

基于 Matlab 的一种新型消弧线圈的仿真

贾清泉, 蔺道深, 袁石文

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 介绍了一种新型自动跟踪补偿消弧线圈, 其主体结构为带有第三绕组的自耦变压器, 通过对第二、三绕组的控制实现消弧线圈的大范围连续可调。利用 Matlab 仿真平台建立了这种消弧线圈的数字仿真模型, 对其性能进行了仿真分析。通过查表的方式来确定消弧线圈第二、三绕组的控制参数, 采用线性插值的方式建立了相应的表格。综合仿真进一步验证了这种消弧线圈具有大范围连续可调、谐波含量小、不含有机运动部件, 免除了因机械运动而造成的故障、噪音等诸多优点。

关键词: 谐振接地; 消弧线圈; 仿真; Matlab; 连续可调

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)16-0049-05

0 引言

我国中压电力网中性点接地方式以中性点不接地、经消弧线圈接地为主流。随着供电负荷的逐年增加, 电网对地电容电流不断增大, 越来越多的中性点不接地电网改为消弧线圈接地方式。新式消弧线圈以自动跟踪补偿为主, 主要有调匝式、偏磁式^[1]、变压器二次侧投切电容式^[2]和高短路阻抗变压器二次侧相控式^[3]等。在实际应用中, 这些消弧线圈各有自身的缺陷。调匝式多以有载调压的形式进行调节, 含有机运动部件, 响应速度慢, 不能连续调节; 偏磁式和高短路阻抗变压器二次侧相控式谐波含量大、调节范围小; 变压器二次侧投切电容式则不能实现连续可调。作者在文献[4]中提出一种新型自动跟踪补偿式消弧线圈, 具有响应速度快、调节范围大且连续可调、谐波小、伏安特性线性度好等诸多优点。本文利用 Matlab 仿真平台建立了这种消弧线圈的数字仿真模型, 进行了仿真分析。仿真进一步验证了文献[4]中理论分析的正确性、结构设计的合理性及新型消弧线圈的诸多优点, 对新型消弧线圈的研发提供了有力的依据。

1 新型消弧线圈介绍

1.1 结构及原理

新型消弧线圈的主体结构为带有第三绕组的自耦变压器, 如图 1 所示。

消弧线圈的一、三绕组之间存在高漏抗, 一次绕组和公共绕组之间的漏抗非常小。一次绕组作为主电抗接在系统中性点和地之间。二次公共绕组接三

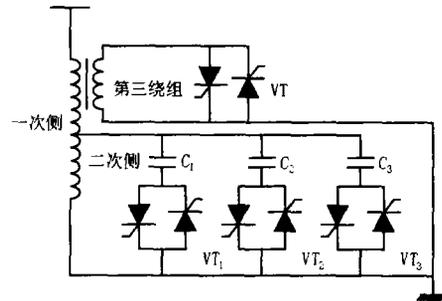


图 1 消弧线圈原理结构图

Fig 1 Schematic diagram of the arc-extinguishing reactor

组晶闸管投切的电容器 (TSC) C_1 、 C_2 、 C_3 , 其电容比值为 1 2 4, 由三组电容器可以组合得到 8 个电容组别 $C_0 \sim C_7$ 。第三绕组接反并联晶闸管, 对第三绕组的控制相当于晶闸管控制电抗器 (TCR)。通过调节公共绕组上 TSC 的投入组别实现消弧线圈等效电抗的阶跃调节, 配合调节第三绕组上 TCR 的触发角实现消弧线圈连续调节, 从而实现了消弧线圈等效电抗的大范围连续调节。消弧线圈的等效电路图如图 2。

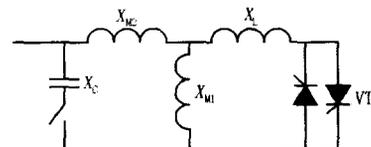


图 2 消弧线圈等效电路图

Fig 2 Equivalent circuit of the AER

1.2 建立双一维表

双一维表相当于两个一维表。由于消弧线圈的有功损耗及各绕组漏抗的影响, 很难用公式准确求出 TCR 触发角、投切电容组别与等效一次电抗三者

之间的关系,可行的办法是建立三者之间的双一维表。要得到某个等效的电抗值,可以通过查双一维表获得 TCR 触发角及投切电容的组别。

2 系统建模

本文仿真采用 Matlab/Simulink 仿真软件^[5], Matlab提供的电力系统工具箱(Power System Blockset)中有非常成熟的各种电气元件的数学模型及接口,可以利用各种元件很方便地建立自己所需要的仿真对象。

2.1 消弧线圈模型

Matlab中三绕组变压器模型不能满足文献[1]中提到的带有第三绕组的自耦变压器的电磁关系,根据图2消弧线圈等效电路图,采用两个线性双绕组变压器模型模拟文献[1]中提到的带有第三绕组的自变压器模型,如图3所示消弧线圈模型转换。变压器1为高短路阻抗变压器,二次侧接反并联晶闸管,相当于TCR电路。变压器2为普通电力变压器,二次侧接三组晶闸管投切的电容器(TSC)。

图4为Matlab中线性双绕组变压器的模型。

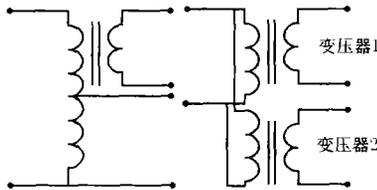


图3 变压器模型转换

Fig 3 Conversion of transformer model

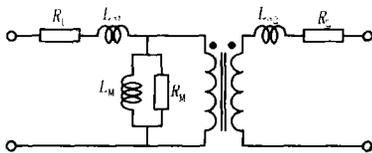


图4 变压器模型

Fig 4 Transformer model

2.2 其他相关元件模型

系统电源模型为三相对称电压源,各序阻抗忽略不计;线路模型用串联阻抗和并联电容、电阻来模拟。单相接地故障模型如图5,在接地点处通过Breaker模块和接地电阻R串联接地,接地发生时刻通过Breaker模块内部参数Switching times来设定。

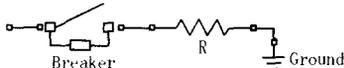


图5 单相接地故障模型

Fig 5 Single phase ground fault model

2.3 系统集成后的模型

本文采用的谐振接地系统在 Matlab仿真平台下的模型如图6所示。

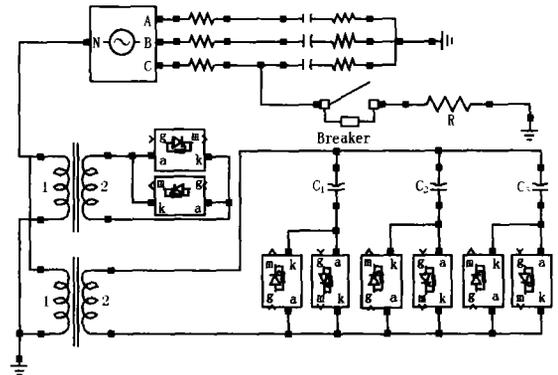


图6 谐振接地系统模型

Fig 6 Model of resonant earthed system

3 仿真实例

3.1 各元件参数确定

根据文献[1]中相关公式求得各元件的参数。

消弧线圈容量: 315 kVA / 6 kV / 0.4 kV / 0.4 kV;
电流调节范围: 10 ~ 50 A。

变压器1参数:

315 kVA / 6 kV / 0.4 kV;

$L_1 = 0.2769 \text{ H}, R_1 = 3$

$L_2 = 0.2706 \text{ H}, R_2 = 3$

$L_M = 0.1292 \text{ H}, R_M = 1 \times 10^5$

变压器2参数:

315 kVA / 6 kV / 0.4 kV;

$L_1 = 0.0127 \text{ H}, R_1 = 3$

$L_2 = 0.0127 \text{ H}, R_2 = 3$

$L_M = 1 \times 10^5 \text{ H}, R_M = 1 \times 10^5$

三组电容器参数:

$C_1 = 5.4 \times 10^{-4} \text{ F}, C_2 = 1.08 \times 10^{-3} \text{ F},$

$C_3 = 2.16 \times 10^{-3} \text{ F}$

3.2 仿真分析

按照以上数据来设置仿真参数,依次投入8个电容组别,在每个电容组别下,TCR处于完全投入和完全切除两种状态,得到一次侧电流如表1所示。

表1 各电容组别对应的电流调节范围

Tab 1 Current adjustment range corresponding to each capacitor bank

电容组别	0	1	2	3	4	5	6	7
I_{min} / A	45.0	40.1	35.0	30.2	25.2	20.2	15.1	10.1
I_{max} / A	50.1	45.2	40.3	35.3	30.3	25.3	20.2	15.1

由表 1可知,消弧线圈的电流实现了等间隔阶跃调节,每级电流差为 5A;全部切除 TSC,完全投入 TCR时,得到一次侧电流为 50.1A;全部投入 TSC而完全切除 TCR时,得到一次侧电流为 10.1A。符合电流调节范围上下限设计的要求。依次投入 8个电容组别,同时调节 TCR的触发角,得到一次侧电流如图 7所示,实现了消弧线圈一次侧电流 10~50A范围内的连续调节。

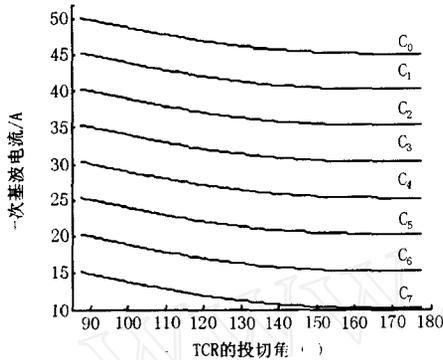


图 7 消弧线圈调节特性曲线

Fig 7 Regulating characteristics of the arc-extinguishing reactor

3.3 双一维表的建立

3.3.1 仿真中双一维表的建立

双一维表中用到的一维查表模块如图 8所示。一维查表有两个内置参数,Vector of input values中嵌入输入值对应的向量,Vector of output values中嵌入输出值对应的向量。使用嵌入的两个向量对输入值进行插值计算得到输出值。插值的方式有很多,本仿真采用线性插值。

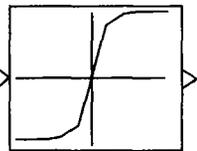


图 8 一维查表模块

Fig 8 Look-up module in Matlab

现在分析投入电容组别为 C_0 时双一维表的建立。消弧线圈加额定电压 6 kV,公共绕组上的三组电容全部切除,TCR的触发角从 $75^\circ \sim 179^\circ$ 变化,仿真得到一组一次基波电流。由图 7可以看出,TCR触发角范围在 $86^\circ \sim 175^\circ$ 之间,触发角和电流为非线性关系。采用 Matlab中的插值函数 interp1进行线性插值,可以得到等间隔变化的电流对应的 TCR触发角,本实例采用了 10间隔变化的电流点,电流对应的 TCR触发角如表 2所示,由表 2可以得到等

间隔变化电抗对应的 TCR触发角。将电抗向量嵌入到 Look-up table模块内置参数 Vector of input values中,将 TCR触发角向量嵌入到 Vector of output values,双一维表中的一个表格建立完成。对于投入电容组别的确定由双一维表中的另一个表格来完成,要表达的关系为:某个电抗范围对应一个电容组别,本实例中电抗范围 $120 \sim 33.3$ 对应电容组别为 C_0 ,至此双一维表的两个表格建立完成。采用同样的方法来建立其他 7个电容组别的双一维表,整理得到整个电抗调节范围内的双一维表。要得到某个电抗值对应的电容组别和 TCR触发角,如图 9所示,将此电抗值输入双一维表,双一维表的一个输出端输出 TCR的触发角,另一个输出端输出需投入的电容组别。

表 2 投入电容组别为 C_0 时电抗与触发角的关系

Tab 2 Relationship between reactance and TCR fire angle when C_0 on

电流 /A	触发角 / (°)
50	86
49.5	90.17
49	95.02
48.5	99.87
48	104.9
47.5	110.1
47	115.8
46.5	122
46	129.4
45.5	139.3
45	179

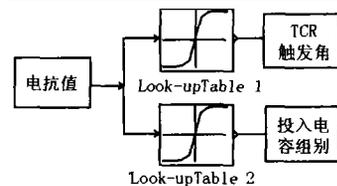


图 9 由电抗值输出触发角和电容组别的示意图

Fig 9 Schematic diagram of reactance TCR fire angle and capacitor bank on

3.3.2 实际系统中双一维表的实现^[6]

对于实际系统,可以通过试验,在消弧线圈额定电压下,按照前面的算法,画出投切电容组别,TCR触发角与等效一次电抗三者之间的拟合曲线,由此可以根据试验结果来确定 TCR触发角、投切电容组别与等效一次电抗三者之间的关系。只要消弧线圈系统不发生变化,这条拟合曲线就不会发生变化。这个拟合过程在消弧线圈安装到现场之前,可由控制器系统的初始化程序自动完成。

3.4 系统综合仿真

如图 10所示系统模型示意图。

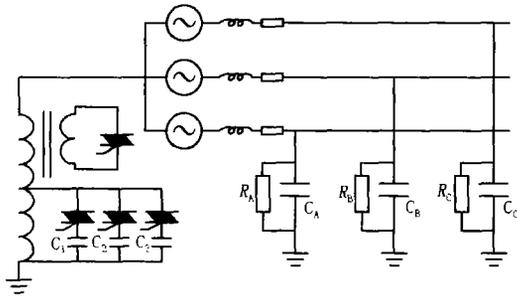


图 10 系统模型示意图

Fig 10 Schematic diagram of system model

系统电源 $U_e = 10 \text{ kV}$, 各序阻抗忽略不计; 线路参数如下:

$$R_A = 2.7034 \times 10^4, \quad X_{CA} = 540$$

$$R_B = 2.5985 \times 10^4, \quad X_{CB} = 530$$

$$R_C = 2.4996 \times 10^4, \quad X_{CC} = 520$$

由以上参数可以计算得到电网的零序容抗 $X_C = 176.6$, 当电网发生单相接地时, 调整消弧线圈电抗 $X_L = 176.6$ 。

按照以上消弧线圈及线路的参数来设置仿真, 观察发生单相接地故障时接地点的残流。如图 11 所示, 为了突出消弧线圈 TCR 的作用, 将 TCR 投入时间延时 0.06 s 运行仿真程序, 两秒钟前, 系统处于正常运行状态; 两秒钟时, 发生单相接地故障, 将 $X_L = 176.6$ 输入到双一维表, 双一维表输出电容组别为 C_3 , 即需要投入的电容为 C_1 和 C_2 , TCR 触发角为 95° 立即投入 C_1 和 C_2 , 图中“投入 TCR 前”的波形为只投入 TSC 时接地点残流, 此时的故障点残流控制在 5 A 以内, 0.06 s 后 TCR 启动, 触发角为 95° , 此时残流主要由系统阻尼形成的有功分量及少量的谐波组成, 残流的基波幅值小于 1 A 。可见消弧线圈对电网电容电流的补偿效果是非常显著的。

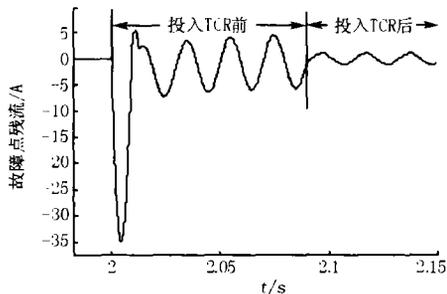
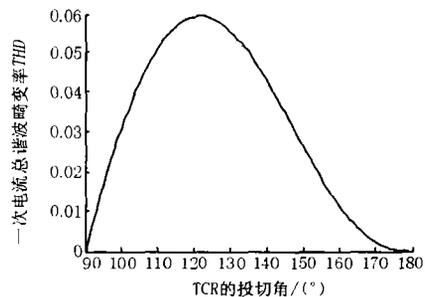


图 11 单相接地故障点残流

Fig 11 Residual current at single line to ground fault point

4 新型消弧线圈性能分析

谐波分析: 一次谐波最大的电容组别下进行谐波分析。三组电容器全部投入, 改变第三绕组上 TCR 的触发角, 一次电流的总谐波畸变率如图 12。由图 12 可知, 消弧线圈一次侧电流谐波含量很小, 谐波最大点出现在 119° , 此时的总谐波畸变率 $THD = 6\%$ 。其他电容组别对应的 THD 更小。一次侧电流的谐波含量在理想的范围内。

图 12 电容组别为 C_7 时对应的一次侧电流的 THD Fig 12 Current THD corresponding to capacitor bank C_7

伏安特性: 变压器结构消弧线圈在电流调节过程中激磁磁通基本不变, 因此具有良好的线性伏安特性。

5 结论

本文对一种新型消弧线圈建立了数字仿真模型, 进行了仿真分析。建立了双一维表, 通过查表的方式来确定消弧线圈的调整参数, 快捷、准确。对一具体实例进行了仿真分析, 仿真结果符合设计要求, 进一步验证了文献 [4] 中理论分析的正确性、结构设计的合理性及新型消弧线圈的诸多优点。新型消弧线圈具有良好的线性伏安特性, 调节范围大且连续可调, 谐波含量小, 无机械运动部件、噪音小等优点。新型消弧线圈正在研发中, 仿真得到的诸多优点有待在样机中进一步验证。

参考文献:

- [1] 蔡旭, 刘勇, 胡春强, 等. 新型偏磁式谐振接地与保护 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 44-49.
CAI Xu, LIU Yong, HU Chun-qiang, et al. New Resonance Earth System with Magnetic Bias and Its Protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 44-49.
- [2] 徐玉琴, 陈志业, 李鹏. 晶闸管投切电容式消弧线圈的设计与应用研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 38-41.
XU Yu-qin, CHEN Zhi-ye, LI Peng. Design and Appli-

- ation Research on Arc Suppression Coil with Thyristor Series Capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (13): 38-41.
- [3] 龙小平,叶一麟. 连续可调消弧线圈 [J]. 电网技术, 1997, 21 (2): 53-55.
LONG Xiao-ping, YE Yi-lin. A Continuously Adjustable Arc Suppression Coil [J]. Power System Technology, 1997, 21 (2): 53-55.
- [4] JA Qing-quan, WANG Ning, LN Dao-shen, et al. A Thyristor Controlled Neutral Grounding Reactor for Medium Voltage Power Networks[A]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, IEEE/PES Asia and Pacific: 2005. 1-4.
- [5] 吴天明,谢小竹,彭彬. MATLAB电力系统设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
WU Tian-ming, XIE Xiao-zhu, PENG Bin. Matlab Power System Design and Analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.
- [6] 胡朝晖,张秀彬,曾国辉,等. 一种新的谐振接地系统的研制 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (5): 54-57.
HU Zhao-hui, ZHANG Xiu-bin, ZENG Guo-hui. Development of a New Resonance Grounding System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (5): 54-57.

收稿日期: 2006-04-13; 修回日期: 2006-05-19

作者简介:

贾清泉 (1970 -), 男, 博士, 副教授, 从事配电网小电流故障保护及配电网自动化的研究;

简道深 (1979 -), 男, 在读研究生, 研究方向为新型自动跟踪补偿消弧线圈。E-mail: lindao-shen2008@yahoo.com.cn

Simulation of a new structure arc-extinguishing reactor based on Matlab

JA Qing-quan, LN Dao-shen, YUAN Shi-wen

(College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A new structure arc-extinguishing reactor (AER) is introduced. Its main structure is a auto-transformer with a tertiary winding. Continuous adjustment of AER with large scale can be implemented by joint control on secondary and tertiary windings. The digital simulation model of AER is established based on Matlab/simulink and the simulation analysis based on this model is studied. The equivalent fundamental reactor of the AER can be determined by looking up tables, which are established by simulation. Integrated simulation proves further that the new structure AER has much superiority compared with existed AER such as continuous adjustment with large scale, low harmonic content, low noise and no mechanical parts and so on.

Key words: resonant earthed; arc-extinguishing reactor; simulation; Matlab; continuous adjustment

(上接第 35 页 continued from page 35)

- ZENG Lu, YANG Bei. Design of Phase Difference Testing Simulator by Virtual Correlative Method Based on Labview [J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2004, (4): 18-20.
- [3] AD734 Datasheet[R]. Analog Devices Inc, 1999.

收稿日期: 2006-02-10

作者简介:

张国志 (1966 -), 男, 工程师, 硕士研究生, 研究方向: 混沌与保密通信; E-mail: infrastructure@163.com

高金峰 (1963 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性与混沌理论的研究。

High frequency parameter measurement of the power line trap based on the correlation principle

ZHANG Guo-zhi, GAO Jin-feng

(School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This paper presents a new approach which can measure the frequency - impedance characteristic of the power line trap. It details the process of signal-phase-detecting by making use of a pair of orthogonal signals. A group of banauasic formulas for calculating the impedance and resistive component is summarized to avoid the fussy triangle function calculation. A hardware implementation scheme of this measuring system is put forward as well. Simulation of a kind of wideband line trap with typical parameters is performed. The result of the simulation demonstrates the validity of the method. The testing system established with this method possesses the advantage of higher accuracy, high speed, being easy to realize and low cost.

Key words: high frequency power line trap; correlation principle; phase detector; frequency synthesizer; VCO; DSP