

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.020

水电站内部铁磁谐振及抑制措施仿真研究

由志勋¹, 刘楠²

(1. 西安热工研究院有限公司, 西安 710032; 2. 国网榆林供电公司, 陕西 榆林 719000)

摘要: 电力系统中铁磁谐振时有发生,严重影响着电网的安全运行。由于导致铁磁谐振的主要原因为铁心设备的非线性磁饱和,仿真分析难度较大。文中利用非线性电抗器加理想变压器的模型等效电磁式电压互感器,准确模拟了某水电站铁磁谐振现象及发生的条件,并在此基础上提出了基于 CVT 的铁磁谐振抑制措施。仿真结果表明,采用 CVT 可以有效抑制一次系统中铁磁谐振的发生,但是在 CVT 二次侧短路且在短时间内消除的极端情况下, CVT 内部会发生铁磁谐振。在分析此铁磁谐振产生原因的基础上,提出了在 CVT 二次侧保护段投入消谐电阻的抑制措施,并进行了仿真验证。

关键词: 水电站; 中性点接地; 铁磁谐振; CVT 抑制措施

Simulation Study on Ferroresonance and Its Suppression Measures in Hydropower Station

YOU Zhixun¹, LIU Nan²

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Limited Company, Xi'an 710032, China;
2. State Grid Yulin Electric Power Supply Company, Shaanxi Yulin 719000, China)

Abstract: Ferroresonance often occurs in power systems, and threatens the safety of the whole grid. Since the main reason of ferroresonance is nonlinear magnetic saturation of equipment with iron core, it is difficult to built accurate simulation model. In this paper, PT is modeled with nonlinear reactor and ideal transformer, and the ferroresonance phenomena and its appearing conditions are accurately simulated. Based on the simulation, the suppression measure of ferroresonance is proposed by using CVT. The simulation results show that utilizing CVT can effectively suppress the ferroresonance in primary system. However, when short circuit happens at the secondary side of CVT and is eliminated quickly, ferroresonance happens inside CVT. The reason of the internal ferroresonance is further analyzed, based on which the suppression measure of adding harmonic elimination resistance is proposed and verified.

Key words: hydra power station; neutral grounding; ferroresonance; CVT and suppression measures

0 引言

长期以来,电力系统中发生的铁磁谐振过电压现象严重威胁着电网的安全运行^[1]。尤其是在中性点直接接地系统中,谐振过程会在 PT 二次开口三角形绕组上会检测出来幅值较高的零序电压,诱发产生接地指示等误动作,更可能危害电气设备的绝缘特性从而引发严重的事故。当发生分频谐振时,励磁电流会急剧增加,甚至达到额定值的百倍以上,使 PT 发生严重的损坏^[2]。因此,研究铁磁谐振的产生原因,并各种消除方法具有非常重要的意义。

对于铁磁谐振现象,国内外长期以来从理论、

试验和仿真等方面入手开展了大量研究工作^[3-12]。1907年, Bethenod 等人率先发现了变压器中的铁磁谐振现象。1938年,学者开始用图解法分析铁磁谐振现象,并一直沿用至今。20 世纪的 50 年代, Peterson 等人详细描述了中性点不接地系统中的铁磁谐振现象及其消除方法。20 世纪的 70 年代,由于个人计算机的快速发展,出现了电磁暂态模拟的计算机程序,其中应用最为广泛的当属 EMTP。1991 年, Kieny 等人利用分形和混沌的理论方法讨论与变压器有关的铁磁谐振现象,并逐步成为近年来研究此问题的热门方法。

在中性点不接地系统中,所发生的谐振基本为

零序性质^[13-22]。Peterson等人通过在电磁式电压互感器(PT)二次侧开口三角形绕组两端接入电阻(因为PT二次开口三角侧可以检测出零序电压,再次接入电阻相当于在零序回路中加电阻),有效地消除此类铁磁谐振^[1]。对于中性点不接地系统,其他的消谐措施还有将PT一次侧中性点经电阻接地或经单相电压互感器接地、将电源中性点经消弧线圈接地、母线接电容器组等等,其消谐基本思路都是减小非线性磁芯的饱和特性或改变回路谐振条件以阻止谐振的发生。而在中性点接地系统中,对于铁磁谐振的抑制原理与中性点不接地系统类似,利用母线上装设电容器、PT一次侧串消谐电阻等方法均可抑制谐振过电压。但是中性点接地系统中对铁磁谐振的抑制与不接地系统相比还有其特殊的地方,主要是由于谐振电压相序关系不同所引起的。由于中性点接地系统中的铁磁谐振三相相互独立,而往往各相发生的谐振是不对称的,所以在PT二次侧开口三角绕组上总能检测到零序电压。开口三角绕组两端施加电阻的方法在当谐振只有零序性质时是有一定作用的,相当于在零序回路内施加阻尼电阻消耗谐振能量。但是当谐振过电压除具有零序性质外还具有线序性质时,由于在正序或负序回路中没有施加阻尼电阻,则谐振还会继续发生,危害设备安全运行。对于PT饱和特性引起的铁磁谐振现象,最直接的抑制措施就是将电磁式电压互感器(PT)替换为电容式电压互感器(CVT)。由于CVT设备中为增加测量精确度一般都具有中压互感器这部分元件,所以还是存在非线性电感,也就是说,当条件适合时,改用CVT的线路仍有可能发生因非线性电感饱和特性引起的铁磁谐振现象。

文中基于EMTPWorks软件,通过仿真实验的方法,对实际发生铁磁谐振的一个中性点直接接地系统进行分析。针对实际运行中发生铁磁谐振的500 kV中性点直接接地系统,根据其发生谐振时等效接线图,分别建立各个元件的仿真模型和系统仿真模型;基于所建立起的系统仿真模型,对谐振事故发生的原因及影响因素进行理论和仿真研究,并对各种可能实现的消谐措施进行计算分析;利用仿真计算对理论分析的结果进行验证;将系统中的PT替换为CVT,建立相应的仿真计算模型,研究采用CVT后的系统消谐效果。

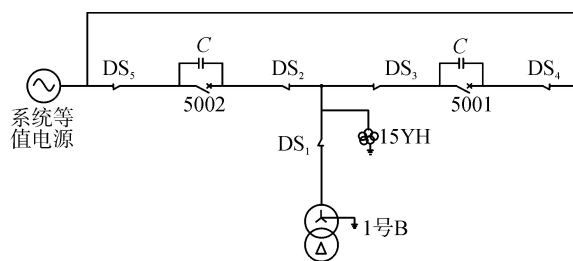
1 水电站电磁暂态仿真研究平台

文中的研究对象是一在实际运行中发生了铁磁谐振的500 kV水电站,为中性点直接接地系统。

文中将根据其发生谐振时的系统接线,对各个元件进行建模,并据此建立起整个系统的仿真计算模型,对该谐振系统的铁磁谐振现象进行仿真计算,并对影响系统铁磁谐振的因素给予深入分析。

1.1 系统结构及发生铁磁谐振情况

某水电站做1号主变T区带电试验,在断开5002开关后,发现1号主变T区出现异常过电压。停电后检查1号主变T区电压互感器15YH的A、C相外壳温度升高。发生谐振时有关设备等效接线见图1。



DS₁、DS₂、DS₃、DS₄—隔离开关; C—断口并联电容。

图1 某水电站发生谐振时等效接线图

Fig. 1 Equivalent circuit of a ferroresonant hydra power station

1号主变T区带电试验前,开关5001、5002及隔离开关DS₁~DS₅均处于断开状态。由线路倒送电给1号主变T区,先后合上隔离开关DS₁~DS₃、5001及5002开关形成闭环,此时未发生谐振过电压。在解环时,断开1号主变T区第1台断路器后未发生谐振,而在断开第2台断路器后发生PT谐振。由故障录波器记录的过电压波形来看,诱发谐振的因素与断路器分闸时刻有关。分闸时刻B相电压过零,未发生谐振,分闸时刻A、C相电压幅值较大,A、C相起振,且该谐振系统具有长时间持续震荡的能力,据此判断谐振与断路器断口电容、该段空母线电容及PT铁心特性有关。该谐振状态仅出现在1号主变T区带电试验这一特殊的工况下,设备投运后没有发生过谐振过电压。

1.2 仿真模型

1)系统电源。实际的系统电源都具有内部阻抗,在一些情况下电源的内部阻抗是不能忽略的,而在此系统中,由于电源内阻与线路阻抗相比对系统造成的影响较小,故可以忽略,而在仿真中使用理想电压源代替。此电压源为三相电压源,A、B、C三相电压相位差各差120°,额定频率50 Hz,额定电压500 kV。

2)系统母线。母线一般采用分布式π型模型仿真。为方便起见,也可以采用集总参数等效。根据卡尔逊阻抗理论,模型中各序集总参数可以由三相

母线的自阻抗和互阻抗获得。三相母线间的互阻抗为

$$Z_m = R_g + j0.1445 \lg \frac{D_g}{D_m} \quad (1)$$

式(1)中: Z_m 为三相母线间的互阻抗, Ω/km ; R_g 为等值大地电阻, Ω/km ; D_g 为导线等值深度,m; D_m 为三相导线的几何均距,m。

而各导线自阻抗则为

$$Z_s = R_0 + R_g + j0.1445 \lg \frac{D_m}{r'} \quad (2)$$

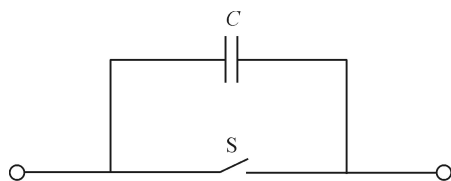
式(2)中: Z_s 为三相母线间的自阻抗, Ω/km ; R_0 为导线单位长度电阻, Ω/km ; r' 为导线等值半径,m。

基于上述计算的正序及零序阻抗即可计算三相母线的正序阻抗(Z_1)和零序阻抗(Z_0)

$$Z_1 = Z_s - Z_m \quad (3)$$

$$Z_0 = Z_s + 2Z_m \quad (4)$$

3)开关模型。此系统的铁磁谐振是由于断路器的操作引起的,所以对于断路器模型的建立应格外重视。此系统采用的断路器是双断口结构,在两个灭弧室外侧分别并联一个均压电容,以使每个断口上的电压分布接近相等。每个均压电容的大小为600 pF,因此当断路器断开时两个均压电容串联后的等效断口电容为300 pF,而对地的等效电容亦为300 pF。断路器的等效模型见图2。



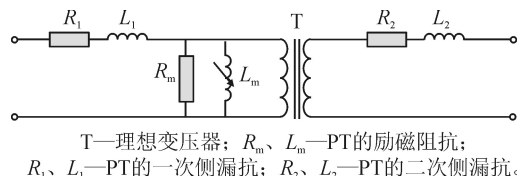
C—断路器断口均压电容; S—等效断路器开关。

图2 断路器的仿真等效模型

Fig. 2 Simulation model of circuit breaker

4)套管模型。根据所连接设备的不同,套管可以有许多的类型,但无论套管类型是充油套管还是空气套管,在仿真计算时均可以用一个对地电容来模拟。根据厂方提供数据,套管部分对地的总电容为150 pF。

5)电磁式电压互感器。中性点接地系统的铁磁谐振主要是由于电磁式电压互感器(P.T)的铁心饱和特性引起的,所以仿真模型中PT的参数设计非常重要。该系统所采用的电磁式电压互感器由3个单相互感器组成,各相PT的仿真电路模型见图3。由于没有专用的PT仿真模型,利用对非线性电感 L_m 的模拟结合理想变压器T,可以在软件环境中实现一个完整的PT模型。



T—理想变压器; R_m 、 L_m —PT的励磁阻抗;
 R_1 、 L_1 —PT的一次侧漏抗; R_2 、 L_2 —PT的二次侧漏抗。

图3 单相电磁式电压互感器仿真原理图

Fig. 3 Simulation model of single phase PT

将PT的模型选定后,需要确定各元件的参数,其中一次侧漏抗、二次侧漏抗以及励磁电阻值都根据现场实测得到。重要的是确定非线性电感 L_m 的参数,即PT的励磁参数。从现场实测的PT励磁参数只有 $U-I$ 曲线,而EMTPWorks软件需要输入电感的 $i-\varphi$ 曲线,因此需要将测得的 $U-I$ 曲线转化为 $i-\varphi$ 曲线。

2 系统铁磁谐振计算及分析

利用上述仿真模型,计算水电站系统的铁磁谐振现象,并对系统铁磁谐振的影响因素进行分析。

2.1 任意开关始终闭合

仿真发现,当断开5001或5002开关中的其中一个而另一个仍然闭合的情况下,通过大量的仿真可得,无论开闸时间定在什么时候,断开其中一台断路器后,系统电压不会发生任何影响。因此,只断开5001或5002开关中的其中一个而另一个仍然闭合的情况下,系统不会发生谐振,电压不会发生任何改变。由此可以将电路进一步简化,因为在任意时刻首先断开任一个断路器都不会对系统产生任何影响,所以可将其中一个断路器在起始时刻就断开,即等效为一个电容,与另一断路器的断口电容并联等效后,只需分析另外一个断路器的断开时间。

2.2 谐振过电压产生及分析

按事故发生现场的实际情况,当断开5001断路器后,系统正常。之后断开5002断路器,系统发生谐振。现利用简化后的谐振系统,在0.2 s时断开断路器,A电压的仿真波形见图4。由图4可知,在开闸后半周期内发生谐振,谐振过电压幅值最大可达到约额定电压的1.7倍,且持续时间非常长,基本不会自行衰减。从图4(b)可以看出,母线上谐振电压除基频分量外,还发生了明显的1/3分频谐振,谐振频率大致为16.6 Hz,对于这种分频谐振应该格外引起重视。

当系统未发生铁磁谐振时,由于三相电压相等且相位互差120°,三相电压之和始终为零。而当系统发生短路或谐振故障时,三相电压变为不对称,在PT二次侧开口三角绕组两端应该会检测出零序

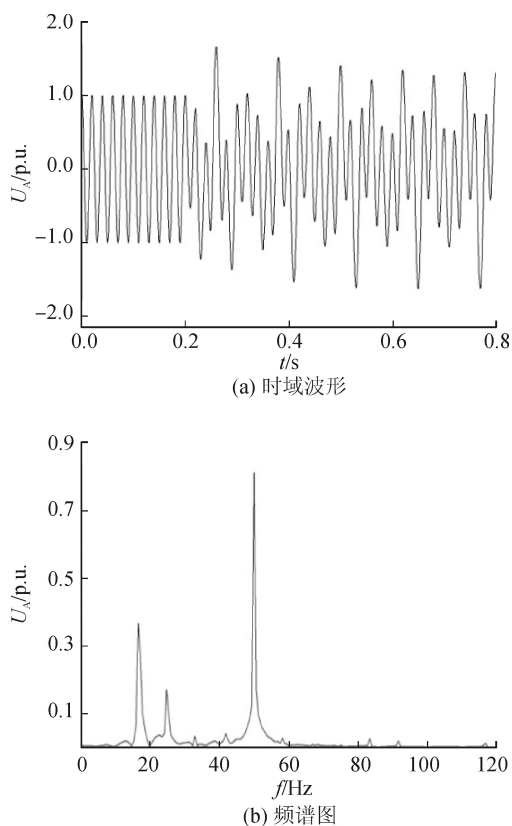


图4 谐振发生时A相母线仿真电压时域波形及其频谱图
Fig. 4 Voltage waveform and spectrogram of phase A at ferroresonance

电压分量^[1]。基于上述分析进行仿真计算,同样当 $t=0.2$ s时断开断路器,PT二次侧开口三角绕组两端电压波形见图5。从图5(a)中可以观察得,在断路器断开之前,即系统发生谐振之前,开口三角端电压为0,此时系统中没有零序分量。而当断路器断开之后,从PT二次侧开口三角绕组两端检测到了零序电压分量。对此零序电压分量进行FFT分析,结果见图5(b),可见此零序电压频率主要为1/3工频,也有部分的1/2工频分量,与谐振电压频率相同,说明零序分量正是由于系统谐振的发生而产生的。

3 采用CVT的抑制措施仿真研究

水电站为中性点接地系统,产生铁磁谐振的主要原因因为PT中铁磁元件的饱和特性。将电磁式电压互感器(PT)替换为电容式电压互感器(CVT),可以从根本上杜绝了铁磁谐振发生的可能性。在文中所建立的水电站铁磁谐振仿真分析平台上,将谐振系统中的PT换为CVT,利用仿真计算分析采用CVT抑制铁磁谐振的可行性。

C_1 、 C_2 为高低压臂电容; L_d 为泄漏电感;CR为保护间隙; R_c 为间隙串联电阻; R_1 、 L_1 为PT一次侧漏抗; R_2 、 L_2 为PT二次侧漏抗; R_3 、 L_3 为PT三次侧漏抗; C_e 、

C_i 、 C_m 为杂散电容; R_m 为PT的励磁电阻; L_m 为PT的励磁电感。

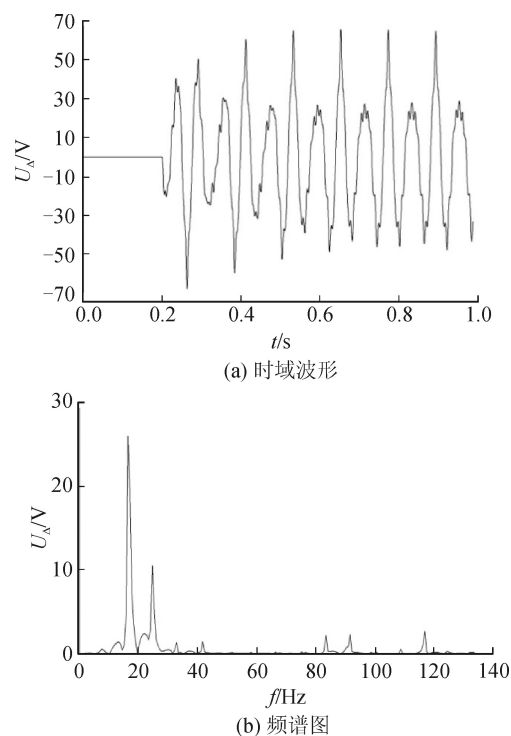
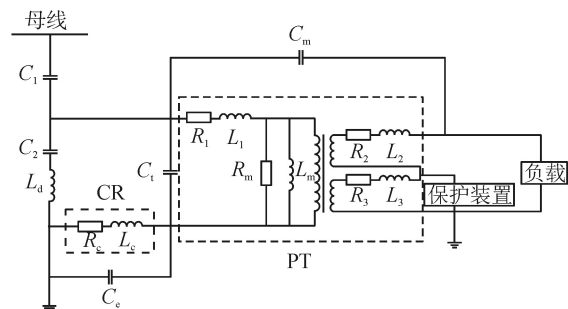


图5 谐振发生时PT二次侧开口三角绕组两端电压波形及其频谱图

Fig. 5 Voltage waveform and spectrogram of PT secondary side at ferroresonance

CVT仿真模型见图6。其中CR为补偿电抗器,用来消除电容器内阻的影响。负载选用ANSI C93.1—1990标准规定的负荷,为 R 、 L 串联负载,其功率因素为0.85,大小为1VA,经过计算,有 $R=2\,438.28\,\Omega$ 、 $L=6.59\,\text{H}$ 。利用此CVT结构进行仿真模型的搭建,并将其投运到本谐振系统中来替换原有的PT,现进行仿真分析,仍以A相电压为例,在 $t=0.4$ s时断开断路器后CVT内部互感器一、二次侧的仿真电压波形见图7。

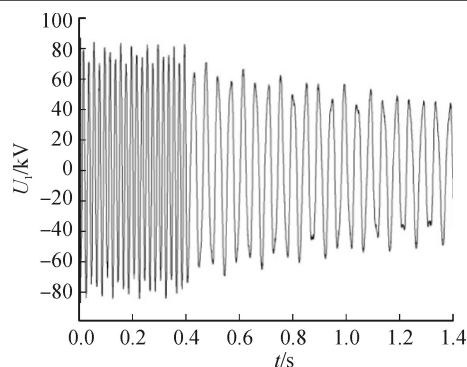


C_1 、 C_2 —高低压臂电容; L_d —泄漏电感;CR—保护间隙;
 R_c —间隙串联电阻; R_1 、 L_1 —PT一次侧漏抗;
 R_2 、 L_2 —PT二次侧漏抗; R_3 、 L_3 —PT三次侧漏抗;
 C_e 、 C_i 、 C_m —杂散电容; R_m —PT的励磁电阻; L_m —PT的励磁电感。

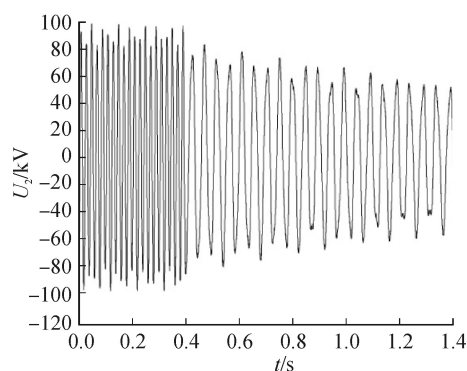
图6 仿真用CVT结构图

Fig. 6 Structure of CVT simulation model

图7表明,当 $t=0.4$ s时断开断路器,虽然CVT内



(a) 互感器一次侧电压波形



(b) 互感器二次侧电压波形

图7 A相CVT内部电压仿真波形

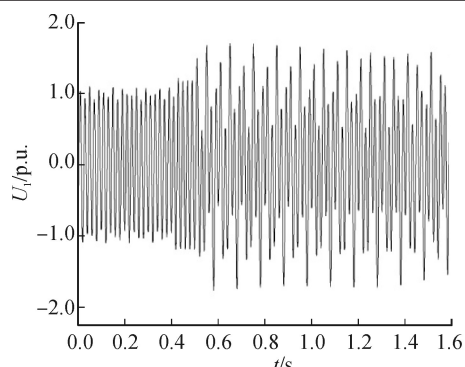
Fig. 7 Voltage waveform inside phase A CVT

部电压的过渡过程较长,但整个系统并未发生铁磁谐振现象,事实上,通过大量的仿真计算可得,无论在何时断开断路器,系统都不会发生谐振,B、C两相上也有相似的仿真结果。所以利用CVT替换PT,可以有效防止系统出现铁磁谐振现象。

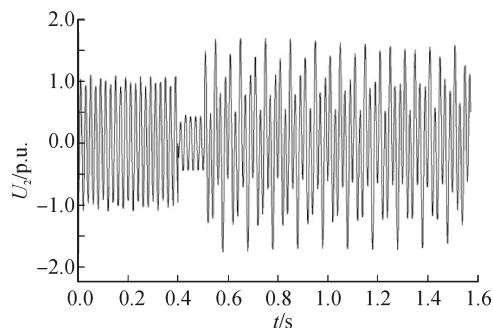
然而,即使使用CVT,也有可能在特殊情况下发生铁磁谐振。CVT中互感器二次侧测量端突然发生短路,并在短时间内消除此短路冲击后,CVT内部可能出现铁磁谐振现象。仿真中,在 $t=0.4$ s时将CVT测量端负载短路,并在5个周期即0.1 s后重新投入负荷,以A相CVT为例,其互感器一、二次侧仿真电压波形见图8。

图8表明,当在CVT负载端突然短路又突然消除此冲击后,CVT内部会发生铁磁谐振现象,无论是在互感器的一次侧还是二次侧,谐振电压最大值均会达到1.7 p.u.。且由于谐振电压仍具有分频分量,所以对互感器绕组的危害是非常大的,且二次侧的谐振电压容易引起保护装置误动作,可能对电网造成严重的危害,所以对于CVT内部的铁磁谐振现象需要予以重视。

事实上,由于CVT内部存在中压互感器,互感器中非线性电感和CVT中电容就可以构成一个典型的铁磁谐振回路。而在正常情况下,由于互感器



(a) 互感器一次侧电压波形



(b) 互感器二次侧电压波形

图8 负载短路后又消除时CVT内部电压仿真波形

Fig. 8 Voltage waveform inside CVT after removing short circuit

中非线性电感工作在线性段,不满足铁磁谐振产生的条件;当二次侧突然短路时,非线性电感迅速达到饱和,当消除短路时,就满足了谐振产生条件,从而引发了CVT内部铁磁谐振。

对于CVT内部谐振的消除,需要利用CVT二次侧保护端。与在PT二次侧星型绕组两端并联电阻消谐的原理类似,在CVT二次侧保护端并联电阻,可以有效减小回路电阻使其减小到临界阻尼电阻值以下,从而阻尼谐振,消耗能量,破坏谐振能量平衡,从而达到消谐的目的。

仍使用上述谐振条件,即在 $t=0.4$ s时将CVT测量端负载短路,并在5个周期即0.1 s后重新投入负荷,此时($t=0.5$ s)在CVT二次侧保护端投入消谐电阻,阻值分别为5、1、0.5、0.1 Ω ,以A相电压为例,仿真结果见图9。图9表明,投入的消谐电阻值越小,消谐效果越好,当选择 $R=0.1$ Ω 时,可以发现消谐效果已经非常出色了。当然,投入的消谐电阻越小,其消耗的功率也就越大,在实际应用中需要考虑电阻发热等问题,所以对于阻值的选择还需要综合各方面因素考虑。

4 结论

文中搭建了水电站铁磁谐振仿真研究平台,验证了谐振的发生条件,并对影响谐振发生的因素和

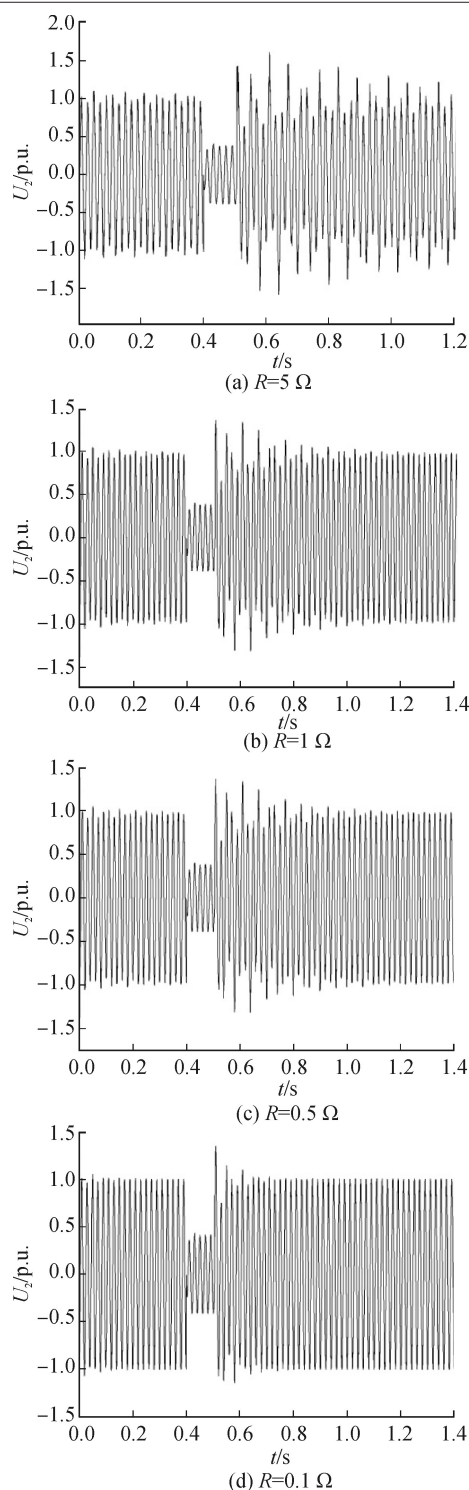


图9 投入消谐电阻后CVT内部电压仿真波形

Fig. 9 Voltage waveform inside CVT after adding degaussed resistance

谐振的产生机理进行了分析,对采用CVT的消谐措施进行了深入的仿真研究,得出了以下结论:

1)对于现有系统,无论5001断路器和5002断路器在何时断开,当后一个断路器断开时,都会引发铁磁谐振现象;

2)该系统谐振过电压最大幅值约为1.7 p.u.,且引发的谐振为1/3分频谐振,频率约为16.7 Hz;

3)利用现有系统,对CVT的性能进行了仿真计算,说明了使用CVT替换PT可以成功避免因断路器操作带来的铁磁谐振。并且通过仿真表明,使CVT二次侧短路并在短时间内消除此冲击时会使CVT内部产生铁磁谐振,通过在CVT二次侧保护端投入消谐电阻的方法可以有效抑制此谐振。

参考文献:

- [1] 张向东,张华龙,李英. 电力系统铁磁谐振的危害、鉴别及其防治措施[J]. 电力学报,2002,17(4):283-286.
ZHANG Xiangdong, ZHANG Hualong, LI Ying. Danger, distinction and prevention and cure treatment on ferro-resonance in electricity system[J]. Journal of Electric Power, 2002, 17(4):283-286.
- [2] 常卫中,刘玄毅. 直接接地系统铁磁谐振过电压计算分析[J]. 东北电力学院学报,1996(1):27-32.
CHANG Weizhong, LIU Xuanyi. Analysis of ferro-resonance overvoltage in direct grounding system[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 1996(1):27-32.
- [3] 常卫中,刘玄毅,刘全. 220 kV铁磁谐振过电压计算分析[C]//CSEE学术年会论文集(一). [S.l.]:[s.n.],1995:64-68.
CHANG Weizhong, LIU Xuanyi, LIU Quan. Calculation and analysis of 220 kV ferromagnetic resonance overvoltage[C]// Proceedings of CSEE Academic Annual Conference(I). [S.l.]: [s.n.], 1995:64-68.
- [4] KIENY C. Application of the bifurcation-theory in studying and understanding the global behavior of a ferroresonant electric-power circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(2):866-872.
- [5] ZAHAWI Z E, TONG Y K. Chaos in ferroresonant wound voltage transformer: effect of core losses and universal circuit behavior[J]. IEE Proc. Sci. Meas. Technol, 1998, 145 (1):39-43.
- [6] ZAHAWI Z E, AUCKLAND D W, TONG Y K. Ferroresonance in electromagnetic voltage transformers: A study based on nonlinear dynamics[J]. IEE Proc. Gener Transm Distrib, 1997, 144(4):383-387.
- [7] 张永祥. 大堡子变110 kV母线谐振现象分析[J]. 青海电力,2002(2):23-24.
ZHANG Yongxiang. Analysis of 110 kV bus line's resonance oscillation phenomenon at dapuzi substation[J]. Qinghai Electric Power, 2002(2):23-24.
- [8] 王铁华. 铁磁谐振及其影响[J]. 上海电力,2001(4):52-54.
WANG Yihua. Ferromagnetic resonance and its influence[J]. Shanghai Electric Power, 2001(4):52-54.
- [9] BOHMANN L J, MCDANIEL J, STANEK E K. Lightning arrester failure and ferroresonance on a distribution system[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1993, 29(6):1189-1195.

- [10] 朱志岩,常世勋. 电磁式电压互感器铁磁谐振的分析与对策[J]. 山西电力,2002(1):23-24.
ZHU Zhiyan, CHANG Shixun. Analysis and countermeasures of ferromagnetic resonance of electromagnetic voltage transformer[J]. Shanxi Electric Power,2002(1):23-24.
- [11] MARTI J R, SOUDACK A C. Ferroresonance in power-systems - fundamental-solutions[J]. IEE Proceedings-C Generation Transmission and Distribution,1991,138(4):321-329.
- [12] KIENY C. Application of the bifurcation-theory in studying and understanding the global behavior of a ferroresonant electric-power circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1991,6(2):866-872.
- [13] SHEIN P, ZISSU S, SCHAPIRO W. Voltage transformer ferroresonance in one 400 kV GIS substation[J]. Electrical and Electronics Engineers in Israel,1989,4(3):1-5.
- [14] 王晓云,李宝树,庞承宗. 电力系统铁磁谐振研究现状分析[J]. 电力科学与工程,2002(4):49-51.
WANG Xiaoyun, LI Baoshu, PANG Chengzong. Research review on ferroresonance in power systems[J]. Information on Electric Power,2002(4):49-51.
- [15] 金雄飞,李之昆. 电力系统铁磁谐振研究现状[J]. 四川电力技术,2004(1):10-13.
JIN Xiongfei, LI Zhikun. Research status of ferromagnetic resonance in power system[J]. Sichuan Electric Power Technology,2004(1):10-13.
- [16] WORNLE F, HARRISON D K, ZHOU C K. Analysis of a ferroresonant circuit using bifurcation theory and continuation techniques[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):191-196.
- [17] EMIN Z, BAT A Z, AUCLAND D W, et al. Ferroresonance in electromagnetic voltage transformers:A study based on nonlinear dynamics[J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution,1997,144(4):383-387.
- [18] MORK B A. Application of nonlinear dynamics and chaos to ferroresonance in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1994,9(2):1009-1017.
- [19] LI Y G, SHI W, QIN R, et al. A systematical method for suppressing ferroresonance at neutral-grounded substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(3):1009-1014.
- [20] EMIN Z, ZAHAWI B, YU K T, et al. Quantification of the chaotic behavior of ferroresonant voltage transformer circuits[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications,2001,48(6):757-760.
- [21] REZAEI-ZARE A, IRAVANI R, SANAYE-PASAND M A, et al. An accurate hysteresis model for ferroresonance analysis of a transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(3):1448-1456.
- [22] MILICEVIC K, EMIN Z. Impact of initial conditions on the initiation of ferroresonance[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2009,31(4):146-152.

由志勋(1982—),男,硕士,主要从事高电压绝缘技术研究工作。

(上接第127页)

- er transformer tanks' internal faults[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):179-185.
- [23] 王秀春,陶军普. 大型自然油循环导向冷却变压器温度场研究[J]. 变压器,2008,45(7):6-10.
WANG Xiuchun, TAO Junpu. Temperature field research of large forced-directed oil cooling transformer[J]. Transformer,2008,45(7):6-10.
- [24] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 变压器用储油柜:JB/T 6484—2005[S]. 北京:机械工业出版社,2005.
National Development and Reform Commission. Oil conservator for transformers: JB/T 6484—2005[S]. Beijing: China Machine Press,2005.
- [25] 中华人民共和国国家能源局. 电力变压器检修导则:DL/T 573—2010[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
National Energy Administration. Maintenance guide for power transformers:DL/T 573—2010[S]. Beijing:China Electric Power Press,2010.
- [26] 中华人民共和国国家能源局. 气体继电器检验规程:DL/T 540—2013[S]. 北京:中国电力出版社,2014.
National Energy Administration. Rules for the inspection of buchholz relay:DL/T 540—2013[S]. Beijing:China Electric Power Press,2014.

周丹(1986—),女,博士,从事电力变压器研究工作。