

# 电网铁磁谐振的产生机理与 10 kV 配网 铁磁谐振的小波分析

黄丽云, 张 焰

(上海交通大学, 上海 200240)

A Brief Review on the Causes of Ferromagnetic Resonance and Wavelet  
Analysis of 10 kV Neutral Isolated Distribution Network

HUANG Li-yun, ZHANG Yan

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

摘要: 铁磁谐振是电力系统运行过程中的一种常见现象, 频繁发生在中性点非直接接地的配电网和中性点直接接地的高压电力网中。为研究其过电压和过电流带给电力设备的损害, 分析了单相铁磁谐振的振荡过程, 并探讨了电力系统铁磁谐振产生的机理; 同时利用 MATLAB 中的小波工具箱对某 10 kV 中性点不接地系统单相接地故障激发的铁磁谐振进行了分析, 检测故障发生时刻以及判断谐振的发生和频率。仿真结果表明, 小波变换方法对判断铁磁谐振的发生和频率以及检测故障发生时刻是有很有效的。

关键词: 铁磁谐振; 过电压; 小波变换

中图分类号: TM864

文献标识码: A

Abstract: Ferromagnetic resonance, a common phenomenon in power system, frequently occurs in neutral isolated distribution net and neutral grounded networks. The consequent overvoltage and overcurrent do great harm to the power equipment, and result in a series of stabilization and safety problems. In this paper, the reason of the phenomenon is discussed. Besides, the wavelet toolbox in MATLAB is also used to analyze the ferromagnetic resonance caused by single-phase earthed fault in a 10 kV neutral isolated power system, detect the time of the fault and determine the resonance frequency. Simulation results show that the method is quite effective.

Key words: ferromagnetic resonance; overvoltage; wavelet transform

## 0 引言

在电网的振荡回路内, 电容和损耗电阻一般都可看作线性参数, 电感则不然。变压器和电机的励磁电感(铁心电感)与磁密的大小有关, 在额定电压或稍高于额定电压下, 绕组的励磁电感是线性的; 但是当绕组电压大大升高或者发生涌流时, 铁心趋于饱

和, 电感呈现出非线性。在电感电容的振荡回路中, 不同参数配合可产生基频谐振、分频谐振和高频谐振。其过电压和过电流常常造成电力设备的损害, 给电力系统的安全稳定运行带来一系列问题。

笔者将探讨其铁磁谐振过电压的产生机理及特点; 并以某 10 kV 中性点不接地系统单相接地故障激发的铁磁谐振为例, 利用被称为“数学显微镜”<sup>[1]</sup>小波变换来确定谐振的发生及谐振频率, 并检测故障时刻。

## 1 电网铁磁谐振的振荡过程

在电力系统的振荡回路中, 由于铁心电感的磁饱和和作用而激发持续性较高幅值的过电压, 称之为铁磁谐振过电压。任意的铁磁振荡回路均可简化为如图 1 所示的最简单的振荡回路。其中: R 为等值电阻; C 为等值电容; L 为非线性电感; E 为等值电源。

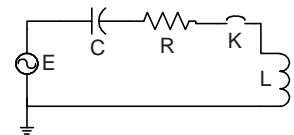


图 1 最简单的振荡回路

以基波铁磁谐振为例, 利用作图的方法分析谐振过程和产生条件。测定图 1 中非线性电感 L 的伏安特性特性曲线, 测量方法为在 L 两端施加不同大小的工频电压, 测定其相应电流的有效值 I (包括谐波电流)。此曲线的起始部分是直线, 设其起始电感值为  $L_0$ ; 同时画出电容 C 的工频伏安特性曲线; 假设随着电流的增大, 铁心饱和, 电感降低, 两条特性曲线相交于  $I_0$ 。各特性曲线见图 2。

令  $U = |U_L - U_C|$ ,  $R=0$ , 在  $I_0$  点,  $U_L - U_C=0$ ,  $U=0$ , 类似于线性回路中的谐振点; 由于电感的饱和效应, 电流大于  $I_0$  后, U 再度上升。不考虑 R 时, 应有:

$$E = U \quad (1)$$

收稿日期: 2005-12-20; 修回日期: 2006-02-19

作者简介: 黄丽云(1980-)女, 硕士研究生, 目前主要从事电网络理论在电力系统中的应用及小波分析方面的研究。

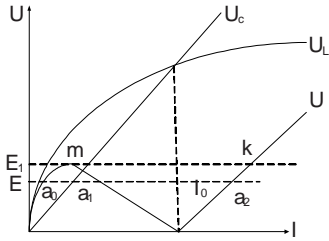


图 2 R=0 时基波谐振图解法

由图 2 可知, E 与有 3 个交点  $a_0, a_1, a_2$ , 只有  $a_0$  和  $a_2$  两点是稳定的。 $a_0$  点为电路的非谐振工作点, 电容和电感上的压降和通过的电流均较小;  $a_2$  点为电路的谐振工作点, 因其已越过特性曲线的交点  $I_0$ , 此时的电流和压降均急剧增大。在  $I_0$  点, 等效感抗  $L=1/C$ , 这与线性谐振相仿, 压降和电流将趋于无穷大, 但因电感非线性的特点, 当  $I$  越过  $I_0$  而继续增大时, 等效感抗进一步下降, 使得  $L$  与  $1/C$  自动错开, 最后到达新的稳定点  $a_2$ , 所以铁磁谐振过电压虽由电感非线性引起, 但其幅值最终又受到非线性限制, 一般不超过电源电压的 3 倍。

## 2 不同接地方式下铁磁谐振的产生

对于 10~35 kV 中性点不接地系统, 产生铁磁谐振的必要条件是系统产生电磁振荡和电压互感器在电磁振荡的激励下饱和, 系统在正常运行状态下, 若电感感抗大于电容容抗, 且具有一定的外施电压激发, 便会产生单相铁磁谐振。零序电压是产生三相铁磁谐振的必要条件。

对于中性点直接接地系统, 特别是在对只带电压互感器的空载母线充电的操作中, 如果没有选择合理的运行方式和操作方式, 很容易发生空载母线通过母联开关的均压电容与电压互感器的铁磁谐振。对中性点直接接地系统, 电压互感器为 3 台单相, 且高压绕组为 Y 接法, 这样该段母线就可以分成 3 个独立的三相系统来考虑, 即可转化为单相铁磁谐振情况分析。

铁磁谐振通常有并联铁磁谐振和串联铁磁谐振两种。并联铁磁谐振是指在中性点不接地系统中, 母线系统的对地电容与母线电压互感器的电感组成谐振回路; 串联铁磁谐振是指在中性点直接接地系统的母线系统中, 断路器断口均压电容与母线电压互感器的电感组成谐振回路。在一定外部条件下铁磁谐振被激发, 这时有关设备上的电压将大大超过额定值, 极易造成绝缘薄弱环节击穿、避雷器爆炸和母线电压互感器过流烧毁等严重设备损坏事故。

## 3 10 kV 配网铁磁谐振小波仿真分析

对某 10 kV 中性点不接地系统, 单相接地故障激发的铁磁谐振, 在 EMTP 上建立仿真模型进行仿真计算, 各元件数值如下: 取互感器激磁电抗  $X_m=900 \text{ k}$ ,

互感器高压直流电阻  $r_1=r_2=r_3=0.0003X_m=270$ ; 系统线路各相对地电容  $C_1=C_2=C_3=0.0055 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$ ; 系统对地绝缘电阻  $R=10^9$ ; A 相电源电势 (kV):  $e_1=10/\sqrt{3} \times \sqrt{2} \sin(\omega t)$ 。其中: 电压基准值  $U_H=8164.966 \text{ V}$ ; 磁通基准值  $\Psi_H=U_H/\omega=25.99 \text{ Wb}$ ; 电流基准值 (A):  $i_H=0.4985 \text{ e-}2$  (JDZJ-10 型 PT), 其他参数列于表 1。

表 1 PT 伏安参数

电压 /V	电流 /A	电压 /V	电流 /A
40.41	0.08	69.28	0.35
51.96	0.13	80.83	0.67
63.51	0.24	86.60	1.00

注: 表 1 中电压电流均为二次侧数值。

在利用 EMTP 和 MATLAB 进行仿真计算时, 对非线性电感使用的是磁链电流值, 故需将电压电流有效值转化为磁链电流值。采用逐点递推法进行转换, 得到 PT 的特性  $\Psi-i$  见表 2。

表 2 PT 磁链、电流有效值表

p.u.		p.u.	
$i$	$\Psi$	$i$	$\Psi$
0	0	1.2	0.7348
0.7	0.1633	1.4	1.3267
0.9	0.2857	1.5	2.0411
1.1	0.4898		

设系统 C 相在  $t=0.1 \text{ s}$  发生短路,  $t=0.2 \text{ s}$  故障消除, 所激发的铁磁谐振的波形 (总电容  $C=3C=0.17 \text{ } \mu\text{F}$ ) 见图 3。

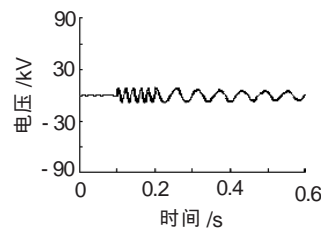


图 3 中性点电压波形

由文[2]可知, 中性点电压能够反映谐振的类型, 铁磁谐振检测可用中性点电压为检测量, 检验出前后两个突变点, 从而判断故障及谐振的产生; 若发生谐振, 判断出谐振的频率, 并检测出故障时刻。

信号中的奇异点及不规则的突变部分是信号的重要特征之一, 长期以来傅里叶变换是研究奇异性的主要工具, 但其缺乏空间局部性, 只能确定奇异性的整体性质, 而难以确定奇异点在空间的位置及分布情况; 而小波变换具有空间局部化性质, 因此, 利用小波变换来分析信号的奇异性及奇异性位置和奇异度的大小是比较有效的。

利用小波分析检测信号突变点一般原理是: 对信号进行多尺度分析, 在信号出现突变时, 其小波变换后的系数具有模量极大值, 因而可以通过对模量极大值点的检测来确定故障发生的时间点。

对图 3 中中性点电压信号进行二进小波变换后

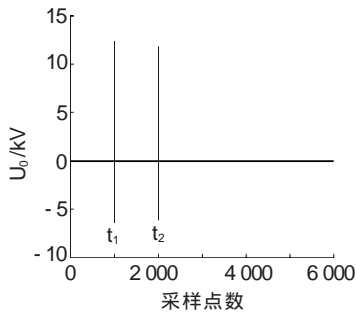


图 4 中性点电压的二进小波变换图

可以很方便地确定故障时刻, 见图 4。

由于 ATP-EMTP 仿真计算中所取的采样频率  $f=10^5$  Hz, ATP-EMTP 中所保存数据为每隔 10 个点保存一个。因图 4 中的模的极大值点所对应的时刻分别为:  $t_1=1\ 000 \times 10 \times 10^{-5}=0.1$  s;  $t_2=2\ 000 \times 10 \times 10^{-5}=0.2$  s 与设置的故障产生时刻和消除时刻完全吻合, 即检验了出故障发生时刻及消除时刻。

其次, 由于在 MATLAB 仿真图形中, 信号的等效采样频率为  $f_s=10$  kHz, 选用小波函数 dB3, 对中性点电压信号进行 9 尺度小波变换, 根据小波变换的分频特性, 第 1 尺度上的小波系数对应的频段为 2.5 ~ 5 kHz, 第 2 尺度上的小波系数对应的频段为 1.25 ~ 2.5 kHz, 依次类推, 见表 3。

表 3 尺度数与小波系数对应频段表

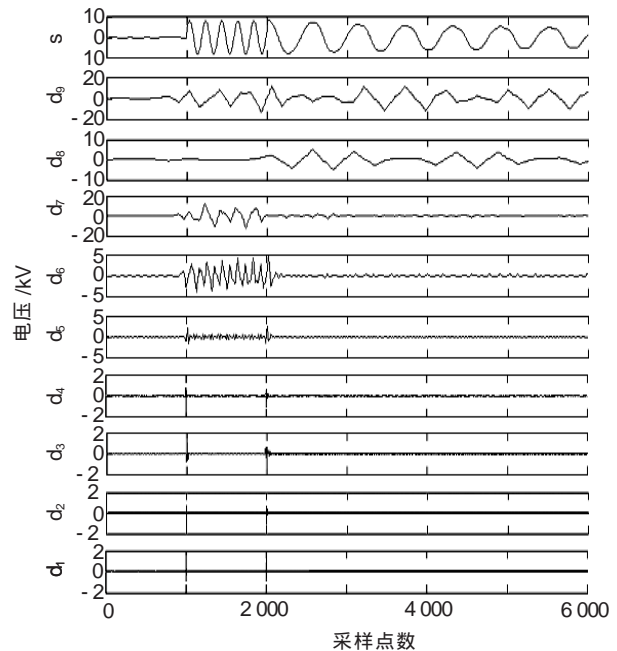
尺度 i	小波系数对应频段	尺度 i	小波系数对应频段
1	2.5 ~ 5 kHz	5	156.25 ~ 312.5 Hz
2	1.25 ~ 2.5 kHz	6	78.125 ~ 156.25 Hz
3	625 Hz ~ 1.25 kHz	7	39.0625 ~ 78.125 Hz (对应基频)
4	312.5 ~ 625 Hz	8	19.531 ~ 39.0625 Hz (对应 1/2 分频)
		9	9.7656 ~ 19.531 Hz (对应 1/3 分频)

利用 MATLAB 编程计算, 可以得到原始信号以及各层波形, 细节编号从下往上依次是  $d_1 \sim d_9$ , 最上面为原始信号  $s$ , 即中性点电压波形, 见图 5, 图 6。

由图 5 易得, 尺度 1 ~ 4 的小波变换系数在 1 000 点和 2 000 点处都有很明显的突变, 因此这种方法也可以方便地检测出两个奇异点。由图 6 可知, 单相接地故障期间, 尺度 7 的能量最大, 为基频谐振; 故障消失后, 尺度 9 的能量最大, 为 1/3 分频谐振, 同时, 尺度 8 的能量也比较大, 因此在激发的谐振中很可能同时存在 1/2 分频谐振。其中, 图 5 可以方便地判断出故障时刻, 图 6 则为了方便判断能量大小, 统一了纵坐标。

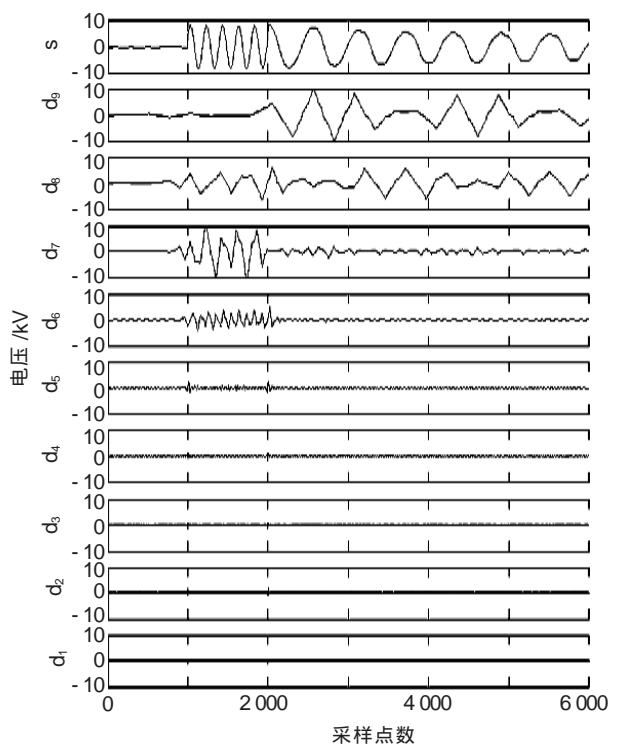
## 4 结语

探讨了电网中铁磁谐振产生的机理及特性。并将 MATLAB 的小波工具箱应用于铁磁谐振的检测;



原始信号和各层细节

图 5 中性点电压及其各尺度细节分量波形



原始信号和各层细节

图 6 中性点电压及其各尺度细节分量波形(统一纵坐标)

利用该方法可以较好地检测出故障的发生时刻和消除时刻, 并可判断故障发生时谐振的频率和故障消失后谐振的类型。

## 参考文献:

- [1] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [2] 陈维贤. 内部过电压基础[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.