

ZHONGDIYAPEIDIAN
SHEJIYUSHIJIAN

中低压配电 设计与实践

汤继东 朱冬宏 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

ZHONGDIYAPEIDIAN
SHEJIYUSHIJIAN

中低压配电 设计与实践

汤继东 朱冬宏 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是中低压电气设计、加工及事故处理方面的经验总结,指出了在电气设计上常出现的问题和开关柜的结构比较及正确选型问题,在太阳能发电及电能质量上也有论及。

本书主要介绍了低压配电常见问题分析、低压系统的接地及等电位联结、低压系统无功功率的电容器补偿、电能质量治理、配电线路材质的正确选择、并网运行光伏电站系统集成、中低压开关柜结构及柜型的选择、中压系统典型主接线、中压柜内所装断路器的选择、中压电磁式电流互感器的选用、中压电磁式电压互感器的选用及铁磁谐振的应对、中压避雷器或过电压保护器的正确选择、中压大容量快速限流开断装置、中压用户配电设计及常见故障的应对。还介绍了有代表性的 KYN28A-12 及 KYN61-40.5 开关柜的元件选型,如电流互感器、电压互感器、断路器、避雷器等的正确选择,事故发生的原因及预防措施,以及在中压领域中推广不久的大容量快速开断装置。

本书可供中低压电气设计人员、电气成套厂的技术人员及电气运行维护人员使用,也可作为中、高等院校师生的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

中低压配电设计与实践 / 汤继东, 朱冬宏编著. —北京: 中国电力出版社, 2015.3

ISBN 978-7-5123-7380-8

I. ①中… II. ①汤… ②朱… III. ①中压电力系统—配电系统—设计②低压—电力系统—配电系统—设计 IV. ①TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 050823 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 3 月第一版 2015 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22 印张 537 千字

印数 0001—2000 册 定价 59.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

中低压领域是人们最常接触的电气领域。在电气设计方面，几乎所有的设计院所都有中低压电气设计方面的工作，在电气材料、电气设备的生产加工方面，中低压电气产品也占有相当大的比重，目前设计院所的电气设计人员对电气设备的生产、加工以及运行维护方面了解不够，因此对有关中低压电气设计及电气主要元件的正确选型等方面的书籍需求极大。

在电气设计方面，设计人员往往不再提供二次原理图及二次安装图，只给出一次系统图，如何使设计的一次系统图更加合理、如何进行系统图中的元件型号与规格的正确选择，这是不可忽视的问题。另外，选择元件不但要考虑它是否满足技术要求，还要考虑它的价位、寿命及性能，即其性价比是否合适，元件的安装维护是否方便。

作者从事多年电气设计工作，在电气设备设计和生产加工方面也有丰富的经验，多次参与电气设备事故分析并提出整改意见，也曾参与有关电气规范的修订与审查，汇总多年的经验编著此书，力求通俗易懂、实用、简洁。本书可供中低压电气设计人员、电气成套厂的技术人员及电气运行维护人员使用，也可作为中、高等院校师生的参考用书。

由于时间短暂，加之水平有限，不足之处在所难免，恳请读者提出批评指正。

作 者

2015年2月

前 言	
第一章 低压配电常见问题分析	1
第一节 电压等级的划分	1
第二节 短路电流计算	3
第三节 低压系统主接线	11
第四节 低压电气元件的合理选择	14
第五节 配电变压器的正确选择	35
第六节 系统标称电压 660V 时电气设备的选择	47
第七节 低压开关柜智能化配电监控系统	49
第八节 电源电涌保护器的选用	50
第二章 低压系统的接地及等电位联结	64
第一节 概述	64
第二节 TN 接地系统	65
第三节 TT 系统与 IT 系统	78
第四节 接地线的截面选择	80
第五节 变压器中性点偏移问题	83
第六节 变电站多台变压器 N 干线电流分流与环流的防治	86
第七节 等电位联结	90
第三章 低压系统无功功率的电容器补偿	97
第一节 概述	97
第二节 低压电容器补偿分类	98
第三节 低压电容补偿柜主要元器件的选择	102
第四章 电能质量治理	118
第一节 概述	118
第二节 低压系统无源滤波器及有源滤波器	120
第三节 中压静止无功补偿器 (SVC)	128
第四节 静止无功发生器 (SVG)	130
第五节 SVC、SVG 的应用	132
第六节 电能质量治理的难点	133

第五章 配电线路材质的正确选择	135
第一节 概述	135
第二节 母线槽的选择	135
第三节 铜铝复合排及铝合金排	143
第四节 中压管形预制式绝缘屏蔽母线	145
第五节 中低压电力电缆的正确选择	147
第六章 并网运行光伏电站系统集成	158
第一节 概述	158
第二节 太阳能电池基本单元构件	158
第三节 太阳能发电站配套设备的选用	163
第四节 常见问题分析	170
第五节 主接线系统	177
第六节 集中式逆变器与分散布置逆变器方案比较	180
第七节 太阳能电站其他应注意问题	180
第七章 中低压开关柜结构及柜型的选择	182
第一节 概述	182
第二节 低压开关柜柜型的比较及正确选择	184
第三节 低压开关柜常见故障分析	195
第四节 几种中压柜结构特点与选型注意事项	196
第五节 中压开关柜其他注意事项	205
第六节 高海拔地区开关柜的结构问题	212
第七节 中压开关柜结构发展方向	216
第八章 中压系统典型主接线	218
第一节 概述	218
第二节 12kV 手车式开关柜标准单元模块接线	219
第三节 系统主接线	228
第四节 环网供电	234
第五节 采用电缆分支箱的配电方式	240
第九章 中压柜内所装断路器的选择	242
第一节 概述	242
第二节 断路器性能要求及主要参数	243
第三节 中压断路器的操动机构	245
第四节 真空断路器选择的误区	249
第五节 发电机出口断路器及电容器回路用断路器的选择	251
第六节 中压真空断路器的发展前景	253

第七节	真空断路器常见故障及应对措施	254
第十章	中压电磁式电流互感器的选用	259
第一节	概述	259
第二节	电流互感器准确度等级及每回路所需个数的确定	260
第三节	对电流互感器其他参数的正确选择	264
第四节	二次侧负荷过大时的应对措施	268
第五节	动热稳定达不到要求时采取的措施	269
第六节	电流互感器的二次接线及二次负荷统计	269
第七节	电流互感器二次绕组的并联、串联、多变比及中间抽头问题	271
第八节	电流互感器安装位置	272
第九节	电流互感器的安装及接线注意事项	273
第十节	电流互感器选择步骤	273
第十一节	电流互感器常见故障及注意事项	274
第十二节	零序电流互感器的选择	275
第十三节	有关电子式电流互感器的问题	276
第十一章	中压电磁式电压互感器的选用及铁磁谐振的应对	278
第一节	概述	278
第二节	中压系统中性点及电压互感器一次侧中性点接地问题	278
第三节	电压互感器二次侧接地问题	280
第四节	三铁芯柱及五铁芯柱式电压互感器	282
第五节	选用电压互感器常见问题	282
第六节	电压互感器常见故障分析	285
第七节	电压互感器铁磁谐振的危害及产生原因分析	287
第八节	避免电压互感器产生铁磁谐振的措施	289
第九节	有关电子式电压互感器问题	292
第十二章	中压避雷器或过电压保护器的正确选择	293
第一节	概述	293
第二节	过电压产生原因及避雷器分类	294
第三节	金属氧化物避雷器主要参数	296
第四节	过电压保护器选择其他注意事项	300
第五节	爆炸原因与预防措施	305
第十三章	中压大容量快速限流开断装置	308
第一节	概述	308
第二节	桥体与限流熔断器并联方案	310
第三节	桥体与限流熔断器、限流电抗器三者的并联方案	311

第四节	几个争议及注意问题	312
第五节	零损耗深度限流装置的有关问题	314
第十四章	中压用户配电设计及常见故障的应对	316
第一节	概述	316
第二节	主接线方案常用元件的选择	316
第三节	功能单元模块主接线方案应注意的问题	323
第四节	中压开关柜的正确选择	326
第五节	二次接线方案	328
第六节	操作控制电源	333
第七节	其他要注意的问题	334
第八节	常见故障及应对	335
第九节	几项新技术的应用问题	340
参考文献		343

低压配电常见问题分析

第一节 电压等级的划分

1. 电力系统的标称电压

中国按照 GB/T 156—2007《标准电压》的规定进行电压等级的划分，只有低压与高压两大部分。如果按平时的习惯称呼，采取细化分类，将交流系统电压等级分为超低压、低压、中压、高压、超高压与特高压六种。

1kV 及以下为低压，在 120V 以下，以前只有 110V，目前又增加 100、60V 的等级。

在 1kV 以上等级中，按照 IEC 62271-1—2007《高压开关设备和控制器》的规定，额定电压 245kV 及以下为电压范围 I，电压范围 I 又分为系列 I 与系列 II：系列 I 中有 3.6、7.2、12、17.5、24、36、52、72.5、100、123、145、170、245kV；系列 II 主要对北美洲而言，电压为 4.76、8.25、15、25.8、38、48.3、72.5kV。245kV 以上为电压范围 II，范围 II 为 300、362、420、550、800kV。

美国电气与电子工程师协会（IEEE）规定，2.4~69kV 为中压，115~230kV 为高压，345~765kV 为超高压。我国实际情况，与 IEC 标准规定不完全相同。GB/T 11022—2011《高压开关设备和控制设备的共用技术要求》规定，在我国，电压范围 I 为 3.6、7.2、12、24、31.5、40.5、63、72.5、126、252kV。范围 II 为 363、550、800、1100kV。上述电压是指设备的额定工作电压，而非系统的额定标称电压。

根据我国的习惯称呼，按系统的标称电压（非设备的额定工作电压）来划分，中压为 3、6、10、20、35、66kV；高压为 110、220kV；超高压为 330、500、750kV；特高压为 1000kV（直流电压 800kV）。

注 1：最近国际电工委员会宣布，交流电压 1000kV 及以上，直流电压 800kV 及以上的中国国家标准作为 IEC 标准。

注 2：上述数据摘自 GB/T 11022—2011《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》。

高低压的界限为 1kV，1kV 及以下为低压，1kV 以上为高压，这在我国法律条文中已有明确说明，GB/T 156—2007《标准电压》中也有明确规定。中压、超高压、特高压是平时的习惯叫法，标准中并没有规定。另外还要注意的，电压系列 I 和电压系列 II 都是指电气设备的额定工作电压，而非电力系统的标称电压。

在低压系统内，有安全特低压系统、保护特低压系统和功能性特低压系统。采用安全特低压系统或保护特低压系统供电，电压在正常环境中不得超过交流有效值 50V，以保证人身安全。此外还有很多附加条件，如在安全特低压系统中，电源的输入与输出要隔离（化学



电源例外)，隔离变压器输出侧绝对要成为独立系统，严禁与其他系统、外露导体、大地有联系，绝不能采用自耦变压器，要采用加强绝缘或双绝缘隔离变压器等；保护特低压系统及功能特低压系统也有多项附加条件，这里不再赘述。

由于我国 10kV 电动机制造非常成熟，3kV、6kV 作为配电电压趋于淘汰，只有在发电厂作为厂用电时，6kV 电压等级尚且存在。

2. 电压组合及其他有关问题

在我国，不同地区有不同的电压组合，例如，西北地区多为 750/330 (220) /110/10 (35) /0.4kV，东北地区多为 330/220/66/10/0.4kV，天津及山东地区多为 500/220/35/10/0.4kV，华南地区多为 500/220/110/10/0.4kV，上海多为 500/220/110 (35) /10/0.4kV。有人把 6kV、10kV 称为配电回路，把 35kV、66kV 称为输电回路，笔者对此不予认可，如果 10kV 发电机直配，10kV 也是输电回路，如 110/35kV 变电站，其 35kV 配电室的馈线就是配电回路，而对 35kV 用户侧，此线路又是供电线路，或称输电线路了。又例如，一台 380/220 的配电箱，它的总进线为供电回路，此总线对它上级配电室而言，它又是配电回路了。

有的地方，城市负荷密度大，为了减少 110kV 变电站的数量，从而减少占地面积，采用 220/35 (10) kV 变电站，这样既减少变电层次，又减少变电站的数量（如果用户侧又设立 35/10kV 变电站，这样总的变电层次还是没有减少）。至于电压等级如何组合才算合理，各地对此问题也在探讨中。

国内低压系统的标称电压为 0.22/0.38kV，而国外有的采用 0.24/0.415kV 作为低压电网的标称电压。而国际电工委员会的标准为 0.23/0.4kV，这是个折中标准，不论是中国还是其他国家的低压系统，只要改变一下变压器的分接头，即可满足国际电工委员会标准的要求了。

如果把低压电网进行升级，电网的电压等级为 0.38/0.66kV，属于低压的范畴；但低压再升级为 0.66/1.14kV，线电压超过 1kV，就已经超出低压范畴了。这在一些特殊应用场合下，把 1.14kV 也纳入低压范畴，这样 0.66/1.14kV 的系统，也作为低压系统了。GB/T156—2007《标准电压》中，把 1.14kV 局限于某些行业系统内，不过在国内，0.66/1.14kV 系统基本没有使用，它的划归并没有意义。

3. 电气装置的额定电压

以上电压等级只是交流系统的标称电压，与电气装置的额定电压不同，通常电气装置承受的最高电压作为额定电压，有时称为工作电压。所谓最高电压，是指在正常运行条件下，系统内不论何时、何处出现的最高电压，但不包括瞬变电压或闪变电压。高低压成套开关设备与控制设备的额定电压一般比所在系统标称电压高 10% ~ 20%，系统标准电压与其相应设备的额定电压见表 1-1。

表1-1 系统标准电压与其相应设备的额定电压

系统标准电压 (kV)	0.38	0.66	3	6	10	20	35	66	110	220	330	500	750	1000
设备最高电压 (额定电压) (kV)	0.4	0.69	3.6	7.2	12	24	40.5	72.5	126	252	363	550	800	1100

例如，在 220/380V 系统中，开关柜额定电压为 400V；在 10kV 系统中，开关柜的额定电压为 12kV；在 35kV 系统中，开关柜额定电压为 40.5kV；在 110kV 系统中，电气装置的额定电压为 126（123）kV……对于电气装置，它有额定工作电压、额定绝缘电压及额定冲击耐受电压，而它的额定工作电压为系统出现的最高电压。

发电机的额定电压既不同于系统额定电压，也不同于其他电气设备的额定电压，具有独立的电压系列，例如，发电机额定电压有 3.15、6.3、10.5、13.8、15.75、18、20、22、24、26kV。

4. 其他特殊电气设备的额定电压

发电机的额定电压既不同于系统标称电压，也不同于其他电气装置的额定电压，不受电网额定电压的限制，而是与发电机容量有关，容量越大，发电机额定电压越高，反之亦然。

电力变压器的额定一次电压是由电源条件决定的，而二次电压是根据需要决定的。例如，与发电机相连接的升压变压器，一次侧应与发电机电压一致，二次侧应高出所接系统标称电压的 5% ~ 10%；与输电线路连接的变压器，其一次电压为系统标称电压，由于向远处输电，线路损失 5% ~ 10%，因此，二次侧与 10kV 的系统相连的电力变压器额定电压为 11kV。对于降压变压器，一次电压为系统标称电压，二次电压按距离负荷的远近不同而不同，一般高出系统标称电压 5%。变压器有一次及二次额定电压，它的电压等级按高电压侧电压确定，而额定电压一次与二次都要标出。

5. 强电与弱电

在工作中，经常听到有强电与弱电的称呼。强电是对电力系统而言，指的是传输功率大、电压高的系统或设备。而弱电的对象是信息系统、测量系统、信号系统等，用于信息传递，如电话、电视、计算机网络，其电压一般不超过 48V。有的控制及信号电压为 110、220V 或 380V，但其不是用于功率的传递，此时不称其为强电回路或弱电回路，而是习惯称为二次回路。

第二节 短路电流计算

1. 短路电流有效值计算及有关问题

在电气设计中，短路电流的计算是必不可少的，它是选择开关元件的电气参数，保护元件的整定及电气元件与导体的动、热稳定校验等设计工作的前提。

对于短路计算，一般只计算三相短路电流值，其他短路电流值可从三相短路电流值直接推导出来。例如，两相短路电流是三相短路电流的 0.87 ($\sqrt{3}/2$) 倍，当保护线的截面与相线相等时，单相短路电流为三相短路电流的一半（当 N 线或 PE 线阻抗与相线阻抗相等时）。但要注意，当电网容量小，而且短路又发生在靠近变压器处时，单相短路电流接近三相短路电流或超过三相短路电流，这属于个别特殊情况，一般不予考虑。

短路电流的计算结果很难做到与实际短路电流一致，因为发生短路时，短路具体条件很难预料，纯金属性短路很少发生，通常伴随着电弧的出现，电弧的阻抗很大，低压母线及接头也有电阻，不能忽略其阻抗，这样，实际短路电流值比计算值偏小。另外，在多级配电的情况下，由于开关的级联效应，产生限流作用，更减少了短路电流值。中压及高压系统短路电流计算还要考虑系统的最大及最小运行方式问题，低压系统的短路电流计算则不需要考虑系统的运行方式。



由此可见，采用纯金属短路电流来校验断路器及熔断器的开断能力，尽管可靠，但比较保守。同样，按动、热稳定要求选择的电器及导体也偏于保守。但采用纯金属短路电流校验保护装置的灵敏度，短路电流计算值可能比实际情况偏大，为保证发生短路时保护电器瞬时动作的可靠性，应对计算值打折扣，保护瞬时动作整定值不能过大，否则，发生短路故障时，保护开关有可能拒动。由于电弧性短路电流很难计算，校验保护元件的开断能力和动、热稳定性还是采用纯金属性短路电流进行校验。

2. 短路电流有效值与峰值的关系

开关元件接通与开断能力的验证、保护整定值的确定以及热稳定的校验要采用短路电流的有效值，而动稳定校验则要用短路电流的峰值。由于存在非周期分量，短路电流峰值与短路稳态电流有效值不是 $\sqrt{2}$ 倍的关系，它与低压系统不一样，在中压系统中，由于回路阻抗中的电抗成分大，时间常数大，直流分量，而且短路电流迟迟不过零，因此短路电流峰值的有效值倍数也比低压系统大，峰值为有效值的 2.5 倍。对发电机出口处，发电机绕组的阻抗基本上是电抗，短路电流更难过零，直流分量更大，短路电流的峰值约为有效值的 2.7 倍。在低压系统中，有效值与峰值的关系，不但与功率因数有关（与回路阻抗成分有关），而且还与短路电流的有效值有关，其关系见表 1-2。

表1-2 低压系统短路电流峰值与短路稳态电流有效值之比K值

短路电流有效值 (kA)	功率因数 $\cos\varphi$	K
$I \leq 5$	0.7	1.5
$5 < I \leq 10$	0.5	1.7
$10 < I \leq 20$	0.3	2
$20 < I \leq 50$	0.25	2.1
$I > 50$	0.2	2.2

注 1. 有人认为本表不易使用，理由是不易确定短路点的功率因数。但只要参考短路电流的稳态有效值，就可以查出峰值电流与有效值的比值了，因为短路电流越大，说明短路点越靠近变压器，回路的电抗成分越大，功率因数越小，表中的功率因数与短路电流的大小成因果关系，由此可见，只要确定短路电流的有效值，就可以查出峰值电流为有效值的倍数了。

2. 本表取自GB7251.1—2005《低压成套开关设备和控制设备 第1部分：型式试验和部分型式试验成套设备》第7.5.4.2条。

3. 短路电流的计算方法

计算低压侧短路电流，要考虑整个电力系统的参数，涉及高压及中压系统的参数及有关计算。下面介绍有关中压侧短路电流计算问题。

(1) 实名制算法。实名制算法是先求得回路的阻抗值，再根据短路点处的电压，求出短路电流的方法。回路阻抗由电阻与电抗组成，根据回路导体的材质及截面可求得电阻值，但电抗值不易求得，电抗分内电抗与外电抗，外电抗远大于内电抗，外电抗值主要由相间的几何尺寸决定，而相间几何尺寸在系统回路中是变化的，不易确定，从而造成回路电抗计算的困难。另外，还要把不同电压下的阻抗值折算至同一电压下，这又增加了工作量。

实名制三相短路电流计算公式为

$$I_{k3} = U_L / \sqrt{3} (Z_c + Z_l + Z_L) \quad (1-1)$$

式中 I_{k3} ——三相短路电流稳态有效值；

U_L ——短路处线间电压；

Z_c ——电源侧电网阻抗；

Z_t ——变压器的阻抗；

Z_l ——相导体的阻抗。

由于实名制算法计算短路电流比较麻烦，准确度也不是很高，因此很少采用。

(2) 短路容量法。短路容量法是先求系统某点处的短路容量，再由短路容量求得短路电流的方法。由于没考虑功率因数的影响，得到的短路电流是近似值，但也能满足使用要求。由某点的短路容量 ΣS_k 求得该点的短路电流为 I_k 为

$$I_k = \Sigma S_k / \sqrt{3} U_N \quad (1-2)$$

式中 U_N ——该点处的额定电压。

由此可见，计算某点的短路容量是关键，为此要考虑电网所有有关设备在此点的短路容量，不但包括增加短路电流的设备，如发电机、电动机（反馈电流）及电源系统，也包括限制短路电流的设备，如变压器及线路。

串联元件的短路容量等于各单个设备短路容量倒数之和的倒数，即

$$S_{串} = 1 / \Sigma (1/S_i) \quad (1-3)$$

并联元件的短路容量等于各设备短路容量之和，即

$$S_{并} = \Sigma S_i \quad (1-4)$$

式中 S_i ——电网中各设备在该点的短路容量。

现就各设备在短路点提供的短路容量计算如下：

1) 系统提供的短路容量 S_{kc} 。如果系统短路点的短路电流为 I_k ，则短路容量为

$$S_{kc} = \sqrt{3} U_N I_k \quad (1-5)$$

有人会有疑问，既然已知道系统短路电流，何必求短路容量呢？这主要考虑求短路点所有设备在该点的短路容量之和用，求短路容量之和，必须单位统一才行。

如果无法获取系统短路容量，对于 10kV 系统可按 400MVA 计算，20kV 系统按 500kVA 计算，35kV 系统按 750kVA 考虑。

2) 发电机提供的短路容量 S_{kG} 。

$$S_{kG} = S_{NG} / (10X_d) \quad (1-6)$$

式中 S_{NG} ——发电机额定容量，kVA；

S_{kG} ——发电机提供的短路容量，MVA；

X_d ——发电机次暂态电抗百分数，通常为 10% ~ 25%。

发电机有同步电抗、暂态电抗及次暂态电抗，其选择取决于短路时刻，短路最严酷的情况下取次暂态电抗。

3) 三相异步电动机的短路容量 S_{kM} 。

$$S_{kM} = KP_{NM} / \eta \cos \varphi \times 10^{-3} \quad (1-7)$$

式中 S_{kM} ——三相异步电动机短路容量，MVA；

K ——电动机起动电流倍数，一般为 5.5 ~ 7，5.5 适用大容量电动机，7 适用小容量电动机；



P_{NM} ——电动机的额定容量，kW；

η ——电动机的效率；

$\cos\varphi$ ——电动机的功率因数。

为简化计算，可不考虑电动机效率的影响，电动机起动电流倍数不考虑起动装置的影响。

4) 变压器的短路容量 S_{kT} 。

$$S_{kT} = S_{NT} / (10U_k) \quad (1-8)$$

式中 S_{kT} ——变压器短路容量，MVA；

U_k ——变压器短路阻抗百分数；

S_{NT} ——变压器的额定容量，kVA。

5) 电缆短路容量 S_{kl}

$$S_{kl} = U_N^2 / Z_1 \times 10^{-3} \quad (1-9)$$

式中 S_{kl} ——电缆线路的短路容量，MVA；

Z_1 ——电缆阻抗， Ω ；

U_N ——短路处的额定电压，kV。

铜芯电缆的短路容量也可从表 1-3 中直接查出，表中给出每米铜芯电缆的短路容量，如果实际长度为 L ，则短路容量乘以系数 K ， $K = 1/L$ ，如果又 N 根同截面电缆并联，则短路容量乘以 N 。

这样，短路点的总短路容量 $\sum S_k = S_{kc} + S_{kG} + S_{kM} + S_{kT} + S_{kl}$ 。短路点处的短路电流 $I_k = \sum S_k / \sqrt{3}U$ 。

表1-3 额定电压400V的三相铜芯电缆每米三相短路容量

电缆截面 (mm ²)	短路容量 (MVA)	电缆截面 (mm ²)	短路容量 (MVA)
2.5	22	70	576
4	35.2	95	772
6	52.9	120	942
10	88	150	1 092
16	140	185	1 285
25	219	240	1 484
35	302	300	1 640
50	406		

- 注
- 表中数据参考编译的ABB公司《低压配电电气设计安装手册》。
 - 不论发电机次暂态阻抗或变压器的短路阻抗百分数，利用式(1-6)及式(1-8)计算短路容量的兆伏安数，不要带%参与计算，如变压器短路阻抗为8%，直接用8代入式(1-6)计算，发电机次暂态阻抗为25%，直接用25代入式(1-8)计算。
 - 变压器低压电缆线路某故障点的短路容量是：系统的短路容量与变压器短路容量串联后再与变压器低压母线电动机短路容量并联，然后再与低压电缆线路短路容量串联。短路容量法之所以简单，不存在电压变换的问题。
 - 如果线路为导线穿管敷设，可看作电缆线路，如果为架空线路，因架空线路阻抗大于同截面电缆线路，如果按电缆线路计算，计算结果大于实际短路电流，按此电缆选择断路器的开断能力，偏于保守，为使瞬动保护可靠动作，整定值应当降低。

(3) 短路容量法计算举例。

【例 1-1】 一台容量 S_{NT} 为 1600kVA，短路电压 $U_k = 6\%$ ，额定电压为 10/0.4kV 的配电变压器，低压母线上接有两台 200kW 的电动机，电动机的功率因数为 0.89，电动机效率 η 为 0.95，电动机起动电流倍数 K 为 6.5，低压母线—馈线回路采用 150mm^2 的铜芯三相电缆，求该电缆离母线 20m 处，电压为 0.38kV 处的三相短路电流值。

计算步骤如下：

1) 10kV 系统的短路容量，按 400MVA 估计（短路容量最好向当地供电部门索取）。

2) 变压器的短路容量为

$$S_{kT} = S_{NT} / (10 \times U_k) = 1600 / (10 \times 6) = 1600 / 60 = 26.67 \text{ (MVA)}$$

3) 200kW 电动机的短路容量为

$$S_{kM} = KP_{NM} / (\eta \cos\varphi) \times 10^{-3} = 6.5 \times 200 / (0.89 \times 0.95) \times 10^{-3} = 1.54 \text{ (MVA)}$$

两台电动并联短路容量为

$$2 \times 1.54 = 3.08 \text{ (MVA)}$$

4) 电缆的短路容量。查表 1-3，可求得 150mm^2 的铜芯电缆每米短路容量为 1092MVA，20m 处的短路容量为

$$1092 / 20 = 54.6 \text{ (MVA)}$$

如果忽略低压母线的阻抗，短路点的短路容量为系统短路容量与变压器短路容量串联后，再与电动机短路容量并联，并联后的短路容量最后再与电缆短路容量串联，即得到电缆短路的总容量。此处不论并联与串联，计算方法与阻抗的串并联计算方法恰恰相反。

5) 系统与变压器串联，合成短路容量为

$$S_{k1} = (400 \times 26.67) / (400 + 26.67) = 25 \text{ (MVA)}$$

[如果不考虑电动机反馈电流及低压母线阻抗，母线电流短路为 $I_k = 25. / \sqrt{3} \times 0.4 = 36.09 \text{ (kA)}$]

6) 再与电动机短路容量并联，并联后的容量为

$$25 + 3.08 = 28.08 \text{ (MVA)}$$

7) 最后再与电缆短路容量串联，其总容量为

$$\Sigma S_k = (28.08 \times 54.6) / (54.6 + 28.08) = 18.54 \text{ (MVA)}$$

由此可求得电缆的短路电流为

$$I_k = 18.54 / (\sqrt{3} \times 0.4) = 26.76 \text{ (kA)}$$

注：变压器电压母线电压为 0.4kV，馈线短路点处离母线近，电压按 0.4kV 计算。

(4) 标么值法计算短路电流。标么值计算短路电流法，是先求得短路点处短路阻抗标么值，对应短路处电压的基准电流除以阻抗标么值，即为该处的短路电流，如果电阻小于电抗的 30% 时，可忽略电阻，只采用电抗计算即可，其计算公式为

$$I_k = I_{jz} / \Sigma X^* \quad (1-10)$$

式中 I_k ——短路电流；

I_{jz} ——相应的基准电流；

ΣX^* ——短路点各设备短路阻抗标么值之和。

电网的平均电压与相应的基准电流见表 1-4，基准电流是以基准容量为 100MVA 为

准的。

表1-4 电网的平均电压与相应的基准电流

平均电压 (kV)	115	37	10.5	6.3	0.4
基准电流 (kA)	0.5	1.56	5.5	9.16	144.3

1) 电力系统短路电抗的标么值为

$$X_c^* = 100/S_{kc} \quad (1-11)$$

式中 S_{kc} ——系统的短路容量, MVA。

2) 双绕组变压器的短路电抗标么值为

$$X_T^* = U_d/S_{NT} \quad (1-12)$$

式中 S_{NT} ——系统变压器的额定容量, MVA;

U_d ——变压器短路电压百分数, 有的称短路阻抗百分数。

例如, 1000kVA 的变压器, 容量为 1MVA, 当短路电压为 6% 时, 变压器的电抗标么值为

$$X_T^* = U_d/S_{NT} = 6/1 = 6$$

【例 1-2】 与上述情况相同, 变压器额定电压为 10/0.4kV, 短路阻抗 U_d 为 6%, 容量为 1600kVA 的变压器 (即 1.6MVA), 10kV 侧短路容量为 400MVA, 求变电站低压母线三相短路电流值。

10kV 系统短路电抗标么值为

$$X_c^* = 100/S_{kc} = 100/400 = 0.25$$

变压器短路电抗标么值为

$$X_T^* = U_d/S_{NT} = 6/1.6 = 3.75$$

当忽略低压母线的阻抗时, 母线短路电流为

$$I_k = I_{jz} / \sum X^* = 144.3 / (0.25 + 3.75) = 36.08 \text{ (kA)}$$

与上述短路容量法计算的母线短路电流 36.09kA 基本一致。

如果把系统容量当成无穷大, 那么只考虑变压器的阻抗了, 这样低压 0.4kV 母线三相短路电流还有更简化的计算方法, 即为变压器容量的千伏安数乘以 1.443, 然后再除以短路阻抗百分数的 10 倍即可, 例如在【例 1-2】中, 变压器容量为 1600kVA, 低压母线短路电流为

$$\begin{aligned} I_k &= 1.443S_{NT} / (10 \times 6) \\ &= 1.443 \times 1600 / 60 = 38.48 \text{ (kA)} \end{aligned}$$

如果对上述计算方法再进一步简化, 当考虑系统阻抗、变压器低压母线阻抗及母线接头电阻时, 短路电流的千安数, 等于变压器额定容量千伏安数的 1.4 倍除以变压器短路阻抗百分数的 10 倍即可。如在上述情况下, 短路电流为

$$I_k = 1.4 \times 1600 / 60 = 37.33 \text{ (kA)}$$

这个计算结果之所以比前次计算偏小, 是考虑系统阻抗及母线阻抗的影响所致。如果既考虑系统阻抗又考虑低压母线阻抗, 及短路点接触电阻或电弧电阻, 与纯金属性短路比较, 应小于 20%, 即短路电流应为

$$38.48 \times 0.8 = 30.78 \text{ (kA)}$$

注：0.8的系数是作者的经验数据，由于短路条件比较复杂，不够准确，在校验保护的灵敏度时可供参考，但选择断路器开断能力时，应按照纯金属性短路考虑。

选择断路器的开断能力，可只考虑变压器的短路阻抗，而且是三相纯金属性短路阻抗，这样选择的断路器开断能力比较保守。如果从最坏情况考虑，同时为了计算方便，断路器的开断能力可以采用此值，由于此值大于实际短路电流，选择断路器的开断能力可以采取它的极限开断能力，如果要校验保护的灵敏度及确定瞬动保护的整定值，就应选取短路电流的较小值。

如果计算变电站馈线电缆的短路电流，可先用此法求出变电站低压母线的短路容量，再与表1-3所示电缆的短路容量串联，求出短路点的合成短路容量，即可求得短路电流。

在以往的电气设计中，设计人员往往按最大短路电流来整定断路器的瞬时动作整定值，结果发生短路故障后，由于实际短路电流比计算短路电流小得多，造成断路器拒动的情况屡屡发生。甚至有的出现变电站低压馈线短路时，馈线保护开关及变压器低压总开关不动作，而高压保护开关动作的案例。这是由于馈线路阻抗复杂，但设计人员往往把馈线短路看做母线短路，把系统看做无穷大，且忽略母线阻抗，结果低压总开关及馈线开关的瞬动保护整定值过大，线路发生短路后，线路馈线开关自然不会动作了，高压侧保护由供电部分整定，瞬动保护整定值小，越级跳闸也不足为惧了。

3) 三绕组变压器的短路阻抗标幺值。三绕组变压器的高、中、低压绕组的短路阻抗标幺值分别为 X_{d1}^* 、 X_{d2}^* 及 X_{d3}^* ，

$$\left. \begin{aligned} X_{d1}^* &= U_{d1}/S_{Nt} \\ X_{d2}^* &= U_{d2}/S_{Nt} \\ X_{d3}^* &= U_{d3}/S_{Nt} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中 U_{d1} 、 U_{d2} 、 U_{d3} ——高、中、低压三绕组变压器的短路阻抗百分数，它们分别为

$$\left. \begin{aligned} U_{d1} &= \{ U_{d(1-2)} + U_{d(1-3)} - U_{d(2-3)} \} / 2 \\ U_{d2} &= \{ U_{d(1-2)} + U_{d(2-3)} - U_{d(1-3)} \} / 2 \\ U_{d3} &= \{ U_{d(1-3)} + U_{d(2-3)} - U_{d(1-2)} \} / 2 \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

$U_{d(1-2)}$ 、 $U_{d(1-3)}$ 、 $U_{d(2-3)}$ 分别为三绕组变压器的高一中压绕组、高一低压绕组绕组及中一低压绕组的短路阻抗，此数据由产品说明书中取得。

4) 线路阻抗标幺值计算。线路阻抗短路阻抗标幺值为

$$\left. \begin{aligned} \text{电缆线路} \quad X^* &= 8L/U^2 \quad (6 \sim 10\text{kV}) \\ \text{或} \quad X^* &= 12L/U^2 \quad (35\text{kV}) \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

对于架空线路

$$X^* = 40L/U^2 \quad (6 \sim 35\text{kV})$$

式中 L ——长度，km；

U ——线路标称电压，kV。

5) 限流电抗器短路阻抗标幺值计算。限流电抗器短路阻抗标幺值

$$S_k^* = K \times U_N / I_N \times I_j / U_j \quad (1-16)$$