

# 电容式电压互感器铁磁谐振的数值仿真

李红斌<sup>1</sup>, 刘延冰<sup>1</sup>, 叶国雄<sup>2</sup>, 王晓琪<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉高压研究所, 湖北 武汉 430074)

## Numerical Simulation on Ferromagnetic Resonances of Capacitive Voltage Transformer

LI Hong-bin<sup>1</sup>, LIU Yan-bing<sup>1</sup>, YE Guo-xiong<sup>2</sup>, WANG Xiao-qi<sup>2</sup>

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan High Voltage Research Institute, Wuhan 430074, China)

**摘要:** 建立了电容式电压互感器的数学模型,在此基础上对其铁磁谐振过电压进行了数值计算,实验结果和仿真结果的吻合验证了模型的可行性。

**关键词:** 电容式电压互感器; 铁磁谐振; 模型

**中图分类号:** TM451.2

**文献标识码:** A

**Abstract:** The mathematic model of capacitive voltage transformer is established, and its ferromagnetic resonance over-voltage are calculated. The consistence of experimental and simulated results has proven the feasibility of the model.

**Key words:** capacitive voltage transformers(CVT);

ferromagnetic resonance; model

## 1 引言

电容式电压互感器(CVT)由于含有电容元件及多个非线性电感元件(如补偿电抗器和中间变压器等),在系统合闸操作或短路故障产生的瞬态过程中,由于非线性电感元件的铁心饱和激发稳定的次谐波谐振,使得在补偿电抗及中间变压器上产生过电压,最终导致补偿电抗器和中间变压器绕组击穿损坏。

为了抑制 CVT 内部铁磁谐振,通常在中间变压器的剩余绕组上并联阻尼装置。为保护补偿电抗器及加大抑制谐振作用,还在其两端并联 ZnO 避雷器或保护间隙。阻尼装置的参数选择是其能否阻尼 CVT 铁磁谐振的关键。笔者在数学模型的基础上,对 CVT 铁磁谐振的过程进行了数值仿真,并通过实验加以验证。

## 2 模型的建立及仿真

### 2.1 原理及等值电路图

模型所选择的阻尼装置是已在 CVT 产品中广泛使用的速饱和电抗器,补偿电抗器的保护装置选择 ZnO 避雷器, CVT 原理见图 1。

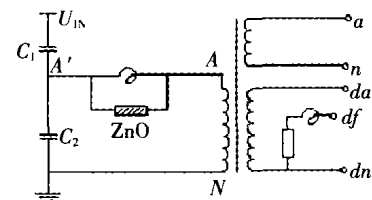
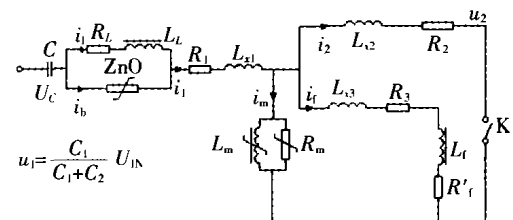


图 1 CVT 原理图(运行中 da 与 df 短接)

根据 GB4703-1984 对铁磁谐振的试验要求<sup>[1]</sup>,在 a, n 的两端连接开关 K,用 K 的合闸与分闸,模拟中间变压器二次侧突然短路故障与消除短路,根据戴维南定理可得到图 2 所示的等值电路。



C——等值电容  $C=C_1+C_2$   $L_L, R_L$ ——补偿电抗器额定电感、电阻  
 $L_{s1}, L_{s2}, L_{s3}$ ——中间变压器漏电感  $i_b$ ——避雷器支路电流  
 $L_m, R_m$ ——中间变压器激磁支路并联等效电感、电阻  
 $R_1, R_2, R_3$ ——中间变压器各绕组直流电阻  
 $L_t, R_t'$ ——速饱和电抗器额定电感及阻尼电阻  
(阻尼回路电阻  $R_t=R_3+R_t'$ )

图 2 CVT 等值电路图

### 2.2 非线性元件的曲线拟合

ZnO 避雷器用非线性电阻来等效,其伏安特性曲线可用下式描述:

$$I = k(u/u_r)^\alpha$$

其中:  $u$  为施加在 ZnO 避雷器两端的电压;  $u_r$  为参考电压;  $k, \alpha$  为系数。中间变压器、补偿电抗器及速饱和电抗器为非线性电感,其磁化曲线  $i=f(\Phi)$  用下述多项式进行拟合<sup>[2]</sup>:

$$i = k_1\Phi + k_2\Phi^3 + k_3\Phi^5 = f(\Phi)$$

其中:  $k_1, k_2, k_3$  为拟合系数;  $\Phi$  为磁通 ( $\Phi = u/\omega$ )。

通过测量各元件的伏安特性,采用最小二乘法进行曲线拟合,从而得到相应各元件的  $f(\Phi)$  关系

式。不同的电抗器,  $k_1, k_2, k_3$  是不一样的。

### 2.3 仿真计算

根据图2所示的等值回路, 可以分别得到K开断、闭合时的回路状态方程, 再根据电容式电压互感器的额定参数, 测量参数或设计值等, 采用标准四阶Runge-Kutta公式<sup>[3]</sup>, 求解回路状态方程, 即可由稳态初始值依次得到各变量在各个时间离散点上的瞬时值。

## 3 仿真结果及试验验证

以一台TYD110/ $\sqrt{3}$ -0.01H型电容式电压互感器为试品进行铁磁谐振仿真计算及试验验证。

### 3.1 试品额定参数和实测参数

额定一次电压:  $110/\sqrt{3}$  kV; 额定二次电压: 测量绕组  $100/\sqrt{3}$  V, 剩余绕组 100 V; 分压器电容:  $C_1 = 0.01353 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 0.04360 \mu\text{F}$ ; 中间变压器一次电压: 15 kV; 避雷器参考电压  $U_r = 6000$  V。实测参数示于表1~2。

表1 直流电阻及短路阻抗  $\Omega$

中变一次绕组	中变二次绕组	中变剩余绕组	补偿电抗器	阻尼支路	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1554	0.03595	0.10115	253	7.665	11318	1410	4003

表2 伏安特性

中间变压器		补偿电抗器		速饱和电抗器	
u/V	i/mA	u/V	i/mA	u/V	i/mA
2.66	15.6	306.9	6.3	14.72	24.4
8.63	36.8	922.1	17.8	42.98	28.0
24.90	113	1550	29.2	70.85	30.8
42.75	202	2835	54	98.57	35.2
56.63	268	4306	84	126.6	37.2
73.68	348	5742	112	157.3	41.6
90.65	404	6463	128	176.9	80
113.3	530	7835	164	186.7	410
127.3	1600	8952	228	192.8	1730

### 3.2 实测波形与实际参数下仿真结果的比较

该产品在实际参数及3种典型电压下铁磁谐振试验波形见图3(a)~(c), 仿真波形见图4(a)~(c)。

根据GB4703-1984《电容式电压互感器》要求, 在电压为  $1.2U_N$  而负荷实际上为零的情况下, 互感器的二次线路短路后又突然消除短路, 其二次电压

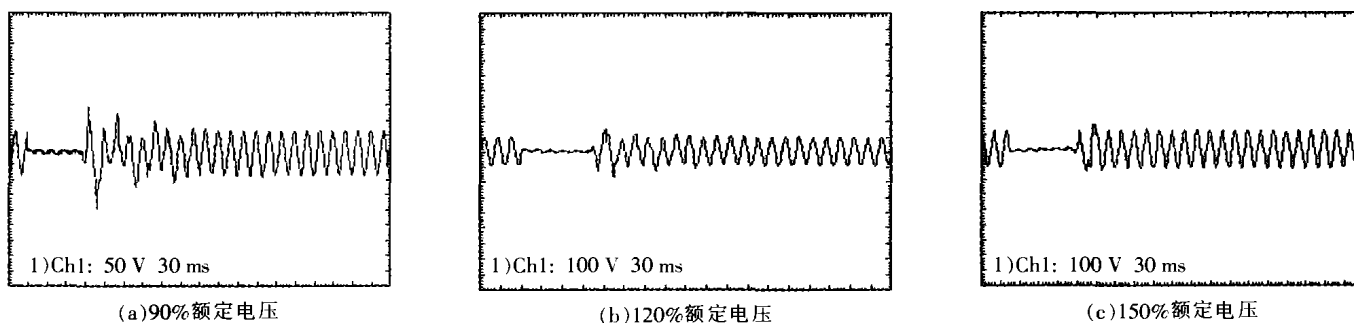


图3 CVT在典型试验电压下的二次电压试验波形

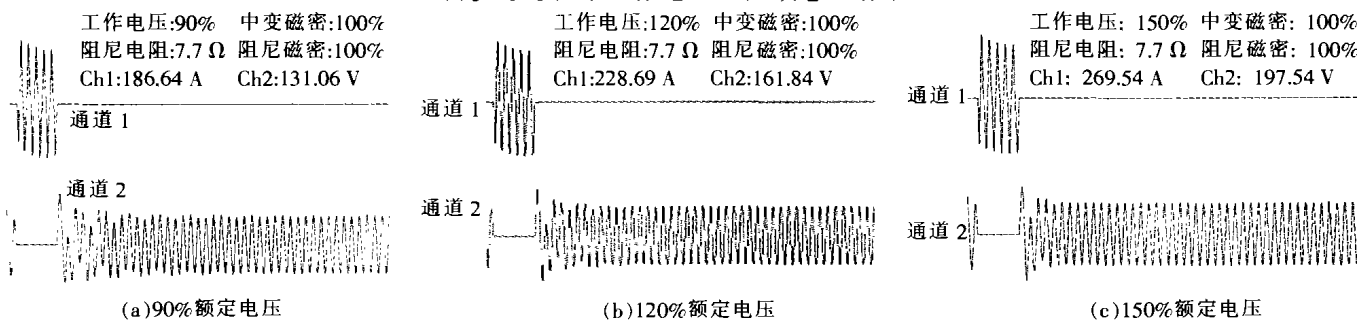


图4 CVT在典型电压下的二次电压仿真波形(避雷器作为补偿的限幅器)

峰值应在额定频率的10个周波恢复到与短路前的正常值相差不大于10%。在电压为  $1.5U_N$  而负荷实际上为零的情况下, 互感器的二次线路短路后又突然消除短路, 其铁磁谐振持续的时间应不超过2s。

分别对照图3与图4可以看出, 实测参数下的试验波形与仿真波形基本一致, 且均符合GB4703-1984的要求。然而, 对于采用速饱和电抗器作为阻尼元件的CVT, 试验与仿真结果均表明, 在同样参数下, 与150%额定电压相比, 90%额定电压时谐振过电压倍数更高, 且延续时间更长, 也就是说, 在低

电压下更容易产生分频谐振, 这是由于速饱和电抗器是通过工作在饱和状态来达到消除谐振目的的。所以, 工作点电压越低, 离速饱和电抗器饱和点越远, 消谐效果越差。

GB4703-1984只要求在120%和150%额定电压下进行铁磁谐振试验, 反而对100%甚至更低电压下无铁磁谐振试验要求。从以上的试验和仿真结果以及理论分析来看, 对于用速饱和电抗器作为阻尼元件的CVT, 其铁磁谐振试验应考虑更低的工作电压(如80%或90%), 这对电力系统的安全生 (下转第128页)

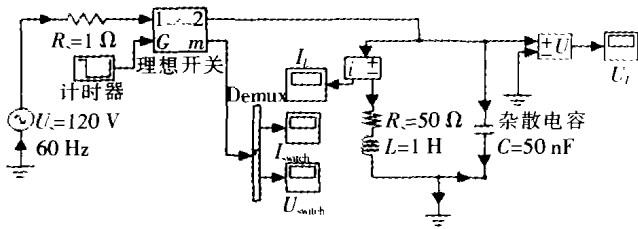


图5 仿真模型

(711 Hz),其最高电压可通过下式计算:

$$U_{Lmax}=I_L\sqrt{L/C}=0.185\sqrt{1/(50\times 10^{-9})}=830\text{ V} \quad (1)$$

当 $t=0.15\text{ s}$ 时,开关重新闭合。在开关的通-断-通过程中,电抗器和开关的电流与电压波形见图6。

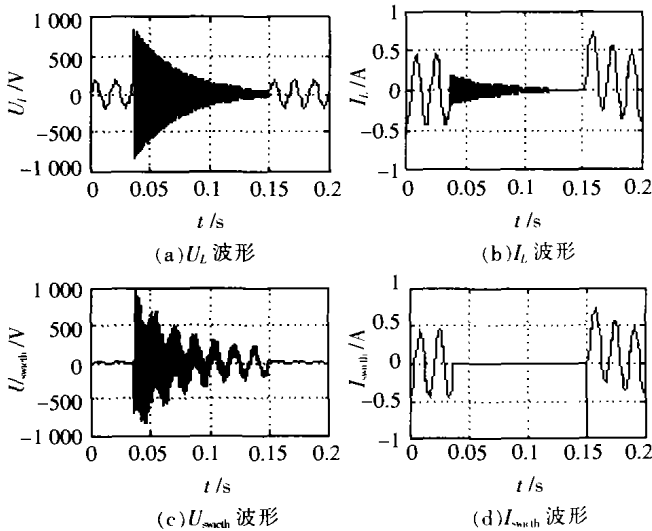


图6 仿真波形

## 5 讨论

尽管十多年来国外对高压固态断路器的研制取得了较大的突破,并有实际的工程应用,但因受到以下固有缺点的制约<sup>[4]</sup>,迄今固态断路器仍未广泛应用。

(1)目前电力电子器件的额定电压和额定电流较低,在高压电网中,需要采取多个 GTO 串并联的方式来提高固态断路器的开断容量及其可靠性,因此必须解决各驱动脉冲的同步控制问题,以保证各

串并联运行的 GTO 在开通与关断时有较好的均压和均流特性,否则压降不均或分流不均都将导致 GTO 元件的损坏,威胁整个串联模块的安全。但由于 GTO 开断时的增益很小,仅有 4~5 倍,因此开断大的电流需要大幅值、陡上升率的门极驱动脉冲电流,且随着串并联器件数的增多,控制这些脉冲的一致性触发难度很大。

(2)GTO 的通态损耗大,目前大功率 GTO 的通态压降约为 3.2 V,而机械式断路器的导通压降仅为几 mV,因此太大的通态损耗使得固态断路器必须采取特殊的冷却装置才能保证安全可靠运行。这不但增加了其运行费用,而且还使装置复杂,降低了装置的可靠性。

(3)GTO 的过载能力低,不能持续导通故障电流,而只能在故障电流到达其最大关断值前关断,因此固态断路器无法实现与下游断路器的整定配合。

由于存在以上缺点,固态断路器的应用范围受到很大的限制,一般只用于一些特殊的场合,例如产生大功率脉冲电源的开断装置、高压直流输电系统的地线转换断路器和一些重要负荷的转移开关。

## 参考文献:

- [1] 中国电工技术学会. 电工高新技术丛书第 5 分册[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [2] T F Podlesak, H Singh, K Fonda, et al. Megawatt High Speed Solid State Circuit Breaker for Pulse Power Applications [A]. IEEE International Pulsed Power Conference [C]. Digest of Technical Papers2, NJ(USA), 1993.
- [3] N Woodley, M Sarkozi, F Lopez, et al. Solid-state 13 kV Distribution Class Circuit Breaker: Planning, Development and Demonstration [A]. IEE Conference Publication 400 [C]. London, 1994.
- [4] 严干贵, 姜齐荣, 黄民聪. 未来的用户电力技术 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(11): 62-68.

作者简介:黄绍平(1964-),男,工程硕士,副教授,从事电力系统及其自动化的教学与研究工作,目前的研究方向为电能质量、无功补偿、智能化开关设备。

(上接第 125 页)产是有利的。这一问题在新的国家标准 GB/T4703-2001 已经得到重视。

此外,通过该仿真系统适当调整局部参数,进行相关仿真计算,还可指导 CVT 的设计。

## 4 结论

该仿真系统的仿真结果与实测结果具有一致性,是 CVT 设计及试验调试的辅助工具。同时,对于在电力系统中运行的 CVT,只需通过实测的各元件伏安曲线及部分额定或设计参数,即可仿真其铁磁谐振性能,对电力系统的安全生产具有指导意义。

从试验和仿真结果以及理论分析来看,对于用速饱和电抗器作为阻尼元件的 CVT,其铁磁谐振试验应考虑较低的工作电压。

## 参考文献:

- [1] GB4703-1984.电容式电压互感器[S].
- [2] 王德忠. 电容式电压互感器瞬变响应特性的研究 [J]. 电力电容器, 1994(3): 1-17; 1994(4): 1-15.
- [3] 于寅. 高等工程数学(第二版)[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1995.

作者简介:李红斌(1967-),女,副教授,从事电磁测量技术研究。电话:027-87484147。