

过电压保护装置在中压配电系统的应用

首先阐述了中压配电系统过电压产生机理和保护要求，同时结合规范在具体工程的使用，探讨了中压配电系统中过电压保护装置的应用和参数选取。

李 曼/上海邮电设计咨询研究院有限公司



李 曼/工程师

近年来随着电网电压等级提高，过电压保护设计的要求亦进一步提高。民用工程配电系统中以中压（1 kV<系统标称电压≤35 kV）为主。民用规范中涉及及相关部分较少，故工程设计中，过电压保护装置选型较粗略，且常根据例行数据，对其依据及理论不甚了解。

针对以上问题，本文首先阐述过电压产生机理和保护要求，就中压配电系统中过电压保护装置的工程应用和参数选取进行探讨，供同行参考。

过电压

1. 产生机理和保护要求

(1) 工频过电压

一般由线路空载、接地故障和甩负荷等引起。3~10 kV系统 $\leq 1.1U_m$ （系统最高工作电压）、35~66 kV系统 $\leq U_m$ 。故无须保护。

(2) 谐振过电压

操作或故障引起系统元件参数出现不利组合而产生，包括线性和非线性（铁磁）谐振过电压。

运行时应避免出现，一旦发生应采取消谐措施（改变系统接线和用阻尼电

阻）。

(3) 操作过电压

开关操作瞬间释放出回路能量产生电磁振荡而引发，且衰减很快。

1) 线路合闸和重合闸。线路过电压 $\leq 2.449U_m$ ；无须保护。

2) 空载线路分闸。开断空载线路过电压 $\leq 3.266U_m$ （开断前已有单相接地故障；低电阻接地系统中 $\leq 2.618U_m$ ）。

3) 操作空载变压器。开断热轧硅钢片铁心变压器 $\leq 3.266U_m$ 。开断冷轧硅钢片变压器 $\leq 1.633U_m$ ，可不保护。

(4) 雷电过电压

雷电放电引起。直击雷保护应采用避雷针或避雷线；雷电侵入波过电压保护采用避雷器。

2. 分类

按幅值、波形及持续时间，分暂时和瞬态过电压。其对比如表1所示。

按能量的来源可分为：

1) 内部过电压。多种原因使电网电磁能量转化或传递所造成的过电压。能量来源于系统本身，包括操作和暂时过电压。

2) 外部（大气）过电压。电力系统设备或建（构）筑物遭受雷击或雷电感应的引起的过电压，受系统外部大气影响。

3. 典型波形

为便于设备绝缘能力的设计和检验，把各种过电压归类于下列几种典型

关键词/Keywords

过电压保护装置 ·
过电压 ·
金属氧化物避雷器 ·

表1 暂时与瞬态过电压对比

名称	特性	持续时间	频率	特性	包括
瞬态过电压	常带阻尼振荡或非振荡	几毫秒或更短	高频	可叠加于暂时过电压上	操作和雷电过电压
暂时过电压	无或弱衰减的振荡	零点几或几秒	工频或某谐波频率		工频和谐振过电压

波形：持续电压（起源正常运行系统）；暂时过电压（起源接地、甩负荷、铁磁和谐振）；缓波前过电压（起源电弧接地、线路合闸等）；快波前过电压（起源架空线和变电站的雷电等）；陡波前过电压（起源GIS内开关操作或故障）；联合过电压（上述任一起源）^[1]。

避雷器的选型

配电系统主要的过电压保护装置是避雷器，常用无间隙金属氧化物避雷器（下简称避雷器，具有理想的非线性伏安特性）。下面就工程选型中常用的选型参数予以讨论。

1. 主要参数

对工程选型中常用的电压参数作比较，如表2所示。其中额定电压与保护水平是矛盾的，选择的原则是：满足保护绝缘配合系数、额定电压可选高一些。

参数值的选取参见GB 11032《交流无间隙金属氧化物避雷器》^[2]。

2. 绝缘配合

根据被保护设备额定雷电和操作冲击耐受电压，按绝缘配合要求，确定避雷器雷电和操作冲击保护水平。

设备额定耐受电压如表3所示^[3]。

(1) 操作冲击

$$U_{\text{res}} \leqslant \frac{1.35U_{\text{gs}}}{K_s} \quad [4]$$

(1)

式中， U_{res} 为避雷器操作保护水平；1.35为内绝缘冲击系数； U_{gs} 为内绝缘1 min工频耐受电压； K_s 为配合系数，取 $\geqslant 1.15$ 。

(2) 雷电冲击

$$U_{\text{res}} \leqslant \frac{\text{BIL}}{K_s} \quad [4]$$

(2)

式中， U_{res} 为避雷器雷电保护水平；BIL为内绝缘

表2 常用电压参数比较

	定义	属性	表征量	数值
额定电压 U_n	暂态过电压（规定动作负载试验中确定）下，能正常的工作。正常时，相间避雷器需承受相电压和暂时过电压	表明运行特性的重要参数	最大允许工频电压有效值	不等于系统标称电压
持续运行电压 U_c	（正常相电压长期作用在避雷器上）允许持久施加的电压值		工频电压有效值	$\geqslant U_m/\sqrt{3}$
残压	放电电流通过时的电压值		最大电压峰值	
雷电保护水平	下两项高者：陡坡电流冲击下最大残压除以1.15；标称放电电流下最大残压		电压峰值	
操作保护水平	规定操作冲击电流下的最大残压		电压峰值	

表3 设备额定耐受电压

系统 标称 电压/kV	设备 最高 电压/kV	设备 类别	雷电冲击耐受电压（峰值）/kV				短时（1 min）工频耐受电压（有效值）/kV			
			相对地	相间	断口		相对地	相间	断口	
					断路器	隔离开关			断路器	隔离开关
6	7.2	变压器	60 (40)	60 (40)	—	—	25 (20)	25 (20)	—	—
		开关	60 (40)	60 (40)	60	70	30 (20)	30 (20)	30	34
10	12	变压器	75 (60)	75 (60)	—	—	35 (28)	35 (28)	—	—
		开关	75 (60)	75 (60)	75 (60)	85 (70)	42 (28)	42 (28)	42 (28)	49 (35)
15	18	变压器	105	105	—	—	45	45	—	—
		开关	105	105	115	—	46	46	56	—
20	24	变压器	125 (95)	125 (95)	—	—	55 (50)	55 (50)	—	—
		开关	125	125	125	145	65	65	65	79
35	40.5	变压器	185/200	185/200	—	—	80/85	80/85	—	—
		开关	185	185	185	215	95	95	95	118

注：1. 分子、分母数据分别对应外绝缘和内绝缘。
2. 括号内和外数据分别对应是和非低电阻接地系统。
3. 开关类设备将设备最高电压称作“额定电压”。

额定雷电冲击耐受电压； K_s 为配合系数，中性点避雷器取 ≥ 1.25 ，避雷器非紧靠保护设备取 ≥ 1.4 。

工程应用

工程设计时，应考虑设备安装点的预期过电压、系统与设备的电气特性、类似系统的运行经验及所有保护装置的限压效果。

1. 系统防护

(1) 原则

保证任何可能的运行方式下，变压器和各设备距避雷器的电气距离应小于最大允许电气距离。

避雷器一般安装在母线上。接线复杂和特殊的变电所，需通过试验或计算机来确定避雷器数量和位置。

(2) 35 kV变电所

1) 进线。全线电缆—变压器组接线视电缆雷电波侵入的可能，经校验确定是否装避雷器。

2) 电缆进线段。架空线和电缆连接处安装避雷器。断路器在雷季可能常断路运行时，电缆末端装避雷器。

3) 架空进线。雷季，变电所进线隔离开关/断路器常断路运行且线路侧带电，线路侧应装避雷器。

4) 敞开式高压配电装置。每组母线上应装避雷器。当母线上避雷器与主变压器及其他被保护设备的电气距离超过表4^[3]时，主变压器附近增设一组避雷器。

表4 35 kV避雷器至主变压器的最大电气距离

(单位：m)

进线长度/km	进线路数			
	1	2	3	≥ 4
1	25	40	50	55
1.5	40	55	65	75
2	50	75	90	105

注：全线有避雷线进线长度取2 km，进线长度在1~2 km间的距离按补插法确定。

(3) 3~10 kV变电所

架空进线和每组母线均装避雷器：架空进线隔离开关的线路侧装一组避雷器；母线上避雷器与主变压器的电气距离不宜大于表5^[5]数值（架空

进线均有电缆段时则不计），超过时应在变压器附近增设一组避雷器。

表5 3~10 kV避雷器至主变压器的最大电气距离

雷季经常运行的进线路数	1	2	3	≥ 4
最大电气距离/m	15	20	25	30

2. 真空断路器

(1) 产生原因

真空断路器具有高速灭弧能力，产生下列过电压。

1) 截流过电压。开断小电感电流时，电流到零前的某一瞬时值时发生强制熄弧即截流。切断回路中的能量经LC充放电反复叠加产生。特点：发生在切断回路；较平缓波头。

2) 电弧重燃过电压。开断时，触头间恢复电压 $U_f >$ 介质绝缘恢复电压发生重燃。电源高频电流过零后多次叠加产生。特点：电流陡度大、幅值高；电压陡度大且随重燃次数增多幅值增大；频率高。

3) 三相同时开断过电压。若A相重燃，高频电流经L或C耦合叠加到B、C相；三相同时过零产生。特点：取决于触头间耐受电压和重燃次数。

(2) 保护措施

电路性质、工作状态不同，操作过电压波形、幅值亦不同。断路器前后两侧会产生过电压，均须采取保护措施。对工程中常用保护装置进行比较，如表6所示。

综上所述：母线上多采用避雷器；中性点经电阻接地系统建议采用阻容保护装置；中性点不接地系统采用避雷器，简单经济且基本满足工程设计要求。优先用带间隙的MOA（间隙串联的保护变压器；间隙并联的保护电动机）。若有条件，采用避雷器和RC保护并用的方案最完善，尤其在电动机相间绝缘要求高的情况下。

3. 变压器

变压器应装设避雷器保护。避雷器尽量靠近变压器装设，其接地线与变压器低压侧中性点（不接地时为中性点击穿保险器的接地端）及金属外壳等连在一起接地。标准规定，变压器高压侧接避雷器，避雷器接地引下线（防雷）、配电

表6 常用保护装置比较

	阻容吸收器	避雷器	过电压保护器	混合保护
组成	RC串联（经验功率≥100 W；R=100~200 Ω、C=0.1~0.3 μF/相）	由数片3~5 kV氧化锌电阻阀片串联组成	采用4个相同单元（火花间隙和氧化锌避雷器串联）组合	双回路并联设计：回路Ⅰ为阻容保护；回路Ⅱ为避雷保护
优点	①减小振荡频率，降低陡度和恢复电压的上升速度；②重燃：降低过电压幅值、增大衰减概率、减少甚至消除；③反应速度快随时吸收过电压；④使用寿命较长；⑤无残压问题	①直接限制过电压幅值；②装置简单；③通流容量大；④使用寿命长；⑤体积小	改善避雷器性能：降低放电电压和残压水平；无劣化和功率损耗；较高耐受暂过电压能力（间隙使其与电网隔离或只承受低电压）、延长间隙寿命。正常时间隙截断工频电压，降低限制电压。ZnO的特性减轻串联间隙的续流冲击与恢复电压	回路保护功能互补，有机结合：回路Ⅰ降低波头陡度、振荡频率，保护电气设备和MOA；解决高频振荡MOA反应慢。回路Ⅱ限制过电压幅值和通泄大能量，保护电气设备和RC元件。间隙既制过电压陡度和多次重燃幅值，避雷器作为后备保护。过电压保护能力明确
缺点	①难以准确选择最佳阻容参数；②吸收过电压能量小，电网谐波使其击穿过热；③无明显过电压限制值；④增加电容电流，易产生弧光接地过电压	①不能限制过电压陡度，对匝间绝缘危害大，易使断路器重燃；②单相接地电弧和谐振过电压时避雷器有爆炸的可能；③不能限制重燃过电压的高频作用	①不能改变振荡频率；②不能改变过电压陡度	①设备较大；②投资较高
适用范围	①开断小电流保护效果较好；②绝缘较弱（运行时间较长、干式绝缘等）的变压器；③开断制动状态电动机（起动截流值大）	目前常用的有效方法，广泛用于母线上电气设备的雷电和操作过电压保护	①国内外专家推荐取代无间隙氧化锌避雷器，尤其对绝缘水平较弱的设备（电动机）；②适用于中性点非有效接地系统	绝缘要求高的设备

变压器外壳（保护）和低压中性点（工作）连接在同一个接地装置（三点共地）。

考虑不接地系统，其中中压断路器均采用真空断路器。

4. 电容补偿装置

电容器组投切会产生复杂的操作过电压。试验表明^[6]：电容器组操作过电压中主要是分闸过电压；且主要是单相重击穿。

采用无间隙（禁止使用带间隙）金属氧化物避雷器进行保护。电容器组极间过电压无成熟保护措施，故工程中采用性能好的断路器，（考虑单相重击穿）只设置对地绝缘保护。故装设中性点对地避雷器；并紧靠电容器组电源侧。根据避雷器的接线方式（相、中性点对地）和电容器组容量、电抗率，选择避雷器参数^[6]。

5. 工程应用

(1) 典型中压配电系统过电压设计示例

某变电站引入2路10 kV双重电源。电源经市区电缆引电后接变压器。现对中压配电系统进行过电压保护设计。下图为系统示意图。中压系统

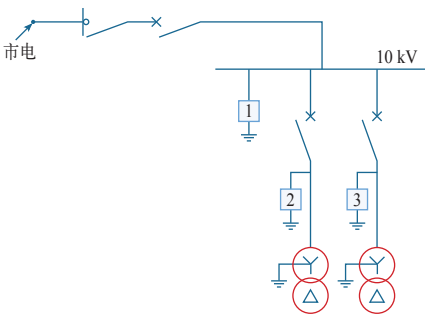


图 系统示意图

(2) 电气设计

1) 位置。应用上述原则：本期在母线、断路器线路侧位置安装过电压保护装置1~3。无功补偿安装在低压侧，本次不涉及。

2) 保护型式。应用上述结论，过电压保护装置1采用无间隙金属氧化物避雷器；过电压保护装置2、3采用过电压保护器。

3) 参数选取。本工程为不接地系统。根据标准^[3,7]：保护装置1的 U_c 取 $1.1U_m$ （13.2 kV）； U_c 取 $1.38U_m$ （16.56 kV）；保护装置2、3的 U_c 可不考虑； U_c 取 $1.1U_m$ （13.2 kV）。标称放电电流是冲击波形8/20 μ s放电电流的峰值。依据文献^[7]的分类要求，标称放电电流均为5 kA。按设备耐受值，据前文式（1）计算操作保护水平；据前文式（2）计算雷电保护水平。陡波冲击电流是波头时间1 μ s、幅值同标称放电电流。在其作用下的残压应与设备的绝缘要求配合^[4]。鉴于电压等级和陡波起源于GIS内开关，本工程可不考虑。方波通流容量表征了避雷器的通流容量，根据标准^[7]的要求，标称放电电流为5 kA的保护装置1持续时间电流冲击（方波冲击电流）的试验要求为150 A。保护装置2、3最少要达到保护装置1的要求。综上所述，保护装置各基本参数如表7所示。

表7 基本参数

序号	参数	1	2、3
1	持续运行电压/kV	≥ 13.2	不考虑
2	额定电压/kV	≥ 17	≥ 13.2
3	标称放电电流/kA	5（峰值）	5（峰值）
4	雷电冲击电流下残压峰值 (5 kA, 8/20 μ s) /kV	≤ 53.5	≤ 53.5
5	陡波冲击电流下残压峰值 (5 kA, 1/3 μ s) /kV	不考虑	不考虑
6	操作冲击电流下残压峰 (250 A, 30/160 μ s) /kV	≤ 49.3	≤ 41.1
7	2 ms方波通流容量/A	≥ 150	≥ 150

结束语

过电压保护装置的应用和选型是民用工程电气设计中的一个重要组成部分。正确进行过电压保护装置的设计，将减小系统中各类过电压对设备的损坏及干扰，最大限度地保证系统的安全运行。

（收稿日期：2015-03-15） EA

（上接第56页）

受到辐射剂量的影响。同时，由于探测器的全封闭性，分析后的空气样本又被重新送回被探测的房间内，保证从高辐射剂量区采集的空气不会外泄。

4. 辐射对火灾探测器可维修性的影响

在核电站正常运行时，高辐射剂量区域是不允许人员进入的，此时如果设置在此区域的火灾探测设备发生故障，将无法维修，造成该区域失去火灾监测能力。由表2的比较可见，极早期空气采样烟雾探测器具有灵活布管，主动采样的特性，其可突破传统点式感烟探测器在安装维护上的局限性，不为设施的高度、广度及环境所限制，安装简便，易于维护。如果探测设备发生故障，也可及时维修，不会造成火灾监测能力的降低或失效。

结束语

从火灾探测的快速性、有效性及可靠性，从安装维护的便利性来说，在高辐射剂量区域选择极早期空气采样烟雾探测器更符合核电站的安全

要求。但由于其造价昂贵，在核电站中并没有得到广泛的使用。在该限制条件下，针对不同的探测区域，更应合理选择满足火灾危害性分析及辐射环境要求的探测手段，优化组网方案，组建最佳的探测系统。这样既提高了监测高辐射剂量区域的可靠性和有效性，实现了对监测核电站高辐射剂量区域所用探测器的可维修性，又可节约工程造价。

参考文献

[1] 郑燕宇，陆明浩．智能型极早期空气采样火灾探测技术探讨[J]．智能建筑与城市信息，2004，92（7）：44-47．
[2] 蔡叶发，李腾龙，周博．抽气式火灾探测系统在核电站中的应用[J]．电力安全技术，2008，10（2）：62-63．
[3] 梁华．建筑弱电工程设计手册[M]．北京：中国建筑工业出版社，1998．
[4] GB 50116—2013 火灾自动报警系统设计规范[S]．北京：中国计划出版社，2013．

（收稿日期：2014-10-15） EA