

第七章 电力电子装置及系统的可靠性

本章首先介绍可靠性的基本概念,然后讨论提高电力电子装置及系统可靠性的主要途径及一些措施,并在讨论中顺便介绍一下电磁兼容性问题。

7.1 概 述

7.1.1 可靠性的基本概念

元件、装置及系统的可靠性是电力电子工作者、制造厂家和用户都极为关心的一个重要问题。对于重要用户(包括军用),装置和系统的可靠性指标是首先考虑的一个问题。对于一个元件、一台装置或一个系统,我们不仅要求它有满足实际需要的技术性能,同时还应当要求它能够长期稳定地工作。一个元件、一台装置或一个系统,短时期内能达到预期的性能并不困难,但长时期内达到预期目的往往是比较困难的,甚至是非常困难的。随着变流技术的普及及其地位的提高以及经济效益的增加,变流器的可靠性问题就成为一个突出的问题,引起了各界人士的广泛重视。随着信息时代的到来,人们对可靠性的重视程度又提高了一步。通常,在变流装置内部并存着强弱信号和高低压环节,同时它还受到来自电网的电磁干扰的威胁,因此装置的可靠性和电磁兼容性问题尤显突出。

上述这些问题均属可靠性的研究范围。可靠性的研究范围主要包括下面三个方面:

- (1) 可靠性数学。
- (2) 可靠性分析:失效机理及对策。
- (3) 可靠性工程:系统可靠性分析、设计评估及相关的问题(可靠性试验)。

可靠性定义:元件或系统在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力,称之为元件或系统的可靠性。对于变流装置或系统来说,其规定条件指的是环境温度、湿度和海拔高度,电磁环境,电网情况,储存条件及其它要求等。显然,这些条件变化了,其可靠性是不同的,即可靠性与规定条件密切相关。从可靠性定义可知,可靠性与技术指标是分不开的,并且随时间的推移是变化的。

当元件、装置或系统不能完成规定功能时,则称它失效。为了描述一个元件、装置或系统的可靠程度(可靠性水平高低),必须引进数量化的概念——可靠性指标。

7.1.2 常用的可靠性指标

常用的可靠性指标有可靠度、失效率 and 平均寿命等。

(一) 可靠度 $R(t)$

定义:元件或系统在规定时间内和规定的使用条件下,正常工作的概率称为它的可靠度。它是时间 t 的函数,记作 $R(t)$,亦可称之为可靠度函数。

若以 T 表示元件的寿命,则事件 $(T > t)$ 表示元件在 $[0, t]$ 时间内能正常工作,即不失

效,故有

$$R(t) = \begin{cases} P(T > t) & t \geq 0 \\ 1 & t < 0 \end{cases} \quad (7.1)$$

式(7.1)就是元件的可靠度函数。

若已知元件寿命 T 的概率密度 $f(t)$, 那么对于给定的 t , 则有

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (7.2)$$

通常元件寿命的概率分布无法事先知道, 所以 $R(t)$ 值的计算经常是通过元件的寿命试验取得的。

可靠度函数的图形如图 7.1 所示。当 $t=0$ 时, $R(t)=1$, 随着 t 的增大, $R(t)$ 随之下降, 也就是说元件的寿命随着 t 的增长, T 大于 t 的可能性不断下降。

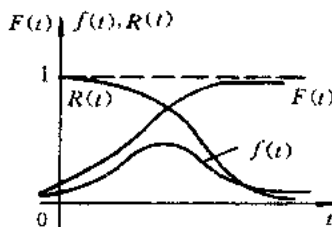


图 7.1 $R(t)$ 和 $F(t)$ 曲线

(二) 不可靠度函数 $F(t)$

事件 $(T < t)$ 表示元件的寿命小于 t , 即元件在 $[0, t]$ 时间内失效, 也就是说元件不能在 $[0, t]$ 时间内可靠工作, 所以称 $F(t) = P(T \leq t)$ 为不可靠度函数(或称失效分布函数), 也就是寿命 T 的分布函数, 故有

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t) dt \quad (7.3)$$

因为随时间 (t) 的推移, 失效的可能性在增大, 而正常工作的可能性在减少, 因此 $F(t)$ 是时间 (t) 的非减函数, 而 $R(t)$ 是时间 (t) 的非增函数。按定义显然有

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (7.4)$$

若 $F(t)$ 可微, 则得

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (7.5)$$

同理可得

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt}$$

式(7.5)表示了不可靠度函数 $F(t)$ 与概率密度 $f(t)$ 之间的关系, 已知 $f(t)$ 可求出 $F(t)$, 反之亦然。

(三) 失效率 $\lambda(t)$

元件失效率是元件一个重要的可靠性指标, 它是计算由该种元件组成的装置或系统的可靠性指标的基础数据。

1. 定义

元件在 t 时刻的失效率定义为元件在 t 时刻以前一直正常工作的条件下, 在 t 时刻以后单位时间内失效的概率, 记作 $\lambda(t)$, 可表示为

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} \quad (7.6)$$

$\lambda(t)$ 也是时间的函数。若 T 服从指数分布, 则 $\lambda(t)$ 为常数。

2. $\lambda(t)$ 与 $f(t)$, $R(t)$ 的关系

由条件概率定义,式(7.6)可变为

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[(t < T \leq t + \Delta t) \cap (T > t)]}{\Delta t P(T > t)} \quad (7.7)$$

因为

$$(t < T \leq t + \Delta t) \cap (T > t) = (t < T \leq t + \Delta t)$$

所以

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t P(T > t)} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t P(T > t)} \\ &= \frac{1}{P(T > t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (7.8)$$

根据式(7.8), $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$, 则失效率又可表示为

$$\lambda(t) = - \frac{dR(t)}{dt} \frac{1}{R(t)} \quad (7.9)$$

或

$$\lambda(t) = - \frac{d \ln R(t)}{dt} \quad (7.10)$$

两边取积分得

$$\ln R(t) = - \int_0^t \lambda(t) dt \quad (7.11)$$

或

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (7.12)$$

失效率又称危险率或风险率。显然,失效率越低,可靠性越高。 $\lambda(t)$ 的常用单位是 $10^{-5}/h$ 或 $10^{-9}/h$ (高可靠性的元件), $10^{-9}/h$ 记为 1 非特。

3. 失效类型和浴盆曲线

失效率分三种类型,反映了其不同的失效原因和特点。

(1) 早期失效型(DFR型)。这种失效类型的特点是开始时失效率高,随着时间的推移逐渐地减少,如图 7.2(a)所示。造成这种特点的主要原因是:设计和制造上的缺陷;管理不当;检验疏忽。若发现这种失效类型,应从上述原因中去寻求解决办法。例如,变流装置在运输过程中,由于散热器安装不当,造成器件损坏,引起装置早期失效;驱动电路设计不当,也会出现这种问题。

(2) 偶然失效型(CFR型)。这种失效类型的特点是,失效率 $\lambda(t)$ 与时间 t 无关,是一个常数,即

$$\lambda(t) = \lambda_0$$

如图 7.2(b)所示。这是在使用过程中因某种不可预测的随机因素造成的。例如变流系统突然遇到外界强干扰而停机或跳闸,也就是说是由于不可预测的外部条件变化引起的,它可以发生在装置工作寿命期内的任何时候。

(3) 耗损失效型(IFR型)。这种失效类型的特点是,失效率随时间的推移而变大,如图 7.2(c)所示。元件的老化、疲劳、磨损是造成这种类型失效的主要原因。例如,电力半导体器件运行的温度过高、或 di/dt 耐量留得太小,都会出现耗损失效。

(4) 浴盆曲线。一般元件,装置或系统的失效原因是多种多样的,故其失效类型也是不同的。它到底属于哪一种类型失效? 这决定于元件本身的性质以及外界条件。将上述三

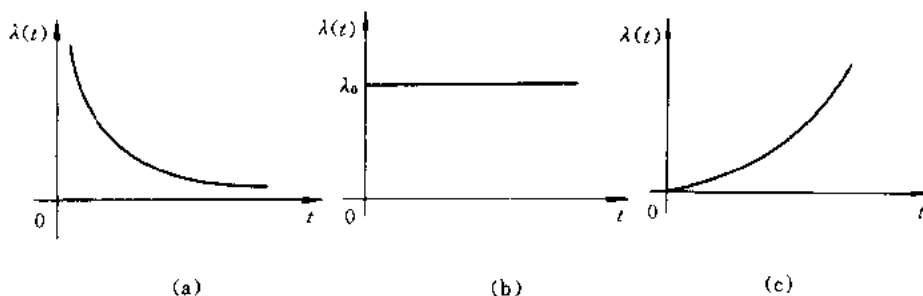


图 7.2 失效率 $\lambda(t)$ 与寿命 t 的关系类型

(a) 早期失效型; (b) 偶然失效型; (c) 耗损失效型

种失效类型组合在一起,可构成所谓形似浴盆的失效曲线,如图 7.3 所示。人的死亡率曲线(如图 7.4)以及装置或系统的失效图象很像浴盆曲线。这种装置或系统在使用初期多表现为早期失效型。当排除了所有引起早期失效的原因后,装置系统进入了偶然失效期,此时 $\lambda(t)$ 保持不变,这是装置或系统的最佳工作时期,通常希望这期间的失效率尽可能低,运行时间尽可能长。运行后期必然进入耗损失效期。对于可维修的装置或系统,若能在耗损失效的开始就进行事先维修,就能降低耗损失效率。

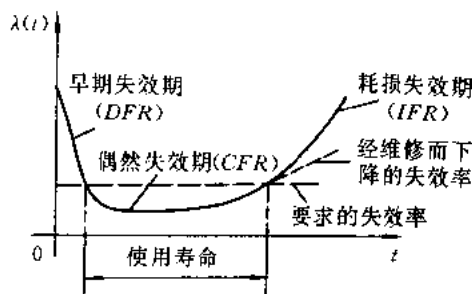


图 7.3 浴盆曲线

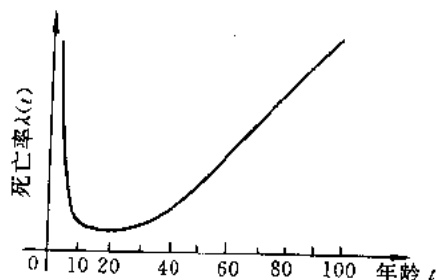


图 7.4 死亡曲线

(四) 平均寿命与方差

1. 寿命 T 的定义

从元件、装置(或系统)开始使用到发生失效(故障)前这段时间称为该装置的寿命,记作 T 。

对于不可修复的元件或装置,寿命指失效前的工作或储存时间;对于可修复的元件或装置,寿命指两次相邻故障间的工作时间,特称工作寿命。

2. 平均寿命 μ

任一种类型的元件或装置的寿命 T 都不是一个确定值,通常都是一个连续型随机变量。随机变量 T 的数学期望 μ 就是此种类型元件或装置的平均寿命,即

$$\mu = E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (7.13)$$

其中 $f(t)$ 为寿命 T 的概率密度函数。可以证明,式(7.13)可变为

$$\mu = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (7.14)$$

对于不可修复元件或装置,通常用 $MTTF$ (Mean Time to Failure) 代替 μ , 即失效前的平

均寿命;对于可修复的元件或装置,用 $MTBF$ (Mean Time Between Failure)——平均故障时间代替 μ 。那么随机变量寿命 T 的方差为

$$D(T) = \int_0^{\infty} (t - \mu)^2 f(t) dt = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - \mu^2 \quad (7.15)$$

若寿命 T 的分布函数为

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-kt} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

那么

$$\mu = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-kt} dt = \frac{1}{k}$$

也就是说,寿命服从指数分布的元件或装置的 $MTBF = 1/k$ 。据此可知:(1) 当 $t = 1/k$ 时, $R(t) = e^{-1} = 0.37$,也就说在一批元件或装置中,能工作到平均寿命的仅占 37%,而 63% 的元件或装置将在达到平均寿命之前出现故障或失效;(2) 若时间以年计, $k = 1/\mu$,表示在不顾及检修时间的条件下,平均每个元件或装置在一年内出现 k 次故障。

(五) 平均失效率

一般失效率 $\lambda(t)$ 是 t 的函数,不是一个常数。实际应用中常采用 $\lambda(t)$ 的平均值形式,即

$$m(t) = \frac{1}{t} \int_0^t \lambda(t) dt \quad (7.16)$$

我们称 $m(t)$ 为随机变量 T 的平均失效率。而

$$M(t) = \int_0^t \lambda(t) dt \quad (7.17)$$

称为累积失效率,而且

$$M(t) = tm(t) \quad (7.18)$$

利用式(7.12),则有

$$M(t) = -\ln R(t) \quad (7.19)$$

(六) 可靠寿命

设元件的可靠度为 $R(t)$,对于给定的值 $0 < r < 1$,若有

$$R(t_r) = P(T > t_r) = r \quad (7.20)$$

则称 t_r 为可靠寿命,其中 r 称为可靠水平。

按此定义,只要元件或装置的使用时间小于可靠寿命 t_r ,那么该元件或装置的可靠度就不会小于 r 。

当 $r = 0.5$ 时的可靠寿命又称中位寿命,记作 $t_{0.5}$ 。也就说,当元件或装置工作到中位寿命时,其可靠度和失效概率都是 0.5,即一批元件或装置工作到中位寿命时,有一半元件或装置失效。

7.1.3 关于寿命试验的说明

前节所提到的可靠性的数量指标均是从寿命分析中求得的。实际元件或装置的寿命分布曲线是通过寿命试验获得的。这就是通过对容量为 N 母体的随机抽样,取得试验数据,并以此对寿命分布及其特征参数作出统计估计,进而就可计算出人们所关心的可靠性

的数量指标的具体数值。为了科学地进行寿命试验,需要数理统计及其统计试验方法方面的知识,读者可参阅有关书籍。

7.2 提高变流装置及系统可靠性的几个问题

提高变流装置及系统的可靠性涉及到许多方面的问题。现就下面几个问题作初步探索,以引起大家的重视。

7.2.1 正确使用电力电子器件

变流装置及系统的可靠性主要决定于元件的可靠性及系统的结构形式。例如,采用 SCR 的 UPS(不间断电源)的平均无故障时间(MTBF)为 17 个月,而采用 VDMOS 的 UPS 的平均无故障时间为 6 年。图 7.5 和图 7.6 是由数台 UPS 电源组成的 UPS 电源系

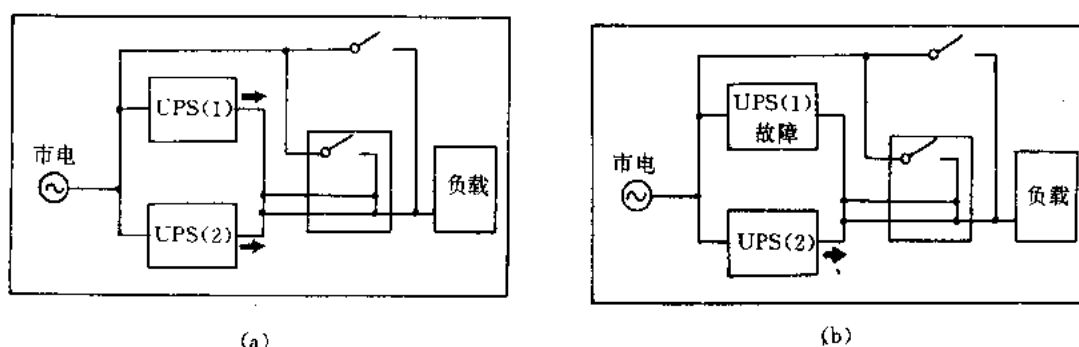


图 7.5 具有备用容量的并联结构

(a)正常运行; (b)故障运行

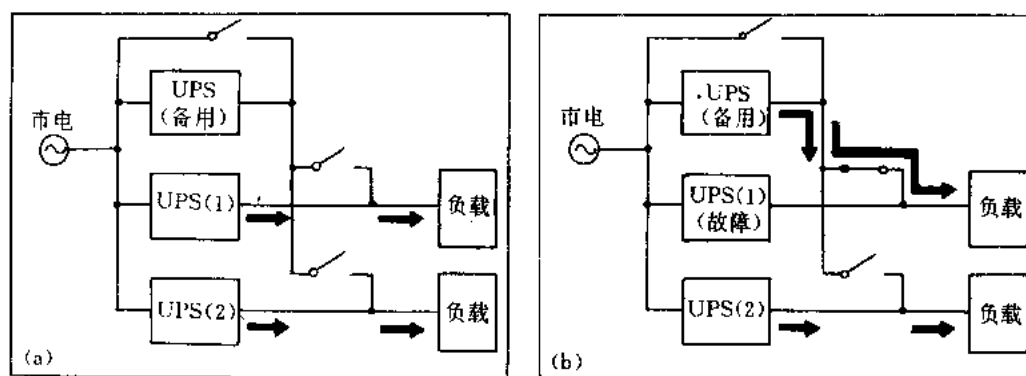


图 7.6 具有备用容量负载隔离的结构

(a)正常运行; (b)故障运行

统。图 7.6 结构的系统可靠性比图 7.5 的高。对于高可靠性装置就要使用高可靠性的元件,或者采取其它措施(例如,加大储备系数)。对于电力半导体器件,不同类型的器件对驱动电路的要求是不同的,不注意这一点将很难使器件可靠地工作。因此,欲想提高变流装置运行的可靠性,设计人员首先就要精心地设计驱动电路。Snubber(缓冲)电路可以改善器件的工作条件,因此它与器件的工作可靠性关系密切。

下面结合第一章的知识,讨论电力半导体器件的驱动电路及 Snubber 电路。

(一) 驱动电路

1. 晶体管的驱动电路

由晶体管工作原理可知,使晶体管导通的正向激励电流(i_B)越大,器件达到稳态电流的时间越短。若一直保持大的正向激励电流,晶体管将进入深度饱和,这对晶体管的关断是不利的,特别是增加了晶体管的存储时间(t_s)。因此,提供给晶体管最合理正向基极电流,应当开始时比较大,而后减少下来,以维持晶体管处于临界饱和状态,其代价是略微增加晶体管的导通压降。

断开基极电流,可使晶体管关断,但关断过程比较慢。然而加反向基极电流($-i_B$),可加速关断过程,减少器件的存储时间(t_s)和下降时间(t_f)。因此采用图 7.7 所示的图腾柱驱动电路是一种比较实用的办法。假如负荷电流在工作过程变动得比较厉害,该电路就不能保证晶体管在任何工况下都工作于最佳状态,其补救办法是增设退饱和电路,如图 7.8 所示。但更好的办法是利用具有智能控制功能的电路,如集成电路片 UAA4002,对晶体管实现较理想的基极电流优化驱动和自身的保护。UAA4002 的电路框图示于图 7.9,其详细功能可参阅有关介绍。

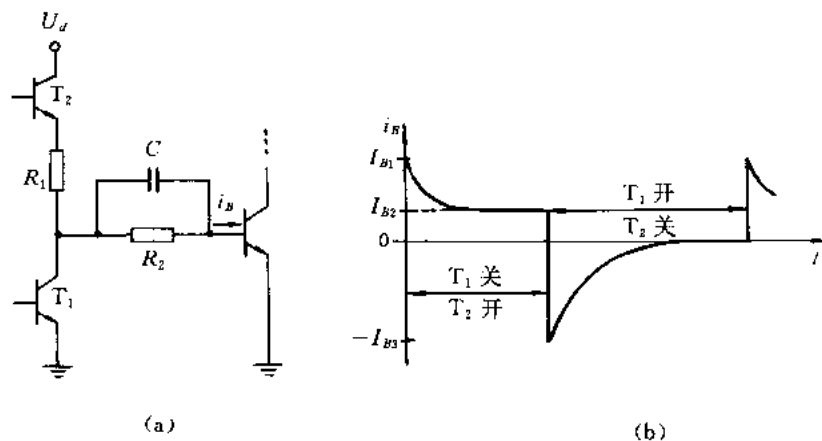


图 7.7 晶体管的驱动电路及基极电流波形
(a) 电路; (b) 波形;

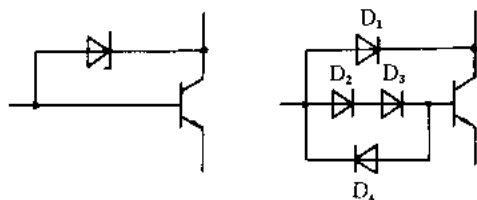


图 7.8 退饱和电路

2. VDMOS 的驱动电路

VDMOS 的栅极相当于容性阻抗,这是栅极驱动电路在设计上有别于晶体管驱动电

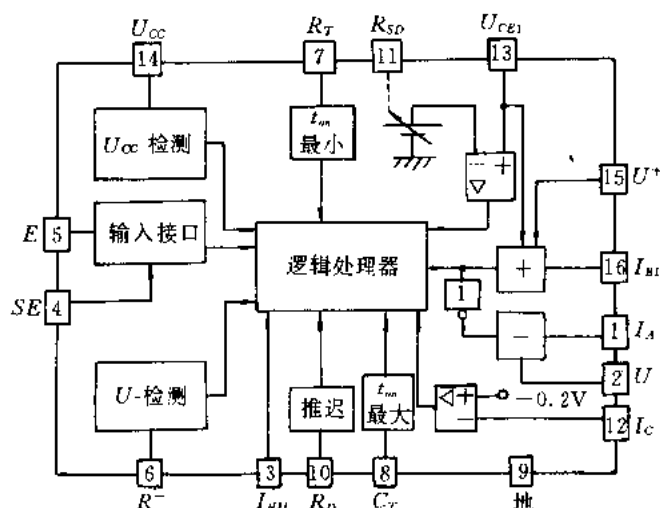


图 7.9 UAA4002 电路框图

路之处。因此 VDMOS 的驱动电路的内阻应当小, 以提供大的充放电流。在栅电压进入稳定阶段, 栅极几乎不从驱动电路取电流, 因此场控制器件所要求的驱动功率不大。需注意的是, 过驱动会增加器件的关断延时, VDMOS 的驱动电路示于图 7.10。原则上, IGBT 也可以采用图 7.10 所示的驱动电路。在高速开关电路中, 为了防止密勒效应起作用, 驱动电路采用双电源。此外, 驱动电路到栅极间的引线要尽量短, 且需绞合起来。目前, 对 VDMOS 和 IGBT 管, 都有现成的驱动模块可供使用。但使用时, 要特别注意其应用条件和使用注意事项。

当并联工作的 VDMOS 器件在开关转换过程中经过有源区时, 通常会出现高频(大于 100kHz)的寄生振荡, 为此应在栅极电路中串进小电阻, 如图 7.11 所示。为防止静电积累效应, 栅-源之间应接适当的电阻, 同时可加稳压管。

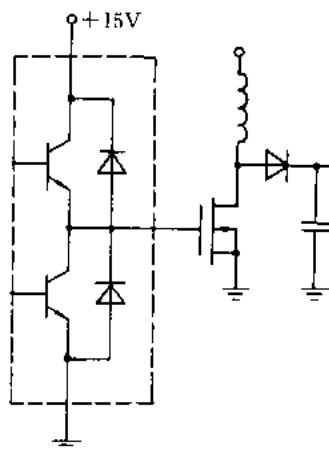


图 7.10 VDMOS 的驱动电路

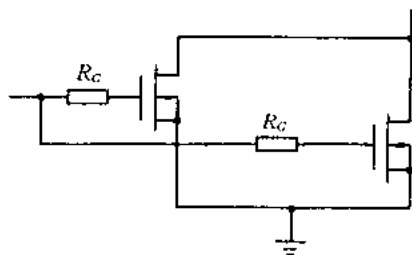


图 7.11 栅极串接小电阻

3. SCR 的驱动电路

SCR 的门极驱动电路应能提供强触发所需要的脉冲电流(幅度为静态触发电流的(5~10)倍, $di_G/dt > (1 \sim 2 \text{ A}/\mu\text{s})$), 以发挥 SCR 潜在的 di/dt 耐量, 避免器件的 di/dt 损坏, 提高其工作寿命。门极驱动电路还应当能提供反向电压($-U_{GK}$), 以提高器件的换向 du/dt , 防止 du/dt 误导通现象的产生。因此, SCR 的门极驱动电路采用腾柱式的驱动电路也是可行的, 如图 7.12 所示。为了使驱动电路同 SCR 隔离, 可在二者之间加入脉冲隔离变压器, 如图 7.13 所示。或者采用光隔离方法, 如图 7.14 所示。若需同时触发数只(甚至十几只)晶闸管, 则应保证各路触发脉冲的一致性以及满足强触发的要求。

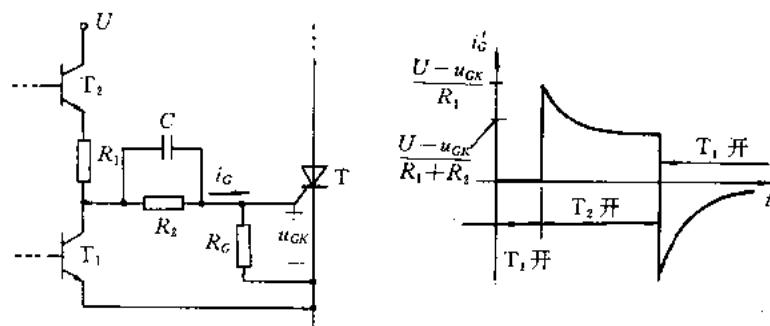


图 7.12 SCR 的驱动电路

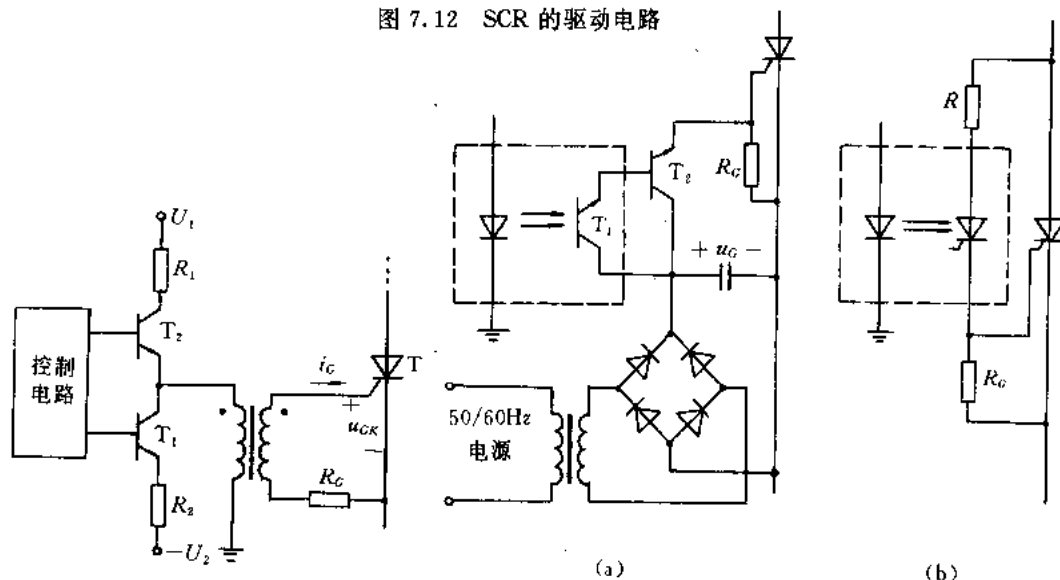


图 7.13 脉冲变压器隔离的 SCR 驱动电路

图 7.14 光隔离的 SCR 驱动电路

4. GTO 的驱动电路

GTO 的触发电路应满足下列要求:

(1) 正向触发电流(i_G): 陡峭的脉冲前沿(类似于 SCR); 脉冲幅值为静态触发电流的(15~20)倍, 并在 GTO 导通期间维持一个小的恒定电流。

(2) 反向触发电流($-i_G$): 反向触发电流上升率($-di_G/dt$)应与器件阳极电流转移到 Snubber 电路的速度相匹配。反向触发电流峰值决定于 GTO 的可关断峰值电流和关断增益, 一般是可关断峰值电流的 $\left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}\right)$, 而且其持续时间应超过 GTO 的拖尾时间。

图 7.15 给出满足上述要求的 GTO 驱动电路(可驱动 50A GTO),其触发电流 i_G 的波形示于图 7.16。

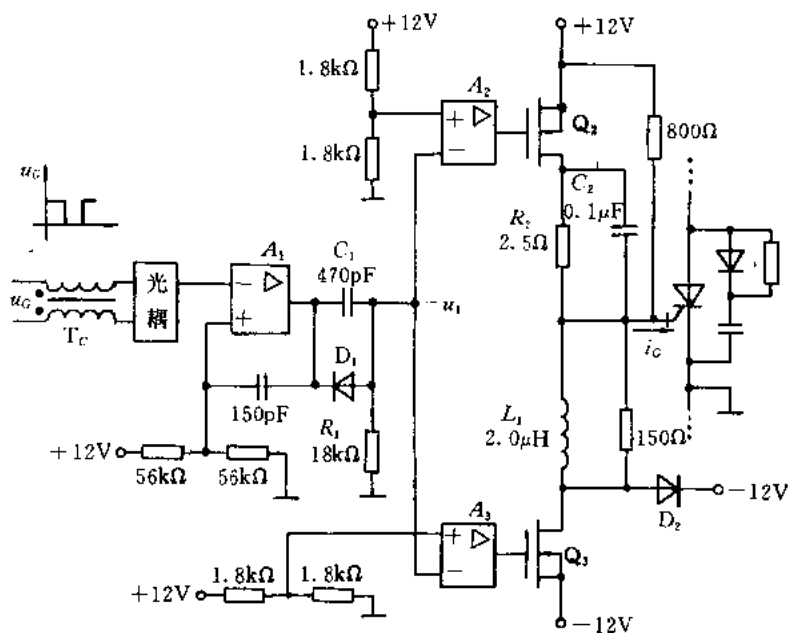


图 7.15 GTO 的驱动电路(50A GTO)

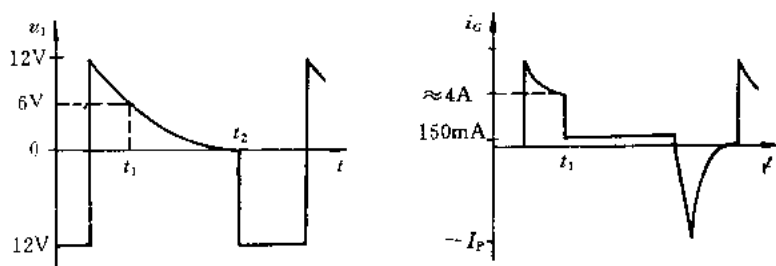


图 7.16 触发 GTO 的 i_G 波形

(二) Snubber 电路和箝位电路

Snubber(缓冲)电路是为了避免器件流过过大的电流和在其上出现过高的电压,或是为了错开同时出现的电压和电流的峰值区而设置的。

图 7.17 是为降低晶体管开关损耗而设置的缓冲电路。当然,它同时也起到降低器件上峰值电压的作用,该缓冲电路也可以用于 VDMOS 和 IGBT,但对于 VDMOS 更主要的目的是避免器件上在开关过程中所出现的瞬态电压尖峰。为此,也可以采用电压箝位电路,如图 7.18 所示。

在图 7.15 的 GTO 虽也加上由二极管、电容和电阻构成的 Snubber 电路,然而有时仍会出现 $\frac{du}{dt}$ 导通现象,因此更为合理的缓冲电路应如图 7.19(a)所示,这时管子上的阳极电压波形如图 7.19(b)。该缓冲电路中增设了饱和电感,主要是考虑到消除由二极管反向恢复电流引起的麻烦而设置的。

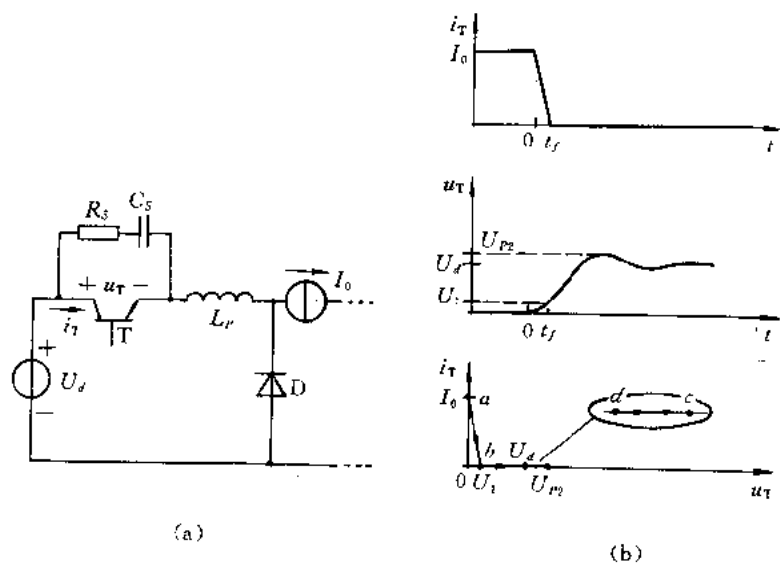


图 7.17 晶体管的 Snubber 电路及其动态轨迹
(a) 电路; (b) 波形及轨迹

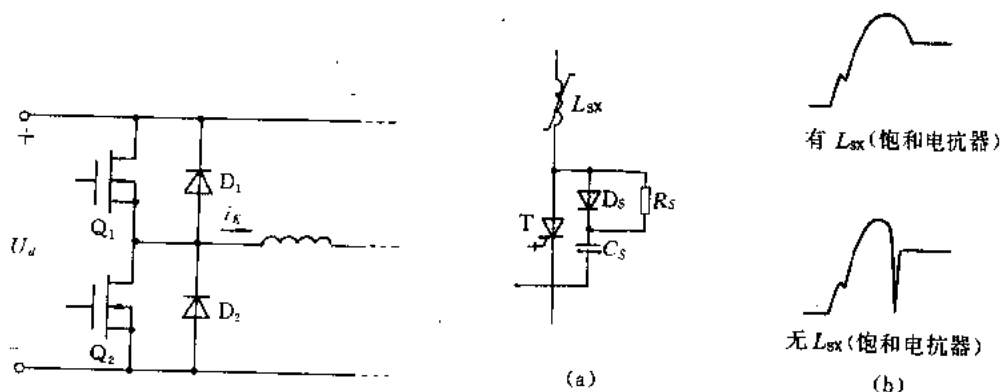


图 7.18 电压箝位电路

图 7.19 施于 GTO 的缓冲电路
(a) 电路; (b) 开关时阳极电压波形

用于 GTO 的缓冲电路形式无疑也可以用于 SCR, 但缓冲电路的参数设计是不一样的, 而且没有 GTO 的那样严格。将 SCR 缓冲电路上的二极管去掉, 利用剩下的阻容吸收网络可解决多只 SCR 串联工作时的动态均压问题。

最后需提醒的是, 所有电力半导体器件都是温度的敏感元件, 因此在任何情况下, 都应当保证创造符合要求的散热条件, 否则将降低器件工作的可靠性。对于串并联工作的元件, 为了降低早期失效率, 还应当对器件进行筛选, 以求合理的匹配。

(三) 设计上的考虑

加深对电力半导体器件的基本工作原理、特性和参数的了解, 对于设计一个可靠的电路是非常重要的。常常因为对器件理解得不深或理解错误而导致电路设计上失败的事是屡见不鲜的, 晶闸管超声电源从 70 年代开始研制, 直到 80 年代才投入生产就是一个典型的例子。下面就有关问题进行分析, 以引起电路设计者的注意。

对于工作于 20kHz 的高频晶闸管,由于四层结构的特点,耐压与动态参数是一对矛盾,而且高压器件的等级合格率很低。因此,在设计高频晶闸管逆变电路时,要尽量设法降低器件在电路中所承受的电压。对于串联运行的晶闸管,按照器件的反向恢复电荷量进行选配,可以获得良好的动态均压效果。在晶闸管逆变电路中使用强触发比弱触发更能发挥器件的性能,并有助于提高其工作寿命。

整流管,特别是快速整流管,人们往往注重其反向恢复特性,而忽略其正向恢复特性。事实上,在某些电路中,其正向恢复特性成为一个重要的制约因素。在场控制器件应用日益扩大的情况下,快恢复整流管几乎成为一个不可缺少的元件,其反向恢复特性成为影响电路工作可靠性的一个重要原因。因此,有经验的电路设计者在设计电路时,常常巧妙而有意识地避开它的影响。

对于场控器件,它工作时从驱动电路吸取的功率很小,但对驱动电路内阻抗并不因此而降低要求,特别是器件在开断时,驱动电路内阻抗越低越好,以抵消器件密勒效应的影响。

在单端变换器中,使用晶体管和使用 VDMOS 管在设计思想上是有差别的。这是因为两种器件在大电流工况下,VDMOS 管性能比晶体管优越得多,因此在同样是 310V 直流输入电压条件下,晶体管的耐压必须选用 700~800V 等级的管子;而 VDMOS 管对耐压等级的要求可降低到 400~500V。

在 GTO 开通后,通常还给它一个小的驱动电流,以保证其可靠导通。因此,在设计 GTO 驱动电路时,人们就要顾及到这一要求。此外,驱动电路的某些参数的选择应考虑同 Snubber 电路参数相配合问题。

对于常闭型静电感应器件,无激励信号时,器件本来就是处于导通状态的,但为了降低其通态压降,仍需提供给它一个导通激励信号。

从上述分析可知,电路设计者对电力半导体器件了解的深浅,直接关系到所设计电路工作的可靠性。电路设计者对此不能掉以轻心。

7.2.2 电磁兼容性与可靠性的关系

大量事实说明,电磁兼容与装置的可靠性之间的关系甚为密切,在进行变流装置可靠性设计的同时还应当进行电磁兼容设计,否则,所设计出来的装置可靠性必然不高,严重时,将造成变流装置一开始就无法正常工作的恶果,即早期失效率很高。人们在研制晶闸管超声电源、甚低频发射机电源、单管感应淬火逆变电源、电机变频调速装置、中频 X 射线机电源以及高频晶闸管电流定额测试装置等过程中,都遇到电磁干扰问题。为增强电磁兼容性设计的意识,下面将简略地介绍一下电磁兼容的基本知识以及提高抗电磁干扰的主要途径和一些措施。

(一) 电磁兼容性(EMC)的基本概念

在装置或系统的内部和周围环境中,都存在着电磁噪声。装置或系统可以产生电磁噪声,又可以接受电磁噪声。对于一个理想的电力电子装置或系统,它在复杂的电磁环境中都能如预期的那样工作,同时并不对周围的设备或系统的工作产生不良的影响(电磁干扰),对于这样的装置或系统,则称它是电磁兼容的。

下面介绍一下基本术语

(1) 电磁噪声: 对于一个电路、装置或系统来说, 任何不希望的信号都可看成是电磁噪声。但这些电磁噪声不一定都形成电磁干扰。

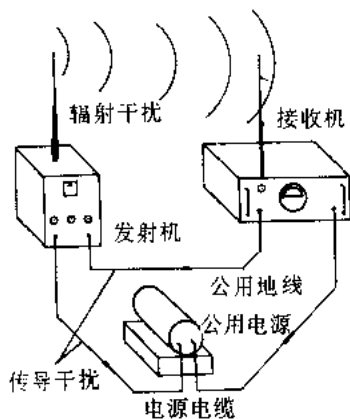


图 7.20 传导和辐射干扰示意图

(2) 电磁干扰(EMI): 当电磁噪声达到影响电路、装置或系统正常工作或性能程度时, 则称它为电磁干扰。电磁干扰可以来自装置或系统的内部, 也可以来自装置或系统的外部, 前者称为“系统内部”的干扰, 后者称为“系统间”的干扰。

(3) 电磁干扰的传播方式, 如图 7.20 所示。

传导干扰: 是指噪声通过金属导体(导线、电容器、电感或变压器等)传播的。

辐射干扰: 是指噪声通过介质(如空气)以电磁场形式(波的形式)传播的。

(4) 电磁噪声源和电磁干扰源: 任何一个元件、一个装置或一个系统工作时, 对于其它元件、装置或系统来说都是一个噪声源。当这种噪声对其它元件、装置或系统产生不利影响时, 这种噪声源就变成了电磁干扰源。电力电子装置或系统本身就可以是一个干扰源, 甚至是一个很强的电磁干扰源。它既可以产生传导干扰, 亦可以产生辐射干扰, 而危害其它设备或系统(电子系统等)。

(5) 形成电磁干扰的三要素: 电磁干扰源、耦合通道——传播途径、设备对干扰的敏感程度。

很显然, 对于一个装置或系统来说, 缺一要素就不可能造成电磁干扰的危害, 所以, 欲提高装置或系统的抗电磁干扰的能力, 就要从分析电磁环境(干扰源、干扰源性质、传播途径等)入手, 针对电磁干扰最敏感的环节, 采取措施加以解决。

(二) 抑制电磁干扰应考虑的主要问题

- (1) 合适的接地;
- (2) 屏蔽措施;
- (3) 滤波;
- (4) 机箱的合理设计;
- (5) 机箱内部的合理布线。

上述每一个方面在装置和系统设计中都有自己的作用, 然而又是互相关联的。设备的良好接地, 可以降低设备对屏蔽和滤波的要求。而良好的屏蔽, 也可以使滤波要求降低。机箱的不合理设计和内部不合理的布线, 将会引起许多麻烦, 可导致其它措施失去作用。

上述每一个问题都可以展开讨论。但因篇幅所限, 此处无法一一加以阐述, 读者只要重视, 都可以从有关文献找到答案。根据我们的经验, 对于变流装置和系统来说, 来自电源进线的电磁干扰比较严重, 同时也不能忽视主电路工作时对驱动电路的影响。此外, 机箱和机箱内的布线设计是否合理, 关系重大。例如, 在中频 X 射线高压油箱中, 需引进工频 220V 电源、几十千赫高频逆变灯丝电源, 以及中频逆变电源的进线, 同时箱内还有高压

(12.5 万 V)引出线和几伏的反馈信号线。因此高压箱的结构设计以及多种线的合理布置问题就成为影响系统可靠工作的关键因素之一。

(三) 提高变流装置及系统可靠性的一些措施

1. 抑制来自电源进线的电磁干扰

来自电源进线的电磁干扰是一种传导干扰。抑制这种干扰,目前比较普遍的都是采用滤波器,该滤波器接于电源进线端,如图 7.21 所示。它既可以加在主电路的电源进线端,也可以加在控制电路的电源进线端。图 7.21 所示的滤波器是一种噪声滤波器,其中电感采用共模扼流线圈。它对频率从 10kHz 到 30MHz 的噪声都有抑制作用。但要注意合理的使用和接地点的选择,否则抑制干扰的效果将会很差。当然,也可以采用通常的 $L-C$ 滤波来抑制电磁干扰,多个级联时,抑制效果更好。

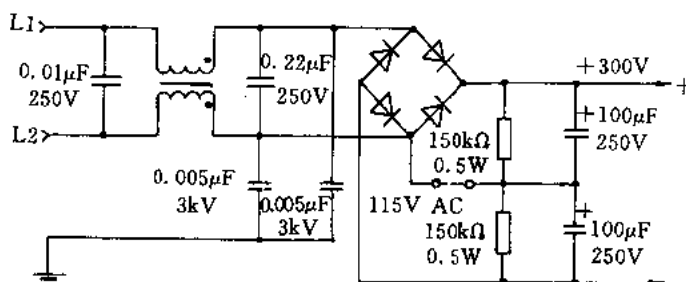


图 7.21 电源滤波器接法示意图

使用超隔离变压器、有源滤波器和数字滤波器也可以收到良好的抑制干扰的效果。总之,使用者应根据具体情况确定应采取的措施。

2. 提高控制电路的抗干扰能力

有关这个问题,主要是处理好控制电路入端和出端部分隔离问题。对于微型计算机控制系统,应注意从抗干扰角度来选择机型。

3. 防止有触点电器开闭动作引起的干扰

这首先要从设计上考虑它在设备内部安装位置,以便同设备内部的敏感区保持合理的距离。然后,对与它有关的引线要加以处理,包括走线、屏蔽及其它消除干扰的措施。当然,也可用固体开关代替之。

4. 系统接地问题

不合理的接地将使整个系统遭受严重的干扰。处理这个问题与装置内部总体布线和装置结构有关。例如,从抗干扰角度看,某些部件必须“浮地”处理。若事先没有顾及到这种情况,系统接地问题就很难处理好。从抗电磁干扰角度,利用电源中性点作为系统接地端,不如接真地好。

5. 装置或系统内部电磁干扰的抑制问题

由于装置或系统内部空间小,不同部分之间的相互影响比较突出。抑制装置或系统内部的电磁干扰通常要考虑以下几方面的问题:

- (1) 元器件及部件的配置问题;
- (2) 合理的布线;

- (3) 对线路、电缆或局部区域进行屏蔽;
- (4) 采用滤波技术;
- (5) 合适的接地。

总之,慎重、仔细地处理好上述几方面的问题,变流装置或系统的电磁兼容性才能得到保证,从而使变流装置或系统的偶然失效率得以降低。

7.2.3 变流装置及系统的保护

与电磁元件不一样,电力半导体器件的过载能力比较弱。当电力半导体器件遭受过压或过流危害时,它可以在极短时间内烧毁。当然,这并不意味着电力半导体器件没有过载能力,只是允许过载的时间非常短吧。例如,GTR 在一倍过流条件下,必须在 $30\mu\text{s}$ 内切断过载电流,然而 GTR 的过电压损坏可发生在数微秒内。第一章数据还表明,40A IGBT 在 $2\sim 3\mu\text{s}$ 内过载电流可达 220A。另外,任何装置和系统的抗电磁干扰能力都是相对的。当电磁环境变化时,逆变装置和系统也会因经受不住外界的电磁干扰而发生逆变颠覆现象。况且,还有许多随机因素或人为误操作也都会引起变流装置和系统的故障。因此在变流装置和系统中,电力半导体器件的保护问题是关系到装置和系统工作可靠性的一个极端重要的问题。为此,设置快速、准确和可靠的保护系统是非常必要的。

目前,对于 GTR,VDMOS 和 IGBT 器件,都可购到与其相匹配的有自保护功能的驱动模块,如 UAA4002(智能),EXB480,MPD1205 等。有关这方面的资料可向销售单位索取,此处就不再赘述了。下面归纳一下过电流和过电压保护的一般方法。

1. 过电流保护的方法

- (1) 电力半导体器件专用的快速熔断器;
- (2) 接触器或快速自动开关;
- (3) 整流桥拉逆变;
- (4) 由晶闸管组成的开关电路(串联或并联);
- (5) 封锁驱动信号(同时配以其它措施);
- (6) 其它。

2. 过电压保护的方法

- (1) 在开关器件上并联阻容、硒堆、压敏电阻和瞬态二极管等,以形成过电压箝位电路;
- (2) 在主电路上设置过电压吸收装置;
- (3) 设置避雷器;
- (4) 提高开关器件的电压储备系数;
- (5) 利用开关器件实现过电压短路保护;
- (6) 其它。

图 7.22 和图 7.23 分别绘出个别的过电流、过电压保护例子,以供参考。目前,人们还可以利用响应时间小于 $1\mu\text{s}$ 的按霍尔效应原理制作的电流传感器和其它电压传感器构成通用电压、电流保护系统,实现保护系统的模块化。现在,电力电子装置或系统已经越来越多地使用故障自诊断技术,例如中频 X 射线机电源系统、交流变频调速装置,UPS 电源、

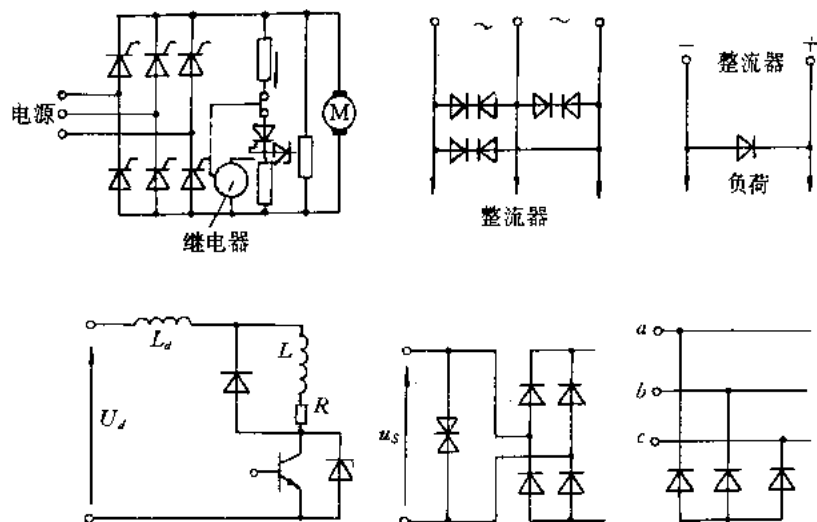


图 7.22 过电压保护电路例子

同步电机启动装置等。一般来说,装置或系统可以在运行前或停机后都进行故障自诊断,以判明该装置或系统当时的可靠状况;若发现问题,则及时进行处理,这样将大大地提高装置或系统的运行可靠性。

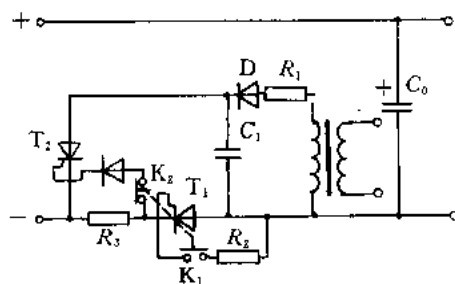


图 7.23 过流保护电路例子

综上所述,变流装置及系统的可靠性及电磁兼容性的思想应贯彻于设计、制造、安装、调试及检验等所有环节。这样做了,变流装置及系统的可靠性才能得到保证。否则,提高变流装置及系统的可靠性将成为一句空话。

思考与练习七

- 7.1 何谓装置的可靠性?
- 7.2 可靠性的数量特征是什么?
- 7.3 从可靠性出发,简述如何降低失效率。
- 7.4 请论述可靠性设计的重要性。
- 7.5 何谓电磁兼容性? 电磁干扰与电磁噪声有何差别?
- 7.6 简述抑制电磁干扰的途径及应采取的措施。
- 7.7 装置或系统的可靠性设计包括哪些方面?

- 7.8 提高装置和系统的可靠性与正确认识电力半导体器件有什么关系?
- 7.9 简述 SCR 类、GTR 和场控器件(VDMOS 和 IGBT)在驱动电路设计上的差别?
- 7.10 如何保证 GTO 器件工作的可靠性?
- 7.11 试说明,在变流装置及系统中设置保护电路的重要性。
- 7.12 简述电力半导体器件的过载能力及损坏特点。
- 7.13 请简述对过电流保护电路的要求。

参 考 文 献

- [1] (美) RaShid M H. Power Electronics. Prentice-Hall, INC, 1988
- [2] (美) John G. Kassakian 等. Principles of Power Electronics. Addison Wesley publishing company, 1991
- [3] (美) Bose B K. Power Electronics and AC Drives. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1986
- [4] (日) 築地謙次, 相川浩合著. ScR とその应用. 日刊工业会社, 1965. 5
- [5] (法) 皮特 让·玛丽·等著, 丁学文译. 功率晶体管和开关二极管的应用技巧. 纺织工业出版社, 1991. 2
- [6] (英) 兰德 CW 著, 郭彩霞等译. 电力电子技术. 机械工业出版社, 1987. 1
- [7] (加拿大) 森 PC 著, 赵士廉译. 晶闸管直流传动. 机械工业出版社, 1984. 4
- [8] (美国) 巴利伽 BJ 著, 王正元等译. 硅功率场控器件和功率集成电路. 机械工业出版社, 1986. 12
- [9] (德) 莱昂哈特 W 著, 吕嗣杰译. 电气传动控制. 科学出版社, 1984. 4
- [10] 黄俊主编. 半导体变流技术. 机械工业出版社, 1980. 7
- [11] 黄俊等编. 电力电子自关断器件及电路. 机械工业出版社, 1991. 10
- [12] 林渭勋等编著. 电力电子技术基础. 机械工业出版社, 1990. 10
- [13] 王守斌主编. 场效应晶体管手册. 科学出版社, 1989. 7
- [14] 苏文成等编著. 无功补偿与电力电子技术. 机械工业出版社, 1989. 7
- [15] 张永生主编. 电力半导体电路原理. 机械工业出版社, 1986. 4
- [16] (德) Heumann K. 电力电子学发展动态. 国外电力电子技术, 1991. (1)
- [17] (日本) 関长隆等编, 袁维慈等译. 可关断晶闸管——GTO 原理和应用. 中国铁道出版社, 1985. 9
- [18] 赵良炳. 关于高压阀体工作可靠性问题. 清华大学学报(增刊), 1991, 第一期
- [19] 赵良炳. 单管感应淬火逆变电路的研究. 清华大学学报(增刊), 1991, 第一期
- [20] 张秀澹. 80 年代电力电子技术的回顾. 全国电力电子学会论文集, 1990
- [21] 张志刚. 国外电力电子技术发展动态. 中国第二届交流电机与调速传动学术会议论文集, 1991. 5
- [22] 刘宗富. 交流调速状况及展望. 中国第二届交流电机与调速传动学术会议论文集, 1991. 5
- [23] 赵良炳. 论高频(晶闸管)逆变电路的可靠性. 通讯电源论文集, 1982
- [24] 赵良炳. 专用计算机控制的 30kW 中频 X 射线机电源系统. 全国电力电子学会论文集, 1993
- [25] (美) 格安迪 SK 著, 张光华等译. 功率半导体器件(工作原理和制造工艺). 机械工业出版社, 1982. 9
- [26] 陈星弼等编. 晶体管原理. 国防工业出版社, 1981. 12
- [27] 俞苹. 一种新型的功率器件——MCT. 全国电力电子学会论文集, 1990
- [28] 许文侠. 静电感应晶闸管的新结构. 全国电力电子学会论文集, 1990
- [29] 李思渊等. SIT 的特点和制造技术的研究. 全国电力电子学会论文集, 1990
- [30] 俞苹. 电力半导体器件的现状与展望. 电力电子技术, 1991(1)
- [31] 顾廉楚主编. 电力半导体器件原理. 机械工业出版社, 1989. 7
- [32] 陈凯等. 可靠性数学及其应用. 吉林教育出版社, 1989. 6



- [33] (美)凯瑟 BE 著,肖华庭等译.电磁兼容原理.电子工业出版社,1985.4
- [34] (美)理查德, J 希金斯著,赵良炳等译.数字和模拟集成电路电子学.机械工业出版社,1988.12
- [35] OlierD 等著,钟桂清译.伪谐振全桥 DC/DC 变流器.国外电力电子技术,1992 年第四期
- [36] (日) Yonemori H 等著,温绍森译.包括电压箝位准谐振技术与软开关相移 PWM 高频逆变器连接的新周波变流器.国外电力电子技术,1992 年,第四期
- [37] Jung G Cho 等著,沈大伟译.采用新的并联谐振直流环的软开关 PWM 变流器.国外电力电子技术,1992 年,第四期
- [38] Dipl Ing-Axel Mertens 等. A High Frequency Resonant DC Link Inverter Using IGBTs. 1990, IPEC, PP152~160
- [39] 张晓松. 谐振直流环逆变器的研究. 清华大学硕士论文,1993.6
- [40] 王春芳. 微机控制的 IGBT 逆变式弧焊整流电源的研究. 清华大学硕士论文,1993.6
- [41] 张晓阳. 离线式半桥零电压开关多谐振逆变器的分析与设计. 清华大学硕士论文,1993.3
- [42] 姚灵芳. 准正弦的零电压式“”逆变器的分析和设计. 清华大学硕士论文,1991.6
- [43] 赵良炳. 电力电子技术与近代电源. 中国电源学会第十届学术年会论文集,1993.11
- [44] 赵良炳. 新型半导体器件及其对电气传动系统的影响. 电气传动,1994.2 期
- [45] 张晓松等. 谐振直流环逆变器的发展及控制技术. 全国电力电子学会第五次学术年会论文集, 1993.5