

优化矿用供电系统过电压防护的高能 ZnO 阀片研究与设计

韩晓明

上海晗普新材料科技有限公司

DOI:10.12238/ems.v6i9.8961

[摘要] 矿用供电系统特性鲜明, 体现在其延伸的输电线路与错综复杂的非线性负载之上, 频繁调节无功补偿成为维持电压稳定性的关键措施。针对真空断路器在接入或断开电容器时易诱发的过电压挑战, 鉴于当前保护设备中 ZnO 阀片存在的能量储备不足及性能差异性问题, 本研究独创性地设计出一种融合非线性高能 ZnO 阀片的并联电容与串联电抗组合型过电压防护策略。本项工作首先深度剖析了电容器操作过电压的生成机理及其有效抑制的核心要素, 随后, 精心制定了高能 ZnO 阀片的优选与均衡配置策略, 同时, 详尽阐述了该策略的实施流程。为进一步验证此保护方案的效能, 研究结合了仿真模拟技术与现场线路实测数据, 实现了全方位的性能评估。此研究成果不仅拓宽了过电压保护设计策略的创新路径, 更预示着在工程实践中具有广阔的应用潜力和显著的实用价值。

[关键词] 高能氧化锌; 过电压; 串抗; 投切

Research and Design of High Energy ZnO Valve Plate for Optimizing Overvoltage Protection of Mining Power Supply System

Han Xiaoming

Shanghai Hanpu New Material Technology Co., Ltd

[Abstract] The mining power supply system has distinct characteristics, reflected in its extended transmission lines and complex nonlinear loads. Frequent adjustment of reactive power compensation has become a key measure to maintain voltage stability. In response to the overvoltage challenge that vacuum circuit breakers are prone to induce when connecting or disconnecting capacitors, and given the insufficient energy reserve and performance differences of ZnO valve plates in current protection equipment, this study innovatively designs a parallel capacitor and series reactance combination overvoltage protection strategy that integrates nonlinear high-energy ZnO valve plates. This work first deeply analyzed the generation mechanism of capacitor operation overvoltage and the core elements of effective suppression. Subsequently, a carefully formulated optimal and balanced configuration strategy for high-energy ZnO valve plates was developed, and the implementation process of this strategy was elaborated in detail. To further verify the effectiveness of this protection scheme, a comprehensive performance evaluation was achieved by combining simulation technology with on-site line measurement data. This research achievement not only broadens the innovative path of overvoltage protection design strategies, but also indicates broad application potential and significant practical value in engineering practice.

[Keywords] high-energy zinc oxide; Overvoltage; String impedance; Throwing and cutting

1. 前言

并联电容器以其无功功率补偿、灵活分布及高可靠性的显著优势, 在我国煤矿供电系统中占据重要地位, 常规操作依赖于真空断路器进行投切[1]。然而, 伴随煤矿供电系统的扩展与升级, 真空断路器在电容组投切过程中的故障频发, 对供电安全构成了严峻挑战[2]。

深入探究发现, 真空断路器的合闸不稳定性及截流现象是诱发并联电容与串联电抗两端过电压的关键因素。针对此, 应对策略聚焦于两大方向: 一是优化断路器性能, 减少截流现象[3]; 二是引入先进的过电压防护装置[4], 以直接控制操作过电压水平[5]。

在工程领域, 已有多种过电压限制技术应用于实践, 如避雷器、阻容保护器及组合式过电压保护器等[6]。然而, 避

雷器存在响应滞后问题, 可能无法及时遏制初期过电压; 阻容保护器则在极端截流条件下限压能力受限[7]; 而组合式保护器虽广受欢迎, 但 ZnO 阀片容量不足及性能不均的问题, 易导致热失效或击穿, 加速设备老化[8]。

鉴于此, 本研究提出了一种创新的高能 ZnO 阀片组合式过电压保护方案, 核心在于增强 ZnO 阀片的容量与均匀性设计。结合 RC 阻容装置与快速断路器, 该方案能够迅速且稳定地将电容器组串/并联电抗电压锁定在安全阈值内, 实现过电压的有效抑制, 为煤矿供电系统的安全运行提供坚实保障^[9]。

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

电容器组投切过程中产生的过电压主要源于真空断路器操作异常, 如预击穿、弹跳、非同步合闸及分闸重燃等。这

些异常会促使电容器和杂散电容积聚能量, 导致过电压的出现。为有效控制过电压, 设计了一种电磁能量释放回路, 并并联于电抗器两端, 能够即时耗散和吸收异常产生的能量, 从而限制过电压的形成。保护装置在正常情况下呈高阻抗特性, 不干扰电抗器电压; 而在断路器动作时, 装置迅速响应吸收能量。装置内还集成了阻容抑频模块与氧化锌阀片并联, 既延缓过电压上升速率, 又削减其峰值。

针对煤矿供电环境的防爆需求, 特别设计了快速熔断器, 串联于电路中, 确保在极端情况下及时切断电路, 防止设备过热引发的次生灾害。图1直观呈现了该过电压保护装置的构造原理与布局。

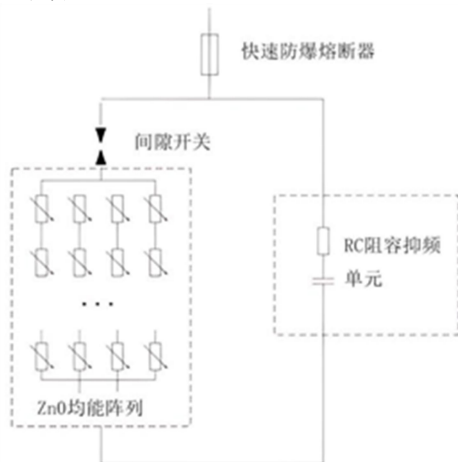


图1 具有 ZnO 阵列的过电压保护器

2.2. 大容量 ZnO 限压

投切电容器产生的瞬时过电压要求保护装置能够立即响应, 通过间隙开关击穿, 使 ZnO 电阻迅速降低, 电流急剧增大, 从而迅速消耗过电压能量, 其增长速率直接影响限压效果。为实现高效限压, 采用了正温度系数的 ZnO 材料, 利用其自然限压的物理特性, 无需额外控制, 降低了成本。ZnO 电阻在电流增加和温度上升时会瞬间从高阻态转为低阻态, 有效将过电压控制在安全范围内, 保护串抗或并抗设备。过电压消失后, ZnO 电阻率迅速恢复至高阻态。此外, 通过在 ZnO 中掺入镁、铝等金属氧化物, 相比 SiC 材料, ZnO 表现出更强的正温度系数特性, 进一步提升了限压性能。图2直观展示了 SiC、ZnO 和线性电阻的伏安特性对比。

图2明确展示了 ZnO 电阻相较于 SiC 的独特优势: 其伏安特性曲线更为陡峭, 且温度系数显著, 这一特性使得 ZnO 在遭遇大电流时, 电阻能迅速下降, 从而展现出卓越的浪涌电流吸收能力, 对过电压能量的消散速度更快。在能量密度与热容量方面, ZnO 同样表现出色, 其能量密度可高达 400, 800 J/cm³, 热容量介于 2.6 至 3.1 J/cm³·°C 之间, 远超过 SiC 的 200~500 J/cm³ 能量密度与 2 J/cm³·°C 的热容量, 彰显了 ZnO 在处理高能量负荷与热管理方面的显著优势。

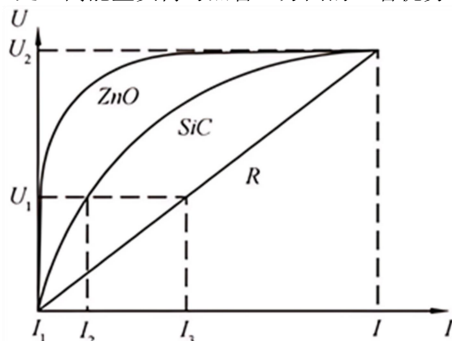


图2 SiC、ZnO 和线性电阻伏安特性曲线

2.3. 高能 ZnO 阵列阀片筛选流程

在图1所示的设计方案中, 核心亮点之一在于对高能 ZnO 材料的严格筛选与均衡化处理, 具体执行流程精细且严谨:

实施高能 ZnO 阀片的初步筛选, 利用漏电流检测机制, 确保在指定直流电压 (U10mA) 及其半压条件下, 各阀片的漏电流严格控制在制造商规定的标准偏差±5%范围内, 同时单柱组件在 0.5 倍 U10mA 电压下的漏电流不超过 100 μA, 全面符合 DL/T 294.2 标准。

随后, 进入参考电压测试阶段, 对初筛合格的 ZnO 阀片, 在 1mA 参考电压基准下, 于 0 至 500A 电流区间内, 以 50A 为间隔设立测试点, 详尽记录各点参考电压数据, 为后续分析奠定坚实基础。

3. 装置验证

搭建过电压保护器验证仿真模型如下。

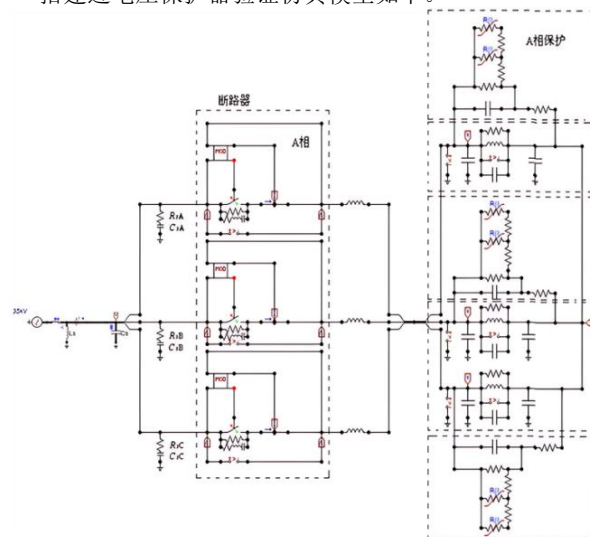


图3 过电压保护器性能验证仿真模型

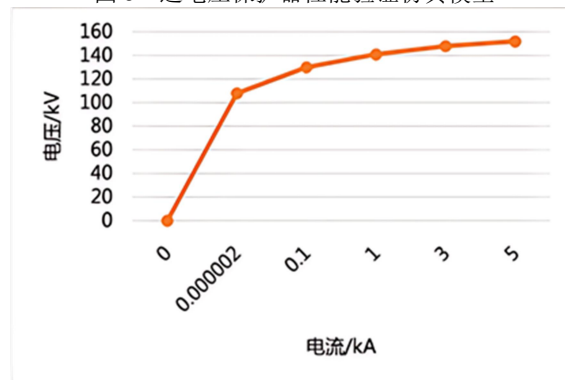


图4 R(i) 伏安特性曲线

图3描绘的电路中, 35kV 线路母线电压维持在 28.574kV, 母线侧配置有 300mH 的线路电感与 1mF 的等效电容, 并串联了一个 10Ω 的阻尼电阻。电抗器至断路器间, 连接线路还额外引入了 10mH 的电感。为有效抑制过电压现象, 该电路特别配备了集成阻容抑频元件的保护装置, 其内嵌电阻为 200Ω, 电容精细设定为 0.00625 μF。此外, 图2中引入的非线性电阻 R(i), 实为高能氧化锌阀片的表征, 其独特的伏安关系曲线详见图4, 进一步强化了过电压防护的效能。

实验中, 设定了电流过零的关键时间点: 首次为 10ms, 随后 20ms 再次过零。特别地, 断路器在 9.95ms 时执行分闸操作, 随后 5ms 内发生复燃现象, 至 20ms 时则出现截流。为全面评估 ZnO 过电压保护器的效能, 我们模拟了截流值从 1A 递增至 40A 的多种场景, 并对比了无保护、避雷器保护、RC 保护及 ZnO 保护四种配置下, 电容器串联电抗所承受的过电

压峰值。图3直观呈现了这些条件下的过电压峰值对比,其中组合式保护器集成了ZnO、RC电路与高速熔断器,展现出综合防护优势。此外,图5进一步揭示了上述条件下并联电抗过电压的抑制成效。

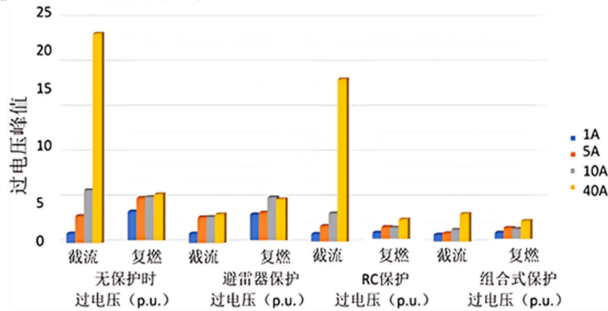


图5 串联电抗过电压保护效果

由图5可见,电容器组投切过程中,各类过电压防护装置对串联电抗过电压均展现了一定抑制能力。然而,随着断路器截流水平的提升,其限压效能开始分化:高截流情境下,RC保护对截流过电压的抑制效果相对减弱,而避雷器与组合式保护则能有效降低此类过电压。特别地,在断路器复燃情况下,组合式与RC保护的表现明显优于避雷器。

图6进一步揭示了各装置在并联电抗过电压抑制上的性能差异:对于截流与复燃情形,RC保护与组合式保护均显著优于避雷器,且成功将过电压控制在1p.u.以下。值得注意的是,尽管目标相同,RC保护与配备氧化锌阵列的装置在降压速度上存在差异,后者凭借氧化锌阵列的并行导通特性,能够更迅速地释放过电压能量,从而更快达成降压目标。

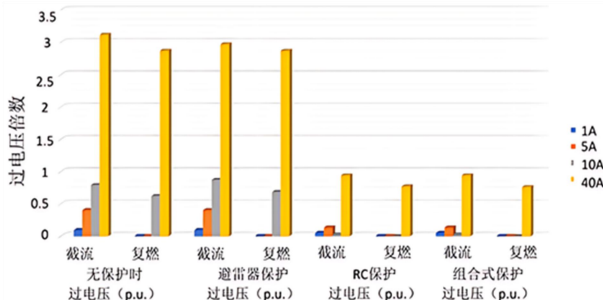


图6 并联电抗过电压保护效果

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35kV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。

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。

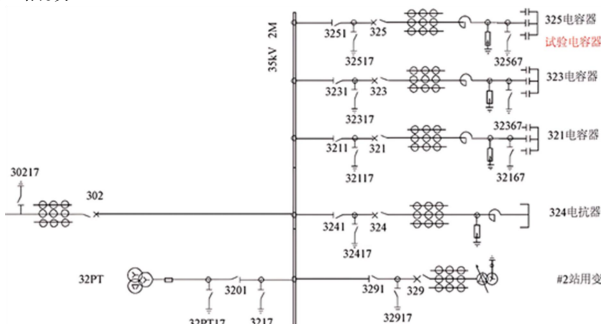


图7 现场试验位置示意图

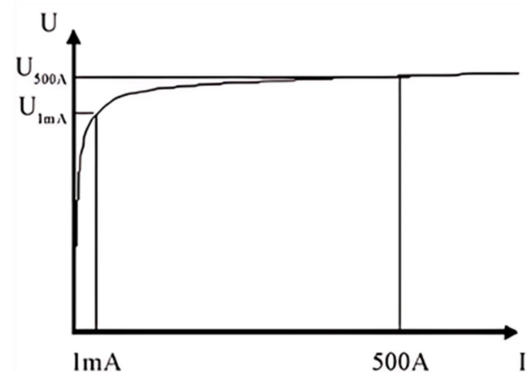


图8 高能ZnO伏安特性曲线

5. 结语

本文创新性地设计了一种过电压防护装置,其核心在于非线性高能ZnO阀片的精选与均衡布局策略。此阀片作为核心限幅组件,与其他元件紧密协作,显著提升了过电压抑制能力。

通过构建精细的仿真环境,对该装置进行了全面验证。在断路器截流高达40A的极端条件下,该装置依然表现出色,成功将过电压水平控制在额定电压的1.6倍以下,相比之下,传统避雷器在相同情境下的过电压控制仅能达到额定电压的3倍左右。值得注意的是,尽管RC阻容保护在峰值电压控制上也能达到相近效果,但其响应速度明显滞后,耗时较长。

这一卓越性能得益于设计中采用的高效能、大容量ZnO阀片,它能迅速将过电压能量导向地面,实现高效释放,从而有效遏制过电压的上升。此设计不仅强化了过电压防护效能,更为电力系统的安全稳定运行开辟了新的技术路径。

【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]Karbalye 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.