

余涛 唐国保 徐承业 董其国 编

干式电力变压器 技术与应用



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

干式电力变压器 技术与应用

技术与应用

余涛 唐国保 徐承业 董其国 编

永明 唐白休 陈永一 王六白 端



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书共 8 章, 主要内容包括干式电力变压器的发展、干式电力变压器的类型与特点、干式电力变压器技术与制造工艺、干式电力变压器选型、干式电力变压器试验、干式电力变压器安装与运行维护、常见故障处理及注意事项和干式电抗器等。

在系统阐述干式电力变压器基础问题的同时, 本书还引用了一些技术经验和典型案例。通过本书的学习, 读者可了解和认识干式电力变压器的发展情况、技术特点、制造工艺、选型要求、安装、运行、维护与试验及故障处理等相关知识。

本书可供从事干式电力变压器安装、运行和维护人员及相关科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

干式电力变压器技术与应用/余涛等编. —北京: 中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-6346-2

I. 干… II. 余… III. 干式变压器-研究 IV. TM412

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 018428 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 6 月第一版 2008 年 6 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.75 印张 262 千字
印数 0001—3000 册 定价 21.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

序

干式变压器是 20 世纪 90 年代初在我国发展起来的一种以空气为绝缘与冷却介质的防火型变压器，主要应用于要求防火场所配电系统。目前已发展到三相 35kV 25000kV·A，有多种品种可供选用，如有载或无励磁调压、24 脉波地铁用、变频调速用、供预装式变电站配套用等等；结构上有敞开通风型与树脂浇注型；耐热等级已发展到 H 级、C 级；性能方面已能做到低局放、低损耗、低噪声，能通过凝露、燃烧、冷热、湿热冲击与动稳定试验。干式变压器的运行可靠性在不断提高，因此发展空间在逐步扩展，产量也在不断提高。

为进一步促进干式变压器的发展，出版本书就显得尤为重要，本书可供制造与使用部门参考。

中国工程院院士

朱英浩

二〇〇八年三月五日

朱英浩

2008.3

前言

随着电力技术的发展和科技的进步,对电力变压器运行的安全性、可靠性、防火功能、使用寿命、无油化和少维护等要求越来越高。由于干式电力变压器不采用液体绝缘,不存在液体泄漏和污染环境的问题,且干式变压器结构简单、维护和检修较油浸变压器方便,同时干式变压器采用阻燃性绝缘材料,被广泛应用在对安全运行要求较高的场合。许多国家和地区都规定,在高层建筑的地下变电站、地铁、矿井、电厂、人流密集的大型商业和社会活动中心等重要场所,必须选用干式电力变压器供电。

目前,我国制造干式变压器的产量、最大容量、最高电压等级都达到了世界领先水平。干式电力变压器的应用已越来越广泛,其不同类型产品的技术特性和安装、运行、维护的要求也越来越引起广大供用电企业及相关运行维护人员的关注,迫切希望了解和认识干式电力变压器的发展情况、技术特点、制造工艺、选型要求、安装、运行、维护与试验及故障处理等相关知识。

为了进一步提高电力系统安全运行的水平,提高对干式电力变压器应用和运行的认识,我们编写了这本旨在服务于技术应用方面的书籍,提供给从事干式电力变压器安装、运行和维护人员及相关技术人员参考。

我们力求能比较系统地介绍干式电力变压器的知识、技术、应用规范、运行导则与相关标准,交流共享同行之间的认识、经验和思路,以积极提高干式电力变压器的应用能力及安装、运行和维护水平,为电力生产和安全运行服务,为电力节能降耗服务,为电力环保服务。

在本书编写过程中,得到了常州供电公司、徐州供电公司、无锡供电公司、华迪变压器厂、上海思源电气公司、上能变压器厂、华鹏变压器厂等企业领导和科技人员的大力支持和帮助。同时,我们查阅了大量的相关资料、规程、标准等技术文献,参考了有关专家发表的相关论著和技术数据,特别是引用了很多地区提供的技术经验和典型案例,在此表示衷心的感谢。由于专业水平和知识面的局限性,不妥之处敬请批评指正,不胜感谢!

编者

2008年2月

目 录

序	1
前言	1
第一章 干式电力变压器的发展	1
第一节 干式电力变压器发展历史	1
第二节 干式电力变压器发展现状与前景	3
第二章 干式电力变压器类型与特点	8
第一节 干式电力变压器分类	8
第二节 干式电力变压器性能特点	12
第三章 干式电力变压器技术与工艺	25
第一节 干式电力变压器结构	25
第二节 干式电力变压器的铁芯	32
第三节 干式电力变压器的绕组	40
第四节 干式电力变压器的组件与附件	48
第五节 线圈浸漆工艺流程	56
第四章 干式电力变压器选型	58
第一节 干式电力变压器选型准则	58
第二节 干式电力变压器选型的一般原则	62
第三节 干式电力变压器选型要求	68
第四节 干式变压器选型步骤	85
第五章 干式电力变压器试验	92
第一节 干式电力变压器检查	92
第二节 干式电力变压器试验方法	92
第三节 IEC60076—11: 2004 中关于试验方法的新要求	112
第四节 干式电力变压器出厂试验	113
第五节 干式电力变压器交接试验	115
第六节 干式电力变压器预防性试验	116
第六章 干式电力变压器安装与运行维护	118
第一节 干式电力变压器安装、验收与启动	118
第二节 干式电力变压器运行	120
第三节 干式电力变压器维护	125

第七章 常见故障处理及注意事项	130
第一节 干式电力变压器常见故障及处理	130
第二节 干式电力变压器故障案例分析	133
第三节 干式变压器应用中的注意事项	137
第八章 干式电抗器	143
第一节 干式电抗器用途、分类及特性比较	143
第二节 干式铁芯电抗器基本结构、设计及工艺特点	145
第三节 干式空心电抗器基本结构、设计及工艺特点	146
第四节 干式电抗器的执行标准、技术参数及外形尺寸	146
第五节 干式电抗器的安装、运行与维护	150
附录 1 SC10-8000/35 变压器试验方案	152
附录 2 SG10-1000/10. H 级干式变压器试验大纲	161
附录 3 户内变压器(含电抗器)通风散热的一种计算方法概述	165
参考文献	166

干式电力变压器的发展

GB 6450—1986《干式电力变压器》对干式电力变压器的定义为“铁芯和线圈不浸在绝缘液体中的变压器”。干式变压器的铁芯和绕组一般为外露结构,不采用液体绝缘,不存在液体泄漏和污染环境的问题;干式变压器结构简单,维护和检修较油浸变压器要方便许多;同时干式变压器都采用阻燃性绝缘材料,基于这些优点,被广泛应用在对安全运行要求较高的场合。许多国家和地区都规定,在高层建筑的地下变电站、地铁、矿井、电厂、人流密集的大型商业和社会活动中心等重要场所必须选用干式电力变压器供电。

20世纪30~50年代,制造的干式电力变压器主要是空气自冷的浸渍式干式变压器,其绝缘等级为A级或B级,防潮性能较差,运行可靠性较低,实际应用并不普遍。1964年,德国 AEG 公司研制出第一台 400kVA/20kV 的环氧树脂浇注式干式变压器,将干式电力变压器的发展和普及应用推向了全新的阶段。据有关资料统计,近 20 年来干式变压器的发展得到了质的飞跃,特别是在配电变压器中所占的比例越来越大,在欧美等发达国家约占 50%以上,在成套变电站中约占 80%。

我国对干式电力变压器的推广应用相对起步较晚,但发展很快,自 20 世纪 80 年代相继制定了有关干式电力变压器及其附件的国家标准后,90 年代即开始迅速推广,使用量逐年增多,其增长速度约为同期油浸式电力变压器的 6.3 倍。干式电力变压器在配电变压器中所占比例从 1991 年的占变压器总数的 1.3%,增加到 2000 年的 6.9%,目前在北京、上海、广州、深圳等经济发达地区,干式变压器约占全部配电变压器的一半,全国大中城市也达到 20%~30%。

第一节 干式电力变压器发展历史

电力变压器是根据电磁感应的原理制造的,并经过多年来的不断完善、改进后,逐步形成现在的油浸电力变压器和干式电力变压器产品。

1885 年发明和制作的变压器都是干式变压器, G. 费兰里斯实验室制造的变压器如图 1-1 所示。直到 20 世纪初,人们发明了高绝缘强度、高导热能力的变压器油,并以此作为变压器的绝缘介质,解决了当时干式变压器由于绝缘和散热的限制而导致的电压上不去、容量上不去的问题,满足了当时工业化进程中用电量急剧增加和电压级次逐渐提高的需求,使油浸变压器的发展得到长足的进步,但干式变压器的发展一度几乎停滞不前。

第二次世界大战以后,全球经济迅速恢复和发展,城市人口、高层建筑、地铁交通、大型商业中心和社会公共设施等骤增。由于油浸变压器的安全性能不强、防火性能差且容

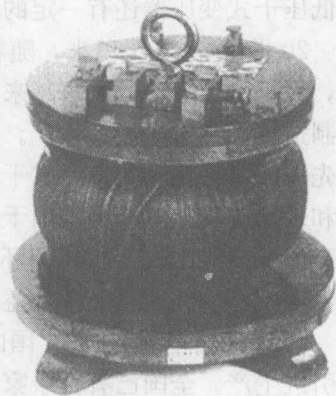


图 1-1 费兰里斯实验室 1885 年制造的干式变压器

易造成环境污染,因此需要一种抗燃性好的变压器来满足人口密集区和特殊场所的安全供电需求。由于干式变压器没有变压器油的火灾隐患和污染,且采用了阻燃性的绝缘材料,安全性较高,是该类场所较理想的电力设备。但早期应用的干式变压器是浸渍式结构,绕组结构与油浸式变压器类似,用玻璃丝包线绕制的绕组浸普通的绝缘漆。浸渍式变压器绕组的制造设备简单、制作容易、但承受短路的能力相对较差,绕组的防潮和防尘能力均不够,往往变压器停用再投入使用时,可能因为周围的环境影响而产生受潮甚至凝露,使绝缘电阻大大下降,因此投运前必须进行清理和干燥处理。

为了改善干式变压器绕组防潮性差的问题,国外研制生产了环氧树脂浇注干式变压器(ORDT)和 Nomex 纸绝缘的敞开式通风冷却干式变压器(OVDT)。如 1964 年德国 AEG 公司研制的世界上第一台环氧树脂浇注干式变压器,容量为 400kVA/20kV,其突出的优点是防火性能好,不污染环境,电气和机械性能都比较优越。这期间,美国西屋公司南波士顿变压器厂开发了敞开通风干式变压器,这种变压器采用了真空压力浸漆技术(VPI),用固体含量 100% 的无溶剂树脂漆处理绕组工艺,包括预热、真空干燥、真空浸漆、保持真空、加压、滴干、固化等过程。处理后的绕组表面被一层牢固的树脂所包封,防潮性能得到了较大的改善。

为提高绕组抗短路电流的能力,对低压绕组采用箔式结构,高压采用连续式绕组,这种结构的绕组经 VPI 工艺处理后承受短路电流的能力得到了很大的提高。与此同时,法国 Transfix 公司还采用聚芳胺合成绝缘纸(Nomex)开发了 VDT 包封式通风冷却的 H 级绝缘干式变压器。Nomex 是美国杜邦公司的专利技术,可制作 H 级干式变压器的绝缘材料。环氧树脂型和敞开通风型干式变压器易于批量生产,使用和维护方便,与早期浸渍干式变压器相比优点明显,尤其是机械强度高、绝缘强度高、运行稳定可靠,因此得到了迅猛的发展。目前,这两类干式变压器已成为国外干式电力变压器的主流类型产品,其中,ORDT 主要应用在欧洲市场,OVDT 主要应用在美国市场。

20 世纪 50~60 年代,国内出现了非包封式绝缘带缠包铜导线绕制的 B 级绝缘敞开式通风冷却干式变压器,我国沈阳第二变压器厂曾是早期生产浸渍干式变压器的知名企业。产品型号为 SG3 系列。由于这种变压器容量和电压受到限制,且绝缘材料价格昂贵、绕组整体密封性差、技术性能不能满足要求、安全运行的可靠性低、故障率高和绝缘寿命短,所以推广应用受到了很大的限制。目前,这种结构的干式电力变压器已很少被选用,仅船用等小容量低压干式变压器还有一定的市场。

20 世纪 80 年代以来,随着我国城市基础设施建设规模的不断扩大和高层建筑的日益增多,对于干式变压器的需求越来越大。国内有制造厂家开始从国外引进环氧树脂浇注干式变压器制造技术并迅速投入生产。从 20 世纪 80 年代末起,我国陆续从欧洲(主要是德国)引进了先进的薄绝缘环氧浇注干式变压器技术,使环氧浇注干式变压器在我国得到了广泛的认同和现场应用,并成为我国干式变压器市场中的主流产品。环氧树脂浇注干式变压器与国内原有的浸渍式干式变压器和环氧树脂加石英粉的所谓厚绝缘干式变压器相比,无论是安全性、运行可靠性还是经济效益回报率都明显提高。

20 世纪 90 年代初期,国内的制造厂家看重环氧浇注干式变压器的潜力和经济利润,纷纷引进生产。全国已有百余家制造厂生产该类产品的变压器,据不完全统计,年产量已超过 10000MVA。干式变压器的制造技术已日趋成熟,它适应高污秽、高温、潮湿的环境,具有阻燃、无公害、少维护等一系列优点,因此需求量很大,发展前景非常好。

近几年,由于浸渍式干式变压器的科技进步和采用杜邦公司 Nomex 纸为基础的绝缘系统,结合 Reliatran 技术而研发出的非包封 H 级干式变压器,其型号为 SG 型,是目前国内绝缘等级最高的干式配电变压器。由于它广泛应用了真空压力浸渍(VIP)工艺,具有防火性能良好、温升均匀、绝缘的寿命长等优点,使 Nomex 纸绝缘浸渍式干式变压器的运行可靠性和安全性得到显著提高,这类浸渍式干式变压器已在国内变压器市场引起高度重视,并得到迅速推广应用。

第二节 干式电力变压器发展现状与前景

目前,我国制造干式变压器的产量、最大容量和最高电压等级都已达到世界领先水平。例如,天津特变电工公司在引进瑞士、美国、德国等国际一流生产及试验设备的基础上,采用新技术、新材料,研制新结构,自主开发完成了 10000kVA 新型干式变压器这一国家级科研项目,填补了国内空白。该产品具有防火、难燃、不污染环境、可深入负荷中心供电等优点,是目前国内冶金、有色金属、石油开采和电厂建设等急需的电力变压器换代产品。由广东顺特电气有限公司设计制造的目前世界上最大容量的干式变压器 SCZ9-25000/35/10.5 通过了包括承受突发短路能力试验在内的全部例行、型式和特殊试验,产品各项技术指标均达到或优于合同技术要求。2003 年 11 月,由北京华力通特种变压器有限公司生产的 SGB11-R 环型铁芯干式变压器通过了国家电力部门鉴定。该产品被列入 2002 年国家重点技术创新项目,处于国际先进水平,填补了国内空白,并已通过 ISO 9001:2000 质量体系认证,被推荐为国家城乡电网建设改造中重点推广的优选产品。SGB11-R 环型铁芯干式变压器将专利产品“环型铁芯变压器”的结构和美国杜邦绝缘材料结合为一体,属于一种新型干式节能、低噪声、环保配电变压器。山东鲁能泰山电力设备有限公司开发生产的 SCZ9-20000/35 有载调压干式变压器,一次性通过国家电网公司武汉高压研究所专家组试验鉴定。该产品是目前国内外同电压等级中容量最大的干式变压器,它采用 MR 真空有载调压开关,线圈使用进口优质绝缘树脂,质量轻、损耗小、噪声低,填补了国内空白。

一、发展现状

据有关资料统计,近 20 年来干式变压器得到了迅猛发展,特别是在配电变压器中,干式变压器所占比例越来越大,发达国家已占 50%以上;我国起步晚,但发展很快,近年在大、中型城市中约占 20%~30%,北京、上海、广州、深圳等城市已达 50%以上。

(一) 产量递增

20 世纪 80 年代,我国逐步使用干式变压器,80 年代末各地纷纷从国外引进技术和设备,并以此作为基础,不断开拓创新,使我国干式变压器制造水平上了新的台阶。从 20 世纪 90 年代开始,其产销量逐年迅猛递增,据行业有关资料分析统计,全国(除港、澳、台外)干式变压器每年以高达 20%以上的增长率递增。

随着我国城乡中、低压配电网建设和改造步伐的加快,干式变压器面临着新的发展机遇,预计近几年其产销量会有新的飞跃。

(二) 技术逐步成熟

1. 电压水平

目前,山东省金曼克电气集团有限公司生产的 110kV 树脂绝缘干式变压器是全球生产

干式电力变压器的最高电压等级, 现已投入运行并通过了国家验收和鉴定。

2. 容量

1) 配电变压器: 10/0.4kV 以及 20/0.4kV、35/0.4kV 的配电变压器容量为 30~2500kVA, 受低压配电屏进线开关遮断容量的限制, 目前很少有超过 2500kVA 容量的产品。

2) 电力变压器: 10、20、35kV 的电力变压器可生产容量达世界先进水平。如 1996 年我国就制造出容量达 16000/24000kVA (AN/AF)、35kV。目前, 广东顺特电气集团设计制造的 SCZ9-25000/35/10.5 是世界上最大容量的干式变压器, 标志着我国在大容量变压器制造技术上已处于世界领先水平。

3. 损耗和噪声

我国干式变压器制造技术的研究、创新和发展, 主要集中在性能参数的优化等方面, 特别是在变压器的损耗及声级水平这些世界性课题的研究上, 我国已经取得了诸多可喜的成绩, 使得我国干式变压器的损耗 (特别是空载损耗) 及噪声大幅度下降。据有关资料统计, SC (B) 9 系列干式变压器比引进技术的 SC 系列之总损耗水平下降 15%~20%, 新的 10 系列总损耗比现行国家标准下降约 19%, 其中空载损耗下降达 33%。通过对噪声的系统研究, 我国进一步掌握了噪声产生的机理, 并将其成果落实在新系列 SC (B) 9 及 SC (B) 10 系列产品上, 目前 SC (B) 9 系列产品比原 SC 系列噪声下降 15%~20%, 新的 10 系列噪声低于国家标准 14~23dB, 2500kVA 容量的配电变压器, 噪声一般可控制在 50dB 以内; 35kV 特大容量 (如 10000、16000kVA) 干式变压器通常可控制在 55dB 左右。综上所述, SC (B) 9 及 SC (B) 10 系列干式变压器的节能降噪等技术性能参数已达到世界先进水平。

4. 有载调压

我国对 10kV 干式配电变压器的有载调压最大容量达 2500kVA。对 35kV 干式电力变压器的有载调压容量达 16000kVA, 其最大客户是上海大众汽车公司 (3 台 16000kVA 有载调压变压器)。

5. 整流、牵引变压器

1) 整流励磁变压器。发电厂的励磁变压器逐步被干式变压器所取代。高低压绕组电压等级一般为 20kV/1kV, 通常采用单相结构、高压封闭母线进线。如为长江三峡工程研制的世界上最大的 840MW 发电机组励磁变压器, 单相容量为 3000kVA 的 3 台 (构成 1 组)。

2) 冶金电炉变压器。特别是低压大电流变压器, 如为江西贵冶制造的 3500kVA 干式变压器, 低压相电流超过 20000A。

3) 牵引变压器。适用于城市地铁及轨道交通的干式牵引变压器, 随着城市轨道交通的发展而得以大量应用。电压有 10、20、35kV 3 个等级; 从 12 脉波整流发展到 24 脉波, 减少了谐波污染; 容量有 800、2500、3300、4000kVA 等。

(三) 形式多样化

干式变压器的外形结构直观明了, 主要有铁芯和浇注绕组两大部分。铁芯与油浸变压器结构相同, 只是暴露在空气中运行, 因此表面涂有环氧漆以防锈蚀。浇注绕组的构造有多种形式, 包括圆通式或分段圆通式、箔式或分段箔式, 箔又分铜箔和铝箔。高低压绕组的结构根据引进技术的不同而异, 主要有高压线绕—低压线绕、高压线绕—低压箔绕、高压箔绕—低压箔绕三种。

高压绕组的电压等级一般为 $10\sim 35\text{kV}$ ，都要进行环氧真空浇注，而低压绕组一般为 0.4kV ，采用真空浇注、端封不浇注或只用环氧浸渍布带绑扎等方法。绕组的环氧浇注层分为带填料和不带填料两种，带填料的浇注层厚度为 $3\sim 4\text{mm}$ ，多用于箔式绕组，其主要引进德国 HTT 公司的技术；不带填料的浇注层厚度为 $2\sim 3\text{mm}$ ，主要引进德国 MC 公司的技术，也引进葡萄牙阿发散克公司技术。这类干式变压器的绕组绝缘分别采用玻璃纤维毡布或无纺布及半干性玻璃纤维浸渍布。此外，还有采用德国 ABB 公司的长玻璃丝浸渍环氧树脂逐层缠绕在绕组上，再进行真空固化成形的技术生产干式变压器。

1. 环氧树脂型干式变压器

环氧树脂干式变压器经过几十年的发展，已经历了树脂加填浇注干式变压器、树脂浇注干式变压器和树脂绕包干式变压器 3 个阶段。

树脂浇注干式变压器的技术现状。树脂浇注有树脂与树脂加填料浇注两种，这两种结构大同小异；其低压绕组有箔式与线绕式两种，也是大同小异。低压绕组为箔式时，绕在玻璃骨架上为分段式（ $8\sim 12$ 段）；低压绕组为线绕式时，用扁或圆线绕成分段圆筒式然后装入浇注模，用树脂或加石英粉树脂浇注绕组。

早期树脂浇注的产品开始使用后，很快就发现有开裂的情况。原因是铜的热膨胀系数为 $17\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，而树脂为 $(60\sim 70)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 相差几倍。研究发现，树脂和石英粉混合后，膨胀系数为 $(27\sim 37)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，比树脂要好，于是树脂加石英粉进行浇注的产品成为前期树脂干式变压器的主流。进而又发现，铝的膨胀系数为 $24\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，效果更好，于是至今许多国外企业仍然制造铝线圈的树脂干式变压器产品。

树脂加填料后，绝缘的水平降低了，绝缘层很厚（ 6mm 以上），所以又称厚绝缘产品。绝缘层厚导致散热更困难，需加大导线截面，加大产品体积，阻燃效果也不好。另外，容易从绝缘间隙处吸潮（如高压引线和分接引线外）；电场分布和热点分布也不均匀，局部放电量和产品温升也不易控制，于是树脂浇注干式变压器产生了。

树脂浇注干式变压器产品是目前世界上，也是我国干式变压器市场的主流产品。与树脂加填料干式变压器比起来，主要区别是在导线外用玻璃丝包绕之后，对整个线圈再包封玻璃丝布，之后采用纯树脂或填料比例较少的树脂进行浇注。这类产品的绝缘厚度有所降低，一般为 $3\sim 6\text{mm}$ ；产品开裂现象明显减少；产品性能相对稳定；局部放电量相对降低；热冲击能力有所提高；产品体积和损耗有所减少。但是，这种产品的成本比树脂加填料的要高 $10\%\sim 15\%$ ，另外这种产品要求的制造工艺更精确，否则局部放电量会更大。最为重要的是，这种产品从本质上没有彻底解决树脂加填料产品的固有问题，尤其是仍为有模制造，于是又有企业研制树脂绕包干式变压器。

树脂绕包干式变压器。其低压线圈与前两种产品一样，高压线圈在绕线机上绕包，内模为环氧玻璃布筒。绕包时，边绕导线边包玻璃纤维（占 80% ）。经过树脂槽将浸好树脂的纤维绕在已绕好的导线上，待整个绕组绕完后，进烘箱加热固化，使其成为一体。这种产品因树脂加玻璃纤维的膨胀系数几乎与铜相近，开裂情况有明显改善，散热效果也更好些。

但是，在常规环境下绕包难免会包裹空气，故局部放电量很大，这是该产品的最大问题。另外绕包产品所需工时太多，质量不稳定性也很突出。

2. 真空浸渍型干式变压器

OVDI 类真空浸渍型干变具有的优点是：不需浇注设备与模具，因此可减少工厂的初

期投资,制造成本较低。这类变压器的耐温等级为 H 级,可以在一定程度上减少变压器的尺寸和重量。同时,在燃烧时所释放的能量较小,能够满足环保的要求。

虽然树脂浇注的干式变压器在近几十年的发展中已成为国际市场的主流产品,但浸渍干式变压器也一直在创新中发展,国内也有一些厂家引进浸渍式及 Nomex 绝缘纸型干式变压器技术进行生产。因为真空浸渍干式变压器具有散热条件优越等特点,适用于矿井、防爆场所、散热条件不利的区域等。

浸渍式干式变压器生产历史最长,制造工艺也比较简单,导线用玻璃丝包线,垫块用响应的绝缘材料热压成型,绝缘耐热等级随浸渍漆特性的不同分为 B、F、H、C 级,主、纵绝缘的通气道以空气为绝缘介质。由于这类变压器体积较大,受外界环境变化的影响也比较大,在一定程度上不如环氧树脂干式变压器,国内外的产量也趋于减少。但它的散热条件比较好,最热点温度比平均温度高出不多,器身温度比较均匀,热寿命长,特别是过负荷能力强,目前仍然占有一定的市场。如,20 世纪 90 年代末,云南变压器厂引进法国 Transfix 公司技术开发生产名为赛格迈 (Securamid) 的 VDT 包封式通风冷却的 H 级绝缘干式变压器,它的层绝缘采用了 Nomex 绝缘纸^①。由于绕组卷制后不用模子浇注、不需浇注设备,只需用普通绕线机绕制即可,这类干式变压器的技术经济性能应该比较好,但由于 Nomex 绝缘纸是美国杜邦公司的专利技术,价格非常高,约为环氧树脂的 5 倍,致使这两类干式变压器的价格大致相当。

美国和德国在近 20 年中,逐渐发展和成熟了两种型式产品,并随产量的加大、技术的进一步成熟,尤其是 GE 公司成功的将杜邦公司的专利 Nomex 绝缘纸应用到干式变压器产品后,新一代 H 级 (180℃) 浸渍式干式变压器开始大量投入应用。德国也开发出 H 级的绝缘材料,推出了玻璃纤维为主的浸渍产品,并开始广泛应用到轮船、码头、地铁、化工厂、电厂等重要场所。因为美国和德国的技术都具有环保的功能,故称为新一代环保型真空浸渍干式变压器 (简称环保浸渍干变)。我国已引进生产,发展前景广阔。

新一代环保型真空浸渍干式变压器通过了 CESI 实验室三项特殊试验。实验室是直属意大利电器与机电行业协会的世界最大的检测机构,是欧洲为数不多的 IEC 认可的实验室。

CESI 三项特殊试验包括:环境试验 E2、(冷) 热冲击试验 C2 和燃烧特性试验 F1 试验。

1) E2 试验:干式变压器的环境试验,该试验分三个环境等级:E0 级、E1 级和 E2 级。E2 级为有频繁的冷凝或严重的污秽,或两者同时存在。它比 E1 和 E0 试验严酷,且增加一项试验,即在温度 50℃ 相对湿度 90% 的气候室内放置 144h 并在 3h 内做绝缘试验。

2) C2 试验:气候试验,也称 (冷) 热冲击试验,分 C1 和 C2 两个等级。C1 级适用于 -5℃ 的环境下运行的变压器,C2 级适用于 -25℃ 的环境下运行的变压器。

3) F1 试验:燃烧特性试验 (新标准中新增的特殊试验),分 F0 和 F1 两个等级。F1 试验中对产品在受到外火源燃烧的时候,要求产品限制燃烧且对其温度和烟雾都有严格的要求。

随着我国经济建设的迅速发展,城乡用电负荷不断增加,人民生活水平不断提高,对供电可靠性和电能质量的要求也越来越高,无油化、防火性、寿命长、节能低噪、维护简单、

^① Nomex 绝缘纸是美国杜邦公司的专利产品,属于垄断性生产的绝缘材料,它具备非常优良的电气、机械和化学性能,防潮防火能力极强,能在明火 750℃ 下阻燃。

安全可靠的干式电力变压器已得到了越来越广泛的应用。

二、发展前景

随着干式变压器的推广应用,其生产制造技术也获得长足发展。可以预测,未来的干式变压器将在如下几方面获得进一步发展:

1. 发展新品种干式变压器

(1) 发展卷铁芯干式变压器,可以采用 VDT 包封式的结构,这样的结构更紧凑、体积更小、重量更轻、损耗更低。特别适合于制造小容量的箱式变电站。

(2) 发展非晶合金铁芯的干式变压器也有非常好的前景。它有很低的空载损耗。只要把它的售价控制在普通变压器价格的 1.5 倍以内,在经济上是划算的。但是发展这种变压器不能仅仅从经济上考虑,还要从节约能源、减少对环境的破坏等角度来考虑。

2. 发展节能低噪干式变压器

目前,新的低耗硅钢片阶梯五步迭铁芯接缝工艺,进一步提高了干式变压器的节能降噪水平,更满足了环境保护的要求。随着对干式变压器的计算机优化设计,噪声研究的深入,新材料、新工艺、新技术的应用,干式变压器的技术指标必将更加先进。

3. 提高产品质量和运行可靠性

在完成引进技术的消化吸收之后,在电磁场计算、波过程、浇注工艺、热点温升、局放机理、质保体系、可靠性工程等方面进行大量的基础研究、积极进行可靠性认证,进一步提高干式变压器的可靠性。

4. 加强环保特性认证

要以欧洲标准 HD464 为基础,开展干式变压器的耐气候 (C0、C1、C2)、耐环境 (E0、E1、E2)、耐火 (F0、F1、F2) 特性的研究与认证。

5. 提高干式变压器的容量

从 50~2500kVA 配电变压器为主的干式变压器,向 10000~20000kVA/35kV 电力变压器拓展,随着城市用电负荷不断增加,城网区域变电所越来越深入城市中心区、居民小区、大型厂矿等负荷中心,35kV 大容量的小区中心供电电力变压器将获广泛应用。

6. 发展多功能组合及智能化干式变压器

从单一变压器向带有风冷、保护外壳、温度计算机接口、零序互感器、功率计量、封闭母线、侧出线等多功能组合式变压器发展;引入 FTU 智能化接口,具有数据处理、状态控制、状态显示等功能,从而使变压器成为一种多功能、智能化、随时处于最佳运行状态的节能电气设备。

7. 发展向多领域拓展

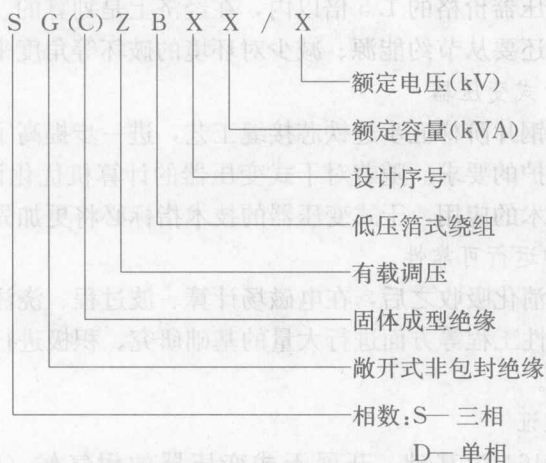
从以配电变压器为主,向发电站厂用变压器、励磁变压器、地铁牵引整流变压器、大电流电炉变压器、核电站、船用及采油平台用等特种变压器及多用途领域发展。

第二章

干式电力变压器类型与特点

第一节 干式电力变压器分类

一、干式电力变压器的型号释义



以型号为 SCZ (B) 10 有载调压干式变压器为例。

(1) SCZ (B) 10 H 级绝缘干式变压器外形图示例如图 2-1 所示。

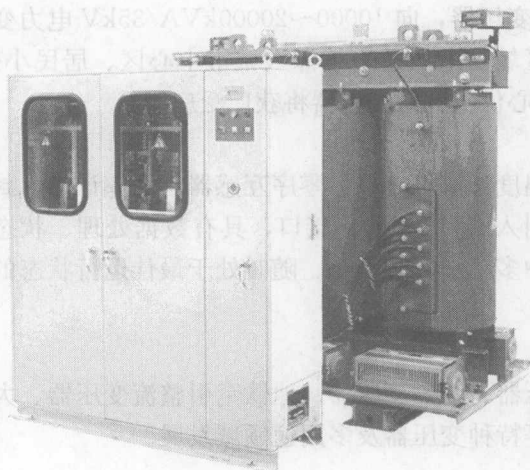


图 2-1 SCZ (B) 10 H 级绝缘干式变压器

(2) SCZ (B) 10 对应为: 三相树脂绝缘、有载调压、低压为箔式线圈, 产品性能水平代号即设计序号为 10 的干式变压器, 如图 2-1 所示。

(3) SCZ (B) 10 型号干式电力变压器规格: SC (B) 10 系列 10kV 配电变压器; SC (B) 10 系列 10kV 电力变压器; SC (B) 10 系列 35kV 电力变压器; SCZ (B) 10 系列 10kV 有载调压变压器; SCZ (B) 10 系列 35kV 有载调压变压器。

(4) SCZ (B) 10 型号中额定容量与电压等级: SCZ (B) 10—××××/×× 中××××代表额定容量 (kVA); ××代表高压电压额定值 (kV)。

(5) SCZ (B) 10 干式电力变压器技术参数:

额定高压: 10kV 或 35kV 电压等级;

额定低压: 0.4kV;

联结组别: Dyn11 或 Yyn0;
 绝缘水平: 0.4kV 级工频耐压为 0.3kV;
 10kV 级工频耐压为 35kV, 雷电冲击电压为 75kV;
 35kV 级工频耐压为 70kV, 雷电冲击电压为 170kV。

二、干式电力变压器的分类

1. 按技术参数分类

(1) 电压等级。目前, 国内主要生产的干式电力变压器主要集中于中压配电网 10kV 电压等级, 发电站应用的干式电力变压器多为 6kV 电压等级。15~35kV 电压等级的产品也有一定的应用需求。试制的 110kV 树脂绝缘干式变压器目前已通过验收和鉴定并投入系统运行。

(2) 额定容量。

1) 配电变压器: 10/0.4kV 以及 20/0.4kV、35/0.4kV 的容量一般为 30~2500kVA。受低压配电屏进线开关遮断容量的限制, 目前很少有超过 2500kVA 容量的配电变压器产品。

2) 电力变压器: 10、20、35kV 的干式电力变压器可生产最大容量达 20000kVA 以上。

(3) 有载调压与无载调压。目前, 我国 10kV 有载调压干式配电变压器的最大容量达 2500kVA, 35kV 有载调压干式电力变压器容量达 25000kVA。

2. 按型号分类

国内三相干式变压器的种类按型号可分为 SC 和 SG, 即包封线圈和非包封线圈两大类。包封线圈的分为纯树脂浇注式、带填料树脂浇注式和缠绕式; 非包封线圈的分为普通浸渍式和包封浸渍式。S 表示三相。SC 型号中, C 表示绕组外绝缘介质为固体浇注式。该类产品中的大部分高压线圈采用环氧树脂真空浇注工艺制造, 属包封型结构, 绝缘耐热等级通常是 F 级 (绝缘系统温度 155℃, 参考温度 120℃, 线圈温升 100K)。

(1) SC 型号的环氧树脂浇注包封式干式变压器。这种型号的干式变压器包括 SCBH 和 SCB 两种, 其中 SCBH 中的 B 表示绕组采用铜箔结构绕制, H 表示铁芯采用非晶合金材料; SCB 则为传统的硅钢片铁芯。

1) 产品特点: 免维护、安装简便、综合运行成本低; 结构先进、安全、阻燃、无污染, 可直接安装在负荷中心; 防潮性能好, 可在 100% 湿度条件下运行, 停运后不经干燥即可投入运行; 绝缘水平高, 抗短路、耐雷电冲击性能好; 低损耗、低噪声、局部放电量小、散热性能好、过载能力强; 强迫风冷条件下可以 150% 运行。

2) 结构特点: 铁芯选用进口优质冷轧硅钢片, 损耗低; 铁芯采用 45° 全斜接缝结构, 心柱采用绝缘带绑扎, 减少噪声和空载损耗; 铁芯表面采用绝缘树脂密封以防潮防锈, 夹件及紧固件表面经防止锈蚀处理。高压绕组采用 F 级绝缘的铜导线绕制, 玻璃纤维与环氧树脂复合材料做绝缘, 在真空状态下浇注而成; 玻璃纤维与环氧树脂复合材料的膨胀系数与铜导体相近, 具有较好的抗冲击、抗温度变化、抗裂性能; 浇注的树脂混合材料可以完全渗透到线圈的间隙中, 使线圈无气泡、空穴, 线圈的局部放电量低。

低压绕组采用箔导体在自动箔式绕线机上绕制, 内部焊接在绕线机上采用氩气保护焊接, 精度高, 焊接电阻小, 无外部焊接过程; 绕组层间采用 DMD 绝缘, 绕制完毕后端部用树脂密封固化。

冷却方式分为自然空气冷却 (AN) 和强迫空气冷却 (AF)。自然空气冷却 (AN) 时, 变压器可连续输出额定容量; 强迫空气冷却 (AF) 时, 变压器输出容量可提高 50%, 适用于各种过负荷运行。

(2) SG 型号的敞开式非包封干式变压器。SG 型号的敞开式非包封干变中, G 表示空气干式, 该产品的绕组采用真空压力浸漆 (VPI) 工艺制造, 属非包封型结构 (OVDT), 绝缘耐热等级通常是 H 级 (绝缘系统温度 180℃, 参考温度 145℃, 绕组温升 125K)。

产品特点如下:

- 1) 容量范围 30~2500kVA。
- 2) 具有安全、可靠、节能、防火、防爆、维护简便、环保等优点。
- 3) 冷却方式为空气自冷式 (A), 耐热等级为 H 级 (180℃)。
- 4) 可在海拔 1000m 以下所有环境气温下使用。
- 5) 适用于污秽潮湿环境, 防火要求高、负荷较大及重点地区, 如高层建筑、机场、地铁、冶金石油化工、购物中心等。
- 6) 损耗低, 标准值与 GB/T 10228—1997《干式电力变压器技术参数和要求》相比, 空载损耗降低 20%; 负载损耗平均降低 15%。
- 7) 精心设计的线圈结构及真空—压力浸渍工艺, 绕组真空—压力浸渍并固化处理, 线圈压紧采用压块结构。局部放电量极低, 无龟裂现象、无绝缘水平下降现象。
- 8) 绝缘材料只含有极少量可燃材料, 且无毒性, 能自熄。产品难燃、阻燃、无毒、自熄、防火。在高温明火燃烧下, 变压器几乎不产生烟雾。
- 9) 短时过负载能力强, 无需强制吹风, 140% 过负载 3h; 在 ±50℃ 条件下可立即加满载。

此外, 具有很好的突发短路电流的承受能力, 采取高强度陶瓷绝缘子或硅橡胶垫块支撑。

线圈修复容易; 噪声低, 比 JB/T 10088—2004《6kV~500kV 级电力变压器声级》标准值降低 12~15dB; 寿命期内产品可分解回收, 可有效保护生态环境。

3. 按损耗水平代号分类

干式变压器的损耗水平一般通过编码的代号来分, 代号通常分为 8、9、10 型。不同损耗水平代号的干式变压器空载损耗和负载损耗情况见表 2-1。

表 2-1 不同损耗水平代号干式变压器的空载损耗和负载损耗

损耗水平代号	空 载 损 耗	负 载 损 耗
8	符合 GB/T 10228—1997 (组 I)	符合 GB/T 10228—1997
9	比 GB/T 10228—1997 (组 I) 平均降低 10%	比 GB/T 10228—1997 平均降低 10%
10	比 GB/T 10228—1997 (组 I) 平均降低 20%	比 GB/T 10228—1997 平均降低 15%

从表 2-1 中可以看出, 损耗水平代号的数值越大, 损耗的数值越小, 产品的性能也越好。

4. 按绝缘等级分类

按绝缘等级可分为 B 级、F 级、H 级、C 级等, 国外有些国家在 H 级和 C 级之间还设有一个 N 级, 其绝缘的温度限值见表 2-2。