

基于选相分合闸技术的短路模拟装置系统设计

戴志伟 周丹凤 侯喆

中国船舶重工集团公司第七〇三研究所无锡分部，江苏省无锡，214151；

摘要：本文提出了一种具有选相分合闸功能的短路模拟装置，旨在解决传统短路模拟装置在精确控制和安全性方面的不足。该装置集成了选相分合闸技术，能够精确控制短路发生的时刻，实现对电力系统短路故障的精确模拟。文章详细阐述了装置的设计原理、硬件结构、软件实现以及实验验证。结果表明，该装置能够有效提高短路模拟的精度和安全性，为电力系统研究和设备测试提供了可靠的工具。

关键词：短路模拟；选相分合闸；精确控制；电力系统；故障模拟

DOI：10.69979/3041-0673.26.01.028

引言

随着电力系统规模的不断扩大和复杂程度的日益提高，短路故障的模拟和研究变得尤为重要。传统的短路模拟装置存在控制精度不足、安全性差等问题，难以满足现代电力系统研究和设备测试的需求。选相分合闸技术作为一种先进的开关控制技术，能够精确控制开关的合闸和分闸时刻，为短路模拟装置的改进提供了新的思路。

本研究旨在设计一种集成选相分合闸功能的短路模拟装置，通过精确控制短路发生的时刻，提高短路模拟的精度和安全性。该装置的研究和开发对于电力系统故障分析、保护设备测试以及电力系统稳定性研究具有重要意义，可为电力系统的安全运行和可靠供电提供有力支持。

1 选相分合闸技术原理

选相分合闸技术是一种基于精确时序控制的开关操作技术，其核心原理是通过检测电网电压的相位，在

预定的相位角精确控制开关的合闸或分闸操作。该技术能够有效减少开关操作时的瞬态过程，降低操作过电压和涌流，提高电力系统的稳定性和可靠性。

在短路模拟装置中应用选相分合闸技术，可以实现对短路发生时刻的精确控制。通过实时监测电网电压相位，装置可以在指定的相位角精确触发短路，从而模拟真实的短路故障情况。这种精确控制不仅提高了短路模拟的准确性，还能够有效降低短路模拟过程中对电力系统和设备的冲击，提高试验的准确性和安全性。

2 短路模拟装置设计

本装置的总体设计方案包括硬件和软件两个部分。硬件部分主要由信号采集模块、选相控制模块、远程控制模块、短路执行模块和模拟负载模块组成。信号采集模块用于记录短路过程中的各种电气参数；选相控制模块负责实时监测电网电压相位并生成控制信号；短路执行模块根据控制信号精确执行短路操作；模拟负载模块为整个短路模拟试验系统提供可靠的阻感负载。下面是短路模拟装置的电气原理图。

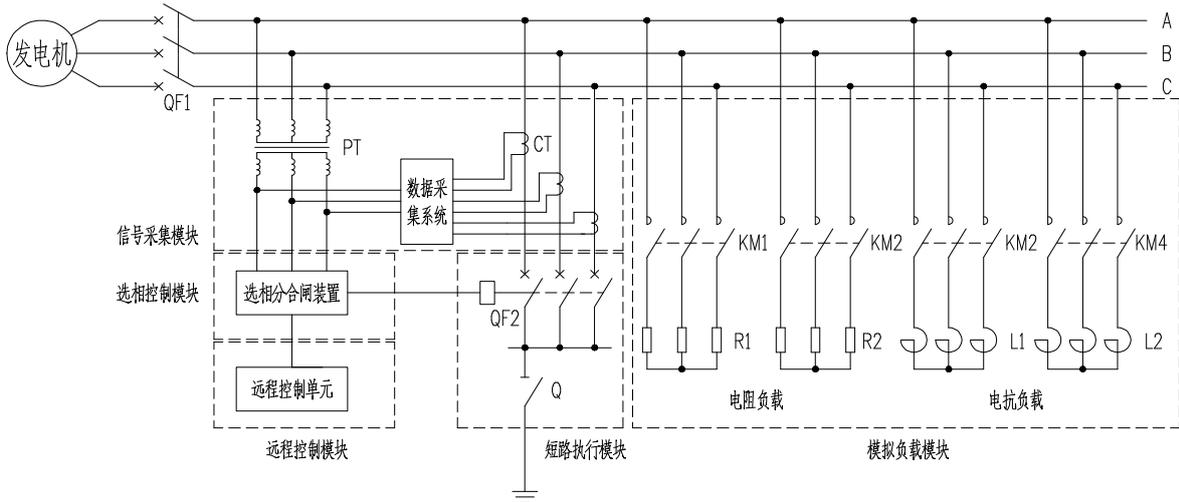


图1 短路模拟装置电气原理图

软件设计方面，采用模块化编程思想，主要包括相位检测算法、控制逻辑、数据采集和处理等模块。相位检测算法实时计算电网电压相位；控制逻辑根据预设参数生成精确的控制信号；数据采集和处理模块负责记录和分析短路过程中的各种电气参数。软件系统还设计了友好的人机交互界面，方便用户设置参数和查看实验结果。图2是短路模拟装置合闸控制逻辑。

短路模拟装置可以模拟两相短路故障、三相对称短路故障和单相对地短路故障，独创了相位自适应补偿算法，可以静态校准合闸补偿时间，提升合闸控制精度。

控制模块设有自动分闸功能，自动分闸功能采用双重化配置，确保短路模拟装置运行的可靠性。图2是短路模拟装置的控制逻辑，其中合闸控制角为 90° ， h_0 是合闸命令发出时间， h_1 是电压波形过零点， h_2 是选相合闸命令发出时间， h_3 是合闸延时动作时间， h_4 是合闸点， t_2 是合闸延时时间， t_3 是断路器合闸固有时间，则

$$\text{合闸控制时间 } t_1 = h_4 - t_3 - t_2 + N \cdot T$$

其中， N 为选相合闸实现的最小整数， T 为电压波形周期。

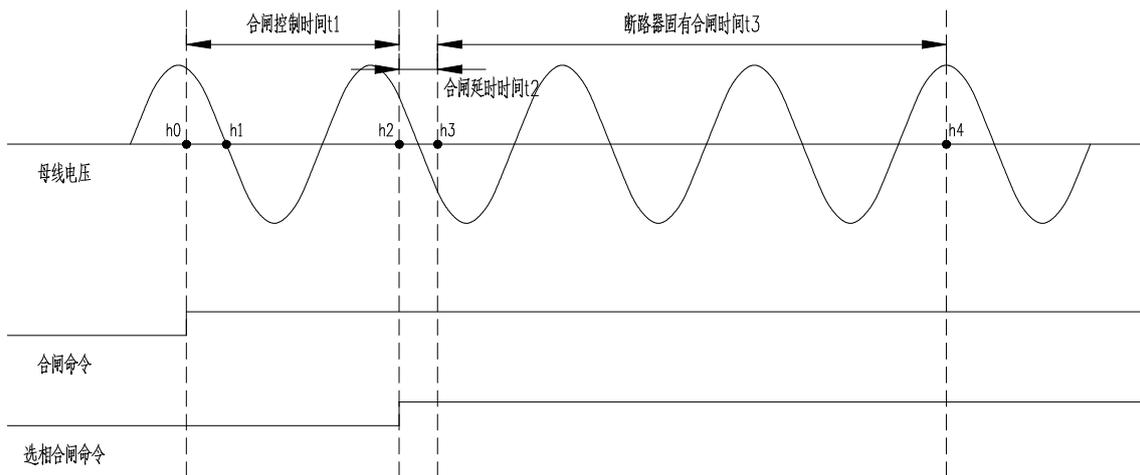


图2 短路模拟装置合闸控制逻辑

以电力系统中的A相为基准电压，断路器合闸角度为 90° ，此时短路电流最大。短路模拟装置接收到远程控制模块发出的合闸控制指令后，由选相控制模块启动

选相合闸逻辑，数据采集装置通过电压互感器确定波形过零点 h_1 ，短路模拟装置根据断路器合闸情况与预测控制算法确定合闸控制时间，合闸控制时间已经考虑了断

路器合闸延时、固有合闸时间、预击穿时间、外部补偿时间等因素，最终确保断路器在 h4 时刻完成合闸操作。

断路器合闸动作时间预测模型如下：

$$T_{\text{合闸}} = (\theta_2 - \theta_1) / 2\pi f - T_{\text{延时}}$$

θ_2 ：合闸时的角度

θ_1 ：合闸命令发出时的角度

T 延时：根据自适应补偿算法在断路器预合闸时得到

3 短路模拟装置性能测试

表 1 合闸测试结果

序号	短路合闸角	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	最大误差
1	0°	-0.22	0.13	0.24	-0.08	0.15	0.24
2	30°	30.27	29.88	30.01	30.19	29.69	0.31
3	45°	45.40	45.11	44.96	45.32	45.05	0.40
4	60°	60.16	60.36	59.84	59.92	60.33	0.36
5	90°	90.42	90.18	89.89	90.41	90.22	0.42

实验结果表明，该装置能够实现 $\pm 0.5^\circ$ 的相位控制精度，短路触发时间误差小于 $10 \mu s$ ，完全满足电力系统短路模拟的要求。与传统的短路模拟装置相比，本装置在控制精度、安全性和可靠性方面均有显著提高，为电力系统研究和设备测试提供了更加精确和安全的实验平台。

4 结论

本研究成功设计并实现了一种具有选相分合闸功能的短路模拟装置。该装置通过集成选相分合闸技术，实现了对短路发生时刻的精确控制，显著提高了短路模拟的精度和安全性。实验结果表明，该装置具有良好的性能和可靠性，可广泛应用于电力系统故障分析、保护

在装置实现过程中，重点解决了高精度相位检测、快速短路执行和系统抗干扰等关键技术。采用高性能数字信号处理器实现精确的相位检测，设计了大功率快速响应的短路执行机构，并通过多重屏蔽和滤波措施提高了系统的抗干扰能力。

为验证短路模拟装置的性能，我们设计了一系列实验，在 10kV 真空断路器上进行了性能测试，分别在 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 进行了短路合闸测试，测试情况如下：

设备测试和电力系统稳定性研究等领域。未来的研究方向包括进一步提高装置的响应速度和精度，拓展装置的功能以适应更复杂的电力系统故障模拟场景，以及探索装置在智能电网和新能源系统中的应用潜力。

参考文献

- [1] 陈谦. 选相分合闸技术在工程实践中的应用[J] 华电技术. 2010. 07.
- [2] 丁富华. 真空开关的选相控制及其应用研究[D] 大连理工大学. 2006.

作者简介：戴志伟（1979.06—），男，汉，江苏张家港市，高级工程师，大学本科，电气工程及其自动化。