

电解铝整流供电系统中的无功补偿及高次谐波研究

张 驰¹ 王金龙¹ 邢 沛¹

ZHANG Chi WANG Jinlong XING Pei

摘要

采用理论分析与仿真模拟相结合的方法,研究高次谐波的产生机制和危害,提出针对高次谐波的抑制设计方案,包括谐波源负载补偿、电容器回路串电抗及滤波回路的无功功率调节等技术。研究结果表明,无功补偿与高次谐波抑制相结合,能够有效改善电解铝整流供电系统的功率因数,提高电能利用效率,并减少系统运行中的设备损耗。可见,采用合理的无功补偿措施和谐波抑制设计,能够提高系统稳定性并延长设备使用寿命,对电解铝生产的能源管理和电气设备保护具有重要意义。

关键词

电解铝整流; 无功补偿; 滤波回路; 谐波抑制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.12.011

0 引言

电解铝行业作为高耗能产业,整流供电系统的稳定性对生产质量和经济效益有直接影响。但系统运行中普遍存在功率因数低和高次谐波污染等问题,严重影响供电质量。当功率因数低于 0.9 时,将造成电能损耗增加,导致设备绝缘加速老化、系统效率下降等一系列问题。同时,高次谐波进一步加剧了系统的不稳定性。因此,深入研究电解铝整流供电系统中的无功补偿技术和高次谐波治理方法,有助于提高供电质量,降低能耗,具有重要的实用价值。

1 电解铝整流供电系统概述

1.1 电解铝生产工艺简介

电解铝生产采用霍尔-埃鲁法,包括以下步骤。首先,将氧化铝溶解在 800~960 °C 的氟化盐熔融电解质中。电解槽由钢壳构成,内衬碳块作为阴极,悬挂的预焙阳极浸入电解质中。通入直流电后,在 3~5 V 电压和高温作用下,氧化铝被分解。游离氧与阳极碳反应生成的 CO₂ 逸出,而金属铝在阴极析出,沉积于槽底。液态铝定期从槽底抽出,经过搅拌、除渣等处理后,铸造成各种规格的铝锭。整个过程连续进行,需要精确控制电流密度、温度等参数,以确保产品质量和能源效率。

1.2 整流供电系统的组成和工作原理

电解铝整流供电系统是一个复杂而精密的电力转换和传输系统,主要由调压变压器、整流变压器、整流器、直流母线、电解槽和控制系统等关键部件组成。系统的工作始于高压电

源,电能通过降压变压器降至中压级别,后经整流变压器进一步降压并调节输出电压。经过这两级变压后的交流电进入整流器,在此转换为直流电。转换后的直流电通过母线系统输送至电解槽,为铝的电解过程提供必要的电能。整个过程中,控制系统发挥着重要作用,实时监控和调节系统各个环节,确保供电的稳定性。通过调节整流变压器的分接头和整流器的触发角,系统能够灵活控制输出电压和电流,以适应电解槽在不同工况下的需求,优化生产过程并提高能源利用效率。具体原理如图 1 所示。

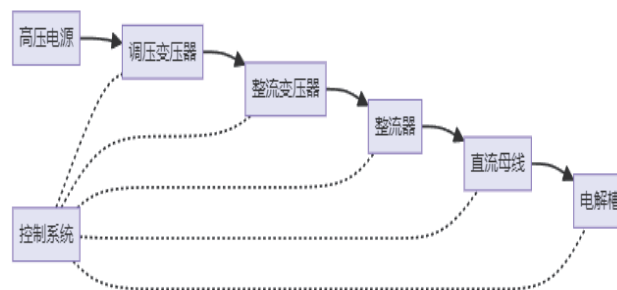


图 1 原理示意图

2 无功补偿技术分析

2.1 无功功率产生原因

在电解铝整流供电系统中,无功功率产生的原因是多方面的。整流变压器和整流器本身具有感性特性,会吸收大量无功功率。整流过程中的换相重叠现象导致功率因数下降,产生额外的无功功率^[1]。电解槽在运行过程中表现出非线性负载特性,也会引入无功成分。系统中的电力电子设备在开关过程中会产生谐波,进一步增加了无功功率。这些因素共同作用,导致系统整体功率因数降低。

1. 甘肃东兴铝业有限公司 甘肃嘉峪关 735100

2.2 无功补偿的意义

在电解铝整流供电系统中，无功补偿具有重要意义，可以显著提高系统的功率因数，减少线路损耗，提升能源利用效率^[2]。无功补偿可以改善电压质量，减少电压波动，确保电解槽稳定运行，降低变压器和输电线路的容量要求，减少设备投资。通过减少无功功率，可以释放系统有功功率传输能力，提高整体供电能力，提高铝生产效率。

2.3 电解铝整流供电系统常用无功补偿技术

电解铝整流供电系统常用的无功补偿技术种类较多^[3]。固定电容器组补偿，通过并联固定容量的电容器来提供无功功率；可控电抗器补偿，利用可控硅调节电抗器阻抗来动态调节补偿量；静止无功补偿器（SVC），结合可控电抗器和固定电容器，实现快速、连续的无功调节；有源电力滤波器（APF），能同时补偿无功功率和抑制谐波；以及同步调相机，通过调节励磁电流来动态补偿无功功率。

3 高次谐波的危害

高次谐波是指在电力系统中，频率为基波频率整数倍（通常大于1倍）的正弦波分量^[4]。在50 Hz的电力系统中，100 Hz、150 Hz、200 Hz等频率的电流或电压分量都属于高次谐波。这些谐波主要由非线性负载设备（如整流器、变频器等）产生，这些设备在运行中会导致电压和电流波形失真，偏离理想的正弦波形。高次谐波越高，其频率越大，对系统的影响也越复杂。比如，高频谐波会显著增加电网设备的热损耗，还可能对敏感设备的稳定性和电力质量造成威胁。

高次谐波在电解铝整流供电系统中的危害是多方面的，严重影响系统的稳定性。高次谐波会导致电网电压波形畸变，影响电能质量^[5]。这种畸变容易引起敏感设备的误动作，进而影响电解铝生产的稳定性和产品质量。此外，谐波电流会增加线路和变压器的电气损耗。比如，在变压器中，高次谐波可能引发额外的涡流损耗和磁滞损耗，导致设备过热，缩短其运行寿命。特别在变压器中，谐波容易引起额外的涡流损耗和磁滞损耗，降低使用效率。高次谐波还可能引发电网的谐振问题，甚至影响整个供电系统的正常运行。

4 电解铝整流供电系统中高次谐波的抑制设计

电解铝整流供电系统中高次谐波的抑制设计是一个复杂的工程任务。需要对系统全面的谐波分析，确定主要谐波源和谐波特性。通常涉及使用高精度的电能质量分析仪器，对系统各点的谐波含量进行测量。基于分析结果，可以设计多级滤波方案。在整流变压器二次侧，安装调谐滤波器，针对性地抑制特定次数的谐波。这些滤波器通常针对5次、7次、

11次谐波进行设计，因为这些是整流器产生的主要谐波。这些滤波器通过精确设计，与目标谐波频率形成共振，从而将谐波电流消耗于滤波器内。

对于高次谐波，可以采用宽带滤波器或高通滤波器。这些滤波器能够有效抑制11次及以上的谐波，防止它们进入电网。考虑到电解槽的非线性特性，可以在整流变压器一侧安装有源电力滤波器（APF）。APF能够通过实时检测谐波电流，并产生与之相等但相反相位的补偿电流，有效实现对多次谐波的动态抑制。

在设计过程中，需注意系统的谐振问题。在选择滤波器参数时，应避免与系统固有频率产生共振，需要进行详细的谐振分析和仿真验证。还可以采用多脉波整流技术，如12脉波或24脉波整流，其基本原理是通过相位移技术，将特定次谐波在相位上相互抵消，从而降低系统中的谐波含量。

5 含有谐波情况下的无功补偿

5.1 对谐波源负载的补偿

在电解铝整流供电系统中，整流器作为主要的谐波源，其非线性负载特性对无功补偿提出了特殊要求。传统的无功补偿方法在含有谐波的系统中容易失效或引发新问题，因此需要采用系统的补偿策略。需要考虑谐波对功率计算的影响。在含谐波的系统中，电压和电流波形可表示为基波与各次谐波的叠加公式为：

$$v(t) = V_1 \sin(\omega t) + \sum V_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

$$i(t) = I_1 \sin(\omega t - \theta_1) + \sum I_n \sin(n\omega t - \theta_n) \quad (2)$$

式中： V_1 和 I_1 为基波分量； V_n 和 I_n 为 n 次谐波分量。基于这些表达式，可以得出有功功率 P 和无功功率 Q 的计算公式：

$$P = V_1 I_1 \cos \theta_1 + \sum V_n I_n \cos \theta_n \quad (3)$$

$$Q = V_1 I_1 \sin \theta_1 + \sum V_n I_n \sin \theta_n \quad (4)$$

在实际应用中，通常关注250 Hz以下的谐波，主要考虑3次、5次和7次谐波。这些谐波不仅增加了系统中的无功功率负担，还会对设备运行和电能质量产生不可忽视的影响，谐波引起的无功功率波动可能导致电压波形畸变、设备发热增加、电磁干扰加剧等问题。为了最大程度减少谐波危害，补偿方案需兼顾谐波抑制与无功功率调节。

谐波源的主要特点是电流波形的非线性引起电压波形畸变，这种特性直接影响到补偿装置的设计与优化。在选择补偿设备时，需要明确谐波电流频谱特性，通过实测数据进行分析，确定特定谐波频率的幅值与相位分布，并制定针对性补偿措施。对谐波源负载的补偿应包括以下几个重点：一是精确测量和分析谐波特性。使用谐波分析仪或功率质量监测设备对整流供电系统进行长时间监测，以获取关键谐波数据。

基于数据分析,制定合理的补偿方案。二是分步优化补偿策略。首先,通过基波无功功率补偿稳定系统电压;其次,采用谐波滤波装置消除主要谐波成分;最后,引入智能控制策略实时调节动态无功需求。

为了有效补偿含谐波系统的无功功率,通常采用复合补偿方案。这种方案结合了固定电容器组、动态无功补偿装置和谐波滤波器。固定电容器组主要用于补偿大部分基波无功功率,而可控电抗器或静止无功补偿器(SVC)则用于动态调节剩余的基波无功功率。安装谐波滤波器可以抑制谐波,提供部分无功补偿。

以5次谐波滤波器为例,其容量可表示为:

$$Q_5 = V_1^2 / (2\pi f_1 L_5) \quad (5)$$

式中: L_5 为5次谐波滤波器的电感值。设计滤波器时,需要确保其阻抗特性在特定频率下呈现最小值,以达到高效滤波的效果。此外,滤波器的安装位置与运行模式也会显著影响补偿效果,应结合电网拓扑结构合理布置。实际运行中,动态补偿装置(如SVC或静止同步补偿器STATCOM)与滤波器协同工作,通过自动控制算法适应负载变化,提升补偿效率^[6]。例如,负载波动频繁时,STATCOM可快速响应调节无功功率,维持系统稳定运行。复合补偿方案的效果可以通过指标评估:谐波总畸变率(THD)是否达到标准要求,无功功率因数的提高幅度,以及整流供电系统的运行经济性改善程度。

在实际应用中,系统的动态特性和负载变化会影响补偿效果。因此需要采用更系统的控制策略,比如自适应控制或预测控制,以实现最优的补偿效果。预测控制策略利用系统的历史运行数据和当前状态,通过算法预测未来负载变化并提前调整补偿设备参数,从而避免滞后效应。这种方法在动态复杂的供电环境中具有显著优势。与传统控制方法相比,预测控制策略可实现更高的响应速度和更低的控制误差,尤其适用于电解铝整流系统等大功率、高负荷场景。此外,自适应控制策略通过实时监测电压、电流波形,自动调整补偿装置的工作状态。具体措施包括:调整滤波器谐振频率以适应谐波频率漂移,优化SVC或STATCOM的控制参数以提高动态响应能力。通过结合预测和自适应控制,可显著提升复合补偿方案的稳定性和可靠性。通过制定综合考虑谐波影响的复合补偿方案,可以有效提高电能质量,降低系统损耗,进而提升电解铝生产效率。

5.2 电容器回路串电抗

电容器与电抗串联构成谐振回路,在特定频率下呈现极低阻抗。当谐振频率与电网谐波频率吻合时,回路的阻抗降到最低,电流的通道几乎没有阻碍,这使得电流能够通过谐

振回路,从而有效地吸收特定的谐波。然而,实际电网中存在的谐波频率并不是单一的,而是由多个不同频率的高次谐波成分组成。这就需要设计者根据系统的谐波源特性,合理选择谐振频率并通过适当的电抗器和电容器容量配置来优化滤波效果。失谐滤波回路主要防止谐波放大,效果有限,仅吸收少量高次谐波,大部分仍流入电网。纯滤波回路则专注于谐波吸收和基波无功补偿。

谐振回路的谐振频率可以通过公式计算:

$$f_r = 1/2\pi\sqrt{LC} \quad (6)$$

式中: f_r 为谐振频率; L 为电抗器的电感值; C 为电容器的电容值。

在谐振频率处,回路的阻抗达到最低,对特定频率的谐波电流提供几乎无阻碍的通道,从而达到吸收谐波的目的。这种现象被称为串联谐振。

失谐滤波回路通过设计使谐振频率略低于目标谐波频率(通常为96%~98%),可以有效减少谐波放大的风险。例如,在处理5次谐波时,失谐滤波回路的谐振频率可能设定在47.5~49 Hz(50 Hz的96%~98%)。这种设计同时增强了滤波器对系统频率波动的适应性。

谐振状态下,滤波回路阻抗接近零,对特定谐波形成“短路”。由于回路在谐振点以下呈容性,与电网电感产生并联谐振。若该频段无特征谐波,并联谐振通常不会危及电网。

△接线电容器的滤波回路谐振频率常设为特征谐波频率的96%~98%,以适应电网频率波动和温度引起的电容量变化。多个不同谐振频率的滤波器在两个过零点间容易出现并联谐振点。这种设计既能有效滤除谐波,又能补偿无功功率,考虑了电网参数变化的影响,确保滤波系统的稳定性和适应性。

5.3 滤波回路的无功功率调节

滤波回路的主要任务是吸收电网谐波,在一定程度上限制了对基波无功功率调节的灵活性。为了平衡谐波吸收与无功功率调节的需求,特别是对于容量较大的补偿滤波装置,常采用纯滤波回路与失谐滤波回路相结合的方式。这种结合方案能够在确保有效吸收谐波的同时,提升无功功率调节的灵活性和响应速度,从而提高电力系统的整体效率和稳定性。

在无功功率调节过程中,需要注意避免产生并联谐振。并联谐振是指在电力系统中,滤波回路中的容性和感性元件在特定频率下产生共振,这会导致电流的剧烈波动,从而影响系统的稳定性和电能质量。特别是在高次谐波频率下,如果滤波回路没有正确调节,就可能引发并联谐振,造成滤波效果的下降,并可能导致系统负载的异常波动。如果两个同次滤波回路在特征谐波频率下一个呈感性、一个呈容性,容易导致谐波放大,这种现象在系统中会造成更大的谐波污染,

影响系统的正常运行。在解决过程中，需要把两个支路均调为在特征谐波频率下呈感性，即 $\omega r < \nu \times \omega_l$ ，并使各支路电阻接近，以改善电流分配。这样，即使在特征谐波频率下，滤波回路也能稳定运行，避免了由于并联谐振而引起的谐波放大问题。然而，这种方法可能会略微降低滤波效果，因为在进行调节时，滤波回路的滤波能力可能会受到一定的影响。因此，在实际应用中需要权衡不同因素，选择合适的参数来确保系统的整体性能。

5.4 滤波回路的选择

滤波回路的选择需要考虑两个主要原则。

一是谐波抑制优先。滤波回路的首要目标是吸收谐波，降低电网电压畸变率。谐波不仅会影响电能质量，导致设备过早老化和故障，还可能引发电力设备的过热、振动甚至设备损坏，因此滤波回路需要针对系统中存在的主要谐波频率进行设计，最大程度地减少谐波对电网的影响。具体而言，滤波器的设计应该考虑到电解铝整流供电系统的谐波源特性，尤其是高次谐波的特征频率。在实际运行中，通过精确的滤波器频率选择，可以最大限度地吸收那些对电网影响较大的高次谐波，从而确保系统的谐波水平保持在规定的安全范围内，避免因谐波过多而导致的设备损害或电网不稳定。

在进行滤波器设计时，需要准确识别系统中的主频谐波，这通常通过谐波分析仪对电网信号进行频谱分析来实现。在一些复杂的系统中，谐波频率不仅仅局限于固定的几个基频和谐波，还可能包含一些高次频率成分，这些成分对系统的影响不可忽视。因此，滤波器的设计不仅仅要考虑主频谐波的抑制，还要针对可能存在的其他高次谐波进行有效的衰减，确保系统整体的电能质量。

二是无功补偿与谐波抑制并重。在这种设计原则下，滤波回路的作用不仅限于谐波抑制，还应考虑无功补偿的需求。电解铝整流供电系统中的电气设备对无功功率有着较高的需求，尤其是在高负载运行时，系统的无功功率需求会大幅增加。因此，滤波回路的设计需要综合考虑无功功率的补偿效果与谐波的抑制能力。这意味着，滤波器的容量和参数不仅要满足谐波抑制的要求，还要确保能够有效补偿系统中的无功功率，提升电网的功率因数，减少无功功率的损耗，提高电能的使用效率。

滤波器的电容容量配置要根据系统的实际无功需求来进行合理设计。如果仅仅依靠单一的滤波回路来完成这一任务，可能会导致滤波效果与无功功率调节的矛盾，因此，设计时需要在两者之间找到一个平衡点。例如，在一些系统中，可能需要安装多个不同类型的滤波器，或者采取并联补偿和滤波相结合的方式，以同时满足无功功率补偿和谐波抑制的双

重需求。这种设计可以有效降低电网负担，提高电网的功率因数，并减少对电网设施的压力，从而实现更高效、更经济的运行。

在实际应用中，滤波回路的选择还需要考虑系统的具体特点，如谐波源的类型和强度、系统的无功需求、电网的稳定性要求等。经济性因素也是重要考虑因素，需要在投资成本和运行效益之间寻求平衡。对于复杂的电力系统，需要综合运用多种类型的滤波器和补偿装置，以达到最佳的电能质量改善效果。

6 结语

电解铝整流供电系统中的无功补偿和高次谐波治理是一个重要的课题。通过深入分析系统特性，可以设计出结合固定电容器、动态补偿装置和谐波滤波器的综合解决方案。在实施过程中，需要权衡谐波抑制和无功补偿的需求，选择适当的滤波回路和调节策略。同时避免并联谐振等潜在问题，确保系统的稳定运行。随着电力电子技术的发展，动态补偿和自适应控制等先进方法为进一步优化系统性能提供了新的可能。持续的研究和实践将不断提高电解铝生产的能效和电能质量，为行业的可持续发展做出重要贡献。

参考文献：

- [1] 马国强. 电动机就地无功补偿的分析研究 [J]. 现代制造, 2024(13): 17-19+23.
- [2] 倪巡天. 变电一次设计中的无功补偿设计分析 [J]. 光源与照明, 2024(6): 177-179.
- [3] 王亿亿, 周俊浩. 基于配网负荷曲线特性的低压配电网分散无功补偿方法 [J]. 光源与照明, 2024(6): 246-248.
- [4] 卜锦峰, 赵金星, 蒋冬. 复矢量电流调节器抑制高速永磁电机高次谐波 [J]. 计算机仿真, 2024, 41(6): 354-358.
- [5] 李圣清, 何伟华, 罗飞, 等. 串联混合型有源电力滤波器对三相负载谐波源补偿特性的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 115-119.
- [6] 覃国林. 电解铝整流机组谐波滤波器功率因素补偿不足的控制研究 [J]. 大众科技, 2022, 24(4): 72-74.

【作者简介】

张驰（1991—），男，甘肃嘉峪关人，本科，工程师，研究方向：电解铝整流供电系统。

（收稿日期：2024-08-16）