

真空断路器关合速度与预击穿对同步关合的影响研究

游一民^{1,2} 陈德桂¹ 张银昌³ 李 静³ 任建军³ 孙志强¹

(1. 西安交通大学电气工程学院 西安 710049

2. 西安高压电器研究所 西安 710077

3. 陕西宝光集团 宝鸡 721006)

摘要 通过对真空灭弧室击穿电压的测量及电场强度的计算,拟合出了真空灭弧室在小间隙下的击穿电压与间隙的关系式。并结合配永磁机构的真空断路器关合时的动特性,对 10kV 系统与 35kV 系统的电容器组进行关合时,考虑到断路器合闸时间的分散性,在一定合闸速度下,确定了关合涌流为最小的最佳预期关合点。

关键词: 同步关合 预击穿 合闸速度

中图分类号: TM561.2

Study of the Influence of the Closing Velocity and the Pre-strike on Synchronous Closing in a Vacuum Circuit Breaker

You Yimin^{1,2} Chen Degui¹ Zhang Yinchang³ Li Jing³ Ren Jianjun³ Sun Zhiqiang¹

(1. Xi'an Jiaotong University Xi'an 710049 China

2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Xi'an 710077 China

3. Shanxi Baoguang Group Baoji 721006 China)

Abstract This paper describes the closing velocity and the pre-strike of vacuum circuit breaker in the synchronous closing. The expression of the gap withstand voltage vs. the gap separation between the two contacts of vacuum circuit breaker was derived from the experiments and the calculations. A critical velocity was proposed by calculation respectively for 10kV and 35kV. If the velocity were lower than the critical one, the pre-strike would happen when synchronous closing. The real closing point will be shifted from voltage zero due to pre-strike. If the velocity is higher than it, the circuit will be closed at zero voltage with no pre-strike. Taking into account the variation of the closing time, the prospective closing time is distinct with different closing velocity. Moreover, the optimal closing point will vary form system voltage and parameters, and closing velocity.

Keywords: Synchronous closing, pre-strike, closing velocity

1 概述

断路器在开断和关合电力设备的瞬时,所处系统电压的初相角通常都是随机的和不确定的,因此会产生不同程度的暂态过程。例如,在关合空载变

压器、电容器组和空载线路时,常常产生幅值很高的涌流和过电压。这样,不仅对系统中的设备不利,还可能引起继电保护的误动作,影响电力系统的稳定。

采用同步关合可以减小涌流的幅值和对系统电压的扰动,既限制了涌流和过电压,又省去了预置合闸电阻^[1-3],提高了系统技术经济指标。文献[3]与文献[5]都提到了预击穿对同步关合的影响,但没

国家自然科学基金资助项目(50007004)。

收稿日期 2003-10-13 改稿日期 2003-12-12

有确定真空断路器关合电容器组时的最佳预期关合点。本文结合真空灭弧室的击穿电压与配永磁机构的真空断路器关合时的动特性,定量地指出断路器的合闸速度对同步关合的影响。

同步关合初相角的选择与真空断路器的预击穿特性有关。同时,合闸速度直接影响着断路器预击穿时间,因此合闸速度是很重要的参数。合闸速度和断口两端的电压以及灭弧室断口两端所能承受的电压确定了断路器进行同步关合时的关合相位。如图1所示,在关合电容器组时,假设断口的电源侧受到系统正弦交流电压的作用,而电容器上的电压为零。此时,在电压过零时关合是比较理想的。然而,断路器的触头在关合过程中,由于断路器合闸时间的分散性,断口间隙上要承受一定的耐压,在关合残压为零的电容器组时,触头两端的电压为系统电压。断口所能承受电压与合闸位移有关,如图中的曲线束 V_1 与 V_2 为断路器在关合时,断口间耐受电压随时间的变化。其中,曲线2与曲线5为断路器预定于电源电压零点进行关合时,断口间耐压随时间的变化。由于,开关合闸时间的分散性,曲线1、曲线3、曲线4、曲线6分别为合闸时间变长或变短1ms时,断口间耐受电压随时间的变化。

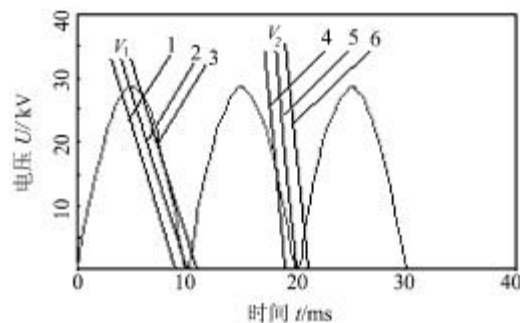


图1 断路器的预击穿对同步关合的影响

Fig.1 The influence of circuit breaker's pre-strike on the synchronous closing

较低的关合速度会使断口耐受电压对时间的特性曲线的斜率较低,如图中曲线束 V_1 ,图中预击穿的点发生在两条曲线的交点。如果断路器的关合速度不够高,本预定于电压过零点进行关合(曲线2),由于触头在关合时发生了预击穿而使触头之间导通,产生较大的瞬态过程,使产品没有达到同步关合的目的。较高的关合速度会使断口耐受电压对时间的特性曲线的斜率较高,如图曲线束 V_2 中曲线5,可以在预定的电压零点处进行关合。只有关合速度足够高,才能实现同步关合。当考虑到断路器合闸时间的分散性,开关进行关合时,它的断口耐受电

压对时间的特性分别落在曲线1与曲线3、曲线4与曲线6范围内,预击穿点也分别为曲线束与电压曲线的交点。如何选择预定的关合相位,可以使断路器在同步关合时暂态分量最小,本文通过对真空灭弧室断口进行击穿电压的测量及计算,得出最佳的预期关合点与断路器的关合速度与系统的电压有关。

2 真空灭弧室预击穿的测量与计算

在真空灭弧室的关合过程中,动静触头之间的距离越来越逼近,当距离小到某一个距离,致使已无法承受外加的电压时,真空间隙击穿。由于此时距离较小,可以认为是场致发射引起的击穿。

为了取得小真空间隙的击穿电压,在国内最大的真空灭弧室生产厂陕西宝光集团进行了真空灭弧室击穿耐压实验。实验在GL-150型高压老练测试台上进行,试品为两只TD3和两只TD3738真空灭弧室,管号分别为00027、00030、030401067、030401108。实验前,对每只灭弧室进行例行出厂老练试验,然后将灭弧室拉开不同的开距进行击穿试验,记录下灭弧室的开距及击穿电压值。表1为四只灭弧室在不同间隙下,所测得的击穿电压值。

表1 不同间隙下灭弧室的击穿电压值

Tab.1 Measured values of withstand voltage vs. the distance of two contacts gaps

真空间隙 /mm	击穿电压值/kV			
	管号 030401067	管号 030401108	管号 00027	管号 00030
0.15	—	—	—	8
0.16	—	—	10.5	—
0.21	10.1	7.8	—	—
0.37	—	—	17.7	—
0.41	16.9	14	—	13.5
0.56	—	19	—	—
0.59	—	—	—	17.1
0.6	—	—	—	—
0.68	—	23.7	—	—
0.75	23.8	—	—	—
0.82	—	—	23.7	—
0.92	27.6	—	—	—
0.99	—	28.9	—	—
1.04	—	—	34.7	—
1.12	32.9	—	—	—
1.24	—	—	—	27.9
1.25	—	33.6	—	—
1.5	37.5	37.7	—	30.2

用表 1 中数据进行拟合, 得出当真空间隙较小时 (小于 1.5mm), 击穿电压与间隙距离的关系为

$$U = 28.9S^{0.7} \quad (1)$$

式中 U ——击穿电压
 S ——真空间隙

图 2 为灭弧室的动静触头之间的间隙与其击穿电压值的关系。图中曲线为利用式 (1) 得出的理论值, 点为四只灭弧室试验值, 其中, *、○、△、□, 分别为管号 00027、00030、030401067、030401108 的灭弧室的击穿电压。从图中可以看出, 试验值有一定的分散性, 这是由于每一个灭弧室的触头表面凹凸状况不一样, 它的局部电场强度也不一样, 因此, 击穿电压也有一定的差别。

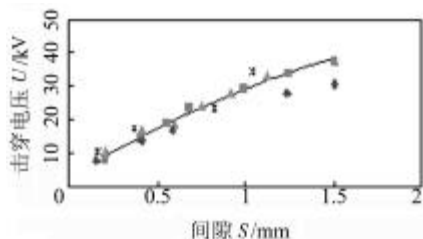


图 2 击穿电压 U 与间隙距离 S 的关系

Fig.2 Withstand voltage U vs. distance of the gap S

从图中可以看出, 用式 (1) 所表示的击穿电压与真空间隙之间的关系曲线基本上可以体现实验测量值, 即击穿电压与真空间隙之间的关系可用式 (1) 近似表示。

3 真空灭弧室的预击穿对同步关合的影响

永磁机构结构简单, 体积小, 便于断路器三相独立操作。因此, 本文采用配永磁机构的真空断路器实现电容器组的同步关合。

通过对配永磁机构的真空断路器进行动态计算^[4], 可以得出真空间隙随时间的变化关系。

图 3 所示为户外真空断路器 ZW33 在关合时的位移特性与速度特性随时间的变化曲线。

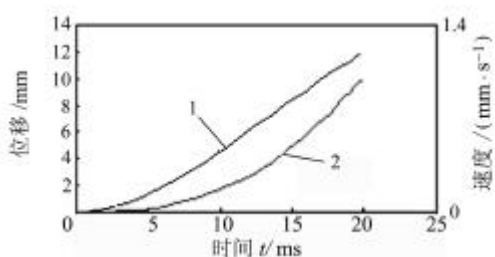


图 3 位移与速度随时间的变化

1. 速度随时间的变化 2. 位移随时间的变化

Fig.3 The stroke and velocity vs. time

结合真空间隙的击穿特性即式 (1), 可以得出当断路器进行关合时, 触头之间耐压特性随时间的变化曲线, 如图中的曲线束 V_1 与 V_2 。实现同步关合, 对断路器的合闸速度应有一个要求, 即应满足触头间耐受电压的变化率应至少大于系统电源电压在过零点时的变化率的 10%。

系统电源电压

$$U = U_m \sin \omega t \quad (2)$$

电压过零点时电压的变化率

$$\left. \frac{dU}{dt} \right|_{t=0} = U_m \omega \quad (3)$$

触头间耐受电压可以表示为

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU}{dS} \frac{dS}{dt} \quad (4)$$

将式 (1) 带入式 (4) 得触头间耐受电压

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU}{dS} \frac{dS}{dt} = 20230S^{-0.3} \times u \Big|_{S=0} = 20230u \quad (5)$$

式中 U ——系统电压的瞬时值, kV

U_m ——系统电压的峰值, kV

ω ——系统电压的角频率

S ——触头之间的距离, mm

u ——断路器触头的关合速度, m/s

要使触头间耐受电压的变化率大于系统电源电压在过零点时的变化率的 10%, 对于 10kV 三相接地系统, 应有以下式子成立

$$20230u > 1.1U_m \omega = 1.1 \times \frac{12}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \times 314 \quad (6)$$

即 $u > 0.17$ (7)

对于 10kV 三相接地系统, 当触头在关合瞬间的合闸速度大于 0.17m/s 时, 触头间耐受电压的变化率大于系统电源电压在过零点时的变化率的 10%, 可以认为 $u=0.17$ m/s 是它的临界速度。对于 10kV 三相不接地系统, 首先对 A、B 两相进行关合, 由于断路器关合时间的不同期性, 其中一相关合的是线电压, 关系式 (6) 变为

$$20230u > 1.1U_m \omega = 1.1 \times 12 \times \sqrt{2} \times 314 \quad (8)$$

即 $u > 0.29$ (9)

经过 5mm 后, 再关合 C 相, C 相断路器两端的电压则为 1.5 倍的相电压, 小于线电压。因此, 对于三相不接地系统, 临界速度为 $u=0.29$ m/s。然而真空断路器在关合瞬间的合闸速度一般都大于 0.8m/s。因此, 对于真空断路器在对 10kV 系统进行同步关合时, 一般都能符合上述速度的要求。

对于 35kV 接地系统，同样应有以下式子成立

$$20230u > 1.1U_m w = 1.1 \times \frac{40.5}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \times 314 \quad (10)$$

即 $u > 0.57$ (11)

对于 35kV 接地系统，当触头在关合瞬间的合闸速度大于 0.57m/s 时，触头间耐受电压的变化率大于系统电源电压在过零点时的变化率的 10%。对于三相不接地系统，同理可得临界速度为 $u=0.98\text{m/s}$ 。

对于 35kV 级系统，在电压过零点关合而不发生预击穿时的临界速度为 $u=0.98\text{m/s}$ ，因此对真空断路器的关合速度应有一定的要求。

4 真空断路器合闸时间的偏差对预击穿的影响

断路器分合闸时间的稳定性是实现同步关合的关键，也是同步开关的难点之一。真空断路器及其永磁机构的分合闸时间受很多因素的影响，有些是系统误差如环境温度、电源电压，这些可以通过补偿得到解决。有些则为偶然误差，很难通过补偿进行解决。为了缩小分合闸时间的分散性，就要减小分合闸时间。即合闸时间应短，减小合闸时间是以减小线圈匝数，增加线圈电流，增加控制单元的成本为代价。因此，本文以关合时间的分散性为 $\pm 1\text{ms}$ 为例，找出最佳的关合点，使得暂态分量为最小。

考虑到开关的合闸时间有分散性，结合真空断路器的预击穿，图 1 中曲线束 V_2 示出了对于 40.5kV 接地系统，开关的关合速度为 1m/s，开关的合闸时间的分散性为 $\pm 1\text{ms}$ 时^[7]，对同步关合的影响。假设此时断路器的关合时间比预定的合闸时间短 1ms，灭弧室触头间的击穿电压与时间的关系如图中的曲线 4，曲线 4 与电源电压的波形有一个交点，此交点为断路器的预击穿点，即实际关合点。为了分析真空断路器关合电容器回路时，合闸时间的偏差对预击穿的影响，以便找出最佳的预期关合点，需要对电容器组的关合涌流进行计算。图 4 所示为电容器组关合的等效电路，图中 C 为电容器组，F 为避雷器。电路参数的取值为：额定电压为 12kV，补偿电容器的容量为 7800kvar，电容器安装处的短路容量为 650MVA。即 $C=173\mu\text{F}$ ， $L_S=0.7\text{mH}$ ， $R=0.2\Omega$ 。应用电力系统电磁瞬态过程计算软件 PSCAD/EMTDC，在不同的关合条件下，对图 4 进行仿真分析，结果如表 2 所示。表 2 示出了断路器在不同的预期关合点，且认为合闸时间的偏离为 \pm

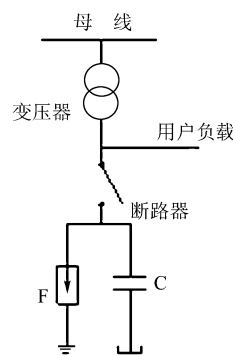


图 4 关合电容器回路的等效电路图

Fig.4 The equivalent circuit for the capacitor bank closing

表 2 断路器实际的关合点最大瞬态电压值及涌流

Tab.2 The voltages at the real making point and inrush currents for switching on the capacitor bank ($U=12\text{kV}$)

预期关合点	实际关合点的范围 /ms	关合涌流 I (pu)	电容器上电压 U (pu)
电压零点	-1.175 ~ 0.869	5.3	1.15
零后 0.1 ms	-1.058 ~ 0.957	5.0	1.14
零后 0.2 ms	-0.941 ~ 1.044	5.14	1.2
零后 0.3 ms	-0.824 ~ 1.131	5.42	1.22

1ms 时，断路器实际的关合点的时间范围与在此间最大瞬态电压值，以及此时关合电容器组涌流与额定电流的比值。图 5 为使用 PSCAD/EMTDC 软件计算出断路器的关合点为电源电压零点时，线路上的关合涌流波形图。

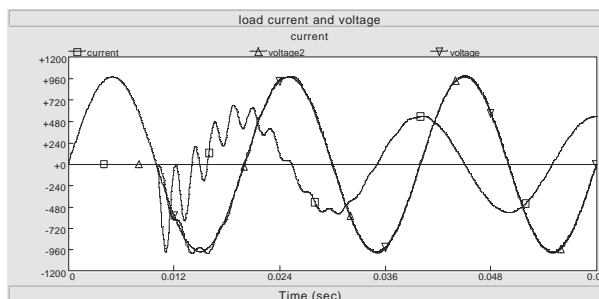


图 5 开关在电压过零时关合涌流

Fig.5 The inrush current and the capacitor voltage closing at the voltage zero

由表 2 可见当预期的同步关合为电源电压零点后 0.1ms 时，最大的关合涌流倍数较小，过电压倍数也较低。

对于 35kV 三相接地系统，表 3 示出了以关合瞬间的合闸速度为 1m/s 进行关合时，断路器在不同的预期关合点，且认为合闸时间的偏离为 $\pm 1\text{ms}$ 时，断路器实际的关合点的时间范围与在此间最大瞬态

电压值, 以及此时关合电容器组涌流与额定电流的比值。线路参数为 $C=54.5\mu\text{F}$, $L_S=2.98\text{mH}$, $R=0.2\Omega$ 。

表 3 35kV 级断路器实际的关合点最大瞬态电压值

Tab.3 The voltages at the real making point and inrush currents for switching on the capacitor bank ($U=35\text{kV}$)

预期关合点	实际关合点的范围/ms	涌流 $I/(\text{pu})$	电容器上电压 $U/(\text{pu})$
电压零点	-1.933 ~ 0.662	7.50	1.45
零后 0.1 ms	-1.758 ~ 0.729	7.04	1.41
零后 0.2ms	-1.577 ~ 0.796	6.55	1.36
零后 0.3ms	-1.393 ~ 0.862	6.02	1.30
零后 0.4ms	-1.204 ~ 0.929	5.48	1.27
零后 0.5ms	-1.01 ~ 0.996	4.91	1.25
零后 0.6ms	-0.813 ~ 1.064	4.97	1.32

由表 3 可见在电压零点后 0.5ms 为预期的同步关合时刻是比较合理的。

对于 10kV 系统或者 35kV 系统的三相不接地系统线路关合时, 则应考虑开关关合时的预击穿电压为线电压。其在电压过零点关合而不发生预击穿时的临界速度也发生了变化, 当考虑开关合闸时间的分散性时, 开关比较合理的预置关合点也会发生相应的变化。

5 结论

对于 10kV 系统和 35kV 系统, 分别存在一个临界合闸速度, 如果合闸速度低于该速度, 真空断路器在电压过零点进行关合时, 会发生预击穿; 断路器关合电流的点就会偏离预定的点, 合闸速度越低, 偏离越严重。如果断路器的关合速度大于临界关合速度, 真空断路器在电压过零点进行关合时, 不会发生预击穿现象, 断路器能够在电压过零点进行关合。真空断路器进行同步关合时, 考虑合闸时间的分散性为 $\pm 1\text{ms}$, 对于 10kV 系统和 35kV 系统, 使得关合时涌流最小的最佳预期关合点与断路器的关

合速度, 系统的电压以及参数有关。

参考文献

- 1 Delfino B, Fornari F, Gemme C, et al. Power quality improvement in transmission and distribution networks via synchronous switching. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 (1) : 367 ~ 372
- 2 Lin K C, Chen N. Voltage-peak synchronous closing control for shunt capacitors. IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib, 1998, 145, (3) : 233 ~ 236
- 3 Carlo Cereda et al. Synchronous medium voltage circuit-breakers: ABB solution based on magnetic drive and electronic control. CIRED 99-15th Conference on Electricity Distribution, Nice, June 1999: 13 ~ 21
- 4 You Yimin, Chen Degui, et al. The optimal design parameters selection of permanent actuator for vacuum circuit breaker based on dynamic characteristic analysis. XXth ISDEIV Proceedings, Tours (France) , 2002 : 584 ~ 587
- 5 林莘. 永磁机构与真空断路器. 北京: 机械工业出版社
- 6 王季梅. 真空开关. 北京: 机械工业出版社
- 7 Carlo Cereda etc. Synchronous medium voltage circuit-breakers: ABB Solution Based on Magnetic Drive and Electronic Control. CIRED 99-15th Conference on Electricity Distribution, Nice, June 1999: 13 ~ 21

作者简介

游一民 女, 1963 年生, 高级工程师, 在职博士, 主攻高压电器及其产品设计。

陈德桂 男, 1933 年生, 教授、博士生导师, 主攻低压电器及其智能化, 电器的计算机辅助设计与可视化仿真等。

(上接第 84 页)

- 3 Chan C C, Chan K T. An advanced permanent magnetmotor drive system for battery-powered electric vehicles. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1996, 45 (1) : 180 ~ 188
- 4 Shigeo Morimoto, Yi Tong, Yoji Takeda, et al. Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1994, 41 (3) : 511 ~ 516
- 5 唐任远等. 现代永磁电机理论与设计. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 6 Roy S Colby, Donald. An efficiency-optimizing

permanent magnet synchronous motor drive. IEEE Trans. on Industry Applications, 1998, 24(3) : 462 ~ 469

- 7 Sadegh Vaez, M A Rahman. Adaptive loss minimization control of inverter-fed IPM motor drives. IEEE Conference of PESC '97 Record, 1997, 35(5) : 861 ~ 868

作者简介

许家群 男, 1973 年生, 工学博士, 研究方向为特种电机及其控制技术。

朱建光 男, 1970 年生, 博士研究生, 研究方向为电机控制技术