

不同负载条件下 CVT 过电压监测装置频率响应特性分析

张榆¹, 谢敏², 谢施君¹, 张晨萌¹, 穆舟¹, 朱军¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 过电压的准确测量对保证电网的安全稳定运行具有重要意义。为此, 对不同负载条件下基于电容式电压互感器(CVT)的过电压监测装置的频率响应特性进行了实际测试分析, 研究了不含内置低压电容和含有内置低压电容情况下负载变化对频率响应特性的影响。研究表明: 对于不含内置低压电容的情况, 当 CVT 二次侧空载或额定负载时, 得到的频率特性大致相同, 但当负载较重时, 频率特性与额定负载情况下差异较大; 当含有内置低压电容时, 内置低压电容的存在几乎不对 CVT 不同负载情况下的频率特性产生影响, 且额定负载和空载情况也对内置低压电容高压侧频率特性影响较小。

关键词: 过电压; 电容式电压互感器; 负载; 频率响应特性

中图分类号: TM933 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)04-0021-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.04.005

Analysis on Frequency Response Characteristics for CVT Over-voltage Monitoring Device under Different Load Conditions

Zhang Yu¹, Xie Min², Xie Shijun¹, Zhang Chenmeng¹, Mu Zhou¹, Zhu Jun¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The accurate measurement of over-voltage is very important to ensure the safety and stability of power grid. Therefore, the frequency response characteristics of over-voltage monitoring device employing capacitor voltage transformer (CVT) under different load conditions are tested and analyzed, and the effect of load change on frequency response characteristics without and with interior low-voltage capacitor is studied. The results show that: for the case without interior low-voltage capacitor, when the secondary side of CVT at no-load or rated load, the frequency characteristics are roughly the same, but when the load is heavy, the frequency characteristics are greatly different from the situation under rated load. When there is an interior low-voltage capacitor, the presence of interior low-voltage capacitor has almost no effect on the frequency characteristics of CVT under different load conditions, and there is also little effect on the frequency characteristics in high-voltage side of interior low-voltage capacitor under rated load and no-load conditions.

Key words: over-voltage; capacitor voltage transformer; load; frequency response characteristic

0 引言

暂态过电压是引发设备事故的重要原因之一, 同时也是评估电网运行状态的有效手段之一。虽然电网中投入了大量的过电压防护装置, 但由于实际中各种过电压相对较复杂, 因此过电压现象仍时有发生。为了减小过电压对电网的影响, 需要对过电压进行实时监测分析^[1-2]。

目前主流的过电压监测方式主要有 3 种: 1) 基于分压器的过电压监测, 如电容、阻容分压器等^[3-4]; 2) 基于运行中容性设备的过电压监测, 如电流互感器(current transformer, CT)、套管等^[5-6]; 3) 基于电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)的过电压监测^[7-8]。其中, 分压器属于离线设备, 因此无法在运行中使用。而基于容性设备的过电压监测装置操作复杂, 且存在一定的安全隐患, 因此这种测量方式目前仍处于调试阶段; 相

比而言, CVT 属于在线设备, 且进行过电压监测时具有较好的测试结果, 因此开始在实际的过电压在线监测系统中得到应用。

为了实现基于 CVT 的过电压监测, 文献 [9] 在实验室成功搭建了基于 CVT、二次电缆和分压器的过电压在线监测系统, 并对该系统的频率响应进行了实测和理论分析; 文献 [7] 结合 500 kV CVT 实际结构, 提出利用内置低压电容实现了过电压的在线监测。然而, 以上监测系统均未考虑实际运行中的 CVT 在不同负载情况下的频率特性, 从而影响后续的过电压波形分析。因此, 下面对基于 CVT 的过电压在线监测装置在不同负载情况下的频率特性进行研究, 这将对后期过电压的监测分析具有实际指导意义。

1 CVT 过电压监测装置

图 1 为常规 500 kV CVT 的典型电气结构图。由图 1 可知, 常规 500 kV CVT 由电容分压器(高压电容 C_1 和中压电容 C_2)、电磁单元和二次端子 3 部分组成。图中: T 为中间变压器; K 为中压接地开关; L 为补偿电抗器; Z_d 为阻尼器; BL 为 ZnO 避雷器; a-n 为主二次绕组端子; da-dn 为剩余电压绕组端子; $3a_z-3n$ 为阻尼器端子。

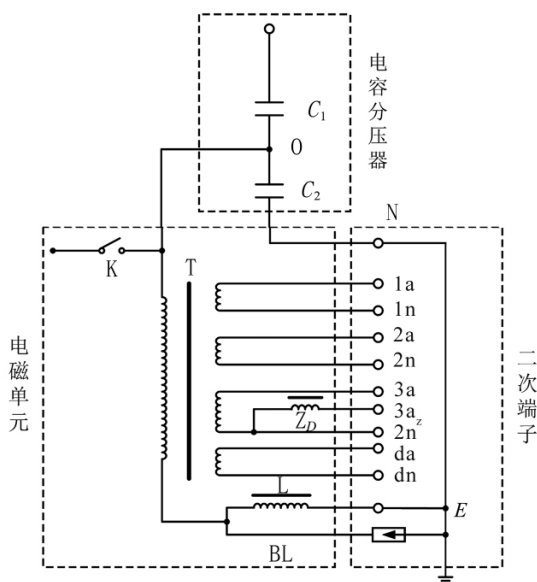
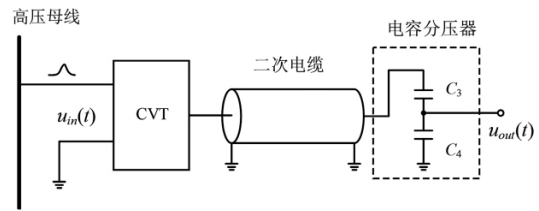
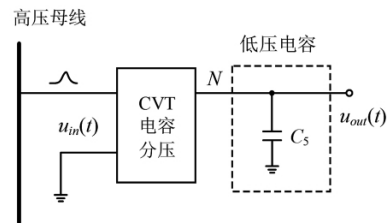


图 1 CVT 电气结构

通常采用两种方式利用 CVT 对过电压进行测试, 测试原理分别如图 2(a)、图 2(b) 所示。第 1 种测量方式为直接在 CVT 分压器信号输出端(图 1 中 O 点) 外接二级分压装置, 并利用二次电缆进行连接。第 2 种测量方式是在电容分压器低压端 N 接入低压电容 C_5 , 从 C_5 高压端进行过电压测量。



(a) 第 1 种测量方式



(b) 第 2 种测量方式

图 2 典型 CVT 过电压测量方式

除了以上两种测试方式外, 亦可在二次端子侧进行过电压测试, 通过测量端得到的输出电压 $u_{out}(t)$ 结合测量系统的传递函数, 利用反演计算即可实现过电压波形的恢复。需要说明的是, 当信号电缆长度较长时, 为减小过电压经过长电缆后存在的振荡现象, 需要在电缆末端加匹配阻抗抑制振荡。

2 不同负载条件下 CVT 频率特性

为了研究基于 CVT 的过电压在线监测系统在不同负载情况下的传递特性, 对 WVL₂ 110-10H 型的 CVT 进行不同负载条件下的频率特性研究。该 CVT 最高运行电压为 126 kV, 额定高压电容为 11 207 pF, 额定电压电容为 92 857 pF, 二次绕组参数如表 1 所示。

表 1 WVL₂ 110-10H 型 CVT 二次绕组参数

二次绕组	额定电压/V	额定输出/VA	准确级
1a-1n	$100/\sqrt{3}$	10	0.2
2a-2n	$100/\sqrt{3}$	10	0.5
3a-3n	$100/\sqrt{3}$	10	3p
da-dn	100	10	5p

2.1 无低压电容时负载对 CVT 频率特性的影响

为了研究无低压电容(图 2(b) 中 C_5) 在不同负载情况下 CVT 的频率特性(测量端为 1a-1n), 利用图 3 所示测量系统进行测量。其中, 高压放大器最大输出电压为 500 V, -3 dB 带宽为 75 kHz; 数据采集部分最大采样率 2.5 GSa/s, 垂直分辨率 12 bit; R//C 为示波器的输入阻抗, 设置为 $1\text{ M}\Omega//15\text{ pF}$ 。需要说明的是, 进行频率特性测量时同时利用 10:1 探头对高压侧电压进行了测量。

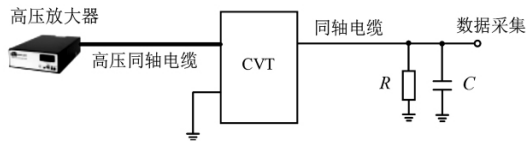


图3 CVT 频率特性测试原理

由表1参数可知,当二次绕组外加 $1000/3\ \Omega$ 电阻、剩余绕组外加 $1000\ \Omega$ 电阻时,二次绕组负载处于额定状态。利用图3所示测试电路进行测试,保持负载处于额定和空载状态,得到二次侧空载、二次侧额定负载、仅测量端空载(1a-1n空载,其他端子额定负载)及仅测量端额定负载(其他端子空载)4种情况下的频率响应曲线,如图4所示。

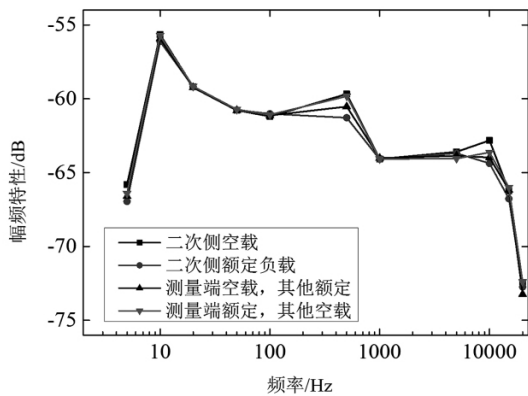


图4 不同负载情况下 CVT 幅频特性

由图4可知,当二次侧额定负载或空载时4种情况测试得到的结果整体呈相似状态,但也存在着一定的不同:当测试频率为 $500\ \text{Hz}$ 时,二次侧均空载与仅测量端接额定负载情况下的频率特性大致相同,但与另外两种情况存在一定差异;当测试频率为 $10\ \text{kHz}$ 时,4种情况下的测试结果均存在一定的差异。

进一步地,图5给出了负载较重情况下($10\ \Omega$) CVT 频率响应测试结果。由测试结果可知,由于补偿电抗器(图1中L)和电磁单元励磁支路的电抗值与电容分压器的等值电容在额定频率附近下的容抗相等,因此当测试频率为额定频率时,负载较大与额定负载情况下的频率特性相似;相比而言,除了额定频率点外,其他频率点的特性曲线均与二次侧额定负载情况下的测试结果存在着较大的差异。因此在实际中利用 CVT 进行过电压监测时,当二次侧负载较重时,若直接利用空载或额定负载条件下的频率特性对真实过电压波形进行反演计算时(过电压波形恢复),计算结果将与真实结果存在着较大的差异;与此同时,当二次侧负载较重时,测量得到的信

号也会存在较大的衰减,不利于过电压的检测。

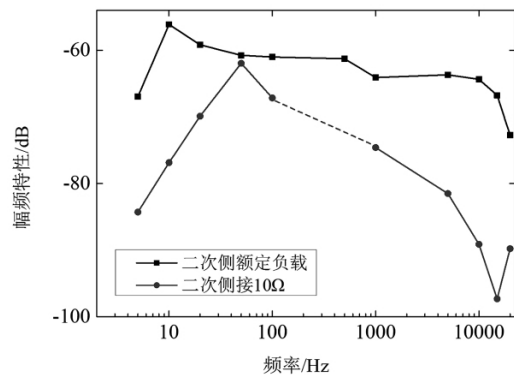


图5 $10\ \Omega$ 负载情况下 CVT 幅频特性

2.2 负载对内置低压电容出口处频率特性的影响

文献[7]给出了一种基于 $500\ \text{kV}$ CVT 内置低压电容(图2(b))的过电压监测系统,然而该文献也未给出不同负载情况下的频率特性。为此,接下来主要对存在低压电容情况下二次侧接不同负载时的频率特性进行研究。

图6为二次侧空载和二次侧接额定负载情况下内置低压电容($C_5 = 1100\ \text{nF}$)高压侧的频率响应曲线。由图6测试结果可知,二次侧空载和额定负载情况下得到的频率特性呈高度相似状态,即当二次侧接额定负载时,其对内置低压电容出口处的频率特性影响较小。

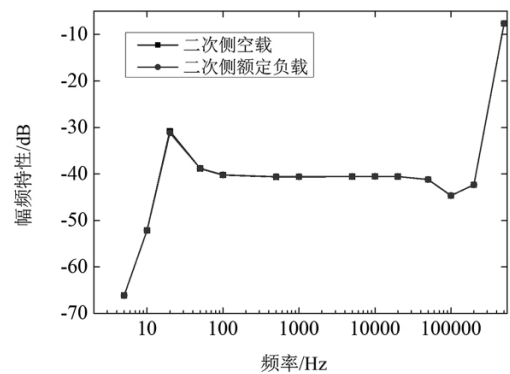


图6 内置低压电容高压侧幅频特性

2.3 存在低压电容时负载对 CVT 频率特性的影响

进一步地,图7给出了存在内置低压电容情况下的 CVT 频率特性曲线。由图7结果可知,当接入内置低压电容时,不同负载情况下 CVT 频率特性与未接内置低压电容时不同负载情况下(见图4)的频率特性存在着较高的相似度,即内置低压电容对 CVT 不同负载情况下的频率特性影响较小。

(下转第37页)

4 结 论

- 1) 在无耦合电容的条件下,直流电源电压需大幅提高才能达到电容器试品未冲击前直流电压的试验要求。
- 2) 在有耦合电容的条件下,耦合电容能有效限制直流侧电压对冲击电压发生器未动作时的影响。
- 3) 本试验条件下,有、无耦合电容对试品叠加电压波形的影响很小,耦合电容对冲击电压发生器效率的影响可以忽略。

参考文献

[1] 孙昕,刘泽洪,高理迎,等. ±800 kV 特高压直流工程创新实践[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 35-45.
 [2] 舒印彪,刘泽洪,高理迎,等. ±800 kV 6400 MW 特高压

直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
 [3] 舒印彪,刘泽洪,袁骏,等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1-12.
 [4] 雷霄,王明新,王华伟,等. 龙政直流闭锁事件分析及降压再启动直流电压偏高抑制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 129-133.
 [5] 高压直流输电系统用直流滤波器电容器及中性母线冲击电容器: GB/T 20993-2012[S], 2012.
 [6] 脉冲电容器及直流电容器: JB/T 8618-1995[S], 1995.
 [7] 叶杰宏. 直流单极运行对 500 kV 交流变压器的影响[J]. 电气时代, 2011, 47(3): 84-86.
 [8] 高电压试验技术第 1 部分: 一般定义及试验要求: GB/T 16927.1-2011[S], 2011.

作者简介:

张晨萌(1988), 博士, 主要从事电力系统过电压、电容器绝缘介质方面研究。 (收稿日期: 2019-06-04)

(上接第 23 页)

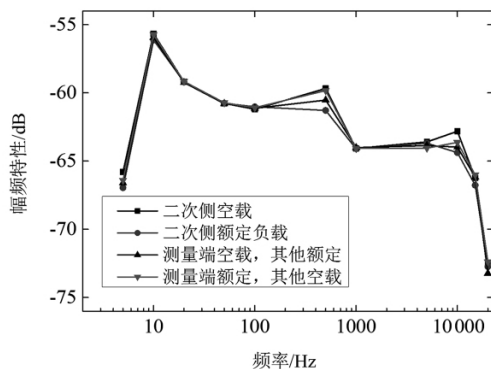


图7 存在内置低压电容时 CVT 幅频特性

3 结 语

对基于 CVT 的过电压在线监测装置在不同负载情况下的频率特性进行了研究, 所得结论如下:

- 1) 当 CVT 二次侧接额定负载或空载状态时, 测量得到的频率特性整体呈相似状态, 仅在部分频率处存在较小的差别;
- 2) 当 CVT 二次侧负载较重时, 测量得到的频率特性与额定负载情况下具有较明显的差别, 且高频下衰减更为严重;
- 3) 额定负载和空载情况对内置低压电容高压侧频率特性影响较小, 且内置低压电容的存在也几乎不对 CVT 不同负载情况下的频率特性产生影响。

参考文献

[1] 张重远, 李文博, 陈涛. 基于 TV 宽频特性的过电压在线监测算法[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 801-807.
 [2] 郑必成, 傅煜. 500 kV GIS 开关站快速暂态过电压计算及对主变的影响[J]. 高压电器, 2012, 48(12): 135-138.
 [3] Jayaram S, Xu X Y, Cross J D. High Divider Ratio Fast Response Capacitive Dividers for High-voltage Pulse Measurements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(3): 920-922.
 [4] 周凯, 何珉, 熊庆, 等. 基于两级分压器的 6~35 kV 系统过电压在线监测装置[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3583-3589.
 [5] 兰海涛, 司马文霞, 姚陈果, 等. 高压电网过电压在线监测数据采集方法研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 79-82.
 [6] 罗易桥, 毛宇翔, 甘黎. 变电站雷电侵入波过电压测量技术综述[J]. 电工文摘, 2017(6): 11-14.
 [7] 傅晨钊, 刘兆林, 杨凌辉, 等. 基于 500 kV CVT 内置低压电容 C_3 的暂态过电压在线监测[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 77-84.
 [8] 司文荣, 贺林, 金珩, 等. 500 kV CVT 内置低压电容 C_3 测量过电压波形的试验研究[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(2): 81-86.
 [9] 李文博. 基于 CVT 宽频线性模型的过电压在线监测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

作者简介:

张 榆(1986), 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电网电磁暂态过程监测、分析及仿真。

(收稿日期: 2019-06-04)