

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240456

基于振荡过零回路的限峰限流装置设计及限流特性分析

余银钢^{1,2}, 潘天红¹

(1. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601; 2. 高可靠配电技术安徽省
联合共建学科重点实验室, 安徽 合肥 230088)

摘要: 工矿企业的配电网系统短路电流超标是威胁设备稳定运行的最严重因素。为此, 提出了一种 LC 串联再并联于主断路器的电气回路, 其电流频率约为 1.3 kHz。该高频电流与系统短路故障电流同时流过主断路器, 强制短路电流提前过零, 实现真空环境下电气开断的短路限流策略。该策略设计一种分闸时间小于 1.2 ms 的超高速真空断路器和 LC 高频振荡回路并联的强制过零单元, 可及时切断主回路并投入限流电抗器, 实现对短路电流的有效抑制。在此基础上, 详细分析了限流装置的运行机制、关键参数设计以及该技术在实际配电网中的应用潜力。通过仿真与实体试验验证, 所设计的限流装置能够将短路峰值限制在实际值的 70% 以下, 显著降低短路电流的峰值水平, 有效减轻对配电网设备的冲击, 进而显著提升了系统运行的稳定性。

关键词: LC 高频振荡回路; 强制过零; 超高速真空断路器; 限峰限流

Peak current limiting device design using an oscillating zero crossing circuit and current limiting characteristics analysis

YU Yingang^{1,2}, PAN Tianhong¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Province Joint Construction Discipline Key Laboratory of High Reliable Power Distribution Technology, Hefei 230088, China)

Abstract: Excessive short-circuit current in distribution networks of industrial and mining enterprises is one of the most severe threats to the stable operation of equipment. To address this issue, an electrical circuit comprising an LC series circuit connected in parallel with the main circuit breaker is proposed, generating a current frequency of approximately 1.3 kHz. The high-frequency current flows through the main circuit breaker along with the system short-circuit fault current, forcing the short-circuit current to reach zero earlier and enabling a short-circuit current-limiting strategy in a vacuum condition. The proposed strategy incorporates an ultra-high-speed vacuum circuit breaker with an opening time of less than 1.2 ms, and a parallel LC high-frequency oscillatory circuit as a forced zero-crossing unit. This setup allows the main circuit to be rapidly interrupted, while a current-limiting reactor is subsequently introduced to effectively suppress the short-circuit current. Furthermore, this paper provides a detailed analysis of the operating mechanism of the current-limiting device, key parameter design, and its potential application in real-world distribution networks. Simulation and experimental validations demonstrate that the proposed current-limiting device can limit the short-circuit peak to below 70% of the actual value, thereby significantly reducing the peak short-circuit current, mitigating the adverse impact on distribution network equipment, and substantially enhancing the overall system operational stability.

This work is supported by the Technology Innovation Project of Anhui Province (No. 202423i08050033).

Key words: LC high-frequency oscillatory circuit; forced zero-crossing; ultra-high speed vacuum circuit breaker; peak current limiting

0 引言

在电力系统的日常运行中, 短路和单相接地故

障常常因为设备缺陷、绝缘老化或外部破坏而突发, 其中短路故障后果尤为严重。为了缓解这类故障对系统的冲击, 一方面通过精心设计电网结构, 采用小型化分布式电源和电抗器限制短路电流; 另一方面, 在故障发生时断路器需快速开断切除故障点。因此, 如何快速有效地投入限流电抗器并快速切断

基金项目: 安徽省科技创新攻坚计划项目资助(202423i08050033); 国家自然科学基金项目资助(52377164)

短路支路, 成为了处理这类事故的关键问题。

得益于断路器技术的突破, 特别是短路电流相控开断控制^[1]和相控分闸电磁斥力机构技术的进步^[2-3], 目前能够将短路电流的持续时间控制在一个工频周期内。对于系统短路电流小于所选用断路器开断能力的小容量电网, 装配了先进断路器的支路可以在继电保护动作之前及时切除故障点, 从而大幅降低短路故障的破坏力。对于系统短路电流大于所选用断路器开断能力的大容量电网, 断路器开断存在风险, 可靠切除故障点需要限制开断时刻的短路电流值^[4-8]。

文献[9-10]提出了一种半导体故障电流限制器(solid-state fault current limiter, SSFCL)的故障电流分析和保护控制方法。文献[11-12]研究了基于超导材料的限流器在短路故障中的应用, 短路故障后 10 ms 时刻电感量达到峰值从而限制短路故障电流。在国内, 配电网中常用的故障限流方法包括各种形式的固定限流电抗器、高阻抗变压器、爆炸桥并联电抗器以及快速开关并联电抗器等。除爆炸桥方案外, 这些方法虽然能有效控制短路电流的长期影响, 但对于初始电流峰值却束手无策, 因此并不能完全解决系统设备的稳定问题。

快速而准确的短路事故检测与识别是有效应对事故的前提^[13-16]。文献[17-18]的研究表明, 控制系统需要在 2~3 ms 极短时间内识别出完成故障识别、断路器开断与限流电抗器投入等操作, 以降低短路电流对系统和设备稳定性的冲击, 同时该快速动作还可有效抑制电压暂降现象。目前的研究多集中在单一电源系统的短路事故上, 然而在配置发电机组电源系统的工程实践中, 当短路电流的非周期性分量占比超过 100%时, 由于真空断路器的灭弧特性, 可能会导致电弧无法在没有电流过零的情况下熄灭。此外, 在不同发电机参数下, 短路时的非周期分量衰减周期可能会延长到 40~200 ms^[19-21]。因此, 在确定断路器参数之前, 需要深入分析电网可能出现的短路非周期分量的影响, 并考虑断路器的开断条件^[22], 以确保其工作的可靠性。

ABB 的 Is-limiter(爆炸桥)装置能够在 5 ms 内切断主回路投入限流回路, 限制短路故障电流, 但由于其动作依赖炸药驱动, 因此只能一次性使用, 这无疑增加了维护和运营成本。虽然国内的爆炸桥技术起步较晚, 但其快速拉开开距、能短时间开断电气主回路的优势明显, 也有大量的应用案例; 与此同时, 国内在快速开关技术的研究与应用方面也取得了显著的成果。然而, 这些技术的进一步普及仍受到技术特性、成本和安全性的制约。尽管人工强制过

零技术尚处于研究初期, 但已受到业界的广泛关注。

本文提出了一种基于振荡过零回路的新型限流装置(manual zero-crossing fault current limiter, MZC-FCL)设计方案, 并对其限流性能进行了深入分析。通过仿真和实验验证, 该装置展现出了显著的优越性和有效性。

1 典型接入系统及短路事故特征分析

MZC-FCL 装置的核心功能在于实现短路电流峰值的主动抑制机制, 通过断路器分闸操作接入限流电抗器。考虑到半波时间为 5 ms, 且机械开关的动作时间至少为 1.6 ms, 加上控制系统的采样、判断识别以及出口动作的累计时间至少为 0.9 ms, 整个过程的时间将超过 2.5 ms。而在工频电流正弦波的 2.5 ms 时刻, 其瞬时值为峰值的 $\sqrt{2}/2 = 0.707$ 倍。因此, 设定一个 70% 的限流目标, 以确保主变压器所承受的短路电流不超过其额定值的 70%, 从而将系统短路电流的冲击降低至 50% 以下。在确定 MZC-FCL 具体设计参数之前, 需预先综合评估下级配电网中短路电流的构成特性及其影响因素。具体而言, 应系统分析短路故障发生时周期性分量与非周期性分量对暂态电流的叠加效应, 同时需重点考察 MZC-FCL 中断路器的开断电流整定条件等关键参数。

考虑如图 1 所示变电站、开关站、配电站、发电站配置系统, 包括: 进线变压器(T_1)、变压器出口限峰限流装置(MZC-FCL-1#)、发电机出口限峰限流装置(MZC-FCL-2#)、发电机(G_1)、发电机出口保护断路器(SS1-G)、馈线线路以及馈线开关 SS1 等, 典型系统参数如表 1 所示。

为保证 MZC-FCL 能可靠应对各类故障, 在 MZC-FCL 的设计中应当考虑产生短路电流最严重的故障情况, 即在最大运行方式下, 线路出口处发生的三相短路故障, 如图 1 所示的 d_3 点和 d_4 点发生短路故障。

由于三相短路后电路依然对称, 因而此处仅选择 A 相进行研究, B、C 相相位角差仅为 120°。基于电力系统暂态分析得 A 相电流瞬时值 i_A , 可表示为

$$i_A = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + Ae^{-t/T_a} \quad (1)$$

式中: $I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$ 与 Ae^{-t/T_a} 分别为短路电流的周期分量与非周期分量; I_m 为短路电流幅值; ω 为短路电流的角频率; α 为短路电流的初始相角; φ 为短路电流与电压的相角; A 是积分常数, 也是 i_A 的初始值; T_a 为非周期分量的衰减时间常数, 反映了非周期分量衰减的快慢。

表 1 典型企业用户配电网参数

Table 1 Distribution network parameters of typical enterprise

参数	数值	参数	数值
进线电压等级/kV	110	T_1 短路阻抗/%	10.5
T_1 频率/Hz、电压/kV	50、12	开关站与主变距离/km	1
T_1 容量/MVA、额定电流/A	63、3460	配电站与主变距离/km	2
G_1 容量/MW、额定电流/A	50、2750	SS1 开断电流/kA	31.5
发电机 G_1 短路阻抗/%	12.5	负荷电流 i_{i3} /A	3150
MZC-FCL 额定开断电流/kA	40	负荷电流 i_{i2} /A	2500
MZC-FCL 额定负荷电流/A	4000	负荷电流 i_{i1} /A	1250
SS1-J 开断电流/kA	40	SS1-J 额定电流/A	4000

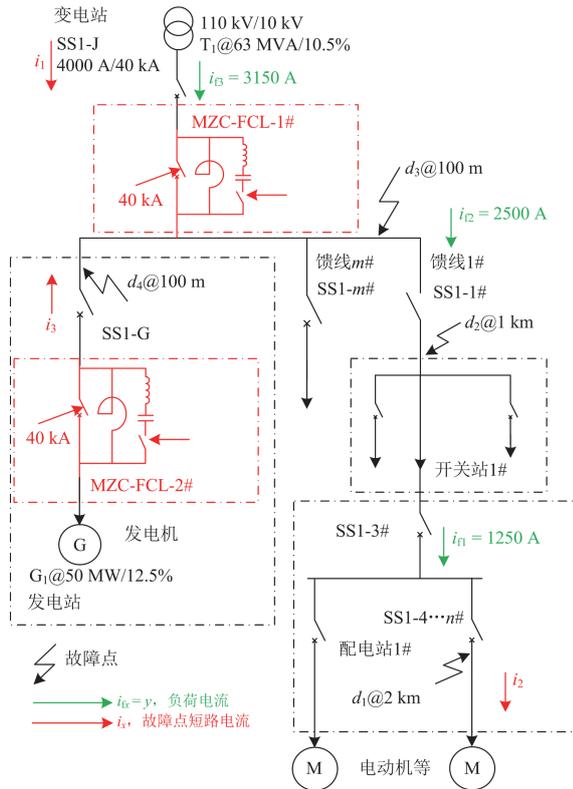
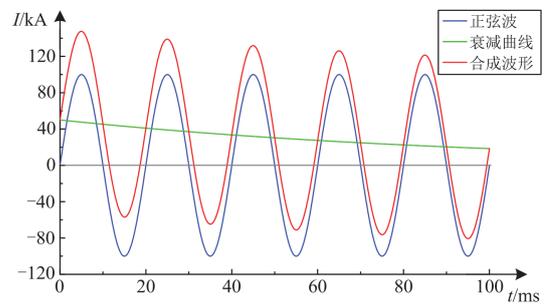


图 1 MZC-FCL 典型接入系统位置

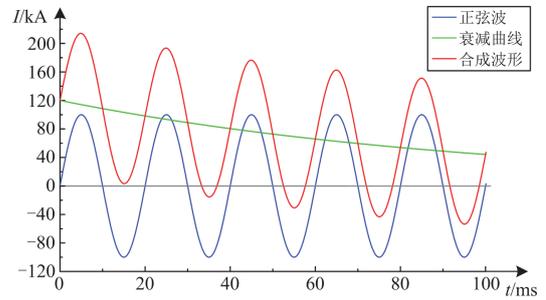
Fig. 1 MZC-FCL typical location of accessing into system

此系统中，系统源发生短路(d_3)如图 2(a)所示，发电机出口断路器 SS1-G 分断，此时发电机源不参与短路分析，文献[23]研究指出，系统源在任何相位角下发生短路故障时，非周期分量初始值均小于 100%，设 d_3 处短路初始非周期分量值为 50%，周期分量和非周期分量叠加电流发生不对称偏置，但是首半波可以工频自然过零。而发电机源发生短路(d_4)的电流波形如图 2(b)所示，发电机出口断路器 SS1-G 闭合，发电机源参与短路分析， d_3 或 d_4 处短路，文献[24-25]指出非周期分量初始值为 110%~150%，以典型 120%为例，周期分量和非周期分量叠

加电流发生不对称偏置，且首半波不能工频自然过零，预判过零时间取决于参数 T_a 。



(a) 系统发生三相短路故障时短路电流波形



(b) 发电机发生三相短路故障时短路电流波形

图 2 三相短路故障时短路电流波形

Fig. 2 Current waveform of three-phase short-circuit fault

2 振荡强制过零装置结构与运行特征

2.1 MZC-FCL 装置的拓扑结构

图 1 中的 MZC-FCL-1# 的三相电气图如图 3 所示，主要包括两个真空断路器 CB_1 和 CB_2 、两个并联在 A 相和 C 相的限流电抗器 L_{A1} 和 L_{C1} 以及两个并联在 A 相和 C 相的 LC 振荡回路。其中 CB_2 处 B 相的上下触头直接连接，只保留 AC 两相的开断功能。

并联振荡回路主要由 LC 振荡电路的电感和电容(L_{os} 和 C_{os})、氧化锌避雷器(可变电阻 R_{os})以及火花间隙管(SK)构成。装配的氧化锌避雷器主要用于

吸收振荡回路放电过程中产生的过电压。

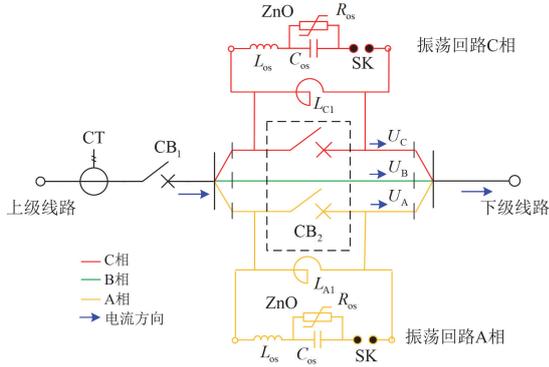


图3 MZC-FCL 结构

Fig. 3 Structure of MZC-FCL

2.2 MZC-FCL 装置的运行特性

图3所示的MZC-FCL回路工作原理是,当下级线路发生短路故障时,断路器 CB_2 的A、C两相断开,投入限流电抗器,抑制A、C相短路电流,B相短路电流也随之降低,为系统电容电流或接近负载电流。在常规电力系统保护机制中,该保护动作需依赖短路电流的自然过零点开断,其动作响应时间通常需要13~20 ms。这种时间延迟特性导致现有保护方案难以有效抑制短路电流峰值对系统设备造成的瞬态冲击,从而无法规避大电流冲击引发的机电应力损伤风险。为了强制缩短短路电流过零时间,需要在 CB_2 开断过程中控制火花间隙管导通,投入振荡回路,振荡回路产生的高频电流与主回路短路电流叠加后形成强制过零点,加快开关动静触头在真空环境下电气开断,限制短路电流峰值。

综上所述,本文所设计的MZC-FCL装置共包含3个运行状态。

1) 系统正常运行状态

CB_2 的A、C相均为闭合状态,此时限流电抗器被旁路,MZC-FCL基本不影响正常电路运行,MZC-FCL的阻抗近似为0,亦即 $Z_{FCL,a}(t) \approx Z_{FCL,b}(t) \approx Z_{FCL,c}(t) \approx 0$,其中 $Z_{FCL,a}$ 、 $Z_{FCL,b}$ 、 $Z_{FCL,c}$ 分别是A、B、C三相的线路阻抗。

2) 暂态振荡过零状态

短路故障发生后,主线路电流迅速抬升, CB_2 快速检测到短路后将A、C两相断开,此时投入振荡回路,强制产生过零点。MZC-FCL装置所呈现的暂态阻抗可表示为

$$\begin{cases} Z_{FCL,a}(t) = Z_{FCL,c}(t) = j\omega L_1 // \left(j\omega L_{os} + \frac{1}{j\omega C_{os}} // R_{os} \right) \\ Z_{FCL,b}(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, L_1 为线路导线等效电感。

3) 稳态电流限制状态

CB_2 利用振荡电路强制过零,A、C两相开关完全开断,此时由限流电感 L_{la} 和 L_{lc} 限制短路电流,完成短路电流首半波峰值电流和稳态电流限制,MZC-FCL的阻抗变为

$$\begin{cases} Z_{FCL,a}(t) = Z_{FCL,c}(t) = j\omega L_1 \\ Z_{FCL,b}(t) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

3 振荡强制过零装置限流设计与仿真

3.1 MZC-FCL 装置应用系统短路事故特征

本文设计MZC-FCL装置运行在变电站主变压器低压出线侧,其安装位置如图1所示,采用标么值计算法可得如图1所示的系统各点发生短路时,最大短路电流值如表2所示。计算结果再次说明 d_3 、 d_4 点发生短路时,其电流值42.6 kA超过主变出口开关SS1-J额定开断能力(40 kA),变压器和发电机出口侧必须安装限制短路电流的设备,保护系统可靠运行。

表2 不同短路点故障电流值

Table 2 Current values at different short-circuit points

故障点	最大短路电流值/kA	最大短路电流峰值/kA
d_1 (线路长度 2 km)	25.6	46
d_2 (线路长度 1 km)	28.1	50
d_3 (线路长度 0 km)	42.6	107
d_4 (线路长度 0 km)	42.6	107

3.2 MZC-FCL 装置的参数设计流程

基于电网短路电流峰值和断路器开断电流峰值条件限制以及现状分析,设系统短路电流最大周期分量峰值为 i_{TF} ,LC振荡回路输出电流首半波峰值为 i_{LC} ,限峰率 $v = i_{LC} / i_{TF}$ 。MZC-FCL装置在短路电流完全对称且无非周期分量的极端工况下,其技术参数应满足下限峰值比率 $v < 70\%$ 的要求。

由于真空灭弧室开断参数极限能力限制,以ABB的4000 A/40 kA灭弧室为例,其开断额定峰值的高频能力为1.5 kHz,电流过零时若电流变化率过高,可能导致真空灭弧室无法熄灭电弧,导致开断失败,因此电流变化率参数设计非常重要。定性分析两种电流过零前能量变化,如图4所示。

两种电流在过零前某一区间产生的热量为 $\int_{t_a}^{t_b} i^2 R dt$,其中 t_a 为灭弧室端口打开时刻, t_b 为流过灭弧电流过零时刻, R 为电弧的等效电阻。若电流变化率过高,在该区间内产生的热量将会过大,不利于灭弧室触头间的介质恢复,导致电弧无法熄灭。

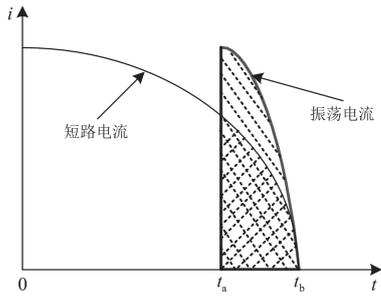


图4 自然过零与强制过零电流对比
Fig. 4 Comparison between natural and forced zero-crossing current

设 LC 振荡高频电流峰值 i_{LC} 与振荡频率 f_{LC} 为

$$\begin{cases} i_{LC} = U_0 \times \sqrt{\frac{C}{L}} \\ f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \end{cases} \quad (4)$$

式中： C 为振荡回路电容； L 为振荡回路电感； U_0 为系统电压。根据式(4)，设计要求 $i_{LC} > F_z$ ，其中 F_z 为短路电流峰值，并且要求振荡频率 $f_{LC} \leq 1.5 \text{ kHz}$ ，可设计振荡回路参数。

根据表 2 计算的系统最大短路电流，可设置电容 $C_1 = C_2 = 630 \mu\text{F}$ ， $L_1 = L_2 = 24 \mu\text{H}$ ，由于线路本身存在过渡电感，实际使用电感值应略小于 $24 \mu\text{H}$ 。电容预充电 $U_0 = 10 \text{ kV}$ ，可计算出此振荡电路高频电流峰值 i_{LC} 和振荡频率 f_{LC} 为

$$\begin{cases} i_{LC} = U_0 \times \sqrt{\frac{C}{L}} = 10 \times 10^3 \times \sqrt{\frac{630}{24}} \approx 50.99 \text{ kA} \\ f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{24 \times 630 \times 10^{-12}}} \approx 1.3 \text{ kHz} \end{cases} \quad (5)$$

在振荡电路整个放电过程中，回路存在过渡电阻，因此电容最终将会完全放电，但仅需振荡电流的首半波，即可完全满足形成强制过零点所需的电流峰值，上述 L 、 C 参数满足本例设计要求。

图 1 中 d_1 、 d_2 发生短路故障时，简化系统阻抗如图 5 所示，变电站实际容量及下端负载额定电流

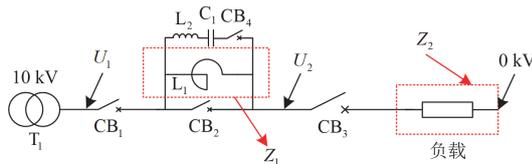


图5 三相短路时阻抗计算电气图
Fig. 5 Electrical diagram for impedance calculation during three-phase short circuit

如表 1 所示。计算电抗器参数，要求在继电保护装置动作前，MZC-FCL 在限流率 $< 70\%$ 条件下可靠动作，且母线电压 U_2 维持在 U_1 的 80% 以上，限流装置需投入限流电抗器 L ，限制短路电流幅值，且稳定母线电压 U_2 。

$i_{f3} = 3150 \text{ A}$ ，可计算出负载总电抗器阻抗 Z_2 和电感值 L_2 。

$$\begin{cases} Z_2 = \frac{U}{I} = \frac{10}{\sqrt{3} \times 3.125} \approx 1.85 \Omega \\ L_2 = \frac{R}{2\pi f} = \frac{1.85}{2 \times 3.14 \times 50} \approx 5.89 \text{ mH} \end{cases} \quad (6)$$

部分敏感负载要求供电电压偏差在其额定电压的 $\pm 20\%$ 内，则限流电抗设计值为

$$\begin{cases} U_2 \geq 0.8U_1 \\ Z_2 \times i = U_2 \\ (Z_1 + Z_2) \times i = U_1 \end{cases} \quad (7)$$

根据式(6)和式(7)进行计算，在确保电抗率大于系统阻抗 8% 的设计要求下，完成了限流电抗器的参数设计。文献[26]研究了配电网中限流电抗器的选型原则，详细探讨了保护定值和延时定值的整定方法，并通过典型案例分析了所提方法的有效性。

3.3 MZC-FCL 装置短路电流峰值限制特性分析

图 3 中 CB_2 采用表 3 所列断路器的技术参数。MZC-FCL 控制系统电流的采样间隔为 $50 \mu\text{s}$ ，每个工频周期(20 ms)采集 400 个数据，并采用 8 点补偿法计算电流的变化率是否大于设定值，即 $di/dt > D_z$ ，其中 D_z 为设定保护启动定值。且控制系统 I/O 输出均采用光纤传输，信号的延时忽略不计。

表 3 超高速机械断路器技术参数

Table 3 Technical parameters of ultra-high speed mechanical circuit breakers

参数	数值
断路器分闸速度/(m/s)	> 5
断路器刚分时间/ms	1.2
断路器 2 mm 开距时间/ms	0.4

强制过零控制时序如图 6 所示。其中， t_1 为短路故障识别时刻， t_2 为控制系统信号触发时刻， t_3 为电气强制开断时刻， t_4 为峰值时刻。为实现设计目标中限峰率为 70% 的技术指标要求，需进行严格的计算验证。研究表明，三相完全对称短路工况构成系统运行的最严苛条件，此时 $t_4 = 5 \text{ ms}$ ，当限峰率为 0.7 时，在工频短路电流波形处于 45° 相位的时刻，则要求 $t_3 \leq t_4 \times 0.5$ ， t_3 最长时长为 2.5 ms ， t_3 后延则导致限峰率不达标。

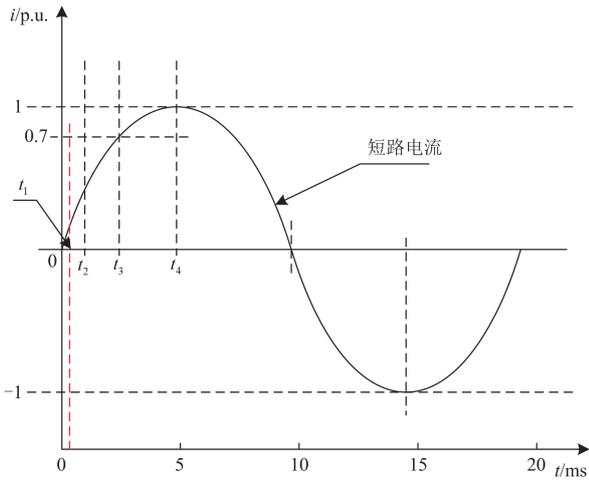


图 6 强制过零控制时序

Fig. 6 Timing diagram of forced zero-crossing control

基于式(1)周期分量叠加非周期分量曲线, 以最苛刻的含有非周期性直流分量的短路故障分析为例, 要求控制参数满足式(8)。

$$\begin{cases} t_4 = 5 \text{ ms} \\ t_3 \leq 0.5 \times t_4 = 2.5 \text{ ms} \\ t_3 - t_2 \geq 1.6 \text{ ms} \\ t_1 \geq 0.4 \text{ ms} \end{cases} \quad (8)$$

可以推导: $t_2 \leq 0.9 \text{ ms}$, 进一步推出: $t_1 \approx 0.5 \text{ ms}$, 此条件下, 控制系统有充足的时间实现限峰率 70%的设计需求。其他直流分量情况下, 限峰率计算值如表 4 所示。

表 4 直流分量对应限峰率数据表

Table 4 Peak limiting rate corresponding to DC component

短路电流达到峰值的时间 t_4/ms	限峰率	短路电流达到峰值的时间 t_4/ms	限峰率
5.01	0.7	6.17	0.43
5.05	0.65	6.41	0.42
5.11	0.61	6.67	0.41
5.19	0.57	6.96	0.40
5.30	0.54	7.29	0.39
5.43	0.51	7.66	0.39
5.58	0.49	8.10	0.38
5.75	0.47	8.67	0.38
5.95	0.45	10.01	0.38

3.4 MZC-FCL 装置限流特性仿真实验

本文在研究限流电路结构参数的基础上, 利用 ATP-EMTP 对整个三相限流过程进行了仿真研究。仿真电路如图 7 所示。

短路电流由无限大功率电源经大容量变压器至短路点产生, 其最大短路电流由变压器容量、变压器短路阻抗以及线路阻抗参数决定。限流装置主要

部分采用 LC 振荡电路产生振荡电流叠加至主回路, 并由理想开关控制其投入和退出。由于仅对 A、C 相进行强制过零开断, 超高速开关采用三只单相开关配合使用, 且 B 相处于导通状态, 所有开关都具备过零开断特性。其元件参数如表 5 所示。

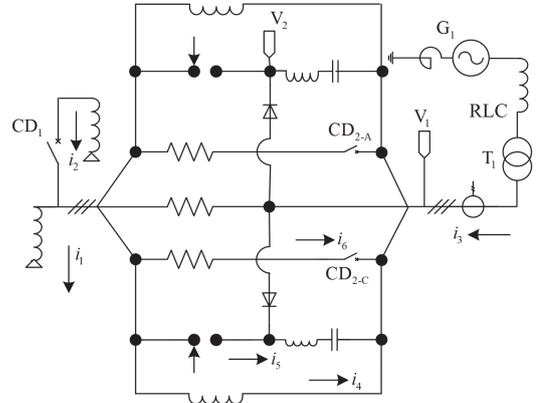


图 7 MZC-FCL 仿真电路模型

Fig. 7 Model of MZC-SFCL simulation circuit

表 5 仿真系统参数

Table 5 Parameters of simulation system

参数	数值
三相电压源频率/Hz、电压/kV	50、12
短路阻抗/ Ω	0.105
主变 T1 容量/MVA	63
AC-LC 回路 $L/\mu\text{H}$	36
AC-LC 回路 $C/\mu\text{F}$	630
AC-限流电感 L_f/mH	1
负荷电流 i_f/A	3150
最大短路电流 i_2/kA	53
短路电流限峰后测量值 i_3/kA	x

采用电流传感器实时检测母线三相电流, 当任意一相电流幅值超过 10 kA 时, 判定为发生短路故障(t_1), 此时发送开断信号至超高速断路器(t_2), 超高速开关动作分闸, 此时电弧尚未熄灭。当故障相电流幅值超过 20 kA 时, 该相双向可控硅导通, 振荡电流回路导通, 振荡电路电流与主回路短路电流叠加, 形成强制过零点熄灭电弧(t_3)。在确认主回路短路电流被切断后, 双向可控硅导通信号截止, 振荡回路退出, 控制逻辑如图 8 所示。

在仿真模型构建过程中, 基于系统性工程考量, 未配置限流电抗装置, 旨在建立完备的实验观测体系, 以实现 AC 相开断工况下断路器设备的动态参数采集与运行状态验证。如图 9 所示, 系统发生短路事故时, 文献[27]研究表明, 短路故障的短路相位角对电流特征具有显著影响, 短路角为 90° 或 270° 时短路不平衡度最大, 在短路角为 0° 和 120°

的工况下，系统输出的电流波形特征呈现高度相似性特征，首过零及最大峰值相等特征相序交换，因此只影响判断首开相别，不影响限流特征，故可短路电流最先自然过零相为 A、B、C 三相中的任意一相，三种情况下装置动作过程均不相同，但动作机理完全一致，本仿真仅针对其中一种情况进行讨论分析。

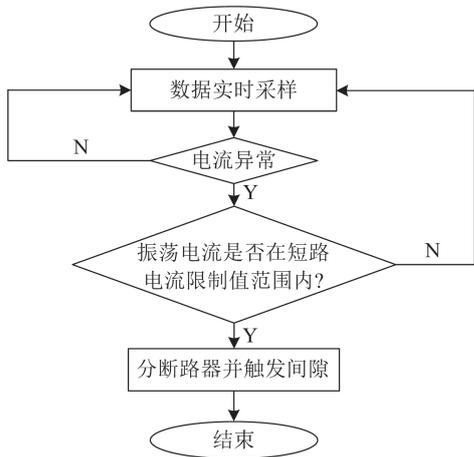


图 8 限峰限流控制逻辑

Fig. 8 Control logic of peak and current limiting

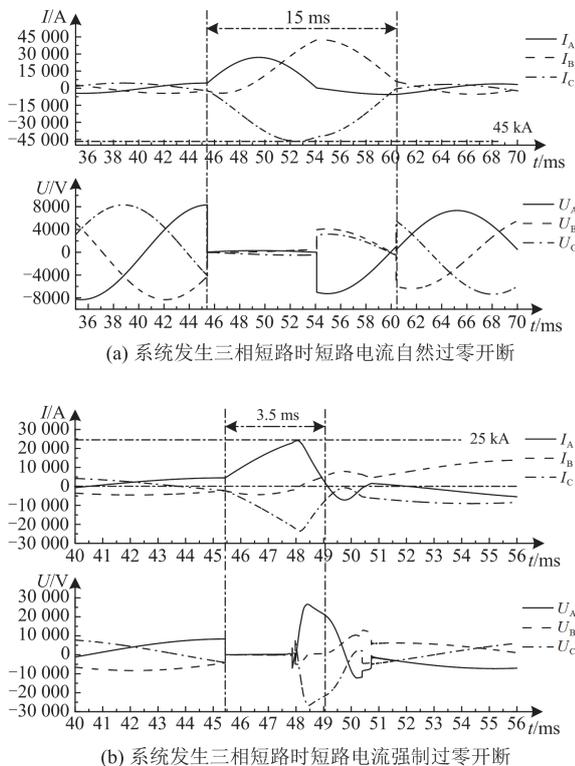


图 9 仿真验证两种开断短路电流及出口电压对比

Fig. 9 Comparison between two short-circuit current and outlet voltage with simulation verification

如图 9(a)所示，数据对应图 7 中的电流测量点 i_3 ，正常过零开断过程中，A 相首先过零开断，此时三相短路故障将演化为两相短路故障，根据系统回路，此时 B、C 相短路电流幅值相同且方向相反，将同时到达零点后开断。整个过程最长可持续近 10 ms，断路器自然过零状态下，灭弧时间为 15 ms，最大短路电流峰值 45 kA。

如图 9(b)所示，数据对应图 7 中的电流测量点 i_3 ，强制过零开断过程中，当 C 相电流幅值超越预设阈值时，振荡回路装置立即触发响应机制。在此工况下，振荡回路电流与主回路短路电流通过矢量叠加形成强制过零点，确保 C 相电弧实现可靠熄灭与有效分断。该操作使系统转换为典型 AB 两相短路模式。同上，待 A 相强制电流过零开断后，B 相电流在自然过零点处完成电弧熄灭及介质强度恢复过程，最终实现系统全相分断。

在 AC 相配备限流电抗器，此时若系统为短路接地故障，则 B 相电流为系统电容电流，远小于短路电流；若系统短路不接地，此时 B 相仅为负载电流，同样远小于短路电流。整个强制过零开断时间为 3.5 ms 左右，由于断路器性能原因，实际使用时需整定振荡回路投入的时间，使其躲过断路器判断短路至完全刚分所需的时间。因此，只要振荡回路叠加时机正确，此限流装置都会在短路电流达到峰值前切断，使短路电流流过限流电抗器，抑制短路电流峰值。

如图 10 所示，数据对应图 7 中的电流测量点 i_6 ，首先开断 C 相不是自然过零开断，导致另外 AB 两相电流处于零点同一侧。但仍然满足 KCL 定理，红色点划线处故障点电流矢量和为 0。

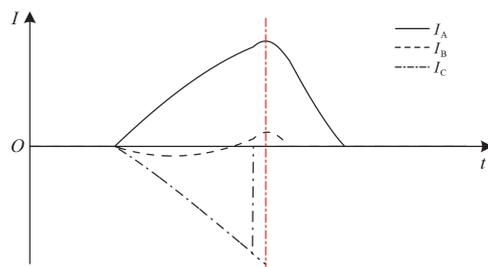


图 10 强制过零开断真空触头电流

Fig. 10 Break vacuum contact current of MZC-FCL

4 自然过零与强制过零限流对比试验验证

为模拟大容量系统短路，采用冲击容量 2500 MVA 的同步发电机进行短路试验，并在短路时刻对发电机进行强励磁，防止发电机出口电压暂降过大。试验过程中防止对发电机造成损坏，短路时间 100 ms，并在限流装置上安装限流电抗器，采用相控超高速

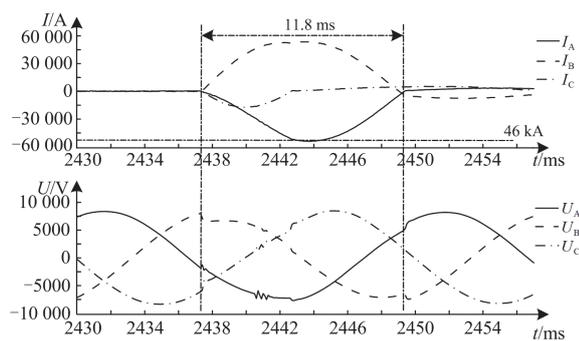
断路器, 即使强制过零未开断, 也能在自然过零点开断短路电流投入限流电抗器。具体试验装置如图 11 所示。



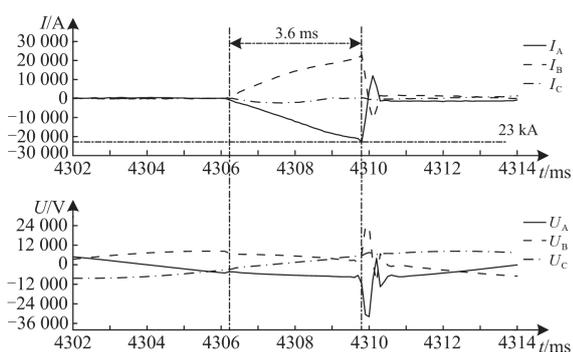
图 11 强制过零限流装置实物图

Fig. 11 Physical picture of forced zero-crossing device

试验过程中, 试验台短路电流峰值的最大预期可达到 56 kA。试验自然过零方式时, 如图 12(a)所示, 对于自然过零开断短路电流, 整个短路过程将持续 11.8 ms, 由于 C 相首开后, AB 相相间短路, 最大短路电流峰值为 46 kA, 小于预期电流 $i_Q = 40 \times \sqrt{2} = 56.6 \text{ kA}$ 。



(a) 试验验证自然过零开断短路电流及出口电压



(b) 试验验证强制过零开断短路电流及出口电压

图 12 实验验证两种开断短路电流及出口电压对比

Fig. 12 Comparison between two short-circuit current and outlet voltage with experimental verification

而采用强迫过零开断时, 整个过程将缩短到 3.6 ms, 如图 12(b)所示, 峰值电流为 23 kA, 限峰

率为 $23/56 \approx 41\%$, 远优于 70% 的设计要求, 大幅度提高了配电网供电可靠性。同时, 也可看出试验与仿真之间存在部分差距, 是因为仿真没有考虑断路器刚分动作时间与检测短路发出命令的继电器动作时间。考虑以上因素后, 仿真结果将与试验结果完全匹配。文献[28]提出的爆炸活塞式高速限流、文献[29]提出的快速开关并联限流电抗器和本文所提限流方案技术效果对比如表 6 所示。

表 6 限流方案效果对比

Table 6 Effect comparison of current limiting strategies

	MZC-FCL	爆炸活塞式 高速限流	快速开关并联 限流电抗器
物理分断时间/ms	<1.2	<0.3	1.5~5
电气限流时间/ms	2.5~4	2~5	>16 & <20
是否可以重复使用	√	×	√
是否限制短路 电流峰值	√	√	×
技术经济性对比	高	低	高

5 总结

基于超高速断路器旁路限流电抗器, 引入强制过零回路, 研制了限峰限流装置, 给出相应的技术参数。经过仿真及实体试验验证了该方案的可行性。

1) 基于斥力机构的超高速机械断路器, 在 2 mm 的开距条件下, 其动作时间需小于 1.6 ms, 以便实现相控。快速检测算法的作用时间约为 0.4 ms, 加上满足短路电流定值等待的时间 0.5 ms, 通常总时间在 2.5 ms 以内, 即可有效投入限流电抗器。

2) 自然过零切换的最大电气中断时间为 20 ms, 而强制过零切换的最大电气开断时间为 3.6 ms, 此时强制过零限流效果更加显著。

3) 该设备能有效避免由于较高的直流分量导致的自然过零点延迟问题, 高效保护同步发电机, 限制峰值率在 38%~70% 范围内, 至少可减少 50% 以上短路电流的热功率。

参考文献

- [1] 黄智慧, 张冬波, 邹积岩, 等. 基于改进 RLS 算法的短路电流相控开断控制系统设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3214-3220.
HUANG Zhihui, ZHANG Dongbo, ZOU Jiyan, et al. Design of control system for controlled fault interruption based on adaptive RLS algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3214-3220.
- [2] 阮绵晖, 陈建福, 陈锐, 等. 10 kV 快速机械开关斥力机构仿真分析[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 141-146, 154.
RUAN Mianhui, CHEN Jianfu, CHEN Rui, et al.

- Simulation and analysis of repulsion mechanism for 10 kV fast mechanical switch[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 141-146, 154.
- [3] 张公一, 张志成, 刘博, 等. 基于电磁斥力—永磁保持式机构的快速真空开关分闸运动特性分析[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 115-122.
ZHANG Gongyi, ZHANG Zhicheng, LIU Bo, et al. Analysis of opening motion characteristics of fast vacuum switch based on electromagnetic repulsion-permanent magnet holding mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 115-122.
- [4] DANIR A, GARDNER C. Investigation of a multiphase winding arrangement for mitigating short-circuit fault currents[C] // 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED2021), August 22-25, 2021, Dallas, TX, USA: 113-118.
- [5] SURYA A O, GUMILAR L, HABIBI M A, et al. Increase in high impedance value of transformer to reduce short circuit fault currents in high voltage networks[C] // 2022 11th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS2022), August 23-25, 2022, Malang, Indonesia: 51-55.
- [6] 刘洋, 管臣, 姚晓飞, 等. 72.5 kV 快速真空断路器技术研究及开发[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 11-19.
LIU Yang, GUAN Chen, YAO Xiaofei, et al. Research and development on 72.5 kV fast vacuum circuit breaker technology[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 11-19.
- [7] 唐欣, 黄晟, 潘一彬, 等. 直流故障下基于交流侧反馈的 MMC 换流站主动限流策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 56-64.
TANG Xin, HUANG Sheng, PAN Yibin, et al. Active current limiting strategy of an MMC converter station based on AC side energy feedback under a DC fault[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 56-64.
- [8] 郑峰, 王威东, 刘宝谨, 等. 计及柔性限流装置与直流断路器协同动作的电弧抑制暂态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 59-69.
ZHENG Feng, WANG Weidong, LIU Baojin, et al. Research on transient characteristic of arc suppression considering the joint operation of a flexible current limiting device and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 59-69.
- [9] ESCOBAR A, SAADEH M, BALDA J C, et al. A methodology to coordinate solid-state fault current limiters with conventional protective devices[C] // 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, March 20-23, 2011, Phoenix, AZ, USA: 1-6.
- [10] SHARMA J P, CHAUHAN V. Analysis and control of fault current by firing angle control of solid-state fault current limiter[C] // 2015 International Conference on Energy Systems and Applications, October 30-November 1, 2015, Pune, India: 527-530.
- [11] KUKSIN A N, MYATEZH A V. Using the effect of superconductivity and superconducting materials to limit short-circuit currents[C] // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, October 3-4, 2018, Vladivostok, Russia: 1-4.
- [12] 熊佳玲, 李文鑫, 杨超, 等. 一种新型超导直流故障限流器[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 93-102.
XIONG Jialing, LI Wenxin, YANG Chao, et al. A new type of superconducting DC fault current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 93-102.
- [13] 郝鑫, 文韬, 韩彬, 等. 考虑变电站内接线和拓扑瞬态调整的断路器短路电流分析[J]. 电力建设, 2024, 45(7): 113-121.
QIE Xin, WEN Tao, HAN Bin, et al. Analysis of short-circuit current of circuit breakers considering substation wiring and topology transient adjustment[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(7): 113-121.
- [14] 杨尚瑾, 戴朝波, 李芳灵, 等. 基于相电流差的短路故障快速识别方法[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2330-2335.
YANG Shangjin, DAI Chaobo, LI Fangling, et al. Fast short-circuit fault identification method based on phase current difference[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2330-2335.
- [15] 荣文帅, 蔡志远. 断路器同步分断短路电流零点预测方法研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3167-3174.
RONG Wenshuai, CAI Zhiyuan. Research on zero prediction method of synchronous breaking short circuit current of breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3167-3174.
- [16] 郝艳, 咸日常, 冷学冰, 等. 基于电压、电流不平衡度差值的干式变压器匝间短路故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 12-21.
HAO Yan, XIAN Richang, LENG Xuebing, et al. Identification method for an inter-turn short circuit fault of a dry-type transformer based on voltage and current imbalance difference[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 12-21.
- [17] 吴行健, 石晶, 陈红坤, 等. 基于短路电流小半波特征的短路故障快速检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 86-94.
WU Xingjian, SHI Jing, CHEN Hongkun, et al. Fast short-circuit fault detection method based on a small half-wave feature[J]. Power System Protection and Control,

- 2022, 50(16): 86-94.
- [18] MA K, WANG S, WANG S, et al. Research on voltage sag suppression technique based on CLR and artificial current zero interruption of FVCB[C]// IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), October 21-24, 2019, Xi'an, China: 1588-1592.
- [19] 费翔, 朱志豪, 袁端磊, 等. 发电机出口真空灭弧室触头磁场分布优化与试验[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3700-3707.
FEI Xiang, ZHU Zhihao, YUAN Duanlei, et al. Optimization and experiment of magnetic field distribution of contacts for vacuum generator circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3700-3707.
- [20] 范国晨, 杜兆斌, 李作红, 等. 可控移相器对电网短路电流特性影响及限流控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(9): 34-44.
FAN Guochen, DU Zhaobin, LI Zuohong, et al. Influence of the thyristor controlled phase shift transformer on power grid short-circuit current characteristics and current limiting control strategy[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9): 34-44.
- [21] 尹项根, 王义凯, 谭力铭, 等. 故障机理深度关联的大型发电机保护新原理探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 1-7.
YIN Xianggen, WANG Yikai, TAN Liming, et al. Discussion on a new principle of large generator protection deeply associated with fault mechanisms[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 1-7.
- [22] 李超, 吴琪, 李斌, 等. 考虑短路电流非周期分量影响的磁偏置型超导故障限流器设计方法及其限流特性分析[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4887-4896.
LI Chao, WU Qi, LI Bin, et al. Designing and current limiting characteristics of magneto-biased superconducting fault current limiter considering DC component of short-circuit current[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4887-4896.
- [23] 曹炜, 王永生, 张文青, 等. 电力系统短路电流直流分量及其对断路器开断能力的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 283-288.
CAO Wei, WANG Yongsheng, ZHANG Wenqing, et al. Analysis on DC component in short-circuit current of power grid and its influence on breaking ability of circuit breakers[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 283-288.
- [24] 赵庆斌, 黄实, 吴钊. 发电机断路器非对称电流开断电流参数的计算与标准的分析[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 113-118.
ZHAO Qingbin, HUANG Shi, WU Zhao. Computation and comparison of current parameters of asymmetrical current breaking[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 113-118.
- [25] 张爽. 大容量发电机出口断路器选择[J]. 高压电器, 2011, 47(11): 77-80, 86.
ZHANG Shuang. Circuit breakers selection method for large-capacity AC high-voltage generator[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 77-80, 86.
- [26] 刘健, 张志华, 芮骏, 等. 基于限流级差配合的城市配电网高选择性继电保护方案[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 101-106.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, RUI Jun, et al. Highly selective relay protection scheme for urban distribution network based on current limiting difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 101-106.
- [27] 李谦, 张波, 蒋榆宽, 等. 变电站内短路电流暂态过程及其影响因素[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1986-1993.
LI Qian, ZHANG Bo, JIANG Yukuan, et al. Transient process of short-circuit current in substations and its influential factors[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1986-1993.
- [28] 李枫, 庄劲武, 江壮贤, 等. 混合型限流熔断器爆炸活塞式高速开断装置炸药腔室结构分析及优化[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2417-2424.
LI Feng, ZHUANG Jinwu, JIANG Zhuangxian, et al. Structure analysis and optimum design on explosive chamber of explosive piston type high-speed interrupter in hybrid current-limiting fuse[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 43(7): 2417-2424.
- [29] 李新海, 曾新雄, 刘建辉, 等. 基于零损耗深度限流技术提升变压器抗短路能力研究[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 111-116.
LI Xinhai, ZENG Xinxiong, LIU Jianhui, et al. Study on anti-short-circuit ability of transformer based on the zero loss deep current limiting technology[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 111-116.

收稿日期: 2024-04-15; 修回日期: 2024-08-16

作者简介:

余银钢(1976—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事高压设备设计与智能控制方面的研究工作; E-mail: yuyingang@163.com

潘天红(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统自动化、智能感知以及预测控制等方面的研究工作。E-mail: thpan@ahu.edu.cn

(编辑 魏小丽)