



国际电气工程先进技术译丛

电网保护

**Protection of Electrical
Networks**

(法) Christophe Prévé 著
蔡中勤 周苏荃 刘明基 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电 网 保 护

(法) Christophe Prévé

著

蔡中勤	周苏荃	刘明基	刘瑞叶
张丽英	詹旻	魏艳霞	张 锋
徐 寅	周 莹	王 莹	叶瑞丽
白 雪	王松岩	徐 英	黄 磊

译



机 械 工 业 出 版 社

译者序

现代电网的迅速发展、日益扩大，电网运行方式的多变，对电网的保护提出了更高的要求，电力系统继电保护的设计与配置是否合理，直接影响到电力系统的安全运行。一本能够全面反映工厂供电保护、面向实用技术的专业教科书和参考资料，对于高等工科院校与电力系统有关专业的在校学生以及从事继电保护科研、生产、应用等工作的工程技术人员来说，是非常有必要的。鉴于此，机械工业出版社及时引进了本书的英文原版，可谓契合时代的需要。

本书共分10章。第1章介绍了各个电压等级的网络接线方式；第2章介绍了中低压接地系统的接地方式；第3章介绍了电力网络和电机的主要故障类型；第4章结合大量实例详细介绍了各种短路及短路电流的计算方法；第5章介绍了短路的影响；第6章介绍了仪用互感器及相关标准；第7章详细介绍了各种保护的功能及应用范围；第8章介绍了过电流开关设备；第9章介绍了不同的选择性系统；第10章结合实例详细论述了网络元件保护。本书理论紧密联系实际，图文并茂，叙述简捷，清楚易懂。本书具有以下特色：

系统性：既详细介绍了电网的网络接线方式和各种短路电流的计算，又介绍了各种保护设备及其应用实例，覆盖面广，内容详实。

实用性：本书理论结合实际，介绍了各种常用的保护设备的功能及整定要求，概念、原理讲解与应用实例介绍结合，清楚易懂，既利于教学，又便于自学。通过阅读本书，可以帮助读者了解国外电网保护的应用现状，掌握电网保护的基础知识和应用设计能力。

本书由周苏荃教授负责审校、定稿、排版，蔡中勤负责本书的译校。

本书共有10章，各章初译的执笔人为：第1、2章为蔡中勤、周苏荃译；第3章为魏艳霞、周苏荃译；第4章为蔡中勤、周苏荃、刘明基译；第5~7章为蔡中勤、刘明基、张锋、徐寅、周莹、王莹译；第8章为张丽英、周苏荃译；第9章为詹旻、周苏荃译；第10章为蔡中勤、刘明基、叶瑞丽、白雪、王松岩译；目录等为徐英、黄磊翻译整理。刘瑞叶教授对本书的翻译也给予了大力支持与帮助指导，提出了宝贵意见。以上译者除刘明基副教授为华北电力大学的教师外，其余人员均为哈尔滨工业大学的师生。

需要说明的是，本书译者是在忠实于原书的基础上翻译的，书中观点并不代表译者本人及其所在单位的观点。

IV 电网保护

我们相信，本书的翻译出版对推动电网保护技术的发展具有一定的促进作用。

由于电网保护系统相关的理论、技术发展迅速，加之译者水平和时间有限，译文中的错误和不妥之处在所难免，敬请专家、读者给予批评指正。

译 者

2009年9月

目 录

译者序

第 1 章 电网结构	1
1.1 专用配电网的一般结构	1
1.2 电源	2
1.3 高压用户变电站	3
1.4 中压供电	5
1.4.1 中压供电的各种接线方式	5
1.4.2 中压用户变电站	6
1.5 中压电网的接线方式	6
1.5.1 中压开关柜的各种供电方式	6
1.5.2 中压电网结构	10
1.6 低压电网的接线方式	14
1.6.1 低压开关柜供电方式	14
1.6.2 发电机作后备电源的低压开关柜	17
1.6.3 低压开关柜由不间断电源 (UPS) 作为备用的接线方式	18
1.7 带有自备电源的工厂供电	22
1.8 标准电网的例子	22
第 2 章 接地系统	30
2.1 低压接地系统	31
2.1.1 低压配电接地系统——定义和接地制式	31
2.1.2 不同低压接地系统的比较	33
2.1.2.1 电源变压器中性点不接地或经高阻抗接地的 IT 系统	33
2.1.2.2 电源变压器中性点直接接地的 TT 系统	34
2.1.2.3 电源变压器中性点接地, 电气设备的外露导电部分与 中性线连接的 TNC-TNS 系统	35
2.2 中压接地系统	36
2.2.1 不同的中压接地系统——定义和接线方式	36
2.2.2 不同中压接地系统的比较	37
2.2.2.1 中性点直接接地	37
2.2.2.2 中性点不接地系统	37

VI 电网保护

2.2.2.3 经限流电阻接地	38
2.2.2.4 经限流电抗接地	38
2.2.2.5 经消弧线圈接地	39
2.3 建立中性点接地系统	39
2.3.1 中压设备电阻接地	39
2.3.2 中压设备经消弧线圈或电抗接地	42
2.3.3 中压或低压设备的直接接地	42
2.4 低压非接地系统的专用设备特点	42
2.4.1 安装永久绝缘监视器	42
2.4.2 安装过电压限制器	43
2.4.3 通过 2~10Hz 低频发电机实现接地故障定位	43
2.5 中压不接地系统的专用设备特点	44
2.5.1 绝缘监视	44
2.5.2 第一绝缘故障定位	45
第 3 章 电力网络和电机的主要故障	46
3.1 短路	46
3.1.1 短路的特点	46
3.1.2 短路故障的类型	46
3.1.3 引起短路的原因	47
3.2 其他故障类型	48
第 4 章 短路	49
4.1 短路电流和波形的确立	49
4.1.1 供电端短路的短路模型的建立	50
4.1.2 发电机机端短路时短路电流的确定	53
4.2 短路电流计算方法	56
4.2.1 对称三相短路	56
4.2.1.1 元件越过变压器的等效阻抗	57
4.2.1.2 并联连接的阻抗	58
4.2.1.3 百分数形式的阻抗和短路电压表达式	58
4.2.1.4 不同电网元件的阻抗值	59
4.2.1.5 电动机对短路电流值的影响	64
4.2.1.6 对称三相短路计算的例子	64
4.2.2 单相金属短路(零阻抗故障)	69
4.2.3 两相短路	76
4.2.4 两相短路接地	77
4.3 单相故障电流的流动	77

4.3.1 中性点不接地或中性点经高阻抗接地	79
4.3.2 中性点经阻抗(电阻或电抗)接地	80
4.3.3 谐振电抗或消弧线圈接地	81
4.3.4 中性点直接接地	81
4.3.5 发生接地故障时网络有几条出线的容性电流的传递	82
4.4 最小短路电流的计算及其重要性	84
4.4.1 与接地系统有关的低压最小短路电流的计算	85
4.4.1.1 计算 TN 系统中的最小短路电流	85
4.4.1.2 计算 IT 系统中无分布中性点的最小短路电流	88
4.4.1.3 计算带有分布中性点的 IT 系统的最小短路电流	92
4.4.1.4 计算 TT 系统中的最小短路电流	92
4.4.1.5 最小短路电流对断路器或熔断器选择的影响	95
4.4.2 中压和高压系统最小短路电流的计算	98
4.4.3 最小短路电流计算对于保护选择性的重要性	99
第 5 章 短路的影响	100
5.1 短路电流的热效应	100
5.2 电动力效应	101
5.3 电压跌落	102
5.4 暂态过电压	103
5.5 接触电压	104
5.6 操作过电压	104
5.7 遥控电路中的感应电压	104
第 6 章 仪用互感器	107
6.1 电流互感器	107
6.1.1 理论提示	107
6.1.2 磁路饱和	108
6.1.3 电流互感器在电网中的应用	111
6.1.3.1 一般应用原则	111
6.1.3.2 电流互感器的组成	111
6.1.3.3 电流互感器参数的规定和定义	112
6.1.3.4 遵从 IEC 60044-1 标准的测量用电流互感器	113
6.1.3.5 遵从 IEC 60044-1 标准的保护用电流互感器	114
6.1.3.6 遵从 BS3938 的保护用电流互感器(X 级)	115
6.1.3.7 IEC 60044-1 和 BS3938 之间关于电流互感器规定的一致性	116
6.1.3.8 使用超出额定值的电流互感器	118

VIII 电网保护

6.1.3.9 电流互感器铭牌的例子	120
6.1.4 非磁性电流传感器	121
6.2 电压互感器	121
6.2.1 一般应用原则	121
6.2.2 电压互感器的技术参数说明和定义	122
6.2.3 测量用电压互感器遵从 IEC 60044-2 标准	123
6.2.4 遵从 IEC 60044-2 标准的保护用电压互感器	124
6.2.5 测量用电压互感器铭牌的例子	125
第 7 章 保护功能及其应用	126
7.1 相过电流保护 (ANSI 码 50 或 51)	127
7.2 接地故障保护 (ANSI 码 50N 或 51N、50G 或 51G)	128
7.3 方向过电流保护 (ANSI 码 67)	131
7.4 方向接地故障保护 (ANSI 码 67N)	137
7.4.1 运行	138
7.4.2 带限流电阻接地的电网参数的研究和设定	139
7.4.3 非接地电网参数的研究和设定	143
7.5 补偿中性点网络的方向接地故障保护 (ANSI 码 67N)	145
7.6 差动保护	148
7.6.1 高阻抗差动保护	148
7.6.1.1 元件的运行和定尺度	150
7.6.1.2 高阻抗差动保护的应用	156
7.6.1.2.1 电动机的差动保护 (ANSI 码 87M)	156
7.6.1.2.2 发电机的差动保护 (ANSI 码 87G)	158
7.6.1.2.3 母线差动保护 (ANSI 码 87B)	158
7.6.1.2.4 限制接地故障差动保护 (ANSI 码 87N 或 REF)	160
7.6.1.3 关于高阻抗差动保护应用的说明	162
7.6.2 电缆或电线的带辅助导线的差动保护 (ANSI 码 87L)	162
7.6.3 变压器的差动保护 (ANSI 码 87T)	169
7.7 热过载保护 (ANSI 码 49)	171
7.8 负相位不平衡保护 (ANSI 码 46)	176
7.9 过长起动时间和转子锁定保护 (ANSI 码 51LR)	178
7.10 过多连续起动的保护 (ANSI 码 66)	179
7.11 欠电流保护 (ANSI 码 37)	180
7.12 低电压保护 (ANSI 码 27)	181
7.13 剩余低电压保护 (ANSI 码 27)	182
7.14 正序低电压和相序方向保护 (ANSI 码 27 D-47)	182

7.15	过电压保护 (ANSI 码 59)	184
7.16	剩余过电压保护 (ANSI 码 59N)	184
7.17	低频或过频率保护 (ANSI 码 81)	186
7.18	无功反向保护 (ANSI 码 32Q)	186
7.19	有功反向保护 (ANSI 码 32P)	187
7.20	变压器箱体漏电保护 (ANSI 码 50 或 51)	188
7.21	中性点接地阻抗过载的保护 (ANSI 码 50N 或 51N)	189
7.22	通过监视流过接地连接的电流实现全网接地故障保护 (ANSI 码 50N 或 51N、50G 或 51G)	189
7.23	温度监视保护 (ANSI 码 38-49T)	190
7.24	电压限制的过电流保护 (ANSI 码 50V 或 51V)	191
7.25	通过气体、压力和温度检测 (DGPT) 的保护	193
7.26	中性点间不平衡保护 (ANSI 码 50N 或 51N)	194
第 8 章	过电流开关设备	195
8.1	低压断路器	195
8.2	中压断路器 (依据 IEC 62271-100 标准)	200
8.3	低压熔断器	203
8.3.1	熔断区域-约定电流	204
8.3.2	开断容量	205
8.4	中压熔断器	206
第 9 章	不同的选择性系统	209
9.1	电流选择性	209
9.2	时间选择性	211
9.3	逻辑选择性	214
9.4	方向选择性	216
9.5	差动保护实现选择性	217
9.6	熔断器和断路器间的选择性	218
第 10 章	电网元件保护	220
10.1	电网保护	220
10.1.1	接地故障对经限流电阻接地 (直接接地或通过人工 中性点接地) 的电网要求	220
10.1.2	非接地电网的接地故障要求	225
10.1.3	相间故障要求	226

X 电网保护

10.1.4 一条输入馈线的电网	227
10.1.4.1 相间故障保护	227
10.1.4.2 接地故障保护	228
10.1.5 两条并列输入馈线的电网保护	232
10.1.5.1 相间故障保护	232
10.1.5.2 接地故障保护	234
10.1.6 双环输入馈线的电网	238
10.1.6.1 相间故障保护	238
10.1.6.2 接地故障保护	240
10.1.7 回路电网	244
10.1.8 分区保护	245
10.2 母线保护	252
10.2.1 采用逻辑选择性的母线保护	252
10.2.2 采用高阻抗差动保护装置的母线保护	253
10.3 变压器保护	253
10.3.1 变压器合闸时的励磁涌流	254
10.3.2 Dy 联结变压器低压侧短路时高压侧保护检测到的短路电流值	255
10.3.3 变压器故障	258
10.3.4 变压器保护	259
10.3.4.1 防止过负载的专用保护	259
10.3.4.2 内部相短路的专用保护	259
10.3.4.3 接地故障的专用保护	259
10.3.4.4 负荷开关-熔断器保护	260
10.3.4.5 断路器保护	264
10.3.5 变压器保护的例子	266
10.3.6 变压器保护整定说明	268
10.4 电动机保护	269
10.4.1 中压电动机的保护	270
10.4.1.1 电动机保护的例子	273
10.4.1.2 电动机保护整定说明	275
10.4.2 低压异步电动机保护	276
10.5 交流发电机保护	277
10.5.1 发电机保护装置的例子	280
10.5.2 发电机保护整定说明	282
10.6 电容器组保护	284
10.6.1 与合闸有关的电气现象	285
10.6.2 施耐德低压电容器组的保护	288
10.6.3 施耐德中压电容器组的保护	289

10.7 直流电流装置的保护	294
10.7.1 短路电流计算	294
10.7.2 绝缘故障和开关装置的特点	295
10.7.3 人员的保护	296
10.8 不间断电源 (UPS) 的保护	297
10.8.1 断路器额定值的选择	297
10.8.2 断路器开断容量的选择	298
10.8.3 选择性要求	298
附录	300
附录 A 公用电网供电的短路暂态电流计算	300
附录 B 电容器组通电时合闸电流的计算	302
附录 C 饱和电流互感器二次电压峰值和二次电流有效值	305

第 1 章 电网结构

定义

IEC 60038 标准定义电压额定值如下：

- 1) 低压 (LV): 100 ~ 1000V 之间的线电压在 50Hz 时的基准额定值为 400V-690V-1000V。
- 2) 中压 (MV): 1000V ~ 35kV 之间线电压的基准额定值为 3.3kV-6.6kV-11kV-22kV-33kV。
- 3) 高压 (HV): 35 ~ 230kV 之间线电压的基准额定值为 45kV-66kV-110kV-132kV-150kV-220kV。

本章主要介绍：

- 1) 高压 (HV) 和中压 (MV) 用户变电站的类型；
- 2) 变电站的中压电网主接线；
- 3) 变电站的低压 (LV) 电网主接线；
- 4) 带有后备电源的系统主接线。

本章最后给出了 6 个标准的工厂供电电网结构的例子。

本章讨论了各种主接线方式的优缺点和适用范围。

NC (常闭) 表示开关或断路器在正常状态下闭合。

NO (常开) 表示开关或断路器在正常状态下断开。

1.1 专用配电网的一般结构

一般来说，由高压供电的专用配电网包含如下部分 (见图 1-1)：

- 1) 由一个或多个电源供电的高压用户变电站，并且由一条或多条母线和断路器组成；
- 2) 一个自备电源；
- 3) 一台或多台高压/中压变压器；
- 4) 一个主中压开关柜，由一条或多条母线组成；
- 5) 一个内部的中压电网给二级开关柜或中压/低压变电站供电；
- 6) 中压负载；
- 7) 中压/低压变压器；
- 8) 低压开关柜和电网；

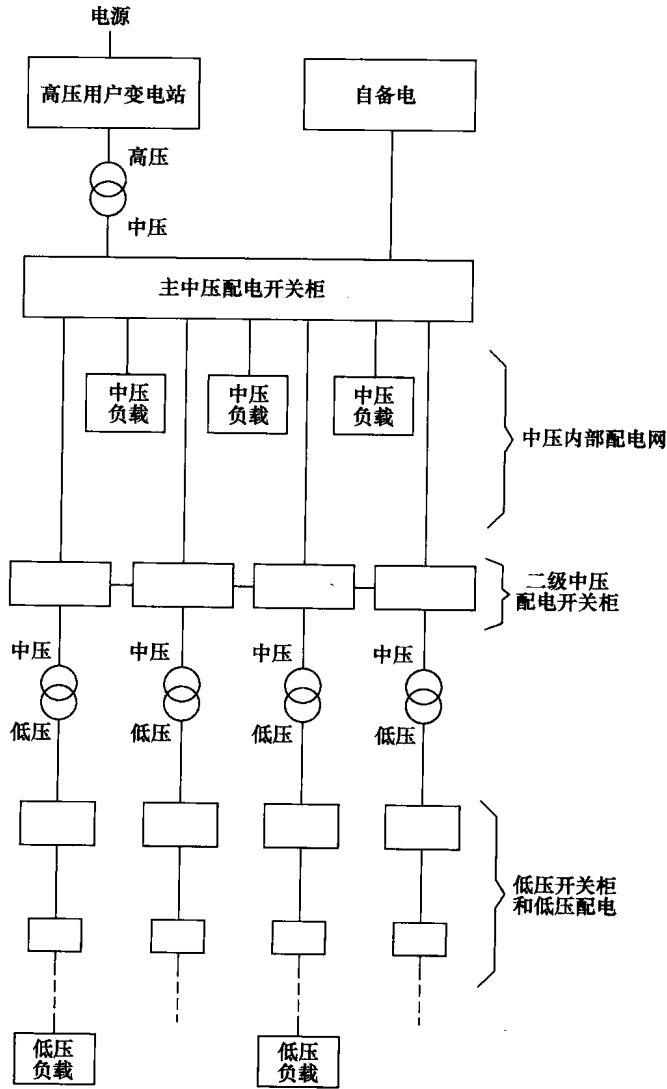


图 1-1 一个专用配电网的结构

9) 低压负载。

1.2 电源

工业用电网的供电电压可以是低压、中压或高压。电源的额定电压值与用户的用电功率要求有关。用户所要求的功率越大，电源的电压应越高。

1.3 高压用户变电站

高压用户变电站最常采用的供电配置如下：

1. 单电源供电（见图 1-2）

优点：成本低；

缺点：可靠性低。

注：没有显示与高压断路器相连的隔离开关。

2. 双电源供电（见图 1-3）

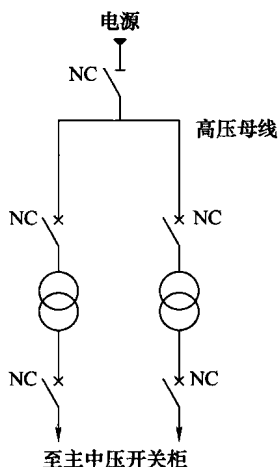


图 1-2 单馈入的高压用户变电站

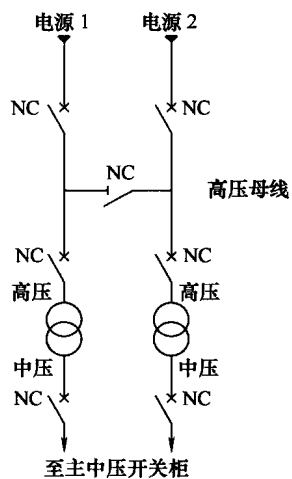


图 1-3 双馈入的高压用户变电站

运行方式：

1) 正常状态：

- ① 两个进线断路器都是闭合的，母联开关也是闭合的；
- ② 变压器由两个电源同时供电。

2) 受扰状态：

如果失掉一个电源，另一个电源提供全部供电。

优点：

- ① 在每个电源都能对全网供电时，这种供电方式是非常可靠的；
- ② 在母线部分运行的情况下可对母线进行检修。

缺点：

- ① 这种接线方式成本较高；
- ② 母线检修时，只允许母线进行部分运行。

注：没有显示与高压断路器相连的隔离开关。

3. 双馈入双母线系统供电（见图 1-4）

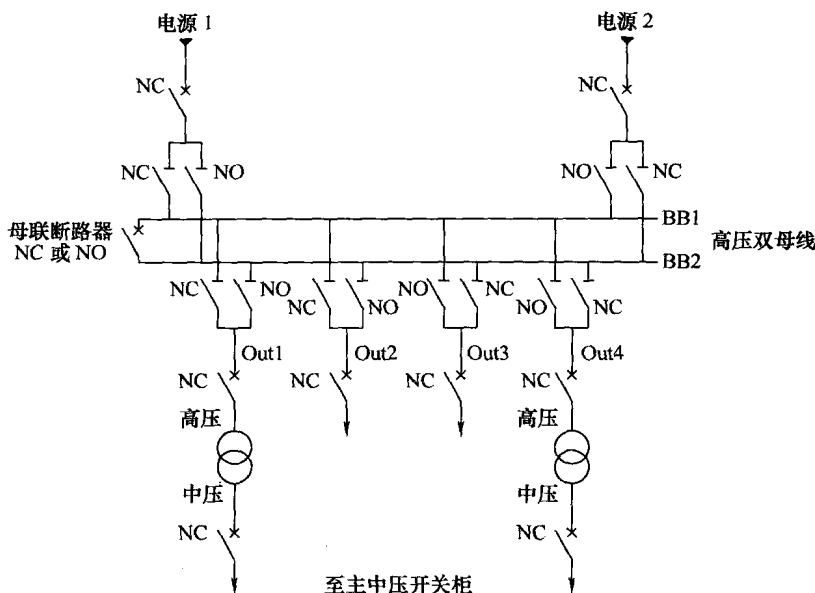


图 1-4 双电源双母线供电的高压用户变电站

运行方式：

1) 正常状态：

- ① 电源 1 通过母线 BB1 给馈线 1 (Out1) 和馈线 2 (Out2) 供电；
- ② 电源 2 通过母线 BB2 给馈线 3 (Out3) 和馈线 4 (Out4) 供电；
- ③ 母联断路器闭合或开断。

2) 受扰状态：

- ① 如果失去一个电源，另一个电源提供全部供电；
- ② 如果一条母线发生故障（或进行母线检修），母联断路器断开，另一条母线给全部输出线供电。

优点：

- ① 供电可靠；
- ② 对于电源、负载和母线检修来讲，这种供电方式提供了更高的灵活性；
- ③ 可以实现不停电状态下的母线供电转移。

缺点：

与单母线供电相比，这种系统造价较高。

注：没有显示与高压断路器相连的隔离开关。

1.4 中压供电

首先来看看中压供电的各种接线方式，然后再来看中压用户变电站的接线方式。

1.4.1 中压供电的各种接线方式

根据中压电网的类型，通常采用下列供电接线方式。

1. 单线供电（见图 1-5）

该变电站由中压配电线（电缆或电线）的一个分支线路供电。该供电方式的变压器额定功率为 160kVA 左右，在乡村地区比较常见。它只有一个供电电源。

2. 环网柜原理（见图 1-6）

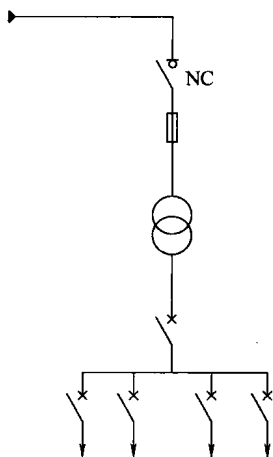


图 1-5 单线供电

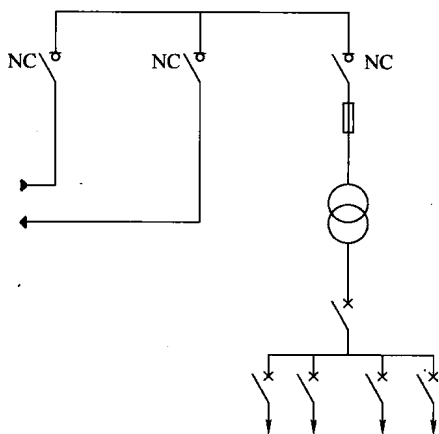


图 1-6 环网柜供电

环网柜（Ring Main Units, RMU）在正常情况下连接成一个中压环网或回路（见图 1-20a 和图 1-20b）。

这种接线方式给用户提供了两个供电电源，因此大大减少因系统故障或供电部门运行操作而引起的任一种停电。环网柜主要用于市区中压地下电缆网络供电。

3. 并联馈线供电（见图 1-7）

当中压供电连接到变电站的同一母线上的两条架空线或电缆时，通常采用类似于环网柜接线方式的中压开关柜（见图 1-21）。

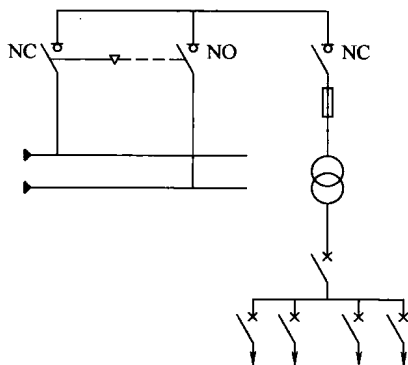


图 1-7 双线供电

该接线方式和环网柜的主要运行差别在于两个进线开关互锁。在这种情况下，一次仅能闭合一个进线开关，也就是闭合一个开关可以防止另一个开关的闭合。

在失电情况下，必须先打开闭合的进线开关，然后闭合先前断开的开关。可通过手动或自动完成该操作顺序。这种类型的开关柜特别适用于高负载密度网络和由地下电缆系统供电的快速扩张的城市中压配电网。

1.4.2 中压用户变电站

中压用户变电站由几台中压变压器和输出馈线组成。供电方式可以是单线供电、环网柜供电或双回线供电（见 1.4.1 节）。

图 1-8 显示了一个中压用户变电站的接线方式，该接线采用带有中压变压器和输出馈线的环网柜供电方式。

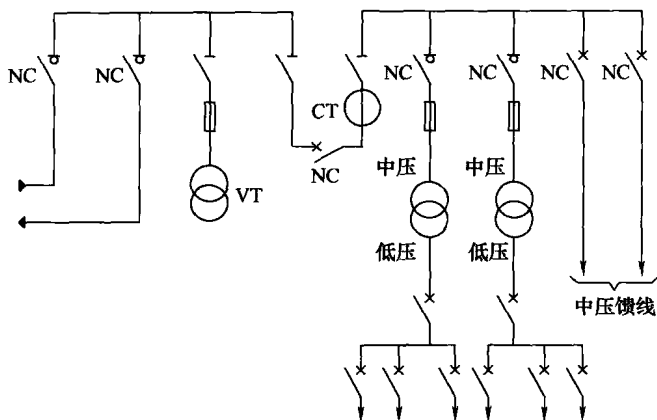


图 1-8 中压用户变电站的例子

1.5 中压电网的接线方式

中压电网由开关柜和馈电路组成。首先来看一下开关柜的各种供电方式，然后再来看看不同的供电网络的结构。

1.5.1 中压开关柜的各种供电方式

以一个中压开关柜的主要供电方式开始，不考虑它在电网中的位置。

电源的数量和开关柜的复杂性因供电安全要求级别的不同而异。

1. 单母线单电源供电接线（见图 1-9）

运行：如果失去供电电源，母线将停止运行直到故障修复。

2. 无母联开关的单母线双电源供电接线（见图 1-10）

运行：一个电源给母线供电，另一电源作为备用。如果母线发生故障（或者母线检修），输出馈线将失电。