

1 100 kV GIS 隔离开关分合容性 小电流试验中的暂态电压测量

卢江平¹, 杨兰均², 贾涛³, 李良书², 刘德辉⁴

(1. 陕西电力科学研究所, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049;
3. 西安高压电器研究所, 陕西 西安 710077; 4. 新东北电气高压开关有限公司, 辽宁 沈阳 110025)

摘要: GIS 隔离开关分合容性电流过程持续时间长,同时产生高幅值、大陡度、高频率的过电压。采用新研制的光纤式电压测量系统,对 1 100 kV GIS 隔离开关分合小电容电流试验中的暂态电压进行测量,得到了分合过程中负载电容上“台阶”状电压波形,同时采用 EMTP 仿真软件对电压波形进行相应的仿真研究,得到了负载上电压的幅值、频率、波形等相应特性。而且试验和仿真结果一致。证明该测量系统可以用于特高压隔离开关分合容性电流用暂态电压的测量。

关键词: 隔离开关; 快速暂态过电压; 测量

中图分类号: TM564

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0106-04

Transient Voltage Measurement in Switching Small Capacitive Current Test of 1 100 kV GIS Disconnecter

LU Jiang-ping¹, YANG Lan-jun², JIA Tao³, LI Liang-shu², LIU De-hui⁴

(1. Shannxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, Xi'an 710077, China; 4. New Northeast Electric High Voltage
Switchgear Co., Ltd., Shenyang 110025, China)

Abstract: The process of GIS disconnecter switching small capacitive current lasted longer, meanwhile, high amplitude, steep and high frequency overvoltage is produced. Using newly developed optical voltage measuring system, to measure the transient voltage in switching small capacitive current test of 1 100 kV GIS disconnecter, is introduced in this paper. "Step" shape voltage waveform on load capacitor during switching process is obtained. Based on EMTP Simulation Software, the voltage amplitude, frequency, waveform and other relevant load characteristics are obtained. Moreover, the test and the simulation results are consistent, which proved that the measuring system can be used for transient voltage measurement in ultra high voltage disconnecter switching capacitive current.

Key words: disconnecter; very fast transient overvoltage(VFTO); measurement

0 引言

GIS 目前广泛应用于电力系统中,其操作时产生的快速暂态过电压不仅会引起主回路的故障,还会对相邻设备造成绝缘损坏。

快速暂态过电压上升时间极短,约为数纳秒,叠加于工频电压上并受到残余电荷的影响,因此要求测量系统不仅具有很高的上限频率(上百兆赫兹)以及足够低的下限频率(几个赫兹);同时,由于系统中会产生很高的对地电压,伴有很强的空间电磁干扰,

使测量具有许多特殊性,并要求测量仪器的方波响应时间很短,频带很宽,还需要采取更强的保护和抗干扰措施。目前测量方法研究还处于起步阶段,缺乏准确、有效的测量手段以及工程应用中通用易行的具体方法,限制了试验研究和现场检测。

在西安高压电器研究所对新东北电气(沈阳)高压开关有限公司生产的 ZF6-1100(L)/Y6300-50 型气体绝缘金属封闭开关设备进行隔离开关分合容性小电流试验过程中,采用新研制的 GXV-I 光纤式电压测量系统(该设备已获国家专利,专利号: ZL200820222057.6)^[1],测量了分合过程中负载电容

收稿日期: 2009-09-05

作者简介: 卢江平(1956),男,高工,现从事开关专业技术工作。

上的电压波形,并进行了相应的分析,得到了暂态电压的规律特性。

1 试验设备及接线

试验的接线方式见图1。设备参数及选型中隔离开关每极分、合闸电阻值: $500 \pm 50 \Omega$; 操动机构为电动弹簧操动机构(快速机构); 分、合闸时间 $< 10 \text{ s}$ (含弹簧储能时间); SF_6 气体额定压力为 0.5 MPa (20°C 表压)。电压测量点在 GIS 负载侧出线套管上, 光纤式电压测量系统 GXV-I 的测量场强: $10 \text{ V/cm} \sim 100 \text{ kV/cm}$; 测量带宽: $50 \text{ Hz} \sim 250 \text{ MHz}$; 测量误差: $\leq 3\%$; 响应时间: $\leq 4 \text{ ns}$; 数据存储长度 128 Mb ; 数据最高采集率 1 GS/s ; 在实际测量中, 由于开关动作过程持续数百毫秒, 考虑记录整个动作过程电压波形的时间需要及波形的精确度要求, 实际采样速率为 125 MS/s , 记录时间 1000 ms 。试验按照 IEC-62271-102《高压交流隔离开关和接地开关》标准的相关要求, 以该标准中的试验方式 3 进行隔离开关容性电流开合试验。国标 GB 1985-2004 中所确定的隔离开关最高电压等级为 800 kV , 特高压示范工程中采用的 1100 kV 隔离开关不在本标准的涵盖范围内, 从世界范围而言, 目前也没有任何一个正式发布的技术标准涵盖了特高压开关设备的技术要求^[2]。

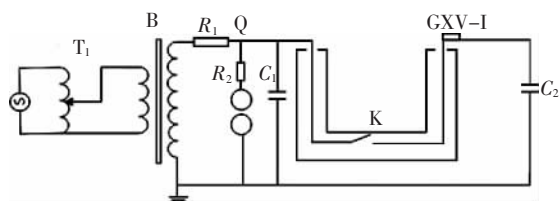


图1 试验接线示意图
T₁—调压器; B—高压变压器; K—1100 kV GIS; R₁—变压器保护电阻; R₂—球隙保护电阻; C₁—测量电容器; C₂—测量和负载电容器; GXV-I—光纤式电压测量系统。

图1 试验接线示意图

2 电压测量波形及数据

2.1 100 kV 电源电压下的试验

2.1.1 试验实测波形

在 100 kV 电源电压下, 隔离开关关合容性小电流时, 负载电容器上电压全波形图见图2。文中所进行的所有测试其测量设备的衰减倍数均为 50000 。

合闸电弧过程持续约 220 ms , 气体放电次数大于 100 次。为了研究方便, 将首次击穿放电附近的电压波形展开见图3。

100 kV 电源电压下关合容性小电流, 隔离开关首次击穿时, 负载电容器上电压波形展开图见图3。相

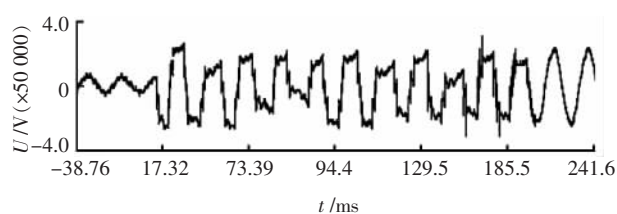


图2 100 kV 关合时负载电容器上的电压全波形图

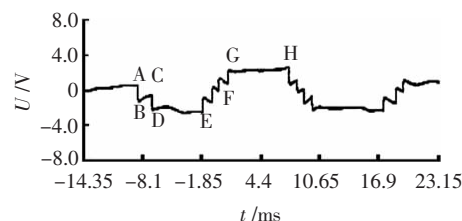


图3 100 kV 电源电压下合闸击穿起始部分展开图

对于断路器, 隔离开关动作速度慢, 需要数秒才能完成分合动作。

隔离开关关合时, 随着触头间距离的不断减小, 触头间的电场强度随之增大, 同时触头间的绝缘强度随之减小。当触头间距离减小到一定程度时, 隔离开关触头间的击穿电压大于触头间的绝缘强度, 触头间隙第一次击穿放电, 形成电弧, 即图3中A点。在此之前, 隔离开关电源侧已存在 100 kV 电源电压, 由于存在断口电容和其他杂散电容, 负载侧也具有一定的工频电压。间隙放电击穿以后, 电路导通, 负载侧电压发生跳变, 从原来的A点跳变到B点, 与电源侧电压基本相同(忽略电弧压降)。此时A和B两点间的电压差即为隔离开关断口击穿电压。

隔离开关放电击穿后, 电路的结构发生了变化, 电路将改变原来的工作状态并过渡到另一个工作状态。由于电路中电感、电容等遵从能量守恒原理, 能量将在有限的时间内(几个微妙)重新分配, 出现上升时间为微秒级的暂态过程, 形成图4的高频电弧电流。

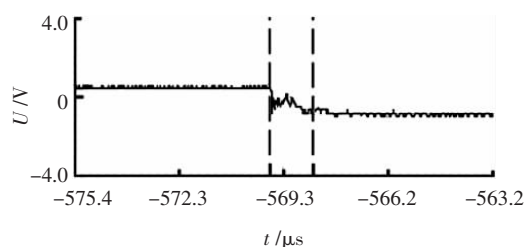


图4 100 kV 电源电压下关合时首次击穿回路高频电流展开图

回路高频电弧电流持续约 $1.5 \mu\text{s}$ 。电弧在高频电流首次过0时不会熄灭, 只有当高频电流震荡衰减到一定程度时, 电流过0, 电弧才会熄灭。此后负载侧电压的变化有2种: 是按电容耦合方式跟随电源侧电压变化; 是负载侧自身的电感及电容形

成的振荡电压(图3波形中的BC段),从波形看出,此时的负载侧电压频率较低。

负载侧由于电容的储能作用,衰减缓慢,在2次击穿的时间间隔内,可认为不变,电源侧电压仍按照正弦电压规律变化,当隔离开关触头间隙电压差再次达到间隙击穿电压强度时,间隙再次被击穿,形成电弧。即图3中C点处发生第二次间隙击穿放电,负载侧电压从C点跳变到D点。

由于负载电容上的电压在电弧熄灭阶段几乎不发生改变,当间隙击穿放电时跳变到电源侧电压,形成图3中独特的“台阶”状电压波形。在整个波形区间内,“台阶”的水平宽度并不是完全相同的,而是在电压波峰处“台阶”宽,电压过0处“台阶”窄,主要是由于电源侧正弦电压波在从一个峰值向另一个峰值变化的区间过程中,变化速率由小到大再到小。在一个变化区间内,隔离开关间隙距离变化不大,绝缘强度近似认为是固定不变的。“台阶”宽度代表了间隙电压从0变化到间隙击穿电压的时间,这与电源侧正弦波形的变化规律一致。电容器上电压波形在从一个区间向相反区间变化的转折点处有一段“平台”,见图3波形中的DE段和GH段,持续时间较长,其原因是当电源电压达到峰值时,间隙电压仍没有达到击穿放电的要求,只有当电源电压向另一峰值变化到间隙击穿电压,才能再次击穿,同时由于峰值处电压的变化率最小,击穿需要一段更长的时间,表现在图形上,即为波形上一段长的“平台”。

图5为间隙完全闭合前一段时间内的电压波形图,开关触头间隙的距离已经非常小,断口的击穿电压(如图5波形纵轴电压高度差)也非常小,在相同的电源电压作用下,间隙电压非常容易达到击穿点。每个周波内的气体放电击穿次数也越来越多,在完全合闸前5ms内,气体放电已达到17次(见图6)。与图3相比,“台阶”宽度减小,高度也减小。此时,出现了因行波折反射产生的快速暂态过电压(VFTO)。将图5中CD段波形展开后见图6。开关进一步动作到闭合,回路导通,负载侧电压与电源侧电压一致。

将图5中F点展开后见图7。VFTO过电压约为

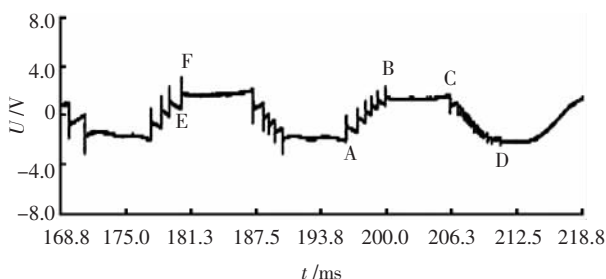


图5 合闸结束时负载电容器上的电压波形图

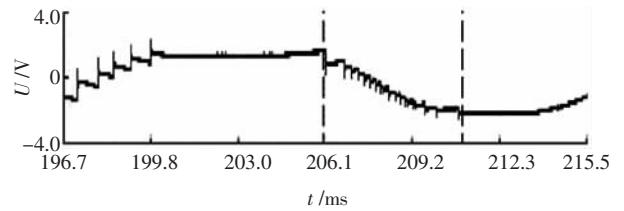


图6 合闸结束时间隙密集击穿放电波形展开图

1.5 p.u., 频率约为 10 MHz, 持续时间为 1.5 μs。VFTO 只在合闸即将结束时产生,其原因可能与电弧通道电阻减小有关,其真正原因需进一步研究。

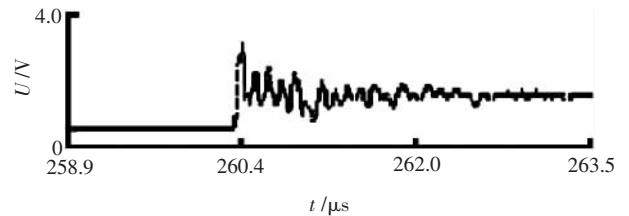


图7 合闸展开的VFTO波形图

2.1.2 仿真模拟

使用 EMTF 仿真软件,对 100 kV 电压下该隔离开关合闸容性电流试验进行了仿真研究,并与实测结果进行了比对。由于 VFTO 的过程十分复杂,很难真实反应 GIS 中的各种损耗,通过实验和仿真的对比,得到与实测相似的波形^[3]。

图8为隔离开关闭合动作仿真研究过程的简易逻辑流程图。随着开关触头靠拢,间隙击穿所需的电压逐渐下降,每一次计算步长 Δt 时间,检测一次间隙电压与间隙击穿电压,当间隙电压小于间隙击穿电压时,间隙不能击穿,跳到下一计算步长 Δt 。当间隙电压大于间隙击穿电压时,间隙击穿,形成电弧,同时检测开关是否完全闭合,如果没有完全闭合,电流过0时电弧熄灭,电路断开,跳到下一个 Δt ,继续进行计算。循环往复,直至闭合动作完成。

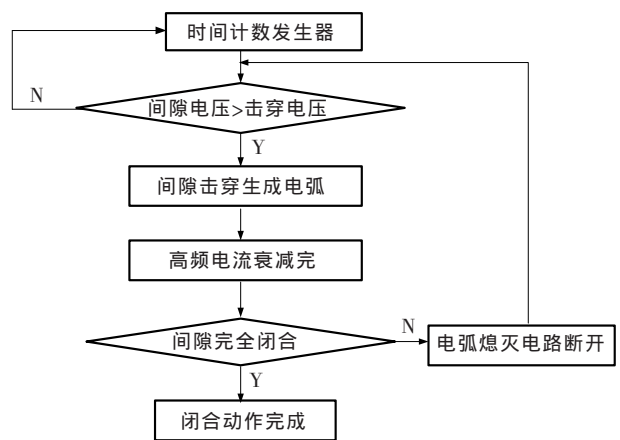


图8 闭合动作的简易逻辑流程图

图9为采用 EMTF 程序对 100 kV 电源电压下

该型隔离开关合容性电流试验进行的仿真研究结果^[4]。可以看到,在隔离开关的整个动作过程中,间隙发生多次重燃,每一次重燃都伴有振荡的发生,随着触头间距离的减小,击穿越来越频繁,“台阶”的分布规律与前述实验结果一致。

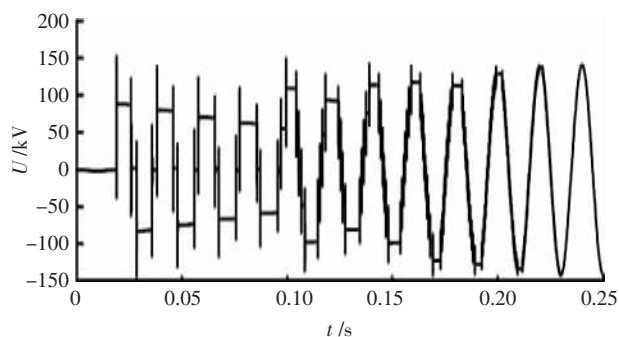


图9 仿真计算图

2.2 300 kV 电源电压下的试验

在隔离开关合容性电流试验中关合操作时,击穿电压随间隙距离的减小不断减小;开断过程与之相反,击穿电压随间隙距离的增大而增大,图10为300 kV电源电压下,该隔离开关开断容性电流时负载电容器上的电压波形图。

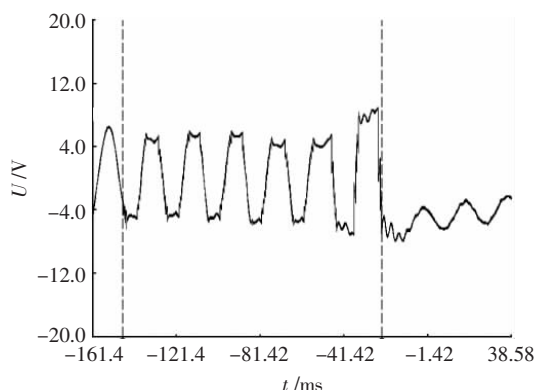


图10 300 kV 电源电压下开断时负载电容器上的电压波形图

分闸电弧过程持续约125 ms,气体放电次数大于100次。在触头分离初期,气体放电频率较高并有VFTO产生(见图11),由于分闸初期的断口击穿电压较低,VFTO的数值并不大,约为1.05 p.u.。

在分闸过程即将结束时,气体放电频率减小,断口击穿电压增加,断口击穿电压增加到大于断口的恢复电压,气体放电过程结束(见图12)。这个过程过的电压是由于电源对负载电容多次充放电所致,分闸过电压约为1.5 p.u.。

2.3 635 kV 电源电压下的试验

在635 kV电压条件下,合闸过程电弧持续时间约260 ms,气体放电次数大于500次。分闸电弧持续时间约140 ms,气体放电次数大于500次。在额

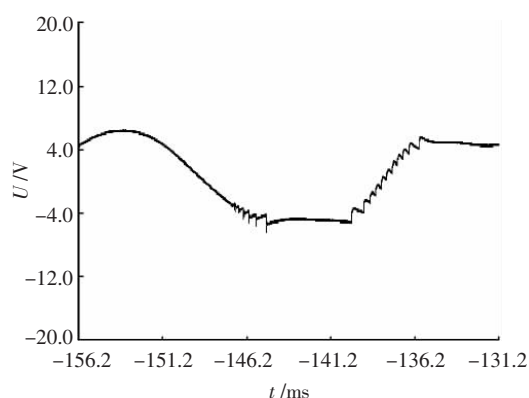


图11 300 kV 分闸起始部分展开图

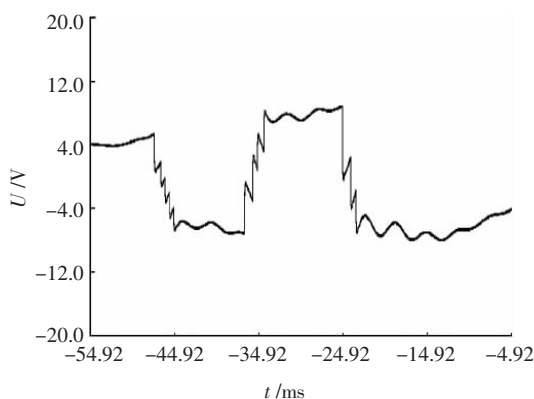


图12 300 kV 分闸结束部分展开图

定电压下的试验,由于受试验条件的限制,改变了试验条件(试验回路参数),测量的波形数据和100 kV、300 kV不同,635 kV电源电压下切合容性电流试验时,负载电容器上的电压波形图见图13、14。

3 结论

由于受试验条件的限制,在该GIS中的隔离开关进行分合小电容电流试验时,仅对100 kV电源电压下和300 kV电源电压下负载侧的暂态电压进行了测量,总结出其波形特点如下:

(1)隔离开关安装有分合闸电阻,暂态过电压为

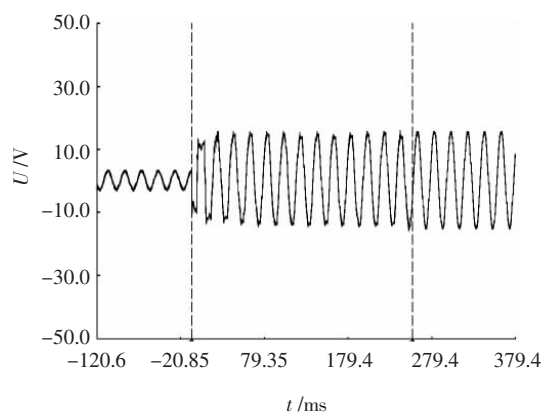


图13 635 kV 电源电压下合闸时负载电容器上的电压波形图

(下转第114页)

(3)杆塔的冲击接地电阻越小,站内各主要设备的过电压就越低。远区杆塔接地电阻减小时,对站内设备过电压影响较小;近区杆塔的接地电阻减小时,过电压水平降低较多,当降低 $1\ \Omega$ 的冲击接地电阻时,设备上的过电压降低几兆伏。所以改变近区冲击接地电阻对限制过电压水平和节约成本有极大的意义。

(4)根据以往配置的避雷器,如果主变上的过电压还是很高,可在出线处增设一组避雷器,全站设备过电压水平都有明显下降。此措施可供工程参考。

4 展望

雷害是输电线路故障的主要原因,绝缘子串放电特性、雷电冲击电晕、与杆塔冲击接地电阻对雷电侵入波过电压影响密切相关。笔者只是粗略地考虑进线段电晕的一些影响,在真正意义上的电晕是电压过高,就产生电晕。电晕越强,导线的动态电容就越大。雷击时电晕具体带来多大的影响,研究工作者可结合此点与线路的绝缘造价展开深入研究,提出更经济的方案。

参考文献:

- [1] 北京电力设计院.房山 500 千伏变电站(一个半断路器接线)雷电侵入波研究报告[R].北京:北京电力设计院,1982.
- [2] 张玉秋,王子春,杨利军. 500 kV 变电所防雷保护计算分析[J].

中国电力,1995(8):12-16.

- [3] 刘渝根,刘 纬,陈先禄.500 kV 变电站雷电侵入波研究[J].重庆大学学报,2000,23(3):17-19.
- [4] 陈禾,江裕熬,陈丽英.广州蓄能水电厂 500 kV 电气设备雷电过电压计算[J].广东电力,2000,13(2): 22-24.
- [5] 刘 青,张玉峰.220 kV GIS 变电站雷电过电压防护措施的研究[J].高压电器,2008,44(4):329-331.
- [6] 刘 青.宝能 220 kV GIS 变电站雷电侵入波过电压的研究[J].高压电器,2008,44(2):142-144.
- [7] 陈梁金,李文艺.750 kV GIL-GIS 系统雷电侵入波防护的研究[J].高电压技术,2005,31(6):39-41.
- [8] 谷定燮.500 kV 输变电工程设计中雷电过电压问题[J].高电压技术,2000,26(6):60-62.
- [9] 袁兆祥,周洪伟.500 kV HGIS 变电站雷电侵入波的计算分析[J].高电压技术,2007,33(6):71-75.
- [10] 谢辉春,文习山.500 kV GIS 变电站雷击进线段塔顶雷电过电压的仿真研究[J].电气应用,2006,25(3):63-66.
- [11] LI X R,MALIK O P,ZHAO Z D.A Practical Mathematical Model of Corona for Calculation of Transients on Transmission Lines[J].IEEE Trans on PWRD,1989,4(2):1 145-1 152.
- [12] CARNEIRO S.Evaluation of Corona and Line Models in Electromagnetic Transients Simulations [J].IEEE Trans on PWRD, 1991,6(1):334-342.
- [13] 陈梁金,杜 宾.计及雷击电晕时 750 kV 进线开关触头间暂态过电压的研究[J].高压电器,2004,40(3):167-169.
- [14] 陈国庆,张志劲.输电线路耐雷性能计算方法的研究现状分析[J].重庆大学学报,2003,26(5):137-142.
- [15] 吴伯华,陈继东.500 kV 线路避雷器的雷电过电压保护性能的研究[J].电瓷避雷器,2002,187(3):27-31.

(上接第 109 页)

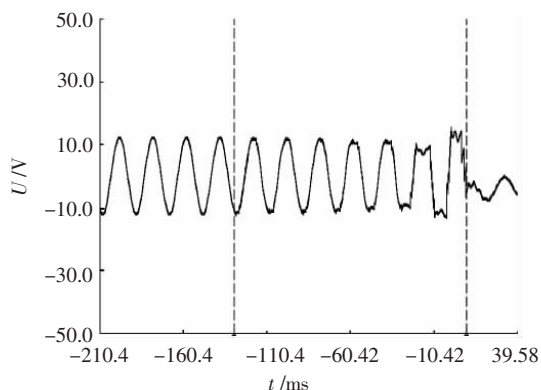


图 14 635 kV 电源电压下分闸时负载电容器上的电压波形图

1.5 p.u., 频率为 10 MHz;

(2)分合过程产生多次气体击穿和熄灭,放电次数与电源电压和触头运动速度有关,电源电压高、触头运动速度慢,则放电次数多,相反则少;

(3)单次气体击穿到电弧熄灭的时间约为 $1.5\ \mu\text{s}$;

(4)气体放电遍布在 $0\sim 360^\circ$ 电角度,气体击穿时负载上残存的电压有时会高于电源电压;

(5)触头间隙较小时,间隙击穿间隔非常小,行波折反射,产生了快速暂态过电压;

(6)气体击穿过程的持续时间随电源电压提高而增加。

参考文献:

- [1] 卢江平.一种新型光纤式电压测量系统 [J]. 陕西电力,2008,36(9):38-40.
- [2] 陈 隽,崔景春,阮 玲,等.1 100 kV HGIS 中隔离开关开合母线转换电流试验及转换电压确定[J].湖北电力,2008,32(1):35-36,56.
- [3] 尹晓芳,于 力,刘广维,等.封闭式组合电器隔离开关产生的过电压[J]. 中国电机工程学报,2002,22(07):111-114.
- [4] 康 宁,李永林,杨兰均,等.GIS 中 VFT 过电压数值分析简化模型的构建方法[J].高电压技术,2004,30(10):1-3,33.