

考虑暂态物理特性的真空断路器容性投切涌流研究

王一涵¹, 于力¹, 贾延超², 扬爽³

(1. 沈阳工程学院 辽宁 沈阳 110136; 2. 沈阳华德海泰电器有限公司 辽宁 沈阳 110141; 3. 国网辽宁省电力有限公司 辽宁 沈阳 110002)

摘要:真空断路器作为 35kV 及以下配电网电容器组投切的核心开关设备,在关合空载电容器组过程中易产生高幅值、高频率的涌流,极易造成电容器组损坏等故障,严重威胁电网的安全。由于理想开关模型未考虑合闸速度、介质恢复强度等实际参数的影响,无法精准刻画真空断路器合闸过程中的暂态特性,本文以 40.5kV 真空断路器投切并联电容器组为研究场景,依托 PSCAD 仿真平台,构建融合预击穿特性、介质恢复特性的真空断路器自定义仿真模型。仿真通过设置真空断路器在不同的合闸速度、触头材料、电容器组带残压、背靠背投切及串联电抗器等多组典型合闸工况,进行合闸涌流仿真试验。结果表明:预击穿现象是合闸涌流的主因,优异的触头材料和提升合闸速度可有效降低涌流峰值;电容器组反向残余电荷会显著放大合闸涌流与过电压;背靠背合闸工况涌流峰值可达单组投入的数十倍,是电容器组最严苛的投切场景;5%-7%电抗率区间可作为 35kV 配电网电容器组投切涌流抑制的优选方案,在多种工况下均能稳定抑制涌流,兼具高可靠性与工程实用性。该研究成果可为真空断路器涌流抑制方案提供贴合实际运行场景的理论依据与数据支撑。

关键词:真空断路器;PSCAD 建模;并联电容器组;合闸涌流;仿真分析

Study on capacitive switching inrush currents in vacuum circuit breakers considering their transient physical characteristics

WangYihan¹, YuLi¹, JiaYanchao², YangShuang³

(1. School of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China; 2. HUADE HIGH-TECH ELECTRIC, Shenyang 110141, China; 3. STATE GRID LIAONING ELECTRIC POWER SUPPLY CO., LTD, Shenyang 110002, China)

Abstract: Vacuum circuit breakers, as the core switching devices for switching capacitor banks in distribution networks up to 35kV, frequently generate high-amplitude, high-frequency closing inrush currents when energizing unloaded capacitor banks. These currents can easily lead to the burnout of switch contacts and failures of capacitor banks, seriously threatening grid safety. As the ideal switch model fails to consider practical parameters like closing speed, dielectric recovery strength, and contact materials, it can't precisely depict the transient characteristics during vacuum circuit breaker closing operations. This study takes a 40.5kV vacuum circuit breaker switching parallel capacitor banks as the research scenario and uses the PSCAD simulation platform to build a customized simulation model integrating pre-breakdown characteristics, dielectric recovery properties, and high-frequency arc-quenching ability. The simulation carried out closing inrush current tests by setting up vacuum circuit breakers under various typical closing situations, including different closing velocities, contact materials, existence of residual voltage in capacitor banks, back-to-back switching, and series reactors. The findings of the research show that the pre-breakdown phenomenon is the main reason for the closing inrush current. Raising the closing speed speeds up the restoration of dielectric strength in the contact gap, which can effectively decrease both the peak value of the inrush current and the dispersion of three-phase closing times. Reverse residual charges in capacitor banks greatly increase the closing inrush current and overvoltage. Under back-to-back closing circumstances, the peak of the inrush current can reach dozens of times that of a single-capacitor bank, which is the most serious switching situation for capacitor banks. The optimal solution for suppressing closing inrush current in 35kV distribution networks (dominated by the fifth harmonic) is the 5%-7% reactance range. It can offer stable suppression under conventional, residual-voltage, and back-to-back closing conditions, and it also has high reliability and engineering applicability. This research finding offers theoretical foundation and data support customized to actual operational scenarios for optimizing the closing speed of vacuum circuit breakers, designing inrush current suppression schemes, and improving the engineering performance of reactive power compensation devices.

Key words: Vacuum circuit breaker; PSCAD modeling; Parallel capacitor bank; Closing inrush current; Simulation analysis

引言

真空断路器凭借绝缘性能优异、灭弧能力强、环境友好等优势,已成为 35kV 及以下配电网无功补偿与负荷投切的核心开关设备,在电容器组、变压器等设备的频繁操作场景中广泛应用^[1-2]。然而,真空断路器在关合空载电容器组时,会因电路拓扑突变与储能元件充放电过程产生高频率、高幅值的合闸涌流;合闸涌流不仅会引发电流畸变与谐波注入,加剧系统电能质量问题,更会通过预击穿电弧直接作用于真空灭弧室触头表面,造成触头熔融、烧蚀、微凸起与金属颗粒残留,显著降低触头绝缘性能与使用寿命^[3-4]。研究表明,合闸涌流幅值上升会直接导致真空灭弧室重击穿概率大幅提升,且重击穿发生时间随涌流强度增大显著提前,严重威胁开关设备与电网运行安全^[5]。

近年来,国内外科研人员针对高压电容器组投切过程中的电气问题展开了更为深入的探究,从多技术

作者简介:王一涵,男,2001,硕士研究生,研究方向:智能电器分析与优化设计;于力,女,1976,副教授,研究方向:高电压与绝缘技术,电力系统开关设备与无功补偿技术;贾延超,男,1970,高级工程师,研究方向:高压开关设计及仿真研究;扬爽,男,1981,高级工程师,研究方向:新型电力系统

维度开展了系统性的分析与论证^[6-8]。Mannekutla 等人通过精准控制断路器在工频电压零点合闸电容器组,消除预击穿涌流电弧对触头的烧蚀损伤,有效降低真空断路器开断电容器组负载电流后的重击穿概率^[9-10];Fugel 等人通过研究表明,目前真空间隙的击穿机理主要包括场致发射和微粒击穿,且真空断路器触头间发生击穿时的间隙长度主要由触头有效面积、具体结构、施加电压种类及老炼状态等因素决定^[11-12]。国内学者围绕真空断路器投切电容器组的关合涌流、预击穿特性、相控策略及结构优化开展了系统性研究。文献[13]针对背靠背电容器组,建立等效电路并开展合闸涌流计算,揭示了分组投入时组间涌流占主导、电容器故障时涌流显著增大的规律,给出了对应的限流保护措施;马飞越等人以快速真空断路器为对象,通过试验研究了工频电压下的预击穿特性,明确了不同合闸速度下绝缘强度下降规律,提出了基于 RDDS 带状区域的选相关合时间窗口,为低涌流关合提供了策略支撑^[14];陈鹤冲等人针对双断口真空断路器,分析了操作分散性与均压电容储能对合闸涌流的影响,发现均压电容对涌流具有抑制作用,最终涌流幅值由最后完成合闸的断口相位决定^[15];文献[16]通过对比纵磁与横磁触头真空断路器的预击穿特性,证实横磁触头预击穿时间与分散性更小,且以预击穿时间为基准的选相方式涌流抑制效果显著优于以触头闭合时间为基准的方式;王成龙等研究了阻容均压对双断口真空断路器预击穿特性的影响,结果表明桥接电阻与串联电阻均可改善断口分压不均、延缓预击穿过程,其中桥接电阻在经济性、散热与安装空间上更具工程优势^[17]。

虽然当前的研究已经深入地揭示了合闸涌流在形成机理、影响因素以及抑制策略等多个方面的多种规律,但依然存在着一些明显的不足之处。具体而言,在合闸涌流的仿真建模工作方面,目前大多数的研究多采用理想开关来进行模拟。这种做法并没有充分考虑到真空断路器在合闸过程中所具有的独特物理特性,从而导致模拟的精度受到了一定程度的限制。此外,现有的研究还没有充分考虑到触头材料以及残余电荷等一系列问题对合闸涌流所产生的影响。由于缺乏对以上因素的综合考量,使得现有的研究结果难以精确符合实际运行场景中的要求。

因此,本文以 40.5kV 真空断路器投切并联电容器组合闸涌流为研究对象,从以下角度进行创新:

(1)针对传统理想开关模型忽略真空断路器合闸暂态物理过程的局限,本文基于 PSCAD 构建了融合介质恢复强度、预击穿特性与高频熄弧能力的自定义仿真模型,有效提升了暂态过程的模拟精度。

(2)系统开展真空断路器在不同触头材料、不同合闸速度、电容器组是否带残余电荷及电容器组背靠背投切的多工况耦合仿真研究,量化揭示各因素对合闸涌流的影响规律:明确 Cu-50Cr 触头在抑制合闸涌流方面显著优于 Cu-25Cr;且在合理区间内合闸速度越高,涌流峰值越低、三相同步性越好;并进一步验证反向残余电荷的强放大效应与背靠背为最严苛工况的关键结论,并通过仿真与实测数据双向验证,确保结论可靠、贴合工程实际。

(3)针对不同电抗率的串联电抗器在常规工况、电容器组带残压工况以及背靠背投切工况这三种不同的工况条件下的合闸涌流的抑制效果进行全面且深入的仿真分析。综合考量其限流性能、谐波治理水平,以及在经济性方面是否具有优势等多方面因素,进而给出优化后的电抗率配置方案。此方案能够为真空断路器在实际工况下关合电容器组产生合闸涌流方面的优化工作提供重要的理论依据,同时也能够在实际的工程应用中起到很好的参考作用。

1 真空断路器模型搭建

PSCAD 软件内置的断路器为理想开关模型,无法精确表征真空断路器实际动作过程中的预击穿、介质恢复强度以及高频熄弧能力等暂态特性^[18]。为此,依托软件自定义组件功能,结合真空断路器的介质恢复强度、预击穿值及高频熄弧能力等关键参数,构建真空断路器自定义仿真模型,以提升断路器在合闸操作中暂态过电压、涌流变化规律的模拟精度。

该模型以断路器两端电压及线路电流作为输入量,通过时序判断、介质恢复强度与开关恢复电压的比较、及高频电弧熄灭等多维度条件判定,实时反馈控制断路器分合状态,实现对其合闸全过程的动态调控,真空断路器合闸操作的仿真流程如图 1 所示。

由图 1 可知,断路器的初始状态为分闸状态,当时间达到合闸时刻 t_{close} 时,控制系统发出合闸指令,断路

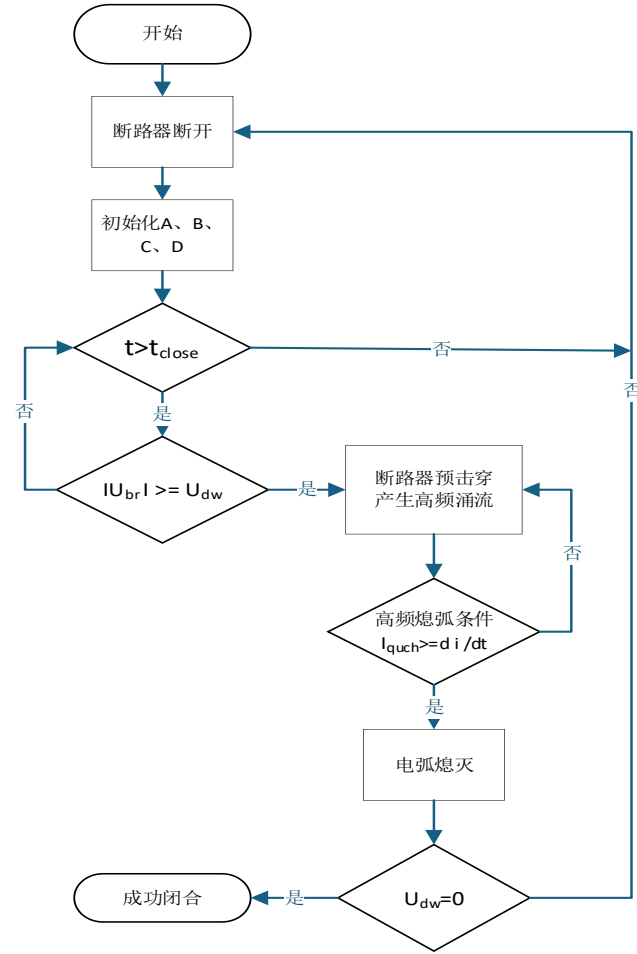


图1 真空断路器合闸流程图

Fig. 1 Vacuum Circuit Breaker Closure Flowchart

器触头开始运动闭合。在触头闭合过程中,断路器断口间介质恢复强度 U_{dw} 随触头间隙的减小逐渐衰减;当断路器断口两端工作电压 U_{br} 的绝对值超过当前开距对应的介质恢复强度 U_{dw} 时,断口间发生触头未接触前的合闸预击穿,回路中产生高频涌流。当涌流变化率 di/dt 小于断路器自身的熄弧能力 I_{quch} 时,即满足断路器的高频熄弧条件时,断路器电弧熄灭,重新开始进行开关恢复电压和介质恢复强度的比较,直至断路器的介质恢复强度下降到0,此时断路器成功合闸。其中, U_{dw} 和 I_{quch} 为真空断路器的介质恢复强度和低频熄弧能力的设定参数,对于真空断路器的合闸操作来说,触头间隙的介质恢复强度和低频熄弧能力可以用一个与开关动作时间相关的一阶多项式来简化表示^[19]。

$$U_{dw} = TRV - A(t - t_{close}) - B \quad (1)$$

$$I_{quch} = C(t - t_{open}) + D \quad (2)$$

式中, t_{close} 表示断路器接收到断路器合闸信号的时刻, TRV 表示触头间隙介质绝缘强度的最大耐受值。 A 、 B 、 C 、 D 的典型值如表1所示^[20-21]。

表1 A、B、C、D典型值

Table 1 A, B, C, D typical values

电压等级	$A(V/\mu s)$	$B(kV)$	$C(A/\mu s^2)$	$D(A/\mu s)$
高压	17	3.4	-0.034	255
中压	13	3.4	0.31	255
低压	0.47	0.69	1	190

2 合闸暂态分析

仿真配置以某220kV变电站为原型,电源经不同等级变压器转换为35kV电压等级后,并联20Mvar无功补偿容量的电容器组,每相电容器配置阻抗值相同,试验原理图如下所示。

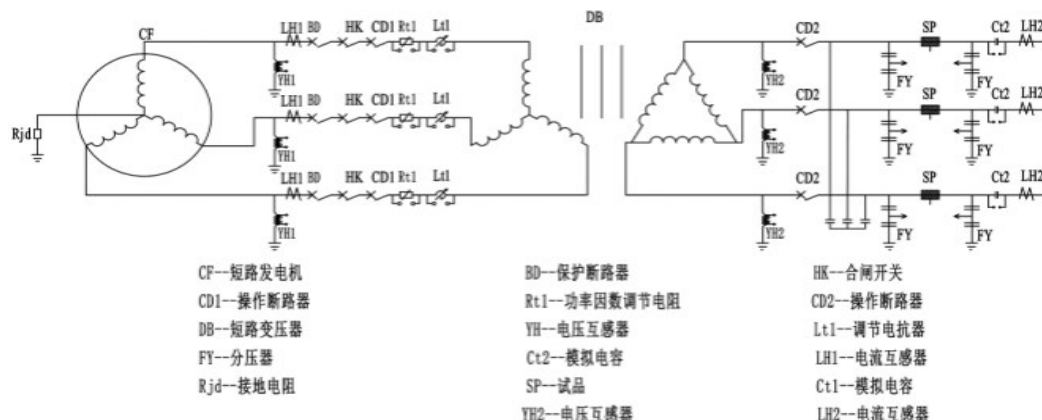


图2 试验原理接线图及相关线路参数

Fig. 2 Principle of Test and Connection of Related Line Parameters

并联电容器组模型参数由厂家提供,具体参数如表2所示。

表2 设备参数表

Table 2 device parameter list

设备	参数类别	参数	参数类别	参数
并联电容器组	额定电压	35kV	额定容量	20016kvar
	单相电容值	52 μ F	接线方式	Y

2.1 并联电容器合闸暂态过程分析

对于并联电容器的合闸暂态过程,当断路器采用三相同期合闸方式,且三相电源、线路及电容器组参数对称时,三相RLC电路可等效为单相RLC串联电路进行分析,单相等效电路如图3所示。

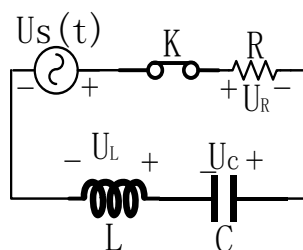


图3 单相合闸等值电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram for single-phase closing

图中, U 为系统的电源电压; C 为电容; R 为线路的电阻; L 为回路总电感。

$$U_s(t) = U_m \sin(\omega t + \phi) \quad (3)$$

断路器K闭合瞬间,电容器相当于短路, $u_c(0)=0$;电感相当于开路, $i_c(0)=0$ 。

由回路电压守恒定律的:

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = U_m \sin(\omega t + \phi) \quad (4)$$

由于并联电容器投切回路的等效电阻较小,电路通常工作在欠阻尼状态,基于该二阶线性非齐次常微分方程,代入初始条件求解,可得电容电压的暂态响应为:

$$u_c(t) = e^{-\delta t} U_m \sqrt{\cos^2(\phi + \theta) + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \sin^2(\phi + \theta)} \cos(\omega_0 + \beta) - U_m \cos(\omega t + \phi + \theta) \quad (5)$$

其中, ω 为工频角频率; δ 为阻尼系数, $\delta = R / 2L$; 为回路固有的角频率。

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{LC} \quad (6)$$

$$\theta = \arctg\left(\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)\right) / R \quad (7)$$

$$\beta = \arctg\left[\frac{\omega}{\omega_0} \tg(\phi + \theta)\right] \quad (8)$$

则电容器的涌流值为:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = U_m \omega C \sin(\omega t + \phi + \theta) + U_m \omega_0 C \cos(\phi + \theta) e^{-\delta t} \sin(\omega_0 + \beta + \pi) \quad (9)$$

其中工频分量为 $U_m \omega C \sin(\omega t + \phi + \theta)$;

逐渐衰减的高频分量为 $U_m \omega_0 C \cos(\phi + \theta) e^{-\delta t} \sin(\omega_0 + \beta + \pi)$;

可能出现的最大涌流值为:

$$I_{cm} = U_m C (\omega + \omega_0) \quad (10)$$

可能出现的最大过电压值为:

$$U_m = |2U_m - U_0| \quad (11)$$

令 I_m 为电容器的额定电流峰值, 根据交流电路中电容电流的关系:

$$I_m = U_m \omega C \quad (12)$$

变形可得:

$$U_m C = \frac{I_m}{\omega} \quad (13)$$

因此涌流倍数:

$$\gamma = \frac{I_{cm}}{I_m} = 1 + \frac{\omega_0}{\omega} = 1 + \frac{f_0}{f} \quad (14)$$

高频分量频率:

$$f_0 = f \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (15)$$

式中, f 为工频频率; f_0 为合闸涌流的高频分量频率; X_C 为电容器容抗, X_L 为电容器组投切回路的等效感抗。从式(15)可见: 投切回路等效感抗 X_L 越大, 高频分量频率 f_0 越小; 结合式(14), f_0 越小则涌流倍数 γ 越小, 合闸涌流的峰值 I_{cm} 也越小。因此, 可以得出如下核心结论: 通过增大电容器投切回路的等效感抗 X_L , 降低高频分量频率 f_0 , 从而减小涌流峰值。

2.2 触头材料与合闸速度对合闸涌流的影响

在实际电力系统的真空断路器合闸过程中, 触头间隙在机械闭合完成前, 会因电场集中、场致发射等原因发生预击穿, 形成预击穿电弧与脉冲电流。预击穿发生的时刻会造成合闸相位偏移, 破坏选相关合的相位匹配精度, 进而改变涌流衰减特性与分布规律^[22]。其中, 触头材料的性能与触头的合闸速度对预击穿的发展过程具有显著影响。本节通过仿真分析, 研究触头材料性能与合闸速度对合闸涌流的影响规律。仿真工况设定如下: A、B 两相在电源电压相等时刻同步合闸, C 相滞后 5ms 动作。作为对比基准, 未发生预击穿时的三相合闸涌流波形如图 4 所示。

2.2.1 触头材料对涌流的影响

结合触头电弧侵蚀特性与等离子体物性仿真研究可知, Cu-Cr 合金中铬含量对真空断路器弧后介质恢复速度有显著影响。郭聪慧等人的试验结果表明, Cu-50Cr 触头的电弧腐蚀速率低于 Cu-25Cr, 高铬配比能够有效减缓触头电弧烧蚀, 减少开断过程中金属蒸气的喷发总量, 削弱弧后气态导电介质的残留基础^[23]。

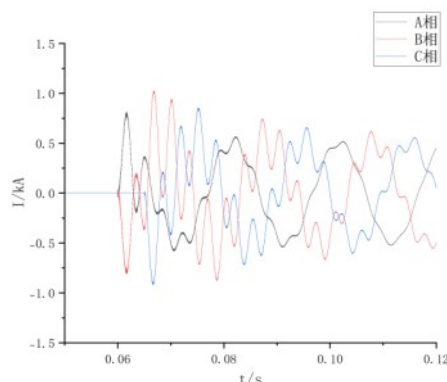


图4 未发生预击穿时的涌流波形

Fig. 4 The current wave shape in the absence of pre-breakdown

文献[24]通过真空电弧等离子体非局部热力学平衡态仿真分析发现,铬含量提升可明显降低铜铬合金电弧等离子体的电子密度与金属粒子浓度,相较于Cu-25Cr,Cu-50Cr弧后残余等离子体衰减速度更快。以上研究共同表明,Cu-50Cr可有效抑制金属蒸汽扩散、降低断口导电粒子残留,绝缘恢复进程更快,介质恢复速度显著优于Cu-25Cr。

为量化触头材料对预击穿特性与合闸涌流的作用规律,本节针对真空断路器开展不同触头材料下的对比仿真研究。依据相关文献,真空断路器灭弧室介质绝缘恢复强度通常为20~50kV/mm,其中40.5kV真空灭弧室的介质绝缘恢复强度典型值约为25kV/mm^[25],且40.5kV真空断路器的常用触头材料为Cu-50Cr,因此本文采用25kV/mm表示触头材料为Cu-50Cr时的介质恢复强度。此外,根据Huber等人的试验数据,短路开断后弧后介质恢复速度方面,Cu-50Cr比Cu-25Cr快约20%^[26],故取20kV/mm作为Cu-25Cr触头的介质恢复强度。本文以某厂商生产的40.5kV的真空断路器为研究对象,该断路器的合闸平均速度约为0.4-0.8m/s,为兼顾工程实际与仿真效率,将模型中的合闸速度设定为0.6m/s,断口额定冲击耐受电压取185kV。基于上述参数,开展三相合闸涌流仿真计算,得到对应的暂态电流波形如图5-6所示。

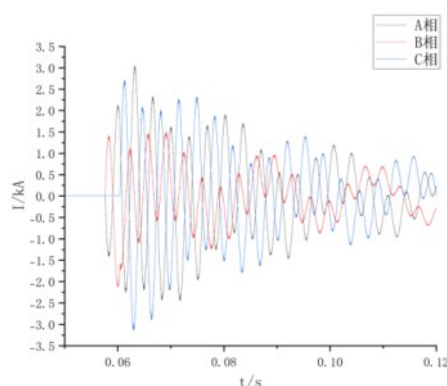


图5 触头材料为Cu-25Cr时的涌流波形

Fig. 5 The surge current waveform when the contact material is Cu-25Cr

结合图4~6的多工况对比结果可知:无预击穿工况下,三相涌流呈现均衡分布特性,峰值最低且暂态过程最为平稳,最大涌流峰值仅为1.02kA;当发生预击穿后,触头材料对涌流特性的影响显著凸显,其中Cu-25Cr触头对应的最大涌流峰值为3.13kA,Cu-50Cr触头对应的最大涌流峰值为2.72kA,且两种工况下均存在明显的三相不均衡性现象。对比两种触头材料的暂态特性可以发现:相较于Cu-25Cr触头,Cu-50Cr触头可有效降低合闸涌流峰值,同时使暂态振荡过程衰减更快。两种触头下断路器两端的合闸电压波形如下所示。

通过图7可知,当触头材料选用Cu-25Cr时,预击穿现象发生的时刻相较于Cu-50Cr会更早一些,并且在

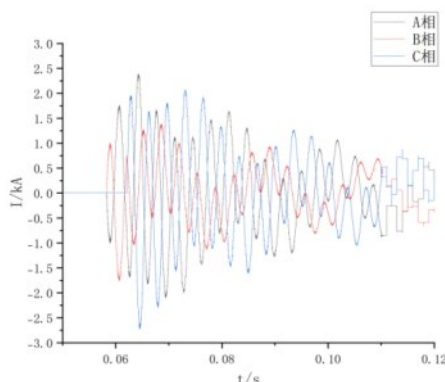


图6 触头材料为Cu-50Cr时的涌流波形

Fig. 6 The surge current waveform when the contact material is Cu-50Cr

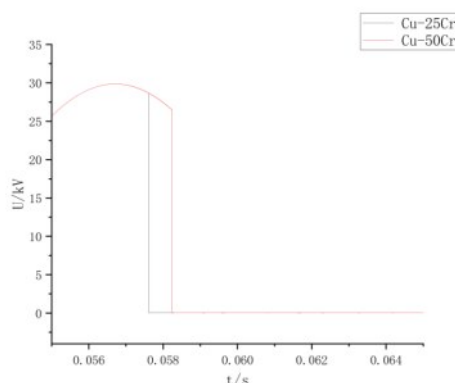


图7 不同触头材料下A相断路器两端电压波形

Fig. 7 Voltage waveform at both ends of an A-phase circuit breaker under different contact material conditions

发生预击穿的时刻,断路器两端的电压幅值会更大;根据2.1节中的式(12)可知,断路器触头闭合时刻的电压幅值与合闸涌流的幅值之间存在着紧密的关联,具体表现为断路器触头闭合时刻的电压幅值越大,合闸涌流的幅值越大。

综合上述仿真规律可以得出:触头材料通过调控发生预击穿的电压、介质恢复强度间接主导合闸涌流大小与稳定性;与Cu-25Cr触头相比,Cu-50Cr触头能降低涌流峰值,显著提升真空断路器在容性负载投入运行场景下的运行稳定性与设备寿命。

2.2.2 合闸速度对涌流的影响

合闸速度是决定真空断路器合闸暂态特性的关键机械参数之一,它通过控制触头间隙减小速率,间接控制介质恢复强度的快慢,直接决定预击穿发生的时刻、间隙大小与击穿电压,进而显著影响合闸涌流的幅值、振荡特性及三相不均衡性^[27]。合闸速度越快,介质耐受电压下降越迅速,预击穿被推迟到更小间隙、更高电压相位下发生,回路被激发的暂态能量更低,涌流峰值更小、三相合闸同步性更好;反之,介质强度下降平缓,预击穿发生更早、击穿间隙更大、电压差更高,会激发更强的高频振荡,使涌流峰值升高、三相分散性显著增大。总体而言,在合理区间内,合闸速度与涌流抑制效果呈正相关,速度提升可有效压缩预击穿时间窗口、降低击穿电压,是改善电容器组合闸暂态冲击的重要手段^[14]。

为量化合闸速度对预击穿特性与合闸涌流的作用规律,本节开展了不同合闸速度下的对比仿真研究。仿真中触头材料以Cu-50Cr的断路器模型为基础,设定合闸平均速度为0.4m/s、0.5m/s、0.6m/s、0.7m/s、0.8m/s,对不同工况下的合闸暂态过程进行仿真分析,得到三相合闸涌流的仿真波形如图7~10所示。

由于上一节已经对触头材料为Cu-50Cr、合闸平均速度为0.6m/s的情况进行仿真(图6),本节不再对该

情况下的涌流进行重复仿真。

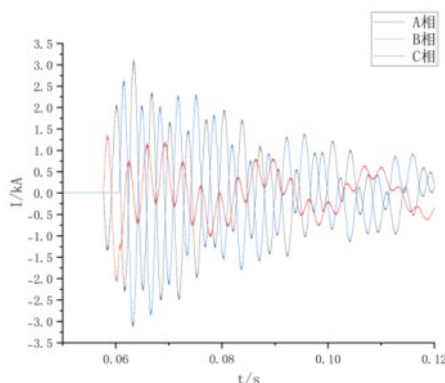


图8 合闸速度为0.4m/s时的涌流波形

Fig. 8 The surge current waveform at a closing speed of 0.4 m/s

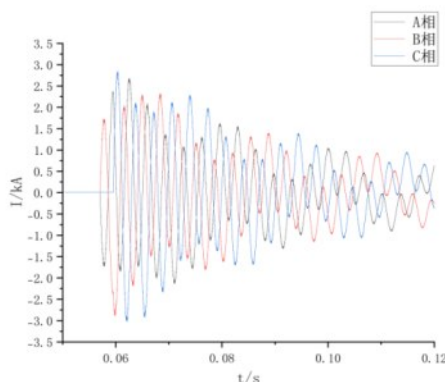


图9 合闸速度为0.5m/s时的涌流波形

Fig. 9 The surge current waveform at a closing speed of 0.5 m/s

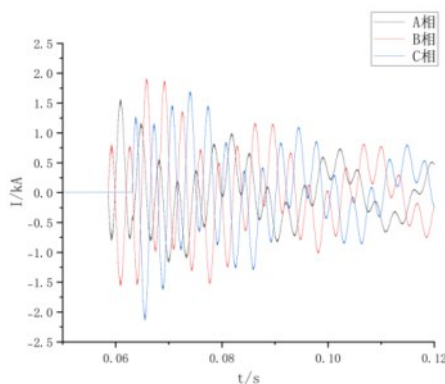


图10 合闸速度为0.7m/s时的涌流波形

Fig. 10 The surge current waveform at a closing speed of 0.7 m/s

由图8~11及图6的波形可知,合闸速度与涌流峰值呈现显著的负相关规律:当合闸速度为0.4m/s时,三相涌流最大峰值达到3.13kA,整体幅值偏高;速度提升至0.5m/s时,最大峰值维持在3.03kA的较高水平,表明低速合闸下预击穿发生早、击穿电压高,回路暂态振荡强烈。随着合闸速度逐步提高至0.6m/s与0.7m/s,涌流最大峰值分别降至2.72kA和2.50kA,呈持续下降趋势,说明速度提升可有效推迟预击穿、降低冲击能量。当合闸速度提高到0.8m/s时,涌流最大峰值进一步降至1.74kA,为所有速度工况中的最低值。整体来看,合闸速度由0.4m/s提升至0.8m/s的过程中,三相涌流最大峰值整体呈明显下降趋势,且三相不平衡性随

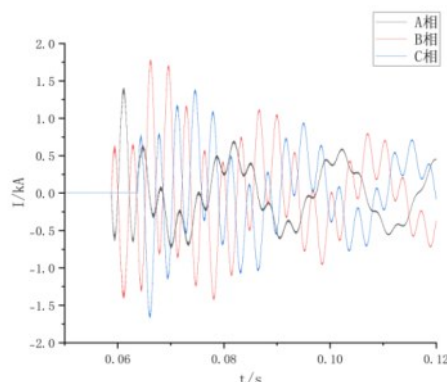


图 11 合闸速度为 0.8m/s 时的涌流波形

Fig. 11 The surge current waveform at a closing speed of 0.8 m/s

速度提高逐步改善,具体数据如表 3 所示。由此可得出明确规律:在合理速度范围内,真空断路器合闸速度越快,合闸涌流最大峰值越低,抑制暂态冲击的效果越显著。

表 3 不同合闸速度下的涌流峰值

Table 3 Peak inrush currents at different closing speeds

	0.4m/s	0.5m/s	0.6m/s	0.7m/s	0.8m/s
A 相	3.13kA	2.68kA	2.40kA	1.57kA	1.41kA
B 相	2.07kA	2.89kA	1.76kA	1.91kA	1.79kA
C 相	3.13kA	3.03kA	2.72kA	2.14kA	1.67kA

结合以上两小节的仿真数据可知,无论是提高合闸速度还是选用介质恢复更快的触头材料,均能降低预击穿对合闸涌流的影响,对提升电容器组投切安全性越有利。

2.3 残压对涌流的影响

在真空断路器投切并联电容器组的实际工程当中,真空断路器在进行分闸操作时,若电容器组上的残余电荷没有得到充分泄放,残余电荷会在电容器组上形成残压。合闸瞬间,电容器残压与电源电压叠加,将引发更严重的过电压与合闸涌流。其中,反向残压的暂态冲击效应远高于同等幅值的正向残压,该不对称现象源于电源电压与电容残压的反向叠加效应,两者叠加会使回路暂态能量瞬间大幅升高,激发剧烈的高频振荡,进而导致合闸涌流峰值和过电压幅值显著增大^[28]。表 4 为某厂家依据 IEC62271-100 标准开展的三相电容器组 C2 级开合试验(试验方式 BC2)的实测数据。

从表 4 的试验数据中可以看出:在电容器组的 4 次合闸过程中,第 1 次、第 2 次的最大合闸涌流峰值均为 3.9kA,处于常规投切工况下的正常涌流水平;由于残余电荷没有充分泄放,第 3 次、第 4 次产生的最大涌流幅值突破 6kA,分别为 6.4kA 和 6.2kA,远超正常情况下的 3.9kA,虽未造成试品即时击穿或拒动,但会加剧真空灭弧室触头电烧蚀、增大合闸电动力冲击与重燃风险。

从表 4 中的第 2 次、第 3 次、第 4 次试验数据中可以看出:C 相的涌流峰值最大;为进一步量化分析残余电荷对合闸涌流的影响机制,本研究拟通过电磁暂态仿真模型对 C 相合闸带残压时的涌流峰值最严重的情况—C 相电容器带反向电源峰值残压的工况下的涌流特性进行仿真分析。

根据 IEC62271-100 的标准,进行电容器组开合试验 BC2 时,试验电压应采用系统最高运行电压,因此仿真电压采用 35kV 系统母线的最高运行电压 40.5kV。假设在 C 相电源相角为 90°时三相同步合闸,具体仿真波形如图 12-13 所示。

从图 12-13 仿真波形中可以看出:当电容器组带反向峰值电压时,合闸涌流幅值与过电压倍数相较不带残压的情况均有明显的增大,此时三相电流波形严重畸变、振荡幅度急剧升高、衰减过程显著拉长,C 相涌流峰值可突破 6kA,过电压倍数约为 2.5 倍电源相电压峰值。因此,当残压处于极端值时,三相涌流与过电压的差异更为突出,极易引发三相不对称运行,加剧系统电压畸变与设备受力不均。不同情况下的涌流峰值和

表 4 三相电容器组(单个)开合试验方式 BC2 试验数据

Table 4 BC2 Test Data of Three-phase Capacitor Bank (Single) Opening and Closing Test

操作顺序	试验 线电压 峰值 kV	相别	合闸涌流 峰值 kA	开断电流		涌流频率 Hz	开关恢复电 压第一幅值	试品状况
				相值 A	平均值 A			
C0	40.6	A	3.6	648	653	317	68.4	正常
		B	3.9	654				
		C	1.4	657				
C0	40.7	A	1.7	647	654	298	68.7	正常
		B	3.2	654				
		C	3.9	657				
C0	40.7	A	3.8	662	657	313	68.9	正常
		B	4.8	657				
		C	6.4	653				
C0	40.7	A	4.3	657	663	297	68.7	正常
		B	3.6	664				
		C	6.2	668				

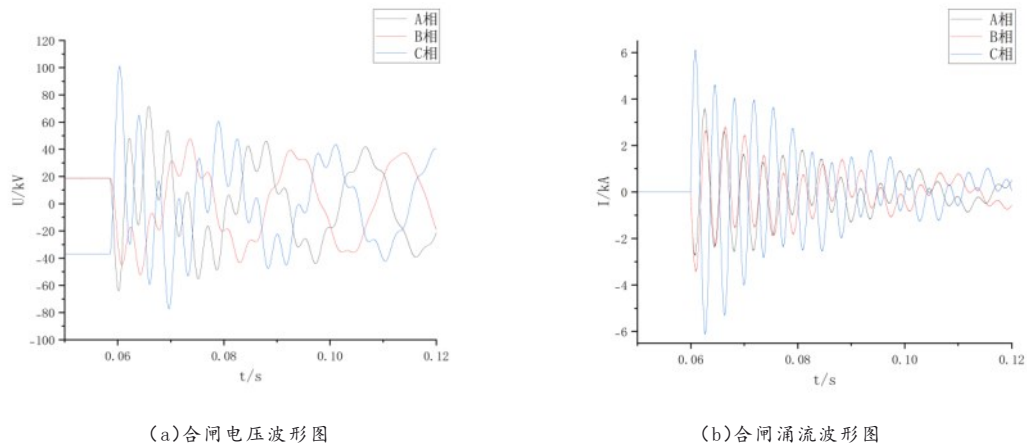


图 12 电容器组带残压断路器合闸时电压、电流暂态波形图

Fig. 12 Transient voltage and current waveform diagrams when the residual voltage circuit breaker closes for a capacitor bank with residual voltage
过电压倍数如表 5 所示。

对比表 4 试验数据和表 5 的仿真数据可以看出：电容器组不带残压时，仿真和试验的最大合闸涌流幅值分别为 3.47kA(C 相)、3.9kA(C 相)；电容器组带残压时，仿真和试验的最大合闸涌流幅值分别为 6.13kA(C 相)、6.4kA(C 相)，相对误差为 4.4% 小于 5%，可说明本文仿真模型及分析过程的正确性。

2.4 电容器组背靠背合闸对涌流的影响

在电力系统无功补偿装置运行过程中，背靠背电容器组投切是极为常见的工况。该工况下产生的背靠背涌流幅值可达单组电容器投入涌流的数十倍，是威胁电网设备安全与系统稳定运行的关键暂态问题。基于前文建立的仿真模型，本节对背靠背合闸涌流特性开展分析。背靠背涌流的等效电路如图 14 所示^[29]。

此时涌流值大小为：

$$I_{cm} = I_m \left(1 + \frac{f_0}{f} \right) \times \frac{n-1}{n} \tag{16}$$

式中， f 为工频频率； f_0 为高频分量频率； I_{cm} 为最大涌流值为； I_m 为电容器的额定电流峰值； n 为投入的电容器

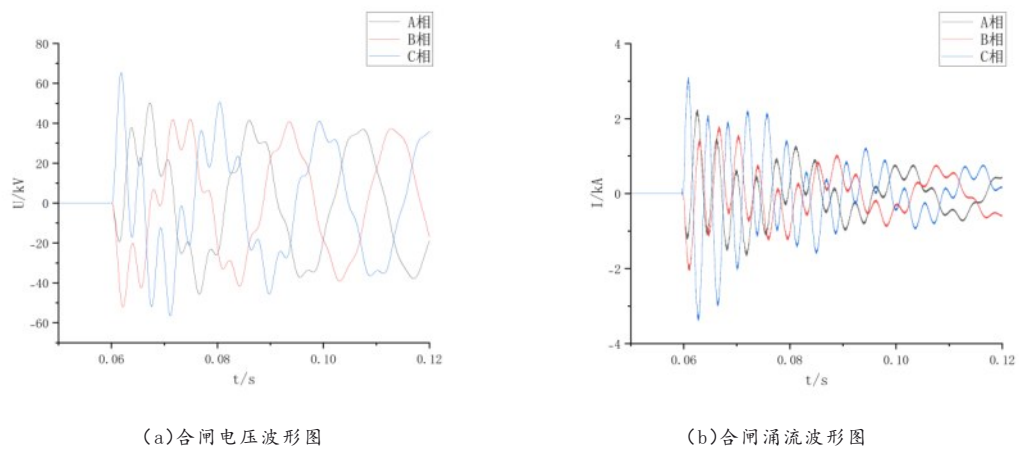


图 13 电容器组不带残压断路器合闸时电压、电流暂态波形图

Fig. 13 Transient voltage and current waveform diagrams when the circuit breaker closes without residual voltage in the capacitor bank

表 5 不同情况下的过电压倍数和涌流峰值

Table 5 Overvoltage multiples and peak inrush currents under different conditions

	相别	带残压的情况下	不带残压的情况下
过电压 倍数/ p_u	A相	1.75	1.24
	B相	1.31	1.29
	C相	2.49	1.61
涌流峰 值/kA	A相	3.61	2.37
	B相	3.46	2.21
	C相	6.13	3.47

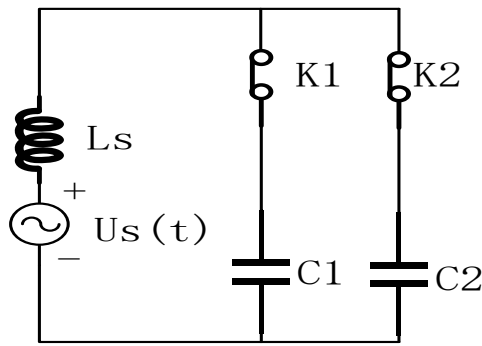


图 14 背靠背涌流的等效电路

Fig. 14 The equivalent circuit of back-to-back current flow

组数。本节对一组电容器组投入运行后,在投入第二组电容器组的情况进行仿真,仿真波形如图 15 所示。

由图 15 可见,背靠背合闸工况下,已投入电容器组储存的电荷会与待投电容器组形成显著的瞬时电压差,在合闸瞬间通过串联电抗器、系统电感与两组电容器构成的 LC 回路,产生剧烈的电磁振荡。该振荡的能量远高于单组电容器空载合闸的工况,因此产生的涌流峰值大幅提升,仿真中涌流峰值可达 41.61kA,约为单组合闸涌流峰值的 13 倍,对应电流幅值超过电容器组额定电流峰值的 80 倍。该涌流不仅包含工频基波分量,还叠加了显著的高次谐波分量,波形呈现出典型的高频振荡、快速衰减的暂态特征。

2.5 串联电抗器对涌流的抑制

上述分析表明,真空断路器投切电容器组时产生的合闸涌流可达电容器组额定电流的数倍乃至数十

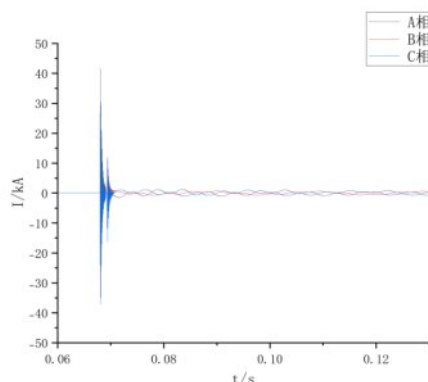


图15 背靠背合闸涌流波形图

Fig. 15 Waveform diagram of the closing surge current when the contacts are closed back-to-back

倍,远超电容器设备的耐受水平,因此必须采取有效的涌流抑制措施。串联电抗器利用电感对电流突变的强抑制特性,成为40.5kV真空断路器投切并联电容器组时抑制合闸涌流的核心工程手段,其作用机理覆盖幅值抑制、振荡衰减、滤除高次谐波等多个维度,在正常合闸、带残压合闸及背靠背合闸等典型场景下均展现出稳定且可靠的限流效果^[30]。因此本节采用不同电抗率的串联电抗器对正常合闸、带反向峰值残压合闸及背靠背合闸三种工况下的涌流的抑制效果开展仿真分析,对比研究串联电抗器对不同工况涌流的抑制程度。不同电抗率下串联电抗器对常规合闸、带反向峰值残压合闸及背靠背合闸三种工况下的合闸涌流抑制效果波形如图16所示;具体数据如表6所示。

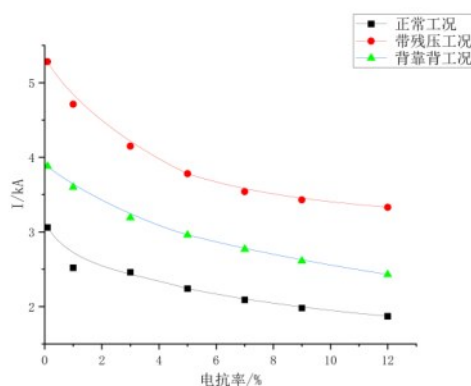


图16 不同电抗率下三种合闸工况的涌流变化

Fig. 16 Changes in inrush current under three different closing conditions at various reactance rates

结合图16波形和表6数据可知:随串联电抗器电抗率的提升,三种工况下的合闸涌流峰值整体呈下降趋势,三相不平衡性、高次谐波分量显著改善,振荡衰减加快。具体来看:

(1)正常合闸工况下,A相涌流(三相中最大)随电抗率提升持续降低,B、C相涌流在高电抗率段出现小幅波动,当串联电抗器的电抗率大于5%时,涌流下降幅度变缓;

(2)针对电容器组带残余电荷的严苛工况,涌流幅值整体高于正常合闸,电抗率提升对涌流抑制效果更显著,当串联电抗器的电抗率大于7%时,也出现涌流下降幅度变缓的现象;

(3)在危害最突出的背靠背合闸场景中,A相涌流随电抗率提升持续下降,B、C相涌流呈先降后小幅回升的趋势;当串联电抗器的电抗率大于5%时,涌流下降幅度变缓。

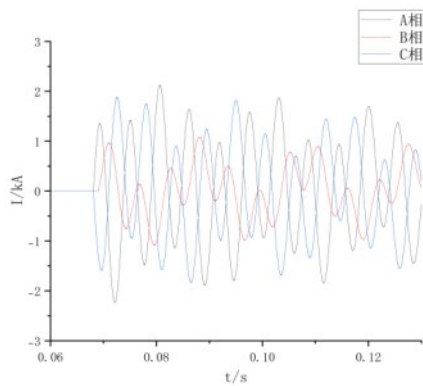
以电抗率为5%和12%两种情况为例,电抗器在上述三种工况下合闸涌流仿真波形如图17~19所示。

从仿真中可以看出:仅从涌流抑制来看,电抗率越高,涌流峰值越低,但电抗率超过5%-7%后,涌流下降

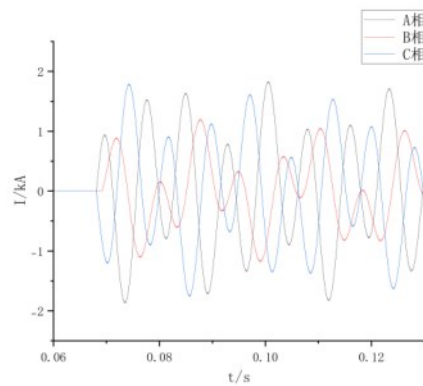
表6 不同电抗率下三种工况下的合闸涌流幅值

Table 6 Amplitudes of closing inrush currents under three operating conditions with different reactance ratios

电抗率		0.1%	1%	3%	5%	7%	9%	12%
正常条件下	A相	3.06kA	2.52kA	2.46kA	2.24kA	2.09kA	1.98kA	1.87kA
	B相	1.20kA	1.18kA	1.13kA	1.09kA	1.04kA	1.04kA	1.20kA
	C相	2.38kA	2.25kA	2.01kA	1.88kA	1.85kA	1.82kA	1.79kA
带残余电荷的条件下	A相	5.28kA	4.71kA	4.15kA	3.78kA	3.54kA	3.43kA	3.33kA
	B相	4.23kA	3.78kA	3.52kA	3.18kA	2.95kA	2.81kA	2.64kA
	C相	1.81kA	1.63kA	1.55kA	1.46kA	1.42kA	1.38kA	1.47kA
背靠背合闸的条件下	A相	3.88kA	3.60kA	3.19kA	2.96kA	2.77kA	2.61kA	2.43kA
	B相	2.16kA	2.04kA	1.87kA	1.84kA	1.97kA	1.87kA	2.04kA
	C相	2.50kA	2.30kA	1.84kA	1.94kA	1.73kA	1.75kA	1.81kA



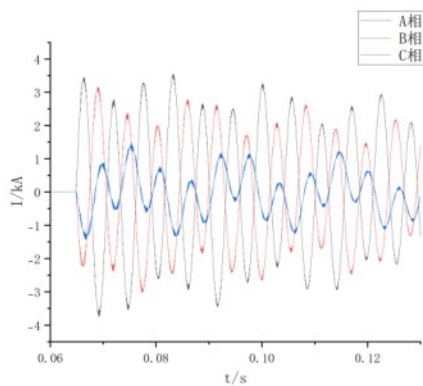
(a)电抗率为5%



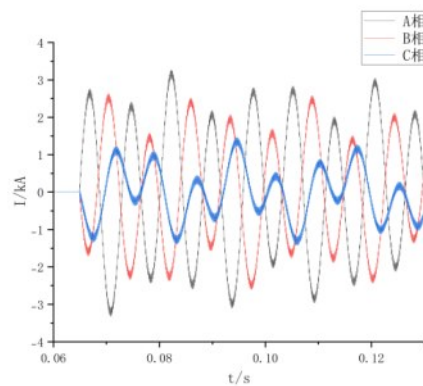
(b)电抗率为12%

图17 不同电抗率下正常合闸时的涌流峰值

Fig. 17 Peak inrush current during normal closing under different reactance rates



(a)电抗率为5%



(b)电抗率为12%

图18 不同电抗率下带反向峰值残压时的涌流峰值

Fig. 18 Peak inrush current under reverse peak residual voltage at different reactance rates

幅度变缓,且过高的电抗率会大幅减少电容器组所发无功,不利于系统运行的经济性。依据涌流抑制确定电抗率后,还需从谐波抑制方面进一步校验电抗率^[31]。滤波等值电路如下图所示。

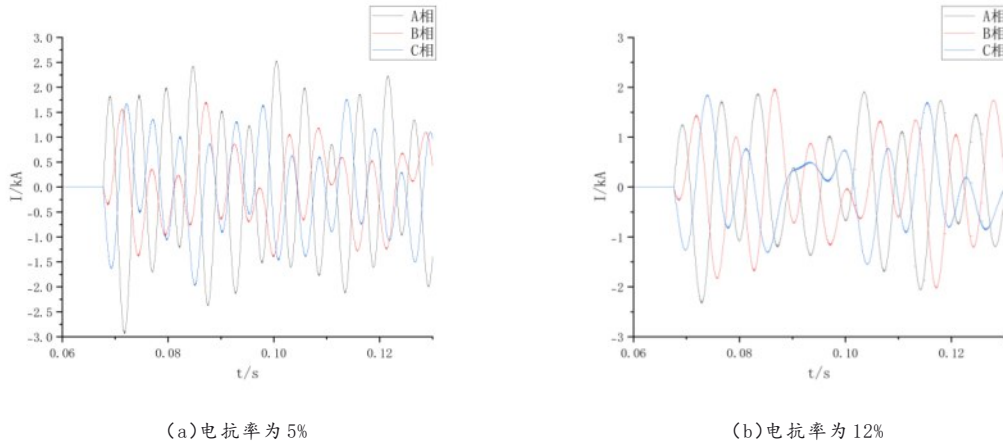


图 19 不同电抗率下背靠背合闸时的涌流峰值

Fig. 19 Peak inrush current during back-to-back closing under different reactance rates

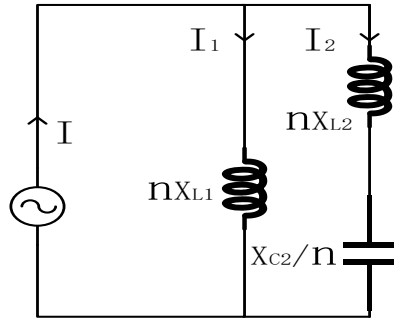


图 20 滤波等值电路图

Fig. 20 Equivalent circuit diagram for filtering

其中, I 为产生的总谐波电流; I_1 为流入系统的谐波电流; I_2 为流入并联电容器组的谐波电流; n 为谐波次数; X_{L1} 为工频系统等效电抗; X_{L2} 为工频串联电抗器; X_{C2} 为工频并联电容器组容抗。

流过系统和并联电容器组的谐波电流为:

$$I_1 = \frac{nX_{L2} - X_{C2}/n}{nX_{L1} + nX_{L2} - X_{C2}/n} I \quad (17)$$

$$I_2 = \frac{nX_{L1}}{nX_{L1} + nX_{L2} - X_{C2}/n} I \quad (18)$$

若 X_{L2}/X_{C2} 用串联电抗率 K 来表示, 流过系统和并联电容器组的谐波电流可简化为:

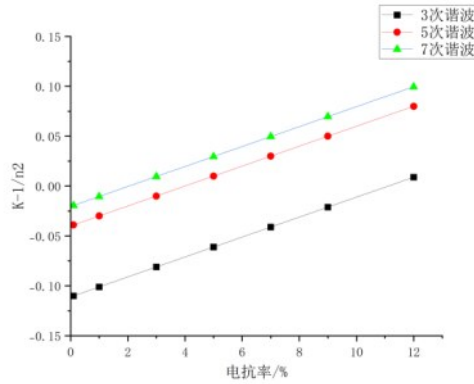
$$I_1 = \frac{K - 1/n^2}{X_{L1}/X_{C2} + K - 1/n^2} I \quad (19)$$

$$I_2 = \frac{X_{L1}/X_{C2}}{X_{L1}/X_{C2} + K - 1/n^2} I \quad (20)$$

由式(19)、(20)可知, 当 $K - 1/n^2 < 0$ 时, 由于并联电容器组的电抗远大于系统电抗, 会反向增大注入系统的谐波电流 I_1 ; 当 $K - 1/n^2 = 0$ 时, 即 $nX_{L2} = X_{C2}/n$, 此时并联电容器回路会产生谐振, 不利于系统运行的稳定性; 当 $K - 1/n^2 > 0$ 时, 串联电抗器能够成功抑制流入系统的谐波; 且随着 $K - 1/n^2$ 越小, I_2 越大, 滤波效果越好。不同电抗率对 3、5、7 次谐波的 $K - 1/n^2$ 波形如下图所示, 具体数据如表 7 所示。

由图 21 和表 7 数据可知, 当系统以 5、7 次谐波为主时, 采用电抗率为 5% 及以上的串联电抗器能够成功滤波, 其中电抗率为 5% 的串联电抗器滤波效果最好; 当系统以 3 次谐波为主时, 选用电抗率为 12% 的串联电抗器能够较好抑制谐波对系统的影响。

综合合闸涌流抑制效果、谐波抑制需求、经济性, 5%-7% 电抗率可作为 35kV 配电网(以 5、7 次谐波为主)

图 21 不同电抗率对应的 $K-1/n^2$ 波形Fig. 21 Waveforms corresponding to different reactance ratios($K=1/n^2$)表 7 不同电抗率对应的 $K-1/n^2$ 具体数值Table 7 Specific values of $K-1/n^2$ corresponding to different reactance ratios

电抗率/%	3次谐波	5次谐波	7次谐波
0.1	-0.110	-0.039	-0.019
1	-0.101	-0.03	-0.01
3	-0.081	-0.01	0.01
5	-0.061	0.01	0.029
7	-0.041	0.03	0.049
9	-0.021	0.05	0.069
12	0.009	0.08	0.099

电容器组投切涌流抑制的优选方案;若系统含有大量的3次谐波,需使用12%电抗率的串联电抗器。

3 结语

本文以40.5kV真空断路器投切并联电容器组合闸涌流为研究对象,基于PSCAD构建了融合介质恢复强度、预击穿特性与高频熄弧能力的真空断路器自定义仿真模型,突破了传统理想开关模型无法还原真实合闸暂态物理过程的局限,系统探究了触头材料、残余电荷、背靠背投切及串联电抗率对合闸涌流的耦合影响规律,得到以下核心结论:

(1)真空断路器合闸涌流由工频稳态分量与高频暂态分量共同构成,预击穿是暂态涌流的主要诱因,其发生的时刻会改变三相合闸的相位,放大涌流峰值与三相不平衡性;真空断路器合闸速度与合闸涌流最大峰值呈显著负相关规律;在0.4-0.8m/s合闸速度范围内,随着合闸速度提升,预击穿被有效推迟、涌流幅值与三相不平衡性均得到明显改善;且有着较快的介质恢复速的触头材料也能降低预击穿对涌流的影响;即合闸速度越快、触头间隙的恢复速度越优良,合闸涌流峰值越低、抑制效果越优。

(2)电容器组残余电荷会显著加剧合闸暂态冲击,且极端反向残压下合闸涌流峰值可提升70%以上,易引发三相不对称运行与设备绝缘劣化,工程中需完善残余电荷泄放措施。

(3)背靠背合闸是涌流危害最突出的工况,其涌流峰值可达单组合闸的80倍以上,伴随显著高次谐波,对真空灭弧室与电容器组构成强冲击,三相不平衡性同步加剧。

(4)串联电抗器是适配多种工况的高效涌流抑制手段,5%-7%电抗率区间可作为35kV配电网(以5、7次谐波为主)电容器组投切涌流抑制的优选方案。在常规合闸、带残压合闸、背靠背合闸等场景下均能稳定发挥限流作用,同时加快振荡衰减、削弱谐波分量,且不依赖复杂控制逻辑,可靠性与工程适配性突出。

本文所建模型与研究结论更贴合配实际运行场景,可为真空断路器容性投切涌流抑制、触头材料选型、串联电抗率配置及无功补偿装置工程优化提供理论依据与数据支撑。后续可进一步结合触头微观形貌演化、电弧动态特性与现场运行数据,深化涌流与设备寿命关联机制研究,并探索串联电抗与相控合闸协同抑

制策略,进一步提升真空断路器容性投切的安全稳定性。

参考文献:

- [1] 盖斌,蔡俊,赵亮,等. 并联电容器装置投切的仿真分析与试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(06): 1-7.
Gai Bin, Cai Jun, Zhao Liang, et al. Simulation analysis and experimental study on the switching of parallel capacitor banks [J]. Electric Capacitors and Reactive Power Compensation, 2020, 41(06): 1-7.
- [2] 廖斌,梁晨,陈松,等. 一起35kV并联电容器装置故障原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(05): 1-6.
Liao Bin, Liang Chen, Chen Song, et al. Analysis of fault causes in a 35 kV parallel capacitor system [J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2022, 43(05): 1-6.
- [3] 曾喜闻,张民,赵景禹,等. 基于暂态电流特征的750kV滤波器组断路器在线监测系统开发[J/OL]. 电力电容器与无功补偿, 1-16[2026-05-31]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1468.TM.20260313.1602.018>.
Zeng Xiwen, Zhang Min, Zhao Jingyu, et al. Development of an online monitoring system for 750 kV filter bank circuit breakers based on transient current characteristics [J/OL]. Electric Capacitors and Reactive Power Compensation, 1 - 16 [2026-05-31]. <https://link.cnki.net/Urlid/61.1468.TM.20260313.1602.018>.
- [4] 耿云,姚晓飞,许闽桦,等. 双断口真空断路器高频涌流预击穿特性实验[J]. 电工技术学报, 2026, 41(10): 3536-3549.
Geng Yun, Yao Xiaofei, Xu Minju, et al. Experimental study on the pre-breakdown characteristics of high-frequency inrush currents in double-break vacuum circuit breakers [J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2026, 41(10): 3536 - 3549.
- [5] 杨和. 合闸涌流对真空断路器重击穿特性的影响[J]. 电气技术, 2019, 20(11): 68-72+81.
Yang He. The effect of closing inrush current on the heavy breakdown characteristics of vacuum circuit breakers [J]. Electrical Technology, 2019, 20(11): 68-72+81.
- [6] Surya Santoso, Jeffrey D. Lamoree & Mark F. Mc Granaghan. Signature analysis to track capacitor switching performance [J]. IEEE, 2001, 1: 259-263.
- [7] Denis V. Coury, Claudio Jose Santos, et al. Transient analysis concerning capacitor bank switching in a distribution system [J]. Elsevier Electric Power System Research, 2002, 65:13-21.
- [8] M Softic, A Tokic, et al. 7th Vienna international conference on mathematical modeling measurement modeling and simulation of capacitor bank switching transients[C]. IFAC proceedings, 2012, 45:1254-1259.
- [9] MANNEKUTLA J, BIANCHETTI R, FRIBERG A, et al. Temperature distribution in ablation controlled switching arcs using optical emission spectroscopy[C]//2016 IEEE 62nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts.[S.l.]:IEEE, 2016:39-45.
- [10] DELACHAUX T, KENEL C, RAGER F, et al. Influence of anisotropic contact materials on the vacuum arc's chopping behavior [C]//2023 30th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV).[S.l.]:IEEE,2023:143 - 146.
- [11] DING Jiangang, LIU Xue, YAO Xiaofei, et al. Lightning impulse breakdown of vacuum gaps in series—Part II: Bridging resistor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(4): 1373-1381.
- [12] FUGEL T, KOENIG D. Influence of grading capacitors on the breaking performance of a 24 kV vacuum breaker series design [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 569-575.
- [13] 石文杰. 背靠背电容器组真空断路器关合涌流计算[J]. 陕西煤炭, 2021, 40(S2): 51-55+68.
Shi Wenjie. Calculation of inrush current during closing of back-to-back capacitor bank vacuum circuit breakers [J]. Shaanxi Coal, 2021, 40(S2): 51-55+68.
- [14] 马飞越,牛雨芊,孙尚鹏,等. 电容器组相控投切快速真空断路器关合策略研究[J]. 高压电器, 2025, 61(12): 33-41.
Ma Feiyue, Niu Yuqian, Sun Shangpeng, et al. Research on the closing strategy of phase-controlled switching capacitor banks for fast vacuum circuit breakers [J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2025, 61(12): 33-41.
- [15] 陈鹤冲,陈轩恕,刘波,等. 双断口真空断路器投入电容器的合闸涌流的研究[J]. 高压电器, 2020, 56(04): 29-34.

- Chen Hechong, Chen Xuanshu, Liu Bo, et al. Study on the closing inrush current of capacitors when double-break vacuum circuit breakers are energized [J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2020, 56(04):29-34.
- [16] 彭晶, 邓云坤, 王科, 等. 真空断路器预击穿特性对选相关合电容器组抑制涌流的影响[J]. 电器与能效管理技术, 2022, (01): 7-13+26.
- Peng Jing, Deng Yunkun, Wang Ke, et al. The impact of pre-breakdown characteristics of vacuum circuit breakers on the selection of associated capacitor banks for surge current suppression [J]. Electrical Equipment and Energy Efficiency Management Technology, 2022, (01): 7-13+26.
- [17] 王成龙, 李洪伟, 徐学帅, 等. 阻容均压方式下双断口真空断路器预击穿特性研究[J]. 高压电器, 2025, 61(03): 27-41.
- Wang Chenglong, Li Hongwei, Xu Xueshuai, et al. Study on the pre-breakdown characteristics of double-break vacuum circuit breakers under resistance-capacitance equalization voltage method [J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2025, 61(03):27-41.
- [18] 辛妍丽. 海上风电场集电系统高频暂态建模和内部过电压产生机理研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
- Xin Yanli. Research on High-Frequency Transient Modeling and Internal Overvoltage Generation Mechanisms in Collective Collection Systems of Offshore Wind Farms [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [19] Popov M, Smeets R P P, Lou V D S, et al. Experimental and Theoretical Analysis of Vacuum Circuit Breaker Prestrike Effect on a Transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1266-1274.
- [20] Mireanu D. Transient Overvoltages in Cable Systems[D]:[Master's Thesis].[S.l.]: Charlmes University of Technology, 2007.
- [21] Glinkowski M T, Gutierrez M R, Braun D. Voltage Escalation and Reignition Behavior of Vacuum Generator Circuit Breakers During Load Shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1):219-226.
- [22] Stanek M. Analysis of circuit breaker controlled switching operations—from manual to automatic[C]. 50th International Universities Power Engineering Conference. Stoke on Trent, UK, 2015:1-6.
- [23] 郭聪慧, 段文新, 杨志懋, 等. CuCr触头材料电弧腐蚀速率的测定[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, (02): 295-298.
- Guo Conghui, Duan Wenxin, Yang Zhimao, et al. Determination of arc corrosion rates for CuCr contact materials [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, (02):295-298.
- [24] 杨赫, 徐晶, 柯贤杨, 等. 真空断路器铜铬金属蒸气等离子体非局部热力学平衡态物性参数分析[J]. 真空科学与技术学报, 2024, 44(11): 955-961.
- Yang He, Xu Jing, Ke Xianyang, et al. Analysis of physical property parameters at the non-local thermodynamic equilibrium state of copper-chromium metal vapor plasma in vacuum circuit breakers [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2024,44(11):955-961.
- [25] 辛妍丽, 周文婷, 余泽远, 等. 40.5 kV 真空断路器分闸并联电抗器重燃过电压及抑制方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(04): 231-240.
- Xin Yanli, Zhou Wenting, Yu Zeyuan, et al. Overvoltage during re-commissioning of parallel reactors in 40.5 kV vacuum circuit breakers and suppression methods [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023,42(04):231-240.
- [26] Huber E, Frohlich K, Grill R. Dielectric recovery of copper chromium vacuum interrupter contacts after short-circuit interruption[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(4): 642-646.
- [27] 张登奎, 张立岩, 李志兵, 等. 基于经验小波变换的真空断路器关合预击穿燃弧时间分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(S1): 106-116.
- Zhang Dengkui, Zhang Liyan, Li Zhibing, et al. Analysis of the pre-breakdown arc duration during vacuum circuit breaker closing based on empirical wavelet transform [J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2024, 39(S1): 106-116.
- [28] 乔文斌. 并联电容器组投切时的过电压和涌流抑制措施研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- Qiao Wenbin. Research on Overvoltage and Surge Current Suppression Measures During Switching of Parallel Capacitor Banks [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [29] 马飞越, 马青, 崔巍, 等. 宁夏电网 35kV 电容器组合涌流计算与仿真分析[J]. 宁夏电力, 2024, (04): 41-48.
- Ma Feiyue, Ma Qing, Cui Wei, et al. Calculation and simulation analysis of closing inrush current in 35 kV capacitor banks of the Ningxia power grid [J]. Ningxia Electric Power, 2024, (04):41-48.

[30] 张金峰. 浅谈光伏电站电容器组串联电抗器典型故障分析[J]. 科技世界, 2021(10) : 61-62.

Zhang Jinfeng. A Brief Discussion on Typical Fault Analysis of Series Reactors in Capacitor Banks of Photovoltaic Power Stations [J]. Science and Technology World, 2021(10):61-62.

[31] 陶梅,江钧祥. 串联电抗器及其电抗率的选取[J]. 电力电容器与无功补偿,2010,31(3):58-61.

Tao Mei, Jiang Junxiang. Series reactors and their reactance selection [J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2010,31(3):58 - 61.