

基于麦氏方程组高压电容器装置切除过程 仿真精度提升研究

赵彦军¹, 马维勇²

(1. 无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214100; 2. 桂林电子科技大学机电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 目前公开文献对高压电容器装置切除电弧的研究尚显不足, 而电弧暂态关乎高压电容器装置安全。为解决上述问题, 本文基于麦克斯韦第一方程与电磁场理论, 结合 EMTP 仿真, 构建等效电路, 通过 3 组差异化案例(不同电抗率、电弧电阻、切除相位角)分析电弧特性。结果表明: 电抗器电流非零时, 磁场能量需经电弧消耗或转为电场能量(易引发过电压); 电弧电阻决定放电类型(大于特征电阻为非振荡放电, 反之则振荡); 同容量装置中, 12% 电抗率较 5% 过零时间更长, 初始电流大则过零时间增加; 电弧持续短可忽略工频影响。研究为电容器装置拉弧控制提供理论依据。

关键词: 麦克斯韦第一方程; 并联电容器装置; 磁场能量; 断路器; EMTP

Research on Simulation Accuracy Improvement for the Switching-off Process of High-voltage Capacitor Bank Based on Maxwell's Equations

ZHAO Yanjun¹, MA Weiyong²

(1. Wuxi Sunking Power Capacitor Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214100, China; 2. School of
Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology,
Guangxi Guilin 541004, China)

Abstract: The research on switching-off arc by high-voltage capacitor banks remains relatively scarce in public literature, yet the arc transient process is critical to the safety of high voltage capacitor device. To address the aforementioned issues, in this paper the equivalent circuit is constructed on the basis of Maxwell's first equation and electromagnetic field theory, as well as in combination with EMTP simulations, and the arc characteristics are analyzed through three sets of differentiated case studies (different reactance ratios, arc resistances, and switching phase angles). The results show that when the reactor current is non-zero, the magnetic field energy must be dissipated via the arc or converted into electric field energy (prone to causing overvoltage). The arc resistance determines the discharge type (the greater characteristic resistance indicates non-oscillatory discharge, otherwise it is oscillatory discharge). For capacitor banks of the same capacity, the zero-crossing time for 12% reactance ratio is longer than that of 5% reactance ratio. In case of large initial current, the zero time is increased. In case of short arc duration, the effect of the power frequency can be neglected. The research can provide a theoretical basis for arc control in capacitor banks.

Keywords: Maxwell's first equation; shunt capacitor device; energy of the magnetic field; circuit breaker; EMTP

0 引言

电力系统中的变压器、电动机等主要器件均是

感性负载, 会使电流滞后于电压, 导致功率因数降低, 并联电容器能够提供容性无功功率, 与感性负载产生的无功功率互相抵消, 从而提高系统的功率

收稿日期: 2025-12-01; 修回日期: 2025-12-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2401504)。

Project Supported by National Key R & D Program of China(2021YFB2401504)。

因数^[1-5]。当功率因数提高时,在有功功率和电压不变的情况下,电流会减小,而线路损耗与电流的平方成正比,因此电流的减少会显著降低线路的电阻损耗。电流的减小会显著降低线路的电压降,提高用户端电压。因此,电力系统中安装有大量的并联电容器装置。文献[3-5]要求所选开关电器开合电容器组的性能应满足 GB 1984^[6-7]中 C2 级断路器的要求,C2 级试验关注的重点是容性电流开合能力,并未对过零切除电容器装置提出要求。查阅现行的高压电容器和高压交流断路器资料^[6-7],均未对过零切除电容器装置提出要求。高压并联电容器装置用过零投切开关电器,在常规 110 kV~750 kV 变电站中仅小范围试用,还未广泛使用^[18-20]。目前公开的文献中对高压电容器装置切除电弧的研究尚显不足,而电弧暂态关乎高压电容器装置的安全,故开展其分析研究具有重要工程意义。

1 电抗器电流原理分析

工程中,多数工程技术人员知晓断路器灭弧需在电流过零时进行,但少数人存在误解,认为断路器可强行在电流非零时断开且不会拉弧。本节将从理论层面,解释断路器为何必须在电流过零时灭弧,明确这一操作的核心必要性。

1.1 磁场的源

查《电磁场》^[21]中的麦克斯韦第一方程见式(1)~(2)所示,式(1)是积分形式,式(2)是微分形式。

$$\oint H \times dl = \int_s \delta_c \times ds + \int_s \frac{\partial D}{\partial t} \times ds + \int_s \rho v \times ds \quad (1)$$

$$\nabla \times H = \delta_c (\text{或} \rho v) + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

式中: H 是磁场强度; δ_c 是传导电流密度; ρv 是运动电流密度; D 是电通密度。

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \delta_d \quad (3)$$

式中, δ_d 是位移电流密度,把式(3)代入式(1),并用 δ_v 表示 ρv , 式(1)可以写成式(4)的形式。

$$\oint H \times dl = \int_s \delta_c \times ds + \int_s \delta_d \times ds + \int_s \delta_v \times ds \quad (4)$$

从式(4)可以明确看出:1)磁场源自电流;2)没有电流必没有磁场。永磁体也符合该结论,但与本文主题无关,不展开讨论。

并联电容器装置中, δ_c 对应导线中的电流密度, δ_d 对应电容器元件两极板间的电流密度, δ_v 对应本文想讨论的断路器拉弧电流密度。

1.2 电抗器磁场能量的连续性和不可储存性

查《电磁场》^[21],可知磁场能量公式为

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V H \times B dv \quad (5)$$

$$B = \mu H \quad (6)$$

式中: W_m 是磁场能量; μ 是磁导率; B 是磁通密度。把式(6)代入式(5),式(5)可以写成式(7)的形式。

$$W_m = \frac{1}{2} \mu \int_V H^2 dv \quad (7)$$

对 W_m 求梯度可得:

$$\nabla W_m = \frac{1}{2} \mu H^2 \quad (8)$$

数学上证明磁场能量 W_m 的连续性:从可导性和连续性(可导必连续)的关系可知,存在 ∇W_m , 则 W_m 必然连续,所以从数学上证明磁场能量 W_m 不能阶跃变化,电抗器的磁场能量 W_m 具有连续性。当然还可以从其他方法证明磁场能量的连续性。

从式(8)可以看出, W_m 源自磁场强度 H , 所以 W_m 不能阶跃变化,则 H 不能阶跃变化。从式(4)可以看出, H 源自电流,同理电抗器的电流不能阶跃变化,电抗器的电流 I_m 具有连续性,与电荷守恒定理相呼应(电抗器不能静态储存电荷)。

同时综合式(4)和式(8)可以看出, W_m 根源是电流,所以如果电抗器中的电流为零,则电抗器中没有磁场能量,即电抗器不能类似电容器在回路断开后储存磁场能量,磁场能量具有不可储存的特性,必须形成回路,回路中有电流才有磁场能量。

2 断路器断口拉弧时间计算

2.1 电容器装置切除时拉弧受电抗器影响机理分析

电抗器磁场能量的连续性,即磁场能量 W_m 满足式(9)。

$$W_m(0^+) = W_m(0^-) \quad (9)$$

磁场能量不可储存性意味着电容器装置切除时,若电抗器内电流非零,电抗器储存的磁场能量必须在断路器断口间以电弧的形式消耗或者骤转至电容器中以电场能量储存,这种磁场能量骤转电场能量引发截流过电压。采用 Electromagnetic Transients Program 建立仿真模型。断路器断口间电压波形图见图 1。图 1(a)和图 1(b)是电抗率为 5% 的 35 kV 电容器装置切除时的波形图,图 1(a)是电流过零时切除无过电压,图 1(b)是 50 A 截流产生 3.5 p.u. 的过电压,具体 p.u. 倍数与截流值、 L 和 C 的值有关。图 1(c)是无电抗器的高压电容器装置,则无论多大电流截流均不会产生截流过电压。

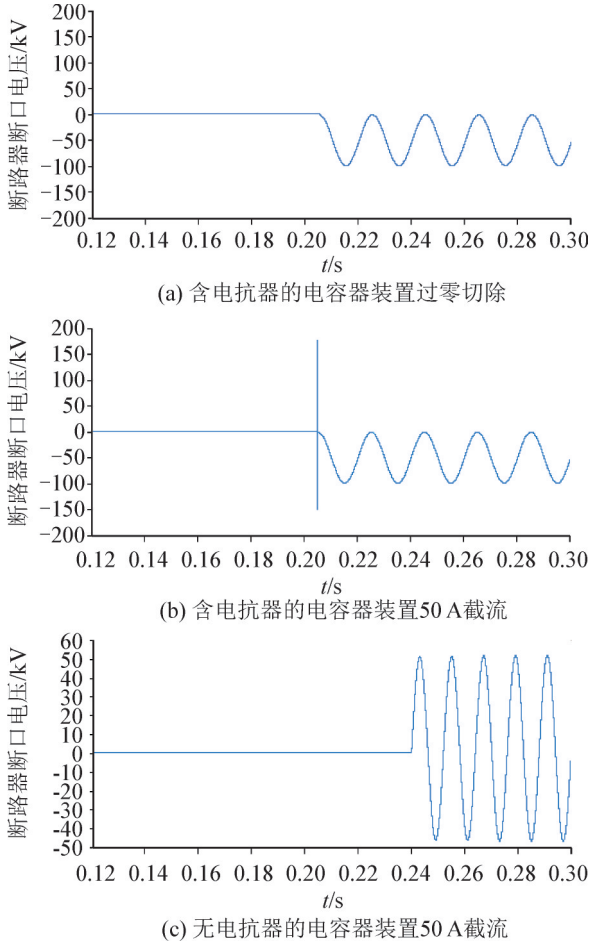


图1 断路器断口间电压波形图

Fig. 1 Voltage waveform diagram across the break of circuit breaker

燃弧电流 I_v 满足公式(10)。

$$I_v(0^+) = I_v(0^-) = I_m(0^-) = I_m(0^+) \quad (10)$$

式中: I_v 是电弧的电流; I_m 是电抗器的电流。

2.2 断路器断口电弧持续时间仿真计算

电容器装置切除时,断路器断口的电弧电流和电抗器中的电流大小相等,断路器断口的电弧是灭弧室内的气体或其他介质被电离,形成导电通道^[22-28],电流通过电离的气体或其他介质持续放电,发光、发热,电弧的能量消耗与白炽灯泡的发光、发热有相似。断路器断口电弧的电阻 R_v 随时间变化规律复杂、连续、非线性,不像白炽灯泡中电阻随温度增加(这是白炽灯泡初亮比较暗,随即变白亮的原因), R_v 随时间大致有以下阶段^[29-32]:

- 1) 动触头因机械力迅速拉开, R_v 迅速变大;
- 2) 绝缘介质被电离,发展电离通道, R_v 可采用下降的指数函数;
- 3) 形成稳定电离通道,稳态燃弧阶段, R_v 可采用固定电阻;
- 4) 随着 W_m 消耗完(可忽略电源工频能量的注

入),电弧逐渐熄灭, R_v 变大至完全绝缘,可采用上升的指数函数表示。 R_v 与灭弧室结构和绝缘介质关系密切。

因阶段 2) 是下降的指数函数,阶段 4) 是上升的指数函数,阶段 2) 和 4) 具有一定的对称性,而阶段 III 是固定电阻,所以本文思路是尝试取一个电弧的等效电阻 R' ,用于估算工程中高压电容器装置的灭弧时间。

高压电容器装置切除时的等效简化电路如图 2 所示。

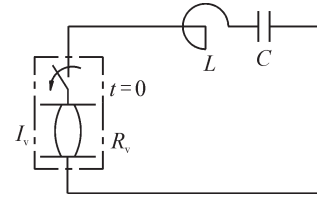


图2 等效简化电路

Fig. 2 Equivalent simplified circuit

图中: R_v 是断路器断口电弧的电阻; I_v 是断路器断口电弧的电流; L 是电抗器的电感; C 是电容器的电容, $t=0$ 时断路器断开。

从图 2 可以看出, I_v 是随时间阻尼指数衰减函数,因 L 和 C 是定值,所以 I_v 的具体函数由 R_v 主导。

10 kV 真空断路器在开断短路电流和正常负荷电流时的电弧电阻不同,10 kV 真空断路器正常负荷开断电弧等效电阻 R' 在 $5 \Omega \sim 15 \Omega$ ^[29-30]。10 kV 高压电容器装置的电阻约 1Ω 左右。10 kV 高压电容器装置到开关柜之间的电阻是 $m\Omega$,可忽略。叠加高压电容器装置和线路的电阻后,10 kV 真空断路器正常负荷开断电弧等效电阻 R' 可取 $6 \Omega \sim 16 \Omega$ 。

2.2.1 仿真案例 1

以电力系统常用的 TBB10-4800/200-AKW(电抗率 5%)高压并联电容器装置为例进行仿真计算,额定电容 $C=126.3 \mu F$,额定电感 $L=4.01 mH$,额定电流 $I=251.9 A$ 。

查阅文献[32],图 1 电路相关参数的计算公式如下:

$$R_T = 2 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (11)$$

$$I_v = -C \frac{du_c}{dt} \quad (12)$$

$$u_c = A_1 e^{P_1 t} + A_2 e^{P_2 t} \quad (13)$$

$$P_1 = -\frac{R'}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R'}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (14)$$

$$P_2 = -\frac{R'}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R'}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (15)$$

式中: R_T 是电路的特征电阻; u_c 是电容器的端电压; P_1 和 P_2 是特征根。把案例 1 的 L 和 C 代入式(11)计算得 $R_{T1} = 11.3 \Omega$ 。

1) 当 $R' > R_T$ 时, 非振荡放电的情况

取相位角在 $\pi/4$ 时切除电容器装置, 则 $I_v(0^+) = I_v(0^-) = (\sqrt{2}/2) \times 251.9 = 178.1 \text{ A}$, 电容器两端电压 $U_0 = U_0(0^-) = (\sqrt{2}/2) \times (11/\sqrt{3}) = 4.49 \text{ kV}$ 。

把 $R' = 16 \Omega$ 和案例 1 中 L 、 C 代入式(14)和式(15), 计算得 $P_1 = -578.8$ 、 $P_2 = -3411.2$ 。把 I_0 、 U_0 、 L 、 P_1 和 P_2 的值代入式(12)和式(13), 并化简得到式(16)。

$$I_v = 609.8e^{-3411.2t} - 431.7e^{-578.8t} \quad (16)$$

$R' > R_T$ 时, 仿真案例 1 电弧电流 I_v 的波形图如图 3 所示。

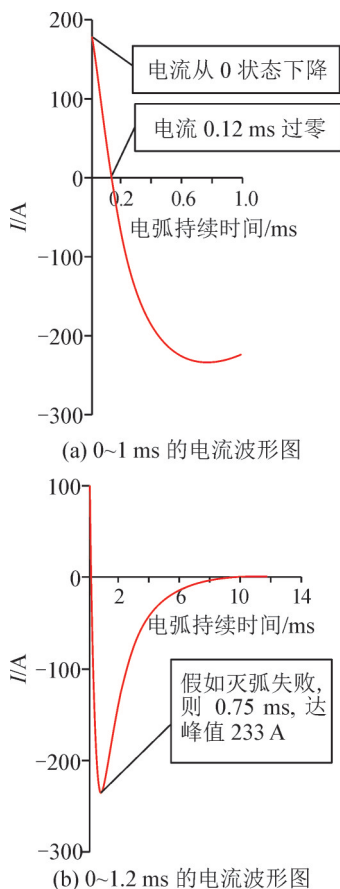


图3 $R' > R_T$ 时 I_v 的波形图(案例 1)

Fig. 3 Waveform diagram of I_v when $R' > R_T$

从上图可以看出: 1) 断路器的电弧电流从零状态开始连续变化, I_v 在 0.12 ms 过零, 正常情况断路器在 I_v 过零时灭弧, 0~0.12 ms 是电抗器中磁场能量的消耗和转移; 2) 假如断路器灭弧失败(实际工程中通常都可以准确灭弧, 本处仅做理论探讨, 下

同), 则 I_v 在 0.75 ms 达峰值 232.5 A, 然后非振荡减小, 0.12 ms 之后是电容器中电场能量的消耗; 3) 从时间可以看出, 断路器电弧起、灭时间很短, 可以忽略电源工频电流对电弧的影响。

2) 当 $R' < R_T$ 时, 振荡放电

因 $R' = R_T$ 的临界情况在工程中很难刚好碰到, 所以为减短篇幅略过。

$$\delta = \frac{R'}{2L} \quad (17)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R'}{2L}\right)^2} \quad (18)$$

$$P_1 = -\delta + j\omega \quad (19)$$

$$P_2 = -\delta - j\omega \quad (20)$$

同样取相位角在 $\pi/4$ 时切除电容器装置, 把 $R' = 6 \Omega$ 和案例 1 中 L 、 C 代入式(17)和式(18)计算得 $\delta = 748.1$, $\omega = 1189.4$, 把 I_0 、 U_0 、 L 、 P_1 和 P_2 的值代入式(12), 并化简得到式(21)。

$$I_v = e^{-748t} (178 \cos 1189t - 1053 \sin 1189t) \quad (21)$$

$R' > R_T$ 时, 仿真案例 1 电弧电流 I_v 的波形图如图 4 所示。

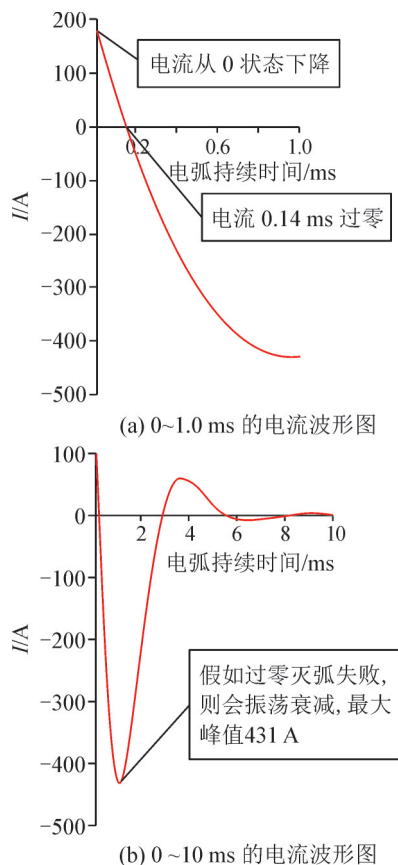


图4 $R' < R_T$ 时 I_v 的波形图(案例 1)

Fig. 4 Current waveform diagram of I_v when $R' < R_T$

从上图可以看出: 1) 断路器的电弧电流从零状态开始衰减, I_v 在 0.14 ms 过零, 正常情况断路器在

I_v 过零时灭弧, 0~0.14 ms 是电抗器中磁场能量的消耗和转移; 2) 假如断路器灭弧失败, 则 I_v 振荡衰减, 最大峰值 431 A。

2.2.2 仿真案例 2

把案例 1 中高压并联电容器装置的电抗率由 5% 改为 12%, 其余参数与案例 1 保持一致。对应额定电容 $C=106.1 \mu\text{F}$, 额定电感 $L=11.46 \text{ mH}$, 额定电流 $I=230.9 \text{ A}$ 。把案例 2 的 L 和 C 代入式(11)计算得 $R_{T2}=20.79 \Omega$ 。

10 kV 真空断路器正常负荷开断电弧等效电阻 R' 在取 $6 \Omega \sim 16 \Omega$, 所以通常 $R' < R_T$, 振荡放电。

同样取相位角在 $\pi/4$ 时切除电容器装置, 则 $I_v(0^+) = I_m(0^-) = (\sqrt{2}/2) \times 230.9 = 163.3 \text{ A}$, $U_0 = U_0(0^-) = (\sqrt{2}/2) \times (12/\sqrt{3}) = 4.9 \text{ kV}$ 。

把 $R'=6 \Omega$ 和案例 2 中 L, C 代入式(18)和式(19)计算得 $\delta=261.9$, $\omega=868.3$, 把 I_0, U_0, L, P_1 和 P_2 的值代入式(12), 并化简得到式(22)。

$$I_v = e^{-262t} (163 \cos 868t - 640 \sin 868t) \quad (22)$$

$R' < R_T$ 时, 仿真案例 2 电弧电流 I_v 的波形图如图 5 所示。

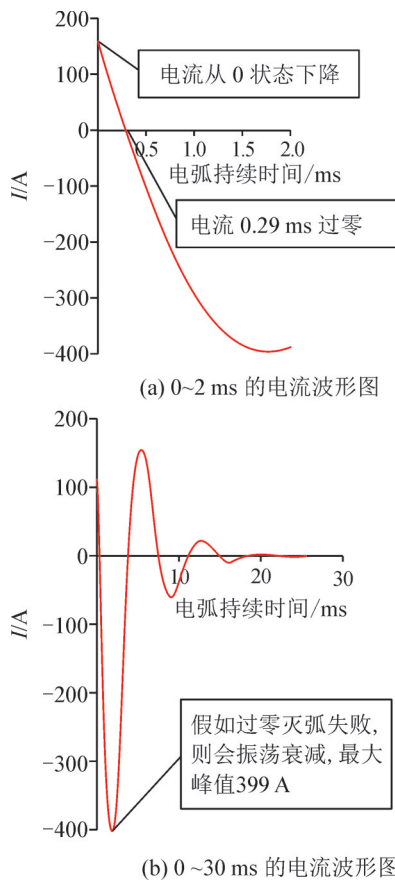


图 5 $R' < R_T$ 时 I_v 的波形图(案例 2)
Fig. 5 Current waveform diagram of I_v when $R' < R_T$

从上图可以看出: 1) 断路器的电弧电流从零状态开始衰减, I_v 在 0.29 ms 过零; 2) 假如断路器灭弧失败, 则 I_v 振荡衰减, 最大峰值 399 A。

2.2.3 仿真案例 3

高压电容器装置切除时机, 由电流相位角 $\pi/4$ 改 $\pi/3$, 其余参数与案例 1 保持一致, 只仿真计算 $R' < R_T$ 时电弧振荡放电的结果。 $I_v(0^+) = I_m(0^-) = (\sqrt{3}/2) \times 251.9 = 218.2 \text{ A}$, $U_0 = U_0(0^-) = (1/2) \times (11/\sqrt{3}) = 3.2 \text{ kV}$ 。

把 $R'=6 \Omega$ 和案例 3 中 L, C 代入式(18)和式(19)计算得 $\delta=748.1$, $\omega=1189.4$, 把 U_0, δ 和 ω 的值代入式(12), 并化简得到式(23)。

$$I_v = e^{-748t} (218 \cos 1189t - 808 \sin 1189t) \quad (23)$$

$R' < R_T$ 时, 仿真案例 3 电弧电流 I_v 的波形图如图 6 所示。

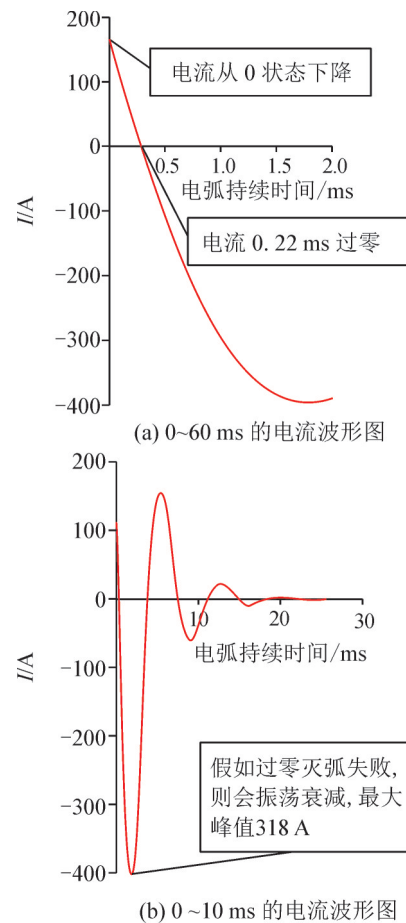


图 6 $R' < R_T$ 时 I_v 的波形图(案例 3)
Fig. 6 Current waveform diagram of I_v when $R' < R_T$

从上图可以看出: 1) 断路器的电弧电流从零状态开始衰减, I_v 在 0.22 ms 过零; 2) 假如断路器灭弧失败, 则 I_v 振荡衰减, 最大峰值 318 A; 3) I_v 变化趋势同案例 1。

2.3 仿真计算结果分析

3个方案的仿真计算结果详见表1。

表1 方案的仿真计算结果
Table 1 Simulation calculation results of the scheme

方案	R' 与 R_T	R'/Ω	灭弧时间/ms	I_v 峰值/A
1	$R' > R_T$	16	0.12	233
	$R' < R_T$	6	0.14	431
2	$R' < R_T$	6	0.29	399
3	$R' < R_T$	6	0.22	318

分析结果:

1) 3个案例中, $I_v(0^+) = I_v(0^-)$, 仿真计算波形图与第1章理论分析一致, I_v 具有连续性, 不会阶跃变化。

2) 3个案例中, 电抗器中的电流均约在 0.1~0.3 ms 内衰减到 0 A, 切除电容器装置的操作会在电抗器中产生一个过电压。

3) 在案例1中, 保持其他参数不变, 只改变电弧电阻 R_v (该值由断路器性能决定), 放电电弧可能出现非振荡放电、临界情况和振荡放电。

4) 在案例1中, I_v 持续时间 0.1~0.14 ms, 可以忽略电源工频电流的影响。

5) 在案例2中, 相同的 10 kV 高压并联电容器装置, 把电抗率由 5% 改为 12%, 因电路的特征电阻 R_T 变大, 按目前公开已知的 10 kV 真空断路器性能, 放电电弧只会振荡放电。

6) 案例2与案例1的振荡放电进行对比, 保持其他参数不变, 电抗率由 5% 改为 12%, I_v 所需过零时间变长。

7) 案例3与案例1的振荡放电进行对比, 保持其他参数不变, 高压电容器装置切除时机, 由电流相位角 $\pi/4$ 改 $\pi/3$, 零状态电流 $I_v(0^-)$ 变大, 所以所需过零时间变长。

3 结语

1) 鉴于磁场能量具备连续性与不可储存性, 若电抗器电流非零, 电抗器储存的磁场能量必须在断路器断口间以电弧的形式消耗或者骤转至电容器中以电场能量储存, 这种磁场能量骤转电场能量引发截流过电压。

2) 当断路器电弧电阻较大, 切除高压电容器装置时, 放电电弧可能会呈现非振荡、临界、振荡这几种放电情况。

3) 因断路器端口电弧持续时间极短, 故在工程分析时, 电源对电弧的影响可予以忽略。

4) 同容量的高压并联电容器装置, 电抗率的 12% 装置相比 5% 的装置, 电弧电流过零所需时间会更长。

5) 同一高压并联电容器装置, 切除时的电流越大, 电弧电流过零所需时间会越长。

参考文献

- [1] 倪学锋. 并联电容器装置技术及应用[M]. 北京: 电力工业出版社, 2011.
- [2] 郭天兴. 电力电容器技术及其应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2020.
- [3] 高压并联电容器装置使用技术条件: DL/T 604—2020 [S]. 2020.
Technical specification of shunt capacitors [S]. : DL/T 604—2020 [S]. 2020.
- [4] 并联电容器装置设计规范: GB 50227—2017 [S]. 2017.
Code for design of installation of shunt capacitors: GB 50227—2017 [S]. 2017.
- [5] 高压并联电容器装置的通用技术要求: GB/T 30841—2014 [S]. 2014.
General requirements for high-voltage shunt capacitor installations: GB/T 30841—2014 [S]. 2014.
- [6] 高压交流断路器: GB/T 1984—2014 [S]. 2014.
High-voltage alternating-current circuit-breakers: GB/T 1984—2014 [S]. 2014.
- [7] 高压交流断路器: GB/T 1984—2024 [S]. 2024.
High-voltage alternating-current circuit-breakers: GB/T 1984—2024 [S]. 2024.
- [8] 滤波器用高压交流断路器: GB/T 42009—2022 [S]. 2022.
High voltage alternating-current circuit-breakers for filter banks: GB/T 42009—2022 [S]. 2022.
- [9] 高压交流真空断路器: DL/T 403—2017 [S]. 2017.
High-voltage alternating-current vacuum circuit-breaker: DL/T 403—2017 [S]. 2017.
- [10] 高压交流断路器: DL/T 402—2016 [S]. 2016.
High-voltage alternating-current circuit-breakers: DL/T 402—2016 [S]. 2016.
- [11] KEIDARM, BEILISI, BOXMAN R L, et al. 2D expansion of the low-density interelectrode vacuum arc plasma jet in an axial magnetic field[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1999, 29(7): 1973-1975.
- [12] HAGHNAZARIH, LAZZARI R, PIEGARI L. Design of LVDC bidirectional hybrid circuit breaker[C]//Proceedings of the IEEE Fourth International Conference on DC Microgrids(ICDCM). Arlington, VA, USA: IEEE, 2021.
- [13] RODRIGUES R, DU Yu, ANTONIAZZI A, et al. A review of solid-state circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 364-377.
- [14] 张照资, 高偲智, 汪倩, 等. 自触型低压混合式直流断路器系统设计与开断特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4544-4555.
ZHANG Zhaozi, GAO Caizhi, WANG Qian, et al. System design and breaking characteristics research of self-trig-

- gered low voltage hybrid DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4544-4555.
- [15] 张宏波, 张铁柱, 赵一鉴, 等. 小电流真空电弧多物理场仿真耦合机理研究[J]. 广东电力, 2024, 37(7): 98-106.
ZHANG Hongbo, ZHANG Tiezhu, ZHAO Yijian, et al. Study on coupling mechanism of multi-physical field simulation for low current vacuum arc[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(7): 98-106.
- [16] 陈邦发, 何子兰, 代苑楠, 等. SF₆断路器弧触头关合侵蚀特性研究[J]. 高压电器, 2024, 60(12): 57-65.
CHEN Bangfa, HE Zilan, DAI Yuannan, et al. Study on corrosion characteristics of arc contact of SF₆ circuit breaker in switching operation[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12): 57-65.
- [17] 王楠, 周卫华. 一种低成本的继电器过零投切控制电路[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(11): 39-42.
WANG Nan, ZHOU Weihua. Low cost relay zero switching control circuit[J]. Techniques of Automation and Applications, 2022, 41(11): 39-42, 138.
- [18] 海涛, 时雨, 陈永鉴, 等. 抑制电力电容投切消极影响的控制策略[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(2): 415-420.
HAI Tao, SHI Yu, CHEN Yongjian, et al. A control strategy to suppress negative influence of power capacitor switching[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021, 41(2): 415-420.
- [19] 李俊杰, 石强. 基于晶闸管与断路器的组合投切电容器方案设计[J]. 电力学报, 2020, 35(3): 261-267.
LI Junjie, SHI Qiang. Design of combined switching capacitor based on thyristor and circuit breaker[J]. Journal of Electric Power, 2020, 35(3): 261-267.
- [20] 冯慈璋. 电磁场[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 1983.
- [21] 王其平. 电器电弧理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [22] 马飞越, 李澳, 吴诚威, 等. 基于LSTM-MIV神经网络的SF₆断路器触头电寿命预测[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 69-77.
MA Feiyue, LI Ao, WU Chengwei, et al. Electrical life prediction for contact of SF₆ circuit breaker based on LSTM-MIV neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 69-77.
- [23] 董冰冰, 陶磊, 李康, 等. 诱导触发型气体间隙开关快速绝缘恢复特性[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 163-169.
DONG Bingbing, TAO Lei, LI Kang, et al. Fast insulation recovery characteristics of induced trigger gas gap switch[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 163-169.
- [24] 刘晓明, 张煦松, 姜文涛, 等. 直流真空断路器永磁斥力机构运动特性监测系统研究[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 17-24.
LIU Xiaoming, ZHANG Xusong, JIANG Wentao, et al. Research on mechanical characteristic monitoring system of permanent magnet repulsion mechanism for DC vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 17-24.
- [25] 于宁, 曾建斌, 游一民, 等. 真空断路器弹簧操动机构的优化[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 25-31.
YU Ning, ZENG Jianbin, YOU Yimin, et al. Optimization of spring operating mechanism for vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 25-31.
- [26] 周秀, 吴旭涛, 田天, 等. 基于机-热-电多参量信号特征的GIS隔离开关状态评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 220-228.
ZHOU Xiu, WU Xutao, TIAN Tian, et al. Condition assessment method of GIS disconnector based on vibration-thermal-electrical multi-parameter signal characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 220-228.
- [27] 薄祥来, 刘思远, 谢洪涛, 等. CuCr55电极触头真空电弧燃弧与烧蚀特性[J]. 高压电器, 2024, 60(4): 1-9.
BO Xianglai, LIU Siyuan, XIE Hongtao, et al. Vacuum arc ignition and ablation characteristics of CuCr55 electrode contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 1-9.
- [28] 王德全, 王汝凡, 邱军, 等. 混合式直流断路器内部关键参数对电弧电流转移特性的影响研究[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 193-200.
WANG Dequan, WANG Rufan, QIU Jun, et al. Research on influence of key parameters in hybrid DC circuit breakers on arc current commutation characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 193-200.
- [29] 黎斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [30] 刘晓明, 曹云东, 王尔智. 高压SF₆断路器电弧与气流相互作用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 151-155.
LIU Xiaoming, CAO Yundong, WANG Erzhi. Study on arc-flow interaction for a high voltage SF₆ circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 151-155.
- [31] 李志兵, 李晓昂, 陈维江, 等. SF₆短间隙中高频电弧的阻抗特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1411-1418.
LI Zhibing, LI Xiaoang, CHEN Weijiang, et al. Impedance characteristics of high-frequency arc in short SF₆ gap[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1411-1418.
- [32] 邱关源(原), 罗先觉(修订). 电路[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

作者简介:

赵彦军(1981—), 男, 高级工程师, 长期从事电力电容器装置的技术工作。E-mail: 93434614@qq.com。

马维勇(1971—), 男, 高级工程师, 通信作者, 主要从事电气自动化技术及无功补偿成套装置研究工作。E-mail: 2261664936@qq.com。