

并联电容器装置操作过电压分析及保护方法研究

洪健 辛永祥

(中机中联工程有限公司 重庆 400039)

摘要: 为了提高并联电容器装置操作过电压保护效率与质量水平,优化过电压保护效果,本文开展了并联电容器装置操作过电压分析及保护方法研究。首先,对并联电容器装置操作过电压进行了全面分析,获取分闸过电压和合闸过电压的相关特性。在此基础上,通过抑制并联电容器稳态电压升高,计算过电压保护整定值,引入复合开关,并联电容器柜内设置无间隙金属氧化物避雷器等方式,实现过电压保护。试验分析结果表明,本文提出的过电压保护方法应用后,并联电容器装置操作过电压保护的灵敏度得到了显著提升,保护效果显著增强,能够快速实现过电压保护目标,不会造成并联电容器装置操作误动或拒动现象。

关键词: 并联电容器装置;过电压;分析;保护

0 引言

在当前电网容量逐渐增大的背景下,各个行业领域对电能质量的要求不断提高,随之对电容器组装置的操作频率也越来越高^[1]。在并联电容器装置运行过程中,主要利用接触器和断路器来实现投切操作。在投切操作过程中,受到运行环境条件的影响,并联电容器装置操作可能会出现过电压问题。并联电容器装置操作过电压具有持续时间较长的特点。一般情况下,此种过电压持续时间比雷电过电压持续时间还要长,在 $100\mu\text{s} \sim 100\text{ms}$ 之间波动变化。一旦并联电容器装置操作出现过电压问题,会产生严重的危害,主要包括损坏电容补偿设备,降低电容补偿设备的使用性能与使用寿命,破坏电容器对地绝缘,破坏电力系统中其他电气设备的安全稳定运行等等。

现阶段,传统的过电压保护方法多数采用文献[2]和文献[3]提出的方法。辛妍丽等^[2]设计了避雷器+阻容吸收器以及避雷器+铁氧体磁环两种过电压协同防护方案;孙友群等^[3]提出了通过避雷器接线方式抑制并联电容器装置过电压的方案。但是上述方法考虑不全面,采用的过电压保护方法存在灵敏度低和击穿次数高的问题,因此,这些方法的过电压保护效率与质量水平较低。为了改善上述问题,本文开展了并联电容器装置操作过电压分析及保护方法的深入研究,对提高并联电容器装置操作的安全性

与可靠性具有重要意义。

1 并联电容器装置操作过电压分析

为了更好地开展并联电容器装置操作过电压保护方法的研究,本文首先对并联电容器装置操作过电压进行了全面分析,获取相关信息特征。

并联电容器装置操作过电压主要包括两种不同的类型,分别为并联电容器装置分闸过电压与并联电容器装置合闸过电压。接下来,对两种操作过电压进行客观分析。

并联电容器装置操作分闸过电压:此种类型过电压主要是受到分闸重燃的影响而产生的。当电容器装置切除时,相应的开关断开,此时,电容器装置内残存的电荷在短时间内无法得到有效释放,导致电容器装置中残留多余的直流电压。若电力系统开关的电气恢复强度无法有效地承受该直流电压,会引发装置的电磁振荡,进而电容器产生重燃,形成过电压。

并联电容器装置操作合闸过电压:此种类型的过电压主要是由触头的大幅度弹跳引起的。电力系统内未充电的电容器装置在合闸时,其极间过电压的最大值不会超过额定电压峰值的2倍,若电容器装置处于充电状态,充电电压与电力系统电压相同,且极性相反时,电容器合闸过程中产生的极间过电压,可能达到额定电压峰值的3倍及以上^[4]。此时,开关发生弹跳,电弧重复断开、接通,电容器就会

在充电状态下重复合闸，从而产生合闸过电压。

2 并联电容器装置操作过电压保护方法研究

2.1 抑制并联电容器稳态电压升高

在并联电容器装置操作过电压保护中，抑制电容器稳态电压升高对过电压保护至关重要。并联电容器装置在接入电网后，受到运行环境条件的影响，会引起电网电压升高，进而导致并联电容器稳态电压出现不规则变化。首先，根据并联电容器的运行工况，设定电容器的稳态电压升高系数为 k ，此时电容器稳态电压升高值计算公式如下：

$$\Delta U = k \cdot U_z \cdot Q_c / S_d \quad (1)$$

式中： ΔU —电容器稳态电压升高值；

U_z —电容器装置未接入电网时对应的母线电压；

Q_c —电容器装置接入母线后对应的总容量；

S_d —电容器装置操作短路容量。

通过计算得出电容器稳态电压升高值，根据电压升高值结果，在电容器回路内设置谐波。首先，根据电容器回路中产生的谐波类型和频率，确定需要抑制的谐波频率。其次，根据谐波频率和电容器回路的电感参数，计算出谐振电容的数值，以实现对其特定的谐波频率的抑制。然后，根据谐振电容的数值，设计并构建相应的谐振电路。谐振电路通常由电感元件（如线圈）、电容元件和电阻元件组成，其结构和连接方式根据具体需求进行设计。最后，将设计好的谐振电路与电容器回路进行连接。通常，谐振电路会与并联电容器低阻抗线圈相连接，以实现谐波在电容器回路内的循环流动，改善谐波电压，进而通过谐波达到抑制并联电容器稳态电压升高的目的。

2.2 计算过电压保护整定值

上述并联电容器稳态电压升高抑制措施，保证了电容器稳态电压在控制范围内波动变化。接下来，综合考虑并联电容器组的实际运行工况及特征，对并联电容器装置操作过电压保护整定值进行计算^[5]。

首先，设定电容器内部中共有 m 个电容元件，在电容器并联^[6]后，将所有电容元件串联起来，设定电容串段数量为 n 。由于电容器并联后产生的电抗率较小，在计算过电压保护整定值时可以忽略不计。在电容器串段数量相等的情况下，计算过电压保护中性点电流整定值，计算公式如下：

$$I_{1n} = \frac{S_n \times 10^3}{\sqrt{3}U_{1n}} \quad (2)$$

式中： I_{1n} —并联电容器装置一次侧额定电流；

S_n —并联电容器装置额定容量；

U_{1n} —并联电容器装置一次侧额定电压。

通过计算，获取并联电容器装置过电压保护中性点电流整定值，将其作为过电压保护整定值。按照整定值，控制并联电容器装置操作过程中电压、电流与容量的动态变化，为后续研究提供有力的数据支持。

2.3 过电压保护方法

基于上述并联电容器装置操作过电压保护整定值计算，设计过电压保护方法。首先，引入复合开关，复合开关采用晶闸管开关和磁保持开关并联运行保护方法。其在接通和断开的瞬间具有可控硅过零投切的优点，而在正常接通期间又具有磁保持开关零功耗的优点。复合开关结合微电子技术，利用CPU对电压、电流的正弦波进行交流采样，根据过电压保护整定值调整复合开关的投切控制方式。通过设置过电压的触发条件和投切时机，确保当电压超过设定值时，启动复合开关、进行电容器的接入或切除，以稳定电网电压。同时，当需要增加无功功率的时候，在电压过零点投入电容器；当需要减少无功功率的时候，在电流过零点切除电容器，从而减少了涌流。复合开关的过零投切是由电压过零型光耦检测控制的，从微观上看它并不是真正意义上的过零投切，而是在触发电压低于 $16 \sim 40V$ 时导通，因而仍有一点涌流。另外，受可控硅器件耐压性能的限制，复合开关只能用于低压电容器投切，高压电容器投切目前主要还是采用断路器。

然后，在集中补偿装置中，加装串联电抗器^[7]。串联电抗器的电抗值根据过电压保护整定值进行匹配。适当调整串联电抗器的电抗值和容量，可限制电容器组的合闸涌流和短路电流，从而减小过电压的影响，并且抑制高次谐波。

最后，考虑到采用装有并联电阻的断路器、电弧不重燃的真空断路器、用复合开关代替接触器、电容器组加串联电抗器等措施主要是限制操作过电压，不能消除操作过电压，为防止操作过电压对电气设备的损害，并联电容器柜内应设置无间隙金属氧化物避雷器^[8]。利用金属氧化物的非线性伏安特性，使

在正常工作时流过避雷器的电流极小（毫安或微安级）。无间隙金属氧化物避雷器的工作电压范围应与过电压保护整定值相匹配。在并联电容器装置的操作过程中，无间隙金属氧化物避雷器将接收来自过电压的能量，保护电气设备不受损坏。此处采用护套型氧化锌避雷器（以下简称避雷器），工作电压从0.22 ~ 1000kV 均有，其中有专门用于并联电容器保护的避雷器。无间隙金属氧化物避雷器的结构如图1所示。

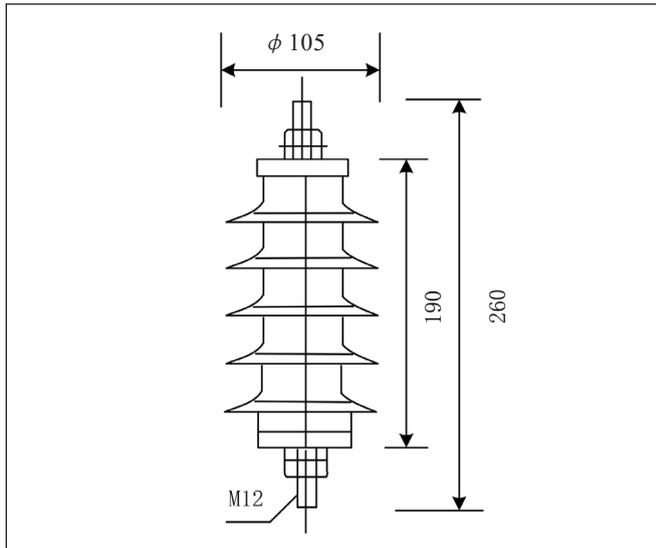


图1 并联电容器装置操作过电压保护的无间隙金属氧化物避雷器结构

通过上述保护方法的设计，实现并联电容器装置操作过电压保护目标。

3 试验分析

3.1 试验准备

本文针对并联电容器装置操作过电压问题，提出了上述一系列过电压保护方法。在提出的过电压保护方法投入实际使用前，开展试验测试，确认所提出的保护方法符合并联电容器装置操作需求后，方可投入实际使用。

将某地区配电网工程中的并联电容器装置作为此次试验的研究对象。并联电容器装置的型号及相关参数，如表1所示。

在此基础上，应用本文提出的操作过电压保护方法，开展试验。根据试验结果，判断本文提出的保护方法是否可行。

3.2 结果分析

为了增强本次试验结果的可信度，使试验测试结

表1 并联电容器装置型号及相关参数

编号	项目	参数
1	型号	BFM11-300-3W
2	额定容量	300kvar
3	额定电压	10kV
4	绝缘水平	42/75kV
5	实测电容	7.90μF
6	额定频率	50Hz

果以更加清晰直观的方式呈现，引入对比分析的方法原理。将本文提出的并联电容器装置操作过电压保护方法设置为实验组，将文献[2]、文献[3]提出的装置操作过电压保护方法分别设置为对照组1与对照组2，对比三种方法的过电压保护结果，进而判断本文提出的保护方法是否具有可行性。

选取并联电容器装置操作过电压保护灵敏度作为此次试验的性能评价指标，其计算公式如下：

$$S_v = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \quad (3)$$

式中： S_v - 并联电容器装置操作过电压保护灵敏度；
 ΔU_a - 并联电容器装置操作输出电压的变化量；
 ΔU_c - 并联电容器装置操作输入电压的变化量。

S_v 越大，说明并联电容器装置操作过电压保护灵敏度越高，过电压保护效果越好。为了避免试验结果存在偶然性，进行多次试验，测定并计算每次试验后并联电容器装置操作过电压保护灵敏度结果，对比结果如图2所示。

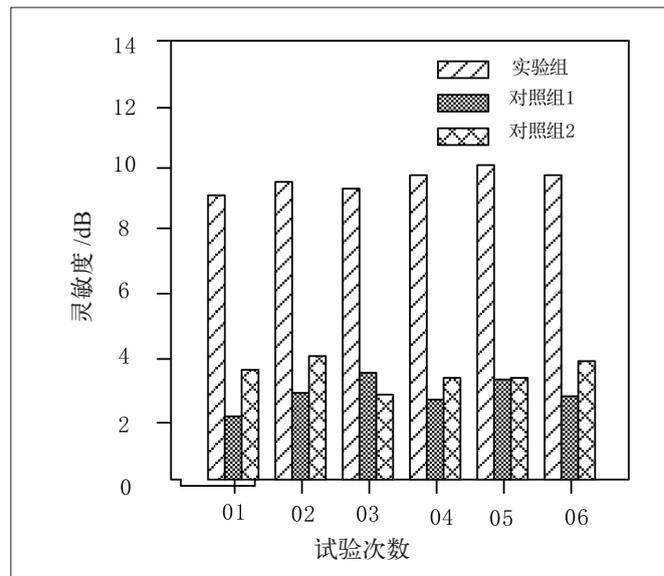


图2 并联电容器装置操作过电压保护灵敏度对比结果

通过图2的性能指标评价结果可知,三种过电压保护方法表现出了不同的性能结果。其中,本文提出的过电压保护方法应用后,并联电容器装置操作过电压保护灵敏度高于对照组1与对照组2,能够快速实现过电压保护目标,不会造成并联电容器装置误动或拒动现象,提高了过电压保护的质量水平,可以大规模投入使用。

为了进一步验证本文提出的保护方法的有效性,分析应用该方法与未应用该方法下的并联电容器装置的击穿次数,试验结果如表2所示。

表2 并联电容器装置击穿次数

保护方法	试验方式	操作方式	试验次数	击穿次数
应用本文方法	单组	CO	100	0
未应用本文方法	单组	CO	100	1
应用本文方法	背靠背	CO	100	0
未应用本文方法	背靠背	CO	100	1

通过单组和背靠背的试验方式,采用CO操作,在试验了100次后,应用本文保护方法的并联电容器装置没有被击穿,而未应用本文保护方法的并联电容器装置发生了1次击穿情况。由此可知,本文提出的保护方法可有效保护并联电容器装置,避免过电压对装置的损伤。

4 结语

为了增强并联电容器装置操作过电压保护效果,提升过电压保护效率与质量水平,本文开展了并联电容器装置操作过电压分析及保护方法研究。首先,以并联电容器装置操作过电压分析结果为基础,根据并联电容器的运行工况,结合电容器的稳态电压升高系数,计算电容器稳态电压升高值;在电容器回路内设置谐波,实现谐波在电容器回路内的循环流动,抑制并联电容器稳态电压升高。在完成稳态电压升高抑制后,计算过电压保护整定值,将其与过电压保护方法相结合,从引入复合开关、在集中补偿装置中加装串联电抗器、并联电容器柜内

设置无间隙金属氧化物避雷器三个方面实现并联电容器装置操作过电压保护。试验性能评价指标对比结果表明,本文提出的过电压保护方法应用后,并联电容器装置操作过电压保护灵敏度得到了显著提升,能够快速实现过电压保护目标,有效地提高了并联电容器装置操作过电压保护的质量水平,对保证并联电容器装置的安全性与可靠性具有重要研究意义。

参考文献:

- [1] 宫艳朝,杨海运,苗俊杰,等. 电力电容器的精准相控投切与过电压抑制[J]. 电气传动,2023,53(8):9-14.
- [2] 辛妍丽,周文婷,余泽远,等. 40.5kV真空断路器分闸并联电抗器重燃过电压及抑制方法[J]. 电力工程技术,2023,42(4):231-240.
- [3] 孙友群,余飞宏,杨代勇,等. 避雷器接线方式对并补电容器组重燃过电压抑制效果分析[J]. 电瓷避雷器,2021,19(4):140-146.
- [4] 李宾宾,罗沙,黄杰,等. 典型因素耦合影响下电容式电压互感器频率特性分析与仿真研究[J]. 电工技术,2023(7):60-63.
- [5] 张利,刘永乾,王哲,等. 变电站10kV高压并联电容器熔断器频繁熔断的分析[J]. 上海电气技术,2023,16(1):77-80.
- [6] 廖斌,梁晨,陈松,等. 一起35kV并联电容器装置故障原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(5):1-6.
- [7] 张亚杰,冉庆凯,赵峰,等. 串联电抗器式高阻抗变压器的冲击特性分析[J]. 变压器,2021,58(4):31-36.
- [8] 朱月亭,范娟. 地铁用无间隙金属氧化物避雷器研制[J]. 电瓷避雷器,2022(4):84-90+98.

作者简介:洪健(1983.01-),男,汉族,安徽安庆人,本科,高级工程师,研究方向:内燃机、工程机械设计;辛永祥(1987.10-),男,汉族,安徽淮北人,本科,高级工程师,研究方向:锂电池工厂工程设计。