

关于大功率可控硅整流电源输出电压失稳问题的研究

蓝振辛

(广西桂东水电勘测设计有限责任公司, 广西 贺州 542899)

摘要: 介绍了大功率可控硅整流电源的组成和运行控制原理, 研究分析了大功率可控硅整流电源运行过程中输出电压不稳定的原因和故障维修方法, 为该类电源输出电压失稳维修提供技术参考。

关键词: 可控硅整流; 输出电压; 电压失稳维修

Research on the problem of unstable output voltage of high-power thyristor rectifier power supply

LAN Zhenxin

(Guangxi Guidong Hydropower Survey and Design Co., Ltd., Hezhou 542899, China)

Abstract: Introduces the composition and operation control principle of high-power thyristor rectifier power supply, studies and analyzes the reasons for unstable output voltage during the operation of high-power thyristor rectifier power supply, and provides technical reference for the maintenance of unstable output voltage of high-power thyristor rectifier power supply.

Keywords: thyristor rectification; output voltage; unstable voltage maintenance

0 引言

大功率可控硅整流电源具有技术成熟、输出功率较大、安全可靠和纹波系数低等优点, 广泛应用于铝电解、电力输送、工业控制等众多行业。在实际应用中, 根据不同的使用工况及生产工艺的需求, 可控硅整流电源可选用稳压或稳流的运行方式。例如, 在中高压电子铝箔的生产制造过程中, 尤其在末段化成工序, 需要对大功率可控硅整流电源实行稳压控制, 以保证电子铝箔的耐压性能。若大功率可控硅整流电源的电压不稳定, 将会导致产品耐压不均衡, 偏离控制范围, 严重影响产品的质量。因此, 需要对可控硅整流电源输出电压不稳定的问题进行研究, 并提

出具体的维修解决方法。

1 大功率可控硅整流电源的运行控制原理

大功率可控硅整流电源主要由主回路和控制回路两部分组成。其中, 主回路由快速熔断器、三相全控桥式整流电路和大功率 LC 滤波电路构成; 控制回路由脉冲触发电路、保护电路和继电器等构成。

大功率可控硅整流电源的运行控制原理是: 通过控制可控硅器件的导通角, 实现对输出电压的调节。当可控硅导通角增大时, 导通时长增加, 输出电压升高; 反之, 当导通角减少时, 导通时长缩短, 输出电压降低。为了控制可控硅器件的导通角, 需要利用触发电路来提供触发脉

冲；这些触发脉冲决定了可控硅的导通时长，从而控制输出电压的大小。可控硅整流电源在运行过程中，输出端的电压或电流通过电量隔离传感器，将高压的直流电转换为0~10 V的直流低电压信号，输入到反馈回路进行处理，然后再输送到控制回路进行PID调节比较。通过比较反馈的电压值与可控硅整流电源的给定电压值，调整控制回路脉冲触发信号的大小，从而实现电解电源稳压或稳流运行。大功率可控硅整流电源原理如下图所示。

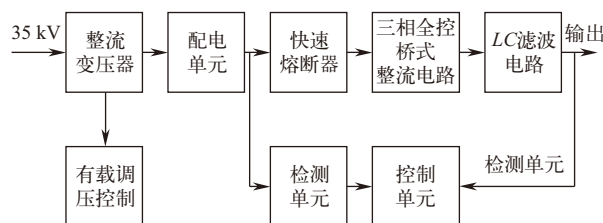


图 大功率可控硅整流电源原理

Fig. Principle of high-power thyristor rectifier power supply

2 大功率可控硅整流电源输出电压不稳的原因

通过综合论证分析，影响大功率整流电源输出电压稳定性的因素主要有：

- 1) 输入电压波动。输入电压的不稳定会直接影响整流电源的输出电压。
- 2) 负载变化。负载突变会引发整流电源输出电压波动。
- 3) 可控硅触发角波动。触发角不稳定或变化，会导致输出电压不稳定。
- 4) LC电路参数。电容C和电感L的参数选择不当，会影响滤波效果和输出电压的稳定性。
- 5) 电压反馈电路异常。
- 6) 显示电压表异常。
- 7) 外部因素导致整流电源输出电压不稳定。

大功率可控硅整流电源在工业应用中扮演着至关重要的角色，其输出电压的稳定性直接影响到设备的运行效率和产品质量。例如，在电子铝箔化成工序的生产控制中，可控硅整流电源的稳压控制是末段化成工序生产质量保障的重要前提。可控硅整流电源输出电压大小决定了电子铝

箔耐压值，如果末段化成电压控制不佳，会使电子铝箔耐压偏高或偏低，从而影响其质量。因此，从设备以及生产过程控制角度，综合分析可控硅整流电源输出电压失稳的原因，并理清维修思路，对提高工程技术人员的技能具有深远意义。

现对不同情况下可控硅整流电源稳压运行控制输出电压不稳定的原因展开分析，同时提出正确判断由可控硅整流电源故障或者生产过程控制引发可控硅整流电源输出电压不稳定的方法及解决方案。

2.1 输入电压波动

输入电网电压波动是影响大功率可控硅整流电源输出电压稳定性的一个重要因素。无论电网电压升高还是降低，都会直接导致整流器输入电压改变，进而影响输出电压。

在电网电压波动的情况下，整流器的输出电压 U 可表示为

$$U=kE' \quad (1)$$

式中， k 为整流器的效率系数（受内部结构和负载影响）； E' 为电网电压波动后的实际输入电压。当 E' 波动时，大功率可控硅电源输出电压 U 会出现不稳定波动。

2.2 负载变化

负载变化是引发大功率可控硅整流电源输出电压不稳定的主要原因之一。设大功率整流电源的内阻为 R ，负载电流为 I ，输出电压为 U ，则输出电压 U 与负载电流 I 的关系可表示为

$$U=E-IR \quad (2)$$

式中， E 为整流器的输入电压（即电源电压）。

根据式（2）可知，大功率可控硅整流电源的输出电压与输入电压、负载电流和电源内阻有关。当负载电流发生变化时，整流电源的内阻和输出电压均会受到影响。负载电流 I 增大，整流电源内阻 R 上的压降增大，导致输出电压 U 降低；反之，负载电流减小，输出电压 U 将会升高。

2.3 可控硅触发角波动

控制回路的脉冲触发电路是大功率可控硅整

流电源比较重要的电路单元，其产生的触发角变化会导致整流电源输出电压变化。

(1) 可控硅整流器的输出电压公式

可控硅整流器的输出电压 V_{out} 计算公式为

$$V_{\text{out}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{\text{in}} \cos a - \Delta V \quad (3)$$

式中， V_{in} 为输入电压的有效值； a 为可控硅的触发角； ΔV 为整流过程中产生的压降，包括可控硅本身的压降和电路中的其他损耗。

根据式(3)，当触发角 a 变化时，输出电压 V_{out} 也会相应变化，从而导致输出电压不稳定。

(2) 可控硅触发角引起输出电压不稳定故障的现象与处理方法

脉冲触发电路是大功率可控硅整流电源的核心单元。其主要作用是：产生与输入三相交流电源同步的六相脉冲触发角信号，控制六相半波双反星形整流方式的整流可控硅交替导通，以输出稳定性较高的直流电源。

当移相触发控制电路存在故障时，易导致脉冲触发角 a 输出畸变、不同步或相序混乱等异常。根据式(3)，当触发角 a 发生变化时，输出电压 V_{out} 也会相应变化，从而导致输出电压不稳定。在出现这类故障时，若在大功率可控硅整流电源的配电柜上直观看到三相电流表的指针有明显抖动现象，且用万用表的交流档测试触发输出端无0.1 mV~1 V的电压，则判定脉冲电路异常。在大功率可控硅整流电源稳压控制的情况下，输出电压不稳定，出现频繁波动的现象，且有上述明显故障特征时，可判定移相触发控制电路故障，通过更换触发模块或者脉冲触发电路修复此类故障。

2.4 LC滤波电路异常

(1) LC滤波电路的作用

在大功率整流电源中，LC滤波电路主要起到滤波和储能的作用。LC电路能够滤除整流过程中产生的高频谐波，使输出电压更加平滑；在整流器的输出端，电容器 C 可以存储电能，并在负载需要时释放，从而在一定程度上稳定输出

电压。

(2) 滤波效果和谐波抑制

电容器的容抗公式为

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (4)$$

式中， f 为频率； C 为电容值。容抗越小，电容器对高频谐波的滤波效果越好。

电抗器的感抗公式为

$$X_L = 2\pi fL \quad (5)$$

式中， L 为电感值。感抗越大，电抗器对低频谐波的滤波效果越好。

通过合理匹配 C 和 L 的值，可以实现对特定频率范围的有效滤除。在负载变化或输入电压波动时，输出电压会发生变化。LC电路可以在一定程度上减缓这种变化，使输出电压更加稳定。但需要注意的是，LC电路的储能和滤波效果有限，当负载或输入电压波动过大时，输出电压仍可能出现较大的波动。

(3) LC电路异常在实际应用中的分析

根据生产工艺的要求，在电子铝箔化成工序中，要求大功率可控硅整流电源输出平稳的直流电。由于可控硅的开关特性，生产过程中会产生高频和低频的电压纹波，这些纹波会影响电源的稳定性和设备的正常运行，为了解决这个问题，需要在电源的输出端安装LC滤波电路来抑制这些电压纹波。

大功率可控硅整流电源运行过程中，若输出端LC滤波电路中的电抗器或者电容器出现异常，失去滤波功能，无法过滤掉电路中频率较高的信号，因为电源输出端的电压为带有脉动的直流电，所以输出电压也会波动，导致无法进行稳压控制，需要通过修复LC电路中的电抗器或更换滤波电容解决异常故障问题。

2.5 电压反馈电路异常

(1) 电压反馈电路原理分析

电压反馈电路异常故障是大功率可控硅整流电源输出电压不稳定的主要问题之一。在可控硅整流电源中，电压反馈电路的作用是检测输出电

压，并与设定值进行比较，通过调节可控硅的触发角来保持输出电压的稳定。电压反馈电路通常包括：

1) 电压检测。检测输出电压，并与设定值进行比较。

2) 误差放大。将检测到的电压与设定值进行比较，产生误差信号。

3) 调节器。根据误差信号调节可控硅的触发角，从而调节输出电压。

4) 触发电路。根据调节器的输出信号，提供满足需要的触发脉冲，控制可控硅的导通状态。

电压反馈电路异常问题主要有：

1) 反馈电路设计不当。当反馈电路设计参数不准确或者存在误差时，会导致输出电压与设定值之间的偏差增大，从而引发整流电源输出电压不稳定。

2) 触发脉冲的参数不准确。触发脉冲的幅值、相位和频率不准确，会影响可控硅的导通状态，进而影响输出电压的稳定性。

3) 滤波和放大环节问题。滤波和放大环节的设计不当或参数设置错误，会导致输出电压中的纹波成分增加，影响电压的稳定性。

(2) 反馈控制系统的基本模型

建立电压反馈控制系统的基本模型，闭环系统的传递函数可以表示为

$$\frac{V_{\text{out}}(s)}{V_{\text{ref}}(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)K_f} \quad (6)$$

式中， V_{out} 为输出电压； V_{ref} 为参考电压； $G(s)$ 为可控硅整流电源的开环传递函数（包括整流、滤波等环节的动态特性）； $H(s)$ 为反馈路径的传递函数； K_f 为反馈增益。

(3) 输出电压波动的来源

输出电压的波动可能来源于多个方面，包括输入电压波动、负载变化和元件参数漂移等。这些波动可以视为对系统输入的扰动，用 $\Delta V_{\text{in}}(s)$ 表示。

(4) 输出电压波动的传递

在考虑反馈电路的情况下，输出电压的波动

$\Delta V_{\text{out}}(s)$ 可以表示为

$$\Delta V_{\text{out}}(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)K_f} \Delta V_{\text{in}}(s) \quad (7)$$

(5) 反馈增益的影响

从式（6）、式（7）可以看出，反馈增益 K_f 对输出电压波动有直接影响。当 K_f 增大时，分母 $1 + G(s)H(s)K_f$ 也增大，从而减小了 $\Delta V_{\text{out}}(s)$ 相对于 $\Delta V_{\text{in}}(s)$ 的比例。这表明，增加反馈增益可降低系统对输入扰动的敏感度，提升输出电压的稳定性。

(6) 不稳定因素的分析

如果反馈电路设计不当，也可能导致输出电压不稳定。例如：

1) 反馈延迟。如果反馈路径 $H(s)$ 存在较大的延迟，那么反馈信号可能无法及时反映输出电压的变化，导致系统调节滞后，输出电压波动增大。

2) 反馈增益过大。虽然增加反馈增益可以提高稳定性，但如果增益过大，可能导致系统过于敏感，对微小的输入扰动产生过度反应，甚至引发系统振荡。

3) 非线性因素。在实际系统中，可控硅整流电源和反馈电路都可能存在非线性特性。这些非线性特性可能导致系统在某些工作点附近出现不稳定现象，如极限环或混沌现象。

(7) 电压反馈电路异常分析与处理

电压反馈回路中的电压变送器是可控硅整流电源控制系统的关键元件之一。其主要作用是可将可控硅整流电源输出端的电压或电流以低电压信号形式反馈到可控硅整流电源的调节控制系统，起到隔离整流电源输出端的高电压和反馈信号的作用。工作原理是可控硅整流电源输出端的高压直流电压经过取样采集线路，并联到电压变送器的输入端，电压变送器按一定的比例运算，输出0~10 V或者0~5 V的小信号，反馈回控制系统中，以实现整机电源的PID调节，从而确保电源的稳定输出。如果电压变送器反馈输出的电压误差比较大（大于±1 V或±0.5 V），那么整机控

制系统将无法根据反馈信号正确调整输出，无法稳定控制电源输出。电压变送器异常故障是引起可控硅整流电源输出电压不稳定比较常见的原因之一。

在电压变送器供电正常运行的情况下，检测其输入端和输出端的电压，是判断电压变送器是否损坏最为可靠的方法。例如，某可控硅整流电源采用规格为DC 750 V/5 V的电压变送器，即其输入端的电压范围是0~750 V，对应的输出端是DC 0~5 V；正常情况下，电压变送器运行输入和输出的电压比例应遵循“变送器实测输出电压值/变送器额定输出值=变送器实测输入值/变送器额定输入值”的规律。当实测输入电压为650 V时，变送器输出的电压设为 X ， $X/5 = 650 \text{ V}/750 \text{ V}$ ， $X = 4.33 \text{ V}$ ，计算得到输出电压值应为4.33 V。若实测输出电压与计算的 X 值偏差在 $\pm 0.7 \text{ V}$ 以上，则可以认为该变送器存在异常。调节变送器的校准电位器仍不能达到正常输出电压值时，直接更换变送器即可解决可控硅整流电源输出电压不稳定的异常故障。

部分可控硅整流电源采用输入和输出都是0~10 V的电压变送器，此类变送器有一个共同的特点，即低电压输入和输出，输入和输出的电压比是1:1。在电压变送器供电电源正常的情况下，如输出和输入电压值相差大于 $\pm 0.5 \text{ V}$ ，调节校准电位器仍无法保持输出和输入电压相等的，则可以认为该电压变送器存在问题，可通过更换电压变送器修复故障。

2.6 显示电压表异常

工业用大功率可控硅整流电源普遍采用各种数显电压表作为监测和显示输出电压的仪表，即电压表通过远程监控实时监测电源装置的输出电压。尽管因电压表故障引发的输出电压波动的现象较少，但也是显示电压不稳定异常问题的原因之一。

此类由电压表导致的显示电压波动现象，可通过万用表实测电压表的输入端电压。如实测

电压较稳定，电压表却显现电压波动，则可判断为电压表存在问题，而大功率可控硅整流电源系统正常。若电压表供电模块出现异常，如供电模块的滤波电容（450 V/10 μF ）漏电或者容量衰减，也会导致电压表显示读数不稳定，通过更换滤波电容或者电压表即可解决显示电压表异常故障引起的电压不稳定问题。

2.7 外部因素

外部因素导致大功率可控硅整流电源输出电压不稳定，主要包括电网波动、电磁干扰和生产工况出现异常变化等。

电磁干扰是导致大功率可控硅整流电源输出电压不稳定的一个重要原因。电磁干扰可能来自周围设备、线路或外部环境，通过影响整流器的控制电路或触发电路，造成输出电压波动。

负载变化及外部因素干扰对大功率可控硅整流电源输出电压稳定性的影响较为复杂。在实际应用中，需要综合考虑负载特性、电网电压波动及电磁干扰等因素，采取相应的措施来提高输出电压的稳定性，如优化整流器设计。通过改进整流器的内部结构和控制电路，提高整流器的效率和稳定性。加强电磁屏蔽，通过加强整流器的电磁屏蔽措施，减少外部电磁干扰对整流器的影响。

生产工况改变也是大功率可控硅电源输出电压不稳定的原因之一。例如，在电子铝箔化成生产工序中，为了控制好电子铝箔的形成电压，末极化成的大功率可控硅整流电源采用稳压进行控制。为了实现对化成槽电压的稳压控制，需要将该槽的电压反馈到电解电源的调节控制系统，通过调整电源的调节控制系统，实现电解电源稳压自动控制。除前述原因外，也可以从反馈电压的某化成槽的槽液参数异常方面入手，综合分析电子铝箔末极生产工况中引起大功率可控硅整流电源电压不稳定的原因。

随着国内中高压电子铝箔化成生产工艺的快速发展，大多数中高压电子铝箔加工企业通过采用液体供电的方式来提高中高压电子铝箔化成

生产线的车速，从而提高产能，降低化成用电成本。因此，在电子铝箔化成生产过程中，若负责液体供电的馈电槽和化成槽的电导率严重偏低，则会导致大功率可控硅整流电源的输出电压急剧波动，无法实现稳压控制。可以通过检测电解液参数，判断排除馈电槽和化成槽液体问题引起大功率可控硅整流电源不稳定的现象；经过检测液馈的电解液，证实电解液存在电导率偏低的，则置换电解液调节槽液参数，即可处理好因液馈电解液电导率引起的检定电压波动问题。

3 推广使用智能工控新技术

大功率可控硅整流电源在铝电解、电力输送和工业控制等领域中起到了至关重要的作用。然而，电源失稳问题一直是影响其性能和可靠性的重要因素，为了提高其可靠性以及维修效率，可以通过推广使用智能工控新技术解决当前的问题。

1) 推广模块化设计理念，将整流电源划分为多个独立模块，并且在弱电控制部分采用可靠的拔插式安装，以便于快速更换和维修，降低维修难度和成本。

2) 引入先进的在线监测和故障诊断技术，建立整流电源故障预测与诊断模型，实时监测整流电源的运行状态，包括电流、电压、温度等关键参数，通过对整流器运行数据的实时监测和分析，提前发现潜在的故障点，并进行预警和定位。这不仅可以减少故障发生的概率，还可以提高维修效率，降低维修成本。

3) 引入先进的智能控制算法，如模糊控制、神经网络等，对可控硅的触发角进行动态调整，以实现输出电压的精确控制。这种算法可以根据整流器的实时工作状态和外界环境，自动调整控制策略，从而提高输出电压的稳定性。

4) 开展预防性维护工作。定期对大功率可控硅电源进行预防性维护，包括清洁散热系统、检查接线和元件状态、测试电压和电流等。通过预防性维护，及时发现并处理潜在问题，避免故障发生。

4 结束语

大功率可控硅整流电源输出电压失稳问题是一个复杂而重要的问题。本文介绍了大功率可控硅整流电源的组成和运行控制原理，研究分析了大功率可控硅整流电源运行过程中输出电压失稳的原因和故障维修方法。通过深入研究大功率可控硅整流电源输出电压失稳问题，结合推广使用智能工控新技术的创新性思路，可以进一步提高整流器的稳定性和可靠性，还能够提高维修效率，降低维修成本，提供更加稳定、高效的电力支持。随着我国制造生产技术的不断进步和创新，大功率可控硅整流电源的稳定性必将得到进一步的提升。

参考文献

- [1] 孙小平. 高性能大功率可控硅整流脉冲电源[J]. 沈阳航空工业学院学报, 1994(2): 18-25.
- [2] 武兆才. 可控硅整流器中的一种简单易行的触发控制电路[J]. 无线电通信技术, 1982(6): 44-48.
- [3] 成汉湘. 一种大功率可控硅整流的高稳定直流稳压电源[J]. 宇航计测技术, 1982(1): 84-86.

作者简介

蓝振辛（1984—），男，通信作者，工程师，研究方向为电气工程及其自动化。

（收稿日期：2024-12-24）