一种容性设备快速放电棒设计

蔡伟杰　方文田　杨协伟
（广东电网有限责任公司揭阳供电局，广东 揭阳　522000）

摘要　放电棒对变电站检修试验人员的安全至关重要，但传统放电棒存在放电时间长、工作效率低的问题。为实现设备残压的快速释放，同时避免放电电流过大损坏设备，本文设计了一种快速放电棒。在传统放电棒 RC 放电电路的基础上，增加电感元件构成 RLC 放电回路与 RL 放电回路，并通过金属-氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）控制 RLC 回路与 RL 回路的通断，从而实现设备快速放电，提高作业人员的工作效率。

关键词：放电棒；快速放电；RLC 放电电路；电容器

Design of a rapid discharge rod for capacitive devices

CAI Weijie　FANG Wentian　YANG Xiewei
(Jieyang Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd, Jieyang, Guangdong　522000)

Abstract　The discharge rod is crucial for the safety of working personnel in substations. However, traditional discharge rods have long discharge times and low work efficiency. A rapid discharge rod is designed to achieve rapid discharge of residual voltage in equipment while avoiding damage to the equipment caused by excessive discharge current. On the basis of the traditional RC discharge circuit, inductive elements are added to form RLC and RL discharge circuits. By selecting RLC circuit or RL circuit through metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET), rapid discharge of equipments can be achieved, thereby improving the work efficiency of operators.

Keywords：discharge rod; rapid discharge; RLC discharge circuit; capacitor

0　引言

变电站一次设备包括许多容性设备，由于电容能够储存能量，容性设备在停电或故障时仍有残余电荷[1]，在工作中威胁作业人员的安全[2]。在进行容性设备检修试验工作时，首先操作设备处于检修状态，然后进入现场对容性设备放电后才能在设备上工作[3]，从而保障作业人员的人身安全[4-5]。

容性设备如无功补偿电容器组，在按要求作业前需要逐个多次放电[6]，由于现有放电棒大多为固定电阻型放电棒，电阻一般为几十兆欧，在先经高阻放电再直接接地放电模式下的放电时间较长。电容放电装置[7-9]放电效率高且操作简单便捷，但体积较大，不适用于现场作业。因此，本文设计一种容性设备快速放电棒，沿用原有棒状结构，方便携带，同时具有快速放电的优点，大大提高作业效率[10]。

1　固定电阻型放电棒

传统放电棒一般为固定电阻型放电棒[11]，其高阻放电过程为 RC 放电电路模型，等效电路如图 1 所示。

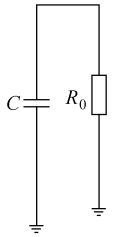

图 1　固定电阻型放电棒等效电路

图 1 中，C 为容性设备电容，R_0 为放电棒的固定电阻。放电过程根据基尔霍夫电压定律得

$$U_c + R_0 C \frac{dU_c}{dt} = 0 \tag{1}$$

广东电网有限责任公司揭阳供电局职工创新项目（GDZC202407310004）

式中，U_c 为容性设备电容电压。

放电开始前，容性设备电容存在电压 U_0，根据换路定理，由式（1）解一阶微分方程得

$$U_c(t)=U_0 e^{-\frac{t}{R_0C}} \tag{2}$$

放电过程的放电电流为

$$i(t)=\frac{U_0}{R_0}e^{-\frac{t}{R_0C}} \tag{3}$$

由式（3）可知，放电开始时放电电流最大，为防止放电电流过大对设备造成冲击而损坏设备[12]，电阻 R_0 的值设计得较大，而放电时间与时间常数 R_0C 有关，其中 C 为设备固有参数，所以当放电电阻 R_0 越大时放电时间越长[13]。

为使容性设备放电至安全电压 U_r，由式（2）可得需要的放电时间为

$$t=-R_0C\ln\frac{U_r}{U_0} \tag{4}$$

假设某设备残压 U_0=10kV，设备最大电流为 1A，设备等效电容 C=0.01F，则为了不损坏设备，放电电阻 R_0 应大于 10kΩ。假设取临界值 R_0=10kΩ，安全电压 U_r 设为 36V，则根据式（4）计算可知，由此放电电阻构成的 RC 放电回路需经过约 562s 才可以把残压降至 36V，放电时间较长，极大影响了工作效率。

2　快速放电棒

为实现设备残压的快速释放，同时避免放电电流过大损坏设备[14]，设计快速放电棒等效电路如图 2 所示，在传统 RC 放电电路的基础上增加电感元件构成 RLC 放电回路与 RL 放电回路[15-16]，并通过金属-氧化物半导体场效应晶体管（metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET）控制 RLC 回路与 RL 回路的通断[17]，实现设备残压的迅速释放。

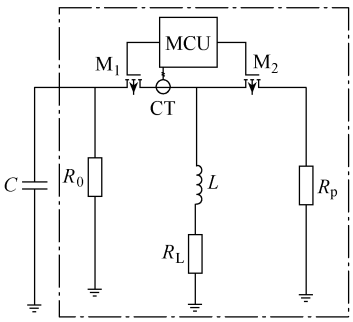

图 2　快速放电棒等效电路

图 2 中，C 为设备的等效电容，R_0 为高阻值放电电阻；L 为线圈电感值，R_L 为线圈等效电阻，R_p 为高压放电电阻，M_1、M_2 为 MOSFET，CT 表示罗氏线圈，MCU 为数据采集、处理与控制单元。

阶段 1 放电回路如图 3 所示。M_1 导通，M_2 关断，设备电容残余电荷通过两条通道释放：一是通过 R_0 的高阻通道；二是通过电感通道。对于 R_0 高阻通道，令设备残压 $u(t)$的初值为 U_0，其放电电流 $i_0(t)$为

$$i_0(t)=C\frac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t}=-\frac{U_0}{R_0}e^{-\frac{t}{R_0C}} \tag{5}$$

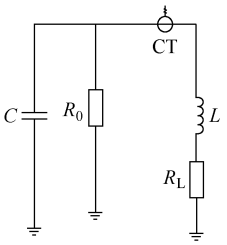

图 3　阶段 1 放电回路

对于电感通道，构成了一个 RLC 电路，根据二阶电路的分析原理可得流过电感回路的电流 $i_l(t)$为

$$i_l(t)=C\left(K_1s_1e^{s_1t}+K_2s_2e^{s_2t}\right) \tag{6}$$

其中

$$\begin{cases} s_1=\dfrac{R_L}{2L}+\sqrt{\left(\dfrac{R_L}{2L}\right)^2-\dfrac{1}{LC}} \\ s_2=\dfrac{R_L}{2L}-\sqrt{\left(\dfrac{R_L}{2L}\right)^2-\dfrac{1}{LC}} \\ K_1=\dfrac{U_0s_2}{s_2-s_1} \\ K_2=\dfrac{U_0s_1}{s_1-s_2} \end{cases} \tag{7}$$

阶段 2 放电回路如图 4 所示。经过时间 T_1 后，CT 测量到电感电流 $i_l(t)$达到设备最大允许电流，则通过微控制单元（microcontroller unit, MCU）控制 M_1 关断。此时，设备消耗的残余电荷ΔQ 可表示为

$$\Delta Q=\int_0^{T_1}\left(i_0(t)+i_l(t)\right)\mathrm{d}t \tag{8}$$

则经过时间 T_1 后，设备残余电压为

$$U_{T_1}=U_0-\frac{\Delta Q}{C} \tag{9}$$

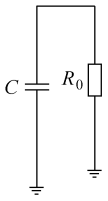

图 4 阶段 2 放电回路

阶段 3 放电回路如图 5 所示。保持 M_1 关断，M_2 导通，电感 L 上的能量通过电阻 R_p 与线圈等效电阻 R_L 构成的 RL 电路释放，设经过 T_2 时间，回路电流降为初始电流的 0.1%以下。由于电感 L 很小，实际上 T_2 极小，T_2 可通过式（10）计算。

$$T_2 = \frac{6L}{R_L + R_p} \tag{10}$$

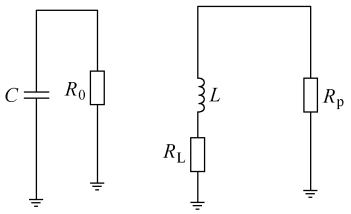

图 5 阶段 3 放电回路

与此同时，设备等效电容 C 继续通过 R_0 高阻放电支路放电，放电时间为 T_2，所以根据式（5）～式（10），再经过 T_2 后，设备残余电压为

$$U_{T_2} = U_{T_1} - \frac{\int_{T_1}^{T_2} i_{T_1}(t)\mathrm{d}t}{C} \tag{11}$$

其中

$$i_{T_1}(t) = -\frac{U_{T_1}}{R_0}\mathrm{e}^{-\frac{t}{R_0 C}} \tag{12}$$

重复进行阶段 1～阶段 3，直至 M_1 单次导通时间超过 1s，说明设备上的残压已足够低，处于安全的电压水平。

3 仿真分析

3.1 算例

设置快速放电棒参数：L=0.1H，R_L=200Ω，R_0=10kΩ，R_p=100kΩ。下面计算快速放电棒经过多长时间可以把残压降至 36V 以下。

为了简化计算，先忽略 R_0 支路。由于 R_0 支路一直处于消耗能量的状态，所以忽略 R_0 实际上会增加放电时间。忽略 R_0 支路后，电流的放电原理为，通过 M_1 控制电感支路不断从 C 获得能量，通过 M_2 控制电感支路经固定时长 T_2 释放电感存储的能量。故可将计算转化为，需要经历 n 个阶段 1～阶段 3 的循环，才能把残压降至 36V。由于 T_2 为常数，所以关键在于 T_1 的求解。为简化计算，认为 M_1 导通时，电感 L 电流从 0 增至设备最高允许电流 I_r 的时间 T_n 内，电流的变化率保持不变，则 T_n 可表示为

$$T_n = \frac{I_r}{k_n(0)} \tag{13}$$

式中，$k_n(0)$为第 n 个循环 0 时刻电感电流的导数。

根据式（13）得 $k_n(0)$为

$$k_n(0) = C\left(K_3 s_1^2 + K_4 s_2^2\right) \tag{14}$$

其中

$$\begin{cases} s_1 = \dfrac{R_L}{2L} + \sqrt{\left(\dfrac{R_L}{2L}\right)^2 - \dfrac{1}{LC}} \\ s_2 = \dfrac{R_L}{2L} - \sqrt{\left(\dfrac{R_L}{2L}\right)^2 - \dfrac{1}{LC}} \\ K_3 = \dfrac{U_n s_2}{s_2 - s_1} \\ K_4 = \dfrac{U_n s_1}{s_1 - s_2} \end{cases} \tag{15}$$

式中，U_n 为第 n 个循环设备的初始残压。

利用 Matlab 进行上述计算，得到循环次数与残压的关系如图 6 所示，循环次数与 M_1 导通时间的关系如图 7 所示。

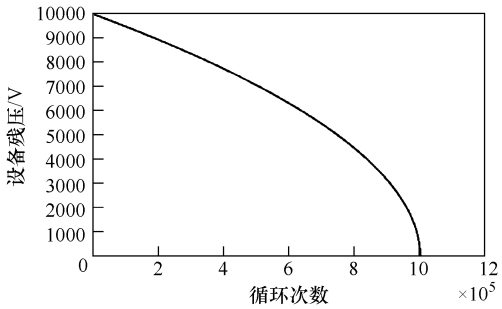

图 6 循环次数与残压的关系

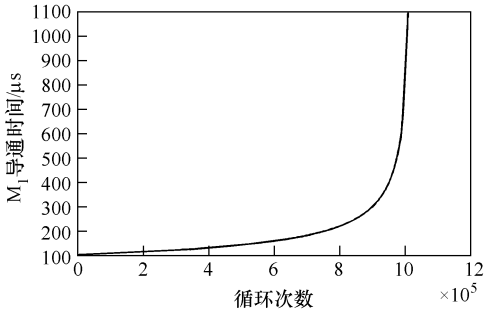

图 7 循环次数与 M_1 导通时间的关系

根据计算结果，经过约 10^6 次循环后，设备残压降至接近 0，M_1 导通总时间为 181s。根据式（10）得 T_2 约为 6μs，则经过 10^6 次循环后，总时间为 181s+6μs×10^6=187s。

由第 1 节可知，设备通过 R_0 的放电时间为 562s，增加本文所述电感放电回路后，总放电时间为 562s×187s/(562s+187s)≈140s，放电速度提高为原来的 4 倍。

3.2　高压放电电阻对放电速度的影响

保持线圈电感值 L 与线圈等效电阻 R_L 不变，改变高压放电电阻 R_p 的数值，研究 R_p 对放电速度的影响。设置 R_p 的变化范围为 20kΩ～2MΩ，根据 3.1 节的计算方法，利用 Matlab 计算得出不同 R_p 下的放电时间与过电压见表 1。

表 1　不同 R_p 下的放电时间与过电压

R_p/kΩ	放电时间/s	元件承受过电压/kV
20	217	20
50	163	50
100	140	100
200	128	200
500	119	500
1 000	117	1 000
2 000	115	2 000

由表 1 可知，R_p 越大，放电时间越短，但元件所承受的瞬时过电压越高，并且放电时间与 R_p 存在明显的非线性，R_p 越大，对放电速度的提升效果越不明显。根据计算结果及现有高压电阻的性能，放电电阻的阻值宜取为 50～100kΩ。

3.3　线圈等效电阻对放电速度的影响

保持线圈电感值 L 与高压放电电阻 R_p 不变，研究线圈等效电阻 R_L 对放电速度的影响。设置 R_L 的变化范围为 10～2 000Ω，利用 Matlab 计算得出不同 R_L 下的放电时间及 MOSFET 动作次数见表 2。

表 2　不同 R_L 下的放电时间及 MOSFET 动作次数

R_L/Ω	放电时间/s	MOSFET 动作次数/次
10	153	1.5×10^6
20	149	1.5×10^6
50	144	1.4×10^6
100	141	1.3×10^6
200	140	1.0×10^6
500	144	1.0×10^6
1 000	158	0.8×10^6
2 000	189	0.5×10^6

由表 2 可知，R_L 在 10～2 000Ω 范围内变化时，放电时间存在极值。R_L 越小，RLC 回路电流达到设备电流限制值所需时间越短，但 MOSFET 动作次数增多，导致放电循环次数随之增多，因此总放电时间呈现增大的趋势。随着 R_L 增大，MOSFET 动作次数减少，放电循环次数也减少，但 RLC 回路电流达到设备电流限制值所需时间增加，导致每个循环周期的时间增大，最终总放电时间也呈现增大趋势。实际应用时，MOSFET 动作次数越少越好，动作次数越多，对控制系统的性能及 MOSFET 寿命的设计要求越高。根据计算结果，综合考虑放电时间与 MOSFET 动作次数，线圈等效电阻取值应在 200Ω 左右。

3.4　线圈电感值对放电速度的影响

保持线圈等效电阻 R_L 与高压放电电阻 R_p 不变，设置线圈等效电感值 L 的变化范围为 5～1 000mH，研究线圈电感取值 L 与放电时间及 MOSFET 动作次数的关系。不同 L 下的放电时间及 MOSFET 动作次数见表 3。

表 3　不同 L 下的放电时间及 MOSFET 动作次数

L/mH	放电时间/s	MOSFET 动作次数/次
5	334	20.0×10^6
10	273	10.0×10^6
20	233	6.0×10^6
50	168	2.0×10^6
100	140	1.0×10^6
200	138	0.6×10^6
500	88	0.2×10^6
1 000	81	0.1×10^6

根据表 3 可知，L 越大，放电总时间越小，同时 MOSFET 动作次数越少。然而，L 越大，线圈尺寸与制造成本会成倍增加，因此根据计算结果与现有电感制造水平，线圈电感值宜为 100mH 左右。

4　结论

本文针对现有放电棒放电电阻设置不合理的问题，设计了一种快速放电回路，并利用 Matlab 仿真软件计算了不同放电回路参数下的放电时间，得出主要结论如下：

1）为保证放电电流不损坏设备，现有放电棒放电电阻通常设置得较大，不利于提高电力生产效率。

2）本文所述方法在放电回路中增加了电感吸能

支路，通过控制开关元件实现电容放电功率的保持，提高了放电效率。

3）放电回路参数对放电速率有较大影响，实际应用时应根据设备、所采用元件的性能选择放电回路元件，以使放电速率达到最佳。

4）本文针对高压电容放电的研究结果可为电力生产、新能源汽车、超级电容储能等相关领域提供参考。

参考文献

[1] 谢翔杰, 魏桃胜, 贺星煚, 等. 变电站蓄电池开路故障定位及集中式续流方法[J]. 电气技术, 2024, 25(3): 63-67, 73.

[2] 陈华文. 一次电路电容放电实验方法浅析[J]. 日用电器, 2014(7): 25-27, 33.

[3] 殷昂. 折叠式低压放电棒的研制与应用[J]. 山东煤炭科技, 2016(5): 126-127.

[4] 高惠新, 周刚, 尚浩志, 等. 现场放电棒及试验线检测装置的研制[C]//2016 年第二届今日财富论坛论文集, 北京, 2016.

[5] 金雍奥, 曲金秋, 周志昊, 等. 变电设备高压试验安全防护措施[J]. 电气技术, 2015, 16(5): 85-88, 94.

[6] 中国南方电网有限责任公司电力安全工作规程: Q/CSG 51001—2015[S].

[7] 李杨, 顾志斌, 陈浩, 等. 电容放电装置研究[J]. 电力电子技术, 2022, 56(2): 1-3.

[8] 徐旭东, 汪源, 彭庆辉, 等. 电力互感器室内检定自放电装置的研制[J]. 科技创新与应用, 2019(4): 9-10.

[9] 张采龙. 岸边集装箱起重机驱动器电容放电装置设计[J]. 港口装卸, 2024(1): 31-32, 70.

[10] 张晓军, 杨家强, 周宇晨. 计及总损耗功率的电动汽车母线电容主动快速放电方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1737-1748.

[11] 林耿明. 一种新型 35kV 放电棒[J]. 电子测试, 2022, 36(11): 109-111.

[12] 左涛. 一起化工厂 10kV 开关柜过电压保护器热崩溃事故分析[J]. 电气技术, 2024, 25(2): 68-73.

[13] 赵永红. 本安电路电容放电模型与仿真分析[J]. 测试技术学报, 2021, 35(5): 392-397.

[14] 王胜刚, 李阳, 王亚杰. 电容器声光报警专用放电棒的研制与应用[C]//2023 年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集(上册), 南宁, 2023.

[15] 刘应敏. 试析 RC 和 RL 电路充、放电过程中能量的变化关系[J]. 焦作师范高等专科学校学报, 2008(1): 74-75.

[16] 赵强, 孙殿平, 郭超修. 用电路模型等效变换的方法教学 RL 暂态过程[J]. 大学物理, 2017, 36(7): 56-58.

[17] 朱小全, 侯鹏辉, 侯锦涛, 等. 带有 LC 串联谐振功率自均衡单元的模块化光伏直流升压变换器[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1087-1102.

收稿日期：2024-11-25

修回日期：2025-01-02

作者简介

蔡伟杰（1997—），男，广东潮州人，学士，助理工程师，从事电力设备高压试验工作。

（上接第 33 页）

[17] 陈光宇, 袁文辉, 徐晓春, 等. 基于残差图卷积深度网络的电网无功储备需求快速计算方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(17): 4683-4700.

[18] 刘笑, 杨建, 李力, 等. 基于机器学习的带被动阻尼直流微电网系统的稳定性检测[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2281-2293, 2324.

[19] 刘金朋, 邓嘉明, 高鹏宇, 等. 基于 VMD-IMPA-SVM 的超短期风电功率预测[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 24-31, 79.

[20] 刘坤. 基于随机森林的风力发电系统输出功率预测方法[J]. 光源与照明, 2022(7): 165-167.

[21] 张维通, 闫正兵, 张正江, 等. 基于物理信息的时间卷积神经网络风电功率预测[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 101-108, 117.

[22] 李尊, 张小科, 张少峰, 等. 基于改进 LSTM 的风电功率预测因素分析[J]. 计算机仿真, 2024, 41(10): 63-68, 143.

[23] 徐炜君, 裴欢, 魏勇. 基于粒子群优化的 SVR 风电功率超短期预测[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2017, 49(1): 73-77.

[24] 赵倩, 陈芳芳, 甘露. 基于改进粒子群算法优化支持向量机的风电功率预测[J]. 电气技术, 2020, 21(12): 12-16.

收稿日期：2025-01-20

修回日期：2025-02-27

作者简介

李 桓（1994—），男，山西省大同市人，硕士，中级工程师，主要从事新能源发电及负荷预测研究工作。