

Research on Switching Over-Voltage Protection Device of Parallel Capacitor Based on ZnO Array

Weijun Feng¹, Ming Wang¹, Hui Huang¹, Chuanyong Liu¹, Hong Yuan¹, Jun Liu^{2*}

¹Hami Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Hami Xinjiang

²Anhui Zhengguang Electric Power Technology Co., Ltd., Hefei Anhui

Email: *4860921@qq.com

Received: Jul. 31st, 2020; accepted: Aug. 13th, 2020; published: Aug. 20th, 2020

Abstract

In order to limit the over-voltage produced by switching capacitor bank of vacuum circuit breaker, a design method of shunt capacitor series anti-over-voltage protector based on non-linear high-energy zinc oxide valve plate is proposed to solve the problem of insufficient energy and poor energy uniformity of the zinc oxide valve plate in the current over-voltage protector. Firstly, the over-voltage mechanism of capacitor switching and the key point of suppression are analyzed. At last, the performance of the over-voltage protector is verified by the simulation model and the actual circuit. The research results of this paper can provide new ideas for the design of over-voltage protectors, and have certain engineering applicability.

Keywords

High Energy ZnO, Overvoltage, Series Reactance, Switching

一种基于ZnO阵列的并联电容器投切过电压保护装置的研究

冯卫军¹, 王 明¹, 黄 辉¹, 刘传永¹, 袁 宏¹, 刘 俊^{2*}

¹国网新疆电力有限公司哈密供电公司, 新疆 哈密

²安徽正广电电力技术有限公司, 安徽 合肥

Email: *4860921@qq.com

收稿日期: 2020年7月31日; 录用日期: 2020年8月13日; 发布日期: 2020年8月20日

*通讯作者。

文章引用: 冯卫军, 王明, 黄辉, 刘传永, 袁宏, 刘俊. 一种基于 ZnO 阵列的并联电容器投切过电压保护装置的研究[J]. 智能电网, 2020, 10(4): 180-189. DOI: 10.12677/sg.2020.104020

摘要

矿用供电系统具有线路长、非线性负荷严重的特点，并需要频繁切换无功补偿设备以维持井下系统电压稳定性。为了限制真空断路器投切电容器组产生的过电压，针对目前存在的过电压保护器中的氧化锌阀片能量不足、均能性差的问题，提出了一种基于非线性高能氧化锌阀片的并联电容串抗过电压保护器的设计方法，首先分析了电容器投切过电压机理及抑制的关键所在，其次，提出了氧化锌阀片的高能筛选、均能组合方法和流程，最后，通过仿真模型和实际线路对过电压保护器的性能进行了验证。论文研究成果可为过电压保护器的设计提供新思路，并具有一定的工程适用性。

关键词

高能氧化锌，过电压，串抗，投切

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

并联电容器可以补偿系统无功功率[1]，且具有分布灵活、可靠性高等优点[2] [3] [4]，在我国煤矿供电系统中广泛使用，并大多通过真空断路器进行投入和切除[5]。然而近年来，随着煤矿供电系统的扩容和改造，真空断路器投切电容组时故障频发，为煤矿供电安全运行构成了威胁[6]。

分析表明，真空断路器具有的合闸弹跳和截流等特性是造成并联电容所串接的电抗两端在投切操作时产生过电压的主要原因，解决上述问题的方案有两种，一种是对真空断路器性能加以改善，降低截流概率和幅值；另一种则是采用过电压保护装置[7]，将并联电容器串抗两端的操作过电压加以限制[8]。

工程上常用来限制串抗过电压有避雷器[9] [10]、阻容串联保护器和组合过电压保护器等[11] [12]，其中，采用避雷器对串抗过电压进行限制时，只有当过电压超过避雷器动作值时避雷器才启动，在此之前有可能过电压已经对串抗造成了损坏，阻容式过电压保护器则存在断路器截流较大时限压能力不足的问题，组合式过电压保护器是近年来在工程上应用较多的一种过电压抑制装置，不过却常因 ZnO 阀片容量选取过低而在限压过程中造成热崩溃、击穿；或因阀片均一性差、电位分布不均等原因，运行一段时间后，部分阀片首先劣化老化加快，最终导致过电压保护器发生热崩溃。

有鉴于此，提出了一种基于高能 ZnO 阀片的组合式过电压保护装置的设计方法，重点对 ZnO 阀片的容量与均配性进行改进，并与 RC 阻容抑制和快速断路器配合，将电容器组串/并抗电压快速钳制在安全电压范围内，达到过电压抑制目的。

2. 并联电容器投切过电压保护器

2.1. 并联电容器投切过电压保护器设计

投切电容器组过电压主要是由真空断路器关合过程中存在异常情况造成：如，合闸过程中存在的断口预击穿、合闸弹跳、合闸不同期等情况；或分闸过程中存在单相、两相重燃、截流等情况，均会使电容器或对地杂散电容从电源获得能量，并积累起来，形成过电压。

从能量的角度来讲，过电压是电磁能量在电网的等效电容和等效电感间往复转化、强烈振荡和传播结果，并通过与电容器并联或串联的电抗器电压体现出来，若在电场能量向磁场能量的转化过程中，在电抗器两端并联电磁能量释放回路，对电磁能量进行消耗和吸收，可有效限制电容器组的投切过电压水平。

过电压保护装置在电容器不投切时不能影响电抗器电压，为此过电压保护器不作用时呈高阻特性，当断路器动作时，过电压保护装置必须快速短时吸收高能量。

为了减小投切过电压振荡频率，还配以阻容抑频单元与氧化锌阀片并联，一方面减缓过电压的上升前沿，一方面对过电压峰值起到一定的抑制效果。

考虑到煤矿供电系统的防爆要求，将快速熔断器与上述两部分串联，共同并联到串抗或并抗两端，可以起到防爆快速脱离作用，避免保护器因热崩溃而引发其他事故。

过电压保护器原理结构见图 1。

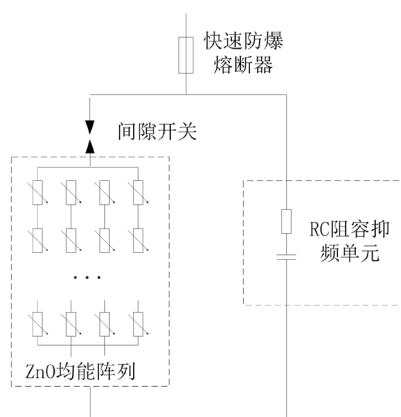


Figure 1. Overvoltage protector with ZnO array

图 1. 具有 ZnO 阵列的过电压保护器

图 1 中，构成 ZnO 阵列的阀片必须具有大容量快速吸能特性，且需经过严格的筛选才能保证每条支路限压与均能效果一致，否则容易产生单个阀片击穿风险。

图 1 中，RC 阻容抑频单元中的电阻值与电容 C 可根据具体的需求确定取值。

2.2. 大容量 ZnO 限压

投切电容器时产生的过电压在瞬时升压，为此需要过电压保护装置在投切时发生过电压初始就启动，间隙开关被击穿使 ZnO 的电阻急剧下降，所流过的电流快速增长以迅速消纳过电压能量，短时间内增长的越大限压效果越好，为了实现这一点，选取具有正温度系数的 ZnO 材料作为限压电阻，能够快速限压，由于是依靠元件的物理特性进行限压，无需外加控制设备，成本较低。

当流过的电流增大、温度升高时，ZnO 电阻值瞬间下降，即从高阻变为低阻，将过电压箝位在一定安全电压范围之内，从而保护所并联的串抗或者并抗；当过电压消失后，ZnO 电阻率迅速增加至极限值，电阻值又恢复到原来的高阻状态。

当在 ZnO 材料中加入镁、铝金属氧化物后，与 SiC 相比具有更大的正温度系数。

SiC、ZnO 和线性电阻的伏安特性曲线如图 2 所示。

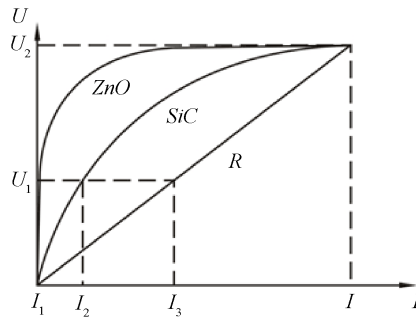


Figure 2. Volt ampere characteristic curve of SiC, ZnO and linear resistance

图 2. SiC、ZnO 和线性电阻伏安特性曲线

图 2 可见，和 SiC 相比，ZnO 电阻伏安特性更为陡峭，具有更大的温度系数，能在流通大电流时电阻迅速减小，具有更大的浪涌吸收能力，符合过电压能量剧增时快速消纳的需求。ZnO 能量密度可达 $400\sim 800\text{ J/cm}^3$ 之间[13]，热容量较大，约为 $2.6\sim 3.1\text{ J/cm}^3\cdot\text{C}$ 之间，而 SiC 能量密度在 $200\sim 500\text{ J/cm}^3$ 之间，热容量仅有 $2\text{ J/cm}^3\cdot\text{C}$ 。

2.3. ZnO 阀片参数选择

假定算每片氧化锌在过电压时吸收的能量：

$$W_{\Sigma T_{ZM}} = \frac{1}{2} U_z \int_0^{T_{ZM}} I_{KM} (-\cos \omega t + 1) dt \quad (1)$$

式中， T_{ZM} 为过电压持续时间， U_z 为氧化性残压， I_{KM} 为每一氧化锌阀片通过的电流，选择每片氧化锌阀片的设计容量为 W_{TM_e} ，则氧化锌可在通过 I_{KM} 时耐受时长 t 为：

$$t = \frac{W_{TM_e}}{W_{\Sigma T_{ZM}}} \times T_{ZM} \quad (2)$$

氧化锌设计容量越大，这样设备投入也越大。为了能够快速吸收过电压能量，可采用 ZnO 多路并联的方法，根据过电压倍数，可确定每条并联支路内串联的阀片数。并联的每一路阀片都要保证有同样的存储能量的能力。

假定过电压时需要泄放的电流为 I ，所需的并联支路数为 I/I_{ZM} ，考虑冗余系数 K_{ry} ，总并联支路数 n 为

$$n = K_{ry} I_{dc} / I_{ZM} \quad (3)$$

这样，每一氧化锌串联支路通过的电流仅为 $I_{KM} = I/n$ ，只需保证 $I_{ZM} > I_{KM}$ 即可。为了使每路电流及能量均匀，可以采用两片以上串联组合，容易达到均流、均能的目的。

2.4. 高能 ZnO 阵列阀片筛选流程

图 1 中，除了使用高能量 ZnO 材料外，还需要将 ZnO 阀片进行均能均压筛选，进行下述阀片选型流程：

第 1 步，筛选高能量 ZnO 阀片，即进行漏电流试验，即检验高能氧化锌组件直流 10 mA 电压 ($U_{10\text{mA}}$) 及 $0.5U_{10\text{mA}}$ 下的漏电流试验时， $U_{10\text{mA}}$ 实测值与制造厂规定值之差不超过规定值的 $\pm 5\%$ ， $0.5U_{10\text{mA}}$ 下单柱高能氧化锌组件漏电流不大于 $100\ \mu\text{A}$ ，并满足 DL/T 294.2 的要求；

第2步,将通过了高能测试的 ZnO 阀片依次施加 1 mA 的参考电压,并在 0~500 A 范围内每隔 50 A 设置一个测试电流点,测试该电流点下的参考电压,并记录;

第3步,根据所有阀片的测试数据,以电流作为横坐标,参考电压为纵坐标建立数学模型;

第4步,根据每一阀片的电压-电流特性曲线,以氧化锌组件流过带有非周期分量的短路电流时,每片氧化锌阀片吸收的能量差最小为约束条件,通过计算机仿真计算找出阀片间串并联的最优组合。

第5步,对阀片组合进行多电流分布检验和短路电流耐受试验,具体如下:

① 氧化锌组件的短路电流耐受试验。

对高能氧化锌组件施加持续 0.2 s 的短路动稳定电流,记录冲击电流下的残压,当残压小于串抗绝缘电阻水平、且阀片没有有任何击穿、闪络、破碎或者明显损坏的痕迹时,则表示通过测试,进行多电流分布试验,否则返回第4步重新匹配阀片组合;

② 氧化锌组件多电流分布试验。

依次挑出高能 ZnO 串联组件中残压值最小的 1 柱和残压值最大的 3 柱并联在一起,再施加一个适当的冲击电流,其值为高能氧化锌组件标称放电电流的 0.01~1.0 倍,持续的时间不小于 7 μ s,观察该冲击电流下测量通过每柱的电流,各柱之间的电流最大不均匀系数不大于 1.1,满足则进行下一步,否则返回第4步重新匹配。

第6步,选型结束,根据实际需要进行阀片组合。

3. 装置验证

搭建过电压保护器验证仿真模型如下。

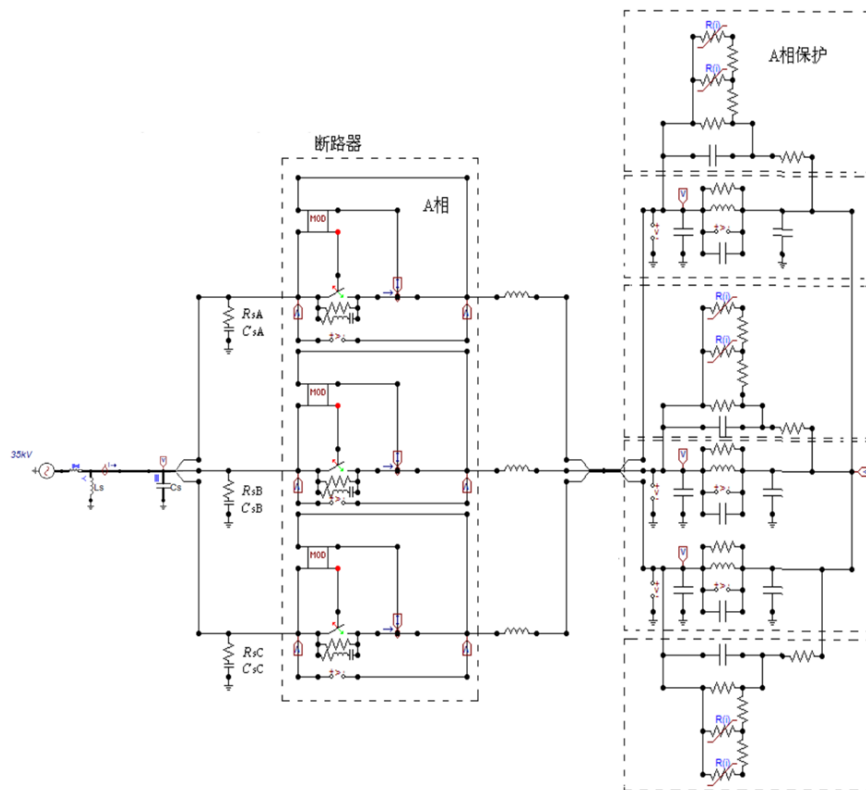


Figure 3. Performance verification simulation model of overvoltage protector

图3. 过电压保护器性能验证仿真模型

图 3 中, 35 kV 线路母线电压为 28.574 kV, 母线侧线路电感为 $LS = 300 \mu\text{H}$, 母线侧等效电容 $CS = 1 \mu\text{F}$, 母线侧阻尼电阻为 10Ω , 电抗器与断路器间引线电感为 $10 \mu\text{H}$ 。过电压保护器的阻容抑频部分中 $R = 200 \Omega$, $C = 0.00625 \mu\text{F}$ 。图 2 中非线性电阻 $R(i)$ 代表高能氧化锌阀片, 伏安特性曲线见图 4。

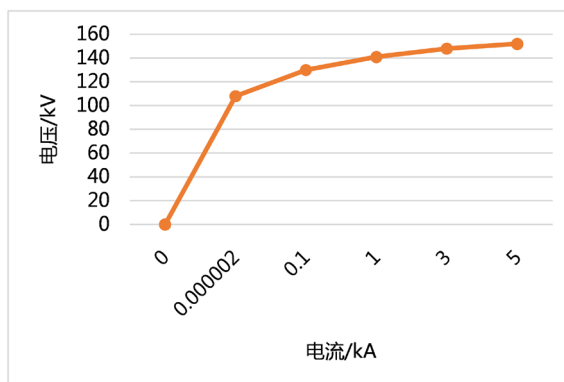


Figure 4. $R(i)$ volt ampere characteristic curve

图 4. $R(i)$ 伏安特性曲线

设置 10 ms 时为电流首次过零点, 20 ms 为第二次过零点, 断路器在 9.95 ms 分闸, 并在 5 ms 后出现复燃, 在 20 ms 时截流, 为了对比 ZnO 过电压保护器的抑制效果, 模拟在截流分别为 1 A、5 A、10 A 和 40 A 时, 电容器串抗在无过电压保护、避雷器过电压保护、RC 过电压保护和带 ZnO 过电压保护 4 种情况过电压峰值情况见图 3, 图中组合式过电压保护即为带有 ZnO、RC 和高速熔断器的的过电压保护。图 5 为对应情况下对并联电抗过电压抑制效果。

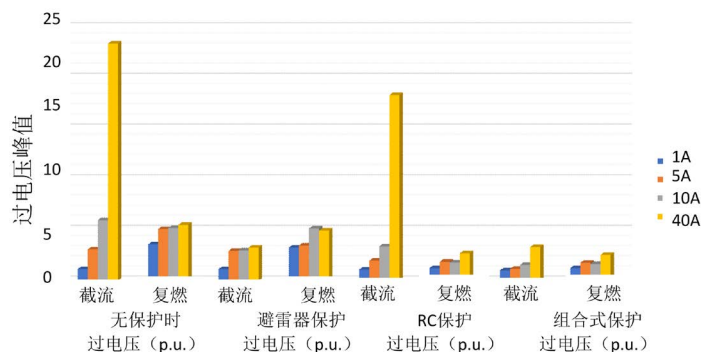


Figure 5. Series reactance overvoltage protection effect

图 5. 串联电抗过电压保护效果

图 5 可见, 投切电容器组时, 各过电压保护装置对串抗过电压抑制都有一定的效果, 但随着断路器截流增大, 限压效果存在明显差异: 断路器截流较大时, RC 保护对截流过电压抑制效果不明显, 避雷器和组合式过电压保护能够有效降低断路器截流时过电压, 但当断路器存在复燃时, 组合式和 RC 过电压抑制效果明显好于避雷器。

图 6 可见, 投切电容器组时, 各过电压保护装置对并抗过电压抑制效果差异明显: RC 和组合式对截流和复燃的抑制效果明显强于避雷器, 且过电压水平均能抑制在 1p.u 以下, 值得指出的是, 采用 RC 保护和具有氧化锌阵列的过电压保护装置存在的区别是, RC 保护过电压抑制所需时间在降到同一电压水平时, 要比具有氧化锌阵列的过电压保护装置花费时间长, 主要原因在于均能氧化锌阵列能够同时导通,

快速泄放过电压所产生的能量，从而将过电压水平降低到期望水平。

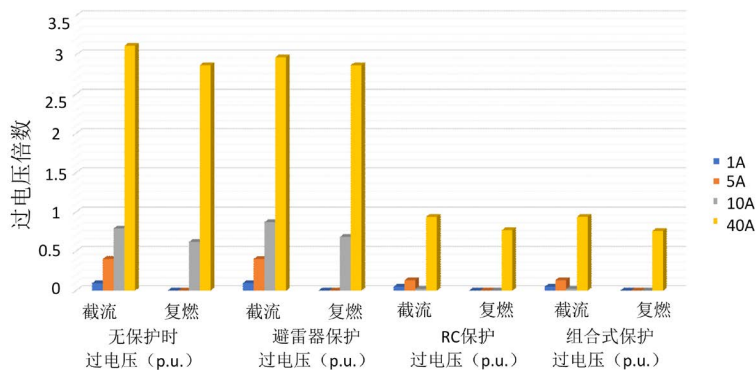


Figure 6. Effect of shunt reactance over-voltage protection
图 6. 并联电抗过电压保护效果

综合图 5 和图 6 可见，组合式过电压保护在断路器截流水平较高时，对并抗和串抗的截流过电压和复燃过电压抑制效果综合较好，并满足 GB311.1《高压输变电设备的绝缘配合》及 DL/T840《高压并联电容器技术条件》的要求。

4. 装置应用

图 7 所示为某 35 kV 供电系统实际系统，图中，过电压保护器中的高能 ZnO 阀片的伏安特性曲线见图 8。

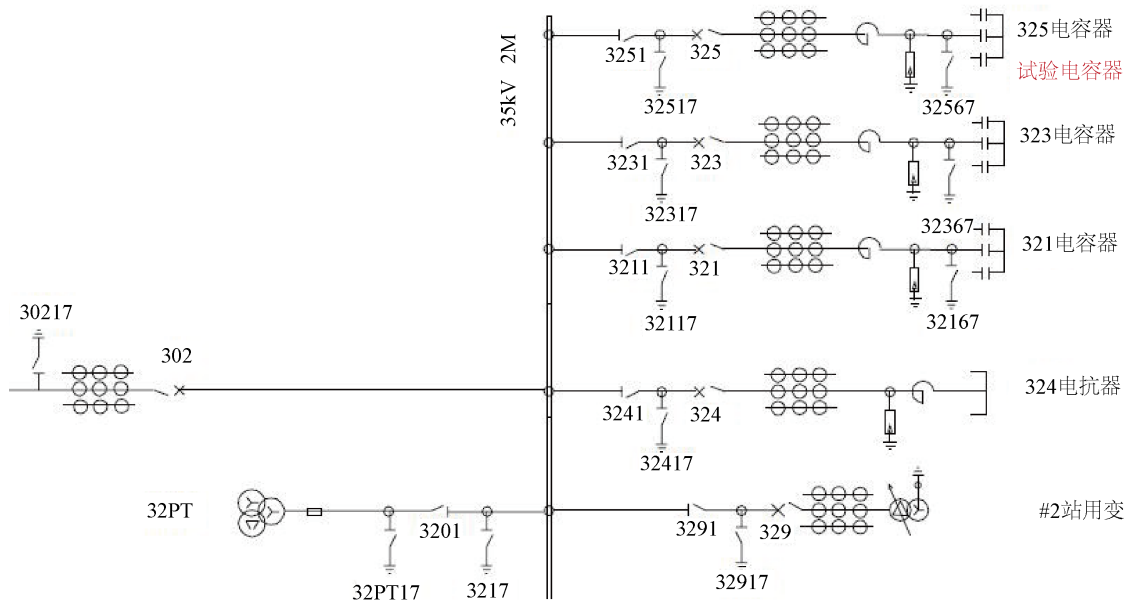


Figure 7. Schematic diagram of site test location
图 7. 现场试验位置示意图

对图 7 所示的 325 断路器进行 20 次合、分操作，通过计算串联电抗器两端电压差，测出投切过程中电抗器两端过电压倍数。

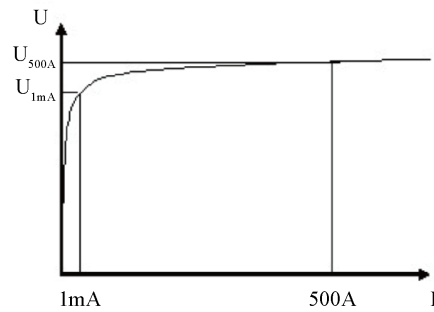


Figure 8. Volt-Ampere characteristic curve of high energy ZnO

图 8. 高能 ZnO 伏安特性曲线

过电压保护器中的 ZnO 阵列取 4 柱并联式，阀片绝缘电阻为 $1.5 \text{ M}\Omega$ ，每片平均电压 $U_{10\text{mA}} = 540 \text{ V}$ 。未安装过电压抑制装置的电容器组串联电抗器两端合闸过电压及分闸过电压统计结果见下图：

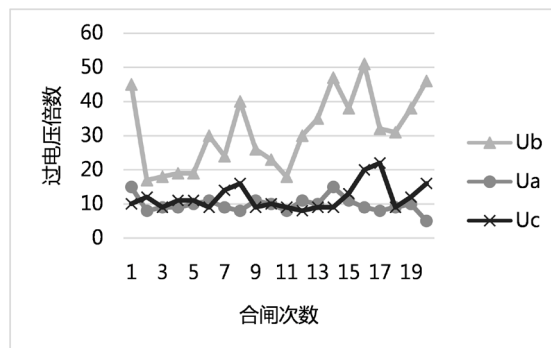


Figure 9. Statistics of capacitor series anti closing overvoltage (not inhibited)

图 9. 电容器串抗合闸过电压统计(未抑制)

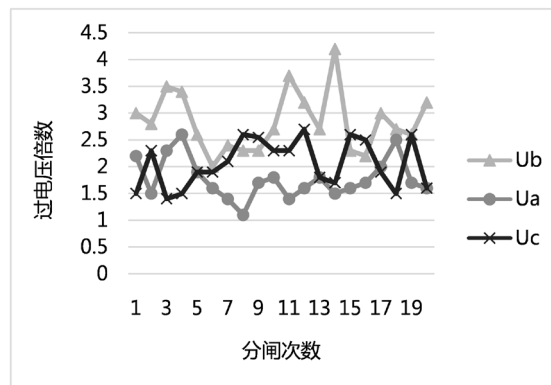


Figure 10. Capacitor series anti opening overvoltage (not inhibited)

图 10. 电容器串抗分闸过电压(未抑制)

图 9、图 10 可见，未安装电抗器过电压抑制装置的电抗器两端过电压非常严重，合闸时过电压倍数最高可达 52 倍，安装过电压抑制装置的电容器组串联电抗器两端合闸过电压及分闸过电压统计结果见下图：

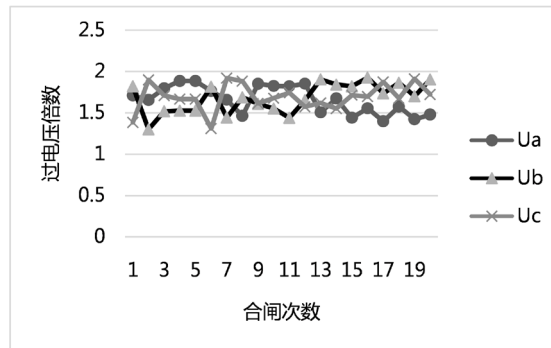


Figure 11. Capacitor series anti closing overvoltage suppression effect

图 11. 电容器串抗合闸过电压抑制效果

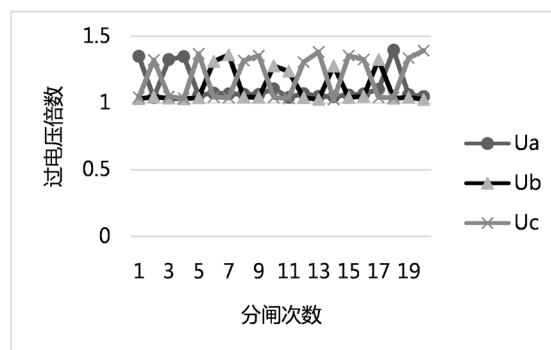


Figure 12. Capacitor series anti opening overvoltage suppression effect

图 12. 电容器串抗分闸过电压抑制效果

图 11、图 12 可见，经过 20 次投切试验，与电抗器并联安装的过电压保护装置能够将过电压倍数下降到合闸时不高于 2，分闸时不高于 1.4，有效的减少了过电压对电抗器、电容器组及投切开关的冲击，达到了保护的目的。

5. 结语

提出了一种基于非线性高能 ZnO 阀片的过电压保护装置的设计方法，其中对 ZnO 阀片进行能量选择、均能配置是关键，作为过电压保护器的限幅单元可以与其他组件配合抑制过电压，经过仿真模型进行抑制效果模拟，表明了论文装置截流为 40 A 时，可将过电压水平抑制在 1.6 倍以内，而避雷器在 40 A 左右截流时，仅能将过电压水平抑制在 3 倍以内，虽然 RC 阻容保护装置在已知电压峰值方面也能具有同样的效果但所需要的时间较长。主要原因在于采用了均能大容量氧化锌可以在短时期内将过电压所产生的能量快速泄放到大地上，从而达到电压抑制的目的。

参考文献

- [1] 张彦昌, 刘刚, 石巍, 等. 大型光伏电站无功补偿装置经济运行研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3): 41-46.
- [2] 林峰, 梁一桥, 吕佳铭, 等. 10kV 配电线路串、并联混合电容器补偿技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3): 10-15.
- [3] Sarkar, P., Baral, A., Das, K., *et al.* (2016) An Ant Colony System Based Control of Shunt Capacitor Banks for Bulk

Electricity Consumers. *Applied Soft Computing*, **43**, 520-534. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.02.032>

- [4] Karbalaye Zadeh, M., Abniki, H. and Shayegani Akma, A.A. (2009) Mitigation of Current Restrict of MV Circuit Breakers in Shunt Capacitor by Metal Oxide Arrester. 2009 *2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS)*, Shenzhen, 19-20 December 2009.
- [5] Das, J.C. (2015) Application of Shunt Capacitor Banks. In: *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 453-502. <https://doi.org/10.1002/9781118887059>
- [6] 宋继孚, 李瑞江. 操作过电压引起低压厂变烧坏的事故解析[J]. 电气应用, 2007(4): 170-176.
- [7] 矫立新, 郭洁, 列剑平, 等. 500kV 串联补偿装置 MOV 运行工况及暂态负荷应力分布研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(3): 71-76.
- [8] 李山, 何丹东, 陈文涛, 等. 高压并联电容器装置过电压研究及应用 EMTPE 软件仿真验证[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(5): 51-55.
- [9] 赵冬一, 汤霖, 胡淑慧, 等. 串联补偿装置用 MOV 工况分析及其关键技术的研究[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 111-117, 123.
- [10] 赵峰, 杜斌, 刘青, 等. 35kV 并联无功补偿装置的 MOA 保护方案研究[J]. 电瓷避雷器, 2004(4): 32-35.
- [11] 司马文霞, 姜雄伟, 彭庆军, 等. 35kV 并联补偿电容器组继电保护动作时过电压的分析及防护[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 1-8.
- [12] 李琼林, 刘书铭, 秦艳萍, 等. 谐波条件下电力电容器的一种过电压保护方案[J]. 电气应用, 2013(21): 47-53.
- [13] 刘建科, 张瑞婷, 宋帆, 等. MgO 掺杂对氧化锌线性陶瓷电阻的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(7): 957-963.