

吴汝豪,杨磊,袁伟明,等. 真空断路器开断并联电抗器过电压抑制方法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(1):84-90. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.01.013

WU R H, YANG L, YUAN W M, et al. Research on Overvoltage Suppression Method of Vacuum Circuit Breaker Switching-off Shunt Reactor [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(1):84-90. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.01.013

# 真空断路器开断并联电抗器过电压抑制方法

吴汝豪\*, 杨磊, 袁伟明, 巫环科, 向齐光, 罗俊杰

(广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523000)

**摘要:**针对真空断路器开断并联电抗器产生过电压故障的难题,文章基于广东电网某 220 kV 变电站真空断路器开断并联电抗器的现场试验数据,结合 Helmer 仿真模型、断路器断口间杂散电容和损耗、相间耦合杂散电容和损耗,建立真空断路器开断并联电抗器过电压计算模型.仿真计算了避雷器伏安特性、安装位置、并联电容器容值对真空断路器开断并联电抗器过电压的影响,研究结果表明:避雷器可以降低其安装位置的过电压,避雷器低伏安曲线的限制过电压的效果更明显;并联电容器可以有效降低过电压幅值,并对过电压振荡频率与陡度有较好的抑制效果.

**关键词:**真空断路器;并联电抗器;过电压;避雷器;并联电容器

**中图分类号:**TM862 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)01-0084-07

## Research on Overvoltage Suppression Method of Vacuum Circuit Breaker Switching-off Shunt Reactor

WU Ruhao, YANG Lei, YUAN Weiming, WU Huanke, XIANG Qiguang, LUO Junjie

(Dongguan Power Supply Bureau Guangdong Power Grid Corporation, Dongguan 523000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of overvoltage failure caused by the vacuum circuit breaker switching-off the shunt reactor, based on field test data of a 220 kV substation vacuum circuit breaker switching-off the shunt reactor in Guangdong Power Grid, combined with Helmer J's vacuum circuit breaker simulation model, phase-to-phase stray capacitance and losses, the stray capacitance and loss between open contacts of circuit breakers, to establish a model in ATP, about an overvoltage simulation calculation model of the vacuum circuit breaker switching-off shunt reactor. The effects were simulated by using of the model, which of V-A characteristics of arrester, the installation position and capacity of shunt capacitor on the switching-off overvoltage of shunt reactor oby vacuum circuit breaker. The research results show that the arrester reduce the overvoltage at its installation location, and lightning arrester's low volt-ampere curve is more effective in limiting overvoltage; the shunt capacitors effectively slow down the overvoltage value and have a better suppression of the overvoltage oscillation frequency and steepness effect.

**Keywords:** vacuum circuit breaker; shunt reactor; overvoltage; arrester; shunt capacitor

真空断路器有结构简单、可靠、操作方便、维护工作少、适用于频繁分合闸操作等优点,是我国变电站内

收稿日期:2020-04-15

基金项目:广东电网公司科技项目资助(GDKJXM20190392(031900KK52190001))

\*通信作者, E-mail: lxtohh@163.com

10 kV 主流断路器<sup>[1-3]</sup>.然而,在真空断路器分闸过程中,电弧在电流未达到零时熄灭,产生高频、高陡度的过电压,经常造成电抗器、站用变等电气设备发生绝缘故障<sup>[4-6]</sup>,因此,采用适当的过电压抑制方法,降低真空断路器开断并联电抗器的过电压幅值与电压陡度,对电力设备的安全稳定运行具有十分重要的作用.

针对真空断路器开断过程中产生的过电压,国内外学者从电感元件储能理论<sup>[7-8]</sup>、电弧重燃可控电阻 ATP 过电压仿真<sup>[9-10]</sup>和基于试验的过电压数据,提取真空断路器投切过程中断口电弧的截流值、电流过零变化率、介质恢复强度这 3 个特征参数进行 ATP 过电压仿真<sup>[10-11]</sup>,并基于此模型进行了真空断路器开断电动机、变压器过电压仿真研究<sup>[12-14]</sup>.同时,也采用该模型进行了避雷器<sup>[15]</sup>、RC 阻容吸收器<sup>[16]</sup>的过电压幅值抑制方法仿真研究,但对过电压陡度研究比较少.

在电压幅值满足系统运行要求条件下,如果电压频率过高、陡度过大,仍有可能造成设备绝缘击穿<sup>[17]</sup>.同时,随着研究的深入,研究人员发现,不同系统运行方式与设备参数,所产生过电压的幅值、陡度也不一样<sup>[18]</sup>.

因此,针对以上问题,本文基于广东电网某 220 kV 变电站真空断路器投切并联电抗器的现场试验数据,采用包含真空断路器开断过程中断口电弧的截流值、电流过零变化率、介质恢复强度这 3 个特征参数的 Helmer 仿真模型、再结合断路器断口间、相间的杂散电容、电感和损耗,仿真研究了避雷器伏安特性、并联安装位置、并联电容器容值对过电压幅值与陡度的抑制效果.

## 1 真空断路器开断并联电抗器仿真模型与参数

### 1.1 仿真模型

在真空断路器开断并联电抗器过程中,由于断口间距离较小,很容易产生电弧,断路器灭弧能力强,电弧极易在电流未过零就熄灭了,此时,系统中电感、电容中储存的能量在系统中形成振荡回路并相互放电,形成截流过电压,根据能量守恒可知,各相截流过电压计算公式如式(1)所示.

$$\frac{1}{2}CU_0^2 + \frac{1}{2}LI_{ch}^2 = \frac{1}{2}CU_m^2. \quad (1)$$

式中: $U_0$  为系统中电容的初始电压; $U_m$  为系统中电容上最大电压值; $C$  为系统中等效电容; $I_{ch}$  为真空断路器电弧截流值,根据运行经验,10 kV 真空断路器的截流值一般为 4~6 A,而本文现场试验的三相截流值为 4.8,5.3,5.1 A.因此,本文仿真中截流值取 5 A; $L$  为电抗器电感.

由式(1)可知,

$$U_m = \sqrt{\frac{L}{C}I_{ch}^2 + U_0^2}. \quad (2)$$

系统中电容上最大电压值  $U_m$  与电抗器电感  $L$ ;等效电容  $C$  以及真空断路器电弧截流值  $I_{ch}$  和电容的初始电压  $U_0$  密切相关.最大电压值  $U_m$  随系统中电容  $C$  的增大而减小.在真空断路器开断过程中,当断口间的击穿电压小于断路器动静触头电压差  $U_d$  时,断口间发生绝缘击穿,出现电弧重燃,当重燃熄弧后,触头电压升高,如此反复,将产生陡度很大的重燃过电压,造成设备绝缘故障.随着断口之间的距离不断地增大,断口介质恢复强度也逐渐地增大, $U_d$  不足以击穿断口,重燃将不再发生.本文主要通过对现场试验过电压数据峰值的拟合,确定断路器开断过程中产生重燃过电压不同时刻的  $U_d$ ,并根据 Helmer 仿真模型,在 ATP 中编程建立真空断路器开断的 MODEL 模型,模块中  $I_{si}$  为断口间电流, $U_j$  为断路器静触头电压, $U_k$  为断路器动触头电压, $K_i$  的值为 1 和 0,分别代表断口间电弧重燃和熄灭.考虑到断口的杂散参数和损耗,在断路器断口间并联 0.8 nF 电容、20 mH 电感和 0.1  $\Omega$  电阻.如图 1 所示.

### 1.2 设备参数

根据变电站设计图纸与设备铭牌得知,设备参数

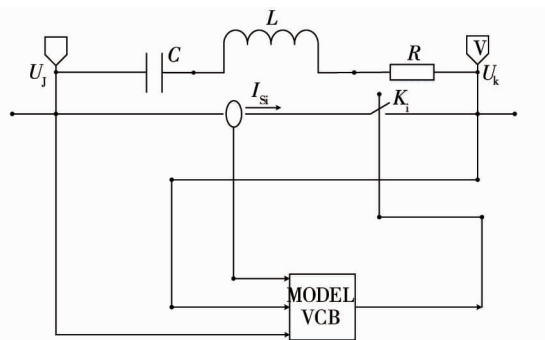


图1 真空断路器开断 MODEL 模型

如表1所示.

表1 设备参数

设备名称	型号与设备参数
主变	型号为SFSZ10-240000/220,额定容量180MVA,高、中、低额定电压分别为230,115,10.5kV,高、中、低绕组容量分别为180/180/90MVA,空载损耗86.273kW,空载电流百分数0.068%
电抗器	型号为BKK-2 667/10,单相额定容量为2 667Mvar,额定电压:10kV,额定电流:462A
站用变	型号DKSC400/10,额定容量为400kW
电缆	型号ZRB-YJV22-8.7/15-3×240,单位长度电容值约为0.3nF/m,单位长度电感值约为0.35μH/m,单位交流电阻约为0.156Ω/km

## 2 现场暂态试验与分析

### 2.1 现场暂态试验

现场试验中采用10kV电容式分压器进行电压测量,电流从现场电流互感器二次侧提取.现场试验和发生故障时运行条件完全相同,10kV 2M上电容器、馈线、#<sup>2</sup>接地变退出运行,#<sup>2</sup>电抗器、#<sup>1</sup>站用变、52乙PT处于运行状态,电压、电流点测量点均在站用变、电抗器首端,如图2所示.

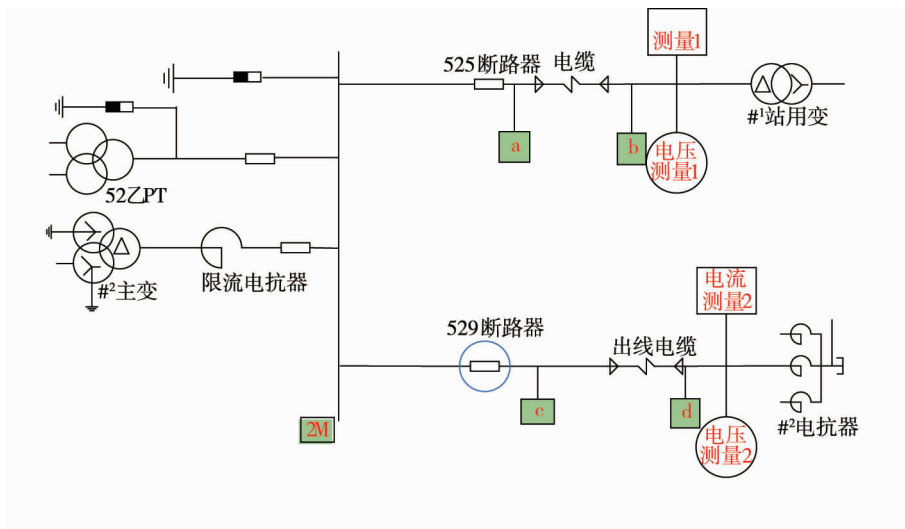


图2 试验测点布置

### 2.2 试验结果

试验共记录到8组分闸数据,具体数值如表2所示,表中 $U_q$ 为电抗器首端对地电压、 $U_b$ 为站用变首端电压,其中 $U_q$ 最大值为47.458kV(5.813p.u.), $U_b$ 最大值为40.79kV(5p.u.),其中IEC规定35kV以下非直接接地系统中最大操作过电压不允许超过4.0p.u..

表2 电抗器与站用变首端电压试验值

序号	动作	$U_q$ /kV	$U_b$ /kV
1	#12-分	18.520	10.661
2	#13-分	14.499	10.231
3	#14-分	14.806	10.772
4	#15-分	23.356	11.536
5	#16-分	19.167	11.024
6	#17-分	47.458	40.790
7	#19-分	23.962	10.639
8	#20-分	14.299	10.728

### 3 真空断路器投切并联电抗器过电压的仿真模型验证

根据以上参数和模型进行断路器开断过电压仿真计算,其中 A,B,C 三相电压颜色分别采用红、绿、蓝表示,如图 3 所示.图 3 中电抗器、站用变首端过电压最大幅值分别为 48.68,40.79 kV,与现场试验过电压幅值接近,验证了本文计算模型的有效性.

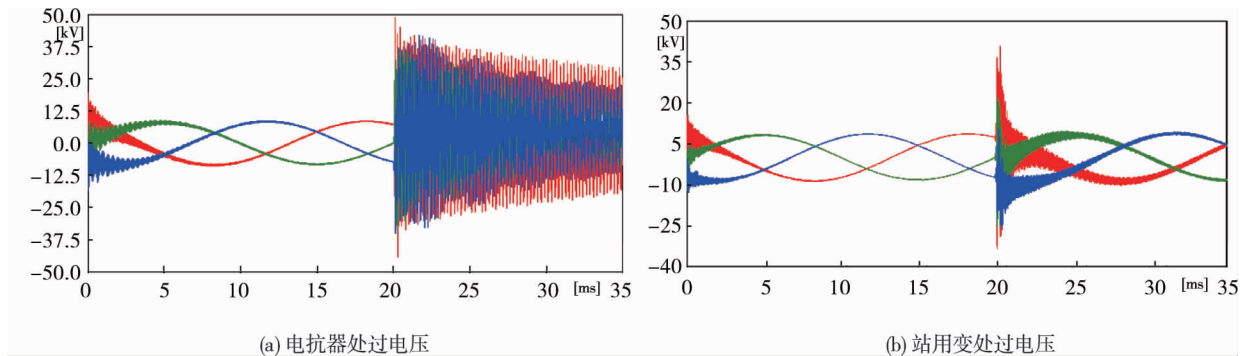


图 3 过电压仿真波形

### 4 避雷器对真空断路器投切并联电抗器过电压影响因素分析

#### 4.1 避雷器参数、安装位置对电压影响分析

避雷器由电阻片串联封装而成,其中电阻片电阻的大小与施加在电阻片上的电压呈非线性关系.在正常电压下工作,电阻片电阻很大,呈绝缘状态.随电压增大,电阻逐渐降低,使过电压通过大电流的方式进行释放,从而将被避雷器保护的电气设备的过电压限制在设备安全电压以下,待过电压消失后,电阻片高电阻恢复,再次呈绝缘状态,使设备免受过电压的损害.所以在考虑系统正常运行和工频电压增大的情况下,本文构建了 2 种避雷器,其伏安特性曲线如图 4 所示.并联安装在图 2 中的 a,b,c,d 这 4 个位置.

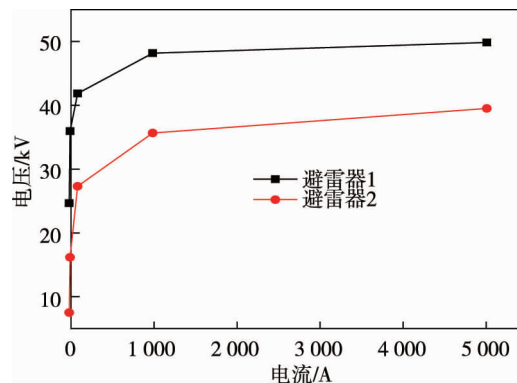


图 4 避雷器伏安特性曲线

#### 4.1.1 避雷器参数、安装位置对过电压影响因素分析

本文先后将避雷器 1、避雷器 2 分别并联安装在 a, b, c, d 这 4 个位置,其电抗器、站用变首端过电压如表 3 所示.表中  $U_{1d}$  为避雷器 1 的电抗器首端过电压、 $U_{2d}$  为避雷器 2 的电抗器首端过电压; $U_{1b}$  为避雷器 1 的站用变首端过电压、 $U_{2b}$  为避雷器 2 的站用变首端过电压.

表 3 避雷器安装位置对电抗器过电压的影响

避雷器安装位置	$U_{1d}/\text{kV}$	$U_{2d}/\text{kV}$	$U_{1b}/\text{kV}$	$U_{2b}/\text{kV}$
a	47.96	42.08	35.96	29.21
b	37.82	22.07	39.31	31.38
c	53.09	40.76	35.42	26.46
d	62.50	44.78	35.72	23.45

由表3可知,根据氧化锌避雷器过电压保护原理,由于伏安特性曲线较低的避雷器,能够在较低过电压时通过非线性电阻,释放过电压能量,到达更好的过电压抑制效果,所以伏安特性曲线较低的并联避雷器过电压抑制效果明显优于伏安特性曲线较高的并联避雷器;并且针对同一避雷器,离避雷器距离越近,受避雷器残压的影响越好,其过电压抑制效果越好.因此,在设计时,可在b,d位置安装伏安曲线较低的避雷器来降低真空断路器开断并联电抗器过电压,对每一个断路器都要配置一个避雷器.其过电压波形如图5所示.电抗器、站用变首端过电压幅值分别为19.28,20.08 kV.

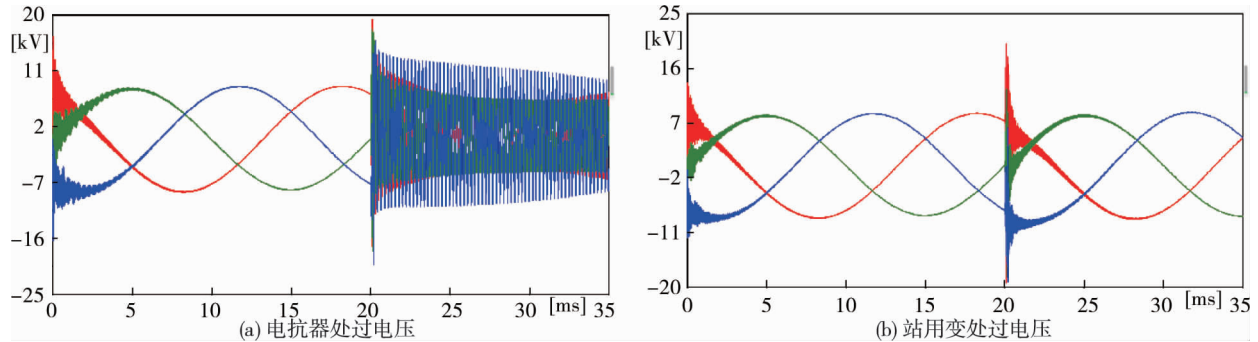


图5 b、d处安装避雷器电压波形

#### 4.2 避雷器与电容器并联方法的过电压抑制

根据仿真结果,电抗器、站用变首端过电压分别下降了60.39%与50.77%,但过电压振荡频率仍为5.5 kHz.然而,在电压幅值一定时,当系统中振荡频率越大,其造成的电压陡度越大,导致幅值满足要求的电压累积作用于站用变等设备时,仍有可能造成设备绝缘击穿.

根据过电压频率计算公式 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 可知,过电压振荡频率与系统中电感 $L$ ,电容 $C$ 的大小成反比,

当系统中未安装并联电容器时,系统中微小的杂散电容是造成过电压振荡频率较大的主要原因.同时,根据式(2),系统中高频过电压幅值随系统中电容的增大而减小.因此,为了进一步抑制系统中过电压幅值,降低过电压陡度,在b,d处并联安装避雷器的基础上,在b处并联安装电容器,仿真研究过电压幅值与陡度的抑制效果.本文仿真采用并联电容器的容值分别为0.05,0.10,0.15,0.20  $\mu\text{F}$ ,电抗器首端、站用变首端过电压波形分别如图6和图7所示.过电压幅值与陡度如表5所示.

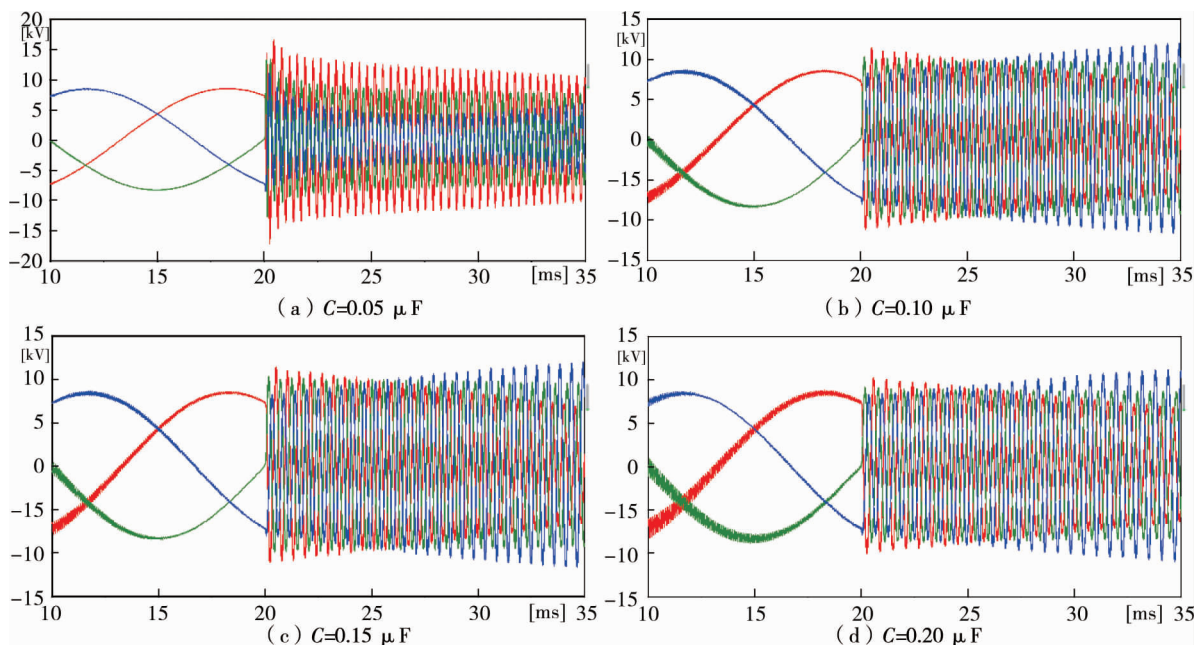


图6 电抗器首端电压

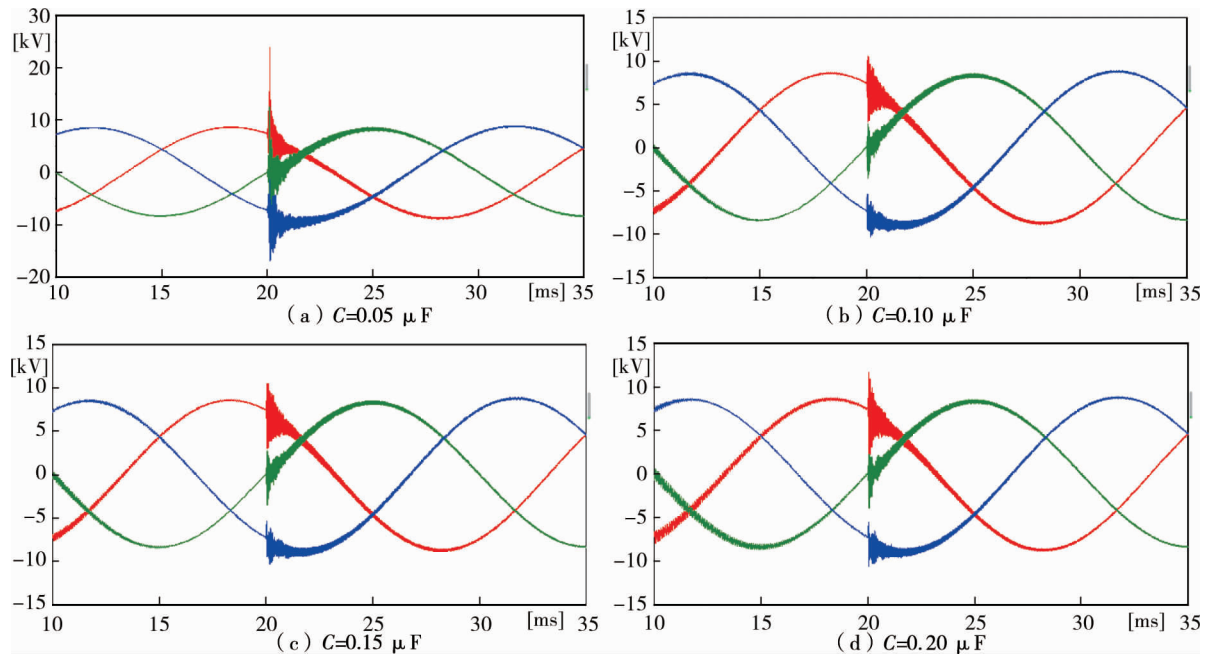


图 7 站用变首端过电压

表 5 并联电容器对过电压的影响

电容器容值/ $\mu\text{F}$	$U_d/\text{kV}$	$du/dt/(\text{kV}/\mu\text{s})$	$U_b/\text{kV}$	$du/dt/(\text{kV}/\mu\text{s})$
$C=0$	19.28	0.42	20.08	12.05
$C=0.05$	16.53	0.23	23.84	2.86
$C=0.10$	11.58	0.10	12.04	1.08
$C=0.15$	11.38	0.08	10.05	0.80
$C=0.20$	10.80	0.07	11.60	0.88

由图 6,图 7 和表 5 可知,安装并联电容器后,电抗器、站用变首端过电压陡度急剧下降,但当电容值从 0.05 增大到 0.15  $\mu\text{F}$  过程中,电抗器、站用变处过电压幅值与电压陡度随着电容值增大而减小,即并联电容器过电压的抑制能力随着电容值的增大而增强;但当电容值由 0.15 增大到 0.20  $\mu\text{F}$  时,电抗器首端过电压值与电压陡度略微下降,而站用变首端过电压幅值和电压陡度略有增加.因此,该系统中可采用 0.15  $\mu\text{F}$  并联电容器与 b,d 位置并联安装避雷器的组合过电压抑制方法进行真空断路器开断并联过电压幅值与陡度抑制.

## 5 结论

1) 本文基于 220 kV 变电站现场试验电压数据,采用 ATP-EMTP 仿真软件建立了真空断路器开断并联电抗器过电压计算模型,从避雷器伏安特性、安装位置、并联电容器容值方面,给出避雷器与并联电容器组合过电压抑制方案.

2) 针对广东电网公司某 220 kV 变电站,可采用较低伏安曲线避雷器与 0.15  $\mu\text{F}$  容值的并联电容器组合的方式,其中将电抗器、站用变处的过电压幅值降低至 23.79% 与 29.52%,电压陡度分别降至 19.05% 和 6.64%.

## 参考文献:

- [1] 刘航,陈嵩,孙晓勇,等.真空断路器合闸 10kV 并联电抗器过电压抑制的仿真研究[J].高压电器,2019,55(12):32-37.
- [2] 陈锡磊,施纪栋.真空断路器开断 35kV 并联电抗器过电压及其防护方案分析[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(2):54-59.

- [3] 周兴梅,彭军庆,姜伟雄.12kV 真空断路器开断并联电抗器过电压抑制[J].云南电力,2017,45(2):113-119.
- [4] 张照辉,魏钢,杨庆,等.12kV 真空断路器投切并联电抗器合闸预击穿过电压研究[J].高压电器,2016,52(3):1-6.
- [5] 陈嵩,杨庆,魏刚,等.真空断路器开断并联电抗器过电压抑制措施[J].电网技术,2019,43(4):1301-1307.
- [6] 安韵竹,文习山,张婷婷,等.SF6 断路器预击穿引起并联电抗器合闸过电压的原因及防护措施[J].高电压技术,2013,39(1):75-80.
- [7] Clerici A, Ruckstuhl G, Vian A. Influence of shunt reactors on switching surges[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970,89(8): 1727-1736.
- [8] Murano M, Fujii T, Nishikawa H, et al. Three-phase simultaneous interruption in interrupting inductive current using vacuum switches[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974,93(1): 272-280.
- [9] 陈梁金,周国良,江少成.35 kV 空母线系统中真空断路器投切电抗器相关问题分析[J].高压电器,2010,46(9):103-106.
- [10] Tan Y, Anji H, Liu Z, et al. Research on the Reignition Problem and Interruption Characteristics of Series Connected Vacuum Interrupters[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(8): 2029-2033.
- [11] 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, 2015, 30(1): 351-359.
- [12] Shipp D D, Dionise T J, Lorch V, et al. Transformer failure due to circuit breaker induced switching transients[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(2): 707-718.
- [13] Popov M, Smeets R, Van der Sluis L, et al. Experimental and theoretical analysis of vacuum circuit breaker prestrike effect on a transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1266-1274.
- [14] Shipp D D, Dionise T J, Lorch V, et al. Vacuum circuit breaker transients during switching of an LMF transformer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(1): 37-44.
- [15] 彭军庆,姜伟雄,司马文霞,等.真空断路器开断 35kV 并联电抗器三相仿真与过电压抑制研究[J].高压电器,2017,53(3):147-159.
- [16] Du N, Guan Y, Zhang J, et al. Phenomena and mechanism analysis on overvoltages caused by 40.5-kV vacuum circuit breakers switching off shunt reactors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2102-2110.
- [17] Liljestränd L, Lindell E, Bormann D, et al. Vacuum circuit breaker and transformer interaction in a cable system[C]//22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Stockholm, 2013: 1-4.
- [18] Badrzadeh B. Transient recovery voltages caused by capacitor switching in wind power plants[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(6): 2810-2819.