



Design of Subsea Power Transformer with Pressure Compensation

Lei Yang^{1,*}, Tang Guoyuan²

¹CSIC 719th Institute, Wuhan, China

²School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China

Email address:

leiyang428@163.com (Lei Yang), tgyuan@163.com (Tang Guoyuan)

*Corresponding author

To cite this article:

Lei Yang, Tang Guoyuan. Design of Subsea Power Transformer with Pressure Compensation. *Asia-Pacific Journal of Energy and Power Engineering*. Vol. 2, No. 2, 2020, pp. 5-9.

Received: June 27, 2020; Accepted: July 8, 2020; Published: July 17, 2020

Abstract: With rapid requirement for energy, off-shore production systems of oil and gas have become important in ocean engineering technology, in which subsea power transformer is an important complement equipment. Subsea power transformer operating in deep ocean should settle some key matters such as higher pressure, seal, anti-corrosion, high reliability, maintenance-free long-period. According to working environment of transformer, design method and structure are put forward in this paper. Titanium alloy is selected to form transformer case, and the pressure compensator is designed. In order to ensure the reliability and reliability of underwater transformers, various measures such as pressure compensation, sealing, temperature control, anti-corrosion, and working state monitoring are adopted. Then cabinet is analyzed using the finite element analysis software Abaqus at different water depth conditions to verify that the structural strength of the transformer cabinet meets the safety permission requirements.

Keywords: Subsea Power Transformer, Case Structure, Pressure Compensation

基于压力补偿的深海变压器结构设计

雷阳^{1*}, 唐国元²

¹中国船舶重工集团公司第七一九研究所, 武汉, 中国

²华中科技大学船海学院, 武汉, 中国

邮箱

leiyang428@163.com (雷阳), tgyuan@163.com (唐国元)

摘要: 随着国际社会对能源需求的增加, 水下生产系统也已成为深海海洋工程技术的重要组成部分, 水下变压器成为极为重要的水下生产配套设备。针对海洋深水环境水下变压器设计, 应解决结构承压、密封、防腐、高可靠性、免维护、长寿命等关键问题。本文分析了水下变压器应用环境条件, 给出了基于压力补偿的深海变压器结构设计方法和具体结构, 选用钛合金设计变压器主体箱体结构, 并针对压力补偿器进行了设计。水下变压器采用了压力补偿、密封、温度控制、抗腐蚀、工作状态监控等多种措施, 保证深海变压器的安全性和可靠性。根据应用的不同水深情况, 使用有限元分析软件Abaqus对箱体进行分析, 验证变压器箱体的结构强度满足安全许用要求。

关键词: 深海变压器, 结构设计, 压力补偿

1. 引言

随着国际社会对能源需要的增加, 世界范围内的深海油气开发活动日渐活跃。在深海开发过程中除了兴建大量的水面油气生产平台外, 水下生产系统也成为深海海洋工程技术的重要组成部分[1]。目前水下生产系统中广泛采用液压流体和电气控制的复合方式, 即复合电液控制技术[2]。而不依赖液压流体的全电控制的概念在水下生产控制系统中也具有较大的吸引力。水下全电控制技术能够提高整个水下系统的可靠性, 同时在开发成本和运行成本方面也具有一定的优势, 尤其是液压控制流体的放空或者泄漏对环境保护存在风险, 而全电控制技术能够从根本上解决这个问题。通过开发相关的水下电气设备, 可以克服目前的电力输送瓶颈。水下生产工艺设备需要较多的电力支持, 因此必须采用高压输配电的方式, 有水下电力分配设备的支持, 包括水下的电力降压变压器、中压开关柜以及变频器等设备。

高压电通过海底电缆供给, 在海底的变压器将高压电变换为适于电机使用的低压电。因此, 水下变压器成为极为重要的水下生产配套设备。水下变压器可能位于数千米深以及距离大陆数百公里远的海洋环境中, 变压器工作于极端作业环境, 如极端温度、压力、海水腐蚀等[3]。在如此的条件下, 水下变压器几乎不可能维修, 因此在适当的成本下保证水下变压器具有安全性、可靠性、长寿命、免维护的性能是极端重要的。

海洋深水环境中水下变压器的研制必须解决结构承压、密封、防腐、高可靠性、免维护、长寿命等关键问题[4]。

2. 变压器总体结构

水下变压器基本结构是将变压器安装在密封的箱体内部, 变压器和箱体之间充满绝缘油。水下变压器在深海工作过程中会承受海水压力作用。另外, 变压器损耗会以热的形式向外发散, 规格为10000/3300V的变压器在满负荷工作条件下, 损耗达11300W, 故水下变压器还承受热作用。

变压器箱体内绝缘油若有海水渗入, 将导致变压器失效。为了保证密封和可靠性, 水下变压器箱体内部压力高于外部压力, 压差要求约在0.02~0.05MPa。因此, 应保证水下变压器在压力和热作用下正常和可靠的运行。

为保证水下变压器的可靠性和工作寿命, 水下变压器采用了多种措施。

(1) 压力补偿

随着水深增加, 变压器及外壳工作压力变大, 因此水下变压器需进行压力补偿。另一方面, 热负荷的存在使绝缘油发生体积热胀冷缩。压力补偿器是保证水下变压器运行的主要措施之一, 简单的讲, 压力补偿器是一个弹性元件, 在水下变压器上同时发挥压力补偿和体积补偿作用, 并使变压器和壳间绝缘油压稍高于外部海水压力(0.05MPa)。这是水下变压器采取的主要措施[5]。

(2) 密封

海水进入将导致水下变压器失效, 因此密封是保证变压器正常工作的重要因素。水下变压器所使用的密封措施主要有焊接和橡胶密封(丁晴橡胶)。鉴于橡胶在海水中的老化难以预计, 主要的密封使用焊接保证。

(3) 温度控制

一般地, 变压器热点温度不得高于98℃, 否则会加速变压器的损坏[6]。在水下变压器的构成中, 铜线绕组、硅铁铁芯、绝缘油的导热性能较好, 而为抗腐蚀采用的钛合金外壳的导热性能较差(其导热系数约为钢的1/5), 尽管海水温度较低(5℃左右), 如果散热不良, 也会造成变压器热点温度过高。如果使用专门的散热器会造成变压器结构复杂, 使用的水下变压器主要采用变压器壳体及其外部的肋片散热。

(4) 抗腐蚀

水下变压器长期(20年)在海水中工作, 必须解决变压器外壳的抗腐蚀问题。从使用经验看, 结构钢、各种碳钢等对海水的抗腐蚀性能不是很好, 而公认钛合金的抗腐蚀性能优异[7]。因此水下变压器裸露于海水的部分均使用钛合金材料制作。为节约成本, 基座采用碳钢制造, 并采用防腐涂料加牺牲阳极的抗腐蚀方式。

(5) 工作状态监控

已有的水下变压器使用多种传感器监测变压器的工作状态, 以确保变压器处于正常工作状态。监测内容包括: 温度、压力、电压、绝缘油品质等。

综合考虑以上因素, 所设计变压器主要由变压器、箱体、压力补偿器、综合在线监测装置、输入电连接器、输出电连接器和底座组成, 如图1所示。其中变压器安装在箱体内部, 箱体内部充满变压器油; 箱体上盖安装4个波纹管式压力补偿器和监测舱, 其中压力补偿器用于补充压力和油液体积变化。变压器主次级以及监控变压器状态的传感器通过电气接插件与外部相连。使用过程中, 箱体通过下盖与底座连接。

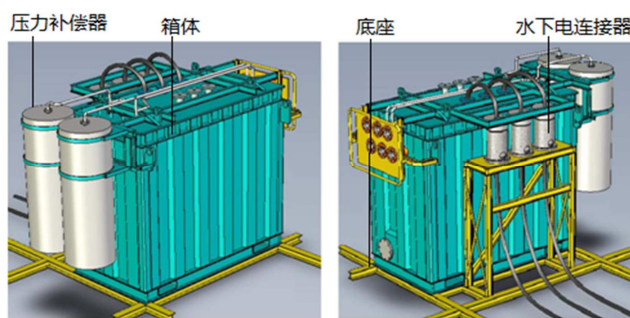
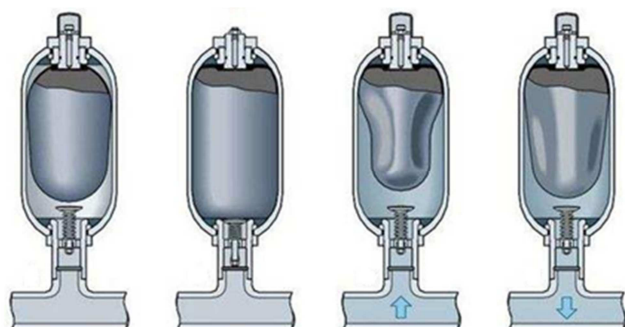


图1 水下变压器的总体结构。

3. 压力补偿器及其参数确定

压力补偿主要有四种形式: 蓄能器式、活塞式、滚动膜片式和波纹管式, 其中以波纹管式、蓄能器式采用较多[8]。这几种压力补偿方式本质上是相同的。受变压器工作稳定的影响, 变压器绝缘油的体积会发生变化, 进而使变压器内部的压力产生变化。压力补偿器就相当于弹簧, 它可以对压力进行反映, 从而适应油液体积的变化。如图2

为蓄能器式补偿器，图3为活塞式补偿器及其在变压器上的安装形式，图4为滚动膜片式补偿器[9]。



(a) 使用前状态 (b) 充气后状态 (c) 蓄压 (d) 释放

图2 蓄能器式补偿器。

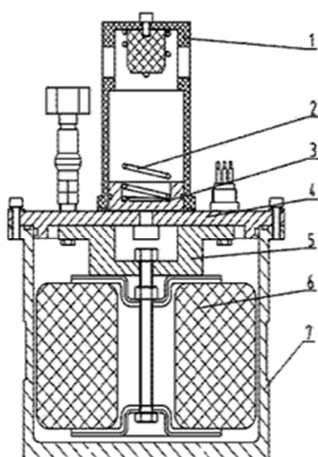


图3 活塞式补偿器。

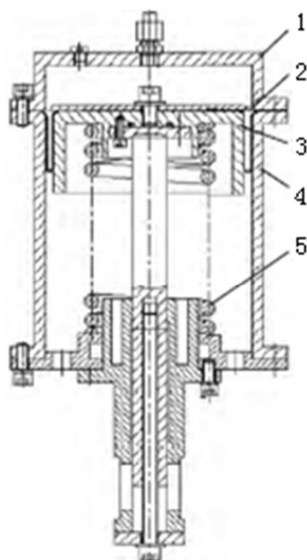


图4 滚动膜片式补偿器。

图3中，1为补偿器壳体，2为补偿弹簧，3为补偿活塞，4为端盖，5为变压器安装座，6为变压器，7为变压器壳体。图4中，1为阀帽，2为滚动膜片，3为膜片滑盘，4为补偿器壳体，5为弹簧。

上述3类补偿器中，普遍认为使用橡胶的蓄能器式和滚动膜片式在海水中的老化程度难以预计[10]。而活塞式补偿器由于在活塞与缸体间存在往复运动，在深海恶劣环境下，其可靠性难以得到保证。而使用钛合金的波纹管式压力补偿器，其材料的抗海水腐蚀性能好，也不存在部件的相对滑动，因此其工作寿命和可靠性更容易得到保证[11]。如图5为波纹管式补偿器示意图。

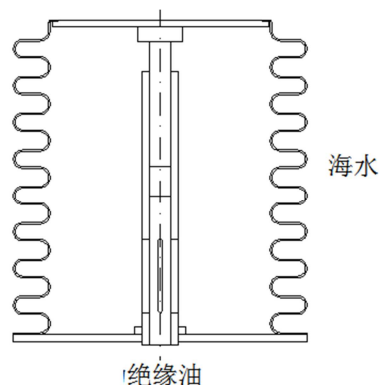


图5 波纹管补偿器。

在波纹管补偿器中，其内部空间与变压器内部空间是相通的，绝缘油充满这一相互连通的密闭空间，并由波纹管以及变压器壳体与海水隔绝，补偿器没有相对作滑动的部件。当海水压力变化时，波纹管本身的弹性使其可发生伸缩，使得密闭空间的体积发生变化，从而保持内外压力的平衡。

考虑到对波纹管伸缩性的要求，其刚度不能太大，一般采用焊接波纹管来制作压力补偿器，波纹管壁厚较薄（0.5mm以下），刚度小，位移量大。焊接波纹管的压缩位移约为自由长度的70%，拉伸位移为自由长度的20%，寿命高于10万次。由于波纹管的压缩比高，在水下变压器中起压力和体积补偿作用的波纹管适宜于工作于压缩状态，且要求刚度小，工作寿命长，因此仅从体积补偿角度看，焊接波纹管适于作为水下变压器的补偿器。如图6 是焊接成形的波纹管。

(1) 压力补偿

通过控制水下变压器箱体内部的充油量大小，压力补偿器产生适当变形位移，使箱体内部的油压与箱体外部压力和压力补偿器弹性力（两者方向一致）之和平衡，这样可使得水下变压器箱体内部压力高于外部压力。



图6 焊接波纹管。

合适的压力补偿器的弹性刚度和充油量, 可使箱体内外压差控制在0.02~0.05MPa范围内。当外部压力变化时, 油液体积微小的变化, 可重新使箱体内外压力达到平衡, 压差会有微小的波动。因此压力补偿器使箱体内外压力随时跟随外部压力变化, 并保证要求的压差。

(2) 体积补偿

尽管绝缘油的体积热膨胀率较小, 约为0.00075左右, 但当油体积较大时, 这种由于温度变化引起的油液体积变化不可忽略。在变压器非运行状态和满负荷运行状态之间, 绝缘油温差较大, 两种状态下的油体积变化较大。当油体积变化时, 压力补偿器变形以容纳油体积变化。否则, 箱体将承受很大的压力, 箱体将发生过大变形甚至开裂。

所涉及水下变压器箱体内腔尺寸为1220×500×1196mm, 体积约为730L。变压器体积约275L, 则变压器内油液体积不大于455L。

由于变压器的功率损耗, 在变压器使用过程中受温度影响油液体积会发生变化。油液体热膨胀系数为0.00075, 经热仿真计算, 在温度从0到60℃的变化过程中, 变压器内油液体积变化量约为25L。

波纹管应能适应油液体积变化并保证油液压力高于海水压力0.02-0.05MPa。焊接式波纹管刚度估计公式如下[12]:

$$k = \frac{\pi \cdot E \cdot t^3 (D_i + D_o)}{2nW} \frac{D_o}{D_i} \quad (1)$$

其中, E 为弹性模量(MPa), t 为壁厚, W 为波纹片宽, D_i 为内径, D_o 为外径, n 为波纹数。

令海水压力为 P_w , ΔP 为油液与海水压差, 波纹管刚度系数为 k , 波纹管压缩量为 x 。截面积为 A 的波纹管的压力平衡方程为:

$$P_w A + kx = (P_w + \Delta P)A \quad (2)$$

波纹管压缩行程 x 由油液体积变化 ΔV 决定, 即 $x = \frac{\Delta V}{A}$ 。对(2)整理有

$$\Delta P = \frac{k}{A} x \quad (3)$$

波纹管位移量不同, 压差也不同。将波纹管刚度系数视作常值, 则有

$$\Delta P = \frac{k}{A^2} \Delta V \quad (4)$$

显然油液与海水压差 ΔP 与油液体积的变化 ΔV 成正比。如果波纹管刚度高, 则当油液体积变化大时, 油液内的压力会较大, 会对箱壳产生不利影响, 因此波纹管的刚度应很小。如图7为波纹管刚度为 $K=34\text{N/mm}$ 和 68N/mm 时, 油液体积变化与压力之间的关系。显然当 $K=34\text{N/mm}$ 时能满足压差范围的要求。

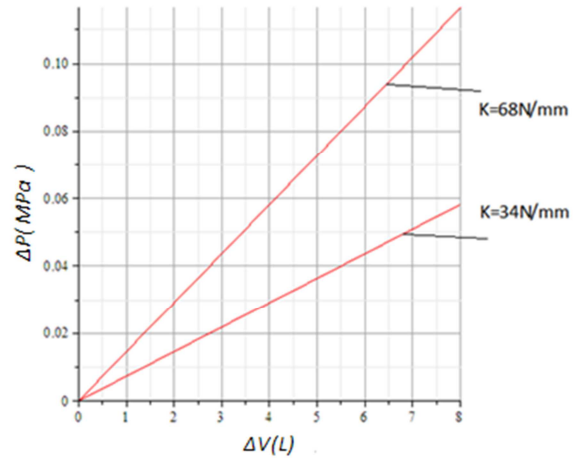


图7 补偿器内外压差、体积变化与刚度的关系。

根据上述分析计算, 当 $D_o=310$, $D_i=240$, $t=0.5$, $n=83$, 波纹管自由长度

$H=200$, 波距为2.4, 采用Ti-6AL-4V钛合金时, 波纹管刚度系数约为 35.5N/mm 。

使用4个波纹管补偿器, 单个补偿6.25L绝缘油体积变化。采用焊接波纹管, 补偿工作于压缩状态。波形为双S型, 波纹管口安装过滤网过滤海水中的杂质, 波纹管补偿器的安装位置如图1所示。

4. 结构计算

由于波纹管补偿器的预压作用, 可以保证在不同水深情况下, 变压器箱体内部的压力高于海水压力0.02-0.05MPa[13], 据此计算变压器箱体的结构强度, 要求安全系数1.2。变压器封闭箱体采用钛合金材料TC4[14], 箱体板材厚度为6mm。

根据不同的使用情况, 使用有限元分析软件Abaqus对箱体进行分析[15]。计算时分别考虑变压器竖直放置和倾斜放置两种情况。应力和变形如图8所示为内外压差为0.05MPa时, 箱体的应力计算情况。

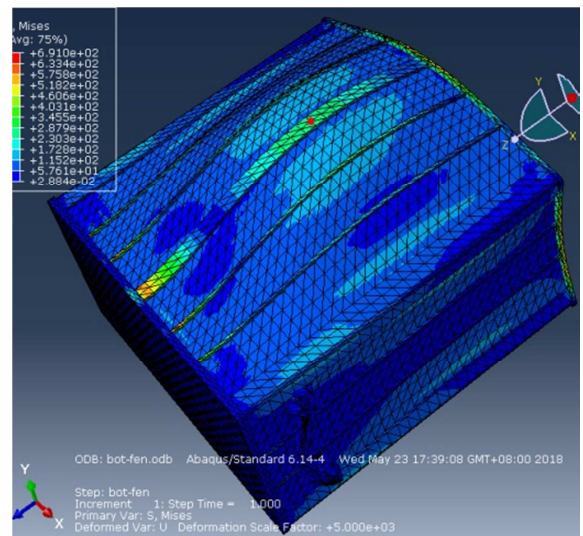


图8 内外压差0.05Mpa时的应力。

计算结果可用如下表1表示，满足安全许用要求。

表1 强度及变形计算结果。

序号	压力/Mpa	最大应力/Mpa	最大变形/mm	安全系数
1	0.02	276.9	0.0145	3.10
2	0.05	691.4	0.0364	1.25

5. 结论

本文针对海洋深水环境水下变压器设计，为解决结构承压、密封、防腐、高可靠性、免维护、长寿命等关键问题。本文分析了其应用环境条件，给出了基于压力补偿的深海变压器结构设计方法，给出了深海变压器的具体结构组成。分析了压力补偿器的设计方法，在此基础上选用钛合金设计变压器主体箱体结构，保证了其安全性和可靠性。

致谢

感谢“十三五”国家科技重大专项“水下生产技术（项目编号：2016ZX05028-003）”给予资金的支持。

参考文献

- [1] 陈家庆.海洋油气开发中的水下生产系统(一)[J].石油机械, 2007, 35(5):54-58.
- [2] 金秋, 张国忠.世界海洋油气开发现状及前景展望[J].国际石油经济, 2005, 13(3):43-44.
- [3] 李志刚 安维崢.我国水下油气生产系统装备工程技术进展与展望[J].中国海上油气,2020,32(02):134-141.
- [4] 郑相周, 唐国元, 罗红汉.深水液压系统压力补偿器的分析与设计[J].液压与气动, 2014(7):96-98.
- [5] 丁雪兴, 王悦, 刘雪岭,等.机械密封焊接波纹管波片的应力计算及分析[J].兰州理工大学学报, 2008, 34(1):58-60.
- [6] 陈军, 赵永庆, 常辉.中国船用钛合金的研究和发展[J].材料导报, 2005, 19(6):67-70.
- [7] 赵腾伦.ABAQUS 6.6在机械工程中的应用[M].中国水利水电出版社, 2007.
- [8] 成大先.机械设计手册（第2卷）[M].北京:化学工业出版社, 2008.
- [9] 李志刚,贾鹏,王洪海,等.水下生产系统发展现状和研究热点[J].哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(5):944-952.
- [10] 孟庆鑫,王茁,魏洪兴,等.深水液压动力源压力补偿器研究[J].船舶工程,2000, (2):39-41.
- [11] 武聪敏. 面向水下生产设施关键零部件的工艺技术研究[D].天津: 天津大学, 2014.
- [12] 周守为.中国海洋石油开发战略与管理研究[D].成都: 西南石油学院,2002.
- [13] SHEN. Diagnosis of Inter-turn Fault in Transformers Based on the Change of Leakage Magnetic Field[A]. Science and Engineering Research Center. Proceedings of 2016 International Conference on Power, Energy Engineering and Management (PEEM 2016)[C].Science and Engineering Research Center,;2016:6.
- [14] Imre L. Determination of the Steady State Temperature in Naturally oil Cooled Disc Type Transformers [J]. IEEE Trans on Power Delivery,2008,10(2):123-128.
- [15] 魏澈,李强,洪毅,等.流花16-2油田电潜泵长距离供电系统仿真分析[J].中国海上油气, 2018,30(04):190-195.