

# 电力变压器中 5 次谐波的产生及其对负序电压继电器的影响

余培岩<sup>1</sup>, 马卫平<sup>1</sup>, 石国良<sup>2</sup>

(1. 吉林省电力科学研究所, 吉林 长春 130021

2. 吉林省电力有限公司, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 针对长春榆树、五棵树一变负序电压继电器频繁误动的现象进行了测试分析, 同时结合对空载电力变压器的升压试验及负序电压继电器的谐波干扰测试。得出了造成榆树、五棵树一变负序电压继电器误动的原因是电力变压器因运行电压偏高, 致使变压器铁芯过饱和产生 5 次谐波, 而 5 次谐波电压对负序电压滤过器的渗透率为 90%。最后提出了解决的措施。

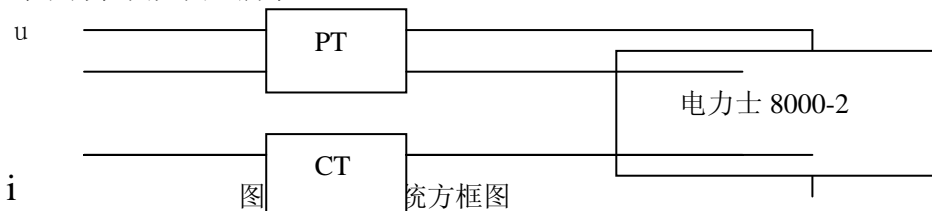
**关键词:** 电力变压器; 5 次谐波; 负序电压; 负序的滤过器

随着国民经济的高速发展, 诸如大型可控硅整流装置、电弧炉、电力机车及具有磁饱和性质的非线性电力设备日益增多, 产生大量的谐波诸如电网, 致使电网电压正弦波形产生畸变, 造成公用电网电能质量下降, 使供用电双方均受到不同程度的损失。特别值得指出的是电力变压器产生的 5 次谐波, 因其产生谐波的特殊性, 对电网中运行的继点保护装置和计量装置带来严重危害和影响。

长春供电公司所属的榆树、五棵树一变在今年的 4、5 月份夜间 22 点至凌晨 1 点左右, 其 66kV 母线负序电压滤过器偶尔动作, 发出电网负序电压偏高的信号, 而此时系统运行一切正常, 并没有任何事故发生。此种现象在今年的 8 月份达到了高峰, 几乎每天夜间负序电压继电器都发出负序电压偏高的信号, 严重影响了系统的安全运行。五棵树一变是我省电气化铁路的牵引变, 其 220kV 线路榆五线与榆树一变相连; 榆树一变 220kV 线路榆双线与双城堡一变相连, 而双城堡一变也是电铁牵引变。这种系统结构使得榆树及五棵树一变在 220kV 系统都含有产生谐波的非线性电力负荷。为查找负序电压继电器频繁误动的原因, 于 2003 年 11 月 3 日至 5 日对榆树及五棵树一变进行谐波测试分析工作。

## 1 试验方法及数据处理

本次谐波测试, 电压取五棵、榆树变电所 220kV 及 66kV 母线电压互感器的二次回路; 电流则串入五棵、榆树变电所主变一、二次主及各线路电流互感器的二次回路。测试系统方框图如图 1 所示。



依据中华人民共和国有关电能质量国家标准《电能质量 公用电网谐波》的要求, 对谐波的测量数据进行了如下的处理:

- (1) 对每个谐波测点的谐波测试次数 (数据) 不少于 5 次;
- (2) 取 5 次测量的算术平均值。

同时实时记录测量 66kV 母线负序电压滤过器输出端电压的变化。

## 2 谐波测试与分析

## 2.1 测试内容

测试安排在晚上 2003 年 11 月 3 日 17 时至 5 日凌晨 1 时左右进行, 先进行正常运行方式下的测试, 间隔 2 小时记录一次 220 kV 母线、66kV 母线电压及谐波电压; 66 kV 母线负序电压滤过器输出端电压值; 主变一次主、二次主、220 kV 线路及 66 kV 线路电流及谐波电流。零时起进行调整有载变压器分接头试验, 模拟系统电压升高, 对变压器有载调压分接头的各位置运行工况下, 测试 220 kV 母线、66kV 母线电压及谐波电压; 66 kV 母线负序电压滤过器输出端电压值; 主变一次主、二次主电流及谐波电流。

## 2.2 测试分析

从测试数据分析, 榆树及五棵树一次变在正常运行方式下, 也就是在没有调整有载变压器分接头位置的情况下, 随着时间的变化, 即电力负荷的减少, 系统电压的升高, 其 66 kV 母线负序电压滤过器输出端电压值及 5 次谐波电压含有率都随着时间的推移在增加, 而此时尽管系统电压升高了, 但其三相电压不平衡度值基本上没有变化。以榆树一次变为例其 220kV、66kV 母线 5 次谐波电压含有率在傍晚 17: 30 分左右分别为 1.4%、2.6%, 至深夜 23 时其 5 次谐波电压含有率已分别上升至 1.8%、4.2%, 已超过国家标准 1.6% 及 2.4% 的限制值; 同时 66 kV 母线负序电压滤过器输出端电压也由 2.9V 上升为 4.9V, 并且用频谱示波器观察负序电压滤过器输出端的电压, 是 5 倍频分量, 也就是说 5 次谐波电压, 而非基波负序电压。220kV 母线电压 (C 相) 由 130.2 kV 上升为 137.0 kV, 升幅 5.4%; 66kV 母线电压 (A 相) 由 36.9 kV 上升为 39.7 kV, 升幅 7.6%; 系统电压 220kV 侧三相电压分别由  $U_A=128.9 \text{ kV}/0^\circ$ 、 $U_B=129.0 \text{ kV}/240^\circ$ 、 $U_C=130.2 \text{ kV}/120^\circ$  变化为  $U_A=135.9 \text{ kV}/0^\circ$ 、 $U_B=135.8 \text{ kV}/240^\circ$ 、 $U_C=137 \text{ kV}/120^\circ$ 。而此时榆树一次变主变二次主的负荷电流由 260A 减少至 120A; 5 次谐波电流由 9.6A 升至 39A 并超过 10A 允许值。对于榆树一次变来讲, 66 kV 线路共有 6 条分别是: 榆城线、榆向线、榆秀线、榆北线、榆五线和榆大线均不含有大型的非线性电力负荷, 而且在傍晚时其负荷较大, 在深夜其负荷较小, 比如榆向线、榆五线及榆大线在深夜时其负荷很小几乎为零。我们知道非线性负荷产生的谐波大小与其负荷有紧密的关系, 往往负荷最大的时刻也是产生谐波电流最大的时刻, 所以国标中规定对非线性负荷的测试要测试其最大负荷的工况。综合上面的测试及分析, 可以得出一个初步的结论, 榆树及五棵树一次变 66kV 及 220kV 5 次谐波问题, 不是其 66 kV 母线所带的电力负荷产生的, 其大小与系统运行的电压水平密切相关。

电力变压器是铁芯设备, 由于铁芯磁路的饱和特性, 使系统侧提供的激磁电流产生畸变, 其产生的谐波电流主要包含在空载电流及激磁电流中且所含的谐波分量相同, 其产生的谐波次数主要是以 3、5 及 7 次为主, 其谐波电流的大小与铁芯材料的饱和特性及设计时选择的工作点有关即工作磁通密度有关。前者决定饱和特性, 后者决定饱和程度。磁通密度高, 可以节省铁芯原材料, 但使谐波增大; 同时产生谐波的大小与变压器运行时的系统电压有关, 系统运行电压越高, 运行点越深入饱和区, 空载电流的波形畸变越大, 谐波含量急剧上升。榆树及五棵树一次变 220kV 及 66kV 5 次谐波含量随着系统电压的升高而升高, 可能是由于电力变压器因系统电压的升高而使铁芯饱和造成的。为此进行了调整有载变压器分接头的谐波测试, 此时负荷基本上没有变化。还是以榆树一次变为例, 随着变压器分接头从“7”调整至“12”, 即 66kV 侧母线电压相电压由 40kV 升至 41.2kV, 升幅 3% 时 66kV 电压 5 次谐波含有率从 4.2% 升至 5.1%, 升幅达 21.4%; 66kV 母线负序电压滤过器输出端电压值由 4.9V 升至 6.6V, 此过程仅 1 分钟左右, 足以证明负荷对 5 次谐波是没有影响的。继续调整变压器分接头位置“12”调整至“3”, 即 66kV 侧母线电压相电压由 41.2kV 降至 37.5kV, 电压降幅 9%; 66kV 电压 5 次谐波含有率从 5.1% 降至 2.1%, 降幅达 59%; 66kV 母线负序电压滤过器输出端电压值由 6.6V 降至 3.2V, 此时系统高低压侧三相电压不平衡度没有变化。由此可见随着系统运行电压的升高, 变压器产生的 5 次谐波也随之升高, 且升高幅度远远大于电压的升高幅度。

为进一步验证系统运行电压的升高对电力变压器产生 5 次谐波的影响，我们对长春变压器厂生产的 SZ9-31500/66 变压器进行了空载试验，试验电源由主变低压侧加入，在 100%、105%及 110%额定电压下分别测量其 3、5 及 7 次谐波电压及电流，测试结果见表 1。

表 1 变压器空载升压谐波测试数据

变压器型号	升压幅度 U/U <sub>e</sub> , %	变压器空 载励磁电 流, A	谐波电压含有率, %			谐波电流占变压器空载 励磁电流的百分比, %		
			U <sub>3</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>7</sub>	I <sub>3</sub> /i <sub>0</sub>	I <sub>5</sub> /i <sub>0</sub>	I <sub>7</sub> /i <sub>0</sub>
SZ9-31500/66	100	0.98	0.7	2.3	1.2	4.9	28.1	10.9
	105	1.60	1.2	3.4	1.9	5.4	33	13.9
	110	2.74	1.5	7.4	3.9	4.4	37	14.5

从表 1 中的测试数据不难看出，运行电压的升高对变压器产生谐波特别是 5 次谐波的影响是相当大的。当电压加到 110%额定电压时，从伏安特性曲线看，此时还没有到达拐点，变压器并没有到达饱和区，所以单纯从变压器空载特性试验并不能全面考核变压器的运行特性中谐波的问题。其主要原因是变压器制造厂为了降低成本，节省铁芯原材料，采用新材料以提高磁通密度造成的。

综合以上的测试与分析，可以认为榆树、五棵树一次变 5 次谐波电压严重超标是因为在夜间系统负荷小，系统运行电压偏高，致使变压器的运行点进入深度饱和区，变压器空载电流产生严重畸变，致使变压器的谐波含量急剧上升，变压器相当于谐波电压源造成的。

### 2.3 谐波对负序电压滤过器影响的分析

从前面的测试数据及分析我们看到，榆树及五棵树一次变负序电压滤过器输出端的电压就是 5 次谐波电压，并且都随着 66kV 母线的 5 次谐波电压的增加而增加。正常情况下负序电压滤过器输出端电压反映的是系统的三相不对称程度，当系统发生三相不对称故障时，负序电压滤过器输出端输出基波负序电压，发出信号。图 2 为一典型的负序电压滤过器电路。

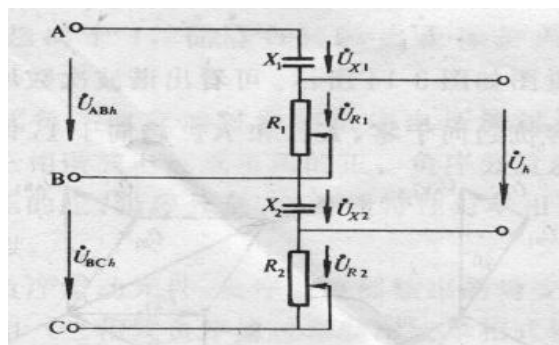


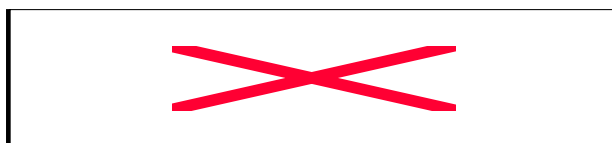
图 2 负序电压滤过器电路

输入三相电压中无零序分量。参数匹配要求为：

$$R_1/X_1=X_2/R_2=\sqrt{3} \quad (2)$$

式中：X<sub>1</sub>和X<sub>2</sub>为AB和BC相电容器的基波容抗。

则负序电压滤过器输出端输出的谐波电压为：



$$= K_{1h} \mathbf{U}_{ABh} + K_{2h} \mathbf{U}_{BCh} \quad h=1, 2, 3, \dots$$

$$K_{1h} = e^{j\varphi_{1h}} / \sqrt{1+1/3h^2} \quad \varphi_{1h} = \arctan 1/\sqrt{3}h$$

$$K_{2h} = e^{j\varphi_{2h}} / \sqrt{1+h^2/3} \quad \varphi_{2h} = \arctan h/\sqrt{3}$$

把输入谐波电压分解为以 AB 相为参考的序分量，得

$$\mathbf{U}_h = \mathbf{K}_{h+} \mathbf{U}_{ABh+} + \mathbf{K}_{h-} \mathbf{U}_{ABh-} \quad (3)$$

$$\mathbf{K}_{h+} = K_{1h} + \alpha^2 K_{2h}$$

$$\mathbf{K}_{h-} = K_{1h} + \alpha K_{2h}$$

式中： $\mathbf{K}_{h+}$ 和 $\mathbf{K}_{h-}$ ——正、负序谐波电压复比例系数；

$$\alpha \text{——三相对称旋转子，} \alpha = e^{j120^\circ}$$

基波正序电压的输出为零，基波负序电压的输出为：

$$\mathbf{U}_1 = 1.5e^{j60^\circ} \mathbf{U}_{AB-} \quad (4)$$

从公式 (3) 可以看出，当谐波次数  $h$  越高， $\mathbf{K}_{h+}$  和  $\mathbf{K}_{h-}$  就越趋向于 1，即谐波电压渗透系数趋向于 1。主要原因是当谐波次数  $h$  越大，其负序电压滤过器电路中电容器的谐波容抗趋向于零所致。

为进一步证实谐波特别是 5 次谐波对负序电压滤过器的影响，对榆树一次变 66 kV 母线安装使用的 BFY-12A 负序电压继电器进行谐波干扰的测试，测试结果见表 2。

表 2 BFY-12A 负序电压继电器谐波干扰测试

继电器的输入电压, V			5 次谐波电压含有率 HRU <sub>5</sub> , %	负序电压滤过器输出端电压 U <sub>负序</sub> , V	谐波电压渗透系数 U <sub>负序</sub> /HRU <sub>5</sub>
U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>			
57.7	57.7	57.7	3	2.66	0.89
57.7	57.7	57.7	4	3.35	0.84
57.7	57.7	57.7	5	4.07	0.81
57.7	57.7	57.7	6	4.80	0.80
57.7	57.7	57.7	7	5.60	0.80
57.7	57.7	57.7	8	6.30	0.79
57.7	57.7	57.7	9	7.10	0.79
57.7	57.7	57.7	10	7.80	0.78
57.7	57.7	57.7	12	9.33	0.78
57.7	57.7	57.7	15	11.6	0.77

从测试数据分析 5 次谐波电压对负序电压滤过器的影响是很大的，其 5 次谐波电压含有率对负序电压滤过器的渗透系数在 80–89%，与理论分析结果基本吻合。榆树一次变 66 kV 母线负序电压继电器动作值整定为 9V，从表 2 的测试数据看，当榆树一次变 66kV 母线 5 次谐波电压含有率达到 12%左右时，其负序电压继电器电压滤过器输出端的电压为 9.33V，超过 9V 的整定值，故而引发误动作。

#### 4 结论、措施、建议

#### 4.1 结论

- a. 66kV 母线负序电压滤过器的负序电压随着系统电压的增大而增大。
- b. 系统的 5 次谐波增加导致 66kV 母线负序电压滤过器输出端负序电压的增大。
- c. 系统中由于存在一批额定电压为 60kV、63kV 的变压器，在轻载高电压下运行是产生 5 次谐波电压的主要原因。
- d. 模拟试验证明，额定电压 66kV 主变在 110%额定电压下运行，可以产生 7.4%5 次谐波电压；37%5 次谐波电流。

#### 4.2 措施

- a. 安装电能质量在线测试装置，设置 5 次谐波电压的预警信号，当系统的 5 次谐波电压偏高时发出预警信号，提示运行人员注意，同时采取技术措施。
- b. 把现有的负序电压滤过器进行更换，选择抗谐波能力强的负序电压滤过器，即带有 5 次谐波滤波电路的。
- c. 在特定的时段内结合电能质量在线监测仪及系统的运行电压水平，对有载变压器分接头进行调节，人为降低 66kV 系统运行电压偏高的问题。
- d. 必要时在 66kV 系统加装并联电抗器以降低系统运行电压在特定的时段内偏高的问题，此项措施需进行进一步的可行性分析。
- e. 更换额定电压低于系统运行电压的变压器。

#### 4.3 建议

建议省电力公司今后对接入我省电网的电力变压器进行饱和倍数的谐波测试工作，对一些生产厂家的产生谐波偏大的变压器禁止入网，在源头上堵住变电力压器产生谐波的问题。同时也希望国家有关部门对电力变压器产生谐波特别是 5 次谐波的问题引起重视，尽快制定出相应的技术标准。

#### 参考文献：

[1]

作者 1 余培岩 吉林省电力科学研究院 吉林省长春市人民大街 4433 号 电话 0431-5793563  
作者 2 马卫平 吉林省电力科学研究院 吉林省长春市人民大街 4433 号 电话 0431-5793597  
作者 3 石国良 吉林省电力有限公司 吉林省长春市人民大街 4629 号 电话 0431-5793917