

816 227

电 变 第25篇

主 编	藤 森 和 雄	(東 京 電 力)
执笔者	石 井 豐 章	(東 京 電 力)
	岡 田 達 也	(関 西 電 力)
	専 田 禎	(電 源 開 発)
	新 村 尚 人	(中 部 電 力)
	藤 本 純	(東 京 電 力)
	堀 内 恒 郎	(東 京 芝 浦 電 氣)
	村 中 慶 三	(東 京 芝 浦 電 氣)
译 者	郑 琛	

目 录

第1章 概述	25-1	6.3 照明设备	25-37
1.1 变电所的作用与主要设备组成	25-1	6.4 压缩空气系统	25-37
1.2 变电所的种类	25-1	6.5 绝缘子清洗装置	25-39
1.3 变电所的新建和运行	25-3	6.6 其他	25-41
第2章 变压器	25-4	第7章 直流变换设备	25-41
2.1 主变压器	25-4	7.1 直流输电设备与变频设备	25-41
2.2 有载分接开关	25-6	7.2 变流设备的实例	25-43
2.3 中性点接地方式	25-7	第8章 设计的协调	25-45
2.4 冷却方式	25-8	8.1 绝缘的配合	25-45
2.5 附属设备	25-9	8.2 污秽设计的协调	25-50
2.6 其他	25-9	8.3 电流的协调	25-52
第3章 母线及开关设备	25-11	8.4 其他	25-52
3.1 结线方式	25-11	第9章 计划、设计与施工	25-53
3.2 母线	25-14	9.1 计划	25-53
3.3 开关设备	25-19	9.2 设计	25-55
3.4 小型开关装置	25-21	9.3 施工管理	25-61
第4章 调相设备	25-24	9.4 试验	25-64
4.1 调相设备的种类与结线	25-24	第10章 运行与维护	25-67
4.2 电力电容器	25-25	10.1 变电所的运行	25-67
4.3 并联电抗器	25-25	10.2 变电所的自动化	25-69
4.4 电力电容器及并联电抗器的 最近趋势	25-26	10.3 维护检查	25-71
4.5 同期调相机	25-26	10.4 事故的处理	25-73
4.6 调相设备用开关	25-26	10.5 安全	25-75
第5章 监视控制与保护	25-27	第11章 自用变电设备	25-76
5.1 监视控制方式	25-27	11.1 自用变电设备的特点	25-76
5.2 继电保护方式	25-29	11.2 基本计划	25-76
5.3 配电盘	25-31	11.3 设计上应注意的事项	25-78
5.4 控制电缆	25-32	第12章 大电力系统变电所的新技术	25-81
5.5 高可靠性的对策	25-33	12.1 大电力系统的稳定装置	25-81
第6章 杂项装置	25-34	12.2 大电力系统的控制技术	25-84
6.1 接地和屏蔽装置	25-34	12.3 特高压变电所	25-86
6.2 所内电源、蓄电池	25-35	参考文献	25-88

第1章 概述

1.1 变电所的作用与主要设备组成

1.1.1 变电所的作用 由水力、火力及核能等发电站发出的电能，由于经济上的原因把电压升高，用输电线送到变电所，在这里把电压降低（有时再升高），用输电线再送到其他变电所，或通过输电线和配电线送到用户。这样在变电所除了把输电线送来的电压和电流进行变换、集中和分配之外，为了使电能的质量良好以及设备安全，还进行电压调整、电力潮流控制以及输、配电线和变电所的保护。

变电所的一般概念，不包括水力、火力及核能等发电站的变电设备或自用变电设备，而是指独立的电力用变电所及电气铁道变电所。

在本篇中，主要叙述电力用变电所，对自用变电设备加以概述。有关发电站的变电设备及电气铁道用的变电所，分别参见第21篇第8章、第22篇第7章及第31篇第6章。

1.1.2 变电所的主要设备组成 变电所为了起到它的作用，由主变压器、母线、开关设备、控制装置、互感器、避雷器、调相设备和其他设备组成。

(a) 主变压器 主变压器是变换电压的，一般在变电所多用于降低电压，在发电站多用于升高电压。变压器中有单相变压器和三相变压器，但由于制造技术的改进，提高了可靠性，所以一般使用经济上有利的三相变压器，单相变压器只在高压、大容量的500kV变压器等由于受到搬运上的限制时而被采用。另外，从500kV变电所到配电变电所一般趋向于采用附有有载分接开关的变压器。

(b) 母线与开关设备 在变电所内汇集着许多为集中和分配电力的输配电线，与主变压器一起接在母线上，在每条线路的引出口处装设断路器和隔离开关等开关设备。断路器通常用于电力的送出、停止或切换，当输、配电线和设备发生事故时则用来自动切断回路。

隔离开关用于当输、配电线路、变压器和断路

器等在进行维护检修时把它们从回路中断开，还有时用来切换母线环。至于，输电线引出口处的隔离开关等则是为了容易取得接地，一般带有接地装置。

(c) 控制装置与互感器 控制装置是变电所的中枢神经，值班员监视设备的运行状态，根据需要进行设备的操作以及联合互感器进行电压、电流和功率等的测量，当事故时由保护继电器自动地使断路器断开，把故障部分从回路中切除以确保设备安全，有时还起着为恢复供电而切换回路的作用。

互感器是由于变电所的高电压和大电流等不能直接测量，用来把它们变换成容易测量的电压和电流的设备，有仪用电压互感器、电流互感器和电压电流互感器等。

(d) 避雷器 避雷器是把系统中发生的如雷电和操作过电压之类的异常电压抑制在规定值以下，从而保护以主变压器为首的机器的绝缘的设备。

(e) 调相设备 调相设备，因为能在重负荷时使电流超前，轻负荷时使电流滞后，所以用来进行电压的调整，同时还能减轻电力损失。调相设备中，旋转型的有调相机，由于能快速且连续地进行输出功率调整，在增进系统稳定性上也起作用。静止型的有电力电容器和并联电抗器，输出功率调整上时间稍长，并且是分阶段不连续的，不能提高稳定性，但比旋转型调相机价格便宜，损失也少，所以广泛用于稳定性上有裕度的系统。

(f) 其他设备 变电所中除上述设备之外，尚有接地和屏蔽装置、所内电源、蓄电池、照明设备、用于操作机器和空气断路器消弧的压缩空气系统以及污秽地区绝缘子类清洗用的清洗装置等各种设备。

1.2 变电所的种类

1.2.1 从电力系统上去看的分类 把发电站发出的电能送到用户的输电系统的代表性例子示于第20篇图1电力系统的基本组成的示例中，根据变电所的用途、变压等级和高压侧电压，有下列各种

不同的名称。

(a) 按变电所用途分类

(1) 电力变电所 电力事业用的变电所一般称做电力变电所,有输电用变电所、配电用变电所和变频站。

输电用变电所,是把接收到的特别高压电变成另外的特别高压而送电的变电所,有升压变电所和降压变电所,升压设备一般和水力、火力、核能等发电站合在一起,很少有作为一个变电所而单独存在的。

配电用变电所是把接收到的特别高压电降为高压而进行配电的变电所。

变频站是联系两个频率不同的电力系统的变电所,我国的例子有佐久間和新信濃等变频所。此外,在进行直流输电的地方有直流输电用变电所。

(2) 电气铁道用变电所 是将一般电力系统由输电线路接收到的交流特别高压电,变成适合于电气铁道运行形式的变电所(见第31篇第6章)。

至于自用变电设备则是指用特别或普通高压接受电能,把它降到适当的电压,供给工厂和大楼建筑物中安装的各种电气设备的负荷以电力的变电设备。

(b) 以电压及变压等级进行分类 按承担任务的不同,可把变电所大体上分为输电用和配电用两种,但在一般情况下则根据变电所高压侧的电压称为500kV变电所、超高压变电所等。

另一方面,还有按变压等级进行分类的,把某一电力系统的最高输电电压进行降压的变电所称为一次变电所,然后再把次高的输电电压进行降压的变电所称为二次变电所,也有把在一次变电所与配电用变电所中间变换电压的称为中间变电所。但是,一次变电所和二次变电所的叫法,如果在其后又引进了更高的电压时则有改变同一变电所的称呼上的不便。在我国,由于大正末期以来,最高电压为154kV的年代继续了很长,所以把154kV降到其他输电电压的变电所称为一次变电所,与其后引进的高压变电所一起并用如下称呼。

(i) 500kV变电所 从500kV降到275~154kV的输电用变电所。

(ii) 超高压变电所 从275~187kV降到154~66kV的输电用变电所。

(iii) 一次变电所 从154~110kV降到77~22kV的输电用变电所。

(iv) 中间变电所或二次变电所 从77~66kV降到33~22kV的输电用变电所。

(v) 配电用变电所 从154~22kV降到配电电压的变电所。

作为一个特殊例子来说,还有用于不同电力公司间进行电力交流的联络变电所,其中起不同频率系统间联络作用的称为变频站。再有不列入变电所范围内,不设置变压器,只通过母线起到输电线的集合和分配作用的叫做开关站。

我国的变电所在不同电压下的输出功率和个数示于表1。

表1 变电设备在不同电压下的个数与输出功率(昭和51年3月31日当时)

高压侧电压等级(kV)	个 数	输出功率(MVA)
6.6	5	27.0
11	11	46.5
22	295	3952.3
33	272	3375.2
44	7	71.9
55	2	15.6
66	1625	42062.5
77	386	32713.4
110	123	9818.9
154	180	52694.0
187	17	4023.0
220	21	9060.0
275	65	52174.0
500	11	28750.0
合 计	3470	238784.3

1.2.2 按变电所的不同形式分类 变电所按其形式的不同可分为户外式、户内式、半户内式、地下式和移动式等。

(a) 户外变电所 主变压器和开关设备等主要回路设备全设在户外,仅配电盘等控制装置设在户内,用地面积虽然要多,但设备配置整齐,施工费用少。

(b) 户内变电所 是将主变压器和开关设备等主要回路设备及配电盘等控制装置都设在户内的变电所,比户外变电所用地面积少,但建筑物工

⑤ 这里的特别高压是指7kV以上至超高压一段的高电压,不是特高压UHV。——译者注

程费用高。

至于,主要设备的一部分放在户内,其余设备设在户外的叫做半户内变电所。

(c) 地下变电所 是在都市中心等处难于找到用地时,将以主变压器为首的主要设备安装在建筑物和公园等的地下的方式。至于变压器等的冷却设备则设在建筑物的顶上或地面上。

(d) 移动式变电所 是把移动用的变压器、电缆、配电柜等载于拖车或载重汽车上,在处理事故和扩建工程时用的变电设备。一般很少像作为变电所那样齐全,而是按照需要由移动用变压器、移动用电缆、移动用配电柜等组成的。

1.2.3 按不同运行方式分类 变电所按运行方式可分为常时监视控制变电所、远动常时监视控制变电所、断续监视控制变电所、远动断续监视控制变电所和简易监视变电所。

1.3 变电所的新建和运行

1.3.1 变电所的新建

(a) 加大容量和提高可靠性 最近的电力系统的特征是,由于建厂地点难定,火力和核能等的发电电源的距离越来越远,规模越来越大,随之,把发出的电能送往用电地区的输电线和变电所也明显地高电压大容量化,特别是,集中输电干线的500kV变电所,在每一个地点就会有5~10GVA的超大容量。

以500kV为首的骨干变电所,由于稳定供电特别重要,于是在寻求可靠性高的大容量变压器和断路器等各种主要设备的同时,还要在万一发生故障时把它的影响局限在最小范围。母线结线方式也应采用双母线四分段或者一个半主母线等可靠性高的方式。要采用高水平的控制装置以及包括机器、控制装置与控制电源等在内的设备双重化或完全按单元机组划分的设计等万无一失地提高可靠性的方法和措施。

(b) 小型化和环境调和 为对付不仅都市内

也包括市郊,在确保变电所用地上的明显困难,同时为了满足安全、公害等有关社会要求,所需空间的小型化以及与周围环境的调和成为新建变电所中的最大的课题。

特别是对一般变电所中占用空间最大的母线、开关设备之类的绝缘空间,把以往的空气绝缘换成绝缘强度大几倍的SF₆气体、绝缘油和环氧树脂绝缘的超小型化的小型变电所,不仅保证了用地,调和了环境,在提高经济性和安全性以及节省维护上的劳动力方面等也有很大效果。

另一方面,近年来配电用变电所等往往密集地建在市内街道中,所以变电所在小型化的同时,还要减低作为噪声源的变压器及其冷却装置、断路器等噪声,并慎重考虑防止机器的灾害、为防日照而减低地上高度以及与环境相调和的色彩、外观等。

1.3.2 变电所的运行 对于变电设备在数量上的增大及电力供应对提高可靠性的要求,要实现开关设备之类的远方操作、输配电线的重合闸和自动操作装置等的各种自动化,加强调度、配电等有关部门的协调,并促进使用电子计算机的变电所的大规模集中控制。

另一方面,为适应伴随高电压大容量化而来的机器的大型化和变电所的规模与数量的增加,在劳动力紧张的情况下,要尽可能使维护省力。为此在谋求各种机器不维护、不检查的高可靠性的同时,还引进防备万一发生事故的控制装置的常时监视自动检查方式,并促进变压器在不停运时也能检测出异常状态的油中气体分析等异常诊断方法等的检查维护的自动化与合理化。

还有,为了安全而有效地维修象500kV设备那样的大型设备用的检查作业车、可移动式接地装置等维修器具,以及能够容易地测试保护控制装置的试验装置等已被付诸实用,并获得省劳力的效果。

另外,以处理事故为主要目的的移动式变压器和电缆等也在应用。

第2章 变 压 器^{(1)~(6)}

2.1 主 变 压 器

2.1.1 容量的选择 决定变压器的单元容量时主要因素有：(i)设置变压器时的初期负荷，(ii)今后的发展趋向，(iii)变压器事故时的对策，(iv)变压器的利用率等，其中负荷的因素占很大比重。随着电力系统的急剧扩大，各种电压等级的变压器容量如图1所示依次在增大。

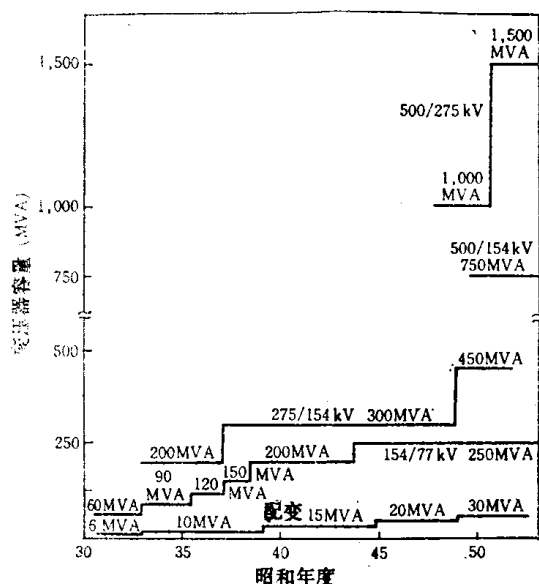


图1 变压器单元容量的变迁

组成电力系统中心的骨干变电所，由于不仅仅是供给负荷，同时还具有把各方面的电源系统并入网内的联络机能，所以不但要适当掌握负荷，还要考虑到变电所的定期检查、事故停运和电源送电线的事故停运等，以及包括本所事故对策以外的因素来决定容量。表2示出骨干变电所和一次变电所的标准容量。

最近配电用变电所不经过二次变电所，基本上都是直接由一次变电所供电。因此，二次变电所的主要作用是向中小规模的特别高压用户供电，固定的用电量一般很难预测，可以根据各个具体情况决定容量，表3示出采用较多的容量。

为配电用变电所时，除初期负荷及其密度、将

表2 骨干及一次变电所的标准容量

电 压 (kV)	变压器组容量 (MVA)	变压器组数	总 容 量 (MVA)
500/275	1500	4~5	6000~7500
	1000	4~5	4000~5000
500/154	750	4~5	3000~3750
275/154	300	4~5	1200~1500
	450	4~5	1800~2250
275/77 (66)	200	3~4	600~800
	250	3~4	750~1000
	300	3~4	900~1200
154/77 (66)	100	3~4	300~400
	150	3~4	450~600
	200	3~4	600~800
	250	3~4	750~1000
154/33 (22)	60	3~4	180~240
	100	3~4	300~400
	150	3~4	450~600

表3 二次变电所的标准容量

电 压 (kV)	变压器组容量 (MVA)	变压器组数	总 容 量 (MVA)
77/33 (66) (22)	30	2~3	60~90
	45	2~3	90~135
	50	2~3	100~150
	60	2~3	120~180

表4 配电用变电所的标准容量

地区划分	负荷密度 (kVA/ km ²)	变 电 所 容 量		
		变 压 器 组 的 组 成	变压器 组 数	总容量 (MVA)
大 城 市	10000以上	三相15 MVA 或三相20 MVA	3	45~60
大城市周围 中等城市中心	3000左右	三相20 MVA 或三相15 MVA	2 3	40~45
中等城市和小 城市一般地区	1000左右	三相10MVA	3	30
城 镇	100~ 300左右	三相6MVA	3	18

来的增长率外，还要考虑当变压器出事故时的邻近变压器组的切换能力、向邻近变电所配电的切换能力与切换时间等，算出再建输电线、变电所、配电

线时投资最小的容量。表4示出不同负荷密度的标准容量。再有随着变电所容量的增大而来的输电线和配电线的尺寸的增大也要一起加以研究。

2.1.2 相数的选定 对同一容量的变压器组,用一台三相变压器和用三台单相变压器组成的来比较三相变压器的价格和损失,都是约为单相变压器的80%。

在变电所的设计当中,必须充分探讨运行初期的变压器组数和是否需要备用变压器等,但最近由于下述理由基本上都采用三相变压器。

(i) 新建当时或新建后的较近几年内从负荷上需要有两组变压器,以便能互相适应事故。

(ii) 变压器设计制造技术有所提高,事故很少。

(iii) 变压器的运输极限容量有所扩大,大容量的三相变压器的整体运输有了可能。

(iv) 有载分接开关对三相变压器远为有利。

(v) 可以大幅度缩小三相变压器的安装面积,变电所能够设计得比较紧凑。

但500kV变压器等特大容量的变压器,由于受运输上的限制而作成单相。即或275kV以下的变压器在运输上受到限制时也作成单相,搬运到现场后再组装成三相使用。

2.1.3 电压的选定 因为额定电压和分接电压可按JEC-168(1966年)决定如表5,所以在容许的情况下希望按表中所列选定,但在研究决定时,对连接变压器的系统的运行电压的实际情况,特别是高阻抗的变压器,其电压变动率和过励磁限度(5%)等都要进行综合的判断。

2.1.4 结线方式的选定 变压器的结线采用Y-Y-△、Y-△、△-△。在用单相变压器组合使用时,也有用除掉△-△一个边的V-V结线的情况。

(a) Y-Y-△结线 一次二次两线圈的中性点能够接地,一次二次间没有相位移。在没有△线圈时则产生如下一些问题。

(i) 变压器铁心的励磁特性呈非线性,且有磁滞现象,因而励磁电流中含有很多三次谐波成分。如果没有△结线则没有励磁电流中三次谐波的通路,所以感应电压成为含有大量三次谐波的失真波形。

(ii) 当中性点不接地时中性点电位仅仅增高

表5 标准额定电压及标准分接电压

分类①	一次电压(%)②	二次电压(%)③
A	参照③	F115/R110/F105 或 F110/R105/F100④
B	F115/R110/F105 (F115)/F110/R105/F100 或 (F110)/F105/R100/F95	R110 或 R105④
C	(F115)/F110/R105/F100 或 (F110)/F105/R100/F95	R115 或 R110④
D	F115/F110/R105/100/95	参照⑥

① 变压器的分类按下表。

② 本表的电压值,是以回路标称电压与回路标称电压除以1.1的百分比表示的。

③ A种变压器的额定一次电压,考虑到电压变动率,选定比发电机端子电压低0~5%的数值。

④ 适用于到负荷端送电距离短的场所。

⑤ 括弧内的分接电压,适用于一次回路电压在77kV以下的场合。

⑥ D种变压器的额定二次电压定为105V及210V。

变压器的分类

略号	分 类
A	把发电机电压升高到高压或特别高压的升压变压器
B	把特别高压变为其他特别高压的降压变压器
C	把特别高压或高压降为高压的降压变压器
D	从高压降到低压的降压变压器

三次谐波部分。

(iii) 中性点如果接地,对地电压中含有的三次谐波分量由于线路常数的不同,有发生串联谐振而产生异常电压的可能。还由于通过中性点流过三次谐波电流,成为对通信线起感应干扰的原因。

根据以上情况大容量高电压的变压器带有△线圈(也叫稳定线圈),但除以上的目的而外,为了在接地故障时使接地电流流过,连接调相设备,和供给所内电源都可使用三次△线圈。

(b) Y-△结线 其特点是把上述Y-Y-△结线的优点用2绕组变压器来完成,广泛使用于275/77(66)kV、154/77(66)kV等降压用变压器。

(c) △-△结线 有三次谐波的环流通路,有在用单相变压器时即或有一相发生故障也能按V结线继续运行等优点,但因不能进行接地保护而要另设接地变压器,以及有载分接开关形成线间电压等

缺点,所以只限于小容量的 33kV 以下的变压器。

(d) V-V 结线 作为事故时的应急处理,以及在新建的负荷轻而预计将来负荷会增加等特殊条件下可以采用,但与 Δ - Δ 结线比输出功率只有其 58%,电压降也不平衡,所以平常很少使用。

2.1.5 自耦变压器 变压器的中性点,因其不同电压等级而接地方式或接地电阻值有所不同,因而不能采用自耦变压器,但 500~187kV 系统因为是同一个中性点直接接地方式,可以采用自耦变压器。

自耦变压器如图 2 所示,为抵消二次侧电流 I_2 的磁动势而从一次侧流入电流 I_1 ,流过 B-C 间的电流为 I_2-I_1 ,所以变压器容量与变压器输出功率的比为

$$\frac{V_1(I_2-I_1)}{V_2I_2} = 1 - \frac{I_1}{I_2} = 1 - \frac{V_2}{V_1}$$

一次电压与二次电压的比在 5 以下时,则对输出功率来说容量急剧减小,非常经济。

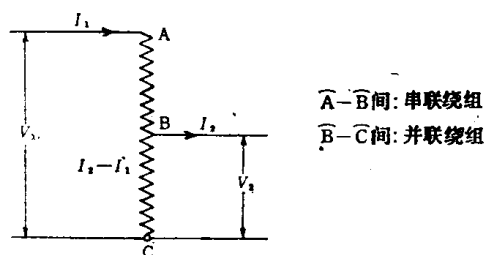


图 2 自耦变压器

2.1.6 阻抗的选定 变压器的励磁磁通不能全在各绕组间交链而产生漏磁通,起着电抗的作用,与绕组的电阻一起合成变压器的阻抗。

变压器的阻抗很小时,电压变动率小,系统的稳定性也好,但除系统的短路容量之外,变压器气隙磁通密度增加,铁心重量增加,损失比(满载损耗/空载损耗)变小,最高效率的负荷点变高。当阻抗大时,这些现象完全相反。

变压器有可以做出经济设计的阻抗值,表 6 中示出的标准值大体上就是这个值。随着电压的提高和容量的加大有走向高阻抗化的倾向,如图 3 所示一直到标准值的 150%左右时在价格上几乎不变。阻抗值应按能抑制发展到最后的二次系统的短路容量到目标值来选定,但极端的高阻抗变压器,不管价格和制造上都有问题。

表 6 电力变压器的阻抗标准值

标称电压 (kV)	阻抗电压 (%)
11	4.5
22	5.0
33	5.5
66	7.5
77	7.5
110	10
154	11
187	12
220	13
275	14

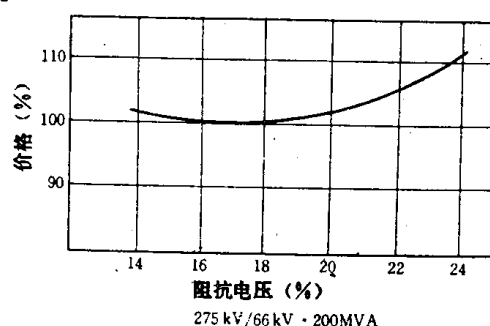


图 3 变压器阻抗电压百分比与价格的关系示例

2.1.7 噪声规格的选定 变压器的噪声主要是由硅钢片的磁致伸缩振动和为进行强制冷却用的风扇所引起的,其值示于 JEM-1118 (变压器噪声水平的标准值)。

通常变电所根据都、道、府、县的噪声防止条例规定出极限噪声值,除了变压器和到变电所边界的距离衰减量之外,为使其衰减到规定极限值的各种降低噪声措施也是非常需要的(见第 9 章及第 16 篇第 17 章)。

2.2 有载分接开关

2.2.1 有载分接开关的种类 为达到提高系统的可靠性和设备的合理使用,最近的输配电用变压器几乎全都应用有载分接开关装置,进行着以无功功率控制为主的电压调整工作。

以具有串联绕组的变压器与有载分接开关装置组成的有载电压调整器(LRA),也有使用于配电用变压器二次侧等处的例子,但最近几乎都使用在变压器中装进有载分接开关装置的有载分接调压变压器(LRT)。

有载分接开关装置虽有多种型式,但最近几乎都采用直接式调整和电阻式限流(见第 16 篇第 9

章)两种。

有载分接开关器有装在变压器本体油箱内的内装型和与变压器本体油箱分开装在独立油箱内的外装型两种,但除了由于高电压大容量化而受到向现场运输的制约的某些场所外,几乎全采用内装型。

2.2.2 电压调整范围与级电压的选定 有载分接调压变压器的电压调整范围,是以标称电压(JEC-158) $\times 1/1.1$ 的 25% (配电用), 20% 和 15% (输电用) 作为标准的,中心电压希望尽量和额定电压相一致。至于级电压采取与系统容许的电压变动幅度(一般为 1~2%) 相等就可以,但有载分接开关的切换能力有一定限度,所以级电压宁可小些。分接头的点数标准示于表 7。

表 7 标准分接头点数

9	11	13	15	17	19	21	23
---	----	----	----	----	----	----	----

2.2.3 在大容量变压器上有载分接开关的应用 随着变压器的大容量化,有载分接开关的容量也要增大,除了增大有载分接开关本身的容量外,也可以相应采用改进连接方法而获得解决。这种方法可以采用:把通过卷在公共铁心上的分流器的电流分成两路一同切换的方法;和如图 4 所示,当变压器绕组有 2~3 个并绕时,按每个绕组单元各与有载分接开关相连接,可把容量增加到相应并联数的倍数的方法。在 154kV250MVA、275kV450MVA、500kV1000MVA 等变压器中可以采用这些方法。

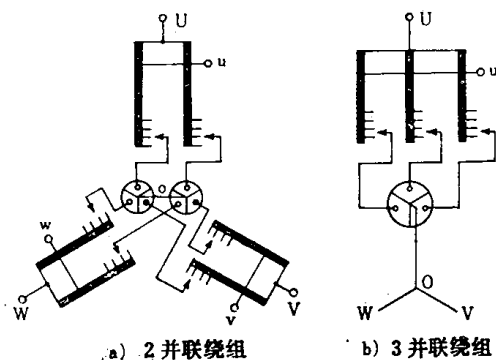


图 4 并联绕组的并联调整方式

2.2.4 在自耦变压器上有载分接开关的应用

自耦变压器的有载分接开关的使用方法示于图 5。图 (a) 在绝缘上最有利,由于具有能利用三相有载分接开关的优点,转换分接头时高、低两侧的绕组数同时变化,在分接头取等间隔调整时电压

调整值并不相等,但我国的 500kV 变压器,由于其 (高压-低压)/高压 (配合比) 比较大,调整范围比较小,所以可以使用这种方式。图 (b)~(d) 三者有载分接开关都接在二次侧分接头处,要提高绝缘。至于图 (e)、图 (f) 是通过串联绕组间接地进行电压调整,所以都能取得等间隔的级电压。

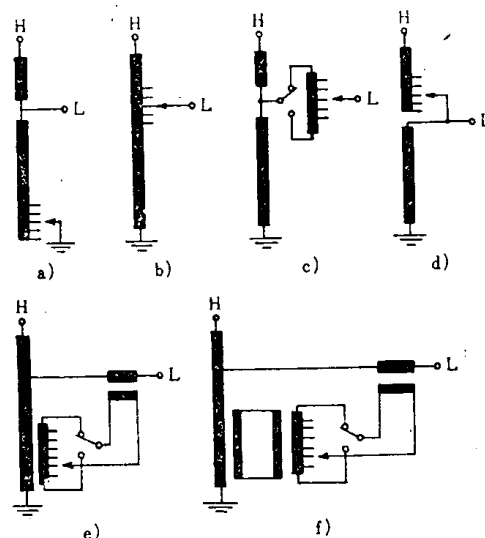


图 5 自耦变压器的分接调压方式

2.3 中性点接地方式

2.3.1 中性点接地方式的种类 当中性点不接地时,系统在接地故障时将发生异常电压,威胁到联结的电力设备的绝缘,不能得到用保护继电器确切地反映出系统接地故障所必要的电压和电流等,以致出现各种故障。所以除较低电压的小系统外,中性点都需经过中性点接地装置接地。

中性点接地方式中有有效接地(直接接地)、非有效接地(电阻接地)、补偿电抗线圈接地、消弧线圈接地及不接地等方式,在我国电力系统中 187kV 以上的用直接接地,154kV 以下用高电阻接地,一部分用消弧线圈接地,至于 22~77kV 电缆系统则用电缆电容的补偿电抗线圈接地及低电阻接地。33kV 以下系统除局部遗留下来的外全采用不接地方式。

中性点接地方式,因其种类、一线接地时的异常电压和接地电流的大小、应用继电保护方式的难易以及对通信线的电磁感应干扰等而都有差异,要对此加以比较和探讨,然后选定接地的方式。

2.3.2 使用中的一些问题 直接接地方式是将变压器中性点直接接到接地电极上的一种方式,所以当一线发生接地故障时非故障相的电压上升最

小,电力设备的绝缘可以显著减低。另一方面,由于接地电流大,容易给通信线造成很高的电磁感应电压。因此除了输电线要进行充分的绝缘设计尽量使其不发生事故之外,当万一发生事故时,为尽可能使流过线路的接地故障电流的持续时间缩短(0.1秒以内),需要采取能准确并快速地进行选择切断的性能良好的继电保护装置及断路器等措施。另外,虽然在满足大电流直接接地的条件下,为了抑制单相接地电流,也可以在变电所的变压器组中,使一部分为不接地,其他采用直接接地的方式。

电阻接地方式是为了抑制单相接地电流,把系统的中性点经过电阻器进行接地的方式,接地电阻值在154kV系统为400~900 Ω ,66~77kV系统为100~400 Ω 程度,所有各电压等级的单相接地电流大多能抑制在100~300A程度,因为电阻值较高,一般称做高电阻接地方式。电阻器的安装场所,有在系统的一个地点接地的集中接地方式和在系统两个以上的地点接地的分散接地方式。后一种方式的故障电流分散流过各电阻器,所以能降低对通信线的电磁感应电压,此外,还有当输电线故障时即或系统解列,解列后的各个系统也不会造成不接地的好处。这种接地方式一线接地电流虽然抑制到很小,但由于继电保护方式采用了高灵敏度的接地继电器,能选择性切除故障。

补偿电抗线圈接地方式是近来作为都市中伴随电缆系统增加而来的对地充电电流增大的对策,为使流过中性点电阻器的电流不增加以抑制异常电压,而在中性点装设补偿电抗线圈来补偿对地充电电流的方法。补偿电抗线圈的接地场所,专对长距离单回电缆线路进行补偿时最好装在受电端,若有多数短距离电缆回路一起进行补偿时则最好设在送电端。

消弧线圈接地方式是为了达到与系统中对地电容发生谐振那样的电抗线圈在中性点接地的方式。这种方式,是用通过消弧线圈的电流抵消一线接地时的对地充电电流,使故障点的电弧自行熄灭而防止发生停电及异常电压的一种办法。为此,消弧线圈具有能适应因系统变更而引起对地充电电流增减的许多分接抽头。此外为了抑制系统操作时的过电压,以及永久性接地时选择并切除故障线路,除消弧线圈外,在许多场合下还装设并联电阻器。

2.4 冷却方式

2.4.1 冷却方式的选定 变压器的冷却方式,要通过对容量和安装场所的条件(变电所形式和噪声等)、运行维护以及与其有关的经济性等进行综合分析来选择最适当的方式。

油浸自冷式是在运行维护上方便的最简单的冷却方式,但容量很大时散热器数量增多而使安装面积也增加,因而很不经济,此外,散热器直接装到变压器上也有困难。一般只30MVA以下的变压器可以采用。

油浸风冷式是在油浸自冷式的散热器上装上冷却风扇的方式,可以很容易地提高20%~30%的容量,所以在油浸自冷变压器过负荷运行时既简单又有效。

强迫油循环自冷式用于为防止大容量变压器的噪声而把变压器主体放在室内,散热器组则设在室外时的方式。

强迫油循环风冷式最适用于为使冷却装置能够小型化的大容量变压器。由于冷却风扇的噪声大,近来采用与消音通道配合使用的低噪声型组合单元冷却装置。还有把强迫油循环风冷式冷却装置装于变压器外与主体分开,并设置引、排气风筒的方式,用于地下式变电所。这种方式当容量大风筒所占的面积大,很不经济,所以在一般情况下只用于地下式相当于配电级别的变电所。

强迫油循环水冷式在地下式大容量变电所那样受到安装空间和冷却上的限制时采用。由热交换器和冷却塔组成,在初期是设置冷水槽和温水槽的水槽方式,但最近有效利用了循环泵扬程小的特点,所以基本上都用直接循环方式。从前变压器采用的油浸水冷式,由于需要大量的优质冷却水及维护上的麻烦,目前已基本上不采用。

2.4.2 使用上的一些问题

(a) 强迫油循环风冷式组合单元冷却器的成组控制 从油泵启动时需要的电源容量来考虑,有把组合单元冷却器分成2~3组,其中一组在变压器励磁同时投入运行,经过某些时间后再投入其余的冷却器组。或者从经济运行的观点出发,也有按照负荷大小和温度,启动或停止冷却器的方法。

(b) 冷却器故障时的变压器的运行 当变压器运行中由于冷却设备停电或发生故障,一部或全

部停止运行时,冷却效果减少。因而变压器若继续运行,则要按照冷却器的停用情况限制负荷。

(c) 用热泵的废热利用 最近,在大都市中建设的大容量变电所,用大规模的冷却装置把从变压器等放出大量热能(总损失达数千 kW)放散到外部。利用这种排出的废热的一部分,由热泵加热蓄热槽,送到建筑物做暖气使用。图 6 示出该冷却系统的原理图。

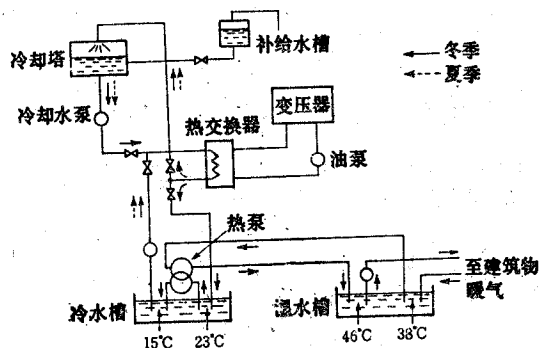


图 6 使用热泵的废热利用原理图

2.5 附属设备

详见第 16 篇第 6 章和第 12 章。

2.6 其 他

2.6.1 运输与变压器的形状 为确保变压器的可靠性,不仅在制造厂要有完善的设计和加工,在一年比一年坏的搬运条件下,变压器的搬运和在现场的组装作业成了重要的课题。最近的变压器由于电压高、容量大而致形体加大,所以要考虑到在运输上特别有利的体形,和在现场组装作业时能缩短作业时间的结构。

运输的状态,有把变压器本身作成是一个整体运输的整体运输型,和把变压器分成几部分运输的现场组装型。变压器能整体运输的范围,由运输时的尺寸限制和重量来决定(见第 16 篇第 12 章)。

由运输状态决定的可能运输的最大容量,在整体运输型及特殊的三相变压器中实际已达到 275kV 级 450 MVA (240 t) 左右。至于 500 kV 变压器,对每相分别装在独立壳体的单相变压器已整体运输到 1500/3 MVA (220 t)。

2.6.2 现场组装作业的办法和管理 对最近的高电压大容量级的变压器在现场进行组装作业,

既复杂又需要很长时间。所以对每台变压器在不同条件的现场组装作业还必须要有高水平的作业管理,建立起能维持工厂出厂质量标准那样的现场作业管理标准,以期做到万无一失。以 154 kV 级以上的变压器为对象,主要的管理事项如下。

(a) 防止绝缘物吸湿 变压器运输中用密封并充入氮气的办法控制压力以期防止吸湿,在现场进行组装作业时尽量缩短绝缘物在大气中的暴露时间,在变压器壳体内作业时等情况下要用送入干燥空气来降低其相对湿度等方法力求防止吸湿。在最坏的条件下在大气中暴露的时间要限制在 50 小时左右。

(b) 防止过大的冲击 考虑到变压器在运输中的冲击,通常的设计为 3 g 左右。运输中用冲击记录表等监视并用限制行驶速度以防止发生过大的冲击。

(c) 防止油箱内混入异物 组装作业时为使尘埃和异物混入油箱,于周围装设隔壁的同时,为使作业不出差错,还要按作业管理标准进行管理。另外,要充分注意在作业场周围洒水等环境整備。

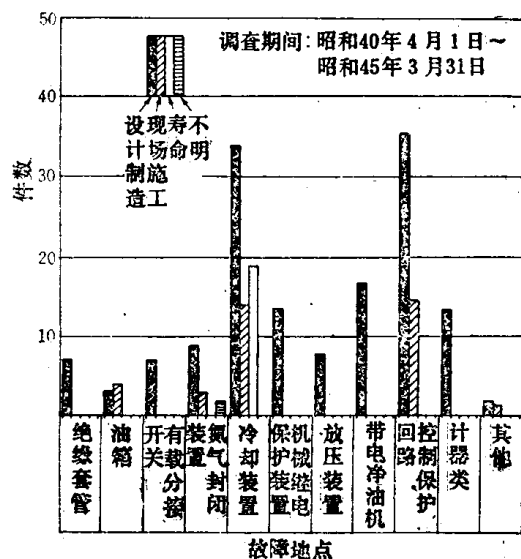
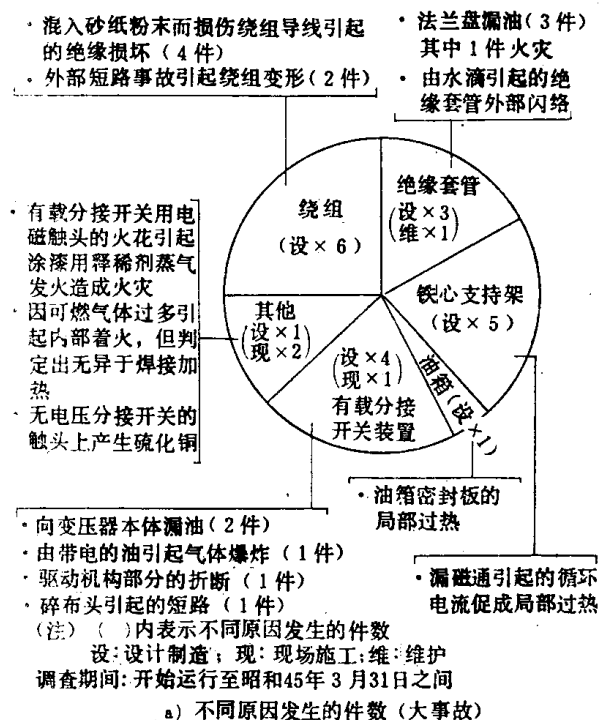
(d) 除掉绝缘物中的水分 经现场热风干燥后的绝缘物表面部分上的水分,必须至少能满足电气性能的要求而达到 20% 以下。

(e) 绝缘油的管理 以往,管理绝缘油仅靠绝缘破坏电压值,但是有必要控制油中含水量在 20 ppm 以下,油中的全部气体含量在 2.0% 以下。

(f) 除去绝缘油中的微小尘埃及残留气泡 绝缘油要在通过循环过滤充分脱气、清除浮游的微小尘埃的同时,在施加电压之前为消除残留气泡而至少还要静止放置 36 小时以上的时间。

2.6.3 事故及其防止措施 变压器事故,按其内容可以区别为变压器本体内部检查和更换套管之类的大事故和如把故障置之不理也能正常运行的小事故。根据最近的调查,得到如图 7 所示的调查结果。其中大事故多出在绕组和铁心的支架,显然占全体的 46%。至于现场组装作业引起的主要事故的例子及其防止措施示于表 8。

防止这些事故的措施,对于处理困难的大事故,就要进一步加强制造及现场组装作业的管理,根据重新评价工厂试验及现场验收试验,对铁心支架的局部过热和绕组导线受损伤等内部故障、各处漏油



b) 不同原因发生的件数 (小事故)

图 7

表 8 因现场作业引起的主要事故的例子及其防止对策

大容量变压器在现场作业中引起的主要事故例子	防止事故的主要措施
绝缘物的吸湿	建立绝缘物吸湿防止法及绝缘物水分的管理标准
油箱内作业时混入异物	防止油箱内混入异物的标准化
焊接不良	明确焊接作业中注意事项及油气密封试验的标准化
油密封作业不良	明确法兰盘油密封作业中注意事项及油气密封试验的标准化
配线作业不良	明确变压器本体周围配线作业的注意事项
绝缘套管保护盖的装配不良	明确配件装配上的注意事项
涂油漆用器材的管理不良	为防止安装中发生火灾而明确可燃性器材保管中的注意事项

以及绝缘套管龟裂等, 从设计到施工切实地采取完整的防止措施。还有采用油中气体分析和局部放电试验等新的检测方法, 对早期发现异常现象是非常必要的。

至于对小事故, 也要靠加强试验和巡视检查等来预防。

此外, 作为防止事故扩大的对策, 特别是对直接接地系统的变压器, 要设置固定的灭火装置和大型灭火器, 即或万一发生火灾时, 可以采用由继电器等自动启动的积极的灭火方式。还有为防止延烧而设置防火壁和防火水幕等的情形。此外, 在防止公害对策上设有防止油、水流出的堤坝和储油、水的槽, 以防止万一发生火灾时使流出的油和灭火用的水外流。这些设备的配置例子示于图 8。

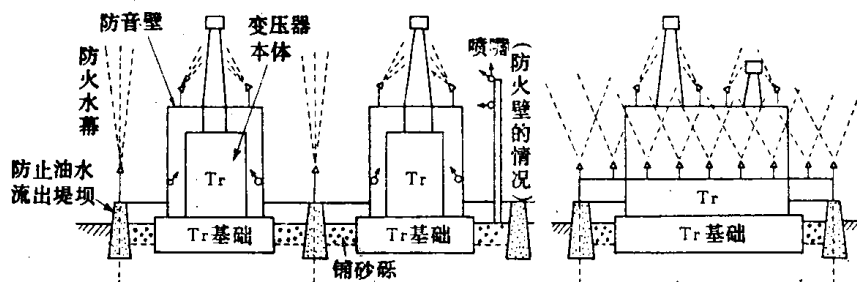


图 8 预防变压器事故扩大的措施例子

第3章 母线及开关设备

3.1 结线方式

变电所的母线结线方式,要使其能充分发挥电力系统的枢轴作用,从电源系统到配电系统,要按照这个特性,综合探讨其可靠性、系统运行的灵活性、运行维护以及经济性,以选出与系统组成取得充分协调的方式。

3.1.1 结线方式的种类 母线的形式,基本上有单母线、多重母线和环状母线,但也有省略母线的。

(a) 单母线 如图9所示的单母线是最单纯的母线形式,为了所需装备和空间少,在经济上有利,结合机器设备可靠性的提高,一般可以广泛采用。但大规模的变电所中,多集中了很多输电线,主变压器和断路器等设备很复杂,万一这些设备发生故障,有时会造成变电所全部停电,在母线及母线侧断路器检修时变电所也要停电,所以要作成装有分段开关装置把母线分成几个区段的结构。

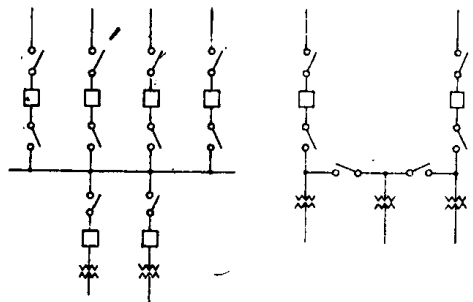


图9 单母线

(b) 多重母线 多重母线有双母线、三重母线和四重母线等,三重母线和四重母线一般不用。

图10是标准的双母线,备有母线联络用开关。这种母线比单母线虽然需要的断路器、母线、铁结构及占地面积都增加,但设备的检修和系统的运行都非常便利。就是停止一侧母线,可以不同时停止输电线和变压器,停止母线侧断路器时也只是停止该回线或变压器。另外我国的架空输电线路多为两回线,常时1号线接在甲母线上,2号线接在乙母线上,如果两线负荷平衡,发生事故时能够用断开

母线联络用断路器来大大缩小停电的范围。此外,还能由甲母线和乙母线分开运行而形成两个不同的系统运行。因此靠电源系统的变电所一般可以采用这种结线。

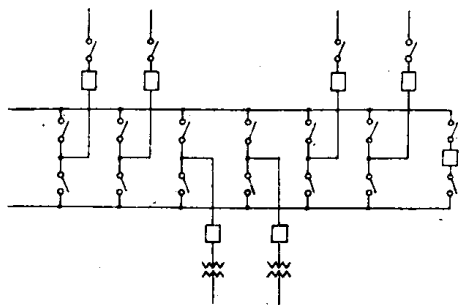


图10 标准双母线

此外,特别是在骨干系统的变电所中,为了发挥双母线的特点,进一步提高可靠性,可以采用下述的双主母线4分段方式或 $1\frac{1}{2}$ 断路器方式等。

(c) 环状母线 图11是环状母线的代表性例子。环状母线占地面积少,便于部分母线的停运和断路器的检修,但因在系统运行上,具有不如双母线那样灵活、控制及保护回路复杂、串联机器设备的电流容量增大等缺点,所以国内几乎没有使用。

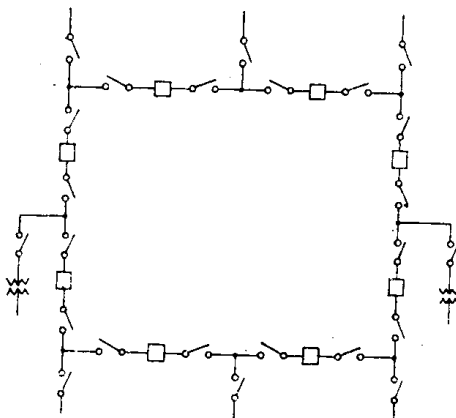


图11 环状母线

(d) 检修母线 检修母线(也叫切换母线或辅助母线)如图12所示是在单母线上再附加上的母线,以便于母线及断路器的检修,但不能作到像

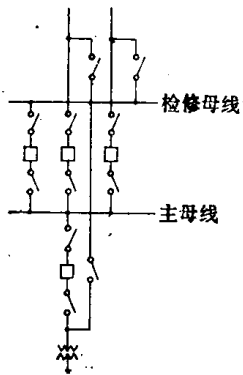


图12 检修母线

标准双母线那样有伸缩性的运行。

3.1.2 结线方式的选定 结线方式，除了要
考虑系统的运行、设备的检修及事故时的处理、扩
建工程和环境等外，还必须考虑停运的难易，即变
电所的开动率、重要程度和对该地区的服务水平，
经济而合理地进行选定。再者，变电所的结线方式
与系统的结构和母线的保护方式有关，从系统整体
来看，希望选定能协调起来的结线，采用可靠性高
的机器设备并力求简洁化。

(a) 一般的选定的设想

(1) 对事故考虑的问题 为了从电力系统最
小限度地切除发生故障的部分，原则上在每台变压
器、每条输电线的引出口、每根母线间安装断路器。
但由于运行上或其他保护装置的关系，也有省略部
分断路器的情况。

(2) 对检修考虑的问题 当断路器等机器设
备进行检修时，就要把设备从回路分离出来，并如
图9~12所示那样设置断路器。

(3) 对工程考虑的问题 在建设变电所之
初，很少有把最终规模的设备完全安装上的。随着
用电量的增加，就要增设或更换变压器以及增设输
电线的引出设备等，因此，对这些工程需要尽可能
在结线和机器配置上作出充分考虑。

(b) 骨干系统的结线方式 500 kV 和 275
kV 的骨干系统的电源及输电线的施工，由于投
资和用地的限制等问题而是流动的，并且工期拖的很
长，所以往往使系统有保持不正常状态的机会和变
电所工程多出现阶段性而且频繁的施工。再有最近，
系统容量增大，出现了变电所容量和通过潮流庞大
的变电所。

从这样的观点出发，要对 (i) 输电线事故和

母线事故时对系统的影响，(ii) 对于流动的电
源、输电线工程的适应性及扩建工程的安全性，(iii)
系统运行操作的容易性，(iv) 经济性，等等进行综
合探讨，可以采用双母线4分段方式或 $1\frac{1}{2}$ 断路器
方式。

(1) 双母线4分段方式 这种方式如图13
所示那样，恰如用断路器将两个变电所结合起来的
方式，即或万一有个母线出故障，其影响不超出 $1/4$
母线范围，可以减少对系统的影响。

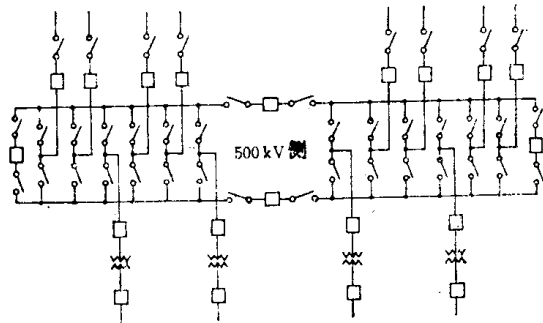


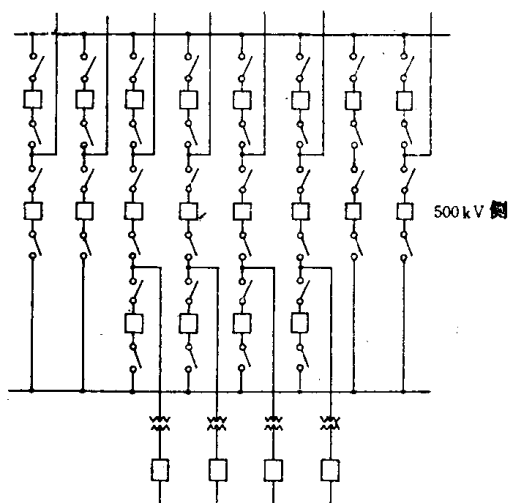
图13 双母线4分段方式

再有，对因电源地址和输电用地情况等所造成
的流动的系统结构可以配合起来分阶段地得到适
应，并由于富有系统运行的灵活性等，所以能在骨
干系统变电所中发挥其特长。

特别是输电线路数多的时候，每条输电线上
用的断路器变少，在经济上也认为有利。但这时考
虑到潮流，送电线的进线位置要适当。还有，这种
方式，当与该线路有关的断路器检修时则线路必须
停止运行，因此需要使用可靠性高的断路器。

(2) $1\frac{1}{2}$ 断路器方式 这种方式如图14所
示，是每两回线安装3台断路器的方式，母线发
生故障时对系统基本上没有影响，再有断路器检
修时，所接的线路不必停电，特别是在简单的系统
中因检修断路器而希望尽可能避免输电线停电的时
候，以及在电流不平衡，并必须防止万一母线发生
事故而致系统分开的变电所，更能发挥其特长，占
地也比较少。再有根据潮流，断路器的额定电流要
不少于两回线的容量，所以在大容量系统，需要充
分考虑将来的扩建计划。

(c) 密集都市系统的结线方式 建设在密集
地区的变电所，由于受到用地情况和周围环境的制
约，所以多采用户内或地下变电所的形式，而且为

图14 1¹/₂断路器方式

了给地下和繁华街道等处的重要负荷供电，从变电所本身以及全部系统，都要求具有协调一致的高度可靠性。再有，万一遇到事故时，考虑到能限制事故的范围，所以要着眼于设备结构的简单化。

从这样的观点出发，在密集地区的变电所的母线方式多采用一次侧不设母线的单元方式。

这种方式，是因为过密地区的供电可以使用电缆系统，一般可靠性高，在送电容量上也是容易取得与变压器相适应、相配合的方式。关于供电的可靠性，因为不存在两组以上变压器同时停电，可以防止事故扩大，所以是最理想的方式。再从运行操作上看，结线和配置简单，在维护方面断路器的数量也少，所以也可说是令人满意的方式。另外也有省略断路器的情况，这时的保护方式，一般可采用传递断路方式。

(1) 超高压三路引入变电所 如图15所示，

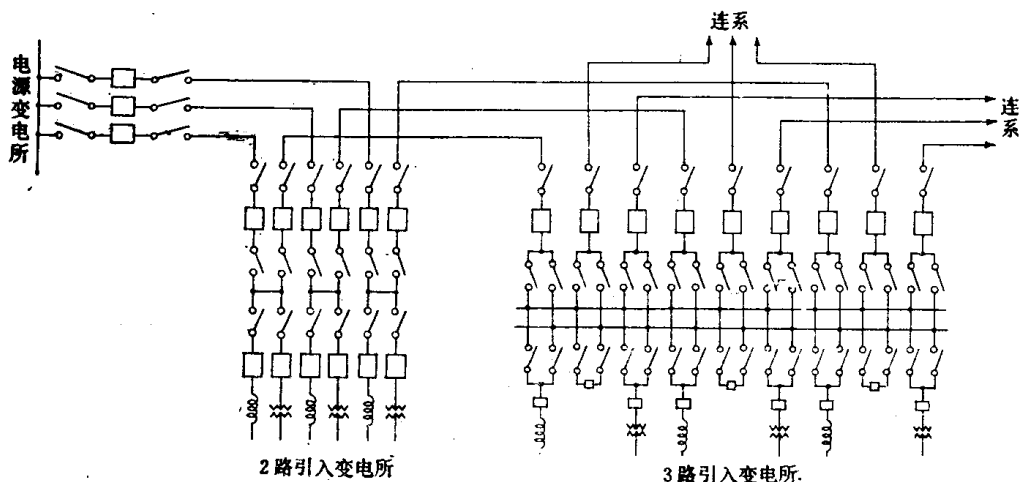


图15 超高压地下电缆系统图

一般可采用双母线3分段方式。这是电缆系统中把每一路以一回线一组变压器为一个单元的单元变电所，在极简单的单母线上，设有母线联络的结构，正常时各单元分别运行，母线联络只在检修和事故时灵活使用的方式。二次侧作成单母线方式。

(2) 超高压二路引入变电所 是超高压地下电缆系统在中途向负荷供电的变电所，可采用单母线单元方式(图15)。

(3) 一次变电所 是一次系统的单元方式所采用的结线的例子有如图16。

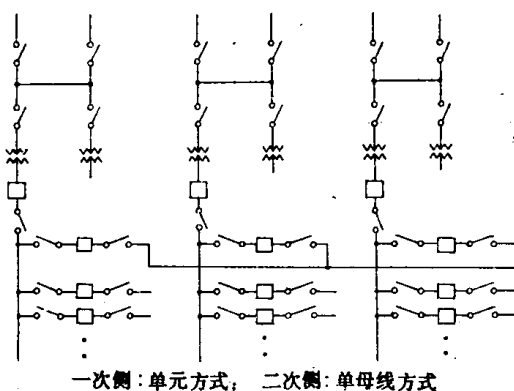


图16 一次变电所的例子

(d) 地方系统的结线方式

(1) 双母线1分段方式 适用于接有多路架空输电线的输电用变电所，是取得运行、可靠性和经济性相平衡的标准结线，其例子示于图17。

(2) 单母线方式 适用于系统简单、连接线路少的变电所等。其例子示于图18。

(e) 配电变电所的结线

(1) 单元方式 在过密地区，采用如图19

的单元方式。至于配电变电所，通常由于二次侧不并联，为了确保一组变压器或一回线故障时还能供电，所以在二次侧设置易于切换的开关装置。

(2) 单母线方式 是通用有两回线受电的配电变电所的标准结线

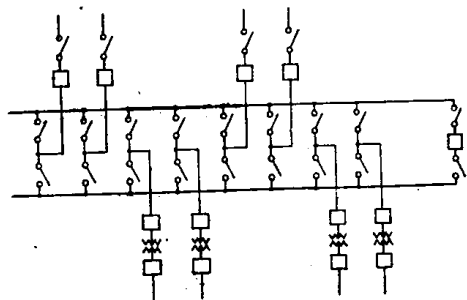


图17 双母线1分段(二次侧也相同)

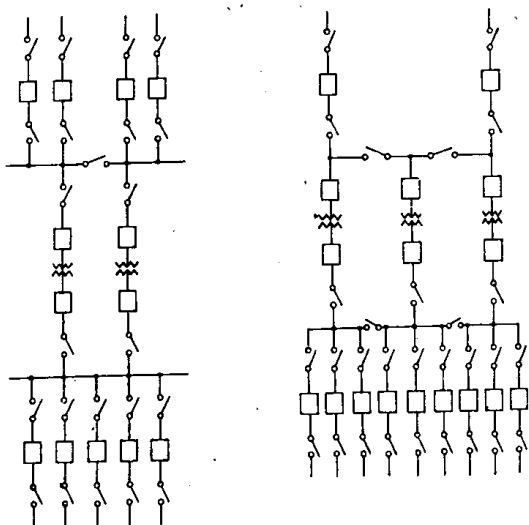


图18 单母线方式

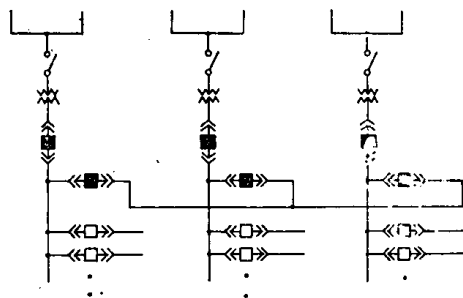


图19 单元方式(二次侧单母线方式)

方式, 所内事故不波及其他带电场所, 而且有当一回送电线出故障不会联系到变压器组停电等优点。其例子示于图 20。

3.1.3 其他

(a) 三次侧结线方式 输电用变电所的三次侧, 如图 21 所示接有调相设备和所内变压器。一般不接输电线。

(b) 中性点结线方式 在不直接接地(电阻接地、消弧线圈接地和补偿电抗线圈接地)系统中, 作为电源的发电站及变电所的中性点经过阻抗接地, 但有只把任意一组变压器接地和把所有变压器

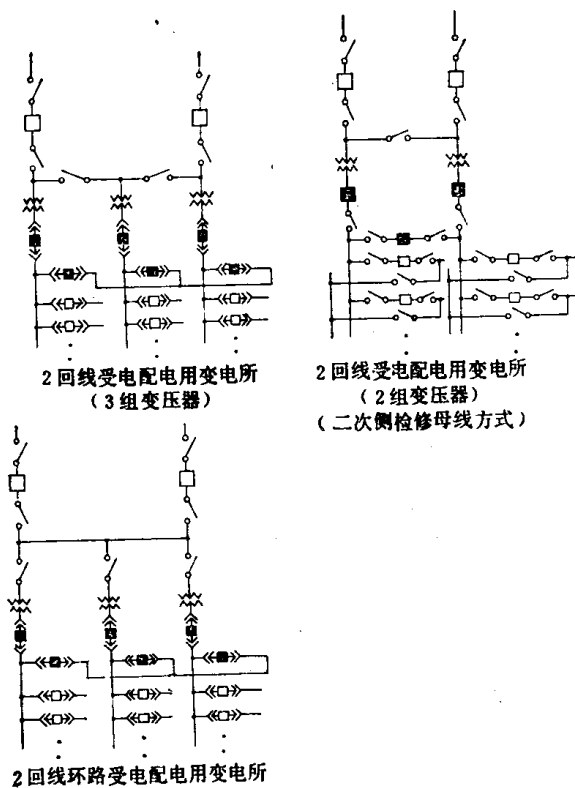


图20 配电变电所的单母线的例子

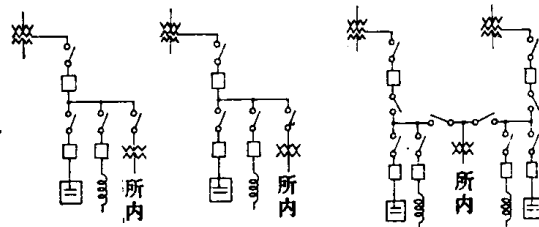


图21 三次侧结线方式

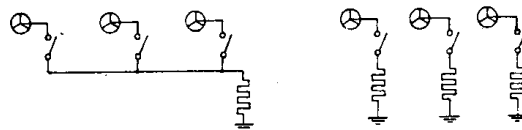


图22 中性点连接方式

组的中性点全都接地的两种情况。图 22 示出这种接线的例子。

3.2 母 线

3.2.1 母线的种类 变电所母线及分支部分, 根据变电所的种类与形式可分好多种。大体上有以绞线或刚性材料为导体的裸母线和以母线槽遮蔽或用特殊气体做绝缘的封闭母线。

3.2.2 裸母线

(a) 裸母线的导体与架设方法 裸母线大体

上可分为以硬铜绞线、硬铝绞线、铝合金绞线（例如耐热铝绞线）等绞线为导体的拉线式母线，和以铜带、铜管、铝带、铝合金管等刚性材料为导体的固定式母线（表9~10）。

表9 电线材料的特性

项 目 \ 线 重	硬铜线	硬铝线	耐热铝合金线
抗张强度(kg/mm ²)	35~47	15~20	15~20
电导率(%)	97以上	61以上	58以上
密度(g/cm ³)	8.89	2.7	2.7
线膨胀系数(1/°C)	17.0×10^{-6}	23.0×10^{-6}	23.0×10^{-6}
弹性系数(kg/mm ²)	12000	6300	6300

表10 铝合金导体的特性

项 目 \ 材 质	JIS H 4180 A6061 TB-T6	JIS H 4180 A6063 TB-T6
抗张强度(kg/mm ²)	27以上	21以上
电导率(%)	39以上	51以上
密度(g/cm ³)	2.7	2.7
线膨胀系数(1/°C)	23×10^{-6}	23×10^{-6}
弹性系数(kg/mm ²)	7000	7000
电阻温度读数(1/°C)	0.00264	0.00350
一般称呼	6061合金	6063合金

拉线式母线，是把绞线用悬式绝缘子或棒式绝缘子等固定在铁构架上，利用绞线加的张力把导体保持在所定位置的母线。由于经济而处理也容易，所以被最广泛地采用。最近随着变电所的大容量和高电压化，多采用由硬铝绞线、耐热铝合金绞线作成的分裂导线方式。

至于固定式母线是把铝管和槽形刚体用工位支柱绝缘子支持或用悬式绝缘子等V形吊钩支持的方式，采用轻量的铁构架和导电弓型隔离开关等的组合方式，可以得到缩小占用空间等的优点。因此多用于户内变电所，由于母线和构件的高度可以很低，所以作为调和环境的措施等也可用于一些户外变电所。

(b) 导线的电流容量

(1) 持续电流 各种裸导体的电流容量示于表11~14。

(2) 热过电流强度 热过电流强度主要是导体在高温时及退火之后的强度所受到的限制。具体的说是根据由过热引起的机械强度的降低在实际使用上还不成问题那样的瞬时最高容许温度来决定。瞬时最高容许温度是从数秒以下的极短时间的加热而给导体的热影响来考虑，硬铜线200°C，硬铝线为180°C，耐热铝线则为250°C左右。热过电流强度（瞬时最大容许电流）可从导体的截面积、通电时间和电阻温度系数等用计算方法求得。

作为一个例子，故障电流流过前的环境温度为40°C，导体的温升取硬铜线和硬铝线各为50 deg，耐热铝线为110 deg，则

$$\text{硬铜线} \quad I = 121 S \sqrt{t}$$

$$\text{硬铝线} \quad I = 76.6 S \sqrt{t}$$

$$\text{耐热铝线} \quad I = 67.5 S \sqrt{t}$$

式中 I ：瞬时最大容许电流(A)； S ：导体截面积(mm²)， t ：通电时间(s)。

(c) 单导线与分裂导线 随着载流量的增大而导线直径加大，因集肤效应⁽⁷⁾而致导线的利用率下降，所以大容量变电所的母线一般用分裂导线。这时的载流量内受到同相内邻近的子导线的影响⁽⁸⁾而发生导线内的电流密度的偏倚，以及由于子导线相互间的热放射，在同一电流情况下导线的温升加大等原因，也比单根子导线的载流量简单地乘上导线数要小。另外，随着电压增高导线表面的电位梯度增大而发生电晕。为此必须把导线的直径增加到相应的载流量以上，或者做成分裂导线。

(d) 加到母线上的机械力⁽⁹⁾

(1) 母线的载荷条件 在母线的机械强度设计中，加在架空导线上的载荷，除导线自重外，还必须考虑到风压、短路电流通过导线时作用于导线间的合成电磁力。拉线式母线时，外部载荷对于导线张力的增加和导线横向摇摆的影响，与固定母线时的作用于导线的弯曲力矩、抗剪强度问题是不同的。再有，关于固定式母线还要对地震强度进行校核。

(2) 短路电流在拉线式母线系统上产生的机械应力及横向摆动量的算法 拉线式母线系统上产生的机械应力与横向摆动量，即或知道电磁作用力，若不能肯定机械设备的状态，也决定不了。求变电所中那样的拉线母线的电磁力与导线最大横向摆动量以及导线摆动最大时的计算已经发表。至于