

大型发电机内部故障分析与计算机软件的开发和应用

孙宇光¹, 黄子果¹, 李 晖², 余 波², 洪 心², 张新平², 封孝松³, 刘 洪⁴

(1. 清华大学 电机系 电力系统国家重点实验室, 北京 100084;

2. 长江电力 三峡梯级调度通信中心, 四川 成都 610041;

3. 溪洛渡水力发电厂, 云南 昭通 657300; 4. 向家坝水力发电厂, 四川 宜宾 644612)

摘要: 基于已通过多种实验验证的交流电机定子内部故障的多回路分析方法, 开发了图形界面化的大型发电机内部故障分析软件, 介绍了软件的主要功能和特点。该软件可以方便地确定电机实际可能发生的各种内部短路的类型和故障位置, 然后进行准确的暂态或稳态仿真计算, 并且全面、直观地查看仿真结果, 还可校核主保护的灵敏度并分析其动作性能。通过对向家坝水电站某发电机可能发生的典型故障的计算与分析, 总结了常见主保护动作死区内的故障类型及其电流分布特点和导致保护灵敏度较低的原因。

关键词: 发电机; 定子内部短路; 多回路分析方法; 继电保护; 电感参数; 故障分析; 计算

中图分类号: TM 31; TM 772

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.026

0 引言

大型发电机定子绕组一般采用双层线棒, 由于层间绝缘磨损或是端部交叉处绝缘破坏, 可能造成绕组内部的短路故障^[1-2]。理论分析、样机实验和生产实践都表明, 定子内部短路故障会在很短时间内给发电机造成灾难性的破坏, 甚至严重威胁着电力系统的安全运行。配置灵敏、可靠的主保护是应对这类故障的首选措施, 一旦故障发生, 保护能够灵敏动作、切除发电机, 使故障损失控制在最小范围^[3-5]。

为设计性能优良的发电机主保护, 必须掌握内部短路后发电机各种电气量的变化规律。20 世纪 80 年代, 文献[6-7]提出了交流电机的多回路分析技术, 突破了国内外传统电机理论无法准确计算绕组内部故障等特殊问题的局限性。应用多回路分析技术建立的定子内部故障数学模型, 是按照绕组实际联接情况列写电机定、转子各回路的电压方程和磁链方程而得到的一组微分方程, 其阶数等于回路总数(包括正常联接的定子回路、励磁绕组回路、笼型结构的阻尼回路和内部短路形成的定子故障附加回路), 其系数矩阵由电机各回路的电感系数和电阻构成。电感系数的准确计算是多回路数学模型的一个关键问题, 在不考虑严重的饱和等非线性因素时, 一般可由气隙磁导分析法先计算出与单个线圈(包括定子单个线圈、笼形阻尼绕组中由相邻 2 根阻尼条及其端环构成的单个回路和正常联接的励磁绕组)有关的电感系数, 计算中考虑了空间磁场谐波、凸极电机的不均匀气隙、铁芯齿槽影响和磁路饱和等多种因素; 然后按照实际回路(尤其是发生短路的定子回路)的

联接方式将相应线圈的电感系数叠加起来, 得到回路电感系数, 从而也计及了绕组的空间分布和联接方式、内部短路的故障类型和发生位置等因素^[8-10]。

基于上述多回路数学模型, 清华大学电机系相关课题组编写了发电机内部故障的稳态仿真分析软件, 能够得到定子和转子各处电流、电压的稳态解, 仿真结果与多台电机的实验结果吻合, 并于 2001 年通过了国家鉴定, 为主保护方案的灵敏度分析和优化设计提供了准确的理论依据^[10], 已经成功应用于国内外多座电站的发电机主保护设计中^[11-17]。

如前文所述, 多回路数学模型准确地考虑了发电机定子内部短路故障的各种影响因素, 这就需要在软件中输入电机的多种原始参数, 主要包括^[10]:

- a. 电机的基本结构尺寸(包括极对数、定子及转子铁芯的轴向长度、定子铁芯内径、凸极电机的最大和最小气隙长度等)和铁芯材料特性;
- b. 定子绕组电阻和结构参数, 包括定子每相并联分支数、槽数、槽形及尺寸、线圈串联匝数和节距、线圈端部的结构尺寸等;
- c. 正常和故障情况的定子绕组联接表;
- d. 励磁绕组电阻和结构参数, 包括并联分支数、每极串联匝数、凸极电机的磁极结构尺寸或隐极电机分布式励磁绕组的结构尺寸(包括实槽数及分度数、槽形及尺寸、每个同心式线圈的串联匝数和端部结构尺寸)等;
- e. 阻尼绕组电阻和结构参数, 包括阻尼条数、阻尼槽的分布位置和槽形尺寸、阻尼端环的形状及尺寸等。

上述原始参数中, 参数 a 和 b、参数 a 和 d、参数 a 和 e 分别是计算定子单个线圈、励磁绕组、阻尼绕组电感系数所需的。除此以外, 计算定子回路电感系数还需要参数 c。这些参数大多不在电机常见的出厂

收稿日期: 2013-03-10; 修回日期: 2014-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277103)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277103)

数据中,必须请电机制造厂提供非常详细的原始资料单,由用户进行正确的分析后,从中提取出来输入到软件中。由于每种型号的电机都需要输入独特的原始参数,而无法根据容量、电压等级等定制通用的输入文件,这就要求用户深入理解参数计算的方法和具体过程,否则经常出现因输入数据不合理而造成程序计算错误甚至根本无法计算的情况,这极大地限制了 2001 版内部故障仿真软件向广大电力工作者的推广应用。

随着发电容量的增大,对各电站安全可靠运行提出了更高的要求。对大型发电机进行准确的故障分析与计算,是正确整定保护定值的重要基础工作,有助于提高继电保护的运行管理水平。对于数目巨大、机理复杂的发电机内部短路故障,很多电站的技术人员希望借助软件,也能方便地进行仿真计算和保护灵敏度校验。为此,本文在 2001 版内部故障仿真软件的基础上,将一些电站发电机的原始数据预置于软件的后台程序中,为用户节约了时间,也避免输入不当导致的错误,并且进行了图形界面化的改进,提供了内容全面、交互友好的结果查看功能。用户只要在图形界面中方便地选择故障类型和具体位置,就能在软件中进行故障暂态或稳态仿真。该软件不仅能图文交互地显示各分支电流,还能在用户自行指定的整定值下进行各种主保护的灵敏度校验并在工作特性图中清楚地显示动作性能。通过在几个电站的试用,软件得到了运行技术人员的认可,为保障电站设备安全运行发挥了基础性作用。

1 软件主要功能及特点

本文介绍的图形界面化的大型发电机内部短路故障分析与计算软件,以基于多回路理论的定子绕组内部故障计算方法为核心,主要包括故障类型和发生位置的确定、内部短路故障暂态与稳态计算、计算结果的交互式查看、各种主保护灵敏度的交互式计算及图形化显示等主要功能。对于原始参数已预置于软件中的发电机,用户无需进行繁琐的数据输入工作就可直接进行分析、计算。下面以向家坝右岸电站发电机^[16]的计算与分析界面为例,详细介绍软件的各种功能及特点。向家坝右岸电站发电机由天津阿尔斯通水电设备有限公司制造,本文中简称为向家坝 Alstom 发电机,其参数见表 1。

表 1 向家坝 Alstom 发电机的主要参数

Tab.1 Main parameters of Xiangjiaba Alstom generator

技术参数	参数值	技术参数	参数值
额定功率	800 MW	极对数	42
额定电压	23 kV	定子槽数	756
额定电流	22313 A	定子绕组联接方式	7Y
额定功率因数	0.9	定子每分支线圈数	36

为便于叙述,下文中的界面图均进行了简化,省略了界面左侧的发电机基本参数,仅示出分析和仿真需要的部分。

1.1 故障类型和发生位置的确定

本软件分析的故障并不是任意设定的,而是发电机实际可能发生的内部短路故障,包括同槽故障和端部故障,都是根据电机制造厂提供的绕组连接图,分析出的任意 2 根导线相邻而可能发生的短路故障^[1]。软件已整合了故障形式的分析过程,用户无需输入繁琐的定子绕组联接表^[10],只要根据软件提示,指定故障所在的槽号及故障编号,软件会自动分析出相应的短路类型和位置,并显示在图形界面中。另外,软件还从发电机所有可能发生的内部短路故障中,选取了若干个对主保护设计及定值整定具有指导意义的典型故障,用户直接点击后也会在图形界面中显示。

这部分功能在软件主界面右半部分的 3 个故障分析选项卡中。以图 1 所示的“端部故障分析”界面为例,用户根据软件提示输入发生短路的槽号和故障序号后,点击“端部故障详细分析”按钮,软件就会自动分析出这个故障的 2 个短路点位置,并以带箭头的实线显示在图 2 所示的故障计算界面中。

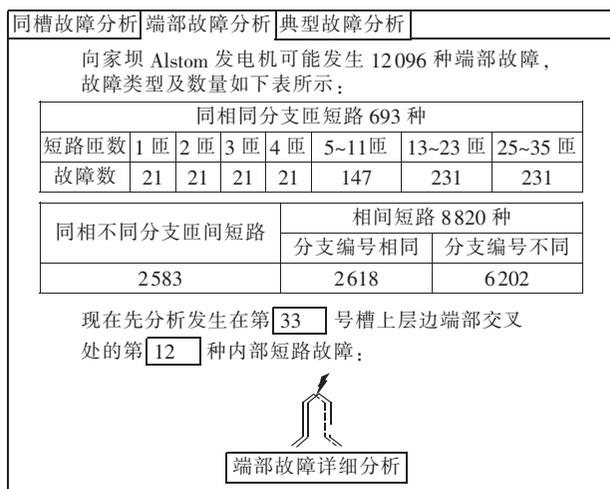


图 1 向家坝 Alstom 发电机的端部故障分析界面

Fig.1 Terminal fault analysis interface of Xiangjiaba Alstom generator

在图 1 所示的软件主界面中,如果点击“典型故障分析”选项卡,则会显示如图 3 所示的典型故障分析界面,用户点击任一种带下划线的典型内部故障,软件也会进入该故障的计算页面(类似图 2)。

1.2 内部短路故障的仿真计算

基于多回路理论的定子内部故障仿真计算是整个软件的核心部分。在引言部分已经论述,发电机定子内部短路的多回路数学模型是一组时变系数的微分方程,那么一般可用数值积分法(比如 4 阶龙格-库塔法)求得定、转子各处电流在整个过渡过程中的

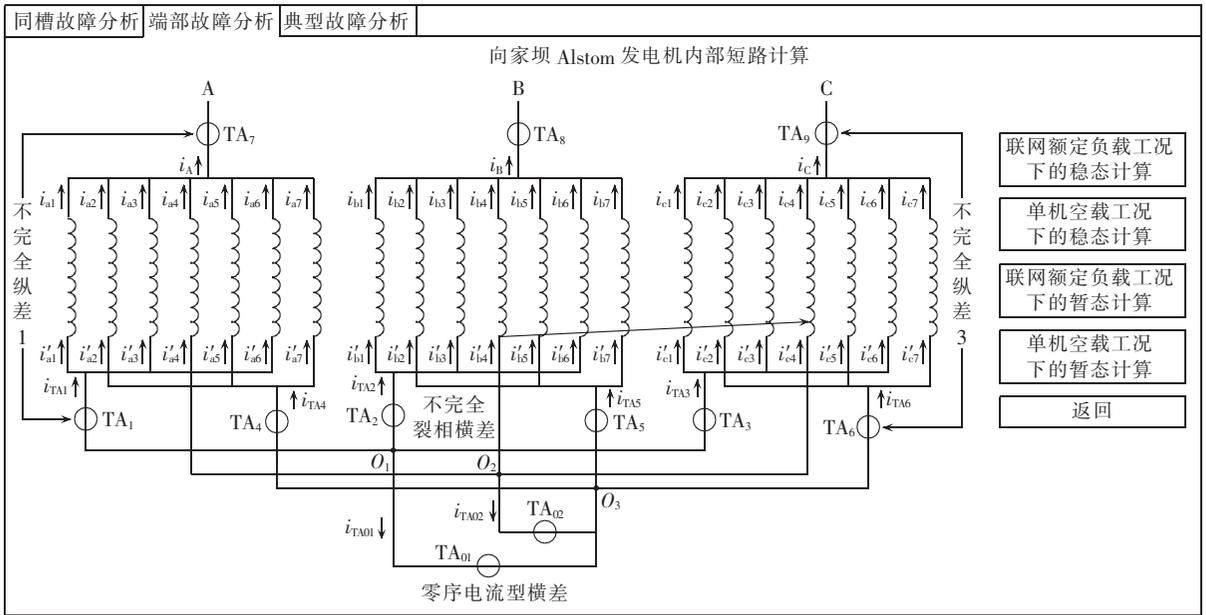


图 2 向家坝 Alstom 发电机的故障计算界面
Fig.2 Fault calculation interface of Xiangjiaba Alstom generator

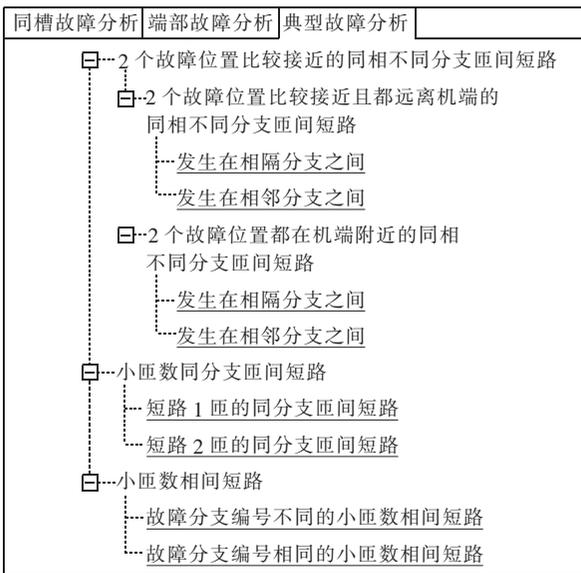


图 3 向家坝 Alstom 发电机的典型故障分析界面
Fig.3 Typical fault analysis interface of Xiangjiaba Alstom generator

暂态时步解。

但大型水轮发电机由于定子支路数、极对数、阻尼回路数都较多,多回路数学模型形成的微分方程组阶数一般很高,暂态仿真的求解速度比较慢,如果要得到稳态解需花费相当长的时间^[8]。基于对内部短路故障稳态过程中电机内部物理概念的理论分析,可以巧妙地将微分方程组转化为线性代数方程组,从而直接求出各回路稳态电气量的各次谐波有效值及相位^[10]。定子内部短路的这种稳态数学模型和计算方法,已成功地解决了大型凸极电机内部故障的快速分析难题,并应用于主保护的定量化设计中。

本软件提供的仿真计算功能既可以求解暂态过

程,也可以求解稳态过程,包括联网额定负载工况下的稳态计算、单机空载工况下的稳态计算、联网额定负载工况下的暂态计算、单机空载工况下的暂态计算(见图 2 所示故障计算界面的右侧前 4 个按钮),用户可以自行点击选择。其中暂态计算由于耗时较长,为避免用户等候时间过长,只计算故障发生后 2 个工频周期内的时步解。

1.3 计算结果的交互式查看

完成对用户指定的某种内部短路故障的仿真计算后,软件进入结果查看与分析功能页(如图 4 所示)。用户可以任意点击图中代表电流的箭头或者界面下部的“查看 $i(kl)$ ”按钮,将会弹出该处电流(包括主保护所配置的各 TA 电流)的计算波形和谐波分析结果(如图 5 所示的稳态仿真结果),通过点击“另存文本”和“另存图像”按钮还可保存该计算结果,方便以后调用比较。为对故障情况下不同分支电流进行直观的比较,还可点击图 4 中“比较电流”按钮,弹出如图 6 所示的界面,通过勾选电流,在同一个图中观察若干个不同的电流。

1.4 主保护的灵敏度校验和动作性能分析

通过仿真计算得到内部短路后绕组各分支电流后,根据各种主保护的工作原理,可计算进入保护的差动电流以及制动电流的基波有效值,在确定的整定值下得到主保护灵敏度的理论值。对于发电机已经配置的主保护,本软件提供了灵敏度计算功能。在图 4 所示的结果查看与分析功能页,用户只要点击右侧的主保护(都是软件预置的发电机实际配置的主保护)按钮,就可进入相应保护灵敏度的计算页面(如图 7 所示,其中 I_N 为发电机相电流的额定值),

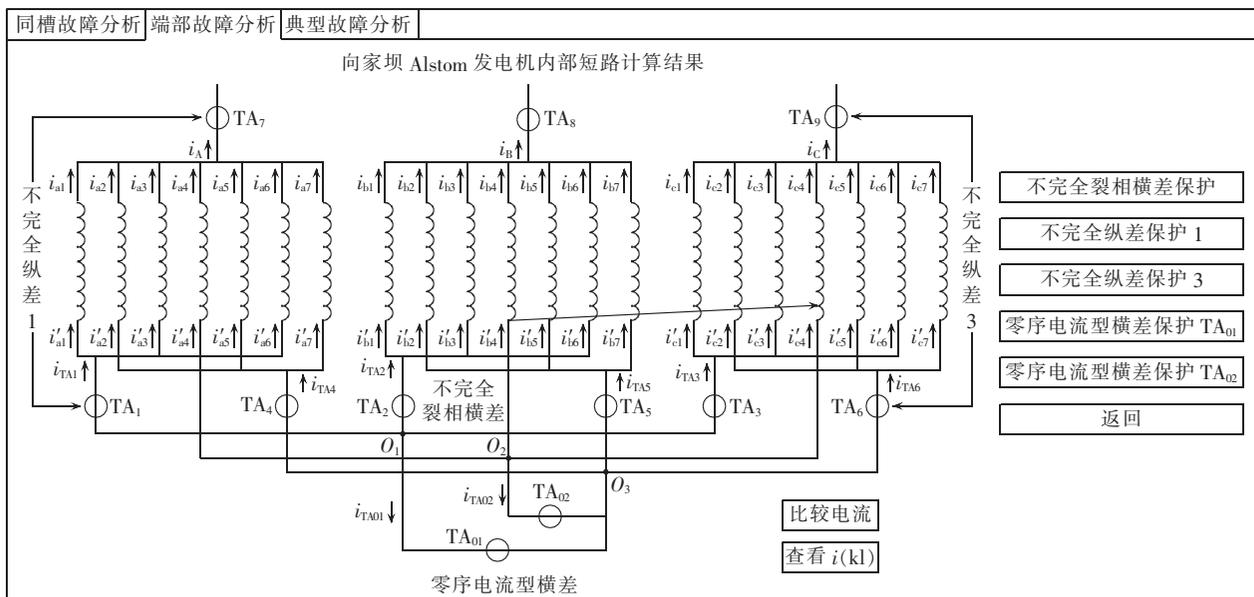


图 4 向家坝 Alstom 发电机的结果查看与分析功能页
Fig.4 Result display and analysis interface of Xiangjiaba Alstom generator

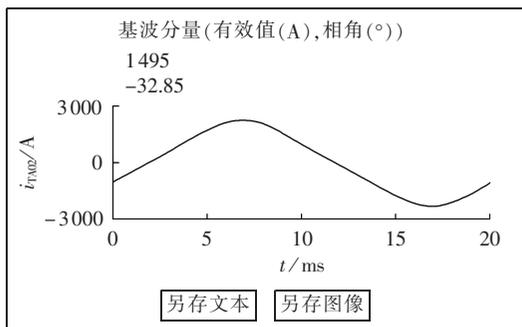


图 5 稳态仿真计算结果的图文显示
Fig.5 Results display of steady-state simulation

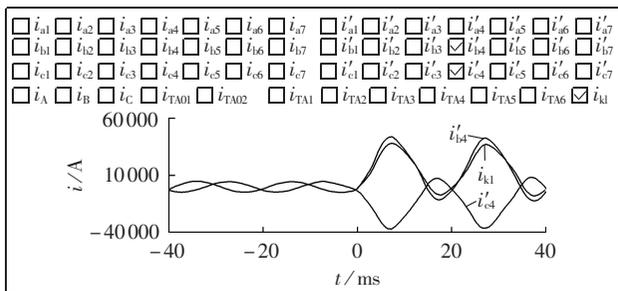


图 6 暂态故障电流的波形比较
Fig.6 Comparison between transient fault current waveforms

用户根据软件提示输入合理的整定值或者使用软件预置的默认值,软件就会给出灵敏度的计算结果。对于比率制动式差动保护,还会在图形中自动显示三相工作点的位置,方便用户判断保护能否可靠动作(只有工作点位于阴影区域上方,才能可靠动作)。

2 应用实例分析

以向家坝 Alstom 发电机^[6]为例,利用本软件对一些典型故障进行仿真计算和主保护灵敏度分析。

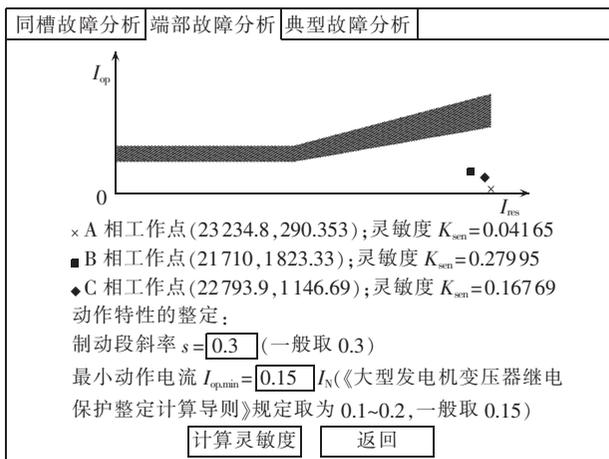
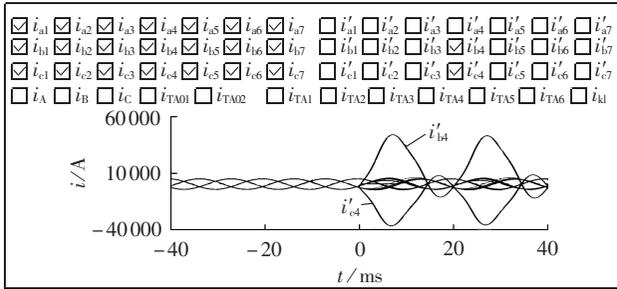


图 7 不完全纵差保护灵敏度的计算页面
Fig.7 Sensitivity calculation interface of incomplete longitudinal differential protection

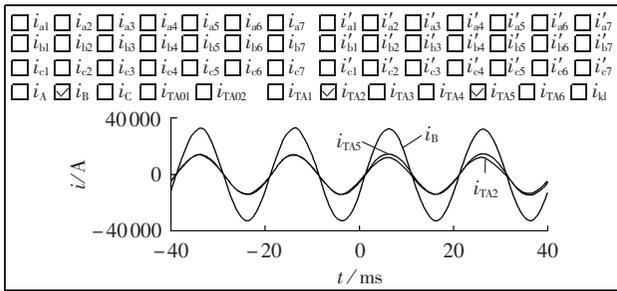
2.1 小匝数相间短路

在图 3 所示的典型故障分析界面,点击“故障分支编号相同的小匝数相间短路”按钮,会进入图 2 所示的故障计算界面中,该故障就是图 1 所示的一种实际可能的端部故障,发生在 b_4 与 c_4 分支之间,2 个短路点分别距中性点 0 个、2 个线圈,距中性点共短路了 2 个线圈,属于小匝数相间短路故障。

以联网负载工况下的暂态计算结果为例,完成计算后点击“比较电流”按钮(在图 4 所示的结果查看与分析功能页中),可以直观地看到三相各分支电流波形,如图 8(a)所示。本软件提供的暂态计算波形中,前 2 个工频周期($t=-40\sim 0$ ms)为故障前的正常运行时段,短路发生在 $t=0$ 时刻,后 2 个工频周期($t=0\sim 40$ ms)为短路后的暂态过程。从图 8(a)可以看出,与正常运行状态相比,小匝数相间短路故障



(a) 三相各分支电流



(b) B 相电流

图 8 小匝数相间短路故障的计算结果

Fig.8 Calculative results of less-turn inter-phase short circuit fault

引起的所有分支机端侧电流变化都不大,包括故障分支电流 i_{b4} 、 i_{c4} ,这是由于故障分支从短路点到机端的匝数与正常支路差不多;只有故障分支中性点侧电流 i'_{b4} 、 i'_{c4} 变化非常大,而且二者相差不大(都与短路回路电流 i_{kl} 近似相等)、方向近于相反(参见图 6,也是该故障的计算结果)。

如图 4 所示,向家坝 Alstom 发电机每相 7 个分支,现有主保护是将每相分成 3 个支路组(1、3、6;4;2、5、7),引出 3 个中性点,配置 2 套不完全纵差保护、1 套不完全裂相横差保护和 2 套零序电流型横差保护。对这些主保护进行的灵敏度校验(利用图 4 右侧的 5 个主保护按钮)表明,所有保护的灵敏度都低于 1.5,在该小匝数相间短路故障时都不能可靠地动作。

以不完全纵差保护 1 为例,各相的差动电流由机端的相电流和 7/3 倍的第 1、3、6 分支的中性点侧电流构成。图 8(b)显示了 B 相相应电流的计算波形(即 i_B 和 i_{TA2}),二者比较平衡(其中考虑与支路数有关的比率),这是由于即使在故障相,所有非故障分支和故障分支机端侧电流比较平衡(参见图 8(a)),大致都为机端侧相电流的 1/7;而非故障相的差动电流一般比故障相更小。所以不完全纵差保护 1 在三相都不能可靠动作(灵敏度计算结果参见图 7)。对不完全纵差保护 3 和不完全裂相横差保护的 analysis 是类似的。

通过上述分析也可看到,由于向家坝 Alstom 发电机采用的主保护配置中,3 套差动保护都无法直接反映各相第 4 分支中性点侧电流,所以对于发生

在各相第 4 分支之间的小匝数相间短路都不能可靠动作。

对发生在编号相同的分支之间的相间短路,即使故障的短路匝数较大,零序电流横差保护的灵敏度也不高。这是由于数值较大的短路回路电流 i_{kl} 并不直接流过两中性点连线。以零序电流横差保护 2 为例,进入保护的动作为 $i_{TA02} = i_{c4} + i'_{b4} + i'_{c4}$,对于这个相间故障,虽然 i'_{b4} 和 i'_{c4} 都很大,但二者方向近于相反(相当于数值很大的短路回路电流 i_{kl} 在这 2 个故障附加支路之间流过,参见图 6),叠加后进入主保护电流互感器 TA02 会相互抵消(参见图 5 的稳态计算结果),保护也无法可靠动作(动作阈值一般为发电机额定电流的 3/40,即 1673.5 A)。

通过全面的计算和统计可知,向家坝 Alstom 发电机目前所配置的主保护对其可能发生的 11 种相间短路故障均无法可靠动作,这些故障都发生在不同相的第 4 分支之间(距中性点的)短路匝数为 1~6。这些故障是受硬件投资所限而造成主保护动作死区,只有增设每相第 4 分支的中性点侧 TA 和相应不完全纵差保护(或者完全纵差保护),保护才能在有些小匝数相间短路故障发生时可靠动作。

2.2 小匝数同分支匝间短路

向家坝 Alstom 发电机的一种典型故障——短路 1 匝的同分支匝间短路(如图 3 所示),发生在 a_4 分支上,2 个短路点位置相差 1 个线圈。以单机空载工况下的稳态仿真为例,三相各分支及短路回路的稳态电流如图 9 所示。

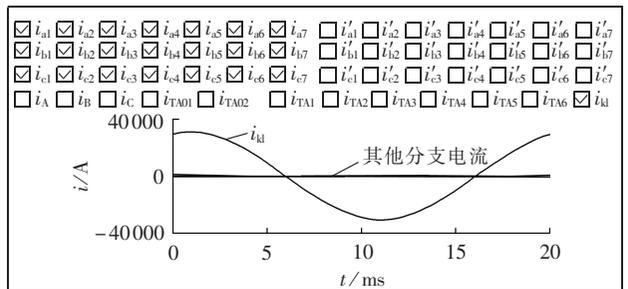


图 9 小匝数同分支匝间短路故障的稳态计算结果(单机空载工况)

Fig.9 Results of steady-state simulation for less-turn co-branch inter-turn short circuit fault (single machine without load)

从图 9 可见,一旦发生这样的小匝数同分支匝间短路,定子绕组内除了短路回路电流 i_{kl} 以及短路匝电流(即 $i_{a4} - i_{kl}$)非常大以外,其余各分支电流变化都很小(短路前单机空载,所有分支电流都为 0)。对各种主保护进行灵敏度计算,结果都低于 1.5,保护无法可靠动作(参见图 10)。

对于这种小匝数的同分支匝间短路,由于现有

同槽故障分析	端部故障分析	典型故障分析	
零序电流型横差保护 1 灵敏度计算			
动作特性的整定:			
动作电流 $I_{op,set} = $ <input type="text" value="0.05"/> I_N (一般取 0.05)			
$K_{sen} = 0.13436$			
<input type="button" value="计算灵敏度"/>		<input type="button" value="返回"/>	

(a) 零序电流型横差保护 1

同槽故障分析	端部故障分析	典型故障分析	
零序电流型横差保护 2 灵敏度计算			
动作特性的整定:			
动作电流 $I_{op,set} = $ <input type="text" value="0.05"/> I_N (一般取 0.05)			
$K_{sen} = 0.60682$			
<input type="button" value="计算灵敏度"/>		<input type="button" value="返回"/>	

(b) 零序电流型横差保护 2

图 10 向家坝 Alstom 发电机小匝数同分支匝间短路的主保护灵敏度计算

Fig.10 Calculation of main protection sensitivity to less-turn co-branch inter-turn short circuit fault of Xiangjiaba Alstom generator

主保护的各种 TA 都无法检测到仅存在于短路回路(包括短路匝)内部的巨大电流,所以很难可靠动作。计算和统计表明,向家坝 Alstom 发电机目前所配置的主保护对其可能发生的 53 种同分支匝间短路故障无法可靠动作,其短路匝数仅为 1~3。这些故障是由定子绕组分布与联接方式而决定的发电机固有的主保护动作死区,即使采用其他的主保护配置也很难进一步减少同分支匝间短路故障的保护死区。

3 结论

基于已通过多种实验验证的交流电机定子内部故障的多回路分析方法,本文开发了图形界面化的大型发电机内部故障分析软件,具有界面友好、功能全面、输出直观、交互方便的优点。应用该软件对大型发电机的典型内部短路故障进行了仿真计算和主保护动作性能分析,由此分析了常见主保护动作死区的形式和电流分布特点,对主保护配置方案的设计及定值整定具有指导意义。作为电气故障分析和保护灵敏度校验的可靠工具,该软件已应用于国内若干电站,受到电厂运行人员的认可,为提高继电保护的运行管理水平、保障电站设备的安全运行发挥了基础性作用。

参考文献:

[1] WANG Shanming, GUI Lin, WANG Xiangheng, et al. Analysis of armature winding internal faults and design of main protection scheme for synchronous generators[C]//Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection. Amsterdam, The Netherlands: IEE, 2004: 148-151.

[2] 崔健伟. 300MW 发电机定子端部匝间短路事故探讨[J]. 上海电力学院学报, 2001, 27(1): 34-36.
CUI Jianwei. Cause of stator circle short circuit accident of 300MW generator[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2001, 27(1): 34-36.

[3] 赵晓东, 段乃娴. 大型汽轮发电机匝间短路保护必要性探讨[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(11): 39-41.
ZHAO Xiaodong, DUAN Naixian. The necessity of interturn short circuit protection for large-sized turbo-generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(11): 39-41.

[4] 傅自清, 陈文学. 大型汽轮发电机定子匝间保护及中性点引出方式探讨[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(11): 63-66.
FU Ziqing, CHEN Wenxue. Discussion on way of connection to neutral point and turn-to-turn fault protection for stator winding of large turbo-generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(11): 63-66.

[5] 桂林, 王祥珩, 王剑, 等. 大型汽轮发电机绕组同槽同相调查及保护方案定量化设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 75-79.
GUI Lin, WANG Xiangheng, WANG Jian, et al. Investigation of turn-to-turn fault ratio and quantitative design of main protection configuration scheme for large-sized turbo-generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 75-79.

[6] 高景德, 王祥珩. 交流电机的多回路理论[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1987, 27(1): 1-8.
GAO Jingde, WANG Xiangheng. The multi-loop theory of alternating current machine[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 1987, 27(1): 1-8.

[7] 王祥珩, 高景德, 金启玫. 凸极同步电机回路参数的计算[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1987, 27(1): 9-19.
WANG Xiangheng, GAO Jingde, JIN Qimei. Calculation of loop parameters of salient pole synchronous machine[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 1987, 27(1): 9-19.

[8] WANG X H, SUN Y G, OUYANG B, et al. Transient behavior of salient-pole synchronous machines with internal stator winding faults[J]. IEE Proceedings—Electronic Power Application, 2002, 149(2): 143-151.

[9] WANG Xiangheng, CHEN Songlin, WANG Weijian, et al. A study of armature winding internal faults for turbogenerators[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38(3): 625-631.

[10] 王善铭, 桂林, 王祥珩. 发电机内部故障仿真分析软件的基本原理[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(5): 27-31.
WANG Shanming, GUI Lin, WANG Xiangheng. Fundamentals of internal fault analysis of software for generators[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2003, 27(5): 27-31.

[11] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2002: 60-82.

[12] 桂林, 王维俭, 孙宇光, 等. 大中型发电机主保护配置方案定量化及优化设计的重要性[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(10): 1-6.
GUI Lin, WANG Weijian, SUN Yuguang, et al. Importance of quantitative and optimum design of main protection configuration scheme for large and medium generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(10): 1-6.

[13] 桂林, 王祥珩, 孙宇光, 等. 大型发电机主保护配置方案的优化设计[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(1): 141-144.
GUI Lin, WANG Xiangheng, SUN Yuguang, et al. Optimum

- design of main protection configuration scheme for large generators [J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology Edition,2005,45(1):141-144.
- [14] 桂林,王维俭,孙宇光,等. 三峡右岸发电机主保护配置方案设计研究总结[J]. 电力系统自动化,2005,29(13):69-75.
GUI Lin,WANG Weijian,SUN Yuguang,et al. Research summarization on design of main protection configuration scheme for hydro-generator of Three Gorges Right Bank Power Station [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(13):69-75.
- [15] 孙宇光,王祥珩,桂林,等. 偶数多分支发电机的主保护优化设计[J]. 电力系统自动化,2005,29(12):83-87.
SUN Yuguang,WANG Xiangheng,GUI Lin,et al. Optimum design of main protection configuration scheme for internal faults of generator with even multi-branches[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(12):83-87.
- [16] 桂林,王祥珩,孙宇光,等. 向家坝和溪洛渡水电站发电机主保护设计总结[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):30-33.
GUI Lin,WANG Xiangheng,SUN Yuguang,et al. Summary of main protection design for hydro-generators of Xiangjiaba power station and Xiluodu power station [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(7):30-33.
- [17] 桂林,郭玉恒,陈俊,等. 二滩发电机主保护技术改进工作研究 [J]. 电力自动化设备,2013,33(9):167-171.
GUI Lin,GUO Yuheng,CHEN Jun,et al. Technical renovation for main protection of Ertan hydroelectric generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):167-171.

作者简介:



孙宇光

孙宇光(1975-),女,江苏泰兴人,副教授,博士,研究方向为电机故障分析与监测保护(E-mail:sunyuguang98@mails.tsinghua.edu.cn);

黄子果(1990-),男,福建周宁人,硕士研究生,研究方向为多相电机系统的绕组内部故障分析。

Development and application of internal fault analysis and calculation software for large-scale generator

SUN Yuguang¹,HUANG Ziguo¹,LI Hui²,YU bo²,HONG Xin²,ZHANG Xinping²,
FENG Xiaosong³,LIU Hong⁴

- (1. State Key Lab of Power System,Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China;
2. Three Gorges Water Conservancy Complex Cascade Dispatch and Communication Center,China Yangtze Power Co.,Ltd.,Chengdu 610041,China;3. Xiluodu Hydro Power Plant,Zhaotong 657300,China;
4. Xiangjiaba Hydro Power Plant,Yibin 644612,China)

Abstract: The multi-loop analysis method for the internal faults of AC machines is fully validated by various experiments,based on which,a kind of visualized internal fault analysis software is developed for large-scale generators and its main functions and features are briefly introduced. It detects conveniently the type and location of any possible internal short circuit of generator,carries out the accurate transient or steady-state simulative calculations,checks comprehensively and intuitively the simulative results,examines the sensitivity of main protection and analyzes its performances. Some typical internal faults that may occur in a generator of Xiangjiaba hydropower station are simulated and analyzed,the types and current distributions of generator internal faults within the operational dead zones of widely-used main protections are summarized,and the causes of their low sensitivity are also introduced.

Key words: electric generators; stator internal short circuit; multi-loop analysis method; relay protection; inductance parameter; failure analysis; calculation