

126 kV三断口真空断路器容性选相关合仿真研究

以荆门特高压110 kV母线并联电容器组作为基础,对126 kV三断口真空断路器投入单组110 kV并联电容器组的合闸暂态过程进行仿真。研究串联电抗器电抗率、断口合闸分散性、合闸相位误差以及三相合闸不同期性对合闸涌流的幅值、频率和衰减时间的影响规律。在PSCAD暂态仿真软件中建立等效模型,对各暂态过程的涌流进行仿真计算,并对仿真结果进行了深化分析。

钟希均 刘 波 万德春/南瑞集团(国网电力科学研究院)

0 引言

在电力系统无功补偿过程中,需频繁投切容性负载。但真空灭弧室用于电容器组投入时存在涌流严重的问题。为解决容性关合涌流问题,目前常用的方法有通过串联涌流限流器来降低高频合闸涌流幅值,从而减少涌流对真空开关触头的破坏。但该方法增加了系统能耗,且降低了系统无功补偿效率。采用动态涌流控制技术,系统复杂而且成本较高^[1-4]。而采用相控技术,在电源电压过零时刻合闸,所产生的涌流最小。近年来,国内外学者们提出了各种选相控制策略应用于断路器投切领域。其中,以西安交大及大连理工为代表的国内高校最早在容性负载选相投切领域做了大量研究工作,提出了针对特定负载及系统接线方式的选相控制策略^[5-6]。

早在2009年国内国网电科院项目组已提出采用多断口串并联的技术解

决126 kV及以上真空开关高电压、大容量开断难题^[6-8]。采用多断口串联,需要解决各断口间均压与非同期性难题。同时针对110 kV及以上容性负载投切采用多断口方式,目前国内尚无先例。而考虑断口间的不同期及断口本身的分散性,同时计及断口预击穿特性的多断口选相最佳相位研究更是稀少^[9-10]。

本文从工程应用角度,结合荆门特高压站110 kV无功补偿系统参数,通过搭建PSCAD仿真模型,对多断口真空断路器断口合闸分散性、合闸相位误差以及三相合闸不同期性对合闸涌流的幅值、频率和衰减时间的影响规律及串联电抗器电抗率对合闸涌流影响的特性进行了仿真研究,并给出了多断口容性选相关合最佳相位角。

1 仿真模型

1.1 仿真参数的选择

荆门特高压线路110 kV母线并联两组电容器,一组为电抗率为12%的电容器组,其单相电容组的容量为72.2 Mvar,单相电容器组的容值为12.35 μF 。电抗率为5%的电容器组单相的容值为 $C=13.32 \mu\text{F}$ 。主要电气参数如表1所示。

1.2 仿真模块的构建

(1) 电源模块

110 kV系统电源采用三角形联结,



钟希均/高级工程师

关键词/Keywords

真空断路器·
选相·
容性关合·
涌流·

表1 主要电气参数

参数	额定电压/kV	线路电阻/m Ω	单相电容值/ μF	5%串联电抗器/mH	12%串联电抗器/mH
数值	126	200	13.32	38.03	98.45

进行星形等效后的相电压幅值为72.74 kV。电源内阻和电抗忽略不计。

(2) 三断口真空断路器模块

通过试验和仿真得到了三断口真空断路器（由3个40.5 kV真空断路器模块串联而成）的电容（含均压电容）等效模型如图1所示，每个断口并联均压电容1 000 pF。真空断路器每个断口由PSCAD的断路器和自定义预击穿判定模块组成。

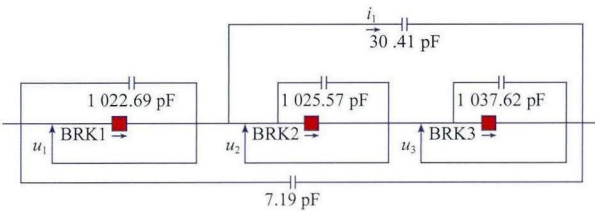


图1 三断口断路器模块

(3) 预击穿判定模块

预击穿判定模块采用MODELS的自定义模块，如图2所示。输入量为断口电压及预期合闸时间，通过预击穿判据判断后，输出断口的预击穿信号：BRK为1表示未发生预击穿；BRK为0表示断口发生预击穿，断口导通。预击穿判据为：当断口电压 u 与介质绝缘强度 u_d 满足 $u > u_d$ 时，认为发

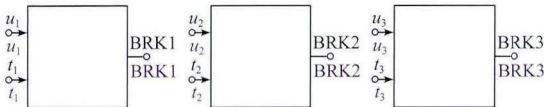


图2 预击穿判定模块

生预击穿。

根据现场试验数据，对40.5 kV真空断路器模块的介质动态绝缘强度 u_d 与触头合闸时间 t 进行拟合，得到触头合闸前5 ms内的介质绝缘强度的三段拟合曲线。各段拟合公式分别为

$$\begin{cases} u_d = 23.5t^{0.846} & 0 < t \leq 0.44 \\ u_d = 38.1t^{1.44} & 0.44 < t \leq 1.45 \\ u_d = 51.4t^{0.610} & 1.45 < t \leq 5 \end{cases} \quad (1)$$

图3为仿真中建立的介质绝缘强度拟合曲线，即预击穿电压的包络线。其中，点A代表断路器预期合闸的位置，即触头完全接触的位置。当断口的恢复电压超过包络线时，断口即发生预击穿。

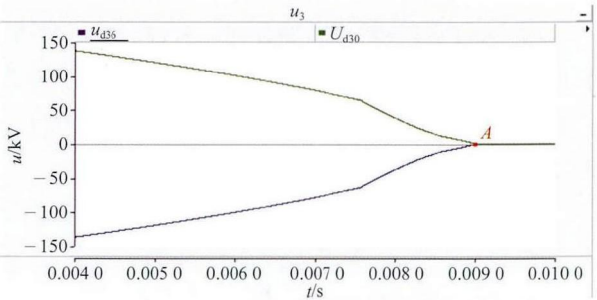


图3 介质绝缘强度拟合曲线

(4) 三相电路仿真模型

搭建合闸涌流的三相电路仿真模型，如图4所示。其中仿真步长设置为1 μ s，仿真时间为0.5~2 s，电源初相角为0。并考虑预击穿对合闸过程的影响。

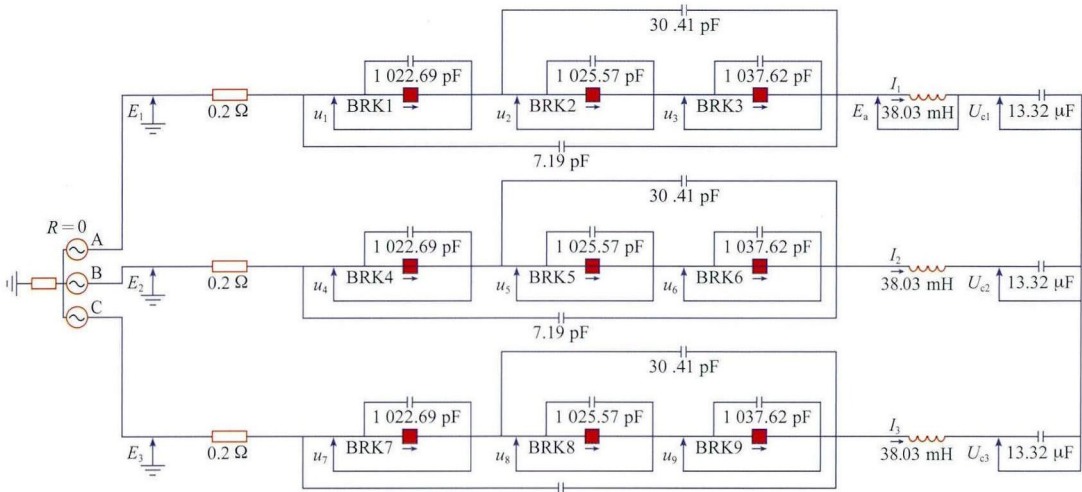


图4 三相电路仿真模型

在进行电抗器、三断口分散性及相位误差对关合涌流影响的仿真中,对仿真进行简化,可认为三相断路器同期合闸,此时三相等效电路参数完全对称,三相电路的暂态过程与单相电路的暂态过程完全相同,可采用图5所示的单相电路模型进行等效。

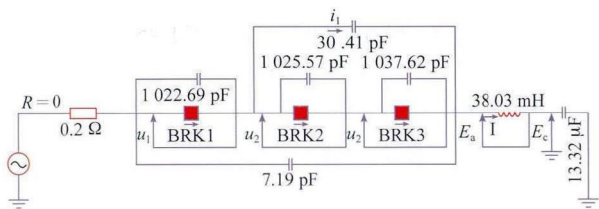


图5 单相电路等效模型

2 电抗器对关合涌流的影响

假定断路器各断口同期合闸,分别对串联5%串联电抗率、12%串联电抗率电抗器和不串联电抗器三种情况进行仿真,线路电抗值分别为38.03 mH、91.27 mH和1 mH。

1) 在 $t=10\text{ ms}$ 时刻进行合闸,即在电压过零点进行合闸,得到串联不同电抗器的合闸流过电容的涌流数据如表2所示。

表2 电压过零时刻合闸,串联不同电抗率电抗器的涌流情况

参数 电抗	涌流幅值 (pu)	涌流频率/Hz	衰减时间/s
5%串联电抗率	1.93	225	0.2
12%串联电抗率	1.90	143	2
不串电抗	1.97	1 370	0.02

从仿真中数据可以得到,在电压过零时投入电容器组,由于产生的合闸涌流峰值都比较小,此时串联电抗器对涌流幅值的影响很小。但是,随着串联电抗器电抗率的提高,暂态涌流的频率会大大降低,随之也带来衰减时间变长。

2) 在 $t=15\text{ ms}$ 时刻合闸,即电压相位为 90° ,电压幅值最大时刻合闸。得到串联不同电抗器的涌流情况如表3所示。

当在电压相角为 90° 时合闸,串联电抗器可以大大降低涌流的幅值,并将涌流的幅值控制在5.1 (pu) 之内,5%电抗率和12%电抗率的串联电抗器对涌流幅值的影响相差不大,主要差别在于涌

表3 电压峰值时刻合闸,串联不同电抗率电抗器的涌流情况

参数 电抗	涌流幅值(pu)	涌流频率/Hz	衰减时间/s
5%串联电抗率	5.10	225	0.2
12%串联电抗率	4.02	143	2
不串电抗	33	1 370	0.02

流频率和衰减时间。

3 三断口合闸分散性对关合涌流的影响

考虑预击穿对合闸过程的影响,对三断口真空断路器投入5%串抗的电容器组的合闸过程进行仿真,研究三断口合闸分散性对关合涌流的影响。断路器预期在 $t=10\text{ ms}$ 时刻(即电压过零点)进行合闸,设 t_1 、 t_2 和 t_3 分别为断口1、断口2和断口3偏离合闸时刻的时间误差,负值表示超前,正值表示滞后。对三断口分散性为0.5 ms、1 ms和1.5 ms的三种情况进行仿真。

(1) 不同断口分散性的最大合闸涌流仿真分析

考虑三断口最大分散性为1 ms,对以下五种断口不同期的极端情况进行仿真:① $t_1=-1\text{ ms}$, $t_2=0\text{ ms}$, $t_3=1\text{ ms}$ 的情况;② $t_1=t_2=t_3=-1\text{ ms}$ 的情况;③ $t_1=t_2=-1\text{ ms}$, $t_3=1\text{ ms}$ 的情况;④ $t_1=-1\text{ ms}$, $t_2=t_3=1\text{ ms}$ 的情况;⑤ $t_1=t_2=t_3=1\text{ ms}$ 的情况。

图6为第一种情况仿真得到的涌流波形,其中涌流最大幅值为2.11 (pu)。

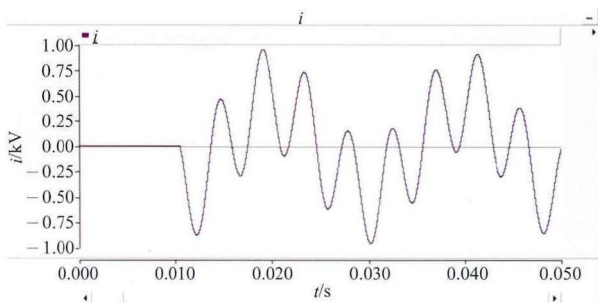


图6 涌流波形

图7为第一种情况三断口的电压波形,可见合闸之前三断口的电压分布比较均匀,断口1、断口2和断口3电压幅值分别为35.8 kV、33.7 kV和33.3 kV。断口1在9 ms时刻最先合闸,从图7b可以

看出，断口1在8.4 ms发生预击穿，预击穿电压为17.1 kV，发生预击穿后，电压迅速降低至0。断口2在10 ms时刻合闸，从图7c可知，断口2在9.4 ms发生预击穿，预击穿电压为16.7 kV。在断口1发生预击穿后，断口2的电压迅速增加，并且产生幅值为7.6 kV、频率为34 kHz的振荡电压，这是由于断口1发生预击穿瞬间断口导通，断口2和断口3立即承担原来三断口承担的电压，电压发生突变，断口间的电容与电抗器发生谐振，产生暂态的振荡电压。断口3在11 ms时刻合闸，从图7d可知，断口3在10.5 ms发生预击穿，预击穿电压为15.9 kV。断口1发生预击穿后到断口2发生预击穿前，断口3电压的暂态过程基本相同，因为均压电容使两断口的电压比较均匀。断口2发生预击穿后，断口3的电压迅速增加，但振荡幅值变小（为5 kV），振荡频率减小至25 kHz。原因为断口2发生预击穿

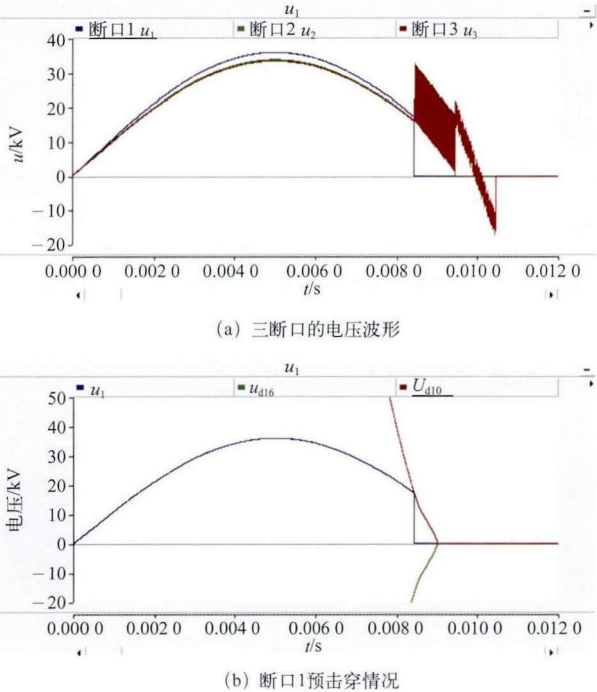


图7 三断口电压波形及预击穿情况

后，其支路电容被短路，回路电容变小，导致振荡幅值和频率减小。

三断口分散性会导致各断口不同期发生预击穿。加入均压电容后，会在后发生预击穿的断口上产生一定的振荡电压，加速后预击穿断口的预击穿。

五种极端情况的涌流和预击穿情况如表4所示，预击穿时刻以电压过零点为参考点。从表中可以看出，电压过零点合闸时，考虑1 ms的断口分散性，最大涌流幅值为3.2 (pu)，发生在-1 ms的时刻，即三断口同时超前预期合闸时间1 ms合闸。三断口断路器投入电容器组，涌流幅值只与最后发生预击穿断口的预击穿相位有关，其预击穿相位偏离电压过零点越多，产生的涌流幅值会越大，如图8所示。断口发生预击穿的相位偏离电

表4 考虑1 ms断口分散性对合涌流的影响

极端情况	涌流幅值(pu)	断口1预击穿时刻/ms	断口2预击穿时刻/ms	断口3预击穿时刻/ms	后合断口预击穿时刻/ms
$t_1 = t_2 = t_3 = -1 \text{ ms}$	3.20	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
$t_1 = t_2 = -1 \text{ ms}, t_3 = 1 \text{ ms}$	2.04	-1.6	-1.55	+0.08	+0.08
$t_1 = -1 \text{ ms}, t_2 = 0 \text{ ms}, t_3 = 1 \text{ ms}$	2.11	-1.6	-0.6	+0.5	+0.5
$t_1 = -1 \text{ ms}, t_2 = t_3 = 1 \text{ ms}$	2.13	-1.6	+0.2	+0.5	+0.5
$t_1 = t_2 = t_3 = 1 \text{ ms}$	2.32	+0.7	+0.7	+0.7	+0.7

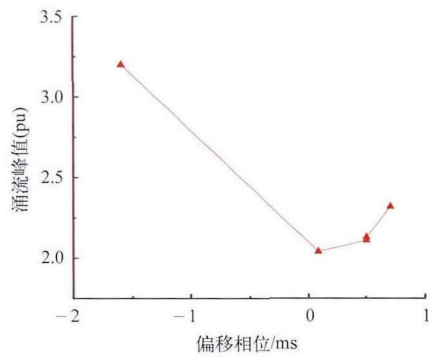


图8 涌流幅值与后合断口预击穿位置的关系

压中性点越严重,预击穿的电压也越大,实际上是由于断口分散性的影响,导致断口可能发生预击穿的电压增大,从而可能产生较大涌流。

利用相同的方法得到0.5 ms和1.5 ms情况下的最大涌流和各断口预击穿情况。仿真结果显示:考虑0.5 ms断口分散性的最大涌流为2.31 (pu),最大涌流发生在-1 ms时刻。且三断口基本同时发生预击穿,预击穿时间为9.2 ms,预击穿电压为9.26 kV。考虑1.5 ms断口分散性的最大涌流为3.96 (pu),最大涌流发生在-1 ms时刻。三断口基本同时发生预击穿,预击穿时间为7.8 ms,预击穿电压为22.7 kV。

(2) 不同断口分散性的最大合闸涌流对比分析

考虑0.5 ms、1 ms和1.5 ms三种不同断口分散性,合闸过程最大涌流均发生在-1 ms时刻,即三断口同时超前电压过零点1 ms的情况。表5列出了最大涌流和预击穿相位与断口分散性的关系,并绘制成曲线如图9所示。

表5 最大涌流和预击穿相位与断口分散性的关系

断口分散性/ms	最大涌流幅值 (pu)	预击穿位置/ms	预击穿电压/kV
0.5	2.31	-0.8	9.26
1.0	3.20	-1.6	17.3
1.5	3.96	-2.2	22.7

可见断口分散性越大,发生预击穿的电压和最大涌流幅值也会相应增加,涌流的幅值与预击穿电压呈线性相关。因此可以认为,断口分散性导致断口预击穿的相位产生偏移,使断口预击穿的电压增加,从而导致涌流幅值增加。

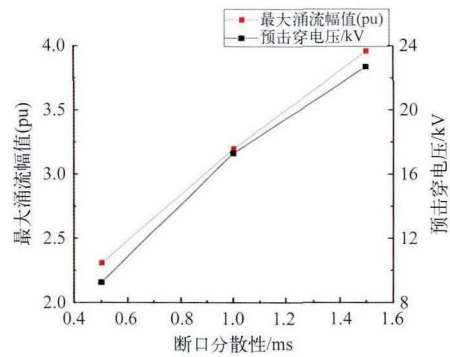


图9 合闸最大涌流与断口分散性及预击穿电压的关系曲线

4 相位误差对关合涌流的影响及最佳目标相位的选择

改变合闸相位,研究相位误差对关合涌流的影响,并且考虑到真空断路器最大分散性1 ms的情况,根据不同合闸相位最大涌流幅值的大小,确定出最佳合闸时间。改变预期合闸位置,运用前文仿真方法找到各个合闸位置的最大涌流。预期合闸位置分别设置为相对电压过零点的时间, $t_{y1}=0$ ms, $t_{y2}=0.1$ ms, $t_{y3}=0.2$ ms, $t_{y4}=0.3$ ms, $t_{y5}=0.4$ ms, $t_{y6}=0.5$ ms, 得到各种情况的合闸涌流数据如表6所示。将最大涌流幅值和预期合闸相位之间的关系绘制成曲线,如图10所示。

表6 最佳预期合闸相角的选择

t_y /ms	最大涌流幅值 (pu)	预击穿位置/ms
0	3.20	-1.6
0.1	3.03	-1.4
0.2	2.86	-1.3
0.3	2.70	-1.2
0.4	2.60	+1.0
0.5	2.70	+1.1

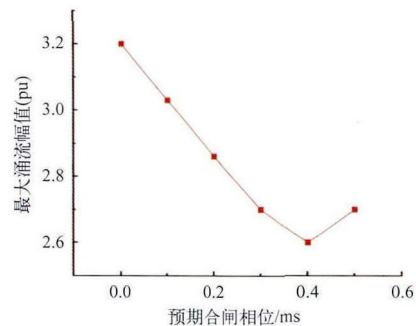


图10 最大涌流幅值与不同预期合闸相位关系曲线

从图表可以看出, 存在一个最佳的合闸相位, 偏离这个相位越大, 可能产生的最大涌流幅值也会越大。考虑1 ms断口分散性的情况, 在电压过零后0.4 ms进行合闸, 最大涌流幅值最小, 可以将其控制在2.6 (pu) 内。

5 并联电容器组选相合闸暂态过程

以A相相电压的相角作为基准, A、B和C三相同期在 $t=5$ ms时合闸, 即合闸角为 90° 时进行合闸, 合闸涌流最大值发生在A相, 涌流峰值为2.20 kA, 约为4.9 (pu)。

三相断路器不同期合闸操作可以等效为先合两相再合一相的情况。假设A相电压相角作为合闸参考相角, 三相电容器组的关合顺序为C-B-A。

考虑实际三相断路器分散性为0.5 ms、1 ms和1.5 ms的情况, 对断路器三相选相合闸及存在三相分散性的选相合闸进行仿真。考虑极端操作情况进行合闸: 分散性导致CB两相可能产生的电压 $|U_{CB}|$ 最大, 分散性导致A相合闸位置偏离电压过零点最多, 即 $|U_A|$ 最大。

(1) 不考虑三相断路器分散性的选相合闸

C、B、A三相合闸时间如下: C相为 $t_c=3.33$ ms ($U_c=0$), B相为 $t_b=5$ ms ($U_b=0$), A相为 $t_a=10$ ms ($U_a=0$)。

选相合闸的涌流最大幅值发生在B相, 为1.07 kA (稳态幅值为0.45 kA), 即2.4 (pu)。相比较于不采用选相策略, 涌流的幅值明显下降。

(2) 考虑0.5 ms三相断路器分散性的选相合闸

考虑0.5 ms三相分散性, 采用合闸策略, $|U_{CB}|$ 最大的情况, C相合闸操作时间为2.73 ms, B相合闸时间为5.5 ms; 在 $|U_A|$ 最大时, A相合闸时间为9.5 ms。涌流最大值发生在A相, 为1.37 kA (3.0 (pu))。

(3) 考虑1 ms三相断路器分散性的选相合闸

考虑1 ms三相分散性, 采用合闸策略, $|U_{CB}|$ 最大的情况, C相合闸操作时间为2.33 ms, B相合闸时间为6 ms; $|U_A|$ 最大的时刻, A相合闸时间为9 ms。涌流最大值发生在A相, 为1.67 kA (3.7 (pu))。

(4) 考虑1.5 ms三相断路器分散性的选相合闸

考虑1.5 ms三相分散性, 采用合闸策略, $|U_{CB}|$ 最

大的情况, C相合闸操作时间为1.73 ms, B相合闸时间为6.5 ms; $|U_A|$ 最大的时刻, A相合闸时间为8.5 ms。最大涌流发生在A相, 为1.97 kA (4.4 (pu))。

综上所述, 三相断路器分散性对合闸涌流的影响非常大, 如图11所示, 随着三相断路器分散性的增加, 产生最大合闸涌流幅值也迅速增加。

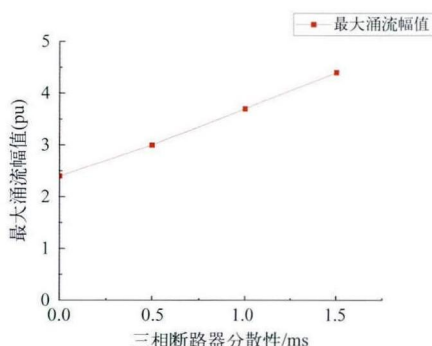


图11 最大涌流幅值与三相断路器分散性的关系曲线

6 结束语

文章对126 kV三断口真空断路器投入110 kV并联电容器组的合闸暂态过程进行仿真, 得到以下结论:

1) 串联5%和12%电抗率的电抗器可以大大削弱涌流的幅值和频率, 而且随着串联电抗率的增加, 对涌流的削弱作用越来越强。但是串入电抗器以后, 涌流的衰减时间会变长, 甚至可以达到1 s。

2) 在电压零点关合, 随着断口分散性的增加, 产生的涌流也会最大幅值增加。三断口分散性为0.5 ms、1 ms和1.5 ms, 可能产生的最大涌流幅值分别为2.31 (pu)、3.20 (pu)和3.96 (pu)。

3) 考虑实际情况最大1 ms的断口分散性, 对不同预期合闸时刻下的最严苛情况进行仿真, 得到不同预期合闸时间下可能产生的最大涌流幅值, 约为3.2 (pu)。由于预击穿的影响, 最佳预期合闸相角不在电压过零点, 而是之后电压过零点一段时间。偏离最佳预期合闸相角越大, 可能产生的最大涌流幅值越大。考虑1 ms断口分散性的情况, 在电压过零后0.4 ms进行合闸, 最大涌流幅值最小, 可以将其控制在2.6 (pu) 内。

4) 考虑三相断路器不同期合闸的情况, 选相合闸不同期性为0.5 ms、1 ms和1.5 ms的情况下得

到的最大涌流幅值分别为3.0 (pu)、3.7 (pu) 和 4.4 (pu)，得出涌流幅值随着三相不同期性的增大而增大的结论。

参考文献

- [1] 段雄英, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控真空开关同步关合电容器组控制策略及其实现 [J]. 大连理工大学学报, 2003, 43 (4): 457-465.
- [2] 丁富华, 段雄英, 邹积岩. 基于同步真空断路器的智能无功补偿装置 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (6): 30-35.
- [3] 周刑, 康义, 郑英芬, 等. 1 000 kV荆门变电站主变压器第三线卷额定电压选择及低压无功补偿设备配置 [J]. 电网技术, 2007, 31 (1): 12-15.
- [4] 黄荣辉, 李穆, 吕启深. 基于基准态的断路器可靠性分析方法 [J]. 电气工程学报, 2016, 12 (1): 33-39.
- [5] 黄道春, 阮江军, 吴高波, 等. 模块化多断口真空断路器电位和电场分布研究 [J]. 高电压技术, 2011, 37 (1): 124-129.
- [6] 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, 43 (16): 126-130.
- [7] 廖敏夫, 段雄英, 邹积岩, 等. 多断口真空开关的动态介质恢复及统计特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (2): 82-87.
- [8] 方春恩, 邹积岩, 丛吉远, 等. 基于DSP的无功补偿电容器组同步投切装置 [J]. 高压电器, 2003, 39 (6): 21-23.
- [9] 方春恩, 王佳颖, 邹积岩. 并联电容器组同步关合最佳目标相位的确定 [J]. 电工技术学报, 2006, 21 (1): 24-27.
- [10] Alexander R W, et al. Synchronous closing control for shunt capacitors [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104 (9): 2619.

(收稿日期: 2016-08-04) **EA**

广告 | AD



Weidmüller

魏德米勒Energy Meter电力参数测量仪 —— 高效透明的生产电能监测

魏德米勒Energy Meter电力参数测量仪不仅能监测电能的消耗, 它还能监测电能质量的基本参数和分析来自不同导体的电流的细微差别, 使电力行业用户能够快速地了解生产设备中电能参数的变化情况, 保证其稳定和高效地使用。具有综合功能的Energy Meter电力参数测量仪使您可以将生产点的能源网络分块测量, 尽可能精确地进行监测, 配备有一体的液晶显示屏, 重要的监测数据如电压、电流、功率和能耗都能一目了然。

扫一扫, 关注魏德米勒官方微信



Let's connect.