

电机操作过电压在线安全监测的新方法理论分析

高瓴, 刘念, 马月姣, 侯宝生

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 在电力系统中普遍采用真空断路器来实现配电网无油化,但是真空断路器开合时易产生的操作过电压对电动机的绝缘造成极大的危害。在分析操作过电压的产生原因及性质后,提出了应用有限元法分析操作过电压对电机的影响,监测定子槽中绝缘介质的场强状况,以此对电机内部绝缘状态实施在线安全预测分析。

关键词: 操作过电压; 在线安全预测; 有限元方法

中图分类号: TM307 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)18-0043-03

0 引言

在电力系统及其它生产领域,大部分电机的损坏都是由于绝缘被击穿引起的。真空断路器具有优良的灭弧性能、极高的电气恢复强度、优异的频繁操作特性、无污染、无火灾、无爆炸性、免维修、体积小等特点,已成为配电网开关无油化的主要设备。由于真空断路器灭弧能力极强,开合时引起的过电压易造成高压电动机绝缘击穿,引起电机设备损坏,甚至对整个系统造成巨大的损失。所以有必要对真空断路器操作过电压产生的原因和特性以及高压电动机受到操作过电压冲击时内部的绝缘状况进行研究分析。因为现有的研究多以离线仿真计算为主,而操作过电压是快速暂态过电压,所以有必要对电机进行在线监测,在线监测的基本要求就是分析计算工作的速度要快,尽量满足实时性的要求。现在计算机硬件、软件的飞速发展,已经可以满足这样的要求。同时根据绝缘工作状况,预测有可能发生绝缘的事故点的电机及其可能的故障点,为检修电机提供了方便。

1 真空断路器操作过电压类型及特点

真空断路器断开高压电动机产生的操作过电压有3种类型:截流过电压、多次重燃过电压和三相同期断开过电压。

1) 由于真空断路器具有很强的灭弧能力,可以频繁切换大电流。当断路器断开后,由于电感中的电流不能突变,储存在电机漏抗中的磁场能量 $L I_0^2 / 2$ 不能进行有效释放,只能向负荷侧的相对地及相间电容充电来完成能量的转换。因电容值一般较小,负荷侧相对地及相间将会出现较高幅值的过电压。截流过电压主要取决于真空断路器的截流水平,真空断路器的截流水平越高,截流过电压也越

高。试验数据表明,最大过电压值可达到电机额定电压的4~7倍,这将对电机绝缘造成极大的威胁。

2) 真空开关在断开三相感性负载(如高压电动机)时,真空开关的各极触头的分离不会完全相同,总是有先有后。如果真空开关其中某一极触头正好在某相电流过零前分离,电流即过零,电弧则首先在该相熄灭。在首先断开的那极触头上就会发生电压恢复过程。由于真空断路器触头间隙很小(6 kV等级10 mm左右),介质恢复强度不高,在较高的恢复电压作用下,间隙有可能被击穿。因回路参数的影响,触头击穿重燃时将流过高频电流。如果高频电流的幅值大于工频电流瞬时值时,就会出现高频电流零点,这又使电弧熄灭而断开电流。此刻负荷侧的电感和电容发生电磁振荡,产生较高电压。这一电压又使触头间隙再次击穿,使电压上升。只有当介质恢复强度超过电压恢复速度,重燃不复产生,电压不再升高。多次重燃的结果,使得负载上的电压不断升高,从而产生较高的过电压。

3) 断开三相电动机时,当第一相的电流通过工频零点断开后,第二相和第三相即变成单相电路,电流幅值降低到原幅值的 $\sqrt{3}/2$ 。断路器若无截流时,在第一相断开后经过 90° ,第二、三相电流将同时过零断开。三相同步断开的物理过程是:电动机一般均通过三相电缆与电源连接,在电缆的三个芯线之间有互感和电容。若第一相断开后又发生重燃,由该相重燃引起的暂态高频电流通过相间互感和电容耦合到第二、三相上,并在第二、三相上与原有工频电流叠加形成高频电流过零。由于真空断路器的灭弧能力很强,使第二、三相的电流强制截断。此两相被截断的工频电流往往比首相截流值大,十分类似于较大水平的截流现象,从而产生比首相断开截流过电压更高的操作过电压。

2 操作过电压采样分析

通过以上对高压电动机的操作过电压来源及性质的分析,可知操作过电压具有幅值大、上升速度快、变化频率高的特点,所以不能通过一般的方法对操作过电压采样,本文是通过电容分压器来实现的。具体的方法是:在需要测试的定子槽(一般是选取#1槽)端部的绝缘层上粘贴一个小薄锡片,连接细导线穿出电机外壳,再通过一个大电容C接地。当操作过电压冲击到电机内部定子时,定子和薄锡片就以定子槽的绝缘材料为绝缘介质形成一个电容C₁,同时C与对C₁操作过电压进行分压。电容C₁ = $\frac{S}{d}$,其中为定子槽绝缘介质的介电常数,S为薄锡片的面积,d为定子槽绝缘介质的厚度。通常可以选择C ≫ C₁,这样通过C上的电压就比较小,方便采样。同时电容分压器还具有无波形误差、响应特性好、体积小、损耗小、制作简单等优点。由于电机周围一般都有其它电磁信号,为了避免干扰,采用光纤作为传输媒质。因为光纤不受外界电磁干扰和噪声的影响,能在长距离、高速率的传输中保持低误码率,具有低损耗、安全保密性好的特点。利用光纤来传输信号,不仅避免了周围环境的电磁干扰,还起到隔离高电压的作用。分压后的过电压信号通过滤波,由快速红外发光二极管实现E/O转换为光信号,经光纤传输通过光探测器实现O/E转换,再经单片机处理转换为电压信号。

3 有限元法的应用

有限元法是一种常用的数值解法,在网格剖分上较为灵活,能很好适应边界区域边界线和内部媒质分界线形状不规则以及场的分布变化比较大的情况。所以用于分析过电压下电机内部定子槽中绝缘介质的场强分布问题。用已经采集并且处理了的操作过电压作为定子绕组各离散电位的边值条件,计算电机定子槽内的绝缘介质中的电场分布。

高压电动机定子绕组被安装在定子铁心槽内,并用绝缘材料(环氧树脂字母等)填充。操作过电压冲击电机时,定子槽内的电磁场由达朗贝尔方程表示:

$$\begin{cases} \nabla^2 A_m - \mu \frac{\partial^2 A_m}{\partial t^2} = -\mu c \\ \nabla \cdot \mu \frac{\partial A_m}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

根据麦克斯韦方程的微分形式可以得到:rot E =

$-\frac{\partial B}{\partial t}$,定义 $B = -\text{rot } A_m$,则有:rot E - $\frac{\partial}{\partial t} \text{rot } A_m = \text{rot}(E - \frac{\partial A_m}{\partial t}) = 0$,因为任何标量函数梯度的旋度恒为零,可以认为 $E - \frac{\partial A_m}{\partial t}$ 等于一个标量函数的梯度,即: $E - \frac{\partial A_m}{\partial t} = \nabla \phi$, $E(t) = \frac{\partial A_m}{\partial t} + \nabla \phi$ 。其中: μ 为槽内介质的导磁率, ϵ 为槽内介质的介电常数, c 为电流密度, ϕ 为槽内标量电位。

由于高压电动机的定子槽结构形状和电磁过程比较复杂,本文用等参有限元法和离散暂态过程时间的方法来解决,且实际监测每个离散时刻的操作过电压,为有限元分析提供了电场的边界条件。在某 t_k 时刻,高压电动机定子槽内的电场满足以下方程(不考虑电机定子槽内绝缘介质的位移电流、槽内边界效应、线棒内集肤效应和定子铁心齿部的涡流效应)。

$$\begin{cases} \frac{\partial(\frac{\partial U_t}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\frac{\partial U_t}{\partial y})}{\partial y} = -p \\ L_1 \quad U_t|_{t=t_k} = U_0 \\ L_2 \quad \frac{\partial U_t}{\partial n}|_{t=t_k} = 0 \end{cases}$$

其中: U_t 为高压电动机定子槽内某槽在轴向某位置处沿径向槽截面1/2的电场区域, p_t 为槽内场域中积累的电荷密度, L_1 和 L_2 围成场域边界并具有时间 $t = t_k$ 瞬时的第一、第二类边界条件。从泛函分析可得知上式的对应条件的变分问题:

$$\begin{cases} F(U_t) = \iint (W(U_t) - p_t U_t) d \\ L_1 \quad U_t|_{t=t_k} = U_0 \end{cases}$$

利用有限元法对高压电动机定子槽内场域进行网格剖分,离散为M个三角形单元,每个有限单元子域为 k ,则可求得电机槽内有限单元上任意时刻的 E_t 的表达式:

$$\vec{E}_t = \nabla U_t = \nabla \left(\sum_{k=1}^6 U_{tk} \right), \text{而 } E_t = |\nabla U_t| = \sqrt{\sum_{k=1}^6 \frac{\partial U_{tk}}{\partial x}^2 + \sum_{k=1}^6 \frac{\partial U_{tk}}{\partial y}^2}$$

电机定子槽内的某槽截面绝缘介质中任意一点P上场强 E_{tp} 的表达式为:

$$E_{tp}(x, y) = \sqrt{\sum_{k=1}^6 \frac{\partial U_{tk}}{\partial x}^2 + \sum_{k=1}^6 \frac{\partial U_{tk}}{\partial y}^2} \Big|_{p(x,y)}$$

其中: U_{tk} 是根据实际采集处理后的数据, $\frac{\partial U_{tk}}{\partial x}$, $\frac{\partial U_{tk}}{\partial y}$ 是根据有限元数学模型分析计算出的。在

实际应用中,利用计算机建立数据库方便调用。

现对某一电站的电机 # 1 槽进行暂态过电压仿真,时间步长为 $50 \mu\text{s}$,有限单元数为 29,根据机端冲击电压 t_k 时的数据仿真出电机定子槽内的暂态电场实时分布情况。例如在 $t_k = 0.21 \text{ s}$ 时,槽内的上下线棒的电位分别为 35.67 kV 、 7.34 kV ,其暂态过电压和暂态电场强度的在定子槽内的分布如图 1、2 所示。

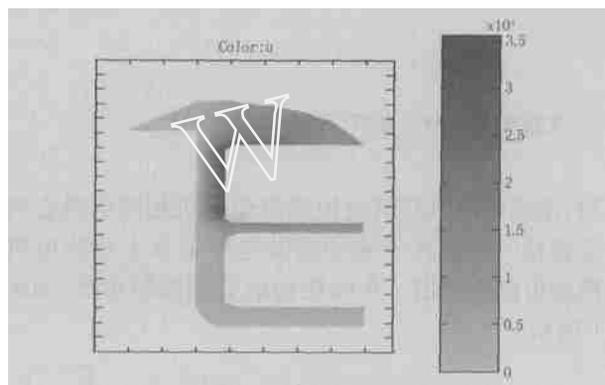


图 1 暂态过电压分布图

Fig. 1 Distribution of transient over voltage

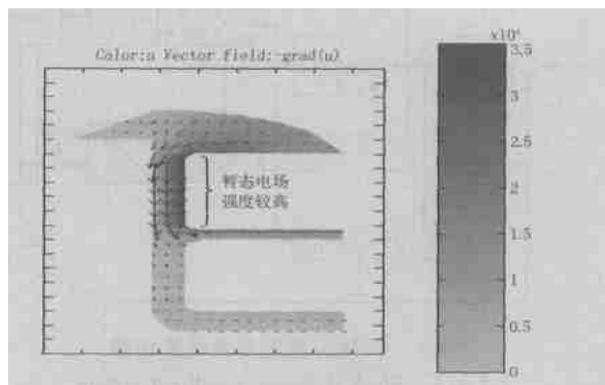


图 2 暂态电场强度分布图

Fig. 2 Distribution of transient electric-field intensity

暂态电场强度较高(大于 5000 V/mm)的单元及相应的电场强度如表 1 所示。

表 1 暂态电场强度较高的单元及场强值

Tab. 1 Units and relevant values of field intensity in the transient electric-field of high intensity

单元号	15	16	17	18
电场强度 V/mm	5 037.1	5 955.1	6 037.1	6 110.4
单元号	19	20	21	22
电场强度 V/mm	6 197.3	6 276.3	6 268.4	6 287.5

根据网格剖分图,可以知道 15~22 号单元的具体位置,此处的绝缘存在极大的隐患,应加强注意。

4 结论及展望

通过对电机操作过电压产生原因、性质等的分析,提出了应用有限元法、采用场路综合分析的计算方法,来计算分析高压电动机定子槽内在操作过电压冲击下的暂态电场的分布情况,有助于实时分析电机的绝缘安全状态及其安全预测。根据电场强弱、是否产生畸变等情况来分析电机内部绝缘介质的工作情况,判断是否容易被击穿。同时根据以前的经验和数据,可以考虑建立电机安全三等级模式,判断电机的绝缘工作情况是处于安全状态、临界状态或是危险状态,采取相应措施:正常、报警或者保护动作。还可以利用先进的图、文、音技术,实现监测的简单化、形象化、可视化及方便化,这些都是需要进一步研究和探讨的。

参考文献:

- [1] 沈标正 (SHEN Biao-zheng). 电机故障诊断技术 (The Diagnosis Technology of Motor's Failures) [M]. 北京:机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1996.
- [2] 刘念 (LIU Nian). 基于 FEM 的大型发电机快速暂态过电压分析 (Large Generator VOF Analyze Based on FEM) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2003, (4): 21-23.
- [3] 胡之光 (HU Zhi-guang). 电机电磁的分析与计算 (The Analysis and Calculation of the Motor Electromagnetism) [M]. 北京:机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1989.
- [4] 苑舜 (YUAN Shun). 高压开关设备状态监测与诊断技术 (The Supervise and Diagnosis Technology of the High-voltage Switch Facility) [M]. 北京:机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2001.
- [5] 陈维贤 (CHEN Wei-xian). 内部过电压基础 (The Foundation of the Interior Over-voltage) [M]. 北京:电力工业出版社 (Beijing: Electric Power Industrial Press), 1981.
- [6] 董振亚 (DONG Zhen-ya). 电力系统的过电压保护 (Protection of the Over-voltage in Electric Power System) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1997.
- [7] 谢德馨,等 (XIE De-xin, et al). 三维涡流场的有限元分析 (The FEM Analysis of Three Dimension Vortex Field) [M]. 北京:机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2001.

(下转第 63 页 continued on page 63)

参考文献:

- [1] 阳宪惠 (YANG Xiarr-hui). 现场总线技术及其应用 (Technology and Application of Field Bus) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 1999.
- [2] 陈积明,王智,孙优贤 (CHEN Ji-ming, WANG Zhi, SUN You-xian). 工业以太网的研究现状及展望 (Status in Quo and Expectation of Industry Ethernet) [J]. 化工自动化及仪表 (Control and Instruments in Chemical Industry), 2001, 28(6): 1-4.
- [3] 李子连 (LI Zi-lian). 现场总线技术在电厂应用综论 (Application Summarization of Field Bus in Power Plant)

[M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2002.

收稿日期: 2004-07-23; 修回日期: 2004-08-13

作者简介:

魏剑啸(1968 -),男,工程师,从事火力发电厂电气系统自动化方面的研究和设计工作;

闫天军(1974 -),男,工程师,从事火力发电厂电气系统自动化方面的研究和设计工作; E-mail: tianjuny-2008@sina.com

张学涛(1972 -),男,工程师,从事发电厂高级应用软件方面的研究和设计工作。

Discussion on the project of Network connections and the mode of entering into DCS in the electric system of thermal power plant

WEI Jian-xiao, YAN Tian-jun, ZHANG Xue-tao, LIU Da-hai, WANG Zhen-yue

(Business Department of Electric Protection and Automation, XI Electric Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: With the development of the computer, control and communication, the technology of network and communication has been employed widely in electric power automation system of thermal power plant, the mode of entering into DCS is transferring from cable connection to communication, and the project of Network connections in the local network is transferring from field bus to industry Ethernet. In view of its equipment status, this paper analyzes the superiority and the shortcomings about different project of Network connections, expounds the superiority of industry Ethernet in technological and economical field, and presents the necessity of its application in the electrical system of thermal power plant as well as the problems faced to.

Key words: field bus; industry Ethernet; distributed control system(DCS)

(上接第 45 页 continued from page 45)

- [8] Klumpner, Christian. The Matrix Converter: Over Voltages Caused by the Input Filter, Bi-directional Power Flow, and Control for Artificial Loading of Induction Motors[J]. IEEE Electric Machines and Power Systems, 2000:129-142.
- [9] Vukelja P I, Naumov R M. Experimental Investigations of High-voltage Motor Switching Surges[J]. IEEE Proceedings: Generation, Transm and Distrib, 1995: 233-239.

- [10] Anderson E. Over Voltages due to Vacuum Switches and Their Reduction in MV Networks[A]. IEEE Conference Publication, 1997. 1-5.

收稿日期: 2003-12-19; 修回日期: 2004-05-09

作者简介:

高 瓴(1979 -),女,硕士研究生,研究方向为电机电器的故障诊断和在线监测; E-mail: lingdang_scu@sina.com

刘 念(1956 -),男,教授,硕士生导师,研究方向为电器设备故障诊断和电力系统计算机应用。

Study of new method for on-line safety monitoring in motor switching over-voltage

GAO Ling, LIU Nian, MA Yue-jiao, HOU Bao-sheng

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Sichuan 610065, China)

Abstract: Vacuum breaker is generally used in power system as the major installation for distribution network. But the breaker switching often causes high over-voltage mostly, which will do great damage to the insulation of the motor stator. After analyzing the reasons and characteristics of switching over-voltage, this paper proposes a new method of using the finite-element method to analyse the effect of switching over-voltage on motor and monitor the field intensity change in insulation medium of motor stator, with which realizing the analysis of on-line safety prediction for motor internal insulation.

Key words: switching over-voltage; on-line safety prediction; finite-element method