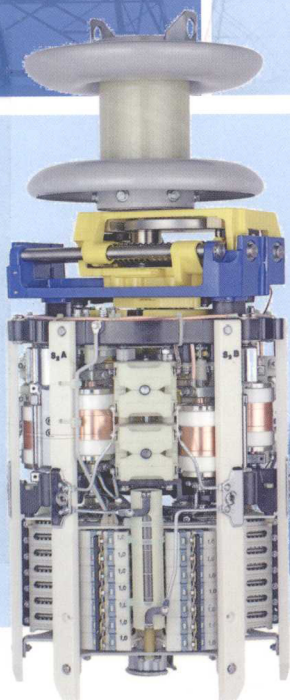


有载分接开关

电气机理

朱英浩 沈大中 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

有载分接开关 电气机理

朱英浩 沈大中 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

有载分接开关是变压器实现有载调压不可缺少的组件,本书主要介绍有载分接开关的电气机理。全书共分为10章,主要内容包括有载分接开关概述、有载分接开关有关键参数的特性、电阻式有载分接开关的开断性能特征、有载调压变压器的结构要求、有载分接开关的并联、换流变压器用与电弧电炉变压器用有载分接开关、铁心电抗器用有载分接开关、电抗式有载分接开关、移相变压器(PST)用有载分接开关、电阻型有载分接开关选用实例。

本书主要供从事变压器设计、运行及检修工作的专业人员阅读、使用。

图书在版编目(CIP)数据

有载分接开关电气机理/朱英浩,沈大中编著. —北京:中国电力出版社,2011.9

ISBN 978-7-5123-2130-4

I. ①有… II. ①朱…②沈… III. ①有载分接开关 IV. ①TM403.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第189864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>)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012年1月第一版 2012年1月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 5.75印张 140千字 3彩页

印数 0001—3000册 定价 30.00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

随着我国输电网电压等级不断提高和远距离输送容量的不断增大，电网运行的安全性、稳定性和提高电压质量的问题显得越发重要。电网需要具备带负载调整电压的功能，变压器，尤其换流变压器，必须采用有载调压方式，这已是当今输电系统不可缺少的组成部分。

有载分接开关是变压器实现有载调压不可缺少的组件，是变压器内部智能化的首脑，是变压器内部唯一可动的部件。在正常运行中，通过有载分接开关的操作即可调整系统电压，并达到满足系统要求的目的。其特有的性能已在变压器应用领域得到验证。

随着我国特高压、超高压交直流输电工程的建设，目前制造的变压器单台容量受制于运输条件已接近极限，调压方式也已从传统的变压器箱内调节发展成为单独的调压变压器调节。各种调压方案的设计是特高压、大容量交流变压器与换流变压器设计的难题之一。

当初变压器采用有载分接开关时，受当时分接开关结构的局限和对其原理及功能缺乏足够的了解，以至于在中文名称上给人们一定的误解，感觉与其他电气类开关有相近之处。其实，“开关”两字在其命名里是源于德文还是英文难以查证，但总归是一个失误。随着有载分接开关功能的不断完善，采用了先进的技术和材料，使开关本身的质量和可靠性有了很大的提高，但这个名称沿用到现在也没有人去改正。毕竟有载分接开关是机械范畴的组件，变压器属于电气领域的设备。电气领域的人员非常需要从电气的角度来认识有载分接开关，所以编写了这本《有载分接开

关电气机理》。

本书将有载分接开关的电气理论与实践相结合，首先对有载分接开关的基本电气原理进行分析，再介绍各类变压器的选用，所以本书是电气类科技书。本书有关章节中的公式及原理，都译自参考文献原文。书中大量的典型案例是作者多年经验的荟萃。

由于有载分接开关在变压器运行中的重要性，特别是在超高压以上等级变压器中，目前选用较多的产品是德国 MR 公司制造的。所以，本书在编写过程中，作者查阅了德国 MR 公司各类产品样本等资料，并得到了开德贸易（上海）有限公司总经理 Mr. Markus klein（克莱恩先生）、王明先生等各位专家和同仁的关心和支持，在此表示感谢。

由于时间所限，书中不妥之处在所难免，恳请读者不吝指正。

编著者

2011 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 有载分接开关概述	1
1.1 有载调压分接开关与变压器的功能	2
1.2 有载调压变压器用有载调压分接开关	2
第 2 章 有载分接开关有关关键参数的特性	10
2.1 有载分接开关级数与调压绕组级数的关系	10
2.2 偏励磁绕组	11
2.3 切换开关端子间电压	14
2.4 负载功率因数对断弧能力的影响	22
2.5 电阻式有载分接开关的过渡电阻选择	26
2.6 电阻式有载分接开关的特殊开断情况	29
2.7 多级粗调加细调方案	43
第 3 章 电阻式有载分接开关的开断性能特征	46
3.1 有载分接开关的开断能力与过渡电阻	46
3.2 增加选择器与切换开关通流容量	67
3.3 极性选择器的开断能力	69
第 4 章 有载调压变压器的结构要求	81
4.1 各分接的参数	81
4.2 电阻式有载分接开关的油系统	83
4.3 有载分接开关在运输时的支撑	83
4.4 低温连续操作	83
4.5 分接位置编号	83
4.6 调压方式与节能	84

4.7	Y 接中点绝缘水平	85
4.8	耐受试验时各分接位置	85
4.9	带电滤油	86
4.10	单独调压绕组的稳定性	86
第 5 章	有载分接开关的并联	87
5.1	单相有载分接开关及分接选择器与切换开关的并联	87
5.2	两台或多台有载调压变压器并联运行	95
第 6 章	换流变压器用与电弧电炉变压器用有载分接开关	97
6.1	换流变压器用有载分接开关	97
6.2	电弧电炉变压器用有载分接开关	99
第 7 章	铁心电抗器用有载分接开关	100
7.1	用有载分接开关切换电抗器匝数概述	100
7.2	串联电抗器的应用（独立电流负载）	105
7.3	并联电抗器的应用（独立电压负载）	108
第 8 章	电抗式有载分接开关	112
8.1	真空断流器型电抗式有载分接开关	114
8.2	负载功率因数对切换电流的影响	115
8.3	真空电抗式有载分接开关参数	116
8.4	用作过渡阻抗的电抗器	117
8.5	典型电气连接图	120
8.6	增加平衡绕组后的开断能力	120
第 9 章	移相变压器（PST）用有载分接开关	124
9.1	移相变压器（PST）功能	124
9.2	负载下移相变压器	126
9.3	移相变压器功率转移	126
9.4	负载电流对负载电压的影响	128
9.5	负载侧输出的负载电流对相位移的影响	129
9.6	移相变压器超铭牌容量运行	129

9.7	防止短路电流的考虑	129
9.8	移相变压器的特点及计算	130
第 10 章	电阻型有载分接开关选用实例	148
10.1	基本接线图选用	148
10.2	调压范围相同时每级电压与分接级数选用	151
10.3	直接调压时 OLTC 可供选用的参考值	153
10.4	变压器额定频率对 OLTC 性能的影响	158
10.5	D 接法时调压绕组悬空自由端振荡电压	159
10.6	D 接调压过程中的循环电流	160
10.7	绕组排列对极性选择器切换悬浮电位的影响	160
10.8	MIII 500Y 型 OLTC 选用实例剖析	161
10.9	自耦变压器线端调压方案对比	168
10.10	有载调压变压器结构要点	168
附录	极性选择器的开断能力计算	170

有载分接开关概述

为提高输电网的运行可靠性和稳定性，需要用两条联络线将两个独立电网互相联网，或在一个输电网内通过调整同相位电压值来控制感性无功功率潮流，或通过将电源侧电压经移相后与负载侧电压有相位差来控制有功功率潮流。当两独立电网用两条不同阻抗的联络线互联时，在一条联络线中串入能移相的装置后可使每条联络线输送相同功率时，即使两条联络线的阻抗不同仍可避免产生循环电流。

以上是解决系统中无功功率不足而使系统电压降低和有功功率不足而使系统频率降低的技术措施。

有载调压变压器是用于同相位电压幅值调整的装置，主要包括采用线性调压、正反调压、粗细调压、线端调压、中性点调压、直接调压、间接调压方案的变压器、自耦变压器或换流变压器。

移相变压器（phase-shift-transformer, PST）是用于调整输出电压相位（即移相位）的装置，其调压方式有单铁心直接调压和双铁心间接调压两种。

不论是电压幅值调整还是相位移动调整，都是靠有载调压分接开关（on-load-tap-changer, OLTC）来完成的。有载分接开关的调整是逐级的，有一定的调整范围。同相位电压调整是将额定电压的相位保持不变，作正或负的（高于或低于额定电压）电

压幅值调整；移相位调整是将额定输入电压相量向前（即输出电压沿电压相量逆时针方向移前，超前于输入电压）或滞后（即输出电压沿电压相量顺时针方向移后，滞后于输入电压）移动。

有载调压变压器可调整系统中节点电压幅值，控制无功潮流；移相变压器可控制有功潮流，使多条并联联络线的负荷均匀，且无循环电流。



1.1

有载调压分接开关与变压器的功能



有载调压分接开关通过改变变压器调压绕组分接头位置调压，即改变变压器的匝数比。

变压器每一相的高压基本绕组与单独邻近布置的本相调压绕组连接，即可调整同相位电压幅值；而某一相的单独调压绕组与其他相的高压基本绕组连接，使合成电压与高压基本电压间有相位移动，即可使合成电压相位超前或滞后于高压基本电压。

有载调压变压器与移相变压器的主要差别在于调压绕组的连接方式，并且两种变压器所用有载调压分接开关的选用技术参数与类型是完全不同的。



1.2

有载调压变压器用有载调压分接开关



1.2.1 调压方式

有载调压分接开关调压方式主要有以下三种：

（1）线性调压：调压范围内所有全部分接线段都在同一调压绕组内（一般正与负分接调压范围不对称）。

（2）正反调压：调压绕组可正或反方向与高压基本绕组连接，分接线段仅为全部调压范围所需线段的一半。

（3）粗细调压：调压绕组分为粗调与细调两部分。细调绕组

可与高压基本绕组和粗调绕组串联后再连接，或只与高压基本绕组连接。

$U_N \pm 10\%$ 情况下，高压基本绕组与调压绕组采用不同调压方式时的电气匝数对比见表 1-1。

表 1-1 不同调压方式时的电气匝数对比

调压方式	线性调压 (%)	正反调压 (%)	粗细调压 (%)	备注
高压基本绕组电气匝数	91	100	90	因结构原因，实际匝数会多于电气匝数，正反调与粗细调在额定分接时有 10% 电气匝数悬浮
调压绕组电气匝数	17	10	粗细调各 10	
负分接时电气匝数	91	110	90	
负分接时悬浮电位电气匝数	17	无	粗细调各 10	

注 线性调压时高压电压为 $U_N \pm 5\%$ ，正负不对称，正分接时总匝数为 108%。

1.2.2 有载调压分接开关中间调压位置数

有载调压分接开关的中间调压位置数：线性调压没有，正反调压及粗细调压有一个或三个位置。

1.2.3 有载调压分接开关类型

为防止调压过程中级间分接线段直接短路，用电阻器或电抗器作为过渡限流元件。

(1) 电阻式：完成切换过程较快；作用在电阻上电流为瞬时性。

(2) 电抗式：完成切换过程相对较慢；如有过桥与非过桥均为运行分接位置，在过桥分接位置运行时的电抗器要能长期连续运行。

1.2.4 恒磁通调压接线图

1.2.4.1 Y 或 YN 接法中点调压

(1) Y 或 YN 接法变压器中点直接调压的接线如图 1-1 所示。

(2) Y 或 YN 接法变压器中点间接调压的接线如图 1-2 所示。特高压或超高压变压器受运输尺寸限制，或将无励磁调压变压器改造成有载调压变压器时，常采用中点间接调压方式。

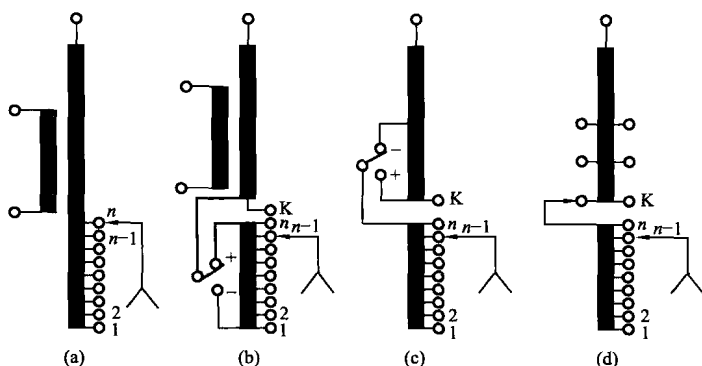


图 1-1 Y 或 YN 接法变压器中点直接调压（中点可接地或不接地）接线图

(a) 线性调压 (n 为偶数); (b) 正反调压; (c) 粗细调压; (d) 多级粗细调压

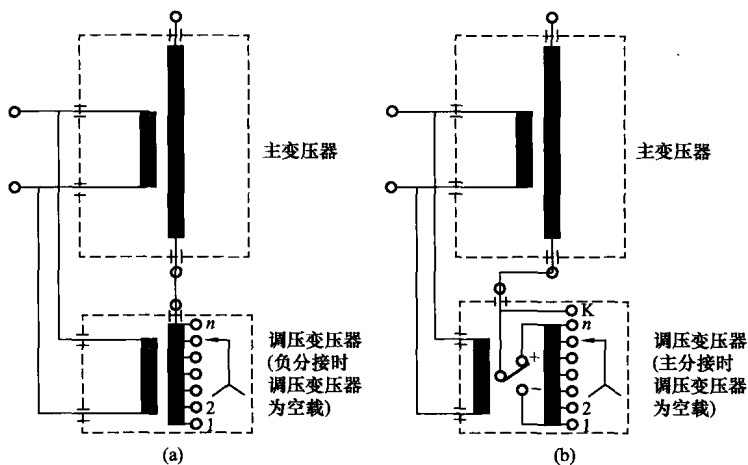


图 1-2 Y 或 YN 接法变压器中点间接调压接线图

(a) 中点间接线性调压; (b) 中点间接正反调压

(3) 中点调压时有载分接开关或调压绕组相间及相对地电压。

变压器 Y 接法中点调压时有载分接开关或调压绕组相间及相对地电压取决于以下四个因素：

1) 调压范围（调压范围较大时起作用）；

2) 中点绝缘水平, 如变压器的 $U_m = 126\text{kV}$, 变压器中点绝缘水平有 40kV 和 60kV 两种;

3) 短路电流通过接地电阻的压降;

4) 中点间接调压时, 调压部分与主变压器的高压部分隔开, 调压绕组匝电压可按设计参数任意选。

(4) 双绕组或三绕组变压器 Y 接法高压绕组常用中点调压, 这种方式具有以下优点:

1) 可降低有载分接开关对地绝缘水平;

2) 三相变压器可采用三相有载分接开关;

3) 调压范围较大时可用正反调压方案, 使分接线段与分接头数减少, 可防止较多匝数悬浮而引起的冲击电压振荡;

4) UHV、EHV 自耦变压器采用间接调压时, 可借助补偿变压器使低压绕组电压不变, 其接线如图 1-3 (c) 所示。

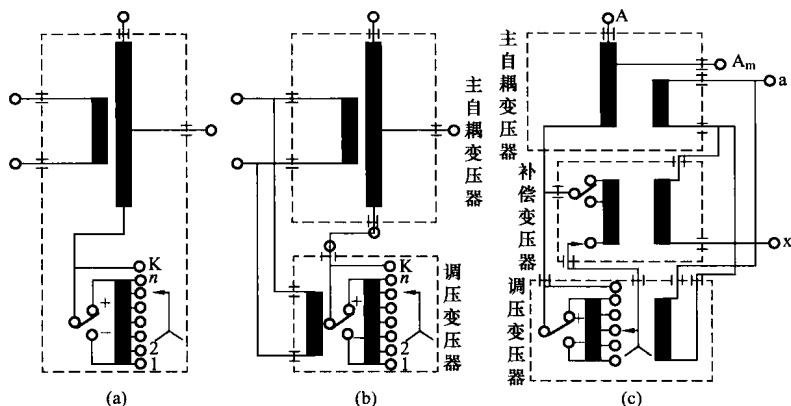


图 1-3 自耦变压器中点变磁通直接与间接调压接线图

(a) 中点变磁通直接正反调压; (b) 中点变磁通间接正反调压;

(c) 低压为恒定电压的中点间接正反调压

(5) 自耦变压器中点变磁通直接与间接调压的接线如图 1-3 所示。为保持自耦变压器高压或中压侧为恒定电压, 采用图 1-3

(a) 及图 1-3 (b) 所示的中点变磁通有载调压方式时, 自耦变压器铁心会有过励磁或欠励磁现象; 第三 (低压) 绕组输出电压为变量。当采用图 1-3 (c) 所示接线方式时, 补偿变压器的感应电压可使低压第三绕组输出电压恒定, 但自耦变压器铁心仍有过励磁或欠励磁现象。高压与中压电压越接近, 即电压比越小, 过励磁越高, 因此较小电压比的自耦变压器不宜用中点调压方案。采用图 1-3 (c) 所示的调压方式, 在主分接时补偿变压器相当于电流互感器, 第三绕组有电流输出时, 相当于补偿变压器有较多匝数的二次绕组被调压变压器短路。

当调压变压器用有载调压分接开关调电压幅值的瞬间, 会有一个较高的开路电压作用在调压变压器的分接线段上。

在运行时, 自耦变压器的中点应接地, 此时有载分接开关对地绝缘水平取决于调压范围。

值得注意的是, 当系统的中压侧发生单相接地故障时, 由于高压与中压系统都会提供短路电流, 故三相或三台单相变压器组成的三相自耦变压器公共中点中流过的单相短路电流是很大的, 因此必须要核对有载分接开关的耐受短路电流值。

1.2.4.2 线端调压

自耦变压器常采用中压线端有载调压, 以防止铁心的过励磁、欠励磁和第三绕组电压变化, 此时必须采用电压等级较高 (其绝缘水平相当于中压电压等级 U_m 的绝缘水平)、电流较大的单相有载分接开关。中压侧单相短路时, 通过中压线端有载分接开关的单相短路电流会比三相短路电流大。

(1) 保持高压侧电压 U_1 为常数时, 自耦变压器中压线端直接调压的接线如图 1-4 所示, 其中: 图 1-4 (a) 为线性调压, 当分接开关在不同调压位置时, 调压线段中的电流方向会变; 图 1-4 (c) 为正反调压的一种, 当 A_m 接负时, 操作波试验时调压线段悬浮端为正极性振荡, 接正则调压线段悬浮端为负极

性振荡。并且图 1-4 (c) 中, 操作波试验时, 操作波试验电压在固定点入波。

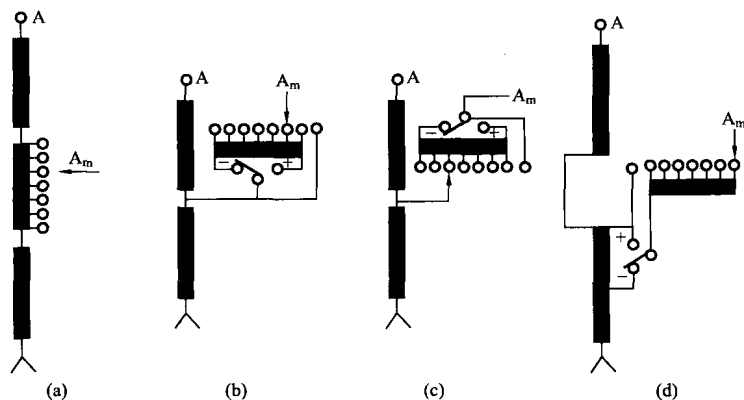


图 1-4 高压侧电压 U_1 为常数时自耦变压器中压线端直接调压接线图

(a) 线性调压; (b)、(c) 正反调压; (d) 粗细调压

(2) 保持中压侧电压 U_2 为常数时自耦变压器中压线端直接调压的接线如图 1-5 所示。

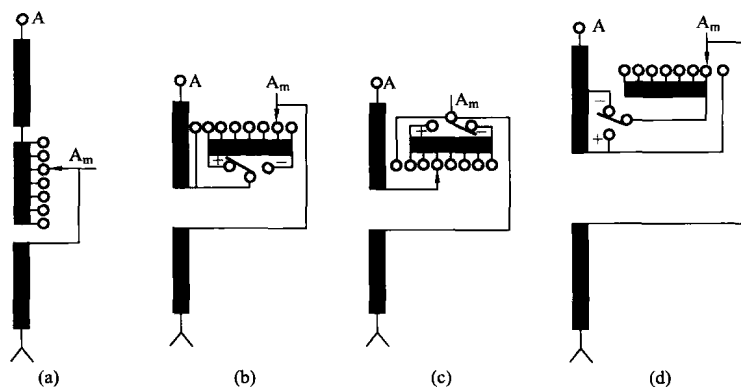


图 1-5 中压侧电压 U_2 为常数时自耦变压器中压线端直接调压接线图

(a) 线性调压; (b)、(c) 正反调压; (d) 粗细调压

(3) 自耦变压器中压线端间接调压的接线如图 1-6 所示。间接调压时, 有载分接开关对地绝缘水平和通过电流可根据调压绕组选定的电压而调整。图 1-6 (a) 适用于有载分接开关对地电压等级低的情况, 其电流由调压范围决定; 图 1-6 (b) 有载分接开关对地电压等级高, 且有载分接开关通过中压线端电流, 可用于无励磁调压改造成有载调压。

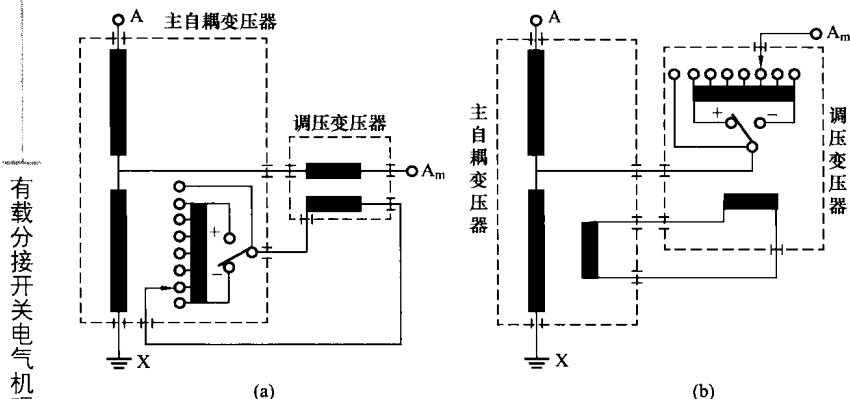


图 1-6 自耦变压器中压线端间接调压接线图

(a) 对地电压等级低时的接线图; (b) 对地电压等级高时的接线图

1.2.4.3 D 接高压绕组调压的接线

国内很少在 D 接高压绕组上采用有载调压方式。在国外, $U_m \leq 145\text{kV}$ 时, 高压绕组有采用 D 接法, 且要求在 D 接高压绕组上采用有载调压方式。D 接绕组调压接线如图 1-7 所示。

在 D 接调压方式中, 当在负分接位置运行时, 都存在悬浮电位匝数, 有振荡电压。图 1-7 (a) 及图 1-7 (b) 在电压等级不高时, 可用三相复合式有载分接开关, 三相同柱垂直布置; 在电压较高时, 可采用三台单相开关组合成开关组。图 1-7 (c) 采用一组由两相与单相有载分接开关组成的开关组。

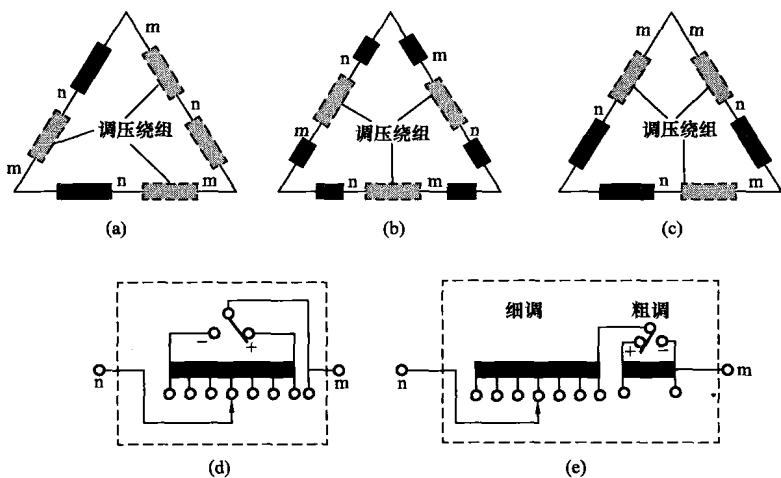


图 1-7 D 接绕组的调压方式

(a) 三极开关线端调压方案；(b) 三极开关绕组中部调压方案；

(c) 双极加单极开关线端调压方案；(d) 正反调

压绕组；(e) 粗细调压绕组