

电气设备故障试验诊断 **攻略**

消弧线圈

丛书主编 包玉树
本册主编 司增彦

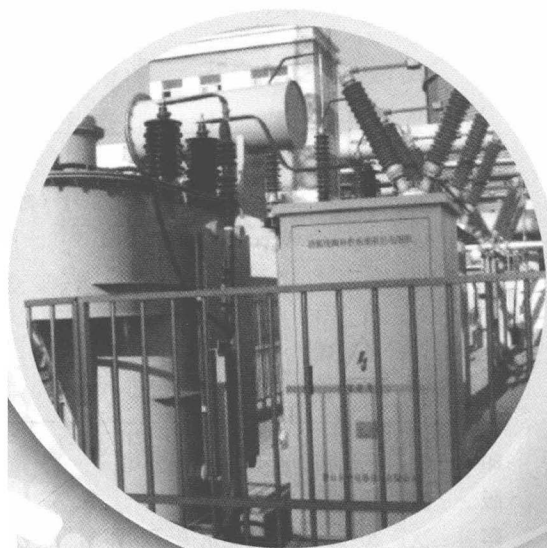


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电气设备故障试验诊断 攻略

消弧线圈

丛书主编 包玉树
本册主编 司增彦



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为加强对电气设备的检查维护及故障诊断力度,确保电气设备安全稳定运行,特编写《电气设备故障试验诊断攻略》丛书。本书以生动的案例介绍、真实的场景再现,将基于电气试验的设备故障诊断案例加以剖析。

本书是《消弧线圈》分册,共分五章,分别为消弧线圈装置、消弧线圈装置的试验、消弧线圈装置常见的故障原因及处理方法、消弧线圈装置典型故障案例分析以及消弧线圈装置监测新技术及其应用。

本丛书可供电力系统从事电气设备试验的工程技术人员使用,也可作为高等院校相关专业师生的学习参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电气设备故障试验诊断攻略. 消弧线圈 / 包玉树主编; 司增彦分册主编. —北京: 中国电力出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-5198-2334-4

I. ①电… II. ①包…②司… III. ①电气设备—故障诊断②消弧线圈—故障诊断 IV. ①TM07②TM475

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第189155号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 吴 冰

责任校对: 黄 蓓 郝军燕

装帧设计: 赵姗姗

责任印制: 石 雷

印 刷: 三河市百盛印装有限公司

版 次: 2018年10月第一版

印 次: 2018年10月北京第一次印刷

开 本: 787毫米×1092毫米 16开本

印 张: 8.75

字 数: 187千字

印 数: 0001—1500册

定 价: 38.00元



版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

《电气设备故障试验诊断攻略》丛书编委会 审定委员会

主 任 黄志高
副 主 任 陈 晟 卞康麟
委 员 (按姓氏笔画排序)
马生坤 王丽峰 水为涟 吉 宏 许焕清 杜 森
李 杰 李瑶红 吴 俊 张红光 祝和明 徐建军
翟学锋

编写委员会

丛书主编 包玉树
丛书参编 (按姓氏笔画排序)
马生坤 马君鹏 王成亮 王伟津 王庆胜 王如山
王丽峰 王泽仁 王建刚 卞康麟 甘 强 叶加星
付 慧 司增彦 朱孟周 刘 洋 孙和泰 孙景奕
杜 森 杨小平 杨世海 杨景刚 李夕强 李 军
李 勇 李瑶红 吴 俊 吴 剑 张兴沛 陈华桂
陈志勇 陈 杰 陈明光 范 忠 周 源 孟 嘉
赵 胤 胡永建 钟子娟 钟永和 祝和明 秦嘉喜
贾勇勇 徐敏锐 殷 峰 高 山 高 嵩 黄亚龙
黄 芬 黄 磊 衡思坤

本册编写人员

主 编 司增彦
副 主 编 司书林
参 编 丁玉江 张 潇 肖学权 刘雪霞 李念森 周 强
白金花 刘 阳 徐沛平



目前，国家电网公司立足自主创新，大力发展特高压和智能电网并取得了重大突破，实现了“中国创造”和“中国引领”，电力事业日新月异，蓬勃向前。国网江苏省电力公司的广大员工随潮而动，逐梦而飞。在此背景下，经过近四年的筹划、组织、立项、编撰、审核、修改，《电气设备故障试验诊断攻略》丛书与读者见面了。

本套丛书按照一次设备的种类分别成册，内容涵盖设备结构、针对性试验、典型故障、诊断攻略等方面，重点放在具有可操作性的故障诊断上。丛书中所列故障案例，既有作者的亲身经历，也有收集借鉴的他山之石，经过筛选、加工一一呈现在读者面前，期望这套丛书能给读者带去不一样的收获。本套丛书各分册内容安排主要以故障描述、缺陷排查、综合分析、诊断攻略的形式呈现，另外对专业领域的试验与诊断新技术做了前瞻性叙述。

《消弧线圈》分册共分五章，介绍了消弧线圈装置及其试验、消弧线圈常见故障原因及处理方法、典型故障案例分析、监测新技术及其应用。收集了大量的消弧线圈典型故障案例，并进行详细的诊断分析，同时提出了切实可行的处理方法及预防措施。

在本套丛书的编写过程中，得到了国网江苏省电力公司领导的大力支持，书中参考了其他省市电力公司的事故案例，引用了一些研究成果及试验数据，在此对相关单位的领导和专家表示衷心的感谢。

本套丛书可供电力系统从事电气设备试验的工程技术人员使用，也可作为高等院校相关专业师生的学习参考资料。

由于各分册作者均为在职电力系统专家，利用工作之余的时间编写，时间仓促，书中仍有疏漏与不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2018年5月



前言

第一章 消弧线圈装置	1
第一节 消弧线圈装置简介	1
第二节 消弧线圈装置的接地方式	4
第二章 消弧线圈装置的试验	8
第一节 系统中性点电压的测量	8
第二节 消弧线圈补偿系统电容电流测量	9
第三节 消弧线圈伏安特性试验	13
第四节 消弧线圈补偿系统的调谐试验	17
第三章 消弧线圈装置常见的故障原因及处理方法	20
第一节 消弧线圈装置运行中容易发生的故障原因及处理	20
第二节 消弧线圈装置常见故障处理方法	22
第四章 消弧线圈装置典型故障案例分析	26
第一节 6~10kV 系统消弧线圈装置故障案例	26
第二节 35kV 系统消弧线圈装置故障案例	100
第五章 消弧线圈装置监测新技术及其应用	124
第一节 数字化消弧线圈装置技术简介	124
第二节 消弧线圈接地补偿装置在线监测技术	127
参考文献	131

消弧线圈装置

长期以来,我国 6~66kV 的配电网大多采用中性点不接地运行方式。这种运行方式,由于在单相接地时允许短时间内带故障运行,因而大大提高了系统的供电可靠性。但随着城乡电网的扩大以及电缆出线的增多,系统对地电容电流急剧增加,单相接地后流经故障点的电流很大,电弧不易熄灭,容易产生间歇性弧光接地过电压,同时由于电磁式电压互感器铁芯饱和时容易引起谐振过电压,导致事故跳闸率明显上升。因此,在变电站安装消弧线圈减小故障点的残余电流,抑制间歇性弧光过电压及谐振过电压,对保证系统安全供电起到显著的作用。

第一节 消弧线圈装置简介

新颁布的电力行业标准规定:3~10kV 架空线路构成的系统和 35、66kV 电网,当单相接地故障电流大于 10A 时,中性点应装设消弧线圈;3~10kV 电缆线路构成的系统,当单相接地故障电流大于 30A 时,中性点应装设消弧线圈。

1. 消弧线圈的作用

消弧线圈是一种带铁芯的电感线圈,应用在中性点接地系统中,电力系统输电线路经消弧线圈接地,为小电流接地系统的一种。消弧线圈的作用是当电网发生单相接地故障后,提供一电感电流,补偿接地电容电流,使接地电流减小,也使得故障相接地电弧两端的恢复电压速度降低,达到熄灭电弧的目的。当消弧线圈正确调谐时,不仅可以有效地减少产生弧光接地过电压的几率,还可以有效地抑制过电压的幅值,同时也最大限度地减小了故障点热破坏作用及接地网的电压等。

当线路发生短路接地时,电流在 30A 以上的情况下,放电间隙产生的电压会升高 2.5~3 倍的线电压,当变压器中性点加装消弧线圈后,放电处电压在电感线圈阻尼作用下,不会升高,从而减小了放电电流的大小,电流减小了,也就起到了消弧的作用。当两电流的量值小于发生电弧的最小电流时,电弧就不会发生,也不会出现谐振过电压现象,其型号(仅举一例)意义如图 1-1 所示。

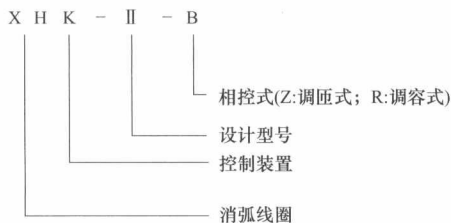


图 1-1 消弧线圈型号示意图

2. 消弧线圈的系统接线

消弧线圈既不接在高压侧，也不接在低压侧，应该说是接在“本级电压侧”，也就是说，35kV的消弧线圈就接在35kV侧，10kV的消弧线圈就接在10kV侧，6kV的消弧线圈就接在6kV侧；如图1-2所示。

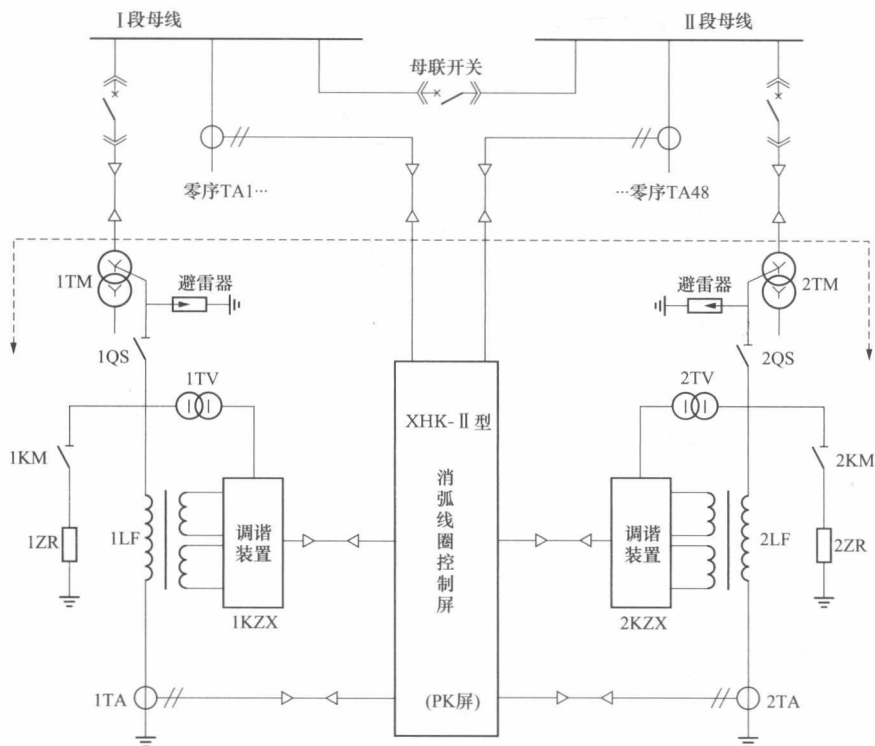


图1-2 XHK-II-B型消弧线圈自动调谐及接地选线成套装置示意图

1TM、2TM—接地变压器；1QS、2QS—单相隔离开关；1TV、2TV—中性点电压互感器；
1ZR、2ZR—并联中电阻；1LF、2LF—消弧线圈；1KZX、2KZX—滤波箱；1TA、2TA—中性点电流互感器

3. 相控式消弧线圈及容量估算

相控式消弧线圈是带铁芯的电感线圈，二次侧为短路绕组和滤波绕组，通过调节晶闸管（可控硅）导通角度，来改变消弧线圈的电感量。消弧线圈接在变压器或发电机的中性点上，当系统发生单相接地时，消弧线圈提供的感性电流与系统的电容电流相位相反，接地弧道中的残流即为电感电流与电容电流的差值。调整电感电流，就可以使接地残流达到最小值，从而降低发生弧光接地过电压的概率。

消弧线圈的补偿是随调补偿，即在系统发生单相接地时，及时调节消弧线圈到最佳补偿状态。从补偿效果来看，相控式消弧线圈装置调节灵活方便。对单相接地故障具有快速补偿能力，极大地减少了系统由瞬时性单相接地故障发展成永久性接地故障的概率，系统安全可靠。

消弧线圈的选型应参考系统的电容电流，根据电容电流大小来决定消弧线圈的补偿

范围。系统应按电压等级估算电容电流，其估算方法如下：

(1) 电缆线路电容电流的估算。电缆线路的电容电流远大于架空线路的电容电流，必须单独计算，其值与电缆的截面积、电缆结构、额定电压密切相关，可参考表 1-1 估算。

表 1-1 交联聚乙烯绝缘电缆接地电容电流的平均值

电缆导体截面积 (mm ²)	YJV、YJLV 6/6kV、6/10kV		YJV、YJLV 8.7/10kV、8.7/15kV		YJV、YJLV 26/35kV	
	电容 (μF/km)	6kV 接地电容电流 (A/km)	电容 (μF/km)	10kV 接地电容电流 (A/km)	电容 (μF/km)	35kV 接地电容电流 (A/km)
25	0.19	0.65	0.15	0.85	—	—
35	0.21	0.72	0.18	1.03	—	—
50	0.23	0.79	0.19	1.08	0.11	2.31
70	0.27	0.92	0.21	1.20	0.12	2.52
95	0.30	1.03	0.24	1.37	0.13	2.73
120	0.32	1.10	0.26	1.48	0.14	2.94
150	0.35	1.20	0.28	1.60	0.15	3.15
185	0.38	1.30	0.30	1.71	0.16	3.36
240	0.42	1.44	0.34	1.94	0.18	3.77
300	0.47	1.61	0.37	2.11	0.19	3.98
400	0.55	1.89	0.43	2.46	0.21	4.40
500	0.60	2.06	0.47	2.69	0.23	4.82
630	0.66	2.26	0.52	2.97	0.25	5.24
800	0.74	2.53	0.57	3.26	0.28	5.86
1000	0.82	2.81	0.63	3.60	0.30	6.29

注 电缆电容参考《电力设备选型手册 2000—2001》。

(2) 架空线路电容电流的估算。一般 3~35kV 架空线路每相对地电容为 5000~6000pF/km，由此可以估算不同电压等级线路每千米的单相接地电容电流值，见表 1-2。考虑变电站设备的电容电流时，可用表 1-2 中增大的百分值予以修正。

表 1-2 无避雷线架空线单相接地电容电流平均值

额定电压 (kV)	单相接地电流 (A/km)	变电站影响接地电流增大率 (%)
6	0.02	18
10	0.03	16
35	0.10	13

(3) 同杆双回路架空线路。同杆双回路架空线路的电容电流并非为单回线的两倍，将其等效为单回线计算电容电流为：

$$I_C = (1.4 \sim 1.6) I_d$$

式中： I_d 为双回路中一回路长度的电容电流；常数 1.4 对应 10kV 线路；1.6 对应 35kV 线路。

根据 DL/T 620—2016《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》，消弧线圈的容量应根据电网 5~10 年的发展规划确定，并按下式计算：

$$W = 1.35I_c U_n / \sqrt{3}$$

实际推荐

$$W = (1.5 \sim 2.5)I_c U_n / \sqrt{3}$$

式中： W 为消弧线圈的容量，kVA； I_c 为电容电流，A； U_n 为系统标称电压，kV。

消弧线圈一般接在电源变压器二次侧中性点上；若电源变压器二次侧绕组为星形接线，则消弧线圈直接接在中性点上；若电源变压器二次侧绕组为角形接线，没有中性点，则消弧线圈不能直接接在中性点上，由此发明了“接地变压器”，人为制造出一个“中性点”，然后再将消弧线圈接在接地变压器引出的中性点上。

4. 接地变压器

如果变电站变压器绕组为 Y 形接法，不需要使用接地变压器。如果变电站变压器绕组为 Δ 形接法，需要增加接地变压器引出中性点，接地变压器的一次侧设有无励磁调压。接地变压器具备零序阻抗低、激磁阻抗大、功耗小等特征。绕组为 Z 接线，可以只有一次绕组，也可以根据需要增加二次绕组（即所用负荷）。接地变压器每相由匝数相等的两个串联分绕组组成，每个磁芯上的两个分绕组之间及它们对次级分绕组的零序互磁通为零。当接地变压器兼做站用变压器使用时，接地变压器的额定容量大于等于所带消弧线圈的额定容量加上站用变压器的容量；独立使用时，接地变压器的额定容量大于等于消弧线圈的额定容量。

第二节 消弧线圈装置的接地方式

一、变电站中性点接地方式的比较

1. 中性点不接地方式

该中性点接地方式比较经济、简便，在接地电容电流较小的条件下，系统发生单相接地时的接地电弧可以瞬间熄灭，系统可带故障运行 2h，供电可靠性相对较高，故世界各地不少中压电网仍在采用。不过在许多情况下，中性点不接地仅为一种过渡方式，随着电网的发展，当接地电容电流接近或达到某一临界值（一般为 10A）时，往往会因间歇电弧接地引起过电压，接地电弧无法自动熄灭，容易发展成两相短路跳闸，导致事故范围进一步扩大。

2. 中性点经小电阻接地方式

该方式的优点是：容易检出单相接地故障线路，永久接地时切除速度快，在消除间歇电弧过电压、防止谐振过电压等方面有优势。缺点在于跳闸率高，断路器工作负担重，瞬时性接地也跳闸，易造成用户短时停电，供电可靠性不高。另外，短路电流冲击对电缆绝缘造成的损伤较大，对电子通信设备的电磁干扰也比较严重，若故障不能及时跳开，电弧有可能连带烧毁同一电缆沟里的其他相邻电缆，从而扩大事故，造成火灾。

3. 中性点经消弧线圈接地方式

当发生单相接地时，由于消弧线圈产生的感性电流补偿了故障点的电容电流，使故障点的残流变小，从而达到自然熄弧，防止事故扩大甚至消除事故的目的。运行经验表明，消弧线圈对抑制间歇性弧光过电压和铁磁谐振过电压，降低线路的事故跳闸率，减少人身伤亡及设备的损坏都有明显的作用。

综上所述，变电站理想的中性点接地方式是采用快速动作的消弧线圈作为接地设备，对瞬时性单相接地故障，能快速补偿，正确识别故障消除并迅速退出补偿；对非瞬时性单相接地故障，系统在消弧线圈补偿的同时在很短的时间（远小于 10s）内能正确判断接地线路，将故障线路切除，从而提高配电网的供电可靠性。

二、消弧线圈调节补偿方式及特点

消弧线圈的调节方式可分为调匝式、调容式、调节短路阻抗式等。从补偿方式上分，有欠补偿、过补偿以及全补偿，其中调节方式又可分为预调式及随调式。预调式的消弧线圈在正常运行时其电感量在最佳补偿值，即在谐振点附近运行，残流和调谐度都控制在允许范围内。随调式自动补偿消弧线圈在正常运行时工作在远离谐振点的位置，这样中性点位移电压很低，不需要串入阻尼电阻器来限制串联谐振引起的位移电压的幅值。

（一）消弧线圈调节方式种类及特点

1. 调匝式

调匝式消弧线圈工作原理如图 1-3 所示。在变电站正常运行时，有载调匝式消弧线圈是一带铁芯的电感线圈，设有多档位分接头，通过有载开关调整分接头的位置，实现改变消弧线圈的电感量。消弧线圈接在变压器或发电机的中性点上，当系统发生单相接地时，消弧线圈提供的感性电流与系统的电容电流相位相反，流过接地点的残流即为电感电流与电容电流的差值。调整电感电流，就可以使接地残流达到最小值，从而消除接地过电压。消弧线圈采用预补偿方式，即在系统发生单相接地前，消弧线圈已处于最佳补偿状态。调匝式消弧线圈装置补偿效果最佳，补偿速度快，无谐波。对瞬时性单相接地故障具有快速补偿能力，减少了系统由瞬时性单相接地故障发展成永久接地故障的几率。

一般采用变压器的有载调节机构或真空开关实现分接头的调节，电感值调节范围比较小，输出补偿电流有最小值的限制，只能达到额定值的 $1/3 \sim 1/2$ ，且不能连续无级调节。由于调节分接头的时间较长，只能采用预调的工作方式，为防止电网正常运行的串联谐振，必须加上阻尼电阻；由于设备带有转动和传动机构，因而日常维护工作量较大。

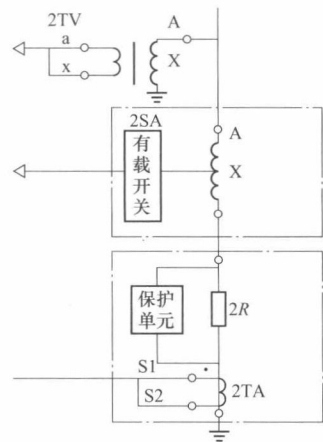


图 1-3 调匝式消弧线圈
工作原理

2. 调容式

调容式消弧线圈工作原理如图 1-4 所示，主要是在消弧线圈的二次侧并联若干组晶闸管（或真空开关）通断的电容器，用来调节二次侧电容的容抗值。根据阻抗折算原理，调节二次侧容抗值，即可以达到改变一次侧电感电流的要求。

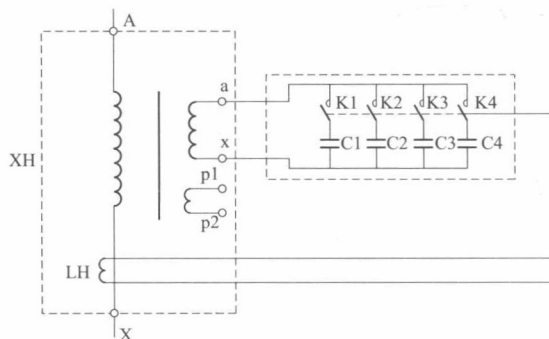


图 1-4 调容式消弧线圈工作原理

电容器组的合理组合可使级差电流做得比较小，输出范围有所增加，调节速度也提高了不少，可以采用随调的控制方式，不用阻尼电阻，但是级差电流越小，开关执行机构的级数和数量就越多，需要综合平衡。特别需要注意的是，在用晶闸管投切电容器组的情况下，晶闸管的工况比较恶劣，对晶闸管的安全运行不利。

3. 高短路阻抗变压器式

高短路阻抗变压器式消弧线圈工作原理如图 1-5 所示，把高短路阻抗变压的一次绕组作为工作绕组接入 6~66kV 系统中性点，二次绕组作为控制绕组由 2 个反向并接的晶闸管短路，晶闸管的导通角由控制器控制。调节晶闸管的导通角为 $0\sim 180^\circ$ ，使晶闸管的等效阻抗在 $\infty\sim 0$ 间变化，则输出的补偿电流就可在零至额定值之间得到连续无级调节。

系统在正常运行时，消弧线圈远离补偿工作点，一旦发生单相接地故障，立即将其调节到补偿工作点；而当接地故障解除时，又立即将其调节到远离补偿工作点。系统正常运行时消弧线圈处于远离与电网电容发生谐振的状态，因此可确保不会发生串联谐振，不需设置阻尼电阻，即随调试消弧线圈。该种消弧线圈的优点是响应速度快，接地残流小，伏安特性在 $0\sim 110\%$ 额定电压范围内保持较好的线性度，输出补偿电流在 $0\sim 100\%$ 额定电流范围内可连续无级调节，但是对晶闸管的工作状态要求较高，若二次回路发生故障，不能实现随调，有可能导致接地残流过大。

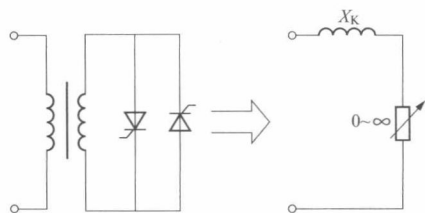


图 1-5 高短路阻抗变压器式消弧线圈工作原理

4. 调气隙式

将电感线圈的铁芯制成带有气隙的型式，利用气隙长度的改变实现励磁阻抗的改变。一般采用步进电机利用转动、传动机构实现气隙的调节；该型产品具有与调匝式一样的缺点，而且其装置更为复杂，较易损坏，调节过程噪声较大，调节速度慢。与调匝式不同的是，其输出的电流可以连续无级调节，但仍然有一个最小补偿电流的限制。

5. 直流偏磁式

对电感线圈的铁芯注入直流磁通，通过改变直流电流的大小改变铁芯的磁饱和程度，从而改变励磁阻抗，直流电流通过晶闸管来进行调节。由于采用晶闸管技术，调节速度大大提高，可以采用随调的控制方式，补偿电流可以连续无级调节，但仍有最小值的限制，且装置比较复杂，谐波要采取特别的措施加以解决。

(二) 消弧线圈补偿方式种类及特点

消弧线圈共有过补、欠补、全补偿3种运行方式，根据规程，消弧线圈一般均运行于过补偿方式下，这主要是考虑到当系统切除线路时，不会运行在谐振状态。

1. 欠补偿

指系统电容电流 I_C 大于线圈电感电流 I_L 的运行方式，即 $I_C - I_L > 0$ 。在欠补偿方式下，显示器的“残流”显示第一位为“+”，表示残流为容性。

2. 过补偿

指系统电容电流 I_C 小于电感电流 I_L 的运行方式，即 $I_C - I_L < 0$ 。过补偿方式下，显示器“残流”显示符号为“-”，即残流为感性。

在满足 $I_C - I_L < 0$ ， $|I_C - I_L| \leq I_d$ ，其中 I_d 为级差电流，即在残流为感性，且残流值不大于级差电流时，消弧线圈不进行调挡操作。当系统对地电容变化，不能满足上述条件时，则消弧线圈自动向上或向下调节分接头，直至重新满足上述条件。在过补偿方式运行时，接地残流值将不大于级差电流 I_d 。

3. 全补偿

指系统的电容电流 I_C 与消弧线圈补偿的电感电流 I_L 相等。由于阻尼电阻的作用，系统可以在此方式下运行，但此时中性点电压偏高，故一般不选择此种方式。

目前，实际运行中对于脱谐度一般不作要求，当发生接地故障时，要求系统经过补偿后的接地残余电流不大于 $3 \sim 5A$ 。

消弧线圈装置的试验

对于中性点不接地的系统，在发生单相接地时，单相接地电流决定于另两相的电容电流。如果系统对地电容不大，则接地电流引起的电弧能自行熄灭。当接地电流较大时，则会产生弧光接地过电压，其结果可能使健全相的绝缘损坏，从而造成两相接地短路；直接由接地电弧引起相间短路，造成停电和设备损坏等事故。

对 3~10kV 不直接连接发电机的系统和 35~66kV 系统，当单相接地故障电容电流超过下列数值又需在接地故障条件下运行时，应采用消弧线圈接地方式，具体要求为：

(1) 3~10kV 钢筋混凝土或金属杆塔的架空线路构成的系统和所有 35~66kV 系统，电容电流超过 10A。

(2) 3~10kV 非钢筋混凝土或非金属杆塔的架空线路构成的系统，电压为：3~6kV 时，电容电流超 30A；电压为 10kV 时：电容电流超过 20A。

(3) 3~10kV 电缆线路构成的系统，电容电流超过 30A。

对 3~20kV 具有发电机的系统，当发电机内部发生单相接地故障不要求瞬时切机时，如单相接地故障电流大于下列允许值时，应采用消弧线圈接地方式，具体要求为：

(1) 6.3kV，容量不大于 50MW 时，单相接地故障电流超过 4A。

(2) 10.5kV，容量为 50~100MW 时，单相接地故障电流超过 3A。

(3) 13.8~15.75kV，容量为 125~200MW 时，单相接地故障电流超过 2A。

(4) 18~20kV，容量不小于 300MW，单相接地故障电流超过 1A。

(5) 13.8~15.75kV 的氢冷发电机，单相接地故障电流超过 2.5A。

第一节 系统中性点电压的测量

一、系统中性点不对称电压测量

系统中性点不对称电压是由于系统三相对地电容不相等产生的，经消弧线圈接地的系统，一般要求不大于系统额定相电压的 15%，否则将影响系统正常运行。当中性点不对称电压较高时，应将部分线路进行换位，以减小系统三相对地电容不平衡的程度。

正常运行的 35kV 及以下系统，其中性点不对称电压一般比较低（几十至几百伏），可用适当量程的电压表直接测量。为了安全起见，一般需先用同一电压等级的电压互感

器接至被测变压器的中性点，并在互感器的低压侧测出电压的大概数值，证明系统没有接地故障，再用适当量程的电压表直接测量中性点的电压。接电压表的引线应用绝缘杆支撑接入被测的中性点上，接触时间应尽可能短，以能正确读数为限，应选内阻高的电压表，一般比被试系统的容抗大 10 倍。在系统对地接有电磁式电压互感器时，也可用静电电压表测量（因这种直接接地的互感器能使感应电荷有泄漏通道，不会造成测量误差）。

为了保证安全，不得在大风、雨雾、雷电天气时测量。万一在测量过程中发生接地故障，为防止事故扩大，可在测量引线中串入一个石英砂填充的复式熔断器。用静电电压表测量时，可在测量引线中串入数兆欧高压电阻或几千皮法的高压电容器。为了防止表计损坏，可并联放电间隙或真空放电管。

必要时可接入示波器观察波形，对发电机中性点电压测量尤为必要。

二、系统中性点位移电压测量

当三相系统中性点接入导纳 Y_0 时，这时的中性点电压称为位移电压。

系统中性点接入消弧线圈后的中性点电压（即位移电压）的测量方法、安全注意事项与不对称电压测量相同，但因位移电压较高，需用电压互感器测量。

系统中性点位移电压 U_{01} 计算式为

$$U_{01} = \frac{U_n \rho}{\sqrt{3(\nu^2 + d^2)}} \quad (2-1)$$

式中： U_n 为系统额定电压，kV； ρ 为补偿系统的不对称度； ν 为补偿系统的脱谐度； d 为补偿系统的阻尼率。

第二节 消弧线圈补偿系统电容电流测量

系统电容电流 I_C 是指系统在没有补偿的情况下，发生单相接地时通过故障点的无功电流。其测量方法很多，这里介绍几种常用的方法。

一、单相金属接地法

单相金属接地又分投入消弧线圈补偿接地和不投入消弧线圈两种。

1. 不投入消弧线圈

试验是在系统单相接地情况下进行的，当系统一相接地时，其余两相对地电压升高为线电压。因此，在测试前应消除绝缘不良问题，以免在电压升高时非接地相对地绝缘击穿，形成两相接地短路事故。为使接地断路器（QF）能可靠切除接地电容电流 I_C ，需将三相触头串联使用，且应有保护。若测量过程中发生两相接地短路，则要求断路器能迅速切断故障，其保护瞬时动作电流应整定为 I_C 的 4~5 倍。

由于这种方法在测量过程中非接地两相电压要升高，一旦发生绝缘击穿，接地断路

器虽能切除短路电流，但由于没有补偿，另一接地点的电弧如不能熄灭，则可能扩大事故。同时由于单相接地产生负序分量，接地电流中将有较大的谐波分量，影响测量结果的准确度，所以一般不采用这种方法。

2. 投入消弧线圈

中性点投入消弧线圈时，利用单相金属接地以测量系统的电容电流，这种测量方法与不投入消弧线圈时相比，有较为安全、准确的优点。但是由于仍采用单相金属接地的方法，仍存在非接地两相电压升高危及设备绝缘，产生负序电流有较大的谐波分量的缺点，所以一般也不采用这种方法。

二、中性点外加电容法

中性点外加电容测量系统的电容电流是在系统无补偿的情况下，在变压器中性点对地接入适当的电容量，测量中性点的对地电压，然后用计算的方法间接得到系统的电容电流。外加电容一般取系统估算的对地电容的 0.5 倍、1 倍和 2 倍。在每个电容下测量一次中性点的对地电压（位移电压），根据系统的不对称电压和测得的各个位移电压来计算系统的电容电流，然后取这些电流的平均值作为该系统的电容电流。中性点外加电容法是现场常用的测量方法，中性点外加电容法测量系统电容电流的原理接线如图 2-1 所示。

右图中，保护电容 C' 的电容量为几千皮法，其额定电压不低于被试系统的相电压；外加电容 C_0 的额定电压不低于 2kV。测量步骤为：

(1) 按实际的试验接线圈接入测量设备及静电电压表。

(2) 合上 S1 和 S2，读取中性点不对称电压 U_0 。

(3) 合上 S3，即投入外加电容 C_0 ，读取此时中性点位移电压 U_{01} ，读完后立即断开 S3。

(4) 按 $C=C_0U_{01}/(U_0-U_{01})$ 计算出系统的相对地电容。

(5) 另接一预选的外加电容 C_0 ，再合上 S3，读取此时中性点的位移电压 U_{01} 。

照此方法，直至测完所有预选的外加电容下的每个位移电压后，立即断开 S3、S2 和 S1。

根据测得的中性点不对称电压 U_0 和在不同外加电容 C_0 下测得的中性点位移电压 U_{01} ，计算出系统的三相对地电容 C ，然后以电容平均值计算系统的电容电流 I_C 。

三、中性点外加电压法

用中性点外加电压法测量系统电容电流，就是将工频电压引入系统中性点作为测量

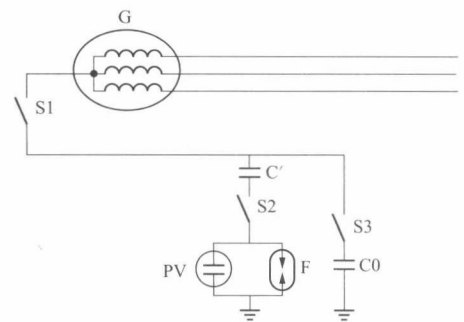


图 2-1 中性点外加电容法测量系统电容电流的原理接线图

S1—中性点开关；S2—静电电压表 PV 的开关；
S3—外加电容 C_0 的开关； C' —保护电容；F—放电管

电源。外加电源的引入，其结果应使系统一相电压降低，另两相电压略有升高，若与此相反，则应改变外加电源的极性。外加电压约为系统正常运行相电压的 1/3，这样两相对地电压的升高不会危及系统绝缘。

外加电压法分投入与不投入消弧线圈两种接线。投入消弧线圈的方法，又分并联（即系统对地电容与消弧线圈并联）加压和串联（即系统对地电容与消弧线圈串联）加压两种。系统除测试外的消弧线圈应退出运行。

1. 投入消弧线圈的外加电压法

投入消弧线圈的中性点外加电压法的原理接线如图 2-2 所示。图 2-2 (a) 中，PV 为测量外加电压 U_0 的电压表；PA1 和 PW1 为测量系统的电容电流 I_C 和有功损耗 P_1 的电流表和功率表；PA2 和 PW2 为测量消弧线圈补偿电流 I_L 和有功损耗 P_2 的电流表和功率表；PA3 和 PW3 为测量残余电流 I'_C 和有功损耗 P_3 的电流表和功率表。PW1、PW2 和 PW3 均为低功率因数功率表。

图 2-2 (b) 中， U'_0 为外加电压； U_0 为加上 U'_0 后的系统中性点电压；PW 为测量有功损耗 P 的低功率因数功率表；PV 为测量 U_0 的电压表；PA 为测量系统电容电流 I_C 的电流表。

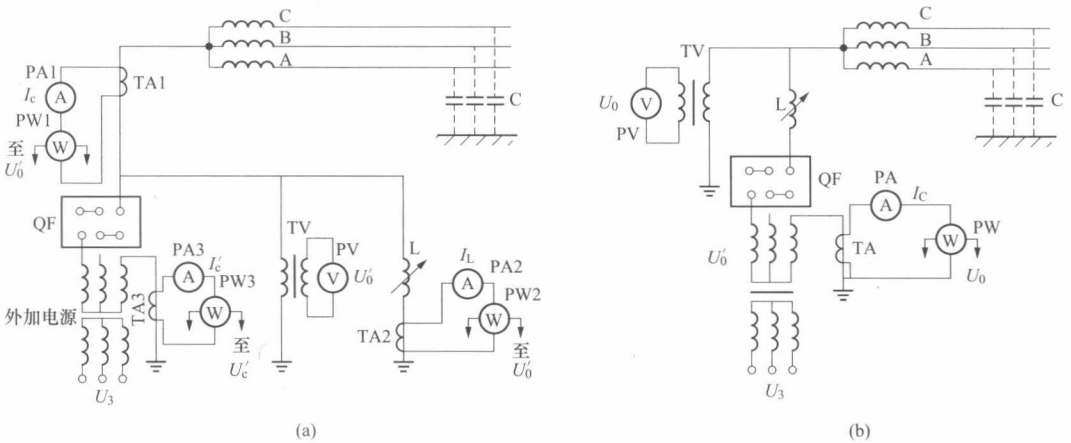


图 2-2 投入消弧线圈的中性点外加电压法的原理接线

(a) 并联加压；(b) 串联加压

2. 不投入消弧线圈的外加电压法

不投入消弧线圈的中性点外加电压试验接线及等值电路图如图 2-3 所示。图中，TV 为测量中性点电压 U'_0 的电压互感器；PV 为测量中性点电压的电压表；PA 为测量电容电流 I_C 的电流表；PW 为测量电容电流 I_C 回路有功损耗 P 的低功率因数功率表；QF 为外加电源断路器；C 为系统三相对地电容。

3. 试验电源的选择

(1) 根据估算或用其他方法实测的系统对地电容电流和所采用的试验接线，计算所需试验电源的容量。