

基于Ansys有限元的接地回路电动力分析与优化

勾国营, 杨姣龙, 骆常璐, 苏戈, 李松磊

(河南平芝高压开关有限公司, 河南 平顶山 467013)

摘要: GIS设备在中国电网建设中占据着重要位置,设备的安全运行至关重要。在高压设备发生短路故障时,通过设备导体与壳体的短路电流峰值高达171 kA,这对设备的动稳定性和热稳定性都提出了苛刻的要求。针对接地回路,热稳定性考核通过理论计算即可满足要求,但对于动稳定性分析,由于空间结构复杂,理论计算较为困难。文中以小型化550 kV GIS用接地开关的接地回路为研究对象,基于Ansys 16.1的电磁场与结构场进行耦合分析,由电磁场得出接地回路的电流密度与磁通密度分布,给出各部位电动力密度云图,再导入结构场,对接地回路导流排的受力进行强度校核,最终完成导流排结构的优化。通过研究,对比不同结构的仿真结果,分析结构差异,提出了优化设计方案,为高压GIS接地回路的结构改进设计提供了理论基础。

关键词: 有限元; 电磁—结构耦合; 电动力; 接地回路; 优化设计

Analysis and Optimization of Electrodynamic Force of Grounding Loop Based on Ansys Finite Element Method

GOU Guoying, YANG Jiaolong, LUO Changlu, SU Ge, LI Songlei

(Henan Pingzhi High-voltage Switchgear Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467013, China)

Abstract: High voltage circuit breaker occupies an important position in the grid, the safety of which is essential. The peak of short-circuit current on the conductors and cases of GIS reaches up to 171 kA when high voltage circuit breaker meets short-circuit fault, which puts forward higher requirements to the thermal stability and dynamic stability of GIS. However, difficulty exists when theoretical calculation is conducted for thermal and dynamic stability because of the complexity of spatial structure. Electromagnetic-structure coupling analysis for grounding loop used in miniaturized 550 kV GIS has been conducted in this paper based on Ansys 16.1. The distribution of current density and magnetic flux density has been obtained through electromagnetic field. And the contour of electric power density in all parts is given, which is imported into structure field to check the strength of diversion row in grounding loop. And the structure optimization of diversion row has been realized. The program of design optimization is proposed through the analysis of simulation results of different structures, which provides a theoretical basis for the structural design of grounding loop in high voltage GIS.

Key words: finite element; electromagnetic-structure coupling; electrodynamic force; grounding loop; design optimization

0 引言

气体绝缘金属封闭开关(GIS)设备经过近半个世纪的研制、运行与发展,其电压等级从40.5 kV增至1 100 kV,开断能力从25 kA增至63 kA,已形成完善的系列产品,并为各国电力工业的发展做出了重大贡献。随着用电量急增与城镇化建设需要,设备

的小型化、大电流成为今后GIS发展的新方向^[1-3]。但小型化、大电流发展的同时也会增加电动力带来的危害,从而影响设备安全运行,尤其在GIS设备发生短路故障时,导体和壳体所受电动力会急剧增大,如果设备机械强度不足,在短路冲击电流作用下可能发生结构变形、部件脱落、接触电阻增大等故障,严重危害设备和电力系统的安全^[4]。因此在进行GIS的开发设计时,必须考虑设备的动稳定性^[5-8]。而接

地回路由于有大电流的流过,必然与通导体之间存在着相互作用的电动力,因此,为了保证可靠的电力连接,实现设备的安全运行,需要对接地回路的动稳定性进行理论计算与仿真分析。

1 现状

在行业中为了保证GIS设备的安全可靠运行,需要对GIS设备进行特定的短时耐受电流与峰值耐受电流型式试验。设计中,电动力分析方法有解析法和有限元方法两种。其中解析法分析时需要物理模型进行等效、简化,建立相对完整的数学模型,推导其表达式,得到更适宜进行工程计算的公式,在定性分析及快速计算方面有较好的效果^[9]。但由于通电回路型式复杂多样,计算繁琐,解析法不能准确地评估电流密度的分布与磁感应强度对电动力的影响,导致求解精度低。有限元方法是近年来逐渐发展成熟的一种数值计算方法,其使用范围已经从最初的力学及结构领域拓展到电磁、热学、流体等多种领域^[10]。在准确建模且合理施加载荷的前提下,使用有限元方法对接地开关接地导流排进行动稳定性分析,可以得到精确的计算结果,导流排的受力结果直观可视^[11]。

2 有限元分析

有限元法(finite element method, FEM)在数学中是一种为求得偏微分方程边值问题近似解的数值技术。其基本思想就是离散化^[12],就是将实际结构假想地离散为有限数目的规则单元组合体,这样可以解决很多实际工程需要解决但理论分析又无法实现的复杂问题。Ansys是一个广泛应用于机械制造、电子等领域,集结构、热、流体、电磁、声学于一体的以有限元分析为基础的大型通用CAE软件,其功能强大,应用范围广,行业认可度高,该次结构场分析采用Ansys Mechanical模块进行,磁场选择使用Maxwell 3D有限元仿真软件来进行。

通常,在电磁—结构耦合分析时,首先计算模型中的电流密度,根据电流密度大小经过磁场分析计算出空间磁通密度分布,再计算通流载体在该磁场下所受的电动力,最后将电动力作为初始条件导入结构场中,计算出对结构的分析。在这个仿真过程中,按照物理顺序进行多步仿真,每一步仿真的结果都作为下一步仿真的加载条件,整个物理过程是多个物理场之间的相互作用,且是多步的^[13-15]。

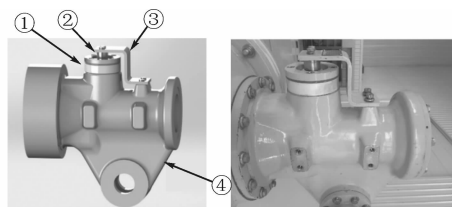
动稳定性是主要考核是在短路电流峰值时结构所受电动力的影响。在接地回路中,涡流对电动

力数值和相位的影响很小,因此为便于分析,该次使用准静态假设的电磁场问题^[16-17],在有限元分析之前,首先对该次解析模型进行了如下假设:

- 1)忽略各导体连接处接触电阻;
- 2)电动力计算忽略位移电流和涡流;
- 3)采用静态磁场分析模块(magneto static),施加短路电流峰值进行计算;
- 4)简化主电流回路,忽略对电磁场分布和电动力影响小的部件和结构;
- 5)各材料均为各向同性材料,忽略材料特性的非线性;
- 6)接地回路中除导流排外,不考虑电动力影响。

2.1 建立有限元模型

根据有限元仿真分析步骤,首先建立三维仿真模型。为了节约系统资源、加快计算速度,接地回路在建立有限元仿真模型前,需要对各个部分进行一定的简化。由于该次主要的研究对象是导流排本身的受力情况,因此与力分析无关或者对力影响较小的部件可以进行省略或者简化。该次结构中传动机构部分电阻值大,回路电流主要通过导流排与壳体,故可不对传动机构部分建模,同样,壳体上其他零组件也不再建立。有限元模型及实物见图1。



1—绝缘法兰; 2—通导体; 3—导流排; 4—壳体。

图1 有限元模型及实物

Fig. 1 Finite element model and the real body

该次的导流排结构设计为Z字型,材料为铝材1050A-H24,选择Ansys材料库中的“aluminum”,其相对磁导率为1,电导率 3.8×10^7 S/m,杨氏模量 7.1×10^4 MPa,泊松比0.33,两端通过螺栓固定于接地开关上,接触面紧密连接。按照国标要求,其短路冲击电流峰值为171 kA/0.3 s^[18],激励电流通过通导体传输到导流排,之后流经壳体完成回流,其电流回路示意图见图2。

铝材1050A-H24的抗拉强度 R_m 大于105 MPa,允许应力 $R_{p0.2}$ 为75 MPa^[19]。为了确保接地回路能够安全工作,导流排短路时的最大电流所产生的弯曲应力不应该超过材料本身的最大允许应力,即 $R \leq R_{p0.2}$ 。

2.2 划分网格

有限元方法计算过程由3个步骤组成:前处理、

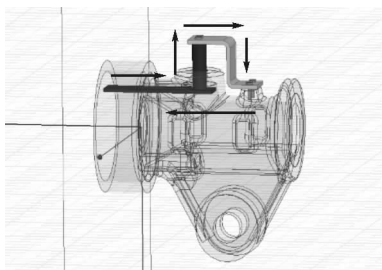


图2 电流回路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of current loop

有限元计算和后处理, 前处理又包含网格划分、激励加载与建立边界条件, 其中网格划分是有限元仿真分析的关键, 网格质量的好坏直接关系到仿真的时长以及仿真结果的准确性, 因此一定要控制好网格划分的质量。理论上讲, 单元划分的数量与有限元计算结果的精度是成正比的, 即剖分越细密, 与真实的物理模型特征吻合的越好, 当然, 计算机资源的消耗也越大, 计算时长会越长。作为主要的研究对象, 该次仿真对导流排和通流导体进行单元尺寸小于2 mm的网格划分, 以保证网格质量, 对于电磁场的真空求解域与壳体使用自由网格划分, 最终有限元模型网格剖分结果见图3。

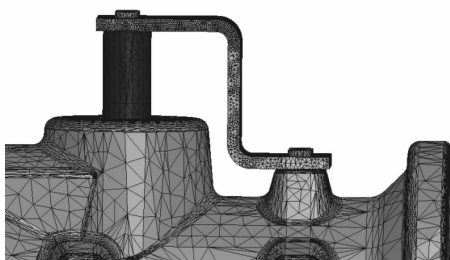


图3 有限元模型网格剖分图

Fig. 3 Chart of meshing in finite element model

2.3 磁固耦合建立

对模型加载激励电流, 由于仿真模型为开环, 因此激励电流需加载到通流导体端面和壳体端面, 完成回流。该次加载激励电流171 kA, 通过电磁场分析, 得到电磁计算结果见图4。可知, 磁通密度主要集中在通流导体与导流排之间, 其余空间位置, 磁通密度分布很少, 这也导致导流排与通流导体成为电动力的主要受力部件。

在磁场中通电导体承受电动力, 该作用力分布在导流排每个单元上, 并以体积力体现。通过将 Maxwell 3D 和 Ansys Mechanical 求解器在 Ansys Workbench 平台下整合, 将电磁场计算结果作为结构场计算的初始条件, 直接完成电磁—结构耦合分析。但由于 Maxwell 3D 与 Ansys Mechanical 的网格单元不互用, 需要用 Ansys 16.1 的数据映射器, 将之前

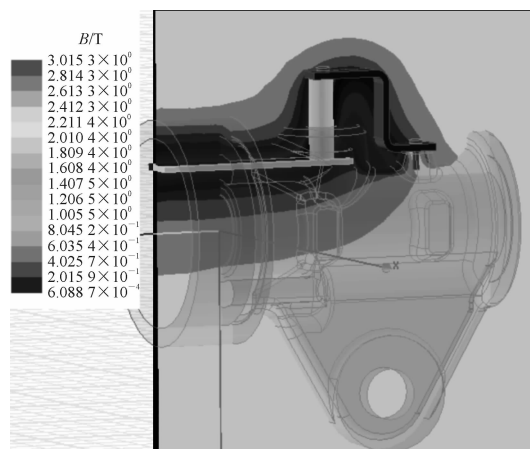


图4 磁通密度分布

Fig. 4 Distribution of magnetic flux density

计算的电动力载荷自动从电磁网格映射到与之不同的结构网格上, 使结构分析中包含电动力密度, 同时由于映射误差的存在, 电动力数据不会完整传输。通过查看传递数据, 将力的传递误差控制在0.5%左右, 结果可以被接受。映射后的力密度云图及力的传递误差见图5。映射的体积力作为载荷条件, 固定导流排于壳体连接的两端面为约束条件, 完整后步的结构仿真。

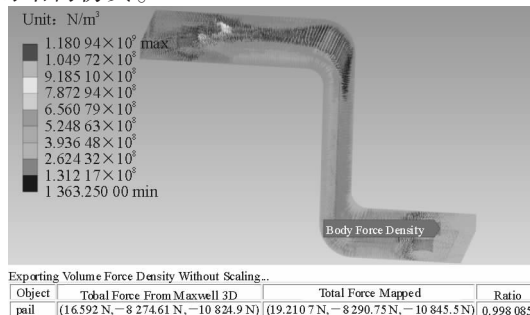


图5 导流排力密度分布

Fig. 5 Stress density distribution of diversion row

2.4 求解及后处理

通过求解, 可以计算出接地回路中导流排在短路冲击电流下的磁通密度、电流密度和单元的电动势分布, 在结构场中得出其应力结果, 其导流排距通流导体距离越近, 其所受电动力就越大, 两者之间电动力体现为斥力。通过查看应力结果, 可以看出, 原设计的结构局部应力值已经远远超出许用应力 $R_{p0.2}$ (75 MPa), 其峰值为192 MPa, 这样将无法保证导流排在短路故障时的机械强度, 导致结构变形。应力解析结果与实际验证情况的对比见图6, 因此需要对导流排进行优化改进。

3 性能分析及优化改进

接地导流排的布置型式一方面影响磁通密度的分布, 进而影响通电导体所受电动力的大小; 另

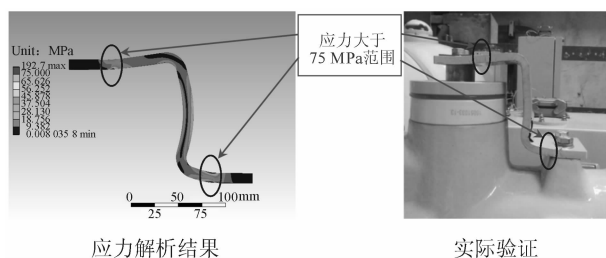


图 6 结果对照

Fig. 6 Comparison of the results

一方面,不同的布置型式下,导流排长度和固定方式的不同会导致受力情况不同^[20]。因此,为使导流排在电动力下的结构稳定性最好,需要通过合理的结构布置以满足使用要求。

通过多组布置型式的对比分析,最终给出了如图7所示的较为理想的布置方式。在该结构中,导流排距离通电导体距离较原结构更近,通过导流排力密度云图及电动力传动误差(图8)可以看出,原结构中体积力密度大部分为0.3 N/mm³,改进后结构的体积力密度大部分为0.6 N/mm³,最大值方面也有1.18 N/mm³升高至1.89 N/mm³。虽然局部电动力与峰值均有所变大,但由于导流排长度变短和固定方式的改变,使其在结构上表现出了更好的机械性能。

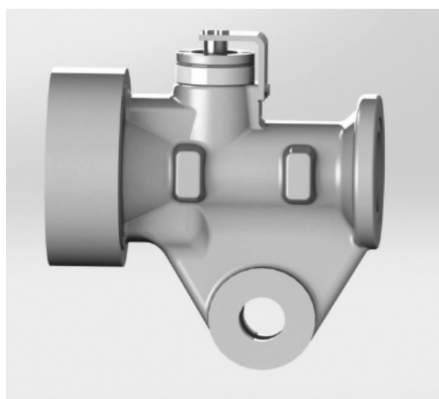


图 7 优化布置型式图

Fig. 7 Optimized layout

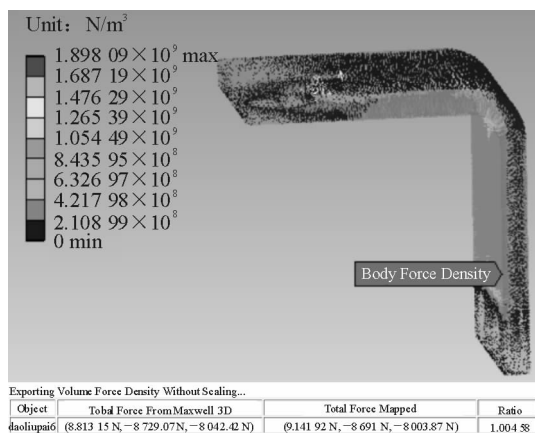


图 8 导流排力密度分布

Fig. 8 Stress density distribution of diversion row

查看电磁计算结果的电流密度分布见图9,通过电动力映射,确认误差满足要求;查看导流排最终结构强度的分析结果见图10,可见其最大值76.4 MPa,在螺栓紧固面处,且范围很小,而其余部位均远小于材料的许用应力 $R_{p0.2}$ (75 MPa),因此不会产生结构变形,满足使用要求,保证设备安全。

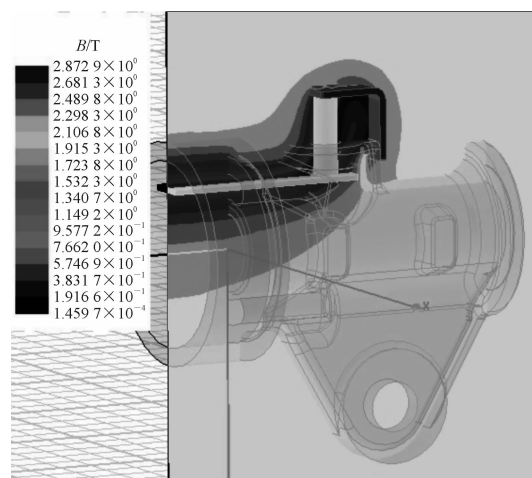


图 9 磁通密度分布图

Fig. 9 Distribution of magnetic flux density

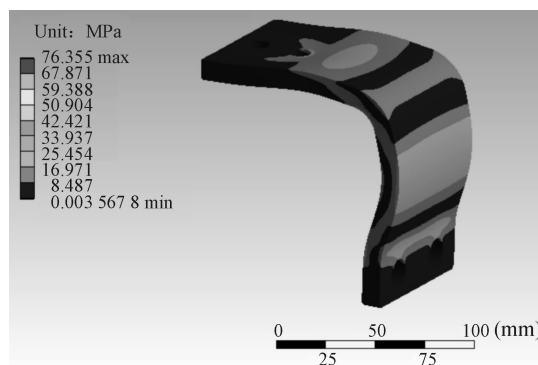


图 10 应力计算结果

Fig. 10 Calculation results of stress

4 结语

随着计算机技术的快速发展,有限元仿真技术越来越多的应用到各类电器的设计中。文中基于Ansys有限元仿真分析,建立了隔离开关接地回路的电磁—结构耦合有限元模型。在耦合场分析中能准确地计算复杂结构的电流密度和磁感应强度的分布,这都有利于电动力的准确求解和分析。在得到导流排的电流密度、磁通密度以及电动力密度分布后,将电动力作为初始条件导入结构场分析中,最终对导流排进行了结构仿真分析及优化设计。这种将有限元分析与优化设计相结合的现代设计方法,大大缩短了研发周期,提高了设计效率,降低了研发成本,保证了产品质量,有必要进行进一步的推广。

参考文献:

- [1] 邱毓昌. GIS装置及其绝缘技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
QIU Yuchang. GIS device and its insulation technology[M]. Beijing: China Water Power Press, 1994.
- [2] 周小谦. 我国电力发展与西北电力展望[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(3): 3-9.
ZHOU Xiaoqian. China's power development and the northwest power outlook[J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24(3): 3-9.
- [3] 蓝增珏. 新型500 kV金属封闭组合电器在工程中的应用及存在问题[J]. 电力设备, 2005, 6(2): 14-17.
LAN Zengjue. Application of new type of 550 kV HGIS in project and its existent problems[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(2): 14-17.
- [4] 张冠生. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
ZHANG Guansheng. Theoretical basis of electrical apparatus[M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [5] 黎 斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
LI Bin. Design of SF₆ high voltage apparatus[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [6] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
LIN Xin. Modern high voltage electrical technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [7] 刘 洁, 唐 亮. 短路电流的危害以及计算方法[J]. 科技传播, 2012, 14(4): 79-80.
LIU Jie, TANG Liang. The harm of short circuit current and calculation method[J]. Public Communication of Science & Technology, 2012, 14(4): 79-80.
- [8] 胡 冰, 张晓锋. 用有限元法计算三相矩形母线的短路电力[J]. 电气应用, 2005, 24(2): 83-85.
HU Bing, ZHANG Xiaofeng. Short-circuit force computation of three-phase busbars with rectangular cross-sections using the finite element method[J]. Electrotechnical Application, 2005, 24(2): 83-85.
- [9] 王稚惠, 郑艳明, 由佳欣, 等. 基于解析法的母线排动稳定性分析[J]. 电气自动化, 2013, 35(5): 58-60.
WANG Zhihui, ZHENG Yanming, YOU Jiaxin, et al. Dynamic stability analysis of busbar based on analytic method[J]. Electrical Automation, 2013, 35(5): 58-60.
- [10] 张洪信. Ansys有限元分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
ZHANG Hongxin. Ansys finite element analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [11] 贾 真. 铜铝复合母线排的电学性能及截面稳定性的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学硕士论文, 2004: 18-19.
JIA Zhen. Research on the electric conductivity and interfacial thermal stability of Cu/Al clad plate[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2004: 18-19.
- [12] 成思源. 有限元法的方法论[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2001, 7(4): 61-63.
CHENG Siyuan. The methodology in finite element method[J]. Journal of Chongqing University(Social Sciences Edition), 2001, 7(4): 61-63.
- [13] 李兴文, 陈德桂, 李志鹏, 等. 考虑触头间电流收缩影响的低压塑壳断路器中电动斥力分析[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 1-5.
LI Xingwen, CHEN Degui, LI Zhipeng, et al. Investigation on electro-dynamic repulsion force in molded case circuit breakers taking into account current constriction between contacts[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 1-5.
- [14] 张 凯. 基于Ansys有限元分析的电器触头系统电动力的研究[D]. 天津: 河北工业, 2006: 26-28.
ZHANG Kai. Study on electro-dynamic force of apparatus contacts based on finite element analysis of Ansys[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2006: 26-28.
- [15] 李 博. 励磁系统母线排与格力开关的动热稳定性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
LI Bo. Analysis of dynamic stability and thermostability of bus bar and disconnect switch in excitation system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [16] ITO S, TAKTO Y, KAWASE Y, et al. Numerical analysis of electromagnetic force in low voltage AC circuit breaker using 3-D finite element method taking into account eddy currents[J]. IEEE Transactions on magnetics, 1998 (34): 2597-2600.
- [17] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
FENG Cizhang, MA Xikui. Introduction to engineering electromagnetic field[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [18] GB/T 11022—2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S]. 2011.
GB/T 11022—2011 Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards[S]. 2011.
- [19] GB/T 3880.2—2012 一般工业用铝及铝合金板、带材[S]. 2012.
GB/T 3880.2—2012 Wrought aluminium and aluminium alloy plates, sheets and strips for general engineering[S]. 2012.
- [20] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 第五版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
WEN Bangchun. Machine design handbook[M]. 5th ed.. Beijing: Higher Education Press, 2010.

勾国营(1971—), 男, 工程师, 主要从事高压GIS开关产品机械结构及仿真方面的研究分析。