[电容器]

特高压并联电容器组选相关合涌流计算分析

文/平高集团有限公司　张银穗　范钦晓　王之军　柏长宇　程铁汉

特高压变压器110 kV侧无功补偿并联电容器组具有电压等级高、容量大等特点，投切电容器组的断路器动作次数多，关合涌流大。采用选相合闸技术可有效降低关合涌流，提高开关电寿命。结合特高压无功补偿系统参数，基于ATP–EMTP软件计算出断路器预击穿电压和关合涌流，并分析了计算结果。

2009年，我国自主研发、设计和建设的晋东南－南阳－荆门1 000 kV特高压交流试验示范工程正式投运。特高压输电线路的充电功率大，并且随着系统运行方式的改变，线路潮流在较大范围内变化，因此特高压输电系统中的无功盈亏有较大幅度的变化，需要足够的无功调节手段。其中通过特高压变电站三次侧自动投切的电容器和电抗器加以调节是无功调节的重要手段。

特高压交流工程中无功补偿电容器组额定电压达到110 kV，最大工作电压126 kV，单组电容器容量达到210 Mvar，远期容量为240 Mvar。电容器组的开断电流、关合过程预击穿烧蚀和频繁的操作等因素决定了电容器组断路器运行工况非常严酷，一旦超出寿命范围使用，极易发生重击穿，将直接威胁电容器组的绝缘性能，给特高压电网的安全运行造成隐患。

投切电容器组的断路器工作于主变压器三次侧，三次侧无功补偿装置额定电压110 kV，最高运行电压为126 kV，无功补偿装置采用中性点不接地方式。以皖电东送工程为例，安吉变电站中主变压器110 kV侧安装了4台选相断路器开合电容器组，系统110 kV侧三角接，电容器组星接中性点不接地，每条母线带2组电容器。110 kV侧的电容器组和电抗器单元典型接线如图1所示，CB1和CB2为选相断路器。

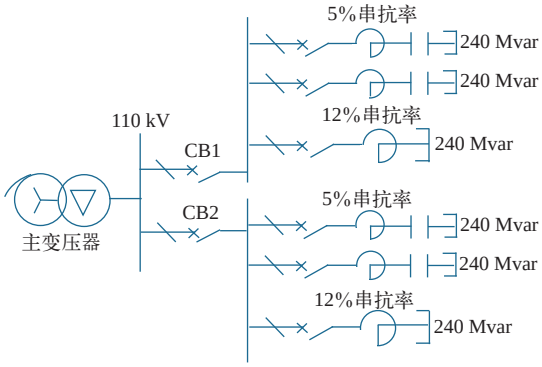

图1　110 kV侧并联电容器的单元接线

特高压变电站三次侧无功补偿专用断路器动作次数多、关合涌流高且开断电流大，若发生重击穿将破坏设备绝缘及引发事故扩大的可能。为了降低电容器组关合涌流，可采用选相控制断路器。该技术已经在35～800 kV电压等级得到了广泛应用，其中大多数用于开合电容器组。

目前，电力系统用户在采购投切电容器组断路器时，要求开关制造厂提供额定关合窗口，并提供该关合窗口下的关合涌流值。在这样的背景下，基于ATP－EMTP软件对特高压无功补偿电容器组关合涌流进行计算仿真。

计算参数确定

1．电源电压

特高压交流变电站内主变压器高、中压侧电压处于不同运行水平时，第三绕组投入容性无功补偿时，第三绕组电压也在不同的水平。若第三绕组电压超过最高运行电压，无功补偿设备将不能投入运行。因而，以第三绕组最高运行电压为标准，计算得出的无功补偿容量是衡量主变压器无功补偿能力的最直接指标。

主变压器中压侧分接头在最大位置时，高压侧电压在1 000～1 100 kV，中压侧电压在500～550 kV时，投入1 500 Mvar容性无功补偿时第三绕组电压均不会超过最高运行电压126 kV。

仿真计算时电源电压取126 kV，对应的相电压为72.7 kV，峰值为102.8 kV。

2．电容器的电容值

特高压交流示范工程中单组电容器容量为210 Mvar，远期规划240 Mvar。计算时取远期规划值，每相容量80 Mvar。

在正弦交流电的作用下，电容器与电源交换能力的能量用电容器的容量或无功功率Q_c来表示

$$Q_c=2\pi fCU^2$$

式中，Q_c为电容器容量，取80 Mvar；U为电容器工作电压，取72.7 kV。

由此可以得到电容器组的电容值C为48 μF。

3．串联电抗器的电抗值

串联电抗器与电容器组相串联，主要为限制无功补偿电容器组与系统发生谐振，串抗率分为5%和12%。电抗器的另一个作用为限制电容器组关合涌流，因此计算关合涌流时选取5%串抗率较苛刻。

额定串抗率K为电抗额定感抗对相串联的电容器组额定容抗的百分比，即

$$K=\frac{X_{LN}}{X_{CN}}\times 100\%$$

式中，$X_{LN}=2\pi f_{LN}$；$X_{CN}=1/2\pi f_{CN}$。

故有，$L_N=10.55$ mH。

4．开关选相合闸策略

当断路器加装选相控制器，随机关合电容器组时会产生幅值很高的涌流和过电压，不仅降低无功补偿设备的绝缘和寿命，而且会造成开关设备触头和喷口的烧蚀，增加开关重击穿概率。

对于特高压无功补偿用并联电容器组，中性点采用非有效接地的方式，选相合闸的策略为：三相交流正弦波中，在两相电压相交时关合，由于中性点非有效接地，这两相涌流值最小；两相关合后90°，在第三相电压过零点关合。采用上述选相关合策略，各个相的关合涌流最小。

根据断路器的额定关合窗口，例如1 ms（±0.5 ms），在最佳关合时间（30°、120°、30°）的基础上加0.5 ms，为2.16 ms、7.16 ms，2.16 ms。如图2所示。

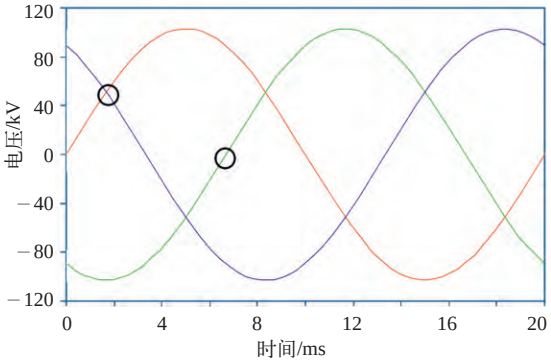

图2　选相合闸最佳相位

关合涌流计算

EMTP是用于电力系统电磁暂态分析的仿真软件。EMTP是Electro－Magnetic Transient Program（电磁暂态程序）的首字母缩写。ATP－EMTP是目前使用最广泛的电磁暂态计算的标准程序，它的功能强大，理论上可以用于任何电路的电磁暂态现象计算。ATPDraw建立计算模型用人机对话图形接口，方便工程技术人员使用。基于ATP－EMTP对选相关合电容器组建模、计算和分析。

1．建立模型

无功补偿并联电容器组模型在不同的分析精度下有不同的建模方法。以下的模型为最简单的关合电容器组模型，如图3所示。未考虑回路电阻、电源阻抗和杂散电容等参量。实践证明，这种简化是有效可行的。

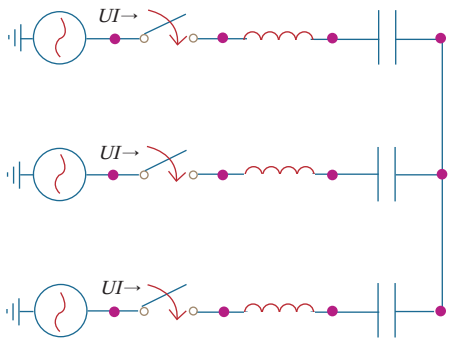

图3　关合电容器组计算模型

2．断路器预击穿电压

采用三相不同期的关合操作，在前两相关合发生预击穿前，断路器断口间的电压为系统电源的额定相电压；在前两相关合后，由于中性点非有效接地，造成中性点电压升高。如图4所示。

此时，第三相关合前的断路器断口电压为系统电源电压与中性点电压之差，为1.5倍相电压，对应的产生预击穿时刻的电压为24 kV。

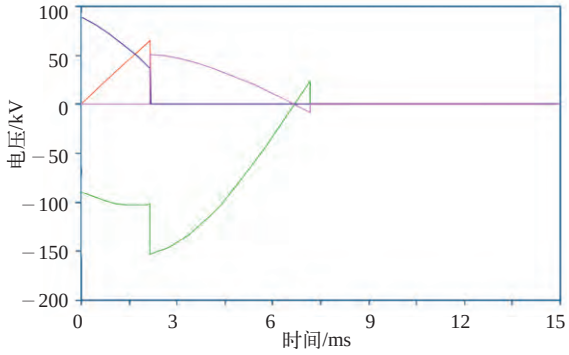

图4　开关关合前断口间电压波形

3．电容器选相关合涌流

在额定关合窗口为1 ms（±0.5 ms）时，选相关合后各相的关合涌流波形如图5所示。从中可以看出关合涌流降低明显，不加选相的峰值9 kA，加选相后小于4 kA。关合涌流频率为170 Hz，比较接近工频50 Hz，如图6所示。各个相的第一关合波形图如图7所示。其中前两相先关合，关合涌流第一峰值为2.7 kA，后合相的关合涌流第一峰值为3.2 kA。由于126 kV断路器的合闸速度较快，关合涌流的频率为170 Hz,因此涌流的第一峰值即为关合预击穿后电弧能量的峰值电流。这个电流值是评估断路器耐烧蚀特性及电寿命的重要参数。

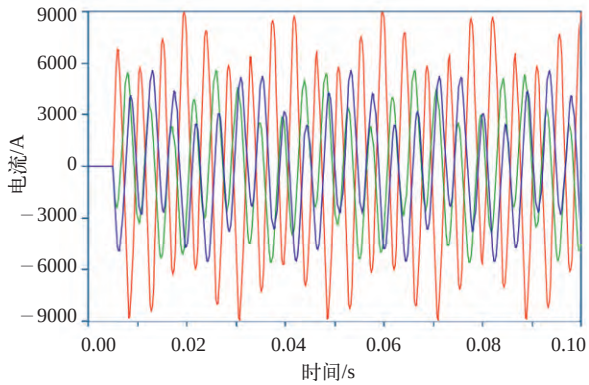

图5　在电压峰值关合时的涌流波形图

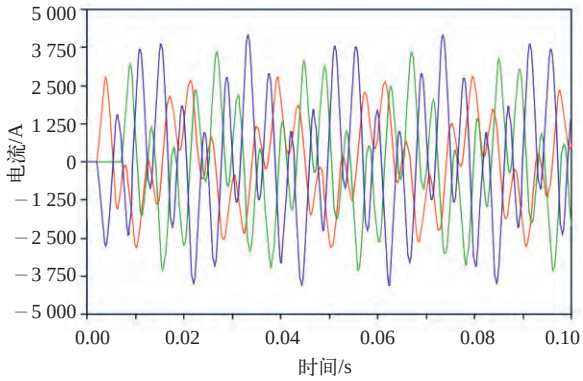

图6　三相关合涌流波形

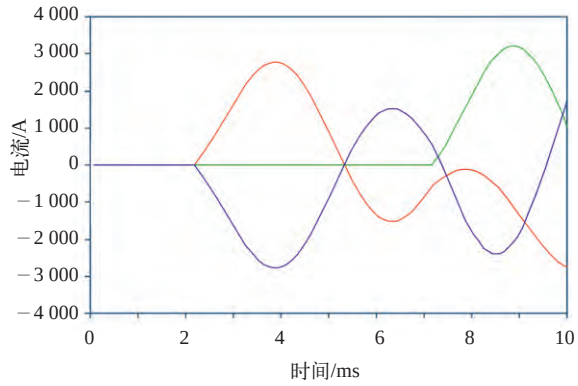

图7　关合涌流第一峰值波形

结束语

介绍了基于ATP－EMTP计算电容器组关合涌流的方法，该计算方法简单有效，适用于工程使用。

计算结果表明，关合电容器组采用选相合闸后，明显降低关合涌流。在断路器关合窗口为1 ms（±0.5 ms）时，涌流第一峰值为3.2 kA，出现在后合相。EA

（收稿日期：2015.04.23）

（编辑：刘群点）