

基于正态分布随机因素的变压器和应涌流概率仿真研究

罗宗杰

(广东电网湛江供电局, 广东 湛江 524001)

摘要: 针对目前缺少随机因素对变压器和应涌流影响的研究, 提出基于蒙特卡洛法来模拟变压器和应涌流的随机因素变化的特性。通过应用 PSCAD 软件的多通道运行组件来模拟不同的随机因素, 同时通过改变随机因素的状态序列模式, 建立关于变压器和应涌流的统计合闸开关模型。该模型综合考虑了变压器剩磁、三相触头不同期性、初始合闸相位等随机因素影响, 并结合现场实例进行统计分析。仿真结果表明: 串并联式的变压器合闸时产生的和应涌流概率模式也为均匀正态随机分布。

关键词: 变压器剩磁; 和应涌流; 蒙特卡洛法; 统计分布; 合闸初始相位角

Simulation study on transformer and sympathetic inrush probability based on normal distribution random factors

LUO Zong-jie

(Zhanjiang Electric Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid, Zhanjiang 524001, China)

Abstract: For the lack of the study of impact of random factors on the transformer and sympathetic inrush, this paper uses Monte Carlo method to simulate the characteristics of random factors change of the transformer and sympathetic inrush. Multi-channel operation components of PSCAD software is applied to simulate the different random factors, and by changing the state sequence mode of random factors, statistics closing switch model of the transformer and sympathetic inrush is set up. The model considers the impact of random factors such as the residual magnetism of the transformer, the non-synchronization of three-phase contact, initial closing phase, etc and field cases are combined to do statistical analysis. Simulation results show that the sympathetic inrush probability mode generated by series and parallel transformers at closing is uniform normal random distribution.

Key words: transformer remanence; sympathetic inrush; Monte Carlo method; statistical distribution; initial closing phase angle

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0090-04

0 引言

目前关于变压器和应涌流的研究多是从其产生机理得到对应的影响因素, 或者通过其发生的特征展开深入研究, 关于这方面已经得到很多研究成果, 例如文献[1-2]认为, 空载合闸变压器产生励磁涌流中的直流分量, 通过接地回路流过运行变压器, 可使其饱和产生和应涌流, 从而认为断开中性点就会消除和应涌流的结论。文献[3-5]提到系统电阻对和应涌流的产生和衰减都有影响, 影响的大小取决于系统电阻与变压器电阻的比值。比值越大, 越容易产生和应涌流, 且涌流的衰减也越慢。文献[6]指出, 线路阻抗与系统阻抗的作用基本一致。当系统与变压器之间的线路较短、阻抗较小时, 将不利于和应涌流的产生。

以上文献分别是通过改变中性点连接情况、系

统电阻或架空线阻抗等确定因素来分析和应涌流的变化特征等, 为此, 本文另辟途径, 从影响和应涌流的随机因素出发, 参照文献[7]关于随机因素对线路操作过电压的影响, 增设考虑变压器剩磁、断路器三相触头不同期合闸时间与初始合闸相位等因素影响, 用 PSCAD 软件仿真得到对应空载合闸变压器过程中产生的和应涌流的直观波形, 同时根据多通道运行组件和状态序列模式功能, 给出断路器三相触头不同期合闸时间在服从正态分布情况下, 变压器产生的各个和应涌流值所对应的概率, 藉此分析随机因素与和应涌流的关系。

1 和应涌流模型中的随机因素

产生和应涌流大致有两种情况: 一种是 2 台变压器并联, 当其中一台变压器空载合闸时, 另一台正在运行的变压器产生和应涌流; 另一种情况是 2

台变压器串联, 当末端变压器空载合闸时, 在首端运行的变压器产生和应涌流。

变压器并联和应涌流模型: 当 2 台双绕组变压器并联连接, 其中变压器 T_1 正常运行, 变压器 T_2 进行空载合闸操作。其电气连接如图 1 所示。

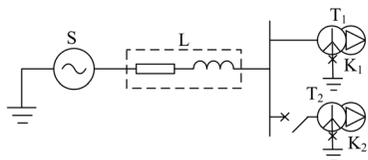


图 1 并联和应涌流仿真模型

Fig.1 Simulation model for sympathetic inrush of transformer in parallel

T_1 、 T_2 中性点均直接接地, 为方便起见, 假设 T_1 空载运行, T_2 空载合闸来说明和应涌流的产生过程, 显然, 在 T_2 和应涌流产生之前有 $i_2=0$, $i_s=i_1$ 。 T_1 投入后, T_2 的磁通满足式 (1)。

$$\frac{d\Phi_2}{dt} = u_s - L_s \frac{di_1}{dt} - r_s i_1 \quad (1)$$

对变压器 T_1 、 T_2 电压方程 1 个周期定积分可得到两台变压器 1 个周期磁链变化量。

$$\Phi_2(2\pi) - \Phi_2(0) = \int_0^{2\pi} u_s(\theta) d\theta - r_s \int_0^{2\pi} i_1(\theta) d\theta - L_s [i_1(2\pi) - i_1(0)] \quad (2)$$

$$\Phi_1(2\pi) - \Phi_1(0) = \int_0^{2\pi} u_s(\theta) d\theta - r_s \int_0^{2\pi} i_1(\theta) d\theta - L_s [i_1(2\pi) - i_1(0)] \quad (3)$$

定义 $\Delta\Phi_{1,p} = -2\pi r_{1,f} i_{1,f}$ 为偏磁增量, $i_{1,f}$ 为 i_1 的

非周期分量。并得, $\Delta\Phi_{2,p} = \frac{r_s}{r_s + r_{1,\sigma}} \Delta\Phi_{1,p}$, 可见,

T_1 的涌流在 T_2 中产生了偏磁。

要定量来得到 $\Delta\Phi_{1,p}$ 随时间变化的解析解很困难, 但是通过文献[8], 可知 $\Delta\Phi_{1,p}$ 与回路阻抗角、涌流间断角、初始合闸相位角和 T_1 的剩磁等有关。

文献[9]也提到, T_2 中不断积累由 T_1 提供的负向偏磁, 即每个周期磁链都在向负方向偏移。其结果是使得 T_2 磁链 Φ_2 中的非周期分量反方向增加, 并逐渐达到饱和点。经过一段时间之后, T_2 进入饱和区, 产生涌流, 即和应涌流。由于变压器 T_2 磁链是在负方向进入饱和, 所以 T_2 中产生的和应涌流与 T_1 中的励磁涌流 i_1 方向相反, 是负向的。

变压器串联和应涌流模型和并联和应涌流模型原理一样, 这里就不再赘述。

从以上和应涌流的产生过程分析可得到, 和应涌流的产生不仅与具体的系统参数设置有关, 还和

开关的初始合闸相位角, 变压器的剩磁比例等随机因素有密切关系, 这些随机因素不能通过具体的数学表达式列出, 只能通过建立概率模型, 在确定某种参数分布状态下研究其对和应涌流产生的影响。

2 系统建模

蒙特卡洛模拟法的概念: 当系统中各个单元的可靠性特征量已知, 但系统的可靠性过于复杂, 难以建立可靠性预计的精确数学模型或模型太复杂而不便应用则可用随机模拟法近似计算出系统可靠性的预计值。随着模拟次数的增多, 其预计精度也逐渐增高^[10]。蒙特卡洛仿真法的优点在于能反映电力系统的随机特性。使用该方法几乎不受系统复杂性的限制, 同时也能给出每个随机因子的概率分布情况, 使复杂问题清晰化。

由于断路器合闸时间是一个随机性很大的变量, 必须通过一定的时间观测才能了解它的平均状况, 而合闸时间可看成是三相平均合闸时间与随机时间之和, 由中心极限定理可认为实际的合闸时间是一个服从正态分布的随机变量。

鉴于绝缘介质的电气强度以及施加到断路器运动触头间的两端电压是时间的变量, 因此开关不是在任何电气角度下都能合闸的。对于建立的断路器三相触头不同期合闸概率模型, 宜采用平均时间 t_0 (一般取 30 ms) 以及各相触头的实际合闸时间 t_i 对 t_0 的偏离 Δt_i 来表示。即:

$$t_i = t_0 + \Delta t_i \quad (i = a, b, c) \quad (4)$$

式中: t_0 由断路器的性能参数决定, Δt_i 在 $\pm\Delta t_m$ 范围内按一定的概率分布规律随机变化, Δt_m 由断路器的最大合闸不同期时间决定。

若认为 Δt_i 在区间 $(-\Delta t_m, \Delta t_m)$ 内服从截断正态分布, 则其概率密度函数为式 (15)。

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} & -2\sigma \leq t \leq 2\sigma \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\sigma = \frac{1}{2} \Delta t_m$ 。为了考虑初始合闸相位的随机性, 引入参数 t_D , 表征初始合闸相位, 其取值在 $0 \sim 20$ ms 范围内 (50 Hz 系统), 是一均匀分布的随机变量。

综上所述: 考虑三相触头合闸的不同期性及初始合闸相位等随机因素, 可以用 t_D , t_a , t_b , t_c 4 个随机变量构成断路器合闸的概率模型。

运用蒙特卡洛法进行合闸和应涌流统计计算的

步骤如下:

(1) 给定受控直流电流源下模拟变压器剩磁情况;

(2) 对 t_D , t_a , t_b , t_c 4 个随机变量在给定的范围内按其分布规律进行随机抽样, 每次抽样由 4 个值组成一组合闸时间的抽样序列;

(3) 对该次抽样序列进行模拟计算或试验。取三相电流幅值最大值作为该次抽样试验的和应涌流值;

(4) 重复以上步骤 n 次($n \geq 200$), 得到 n 次抽样计算结果;

(5) 对 n 次抽样试验结果, 按式 (6) ~ (9) 计算得到样本均值 i_{mean} 、样本标准差 S 、最大涌流值 i_{max} 、最小涌流值 i_{min} :

$$i_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i_k \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (i_k - i_{mean})^2} \quad (7)$$

$$i_{max} = \max(i_k) \quad k=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$i_{min} = \min(i_k) \quad k=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

由样本均值和标准差推断 2% 过电流值。合空载变压器和应涌流电流值近似服从正态分布 $N(i_{mean}, S^2)$, 因此定义可以推断 2% 统计过电流值为式 (10):

$$i_{2\%} = i_{mean} + 2.05 \times S \quad (10)$$

在本文建立的模型中, 随机变量 t_D 作为 Multiple Run 组件的输出变量 V_1 , 其取值范围在 0 ~ 20 ms (50 Hz 系统)。由 Multiple Run 组件按照设置的随机参数分布特性生成变量 I_1 。Ch.1 是 Multiple Run 组件的记录通道, 记录的是对应该次抽样计算生成的三相最大涌流值 $MAXI$ 和对应的 t_D 值。

输出计算结果中包括每一次计算的随机变量 t_D 和对应的和应涌流值, 所有样本空间的过电压最大值、最小值、平均值、标准差、2% 统计涌流值等。

运用 PSCAD 的自定义建模功能, 可以建立考虑断路器三相合闸不同期性的统计合闸开关模型 (见图 2)。

该模型实现如下功能:

- (1) 接收随机变量 t_D 值, 并按照正态分布分别生成三相合闸不同期时间 Δt_a 、 Δt_b 、 Δt_c ;
- (2) 计算绝缘介质恢复强度;
- (3) 计算开关触头两端的电压差;
- (4) 分析计算触头是否发生预击穿;
- (5) 计算各相触头闭合时间;
- (6) 分别输出三相触头的状态信号。

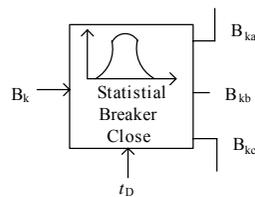


图 2 统计合闸开关模型

Fig.2 Statistics closing switch model

此外, 变压器和应涌流的幅值和波形还与电网结构及其参数、断路器性能、系统接线、运行操作方式及限压设备的性能等因素有关, 具有随机性。对和应涌流的统计方法可以采用 Case-peak 法处理^[11], 即认为三相数据相关, 取三相电流幅值最大值作为该次抽样计算的合闸涌流值。即:

$$MAXI = \max(|i_a|, |i_b|, |i_c|) \quad (11)$$

电源用 PSCAD 提供的带励磁装置的发电机模型组件。线路模型可根据需要选取 Π 模型。变压器模型采用 PSCAD 库中的 UMEC 标准模型, 并考虑变压器铁芯饱和特性和给定饱和特性曲线、变压器剩磁情况。

3 应用实例

制定广州某电厂电网黑启动方案^[12]的过程中, 沿黑启动路径(110 kV)对合空载线路过电压、合空载变压器过电压、合空载变压器和应涌流等进行了详细仿真计算。这里仅介绍部分合空载变压器和应涌流的仿真计算结果。

使用多通道运行组件的记录通道, 记录升压变低压侧电流 $MAXI10$ 与对应的 t_D 值。对合 110 kV 空载变压器的 200 次统计仿真结果如下(电流单位是 kA, 时间单位是 ms)。

和应涌流 $IX10$:

$$i_{max}=2.144 \quad t_D=13.56 \quad i_{2\%}=2.258$$

变低涌流概率模式符合均匀正态随机分布。

和应涌流引起该电厂机组跳闸的概率性分析:

对大量仿真曲线进行分析后表明, 引起该电厂机组跳闸更重要的因素取决于变低电流稳态衰减值; 合外部主变后, 该电厂升压变变低电流峰值最大值若小于 1 000 A, 则其稳态电流峰值一般在 800 A 以下, 这样便不会发生明显涌流。

对 200 次统计合闸仿真计算结果分析结论如表 1 所示。可见, 200 次随机统计合闸仿真中该电厂 #2 主变变低电流峰值在 1 000 A 以下出现的概率之和在 20% 左右, 而该主变变低电流峰值的最大值在

1 000 A 以上有 80% 的概率。可见由和应涌流引起的机组过电流跳闸概率相当大。

表 1 变低电流与对应概率关系

Tab.1 The relationship between current of low-voltage and the corresponding probability

变低电流/kA	概率/%
0.29	3.33
0.52	1.67
0.75	5.00
0.98	10.83
1.21	12.50
1.43	18.33
1.66	17.50
1.89	13.33
2.12	8.33
2.35	9.17

4 结论

本文应用 PSCAD 的多通道运行组件和状态序列模式功能, 结合蒙特卡洛法, 开发了统计合闸开关模型, 计算合空载变压器的和应涌流。由于实际中变压器的差动保护关于和应涌流这一块整定相当困难, 现在借助仿真, 我们可以得到试验变压器出现涌流对应值的概率, 这样对于我们继保人员对保护的整定有借鉴意义。

参考文献

- [1] 王晶, 余涛, 束洪春, 等. EMTP 在变压器励磁电流仿真计算中的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 22-25.
WANG Jing, YU Tao, SHU Hong-chun, et al. Simulation of excitation current of transformer using Electro-magnetic Transient Program (EMTP)[J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 22-25.
- [2] 杨晓薇, 郑涛, 许云雅, 等. 一种鉴别变压器励磁涌流和内部故障的新方法[J]. 继电器, 2007, 35(2): 18-20.
YANG Xiao-wei, ZHENG Tao, XU Yun-ya, et al. A new technique to discriminate inrush current from internal fault of power transformer[J]. Relay, 2007, 35(2): 18-20.
- [3] 卢雪峰, 王增平, 徐岩, 等. 基于波形间断角原理识别变压器励磁涌流的新方法[J]. 继电器, 2007, 35(S1): 1-4.
LU Xue-feng, WANG Zeng-ping, XU Yan, et al. A new method to identify inrush current based on the principle of dead angles[J]. Relay, 2007, 35(S1): 1-4.
- [4] 张和生, 王立文. 变压器空载合闸瞬态过程的仿真及其在计算机测试系统中的应用[J]. 变压器, 1997, 12(12): 9-11.
ZHANG He-sheng, WANG Li-wen. Simulation of transient process in switching on transformer when

- no-loaded and its application in computer test system[J]. Transformer, 1997, 12(12): 9-11.
- [5] 陈剑, 李炜. 变压器励磁涌流的特性分析及应用[J]. 湖南电力, 2005 (4): 7-8, 13.
CHEN Jian, LI Wei. Characteristic of transformer magnetizing inrush current and its practical application[J]. Hunan Electric Power, 2005 (4): 7-8, 13.
- [6] 肖伟平, 黄绍平. 考虑磁滞现象的变压器饱和特性仿真分析[J]. 高压电器, 2005, 41(4): 11-13.
XIAO Wei-ping, HUANG Shao-ping. Simulation analysis on saturation characteristics of transformer considering hysteresis[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 11-13.
- [7] 夏成军, 龚建平, 张尧, 等. 广州城区电网黑启动方案的分析计算[J]. 继电器, 2006, 34(16): 44-48.
XIA Cheng-jun, GONG Jian-ping, ZHANG Yao, et al. Analysis and simulation on black start scheme for Guangzhou metropolitan power grid[J]. Relay, 2006, 34(16): 44-48.
- [8] 束洪春, 贺勋, 李立新. 变压器和应涌流分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10): 22-24.
SHU Hong-chun, HE Xun, LI Li-xin. Research on sympathetic inrush in operating transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 22-24.
- [9] 毕大强, 王祥珩, 李德佳, 等. 变压器和应涌流的理论探讨[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 15-18.
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, LI De-jia, et al. Theory analysis of the sympathetic inrush in operating transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 15-18.
- [10] 余高旺, 毕大强, 往志广, 等. 变压器和应涌流现象及实例分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 11-13.
YU Gao-wang, BI Da-qiang, WANG Zhi-guang, et al. Phenomenon of sympathetic inrush and analysis of an example[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 11-13.
- [11] 田成凤, 邓连波. 变压器空载合闸引起的励磁涌流及和应涌流分析[J]. 天津电力技术, 2007 (2): 28-31.
- [12] 贺勋, 束洪春, 李立新. 变压器和应涌流现象分析及应对措施[J]. 电气应用, 2006, 25 (4): 43-46, 96.
HE Xun, SHU Hong-chun, LI Li-xin. Analysis and countermeasure of sympathetic inrush in operating transformers[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25(4): 43-46, 96.

收稿日期: 2010-03-20; 修回日期: 2010-10-12

作者简介:

罗宗杰(1984-), 男, 助理工程师, 主要从事电力系统继电保护和电网运行控制工作。E-mail:scutluozongjie@163.com