

铁磁谐振仿真模型的改进

杜志叶, 阮江军, 王伟刚

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在中性点绝缘的复杂电网中, 因系统突发单相接地故障而激发的铁磁谐振现象经常出现, 利用 MATLAB 内建的仿真工具实现了由于电压互感器非线性励磁电感和系统对地电容匹配而引起的铁磁谐振暂态过程的数字仿真, 并分析比较了各种不同消谐方法的作用及效果。

关键词: 铁磁谐振; MATLAB 仿真; 消谐

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)08-0026-04

0 引言

电力系统中有许多非线性感性器件, 这些器件与系统内的容性元件在满足一定的条件下就会发生谐振, 这就是“铁磁谐振”。当铁磁谐振发生时, 由于参与谐振的电感元件的铁心严重饱和而产生谐振过电压和过电流, 严重威胁电网的安全运行。统计结果表明, 铁磁谐振可以在各种等级的网络中产生, 尤其是在 35 kV 及以下的电网中, 铁磁谐振的发生极为频繁, 目前已经成为一个普遍关注的问题^[1]。

目前在电力系统中对于铁磁谐振现象大多注重“治”忽视“防”。随着社会对供电可靠性要求的提高, 电网运行的稳定性是非常重要的, 对于严重威胁系统安全的铁磁谐振现象, 应尽可能做到未雨绸缪。这就要求在一个系统投入运行之前就能够可靠预测系统的运行状况, 让系统运行时尽量远离谐振点, 即使无法避免, 也能根据所预测的谐振类型设计适当的消谐措施。由于铁芯电感元件的动态特性极为复杂, 电网中又存在着大量的此类元件, 我们必须建立一个相对可靠的、精确的系统仿真模型和仿真方法来提高预测的准确性。

1 铁磁谐振的研究现状

由于铁磁谐振的发生同电磁式电压互感器 (Potential Transformer 以下简称 PT) 的特性有很大的关系, 目前的研究主要是围绕着 PT 展开的, 总结如下^[2,3]。

1.1 铁磁谐振发生的条件

- 1) 电网的对地电容与互感器的励磁电感相匹配, 且初始感抗大于容抗;
- 2) PT 的一次线圈中性点直接接地, 二次绕组线圈为轻载(开路) 状态;

- 3) 具有外界的突发条件如: 瞬间接地、合闸、雷击等, 产生电磁震荡, 导致 PT 铁芯严重饱和。

1.2 铁磁谐振发生时系统参数和故障现象

根据著名的 PETERSON 谐振判据^[4]:

- 1) 当系统参数比值 X_{c0}/X_m (其中 X_{c0} 为线路每相对地的容抗值, X_m 为电压互感器单相绕组在额定电压作用下的励磁电抗值) 在 0.07 ~ 0.55 时, 谐振频率与电网频率相同, 故称之为基频谐振。谐振发生时的故障特点: 三相电压表中指示数值为二相升高、一相降低, 或“两低一高”, 线电压正常; 过电压不超过 3.5 倍相电压, 伴有接地信号指示, 称为“虚幻接地”现象;

- 2) 当系统参数比值 X_{c0}/X_m 在 0.01 ~ 0.07 时发生分频谐振。其特点表现为: 过电压一般不超过 2.5 倍相电压, 三相电压表的指示数值同时升高, 并周期性摆动, 线电压正常; 励磁电流极大, 可达额定值的 30 ~ 50 倍;

- 3) 当系统参数比值 X_{c0}/X_m 在 0.55 ~ 2.8 时发生高频谐振。其主要特点为: 过电压倍数较高, 三相电压表的指示数值同时升高, 最大值可达到 4 ~ 5 倍相电压, 线电压基本正常; 谐振时过电流较小。

1.3 抑制、消除谐振的方案

- 1) 改变系统的运行方式。改变系统的阻抗比 X_{c0}/X_m , 躲开谐振区域, 破坏谐振条件;
- 2) 系统中性点和地之间加装消弧线圈;
- 3) 增大网络阻尼效应。例如: 在 PT 三角形绕组两端接阻尼电阻, 或加装消谐装置; 在 PT 一次线圈上的中性点和地之间串电阻或参数相近的单相电压互感器;
- 4) 采用零序电压互感器防止谐振。将特制的 PT 接入易发生谐振的电力系统高压母线上;
- 5) 采用励磁特性好的 PT 或用电容式电压互感

器(CVT) 代换电磁式 PT。

2 PT 仿真模型的建立和 10 kV 系统铁磁谐振仿真分析

MATLAB 是美国 Mathworks 公司开发的一款功能强大的数学计算和仿真分析软件。利用该软件中的电力系统工具箱 (POWER SYSTEM BLOCKSET) 结合 MATLAB 本身所擅长的高精度的数值计算特点可对电力系统的各种运行方式进行精确、直观、高效的仿真。

本文结合 MATLAB/SIMULINK 的特点,对中 性点不直接接地电网铁磁谐振典型电路进行仿真分析。下面介绍它的仿真方法。

2.1 饱和变压器模型的建立

如前文中所述,PT 的励磁特性曲线对铁磁谐振的发生有着直接的作用。因此,首先应该考虑如何建立一个适当的磁饱和和变压器模型。在以前的数值仿真研究中,大多采用三个 Y 型连接的非线性电感串联电阻的模型代替 PT,而将对铁磁谐振影响很大的 PT 铁损、漏抗忽略,使得仿真结果误差较大。本人在仿真计算中通过对 MATLAB/SIMULINK 内建的 SIMPOWER 库中的元件分析,认为采用磁饱和和变压器模型能更有效、准确地模拟电压互感器的工作特点^[5,6]。

图 1 画出了磁饱和和变压器的模型(单相),其中 R_1 是高压侧线圈的直流电阻(铜耗), L_1 为线圈漏感, R_m 为互感器的励磁电阻(铁损), L_{sat} 为铁心线圈的励磁电感,其电感值随着励磁电流的变化而变化,呈现非线性关系, L_2 、 R_2 是副边绕组的线圈漏感和直流电阻。

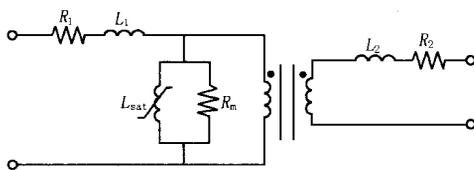


图 1 饱和变压器模型

Fig. 1 Model of saturation transformer

从图 1 可以看出此模型包含了铁心电感的铁损 (R_m) 及漏抗 (L_1),非常接近于铁心电感的真实值。在实际应用中由于系统一般是对称的,将三个单相的饱和变压器一次侧接成 Y 型,即可作为电压互感器的模型。

PT 的励磁特性参数设定利用曲线坐标法,将实测得到的 PT 二次侧电压、电流值转换到一次侧,利

用 $U = d \phi / dt$ (在单一频率的正弦电压的激励下可得 $\phi = U / \omega$),计算出 ϕ 值,再换算成标么值填入互感器参数设置中的饱和特性一栏中。其他参数的设定均按 PT 的实际标称值整定。

仿真中采用的电压互感器型号 JDZJ - 10 型,其实测的电压互感器的 $U - I$ 数据如表 1 所示。实验方法是:将电压互感器一次侧开路,在二次侧任意一相加单一频率(50 Hz)的正弦电压,测量不同电压激励下的电流。

表 1 JDZJ - 10 型电压互感器实验参数

二次电压	二次电流 / A	二次电压	二次电流 / A
0.7 U_e	0.08	1.2 U_e	0.36
0.9 U_e	0.14	1.4 U_e	0.65
1.1 U_e	0.24	1.5 U_e	1.0

(注: $U_e = 57.73$ V)

标么值参数换算(磁通、电流的基准值采用最大值):

$$U_{base} = U_{AC} / \sqrt{3} = U_n \quad R_{base} = U_n^2 / P_n$$

$$L_{base} = R_{base} / 2 f \quad \phi_{base} = U_n * \sqrt{2} (2 f)$$

$$I_{base} = P_n * \sqrt{2} / U_n$$

其中: $U_{AC} = 10$ kV, $P_n = 20$ VA, $f = 50$ Hz

根据实际值换算出来标么值,一般仅有 3 ~ 7 个点,再利用数值方法进行适当插值,使曲线更接近于实际曲线。等效折算后的互感器的饱和特性曲线如图 2 所示。

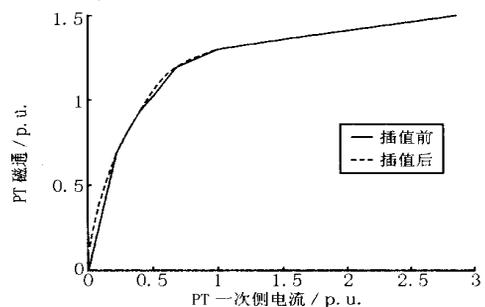


图 2 PT 的饱和特性曲线

Fig. 2 Saturation characteristic curve of PT

2.2 仿真计算

以一个简单的 10 kV 中性点不接地网络为模型,假设系统在正常运行的状态下,某一时刻 C 相突然接地,接地持续一段时间后又自行恢复,对其所激发的铁磁谐振进行仿真分析。

等效仿真系统网络如图 3 所示: $U_a \sim U_c$ 表示

三相电源, $Z_1 \sim Z_3$ 表示等效线路阻抗, $Y_1 \sim Y_3$ 是等效线路对地电容和绝缘电阻, 均由线路具体参数折算而得。开关 B_1 闭合将 C 相接地, 接地阻抗设定为 0.5Ω , 其动作时刻可以自由设定。万能测量模块 UT_{a-c} 和 IT_{a-c} 测量三相电压互感器一次侧绕组的电压和电流, 电压表 V_0 测量电源中性点对地电压。仿真计算时为了保证一定的精度, 求解器采用的最大步长为 $1e-5$, 允许相对误差为 $1e-4$ 。

在消谐作用仿真分析中, 我们分别对: 系统中性点经阻尼电阻接地; 电压互感器一次侧经消谐电阻接地; 电压互感器开口三角绕组接电阻, 三种不同的消谐措施进行仿真比较, 并分别找出最优的消谐元件取值。

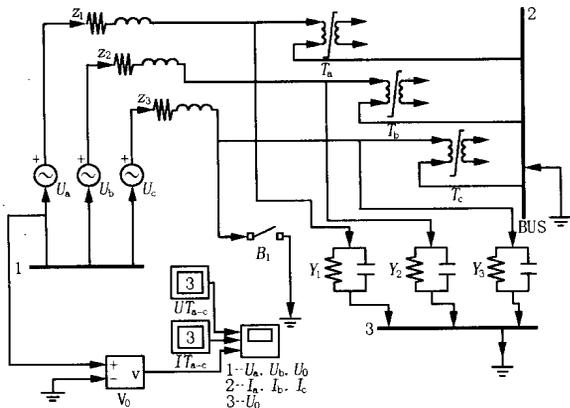


图3 仿真系统接线图

Fig. 3 Simulation system connection diagram

3 仿真计算结果及分析

3.1 铁磁谐振仿真计算结果分析

铁磁谐振仿真计算结果如表 2, 当系统线路长度取不同的值时(对地电容值不同), 可在接地故障消失后激发出各种类型的谐振。

表 2 铁磁谐振仿真计算结果

Tab. 2 Results of ferro resonance simulation

对地电容 C_0/nF	X_C/X_L	励磁电阻 R_m/M	谐振频率 f_x/f_E	接地时间/s [K_{ON}, K_{OFF}]	故障电压 U_{MAX}/U_E	故障电流 I_{MAX}/I_E
50	0.01	5	1/3	[0.1, 0.21]	1.9	50
10	0.05	10	1/2	[0.11, 0.2]	1.8	30
5	0.1	5	1/2, 1	[0.1, 0.2]	2.0	22
1	0.5	5	1, 2	[0.1, 0.21]	2.5	18
0.5	1	10	2, 3	[0.11, 0.2]	4.5	22
0.2	2.5	10	3	[0.11, 0.2]	5.5	15

从表 2 中的数据可以看出, 随着每相对地电容

的减小, 系统激发的铁磁谐振的频率逐渐增大, 由低频谐振向高频谐振变化。而产生的过电压、过电流也都符合各自的特征, 基本上同 H. A. PETERSON 所描述的谐振区相吻合。在仿真计算时还发现, 系统激发铁磁谐振的强度不但同线路接地故障发生的时刻、故障恢复的时刻有关, 而且同电压互感器的励磁电阻(铁损)取值有关。下面将三种典型的谐振波形录下如图 4 ~ 6 所示。

1) 基频谐振波形(图 4)。仿真参数 $C = 1 nF$, $R_m = 10 M$ 。从波形图中可看出接地故障恢复后相电压突然升高, 幅值约等于 3.0 倍的额定相电压(U_E), 电流可达 0.03 A, 20 倍于额定电流(I_E)。谐振时 A、B 相电压升高, C 相降低。

若将 R_m 减小到 5 M, 电压幅值约为 2.5 U_E , 电流约为 18 I_E 。

2) 高频谐振波形(图 5)。仿真参数 $C = 0.2 nF$, $R_m = 5 M$ 。谐振时三相电压同时升高, 幅值约等于 5 U_E , 电流 0.02 A, 约 15 I_E 。

3) 分频谐振(图 6)。仿真参数 $C = 50 nF$, $R_m = 10 M$ 。谐振时三相电压同时升高, 幅值约等于 1.8 U_E , 电流最高可达 0.08 A, 约 50 I_E 。电压表将会出现指针摆动现象。

在对系统三相电源不同期合闸(A 相 0.1s, B、C 相 0.11s) 仿真计算时, 发现随着系统对地电容取值的变化, 同样可以激发出不同类型的谐振, 仿真结果基本相似。

3.2 消谐措施仿真计算结果分析

将三种不同的消谐措施分别在系统参数不同的取值下进行仿真计算, 比较不同的谐振类型下各种消谐措施的效果。

图 7 所示的是在系统每相对地电容 $C = 5 nF$, 励磁电阻 $R_m = 10 M$ 时的仿真结果, 由图 7 中可以看出, 三种不同的消谐方式在适当的元件取值下均能达到良好的消谐效果, 最佳的电阻取值均在 5 k 左右, 但实际应用中要考虑系统的整体要求和实际的功率损耗。图 8 所示为消谐电阻接入后的波形。电压互感器一次侧中性点经一个 10 k 的电阻接地。将图 8 同图 5 比较一下可以发现, 当单相接地故障恢复时, 相电压、电流震荡幅值没有大幅升高, 且迅速衰减至正常的幅值, 说明采用消谐电阻以后, 系统没有激发出强烈的铁磁谐振, 达到了消谐目的。

4 结论

利用 MATLAB 内建的饱和变压器模型能够比较真实地模拟实际的 PT 特性,由于它充分考虑了铁心线圈的漏抗、铁损的作用(其他仿真分析所采用的模型大多忽略了漏抗及铁损),在仿真计算中可以取得更加准确的仿真结果,从而实现对系统运行状况的准确预测。

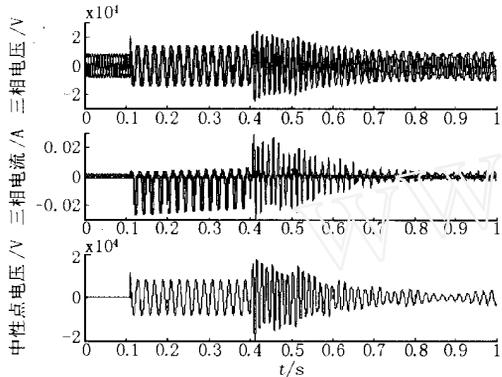


图4 基频谐振波形

Fig. 4 Waveform of fundamental frequency ferroresonance

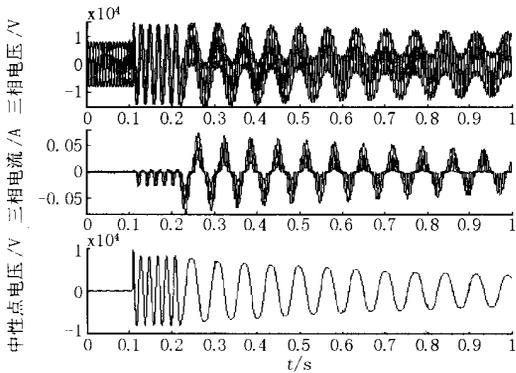


图5 分频谐振波形

Fig. 5 Waveform of sub frequency ferroresonance

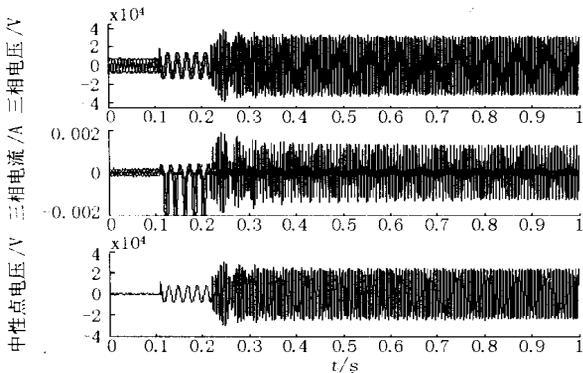
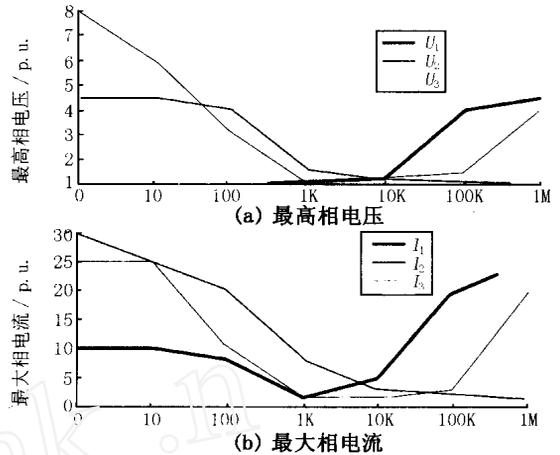


图6 高频谐振波形

Fig. 6 Waveform of high frequency ferroresonance



注: U_1, I_1 表示系统中性点经阻尼电阻接地; U_2, I_2 表示 PT 一次侧经电阻接地; U_3, I_3 表示 PT 开口三角绕组接电阻

图7 消谐措施仿真结果

Fig. 7 Simulation results of resonance suppression measure

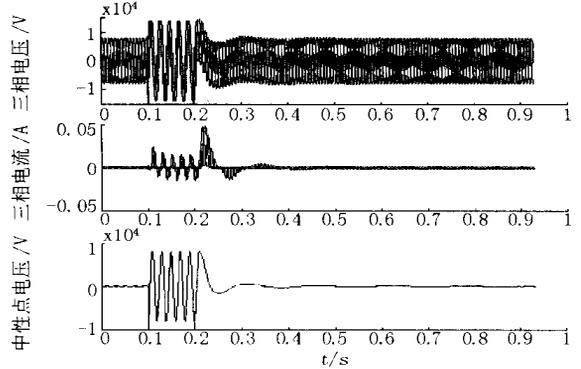


图8 PT 一次侧经电阻接地时波形

Fig. 8 A resistor linked from PT to GND

故障发生的时刻和恢复的时刻均对谐振的震荡幅值有一定的影响,PT 铁损对铁磁谐振有影响,一般来说此值 (R_m) 越大,越有可能激发谐振。

在各种消谐措施中,每种方法对不同性质的谐振有不同的效果,在实际中应该根据具体情况结合仿真分析选取适当的消谐措施,必要时也可以联合使用。

参考文献:

[1] 解广润(XIE Guang run). 电力系统过电压(Over-voltage in Power System)[M]. 武汉:武汉水利电力出版社(Wuhan: Wuhan Hydraulic and Electric Power Press),1985.
 [2] 张玲,郝春娟(ZHANG Ling, HAO Chunjuan). 电压互感器铁磁谐振过电压及防止(Ferroresonance Over-voltage in Power System and Its Prevention)[J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment),2000,20(3):29-31.

(下转第 35 页 continued on page 35)

- Proc 1998 International Symposium on Power-line Communications and its Applications. Tokyo (Japan) : 1998.
- [3] Nguimbis J, JIANG Xia, CHENG Shirjie. Noise Characteristics Investigation and Utilization in Low Voltage Power-line Communication[A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore :2000.
- [4] Liu D, Flint E, Gaucher B, et al. Wide Band AC Power Line Characterization[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 1999, 45(4) : 1087-1097.
- [5] Ahmad R S, Bahai, Burton R S. Multicarrier Digital Communications Theory and Applications of OFDM[M]. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 1999.
- [6] Jiang X, Nguimbis J, Cheng SJ, et al. A Novel Scheme for Low Voltage Power-line Communication Signal Processing[J]. ELSEVIER Electrical Power & Energy Systems, 2003, 25 : 269-274.
- [7] Boashash B. Time Frequency Signal Analysis Methods and Applications[M]. Australia: Longman Cheshire, 1992. 3-39.
- [8] Cohen L. Time-frequency Distribution[J]. Review Proceedings of IEEE, 1989, 77(7) : 941-980.

收稿日期: 2003-08-08; 修回日期: 2003-12-19

作者简介:

熊兰(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统载波通信;

程时杰(1945-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统稳定控制、人工智能在电力系统中的应用、电力系统载波通信等方面的教学和研究工作;

Joseph Nguimbis(1965-),男,博士研究生,研究方向为电力系统载波通信。

Transmission and time-frequency analysis of the OFDM signal over the low voltage power-line

XIONGLan, CHENG Shirjie, Joseph Nguimbis

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A model and a complete design methodology of OFDM transmitter for power-line communication are proposed. Some experimental measurements have been performed in residential environments to find proper physical layer parameters of PLC OFDM. The Wigner-Ville time-frequency analysis in conjunction with properly selected OFDM parameters is applied to evaluate the signal dynamic range performance over the low voltage power-line network. The results indicate that PLC is a potential solution for high speed communications.

Key words: low voltage power-line carrier communication; OFDM; time-frequency analysis; wigner-ville distribution

(上接第 29 页 continued from page 29)

- [3] 卢盛和,冉龙明(LU Sheng-he, RAN Long-ming). 配电网电压互感器中性接地方式研究(A Study of Distribution Network Voltage Transformer Neutrium Grounding Method)[J]. 重庆大学学报(自然科学版)(Journal of Chongqing University, Natural Science Edition), 1998, 21(3) :94-100.
- [4] Peterson H A. Transients in Power System[Z]. 1961.
- [5] Araujo A E A, Soudack A C. Ferroresonance in Power Systems: Chaotic Behaviour[J]. IEE Proceedings-C, 1993, 140(3) :237-240.
- [6] Emin Z, AlZahawi B A T. Ferroresonance in Electromagnetic Voltage Transformers: A Study Based on Nonlinear Dynamics[J]. IEE Proc—Gener Trans and Distrib, 1997, 144(4) :383-387.

收稿日期: 2003-10-14; 修回日期: 2003-10-27

作者简介:

杜志叶(1974-),男,工程师,硕士研究生,主要从事电力系统过电压及电磁兼容方面的研究;

阮江军(1968-),男,教授,博士生导师,主要从事电磁场数值计算及电磁兼容方面的研究;

王伟刚(1978-),男,在读硕士研究生,主要从事电力系统电磁兼容方面的研究。

Improvements on simulation model of ferroresonance

DU Zhi-ye, RUAN Jiang-jun, WANG Wei-gang

(College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In the neutral point non-earthed complicated power system, ferroresonance overvoltage caused by single-phase earthed fault happens frequently. This paper employs MATLAB-based simulation to achieve digital calculation and simulation of the ferroresonance transient process due to matching of non-linear exciting inductance of PT and network to earth capacitance. Different ways about ferroresonance suppression and their effects are discussed and simulated as well.

Key words: ferroresonance; MATLAB-based simulation; resonance suppression