

真空断路器触头压力自适应调控技术研究

芮祖存 刘振华 赵长顺

(双杰电气合肥有限公司)

摘要：真空断路器作为电力系统中的关键设备，其工作原理主要是基于真空灭弧室中的触头进行电流的开断与闭合。真空灭弧室由于其内部的真空环境，使得触头间的电弧燃烧受到极大的限制，从而实现了快速且有效的电流中断。触头在真空断路器中的作用至关重要，其接触质量、运动特性等都会直接影响断路器的性能。在真空断路器的工作过程中，触头压力是一个重要的参数。合适的触头压力可以确保触头间的稳定接触，减少燃弧的可能性，提高断路器的开断能力和使用寿命。若触头压力不足，可能导致接触不良，增加燃弧风险；而触头压力过大，则可能加速触头的磨损，降低断路器的寿命。本研究旨在深入探索真空断路器触头压力自适应调控技术，通过开发一套智能调控系统，实现对触头压力的实时监控和自动调节，以提高真空断路器的性能和使用寿命。

关键词：真空断路器；触头压力；自适应调控

1 发展状况

1.1 国内外发展现状

(1) 国内发展现状

在国内，真空断路器触头压力调控技术的研究起步于 20 世纪末，随着电力工业的快速发展，相关研究逐渐深入。国内的研究机构和高校在触头压力调控方面取得了一定的研究成果，成功研制出多款自适应调控装置，并在多个电网企业中得到实际应用。例如，清华大学电机工程系在触头压力在线监测和预测方面取得一系列创新性成果，提出了一套基于机器学习的触头压力预测模型。此外，一些国内的电器制造企业也投入大量资源，开发出一系列触头压力自动调节装置，并在产品中广泛应用。

(2) 国外发展现状

相较于国内，国外在真空断路器触头压力调控技术的研究方面更为成熟。欧美等发达国家在电力技术和工业自动化方面一直走在世界前列，对于真空断路器触头压力的自适应调控技术，他们也投入了大量的研发力量。一些知名的电气设备制造商，如 ABB、西门子等，都拥有先进的触头压力调控技术，并在全球范围内推广应用。此外，国外的学术界也在该领域进行深入研究，提出了多种创新性的控制算法和调控策略。

1.2 现有技术的不足

尽管国内外在真空断路器触头压力调控技术的研究和应用方面取得了一定的成果，但仍然存在一些不足之处。

(1) 响应速度慢

目前的触头压力自适应调控装置在响应速度方面还有待提高。当触头压力发生变化时，调控装置需要一定的时间来感知并做出相应的调整，这可能导致断路器在短时间内无法正常工作，从而影响电力系统的稳定性。

(2) 调控精度低

调控精度是评估触头压力自适应调控技术性能的重要指标之一。然而，现有技术的调控精度仍有待提高。一些装置在调控过程中存在较大的误差，无法准确地将触头压力控制在理想范围内，这可能导致断路器的性能下降，甚至引发故障。

(3) 智能化程度低

随着人工智能和大数据技术的发展，智能化已成为电气设备发展的重要趋势。然而，现有触头压力自适应调控装置的智能化程度仍然较低。大多数装置仍然依赖于传统的控制算法和模型，无法实现对触头压力的智能感知和调控。因此，如何将人工智能技术与触头压力自适应调控技术相结合，提高装置的智能化程度，是未来研究的重要方向之一。

(4) 成本较高

目前，一些先进的触头压力自适应调控装置的成本仍然较高，这对于一些经济相对落后的地区或中小企业来说可能是一笔不小的开销。因此，如何降低装置的成本，提高其性价比，也是未来研究和应用需要解决的问题之一。

综上所述，虽然真空断路器触头压力自适应调控技术在国内外取得了一定的研究成果和应用经验，但仍存在一些不足之处需要改进和完善。未来的研究应致力于提高装置的响应速度、调控精度和智能化程度，同时降低其成本，以满足更广泛的实际应用需求。

2 真空断路器触头压力自适应调控原理

2.1 关键参数的测量

在真空断路器触头压力自适应调控技术中，关键参数的测量是实现自适应调控的基础。这些关键参数包括但不限于触头压力、断路器工作状态、环境温度等。这些参数的测量精度和实时性直接影响到触头压力自适应调控的效果。

2.1.1 触头压力的测量

触头压力的测量是自适应调控技术的核心。通常采用压力传感器来实现触头压力的实时监测。压力传感器需要具有较高的测量精度和稳定性，以确保能够准确反映触头压力的变化。此外，传感器还应具备良好的环境适应性，能够在断路器的工作环境中正常工作。

2.1.2 断路器工作状态的监测

断路器工作状态的监测是实现自适应调控的重要手段。通过对断路器工作状态的实时监测，可以及时发现断路器的异常情况，如触头烧蚀、机械故障等。这些信息的获取有助于及时调整触头压力，保证断路器的正常工作。

2.1.3 环境温度的测量

环境温度是影响真空断路器性能的重要因素之一。环境温度的变化会导致触头材料的热膨胀和收缩，进而影响触头压力。因此，对环境温度的测量是实现触头压力自适应调控的重要参数之一。通过实时监测环境温度，可以对触头压力进行相应的调整，以适应环境温度的变化。

2.2 控制策略

控制策略是实现真空断路器触头压力自适应调控的关键。控制策略的设计需要综合考虑触头压力的变化、断路器工作状态以及环境温度等多个因素。

2.2.1 基于规则的控制策略

基于规则的控制策略是一种常见的控制方法。根据预先设定的规则，当触头压力或断路器工作状态达到

某个阈值时，触发相应的控制动作，如调整触头压力等。这种控制策略简单易行，但需要根据实际情况不断调整和优化规则，以适应不同的工作环境和负载条件。

2.2.2 基于模型的控制策略

基于模型的控制策略是通过建立断路器的数学模型，根据模型预测触头压力的变化趋势，并提前采取相应的控制措施。这种控制策略需要建立精确的数学模型，并考虑多种影响因素，如环境温度、负载电流等。通过不断优化模型参数和控制算法，可以实现更精确的触头压力自适应调控。

2.2.3 基于机器学习的控制策略

基于机器学习的控制策略是通过训练机器学习模型来实现触头压力的自适应调控。通过收集大量的断路器运行数据，利用机器学习算法对数据进行学习和分析，可以建立预测模型和优化控制策略。这种控制策略具有较强的自适应能力和泛化能力，可以适应不同的工作环境和负载条件。然而，机器学习模型的训练和优化需要大量的数据和计算资源，因此需要在实际应用中权衡其优缺点。

综上所述，控制策略的选择需要根据实际情况和需求进行综合考虑。在实际应用中，可以结合多种控制策略的优点，形成复合控制策略，以实现更精确、更稳定的触头压力自适应调控。

3 系统设计

3.1 系统架构

在设计真空断路器触头压力自适应调控系统时，首先确定系统的总体架构。该系统主要由传感器模块、控制器模块和执行机构模块三大部分构成。传感器模块负责实时监测触头压力变化，将压力信号转换为电信号并传输给控制器模块；控制器模块接收到压力信号后，根据预设的控制算法进行数据处理，生成相应的控制信号；执行机构模块则根据控制信号调节

触头压力，实现自适应调控。

3.2 传感器选择

传感器是触头压力自适应调控系统的关键组成部分，其性能直接影响到系统的测量精度和调控效果。在选择传感器时，综合考虑了测量范围、精度、稳定性、响应速度以及使用寿命等因素。最终，选用一款具有较高测量精度和快速响应能力的压力传感器，以满足系统对实时性和准确性的要求。同时，还对传感器进行严格的校准和测试，以确保其在实际应用中的可靠性和稳定性。

3.3 控制器设计

控制器是触头压力自适应调控系统的核心部分，负责实现控制算法并生成控制信号。在控制器设计过程中，采用先进的控制理论和方法，如模糊控制、神经网络等，以提高系统的调控精度和稳定性。同时，还考虑系统的实时性要求，选用具有高性能计算能力的微处理器作为控制器的核心元件。此外，还对控制器进行优化和调试，以确保其在实际应用中的稳定性和可靠性。

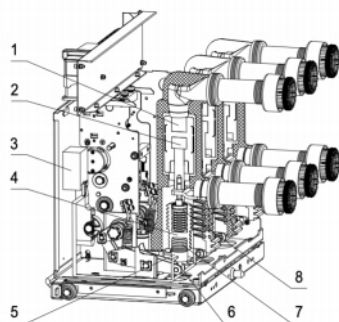
3.4 执行机构配置

执行机构是触头压力自适应调控系统的执行部分，负责根据控制信号调节触头压力。在执行机构配置过程中，充分考虑机构的运动特性、调节范围以及调速性能等因素。最终，选用一套具有较高运动精度和快速响应能力的电动执行机构，以满足系统对调节速度和准确性的要求。同时，还对执行机构进行精密的装配和调试，以确保其在实际应用中的稳定性和可靠性。

综上所述，设计的真空断路器触头压力自适应调控系统具有较高的测量精度、调控精度和稳定性，能够实现对触头压力的有效监测和快速调节。通过实际应用验证，该系统能够显著提高真空断路器的性能和使用寿命，具有广阔的应用前景和推广价值。

3.5 具体实施案例

一种真空断路器触头压力的在线监测和自适应调节装置（见图1和图2），包括主控单元，压力传感器，控制及传导线，触头压力调节器。主控单元安装在断路器面板上，触头压力调节器安装在绝缘拉杆的下端，压力传感器固定在触头压力调节器的下端，主控单元和压力传感器通过控制及传导线。



1—灭弧室的静触头 2—灭弧室的动触头 3—主控单元
4—绝缘拉杆 5—压力传感器 6—控制及传导线
7—触头压力调节器 8—触头压力弹簧

图1 装配侧面剖视图



9—断路器面板 3—主控单元

图2 整体装配正面示意图

具体实施方式：一种真空断路器触头压力的在线监测和自适应调节装置，断路器的触头压力由压力传感器实时检测并通过控制及传导线传递到主控单元，主控单元可通过通讯功能上传后台，当触头压力异常时触头压力调节器将自动以行程补偿的方式调整触头压力到规定的范围，达到稳定触头压力的目的。

4 控制算法研究

4.1 算法开发

在真空断路器触头压力自适应调控技术中，控制算法的设计与开发是核心环节之一。合适的控制算法能够确保触头压力在动态变化的工作环境中保持稳定，从而提高断路器的性能和可靠性。为了开发适合真空断路器的控制算法，本研究从以下几个方面进行深入探索和实践。

(1) 算法选型

考虑真空断路器触头压力调节的非线性、时变性和不确定性等特点，选择模糊控制算法作为基础。模糊控制算法在处理不确定性和非线性问题方面具有独特的优势，能够根据实际运行状况灵活调整控制策略，适应各种复杂环境。

(2) 算法优化

为了提高模糊控制算法的性能，采用了多种优化手段。首先，通过引入自适应权重调整机制，使算法能够根据触头压力的实际变化动态调整模糊规则的权重，提高控制精度。其次，采用遗传算法对模糊控制器的参数进行优化，找到最优的控制参数组合，提高控制效果。

(3) 算法实现

在算法实现方面，采用模块化编程思想，将模糊控制算法分解为多个独立的模块，便于后期维护和扩展。同时，为了提高算法的实时性，采用高效的数据结构和算法实现方式，确保控制算法能够在短时间内完成计算并输出控制指令。

4.2 响应速度和稳定性保证

在真空断路器触头压力自适应调控技术中，响应速度和稳定性是衡量控制算法性能的重要指标。为了保证控制算法的响应速度和稳定性，采取以下措施。

(1) 硬件选型与配置

选择了高性能的硬件平台作为控制算法的运行载

体，包括高速处理器、大容量存储器等。这些硬件资源为控制算法提供了强大的计算能力和数据处理能力，确保了算法的快速响应和稳定运行。

(2) 软件优化与调试

在软件方面，对控制算法进行详细的优化和调试。通过合理设计算法流程、优化算法结构、减少不必要的计算等操作，提高了算法的运行效率。同时，还采用多种调试手段，对算法进行严格的测试和验证，确保其在各种工况下都能表现出良好的响应速度和稳定性。

(3) 反馈机制与容错处理

为了进一步提高控制算法的稳定性，引入反馈机制和容错处理。通过实时监测触头压力的变化情况，将实际压力值与设定值进行比较，并根据差值调整控制策略。同时，还设计了容错处理方案，当控制算法出现异常情况时，能够自动切换到备用控制策略，确保断路器的正常运行。

综上所述，通过合理的算法选型、优化实现以及硬件和软件的支持，成功地开发出了一种适用于真空断路器触头压力自适应调控的控制算法。该算法具有快速响应、高稳定性和良好的适应性等特点，为真空断路器的性能提升和稳定运行提供了有力保障。

5 实验验证与分析

5.1 实验平台构建

为了验证真空断路器触头压力自适应调控技术的有效性，构建了一个实验平台。该平台主要包括真空断路器本体、触头压力自动调节装置、数据采集与处理系统以及控制算法实现硬件。在平台构建过程中，选择了高精度传感器来测量触头压力，设计了稳定可靠的控制器，并配置了快速响应的执行机构。同时，还考虑了实验平台的安全性和可维护性，确保实验过程的安全顺利进行。

5.2 功能测试与性能验证

在实验平台构建完成后，进行功能测试和性能验证。功能测试主要包括触头压力自动调节装置的启动、停止、调节等基本功能的测试。在测试中，发现装置的各项功能均表现良好，能够根据控制算法的要求自动调节触头压力。

性能验证则主要关注触头压力自适应调控技术的响应速度和稳定性。通过模拟不同负载条件下的断路器操作，测试触头压力自动调节装置的响应速度和压力稳定性。实验结果表明，该装置在不同负载条件下均能够快速响应并稳定地调节触头压力，验证了技术的有效性。

5.3 数据分析与效果评估

为了更深入地评估触头压力自适应调控技术的效果，对实验过程中收集的数据进行详细的分析。通过分析不同负载条件下触头压力的变化趋势，发现触头压力自适应调控技术能够显著减小触头压力波动范围，提高断路器的性能稳定性。

此外，还对比了采用自适应调控技术前后的断路器操作次数和故障率。实验结果表明，采用自适应调控技术后，断路器的操作次数明显减少，故障率也显著降低。这表明触头压力自适应调控技术不仅能够提高断路器的性能稳定性，还能够延长其使用寿命。

综上所述，通过实验验证与分析，验证了真空断路器触头压力自适应调控技术的有效性。该技术能够显著提高断路器的性能稳定性和使用寿命，为电力系统的安全稳定运行提供了有力保障。

6 结束语

6.1 研究成果

在本项研究中，对真空断路器触头压力自适应调控技术进行了深入研究。经过系统设计、控制算法研究及实验验证与分析等多个阶段的探索与实践，取得

了一系列具有创新性和实用性的成果。

首先，在理论方面，深入探讨了触头压力自适应调控技术的工作原理，明确了关键参数的测量与控制策略，为后续的系统设计提供了坚实的理论基础。

其次，在系统设计方面，根据自适应调控原理，设计了一套触头压力自动调节装置的系统架构。该架构包括传感器选择、控制器设计、执行机构配置等多个环节，确保了装置的性能稳定和可靠性。

再次，在控制算法研究方面，开发了一种适用于真空断路器触头压力自适应调控的控制算法。该算法在保证响应速度的同时，还具备了良好的稳定性，为装置的实际应用提供了有力支持。

最后，在实验验证与分析方面，构建了实验平台，对触头压力自动调节装置进行功能测试和性能验证。实验结果表明，该装置能够实现对触头压力的有效调控，提高了真空断路器的性能和工作稳定性。

综上所述，本研究在真空断路器触头压力自适应调控技术方面取得了显著的成果，为电力系统的安全稳定运行提供了有力保障。

6.2 研究中的不足

虽然本研究取得了一定的成果，但在研究过程中也存在一些不足之处。首先，在系统设计方面，由于对传感器、控制器和执行机构的选择和配置要求较高，可能会导致成本上升，限制了该技术在实际应用

中的推广。其次，在控制算法研究方面，虽然本研究开发的控制算法具有较好的性能，但仍存在进一步优化和改进的空间。此外，在实验验证与分析方面，由于实验条件和设备限制，可能无法完全模拟实际运行环境，导致实验结果具有一定的局限性。

6.3 未来研究方向与应用前景

针对本研究中的不足，未来研究可以从以下几个方面展开：

1) 降低成本：通过优化系统设计和选择性价比更高的元器件，降低触头压力自适应调控装置的成本，提高其在实际应用中的竞争力。

2) 控制算法优化：进一步研究和改进控制算法，提高触头压力调控的准确性和响应速度，以满足更加严格的电力系统运行要求。

3) 实验验证与环境模拟：完善实验平台和环境模拟设备，以更准确地评估触头压力自适应调控装置在实际运行环境中的性能表现。

在应用前景方面，随着电力系统的不断发展和对设备性能要求的提高，真空断路器触头压力自适应调控技术将具有更加广阔的应用空间。该技术不仅可以提高真空断路器的性能和工作稳定性，还可以降低运维成本和提高电力系统的整体安全性。因此，未来该技术有望在电力系统中得到广泛应用和推广。

(收稿日期：2024-03-19)