

相控开关的最佳投切相位研究

丁富华, 邹积岩, 段雄鹰

(大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116023)

Research on Optimum Switching Phase of Phasing Switches

DING Fu-hua, ZOU Ji-yan, DUAN Xiong-ying

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

摘要: 相控开关的核心问题之一是最佳投切相位的确定,而最佳投切相位又与断路器的预击穿绝缘特性密切相关。针对断路器预击穿特性对最佳同步关合目标相位的影响,文中引入了关合系数 k , 并对其进行分类讨论,详细分析了断路器合闸时的预击穿物理过程,同时考虑到断路器动作时间分散性,得到了不同绝缘强度下降率(RDDS)与机械分散性条件下的最佳投切相位计算公式。

关键词: 相控开关; 预击穿; 绝缘强度下降率; 最佳投切相位

中图分类号: TM501; TM561 **文献标识码:** A

Abstract: One of the dominant factor in phase controlled switching is the determination of optimal switching phase, while the optimal switching phase is mainly affected by the pre-strike characteristics of the circuit breaker. According to the pre-strike phase associated with the mechanical scatters, the making factor k is introduced and discussed in classification, and the pre-strike physical process is analyzed in detail. The computing formulas of optimum switching phase are obtained as function of decrease rate of dielectric strength (RDDS) and mechanical scatters.

Key words: phasing switch; pre-strike; decrease rate of dielectric strength(RDDS); optimum switching phase

1 引言

断路器合分闸时所产生的涌流和过电压等暂态冲击不仅对断路器本身与用户设备产生危害,还会引起继电保护装置误动,甚至危及电力系统稳定。上述暂态特性与合分闸时系统的初相角密切相关,通过控制断路器合分闸时参考电压或电流的初相角,不仅能

够有效地削弱相关电磁效应,而且可以省掉合闸电阻、合闸电感或避雷器等辅助设备,降低系统成本^[1]。

相控开关技术也称同步开关技术,最早提出于20世纪70年代。进入20世纪90年代中期后,相控开关迅速走向实用化并取得了令人满意的效果^[2-4],目前已成为智能化电器的研究热点之一。近年来,国内关于相控开关技术只在理论和可行性方面做了一些探讨,在中压领域尚无实际应用^[5-6]。

在最合适的相位进行合分闸操作,才能最大限度地抑制涌流与过电压,因此最佳投切相位的确定就成为相控开关的核心问题之一。而要确定相控开关的最佳投切相位,就需要详细地分析断路器的机械特性与绝缘特性。笔者论述的基于断路器的机械分散性与关合预击穿特性的最佳投切相位算法,为选相控制技术的实现提供了理论依据,具有实用价值。

2 相控开关的选相投切原理

相控开关技术实质上就是通过控制断路器合分闸时电压或电流的初相角,在电压过零时刻关合;控制断路器分断时的燃弧时间,使得在电流过零、电弧熄灭时触头间隙能承受系统恢复电压,从而减小乃至消除相关的电磁冲击效应。在系统电压过零点选相合闸的基本原理和时序,见图1。

控制系统实时检测系统电压过零点, 当在 t_1 时

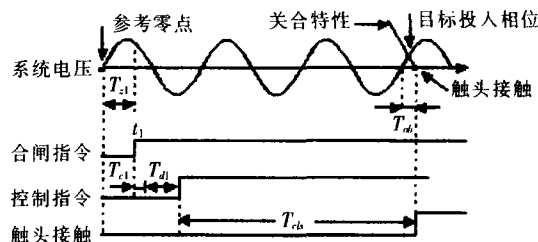


图1 同步关合时序原理图

收稿日期:2005-05-08

基金项目:自然科学基金项目(50107000)

作者简介:丁富华(1977-),男,博士研究生,主要从事智能化电器方面的研究。

到断路器合闸时间分散性及放电分散性的耐压特性边界线、实际合闸位置应在图中的 $D_1 \sim F_1$ 的范围内、呈标准方差为 σ 的正态分布。

为了使 A_1, C_1 处的电压相等而设 E_1 点为目标合闸时刻、这样在合闸时间偏移范围内预击穿电压最小 观察图 3, 显然有:

$$t_{11} = 3\sigma \tag{11}$$

当断路器在 O 点闭合时, 没有发生预击穿, 即其最小预击穿电压为 0; 而当断路器在 A_1 或 C_1 点发生预击穿(分别在 E_1, F_1 点闭合)时, 所对应的最大预击穿电压为:

$$u_{pmax1} = -U_m \sin(-\omega t_{A1}) = U_m \sin(3\omega\sigma) \tag{12}$$

设所要求的预击穿电压最大值为 $\gamma U_m (0 < \gamma < 1)$, 并满足:

$$\gamma U_m \leq U_m \sin(3\omega\sigma) \tag{13}$$

则所要求预击穿电压下的断路器机械分散性应满足:

$$\sigma \leq \frac{\arcsin(\gamma)}{3\omega} \tag{14}$$

关合特性 $u_{p1}(t)$ 可表示为:

$$u_{p1}(t) = -k_p t + \gamma U_m = -k\omega U_m t + \gamma U_m \tag{15}$$

令 $u_{p1}(t) = 0$, 则可得 $k \geq 1$ 时的最佳目标关合相位对应时刻为:

$$t_{d1} = \frac{\gamma}{k\omega} \tag{16}$$

(2) $k < 1$ 的情况

当 $k < 1$ 时, 关合特性曲线可能平移到与电压波形相切于点 A , 见图 4。如果继续右移, 则交点转到 A_2 点, 此时预击穿点将出现在 A_2 右边的区域, 从而点 A_2 成为关合特性曲线与外施电压相交的最小相位点。

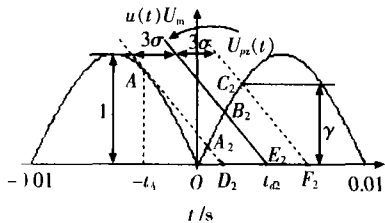


图 4 $k < 1$ 时最佳关合相位示意图

在特定的机械分散特性下, 应选择 E_2 点为最佳目标关合时刻, 从而保证断路器合闸时间最大偏移量下的预击穿电压(对应图 4 中的 C_2 点)不超过预设阈值, $u(t)$ 在 A 点的切线斜率的大小与关合绝缘特性相等, 即:

$$\left. \frac{du(t)}{dt} \right|_{t=t_1} = -\omega U_m \cos(\omega t_1) = -k\omega U_m \tag{17}$$

从而得到:

$$t_1 = \frac{\arccos(\gamma)}{\omega} \tag{18}$$

设 $u(t)$ 在 A 点切线(直线 A_2, D_2)的方程为:

$$u_p(t) = -k_p(t) + b = -k\omega U_m t + b \tag{19}$$

把点 $A(-t_1, U_m \sin(\omega t_1))$ 代入上式得:

$$b = U_m \sin(\omega t_1) - U_m k\omega t_1 \tag{20}$$

则式(19)可化为:

$$u_p(t) = U_m(-k\omega t + \sin(\omega t_1) - k\omega t_1) \tag{21}$$

直线 B_2, E_2 为 A_2, D_2 右移 3σ 得到, 故其方程为:

$$u_{p2}(t) = U_m[-k\omega(t - 3\sigma) + \sin(\omega t_1) - k\omega t_1] \tag{22}$$

令 $u_{p2}(t) = 0$, 得:

$$t_{d2} = \frac{\sin(\omega t_1)}{k\omega} - t_1 + 3\sigma \tag{23}$$

把式(18)代入上式, 可得 $k < 1$ 时的最佳目标关合相位对应时刻为:

$$t_{d2} = \frac{\sqrt{1-k^2}}{k\omega} - \frac{\arccos k}{\omega} + 3\sigma \tag{24}$$

直线 C_2, F_2 为 A_2, D_2 右移 6σ 得到, 它与系统电压交点 C_2 处有如下等式成立:

$$-k\omega U_m[t - (t_{d2} + 3\sigma)] = U_m \sin(\omega t_{C2}) \tag{25}$$

把式(24)代入上式, 并化简后得:

$$\sin(\omega t_{C2}) + k\omega t_{C2} + k \arccos(k) - \sqrt{1-k^2} - 6k\omega\sigma = 0 \tag{26}$$

解上方程求出 C_2 点对应的时刻 t_{C2} , 则可以得到它所对应的最大预击穿电压为:

$$U_{pmax2} = U_m \sin(\omega t_{C2}) \tag{27}$$

同理, 在 A_2 点有方程:

$$\sin(\omega t_{A2}) + k\omega t_{A2} + k \arccos(k) - \sqrt{1-k^2} = 0 \tag{28}$$

解上方程求出 A_2 点对应的时刻 t_{A2} , 则可以得到它所对应的最小预击穿电压为:

$$U_{pmin2} = U_m \sin(\omega t_{A2}) \tag{29}$$

3.3 仿真结果与分析

根据式(16), 式(24)可以得到断路器在不同的机械分散性(3σ)及关合系数 k 下的最佳关合相位。分别以机械分散性与关合系数作为横坐标, 最佳关合相位对应时刻为纵坐标, 利用 Matlab 6.1 仿真后的处理结果见图 5, 图 6。

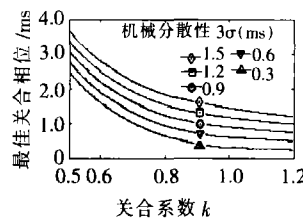


图 5 关合系数与最佳关合相位关系图

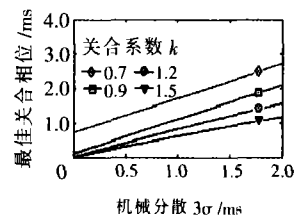


图 6 机械分散性与最佳关合相位关系图

当断路器的 $RDDS$ 与 3σ 已知时, 可以参考图 5 或图 6 选择最佳关合相位, 二者结果是一致的。如 $k=0.9, 3\sigma=0.9$ ms 时对应的最佳关合相位约为 1.0 ms (18°), 由下文内容可知, 以该相位作为最佳关合相位的最大预击穿电压为 $0.2818 U_m$, 最小预击穿电压为 $0.0158 U_m$ 。

方程(26), (28)是超越方程, 一般情况下无法求

出其解析解,但是可以用牛顿迭代法求出其数值解^[8]。用C语言编程算出不同 σ 与 k 时的预击穿时刻,进而可以求出最大预击穿电压与最小预击穿电压,结果见图7与图8。

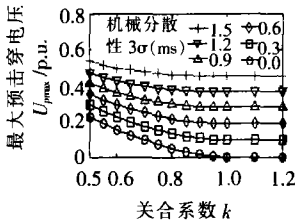


图7 关合系数、机械分散性与最大预击穿电压关系图

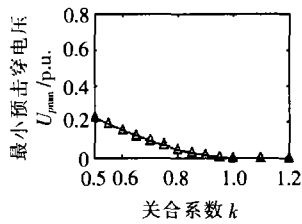


图8 关合系数、机械分散性与最小预击穿电压关系图

分析图7,图8可知,随着 k 的增加,同步合关的最大预击穿电压减少,特别当 $k \geq 1$ 时,最大预击穿电压只受断路器合闸时间偏差的影响,断路器可在电压零点实现合关;当 k 小于某一阈值时,若断路器机械分散性较大,最小预击穿电压就达不到预定要求;具有相同 k 的断路器,随着机械分散性的增加,最大预击穿电压也随之增加。另外,选相合闸后的预击穿电压在最小预击穿电压与最大预击穿电压之间,根据上图亦可判断给定断路器能否在要求的预击穿电压范围内满足同步合关要求。

综上所述,应采取相关措施提高断路器动作时间稳定性、减小合闸时间偏移量,同时提高合闸速度、增大 k 值,降低最大预击穿电压。需要说明的是,对交流10 kV电压等级的真空断路器,从预击穿的固有特性和概率统计,在合闸过程中的预击穿机会接近等于零^[9],即10 kV领域的选相操作可不考虑预击穿的影响,但更高电压等级中则不容忽视。

4 预燃弧时间与最佳分断相位

断路器在开断容性负荷(并联电容器组、空载线路等)与感性负荷(电抗器、变压器等)时所产生的重燃或重击穿过电压容易对电力设备绝缘产生危害。选相分断时,根据不同的应用场合,通过控制断路器的分断相位,获得较长的燃弧时间,就可以在电流过零、电弧熄灭时获得较大的触头开距与介质恢复强度,此时触头间隙能承受系统恢复电压,从而有效避免了重燃与重击穿过电压,即实现了同步分断。所谓最佳分断相位,即为处于电弧熄灭、触头间距能承受系统暂态恢复电压的区间范围。如10 kV真空断路器,若其分断速度为1.3 m/s,燃弧时间设定为3~5 ms,则对应触头间隙为3.9~6.5 mm,足以满足电流正常过零、电弧熄灭时触头间隙不发生重燃或重击穿的要求。

断路器的分断过程开始于在电流过零前某一瞬间拉开触头,引发电弧。对于特定的具有相对高分断

速度的断路器而言,存在着能保证分断的最小燃弧时间与某一恢复电压下扩散电弧后的临界开距^[10]。因此,同步分断也可以用于开断短路电流。在分断操作时,控制断路器燃弧时间,使得电弧电流在经过最小燃弧时间时过零,同时断路器触头分开后产生的过电压最小,如此可以减少断路器触头烧蚀,延长触头电寿命,并能提高断路器开断能力。

同步分断要求断路器的分断速度足够高,如此电弧才能在首次过零时熄灭。需要注意的是,为保证在电流过零时开断,应避免截流发生,否则会形成截流过电压,从而削弱选相控制的优点。

5 结语

相控开关技术能够有效地削弱断路器投切所引起的暂态过程,提高系统稳定性、电能质量及开关开断能力。文中引入了关合系数 k ,并分 $k \geq 1$ 与 $k < 1$ 两种情况,讨论了如何根据断路器关合绝缘特性、机械操作时间分散性确定最佳投切相位,所得结果对于工程应用具有指导意义。

参考文献:

- [1] Delfino B, Fornari F, Gemme C, et al. Power Quality Improvement in Transmission and Distribution Networks Via Synchronous Switching [J]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES, 2001, 19(28): 367-372.
- [2] Lee W Y, Park K Y, Chong J K, et al. A Method to Decide the Switching Instants of Controlled Switching Circuit Breaker for Shunt Reactors [J]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2002, 3(10): 1760-1765.
- [3] Kohyama H, Wada K, Hidaka M, et al. Development of 550 kV and 362 kV Synchronous Switching Gas Circuit Breakers [A]. Transmission and Distribution Conference and Exposition[C], IEEE/PES, 2002(1): 597-602.
- [4] Cereda C, Gemme C, Reuber C. Synchronous Medium Voltage Circuit Breakers: ABB Solution Based on Magnetic Drive and Electronic Control [A]. CIRED 15th Conference on Electricity Distribution[C], Nice, CIRED, 1999.
- [5] 丁富华, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控真空断路器投切空载变压器的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 89-93.
- [6] 钱家骧. 相位控制高压断路器的动向 [J]. 高压电器, 2001, 37(1): 38-40.
- [7] Naik B R, Asche R G, Billings S, et al. Field Verification of Controlled Switching GCB [A]. Power Engineering Society Summer Meeting[C], IEEE, 2002(1): 21-25.
- [8] 张池平, 施云慧. 计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] 王季梅. 真空电弧理论研究及其测试 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993.
- [10] Sun Peng, Konig D. Optimal Controlling of the Interruption of High Short Circuit Currents with A Monophase Vacuum Interrupter [A]. Proceedings of the 19th ISDEIV [C], Xi'an, 2002(2): 427-430.