

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.026

## 海上柔直选相合闸操作计算验证及工程应用研究

李英<sup>1</sup>, 李海涛<sup>2</sup>, 刘根根<sup>3</sup>, 陕华平<sup>4</sup>, 王根政<sup>3</sup>

(1. 特变电工衡阳变压器有限公司, 湖南 衡阳 421007; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102; 3. 特变电工中发上海高压开关有限公司, 上海 201401; 4. 国家电网有限公司直流技术中心, 北京 100052)

**摘要:**文中阐述了在完成海上柔性直流系统送电过程中,防止变压器励磁涌流造成送电失败而采用选相合闸措施。为保证选相操作顺利实施,通过变压器励磁涌流仿真计算,明确变压器涌流在最大允许限值时,断路器允许的动作时间最大偏离值,通过试验验证,确认影响断路器合闸操作时间分散性因素和范围。根据以上计算和验证结果,根据断路器空置时间分散性试验,选用多次关合时间中间值作为最终参数,减小了断路器机械及电气分散性的影响,使得实际运行考核中,变压器励磁涌流得到有效抑制,可为后续海上柔性直流选相合闸装置、断路器动作特性、变压器励磁涌流的配合及控制策略提供参考。

**关键词:**柔性直流输电; 变压器涌流计算; 断路器动作时间; 选相合闸

### Study on Calculation Verification and Engineering Application of Offshore VSC-HVDC Phase Selection Closing Operation Measures

LI Ying<sup>1</sup>, LI Haitao<sup>2</sup>, LIU Gengen<sup>3</sup>, SHAN Huaping<sup>4</sup>, WANG Genzheng<sup>3</sup>

(1. TBEA Hengyang Transformer Co., Ltd., Hunan Hengyang 421007, China; 2. Nanjing Nanrui Jibao Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 3. TBEA Zhongfa Shanghai High Voltage Switch Co., Ltd., Shanghai 201401, China; 4. DC Technology Center of State Grid Co., Ltd., Beijing 100052, China)

**Abstract:** In this paper, the adoption of phase selection closing measures are described in order to prevent the failure of power supply due to excitation inrush current of transformer during the completion of the power supply of offshore VSC-HVDC system. For assuring the smooth implementation of phase selection operation, the maximum allowable deviation of operation time permitted by the circuit breaker is determined by the simulation calculation of excitation inrush current of transformer. Through the test verification, the factors and ranges affecting the operation time dispersion of circuit breaker are confirmed. According to the above calculation and verification results and the idle time dispersion test of the circuit breaker, the intermediate value of multiple making time is selected as the final parameter, the influence of mechanical and electrical dispersion of circuit breaker is reduced, the excitation inrush current of transformer is effectively suppressed in the actual operation assessment. It can provide reference for the coordination and control strategy of the offshore VSC-HVDC phase selection closing device, operation characteristics of circuit breaker and excitation inrush current of transformer of subsequent offshore VSC-HVDC system.

**Key words:** VSC-HVDC transmission; inrush current calculation of transformer; operation time of circuit breaker; phase selection closing

## 0 引言

柔性直流输电是基于电压源换流器的高压直流输电模式,适合海上风场和分布式电源接入电网,相比于传统直流输电技术,其优势主要表现在:没有无功补偿问题,没有换相失败问题,可以为无

源系统供电,可同时独立调节有功功率和无功功率,谐波水平低,适合构成多端直流系统,在海上风电接入方面优势明显,其技术正在得到越来越广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。直流换流变压器和特高压主变均出现过励磁涌流造成的继电保护动作,断路器采用选相合闸技术可以有效抑制合空变励磁涌流,优化技术

包括选择合闸电阻、合闸时刻,在不同储能条件下的液压操作机构开关动作特性曲线,针对开关的优化选相分合闸自适应控制策略,具有重要工程应用价值<sup>[3-12]</sup>。案例中 $\pm 800$  kV 换流站 750 kV 交流侧滤波器断路器合闸时事故频发,对不同滤波器组合闸过程中所产生的合闸涌流、合闸过电压、合闸电阻所能吸收的最大热量进行了仿真计算,研究了合闸电阻阻值和合闸相角对合闸暂态的影响规律<sup>[13]</sup>。特高压直流分层接入高低端换流器后,会对换流站及所接入交流系统的过电压、谐振特性等产生影响,交流滤波器断路器的分断性能对系统的可靠运行影响显著,换流变压器励磁涌流具有一定特殊性<sup>[14-15]</sup>,励磁涌流引起枫泾站换流母线电压畸变、阀控 VBE 对已关断阀执行重触发以及换相失败恢复期间,直流电流过冲等因素导致了林枫直流发生换相失败,提出了极控系统的改进措施:取消瞬时电流控制、优化换相失败预测和低压限流等措施的有效性<sup>[16]</sup>。文[17-19]中分析了高压直流输电交流滤波器在投入时可能引起的谐波冲击,阐述了谐波电流引发串并联谐振,导致系统谐波放大的机理,通过改进系统设计及优化分相合闸装置,解决滤波器投切时冲击过大的问题,分析了换流站交流滤波器低电流退出功能的逻辑缺陷,并提出了改进建议。文[20-25]讨论了励磁涌流的识别,提出了基于多变量多尺度熵的辨识方法能有效区分励磁涌流和故障电流,并在性能上优于传统的二次谐波判据,提出一种基于 Jarque-Bera 系数来识别励磁涌流的新策略。结合反并联晶闸管和滤波电路组成的涌流抑制器,文[26]提出了一种基于软启动的变压器涌流抑制方法。在剩磁对励磁涌流的影响,有必要预测铁心剩磁以确定最佳合闸相位,实现空投变压器的无冲击平滑过渡<sup>[18]</sup>。剩磁水平随断路器均压电容的增大而

降低,文[27]提出以动态剩磁整周期内的平均值作为剩磁水平,来确定最佳合闸相位进行选相关合的策略。选相合闸策略能够有效地抑制中性点不接地空载变压器励磁涌流,在长链式薄弱电网中,变压器空载励磁涌流 PSCAD 仿真平台,搭建藏中联网工程电磁暂态模型并提出剩磁准确添加方法,针对三相联动断路器,文[28]提出了相适应的空载变压器选相合闸策略。文[29]提出了基于零模涌流的零差保护 CT 极性无负荷校验方法,利用变压器空载合闸励磁涌流的零模分量,通过计算 Y 侧自产与中性点零模涌流的波形相似度,采取“假设—检验”的方式,遍历所有可能的极性错误情况,实现零差保护 CT 极性正确性的校验,并引入欧氏距离以进一步提高方法对极端涌流情况的适应性。前期研究成果可以看出,对励磁涌流的研究多集中在涌流的识别、剩磁的影响,选相合闸装置的投切、合闸电阻的优化等各方面,文中在准确计算不同选相分合闸策略下变压器励磁涌流基础上,根据断路器动作特性和空置时间分散性试验,选用多次关合时间中间值作为最终参数,减小了断路器机械及电气分散性的影响,使得实际投运考核中,达到工程技术要求,变压器励磁涌流得到有效抑制,为后续海上柔直选相合闸装置、断路器动作特性、变压器励磁涌流的协调控制策略提供参考。

中国首个柔性直流海上风电项目,三峡江苏如东海风项目首批机组不久前正式送电。该海风项目由多台风机发电,经 35 kV 海缆分别送至 3 个 220 kV 海上升压平台,升压后转送至一个换流平台,从交流 500 kV 换流直流 400 kV 后,经两条海缆送至陆上换流站,再换流成交流 500 kV 上网。海上整个换流系统接线图见图 1。

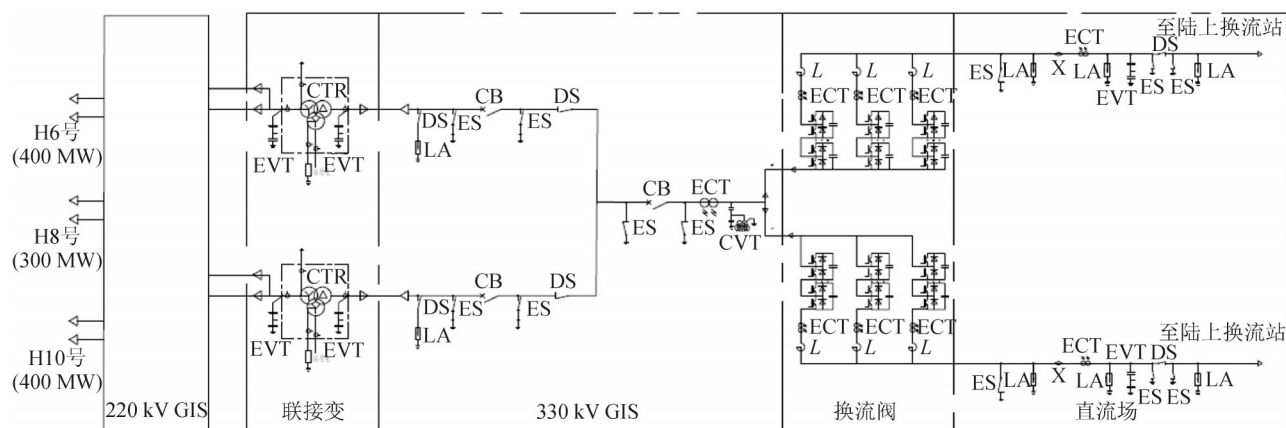


图1 如东海上海换流站主接线图

Fig. 1 Main diagram of Rudong sea converter station

风电场投运前,分布式海上风机启动电源是通过陆上电源倒送电获得。在这空载倒送电过程中,变压器铁心残存的电磁能量会造成系统投运时的励磁涌流现象,且受变压器铁心励磁特性非线性影响,合闸空载变压器时可能产生的高幅值的励磁涌流(严重时可达额定电流的6~8倍),其中含有各次谐波分量,励磁涌流注入电网可能引起电压暂降、谐波过电压等问题,影响电网的正常运行。在海上柔性输电系统中,极易造成变压器网侧过流保护动作致使送电失败。励磁涌流大小与变压器磁密、绕组结构、铁心剩磁及合闸相位角有关,影响尤其大的因素是合闸瞬间相位。典型的变压器励磁涌流波形见图2。

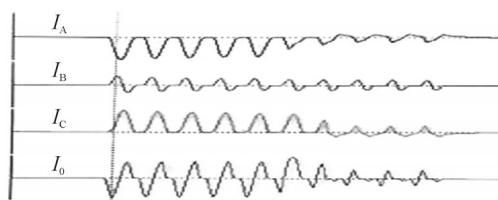


图2 变压器励磁涌流波形

Fig. 2 Transformer inrush current waveform

根据国网经研院提供的《如东工程海上升压站注入海上换流站的励磁涌流问题分析》,通过在海上升压站配置合闸电阻或选相合闸装置两个方案来限制励磁涌流。并需要满足单台主变投入时,注入海上换流站联接变网侧的励磁电流控制在1.2 kA以下。若励流电流超标会引起换流阀中过流保护继电器动作,触动断路器跳闸,造成送电失败。

3个220 kV升压平台中的H6和H10平台,主变前侧断路器选用配置合闸电阻。由于220 kV GIS断路器均无合闸电阻产品,因此使用带合闸电阻双断口550 kV断路器,去掉一个断口并补做一些试验来实施(这不在文中讨论范围)。而H8 220 kV升压平台为了节约成本,选用断路器配置选相合闸装置的技术路线。文中要阐述的就是在断路器配置选相合闸装置后,如何满足断路器空合时,变压器励磁涌流小于规定值要求。

## 1 变压器励磁涌流计算

柔性直流输电工程实时数字仿真、物理动模仿真和数字物理混合仿真是常用的系统仿真研究方法<sup>[23]</sup>。对于变压器空载投入引发较大励磁涌流问题,特定的合闸角度可以影响铁心总磁通的变化,理论上通过控制断路器的合闸相位,使得合闸时刻产生的预感应磁通和剩磁相等。如此,在合闸瞬间产生的稳态磁通和剩磁相等,而铁心中为了维系磁链守恒,合闸瞬间产生的偏磁将和剩磁大小相等、

方向相反,偏磁和剩磁相互抵消,从而起到减小励磁涌流的作用。但是断路器合闸时间分散性、预击穿特性等因素均会影响变压器合闸产生的励磁涌流。文中通过仿真计算,在保证涌流小于规定值前提下,允许断路器关合点偏离理想值的时间误差。

### 1.1 计算工况

220 kV GIS装置采用两组变压器线路组接线,见图3。通过约10 km海缆连接到整流平台。正常送电时采用倒送电模式,由陆上集控站直流送电至海上换流站,整流后通过海缆至220 kV升压站,计算该工况下变压器出口断路器,空载变压器所产生的涌流值。

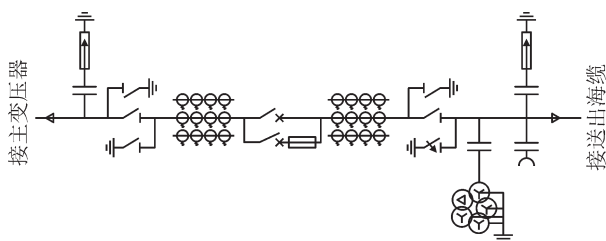


图3 系统接线图

Fig. 3 System wiring diagram

### 1.2 计算方案

计算方案有无选相合闸装置和选相合闸装置两种,两种方案分别进行讨论。

方案1:无选相合闸装置。所用变压器型号为SZ-150000/220;绕组连接方式为YNd11。设定主变压器三相铁心典型剩磁分别为(-1、0.5、0.5 T),断路器三相均在母线电压 $U_A$ 的 $0^\circ$ 同时合闸,验证理论上较严重的合闸励磁涌流水平,变压器主要参数见表1。

表1 变压器主要参数

Table 1 Main parameters of transformer

| 参数       | 数值    |
|----------|-------|
| 额定电压/kV  | 230.0 |
| 高压额定电流/A | 376.5 |

方案2:采用选相合闸装置。选相合闸按A相在母线电压 $U_A$ 的 $90^\circ$ 合闸,B、C相滞后5 ms同时合闸。出现3种情况:①A相电压 $90^\circ$ 合闸,B、C相滞后5 ms合闸;A相剩磁-1 T,B、C相剩磁为-0.85 T。②选相分闸后再进行选相合闸,主要目的在于选择合适的分闸策略,并增加选相合闸控制。B、C相在A相电压 $0^\circ$ 时分闸,A相在电压 $90^\circ$ 时分闸,然后进行选相合闸。③电压峰值同时分闸后再选相合闸。

合闸时间分散性允许窗口验证:情况②、③在目标合闸点附近偏差正负0.5、1、1.5、2 ms,评估断路器分散性能否满足要求。分析断路器合闸偏差多少,励磁涌流有效值可达到1.2 kA的最大允许值,

给出对断路器合闸时间分散性的允许窗口要求。

### 1.3 计算结果

1)方案1中无选相合闸装置计算结果见表2、图4。

表2 无选相合闸装置励磁涌流计算值

Table 2 Calculation value of excitation inrush current of non-selected phase closing device

| 参数      | A相             | B相      | C相             |
|---------|----------------|---------|----------------|
| 额定电流/A  | 376.5          | 376.5   | 376.5          |
| 涌流有效值/A | 1 265.4        | 834.4   | 872.2          |
| 涌流峰值/A  | <b>1 789.6</b> | 1 180.0 | <b>1 233.5</b> |
| 涌流倍数    | 3.36           | 2.22    | 2.32           |

注:表中深色字误差仅统计空置后首次操作,误差小于1 ms 均不标注。

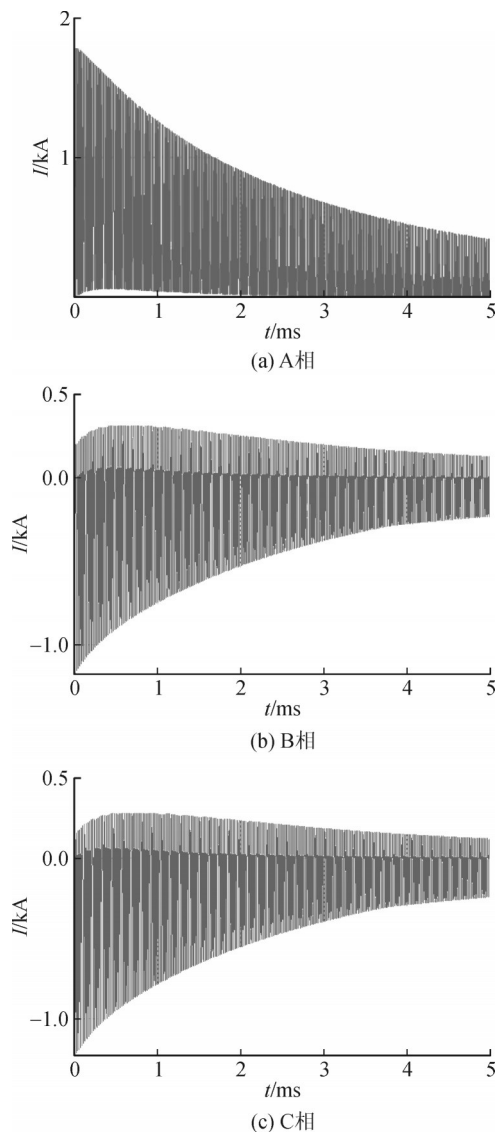


图4 无选相合闸装置励磁涌流波形图

Fig. 4 Deputy director of research and evaluation department

2)方案2中3种情况采用选相合闸装置计算结果及分散性分析见表3。方案2中情况2(选相分闸后选相合闸)励磁涌流见图5。

### 1.4 计算结果分析及结论

根据现有计算工况条件,仿真结果如下:

1)变压器接入端断路器合闸时,首合相变压器励磁涌流将达约1.27 kA,涌流倍数3.36倍,超过1.2 kA的规定值。

2)增加选相合闸装置后,几种方案的励磁涌流均得到有效控制,满足小于1.2 kA的控制要求。

3)选相分合闸中两个方案,其中B、C相在A相电压0°时分闸,A相在电压过90°时分闸,再进行选相合闸变压器涌流值更小。

4)对于两个选相分合闸方案,当合闸时间分散性 $\pm 2$  ms时,已不能满足励磁涌流小于1.2 kA的控制要求,建议合闸时间分散性控制在 $\pm 1.5$  ms之内。

通过计算可知,在现有计算工况情况下,必须采取断路器分合闸选相装置,控制断路器三相分合闸时间,可以使变压器涌流小于1.2 kA规定值,满足工程需求,并有一定裕度。

## 2 影响断路器合闸分散性因素及摸底试验

H8选相合闸装置出厂时要求断路器动作“可预测”性,即在额定条件下,开关空载分合闸时间分散性足够小,宜小于1 ms。影响断路器合闸分散性因素:环境温度、控制电压、储能方式、机械磨损老化程度,空置时间等,选相装置应具备上述影响因素的补偿修正功能。

该220 kV GIS断路器操作机构为弹簧机构。影响弹簧机构操作时间分散性最常见因素是空置时间。即长期不动作,由于弹簧机构储能及传动零部件全部是机械传动,首次动作(按实际运行状况)极易存在梗迟现象,一旦动作几次后又恢复正常。验证空置时间对断路器操作动作时间分散性影响程度,为此将H8项目使用的两组断路器在出厂试验中,补做一轮空置时间再对比时间的摸底试验。

根据运行状况,静置前处于合闸状况,分别放置2、24 h和一星期进行5次分合闸操作,分别记录分合闸时间进行对比,其结果见表4。

空置时间对比摸底试验结论为:①静置后操作,分闸时间误差均在 $\pm 1$  ms以内;②静置后操作,合闸时间的平均误差均在 $\pm 1$  ms之内;③静置后操作,第1次误差个别超过2 ms。

## 3 选相合闸实施及应用效果

### 3.1 选相投切与断路器配合原理

选相投切是指在相关参考电信号的预定点完

表3 励磁涌流及分散性计算结果

Table 3 Excitation inrush current and dispersion calculation results

| 参数              | 情况 1(A 相电压 90°合闸,<br>B、C 相滞后 5 ms 合闸) |                |                | 情况 2(选相分闸后<br>选相合闸) |         |         | 情况 3(电压峰值同时<br>分闸后再选相合闸) |         |         |
|-----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|---------------------|---------|---------|--------------------------|---------|---------|
|                 | A 相                                   | B 相            | C 相            | A 相                 | B 相     | C 相     | A 相                      | B 相     | C 相     |
| 额定电流/A          | 376.5                                 | 376.5          | 376.5          | 376.5               | 376.5   | 376.5   | 376.5                    | 376.5   | 376.5   |
| 涌流有效值/A         | 513.4                                 | 895.5          | 933.2          | 340.2               | 815.6   | 860.6   | 512.7                    | 815.6   | 860.6   |
| 涌流峰值/A          | 726.0                                 | <b>1 266.4</b> | <b>1 319.8</b> | 481.1               | 1 153.5 | 1 217.1 | 725.1                    | 1 153.5 | 1 217.1 |
| 涌流倍数            | 1.36                                  | 2.38           | 2.48           | 0.90                | 2.17    | 2.29    | 1.36                     | 2.17    | 2.29    |
| ±0.5 ms 偏差涌流有效值 | —                                     | —              | —              | 372.1               | 892.1   | 941.3   | 512.7                    | 892.1   | 941.3   |
| ±1 ms 偏差涌流有效值   | —                                     | —              | —              | 392.2               | 940.3   | 992.2   | 560.8                    | 940.3   | 992.2   |
| ±1.5 ms 偏差涌流有效值 | —                                     | —              | —              | 414.4               | 993.5   | 1 048.3 | 591.1                    | 993.5   | 1 048.3 |
| ±2 ms 偏差涌流有效值   | —                                     | —              | —              | 520.3               | 1 247.4 | 1 316.2 | 624.5                    | 1 247.4 | 1 316.2 |

注:表中深色字误差仅统计空置后首次操作,误差小于 1 ms 均不标注。

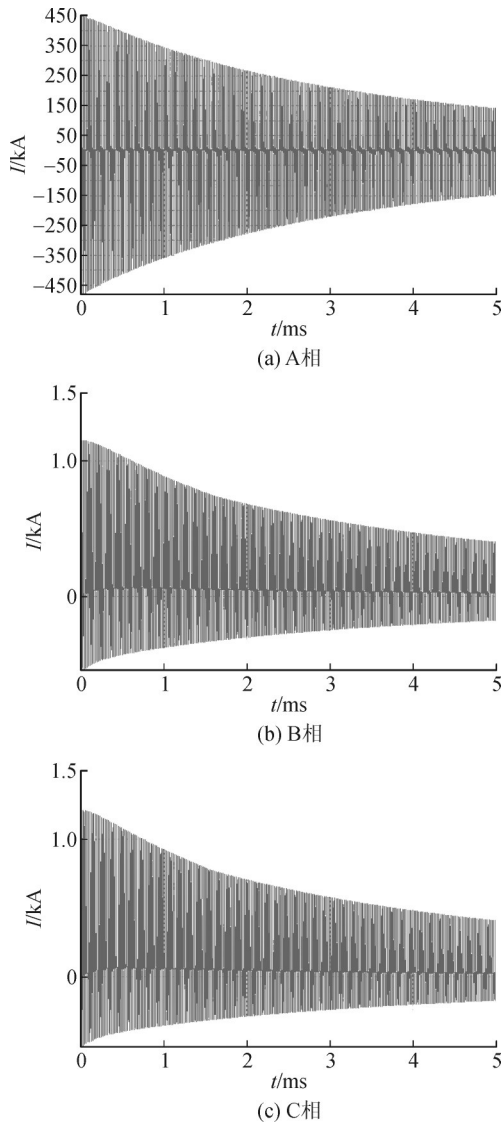


图5 励磁涌流波形图

Fig. 5 Excitation inrush current

成开关装置触头操作的过程,选相合闸时,开关控制器监测电源电压,并且在相对于参考信号一定相位角的某一时刻 $t$ 指令,起始合闸指令随机发出,控

制器相应地延迟该指令。这里,预定的同步延时 $t_{\text{控制器}}$ 由机械合闸时间 $t_{\text{合闸}}$ 、预击穿时间 $t_{\text{预击穿}}$ 和目标关合时刻的实际相位角决定。选相合闸的时序原理见图6。该实例是关于变压器感性负载的,其中最佳关合时刻是在电压峰值。

给定合闸时间和预击穿时间,控制器计算式 $t_{\text{控制器}}$ 为:

$$t_{\text{全部}}=t_{\text{等待}}+t_{\text{控制器}} \tag{1}$$

$$t_{\text{控制器}}=Nt_{\text{过零}}-t_{\text{过零}}/2-(t_{\text{合闸}}-t_{\text{预击穿}})=Nt_{\text{过零}}-t_{\text{过零}}/2-t_{\text{关合}} \tag{2}$$

关合时刻 $t_{\text{关合}}$ 是开始有电流流过的时刻。机械上的合闸时间 $t_{\text{合闸}}$ 是合闸线圈带电与触头在机械上接触之间的时间间隔。预击穿时间 $t_{\text{预击穿}}$ 是预击穿时刻与触头接触之间的时间间隔。关合时间 $t_{\text{关合}}$ 是合闸线圈带电与关合时刻之间的时间间隔。

3.2 断路器动作分散性分析

1)机械特性。根据以上试验验证结果,断路器静置后首次动作合闸时间分散性,是其机械特性变化最大影响因素,这也成为了影响选相投切最终效果的核心问题之一,因此将相控技术应用于高压变压器时需要考虑断路器性能参数对最佳相位和涌流的影响。

对于断路器来说,即使在完全相同的动作参数和环境条件下,这时通过与现场完全相同的条件下的操作来进行评估,采用统计的正态分布函数标准差 $\sigma_{\text{mesh}}$ 来描述,最大的分散性可能约为 $3\sigma_{\text{mesh}}$ 。

2)电气特性。选相合闸的重要电气特性是介质绝缘强度下降率(RDDS)。在合闸过程中,当触头接近于接触时,耐受电压下降的平均值近似为时间的线性函数。斜率 $S_0$ 与合闸速度的平均值和气体断路器的气压成正比。对与理想断路器, $S_0$ 是无穷大的。

关合时刻 $t_{\text{关合}}$ 是作用于断路器上的电压超过触

表4 出线1、2 断路器  
Table 4 Output 1、2 circuit breaker

| 日期                             |                                | 合闸         |            |      |      |            |            | 分闸   |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|--------------------------------|------------|------------|------|------|------------|------------|------|------|------|------|------|------|
|                                |                                | A相         |            | B相   |      | C相         |            | A相   |      | B相   |      | C相   |      |
| 出线1                            | 出线2                            | 出线1        | 出线2        | 出线1  | 出线2  | 出线1        | 出线2        | 出线1  | 出线2  | 出线1  | 出线2  | 出线1  | 出线2  |
| 2020-11-05<br>8:30             | 2020-11-05<br>8:00             | 84.2       | 87.3       | 88.1 | 87.3 | 87.1       | 85.2       | 24.4 | 24.5 | 24.6 | 24.3 | 24.2 | 24.3 |
|                                |                                | 84.3       | 87.9       | 87.7 | 88.1 | 86.9       | 85.8       | 24.4 | 24.4 | 24.6 | 24.3 | 24.2 | 24.3 |
|                                |                                | 84.5       | 87.8       | 88.2 | 87.9 | 87.3       | 86.8       | 24.5 | 24.4 | 24.6 | 24.3 | 24.2 | 24.4 |
|                                |                                | 84.3       | 88.1       | 88.0 | 88.1 | 87.0       | 87.7       | 24.4 | 24.4 | 24.6 | 24.3 | 24.2 | 24.3 |
|                                |                                | 84.2       | 88.0       | 88.5 | 88.2 | 86.7       | 87.1       | 24.4 | 24.4 | 24.6 | 24.3 | 24.2 | 24.4 |
| 2020-11-05<br>10:30<br>(隔2 h)  | 2020-11-05<br>10:30<br>(隔2 h)  | 86.1(+1.9) | 87.9       | 88.8 | 88.2 | 88.9(+1.8) | 87.3(+2.1) | 24.4 | 24.4 | 24.6 | 24.3 | 24.4 | 24.3 |
|                                |                                | 84.5       | 88.4       | 88.1 | 88.3 | 87.2       | 87.4       | 24.5 | 24.4 | 24.6 | 24.3 | 24.3 | 24.2 |
|                                |                                | 84.2       | 88.4       | 88.8 | 88.3 | 86.9       | 87.3       | 24.4 | 24.4 | 24.6 | 24.3 | 24.2 | 24.2 |
|                                |                                | 84.2       | 88.2       | 88.6 | 88.3 | 87.1       | 87.5       | 24.4 | 24.4 | 24.6 | 24.3 | 24.4 | 24.4 |
|                                |                                | 84.4       | 88.3       | 88.6 | 88.6 | 87.3       | 86.9       | 24.3 | 24.3 | 24.6 | 24.2 | 24.2 | 24.2 |
| 2020-11-06<br>10:30<br>(隔24 h) | 2020-11-06<br>10:30<br>(隔24 h) | 83.9       | 88.4(+1.1) | 88.5 | 87.9 | 87.3       | 86.6(+1.4) | 24.2 | 24.3 | 24.5 | 24.2 | 24.3 | 24.2 |
|                                |                                | 84.3       | 87.5       | 88.7 | 88.3 | 87.6       | 85.8       | 24.1 | 24.2 | 24.5 | 24.1 | 24.2 | 24.1 |
|                                |                                | 84.2       | 87.9       | 89.2 | 88.3 | 87.9       | 86.1       | 24.2 | 24.2 | 24.5 | 24.1 | 24.1 | 24.1 |
|                                |                                | 84.2       | 87.9       | 88.9 | 88.3 | 87.9       | 86.1       | 24.2 | 24.3 | 24.5 | 24.1 | 24.2 | 24.1 |
|                                |                                | 84.1       | 87.4       | 89.2 | 88.2 | 88.0       | 85.9       | 24.2 | 24.2 | 24.5 | 24.2 | 24.2 | 24.1 |
| 2020-11-12<br>8:30<br>(隔6 d)   | 2020-11-12<br>8:30<br>(隔6 d)   | 83.9       | 87.3       | 88.2 | 88.3 | 87.5       | 85.6       | 24.4 | 24.4 | 24.6 | 24.3 | 24.2 | 24.3 |
|                                |                                | 84.3       | 87.6       | 89.1 | 89.4 | 87.5       | 85.5       | 24.3 | 24.3 | 24.8 | 24.2 | 24.3 | 24.3 |
|                                |                                | 84.3       | 87.8       | 89.5 | 89.3 | 88.1       | 85.5       | 24.3 | 24.3 | 24.6 | 24.2 | 24.3 | 24.2 |
|                                |                                | 84.2       | 87.5       | 89.2 | 89.4 | 87.9       | 85.4       | 24.3 | 24.3 | 24.6 | 24.2 | 24.3 | 24.3 |
|                                |                                | 84.2       | 87.7       | 89.2 | 89.3 | 88.1       | 85.8       | 24.4 | 24.3 | 24.6 | 24.2 | 24.3 | 24.3 |

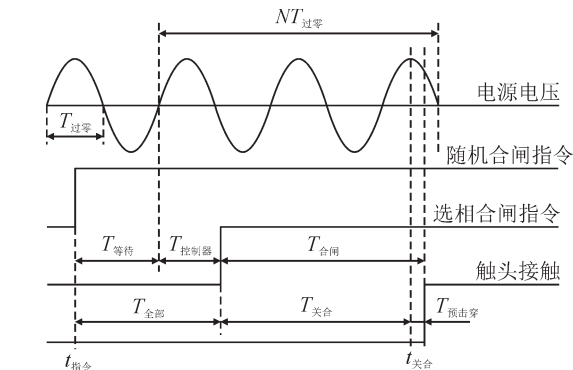


图6 选相合闸的时序原理图

**Fig. 6 Timing diagram of phase selection switch on**

头间隙耐受电压的时刻,如果关合目标是在电压峰值,如本工程中变压器合闸,目标点的优化见图7,相应的关合时间窗口由电压峰值附近的 $\pm\Delta t_{\text{关合}}$ 来定义。

**3.3 选相装置外部参量补偿技术**

选相装置接入是对断路器合闸时间有较大影响的参量,通过传感器信号实时监控外部参量,并通过预置的补偿曲线对断路器预期合闸时间进行实时补偿。各种外部补偿参量功能是否投入可独立设置,也可根据工程需求选择一种或几种传感器,还可对所有影响因素进行综合补偿。所有外部

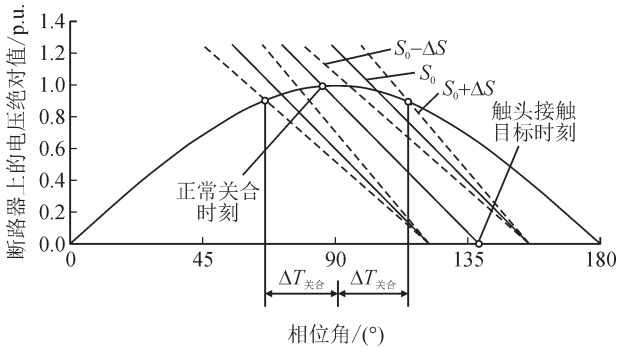


图7 预击穿特性与机械和电气特性偏差对目标电压峰值影响的原理图

**Fig. 7 Schematic diagram of the effect of pre-breakdown characteristics and mechanical and electrical characteristics deviation on the target voltage peak**

因素的补偿均在于对预期动作时间参数的修正,补偿修正功能的软件实现流程见图8。

**3.4 选相控制策略**

该工程中变压器330 kV 侧配置三角形绕组,见图9。选择剩磁最大相作为首合相,首合闸相合闸后,该相铁心中将产生磁通,因三角形绕组的电气耦合关系,剩余两相在合闸之前铁心中感应出大小约为首合相铁心磁通 1/2 且相位相反的磁通,同时

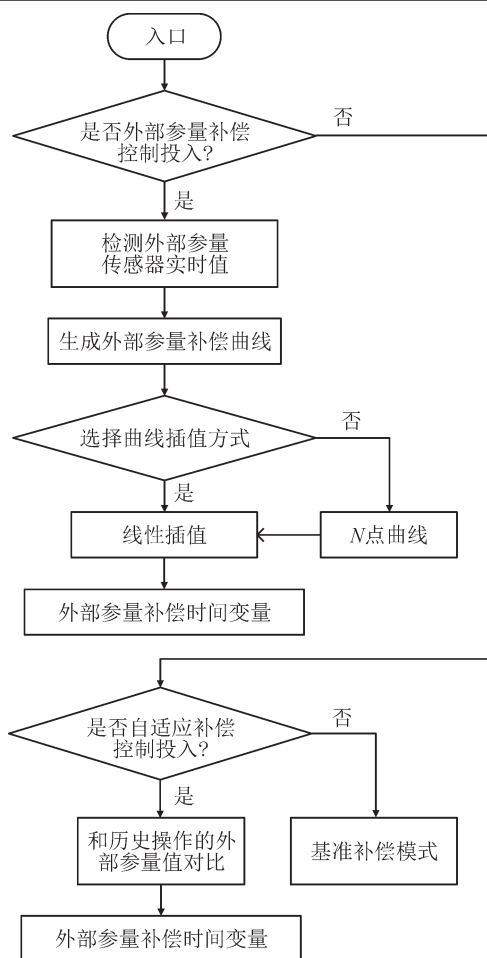


图8 外部参量变化补偿修正

Fig. 8 External parameter variation compensation correction

剩磁也迅速衰减。剩余两相应合闸于首合闸相系统电压过零处,如此三相励磁涌流均得到有效抑制。同时,根据仿真结果,配套使用了B、C相在A相电压 $0^\circ$ 时分闸、A相在电压 $90^\circ$ 时分闸的分闸控制策略,从而进一步优化选相合闸时励磁涌流的抑制效果。

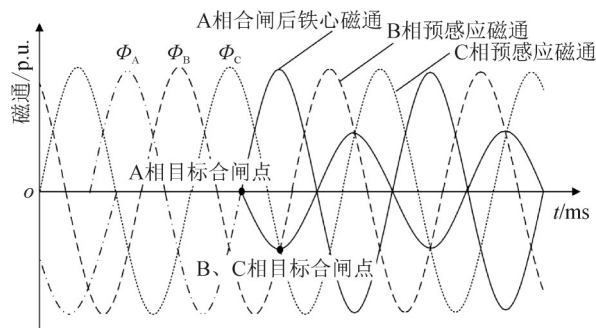


图9 断路器各相的目标合闸相位

Fig. 9 Target switch on of each phase of circuit breaker

### 3.5 应用效果

选相装置在完成单体常规性测试后进行带电调试工作,一次系统带电后,断路器的机械分散性、预击穿特性、静置时间等因素影响均会对最终控制效果产生影响。

对每台主变均进行了多次空充带电试验,从选相装置波形中可分析得出,装置发出选相合闸指令至反馈电压发生突变的时间差,即断路器的关合时间。选用其中间值作为最终运行参数,以减小断路器机械及电气分散性的影响。

理想情况下各相涌流瞬时值均小于100 A,若考虑断路器分散性影响,合闸涌流会变大,但仍然远优于单台主变投入时要求的1.2 kA以下的水平,主变空充励磁涌流波形见图10。

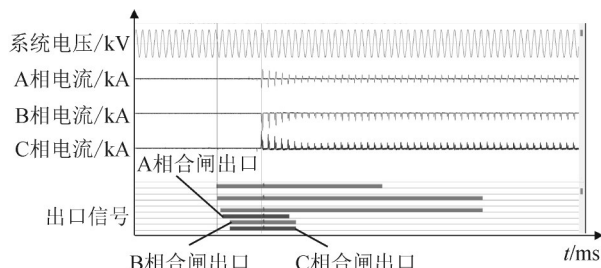


图10 主变空充励磁涌流波形

Fig. 10 Inrush current waveform of main transformer

东柔直对比的配置选相合闸装置前后的系统电压及涌流情况,见图11。由图11发现励磁涌流冲击幅值改善较明显。

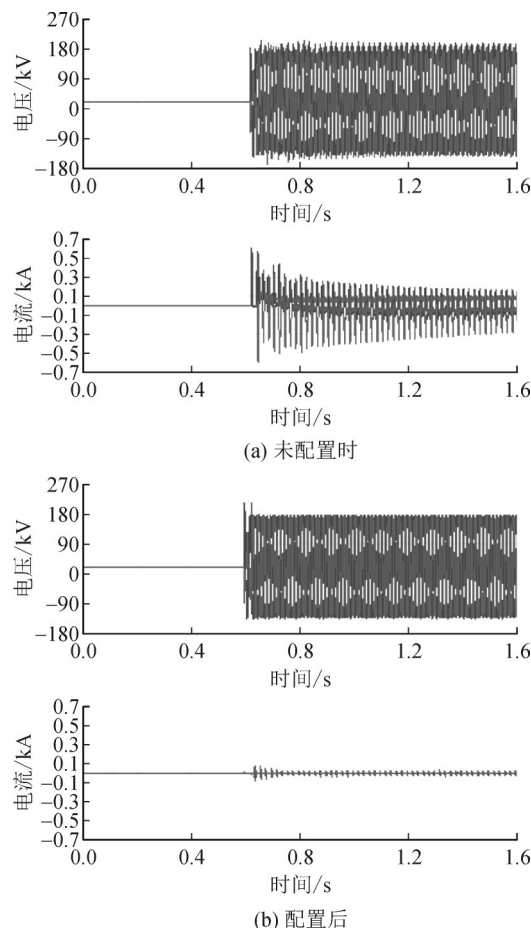


图11 配置选相合闸装置前后的电压及涌流冲击

Fig. 11 The system voltage and inrush current of the phase-selecting closing device are configured

建议在今后的运维过程中,尤其在空充变压器之前,要密切关注断路器所处的各种运行条件,如控制回路电压、储能油压水平、SF<sub>6</sub>压力等,均可人为调试在标准工况下再进行带电合闸冲击。不能忽略首次操作时静置时间的影响,其有两种方案,一是根据文中第2节测试结果,将补偿曲线设定入选相装置进行补偿,并进行充分测试;二是在主变空充前,先对断路器进行3~5轮空载分合闸操作,以消除静置时间的影响。因静置时间的测试结果仅针对某个被测断路器的个体样本,补偿规律的普适性尚待进一步验证,故现场暂采用第2种方案。

#### 4 结语

断路器选相合闸在电力系统特殊运行状况下使用成为常态,在本次海上柔性送电过程中成功运用,是一次难度较大,事先考虑因素较全面的案例。

首先基于变压器励磁涌流必须控制在一个较小范围时,通过仿真计算,求出断路器操作时间分散性控制要求,而后通过试验验证,得出影响断路器静置操作时间最大误差。针对以上仿真计算和试验验证,选相合闸采取更有针对性的有效措施,在投运中实际变压器涌流极小,使首次海上直流柔性送电顺利完成。而作为常态使用的选相操作,事先通过计算和试验验证,排除最大影响因素,也是选相操作功能全过程控制成功运用的案例,可为后续海上柔直选相合闸装置、断路器动作特性、变压器励磁涌流的配合及控制策略提供一个很好的参考先例。

#### 参考文献:

- [1] 徐正. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2022.  
XU Zheng. Flexible DC transmission system[M]. Beijing: China Machine Press, 2022.
- [2] 汪惟源, 窦飞, 蔡晖, 等. 柔性输电技术在江苏跨江输电通道的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(2): 14-146.  
WANG Weiyuan, DOU Fei, CAI Hui, et al. Research on application of flexible AC/DC transmission technologies in Yangtze - river - crossing transmission channels of Jiangsu province[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(2): 14-146.
- [3] 何春应, 陈晓慧, 朱晓光, 等. 换流站 750 kV 交流滤波器合闸涌流及其抑制方法[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3182-3189.  
HE Chunying, CHEN Xiaohui, ZHU Xiaoguang, et al. Inrush current and suppression of switching 750 kV AC filter in converter station[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3182-3189.
- [4] 孙银锋, 刘金鑫, 梁栋. 基于附加改进有源滤波器的柔性直流输电系统高频振荡抑制策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 85-92.  
SUN Yinfeng, LIU Jinxin, LIANG Dong. High frequency oscillation suppression strategy for flexible HVDC system based on improved active filter[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 85-92.
- [5] 吴盛刚, 罗园. 高压断路器选相开合技术的应用与展望[J]. 电工电气, 2018, 12(1): 1-7.  
WU Shenggang, LUO Yuan. Application and prospect of phase selection and closing technology for high voltage circuit breakers[J]. Electrotechnics Electric, 2018, 12(1): 1-7.
- [6] 马翼飞, 樊艳芳, 鲁月华. 适用于交直流混联系统的改进型电流突变量选相元件[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 65-74.  
MA Yifei, FAN Yanfang, LU Yuehua. Improved current sudden variable mutation phase selector for AC/DC hybrid system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 65-74.
- [7] 班连庚, 郑彬, 周佩朋, 等. 特高压交流变压器选相合闸技术研究及工程应用[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1226-1233.  
BAN Liangeng, ZHENG Bin, ZHOU Peipeng, et al. Research and engineering application of phase selection closing technology for UHV AC transformers[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1226-1233.
- [8] 张思瑞, 张兵, 张云鹏, 等. 基于波形凹凸性的励磁涌流识别方法[J]. 变压器, 2022, 59(6): 31-35.  
ZHANG Sirui, ZHANG Bing, ZHANG Yunpeng, et al. A new method for identifying inrush current based on concave and convex waveform[J]. Transformer, 2022, 59(6): 31-35.
- [9] 方智泉, 陈先友, 赵鹏, 等. 高压绕组内置式高阻抗变压器励磁涌流分析[J]. 变压器, 2022, 59(8): 6-7.  
FANG Zhiquan, CHEN Xianyou, ZHAO Peng, et al. Analysis of magnetizing inrush current of high-voltage winding built-in high impedance transformer[J]. Transformer, 2022, 59(8): 6-7.
- [10] 方春恩, 陈川江, 李伟, 等. 断路器均压电容对空载变压器选相关合的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1960-1966.  
FANG Chun'en, CHEN Chuanjiang, LI Wei, et al. Influence of breaker's grading capacitor on controlled switching for unloaded transformer[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1960-1966.
- [11] 倪辉, 陈晓慧, 何春应, 等. 750 kV 交流滤波器断路器的合闸暂态特性及其抑制措施[J]. 高电压技术, 2022, 5(14): 1-10.

- NI Hui, CHEN Xiaohui, HE Chunying, et al. Switching transient characteristics and its suppression measures of 750 kV AC filter circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2022, 5(14): 1-10.
- [12] 王成亮, 石凡, 王宏华, 等. 基于改进多目标粒子群的 HVDC 交流滤波器优化设计[J]. 电测与仪表, 2023, 60(4): 57-63.
- WANG Chengliang, SHI Fan, WANG Honghua, et al. Optimization design of AC filters for HVDC system based on improved multiobjective particle swarm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 57-63.
- [13] 刘泽洪. 换流变压器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- LIU Zehong. Converter transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [14] 王运超, 余占清, 季一鸣, 等. 直流系统分层接入方式下滤波器断路器的分断特性分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2857-2865.
- WANG Yunchao, YU Zhanqing, JI Yiming, et al. Breaking characteristics of AC-filter breaker for UHVDC with hierarchical connection to AC grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2857-2865.
- [15] 李晓华, 张冬怡, 吴立珠, 等. 换流变压器励磁涌流的特殊性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3869-3875.
- LI Xiaohua, ZHANG Dongyi, WU Lizhu, et al. Particularity analysis of converter transformer inrush current[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3869-3875.
- [16] 王昊晴, 杨海芳, 林金阳, 等. 真空断路器选相合闸空载变压器的试验研究[J]. 高压电器, 2018, 53(3): 173-177.
- WANG Haoqing, YANG Haifang, LIN Jinyang, et al. Experimental study on the phase control closing of vacuum circuit breakers for no-load transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 53(3): 173-177.
- [17] 周念成, 李春艳, 王强钢. 基于多变量多尺度熵的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3426-3436.
- ZHOU Niancheng, LI Chunyan, WANG Qianggang. An algorithm to identify transformer inrush currents based on multivariate multiscale sample entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3426-3436.
- [18] 李振兴, 胡聪, 朱益, 等. 基于采样序列整形的配电网线路保护防励磁涌流误动策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 136-145.
- LI Zhenxing, HU Cong, ZHU Yi, et al. An anti-excitation inrush current maloperation strategy of line protection for a distribution network based on sampling sequence shaping[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 136-145.
- [19] 孔硕颖. 变压器励磁涌流分析与抑制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- KONG Shuoying. Research on analysis and suppression method of transformer magnetizing inrush current[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [20] 张员宁, 黄景光, 张艳华, 等. 利用双重特征量鉴别变压器励磁涌流的高阶统计原理[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 21-30.
- ZHANG Yuanning, HUANG Jingguang, ZHANG Yanhua, et al. High order statistical theory for identifying transformer inrush current by using dual characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 21-30.
- [21] 郭程, 阎长春, 武洪涛. 变压器励磁涌流对相邻发电机的影响与防范措施[J]. 变压器, 2023, 60(9): 28-30.
- GUO Cheng, YAN Changchun, WU Hongtao. Influence of transformer excitation surge on adjacent generator and solutions[J]. Transformer, 2023, 60(9): 28-30.
- [22] 李春艳, 周念成, 王强钢, 等. 基于软启动的变压器励磁涌流抑制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3640-3651.
- LI Chunyan, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. A method to eliminate transformer inrush currents using soft-starter-based controlled energization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3640-3651.
- [23] 栗磊, 赫嘉楠, 熊军辉, 等. 基于波形分区重构的变压器励磁涌流与故障电流识别方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 16-23.
- LI Lei, HE Jianan, XIONG Junhui, et al. An identification method of inrush current and fault current based on waveform partition and reconstruction[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 16-23.
- [24] 陈川江, 方春恩, 曾俊龙, 等. 计及剩磁的空载变压器选相合闸研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 82-87.
- CHEN Chuanjiang, FANG Chun'en, ZENG Junlong, et al. Research on unloaded transformer controlled switching considering residual flux[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 82-87.
- [25] 陈川江, 方春恩, 李伟, 等. 计及剩磁的中性点不接地变压器选相合闸仿真与实验[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3521-3528.
- CHEN Chuanjiang, FANG Chun'en, LI Wei, et al. Simulation and experiment of controlled switching for isolated neutral transformer considering residual flux[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3521-3528.
- [26] 曹文斌, 黄晓明, 王松, 等. 基于饱和深度动态相量图的变压器涌流不平衡分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 139-147.
- CAO Wenbin, HUANG Xiaoming, WANG Song, et al. Imbalance analysis of transformer inrush current based on saturation degree dynamic phasor diagram[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 139-147.

- IEEE, 2014: 1193-1198.
- [23] QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun. Mechanical fault diagnosis of outdoor high-voltage disconnecter[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2016, 11(5): 556-563.
- [24] 成林, 陶佳鑫, 吴涛, 等. 330 kV GIS 隔离开关操作产生的 VFTO 电磁骚扰特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(5): 11-19.
- CHENG Lin, TAO Jiaxin, WU Tao, et al. Research on VFTO electromagnetic disturbance characteristics of 330 kV GIS disconnector operation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 11-19.
- [25] 杜耀文, 谢静, 刘志坚, 等. 基于深度学习的高压隔离开关分合状态检测算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 114-123.
- DU Yaowen, XIE Jing, LIU Zhijian, et al. A detection algorithm for opening and closing states of high-voltage isolation switches based on deep learning[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 114-123.
- [26] 邱志斌, 阮江军, 黄道春, 等. 高压隔离开关机械故障分析及诊断技术综述[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 171-179.
- QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Mechanical faults analysis of high voltage disconnectors and review of diagnosis technology[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 171-179.
- [27] 阳瑞霖, 何葵东, 胡蝶, 等. 基于振动信号 EMD 分解与支持向量机的有载分接开关机械故障诊断[J]. 变压器, 2022, 59(7): 29-33.
- YANG Ruilin, HE Kuidong, HU Die, et al. Mechanical fault diagnosis of on-load tap-changer based on EMD decomposition of vibration signal and support vector machine[J]. Transformer, 2022, 59(7): 29-33.
- 马宏明(1987—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为高压开关设备状态评价(E-mail:ncepuming@126.com)。

(上接第 240 页)

- [27] 周波, 常晓青, 张华, 等. 计及剩磁、合闸电阻及选相合闸策略的励磁涌流仿真评估方法[J]. 四川电力技术, 2018, 41(6): 37-40.
- ZHOU Bo, CHANG Xiaoqing, ZHANG Hua, et al. Evaluation method for inrush current simulation considering residual flux, closing resistance and phase-controlled switching strategy[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018, 41(6): 37-40.
- [28] 李振兴, 胡聪, 朱益, 等. 基于采样序列整形的配电网线路保护防励磁涌流误动策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 136-145.
- LI Zhenxing, HU Cong, ZHU Yi, et al. An anti-excitation inrush current maloperation strategy of line protection for a distribution network based on sampling sequence shaping[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 136-145.
- [29] 蔡欢, 袁旭峰, 熊炜, 等. 柔性互联配电网运行调度研究综述[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 92-99.
- CAI Huan, YUAN Xufeng, XIONG Wei, et al. Review on operation scheduling of flexible interconnected distribution network[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 92-99.
- 李英(1970—), 女, 正高级工程师, 长期从事电力变压器研发及高端输变电装备相关基础科研工作。
- 李海涛(1984—), 男, 硕士, 正高级工程师, 长期从事智能变电站技术、选相控制及一次设备在线监测研究工作。
- 刘根根(1947—), 男, 高级工程师, 从事高压开关设计工作(E-mail:liugengen50@163.com)。