

配电网投切无功补偿装置的过电压与抑制分析

庄琛¹ 姚圣平¹ 陈少卿² 聂鸿宇² 谢同平¹ 黄小琼¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400044;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘要: 目前国内仍主要采用并联电容器组作为无功补偿装置,投切并联电容器组产生的操作过电压会威胁设备的安全运行。利用 PSCAD/EMTDC 软件对某变电站 10 kV 系统进行了仿真建模,对其投切无功补偿装置过程中可能出现的各种过电压特点进行了分析。并研究了串联电抗率的变化对过电压和涌流的影响与抑制,仿真结果表明,实际中改变串联电抗率对过电压的抑制效果并不明显,但对于涌流有较好的抑制作用。

关键词: 过电压; 无功补偿; PSCAD/EMTDC; 并联电容器; 串联电抗率

Abstract: At present, shunt capacitor groups are the main devices of reactive compensation in domestic power system. The overvoltage generated by the switching operation will threaten the safety operation of equipment. The simulation model of 10 kV substation system is established with PSCAD/EMTDC software, and several kinds of overvoltage characteristics generated in the process of switching operation of reactive compensation devices are analyzed. The focus is on the suppression effect on overvoltage and inrush current related to different series reactance rates. The simulation results show that changing series reactance rate has not obvious effect on the overvoltage, but it has a significant reduction on overcurrent.

Key words: overvoltage; reactive compensation; PSCAD/EMTDC; shunt capacitor; series reactance rate

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0048-04

0 引言

随着电网容量的迅速增大,和对电能质量要求的不断提高,电力系统中无功补偿和电压稳定的重要性愈加凸显。目前,并联电容器作为主要的无功补偿装置在各级电力系统中,特别是配电网系统,获得了广泛的应用^[1]。电容器频繁的投切操作,真空断路器的大面积应用,使得并联电容器组的操作过电压问题有了一些新的特性^[2]。由此带来的操作过电压威胁设备绝缘,已经成为影响电网运行可靠性的重要因素。因此,有必要对并联电容器组的操作过电压及其保护措施进行深入研究。

针对配电网变电站的具体情况,无功补偿装置一般安装在其低压母线侧。针对变电站 10 kV 母线侧的并联电容器投切,通过理论分析和 PSCAD/EMTDC 软件的仿真建模,深入研究了无功补偿并联电容器组投切过程中,不同类型过电流和过电压的暂态特性。同时,针对并联电容器上的串联电抗,研究了串联电抗率的变化对过电压和涌流的影响与抑

制效果。实验结果表明,增加串联电抗率对过电压影响不大,但可以有效抑制投切过程中的涌流作用,从而保证了电力系统设备的安全可靠运行。

1 投切过电压分析

电力电网中的电容、电感元件均为储能元件。当有操作或故障使其工作状态发生变化时,将产生振荡性的过渡过程^[3]。如果在电网状态发生突变的瞬间,电网中这些储能元件表征能量值的初始值与新状态的稳定值两者不一致时,则在过渡过程之中电网的响应将出现暂态分量,暂态分量通常表现为强阻尼的高频振荡特征。

因为电网负荷是变动的,随之电网中无功功率的消耗也是经常变化的,要保持电网电压稳定,需随负荷的变化改变并联电容器的投入量,因而大型补偿电容器组一般分为若干组,并随负荷变化分组投入^[4-6]。在投切并联电容器组时会出现两个问题:一是投入电容器的瞬时会产生很大的涌流电流;二是切除电容器时因断路器的重燃会产生比较严重过

电压^[7]。

1.1 投合电容器过电压

设并联补偿电容器三相完全同期合闸,则此时三相电路可用单相电路代替,如图 1。

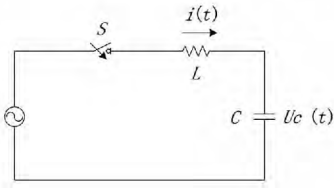


图 1 电容器合闸等值电路

在图 1 中 L 为电源的等效内电感, U_{NC} 为补偿电容器 C 的残留电压,电源电势 $e(t) = E_m \cos(\omega t)$ 。不计回路损耗电阻,合闸后电容器 C 上电压 $U_c(t)$ 为

$$U_c(t) = U_{cm} \cos(\omega t) - (U_{cm} - U_{NC}) \cos(\omega_1 t)$$

其中 U_{cm} 为电容器稳态电压幅值,即

$$U_{cm} = \frac{E_m}{1 - (\omega/\omega_1)^2}$$

其中 ω 为工频角频率, $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$ 为上述回路的自振角频率,通常 $\omega_1 \gg \omega$,因此 $U_{cm} \approx E_m$ 。

当并联电容器的极板上留有反极性残压时,即 $U_{NC} = -E_m$,合闸后电容器电压最大值可达 $3E_m$ 。一般情况下并联电容器都接有放电线圈,因此在断路器合闸前残压 U_{NC} 已经很小,近似为 0,所以在此情况下并联电容器合闸可能出现的最大电压为 $2E_m$ 。

1.2 切除电容器过电压

当开关断开电流熄灭后,电容器组上的残存电荷在短时间内无法释放,电容器组上将残留直流电压^[8],假如开关弧隙绝缘恢复的速度低于恢复电压增长的速度,一旦真空开关的电气恢复强度不能承受加于其上的暂态恢复电压,将发生重击穿,引起电磁振荡,产生重燃过电压。

1.2.1 无故障单相重燃

过电压主要出现在并联电容器组的中性点与地之间,并联电容器极间一般没有比较高的过电压出现。重燃相过电压并不是最高的,往往是通过中性点传递至不重燃的两相中的一相,成为过电压的最高相。即使是单相重燃(在小于 1/4 周期内重燃)时,在非重燃相中的一相也会出现过电压,过电压最高相可达 5~6 倍 E_m 。

1.2.2 带故障单相重燃

中性点不接地电网允许发生单相接地后持续带

故障运行 2 h,因此有可能遇到在单相接地时要开断电容器组。母线侧单相接地时,开断电容器组时产生的单相重燃过电压要比无故障开断的情况下要高,可达 7~8 倍 E_m 。

1.2.3 二相重燃

如 A 相电容器为首先断开相,则 C 相电容器上所产生的过电压最高,由于单相重燃时回路的振荡频率很高,因此中性点对地电容上的电压在很短时间内上升,结果会立即导致 C 相断口重燃,形成两相重燃。

2 仿真模型的建立与分析

PSCAD/EMTDC 软件是目前在电力系统中广泛使用的电磁暂态仿真程序,具有模拟复杂电力系统的功能,并且提供强大的元件模型库及有效的用户图形界面。利用 PSCAD/EMTDC 软件进行了投切并联电容器的过电压分析模型,并对模型进行了研究分析。

以 110 kV 某变电站为例,其仿真系统结构图如图 2 所示。

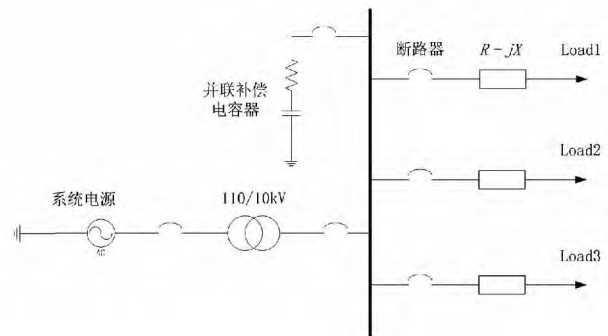


图 2 变电站仿真系统结构图

其中,主要仿真元件有:110 kV 系统电源、主变压器、并联补偿电容器组、串联电抗器等。

变压器为 YN-d11 接线的三绕组变压器,变比为 110/10。并联补偿电容器组的额定容量为 4 800 kvar,计算得每相实际电容值为 51 μF ,联结方式为星接。串联电抗器的电感值 1 mH,串联电抗率 (X_L/X_C) 0.5%。模型中断路器采用时控理想开关,开断后在电流过零时熄弧。

2.1 并联电容器合闸过电压仿真分析

如表 1 所示,对其不同合闸相角进行仿真分析,假设 $t=0$ 时刻 A 相电压达到最大值,仿真得出不同

相位(即不同时刻)的过电压。

表 1 不同相位下 相间电压及相对地电压值

合闸角 / (°)	合闸时间 /ms	极间电压 /p. u.	相对地电压 /p. u.
0	0	1.81	1.81
15	0.833 3	1.81	1.81
30	1.666 6	1.75	1.75
45	2.500 0	1.80	1.80
60	3.333 3	1.93	1.93
75	4.166 6	1.77	1.77
90	5.000 0	1.72	1.72
105	5.833 3	1.92	1.92
120	6.666 6	1.87	1.87
135	7.500 0	1.69	1.69
150	8.333 3	1.75	1.75
165	9.166 6	1.84	1.84
180	10.000	1.81	1.81

从表 1 中的电压数值可以看出,由于中性点零电位的牵制,三相电容器的极间电压基本维持在 1.8 p. u. 左右,小于 10 kV 电容器极间操作冲击绝缘水平 2.56 p. u.,基本不存在威胁电容器绝缘的过电压。而相对地过电压由于中性点电位为零,与极间电压数值相同,且相对地过电压绝缘水平较高,因此也不会威胁电容器的相间绝缘。所以可以得出,当断路器能保证三相同时合闸时,电容器组的合闸过电压基本不会对电容器绝缘造成威胁。

2.2 并联电容器分闸过电压仿真分析

同期分闸单相重燃实验,三相对地电压与极间电压分别如图 3、图 4 所示,经计算可得最大相对地电压为 3.35 p. u.,最大极间电压为 1.37 p. u.。

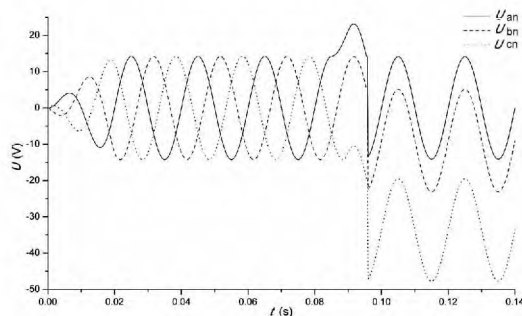


图 3 单相重燃相对地电压波形图

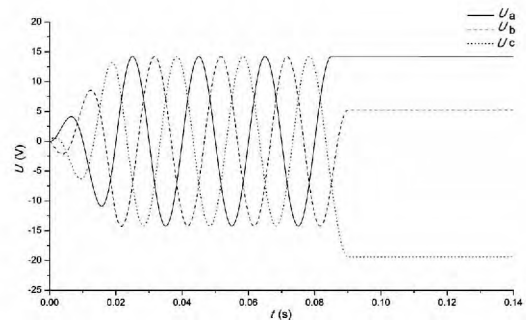


图 4 单相重燃极间电压波形图

结果表明,与三相同期分闸不重燃仿真结果相比较,电容器电流与电容器极间电压均未发生变化,主要原因是在 B、C 相断开情况下,A 相断路器重燃并不能形成通路。但是电容器中性点通过 A 相电弧与电源相连,中性点电位发生偏移,导致各相电容器相对地过电压。

同期分闸两相重燃实验,设置 A 相断路器重燃,导致 C 相在其电压峰值时刻也发生重燃,三相对地电压、极间电压、相电流分别如图 5、图 6、图 7 所示。

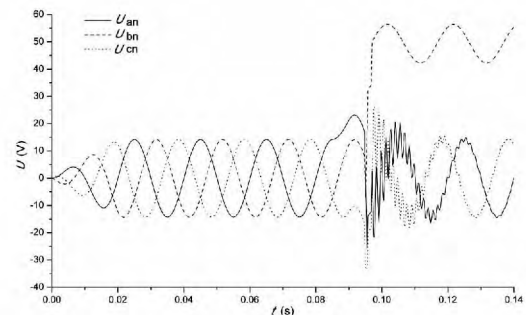


图 5 两相重燃相对地电压波形图

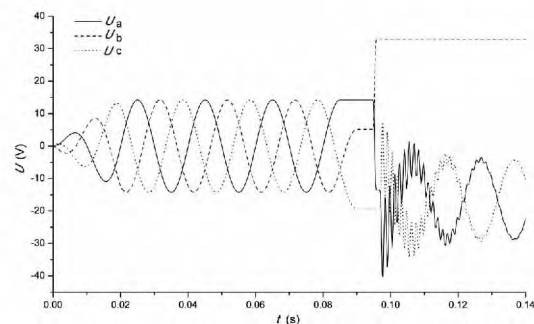


图 6 两相重燃极间电压波形图

由仿真结果分析可知,两相重燃后,极间电压最大值达到了 2.24 p. u.;相对地电压最大值为 4.05 p. u.。同时,重燃后伴随着高幅值高频率的电流冲击对电容器具有相当大的破坏力,幅值倍数为

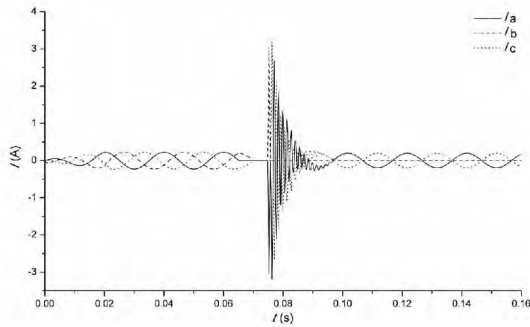


图7 两相重燃相电流波形图

12.8 p. u.。

由上述实验可知,无论是同期分闸单相重燃还是两相重燃,电容器极间过电压都相对较低,其中两相重燃时的极间电压接近绝缘水平,有一定的危险;而相对地会产生较高的过电压,超过3 p. u. 以上,会威胁到设备的安全运行。同时,在断路器重燃时系统振荡比较剧烈,会出现很大的过电流,具有较大的危害,但持续时间较短,随着系统阻尼的作用会衰减到额定值附近。

2.3 串联电抗率对过电压与过电流的影响

同时,可以通过增加串联电抗率来抑制涌流。因此对串联电抗对过电压和过电流的影响进行了相应的分析,串联电抗率即感抗与容抗的比值, X_L/X_C 。这里准备从0%、2%、4%、6%、10%这几种电抗率来观察不同电抗率对并联电容器操作过电压以及电流抑制的影响,表2列出了不同电抗率情况下的电感值。

表2 电抗率与电感值

电抗率 /%	0	2	4	6	10
电感值 /mH	0	4	8	12	20

首先仿真分析了不同串联电抗率对过电流的影响,由图8可知:10 kV无功补偿系统中,串联电抗器有显著的限流作用。观察曲线可以发现,增大电抗率能有效地降低电容器的合闸电流,电抗率为10%时的涌流大小减小到0%时的1/3。

由前述分析可知,并联电容器组的操作过电压主要是分闸重燃过电压。假设三相断路器分闸后发生单相重燃,前面模拟了不同电抗率时的操作过电压,结果见图9。

从图中可以看出,两种操作情况下的电容器组过电压值都与电抗率有关,电容器的操作过电压值大致随电抗率的增大而上升,但是上升幅度不大,说

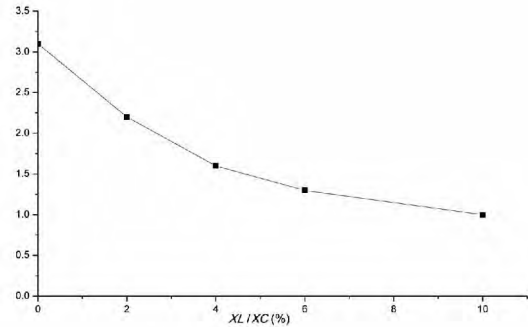


图8 不同电抗率下的涌流值

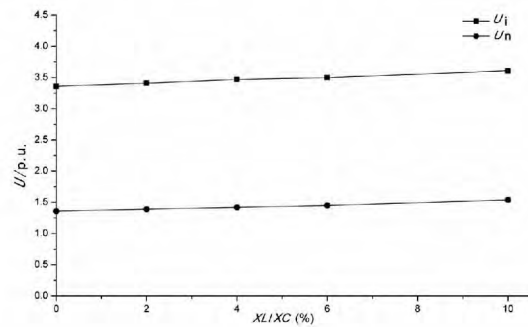


图9 不同电抗率下的操作过电压值

明电抗率对电容器操作过电压值的影响程度不高。

抑制电力系统中的过电压最常用的方法还是通过装设避雷器,目前主要采用金属氧化物避雷器(MOA)。相关研究与实验均表明,采用MOA对无功补偿设备投切过电压具有良好的抑制效果,在此不再赘述。

3 结 语

简要介绍了投切并联电容器的暂态过程和产生过电压的基本原理,并采用PSCAD/EMTDC软件对配电网投切无功补偿设备的暂态过程进行了仿真分析,得到以下结论。

1) 并联电容器投合闸的分析表明, 0° 到 180° 的合闸相角变化对过电压大小基本没有影响,合闸过电压也基本保持在绝缘水平之内,不会对设备造成危害。

2) 并联电容器同期分闸单相重燃和两相重燃的仿真分析表明,其极间电压也相对较低,其中两相重燃时的极间电压接近绝缘水平,有一定的危险。两种情况下的对地电压都较高,需要进行过电压的抑制与保护措施。

(下转第74页)

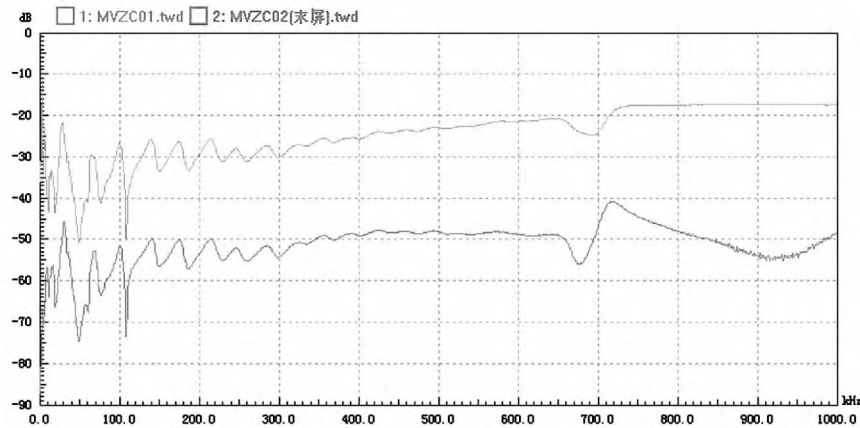


图 4 某 500 kV 主变压器 220 kV 中压侧 C 相套管首端及末屏接线两种方法测试结果比较
(上部曲线为首端接线测试结果,下部曲线为末屏接线测试结果)

号的接线方法,丝毫不会影响对绕组变形的判断和灵敏度。而绕组变形频率响应法的重点分析区段正是 1 到 600 kHz^[1],在这个重点分析区段两种接线方法各个极值点即波峰、波谷对应频率和对应幅值具有一致性和对应性的关系,因此用通过套管末屏接线取扫描输出信号的接线方法替代通过套管首端接线取扫描输出信号的接线方法具有显著的现实性、可行性。

4 结 论

基于试验结果,用套管末屏接线取扫描输出信号的方法替代套管首端接线取扫描输出信号的方法具有显著的现实性、可行性,推广这种新工艺可以避免高空作业环节,减少危险点,简化现场操作过程,节约操作时间,提升工作效率。

(上接第 51 页)

3) 串联电抗率对过电压没有太大影响,但可以有效抑制过电流的大小,防止其对设备造成较大损害。

参考文献

[1] 陈慈萱. 电气工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
[2] 张要强, 唐明贵, 胡选, 等. 35 kV 系统投切无功补偿兼滤波装置引发重燃过电压[J]. 电气安全, 2001, 30(23): 27-30.
[3] 陈鹏云, 苏梓铭, 鲁铁成, 等. 无功补偿装置电磁暂态仿真计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(5):

参考文献

[1] 罗军川, 张星海. 电力变压器反事故措施解析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
[2] 张琛. 变压器绕组变形测试方法及应用[J]. 变压器, 2007, 44(2): 35-37.
[3] 朱维路, 贾永江, 杜深慧. 电力变压器绕组短路轴向稳定性分析[J]. 变压器, 2010, 46(9): 17-19.
[4] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
[5] 天威保变电器股份有限公司. 变压器试验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
[6] 天威保变电器股份有限公司. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

作者简介:

杨 洋(1982), 从事高电压输变电设备状态诊断的研究。
(收稿日期: 2014-01-06)

40-45.

[4] 涂轶昀. 基于 PSCAD /EMTDC 软件的超高压线路操作过电压研究[J]. 上海电力学院学报, 2009, 25(4): 32-38.
[5] 卢向东, 赵成勇. 基于 VSC-HVDC 的线路过电压抑制策略研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 25-30.
[6] 沈黎明. 变电站补偿电容器投切过电压的仿真与测试[D]. 北京: 华北电力大学, 2009: 30-35.
[7] 王永源. 并联电容器组中电容器损坏特征与过电压保护研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 30-34.
[8] 梁思聪, 王维庆, 张新燕, 等. 基于 PSCAD /EMTDC 软件的空载线路工频过电压分析[J]. 华东电力, 2009, 37(2): 15-23. (收稿日期: 2013-11-26)