

中低压电气设计 与电气设备成套技术

汤继东 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

中低压电气设计 与电气设备成套技术

汤继东 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书内容理论联系实际,主要包括中压和低压电气设计与电气设备成套方面的基本知识和技术要求。电气设计着重介绍元件的选择、单元模块化设计要点及主回路与二次回路典型接线方案和问题分析等内容;电气设备成套技术着重介绍中低压开关柜结构类型、加工及质检事项、现场安装方法、柜子常见故障及应对措施等内容。

本书内容通俗易懂,可供设计院所、电气设备成套厂家或电气成套公司的电气技术人员阅读使用,也可供大专院校及职业教育院校有关专业师生参考,同时可作为电气成套厂技工的培训教材,对有关电气施工监理人员也有借鉴作用。

图书在版编目(CIP)数据

中低压电气设计与电气设备成套技术/汤继东编著. —北京:中国电力出版社, 2009.9

ISBN 978-7-5083-9367-4

I. ①中… II. ①汤… III. ①低压电器—电气设备—基本知识
②高压电器—电气设备—基本知识 IV. ①TM51②TM52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 153131 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 14.625 印张 374 千字

印数 0001—3000 册 定价 32.00 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

前 言

电气设备成套,是指把单个电器元件按一定要求组装成一台或一套具备一定功能的电气设备装置。电气成套厂(俗称盘厂)对电气设备的成套比较熟悉,以前皆按设计单位给出的主接线及二次接线图来完成。目前设计单位或用户只提供主接线系统图,而省略了二次接线图,把对成套设备应完成的功能要求用文字来说明。这样二次图的设计就转移到电气设备成套厂来完成,因此要求电气成套设备厂的技术人员应熟悉电气设计。

设计院所的电气设计人员往往对产品结构不够熟悉,只选用,不生产,在开列产品型号规格时,若产品样本无此规格,往往在型号规格后边加上一个“改”字,认为只要加上“改”字后,电气设备成套厂总能生产出所要求的产品,实际上并非如此,因为这涉及产品结构、元器件布置及生产工艺等诸多问题。有鉴于此,电气设计单位人员应对电气成套设备装置方面的知识有所了解。

电气设备成套厂的电气及结构技术人员应具有某些电气设计能力,而设计院所的电气技术人员也应对电气设备整套装置的结构、加工、性能等有所熟悉。这样互相沟通、互相借鉴,使电气设计更合理,电气成套设备更完善,产品质量进一步提高,从而使用户更加满意。

笔者在设计院多年从事电气设计工作,也在电气公司从事过电气成套设备的生产、新产品研发及售后服务工作,对各种电气成套产品的性能、生产工艺比较了解,对产品运行中出现的故事参与过分析解决,积累了一些经验及应对措施。在产品生产加工过程中,笔者也发现设计单位一些电气设计人员施工图中存在的某些问题,为此,特编写此书,以便各方面电气人员参考、借鉴,在电气成套厂与设计院之间架设沟通桥梁。

本书着重谈及个人的心得体会及见解,不深入探讨理论及

复杂公式推导，尽量做到通俗易懂。由于书中内容多为笔者的经验总结，且水平及时间有限，书中难免存在谬误及不足之处，敬请读者批评指正。此书若能达到抛砖引玉之效，使读者有点收获，笔者会深感欣慰。

在本书的编写过程中，曾得到各方面专家和技术人员的有力支持与鼓励，马锡刚高级工程师对本书给予细致审阅及更正，在此一并致谢。

作 者

2010 年 1 月

目 录

前言

第一章 中低压系统基本知识	1
第一节 电压等级的划分	1
第二节 中压电力系统中性点接地方式	5
第三节 低压接地系统	22
第四节 短路电流计算	35
第二章 中压开关柜	46
第一节 中压断路器与中压开关柜	46
第二节 中压开关柜常见结构型式	54
第三节 开关柜去湿加热及其他问题	72
第四节 中压开关柜的出厂检验与现场安装	76
第三章 中压开关柜常见故障及对策	91
第一节 中压开关柜载流问题及对策	91
第二节 中压开关柜绝缘问题及对策	114
第三节 过电压损坏及过电压保护	136
第四节 开关柜中断路器的故障对策	152
第四章 中压开关柜主要元件的合理选用	159
第一节 中压断路器的正确选用	159
第二节 中压电流互感器的选用	180
第三节 中压电压互感器的选用	214
第四节 避雷器及显控器的选用	229
第五章 高海拔地区用中低压开关柜的研制	232
第一节 中压开关柜如何满足高海拔地区要求	232
第二节 低压开关柜如何满足高海拔地区要求	239
第三节 高原型开关柜出厂试验	242
第六章 中低压柜常见主接线及二次接线	244
第一节 单台中压柜主接线模块化设计	244

第二节	中压系统几种标准主接线	252
第三节	环网接线	267
第四节	典型二次接线	280
第五节	中压柜二次线路设计及设备选型常见问题 ...	309
第七章	低压成套开关设备	315
第一节	低压开关柜分类及柜体制作	315
第二节	电气成套厂典型问题分析	320
第三节	设计中存在的与电气成套有关的问题	339
第四节	低压开关柜的安装、出厂检验及故障分析 ...	368
第八章	低压电容器无功补偿	378
第一节	概述	378
第二节	补偿容量及串入电抗器的计算	383
第三节	电容器补偿应注意的问题	400
第九章	低压交流鼠笼电动机启动电流及启动方式	408
第一节	电动机直接启动对变电所母线电压波动的计算	408
第二节	交流异步电动机直接启动有关问题	411
第三节	晶闸管软启动器有关问题及注意事项	419
第四节	Y/ Δ 启动方式	427
第五节	电源频率变化对交流异步电动机运行的影响	432
第十章	低压断路器的正确选用	435
第一节	断路器的极数及分断能力	435
第二节	断路器选用的注意事项	441
第三节	低压断路器常见故障分析及计算机配电监控系统	453

中低压系统基本知识

本书重点介绍中低压电气设计与电气设备成套技术方面的内容,要想对此问题深入了解,应具备一些基本知识。对设计单位电气设计人员,设计中为确定断路器的开断容量、校验电器元件及导体的动热稳定性及继电保护的选择与整定短路计算是必不可少的,而电气设备成套厂在柜体加工中,对导体的动稳定要校验,有时也需确定断路器及熔断器的开断能力,因此也要进行短路计算,这些内容均属于基本知识范畴。



第一节 电压等级的划分

在我国,很少提及“中压”这一概念,通常将交流电压有效值 1000V 及以下者称为低压,以上者称为高压。为与国际接轨,我们引入“中压”这一概念,而承受此电压等级的电气设备,称为中压电气设备。中压以上,还有高压、超高压、特高压等级别。

一、中低压系统电压等级的划分

低压系统标称电压见表 1-1。

表 1-1

低压系统标称电压

V

50Hz		60Hz
我国标准	IEC 推荐标准	
220/380	230/400	120/240 (单相三线) 227/480

续表

50Hz		60Hz
我国标准	IEC 推荐标准	
380/660	400/690	347/600
1000		600

在低压系统中,国外有的采用 240/415V,如果采用 IEC 推荐标准 230/400V 系统,对于我国及使用 240/415V 的国家来说,在没有完全一致的情况下,只要调一下电力变压器的接头即可。而电气设备也不必作改动,完全能适应新系统的要求。

中压系统的标称电压见表 1-2。

表 1-2 交流 50Hz (60Hz) 系统标称电压及设备的最高电压

系统标称电压 (kV)		设备的最高电压 (kV)
系列 1	系列 2	
3	3.3	3.6
6	6.6	7.2
10	11	12
15		17.5
20	22	24
	33	36
35		40.5

表 1-2 的数据是根据 IEC60038 给出的数据,我国采用系列 1 的参数,对于 33kV 与 35kV 电压等级,IEC 正考虑制定统一标准。

中压设备的最高电压实际上规定为设备的额定电压,这里所讲的“设备”,不是指电动机及变压器,它们的额定电压应与系统标称电压一致,例如在 3、6、10kV 系统中,所用电动机的额定电压也分别为 3、6、10kV。这里所指“设备”是针对成套开关柜、熔断器、电流互感器等各种主回路元器件,及各种开关设备而言,设备的最高电压或额定工作电压与标称电压系列 2

相比,一般不高出 10% (约为 9%),与标称电压系列 1 相比,一般不高出 20%。电压互感器的额定电压应与变压器一致。

二、推广 660V 及 20kV 标称电压等级势在必行

不论中压还是低压,在我国尚有些电压等级需尽快普及与推广。例如,在中压系统中,20kV 电压等级应用得不够普遍,而实际上作为中压配电,20kV 比 10kV 优越。由于 20kV 比 10kV 电压高一倍,输出同样功率,线路有功损耗只为 10kV 线路的 1/4。在同样的线路电压损失下,输送同样的功率,20kV 比 10kV 电压输送距离高出 1 倍。或者输送距离一样情况下,20kV 比 10kV 输送容量增加一倍。

目前推行使用 20kV 电压系统,不论从技术还是从设备上皆不存在问题,传输电缆有专用此电压等级用的 12/20 (24) kV 级电缆。生产额定电压 20kV 的变压器更无问题,施耐德电气公司可供应高压侧 10kV 及 20kV 双接头变压器,作为过渡阶段使用。至于成套中压柜,额定电压 35kV 级早已成熟。生产 20kV 系统用的额定电压 24kV 的成套开关柜更无问题,目前国内多家成套厂均有生产,外形尺寸比 12kV 开关柜稍大。

目前采用 660V 级标称电压,更是没有技术及设备问题可言。4kW 及以上容量的电机多为六桩头接线,额定电压 380V “△”接线,改成“Y”接线用于 660V 系统中电机使用性能没有发生任何变化,传输电缆可选用 0.7/1kV 级的完全适用系统要求。在以往 380V 系统中,所选控制及电力电缆多选为额定电压 1kV 级的,绝缘强度稍显富余。

对采用低压断路器来说,目前所用空气断路器或塑壳断路器额定工作电压可达 690~1000V,回路中所用接触器、软启动器、热断电器也有相应电压产品。对于微型断路器,工作电压大约都为 230/400V,主要用于照明回路。对照明回路,可另加专用照明变压器,使之二次电压为 230/400V,采用局部标称电压 230/380V 网络,适应照明灯具对电压的要求(在大型大功率照明光源中,有的额定电压为 380V,这样在 380/660V 标称电

压系统内采用相电压供电即可)。

采用 380/660V 或 400/690V 标称电压系统后, 低压电网可传输较远的距离, 低压系统线路能耗降低, 为使用更大容量的配电变压器创造条件。低压电动机容量可达 1000kW。由于低压配电范围扩大, 配电变压器容量可采用 4000kVA。推广 380/660V 标称电压系统的主要困难是来自用户习惯的阻碍, 对采用高一级电压的配电电压还有顾虑, 总觉得缺少运行经验而不敢冒然采用。另外, 为满足照明需要, 还要另外设置配电电压为 230/400V 的专用变压器, 感到管理不便, 而放弃采用 380/660V 标称电压系统。

380/660V 系统主要应用于大型工厂、矿山等有较多大容量电动机的工业部门中, 这些部门大容量电动机所占比重较大, 对节约电损、减少线路导线截面效果明显。而在民用建筑, 尤其对居民小区的供配电系统中, 低压 220/380V 系统还具有不可替代的优势, 因为居民用电还是 220V, 家用电器的额定电压也与此相适应。在民用建筑中, 所用控制保护开关多为微型断路器, 其单相额定电压为 230V, 三相为 400V, 由此可见, 低压系统采用 220/380V 较合适, 中央空调中大型压缩机组专用变压器, 可采用低压额定电压 400/690V 级配电变压器, 由于配电变压器常距压缩主机较近, 采用 230/400V 级配电变压器问题也不大, 当然, 一定要与中央空调主机的额定电压相符。

三、3kV 级电压等级宜取消, 6kV 级电压等级应少用

3kV 级电压等级宜取消, 原因是这种电压等级如作为电能传输用电压, 显得过低, 不可能传输大功率至远距离; 若作为用电设备的额定电压, 如电动机的额定电压, 经济效益不显著, 倒不如采用 660V 级电压, 此种电压等级对于电机容量为 200~1000kW 是合理的。额定电压 660V 电机与同容量额定电压 3kV 电机相比, 它的重量轻、价格低廉、维修方便、启动控制简单容易且经济。至于容量大于 1000kW 电机, 可采用

10kV 级供电，额定电压 10kV 电机随着技术进步及制造工艺的完善，绝缘材料性能的提高，制造设备已非常完备，产品质量也得到保证。

对于大功率变频调速电机，当电机额定功率为 1500kW 及以下时，采用高压变频调速，性价比很低，用户很难接受，如改用 660V 变频器。不论变频器还是与此配套的电机，价格均低很多。

有人认为，采用 660V 变频器，要增加变压器。在 10kV 供电系统内，要添置 10/0.66kV 的变压器，这样会增加造价。但这种想法不够全面，要知道，即使采用 10kV 级变频器，为不使变频器整流时产生的高次谐波串入电网，也需添加专用整流隔离变压器与之配套。由此可见，配电采用 660V 作为电能传输电压取代 3kV 已没问题。不过目前 3kV 级电压只存在于少量老电厂的厂用电电压中。

对于 6kV 电压等级，目前不再作传输电力的电压。原因是电压低、线损大、传输距离小、传送功率小。现只在大型电厂中作为厂用电的电压等级。小容量发电机，尚有额定电压为 6.3kV 的。对于厂用电采用 6kV 级，有时也带来不便。例如：若外引 10kV 电源作厂用电的备用电源及起动电源时，还需配备 10/6kV 的降压变压器才行，这样又增加了变电环节，从而增加了投资及电能的损耗。有鉴于此，6kV 级设备少用为宜。



第二节 中压电力系统中性点接地方式

一、概述

在电力系统发展初期，由于担心一相接地后，其他两相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，造成对地绝缘问题不好解决，采用中性点直接接地方式。随着系统容量的增大及电力网络的扩大，单相短路造成跳闸事故频繁。对中压系统来讲，单相接地故障造成频

繁跳闸，对可靠运行的危害很大，是电力系统故障的主要矛盾。而随着绝缘材料制造技术的完善与提高，即使由于一相接地而引起其他两相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，即产生工频过电压问题，所用绝缘设备皆能满足要求，且因绝缘水平的提高而为此付出的成本也不是很大。而单相接地引起的频繁跳闸使经济效益大幅降低，在权衡利弊后，还是采取中性点不接地的优点明显，因此对于中压系统来说，不再采用中性点直接接地的运行方式。这样，一相接地还可继续运行 2h，不至于瞬时跳闸了。而对于 110kV 及以上的高压、超高压、特高压系统来说，主要问题是如何限制一相接地而引起其他两相电压升高 $\sqrt{3}$ 倍所带来的绝缘问题。电压越高，对绝缘的要求越高，解决绝缘问题越困难，而在绝缘上的投资也大幅增加。因此电网主要矛盾转化为绝缘问题。中性点直接接地系统，当一相接地后，其他完好的两相对地电压基本上保持不变。这样就减轻了由于考虑对地绝缘问题而造成的压力了。

总之，与高压、超高压、特高压相比，中压电力系统设备绝缘裕度受经济因素的制约相对小得多，工频电压的升高对绝缘体的价格影响不大，而供电可靠性却得到提高，但要注意的是，单相接地电流虽小，若超过某一限度，其危害不能忽视，必须认真对待并设法消除。

二、中压系统中性点接地方式的选择

在 3~66kV 中压系统中，中性点常见的几种接地方式为：

- (1) 中性点不接地。
- (2) 中性点经消弧线圈接地。
- (3) 中性点经低电阻、中电阻与高电阻接地。
- (4) 中性点经阻抗接地。

中压系统与低压系统不一样，绝不能把低压接地系统中 TN、TT、IT 系统搬到中压系统中来，不能认为中压系统中性点不接地，而设备接地，就认为是 IT 系统了。

在电阻接地方式中，分为低电阻、中电阻及高电阻接地。

一般说来,其阻值的划分:当电阻器电阻值在 200Ω 及以上时,称为高电阻;当电阻值在 $10\sim 200\Omega$ 时,称为中电阻;当电阻值不超过 10Ω 时,称为低电阻。高电阻接地时,接地电流大多不超过 15A ;中电阻接地时,接地电流不超过 600A ;而低电阻接地时,接地电流在 600A 以上。

三、大电流接地与小电流接地系统,直接接地与非直接接地系统,有效接地与非有效接地系统

国外有的国家规定单相接地电流不超过三相短路电流的 $1/4$ 时,称小电流接地系统,否则就是大电流接地系统了。在我国中压系统中,由于中性点不接地或不直接接地,接地电流根本达不到三相短路电流的 $1/4$ 以上。如果中性点不接地,接地电流只不过是系统对地电容电流,此电容取决于网络大小及线路性质,因此我国基本不存在中压大电流接地系统。另外,我国规定接地电流不允许超过 10A ,否则应采取限制措施,因此我国的中压系统原来基本上属于小电流接地系统,而目前在有的项目上或某些地区,由于保护装置的完善及架空线路减少、电缆线路增多、瞬时单相接地故障减少,中性点直接接地或经低电阻接地的优势明显,很难一概把中压系统均称为小电流接地系统了。

在中压范围内,如何划分大电流及小电流接地系统,也是个难题。我国及有的国家采用单相接地故障电流是否能自动熄灭作为条件,而不是采用一个单相接地电流的具体数值来划分大电流接地系统与小电流接地系统。简言之,凡需用断路器断开接地故障者称大电流接地系统,如果不用断路器断开而接地电流自行熄灭者称小电流接地系统。

在大电流接地系统中,有中性点直接接地或经低电阻接地方式。在小电流接地系统中,有中性点经消弧线圈接地、不接地及经高电阻接地方式。实际上,划分大电流接地系统与小电流接地系统意义不大,重要的是根据实际需要,确定电源中性点是直接接地、不接地,还是经消弧线圈、低电阻、高电阻接

地，并根据接地方式的不同，确定相应的保护措施及要采取的接地设备。

中性点直接接地，并非指整个接地系统的接地电阻为零，因为接地系统的接地电阻还应包括接地极的电阻，而接地极的电阻是无法降到零阻抗的。

另外，中性点直接接地是指某单台电源设备而言，不应泛指整个电力系统或电网，因为在高压电力系统中，有个别变压器不接地或经低阻抗接地。高压系统与低压系统显著不同的是，低压系统多由一台变压器供电，变压器并联运行的很少，而高压系统多为多台变压器联网。鉴于上述情况，有的国家规定，对某系统或系统某点上，零序电抗与系统电抗之比不大于3，则该电力系统或系统的某部分可视为中性点有效接地系统。若高压系统变压器中性点皆直接接地，零序阻抗远小于中性点有效接地方式，则此种接地又称为非常有效接地方式。除有效接地或非常有效接地外，还有中性点非有效接地系统，此系统包含单相接地电弧能自动熄灭的中性点不接地、经消弧线圈接地、经高电阻接地的小电流接地方式，也包括单相接地电弧不能自动熄灭的中性点经中、低阻抗接地的系统。

四、中性点不接地系统

目前我国中压电力系统中，中性点不接地方式比较普遍。其应用应具备的前提是系统电力容量小、网络不大、供电距离不长、电缆线路不多且架空线路较多。之所以应具备上述条件，是为了保证系统的接地电容电流不至于过大。具体来说，6~10kV系统接地电容电流应不超过10A，否则接地电流就很难自动熄灭，其间歇电弧过电压幅值高达额定相电压的3.5倍。这样高的过电压会造成设备绝缘损坏，导致更大故障的产生，例如若系统接有电动机，中压电动机其分频工频耐压允许值不能超过额定电压（相电压）的3倍，检修过的设备，要求耐压能力更低，若因单相接地电弧产生过电压，很有可能击穿电机绝

缘而使电机损坏。持续而不能自熄的接地电弧电流，又是引起火灾的重要因素。

单相接地电弧能够自动熄灭的前提条件是电弧电流小，不能维持继续燃烧，单相接地是暂时性故障，此故障不必人为排除即可自行消除，此种故障多为架空线路故障。对电缆线路来说，接地故障很难自行消除，一旦电弧形成熔化通道，此故障会持续下去，造成大面积停电事故（也有人持有不同看法，认为电缆单相接地时，介质会因局部过热而蒸发，蒸发气体可产生去游离作用，即灭弧作用，熔化的绝缘介质还会自动充填通道，使绝缘强度得以恢复，即有自愈作用）。

1. 中性点不接地系统的缺点

中性点不接地系统的优点是明显的，那就是当接地故障电容电流不大，可自动熄灭间歇性电弧，而且故障又是暂时性的，可保证供电的连续性，但其缺点主要有：

(1) 其他完好两相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，这会使设备的绝缘投资增加，对于110kV以上的系统，中性点是否接地与绝缘投资的增加有很大关系。中压系统对地电压的升高，使系统中氧化锌避雷器的选择处于两难境地。为使设备得到有效保护，不但要使氧化锌避雷器残压低，而且额定放电压也要低。由于单相接地后，其他两相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，为使氧化锌避雷器不动作，要采用高额定电压的避雷器，氧化锌避雷器放电电压要高，且残压更大，这又降低了它的保护性能，也就是说，中性点不接地系统的氧化锌避雷器很难与系统配合。

(2) 弧光间歇性接地过电压可达额定相电压的3.5倍，此过电压波及整个系统。间歇接地电弧电流又含很多高次谐波成分，如果某次谐波正巧与系统电容匹配而发生谐振，则谐振过电压最大幅值可达额定相电压的7倍，在此过电压下，系统中所接电磁电压互感器往往被击穿。

(3) 由于电力系统的扩大及城市对美观的要求，电力线路采用大量电缆而非架空线路，架空线路除农村尚广泛使用外，

在城市里很少采用。由于电缆线路增多，电缆对地电容大，接地故障电容电流随之增大。目前在中压系统中，由于电源容量的增大及电缆线路的增多，接地电容电流已达上百安。这样大的接地电弧电流很难自动熄灭，如果采用过电流保护装置断开故障电流，又显得接地故障电流太小，无法满足灵敏度的要求，只得采用零序保护了。

架空线路单相接地电弧电流自动熄灭的条件是不大于 10A，而塑料电缆发生单相电接地电弧电流自动熄灭的电流更小。当网络系统小、出线回路不多时，接地电容电流小，为躲过被保护回路自身单相接地电流值，回路零序保护动作值应在自身接地电容电流基础上乘以可靠系数 1.2，这样使保护动作灵敏度更低，有的只得靠零序方向保护方式才能解决，零序电流循环检测装置应运而生。

2. 电网单相接地电容电流的计算

在选择中压系统采用的接地方式时，需计算电网接地电容电流，计算公式如下

架空单回路无避雷线时

$$I_c = 2.7UL \times 10^{-3} (\text{A}) \quad (1-1)$$

架空单回路有避雷线时

$$I_c = 3.3UL \times 10^{-3} (\text{A}) \quad (1-2)$$

电缆线路

$$I_c = 0.1UL (\text{A}) \quad (1-3)$$

式中：U 为系统标称电压，kV；L 为线路长度，km。

单相接地电容电流可查表 1-3 得出，对于变电设备造成单相接地电容电流的增加值，如表 1-4 所示。需要指出的是，所求得的电容电流值是指系统中同一电压下，有电气连接的全部线路的电容电流。例如，某变电站有一台 80MVA 降压变压器，额定电压为 110/11kV，此降压变压器以 10kV 标称电压向多个单位供电，标称电压 10kV 系统的电容电流是指该电力变压器低压侧所有线路的电容电流之和，而不是某用电单位 10kV 线路的电容电流。