

浅谈 110 kV 全地下变电站主变压器的选型

赵柳

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]随着社会经济的迅速发展,全地下变电站逐渐在城市 110 kV 及以上电网建设中应用,其中主变压器的选型是全地下变电站重点考虑问题。[方法]文章详细介绍了植物油变压器和 SF₆ 气体变压器的特点和应用。比较分析了普通矿物油变压器、植物油变压器、SF₆ 气体变压器的优缺点。[结果]研究表明:SF₆ 气体变压器用地面积小,防火性能好,适合 110 kV 全地下变电站主变压器的选型。[结论]研究结果为全地下变电站变压器选型提供了良好思路。

关键词: 地下变电站; 植物油变压器; SF₆ 气体变压器

中图分类号: TM63; TM415

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0046-06

Introduction to the Selection of Transformer in 110 kV Fully Underground Substation

ZHAO Liu

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] With the rapid development of social economy, the underground substation gradually applied in the city 110 kV and above power grid construction, the selection of the transformer which is central to the underground substation. [Method] In this paper, the characteristics and application of vegetable oil insulated transformer and SF₆ gas insulated transformer were introduced in detail. The advantages and disadvantages of mineral oil insulated transformer, vegetable oil insulated transformer and SF₆ gas transformer were analyzed. [Result] The results show that SF₆ gas transformer has small land area, good fire resistance, and is suitable for the selection of main transformer of 110 kV underground substation. [Conclusion] A good design idea for the selection of transformer in underground substation applications is provided as well.

Key words: underground substation; vegetable insulating oil insulated transformer; SF₆ gas insulated transformer

随着社会经济的迅速发展,在城市中心区,由于房地产的开发和旧城改造,大量的商业区、高级住宅区越来越多地出现在城市中心区域,造成供电负荷的激增,使深入市中心的变电站越来越多。利用地下空间建设地下变电站以提高土地利用效率,同时又能较好地改善城市景观,使变电站与城市环境相协调,不失为一种新的途径和可行的思路。本文以 110 kV 全地下变电站、变压器容量为 63 MVA 为例,分析比较普通矿物油绝缘变压器、植物油绝缘变压器、气体绝缘变压器之间的优缺点。

1 普通矿物油绝缘变压器

目前国内生产及应用的油浸式变压器使用的绝

缘油大部分满足 GB 2536 标准规定的 10#, 25#和 45#矿物变压器油,GB 2536 规定矿物变压器油的闪点不低于 135 °C。普通矿物油绝缘变压器应用十分广泛和成熟,此文不再赘述。

2 植物油变压器

2.1 植物油变压器概述

IEC 1100 按照变压器油的燃点和净燃值对其分类:将燃点小于或等于 300 °C 的变压器油归为 Class 类;燃点大于 300 °C 的变压器油归为 Class K 类。其中燃点大于 300 °C 的变压器油就是所谓的高燃点变压器油或者叫阻燃型变压器油^[1]。

高燃点变压器油主要包括硅油、大分子的烃类油、合成酯和植物油四大类。在几种高燃点变压器油中,植物油是价廉和最容易生物降解的产品,同时由于植物油的阻燃性,还可以减小变压器在安装时的防火距离。FM(Factory Mutual)的 Loss Preven-

收稿日期: 2017-11-8 修回日期: 2018-1-22

基金项目: 中国能建广东院科技项目“500 kV 全户内变电站设计研究”(EX03631W)

tion Data^[2] 对户外绝缘液体户外变压器与建筑物和电气设备之间的间距的规定，如表 1 和表 2 所示。

表 1 变压器与建筑物之间的距离

Tab. 1 The distance between the transformer and buildings

液体	FMRC 许可的 变压器	液体 容积/ (USgal · m ⁻³)	水平距离			垂直 距离/ (ft · m ⁻¹)
			耐火 建筑物	不燃 建筑物/ 建筑物/	可燃 建筑物/ 建筑物/	
高 燃 点 油	是	N/A	3 (0.9)	3 (0.9)	3 (0.9)	5 (1.5)
		≤1 000 (3.8)	5 (1.5)	5 (1.5)	25 (7.6)	25 (7.6)
	否	>1 000 (3.8)	15 (4.6)	15 (4.6)	50 (15.2)	50 (15.2)
		<500 (1.9)	5 (1.5)	15 (4.6)	25(7.6)	25 (7.6)
普 通 矿 物 油	否	500 ~ 5 000 (1.9 ~ 19)	15 (4.6)	25 (7.6)	50 (15.2)	50 (15.2)
		>5 000 (19)	25 (7.6)	50 (15.2)	100 (30.5)	100 (30.5)

表 2 变压器与电气设备之间的距离

Tab. 2 The distance between the transformer and other electrical equipment

液体	FMRC 许可的 变压器	液体容积/ (USgal · m ⁻³)	距离/ (ft · m ⁻¹)
高 燃 点 油	是	N/A	3(0.9)
	否	≤1 000(3.8)	5(1.5)
		>1 000(3.8)	25(7.6)
普 通 矿 物 油	否	<500(1.9)	5(1.5)
		500 ~ 5 000(1.9 ~ 19)	25(7.6)
		>5 000(19)	50(15.2)

植物油变压器外形结构与矿物油变压器外形结构相同。

2.2 植物油变压器特点

2.2.1 绿色环保

基于可再生资源，降解速度快，降解效率高，无毒无害，不含任何石油、卤素、硅树脂

植物绝缘油一般是由油料作为的种子，增加部分添加剂而生产的，它是绿色变压器油，该绝缘油 21 d 降解率超过 98%，不会对环境对人体健康造成危害。该绝缘油由食用植物油和食品级性能增加添加剂配置而成，无毒，其燃烧的产物只有 CO₂ 和 H₂O，因此植物油是可以被重新利用回收的。本身可以被完全生物降解，其生物降解速率达到美国环保署(EPA)标准参考材料的要求，被 EPA 认为是“完全可生物降解”材料。并且植物油还通过了

96 h 1 000 mg/kg 的急性水生毒性标准测试，这更充分证明了植物油是无害的^[3]。

2.2.2 良好的耐热性

能提高设备过载能力，同时延长设备寿命。

根据 IEC 高温绝缘系统标准 IEC 60076—14，标准中变压器矿物油热点限值为 110 °C，线圈温升限值 65 K，这限制了变压器的负载能力，如图 1 中色圆圈位置所示。

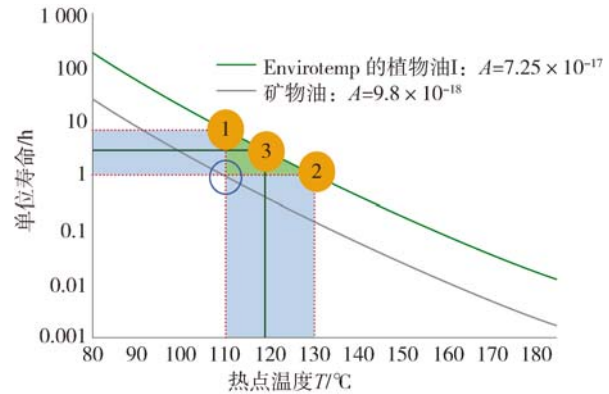


图 1 热改性绝缘纸运行温度与寿命曲线

Fig. 1 Curve of the hottest spot temperature and per unit of normal life

$$\text{Life}(T) = A \cdot e^{\frac{15000}{T+273}} \quad (1)$$

如图 1 所示，由植物油所组成的绝缘系统可以耐受比标准高 20 °C 的高温，即热点限制为 130 °C，不影响变压器寿命(见图 1 中标注②)；若在 110 °C 运行时，可以延长变压器寿命(见图 1 中标注①)；当然长期在 120 °C 运行时，可以提高变压器的过载能力，也可以延长设备寿命(见图 1 中标注③)。

2.2.3 植物油难燃性

降低火灾风险，还可以减少变压器安装时的防火距离。

植物绝缘油闪点、燃点远高于矿物油，能够抑制局部放电。像常用库伯植物绝缘油的燃点为 360 °C，闪点(330 °C)，ABB 的 BIOTEMP 植物绝缘油的燃点为 360 °C，闪点为 340 °C，均远高于美国电气规范(NFC)所规定的最低燃点(300 °C)。而且植物油被 FM Global 检测试验室归为阻燃油，因此在任何场合使用植物油变压器，发生火灾和爆炸的风险，远低于传统变压器，而且也可以在室内取代干式变压器。

由于植物油的阻燃性，在布置变压器时可以省去喷淋系统和防火墙，从而减少了建筑物之间的距

离,如图2、图3所示。

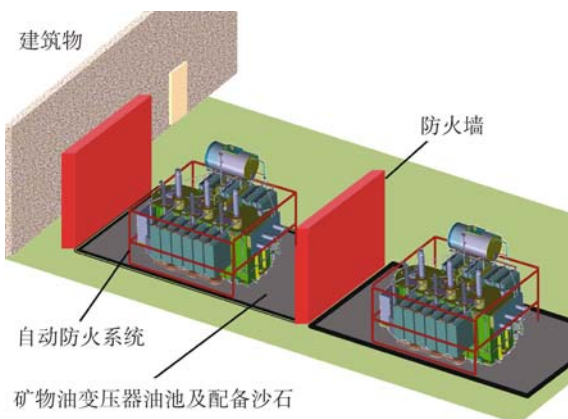


图2 矿物油变压器布置

Fig. 2 Layout of mineral oil insulated transformer

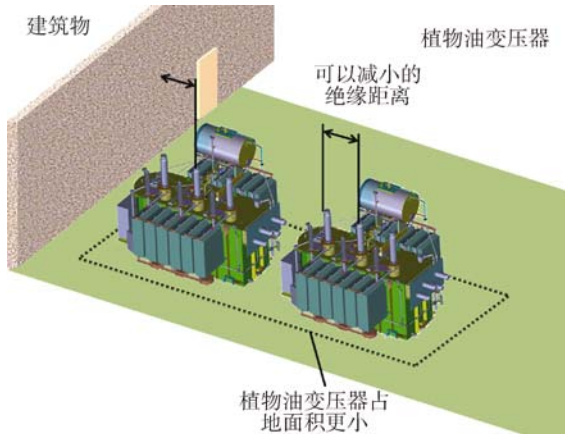


图3 植物油变压器布置

Fig. 3 Layout of vegetable oil insulated transformer

2.2.4 植物油性能优异

具有延缓绝缘老化和水分对油的耐压性能的影响小的特性。

在变压器的正常运行过程中,其内绝缘主要由矿物油和绝缘纸或绝缘纸板构成的复合绝缘组成。由于绝缘纸和绝缘纸板的无法更换,因此变压器的使用寿命主要由绝缘材料决定。而在常规变压器中,矿物油为碳基绝缘油,在变压器运行会促使导线和开关触点的焦化,加快绝缘材料的老化,进而使变压器的使用寿命大大下降。

2.3 植物油变压器油应用

自20世纪90年代以来,植物绝缘油研究成果较多。植物变压器油的产品主要有Cooper公司生产的FR3油^[4]。植物绝缘油主要来源于大豆、菜籽、山茶籽和橄榄等油料种子。其高燃点、可再生、无毒害和可完全降解的优点,对水源和土壤等

不会造成环境污染,特别适合应用在水力发电厂或海上升压站等。

植物油纸绝缘中油纸组合可有效延缓绝缘的老化寿命,延长油纸绝缘的寿命。通过良好的变压器设计与运行维护,植物绝缘油能大大提高变压器的过负荷能力,可在过负荷条件下长期运行而不影响变压器的寿命和性能,从而降低变压器全寿命周期成本^[5]。

此外,植物绝缘油用于高燃点变压器的制造,不仅环保性能好,并且价格更低。目前,已有超过100万台植物油变压器应用在配电领域,并获得了良好的工程实例,正逐步开始应用于大型电力变压器中。德国西门子制造的420 kV变压器已经在2013年在网运行。

3 SF₆ 气体绝缘变压器(GIT)

3.1 SF₆ 气体绝缘变压器概述

SF₆ 气体变压器与常规油浸式变压器相比,最简单、最直接的区别是充入变压器内的绝缘和冷却介质是SF₆ 气体而非绝缘油。众所周知,SF₆ 气体具有无毒、无气味、不易燃烧的特点,具有杰出的绝缘性能。其应用已有百年历史,主要用于电力工业中,SF₆ 气体的作用主要为绝缘、灭弧和冷却,目前主要用于SF₆ 断路器、GIS设备、SF₆ 绝缘输电管线、SF₆ 变压器及变电站,80%用于高、中压电力设备^[6]。

随着城市化进程的加快、区域电力消费的增加,大量变电站在地下建设,如商业建筑、公园和公共空间下面。而地下变电站最重要的因素是安全和高度预防火灾事故,解决大城市中急剧增长的电力需要,采用气体绝缘变压器是较好的解决方案。

3.2 SF₆ 气体绝缘变压器特点

与常规油浸式变压器相比,SF₆ 气体变压器具有良好的阻燃和阻爆特性,因此可降低变压器结构所需的绝缘尺寸,减少传统油变必须的储油池和防火设施,特别适合城市人口密集区、地下变电站或者环保要求严禁有泄漏的区域。

另外,由于SF₆ 气体密度大概是矿物油的1/60,凭借这一优势,气体绝缘变压器的散热器可以实现多种布局,不受距离限制。这种灵活的布局是无法在油浸式变压器上实现的。

SF₆ 气体变压器自身具有以下特点:

1) 阻燃性

SF_6 气体变压器采用 SF_6 气体作为绝缘和冷却介质。 SF_6 气体也是惰性气体, 其密度是空气的 5.1 倍, 其不易燃的化学特性, 使得 SF_6 气体变压器一旦发生故障时, 不会爆炸并不起火燃烧, 无火灾危害。因此, 节省了消防设备、变压器储油池和变压器室的投入。

2) 阻爆性

由于气体的特性导致箱体内部故障时箱体上升压力对于变压器箱体耐受压力较小, 变压器内部故障时箱体不爆, 能确保变电站内设备安全。

3) 紧凑性

与油浸式变压器相比, SF_6 气体变压器的绝缘特性决定其不需要以下附属设施: 储油柜、消防及报警系统、油栅及油池、防火墙、地下水槽、地下储油池等^[7]。变压器间可减少顶部高度。 SF_6 气体变压器与油浸变压器附属设施对比如图 4、图 5 所示。

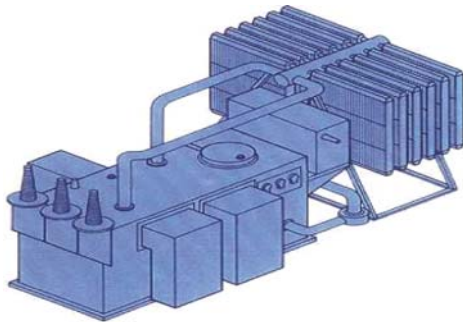


图 4 气体变压器附属设施

Fig. 4 Ancillary facilities of SF_6 gas insulated transformer

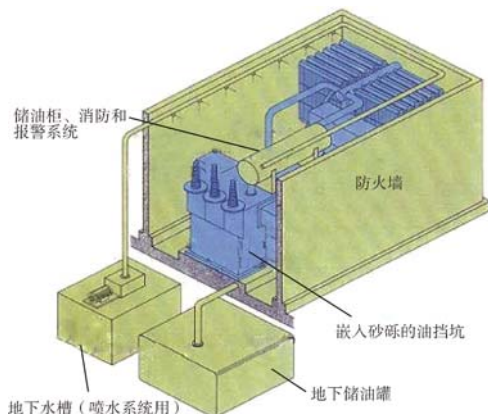


图 5 油浸变压器附属设施

Fig. 5 Ancillary facilities of oil insulated transformer

4) 与 GIS 接口便利

SF_6 气体变压器与 GIS 设备均采用 SF_6 气体绝缘, 因此两种设备可通过 GL(气体绝缘母线) 进行连接。

布置 SF_6 气体变压器和 GIS 设备时可将其组合布置在一个房间, 可以减少整个变电站的建筑面积, 降低变电站安装高度要求, 实现变电站紧凑型设计, 节省内部结构造价。

5) 与油浸式变压器结构相比, 气体变压器的冷却装置布置更具灵活性

SF_6 气体绝缘变压器除了绝缘材料和冷却介质外, 其他组成与油浸式变压器基本一致, 因此, 传统油浸式变压器的经验和技術可以用到 SF_6 气体变压器的设计、制造和维护中。

与油浸式变压器类似, 采用 SF_6 气体循环冷却的散热方式时, 要根据变压器容量大小的不同, 分别采用内部 SF_6 气体自然循环散热器的外部自然冷却方式 (GNAN)、变压器箱体内部 SF_6 气体强迫循环、散热器外部自然冷却方式 (GFAN)、外加风扇的强迫空气冷却 (GFAN) 和强迫水冷 (GFWF)。由于气体变压器没有储油柜, 空间利用率高, 变压器片散可以安装在变压器同层, 也可以安装在异层, 甚至在建筑物顶层, 特别适用于地下变电站增容改造。由于顶部 SF_6 气体压力可以低到忽略, 冷却设备可以布置到 SF_6 气体绝缘变压器上部^[8], 在布置冷却器或散热器时 SF_6 气体绝缘变压器有较大的灵活性。变压器和散热片可以布置在同层, 如图 6 所示, 也可以错层布置, 如图 7 所示, 甚至散热器可以安装在距离较远的楼层顶部, 如图 8 所示。

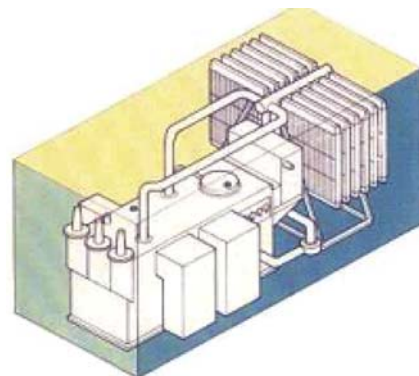


图 6 变压器本体与散热片同层布置

Fig. 6 Transformer and heat sink arranged in the same layer

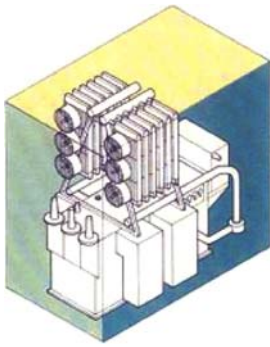


图7 变压器本体与散热片错层布置

Fig. 7 Transformer and heat sink arranged in different layers

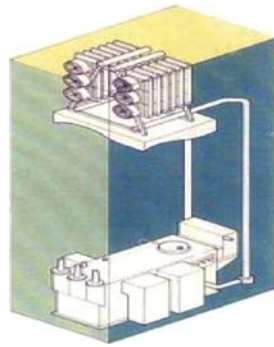


图8 散热片布置在楼层顶部

Fig. 8 Heat sink arranged in the top of floor

6) 无油化, 减少对环境污染

与普通油浸式变压器相比, SF_6 气体变压器无变压器油泄露、污染等问题, 实现电站设备的“无油化”, 减少对环境的污染。

3.3 气体变压器油的应用

SF_6 气体变压器自上世纪 60 年代以来在日本、欧洲应用及开发较为广泛, 在日本、我国香港和内地, 110 kV SF_6 气体变压器在地下变电站以及人口密集、场地狭窄、防火要求高的失去变电站等场所使用广泛。10 ~ 22 kV SF_6 气体变压器在香港、新加坡等市场已经较为广泛应用, 66 ~ 132 kV 气体变压器也在国内外特殊场合广泛应用。

自 1999 年我国引进气体绝缘变压器, 目前国内变压器厂已具备 110 kV 气体变压器的生产和研发能力。我国已经在北京、上海、深圳、广州等地区的地铁、地下变电站领域中应用。2015 年我国在上海世博会首次使用了 500 kV SF_6 气体变压器^[9-12]。

4 三种变压器比较分析

文中上述的三种变压器应用都很广泛, 本文针

表3 三种变压器参数对比表

Tab. 3 Comparison of three types of transformer parameters

比较项目	矿物油变压器	植物油变压器	SF_6 气体变压器
介质	普通矿物油	高燃点油	SF_6 气体
绝缘材料耐热等级	A 级(105 ℃以上)	300 ℃及以上	E 级(120 ℃以上)
冷却方式 ^①	ONAN/ONAF	ONAN/ONAF	GNAN/GDAF
散热器布置 ^②	1F(同层高度)	1F(同层高度)	1F、2F...(跃层)
油枕	需要	需要	不需要
消防设施	需要	不需要 ^③	不需要
地下储油设施	需要	不需要 ^③	不需要
环境保护	一般	好(植物油无毒无污染, 可完全生物降解)	良(SF_6 为无毒气体)
防爆	一般	良	良
维护保养	良	良	一般
防火性	一般, 需要满足防火距离, 户内布置时需要设置防火墙	优, 植物油为难燃介质, 户内布置时不需设置防火墙 ^③	优, SF_6 气体是不燃性气体, 户内布置时不需设置防火墙, 所以气变的防火、防灾性能是最好的
设备占地面积	63 MVA 油浸式变压器占地约为 11.0 × 10.0 m	与油浸式变压器相当, 但无需另设消防设备	较同容量、同电压等级的油浸式变压器大, 但无需另设消防设备
设备高度	63 MVA 油浸式变压器高度约为 5.5 m	与油浸式变压器相当	气体变压器由于没有储油柜, 故相对油浸变压器而言, 可使其高度降低 20%
散热性	较好	较好	SF_6 气体的散热冷却能力较变压器油要差
噪声	一般	一般	GIT 的本体噪声可较油浸变压器平均降低 3 dB 左右, 但是风机的噪声较大
过负荷能力	较好, 105% ~ 110% 长期过负荷能力	好, 120% ~ 130% 长期过负荷能力	好, 120% ~ 130% 长期过负荷能力
运行经验	广泛应用	欧美国家应用广泛; 国内主要应用在配网领域, 110 kV 及以上电网中运行经验少, 同时国内也缺少相关支持的规范文件	日本、欧洲使用广泛; 国内主要应用在北京、上海、深圳等城市, 运行经验少
设备价格	以矿物油变压器为基准	1.2 ~ 1.5 倍	3 ~ 4 倍

注: ①冷却方式对应的 SF_6 热容量小; ②散热器布置对应的 SF_6 密度低; ③FM 规定了植物油变压器与建筑物和电气设备之间距离, 国内目前暂无对植物油变压器有专门的规范规定, 很多地方仍按照普通矿物油变压器相关规定进行验收校验, 本文是按照 FM 的 Loss Prevention Data 考虑, 植物油变压器不设置消防设施和防火墙。

对三种变压器的外形结构、冷却型式、防火防爆特性、环境适应性、占地等特性进行对比分析。如表3所示。

5 结论

通过普通矿物油变压器、植物油变压器、SF₆气体变压器的性能比较得到以下结论:

1)从防火防爆方面考虑,全地下变电站主变压器不建议选择普通矿物油变压器。

2)植物油变压器为阻燃型变压器,具有耐燃、阻爆、可降解的特点,根据IEC对阻燃型变压器的要求,不需要设置防火墙和油池,也无需设置自动灭火装置,可节省变压器室的布置空间;设备价格适中;在欧美国家应用较为广泛。

在我国植物油变压器目前只应用于低电压等级的配网变压器,在高电压等级的应用尚不成熟,生产厂家也不多,也没有相应的规程规范支撑,全地下变电站暂不建议采用。

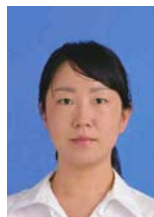
3)SF₆气体变压器具有阻燃、阻爆、无油化的特点,不需设置消防设施如防火墙和事故油池等,也无需设置自动灭火装置,可节省变压器室的布置空间,但是设备价格高昂。

综上所述,110 kV全地下变电站一般建设在人口密集、建筑密度大的商业、经济、文化中心,可以减少占地、节约土地资源,同时又能较好地改善与周边环境的协调性。因此全地下变电站对于用地面积和防火要求都比较高。因此,根据技术经济比选,可以选择使用SF₆气体变压器。

参考文献:

- [1] 韩金华,韩筛根,王思宝,等.一种基于高燃点植物绝缘油变压器设计方法[J].变压器,2014,51(8):38-42.
HAN J H, HAN S G, Wang S B, et al. Transformer design method based on high ignition point vegetable insulation oil [J]. Transformer, 2014, 51(8): 38-42.
- [2] National Fire Protection Association. National Electrical Code [S]. New York U. S.: One Batterymarch Park Quincy, Massachusetts, 2005.
- [3] 杨涛,寇晓适,王吉,等.电力变压器用植物绝缘油微水特性[J].变压器,2016,53(11):38-40.
YANG T, KOU X S, WANG J. Characteristics of moisture content in vegetable insulating oil for power transformer [J]. Transformer, 2016, 53(11): 38-40.
- [4] 蒋国柱,赵玉贞,谢宇,等.高燃点变压器油的性能与用途[J].合成润滑材料,2010,37(8):33-34.
JIANG G Z, ZHAO Y Z, XIE Y, et al. Characteristics and applications of high burning point transformer oil [J]. Synthetic
- [5] Lubricant, 2010, 37(8): 33-34.
李剑,姚舒瀚,杜斌,等.植物绝缘油及其应用研究关键问题分析与展望[J].高电压技术,2015,47(2):353-363.
LI J, YAO S H, DU B, et al. Analysis to principle problems and future prospect of research on vegetable insulating oils and their applications [J]. High Voltage Engineering, 2015, 47(2): 353-363.
- [6] 涂昊曦,戴志勇,李辉,等.220 kV/20 kV SF₆气体变压器技术参数和试验技术研究[J].变压器,2015,52(12):19-25.
TU H X, DAI Z Y, LI H, et al. Research on 220 kV/20 kV SF₆ gas transformer technical parameters and test technology [J]. Transformer, 2015, 52(12): 19-25.
- [7] 殷雪莉.SF₆气体变压器布置方案的研究[J].电力勘测设计,2016(5):61-66.
YIN X L. Discussion on layout of SF₆ gas insulated transformer in substation [J]. Electric Power Survey & Design, 2016(5): 61-66.
- [8] 赵云,郑明,郑建伟.海上升压站主变压器冷却方式选择[J].南方能源建设,2015,2(3):91-94+100.
ZHAO Y, ZHENG M, ZHENG J W. Selection of main transformer cooling system in offshore substation [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 91-94+100.
- [9] 邹俭,林俊.大型地下变电站运行问题分析及对策措施[J].华东电力,2007,35(11):64-67.
ZOU J, LIN J. Operational problems for large underground substations and relevant countermeasures [J]. East China Electric Power, 2007, 35(11): 64-67.
- [10] 刘贝宁,沈婷.500 kV静安(世博)地下变电站站用配电系统及辅助系统设计[J].电力建设,2008,29(7):15-19.
LIU B N, SHEN T. Design of auxiiary distribution system and its auxiliary systems for the 500 kV world-expo underground substation [J]. Electric Power Construction, 2008, 29(7): 15-19.
- [11] 陈宝运.500 kV静安(世博)地下变电站水工设计特点[J].电力建设,2008,29(7):12-14.
CHEN B Y. Hydraulic design features of 500 kV jing'an (world exposition) substation project [J]. Electric Power Construction, 2008, 29(7): 12-14.
- [12] 沈婷,乐党救.500 kV静安(世博)地下变电站设计方案[J].电力建设,2008,29(7):8-11.
SHEN T, LE D J. Design on 500 kV large underground substation design scheme [J]. Electric Power Construction, 2008, 29(7): 8-11.

作者简介:



ZHAO L

赵柳(通信作者)

1983-,女,陕西西安人,高级工程师,硕士,主要从事变电站电气一次设计研究的工作(e-mail) zhaoliu@ge-di.com.cn。

(责任编辑 高春萌)