....	12
√ 无源逆变电路和有源逆变电路有何不同? 41.....	12
√ 逆变电路与变频电路有什么区别? 42.....	12
√ 换流方式有几种? 各有什么特点? 43.....	13
√ 什么是电压型逆变电路? 有何特点? 44.....	13
√ 电压型逆变电路中反馈二极管的作用是什么? 45.....	14
√ 说出总谐波畸变因数 THD 的含义。 46.....	14
√ 什么是异步调制? 什么是同步调制? 两者各有何特点? 分段同步调制有什么优点? 48.14	
√ 什么是 SPWM 波形的规则化采样法? 与自然采样法相比规则采样法有什么优点? 4915	
√ PWM 调制有哪些方法? 它们各自的出发点是什么? 410.....	15

√ 电流跟踪 SPWM 逆变有哪几种控制方式? 411	15
√ 三相 SPWM 逆变电路采用什么样的控制方法可以提高直流电压利用率? 415	16
√ SVPWM 控制方法中, 直流电压利用率(线电压峰值与直流电压的比值)最大值为多少? 416	16
√ 逆变电路多重化、多电平化的目的是什么? 三电平逆变电路有什么突出优点? 417 △	16
√ 单相全波可控整流电路, 分别给电阻性负载供电和带阻感负载供电时, 如果流过 负载电 流的平均值相同, 试问哪种情况下通过负载的电流有效值更大? 54.....	16
√ 在三相半波可控整流电路中, 如果触发脉冲出现在自然换流点附近之前, 能否进行换流? 可能会出现什么情况? 58	16
√ 三相半波可控整流电路, 如果 a 相的触发脉冲消失, 试绘出电阻性负载和电感性负载下 的直流电压 u_d 波形。 59	17
√ 单相桥式全控整流电路、三相桥式全控整流电路中, 当负载分别为电阻负载或电感负载时, 要求的晶闸管移相范围分别是多少? 515.....	17
√ 三相桥式可控整流电路, 六个晶闸管分别由六个同步信号为锯齿波的触发电路驱 动, 某 个触发电路的同步信号与对应晶闸管的阳极电压之间的相位有什么关系? 516	17
√ 三相半波逆变电路, 当 $\alpha > \pi/2$ 时, 反电动 E_M 和整流电压 U_d 均为负值, 若反电动势 $ E_M > U_d $, 电路运行情况如何?若反电动势 $ E_M < U_d $, 电路运行情况又如何? 520.....	17
√ 使变流器工作于有源逆变状态的条件是什么? 521.....	17
√ 试从电压波形图上分析, 无论何种逆变电路, 当电抗器电感量不够大时, 则在 $\alpha = \pi/2$ 时 输出直流平均电压 $U_d > 0$, 将造成被拖动直流电动机爬行(极低速转动)。 522 △	18
√ 什么是逆变失败? 如何防止逆变失败? 526.....	18
√ 结合电路原理图, 简要说明倍流整流电路的工作原理。 527 △	18
√ 结合电路原理图, 简要说明同步整流电路的工作原理。 528 △	18
√ 间接电流控制的 PWM 整流电路, 当测量的交流侧电感量与工作过程中的实际值误差较大 时, 会影响输入电流与输入电压相位差吗? 530.....	19
√ 直接电流控制的 PWM 整流电路, 当设计的交流侧电感量与工作过程中的实际值误差较大 时, 对输入电流有何影响? 531	19
√ 交流调压电路和交流调功电路有什么区别?各适合予何种负载? 611	19
√ 单相交流调压斩控电路工作原理。 6X △	20
√ 何谓软开关和硬开关? 谐振软开关的特点是什么? 71.....	20
√ 高频化的意义是什么? 为什么提高开关频率可以减小滤波器的体积和重量? 为什么提高 开关频率可以减小变压器的体积和重量? 72	20
√ 软开关电路可以分为哪几类? 73.....	20

什么是电力电子技术？ 01

答：电力电子技术是应用于电力技术领域中的电子技术；它是以利用大功率电子器件对能量进行变换和控制为主要内容的技术。国际电气和电子工程师协会（IEEE）的电力电子学会对电力电子技术的定义为：“有效地使用电力半导体器件、应用电路和设计理论以及分析开发工具，实现对电能的高效能变换和控制的一门技术，它包括电压、电流、频率和波形等方面的变换。”

电力电子技术的基础与核心分别是什么？02

答：电力电子技术的基础是电力电子器件，电力电子技术的核心是能量变换技术，并随着变换电路和控制技术的发展而发展的。

请列举电力电子技术的 3 个主要应用领域。 03

答：电力电子技术的主要应用领域有：①电源装置；②电源电网净化设备；③电机调速系统；④电能传输和电力控制；⑤新能源开发和新蓄能系统；⑥照明及其它。

电能变换电路有哪几种形式？其常用基本控制方式有哪三种类型？ 04

答：电能变换电路可分为四类：

- 1) 交流 - 直流变换电路(或称 AC - DC 整流电路)，功能为将交流电能变换成直流电能；
- 2) 直流 - 交流变换电路(或称 DC - AC 逆变电路)，功能为将直流电能变换成交流电能；
- 3) 交流 - 交流变换电路(或称 AC - AC 交流变换电路)，功能为将一种交流电压或频率变换到另一种交流电压或频率；
- 4) 直流 - 直流变换电路(或称 DC - DC 直流变换电路)，功能为将一种直流电压变换成另一种幅值或极性不同的直流电压。

常用基本控制方式主要有以下三种类型：

相控方式：用于交流电源的电力变换器，如可控整流器、有源逆变器、交流调压器、周波变换器等。在该控制方式下，控制信号的变化结果体现为触发脉冲的移相。

频控方式：用于由直流电源供电的无源逆变器。在该控制方式下，控制信号的变化结果体现为控制脉冲频率的变化。

斩控方式：用于斩波器和采用脉宽调制 PWM 的变换器。在该控制方式下，控制信号的变化结果体现为变流元件导通时间和关断时间比值的变化。

从发展过程看，电力电子器件可分为哪几个阶段？简述各阶段的主要标志。 05

答：如果以电力电子技术器件的发展为主线，可以把它分为 3 个主要发展阶段，即

- 1) “晶闸管及其应用”， 主要标志为晶闸管；
- 2) “自关断器件及其应用”， 主要标志为可关断晶闸管 GTO、大功率（巨型）晶体管 GTR、功率场效应晶体管 Power MOSFET、绝缘栅双极晶体管 IGBT 等；
- 3) “功率集成电路和智能功率器件及其应用”， 主要标志为功率集成电路 PIC 和智能功率模块 IPM。

传统电力电子技术与现代电力电子技术各自特征是什么？ 06

答：传统电力电子技术的特征：电力电子器件以半控型晶闸管为主，变流电路一般为相控型，控制技术多采用模拟控制方式。

现代电力电子技术特征：电力电子器件以全控型器件为主，变流电路采用脉宽调制型，控制技术多采用 PWM 数字控制技术。

电力电子技术的发展方向是什么? 07

答：电力电子技术的发展方向概括为以下几个方面：①新器件；②高频化与高效率；③集成化与模块化；④数字化；⑤绿色化。

按可控性分类，电力电子器件分哪几类? 11

答：按可控性分类，电力电子器件分为不可控器件、半控器件和全控器件。

电力二极管有哪些类型？各类型电力二极管的反向恢复时间大约为多少? 12

答：电力二极管类型以及反向恢复时间如下：

- 1) 普通二极管，反向恢复时间在 $5\ \mu\text{s}$ 以上。
- 2) 快恢复二极管，反向恢复时间在 $5\ \mu\text{s}$ 以下。快恢复二极管从性能上可分为快速恢复和超快速恢复二极管。前者反向恢复时间为数百纳秒或更长，后者在 $100\ \text{ns}$ 以下，甚至达到 $20\sim 30\text{ns}$ ，多用于高频整流和逆变电路中。
- 3) 肖特基二极管，反向恢复时间为 $10\sim 40\ \text{ns}$ 。

在哪些情况下，晶闸管可以从断态转变为通态？维持晶闸管导通的条件是什么? 13

答：晶闸管同时承受正向阳极电压并在门极施加触发电流（脉冲）时晶闸管才能导通，两者缺一不可。在两者条件都具备情况下，晶闸管可以从断态转变为通态。

维持导通的条件：使流过晶闸管的电流大于能保持晶闸管导通的最小电流，即维持电流。

已处于通态的晶闸管，撤除其驱动电流为什么不能关断，怎样才能使晶闸管由导通变为关断? 14

答：已处于通态的晶闸管在内部已形成强烈的正反馈，即使撤去其驱动电流，会仍然维持导通的状态。因此晶闸管一旦导通后门极将失去控制作用，门极的电压和驱动电流对管子随后的导通或关断均不起作用。

要使晶闸管由导通变为关断，可利用外加电压和外电路的作用使流过晶闸管的电流降到接近于零的某一数值以下，即降到维持电流以下，便可使导通的晶闸管关断。

根据 GTO 的关断原理，说明：GTO 和普通晶闸管同为 PNP 结构，为什么 GTO 能够通过门极控制关断，而普通晶闸管不能? 16

答：GTO 之所以能够自行关断，而普通晶闸管不能，是因为 GTO 与普通晶闸管在设计 and 工艺方面有以下几点不同：

- 1) 在设计 GTO 时使其 α_2 较大，这样，晶体管 V_{T2} 控制灵敏，使 GTO 容易关断。
- 2) 由于 GTO 的内部包含着许多共阳极的小 GTO 单元，GTO 元阴极面积小，门极和阴极间的距离短， P_2 基区的横向电阻小，可以从门极抽出更大的电流。
- 3) GTO 导通时，双晶体管模型中的 2 个晶体管共基极电流放大倍数之和 $\alpha_{12} + \alpha$ 大于 1 且近似等于 1 (1.05 左右)，因而处于临界饱和和导通状态，若要关断 GTO，可用抽出部分阳极电流的办法破坏其临界饱和状态，使 GTO 用门极负信号关断。SCR 的 $\alpha_{12} + \alpha$ 比 1 大 (大约为 1.15)，SCR 导通后处于深度饱和状态，因而用门极负脉冲不足以使 $\alpha_{12} + \alpha$ 达到小于 1 的程度，因而也就不能用门极负信号去关断阳极电流。这是 GTO 与 SCR 的一个极为重要的区别。

关于 GTR，请回答如下两个问题： 1) 描述 GTR 的二次击穿特性。 2) 为什么 GTR 在开关瞬变过程中易被击穿?有什么预防措施? 17

答： 1) 当 GTR 集电极间的电压升高至击穿电压 BU_{CE0} 时，发生一次击穿，此时集电极电流急速增加，如果有外接电阻限制集电极电流的增长，一般不会引起晶体管特性变坏；一次击穿发生时，如果对集电极电流不加限制，集电极电流继续增加，集电极间的电压陡降，就会导致破坏性的二次击穿。所以，二次击穿是在器件发生一次击穿后，在某电压和电流点产生向低阻抗区高速移动的负阻现象。

2) GTR 的安全工作区较窄，当 GTR 在工作过程中所承受的电压电流都较大时，超出安全工作区域，那么 GTR 在开关瞬变过程中易被击穿。

预防措施就是加辅助电路，确保 GTR 所承受的电压电流在安全工作区域之内。

如何防止电力 MOSFET 因静电感应引起的损坏? 18

答：电力 MOSFET 的栅极绝缘层很薄弱，容易被击穿而损坏。MOSFET 的输入电容是低泄漏电容，当栅极开路时极易受静电干扰而充上超过 $\pm 20V$ 的击穿电压，所以为防止 MOSFET 因静电感应而引起的损坏，应注意以下几点：

- 1) 一般在不用时将其三个电极短接。
- 2) 装配时人体、工作台、电烙铁必须接地，测试时所有仪器外壳必须接地。
- 3) 电路中，栅、源极间常并联齐纳二极管以防止电压过高。
- 4) 漏、源极间也要采取缓冲电路等措施吸收过电压。

比较电力 MOSFET 与 IGBT 内部结构，说明电力 MOSFET 在开关特性上的优点。 19

答： 内部结构相似之处： IGBT 内部结构包含了 MOSFET 内部结构。 内部结构不同之处： IGBT 内部结构有注入 P 区， MOSFET 内部结构则无注入 P 区。

开关特性的相似之处： IGBT 开关大部分时间由 MOSFET 运行，特性相似。

开关特性的不同之处： IGBT 的注入 P 区有电导调制效应，有少子储存现象，开关慢，所以，电力 MOSFET 开关速度快。

作为开关使用时，IGBT 有哪些优点? 110

答： IGBT 将 MOSFET 与 GTR 的优点集于一身，既有输入阻抗高、速度快、热稳定性好、电压驱动型，又具有通态压降低，高电压、大电流的优点。

试说明 IGBT、GTR、GTO 和电力 MOSFET 各自的优缺点。 112

答： IGBT 优点：开关速度高，开关损耗小，具有耐脉冲电流冲击的能力，通态压降较低，输入阻抗高，为电压驱动，驱动功率小。

缺点：开关速度低于电力 MOSFET，电压，电流容量不及 GTO。

GTR 优点：耐压高，电流大，开关特性好，通流能力强，饱和压降低。

缺点：开关速度低，为电流驱动，所需驱动功率大，驱动电路复杂，存在二次击穿问题。

GTO 优点：电压、电流容量大，适用于大功率场合，具有电导调制效应，其通流能力很强。

缺点：电流关断增益很小，关断时门极负脉冲电流大，开关速度低，驱动功率大，驱动电路复杂，开关频率低。

电力 MOSFET 优点：开关速度快，输入阻抗高，热稳定性好，所需驱动功率小且驱动电路简单，工作频率高，不存在二次击穿问题。

缺点：电流容量小，耐压低，一般只适用于功率不超过 10kW 的电力电子装置。

试分析电力电子集成技术可以带来哪些益处。智能功率模块与功率集成电路实现集成的思路有何不同？ 113

答：带来的益处：装置体积减小、可靠性提高、使用方便、维护成本低。

智能功率模块与功率集成电路实现集成的思路的不同：前者是将一系列的器件集成为一个模块来使用（封装集成），而后者则是将所有的东西都集成于一个芯片当中（芯片集成）。

IGCT 与 GTO、IGBT 相比，有哪些特点？ 114

IGCT 与 GTO、IGBT 相比，有以下几个特点：

- 1) 保留了 GTO 阻断电压高（6kV），导通电流大（6kA）的优点。
- 2) 在相同运行功率条件下，开关频率比 GTO 更高，可达到 1 kHz，开关损耗降低，约为 GTO 的一半。
- 3) 由于采用了很薄的缓冲层和可穿透发射区结构，所以通态压降小，通态损耗几乎可以忽略不计，有利于器件的保护。
- 4) GTO 关断时需要一个庞大的缓冲电路。而 IGCT 可承受很大的 du/dt 的冲击，无需缓冲电路，逆变器结构设计的比 IGBT 还要简单，与传统的 GTO 相比，元器件数减少一半以上，系统更加简单、可靠。
- 5) 器件与器件之间的开关过程一致性好，所以，可以容易地实现 IGCT 的串、并联，扩大其功率使用范围。
- 6) 电压等级高于 IGBT，现有 IGCT 的电压等级为 4.5 kV 和 6 kV。

请说出 3 种硅材料制成的电流控制电力电子器件、3 种硅材料制成的电压控制电力电子器件和 3 种碳化硅材料制成的电力电子器件。 115

答：硅材料制成的电流控制器件：SCR、GTO、GTR。

硅材料制成的电压控制器件：MOSFET、IGBT、IGCT、IEGT、SIT、SITH、MCT。

碳化硅材料制成的电力电子器件：二极管、MOSFET、GTO、IGBT、IGCT 都已经有了对应的碳化硅产品。

电力电子器件的驱动电路对整个电力电子装置影响有哪些？ 21

答：采用性能良好的驱动电路，可以使电力电子器件工作在较理想的开关状态，缩短开关时间，减少开关损耗，对装置的运行效率、可靠性和安全性都有重要意义。

驱动电路的基本任务有哪些？ 22

答：按控制目标的要求施加开通或关断的信号。对半控型器件只需提供开通控制信号。对全控型器件则既要提供开通控制信号，又要提供关断控制信号。除此之外，驱动电路一般还要提供控制电路与主电路之间的电气隔离环节，一般采用光隔离或磁隔离。

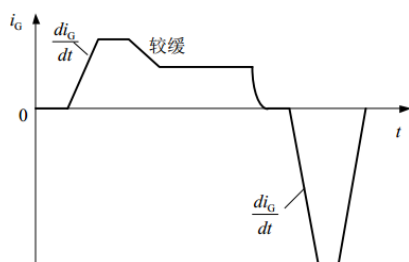
为什么要对电力电子主电路和控制电路进行电气隔离？其基本方法有哪些？ 23

答：对电力电子主电路和控制电路进行电气隔离可以提高电力电子装置的安全使用，同时防止主电路和控制电路之间的干扰，其基本方法有光隔离、磁隔离。

由晶闸管构成的主电路对触发脉冲一般要求有哪些? 24

- 1) 触发信号应有足够大的功率;
- 2) 触发脉冲的同步及移相范围;
- 3) 触发脉冲信号应有足够的宽度, 且前沿要陡;
- 4) 为使并联晶闸管元件能同时导通, 触发电路应能产生强触发脉冲;
- 5) 应有良好的抗干扰性能、温度稳定性及与主电路的电气隔离。

画出 GTO 理想的门极驱动电流波形, 并说明门极开通和关断脉冲的要求。 26



除电气隔离外, 可关断晶闸管的门极驱动电路的一般要求有:

- 1) 开通时, 驱动信号前沿要陡, 且应有足够大的功率与足够的宽度。
- 2) 可关断晶闸管关断时, 门极驱动电路应产生负电压并具有足够的灌电流能力。
- 3) GTO 关断后, 门极驱动电路应保持负电压。

说明电力场效应晶体管栅极驱动电路的一般要求。 27

答: 栅极驱动电路的一般要求有:

- 1) 为快速建立驱动电压, 要求驱动电路具有较小的输出电阻。
- 2) 开通时栅源极驱动电压一般取 10~15V。
- 3) 在关断时, 要求施加一定幅值的负驱动电压, 有利于减小关断时间和关断损耗。
- 4) 在栅极串入一只低值电阻可以减小寄生振荡。

GTO、GTR、电力 MOSFET 和 IGBT 的驱动电路各有什么特点? 28

答: IGBT 驱动电路的特点是: 驱动电路具有较小的输出电阻, IGBT 是电压驱动型器件, IGBT 的驱动多采用专用的混合集成驱动器。

GTR 驱动电路的特点是: 驱动电路提供的驱动电流有足够陡的前沿, 并有一定的过冲, 这样可加速开通过程, 减小开通损耗, 关断时, 驱动电路能提供幅值足够大的反向基极驱动电流, 并加反偏截止电压, 以加速关断速度。

GTO 驱动电路的特点是: GTO 要求其驱动电路提供的驱动电流的前沿应有足够的幅值和陡度, 且一般需要在整个导通期间施加正门极电流, 关断需施加负门极电流, 幅值和陡度要求更高, 其驱动电路通常包括开通驱动电路, 关断驱动电路和门极反偏电路三部分。电力 MOSFET 驱动电路的特点: 要求驱动电路具有较小的输入电阻, 驱动功率小且电路简单。

电力电子器件过电压产生的原因有哪些? 29

答: 电力电子器件过电压产生的原因有外因和内因 2 方面, 外因包括操作过电压和雷击过电压; 内因包括换相过电压和关断过电压。

发生过电流的原因有哪些? 210

答：当晶闸管变流装置内部某一器件击穿或短路、触发电路或控制电路发生故障，外部出现过载重载、直流侧短路、可逆传动系统产生环流或逆变失败，以及交流电源电压过高或过低、缺相等状况时，均可引起装置其他元件的电流超过正常工作电流，即出现过电流。

电力电子器件过电压保护和过电流保护各有哪些主要方法? 211

答：过电压保护主要方法有避雷器过电压抑制、各种 RC 过电压抑制、非线性元件过电压抑制等方法。

过电流保护主要方法有电路过流保护、快速熔断器过流保护、快速断路器过流保护和过流继电器过流保护等方法。

电力电子器件过热保护有哪些主要方法? 212

答：电力电子器件过热保护主要方法有：

- 1) 降低损耗。
- 2) 减小热阻。 1) 一方面减小接触热阻 $R_{\theta cs}$ 。 2) 另一方面减小散热器热阻 $R_{\theta sa}$ 。
- 3) 加强散热。电力电子装置常用冷却方式分为四种：自冷、风冷、液冷和沸腾冷却。

电力电子器件缓冲电路是怎样分类的? 全控器件缓冲电路的主要作用是什么? 试分析 RDC 缓冲电路中各元件的作用。 213

答：电力电子器件缓冲电路有不同的分类方法。缓冲电路又称为吸收电路，通常可以分为关断缓冲电路和开通缓冲电路。关断缓冲电路又称为 du/dt 抑制电路，开通缓冲电路又称为 di/dt 抑制电路。将关断缓冲电路和开通缓冲电路结合在一起，称为复合缓冲电路。还可以分类方法：缓冲电路中储能元件的能量如果消耗在其吸收电阻上，则被称为耗能式缓冲电路；如果缓冲电路能将其储能元件的能量回馈给负载或者电源，则被称为馈能式缓冲电路，或称为无损吸收电路。

全控器件缓冲电路分为关断、开通缓冲电路。全控器件关断缓冲电路的主要作用是抑制过电压或 du/dt ，全控器件开通缓冲电路的主要作用是抑制过电流或 di/dt 。

RDC 缓冲电路中电阻 R 的作用是为电容 C 提供释放能量的通路并消耗 C 上的能量，二极管 D 的作用是在器件关断、电压上升时，使器件电压嵌位在电容 C 上的电压，电容 C 的作用是在器件关断时抑制过电压和 du/dt 。

在高压变流装置中，晶闸管串联使用以提高耐压，其均压措施有哪些? 215

答：晶闸管串联运行时应有相应的均压措施，均压包含静态和动态。静态均压措施包括：选用参数和特性尽量一致的器件；采用电阻 R_B 均压， R_B 的阻值应比器件阻断时的正、反向电阻小得多。动态均压措施包括：选择动态参数和特性尽量一致的器件；用 $R_D C_D$ 并联支路作动态均压；还有采用门极强脉冲触发可以显著减小器件开通时间的差异。

电力 MOSFT、NPT 型 IGBT 易于并联使用的原因是什么?并联使用时还应注意哪些事项? 216

答：电力 MOSFT、NPT 型 IGBT 易于并联使用的原因在于电力 MOSFT 的通态电阻具有正温度系数特性，NPT 型 IGBT 的通态压降具有正温度系数特性。

MOSFET 或 IGBT 并联使用时，多个管子型号、厂家一致，连线尽量做到一致，同时主

回路各模块布线电阻和电感一致。即使这样， n 个相同等级的模块并联时，允许的电流应小于 nI_{CN} （ I_{CN} 为额定值），因为每个开关管之间的电流不可能完全均衡，所以，应适当降低允许值。

(其它基本概念—比较杂)、电力电子器件工作状态、开关损耗、通态损耗、常用的器件、串并联、开关速度、器件内部（PNPN 结构，MOSFET 与 IGBT），晶闸管各电流名称、常用开关管的名称、晶闸管触发电路各环节名称（脉冲宽度、锯齿宽度、移相范围）以及要求。其它器件触发电路及其方式，另外，如贝克钳位、栅极电阻、电压值 217

时间比控制有哪三种控制方式？ 31

答：时间比控制主要有脉冲频率调制（PFM）、脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation - PWM）及混合调制三种控制方式。

试述脉冲宽度调制（PWM）基本原理。 32

答：脉宽调制是目前电能变换中最重要的变换技术，其基本原理内容为：冲量相等而形状不同的 PWM 波（或窄脉冲）加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同。

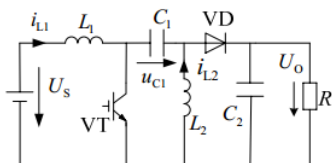
结合原理图，简述降压斩波电路的工作原理。 33

答：降压斩波器的原理是：在一个控制周期中，让 VT 导通一段时间 t_{on} ，由电源 E 向 L 、 R 供电，在此期间， $u_o = U_s$ 。然后使 VT 关断一段时间 t_{off} ，此时电感 L 通过二极管 VD 向负载 R 供电， $u_o = 0$ 。一个周期内的平均电压 $U_o = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} U_s$ 。输出电压小于电源电压，起到降压的作用。

分别简述 Sepic 变换电路与 Zeta 变换电路的工作原理，并写出输入输出电压关系。 314

答：Sepic 变换电路由电感 L_1 和 L_2 、电容 C_1 、开关管 VT、二极管 VD、输出侧电容 C_2 和负载 R 、输入电源 U_s 构成。当 VT 处于通态时， U_s 、 L_1 、VT 构成一个回路， C_1 、VT、 L_2 也构成一个回路同时导电， L_1 和 L_2 贮能，通过电感的电流上升。

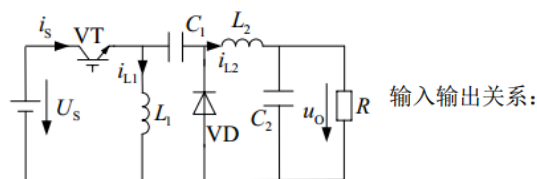
当 VT 处于断态时， U_s 、 L_1 、 C_1 、VD、负载构成一个回路， L_2 、VD、负载也构成一个回路，两个回路同时导电，此阶段 U_s 通过 L_1 既向负载供电，同时也向 C_1 充电，其中 C_1 上贮存的能量在 VT 处于导通时向 L_2 转移。



输入输出关系：
$$\frac{U_o}{U_s} = \frac{\rho}{1-\rho}$$

Zeta 斩波电路由电感 L_1 和 L_2 、电容 C_1 、开关管 VT、二极管 VD、输出侧电容 C_2 和负载 R 、输入电源 U_s 构成。在 VT 处于通态期间，电源 U_s 经开关 VT 向电感 L_1 贮能。同时， U_s 和电容 C_1 共同向负载 R 供电，并向 C_2 充电。VT 关断后， L_1 、 C_1 、

VD 构成振荡回路， L_1 的能量转移至 C_1 ，同时， C_2 向负载供电， L_2 的电流则经负载并通过 VD 续流。 L_1 能量全部转移至 C_1 上之后，VD 关断， C_1 经 L_2 向负载供电。



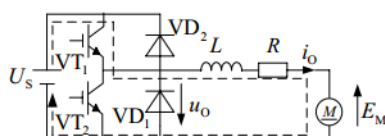
$$\frac{U_o}{U_s} = \frac{\rho}{1-\rho}$$

分析图 3-21a) 所示的电流可逆斩波电路，并结合图 3-21b 的波形，绘制出各个阶段电流通路的路径并标明电流方向。 315

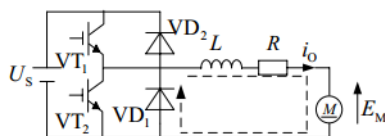
答：在该电路中， VT_1 和 VD_1 构成降压斩波电路，由电源向直流电动机供电，电动机为电动运行，工作于第一象限； VT_2 和 VD_2 构成升压斩波电路，把直流电动机的动能转变为电能反馈到电源，使电动机作再生制动运行，工作于第二象限。

各阶段器件导通情况及电流路径等如下：

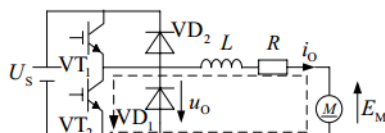
VT_1 导通，电源向负载供电：



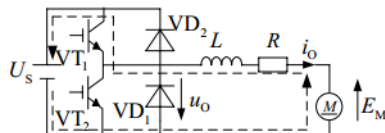
VT_1 关断， VD_1 续流：



VT_2 导通， L 上蓄能：



VT_2 关断， VD_2 导通，向电源回馈能量



多相多重斩波电路有何优点？ 316

答：总输出电流最大脉动率与相数的平方成反比，电流脉动率降低；如果各电感量相同，总的输出电流脉动幅值降低；如果各电感量相同，电源侧的电流谐波分量显著减小；当要求总输出电流脉动率相同时，所需平波电抗器总重量大为减轻；多相多重斩波电路还具有备用功能，各斩波电路单元可互为备用，万一某一斩波单元发生故障，其余单元可以继续运行，使得总体的可靠性提高。

为什么正激变换器需要磁场复位电路？ 317

正激变换器在开关 VT 开通后，变压器的原边电流 i_{w1} 由两部分构成，一部分是副边电流的折算值，另一部分是激磁电流 i_m ，激磁电流 i_m 随时间线性增长。线圈通过的是单向脉动激磁电流，如果没有磁场复位电路，剩余磁通的累加可能导致磁场饱和。磁场饱和使开关导通时电流很大；断开时使电压过高，导致开关器件的损坏。所以，一方面限制开关管持续导通时间，另一方面必须设法使激磁电流 i_m 在 VT 关断后到下一次再开通的时间内降回零，这一过程称为变压器的铁芯磁场复位。

试分析全桥，半桥和推挽电路中的开关和整流二极管在工作时承受的最大电压，输入输出电压关系。 320

1) 全桥电路

开关在工作时承受的最大电压 $u_T = U_s$ 。

按书图3-31的原理图，整流二极管在工作时承受的最大电压 $u_{DD} = \frac{N_2}{N_1} U_s$ 。

输入输出电压关系：滤波电感电流连续时 $\frac{U_o}{U_s} = \frac{N_2}{N_1} \frac{2t_{on}}{T_s}$ ，在负载为零的极限情况下

$$U_o = \frac{N_2}{N_1} U_s。$$

2) 半桥电路

开关在工作时承受的最大电压 $u_T = U_s$ 。

按书图3-29的原理图，整流二极管在工作时承受的最大电压 $u_{DD} = \frac{N_2}{2N_1} U_s$ 。

输入输出电压关系：滤波电感电流连续时 $\frac{U_o}{U_s} = \frac{N_2}{N_1} \frac{t_{on}}{T_s}$ ，在负载为零的极限情况下

$$U_o = \frac{N_2}{N_1} \frac{U_s}{2}。$$

3) 推挽电路

开关在工作时承受的最大电压 $u_T = 2U_s$ 。

按书图3-31的原理图，整流二极管在工作时承受的最大电压 $u_{DD} = N_2 U_s / N_1$ 。

输入输出电压关系：滤波电感电流连续时 $\frac{U_o}{U_s} = \frac{N_2}{N_1} \frac{2t_{on}}{T_s}$ ，在负载为零的极限情况下

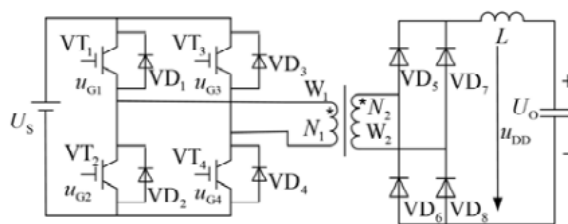
$$U_o = \frac{N_2}{N_1} U_s。$$

试分析全桥式变换器的工作原理。321

当 u_{G1} 与 u_{G4} 为高电平, u_{G2} 和 u_{G3} 为低电平时, 开关管 VT_1 和 VT_4 导通、 VT_2 和 VT_3 截止, $u_{T2} = u_{T3} = U_s$, 变压器建立磁化电流, 磁通密度正向增加并向负载传递能量, 副边 W_2 绕组感应电势上正下负, 二极管 VD_5 和 VD_8 导通、 VD_6 和 VD_7 截止, u_{DD} 电压约为 $N_2 U_s / N_1$, 电感 L 上的电流 i_L 上升, 开关管 VT_1 、 VT_4 通过的电流为 $N_2 i_L / N_1$ 。

当 u_{G1} 与 u_{G4} 为低电平, u_{G2} 和 u_{G3} 为高电平时, 开关管 VT_2 和 VT_3 导通、 VT_1 和 VT_4 截止, $u_{T1} = u_{T4} = U_s$, 在此期间变压器建立反向磁化电流, 也向负载传递能量, 这时铁芯工作在 B-H 磁滞回线中的磁通密度减小然后反向增加, 匝数为 N_2 的副边 W_2 绕组感应电势下正上负, 二极管 VD_6 和 VD_7 导通、 VD_5 和 VD_8 截止, u_{DD} 电压约为 $N_2 U_s / N_1$, 电感 L 上的电流 i_L 上升。在 VT_1 、 VT_4 导通期间 (或 VT_2 和 VT_3 导通期间), 施加在一次绕组 W_1 上的电压约等于输入电压 U_s 。

当 4 个 IGBT 都关断时, 变压器绕组 W_1 和 W_2 中的电流为零, 一次绕组上是没有施加电压的, 二次绕组上电压为 0, u_{DD} 电压为 0。假设 $VD_5 \sim VD_8$ 通态电阻相等, 根据磁平衡原理, 各分担一半的电感电流, 电感 L 的电流 i_L 逐渐下降。



开关电源与线性稳压电源相比有何优缺点。322

开关稳压电源的优点有: 体积小、重量轻、效率高、自身抗干扰性强、输出电压范围宽、模块化。开关电源的主要缺点: 由于逆变电路中会产生高频电压, 对周围设备有一定的干扰, 输出电压存在纹波。线性电源的优点有: 工作在线性状态, 对周围设备干扰小, 输出电压无高频纹波; 缺点有: 工作效率低、发热量较大、体积大、重量重。

无源逆变电路和有源逆变电路有何不同? 41

答: 两种电路的不同主要是: 当逆变电路的交流侧接电网 (源), 电网 (源) 成为负载, 在运行中将直流电能变换为交流电能并回送到电网 (源) 中去, 称为有源逆变。当逆变电路交流侧接负载, 在运行中将直流电能变换为某一频率或可调频率的交流电能供给交流负载, 称为无源逆变。

逆变电路与变频电路有什么区别? 42

答: 通常所说的变频电路与逆变电路有所不同, 变频电路分为交-交变频和交-直-交变频两种。交-直-交变频由交-直变换 (整流) 和直-交变换 (逆变) 两部分组成, 后一部分是逆变。

换流方式有哪几种？各有什么特点？ 43

答：换流方式有 4 种：

器件换流：利用全控器件的自关断能力进行换流。

电网换流：电网提供换流电压的换流方式称为电网换流。将负的电网电压施加在欲关断的晶闸管上并保持一定时间即可使其关断。这种换流方式主要适用于半控型器件，不需要为换流添加任何元件，不需要器件具有门极可关断能力。这种换流方式不适用于没有交流电网的无源逆变电路。

负载换流：采用负载换流时，要求负载电流的相位必须超前于负载电压的相位，即负载为电容性负载，且负载电流超前电压的时间应大于晶闸管的关断时间，即能保证该导通晶闸管可靠关断，触发导通另一晶闸管，完成电流转移。

强迫换流：设置附加换流电路，给欲关断的晶闸管强迫施加反向电压换流称为强迫换流。通常是利用附加电容上的能量实现，也称电容换流。

上述四种换流方式，器件换流适用于全控型器件，其余三种方式针对晶闸管。器件换流和强迫换流属于自换流，电网换流和负载换流属于外部换流。

什么是电压型逆变电路？有何特点？ 44

答：按照逆变电路直流侧电源性质分类，直流侧是电压源的逆变电路称为电压型逆变电路，直流侧为电压源的逆变电路称为电压型逆变电路。电压型逆变电路的特点有：

1) 直流侧为电压源或并联大电容，直流侧电压基本无脉动。

2) 输出电压为矩形波，输出电流因负载阻抗不同而不同。

3) 阻感负载时需提供无功功率。为了给交流侧向直流侧反馈的无功能量提供通道，逆变桥各桥臂并联反馈二极管。

直流侧为电流源的逆变电路称为电流型逆变电路。电流源型逆变电路采用大电感作储能元件，电流源型逆变器有如下特点：

1) 直流侧为电流源或串联大电感，直流侧电流基本无脉动。

2) 直流回路串以大电感，储存无功功率，构成了逆变器高阻抗的电源内阻特性（电流源特性），即输出电流波形接近矩形，而输出电压波形与负载有关，在正弦波基础上叠加换流电压尖峰。

3) 由于直流环节电流不能反向，只有改变逆变器两端直流电压极性来改变能量流动方向并反馈无功功率，无需设置无功二极管作为反馈通道。

电压型逆变电路中反馈二极管的作用是什么？ 45

答：在电压型逆变电路中，当交流侧为阻感负载时需要提供无功功率，直流侧电容起缓冲无功能量的作用。为了给交流侧向直流侧反馈的无功能量提供，电压型逆变桥各臂都并联了反馈二极管。当输出交流电压和电流的极性相同时，电流经电路中的可控开关器件流通，而当输出电压电流极性相反时，由反馈二极管提供电流通道。

在电流型逆变电路中，直流电流极性是一定的，无功能量由直流侧电感来缓冲。当需要从交流侧向直流侧反馈无功能量时，电流并不反向，依然经电路中的可控开关器件流通，因此不需要并联反馈二极管。

说出总谐波畸变因数 THD 的含义。 46

答：谐波畸变因数 THD ，在电气工程学科中表征波形相对正弦波畸变程度的一个性能参数。其定义为全部谐波含量均方根值与基波均方根值之比，用百分数表示。

总谐波畸变因数为

$$THD = \frac{1}{U_{AB1m}} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{ABnm}^2} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2}$$

式中， $C_n = 1/n$ 为各次谐波相对于基波幅值的标么值。

什么是异步调制？什么是同步调制？两者各有何特点？分段同步调制有什么优点？ 48

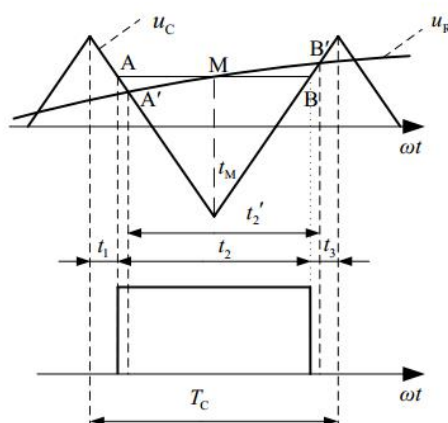
答：载波比 N 等于常数，变频时使载波和信号波保持同步的方式称为同步调制。同步调制的主要特点是：在同步调制方式中，信号波频率变化时载波比 N 不变，信号波一个周期内输出的脉冲数是固定的，脉冲相位也是固定的，输出波形谐波较小。缺点是：载波频率过低时由调制带来的谐波不易滤除。而当逆变电路输出频率很高时，同步调制时的载波频率 f_c 会过高，使开关器件难以承受。

载波信号和调制信号不保持同步的调制方式称为异步调制。在异步调制方式中，通常保持载波频率 f_c 固定不变，因而当信号波频率 f 变化时，载波比 N 是变化的。异步调制的主要优点是载波频率 f_c 可以保持固定不变，输出波形的谐波容易滤除，缺点是：在信号波的半个周期内，PWM 波的脉冲个数不固定，相位也不固定，正负半周期的脉冲不对称，半周期内前后 $1/4$ 周期的脉冲也不对称。输出波形谐波较大。

分段同步调制是把逆变电路的输出频率划分为若干段，每个频段的载波比一定，不同频段采用不同的载波比。其优点主要是，在高频段采用较低的载波比，使载波频率不致过高，可限制在功率器件允许的范围内。而在低频段采用较高的载波比，以使载波频率不致过低而对负载产生不利影响。

什么是 SPWM 波形的规则化采样法？与自然采样法相比规则采样法有什么优点？ 49

答：SPWM 波形的规则化取样法是指信号为正弦波，以规则时间点对信号波进行取样来计算脉冲宽度的 PWM 波形生成方法，规则取样法也称规则采样法。其基本思路是：取三角波载波两个正峰值之间为一个采样周期。使每个 PWM 脉冲的中点和三角波一周期的中点（即负峰点）重合，在三角波的负峰时刻对正弦信号波采样而得到正弦波的采样值，并认为信号波在该三角波周期中幅值不变，均等于该采样值，该采样值水平线与三角波载波的交点即为功率开关器件通断的时刻，即可计算 PWM 的宽度。用规则采样法得到脉冲宽度代替正弦波与三角载波交点的脉冲宽度，误差很小，如图所示。



优点：比起自然采样法，规则采样法的计算非常简单，计算量大大减少，而效果接近自

然采样法，得到的 SPWM 波形仍然很接近正弦波，克服了自然采样法难以在实时控制中在线计算，在工程中实际应用不多的缺点。

PWM 调制有哪些方法？它们各自的出发点是什么？ 410

答：PWM 调制方法有两种：一是采样法，二是特定谐波消去法。

1) 采样法，包括自然采样法和规则采样法，其中规则采样法有对称规则采样法和不对称规则采样法。以一个正弦波为基准波（称为调制波），用一系列等幅的三角波（称为载波）与基准正弦波相交，由它们的交点确定逆变器的开关模式。采样法是为了使输出的 PWM 波形接近于信号波。

2) 指定谐波消去法。该方法的出发点是为了消去指定的低次谐波。

电流跟踪 SPWM 逆变有哪几种控制方式？ 411

答：电流跟踪 SPWM 逆变有 3 种控制方式：①电流滞环控制方式；②三角形比较方式；③定时比较方式。

三相 SPWM 逆变电路采用什么样的控制方法可以提高直流电压利用率？ 415

答：对于三相 SPWM 逆变电路，采用如下 2 种控制方法可以提高直流电压利用率（1）采用梯形波调制方法的思路为：采用梯形波作为调制信号，当梯形波幅值和三角波幅值相等时，梯形波所含的基波分量幅值超过了三角波幅值，相当于 $m_a > 1$ 的过调制状态，可有效提高直流电压利用率。（2）还可以采用线电压控制方式，即在相电压调制信号中叠加 3 的倍数次谐波及直流分量等，同样可以有效地提高直流电压利用率。

SVPWM 控制方法中，直流电压利用率（线电压峰值与直流电压的比值）最大值为多少？ 416

答：SVPWM 中电压矢量幅值 U_s 的最大值等于 $U_d / \sqrt{2}$ ，三相正弦波线电压有效值为 $U_d / \sqrt{2}$ 等效，线电压峰值为 U_d ，直流电压利用率为 1。

逆变电路多重化、多电平化的目的是什么？三电平逆变电路有什么突出优点？ 417

答：逆变电路多重化的目的之一是使总体上装置的功率等级提高，二是可以改善输出电压的波形。因为无论是电压型逆变电路输出的矩形电压波，还是电流型逆变电路输出的矩形电流波，都含有较多谐波，对负载有不利影响，采用多重逆变电路，可以把几个矩形波组合起来获得接近正弦波的波形。

多电平化的目的是使逆变电路的相电压输出更多种电平，不仅使逆变器可以承受更高的电压，而且可以使其波形更接近正弦波，这是逆变电路多电平化的目的。

三电平逆变电路的突出优点是每个主开关器件关断时所承受的电压仅为直流侧电压的一半。因此，这种电路特别适合于高压大容量的应用场合。

单相全波可控整流电路，分别给电阻性负载供电和带阻感负载供电时，如果流过负载电流的平均值相同，试问哪种情况下通过负载的电流有效值更大？ 54

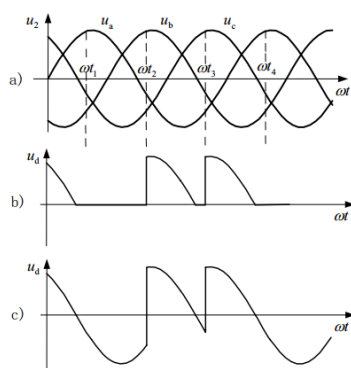
答：电阻性负载的电流有效值大些，带阻感负载的电流有效值小一些。由于具有电感，当其电流增大时，在电感上会产生感应电动势，抑制电流脉动，电流波形平直，平均值相同时，其电流有效值更小，相反，电阻负载时，电流波形波动较大，平均值相同时有效值大。

在三相半波可控整流电路中，如果触发脉冲出现在自然换流点附近之前，能否进行换流？可能会出现什么情况？ 58

答：触发脉冲出现在自然换流点附近之前，不能换流。

如果三个触发脉冲全部出现在自然换流点附近之前，输出电压为 0，如果其中一个触发脉冲全部出现在自然换流点附近之前，该相无输出电压。

三相半波可控整流电路，如果 a 相的触发脉冲消失，试绘出电阻性负载和电感性负载下的直流电压 u_d 波形。 59



单相桥式全控整流电路、三相桥式全控整流电路中，当负载分别为电阻负载或电感负载时，要求的晶闸管移相范围分别是多少？ 515

答：单相桥式全控整流电路，当负载为电阻负载时，要求的晶闸管移相范围是 $0 \sim 180^\circ$ ，当负载为电感负载时，要求的晶闸管移相范围是 $0 \sim 90^\circ$ 。

三相桥式全控整流电路，当负载为电阻负载时，要求的晶闸管移相范围是 $0 \sim 120^\circ$ ，当负载为电感负载时，要求的晶闸管移相范围是 $0 \sim 90^\circ$ 。

三相桥式可控整流电路，六个晶闸管分别由六个同步信号为锯齿波的触发电路驱动，某个触发电路的同步信号与对应晶闸管的阳极电压之间的相位有什么关系？ 516

答：共阴极组的晶闸管，哪个阳极电位最高时，那个相应的晶闸管应触发导通；共阳极组的晶闸管，哪个阳极电位最低时，那个相应的晶闸管应触发导通，同步信号为锯齿波的触发电路驱动，触发电路的同步信号与对应晶闸管的阳极电压之间的相位相差 180° 。

三相半波逆变电路，当 $\alpha > \pi/2$ 时，反电动 E_M 和整流电压 U_d 均为负值，若反电动势 $|E_M| > |U_d|$ ，电路运行情况如何？若反电动势 $|E_M| < |U_d|$ ，电路运行情况又如何？ 520

答： $\alpha > \pi/2$ 时，反电动 E_M 和整流电压 U_d 均为负值。

若反电动势 $|E_M| > |U_d|$ ，电路运行于逆变状态

若反电动势 $|E_M| < |U_d|$ ，电路不满足逆变条件，为待逆变状态。

使变流器工作于有源逆变状态的条件是什么？ 521

答：条件有两个：

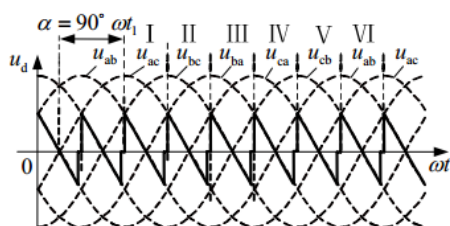
①直流侧要有电动势，其极性须和晶闸管的导通方向一致，其值应大于变流电路直流侧的平均电压；

②要求晶闸管的控制角 $\alpha > \pi/2$ ，使 U_d 为负值。

试从电压波形图上分析，无论何种逆变电路，当电抗器电感量不够大时，则在 $\alpha=\pi/2$ 时输出直流平均电压 $U_d > 0$ ，将造成被拖动直流电动机爬行（极低速转动）。 522

答：如果 L_d 足够大，电流连续，则 $\alpha=\pi/2$ ，正负面积相等， $U_d=0$ 。

从下面三相桥式电路输出电压波形图上看，如果 L_d 不够大，则电流断续，出现负面积小于正面积现象，故 $U_d \neq 0$ ，但输出电压值很小，如果负载为直流电机，则电机速度很低，造成直流电机爬行。



什么是逆变失败？如何防止逆变失败？ 526

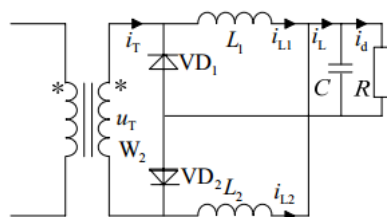
答：逆变运行时，一旦发生换流失败，外接的直流电源就会通过晶闸管电路形成短路，或者使变流器的输出平均电压和直流电动势变为顺向串联，由于逆变电路内阻很小，形成很大的短路电流，称为逆变失败或逆变颠覆。

防止逆变失败的方法有：采用精确可靠的触发电路；使用性能良好的晶闸管；保证交流电源的质量；留出充足的换向裕量角等。

结合电路原理图，简要说明倍流整流电路的工作原理。 527

答：当 u_T 处于正半周时， VD_1 截止， VD_2 导通，此时 L_1 充电， L_2 放电，此时二次侧有两个电流回路： $L_1-R-VD_2-L_1$ ； $L_2-R-VD_2-L_2$ 。由于 L_1 与 L_2 电感几乎相等，所以 i_{L1} 与 i_{L2} 波形有相位差但形状和大小基本相等，当电感较大，电流波形波动较小时， $i_L = i_{L1} + i_{L2} \approx 2i_{L1}$ ；

负半周期与正半周期相似。利用两电感并联相互交替充放电实现负载电流加倍的目的。



倍流不控整流电路

结合电路原理图，简要说明同步整流电路的工作原理。 528

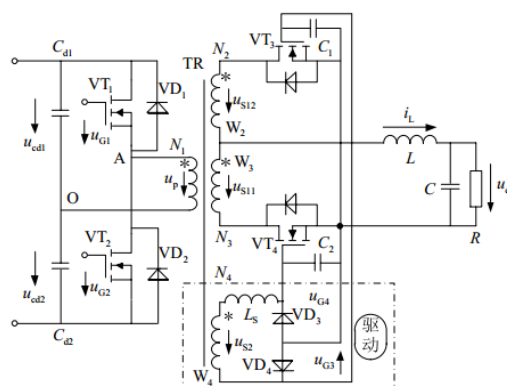
答：在 $u_{S11}=u_{S12}$ 输出正电压，处于正半周期时，此时绕组 W_4 输出正电压 $u_{S2}=U_{S2m}$ ，所

以辅助绕组电流回路为 $W_4-L_3-C_2-VD_4-W_4$ ，电容 C_2 充电， VT_4 导通 VT_3 截止，二次回路中 i_L 在 u_{S11} 作用下线性增长并为负载提供能量。

而当 $u_{S11}=u_{S12}=0$ 时，电容 C_2 沿 L_3 和 W_4 向 C_1 放电（绕组 W_4 输出电压 $u_{S2}=0$ ，可忽略），直至两者电荷平衡，当 $C_2=C_1$ ，此电压值大于 MOSFET 的开启电压， VT_3 和 VT_4 导通， L 通过 VT_3 和 VT_4 续流。

负半周期与正半周期类似。

一方面整流电流通过MOSFET而不是二极管，另一方面MOSFET的导通关断是根据交流波形同步进行的，故称为同步整流。



间接电流控制的 PWM 整流电路，当测量的交流侧电感量与工作过程中的实际值误差较大时，会影响输入电流与输入电压相位差吗？ 530

答：会影响输入电流与输入电压相位差。采用间接电流控制时，电压向量关系为

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_2 - \dot{U}_L$$

在信号运算过程中用到电路参数 L ，当 L 的运算值和实际值有误差时，会影响 \dot{U}_L ，也影响了 \dot{U}_{AB} 的计算值。根据 \dot{U}_{AB} 构成的输入侧PWM参考电压的幅值与相位同样受到影响，从而影响输入电流与输入电压的相位差。

直接电流控制的 PWM 整流电路，当设计的交流侧电感量与工作过程中的实际值误差较大时，对输入电流有何影响？ 531

答：该控制方法是让实际电流跟踪给定电流，电路参数 L 的大小对输入电流基波几乎无影响，对输入电流的谐波有较小影响。主要表现在：实际电感很大时，电流的变化率较小，滞环控制输出切换频率变小，即PWM频率降低；相反，实际电感很小时，电流的变化率较大，滞环控制输出切换频率变大，即PWM频率增加。当设计的交流侧电感量与工作过程中的实际值误差较大时，对输入电流的影响主要体现在高次谐波上。

交流调压电路和交流调功电路有什么区别？各适合于何种负载？ 611

答：交流调压电路和交流调功电路的电路形式完全相同，二者的区别在于控制方式不同。

交流调压电路是在交流电源的每个周期对输出电压波形进行控制。而交流调功电路是将负载与交流电源接通几个周波，再断开几个周波，通过改变接通周波数与断开周波数的比值来调节负载所消耗的平均功率。

交流调压电路是通过改变电压波形来实现调压的，因此输出的电压波形不再是完整的正弦波，谐波分量较大。从调压器输入端所观察到的调压器及其负载的总体功率因数也随着输出电压的降低而降低。但这种交流调压器控制方便、体积小、投资省，因此广泛应用于需调温的工频加热、灯光调节及风机、泵类负载的异步电机调速等场合。

交流调功电路一般用于电炉调温等交流功率调节的场合，由于控制对象的时间常数大，没有必要对交流电源的每个周期进行频繁控制。

单相交流调压斩控电路工作原理。 6X

何谓软开关和硬开关？谐振软开关的特点是什么？ 71

答：硬开关：硬开关指的是电力电子器件在承受电压或电流应力条件下的开关行为。在功率开关的开通和关断过程中，电压和电流的变化比较大，产生开关损耗和噪声也比较大，开关损耗随着开关频率的提高而增加，导致电路效率下降，开关噪声给电路带来严重的电磁干扰，影响自身和周边的电子设备的正常工作。

软开关：在硬开关电路的基础上，加入电感、电容等谐振器件，在开关转换过程中引入谐振过程，开关在其两端的电压为零时导通，或使流过开关器件的电流为零时关断，是的开关条件得以改善，降低硬开关的开关损耗和开关噪声，从而提高了电路的效率。

谐振软开关的特点：实现了零电压开通、零电流关断、软开通、软关断；减少开关损耗，有助于提高开关频率；解决由硬开关引起的电磁干扰问题，有利于电力电子装置的小型化。

高频化的意义是什么？为什么提高开关频率可以减小滤波器的体积和重量？为什么提高开关频率可以减小变压器的体积和重量？ 72

答：高频化可以减小滤波器的参数，并使变压器小型化，从而有效的降低装置的体积和重量。使装置小型化、轻量化是高频化的意义所在。

提高开关频率，周期变短，可使滤除开关频率中谐波的电感和电容的参数变小，从而减轻了滤波器的体积和重量。

对于变压器来说，当输入电压为正弦波时， $U = 4.44fNBS$ ，当频率 f 提高时，可减小绕组匝数 N 和铁芯截面积 S 参数值，从而减小了变压器的体积和重量。

软开关电路可以分为哪几类？ 73

答：根据电路中主要的开关元件开通及关断时的电压电流状态，可将软开关电路分为零电压电路和零电流电路两大类；根据软开关技术发展的历程可将软开关电路分为准谐振电路，零开关 PWM 电路和零转换 PWM 电路。