

[谐振电流]

基于谐振电流法的直流开断分析

文/施耐德电气(中国)有限公司上海分公司 张 辉

直流断路器在柔性直流电网中用于清除直流侧故障电流,对于直流电网的可靠运行至关重要。直流电流无过零点,而传统的交流电流开断技术是基于电流过零点进行设计的。因此需要新型的开断技术使直流断路器具备开断直流电流的能力。谐振电流法是一种针对无源自激振荡机械式回路的主要开断方法。

高压直流断路器开断的关键因素是在任何短路故障发生的情况下,首先需要中断线路电流,然后在电流开断后,自身的绝缘性能能够承受系统因为暂态过程产生的瞬态电压。关于高压直流断路器的应用研究已经开展了多年。在研究直流开断最初,主要就是基于无源谐振原理,并联谐振电路的交流断路器应用于直流故障开断上,利用谐振产生的交流电流使得直流电流上产生电流过零点从而开断电流。

谐振电流法

利用机械式断路器开断电流,振荡电流由电容 C 和电感 L 谐振产生。

机械断路器分断后,产生弧压 U_{arc} ,激发振荡电流。振荡回路电流注入主回路电流后,叠加在直流电流上并创造“人工电流零点”后开断。

电流开断后,电容此时两端的瞬态电压施加在机械式断路器的断口两侧,只有电容电压数值及上升应小于其断口内介质耐受能力,才能够成功熄弧。忽略回路中的暂态过程,此时电压的平均上升率可近似表示为

$$du/dt = I/C \quad (1)$$

式中, I 为直流开断电流; C 为换相电容值。

初始瞬态恢复电压受电流过零点时电容上电压,以及高频电流在回路电容和电感上产生的电压影响。与此同时,随着电流不断流入电容器回路并

为其充电,电容器两端电压不断增加至避雷器动作电压 U 。

避雷器动作后,故障电流转入该回路,吸收剩余的能量。以两端HVDC工程中转换开关MRTB为例,工作回路如图1所示。

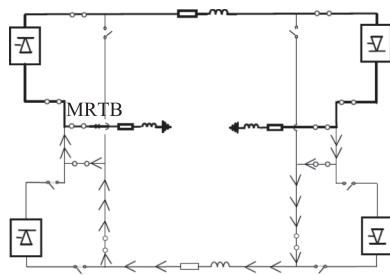


图1 电压转换等效电路图

当负极换流阀停运时,将电流从大地回路转移至金属回线。电流在此时存在两条并联通路。待MRTB分闸后,避雷器在其两端建立恢复电压 U 。这时电流由于反向电压的存在转换至另一条回路,此时等效的电路图如图2所示。

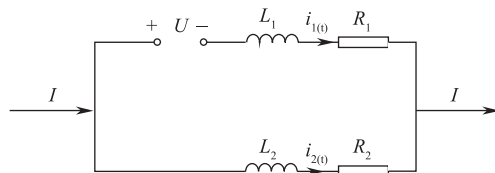


图2 电压转换等效电路图

根据电路图,列写方程组为

$$U + R_1 i_1(t) + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - R_2 i_2(t) = 0 \quad (2)$$

$$I = i_1(t) + i_2(t)$$

式中, U 为开关两端的避雷器的残压, 假设在转换过程中 U 基本保持不变; R_1 、 L_1 、 R_2 、 L_2 为各支路的电感和电阻值; $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ 为并联支路各电流值; I 为总回路电流。分断电流稳态初始值 $i_1(0)=I_1$ 由总电流 I 在两并联支路间根据电阻反比分配。

恢复电压 U 作为反电动势, 在回路中产生一个逆时针的电流 i_0 , 根据式 (3) 求得式 (4) 和式 (5), 即

$$U = R_2 i_0 + L_2 \frac{di_0}{dt} + R_1 i_0 + L_1 \frac{di_0}{dt} \quad (3)$$

$$i_0 = \frac{U}{R_1 + R_2} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4)$$

$$i_1(t) = i_1(0) - i_0 = I_1 - \frac{U}{R_1 + R_2} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (5)$$

令 $i_0=0$, 得到电流转换时间

$$t_k = -\tau \ln \left[1 - \frac{i_1(0)(R_1 + R_2)}{U} \right] \quad (6)$$

避雷器吸收能量为

$$W = U i_1(0) (t_k + \tau) - \frac{U^2}{R_1 + R_2} t_k \quad (7)$$

$$t_{total} = t_{arc} + t_c + t_{arrestor} \quad (8)$$

式中, t_{arc} 为断路器燃弧时间; t_c 为电容器的充电时间; $t_{arrestor}$ 为避雷器吸收能量时间。断路器燃弧时间通常可按照 20 ms 考虑。

谐振电流法模型仿真

基于以上参数, 利用 PSCAD/EMTDC 建立转换过程的等效电路如图 3 所示。选取 $C=22 \mu\text{F}$, $L=60 \mu\text{H}$, 作为辅助振荡回路, 在设定的仿真电路中, 开断稳态电流为 $I_1=1.5 \text{ kA}$ 。 L_1 、 R_1 、 L_2 和 R_2 分别为两条输电线路的等效阻抗。 $I=5.8 \text{ kA}$ 为系统额定电流。

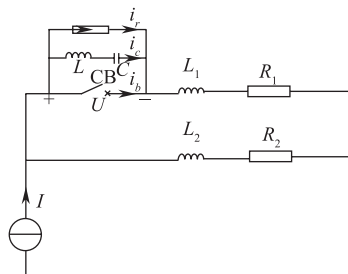


图3 谐振电流法仿真电路

仿真得到 i_c 的振荡峰值和频率分别为 1.48 kA、4.3 kHz, 自激振荡电流开断过程如图 4 所示, 与计算结果吻合。

当辅助谐振支路产生的电流 i_c 注入断路器回路后, 经过一段延时令断路器支路电流 i_b 过零并开断。

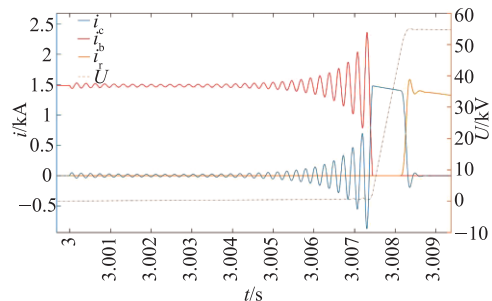


图4 自激振荡电流开断过程

第二次换流发生在电容器 i_c 与避雷器支路电流 i_r 之间。此时开关两端电压达到了 55 kV, 为设定的避雷器动作电压。这一过程是由于主回路中的电流为电容器充电, 引起两侧电压升高, 根据仿真结果可知电容器充电时间为 0.8 ms。避雷器能量吸收曲线如图 5 所示。

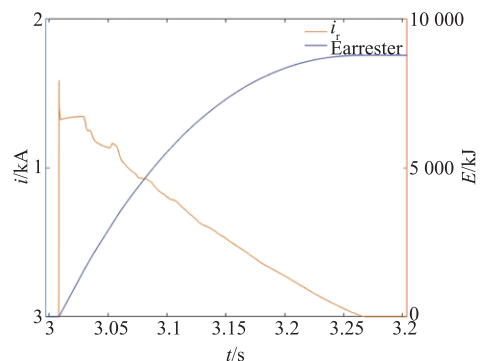


图5 避雷器能量吸收

由图 5 仿真结果可知, 共吸收能量最大值为 8 770 kJ, 耗时 260 ms。本次开断总时间为 280.8 ms。

结束语

谐振电流法依赖于谐振 LC 电路的概念。无源自激振荡机械式回路中更加适合。如果出现故障, 则会在主通流支路和转换电流支路之间产生振荡电流。谐振电路可以通过主支路在开断过程中产生的暂态电压来充当励磁源。故障电流和振荡电流叠加后, 使得主支路电流最终变为零时完成开断。EA

(收稿日期: 2021-11-02)