

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.06.022

基于脉冲功率技术的高压电场感应取能设计

王秉卓, 司剑飞, 于春风

(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266000)

摘要:针对电力巡线旋翼无人机续航能力不足的问题,提出一种基于脉冲功率技术的高压电场感应取能设计。以巡线无人机载导体作为悬浮电极,在电力线与架空地线之间高压电场中储存感应电能,级联气体自触发开关和电感,并与架空地线构成取能回路,悬浮电极击穿开关气隙对地放电。随气隙放电发展,悬浮电极与电力线、架空地线间分布电容将迅速分压,抑制放电,使气隙间无法形成电弧,而转为高频流注脉冲放电,激发回路高频电磁振荡,通过电磁互感实现电场感应电能输出。文中详细介绍了脉冲功率电场感应取能设计及抑制放电原理,分析取能等效电路并建立了放电脉冲取能模型,在实验室环境下进行物理平台搭建与测试,实验结果证明设计可行。

关键词:电场感应技术;脉冲功率技术;流注理论;抑制放电;电力巡线无人机

中图分类号:TM89

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)06-0160-07

0 引言

定期对输变电系统进行巡检、维修维护是电网运行部门确保输电安全的重要手段。随着电力系统自动化的发展,以无人设备代替人工线路巡检的方式日渐兴起。近年来,旋翼无人机以其高效、准确和安全等优势逐渐承担起高压输电线路巡检工作^[1-3]。但受到机载电池容量的限制,旋翼无人机无法进行长时间长距离的自主巡检工作,或在其长时间长距离巡线工作过程中需要人为干预,例如更换电池、充电车跟随保障等。

为了扩大旋翼无人机的工作巡航半径,需要对其提供及时的电能补充。输配电网中,电压为110~1 150 kV不等,工作电流可达数十乃至数千安,虽有巨大的电能传输,但难以直接利用。目前适用于无人机从输配电网中抽取电能的方案集中在利用电力线周围的高压电(磁)场感应获能上:(1)无人机通过机械结构停落或悬挂在电力线上,利用搭载的感应取能线圈,通过电流互感从电力线载流中获取电能^[4]。此种电磁感应松耦合式无线电能传输缺点明显,其感应取能线圈体积和重量大,且充电效率低。(2)通过紧箍在电力线上的电流互感器感应取电,或者采用特制的高压电容器与电压互感器串联,直接从高压导线上取能,再通过电力变换由谐振方式向无人机传输电能^[5-8],这种方式受电力线瞬时故障电流影响大,且布设充电平台成本高、灵活性差。

考虑到高压输电线路与周围良导体间存在较高水平的空间电场^[9],可以利用高压感应电场空间

位移电流来获取电能,由于直接利用位移电流取能能量低、功率小,文献[11]提出一种基于放电法的高压电场感应取能技术,让位移电流先对小电容量高压电容充电,再控制其放电对后续设备供电。实验证明该技术可有效提高取能效率。为得到足够的位移电流,需安装体积较大的感应极板,同时增加机械结构,导致重量增加,不利于机载取能的实现。对此,文中提出了基于脉冲功率技术的高压电场感应取能设计:利用气体放电特性,在时间尺度上压缩感应电能,同时抑制放电,得到高频功率脉冲,从而实现小型旋翼无人机在持续飞行工作中通过小型轻量的机载脉冲变压器提取工频非辐射电场能量。

1 高压线路电场环境

高压输电线路上有数十万伏特的电压,可在电力线与架空地线间形成较高水平电场。文献[10]给出的220 kV单回线路导线、地线布置如图1所示,可见在电力线与架空地线之间,高度差几厘米的空间就将存在近千伏的电压差。图中:A、B、C分别为三相输电线;1为光纤复合架空地线(optical power ground wire, OPGW);2为普通地线。

2 脉冲功率电场感应取能设计

由于空气的绝缘特性,电力线与架空地线间空间位移电流微弱,直接取电能量低、功率小^[11],并且一般用电设备无法直接承受数千伏的高压,因此,即使高压输电线路周围电场输出能量和功率满足用电需求,也无法直接有效利用,需要通过一定的手段获取。

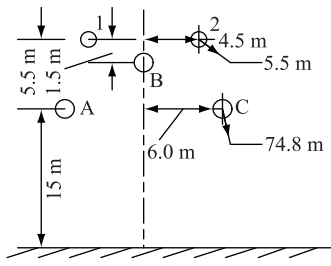


图1 220 kV单回线路导线和地线布置示意
Fig.1 Conducting and ground wire arrangement of 220 kV single power line

2.1 脉冲功率电场感应取能原理

脉冲功率电场感应取能需要经历从电场中感应储能、脉冲成形、高频振荡和互感输出4个过程,如图2所示,其中脉冲成形是气隙放电发展与抑制的过程。

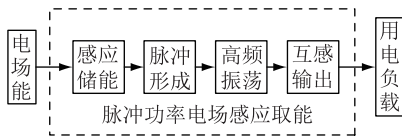


图2 脉冲功率电场感应取能工作过程
Fig.2 Working process of the electric-field induction energy-acquisition based on pulsed power technology

图3给出文中提出的基于脉冲功率技术的高压电场感应脉冲取能设计原理:机载导体作为悬浮电极在电力线与架空地线间的高压电场中感应储能,并与二者保持良好绝缘,同时连接一个保持断开的气体开关G(二电极自触发开关)和脉冲变压器TP高压侧 L_p (下文简称电感),并与架空地线构成抑制放电取能回路,互感电压 U_m 由脉冲变压器低压侧经桥式整流后输出。图中: C_d 为悬浮电极分别与电力线和架空地线间分布电容的串联等效电容(下文简称分布电容); C_g 为气体开关G气隙等效电容。

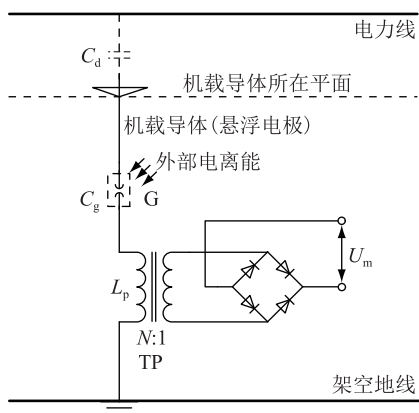


图3 脉冲功率电场感应取能原理
Fig.3 Principle diagram of energy acquisition by electric-field induction based on pulsed power technology

悬浮电极间感应电压超过气体开关阈值时,气隙放电,气体开关在极短的时间接通(流注放电一般 10^{-8} s甚至更短),导体在短时间快速向电感释放能量,能量在时间尺度上被压缩,从而获得较大的脉冲功率。气体开关闭合接通电极的过程中,气隙电导率增强速度极快,电流 i 迅速增大,电感 L_p 迅速分压,分布电容 C_d 随电流增大产生的电压 U_d 迅速增大,导致气隙电压 U_g 压差急剧下降,阻碍电弧的形成,放电熄灭,之后电流减小,分布电容分压减小,气隙在外加电压 U_{ac} 作用下将再度发展放电,从而形成高频流注脉冲放电模式,激发回路高频电磁振荡,能量通过互感电感(脉冲变压器低压侧)向后输出给用电负载。

取能设计主要思想如下:

- (1) 利用气体放电特性在时间尺度上压缩能量获得较大的功率脉冲,满足用电负载需求。
- (2) 分布电容分压抑制开关气隙放电向连续电弧接通方向发展,使气隙转为高频流注脉冲放电,激发回路高频电磁振荡。

因而可以由机载小型轻量的高频脉冲变压设备实现高压小电流到低压大电流的转换,最终实现几瓦至几十瓦的功率输出。

2.2 抑制放电原理

抑制放电的原理可以用图4来说明:气隙放电前,分布电容 C_d ,气隙等效电容 C_g 及电感 L_p 串联;气隙放电后, C_g 并联一个随时间变化的等离子体的电阻 $R(t)$ 。

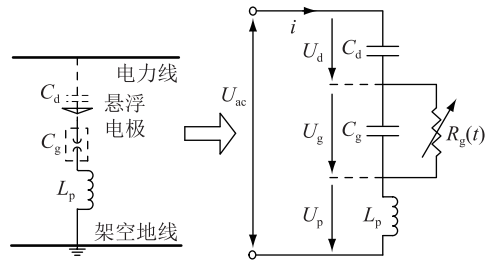


图4 分布电容抑制放电等效电路
Fig.4 Equivalent circuit of inhibiting discharge by distributed capacitance

显然,气隙上的电压 U_g 可以用式(1)表示:

$$U_g = U_{ac} - U_p - U_d = U_{ac} - L_p \frac{di}{dt} - \frac{1}{C_d} \int i dt \quad (1)$$

式中: U_{ac} 为电力线电压,即外加电压; U_d , U_p 分别为分布电容和电感上的分压。

气隙放电形成火花放电等离子体通道而接通电路,接通时间一般在 10^{-8} s量级^[12-20]。放电过程气隙电导率快速增长,放电脉冲电流 i 迅速增大,上升速度极快。由式(1)易见:电感迅速分压,分布电

容随电流增大产生的电压 U_d 迅速增大,导致气隙电压 U_g 压差急剧下降,阻碍电弧的形成,放电熄灭。当放电熄灭,电流减小,分布电容分压减小,气隙在外加电压 U_{ac} 作用下将再度放电。上述过程不断重复,即可获得高频放电短脉冲,激发回路高频振荡。

分布电容在抑制放电过程中起决定作用,而电感分压是为了通过电磁互感输出电压。

在抑制放电过程中,气体开关同时起到脉冲开关及振荡的双重作用,因此省去了开关触发、激励控制电路。同时,用电负载位于脉冲变压器的低压侧且工作在反激状态,具有输入和输出间良好的电气隔离,适用于放电脉冲功率取能。

2.3 取能等效电路分析

文献[21]指出放电脉冲上升时间受回路电感影响较大。使用韦策尔提出的火花间隙随电流和时间变化的非线性电阻直接求解脉冲上升时间相当困难,而火花间隙电阻从高阻值变化到接近 0 的过程可以用与火花间隙电导率增长的特征时间 θ 来表征^[22]:

$$\theta = \frac{2pd^2}{aU_b^2} \quad (2)$$

式中: p 为气隙气压(0.1 MPa); d 为气隙距离,cm; a 为弧道电阻系数; U_b 为开关击穿电压,V。

一般情况下,火花间隙电阻下降到远低于放电回路其余部分总阻抗的时间,要远小于放电电流的上升时间,火花电阻变化的详细情况并不是很重要^[23],考虑到取能回路串有较大电感元件,忽略火花间隙发展时间,将气体开关看作接通瞬间有压降的无延时理想开关 K,取能电路进一步等效为图 5。

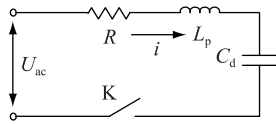


图 5 气隙放电等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of air-gap discharge

当开关闭合,可列回路方程:

$$L_p \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C_d} \int i dt - U_{ac} + U_d = 0 \quad (3)$$

需要指出,理想开关 K 是为忽略气体开关导通延时而引入的,在气隙放电前,回路中实际存在有微弱的位移电流,在外加电压 U_{ac} 上升阶段,位移电流为分布电容 C_d 和气隙等效电容 C_g 充电。因此,理想开关 K 在闭合时刻,即 $t=0$ 时,回路中各部分是有初始电压的,只是由于位移电流微弱且频率较低($10^{-5} \mu A, 50 \text{ Hz}$),所以忽略电流初值以及电感和电阻的分压,得到式(3)的初始条件:

$$\begin{cases} i|_{t=0} = 0 \\ U_d|_{t=0} = U_{d0} \\ \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U_{ac} - U_{d0}}{L_p} \end{cases} \quad (4)$$

求解式(3),得到电流表达式:

$$i = \frac{U_{ac} - U_{d0}}{\omega L_p} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \omega t \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} \tau = \frac{2L_p}{R} \\ \omega = \left(\frac{1}{L_p C_d} - \frac{1}{\tau^2} \right)^{1/2} \end{cases} \quad (6)$$

令 $di/dt=0$,求得放电脉冲上升时间 t_s :

$$t_s = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \omega \tau \quad (7)$$

将电路各参量的特征参数代入式(7),得到的放电脉冲上升的特征时间在 10^{-6} s 量级,再将气隙参数代入式(2)得到火花间隙的时间常数,即火花间隙电导率增长的特征时间为 10^{-8} s 量级。对比可见,放电脉冲上升时间要远大于火花间隙电导率增加时间,电感 L_p 对放电脉冲上升时间有很大的影响,因此,忽略火花间隙非线性电阻变化过程是正确的。另外,气隙电感一般很小,约在 10 nH 左右,相对于电感 L_p 而言可以忽略不计。

为确定抑制放电的根本原因在于分布电容分压还是电感分压,不妨先假设电感分压 U_p 导致气隙放电熄灭。

$$U_p = L_p \frac{di}{dt} \propto \frac{di}{dt} \quad (8)$$

令 $f(t) = di/dt$,对 $f(t)$ 求导:

$$f'(t) = \frac{d^2 i}{dt^2} = \frac{1 - \omega^2 \tau^2}{\tau^2} \sin \omega t - \frac{2\omega}{\tau} \cos \omega t \quad (9)$$

显然在 $t=0$ 时, $f'(0) < 0$,继续对 $f'(t)$ 求导得到:

$$f''(t) = - \left(\frac{\omega^3 \tau^2 - \omega}{\tau^2} \cos \omega t + \frac{2\omega^2}{\tau} \sin \omega t \right) \quad (10)$$

可见, $f''(t)$ 在 $1/4$ 周期时间内均小于 0,故在 $(0, T/4)$ 内 $f'(t)$ 单调递减,又有 $f'(0) < 0$,因此, $f'(t)$ 均小于 0,即 U_p 单调递减。设 k 为 $1/4$ 周期时间与放电脉冲上升时间 t_s 的比值:

$$k = \frac{\pi}{2 \tan^{-1} \omega \tau} \quad (11)$$

计算后发现 k 略大于 1,故得出结论:起抑制气隙放电并最终熄灭放电作用的主要是分布电容分

压 U_d , 电感分压在气隙放电开始瞬间即达到峰值, 并在放电脉冲上升至峰值过程中渐趋于 0, 放电熄灭发生在 $\theta \sim t_s$ 时间段内。

如果从电容电感特性角度解释, 气隙放电瞬间, 由于电容电压无发生阶跃, 由气隙火花间隙电阻主动变化所产生的压降迅速转移到电感上, 此时电感分压最大, 也可以证明上述结论是合理的。

2.4 取能功率计算

取能设计中受到更多关注的是抑制放电过程中的取能功率。上文已经证明, 放电熄灭在 $\theta \sim t_s$ 时间段内, 不妨设放电熄灭时刻为 t_s , 那么抑制放电过程中, 电感中储存的能量表示为:

$$W_p = L_p \int_0^{t_s} i \frac{di}{dt} dt \quad (12)$$

代入 t_s , 求解式(10):

$$W_p = \frac{(U_{ac} - U_{d0})^2}{2\omega^2 L_p} e^{-\frac{2\tan^{-1}\omega\tau}{\omega\tau}} \sin^2 \omega t_s \quad (13)$$

进而得到取能平均功率:

$$P = W_p / t_s = (U_{ac} - U_{d0})^2 \left(\frac{e^{-\frac{2\tan^{-1}\omega\tau}{\omega\tau}}}{\pi\omega L_p} \right) \quad (14)$$

在无人机定高飞行工作中, 分布电容可被视为稳定, 那么由式(14)可知, 取能平均功率 P 将随电力线电压 U_{ac} 变化而变化。

3 实验及结果分析

3.1 实验平台设计

在实验室条件下, 为使实验平台设计更为合理, 采用串联高压分压电阻等效分布电容分压的方法, 电阻阻值为脉冲电流达到峰值时分布电容分压与电流的理论比值。另外, 电压上升阶段回路电流微弱, 对比外加电压 U_{ac} , 电阻分压可忽略不计。

实验电路设计如图 6 所示: 以棒-棒对称钨电极作为气体开关 G, 间隙充 0.1 MPa 空气; 匝数比 4 250:29 的磁芯 (不封闭) 树脂灌封脉冲变压器 TP; 高压分压电阻 R ; 可调高压电源 U_{ac} 作为外加电压输入; 桥式整流模块。测量电路包括 500 MHz 示波器、高压探头、罗氏线圈 (电流传感器) 等。

钨棒电极直径 2 mm, 间隙 0.5 mm, 大气条件下空气作为气体介质, 使用 Maxwell 电磁软件仿真气隙电场, 结果如图 7 所示, 可近似认为电极间为均匀电场。

气隙间距与压强之积 $pd > 200 \sim 500 \text{ Pa} \cdot \text{m}$, 气隙放电电压将服从巴申 (Paschen) 定律: 气隙放电电压 U_b 服从关于气压 p 和间隙距离 d 乘积的函数, 均匀电场中空气间隙的放电电压可用经验公式计算^[24]:

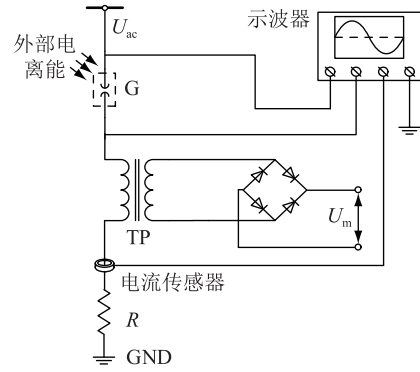


图 6 实验电路

Fig.6 Experimental circuit

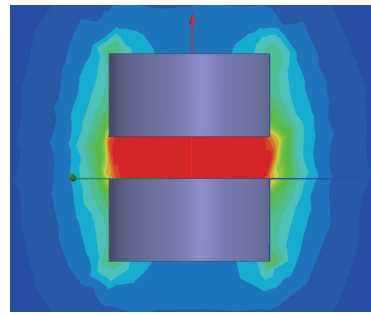


图 7 气隙电场仿真

Fig.7 Simulation of air gap electric field

$$U_b = 24.22\delta d + 6.08 \sqrt{\delta d} \quad (15)$$

据式(15)计算得到气体开关阈值约为 2.5 kV, 外加峰-峰值为 6 kV 的工频正弦电压, 进行实验。

3.2 波形数据分析

为清晰分析数据, 实测波形均取半个周期。图 8 给出回路电流及外加电压的工作波形, 图 9 是由示波器通道差值得到的气隙开关端电压波形。

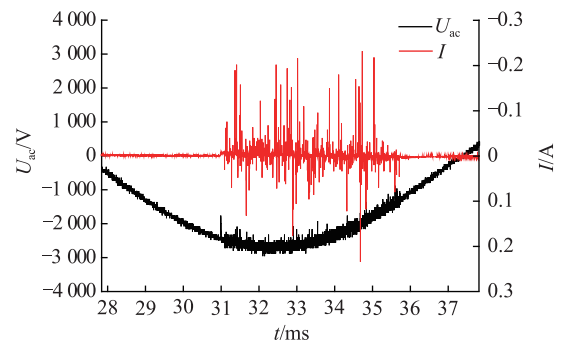


图 8 回路电流与外加电压工作波形

Fig.8 Working waveforms of loop current and applied voltage

对比图 8 和图 9, 可以看到: 在回路高频振荡过程中, 气隙分压 U_g 保持在 0~500 V 区间高频波动, 说明气隙放电虽然被抑制甚至熄灭, 但火花通道依然保持着较高的电导率, 当气隙分压重新达到一定值, 气隙即可再度发展放电。可见, 气体开关起到

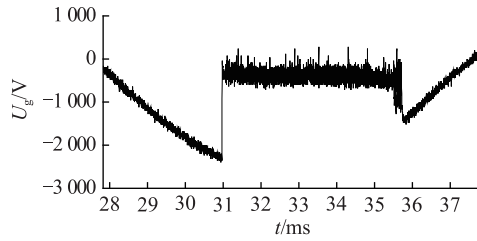


图9 气隙开关端电压波形

Fig.9 Terminal voltage waveform of air gap

了高频开关的作用。

如图 10 将放电脉冲展开,可以看到放电脉冲上升时间为 $1 \sim 2 \mu\text{s}$,较好地吻合了计算结果,说明忽略火花间隙非线性电阻变化的放电脉冲取能模型是较为准确的。

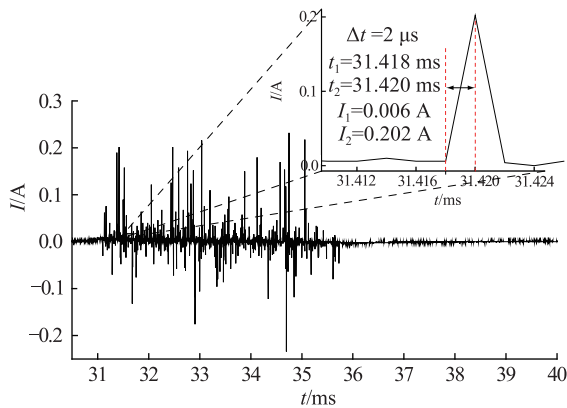


图 10 放电脉冲时域展开

Fig.10 Discharge pulse expansion in time domain

图 11 是整流后的互感电压 U_m 波形,虚线表示互感电压均值。波形显示除尖峰脉冲外,互感输出电压大致随电力线电压变化,基本实现了对工频高压电实现高频降压的目的,一定程度上证明了文中脉冲功率电场感应取能设计的可行性。

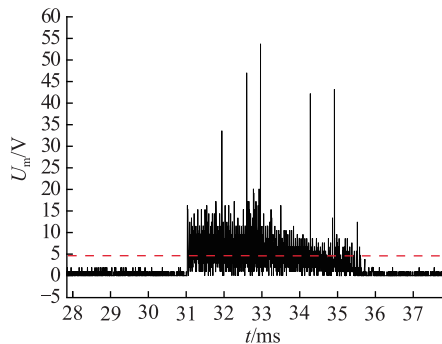


图 11 脉冲变压器低压侧互感电压波形

Fig.11 Mutual voltage waveforms of the low voltage side of pulse transformer

4 结论

文中研究提出了基于脉冲功率技术的高压电

场感应取能设计,分析并建立了放电脉冲取能模型。通过等效实验验证了取能设计可行,并得出以下结论:

(1) 抑制放电设计中,分布电容可有效抑制开关气隙间连续电弧放电的形成,得到高频放电脉冲,激发回路高频电磁振荡。

(2) 利用气体放电特性,在时间尺度上压缩能量,获得较大的功率脉冲,可以满足用电负载的功率需求。

(3) 理论计算值符合实验结果,证明了放电脉冲取能模型的正确性。

(4) 气体开关放电电压会影响互感电压脉冲幅度,在电磁振荡过程中主要起高频开关的作用,能量在分布电容与电感间相互转化,并随外加电压而变化。

参考文献:

- [1] 彭向阳,刘正军,麦晓明,等. 无人机电力线路安全巡检系统及关键技术[J]. 遥感信息,2015,30(1):51-57.
PENG Xiangyang, LIU Zhengjun, MAI Xiaoming, et al. A transmission line inspection system based on remote sensing: system and its key technologies[J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(1):51-57.
- [2] 李力,徐勋建,李波,等. 架空线路无人机巡线技术探讨[J]. 湖南电力,2012,32(1):44-47.
LI Li, XU Xunjian, LI Bo, et al. A magnetic coupling resonant circuit design of the wireless charging[J]. Hunan Electric Power, 2012, 32(1):44-47.
- [3] 张捷,维欣. 配电线路采用无人机巡线的应用分析[J]. 电力与能源,2013,34(4):365-368.
ZHANG Jie, YAN Weixin. Application analysis of distribution line using unmanned aircraft patrol [J]. Power and Energy, 2013, 34(4):365-368.
- [4] 王玉峰,赵敏,罗沛文. 一种高压线非接触式自取电电源的设计[J]. 机械制造与自动化,2013,42(6):178-180.
WANG Yufeng, ZHAO Min, LUO Peiwen. Design of non-contact self-supplying electric power applied in high-voltage bus [J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(6):178-180.
- [5] 肖波,徐敏捷,席朝辉,等. 高压侧感应取能电源的研究[J]. 高压电器,2013,49(1):1-5.
XIAO Bo, XU Minjie, XI Zhaohui, et al. Research of induction power supply at high voltage side[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1):1-5.
- [6] 焦斌亮,付伟,赵德功. 高压输电线路 CT 取能电源的设计[J]. 电源技术,2013,37(1):130-133.
JIAO Binliang, FU Wei, ZHAO Degong. Design for CT energy-getting power of high voltage transmission line [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(4):119-124.
- [7] 吕潇,孙跃,王智慧,等. 复合谐振型感应电能传输系统分析及参数优化[J]. 电力系统自动化,2013,37(4):119-124.
LYU Xiao, SUN Yue, WANG Zhihui, et al. Analysis and param-

- eter optimization of composite resonant inductive power transfer system[J]. Automation of Electric Power System,2013,37(4): 119-124.
- [8] 皇甫羽飞. 电容式高压取电方法及雷电暂态研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
HUANGFU Yufei. A taking power method based on high-voltage capacitor and research on lightning transient effects [D]. Beijing:North China Electric Power University,2015.
- [9] 朱艳秋,宋晓东,赵志勇. 220 kV 高压输电线路工频电磁场影响因素研究[J]. 电力科技与环保, 2011,27(1):5-8.
ZHU Yanqiu,SONG Xiaodong,ZHAO Zhiyong. Study on influential factors of power frequency electromagnetic field under 220 kV high voltage transmission line [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection,2011,27(1):5-8.
- [10] 蒋兴良,谢彦斌,胡建林,等. 典型架空输电线路地线电磁取能等效电路的分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2052-2057.
JIANG Xingliang,XIE Yanbin,HU Jianlin,et al. Analysis of equivalent circuit for tapping electromagnetic power from overhead ground wires of typical transmission lines[J]. Power System Technology,2015,39(7):2052-2057.
- [11] 骆一萍,曾翔君,雷永平,等. 基于放电法的高压电场感应取能技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):113-119.
LUO Yiping,ZENG Junxiang,LEI Yongping,et al. High voltage electric-field induction energy-acquisition technology based on discharge method[J]. Automation of Electric Power System,2015,39(8):113-119.
- [12] 吕治辉. 高功率自击穿气体火花开关多脉冲运行特性研究[D]. 国防科学技术大学,2005.
LYU Zhihui. Investigation of spark gap switch multi-pulse operating in the self-breakdown mode[D]. National University of Defense Technology,2005.
- [13] 邵涛,孙广生,严萍,等. 纳秒脉冲气体放电机理研究现状[J]. 高电压技术,2004,30(7):40-42.
SHAO Tao,SUN Guangsheng,YAN Ping,et al. Overview of nanosecond-pulse gas breakdown mechanics [J]. High Voltage Engineering,2004,30(7):40-42.
- [14] IVAN SHKURENKOV,IGOR V ADAMOVICH. Energy balance in nanosecond pulse discharges in nitrogen and air [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2016,25(1): 015021.
- [15] 张贇,曾嵘,黎小林,等. 大气中短空气隙流注放电过程数值仿真[J]. 中国电机工程学报,2008,28(28):6-12.
ZHANG Yun,ZENG Rong,LI Xiaorong,et al. Numerical simulation on streamer discharge of short air gap of atmospheric air [J]. Proceedings of the CESS,2008,28(28):6-12.
- [16] BURMETTE D,MONTELLO A,ADAMOVICH I V,et al. Nitric oxide kinetics in the afterglow of a diffuse plasma filament[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2014, 23(4): 045007.
- [17] 董曼玲. 直流条件下厘米级间隙流注特性数值仿真及实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
DONG Manling. Numerical simulation and experimental research of DC corona streamer in centimeter-level air gap [D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2012.
- [18] ONO Ryo ,ODA Tetsuji. Ozone production process in pulsed positive dielectric barrier discharge[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2007,40:176-182.
- [19] MONTELLO A,YIN Z,BURNETTE D,et al. Picosecond CARS measurements of nitrogen vibrational loading and rotational/translational temperature in non-equilibrium discharges [J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2013,46:464002.
- [20] 赖联有,许伟坚. 基于零相位误差滤波的局部放电故障识别[J]. 电力工程技术, 2018,37(3):67-71.
LAI Lianyou,XU Weijian. Recognition of partial discharge faults using zero phase error filtering[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3): 67-71.
- [21] 张乔根,邱毓昌. 高压纳秒脉冲开关转换电路的分析与设计[J]. 电工电能新技术,1996(3):11-15.
ZHANG Qiaogen,QIU Yuchang. Analysis and design of switch-transfer circuit for high voltage nanosecond pulses [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,1996(3):11-15.
- [22] 张现福,陆巍,陈志刚,等. 可调间隙亚纳秒气体开关的研制[J]. 强激光与粒子束,2008,20(4):697-700.
ZHANG Xianfu,LU Wei,CHEN Zhigang,et al. Development of sub-nanosecond gas switch with adjustable gap [J]. High Power Laser And Particle Beams,2008,20(4):697-700.
- [23] 李懂理. 气体开关放电动态过程的研究[D]. 西安:西安交通大学,2007.
LI Dongli. Research on dynamic process of gas switch discharge [D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2007.
- [24] 李景禄. 高电压技术 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
LI Jinglu. High voltage engineering [M]. Beijing:China Water and Power Press Electric Power Press,2008.

作者简介:



王秉卓

王秉卓(1997),男,本科在读,研究方向为电气工程及其自动化(E-mail:4943510@qq.com);

司剑飞(1981),男,硕士,讲师,研究方向为航空电气及计算机测控;

于春风(1983),男,硕士,副教授,研究方向为航空电气。

A design of high voltage electric-field induction energy-acquisition based on pulsed power technology

WANG Bingzhuo, SI Jianfei, YU Chunfeng

(Navy Aeronautics University Qingdao Branch, Qingdao 266000, China)

Abstract: According to the insufficient endurance of rotor UAV in power line inspection, a design of high voltage electric-field induction energy-acquisition based on pulsed power technology is proposed. The inductive electric energy is stored between the high voltage electric field and the overhead ground line by using the airborne conductor of the patrol UAV as a floating electrode. The airborne conductor cascades the gas self-triggering switch and the inductor, and forms an energy-receiving loop with the overhead ground wire. The floating electrode breaks through the switch air gap and discharges to the ground. With the development of air gap discharge, the distributed capacitance between the floating electrode and the power line and the overhead ground line will be quickly divided to suppress the discharge. Therefore, an arc cannot be formed between the air gaps, and the high-frequency stream is injected into the pulse discharge to excite the high-frequency electromagnetic oscillation of the loop. Finally, the electric field induced electric energy output is realized by the electromagnetic mutual inductance. This paper introduces the principles of this design and the theory of inhibition-discharge, analyzes the equivalent energy-gaining circuit and builds a discharge-pulse energy-gaining circuit model. The feasibility of the design is verified through tests on the physical platform.

Keywords: electric-field induction technology; pulsed power technology; streamer theory; inhibition-discharge; power lines inspection UAV

(编辑 江林)

(上接第 153 页)

The electromagnetic vibration characteristics of the first end of single-phase transformer

PAN Chao¹, GE Jiarou¹, LIU Tianshu¹, LI Xiang²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Jilin city measurement and testing technology research institute, Jilin 132013, China)

Abstract: According to the inter-turn short circuit problem of single-phase transformer, the electromagnetic vibration characteristics of different turn-to-turn short-circuit ratios are studied. The electromagnetic coupling principle is used to establish the inter-turn short-circuit state equation of the transformer. The electromagnetic parameters and vibration acceleration changes under different short-circuit ratios are simulated. Under different inter-turn short-circuit faults, the short-circuit winding current direction changes, the amplitude becomes larger, and the un-short winding current changes less; the internal leakage flux increases and the leakage flux in the corresponding area of the short-circuit winding increases significantly; the winding vibration due to the increase of current and leakage flux Intensified; electromagnetic parameters and vibration acceleration are further changed as the proportion of short-circuit between turns is increased. Finally, the inter-turn short-circuit dynamic model experimental platform is built to measure the winding current and vibration acceleration under different inter-turn short-circuit faults at the head end of the transformer. The simulation results and experimental data are compared to verify the validity of the model and the correctness of the conclusions obtained.

Keywords: single-phase transformer; inter-turn short circuit; electromagnetic parameters; vibration characteristics

(编辑 杨卫星)