

取能电源线圈气隙宽度与感应电压的计算方法

林杰 林思豪

国家电网福建省电力有限公司厦门供电公司, 福建 厦门 361000

[摘要]为解决输电线路高压侧在线监测系统的供电问题, 研制了一种通过引入气隙磁阻来减小线圈的饱和程度的新型取能线圈。通过研究气隙宽度对线圈饱和程度的影响, 对相应的曲线进行分段等效处理, 提出了一种关于气隙宽度与线圈感应电压的计算模型。根据取能线圈的无气隙时的特性, 运用计算模型获得线圈增加一定的气隙宽度后, 输出感应电压的变化范围, 同时笔者也提出了增加气隙后线圈磁饱和点电流值大小计算的一种方法, 为实际的调试过程提供一定的理论依据。通过试验平台验证算法的准确性, 结果表明计算方法精确度较高。

[关键词]取能电源; 气隙磁阻; 计算模型; 磁饱和点

DOI: 10.33142/aem.v3i12.5163

中图分类号: TM452

文献标识码: A

Calculation Method of Air Gap Width and Induced Voltage of Energy Taking Power Supply Coil

LIN Jie, LIN Sihao

Xiamen Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Xiamen 361000, Fujian

Abstract: In order to solve the power supply problem of on-line monitoring system at high voltage side of transmission line, a new energy taking coil is developed to reduce the saturation degree of the coil by introducing air gap magnetoresistance. By studying the influence of air gap width on coil saturation, the corresponding curves are treated by subsection equivalence, and a calculation model of air gap width and coil induced voltage is proposed. According to the characteristics of the energy taking coil without air gap, the variation range of the output induced voltage after the coil increases a certain air gap width is obtained by using the calculation model. At the same time, the author also puts forward a method to calculate the current value of the magnetic saturation point of the coil after increasing the air gap, which provides a certain theoretical basis for the actual commissioning process. The accuracy of the algorithm is verified by the experimental platform, and the results show that the accuracy of the calculation method is high.

Keywords: energy extraction power supply; air gap magnetoresistance; calculation model; magnetic saturation point

引言

随着国家智能电网工作的展开及输电线路等级的不断提高, 对输电线路的安全运行在线监测显得尤为重要, 在线监测系统的电源是监测系统实用化的一个关键问题^[1]。目前常应用的供电方式主要有太阳能供电^[2-3]、母线感应取能^[4]、激光供能^[5]等。由于在线监测系统需要长期工作在架空线上, 需要长期免维护。太阳能供电和激光供能虽然供电能源来自电网外部, 不受电网干扰, 但是受光转换效率低限制, 且成本高, 目前无法普遍使用^[6]。母线感应取能即在导线上套取能线圈将导线能量转换到二次侧, 实现隔离式供电, 可靠性高, 使用性强, 是目前最有前景的供电方式。对高压侧装置供电电源的研究具有重要的实用价值。

在目前市场上通过切割磁力线从而从输电导线中获取电源的装置中, 为避免线圈磁通出现过度饱和的情况, 通过加入二次控制电路、线圈补偿等调节方式, 这样做使得装置的电路复杂化, 由于设备零部件增加, 从而增加了设备故障的概率。笔者在对市面上不同品牌的电力线路在线监测设备的电源模块的进行产品实验时发现, 随着线路载流量增加, 设备先后出现不同程度的振动, 分析原因可能是由于电源模块的磁通出现过度饱和的情况, 线圈铁芯损耗增加, 从而导致线圈不规则振动。同时, 在一些文献中提到引入一定程度的气隙磁阻可以缓解磁场饱和和导致的线圈振动, 一定程度上提高了线圈饱和零界点。因此通过增加气隙后引起线圈特性改变和磁场饱和点的确定存在一定的可行性, 但由于多数文献只是提出了气隙磁阻的影响而未提出相应的计算方法, 在实际应用中, 存在一定的理论空缺。

针对此问题, 笔者在通过大量实验的基础上得出了, 根据无气隙条件下电源的特性可以得出增加气隙后电源输出电压的变化, 并提出了一种计算增加气隙后电源饱和点的计算方法。可以根据不同实际要求及不同的电流范围, 为实验中合理的选择气隙宽度, 降低电源的饱和程度, 减少磁损耗, 提供一定的理论依据。

1 感应取能电源的工作原理

导线感应取能电源的方式就是利用电磁感应原理, 通过切割磁力线, 使得闭合线圈从高压母线上感应出交流电压,

后续经过一系列整流器、稳压器等进而为设备提供电源。根据电磁感应理论，将感应线圈类比成小型变压器，在变压器二次侧端空载情况下，变压器的一次侧由工频交流电流控制，假设二次侧输出电压有效值为 U_2 ：

$$U_2 \approx E_2 = 4.44fN_2 \varphi_m \quad (1)$$

式中， E_2 为二次侧感应电动势的有效值； f 为频率，通常为 50Hz； N_2 为二次侧线圈匝数； φ_m 为磁通量。

$$\varphi_m = B_m S \lambda \quad (2)$$

式中， B_m 为磁感应强度的幅值； S 为铁芯截面积； λ 为铁芯叠片系数。由安培环路定律

$$H_m l = \sqrt{2} N_1 I \quad (3)$$

式中， H_m 为磁场强度幅值； l 为平均磁路长度， I 为励磁电流，空载情况下等于一次侧导线电流， N_1 为一次侧匝数，这里取 1。磁感应强度幅值与磁场强度幅值的关系为

$$B_m = \mu_0 \mu_{Fe} H_m \quad (4)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (5)$$

式中， μ_0 为真空磁导率，取 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ； μ_r 为相对磁导率， μ 为磁导率。

根据磁性材料的磁化曲线，大致可将其分为：起始区、线性区、趋近饱和区、饱和区。由于磁化曲线的初始范围相对较短，因此，可以把初始范围跟线性区域同时考虑，在起始区和线性区，磁感应强度 B 都随磁场强度的增大而增大，且近似成线性关系，比例系数为磁导率，有磁性材料的这个性质可得在取能线圈在电流一定的范围内，感应电压随电流成线性关系，但是当电流增加到一定的程度，随着电流的增大，感应电压 U_2 也不随之增大。当线圈的磁通超过饱和临界点时，二次侧所感应出的电压波形将不在与一次侧一样有线性关系，波形类似成为尖顶波。同时，由于磁通饱和导致感应电压的瞬时值指数性增大，对取能装置后续元器件的耐压和绝缘性能提出了更高的要求，同时也会导致铁芯的损耗增加，转换效率低，线圈会震动，温升较高有可能烧坏铁芯。因此确定线圈增加的气隙宽度，提高线圈的耐饱和特性，并确定线圈的饱和点，防止线圈长时间工作在饱和区具有重要的意义。

2 不同气隙宽度感应电压及相应饱和点的计算

2.1 对线圈的 $U-I$ 关系曲线进行模型简化

将线圈的特性曲线，进行简化处理，将起始区规划到线性区内，于是将等效为：线性区、趋近饱和区、饱和区三个部分。由于大部分的电源工作在线性区，下面主要对线性区进行分析。

(1) 无气隙线性区：

$$U_2 \approx E_2 = 4.44fN_2 \varphi_m \quad (6)$$

$$\varphi_m = B_m S \lambda \quad (7)$$

安培环路定理：

$$H_m l = \sqrt{2} N_1 I \quad (8)$$

$$B_m = \mu_0 \mu_{Fe} H_m \quad (9)$$

则取能电源线圈未增加气隙时在线性区时二次侧感应电压为：

$$U_2 \approx E_2 = 4.44fN_1 N_2 \mu_0 \mu_{Fe} S l \frac{\sqrt{2}}{l} \lambda \quad (10)$$

(2) 增加气隙后的线性区电压:

$$U_2 \approx E_2 = 4.44fN_2\varphi_m \quad (11)$$

$$\varphi_m = B_m S \lambda \quad (12)$$

安培环路定理:

$$H_\delta l_\delta + H_{Fe} l_{Fe} = \sqrt{2} I \quad (13)$$

$$B_m = \mu_0 \mu_{Fe} H_{Fe} = \mu_0 \mu_\delta H_\delta \quad (14)$$

则二次侧感应电压为:

$$U_2 = 4.44fN_2 \mu_0 \mu_{Fe} S I_m \frac{\sqrt{2}}{\mu_{Fe} l_\delta + l_{Fe}} N_1 \lambda \quad (15)$$

当电流位于线性区时上式可等效为:

$$U_2 \approx E_2 = 4.44fN_2 \mu_0 \mu_{eq} S I \frac{\sqrt{2}}{l} \quad (16)$$

$$\mu_{eq} = \frac{1}{\mu_\delta} \quad (17)$$

式中, l 为平均磁路长度, l_δ 为气隙宽度, l_{Fe} 为铁芯的磁路长度, $\mu_\delta = 1$ 。

2.2 铁芯磁饱和点的确定

取能电源线圈磁饱和点的确定要借助于未增加气隙线圈的一次侧电流与二次侧感应电压的关系, 同时也需要铁芯材料的饱和磁感应强度, 由于铁芯的磁导率是变化的, 当铁芯接近于饱和的时候, 铁芯的相对磁导率已经非常趋近于零, 此时可以近似的认为铁芯处于磁饱和状态。

$$H_m l = \sqrt{2} N_1 I \quad (18)$$

$$B_m = \mu_0 \mu_{Fe} H_m \quad (19)$$

由上述两个公式可以计算出, 铁芯趋于饱和时的磁导率 μ_{Fe} , 由于增加气隙后, 气隙的宽度相对铁芯的有效宽度是很小, 因此铁磁材料仍然是决定饱和磁感应强度的主要因素, 因此可认为增加气隙后 B_m 和 μ 是不变的, 对应的式 (18) 中的 I 值可以从未增加气隙的 U-I 关系曲线中获得。

$$H_\delta l_\delta + H_{Fe} l_{Fe} = \sqrt{2} I \quad (20)$$

$$B_m = \mu_0 \mu_{Fe} H_{Fe} = \mu_0 \mu_\delta H_\delta \quad (21)$$

由上述两个式子可以计算出增加气隙后线圈磁饱和点的 I_m 值。

2.3 线圈增加气隙后相对于未增加气隙二次侧感应电压差值 ΔU 的计算方法。

通过对取能线圈的 U-I 关系曲线的分析可以得出,

$$(1) 0 < I < I_1$$

$$\Delta U = 4.44fN_2u_0SI\sqrt{2}\lambda N_1 \left(\frac{\mu_{Fe}}{1} - \frac{1}{l_g} \right) \quad (22)$$

(2) $I_1 < I < I_m$

$$U < \Delta U < 4.44fN_2u_0SI\sqrt{2}\lambda N_1 \left(\frac{\mu_{Fe}}{1} - \frac{1}{l_g} \right) \quad (23)$$

(3) $I > I_m$

$$\Delta U = U \quad (24)$$

$$U = U_0 - 4.44fN_2u_0\mu_{Fe}SI_m \frac{\sqrt{2}}{\mu_{Fe}l_g + l_{Fe}} \lambda N_1 \quad (25)$$

式中, I_1 为无气隙的线性区截至点, I_m 为增加气隙后的饱和点, U_0 为无气隙二次侧电压饱和值。

3 实验分析与验证

3.1 理论计算与仿真

对于取能线圈材料的选择,从磁感应强度、初始磁导率、最大磁导率、叠片系数进行对比,最终选择铁基纳米材料。在实例中所用电源的材料为铁基纳米材料,由表可获知取能电源线圈的基本参数,选定铁基纳米材料的矩形铁芯磁路长=57.5mm,宽=42.5mm,高度h=32mm,则平均磁路长度 $l \approx (57.5+42.5) \times 2 = 200\text{mm}$ 选定二次侧线圈的匝数为60匝,分别计算 l_g 为0.64mm和0.48mm及0.32mm宽的气隙相应的数据。

由实际测得的数据绘制对应的U-I曲线图,如图2所示,由图可以得出,线性区的截止点约为120A,及取能电源线圈的饱和点为500A。

(1)在线圈未增加气隙时的线性区内,运用公式(21)进行计算,将上述的相应的数值代入式(22)可以得 $\Delta U = 0.04394I$,可以将无气隙线性区截至点120A代入公式可以得, $\Delta U = 5.28\text{V}$ 。

(2)当电流的值超出无气隙的线性区截止点且没有进入增加气隙后电源线圈的饱和区时,需要求出增加一定的气隙后线圈的近似电流饱和值。则需要用到未增加气隙时的电源线圈的饱和值,根据已知,可以取未增加气隙时电源线圈的饱和值为500A,则由安培环路定律(17)和(18)可得,

$$\mu_r = u_0\mu_{Fe} = \frac{B_m l}{\sqrt{2}I} \quad (26)$$

根据已知的条件可以求得 $\mu_r = 3.93 \times 10^{-4}$,可知此时 μ_r 已经非常接近于0,线圈已经饱和。

增加了气隙后,由安培环路定律即式(20)和(21),同时由于饱和时的 $B_m = 1.25\text{T}$, $\mu_r = 3.93 \times 10^{-4}$, $\mu_s = 1$,可以求出,饱和时的 $I_m = 950\text{A}$,此时可以求出加入一定宽度的气隙后,线圈饱和时感应电压的饱和值。由式(15),将 I_m 及 μ_{Fe} 代入可得,此时的饱和值 $U_2 = 9.23\text{V}$ 。则可以的得出在此区间,电压变化的差值可近似为: $0.77\text{V} < \Delta U < 5.28\text{V}$ 。

(3)当电流值已经进入增加气隙后线圈的曲线的饱和区时,此时可认为二次侧的电压是不变的,则对应的差值是一个恒值。即 $\Delta U = 0.77\text{V}$ 。

用同样的方法可以计算出增加宽度为0.48mm的气隙线性区截止点相对于未增加气隙的差值为4.49V,求出此时饱和点的电流值为787A,也可以求出增加0.32mm宽的气隙线性区截至点相对于未增加气隙的差值为3.11V,饱和点的电流值约为675A。

3.2 试验验证

建立试验平台如图所示,调压器一端接220V工频交流电,另一端通过升流器连接架空导线LGJ-241/30。通过调节调压器,可以对架空线路,加载不同大小的电流测量装置启动电流以及饱和电流。

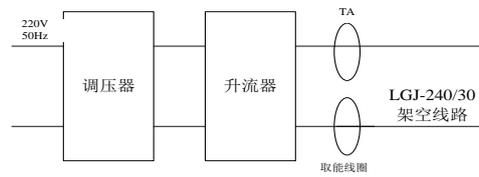


图3 试验平台示意图

对取能电源线圈的感应电压进行空载实验，由不同气隙宽度所获得数据绘制成的图像如下图所示。

从实际测得的曲线中可以看出感应取能电源线圈增加了一定宽度的，线圈感应电压的幅值会下降。气隙后会使得曲线的线性区相应的增长，线圈达到饱和所需的励磁电流也相应的增大，在实际的运用中有很重要的意义。

由表 2 可知，实验测出的无气隙时感应电压为 7.98V，增加了 0.64mm 的气隙后的感应电压为 2.519V，则对应的实际的 ΔU 为 5.46V，而理论值为 5.28V，误差为 0.18，误差为实际值的 3.3%，同样情况下增加 0.48mm 宽度的气隙的感应电压为 3.024V，则对应的实际 ΔU 为 4.95V，而理论值为 4.49V，误差为 0.46，误差为实际值的 9.3%。

表 2 不同气隙宽度的数据对比图

气隙宽度 (mm)	0.32	0.48	0.64
理论值 (V)	3.11	4.49	5.28
实验值 (V)	3.99	4.95	5.46
差值 (V)	0.88	0.46	0.18
饱和点电流值 (A)	675	787	950

在上述三种不同的气隙宽度下，二次侧感应电压相对未增加气隙的情况下的 ΔU 的理论计算值结果接近于实际结果，由于气隙磁阻增大导致线圈磁路中的漏磁通不断增加，从而使得二次侧的感应电压的有效值较低的情况。同时公式在推导的过程中也存在着一些近似的计算，也会相应导致产生了误差。

4 结论

为了优化在线取能电源，在线圈中引入气隙磁阻，线圈感应电压的值会下降，同时线圈达到饱和的电流值也相应的增大，解决了感应取能电源在大电流情况下线圈过度饱和的问题。通过对曲线的分析引入数学模型，并进行了定量的分析与计算，最后通过加入不同气隙宽度的实验对算法进行了验证。

在理论值与实际值的对比过程中，取对应 U-I 图中的线性区截止点进行计算，若对应增加 0.64mm 的气隙，则相对于未增加气隙时感应电压的差值的理论值为 5.28V，实际测得为 5.46V，误差为 0.18V，为实际值的 3.3%，为而算出的线圈饱和时的电流值为 950A，若增加 0.48mm 宽的气隙，理论值为 4.49V，实际值为 4.95V，误差为 0.46，为实际值的 9.3%，计算出的线圈饱和的电流值为 787A，都与实际情况也非常接近，因此确定线圈饱和点的算法也比较准确，能够为在线取能电源在实际的操作中提供一定依据。

[参考文献]

- [1] 李先志, 杜林, 陈伟根, 等. 输电线路状态监测系统取能电源的设计新原理[J]. 电力系统自动化, 2008(1): 76-80.
- [2] 钱政. 有源电子式电流互感器中高压侧电路的供能方法[J]. 高压电器, 2004(2): 135-138.
- [3] 唐旭晖, 完保娟, 张景超, 等. 光电电流互感器高压端供能电源的设计[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 123-125.
- [4] 刘丰, 高迎霞, 毕卫红. 电子式电流互感器高压侧供能方案的研究[J]. 高电压技术, 2007(7): 72-75.
- [5] 段雄英, 吕斌, 邱红辉. 高压 ECT 中激光供能电源的设计[J]. 高压电器, 2006(6): 428-431.

作者简介: 林杰 (1988-) 男, 毕业于华南理工大学, 学历: 硕士研究生, 专业: 电气工程及其自动化, 现就职于国网福建省电力有限公司厦门供电公司供电服务指挥中心, 配调技术员。