

# 电压互感器三相励磁特性对铁磁谐振的影响

王亮<sup>1</sup>, 施围<sup>1</sup>, 沙玉洲<sup>2</sup>, 惠兆鹏<sup>2</sup>, 李新<sup>2</sup>, 贾建华<sup>2</sup>, 安作平<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 大连第一互感器厂, 辽宁 大连 116200)

**摘要:** 利用通用的电磁暂态计算程序 EMTP, 对 10 kV 中性点不接地系统中电磁式电压互感器 (PT) 饱和引起的铁磁谐振过电压进行了仿真计算。通过三相 PT 对称和不对称两种情况下的计算, 得到互感器三相励磁特性对铁磁谐振的影响。计算表明, 系统中三相 PT 励磁特性不相同非常有利于谐振发生。

**关键词:** 电磁暂态计算程序; 铁磁谐振; 电压互感器; 励磁特性; 不对称

**中图分类号:** TM864 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897 (2005) 02-0035-04

## 0 引言

统计表明, 由于电磁式电压互感器 (简称 PT) 饱和引起的铁磁谐振过电压是中性点不接地系统中最常见、且造成事故最多的一种内部过电压<sup>[1]</sup>, 严重影响电力系统的安全运行。国内外学者对铁磁谐振的机理与限制措施作了大量的研究, 但这些成果大多是基于 PT 三相励磁特性相同的前提下得到的。而对于 PT 三相励磁特性不同, 甚至分散性较大的情况下铁磁谐振会有怎样的新特点, 很少有研究涉及。事实上, 这种 PT 三相不对称下的谐振是很有可能在实际中遇到的, 所以对此进行较深入的研究是有其理论价值和实际意义的。

本文首先建立发生谐振系统的三相电路模型, 然后利用广泛应用的电磁暂态计算程序 (EMTP), 分别对 PT 三相励磁特性相同和三相励磁特性不同两种情况下的铁磁谐振进行仿真计算。通过对计算结果的分析, 得到一些结论, 供电网运行管理单位和电压互感器的制造单位参考。

## 1 仿真计算模型的建立

图 1 为 10 kV 中性点不接地系统的三相等效电路。E<sub>A</sub>、E<sub>B</sub>、E<sub>C</sub> 分别为三相运行相电压, 幅值 E<sub>m</sub> = 11.5/√3 × √2 = 9.39 kV。电源通过三相断路器连接至空载母线, 母线可以带其它出线。Z 为线路每相的等值阻抗, C<sub>0</sub> 为线路单相对地电容。母线上接三相电压互感器。L<sub>A</sub>、L<sub>B</sub>、L<sub>C</sub> 分别为三相 PT 等效的非线性电感, R<sub>A</sub>、R<sub>B</sub>、R<sub>C</sub> 分别为三相 PT 的等值电阻。

计算中采用 JDZX9-10G 型电压互感器, 图 2 为其中三台的励磁特性曲线。为了便于 EMTF 仿真计算, 必须先将图 2 的电压电流有效值特性转换为磁链电流瞬时值特性。本文采用逐点递推法进行转

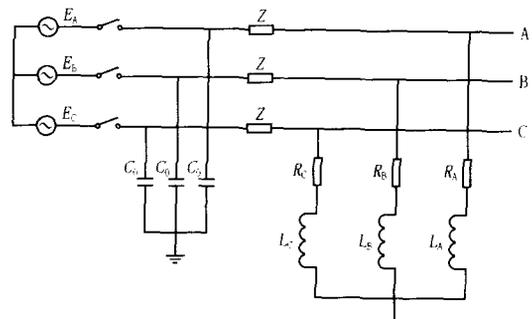


图 1 仿真计算的电路图

Fig 1 Circuit of simulation

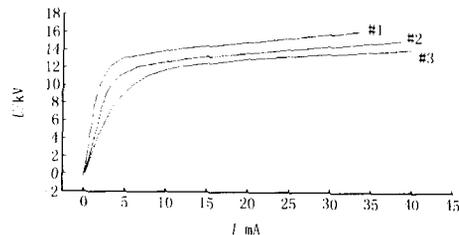


图 2 三台 PT 的伏安特性曲线

Fig 2 U-I characteristic curves of three PTs

换<sup>[2]</sup>。

通常构成谐振的激发条件, 一是断路器对母线的突然合闸, 二是由于雷击等原因发生短时单相弧光接地<sup>[3]</sup>。本文对这两种激发条件下的谐振都进行了模拟。为了使计算结果具有可比性, 本文计算中合闸和单相接地的初始条件都是相同的。合闸情况下, A 相在电源电压达到峰值时合闸, 3 ms 之后 B 相合闸, 再过 7 ms 之后 C 相合闸; 单相接地情况下, 故障相在电源电压达到峰值 E<sub>m</sub> 时发生接地, 在电源电压等于 -E<sub>m</sub> 时接地消除。计算表明, 上述条件下比较有利于铁磁谐振的发生。

## 2 三相对称的计算

为了与三相不对称的情况相对照,先对三相 PT 励磁特性一致的情况进行计算分析。

从图 2 可以看出,三台 PT 的分散性还是比较大的。分别取线性度最好的 #1 和最差的 #3 进行计算。若三相均为 #3PT,三相不同期合闸激发谐振,变化

系统对地电容值,仿真计算谐振情况得表 1。然后保持开关闭合,A 相短时接地激发谐振,计算得表 2。若三相均为 #1,用同样方法计算得表 3、表 4。表中  $X_C/X_L = \frac{1}{C_0} / L$ ,其中  $L$  为 PT 在额定电压下的电感。过电压标么值基值取为电源电压。PT 上过电压和 PT 上电流峰值均取三相中最大的一相。

表 1 三相 PT 均为 #3 时合闸激发的谐振情况

Tab 1 Ferreresonance excited by switching when three phases PTs are #3

单相对地电容 $C_0/\mu\text{F}$	$X_C/X_L$	电源中性点位移过电压 /pu	PT 上过电压 /pu	PT 上电流峰值 /A	谐振频率
0.001	1.333	3.02	3.99	0.148	高频
0.005	0.267	3.58	4.56	0.365	高频
0.010	0.133	1.89	2.65	0.273	基频
0.020	0.067	1.83	2.79	0.451	基频
0.040	0.033	0.83	1.79	0.219	1/2分频
0.060	0.022	1.08	2.04	0.292	1/2分频
0.100	0.013	1.17	2.10	0.365	1/2分频

表 2 三相 PT 均为 #3 时单相接地激发的谐振情况

Tab 2 Ferreresonance excited by single phase earthing when three phases PTs are #3

单相对地电容 $C_0/\mu\text{F}$	$X_C/X_L$	电源中性点位移过电压 /pu	PT 上过电压 /pu	PT 上电流峰值 /A	谐振频率
0.005	0.267	1.53	2.42	0.164	基频
0.010	0.133	1.41	2.31	0.183	基频
0.020	0.067	1.08	2.06	0.271	1/2分频
0.060	0.022	0.89	1.93	0.268	1/2分频
0.100	0.013	1.17	2.13	0.441	1/2分频
0.140	0.010	1.13	2.10	0.613	1/2分频

表 3 三相 PT 均为 #1 时合闸激发的谐振情况

Tab 3 Ferreresonance excited by switching when three phases PTs are #1

单相对地电容 $C_0/\mu\text{F}$	$X_C/X_L$	电源中性点位移过电压 /pu	PT 上过电压峰值 /pu	PT 上电流峰值 /A	谐振频率
0.001	0.513	5.06	4.17	0.161	高频
0.005	0.103	1.96	2.86	0.144	基频
0.010	0.051	1.03	2.03	0.143	基频
0.015	0.034	0.61	1.60	0.129	1/2分频
0.020	0.026	0.98	1.93	0.125	1/2分频
0.040	0.013	1.28	2.23	0.193	1/2分频

表 4 三相 PT 均为 #1 时单相接地激发的谐振情况

Tab 4 Ferreresonance excited by single phase earthing when three phases PTs are #1

单相对地电容 $C_0/\mu\text{F}$	$X_C/X_L$	电源中性点位移过电压 /pu	PT 上过电压 /pu	PT 上电流 /A	谐振频率
0.005	0.103	1.54	2.43	0.095	基频
0.010	0.051	0.88	1.87	0.134	1/2分频
0.030	0.017	1.00	1.98	0.150	1/2分频
0.050	0.010	1.25	2.19	0.232	1/2分频
0.070	0.007	1.06	2.06	0.308	1/2分频

一般 10 kV 系统中架空线对地电容的数量级为  $0.001 \mu\text{F}/\text{km}$ , 电缆对地电容的数量级为  $0.1 \mu\text{F}/\text{km}$ 。从计算结果可见, 无论母线接架空线出线或是电缆出线, 或者二者兼有, 都有可能发生谐振。但采用 #1PT 时发生谐振的对地电容范围比 #3 要小得多, 过电压、过电流也小得多, 线性度的提高对铁磁谐振的抑制作用还是很明显的。分频谐振下虽然过电压不高, 但过电流很大, 因此对 PT 的危害更大。另外, 同样的系统参数下, 不同的激发条件对谐振也有一定影响, 简单的说, 合闸更倾向于激发高频侧的谐振, 而单相接地更倾向于激发分频侧的谐振。

增大系统对地电容, 使之超出表格所列电容范

围, 就可以避免铁磁谐振的发生。但是随着电容的增大, 激发出的谐振电流越来越大。对地电容的增大一旦没能避免谐振的发生, 将会造成更严重的情况。

### 3 三相不对称计算

在不对称计算中, A 相 PT 采用线性度最差的 #3, B、C 两相 PT 采用线性度最好的 #1, 同样在合闸和单相接地激发谐振的条件下, 变化对地电容值, 计算得表 5、表 6、表 7。由于在此条件下, A 相接地与 B、C 相接地激发的谐振情况不再相同, 故对这两种情况分别计算。

表 5 三相不对称时合闸激发的谐振情况

Tab 5 Ferroresonance excited by switching when three phases PTs are asymmetric

单相相对地电容 $C_0/\mu\text{F}$	电源中性点过电压 /pu	PT上过电压 /pu			PT上过电流峰值 /A			谐振频率
		A相	B相	C相	A相	B相	C相	
0.001	3.86	3.40	3.55	4.85	0.137	0.112	0.112	高频
0.005	1.93	1.15	2.71	2.76	0.001	0.125	0.123	基频
0.010	1.94	1.46	2.55	2.92	0.004	0.123	0.201	基频
0.020	2.76	2.48	3.15	3.75	0.271	0.214	0.374	基频
0.040		未激发出谐振						
0.050	0.70	1.70	1.68	1.62	0.322	0.184	0.142	1/2分频
0.060		未激发出谐振						
0.070	0.87	1.86	1.69	1.62	0.301	0.190	0.163	1/3分频
0.080	0.84	1.82	1.68	1.63	0.284	0.196	0.193	1/3分频
0.090	1.01	1.99	1.83	1.77	0.473	0.255	0.220	1/3分频

表 6 三相不对称时 A 相接地激发的谐振情况

Tab 6 Ferroresonance excited by phase A earthing when three phases PTs are asymmetric

单相相对地电容 $C_0/\mu\text{F}$	电源中性点过电压 /pu	PT上过电压 /pu			PT上过电流峰值 /A			谐振频率
		A相	B相	C相	A相	B相	C相	
0.00005	0.81	0.98	1.67	1.66	0.003	0.002	0.002	基、高频混合
0.00010	0.94	1.06	1.80	1.78	0.003	0.002	0.002	基、高频混合
0.00050	1.01	0.10	1.74	1.74	<0.001	0.003	0.003	基频
0.00100	6.01	6.09	6.86	7.01	0.282	0.192	0.165	高频
0.00500	1.58	0.76	2.46	2.46	0.003	0.088	0.092	基频
0.01000	2.03	2.03	2.39	3.02	0.047	0.069	0.243	基频
0.02000	2.75	2.47	3.16	3.74	0.265	0.215	0.373	基频
0.03000	1.27	2.26	1.68	1.97	0.401	0.157	0.109	1/2分频
0.04000		未激发出谐振						
0.05000	0.79	1.79	1.64	1.43	0.233	0.142	0.120	1/2分频
0.07000	1.48	2.40	2.22	2.35	0.535	0.214	0.225	1/2分频
0.09000	1.45	2.44	2.32	2.29	0.612	0.271	0.350	1/2分频
0.10000		未激发出谐振						
0.11000		未激发出谐振						
0.12000	0.75	1.75	1.65	1.68	0.282	0.221	0.239	1/3分频
0.13000	0.79	1.78	1.75	1.64	0.279	0.221	0.254	1/3分频
0.14000	0.81	1.80	1.71	1.69	0.304	0.236	0.270	1/3分频

表 7 三相不对称时 C相接地激发的谐振情况

Tab 7 Ferreresonance excited by phase C earthing when three phases PTs are asymmetric

单相对地电容 $C_0/\mu\text{F}$	电源中性点过电压 /pu	PT上过电压 /pu			PT上过电流峰值 /A			谐振频率
		A相	B相	C相	A相	B相	C相	
0.000 1	1.76	1.90	2.58	2.58	0.004	0.003	0.003	高频
0.000 5	2.97	3.46	3.56	3.55	0.087	0.064	0.071	高频
0.001 0	5.34	5.74	6.34	6.27	0.231	0.145	0.159	高频
0.005 0	2.06	1.53	2.93	2.85	0.005	0.143	0.153	基频
0.010 0	2.09	2.01	2.37	3.09	0.046	0.067	0.243	基频
0.020 0	3.17	3.01	3.59	4.14	0.374	0.289	0.404	基频
0.030 0	0.88	1.89	1.67	1.48	0.319	0.122	0.148	1/2分频
0.040 0	1.11	2.01	1.81	2.04	0.330	0.144	0.121	1/2分频
0.060 0	1.25	2.24	2.03	1.97	0.454	0.173	0.163	1/2分频
0.080 0					未激发出谐振			
0.100 0					未激发出谐振			
0.120 0	0.78	1.78	1.71	1.61	0.252	0.218	0.246	1/3分频
0.160 0	0.83	1.83	1.77	1.69	0.334	0.252	0.289	1/3分频
0.180 0	0.87	1.87	1.84	1.69	0.415	0.262	0.322	1/3分频

从计算结果看,相对于三相对称的情况,三相PT不对称时谐振情况有其自身特点。首先从谐振频率分布看,三相对称时随着对地电容增大,依次发生高频、基频、1/2分频谐振,界限比较分明。而在三相不对称时,随着对地电容增大,谐振频率依次是高频、基频、1/2分频、1/3分频,但界限并不分明,分界区域内不仅两个频率的谐振都可能发生,还可能发生两个频率的混合谐振,或者未能激发谐振。需要特别指出的是,如前文所述,本文计算中同一激发方式下初始条件是相同的,而铁磁谐振对初始条件的变化很敏感,因此这里的“未激发出谐振”并不意味着改变初始条件后也无法激发谐振,但可以说明谐振发生的概率减小了。

从激发方式看,单相接地比合闸激发的谐振电容范围更大,C相接地(B相接地类似)比A相接地激发的谐振电容范围更大。

比较A、B、C三相的过电流,虽然A相PT最易饱和,且饱和段等效电感较小,但是其上的电流值并非总是三相中最大的。在发生高频或基频谐振时,反倒经常是B、C相不易饱和的PT过电流更大。

将不对称计算的结果与表3、表4对比,可以发现无论是从谐振电容范围看,还是从谐振时的过电压、过电流看,两台线性度好的PT与一台线性度不好的PT配合远远比不上三相均采用线性度好的PT。也就是说,若将三相线性度好的PT中的一台换为线性度差的PT,系统发生谐振的可能性将大大提高,谐振时的危害也大大加强,“木桶效应”十分

明显。

如果说上述结论还是可以预期的话,那么将不对称计算的结果与表1、表2对比,则会得到比较出乎意料的结论。两台线性度好的PT与一台线性度不好的PT配合,可能发生谐振的对地电容范围甚至比采用三台线性度不好的PT时还要略大,即使除去过渡区域中不谐振的部分(事实上,仿真表明,即使在这种不谐振情况下,系统中震荡的暂态过程常常可以维持几秒钟时间,其间的过电流与发生谐振时相当),二者也是几乎相同。谐振时的过电流也没有得到有效抑制,考虑到正常运行时线性度好的PT电流更小,所以其谐振过电流倍数要大得多。换句话说,若将原有的三相易饱和但分散性很小的PT中的两相换为线性度好得多的PT,发生谐振的可能性并没有减小,谐振危害也没有减弱,情况甚至可能更严重。

#### 4 结论

1) 在接有电磁式电压互感器的中性点不接地的配电网中,整体提高三相互感器的线性度可以有效防止铁磁谐振的发生,减小危害。但如果仅提高三相中一相或两相的线性度,对铁磁谐振的抑制并没有显著效果。

2) 铁磁谐振不仅与系统中每相PT的线性度有关,还与三相PT励磁特性的分散性有关,分散性大,谐振发生的可能性就大,谐振状况越严重。

(下转第42页 continued on page 42)

- [8] 万建成, 卢雷. 软件体系结构的原理、组成与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002  
WAN Jian-cheng, LU Lei Principle, Composing and Application of Software Architecture [M]. Beijing: Science Press, 2002
- [9] Land R. A Brief Survey of Software Architecture [R]. Malardalen Real-time Research Center Report, 2002
- [10] 杨芙清, 梅宏, 李克勤. 软件复用与软件构件技术 [J]. 电子学报, 1999, 27(2): 68-75.  
YANG Fu-qing, MEI Hong, LI Ke-qin Software Reuse

and Software Component Technology [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(2): 68-75.

收稿日期: 2004-05-18; 修回日期: 2004-06-20  
作者简介:

李书勇 (1979 - ), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统远动与信息网络的研究; E-mail: oliver0057@tom.com  
宋玮 (1963 - ), 男, 副教授, 主要从事电网调度应用软件的研究。

### A power system software architecture of reusable components

LI Shu-yong<sup>1</sup>, SONG Wei<sup>1</sup>, DENG Jian<sup>2</sup>, ZHENG Xiang-hua<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Xiangtan Electric Power Bureau, Xiangtan 411100, China)

**Abstract:** In order to reduce effectively the complexity of power system application software, and make it more compatible, compositive, reusable, and more easy to upgrade and maintenance, after analyzing power system and EMS, based on the related principles of software architecture and component technique, the traditional power system application software is delaminated and decomposed in components. Then a power system software architecture based on reusable components is proposed, and its advantages are pointed out by further analysis. The architecture contains two basic application components of mainboard-style, and its components communicate on the software bus.

**Key words:** power system; software architecture; reusable component; software bus

(上接第 38 页 continued from page 38)

3) 对于电网运行管理单位来说, 应尽量选用同型号、同批次生产的单相电压互感器, 或采用三相电压互感器。对于互感器制造企业来说, 应尽量减小同型号产品技术参数的分散性, 这与提高产品的线性度同样重要。

#### 参考文献:

- [1] 张纬钺, 何金良, 高玉明. 过电压防护及绝缘配合 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002  
ZHANG Wei-po, HE Jin-liang, GAO Yu-ming Overvoltage's Protection and Insulation Coordination [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002
- [2] 李谦, 陈猷清, 王晓瑜, 等. 变压器和电磁式电压互感器铁芯励磁特性曲线转换方法的讨论 [J]. 变压器, 1993, 30(12): 10-13.

LI Qian, CHEN You-qing, WANG Xiao-yu, et al Method of Converting Excitation Characteristics of Power Transformers and Potential Transformers [J]. Transformer, 1993, 30(12): 10-13.

- [3] 陈维贤. 电网过电压教程 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1996  
CHEN Wei-xian A Tutorial on Overvoltage of Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996

收稿日期: 2004-05-11; 修回日期: 2004-06-20  
作者简介:

王亮 (1981 - ), 男, 硕士生, 研究方向为电力系统暂态仿真计算; E-mail: lionelwangliang@sohu.com  
施围 (1941 - ), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统过电压及其防护。

### Influence of three phases excitation characteristics of PT on ferroresonance

WANG Liang<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>1</sup>, SHA Yu-zhou<sup>2</sup>, HUI Zhao-peng<sup>2</sup>, LI Xin<sup>2</sup>, JIA Jian-hua<sup>2</sup>, AN Zuo-ping<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Dalian No. 1 Instrument Transformer Works, Dalian 116200, China)

**Abstract:** The ferroresonance overvoltage, which results from the electromagnetic potential transformer in the 10 kV system with neutral point unearthed, is simulated and studied by the electromagnetic transient program (EMTP). Through the simulations of three phases under the conditions of PT symmetric and asymmetric, the effect of excitation characteristics of three phases PT on ferroresonance is concluded. The results indicate that the difference of the three phases excitation characteristics of PT makes the ferroresonance very easy to occur.

**Key words:** EMTP; ferroresonance; potential transformer; excitation characteristic; asymmetry