

[电线电缆]

新型配网电缆沟状态检测 供电装置

文/深圳供电局有限公司 张升平 张鹏飞 陈雷 华卫达 高亮

通过研究电缆表面振动能/电能转换装置，优化设计了基于振动至电能能量转换的微型能量收集模型。通过对定子绕组及尺寸设计，针对模型整体建立了磁场分析及负载状态分析。依据仿真分析及模型优选参数，搭建了实际试验平台，解决了电缆沟在线监测装置取电难问题。

随着城市化以及城市电网的发展，因电力电缆不占用地上空间，供电可靠，电击的可能性小，分布电容大及维护工作量小等优点，已经成为国内输电线路的动脉。线路运行的可靠性及智能控制的要求更加严格，电缆沟内部供电困难，常见的远端供电不仅敷设困难，更给后期检修带来隐患。电缆沟内分布温度采集、气体采集等传感器的安装受供电方式的制约。因此，研究新型的电缆沟内部供电方式是配电电缆状态感知的前提及关键环节。

现有电缆沟监测设备的供电方式主要有以下几种：①太阳能供电与锂电池结合供电，该组合方式被广泛推广，然而由于太阳能供电受制于天气及日照强度，其电源输出性能波动性较大，供电可靠性低。②激光供电，该供电方式具有电气隔离性好，适用范围广等优势，可将高压侧与低压侧完全隔离，然而激光供电装置仍不成熟，转换效率较低，装置使用寿命较短。③感应取电装置，感应取电装置一般安装在电缆中间头位置，通过电磁感应进行取电，电源用于电缆终端头温度监测装置的电能。取能之后经锂电池储存并经整流、滤波及稳压后提供给监测装置。

本文基于振动至电能的转换模型，提出了一

种新型电缆振动发电装置，装置为电缆故障监测提供电源。通过优化模型定子排列设置、定子绕组等参数提高振动电能转换模型输出效率。本文建立的小型振动转换模型是一种可长期使用的电缆在线监测的微电源。

基本原理

1. 转换模型

对于配网电力电缆线路，由于电缆承受的大负荷，其在工频磁场及电场作用下产生低频振动。对于配网电缆，其中交联聚乙烯（XLPE）电缆使用最广。由于电缆外层存在屏蔽层，因而通过外套电流互感器取电方式难以实施。而配网电缆振动所蕴含的能量有望转换为电能，从而使电缆沟内部供电成为可能。直线发电机通过往复运动的动子切割磁力线，从而在定子绕组产生感应电动势。总体而言，直线发电模型具有结构简单、转换效率高及损耗小等优点。本文设计的振动电能转换模型基于直线发电技术，其由动子永磁体、静态永磁体、定子线圈及外护套组成，如图1所示。

在图1中，固定在套筒底部的动子永磁体与磁悬浮的动子永磁体构成了一种新型的悬浮弹

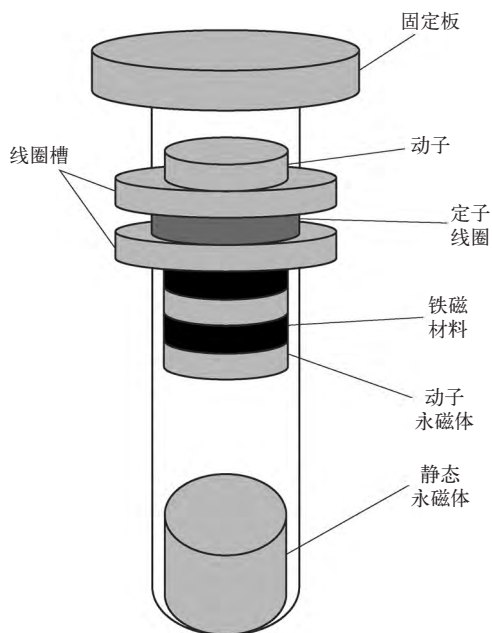


图1 直线型振动电能转换模型

簧。悬浮磁力弹簧工作摩擦小、噪声低且使用寿命长。避免了传统机械弹簧疲劳变形、噪声大、断裂和振荡周期长等缺点。针对图1中的直线型振动电能转换模型基于递加荷重法开展弹簧斥力试验，结果如图2所示。弹簧斥力曲线经多项式拟合可获取其斥力随间距量化规律。

$$F = 0.992\ 81 - 0.894\ 1 \times b + 0.002\ b^2 \quad (1)$$

式中， F 是磁力弹簧中动子两部分之间的斥力，N； d 是磁力弹簧中动子两部分之间的间距，mm。由式（1）可得，悬浮弹簧的刚度和间距近似成反比关系，随着压缩程度的增加，刚度逐渐增加。

2. 能量转换原理

永磁型直线发电技术的能量转换模型可等效为旋转发电机模型。振动能量转换模型安装在电缆表面，电缆的本身振动传递至电缆外护套，从而带动动子在直线发电模型中振动。动子与定子的相对位移即为切割磁力线过程，从而使得磁链改变，进而在定子绕组中产生感应电动势

$$\begin{aligned} E_0 &= -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{dNBA}{dt} = -N \frac{dBnA}{dt} \\ &= -NA \frac{d(Bn)}{dt} = -NAv \frac{d(Bn)}{dS} \end{aligned} \quad (2)$$

式中， ψ 是磁链； n 是横截面单位法向量； A 是定子线圈横截面积； v 是定子与动子之间的相对运动速度； dS 是相对运动长度； N 是定子线圈匝数。 B 是磁感应强度，其中为磁感应强度的径向分量为 B_r ， $B_r = \sin \theta$ ； Z 轴向方向分量 $B_z = \cos \theta$ 。

由于线圈形状为圆形，径向分量可忽略。则式（2）可转换为

$$E_0 = -NAv \frac{dB_z}{dS} \quad (3)$$

定子绕组一般为多绕组，模型总输出的感应电动势为单个绕组的 M 倍， M 是绕组个数。即为

$$E = ME_0 = -MNAv \frac{dB_z}{dS} \quad (4)$$

电磁场分析

1. 模型构建

为验证上节中能量转换模型的理论推导，本节建立了电磁场仿真模型。为获取模块输出特性，对模型做一定仿真简化。忽略掉定子中涡流损耗，忽略静态永磁体对磁场的影响，忽略动子运动的加速度，忽略动子与定子内壳之间的摩擦。

仿真模型中各参数设置如下：

- 1) 永磁体材料为钕铁硼，相对磁导率1.1，磁化强度 9.78×10^5 A/m，剩磁为1.2 T，矫顽力为 8.9×10^5 A/m，密度为 7.5 g/cm³；
- 2) 定子线圈中漆包铜线电导率 5×10^7 S/m，密度 8.9 g/cm³，半径为 0.15 mm；
- 3) 壳体内气隙相对磁导率 $\mu_r = 1$ ；
- 4) 定子线圈匝数1 000，绕组个数为2。

2. 感应电势

针对不同的动子排列组合对比分析感应电动势。动子永磁体的设置7组不同的参数。前四组中a~d四组由不同数量的永磁体模块组成，永磁体材料为钕铁硼永磁体，模块为圆柱形，厚度3 mm、直径6 mm；e组为实心圆柱与永磁体间隔组合，实心铁柱体直径为6 mm、长度为9 mm；f组为空心柱体与永磁体组合一起，外直径为6 mm、内直径为4 mm，长度为9 mm。7种组合方式如图2所示。

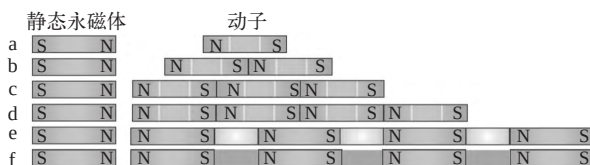


图2 不同的动子排列结构

在优选出e组最优排列的前提下，针对e组的圆柱长度进行对比分析。图3为不同长度的圆柱形铁磁材料所对应的空载磁链及空载感应电动势演变规律。

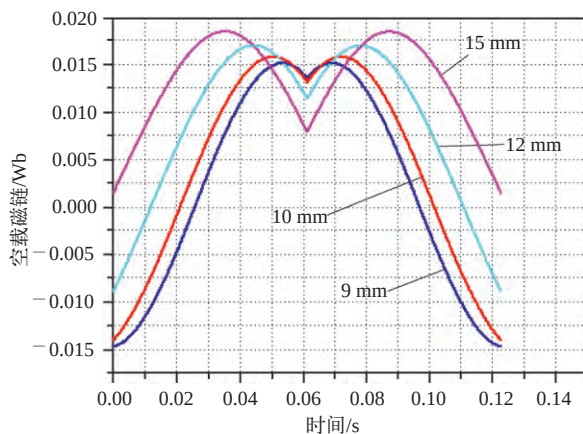


图3 不同圆环柱长的空载感应电势

3. 模型最优参数

动子中永磁体个数为4, 长度为9 mm, 直径为6 mm。动子中圆柱体个数为3, 长度为9 mm, 内径为2 mm, 外径为3 mm。定子中永磁体长度30 mm, 半径3 mm。线圈匝数1 000, 绕组数为2。

4. 空载磁场分析

当整体模型空载时, 定子绕组内无电流流过。动子沿轴向做往复振动, 振动过程中切割磁力线, 从而在绕组中产生空载感应电动势。空载状态时无电枢效应对主磁场影响。转换模型的磁场由永磁体提供, 动子永磁材料产生的磁场对空载感应电动势影响较大, 因此合理地分析主磁场是能量转换模型参数计算的关键。

5. 负载参数

定子绕组带负载状态下, 可以推得磁链与电流之间满足

$$\psi_i = L_i I_i \quad (5)$$

定子两线圈电感量满足下表中关系, 由表可得电感量约为10.56 mH。

表 电流、磁链和电感

电流/ I/A	电感/ L/H	磁链 ψ/Wb
0.5	10.564	0.005 278 4
1.0	10.557	0.010 556 8
1.5	10.558	0.015 846 8
2.0	10.558	0.021 012 6
2.5	10.558	0.026 401 5
3.0	10.558	0.031 668 6
3.5	10.557	0.036 948 9
4.0	10.560	0.042 242 2

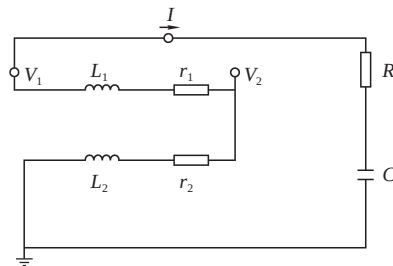


图4 转换模型等效电路图

图4为转换模型的等效电路图, 其中 R 和 C 分别等效负载的电阻和电容。 V_1 是最终输出电压; V_2 是单绕组端电压, 电压频率约为11 Hz。 I 是负载电流; r_1 和 r_2 是定子绕组的等效电阻; L_1 和 L_2 是定子绕组的等效电感。进一步可得转换模型的输出功率

$$P = V_1 I \cos \theta \quad (6)$$

式中, P 是模型功率; $\cos \theta$ 是功率因数。

定子绕组内部阻抗为

$$Z_G = R_G + jX_G \quad (7)$$

式中, $R_G = r_1 + r_2$, $X_G = j\omega L_1 + j\omega L_2$ 。

负载阻抗为

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} \quad (8)$$

定子绕组线圈电阻为

$$r_1 = r_2 = \rho L_r / S_r \quad (9)$$

式中, ρ 是绕组线圈的电阻率, 为 $1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$; V_r 是定子绕组线圈的长度, 为15 m; S_r 是定子绕组漆包线的截面积, 为 $7.069 \times 10^{-8} m^2$; L_1 和 L_2 均为10.56 mH。

由式(7)可计算得到阻抗 Z_G 。

结束语

本文分别研究了振动至电能转换模型的结构参数对空载磁感应强度、空载磁链及感应电动势的变化规律, 为转换模型的动子永磁体及圆柱设计提供了设计依据, 同时得出了以下结论:

1) 本文获取转换模型最优动子组合, 其中e组排列组合永磁体与圆柱体相间排列时对空载电动势的波形无明显畸变, 且空载磁感应强度分布最优。

2) 依据设计的模型参数及仿真模型, 计算和分析了磁场分布, 获取了定子绕组感应电动势分布。同时对转换模型的电路参数进行了计算, 通过试验与计算, 获取了转换模型最大功率及效率。转换模型在11 Hz激励器的激励下可获得最大电动势, 为2.8 V。EA

(收稿日期: 2020.02.26)

(编辑: 朱金凤)