

12 kV真空断路器开断并联电抗器 电弧重燃三相建模

在一定的系统条件下真空断路器开断10 kV并联电抗器时，触头间隙可能会产生连续的电弧重燃与熄灭现象，形成危险的过电压。为搭建准确的真空开关仿真模型，以复现断路器的分闸重燃基本特性，简单综述了真空开关仿真模型的研究现状，总结出现有研究的不足。为了消除现有仿真模型的不足，在运行电网上对一种型号的12 kV真空断路器开断并联电抗器进行了一系列的现场试验研究，得到其断口间介质动态绝缘强度恢复曲线和高频电流熄弧特性，利用ATP-EMTP搭建了真空断路器分闸电弧重燃模块。考虑电缆三相间的寄生参数，在ATP中搭建了真空断路器开断并联电抗器三相仿真模型，并对现场试验进行了仿真计算，仿真结果与试验结果大致相符。

魏 钢¹ 张照辉^{2,3} 杨 庆³ 赵 鑫¹ 赵晓勇¹/1.重庆市电力公司检修分公司 2.江苏省电力公司电力科学研究院 3.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



魏 钢/工程师

关键词/Keywords

仿真 ·
并联电抗器 ·
真空断路器 ·
重燃过电压 ·
ATP-EMTP ·

近年来，随着电力系统负载的快速增长，并联电抗器在中高压系统中的应用越来越普遍。当电网的负载较轻时，并联电抗器能够限制电力系统的工频电压升高和操作过电压；当电网的负载较重时，需要切除全部或部分的并联电抗器，以避免过分地消耗系统的感性无功。真空断路器由于具有开断容量大、无污染和适合频繁操作等优点，被广泛应用于10 kV无功补偿并联电抗器回路中。随着科技进步和制造工艺的改进，国内无功补偿电抗器用12 kV真空断路器的重燃率已降到很低水平^[1]，但系统负载时常变化，为维持系统电压的稳定与改善电能质量，需要对并联电抗器进行频繁的操作。因此电网投切并联电抗器操

作过电压事故时有发生^[2-4]。

实际工程应用中，由于缺乏现场试验数据和较准确的12 kV真空断路器分闸并联电抗器多次重燃仿真模型，通常设置开关在特定的时间点闭合，这是仿真模拟系统过电压最严重的情况，但此方法准确度较差，难以满足工作需要。因此，只有建立更加准确的真空断路器分闸电弧重燃模型，才能掌握该工况下过电压的具体过程，并采取合理的过电压抑制措施。此外，其对断路器运行状态以及重燃过电压的在线检测与诊断，特别是对分析该工况下的故障原因也有重要意义。

真空断路器分闸重燃模型研究现状

对真空断路器开断感性负载电弧多次重燃统计仿真模型的研究起始于20世纪70年代，Yu C等人^[5]将线性介质强度恢复曲线和高频电流灭弧判据作为开关状态的转换依据，利用自编程序对三相真空断路器分闸电弧炉变压器的重燃现象进行了仿真研究；20世纪80年代，Czarnecki L等人^[6]在EMTP中建立了包含分闸间隙电弧在内的3个基本特性参数的单相真空开关仿真模型，仿真计算出真空开关操作的重燃与“虚拟截流”过电压；20世纪90年代，Kosmac J等人^[7]基于EMTP中的MODELS模型和可控电阻模型，通过MODELS计算可控电阻的瞬时阻值来模拟真空断路器的截流、重燃和高频电流熄弧现象；同一时期，Helmer J等人^[8]根据文献和试验数据在EMTP的

国家创新研究群体基金(51321063)。

MODELS模块中建立起包含分闸间隙电弧在内的3个基本特性参数控制程序的真空开关仿真模型,并与真空开关开断空载变压器的试验数据进行了比较;此后, M.Glinkowski等人^[9-11]基于试验数据和理论分析继续对含有3个基本要素的Helmer真空开关仿真模型进行改进,并根据经验和理论分析在模型中加入触头 RLC 并联支路,以模拟分闸暂态过程中断路器触头间寄生电阻、电感和电容,并将仿真结果、试验数据与前人的研究结果进行对比分析,以验证其所建模型的有效性。

21世纪以来,国内外学者仍对真空开关仿真模型展开了大量的研究工作。文献[12-13]中对有无真空电弧模型的仿真结果进行了对比分析,结果表明:重燃时真空电弧的压降小于20 V,对暂态电压的影响不大,因此在不考虑真空电弧的动态模型时,真空开关的仿真模型也可获得较准确的结论;文献[14]中将真空开关模型用于评估真空断路器开断中压电动机过电压值的研究;文献[15-16]中对开断空载变压器进行了仿真研究;根据查到的文献,在国内只有杜宁、关永刚等人^[17]根据40.5 kV真空断路器开断并联电抗器现场试验数据,得到表征多次重燃暂态过程特征的3个基本要素,在ATP中利用MODELS模块建立起真空断路器分闸多次重燃仿真模型,并与试验波形进行了比较。

综上可知,真空断路器分闸多次重燃仿真模型的发展趋势是基于一定条件下的试验数据,利用ATP-EMTP中的MODELS模块建立含有3个基本要素的真空开关仿真模型,建模时3个真空开关的特性参数分别为:①真空断路器的截流值;②介质绝缘动态恢复强度;③高频电流过零时的灭弧能力。

另外,已有真空开关仿真模型存在以下不足:①仿真模型中的3个基本要素多是基于实验室或相关文献获得的数据,缺少现场试验数据;②关于真空开关开断中压并联电抗器的研究较少,尚未见到12 kV真空断路器的研究;③基本采用单相电路和未考虑电缆或系统其他设备寄生参数的三相电路。这些情况使真空开关模型应用于12 kV

真空断路器工况时的可靠性较差。

为了消除上述真空开关仿真模型的不足,在某220 kV变电站的运行电网上对一种型号的12 kV真空断路器开断并联电抗器展开了一系列的现场试验,然后根据试验数据,在ATP-EMTP的MODELS模块中利用Fortran语言对其编写控制程序,建立真空断路器电弧重燃模块,并搭建真空断路器开断并联电抗器三相仿真模型,同时进行仿真计算,并将仿真结果与试验数据比较。

试验与仿真分析

1. 试验简介

试验在重庆某220 kV变电站2[#]主变压器的10 kV侧实施,利用962开关对4[#]电抗器进行投切操作,试验中使用10 kV普通真空断路器型号为VEP-12。10 kV并联补偿电抗器型号为BKGKL-2667/10,中性点不接地。连接并联电抗器与断路器所使用的三芯电缆型号为YJV22-8.7/15-3×300,长度约为80 m。试验回路所在变电站低压侧的电气主接线如图1所示。

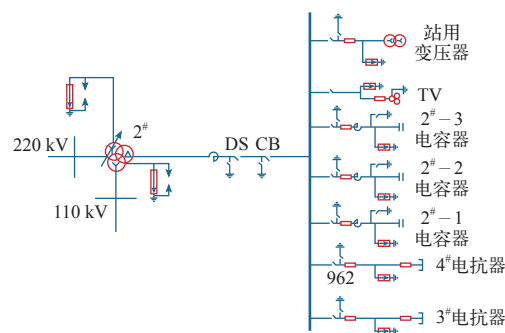


图1 真空断路器开断并联电抗器接线示意图

试验中分别在962开关母线侧、三相负载侧以及电抗器侧安装10 kV电容式分压器,以期准确获取断路器投切暂态过程中的过电压波形,电容分压器高、低压臂的电容量分别为299.4 pF和0.102 5 μ F。断路器投切过程中形成的高频暂态电压信号频率预估高达几百千赫兹,现场10 kV电容式分压器对低于1 MHz的高频暂态电压可沿用工频下的分压比。现场试验共进行了10次真空断路器合闸并联补偿电抗器组操作方式。

电容式分压器输出的低电压信号经过同轴电缆传输到信号调理装置,最后经多通道数据采集卡(最高采样频率可达40 MHz的高速变频数据采集卡)进行采样并存储,同时信号采集系统软件可提供数据分析和查询功能。现场试验数据采集系统采用工控机及采集卡,如图2所示。



图2 现场试验数据采集系统

试验成功捕获断路器分闸暂态过渡过程中的电压波形,经Matlab处理后得到分闸暂态触头电流接近于零点时刻的恢复电压波形,如图3所示。

由图3可知,断路器在开断的过程中,工频电流首先过零相A相熄弧之后发生单相电弧重燃,高频电流通过电缆相间、相地电容耦合到B、C两相,使后开两相在电弧重燃时刻也出现了一定幅值的高频振荡电压,但此高频电流并未使B、C两

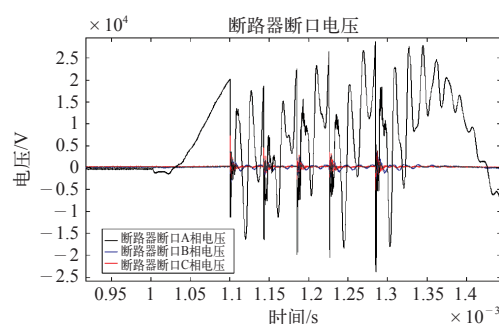


图3 断路器断口暂态恢复电压

相的电流强制熄弧。

2. 主要设备仿真模型

基于该220 kV试验回路和获取的试验数据搭建仿真模型,采用ATP-EMTP电磁暂态仿真软件,对真空断路器开断并联电抗器过电压进行仿真计算。三相仿真电路的示意图如图4所示。

(1) 变压器

主变压器采用ATP中的BCTRAN支持子模块来模拟,其主要参数设置如下:主变压器型号为SFSZ10-240000/220,额定容量为180 MV·A,额定电压为230 kV,高、中和低绕组容量分配为180/180/90,空载损耗为86.273 kW,空载电流百分数为0.068%,变压器中性点经放电间隙并联避雷器接地,其余参数如表1所示。

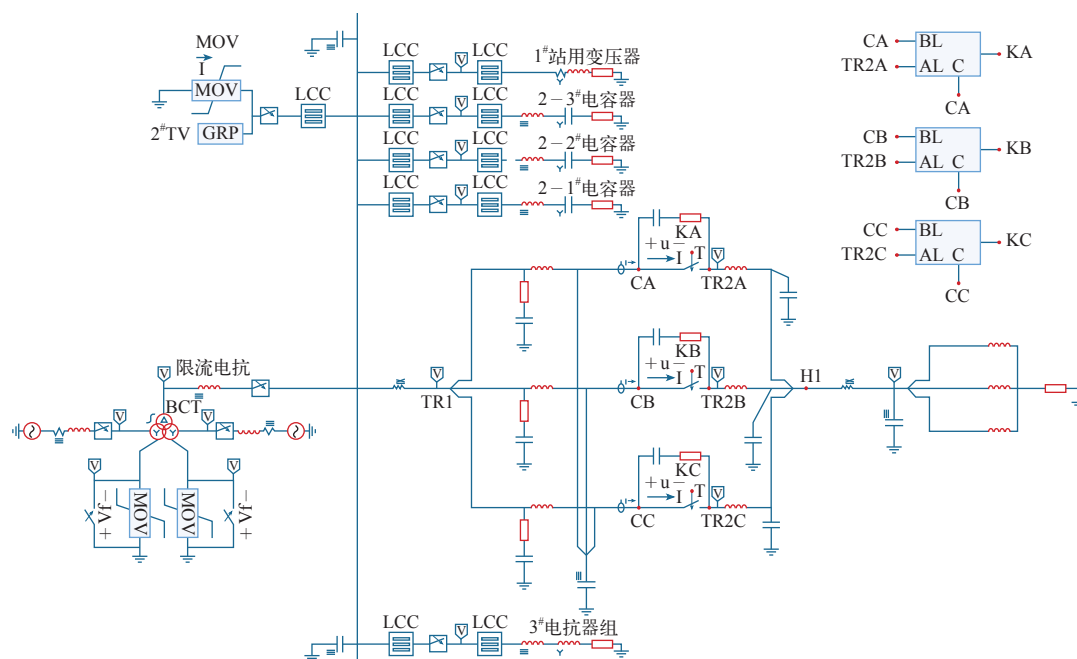


图4 三相仿真电路示意图

表1 变电站220 kV主变参数

额定电压/kV			阻抗电压/(%)			负载损耗/kW	联结组别
高	中	低	高低	高中	中低		
230	115	10.5	23.32	13.11	7.96	475.562	YNyn0d11

(2) 10 kV避雷器

10 kV站用氧化锌避雷器动作电压为45 kV, 其伏安特性如表2所示。

表2 10 kV电站型金属氧化锌避雷器的伏安特性

电流	5 kA	1 mA	13.6 μ A
电压/kV	45	25.7	19.275

(3) 并联电抗器

并联电抗器型号为BKGKL-2667/10, 其单相额定容量为2.667 Mvar, 额定电压为10 kV, 星形联结, 中性点不接地, 实测其三相电抗分别为12.85 Ω 、12.61 Ω 和12.83 Ω , 三相电感值分别为40.9 mH、40.14 mH和40.84 mH。并联电抗器单相入口等效电容取为3 nF。

(4) 电缆

该变电站中连接电抗器与断路器所使用的三芯电缆型号为YJV22-8.7/15-3 $\times$ 300, 长度约为80 m。该电缆的单位长度电容值约为0.260 3 nF/m, 单位长度电感值约为0.36 μ H/m, 单位交流电阻约为0.153 Ω /km。

(5) 站用变压器模型

站用变压器型号为SC10-400/10, 额定容量为315 kW, 额定电压为10.5 kV/0.4 kV, 额定电流为17.3 A/454.7 A, 空载损耗为480 W, 负载损耗为3 650 W, 短路阻抗为3.99%。

(6) 真空断路器仿真模型

当真空断路器开断小电流感性负载时, 可能存在截流、重燃现象。本文依据现场试验数据, 在ATP-EMTP中采用Fortran语言编写控制程序, 建立真空断路器分闸电弧重燃模块, 该模块考虑了真空断路器的截流值、触头间真空介质的动态绝缘强度以及高频熄弧能力3个因素。本文中搭建的断路器仿真模块如图5所示。

断路器仿真模块包括3个输入量和1个输出量。图5中, I_k 为流过断路器的电流, U_s 为断路器

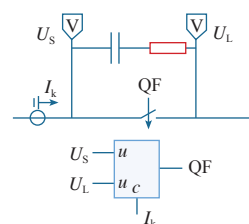


图5 真空断路器的仿真模型

电源侧电压, U_L 为断路器负载侧电压, 这3个变量为输入变量; QF开关是输出变量, 其状态由断路器仿真模块决定。断路器仿真模块在每一步长时间内, 根据当前输入量的值以及一定的规则算出输出量, 实时控制开关QF的状态。为了更好地模拟断路器的投切与断口电弧特性, 在开关QF两侧并联有0.8 nF电容和0.1 Ω 电阻组成的支路。

1) 截流值。在分闸的初始时刻, 真空断路器触头间不仅会流过工频续流, 还会由于系统受到扰动而流过高频暂态电流, 截流实际上是两者叠加同时被截断, 这个过程很复杂, 且仿真中难以再现。因此假定流过触头的电流小于某一设定值后就直接跳变为零。文献[17]通过试验得到中压真空断路器开断并联电抗器的截流值为4~6 A, 模型中取6 A。

2) 介质动态绝缘强度。真空断路器分闸暂态过程中, 工频电流过零熄弧之后, 随着触头间距的逐渐增大, 触头间介质的动态绝缘强度也随之增大。另外, 由于工艺和电弧的不稳定性, 试验中测量到的断口击穿电压的分散性很大。一些学者常将介质绝缘强度与时间的关系近似拟合为线性, 而实际上在触头分断的最初约0.1 ms, 介质恢复速度较慢, 之后介质恢复速度加快; 而在触头分断约0.3 ms以后, 介质恢复速度又会趋于缓慢, 并且击穿电压的分散度明显增大。图3中, 由于12 kV真空断路器恢复电压波形正方向的幅值都被触头间介质动态绝缘强度所限制, 因此暂态恢复电压波形的包络线即为其介质动态绝缘强度曲线, 并分两段进行拟合, 取得了较好的仿真效果。

各段3次拟合公式分别为

$$u_d = -2.011 \times 10^{-5} t^3 + 5.249 \times 10^{-3} t^2 - 9.107 \times 10^{-2} t \quad (1)$$

$$0 < t \leq 100$$

$$u_d = -8.759 \times 10^{-6} t^3 + 5.281 \times 10^{-3} t^2 + 0.9308t + 72.3$$

$$100 < t \leq 300 \quad (2)$$

式中, t 为触头分断时间, μs ; u_d 为介质动态绝缘强度, kV 。该公式适合于触头分开后0.3 ms内的击穿。

3) 高频熄弧能力。断路器开断高频暂态电流时, 只有满足下面两个条件时才能够成功熄弧:

① 电流过零; ② 电流过零时, 其对时间的变化率低于某值。对于条件②, 存在多种不同的处理方法: 文献[11]将高频电流过零次数限定为大于某个值, 这显然不够合理; 由于三相电缆及电抗器之间存在耦合, 三相电流互相影响, 且熄弧时电流变化率的分散度也很大, 文献[17]根据现场试验数据采用了简化电流变化率上限为300 A/ μs 的熄弧能力判断准则; 本文分析试验数据得出高频电流基本在第4次过零且电流变化率低于260 A/ μs 时熄弧。

仿真结果

本文基于前文搭建的断路器分闸电弧重燃模型, 在ATP-EMTP中建立一种型号的真空断路器开断并联电抗器三相仿真模型, 考虑相间寄生参数, 得到一系列的电压波形, 图6为分闸暂态过程中断路器断口恢复电压波形。

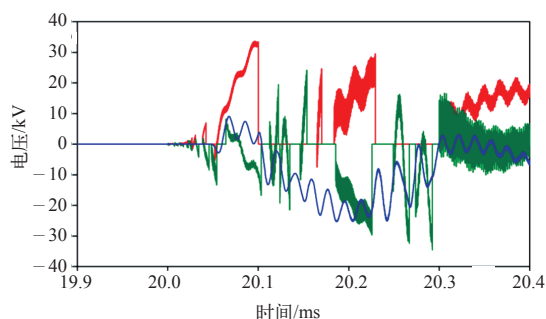


图6 断路器断口三相恢复电压波形

图6中, 红色为断口A相恢复电压; 绿色为断口B相恢复电压; 蓝色为断口C相恢复电压。在分闸暂态过渡过程中, A、B相发生多次重燃, 而C相并未发生重燃。由图6可知, 在整个分闸暂态过程中, 断口C相的恢复电压均小于断口A相或B相恢复电压的包络线, 即C相断口恢复电压的上升速率小于断口介质动态绝缘强度的恢复速率, 因此, 在整个分闸暂态过程中断路器断口C相均未被

击穿。

分闸暂态过渡过程中, 断口恢复电压包络线呈发散状, 即断口恢复电压的幅值随着分闸时间的流逝而逐渐增大。与图3试验波形相比, 总重燃时间以及A相相邻两次重燃时间间隔都相差不大。其中, 试验总重燃时间为283 μs , 仿真总重燃时间为293 μs ; 试验A相重燃平均时间间隔为47.8 μs , 仿真A相重燃平均时间间隔为51.6 μs 。另外, 仿真所得的最高击穿电压略高, 仿真与试验所得的最高击穿电压分别为33.124 kV和28.78 kV。综上所述, 仿真结果与试验结果基本相符。

由于系统中存在的电感、电容等寄生参数极其复杂, 难以准确计算, 因此仿真不可能完全实现。总体而言, 本文所建仿真模型的仿真结果与试验结果基本相同。

结束语

本文简要综述了真空开关仿真模型开断感性负载的仿真研究现状, 总结了现有研究的不足。为了改进这些不足, 基于某变电站分闸并联电抗器现场试验数据, 建立某种型号断路器的分闸电弧重燃模块, 搭建试验回路的三相仿真模型, 仿真结果与试验结果基本相同。

1) 真空开关仿真模型需要3个表征分闸间隙电弧特性的基本参数, 并根据实际三相系统设备配置, 考虑电网中可能存在的各种耦合参数, 建立三相仿真模型, 才可进行适用的真空开关开断并联电抗器的仿真研究。

2) 根据试验结果, 获得10 kV真空断路器分闸断口动态恢复电压的分段3次拟合曲线和高频电流熄弧判据, 在ATP-EMTP软件中搭建断路器分闸电弧重燃模块。

3) 依据搭建的断路器分闸模块, 建立10 kV真空断路器开断并联电抗器现场试验回路的三相仿真模型, 同时进行仿真计算, 仿真计算结果与试验结果大致相符。

4) 使用真空断路器作为投切操作开关的10 kV并联电抗器, 只需提供该工况下的相关设备具体参数, 便可使用本文所建的真空开关仿真模型仿

真计算该工况下的过电压情况。

参考文献

- [1] 李电, 金百荣, 洪金琪, 等. 真空断路器投切电容器组性能的现状与对策 [J]. 高压电器, 2003 (5): 44-46.
- [2] 刘卫东, 钱家骊. 真空开关开断单相感性小电流的操作过电压 [J]. 高压电器, 1986 (2): 9-15.
- [3] 陈西庚. 断路器切合并联电抗器爆炸原因分析 [J]. 电力建设, 2003 (5): 10-11.
- [4] 邵彬. 35 kV 并联电抗器故障分析 [J]. 广东电力, 2011 (2): 97-99.
- [5] Yu C W, Bickford J P. Digital-computer simulation of virtual-current chopping in vacuum circuit breakers [J]. IEE Journal on Electric Power Applications, 1979, 2 (4): 125-131.
- [6] Czarnecki L, Lindmayer M. Measurement and statistical simulation of multiple reignitions in vacuum switches [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1985, 13 (5): 304-310.
- [7] Kosmac J, Zunko P. A statistical vacuum circuit breaker model for simulation of transient overvoltages [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10 (1): 294-300.
- [8] Helmer J, Lindmayer M. Mathematical modeling of the high frequency behavior of vacuum interrupters and comparison with measured transients in power systems [C]. Proceedings of XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV 1996, Berkeley, CA, : 323-331.
- [9] Glinkowski M T, Gutierrez M R, Braun D. Voltage escalation and reignition behavior of vacuum generator circuit breakers during load shedding [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12 (1): 219-226.
- [10] Popov M, Van der Sluis L. Comparison of two vacuum circuit breaker arc models for small inductive current switching [C]. Proceedings of XXIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV 2000, Xi'an, 2000: 438-441.
- [11] Wong S M, Snider L A, Lo E W C. Overvoltages and reignition behavior of vacuum circuit breaker [C]. Sixth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 2003 (ASDCOM 2003) (Conf. Publ. No. 497), 2003: 653-658.
- [12] Popov M. Switching three-phase distribution transformers with a vacuum circuit breaker analysis of overvoltages and the protection of equipment [D]. The Netherlands: Delft University of Technology, 2002.
- [13] Lopez-Roldan J, Blundell M, Wing D, et al. Analysis of modern high voltage circuit breaker failure during shunt reactor switching operations and corrective measures [C]. Matpost European Conference on HV & MV Substation Equipment. Lyon, France: 2007.
- [14] Penkov D, Vollet C, De Metz-Noblat B, et al. Overvoltage protection study on vacuum breaker switched MV motors [C]. 5th Petroleum and Chem. Industry Conf. Europe-Electr (PCIC Europe). Instrumentation Applications. 2008: 1-7.
- [15] Kondala Rao B, Gajjar G. Development and application of vacuum circuit breaker model in electromagnetic transient simulation [C]. Power India Conference, 2006 IEEE, New Delhi, 2006: 7.
- [16] Theocharis A, Popov M, Seibold R, et al. Analysis of switching effects of vacuum circuit breaker on dry-type foil-winding transformers validated by experiments [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014 (99): 1.
- [17] 杜宁, 关永刚, 张景升, 等. 真空断路器开断并联电抗器的三相建模 [J]. 高压电器, 2010 (3): 6-9.

(收稿日期: 2015-01-15) **EA**