

电机原理和运行

宋远智 叶世超

小型水电站运行工人培训教材

水利电力出版社

内 容 提 要

本书共分四篇。第一篇为变压器，第二篇为同步电机，第三篇为异步电动机，第四篇为直流发电机。书中以同步发电机和变压器为重点，从物理概念上阐明电机的基本原理及电磁变化过程，并采用一部分等效电路、磁场电势图和相量图进行分析。同时结合运行实际，介绍电机的使用维护知识和操作试验方法。书中各章都有例题说明，并附有小结、思考题和习题。

本书可作为具有初中毕业文化程度的小型水电站运行人员的培训教材，亦可作为具有同等文化程度的有关人员的自学参考书。

本书教学时数约为130学时，使用中可根据实际情况增减。

小型水电站运行工人培训教材

电机原理和运行

宗远智 叶世超

★

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

★

850×1168毫米 32开本 12印张 316千字

1985年10月第一版 1985年10月北京第一次印刷

印数0001—1640册 定价2.95元

书号 15143·5088

前 言

近年来,我国小水电建设发展很快。为了提高小水电站、电网运行工人的技术和管理水平,充分发挥小水电的经济效益,巩固和扩大办电成果,迫切需要加强对职工进行技术培训。为此,我们组织成都科技大学的有关同志,编写了培训讲义。经多次使用并广泛征求读者意见,现修改编写成这套“小型水电站运行工人培训教材”,供各地举办技术培训班之用。全套教材共十一册:《电工数学基础》、《电工原理》、《电子技术及应用》、《电机原理和运行》、《电工仪表和测量》、《水电站电气一次部分》、《水电站电气二次部分》、《地方电力系统》、《水轮机》、《水轮机调节》、《水轮发电机组辅助设备及自动化》。本教材内容丰富,针对性较强,理论联系实际,凡小型水电站和35千伏及以下电网运行、维护、检修中应当掌握的主要知识,都作了较系统的讲述。对有关领域的新设备和新技术,也有简要的介绍。

本教材适用于培训具有初中毕业文化程度的小型水电站和电网的发、供电运行工人,也可作为具有同等文化程度的有关人员的自学参考书。各地可根据实际需要,选用其中有关分册,进行培训。一般以半年为一期,总教学时数控制在500学时左右。

《电机原理和运行》一书由宋远智(第一篇)、叶世超(第二、三、四篇)编写。胡鸣善审阅,教学时数约为130学时。

由于受经验和水平限制,本书中存在的缺点和问题,恳请读者批评指正。

四川省地方电力公司

1982年12月

目 录

第一篇 变 压 器

第一章 概述	1
1-1 变压器的用途	1
1-2 变压器的结构	1
1-3 变压器的发热和冷却	7
1-4 国产变压器简介	8
1-5 变压器的额定值和铭牌数据	10
第二章 变压器的运行分析	13
2-1 变压器的基本工作原理	13
2-2 变压器的空载情况	15
2-3 变压器的负载运行	18
2-4 变压器参数的测定	25
2-5 电压调整率	31
2-6 变压器的效率	36
第三章 变压器的联接组	44
3-1 单相变压器的联接	44
3-2 三相变压器的联接	45
3-3 绕组联接组和铁芯结构对三次谐波电动势和电流的影响	56
第四章 变压器的并联运行	61
4-1 并联运行及其应具备的条件	61
4-2 并联运行时的负载分配	63
第五章 变压器的不正常运行	69
5-1 变压器的不对称运行	69
5-2 变压器的过渡过程	75
5-3 变压器的允许过载倍数和允许过载持续时间	81
第六章 特殊变压器	86

6-1	三绕组变压器	86
6-2	自耦变压器	89
6-3	调压变压器	92
第七章	变压器的使用和维护	96
7-1	变压器的操作	96
7-2	变压器的运行检查维护	99
7-3	变压器的故障	110

第二篇 同步电机

第八章	交流电机的绕组、电动势和同步发电机的基本原理及结构	112
8-1	同步发电机的基本原理	112
8-2	同步发电机的基本结构	116
8-3	同步发电机的磁路	120
8-4	交流电机电枢绕组	123
8-5	交流绕组中感应电动势的大小	134
8-6	谐波电动势及其削弱方法	140
8-7	同步发电机的励磁方式	146
8-8	交流电机的旋转磁场	149
第九章	同步发电机的正常运行	159
9-1	概述	159
9-2	同步发电机的空载运行	160
9-3	在对称三相负载时同步发电机的电枢反应	163
9-4	同步发电机对称运行的分析方法	171
9-5	同步发电机对称稳态运行时 X_d 不饱和值的测定	183
9-6	同步发电机的运行特性	187
9-7	同步发电机的电压调整率和额定励磁磁势	190
9-8	同步发电机的损耗和效率	192
9-9	在不同参数情况下同步发电机的允许运行方式	194
9-10	同步发电机的通风冷却方式	200
9-11	同步发电机的型号和铭牌	201
第十章	同步发电机的功角特性和并联运行	209

10-1	概述	209
10-2	同步发电机投入并列的条件	210
10-3	同步发电机的并列方法	214
10-4	同步发电机单机运行时的功率调节	222
10-5	同步发电机与无穷大电网并联运行时有功功率的调节	232
10-6	同步发电机与无穷大电网并联运行时的无功调节 和U形曲线	241
10-7	调节功率时对发电机运行状态的影响	246
10-8	同步发电机与相近容量电网的并联运行	250
10-9	同步发电机的调相运行方式	256
第十一章	同步发电机的非正常运行	272
11-1	同步发电机的不对称运行	272
11-2	同步发电机的突然短路	274
11-3	同步发电机失磁后的异步运行	278
11-4	同步发电机的进相运行	281

第三篇 异步电动机

第十二章	三相异步电动机的基本结构及原理	284
12-1	三相异步电动机的一般介绍	284
12-2	异步电动机的基本原理	287
12-3	异步电动机的铭牌数据	291
12-4	异步电动机的接法和始末端判别法	293
第十三章	异步电动机的运行	298
13-1	概述	298
13-2	转子不动时的异步电动机	299
13-3	转子转动后的异步电动机	302
13-4	异步电动机的电磁转矩和机械特性	307
13-5	异步电动机的工作特性	313
第十四章	异步电动机的起动	319
14-1	起动电流和起动转矩	319
14-2	异步电动机的起动方法	322

14-3 深槽式和双鼠笼式异步电动机.....	330
-------------------------	-----

第四篇 直 流 发 电 机

第十五章 直流发电机的基本结构及工作原理	336
15-1 直流发电机的构造.....	336
15-2 直流发电机的基本工作原理.....	340
15-3 电枢绕组的一般介绍	343
15-4 直流发电机的电枢反应	347
第十六章 直流发电机的运行原理	353
16-1 直流发电机按励磁方式分类.....	353
16-2 并励发电机电压的建立.....	354
16-3 并励发电机的外特性和调整特性.....	358
第十七章 直流发电机的换向	364
17-1 换向过程的基本概念.....	364
17-2 火花及其产生的原因.....	366
17-3 改善换向的方法.....	371

第一篇 变 压 器

第一章 概 述

1-1 变 压 器 的 用 途

变压器是一种静止的电器，由绕在同一铁芯上的两个或两个以上的绕组（线圈）组成。通过电磁感应，可以把交流电源的电压适当地升高或降低，以满足不同的需要。

水电站要把自己生产的电能，输送到较远的地方去供用户使用或并入本地区的高压电网，都需要先用升压变压器把电压升高。这样，可以大大地降低线路损耗和电压降。当电能送到用户区，又必须用降压变压器把电压降低，以保证用户安全使用。所以，在水电站和电力系统中，变压器是一个主要的元件，不但数量多，而且要求性能好和运行安全可靠。

此外，在需要特种电源的工业企业中，如电炉、整流设备、量测设备、试验设备和控制设备等供电，也都广泛应用变压器。

1-2 变 压 器 的 结 构

变压器的基本工作原理是由一个共同的闭合磁路，把两个或两个以上的联接到不同电路上的绕组链在一起，通过电磁感应，把一个绕组从电源接受来的交变电能，传递到其余的绕组再传输出去，接到负载（负荷）。共同的磁路部分，一般用硅钢片叠成，称为铁芯。接到电源的绕组称为原绕组或原线圈，也叫一次

绕组、原边或初级。接到负载的绕组称为副绕组或副线圈，也叫二次绕组、副边或次级。图1-1是双绕组变压器的示意图。

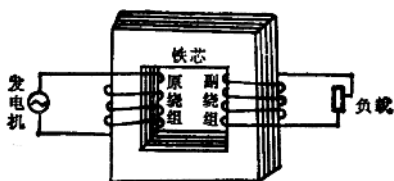


图 1-1 双绕组变压器示意图

通常的变压器都为油浸式，铁芯和绕组都浸入盛满变压器油的油箱中。各绕组的端点通过绝缘套管引至油箱外面，以便和外线路联接。因此，变压器的主要构成部分有：铁芯；带有绝缘的绕组；变压器油；油箱；绝缘套管等。现分述如下：

一、铁芯

通过变压器铁芯的磁通为一交变磁通。为要减少交变磁通在铁芯中感应产生的涡流，变压器的铁芯用彼此绝缘的、厚度为0.35毫米的电工钢片叠成。铁芯结构可分两部分：绕有绕组的部分，称为铁芯柱，用以闭合磁路的部分，称为磁轭。组成铁芯的钢片，应先裁成所需要的形状和尺寸，称为冲片。图1-2（a）表示单相

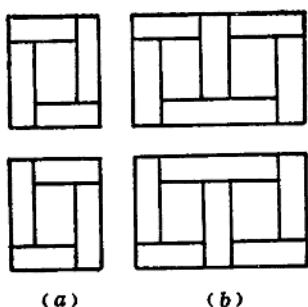


图 1-2 变压器铁芯的交叉装配
(a)单相，(b)三相

变压器的铁芯，每一层由四片冲片组合而成。图1-2（b）表示三相变压器的铁芯，每一层由六片冲片组合而成。把每层钢片分成几片冲片后，在装配时，可在由冲片构成的铁芯柱上套上预先绕制好的绕组，然后再把构成磁轭的冲片镶入。如图所示，每两层的冲片组合应用不同的排列方法，使各层磁路的接缝互相错开。

这种装配方式称为交迭装配。这样做法的优点是可以避免涡流在钢片与钢片之间流通，且因各层冲片交错镶嵌，在把铁芯压紧时，可以少用穿过铁芯的螺杆而使铁芯的结构简单化。

只有当变压器的容量很小时，铁芯柱的截面才用正方形。当变压器的容量较大时，为更充分利用空间，可将铁芯截面分为两级或更多的级数。如图1-3所示，(a)为正方形铁芯；(b)为两级铁芯，亦称十字形铁芯；(c)为多级铁芯。当变压器铁芯柱的截面愈大时，所用的级数也愈多。

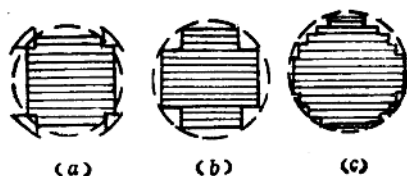


图 1-3 铁芯截面
(a)正方形；(b)十字形；(c)多级铁芯

在容量较大的变压器中，为了保证铁芯的温度不致太高，在叠片间可以设置油槽。油槽分两种：(1)与钢片垂直；(2)与钢片平行，如图1-4(a)和(b)所示。第一种布置方式散热效果较好，但结构较为复杂。

二、绕组

绕组是用绝缘铜线或铝线绕成，按照绕组在铁芯上的排列方法来分类，变压器可以分为铁芯式和铁壳式两种外形，如图1-5所示。图1-6为铁芯式变压器的剖面 and 同心式圆筒形绕组，(a)为单相；

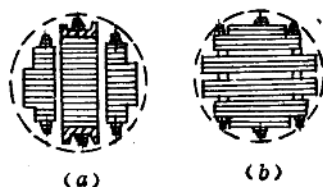


图 1-4 铁芯中的油槽
(a)油槽和钢片垂直；(b)油槽和钢片平行

(b)为三相。由图可见，每个铁芯柱上都有低压绕组和高压绕组，低压绕组靠近铁芯柱，高压绕组则套在低压绕组的外面。对

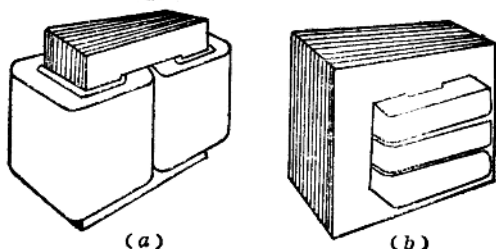


图 1-5 小型变压器外形
(a)铁芯式; (b)铁壳式

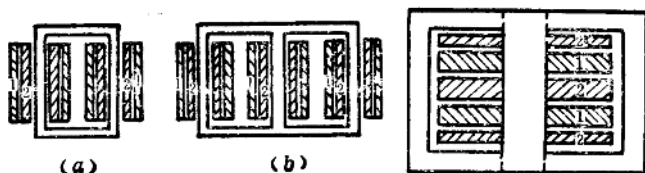


图 1-6 铁芯式变压器的剖面 and 同心式圆筒形绕组
(a)单相; (b)三相
1—高压绕组; 2—低压绕组

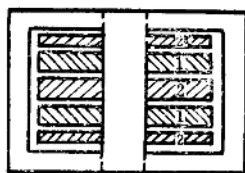


图 1-7 铁壳式变压器的剖面 and 交迭式绕组
1—高压绕组; 2—低压绕组

于三相变压器，每一铁芯柱上的低压绕组和高压绕组属于同一相。对于单相变压器，低压绕组和高压绕组各分为两部分，分别排列在两边的铁芯柱上。图 1-7 所示为一单相铁壳式变压器的剖面。这种变压器的铁芯柱在中间，磁轭在两边环绕，且把绕组包围起来。铁芯式变压器的优点是制造工艺比较简单，高压绕组和铁芯间的绝缘较易。铁壳式变压器的优点是结构比较坚固，缺点是制造工艺复杂，绕组与铁芯间的绝缘也比较困难。因此，应用于电力系统中的各种变压器，一般都用铁芯式。

变压器绕组的基本型式有同心式绕组及交迭式绕组两种。铁芯式变压器常用同心式绕组，铁壳式变压器常用交迭式绕组。如图 1-5(a)和图 1-6 所示，同心式绕组的高压绕组和低压绕组，制

成圆筒的形式，然后同心地套在铁芯柱上。把低压绕组套在里层，把高压绕组套在外层便于绝缘。交迭绕组又称饼式绕组。如图1-5(b)和图1-7，高压绕组和低压绕组各分为若干线饼，沿着铁芯柱的高度交替地排列着。为了排列得对称起见，也使高压绕组能够离开磁轭远一些以便于绝缘，图1-7中的高压绕组分为两个线饼，低压绕组则分为一个线饼和两个“半线饼”。靠近上下磁轭处的线饼为低压“半线饼”，其匝数为位于中间的低压线饼的匝数的一半。交迭式绕组仅用于铁壳式变压器，故应用不多。铁芯式变压器应用同心式绕组，是电力变压器的主要结构形式。

三、变压器油

除了极少数例外，装配好了的变压器铁芯和绕组都须浸入变压器油中。变压器油既是很好的绝缘介质，又作为散热的媒介。变压器油为矿物油，由石油分馏得来。

四、油箱及附件

电力变压器的油箱一般都做成椭圆形，因为它的机械强度较高，所需的油量较少。为了防止潮气侵入，希望油箱内部和外界空气隔绝。为此，在油箱上面装一油枕（亦称膨胀器或储油器），以减少油和空气的接触面，降低油的氧化速度和侵入变压器油的水分。油枕为一圆筒形的容器，装在油箱盖上，用管道与变压器的油箱接通，使油面的升降限制在油枕中。油枕上部的空气通过存放氯化钙等干燥剂的通气管（亦称呼吸器），和外界自由流通。油枕底部有沉积器，以沉聚侵入油枕中的水分和污物，定期加以排除。通过玻璃油位表，可以看到油枕中油面的高低。变压器油箱上的油枕，如图1-8中所示。通常容量超过75千伏安或高压绕组额定电压超过6.3千伏的变压器，才在油箱上装置油枕。

装在油箱顶盖上的另一附件排气管（亦称安全气道或防爆管），是作为保护设备用的，如图1-8中的4。它是一个长钢筒，上端装有一定厚度的玻璃板或酚醛纸板（防爆膜）。当变压器内部发生严重的故障而有大量的气体形成时，油箱内的压力超过

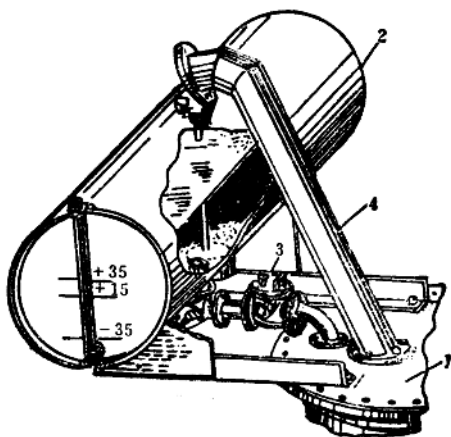


图 1-8 油枕和防爆管

1—油箱；2—油枕；3—气体继电器；4—防爆管

0.5个大气压，油流和气体将冲破防爆膜向外喷出，以免油箱受到强烈的压力而爆裂。

气体继电器（瓦斯继电器）是当变压器内部发生故障产生气体时，或油箱漏油等使油面降低时，保护变压器用的。届时它可以发出警报或切断变压器的电源。

五、绝缘套管

绝缘套管由外部的瓷套与中心的导电杆组成。它穿过变压器的箱壁，其导电杆在油箱中的一端与绕组的端点相接，在外面的—端则和外线路相接。当变压器的电压不高时，可用简单的瓷制空心式套管。随着电压的提高，套管的结构就愈为复杂，尺寸也愈来愈大。为了加强绝缘能力，可在瓷套和导电杆间充油。当电压更高时，在套管内腔中，除了充油以外，环绕着导电杆，还可包上几个同心绝缘纸筒，而在这些纸筒上贴附一层均压铝箔。这样，则沿着套管的径向距离，绝缘层和铝箔层构成一系列的串联电容器。套管内部的电场便将均匀分布而使它的绝缘性能增强。图1-9为35千伏的瓷制充油式套管。

1-3 变压器的发热和冷却

变压器在工作时，铁芯及绕组中有能量损耗，这些能量损耗一方面影响变压器运行时的效率；另一方面，损耗转变为热能，引起变压器发热，使变压器的温度升高。当其温度高于冷却介质的温度时，就开始向冷却介质散出热量。散热的快慢，决定于变压器温度与冷却介质的温度之差和变压器的散热能力。在一定条件下，温差愈大，散热愈快。因此，在一定的负载下，变压器的温度将逐渐升高，直到散出去的热量等于产生的热量时，温度就不再升高，保持一定的对冷却介质的温升值。温升过高，将使绝缘材料破坏而失去绝缘能力，或减短它的有效使用寿命，还将增大绕组的电阻因而使铜耗增加。因此，需要规定变压器在额定负载时，各部分的温升不超过一定的数值。

要降低温升，有两种方法：一方面在设计时提高变压器的效率，减少损耗；另一方面是提高变压器的散热能力，使它更有效地冷却。散热能力与变压器的结构布置和所采用的冷却方式有关。

最初的变压器，都是空气冷却的。后来，随着变压器容量的不断增大，电压等级不断提高，用空气冷却和作为绝缘就越来越困难，因此产生了油浸变压器，这是目前最通用的冷却方式，即把变压器器身（铁芯和绕组），浸在盛于铁箱中的油内。变压器油有很好的绝缘性能，还作为一个散热的媒介。铁箱除了作为油的容器外，还提供一个对周围空气的散热面。

油浸变压器的绕组和铁芯的温度，是下部低上部高。平常量

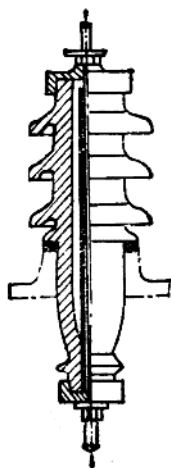


图 1-9 35千伏瓷制
充油式套管

测的是上部油温（油的最高温度）和绕组的平均温度，平均温度是通过量测绕组电阻的变化计算出来的。在一般变压器中，绕组的最高温度和平均温度相差约 15°C 。

变压器的绕组均用A级绝缘。根据我国的气候情况，国家标准规定，以 $+40^{\circ}\text{C}$ 作为周围冷却空气的最高温度，并据此规定变压器各部分的容许温升，如表1-1。

表 1-1 变压器主要部分的容许温升

变 压 器 部 分	最 高 温 升 ($^{\circ}\text{C}$)	测 量 方 法
绕 组	65	电 阻 法
铁芯表面	70	温度计法
油(顶层)	55	温度计法

由于没有旋转部分带动气流，变压器的冷却要比旋转电机更为困难。当变压器的容量增大时，散热面积的增加跟不上损耗的增加，因而更需要采取强有力的冷却方式。变压器的冷却方式，可分为以下几种：（1）油浸自冷式；（2）油浸风冷式（人工通风）；（3）强制油循环冷却式。

油浸自冷式变压器的绕组和铁芯中发出的热量，完全依靠油的对流作用传至油箱壁，然后由油箱壁的辐射作用和周围冷却空气的自然对流作用发散至外面。

油浸风冷式变压器是在变压器油箱的各个散热器上，安装一个或几个风扇，把自然对流作用改为强制对流作用，用以增加散热器表面的散热能力。

更大型的变压器，可采用强制油循环冷却式，兹不赘述。

1-4 国产变压器简介

建国以来，我国电力变压器的生产和制造技术有了迅速发展

展，现在已能生产600千伏电压等级、容量达36万千伏安的巨型电力变压器。

容量大于63000千伏安，电压高于110千伏的电力变压器，因电压组合及技术要求都比较单一，大多属于单台生产，并且这些产品的性能还在不断改进，所以尚未形成系列。容量小于63000千伏安，电压低于110千伏的电力变压器，我国已列入系列生产，它们的技术数据可以从有关手册查到。

我国已制定了新的《电力变压器国家标准》。它规定的符号含义如表1-2所示。但目前还有许多旧标准变压器在运行，故表中也将旧标准列出参考。

表 1-2 变 压 器 型 号 含 义

分 类 项 目	代表符号		分 类 项 目	代表符号	
	新	旧		新	旧
单相变压器	D	D	强迫油导向循环	D	—
三相变压器	S	S	双绕组变压器	—	—
油浸式	—	J	三绕组变压器	S	S
空气自冷式	—	—	自耦变压器	O	O
风冷式	F	F	无励磁调压	—	—
水冷式	W	S	有载调压	Z	Z
油自然循环	—	—	铝线变压器	—	L
强迫油循环	P	P			

按表1-2所列符号顺序书写，组成基本型号，其后加一短横，再加注额定容量（千伏安）/高压绕组电压等级（千伏）。例如，三相油浸自冷双绕组铝线500千伏安10千伏电力变压器，新型号表示为S-500/10；旧型号表示为SJL-500/10。又如三相强迫油循环风冷式双绕组铝线63000千伏安110千伏电力变压器，新型号表示为SFP-63000/110；旧型号表示为SFPL-63000/110。

我国生产的电力变压器除了容量、电压等级不断扩大外，在生产技术方面，也不断采用新技术。

例如，为了使变压器铁芯的生产过程便于实行机械化、自动

化,我国许多工厂已生产渐开线式铁芯。这种变压器的铁芯结构比较特殊。把若干张一定尺寸的硅钢片分别卷成渐开线状,然后迭成圆柱形的铁芯柱。用宽度等于铁轭高的条状硅钢片卷成三角形状构成铁轭。三个铁芯柱按等边三角形布置。铁芯柱和上下铁轭依靠穿心螺杆固定在一起。这种铁芯结构使三相磁路完全对称,缩小了尺寸,并且可以节约材料。但由于受硅钢片标准尺寸的限制,同时振动、噪声等问题也有待改进,目前最大的渐开线式铁芯变压器,容量为8000千伏安。

1-5 变压器的额定值和铭牌数据

为了变压器安全、经济地运行,并保证一定的使用寿命,制造厂对它规定了额定值或额定数据,并按额定值进行设计和试验。如按这种规定来运行,就叫额定运行。变压器的额定数据写在铭牌上,如表 1-3 所示。在正确使用变压器时,首先要掌握铭

表 1-3 铝 线 电 力 变 压 器

产品标准:				型号: S-1000/10		
额定容量: 1600千伏安				相数: 3		额定频率: 50赫芝
额定电压		高压: 10000伏		额定电流	高压: 57.7安	
		低压: 400/230伏			低压: 1443安	
使用条件: 户外式				油面温升: 55°C		
短路电压: 4.94%				冷却方式: 油浸自冷式		
接线联接图		相量图		联接组	开关位置	分接头电压
高压	低压	高压	低压			
				Y/Y _o -12	I	10500
					II	10000
					III	9500