

· 技术探讨 ·

基于磁滞特性的自取电电源取能线圈匝数研究

张璐路¹, 李斌¹, 权超¹, 郑健², 姜彤¹, 董晓峰³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 3. 国网苏州供电公司, 江苏 苏州 215004)

摘要:为了优化输电线路上的取能装置,降低取能线圈体积,提高取能装置的经济性,文中着重研究了取能线圈的匝数设计。基于 Jiles-Atherton 磁滞理论模型对取能线圈的磁滞特性进行仿真,选择合适线圈材料,同时提出了保证线圈稳定工作在非饱和区域的最优匝数计算方法。为了安装方便,采用开合式线圈,探究气隙宽度对最优匝数的影响,计算结果表明,气隙的存在使得最优匝数减小,但是随着气隙宽度增加,气隙损耗功率显著增加,因此在制作时应尽可能减小气隙宽度。最后通过仿真和实验验证了该设计方案的有效性。

关键词:自取电电源;铁芯饱和;开合式取能线圈;参数匹配

中图分类号:TM452

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)01-0119-07

0 引言

对输电线路进行大范围的实时监控,将采集到的有关线路工作状态的实时数据通过无线传送,并对采样的数据进行分析和处理,实现一次设备的智能化监测,不仅有利于提升电力系统自动化管理技术,便于尽快发现故障并及时进行排除^[1-2],同时也符合国网公司“互联网+”发展理念。

输电线路的分布范围较广,并且大多数线路位于野外,受地理环境、高压绝缘等条件的限制,在线监测系统的电源需满足能长期工作免维护、与一次系统保持良好的电气隔离和稳定工作的要求。目前国内常用的监测系统供电方法有分压电容取电法、激光供电法、太阳能供电法和电流互感器(current transformer, CT)取电法。分压电容取电法存在电气隔离问题和受外界环境影响较大^[3];激光供电法效率低且寿命短^[4];太阳能供电法受环境影响大、稳定性较差^[5];CT取电法不受外界环境干扰,具有良好的电气隔离,适用范围更加广泛^[6-7]。

目前 CT 取电法面临的困难在于,输电线路流过的电流范围波动较大,无法保证功率的稳定输出。实际应用中 CT 供电装置需要满足以下 3 个要求:(1) 输电线路流经的电流范围内,均能恒功率稳定输出;(2) 输电线路电流较大甚至出现短路故障时,装置仍能正常工作;(3) 取能线圈的铁芯稳定工作在低热耗状态。文献[8]采用多个铁芯并联方式,根据不同的电流范围来选择相对应的铁芯工作,从而降低了最小工作电流和增大线圈的工作电

流范围。文献[9]采用限流式 CT 取能法,根据电缆线路电流的大小来调节电路的阻抗,从而使得 CT 二次侧的输出功率保持相对平稳。文献[10]采用反相串联补偿线圈法,在取能线圈的基础上增加补偿线圈来解决大电流的线圈饱和问题。

文中在已经解决的技术难题基础上,基于 Jiles-Atherton 理论,通过对铁芯饱和特性的研究,合理匹配线圈,优化线圈参数,提高取能线圈的经济型。文中给出铁芯始终工作在磁化曲线非饱和区域的最优匝数计算方法,并基于此方法提出一种新的自取电电源设计方案,对取能线圈的参数和电源结构进行设计,同时考虑线圈开口对取能线圈输出功率的影响。自取电电源的无线通信模块采用卫星无线电测定业务(radio determination satellite service, 简称 RDSS),由于无线通信模块发射所需的功率较大,因此文中采用间断式工作模式,合理设置不同电流范围内无线通信模块的工作模式,扩大自取电电源的应用范围,提高电能的利用率。

1 自取电电源的设计

1.1 自取电电源整体结构设计

自取电电源由取能线圈模块和输出电路模块构成,装置总体结构如图 1 所示。

选择合适的铁芯材料、尺寸和取能线圈匝数,可以直接消除大电流下线圈深度饱和现象,使取能线圈始终工作在低功耗状态。输出电路的作用是将交流电转换为直流电,并使输出电压稳定在恒定值,以确保取电电源供电的可靠性和稳定性。

1.2 输出电路模块设计

输出电路包括冲击保护模块、整流模块、储能

收稿日期:2018-08-16;修回日期:2018-10-09

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904700)

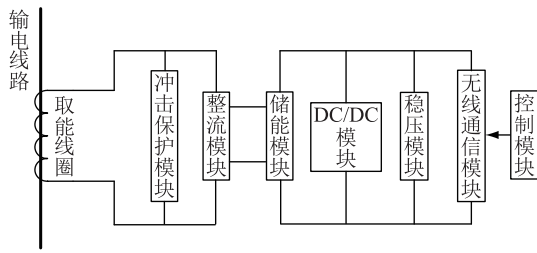


图1 自取电电源结构

Fig.1 The structure chart of self-powered supply

模块、控制模块、DC/DC 模块、稳压模块和无线通信模块。冲击保护模块确保一次侧的输电系统发生短路故障或电流超限时,自取电电源在冲击大电流下仍能正常工作;整流模块由全波整流桥组成;储能模块由电容组成,整流桥将取能线圈两端的交流电转化成直流电,在保证后续输出电路稳定工作的前提下,当输电线路上的电流较大时,取能线圈给电容充电,当输电线路上的电流较小时,电容放电,维持整个装置恒定的功率输出。在线监测设备对线路工作状态进行实时监测,测量数据通过无线通信模块进行传送;整流模块采用全波整流电路;DC/DC 模块将波动的直流电压转化成在线监测设备所需要的恒压来确保取电装置工作的可靠性;无线通信模块由 RDSS、蓝牙和通用分组无线服务技术 (general packet radio service, GPRS) 组成,蓝牙负责输电线路三相之间的数据传送,将两相的数据传送到第三相,对三相线路信息进行数据处理得到零序电流,然后通过 GPRS 或者 RDSS 发送给主机,从而实现故障区间的定位。控制模块的作用为控制无线通信模块的工作状态,实际应用中,当输电线路上的电流较小时,充电功率不足,电容电压较低,在线监测设备保留采集功能,关闭通信功能,工作在低功耗状态,待电容充电完成后,开启通信功能,从而保证自取电电源的稳定运行。

2 取能线圈的参数选取

2.1 铁磁材料的选取

为了得到较强的磁场,电流互感器的铁芯由铁、钴、镍等金属或其合金构成的铁磁材料组成,铁磁材料影响着磁导率的大小,从而决定了电流互感器励磁电流和感应电动势之间的关系。一般用磁化曲线表示铁磁材料的饱和特性^[11]。

基于 Jeils-Atherton 磁滞理论模型拟合铁磁材料的磁化曲线,奠定 Jeils-Atherton 磁滞理论模型的根本是能量守恒定律^[12-13]。该模型中,磁化强度 M 满足:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{(1-c)(M_{an}-M) + c\delta k \frac{dM_{an}}{dH}}{\delta k - \alpha(1-c)(M_{an}-M)} \quad (1)$$

$$M_{an} = M_s \left[\coth\left(\frac{H + \alpha M_{an}}{a}\right) - \frac{a}{H + \alpha M_{an}} \right] = M_s L\left(\frac{H + \alpha M_{an}}{a}\right) \quad (2)$$

$$B = \mu_0(H + M) \quad (3)$$

式中: M_s 为饱和磁化强度; M_{an} 为非磁滞函数中的磁化强度; $L(x)$ 为朗之万函数; a 为磁场能和热能的比值,反应由于热运动导致铁磁材料内部无序化的参数; α 为磁畴耦合的平均场参数; c 为可逆磁化系数; k 为能量损失系数; δ 为磁场强度 H 的方向系数,即当 $dH/dt > 0$ 时, δ 的值为 1;当 $dH/dt < 0$ 时, δ 的值为 -1 ^[14-15]; μ_0 为真空磁导率,值为常数,取 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 。

基于 Jeils-Atherton 磁滞理论模型选取铁芯的材料^[16-18]:

(1) 能量损失系数 k 要小,即对应磁化特性中的矫顽力 H_c 越小,铁磁材料的磁滞回线越窄,铁磁材料在磁化或者退磁过程更灵敏,并且由磁滞所引起的能量损失就越少。

(2) 饱和磁通强度 M_s 要大,取能线圈的二次侧感应电动势越高,充电速度越快。

(3) 磁场能和热能的比值 a 要小,矫顽力附近区域的磁导率 dB/dH 值越大,当线路周围的 H 值不变时,磁感应强度 B 的大小由铁磁材料的磁导率决定,磁导率越高, B 的值越大。

(4) 为了方便取能线圈在一次线路上进行安装,选用开合式线圈,考虑线圈开口对铁磁性能的影响。

铁磁性物质根据矫顽力的大小可以分成软磁材料、硬磁材料和矩磁材料。其中软磁材料具有矫顽力小,易磁化、易退磁、饱和磁通密度大等优点,是铁芯材料的最佳选择。

常用的软磁材料有坡莫合金、铁氧体、硅钢片、非晶及微晶合金等^[19]。坡莫合金在较弱磁场下具有较高的磁导率,但是饱和磁感应强度较低,因此多适用于高频低电压变压器。铁氧体在高频时具有较高的磁导率,但是单位体积储存的磁能较低,饱和磁化强度低,因此多适用于高频弱电领域。微晶合金具有较高的起始磁导率和饱和磁感,矫顽力较低,铁芯损失少,但是微晶铁芯的切口断面粗糙,开口后磁性能变化较大^[20],因此主要用于闭合式变压器。硅钢片是含硅量 0.5%~4.5% 的硅铁软磁合

金,具有铁损低,饱和磁感应强度高优点,同时硅钢片的开口工艺成熟,闭合后连接紧密,空气气隙小,开口后性能变化不大,因此文中选择硅钢片作为自取电电源的铁芯材料。

2.2 取能线圈匝数的选取

CT的本质是变压器,其理论模型可采用变压器模型,CT取能装置如图2所示。一次绕组为输电线路,二次绕组和输出电路模块相连。

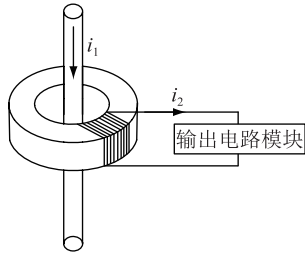


图2 取能线圈结构

Fig.2 The structure of CT

图中: N_1 为一次侧匝数(图2中 $N_1=1$); N_2 为二次侧匝数; i_1 为一次侧电流; i_2 为二次侧电流; i_0 为励磁电流。根据电磁感应原理可知:

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = N_1 i_0 \quad (4)$$

一次磁动势由两部分组成,一部分作为励磁产生主磁通 φ_m ,剩下部分用来平衡二次侧线圈感应的磁动势 $N_2 i_2$,两者数值相同,方向相反。通过线圈中的磁链发生变化时,变化的磁通感应得到的电动势(以二次侧电压 e_2 为例),依据法拉第电磁感应定律得:

$$e_2 = k_p N_2 \frac{d\varphi_m}{dt} = k_p N_2 S \frac{dB}{dt} = k_p N_2 S \frac{dB}{dH} \frac{dH}{dt} \quad (5)$$

式中: S 为磁通所穿过的面积; k_p 为叠片系数。二次侧输出电压恒定,由公式可以看出,二次侧匝数的大小决定铁芯的磁场强度和磁感应密度,即铁磁材料的工作区域。二次侧匝数越大,对应的磁场强度越小,铁芯越不容易饱和,但当二次侧输出电压恒定和一次侧电流值固定时,二次侧匝数越大,对应的二次侧感应电流越小,取能线圈的输出功率越低,充电速度越慢,因此,存在一个最优匝数,保证取能线圈工作在非饱和区域时输出功率最大,充电时间最短。

后续电路的设计目标也在于满足铁芯工作在非饱和区域时,尽可能减小匝数和扩大铁芯的电流使用范围。由于RDSS的发射瞬时功率较大,所以此过程所需的能量由电容提供,取能线圈取能的最低要求即满足后续电路的正常工作需求。在大电流时,取能线圈既提供正常工作所需的电能,又负

责给电容充电,待电容两端的电压满足发射要求时,RDSS向外发射信号,传递数据;当电流较小时,取能线圈主要提供正常工作所需的电能,此时降低RDSS的发射频率,同时电容也负责对后续电路进行供电。

文中选取27ZH110型号硅钢片作为铁磁材料生产的铁芯,由实验和仿真得到其对应的Jiles-Atherton磁滞理论模型参数如下: a 为8, M_s 为 1.6×10^6 A/m, $K=k/\mu_0=12$ A/m, α 为 8.682×10^{-7} , c 为0.01,用Matlab软件拟合得到27ZH110型号硅钢片的磁化曲线,如图3所示。

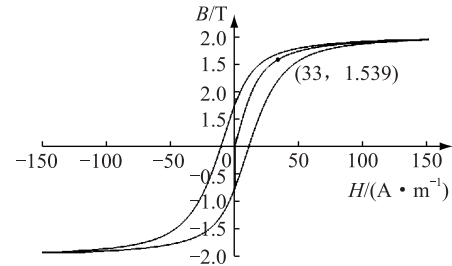


图3 27ZH110硅钢片磁化曲线

Fig.3 Magnetization curve of Nippon Steel 27ZH110 silicon steel sheet

饱和区域的特点为当铁磁材料的磁通密度 B 大于某一特定的数值 B_s 后,随着磁场强度 H 的变化,磁通密度 B 变化的能力大大降低,称 B_s 为磁芯的饱和磁通密度。文献[21]中电流互感器选择及设计导则中对饱和磁通密度 B_s 的值给出了如下定义:铁磁材料由非饱和状态向完全饱和状态转变时的磁通密度值,认为其是在铁磁材料的 $B-H$ 特性曲线上,磁通密度 B 值上升10%而磁场强度 H 值上升50%的那一点对应的磁通密度为 B_s ,磁场强度为 H_s 。电流互感器若想满足始终工作在非饱和区域内,铁磁材料的磁场强度必须小于 H_s 。计算可得27ZH110型号硅钢片的 H_s 为33 A/m, B_s 为1.539 T。

为了安装方便,取能线圈采用开合式铁芯,由安培环路定理得:

$$N_1 i_0 = H_\delta L_\delta + H_{Fe} L_{Fe} \quad (6)$$

式中: L_δ 为气隙宽度; L_{Fe} 为铁芯的等效磁路。由式(6)可得,励磁电流 i_0 可以看作由两部分组成,一部分 i_{01} 对应气隙磁路,另一部分 i_{02} 对应铁芯磁路, i_{02} 与 H_{Fe} 呈一次线性关系,因此可以通过判断 i_{02} 大小,来判断铁芯的工作区域。为了保证铁芯工作在非饱和区域,励磁电流的值需满足 $i_{02} < i_{0max} = H_s L_{Fe}$ 。

当取能线圈二次侧电压值恒定时,基于Jiles-Atherton磁滞理论模型计算仿真得到所需的励磁电流波形,调节二次侧匝数值,得到刚好满足铁芯工作在非饱和区域的最优匝数。其详细流程见图4,

其中, E 为一次侧线圈两端的电压最大值, N_{num} 为迭代次数。

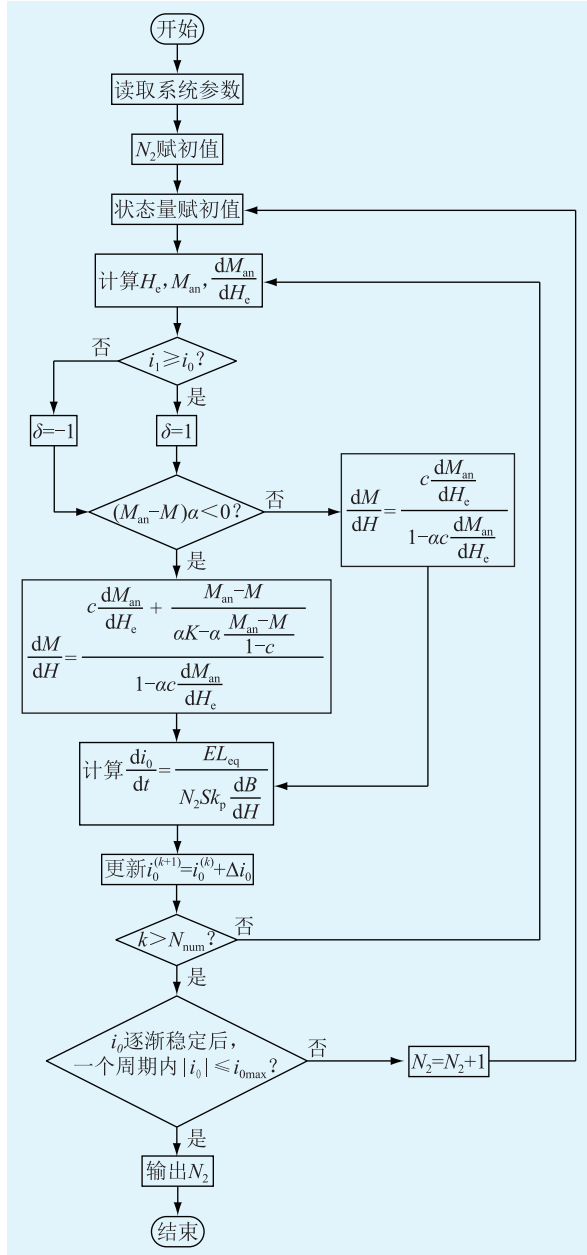


图4 基于 Jiles-Atherton 磁滞理论的最优匝数计算流程

Fig.4 The flow chart of optimal turns calculation based on Jiles-Atherton hysteresis theory

选取铁芯尺寸内径 d_1 为 40 mm, d_2 为 64 mm, h 为 40 mm。计算得到此时线圈工作在非饱和区域的最大励磁电流为:

$$i_{0max} = H_s L_{Fe} = H_s \frac{\pi(d_2 - d_1)}{\ln(d_2/d_1)} = 5.28 \text{ A} \quad (7)$$

取能线圈二次侧电压值固定为 5.6 V (电容两端电压 5 V + 二极管导通压降 0.6 V), 利用 Matlab 软件计算一次侧电流为 700 A 时的最优匝数。设定气隙宽度 L_δ 在 0~0.5 mm 变化, 由于气隙磁阻的存在,

需要消耗额外的功率, 使得线圈的输出功率降低, 最优匝数 N_{2best} 和气隙消耗的功率 P_δ 如表 1 所示。

表 1 不同气隙宽度下的最优匝数和气隙功率

Table 1 Optimal turns and power losses considering the different widths of air gap

L_δ / mm	N_{2best}	P_δ / W
0	124	0
0.000 1	122	0.001
0.001	118	0.012
0.01	110	0.122
0.1	110	1.215
0.5	110	2.138

表 1 中气隙宽度由 0 增加到 0.5 mm, 最优匝数变化缓慢, 呈减少趋势, 气隙的存在使得铁芯越不容易发生饱和, 但随着气隙宽度的增加, 由于气隙存在造成的功率损耗显著增加, 因此开合式线圈在生产时, 需要尽可能的减小气隙宽度, 从而降低气隙所消耗的功率。

搭建如图 5 所示的仿真电路图, 选择 Pspice 软件对非线性铁芯进行仿真研究, 使用 Model Editor 功能改变非线性铁芯 $B-H$ 曲线参数, 存在气隙时, 铁芯工作在非饱和区域, 气隙存在时, 铁芯仍能稳定工作在非饱和区域, 因此仿真时设定气隙宽度为 0, 仿真得到稳定后励磁电流 i_0 的波形如图 6 所示。

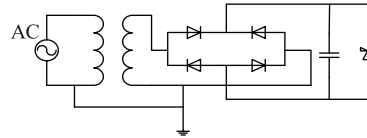


图 5 自取电电源仿真电路

Fig.5 Simulation circuit diagram of self-powered supply

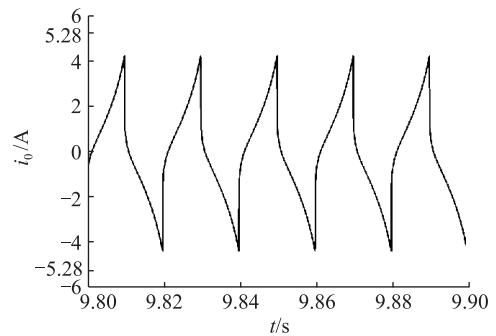


图 6 电流为 700 A 时, 铁芯的励磁电流仿真波形

Fig.6 The waveforms of transformer excitation current when i_1 is 700 A

从图 6 看出, 励磁电流满足 $i_0 < i_{0max}$, 一次侧电流在 700 A 的范围内时, 均能保证铁芯工作在磁化曲线的非饱和区域, 实现低能耗的要求。

3 应用实例

考虑到投运的配电线路很少轻载,10 kV 架空线最大载流量不超过 700 A,选取 60~700 A 作为线路上流过的负荷电流进行讨论,若实际中电流范围发生变化,可相应的调节取能线圈的体积和匝数。RDSS 正常工作时,接收一直进行,RDSS 的接收功率为 1.2 W,蓝牙、GPRS 和进阶精简指令集机器(advanced RISC machine, ARM, 功能为处理采集数据)的最大工作功率均为 0.4 W,因此文中所设计的自取电电源正常工作的电流范围为 60~700 A,输出功率为 2.4 W 时可满足后续输出电路模块的正常工作。

设计时,DC/DC 模块输入端的电压范围为 3.5~5 V,输出端的电压为 5 V。当线路上流经的电流小于 60 A 时,在线监测设备工作在低功耗状态,取能线圈给电容充电,电容两端电压达到 5 V 时,开启在线监测设备的通信功能(即 RDSS 的发射功能),然后关闭通信功能,电容继续充电直到电容两端电压上升到 5 V。当线路上流经的电流为 60~700 A 时,在线监测设备对输电线路进行实时监测,采集得到的数据处理后通过 RDSS 向主站台发送,RDSS 每分钟发射一次,发射功率为 10 W,发射持续时间为 0.25 s,由于 RDSS 在发射过程中需要的瞬时功率较大,因此采用电容给 RDSS 供电。在计算电容值时,也需考虑当线路电流小于 60 A 时,自取电电源的输出功率由电容提供。

后续电路按功率特性可等效看作恒功率元件,电容大小需满足以下不等式:

$$\begin{cases} \int_{U_0}^{U_c} -u_c du_c = \int_0^{0.25} \frac{12.4}{C} dt \\ U_0 = 5 V \quad U_c \geq 3.5 V \end{cases} \quad (8)$$

求解得到 $C \geq 0.5$ F,考虑裕度和材料获取的难易程度,选取电容值大小为 4 F,电容两端的耐压值为 5.5 V。

实际应用中为了避免铁芯体积太大,架空线负重太多,铁芯较多采用内径 d_1 为 68 mm,参照文献[22],环形铁芯的尺寸推荐采用 d_2/d_1 为 1.25,计算得到外径 d_2 为 85 mm。铁芯高度 h 满足 $0.2 \leq h/d_1 \leq 1.25$,即满足 $13.6 \text{ mm} \leq h \leq 85 \text{ mm}$ 。设计要求当一次侧电流为 60 A 时,在线监测设备能够实时监测,电容两端的电压范围为 3.5 V~5 V,即取能线圈需要满足当一次侧电流为 60 A,电容电压为 3.5 V 时,输出功率达到 2.4 W。北京某公司生产的开合式线圈,气隙宽度为 0.03 mm 左右,仿真得到气隙功

率为 0.65 W,因此开合式取能线圈的输出功率修正为 3.1 W。

根据输出功率的要求来设计铁芯的高度 h 。输出功率为:

$$p_2 = i_2 u_2 \quad (9)$$

改变铁芯高度,通过 Matlab 仿真计算取能线圈的最优匝数,同时得到取能线圈输出功率的有效值与一次侧电流的关系如图 7 所示。其中,68 表示内径,85 表示外径,40~60 表示高度,54~80 表示功率为 3.1 A 时所需的一次侧电流大小。

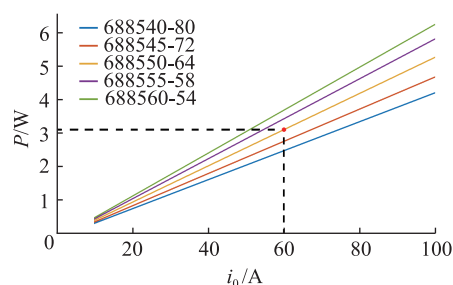


图 7 一次侧电流与输出功率

Fig.7 The current and output power at primary side

一次侧电流与输出功率呈一次线性关系,同时高度越高,一次侧电流值相同时,输出功率越大。当一次侧电流为 60 A 时,输出功率为 3.2 W,选取铁芯的高度 h 为 50 mm。

结合输出电路的整流模块和储能模块进行实验,调节一次侧电流从 30 A 到 60 A 变化,得到取能线圈的输出功率值,通过实际测量计算可知由于气隙存在造成的功率损耗为 0.7 W,对实验得到的输出功率值进行修正,修正后的输出功率与 Matlab 计算结果对比如图 8 所示,实验结果和理论计算结果差别不大,当一次侧电流为 60 A 时,取能线圈的输出功率为 2.48 W,符合设计要求。

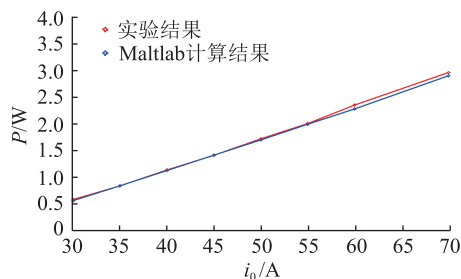


图 8 实验结果与 Matlab 计算结果对比

Fig.8 Comparison between experimental and simulation results

结合输出电路的无线通信模块进行实验,调节一次侧电流为 53 A,当电容两端电压上升到 4.76 V 时,开启 RDSS 发射功能,RDSS 能正常工作传送数

据,电容两端的电压从 4.76 V 下降到 4.37 V,满足 DC/DC 模块的工作范围,装置仍能稳定工作。

4 结语

文中设计的自取电电源装置以开合式线圈作为取能线圈,采用间断式工作模式。方案基于 Jiles-Atherton 磁滞理论模型,同时考虑了气隙对取能装置输出功率的影响,合理选择了取能装置的最优匝数和工作模式,从而有效降低取能线圈体积,提高取能装置的经济性。文中以 10 kV 输电线路为例,无线通信模块采用 RDSS,通过仿真和实验验证表明:取能线圈能够稳定工作在非饱和区域,当一次侧电流范围在 60~700 A 时,输出功率达到 2.4 W。对于其他电压等级的输电线路,可以参考该方法进行相关设计。

参考文献:

- [1] 李滨,杜孟远,祝云,等. 基于准实时数据的智能配电网状态估计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1):34-44.
LI Bin, DU Mengyuan, ZHU Yun, et al. A state estimator for smart distribution networks with quasi-real time data [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 34-44.
- [2] 沈兴来,杨智. 基于故障全信息的自适应模糊融合选线技术[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6):90-95.
SHEN Xinglai, YANG Zhi. A self-adapted fault line selection method based on complete data fusion theory [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6):90-95.
- [3] 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(8):113-119.
LUO Yiping, ZENG Xiangjun, LEI Yongping, et al. High voltage electric-field induction energy-acquisition technology based on discharge method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(8):113-119.
- [4] 龚贤夫,周浩,戴攀,等. 一种输电线路大功率取能电源的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 124-128.
GONG Xianfu, ZHOU Hao, DAI Pan, et al. A design of high-power supply installed on transmission lines [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 124-128.
- [5] 丁志刚,胡钰林,周华良,等. 一种新型变流器式取能电路[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12):109-113.
DING Zhigang, HU Yulin, ZHOU Hualiang, et al. A novel converter draw-out power circuit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12):109-113.
- [6] 褚强,李刚,张建成. 一种基于超级电容的输电线路在线监测系统电源设计[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 152-157.
CHU Qiang, LI Gang, ZHANG Jiancheng. Power supply of transmission line online monitoring system based on super-capacitor [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3):152-157.
- [7] 赵强松,陈宝林,叶永强,等. 基于五级电荷泵能量收集的电流互感器取能电源[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 118-123.
ZHAO Qiangsong, CHEN Baolin, YE Yongqiang, et al. A current transformer energy-obtaining power supply based on five-level charge pump circuit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15):118-123.
- [8] 谢志远,毕亭亭,李亚康,等. 高压输配电线路低下限死区感应取能电源的研究[J]. 电子技术应用, 2016, 42(1): 126-128.
XIE Zhiyuan, BI Tingting, LI Yakang, et al. Research of high voltage transmission line induction power supply with low limit deadband [J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(1):126-128.
- [9] 刘亚东,盛戈峰,王又佳,等. 基于功率控制法的电流互感器取电电源设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3):70-74.
LIU Yadong, SHENG Gehao, WANG Youjia, et al. Current transformer draw-out power supply design based on power-controlled method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3):70-74.
- [10] 宋娇. 配电网智能设备取能电源设计[D]. 济南:济南大学, 2014.
SONG Jiao. The design of energy-get power supply for intelligent equipment in distribution network [D]. Jinan: University of Jinan, 2014.
- [11] 杨志强,陈卫. 电流互感器铁心剩磁测量方法研究[J]. 电力工程技术, 2018,37(3):38-42.
YANG Zhiqiang, CHEN Wei. Research on the method of measuring residual flux in the core of current transformer [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018,37(3):38-42.
- [12] 王洋,刘志珍. 基于蛙跳模糊算法的 Jiles Atherton 铁心磁滞模型参数确定[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 154-161.
WANG Yang, LIU Zhizhen. Determination of Jiles Atherton core hysteresis model parameters based on fuzzy-shuffled frog leaping algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4):154-161.
- [13] 李超,徐启峰. J-A 模型误差修正和温度特性仿真[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9):232-238.
LI Chao, XU Qifeng. Error modification and temperature simulation of J-A model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9):232-238.
- [14] LEDERER D, IGARASHI H, KOST A, et al. On the parameter identification and application of the Jiles-Atherton hysteresis model for numerical modelling of measured characteristics[J]. Magnetics IEEE Transactions on, 1999, 35(3): 1211-1214.
- [15] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Applied Physics, 1984, 55(6):2115-2120.
- [16] 李晓萍,彭青顺,李金保,等. 变压器铁芯磁滞模型参数辨识[J]. 电网技术, 2012, 36(2):200-205.
LI Xiaoping, PENG Qingshun, LI Jinbao, et al. Parameter i-

- dentification of hysteresis loop model for transformer core [J]. Power System Technology, 2012, 36(2):200-205.
- [17] 李建标,司马文霞,孙廷玺,等. 基于 Jiles-Atherton 磁滞理论的"三相五柱"变压器中低频电磁暂态模型研究[J]. 广东电力,2017,30(2):65-69.
LI Jianbiao, SIMA Wenxia, SUN Tingxi, et al. Research on low-frequency electromagnetic transient model in three-phase five-legged transformer based on Jiles-Atherton hysteresis theory[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2):65-69.
- [18] 杨汾,王豹. 基于 PSCAD V4.6 考虑磁滞的变压器模型[J]. 广东电力,2017,30(6):67-72,85.
YANG Fenyan, WANG Bao. Transformer model considering hysteresis based on PSCAD V4.6 [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(6):67-72, 85.
- [19] 刘亚丕. 软磁铁氧体材料性能与器件性能之间的关系及其测试技术进展[J]. 电气技术, 2010(5):25-32.
LIU Yapi. Connections between material properties and device properties of soft magnetic ferrite and advance in measuring these two properties [J]. Electrical Engineering, 2010(5):25-32.
- [20] 岳天琛,刘亚东,何志菴,等. 感应取能电源磁芯功率输出特性研究[J]. 高压电器, 2015(1):18-23.
YUE Tianchen, LIU Yadong, HE Zhimin, et al. Power output characteristics of magnetic core in CT energy harvesting devices [J]. High Voltage Apparatus, 2015(1):18-23.
- [21] 袁季修. 电流互感器和电压互感器选择及计算导则[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
YUAN Jixiu. The guide for selection and calculation of current transformers and voltage transformers [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [22] 王全保. 新编电子变压器手册[M]. 北京:辽宁科学技术出版社, 2007.
WANG Quanbao. New electronic transformer handbook [M]. Beijing: Liaoning Science and Technology Press, 2007.

作者简介:



张璐路

张璐路(1995),女,硕士在读,研究方向为大规模电力储能、配电网单相接地故障、电力市场等(E-mail: zhanglulu302@163.com);

李斌(1994),男,硕士在读,研究方向为大规模电力储能、配电网规划、液压传送机构等(E-mail: 18612332968@163.com);

权超(1993),男,硕士在读,研究方向为大规模电力储能、综合能源系统规划等。

The number of coil turns for self-powered supply on transmission lines based on hysteresis characteristics

ZHANG Lulu¹, LI Bin¹, QUAN Chao¹, ZHENG Jian², JIANG Tong¹, DONG Xiaofeng³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Xuji Croup Corporation, Xuchang 461000, China; 3. State Grid Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China)

Abstract: In order to optimize the self-powered supplies on transmission lines, including reducing the volume of the energy power coil and improving its economy, the optimal number of coil turns for self-powered supply is studied. Based on the Jiles-Atherton hysteresis theory, the hysteresis characteristics of the energy power coil are simulated to select the suitable coil material. Furthermore, the calculation method for the optimal number of coil turns, which can make the coils stably work in the unsaturated region, is proposed. Considering installation convenience, open-close coil is used and the influence of its air gap width on the optimal number of coil turns is discussed. The calculation results show that air gap causes the decrease of optimal turn optimal number of coil turns. However, power loss caused by air gap increases significantly with the increase of air gap width, so the air gap width should be reduced as much as possible. Finally, the effectiveness of the design scheme is verified by simulations and experiments.

Keywords: self-powered supply; magnetic core saturation; open-close power supply coil; parameter match

(编辑 方晶)