

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.04.005

双断口真空断路器投入电容器的合闸涌流的研究

陈鹤冲, 陈轩恕, 刘波, 杜玮

(国网电力科学研究院, 武汉 430074)

摘要:考虑到双断口真空断路器存在操作分散性,一个断口先动作时,另一个断口上的均压电容会与该先动作的断口形成通路;同时均压电容上若提前储存有能量,是否会对涌流产生影响目前尚无研究。为解决该问题,文中展开了相关研究。首先通过建模,再进行数学公式推导并利用PSCAD/EMTDC软件进行仿真计算,分析了在此过程中,均压电容储存有能量的前提下,均压电容对涌流的抑制作用。并分析了后动作的断口的合闸相位对合闸涌流的幅值的影响。结果表明:在不考虑预计穿的情况下,合闸涌流的幅值由最后完成合闸动作的断口的合闸相位决定的;且涌流存在着稳态分量和高频暂态分量。运用选相合闸技术只能控制涌流的稳态分量的幅值,而高频暂态分量的振荡频率无法通过选相合闸技术进行控制。

关键词:双断口;真空断路器;均压电容;储能;合闸涌流;选相

Study on Closing Inrush Current of Double Break Vacuum Circuit Breaker with Equalizing Capacitors

CHEN Hechong, CHEN Xuanshu, LIU Bo, DU Wei

(State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Considering the operational dispersion of double break vacuum circuit breaker, when one fracture moves first, the voltage-sharing capacitance on the other fracture will form a path to the fracture surface of the first action. At the same time, if there is energy stored ahead of time on the capacitance, whether it will affect the inrush current has not been studied. This paper deduces the formula and makes use of the PSCAD/EMTDC software to carry on the simulation calculation. In this paper, the effect of voltage equalizing capacitance on inrush current is analyzed under the condition that the average voltage capacitance has energy stored in the process. The effect of closing phase on the amplitude of closing inrush current is analyzed. It is concluded that the amplitude of closing inrush current is determined by the closing phase of the final closing operation without considering the predicted penetration. The paper also puts forward some suggestions on how to use phase selection and closing technology to restrain the closing inrush when the capacitor is put into the capacitor.

Key words: double break vacuum circuit breaker; voltage equalizing capacitance; stored energy; closing inrush current; phase selection

0 引言

随着特高压输电的发展,无功补偿电容器设备也要向高电压、大容量方向发展,要求用于电容器投切的断路器等电器设备也必须向高电压、大电流方向发展。目前在特高压线路1 000 kV变电站低压

110 kV侧无功补偿用电容器投切中,断路器主要采用SF₆断路器^[1-3]。然而SF₆温室效应系数大,它的GWP(全球变暖潜势)是CO₂的22 500倍以上,它对于全球变暖的贡献将会累积并且实际上是永久的,因此必须找出更好的替代品。鉴于《京都议定书》的相关规定,研究可替代SF₆断路器的环保型高压

收稿日期:2019-09-14; 修回日期:2019-11-19

基金项目:国家电网公司科技项目(524625160019)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(524625160019).

断路器日益紧迫^[4-6]。真空断路器是SF₆的良好替代品,其结构简单,造价便宜,灭弧性能优异,干净环保无污染。然而由于真空间隙的击穿电压和间隙长度之间存在饱和效应,导致高电压等级的单断口的断路器发展受到限制。于是现在采用多断口串联的真空断路器技术使得开发更高电压等级的高压、超高压真空断路器成为可能。

由于多断口串联的真空断路器,各断口间存在杂散电容,对地也存在杂散电容,导致各断口分压不均匀,严重情况下分压不均匀会导致断路器开断失败。因此目前的做法是在各断口上加装均压电容,均压电容可以保证各断口的分压均匀^[7-10]。但均压电容的存在将造成断路器在分断电容器时,均压电容上会储存能量。双断口断路器的操作存在时间上的分散性,在合闸的时候有可能存在一个断口先完成合闸,另一个断口后完成合闸的现象^[11-13]。因此当双断口断路器在均压电容上储存了能量的情况下进行合闸操作,在分散性存在的情况下,先完成合闸操作的那个断口将会与尚未完成合闸操作的断口上的均压电容以及系统中的其余元件先形成一个完整的回路,尚未完成合闸操作的断口上的均压电容由于储存有能量将会和电源侧一起对负载侧进行放电,从而造成对合闸涌流的幅值的影响。对于该情况下的投入电容器的合闸涌流的规律变化国内外尚无研究^[14]。

针对此情况,文中利用电力系统仿真软件PSCAD/EMTDC构建了由两个40.5 kV的单断口真空断路器串联而成的双断口真空断路器模型,探究了在双断口操作分散性存在的情况下,在投入电容器时,均压电容上的储能对合闸涌流的影响,为电容器合闸涌流分析工作提供参考。

1 理论分析

在投入电容器时由于双断口断路器需要安装均压电容,其电路原理图见图1。图1中,CB₁和CB₂分别为真空断路器的两个断口;C₁,C₂分别为两个断口上的均压电容;L为线路中的杂散电感;R为输电线路的阻抗;C₀为投入的电容器组^[15-17]。由于两个断口动作存在分散性,假设CB₁先完成合闸动作,合闸时间为t₁;CB₂后完成合闸动作,合闸时间为t₂,t₁<t₂。在该次动作前,假设之前该双断口断路器完成过一次合分闸操作,造成均压电容上储存的电压为U_{C1}、U_{C2}。由于C₁=C₂,所以在某个断口完成合闸前,U_{C1}=U_{C2}。

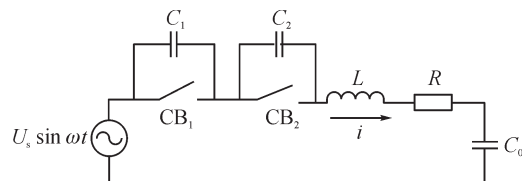


图1 装有均压电容的双断口真空断路器投入电容器的电路原理图

Fig. 1 The circuit schematic diagram of a double-break vacuum circuit breaker with a voltage-sharing capacitor put into the capacitor

1.1 CB₁先完成合闸操作

当t₁时刻,CB₁完成合闸操作,在不考虑预击穿的情况下,此时均压电容C₂与电源U_s以及负载侧电容,及线路中的L与R构成一个回路,此时均压电容C₂上储存的能量将和电源一起对负载侧进行放电,同时CB₁关合的瞬间将造成合闸涌流i的产生^[18-20]。

t₁时刻,电路满足的微分方程为

$$U_s \sin \omega t = u_{C_2}(t) + i_R + L \frac{di}{dt} u_{C_2}(t) \quad (1)$$

$$i = C_2 \frac{du_{C_2}(t)}{dt} \quad (2)$$

$$C_2 \frac{du_{C_2}(t)}{dt} = C_0 \frac{du_{C_0}(t)}{dt} \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1)中,并对式(1)再求一次微分得到并令 $\frac{du_{C_2}(t)}{dt} = y(t)$,则可得到

$$\omega U_s \cos \omega t = (1 + \frac{C_2}{C_0})y(t) + RC_2 \frac{dy(t)}{dt} + L \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \quad (4)$$

由于实际选取的模型中,R=0.01 Ω,C₂=1 000 pF,C₀=13.32 μF,L=1 mH,所以式(4)的判别式Δ<0,故式(4)具有共轭复根α±iβ,式(4)的齐次方程的通解为

$$y(x) = e^{\alpha x} (A \cos \beta x + B \sin \beta x) \quad (5)$$

式(5)中,A、B均为常数。再解式(4)的特解。由于 $\frac{\omega U_s \cos \omega t}{L} = e^{\alpha x} Q_0(x) \cos \omega t$,所以其特解形式为 $y^*(x) = D \cos \omega x + E \sin \omega x$,代入式(5)得式(4)的通解为

$$y(t) = e^{\alpha t} (A \cos \beta t + B \sin \beta t) + D \cos \omega t + E \sin \omega t \quad (6)$$

此时涌流为

$$i = C_2 \frac{du_{C_2}(t)}{dt} = C_2 y(t) = C_2 e^{\alpha t} (A \cos \beta t + B \sin \beta t) + C_2 D \cos \omega t + C_2 E \sin \omega t \quad (7)$$

根据初值状态和稳态来求常数A、B。由于t₁时刻,开关CB₁合闸,均压电容C₂上的电压不能突变,设此时的电压为U_{C2}即为均压电容上之前储存的电压值,设负载电容器上此时的电压为U_{C0};到了稳定状态后,设稳态时间为t_∞,此时由于C₂≤C₀,故均压

电容 C_2 的容抗远大于 C_0 的容抗以及远大于线路的其它阻抗, 因此此时均压电容 C_2 上的电压为 $U_s \sin \omega t_\infty$, 负载电容上的电压为 0, 将此两种状态带回式(5)求解 A 、 B , 为简化计算, 不妨设 $t_1 = 0$, $t_\infty = 1$, 结合实际电路模型参数计算可得如下: $\alpha = -5 \times 10^{-9}$; $\beta = 10$; $C_2 = 1 \times 10^{-9} \text{ F}$; $D = 0.032\ 64 U_s$; $E = 3.296 \times 10^{-13} U_s$ 。由于 $E \ll D$, 又 $U_s = 110 \text{ kV}$, 所以可简化为 $E \approx 0$; $A \approx \frac{(-u_{C_0} - u_{C_2}) \sin \beta}{(R + L\alpha - L\beta \cos \beta)}$; $B \approx \frac{(-u_{C_0} - u_{C_2})}{L\beta}$, 由此可以看出, 该情况下由于 C_2 的值过小, u_{C_0} 、 u_{C_2} 对涌流 i 幅值的影响并不大。

1.2 后动作的断口也完成合闸阶段

当 t_2 时刻, 后动作的断口也已经完成合闸动作, 此时均压电容将被开关短接掉, 不再起作用, 单相等值电路见图 2。均压电容不再对电路进行放电^[21-22]。

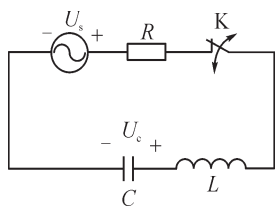


图 2 两个断口均完成合闸的等值电路

Fig. 2 The equivalent circuit for closing both breaks

设 $t=0$ 时刻, 合上开关 K , 则电路的微分方程为

$$LC \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_s(t) \quad (8)$$

设正弦电压为

$$u_s(t) = U_{sm} \sin(\omega t + \theta_s) \quad (9)$$

则电路的稳态响应分量为

$$u_c(t) = U_{cm} \sin(\omega t + \theta_c) \quad (10)$$

利用相量分析法, 可以得出正弦稳态响应的 U_{cm} 、 I_{cm} 和 θ_c , 即

$$U_{cm} = \frac{U_{sm}}{\omega C \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} \quad (11)$$

$$I_{cm} = \frac{U_{sm}}{\sqrt{R^2 + (L - 1/\omega C)^2}} \quad (12)$$

$$\theta_c = \theta_s - \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} \quad (13)$$

开关投入电容器时产生的合闸涌流和过电压幅值与合闸相角 θ_c 有关, 并且在 $[0, \frac{\pi}{2}]$ 区间随着 θ_c 的增大而增大。对方程做进一步简化处理, 忽略回路中阻尼 R , 即认为回路的衰减系数为零。并假定断路器在电源电压为最大值时合闸, 即合闸相角 $\theta_c = 90^\circ$, 合闸瞬间电容电压从零值过度到 U_m , 则可将式(8)简化为

$$u_c(t) = U_{cm} \cos \omega t + (U_0 - U_{cm}) \cos \omega_0 t \quad (14)$$

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = -U_{cm} \omega C \sin \omega t - \frac{(U_0 - U_{cm})}{\sqrt{L/C}} \sin \omega_0 t \quad (15)$$

由此可见, 合闸操作暂态过程的电容器合闸电压、合闸涌流都由稳态分量和高频分量组成。其中, 电容器合闸过电压电压 u_c 一般不大于 2 倍稳态相电压幅值, 合闸涌流 i_c 则正比于涌流振荡频率, 极端情况下峰值 ($f_0 \geq 500 \text{ Hz}$) 可达到 6 倍相电流幅值以上, 见式(16)、(17)。

$$|u_{cm}| = |2U_{cm} - U_0| \quad (16)$$

$$I_{cm} \approx I_m \times \frac{f_0}{f} \quad (17)$$

式(17)中: f 为电源频率; f_0 为涌流振荡频率。其中

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (18)$$

由此可见涌流振荡频率仅有系统中 LC 参数决定, 而与合闸相位无关。由上述可知选相合闸技术仅能通过控制合闸相位, 决定涌流的稳态响应分量的幅值, 而暂态分量的振荡频率无法通过选相合闸技术控制。

2 仿真计算及分析

在投入电容器的过程中, 合闸涌流是由系统中的杂散电感以及负载侧的电容经过高频电磁能量转换产生的, 因此首先需要通过仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建带有均压电容的双断口真空断路器投切电容器的仿真模型。

2.1 模型参数的选取

根据目前的研究情况, 均压电容多采用 $1\ 000 \text{ pF}$, 110 kV 侧无功补偿侧电容器容值为 $13.32 \text{ }\mu\text{F}$, 线路的杂散电感为 1 mH , 阻抗为 $0.01 \text{ }\Omega$, 两个断口之间的分散性为 1 ms , BRK_1 先动作, BRK_2 后动作, 建立的仿真模型见图 3。

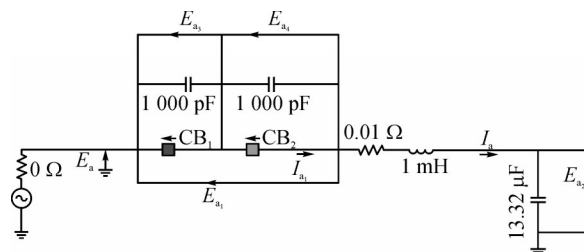


图 3 带均压电容的双断口真空断路器投入电容器仿真模型

Fig. 3 Simulation model of double break vacuum circuit breaker put into capacitors with voltage equalizing capacitance

2.2 一个断口先动作时的涌流分析

先设置电源为均压电容充电,然后在均压电容上的电压达到不同值的时候控制 CB_1 先完成合闸动作, CB_2 依旧保持断开状态,即相对于此时均压电容

C_2 对整个回路进行放电,以10 kV为步长,计算均压电容 C_2 上的电压值从20~150 kV时对回路中涌流的影响,均压电容 C_2 上的电压值与开关 CB_1 闭合后产生的涌流幅值计算结果见表1。

表1 均压电容 C_2 的电压值与涌流幅值的关系

Table 1 Relationship between voltage value and inrush amplitude of voltage-sharing capacitance C_2

电压幅值/kV	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
涌流幅值/kA	0.001 4	0.001 6	0.001 9	0.002 3	0.002 8	0.003 1	0.004 2	0.005 9	0.006 2	0.007 8	0.008 3	0.009 4	0.0120	0.0180

将此关系拟合合成图像,见图4。

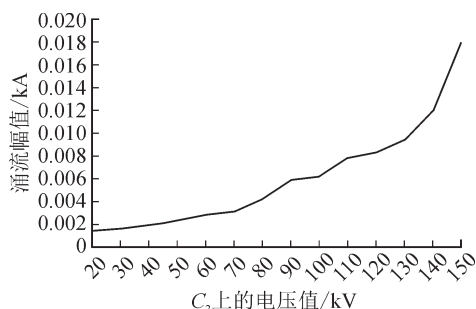


图4 均压电容 C_2 的电压值与涌流幅值的拟合图像

Fig. 4 Fitting image of voltage value and inrush current amplitude of voltage equalizing capacitance C_2

由PSCAD仿真计算结果以及图4可以发现,在某个断口先动作的情况下,随着均压电容上的储能

的增大,回路中产生的涌流也会增大,但是实际的幅值非常的小,对形成的回路中产生的影响并不大。结合式(10)可知,主要是均压电容的容值太小,导致在形成的回路中的容抗太大,由于容抗太大,均压电容上的能量变化幅度其实很小,导致回路中电磁能量的转换幅值很小,可以忽略。因此均压电容在另一个断口先动作的情况下,对涌流起到了很好的抑制作用。

2.3 后动作的断口完成合闸操作的涌流分析

在操作分散性为1 ms的情况下,令 CB_2 滞后 CB_1 ,1 ms合闸, CB_2 合闸的时间 T_2 选取从6~26 ms进行计算,步长为1 ms。 CB_1 合闸时间为 T_1 。得到的结果见表2。

表2 断口 CB_2 合闸时间与涌流幅值关系

Table 2 Relationship between CB_2 closing time and inrush current amplitude

合闸时间/ms	$T_2=6,$ $T_1=5$	$T_2=7,$ $T_1=6$	$T_2=8,$ $T_1=7$	$T_2=9,$ $T_1=8$	$T_2=10,$ $T_1=9$	$T_2=11,$ $T_1=10$	$T_2=12,$ $T_1=11$	$T_2=13,$ $T_1=12$	$T_2=14,$ $T_1=13$	$T_2=15,$ $T_1=14$	$T_2=16,$ $T_1=15$
涌流幅值/kA	18.27	15.88	11.93	6.82	1.42	5.3	10.25	14.65	17.63	18.87	18.27
合闸时间/ms	$T_2=17,$ $T_1=16$	$T_2=18,$ $T_1=17$	$T_2=19,$ $T_1=18$	$T_2=20,$ $T_1=19$	$T_2=21,$ $T_1=20$	$T_2=22,$ $T_1=21$	$T_2=23,$ $T_1=22$	$T_2=24,$ $T_1=23$	$T_2=25,$ $T_1=24$	$T_2=26,$ $T_1=25$	—
涌流幅值/kA	14.65	17.63	6.82	1.42	5.29	10.24	14.65	17.62	18.87	18.27	—

根据表2数据,将最后一个断口完成合闸的时间 T_1 与产生的涌流幅值的关系拟合合成图像,见图5。

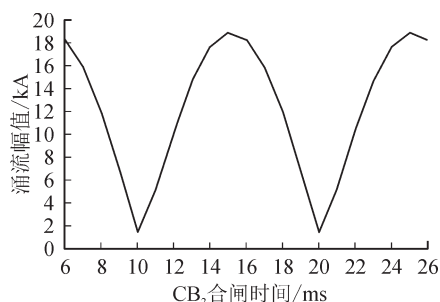


图5 最后一个断口完成合闸的时间与产生的涌流幅值的拟合图像

Fig. 5 Fitting image of the time when the last fracture was closed and the generated inrush amplitude

根据PSCAD的仿真结果以及图5可得,双断口断路器的合闸涌流幅值取决于最后一个完成合闸

操作的断口的合闸相位,且合闸相位处于电源电压峰值时产生的涌流最大,处于电源电压过零点时产生的涌流最小。当断路器两个断口全部完成合闸动作时,均压电容将不会对整个系统产生影响。

3 结论

1)双断口断路器当其中某个断口先完成合闸动作时,另一个断口上的均压电容会与该合闸的断口以及系统中的其它部分形成通路。但由于均压电容的容抗太大,均压电容上储存的能量对该通路中形成的涌流影响并不大,均压电容对涌流具有抑制的作用。

2)影响合闸涌流幅值的是系统中的杂散电感以及负载电容的参数,还有最后一个完成合闸动作的断口的合闸相位,先完成合闸动作的断口对涌流幅

值影响不大。最后一个合闸断口合闸相位处于电源电压峰值时产生的涌流最大,处于电源电压过零点时产生的涌流最小。合闸操作暂态过程的电容器合闸电压、合闸涌流都由稳态分量和高频分量组成。其中,电容器合闸过电压一般不大于2倍稳态相电压幅值,合闸涌流 i_c 则正比于涌流振荡频率,极端情况下峰值($f_0 \geq 500$ Hz)可达到6倍相电流幅值。

3)涌流的暂态振荡频率只与系统中的 LC 参数有关,与断路器合闸相位无关。因此运用选相合闸技术只能控制涌流的稳态响应分量的幅值,而高频暂态分量的振荡频率无法通过选相合闸技术控制。

参考文献:

- [1] 吴高波,阮江军,黄道春,等.多断口真空断路器均压电容研究综述[J].高压电器,2011,47(3):77-81.
WU Gaobo, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. A review on the study of multifractal vacuum circuit breaker voltage equalization capacitance[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3):77-81.
- [2] 文化宾,邹积岩,廖敏夫,等.126 kV双断口真空断路器的理论分析[J].高压电器,2009,45(2):14-17.
WEN Huabin, ZHOU Jiyan, LIAO Minfu, et al. Theoretical analysis of 126 kV double fracture vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3):77-81.
- [3] 廖敏夫,邹积岩,段雄英.双断口真空断路器开断能力的探讨[J].高压电器,2012,38(3):34-36.
LIAO Minfu, ZHOU Jiyan, DUAN Xiongying, Discussion on the breaking capacity of double fracture vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 38(3):34-36.
- [4] 钟希均,刘波,万德春.多断口真空断路器容性非同期开断断口电压分布特性[J].电信科学,2017(s1):186-191.
ZHONG Xijun, LIU Bo, WAN Dechun. Voltage distribution characteristics of multi-fracture vacuum circuit breaker capacitive non-synchronous breaking port[J]. Telecommunication Science, 2017(s1):186-191.
- [5] 刘波,田利民,翟小社,等.双断口40.5 kV真空容性开断最佳燃弧时间确定试验研究[J].高压电器,2017,52(3):160-166.
LIU Bo, TIAN Limin, ZHAI Xiaoshe, et al. Experimental study on determination of optimal arc burning time for double fracture 40.5 kV vacuum capacitive breaking[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 52(3):160-166.
- [6] 曹先平,刘波,陈轩恕,等.选相精度对容性关合涌流幅值影响的数值仿真分析[J].高压电器,2016,51(2):160-165.
CAO Xianping, LIU Bo, CHEN Xuanshu, et al. Numerical simulation analysis of the effect of phase selection precision on the amplitude of capacitive closing inrush current[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 51(2):160-165.
- [7] 王金辉,郎福成.40.5 kV真空断路器开合并联电容器组产生过电压的仿真分析[J].电工材料,2015(4):15-20.
WANG Jinhui, LANG Fucheng. Simulation analysis of over-voltage generated by shunt capacitor bank of 40.5 kV vacuum circuit breaker[J]. Electrical Material, 2015(4):15-20.
- [8] 廖敏夫,邹积岩,段雄英,等.多断口真空开关技术的发展与研究现状[J].高压电器,2006,42(6):456-459.
LIAO Minfu, ZHOU Jiyan, DUAN Xiongying, et al. Development and research status of multi-fracture vacuum switch technology[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6):456-459.
- [9] 李辉,陈轩恕,潘垣,等.串并联模块化断路器技术研究[J].高压电器,2012,47(10):1-5.
LI Hui, CHEN Xuanshu, PAN Yuan, et al. Research on modular circuit breaker in series and parallel[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 47(10):1-5.
- [10] 陈轩恕,尹婷,潘垣,等.基于单元化真空断路器串并联结构的大容量高压断路器设计方案[J].高电压技术,2011,37(12):3157-3163.
CHEN Xuanshu, YIN Ting, PAN Yuan, et al. Design scheme of high voltage circuit breaker with large capacity based on serial and parallel structure of unit vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12):3157-3163.
- [11] 刘波,陈轩恕,兰贞波,等.新一代110 kV真空断路器挂网试运行研究[J].电力系统保护与控制,2015,6(16):126-132.
LIU Bo, CHEN Xuanshu, LAN Zhenbo, et al. Trial operation of new generation 110 kV vacuum circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2015, 6(16):126-132.
- [12] CHOMPUSRI Y, KLEESUWAN S, CHARBKAEW N, et al. High voltage SF₆ circuit breaker modeling for capacitor bank controlled switching simulation[C]//International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology. [S.l.]: IEEE, 2010:464-467.
- [13] HUANG Y, LI D, YANG T, et al. Research on the control techniques of motor drive for SF₆ high voltage circuit breaker[C]//International Conference on Power System Technology. [S.l.]: IEEE, 2010:1-6.
- [14] JIN L, LIU J, ZHANG W, et al. Analysis of the breaking capacity of auxiliary switch for the operation control of high-voltage circuit breaker[C]//International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology. [S.l.]: IEEE, 2012:191-194.
- [15] LIU X, LI L, CAO Y, et al. Analysis on the gas flow characteristic of high voltage SF₆ circuit breaker with novel energy separated nozzle[C]//International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology. [S.l.]: IEEE, 2011:500-503.
- [16] JIN L, LIU J, ZHANG W, et al. Modeling the auxiliary

- switch of a high-voltage SF₆ circuit breaker[C]//International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology. [S.l.]:IEEE, 2011:48-51.
- [17] ANDRUSCA M, ADAM M, IRIMIA F D, et al. Aspects about the monitoring and diagnosis of high voltage circuit breakers[C]//International Conference & Exposition on Electrical & Power Engineering.[S.l.]:IEEE,2013:894-899.
- [18] YANG F, HU X. Research on the mechanical state parameter extraction method of high voltage circuit breakers[C]//IEEE International Conference on Industrial Informatics. [S.l.]:IEEE, 2012:1062-1066.
- [19] ZHANG W, GUAN Y, LIU W, et al. Vibration characteristics during mechanism endurance test of a high voltage circuit breaker[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. [S.l.]:IEEE, 2013:975-978.
- [20] MURATOVIC M, SOKOLJKA K, KAPETANOVIC M. Modelling of high voltage SF₆ circuit breaker reliability based on Bayesian statistics[C]//Gcc Conference and Exhibition. [S.l.]:IEEE, 2014:303-308.
- [21] PASDAR A M, SOZER Y. Smart high voltage circuit breaker in overhead power lines for smart grid applications[C]//Energy Conversion Congress and Exposition. [S.l.]:IEEE, 2013:1118-1123.
- [22] DHOTRE M T, YE X, MANTILLA J D, et al. CFD-based dielectric design of high voltage circuit breakers using air, CO₂, N₂ and SF₆[C]//Electrical Insulation Conference. [S.l.]:IEEE, 2014:474-477.
- 陈鹤冲(1994—),男,硕士研究生,研究方向为智能高压电器、超高压真空断路器。