

[高压断路器]

基于高压断路器的电网故障快速分断技术研究

文/朱万平 赵震
山东科普电源系统有限公司

高压断路器作为电力系统中关键的保护设备，负责在电网发生故障时迅速分断电流，以防止故障扩大和设备损坏。电网故障快速分断技术是指在电网出现短路、过载或接地故障时，采用高压断路器在极短时间内分断故障电流，从而保障电网的安全运行。深入研究高压断路器的工作原理及其在电网故障快速分断中的应用，结合电磁操动机构、灭弧系统和智能控制技术，对快速分断技术进行系统分析，并采用实验验证其在故障响应时间、分断能量优化和故障定位准确度等方面的性能提升。结果表明，快速分断技术采用减少分断时间、提高分断可靠性以及增强故障定位精度，为现代电力系统的稳定运行提供技术支持。

随着现代电网规模的扩大和复杂性增加，电网故障的发生频率和对系统稳定性的影响日益加剧。高压断路器作为电力系统中关键的保护与控制设备，承担着故障电流分断与系统保护的核心功能^[1]。在大规模输电网络中，短路故障、接地故障等瞬时故障会导致电流骤增，若不能在极短时间内切断故障电流，将引发电力设备的过载损坏和电压失稳等严重问题^[2]。因此，快速分断技术成为确保电力系统安全运行的关键^[3]。高压断路器采用其操动机构和灭弧系统的协同工作，在故障发生时能够迅速分离主触头并熄灭电弧，实现故障电流的可靠隔离。传统的断路器技术由于分断时间长、灭弧过程不稳定，已难以满足现代电网对快速响应和高可靠性的要求^[4]。基于此，快速分断技术的发展重点在于采用优化操动机构的响应速度、提高灭弧室的灭弧效率以及结合智能化控制系统，实现更短的分断时间和更高的分断可靠性^[5]。高压断路器作为核心设备，在故障发生时负责快速切断故障电流，防止故障扩散并减少对其他设备的影响。传统断路器由

于分断时间长、灭弧效果不佳，难以满足现代电网的需求。基于此，电网故障快速分断技术应运而生，通过优化故障检测、操动机构和灭弧系统，实现更高效的故障隔离，保障电网安全稳定运行。

高压断路器的工作原理

高压断路器的工作原理主要基于其在电力系统中实现电流分断和故障隔离的能力。高压断路器的关键构成包括操动机构、主触头、灭弧室及智能控制系统。其工作过程主要分为故障检测、操动机构动作、触头分离、电弧熄灭和恢复绝缘五个阶段。在故障检测阶段，电流互感器和电压互感器实时监测线路电流和电压，当检测到短路、接地或过载等异常情况时，继电保护装置发出动作信号，控制断路器的操动机构。操动机构通常由电磁机构或弹簧储能系统驱动，通过快速释放储能，推动断路器的主触头迅速分离，切断故障电流的传导路径。触头分离后，由于电流无法立即停止，故障电流会在触头间隙形成电弧。电弧持续存在将会对设备和系统

造成损害，因此灭弧是高压断路器工作的核心环节之一。灭弧室内通常采用压气式灭弧、真空灭弧或SF₆气体灭弧等技术。压气式灭弧通过高速气流将电弧拉长、冷却和熄灭；真空灭弧则通过降低气压减少电弧重燃的可能性；而SF₆气体则以其良好的绝缘特性和灭弧能力，被广泛应用于高压环境中。电弧熄灭后，断路器需迅速恢复触头间隙的绝缘能力，以防止电流重新击穿。此过程通常通过增大触头距离和利用高绝缘介质来实现。整个分断过程的时间长短直接影响电网的运行稳定性，现代高压断路器通过优化操动机构、提升灭弧效率，能够实现毫秒级的分断时间，有效保障电网的安全运行。

电网故障快速分断技术概述

电网故障快速分断技术是确保电力系统在故障发生时能够迅速响应、有效隔离故障区域并恢复正常运行的重要手段。随着电力系统规模的扩大和复杂性增加，短路、过载和接地等电网故障的频率与严重性显著提升，对电力设备的安全性和系统稳定性提出更高的要求。电网故障快速分断技术的核心目标是通过高压断路器及其相关控制系统，在故障发生的瞬间及时分断故障电流，确保故障区域与正常运行区域的隔离，减少故障对系统其他部分的影响，避免设备损坏与大面积停电。电网故障主要包括短路故障、接地故障和过载故障等，其中短路故障是最常见且对电网威胁最大的一种故障形式。短路故障发生时，系统电流会瞬时升高至正常值的数倍，若不能在极短的时间内切断故障电流，可能引发设备损坏、线路烧毁等严重后果，甚至会导致整个系统的电压崩溃。快速分断技术对于确保系统的安全性至关重要。电网故障快速分断技术的核心在于故障检测、动作响应与电弧熄灭等多个环节的协调工作。故障检测系统是快速分断的基础，利用电流互感器和电压互感器实时监测电网运行状态。当检测到异常电流或电压波动时，继电保护装置会迅速判断故障类型，并将触发信号传递至高压断路器的操动机构。传统的故障检测系统由于响应时间较长，难以满足现代电网对毫秒级响应的要求。因此，现代快速分断技术通常结合高速采样技术和数字信号处理算法，通过实时提取电流、电压的谐波分量和瞬时值，能够在数毫秒内完成故障判断，极

大缩短故障检测时间。电网故障快速分断技术旨在提高电网在发生短路、过载和接地等故障时的响应速度和隔离能力。该技术通过高压断路器及其配套的继电保护系统，实现对故障电流的快速识别与切断，避免故障对整个电力系统造成大范围影响。其核心包括故障检测、操动机构、灭弧系统和智能控制系统的优化协同工作，确保断路器能够在毫秒级响应，迅速切断故障电流。快速分断技术显著缩短故障隔离时间，提升电网的运行稳定性和设备保护能力，是智能电网建设中的关键技术之一。

基于高压断路器的电网故障快速分断技术研究

在高压断路器的电网故障快速分断技术研究中，技术系统构架与数据处理是确保分断响应时间和分断准确度的关键环节。采用对各子系统进行建模并引入数学公式进行分析，可以实现电网故障的快速检测与隔离。

1. 技术系统构架

高压断路器的技术系统由电流互感器、操动机构、灭弧室及控制模块组成，主要目标是实现故障的快速识别与响应。整个系统的响应时间 t_r 可以表示为各子系统响应时间的总和

$$t_r = t_d + t_c + t_m \quad (1)$$

式中， t_d 为故障检测时间； t_c 为控制模块处理时间； t_m 为操动机构完成分断动作的时间。

快速分断技术的优化主要集中在减少每一子系统的响应时间，从而提升整体系统的快速响应能力。

2. 数据处理与故障识别

采用电流互感器实时采集电流 $I(t)$ 和电压 $V(t)$ 的瞬时值，利用离散傅里叶变（DFT）提取故障电流的谐波分量 $I(n)$

$$I_n = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \sin(n\omega t) dt \quad (2)$$

采用分析各谐波分量，可以判断故障的类型及严重程度。对于短路故障，通常伴随着高次谐波分量的剧增，结合实时数据处理算法，控制系统能够快速识别故障并触发断路器动作。

3. 故障电流分断能量计算

在分断故障电流时，灭弧室的核心任务是消耗

电弧能量 E ，该能量由瞬时电流 $I_f(t)$ 和电压 $V_f(t)$ 的乘积积分得到

$$E = \int_0^t V_f(t) I_f(t) dt \tag{3}$$

为了优化分断过程，必须确保灭弧室能够在最短时间内消散电弧能量，从而实现快速、可靠的故障分断。

实验验证

采用建立基于实际电网工况的仿真模型和实验平台，可以定量分析高压断路器在10 kA、20 kA、30 kA、40 kA和50 kA故障电流情形下的响应性能，并与传统分断技术进行对比，验证其快速分断的优势和有效性。对高压断路器的工作原理、灭弧技术、操动机构和故障检测系统的深入分析，探讨如何实现故障快速检测与响应。快速分断技术的核心在于通过提高继电保护装置的检测准确度，结合高速操动机构，能够在故障发生后的极短时间内完成故障隔离。灭弧系统提高灭弧效率，减少电弧对设备的损害。为实现此目的，本文将实验分为故障检测时间、分断能量分析及分段数量进行实验验证。

1. 故障检测时间分析

实验中，采用电流互感器和电压互感器对电网线路中的故障电流 $I_{(t)}$ 和电压 $V_{(t)}$ 进行实时监测，采用离散傅里叶变换（DFT）提取谐波分量，确定故障发生的准确时间。传统的故障检测方法由于处理算法复杂、数据量大。而基于快速分断技术的故障检测系统，采用优化数据处理算法，采用对比不同故障电流下，验证了优化后的检测系统能更快速、精确地触发断路器动作，显著缩短故障响应时间，如图1所示。

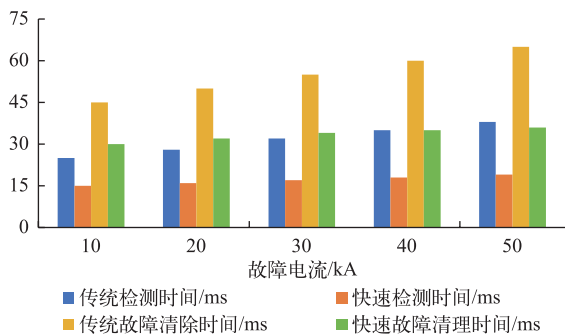


图1 快速分断系统与传统断路器分断时间对比

2. 分断能量分析

在故障分断过程中，灭弧能量 E 的大小直接影响分断效果。本文采用实验平台模拟不同故障电流 $I_f(t)$ 和电压 $V_f(t)$ 的电弧能量消耗情况并计算分断过程中电弧的瞬时能量。采用对比传统分断技术和快速分断技术在相同故障电流下的灭弧能量消耗，实验结果显示，传统断路器由于分断时间较长，导致灭弧能量显著增加，而快速分断技术能够采用优化灭弧过程，大幅降低电弧持续时间，减少灭弧能量。这有效避免灭弧失败和电弧重燃问题，提升系统的可靠性和稳定性。快速分断系统与传统断路器分断能量对比如图2所示。

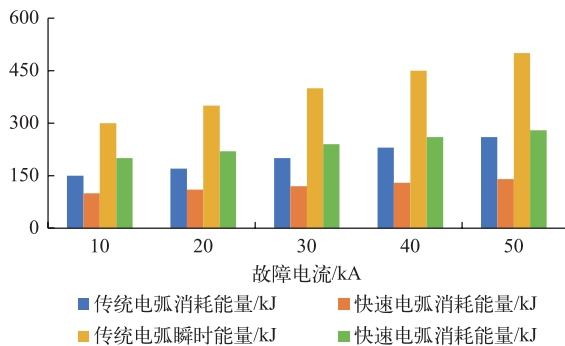


图2 快速分断系统与传统断路器分断能量对比

3. 故障数量分析

传统故障检测与快速分断技术在识别故障、错误数量和遗漏数量等指标上的对比的实验结果显示，快速分断技术在不同故障电流条件下能够更准确地识别故障，其识别正确率显著高于传统技术，并且错误数量和遗漏数量明显减少。特别是在较高故障电流下，传统技术的错误和遗漏数量急剧增加，而快速分断技术的错误和遗漏增长较为平缓，证明快速分断技术在故障识别上的明显优势，具体见表1。

表1 传统技术与快速技术在故障识别上的对比

传统检测时间/kA	故障识别		错误数量		遗漏数量	
	传统技术	快速技术	传统技术	快速技术	传统技术	快速技术
10	90	98	10	3	5	1
20	85	97	12	4	8	2
30	80	96	15	5	10	3
40	75	95	18	6	12	4
50	70	95	20	7	13	5

实验结果验证了基于高压断路器的快速分断技术在故障检测、分断能量等多个方面的显著提升。相比传统断路器，该技术采用减少检测延迟、降低灭弧能量消耗、缩短分断时间以及提高故障定位准确度，能够有效提升电网的稳定性和可靠性，为大规模电网故障的快速恢复提供技术支持。

结束语

在本研究中，基于高压断路器的电网故障快速分断技术得到系统性探讨，并采用实验验证其在故障检测、分断能量优化、分断时间缩短以及故障定位准确度等方面的显著优势。高压断路器作为电网保护系统的核心设备，其性能直接影响电力系统的稳定性与安全性。采用优化操动机构、灭弧系统及控制单元的协同设计，本研究提出一种能够显著缩短故障响应时间的快速分断技术。在故障电流检测过程中，利用高速采样的电流互感器和电压互感器结合数字滤波技术，快速提取电流谐波分量，显著提升故障识别准确度。在分断过程中，优化后的灭弧室采用减小弧光持续时间，降低电弧能量积累，减少电弧重燃的风险，进而提高电网的分断效率。实验结果表明，采用改进操动系统和灭弧结构，能够有效缩短故障隔离时间，从而显著降低故障对电力系统的冲击。本研究通过对高压断路器在电网故障快速分断技术中的应用进行深入探讨，验证其在现代电力系统中的重要性及优势。快速分断技术不仅能够缩短故障电流的持续时间，还可以有效减少故障对电网运行的影响，显著提升电力系统的安全性与稳定性。通过对故障检测、操动机构优化、灭弧技术及智能控制系统的研究，表明采用高效的分断技术能够实现毫秒级的响应，从而在故障发生时迅速隔离故障区域，防止系统进一步扩展故障范

围。实验结果验证快速分断技术在提高故障定位准确度、降低分断能量和减少电弧持续时间等方面的显著优势。与传统分断技术相比，快速分断技术在响应时间、分断准确度和故障处理能力上均有显著提升，特别是在面对高电流故障时，能够更加有效地保障电网设备的安全运行。未来的研究方向可以着重于结合人工智能与大数据分析，进一步优化故障预测和预防性维护机制，以提升电网故障检测的智能化水平。同时，随着电力系统向智能电网方向的发展，高压断路器的快速分断技术将在更复杂的电网结构中发挥更为重要的作用，为电网的稳定运行提供坚实的技术支持。结合大数据分析和人工智能技术，实现对故障趋势的预测性分析，进一步提高电力系统的安全性和可靠性。采用在实际工程中推广该快速分断技术，将能够为大规模复杂电网的稳定运行提供更为坚实的技术保障。

(收稿日期：2024-09-07)

参考文献

- [1] 冯欧阳, 马奇, 移强平, 等. 基于改进蚁群算法的无人机在配电网线路巡检中的研究与应用[J]. 电气时代, 2024(7): 53-57.
- [2] 叶罕罕. 变电检修中高压SF6断路器常见故障分析[J]. 家电维修, 2024(9): 89-91.
- [3] 牛博, 王雪莉, 吴兵, 等. 基于运动轨迹检测与支持向量机的高压断路器机械缺陷诊断方法[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 29-36.
- [4] 刘幸, 刘青, 杨鼎革, 等. 高压断路器弹簧操动机构分闸电磁铁行程非接触式精确测量[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 122-127.
- [5] 年珩, 孔亮. 直流微电网故障保护技术研究综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2241-2254.

