

智能电网用空间电能集能转换器

邹 亮¹, 黄金鑫², 刘梦琦¹, 赵 彤¹, 张 黎¹

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 国网技术学院, 山东 济南 250002)

摘要: 提出球形集能拓扑并建立其数学解析模型, 分析影响其集能效果的因素。考虑到集能拓扑的实际应用, 在球形拓扑的基础上改进为球冠型拓扑结构。通过建立调理电路的大信号和动态扰动模型, 给出了调理电路反馈网络的设计原则, 仿真结果验证了电路的可行性。针对外电场变化对调理主电路工作特性的影响, 建立了仿真模型, 研究了等效输入电压变化下的调理主电路工作特性。在搭建的自供能系统实验平台上进行实验, 实验结果验证了集能转换器的整体工作性能。

关键词: 智能电网; 集能转换器; 球型集能拓扑; 调理电路; 设计

中图分类号: TM 835

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.025

0 引言

智能电网是未来电力工业的发展方向^[1], 其对传感和测量技术提出了更高要求, 这也导致无线传感器在智能电网中占据了重要地位。但是无线传感器能量的供给问题却未得到有效解决^[2,3], 为此尝试采用的增加电池能量密度、新的能量传输方法^[4]等, 因安全性及能耗大等缺点而搁置。而收集周围环境中的能量^[5,9] (太阳能、振动能、热能、电磁能等) 并转换为电能的自供能技术可以有效解决无线传感器网络的能量供给问题。

由于变电站特殊的空间布局及环境要求, 基于太阳能的自供能技术受到限制; 出于绝缘和安全考虑, 振动能收集装置也不可直接外挂于电气设备上; 而众多新型自供能技术 (如热能自供能和声能自供能) 因其能量源太微弱无法达到要求。因此, 针对变电站的特殊电磁环境, 科研人员开始研究基于空间电磁能的无线传感器自供能技术^[10]。

现代化高压变电站或输电线路周围蕴含丰富的电磁能量。实测数据表明, 500 kV 高压变电站内的工频电场强度可达 18 kV/m, 变电站内的电场能量非常丰富^[10]。因此, 为将高压变电站中的电场能转换为可以为无线传感器网络供能的电能, 本文采用电容式集能转换器来实现该功能。电容式集能转换器主要包括 2 个部分: 集能拓扑和调理电路。集能拓扑的作用是实现能量由空间强电场能到可

供无线传感器网络供能电能之间的转换。调理电路的作用是将收集到的无规则脉冲电流或脉动电压进行调理, 使经调理电路处理过的电能可直接为无线传感器所使用。本文的研究正是基于两者展开的。

1 电容集能拓扑性能分析

外电场条件下的电能转换能力是由电容集能拓扑决定的。电容集能拓扑的典型结构为平板型, 但其只对垂直其轴线方向的电场集能效果较好。在变电站复杂电场环境下, 球型集能拓扑更适于跟踪收集各方向的电场分量, 并且球型拓扑近似封闭的金属面还为内置电路提供了电磁屏蔽, 可避免尖端放电现象^[11], 本节将对其进行数学建模。

1.1 集能拓扑数学建模

由于自供能装置收集工频电场能量时, 主要工作在低频电场下, 且电容集能拓扑的尺寸远小于波长, 因此可用准静态场的方法来分析。设球壳半径为 R , 电势为 u , 空间任意一点 $P(r, \theta, \varphi)$ 电势满足拉普拉斯方程 $\nabla^2 u = 0$, 其中, θ 为 P 点与球心的连线与 z 轴的夹角, φ 为 P 点与球心的连线映射在 xy 平面上所形成的线段与 x 轴的夹角。在球坐标系下, 因 φ 满足旋转对称性, u 与 φ 无关, 故拉普拉斯方程在球坐标系下的展开式^[12]可简化为:

$$\nabla^2 u = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) = 0 \quad (1)$$

采用分离变量法, 设 $u(r, \theta) = X(r)Y(\theta)$, X 和 Y 分别为关于 r 和 θ 的函数, 代入并整理得:

$$\begin{cases} \frac{1}{X} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dX}{dr} \right) = n(n+1) \\ \frac{1}{Y} \frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{dY}{d\theta} \right) = -n(n+1) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $n(n+1)$ 为分离变量法时产生的常数, 满足在有限区域内电势处处有限且有解。令 $x = \cos \theta$, $y(x) = Y(\theta)$, 方程(2)变为:

收稿日期: 2014-10-07; 修回日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307102); 新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS14007); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130131120012)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307102), State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(LAPS-14007) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20130131120012)

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dX}{dr} \right) - n(n+1)X = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx} \left[(1-x^2) \frac{dy}{dx} \right] + n(n+1)y = 0 \quad (4)$$

方程(3)为欧拉方程,其通解为:

$$X(r) = Ar^n + B \frac{1}{r^{n+1}} \quad (5)$$

其中, A 和 B 为待定常数,可通过边界条件求取。

方程(4)的解是一个勒让德多项式:

$$\begin{aligned} y(x) &= P_n(x) \\ Y(\theta) &= P_n(\cos \theta) \quad n=0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (6)$$

则电势的通解可表示为:

$$u(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(A_n r^n + B_n \frac{1}{r^{n+1}} \right) P_n(\cos \theta) \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

下面在 2 种边界条件情况下求解球型拓扑电容以及输出电压的表达式。

a. 设球型拓扑的上、下金属半球的电位分别为 U 和 $-U$, 外加电场为 0, 无穷远处电势为 0, 根据这 3 条边界条件可确定式(7)中的待定系数分别为:

$$\begin{aligned} A_n &= 0 \\ B_n &= \begin{cases} (2n+1)R^{n+1}U_1 \int_0^{\frac{\pi}{2}} P_n(\cos \theta) \sin \theta d\theta & n=1, 3, 5, \dots \\ 0 & n=0, 2, 4, \dots \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

球型拓扑表面电场强度为:

$$E_{r=R} = -\nabla u|_{r=R} = (n+1) \sum_{n=1, 3, \dots}^{\infty} \frac{B_n}{R^{n+2}} P_n(\cos \theta) \quad (9)$$

球型拓扑极板上的电荷为:

$$\begin{aligned} Q &= \iint_S \sigma ds = \iint_S \epsilon_0 E_{r=R} ds = 2\epsilon_0 \pi R U_1 \times \\ &\sum_{n=1, 3, \dots}^{\infty} (n+1)(2n+1) \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} P_n(\cos \theta) \sin \theta d\theta \right]^2 \end{aligned} \quad (10)$$

则球型拓扑的电容为:

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q}{U} = \frac{Q}{2U_1} = \epsilon_0 \pi R \times \\ &\sum_{n=1, 3, \dots}^{\infty} (n+1)(2n+1) \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} P_n(\cos \theta) \sin \theta d\theta \right]^2 \end{aligned} \quad (11)$$

其中, ϵ_0 为真空介电常数。

b. 当外加电场 E_0 为均匀电场时, 边界条件为 $E_{r=\infty} = E_0$, 则:

$$U_{r=\infty} = -E_0 r \cos \theta + D \quad (12)$$

常数 D 可通过适当的零电势参考点选择而取值为 0, 再利用勒让德多项式的正交关系可得:

$$u(r, \theta) = -E_0 r \cos \theta + \frac{E_0 R^3 \cos \theta}{r^2} \quad (13)$$

式(13)中等号右侧第 1 项是原来匀强电场产生的电势, 第 2 项是因导体球受到电场的作用而类似

极化为一个偶极矩为 $E_0 R^3$ 的偶极子所产生的电势。

同理, 球壳电极上的电荷量为:

$$\begin{aligned} Q &= \iint_S \epsilon_0 E_{r=R} ds = \\ &\int_0^{\frac{\pi}{2}} \epsilon_0 \cdot 3E_0 \cos \theta \cdot 2\pi R^2 \sin \theta d\theta = 3\pi \epsilon_0 R^2 E_0 \end{aligned} \quad (14)$$

则球型拓扑输出电压的数学表达式为:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{3RE_0}{\sum_{n=1, 3, \dots}^{\infty} (n+1)(2n+1) \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} P_n(\cos \theta) \sin \theta d\theta \right]^2} \quad (15)$$

式(15)可推广到外界均匀场强 E_0 与集能拓扑 z 轴成一定角度 δ 的普遍形式。当外电场与集能拓扑 z 轴垂直时, 由对称性可知上下两半球极板等电势, 即无输出电压, 因此球型集能拓扑对垂直于 z 轴的电场分量无收集作用。最终, 球型集能拓扑的输出电压与球壳半径和外电场的关系为:

$$U = \frac{3RE_0 \cos \delta}{\sum_{n=1, 3, \dots}^{\infty} (n+1)(2n+1) \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} P_n(\cos \theta) \sin \theta d\theta \right]^2} \quad (16)$$

其中, δ 为任意方向的均匀场强与集能拓扑 z 轴的夹角。

由式(16)可看出, 球型集能拓扑的输出电压由球半径和外界场强的大小及方向共同决定。以集能拓扑输出电压最大为优化目标时, 应综合考虑球半径和外界电场因素; 当外界电场一定时, 球半径越大, 输出电压越大, 优化约束条件则变为集能拓扑的体积限制。

在实际应用中, 采用球冠型集能拓扑结构, 该种结构上极板保持弧形, 下极板设计为平板形状, 这主要是由于球型结构接地连接的不稳定以及弧形下极板电势近于地表电势。如图 1 所示的球冠型集能拓扑可保持球型拓扑适应复杂电场环境的优点, 其电容和电势表达式的推导过程与上述类似, 不再赘述。



图 1 球冠型集能拓扑结构
Fig.1 Structure of spherical-cap energy scavenging topology

1.2 集能拓扑空载实验

本文采用的自供能系统实验平台主要由电场发生单元、轻型高压试验变压器、示波器以及分压器等单元组成, 通过该实验平台可以验证集能拓扑的实际特性。其中电场发生单元由面积为 1 m^2 的两平行金属极板组成, 用高度为 1 m 的绝缘支柱支撑, 通过轻型高压试验变压器连接 50 Hz 交流电网。因为本

节主要针对集能拓扑的能量收集效果以及参数变化对集能效果的影响,所以空载实验在较低电压下进行。

制作拓扑和结构参数各不相同的集能单元试样。将不同拓扑结构和参数的试样置于电场发生单元中,以示波器观察其空载波形。调节变压器,使电场发生单元两端电压的峰值在 50~300 V 之间变化,观察集能拓扑两端的电压变化趋势。假设电场方向与集能拓扑中轴线夹角为 δ ,在平板和球冠半径以及高度相同且 $\delta=0^\circ$ 时,球冠型拓扑的集能电压更高,如图 2(a)所示,图中输入和输出电压均为电压峰值。针对球冠型集能拓扑,改变其半径 R 和高度 d ,观察集能电压的变化,如图 2(b)、(c)所示,可知增大球冠的半径 R 和高度 d 均能增大集能拓扑的输出电压。为研究电场方向变化对集能拓扑集能效果的影响,实验中保持半径 R 和高度 d 不变,改变 δ ,观察集能拓扑的输出电压特性。由于实验中的测量误差以及电场发生单元的电场畸变,当增大 δ 时,平板型集能拓扑的集能效果有一定的降低,如图 2(d)所示,但球冠型拓扑没有变化。

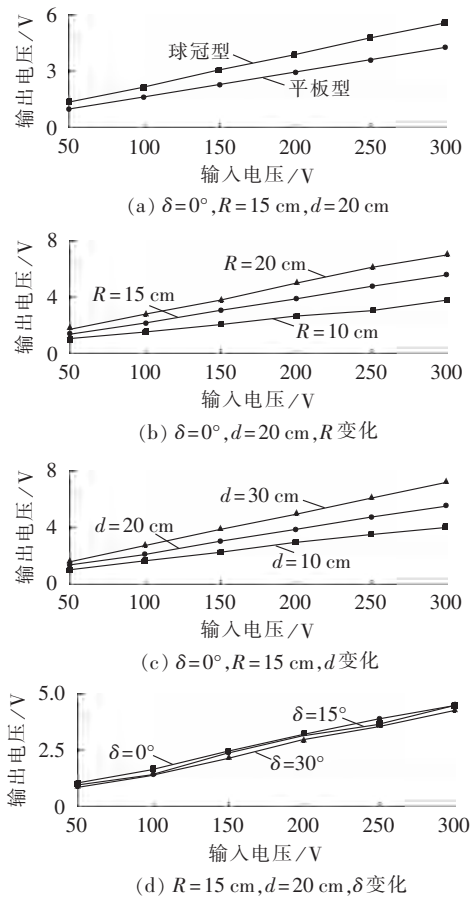


图 2 2 种集能拓扑的输出特性对比
Fig.2 Comparison of output characteristics between two energy scavenging topology types

为更直观地对比 2 种拓扑的集能效果,本文选择对比平板型拓扑与球冠型拓扑的 2 个基本性能指标:转换器的输出电压 U 与电容储能 W_c 。转化器输

出电压 U 可直观反映集能效果;电容储能 W_c 直接决定了拓扑的集能上限。当电场方向与集能拓扑中轴线夹角 $\delta=0^\circ$ 时,取半径 R 同为 15 cm 的平板型和球冠型转换器,极板高度 d 调节为 20 cm,调节变压器,使电场发生单元的输出电压为 300 V,2 种拓扑的实验结果如表 1 所示。

表 1 2 种集能拓扑参数对比
Table 1 Comparison of parameters between two energy scavenging topology types

拓扑类型	输出电压/V	电容储能/J
平板型	4.0	789.33×10^{-8}
球冠型	5.8	182.48×10^{-7}

实验与仿真结果表明,在相同半径和高度的条件下,球冠型拓扑的集能效果要优于平板型拓扑。球冠型拓扑的半径、高度以及电场的强度对集能效果影响显著,且近似成正比关系。由于测量误差、电场发生单元的电场畸变以及实验中集能拓扑角度变化限制等,实验中 δ 在 30° 以下变化时,角度变化因素对球冠型拓扑的集能效果影响不明显。

2 调理单元拓扑设计与仿真

因外部电场的不断变化以及传感器负载在发射和休眠工作状态的转换所导致的等效阻抗的变化都将引起电路输出电压及功率的波动,加之集能拓扑能量收集的断续性和波动性,必须设计可实现整流、斩波、存储和稳压等功能为一体的调理电路。调理电路的主体是稳压子系统、整流子系统和存储子系统。

2.1 调理单元拓扑设计

图 3 所示为满足无线传感器功能要求所设计的调理电路拓扑。该拓扑中,先采用简单的单相整流桥将集能拓扑两端电压转换为近似的直流,其后接存储电容将收集的能量暂时存储起来,同时该能量也可为后端控制电路提供工作电压。为达到稳压目的,调理拓扑中采用了 Buck 电路。当外电场变化或负载变化时,由 R_x 和 R_y 组成的反馈回路可将输出电

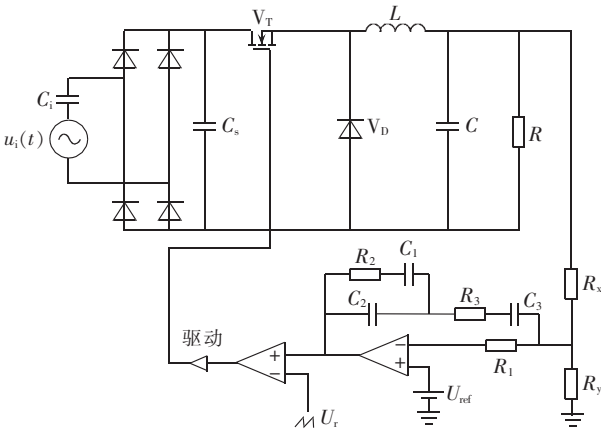


图 3 调理电路拓扑
Fig.3 Topology of conditioning circuit

压波动经补偿网络传递给 PWM 器,后者通过调制的脉宽信号控制开关 V_T 的开通时间,最终达到稳压的目的。

2.2 调理拓扑主电路数学模型

为研究调理拓扑主电路的输出电压特性,经桥式整流和电容滤波后,后续电路可近似等效为 DC/DC 变换电路。为获得调理电路直流稳态时的输出电压特性,本文应用开关周期平均值法^[13-14],建立了调理电路的大信号模型:

$$\begin{cases} L \frac{d\langle i(t) \rangle_{T_s}}{dt} = d(t)[u_s(t) - u_o(t)] - [1 - d(t)]u_o(t) \\ C \frac{d\langle u_o(t) \rangle_{T_s}}{dt} = i(t) - \frac{u_o(t)}{R} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $u_s(t)$ 为电容 C_s 两端的电压; $u_o(t)$ 为输出电压; $i(t)$ 为电感电流; $\langle x(t) \rangle_{T_s}$ 表示一个开关周期 T_s 中,变量 $x(t)$ 的平均值; $d(t)$ 为开关占空比。

设电路稳定在某一静态工作点,则其稳态时的占空比 $d(t) = D$, 电感电流为 I 、输出电压为 U_s 、输出电压的稳态值为 U_o 。根据电感电压的伏秒平衡原理和电容电荷的平衡原理^[14], 电感电压的平均值和电容电流的平均值都等于零。将占空比以及各变量的稳态值分别代入上述大信号模型,可推导出各稳态值之间的关系式:

$$\begin{cases} D(U_s - U_o) - (1 - D)U_o = 0 \\ I - \frac{U_o}{R} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

其中, U_s 、 U_o 分别为电路处在静态工作点(电路处在直流工作状态下)时的输出电压和稳态电压。

经整理:

$$\begin{cases} U_o = DU_s \\ I = \frac{U_o}{R} \end{cases} \quad (19)$$

由调理电路的大信号建模,可得到直流稳态时各变量之间的关系。从式(19)可看出,输出电压的直流稳态值与输入电压和占空比的大小有关。占空比越大,输出直流稳态电压值也越大,通过合理调节高频开关的占空比,可使得电路输出电压在数值上满足无线智能传感器的供能要求。

当负载和输入电压变化时,输出电压将会产生较大波动,因此,为研究扰动对电路输出电压的影响,有必要建立调理电路的动态小信号模型。如果电感电流、输入电压、输出电压和占空比在直流工作点附近作小扰动,并以 $\hat{x}(t)$ 表示 $x(t)$ 的扰动量,将扰动量代入式(17)中,消去直流项并忽略二阶交流项,可得如下的交流小信号模型:

$$\begin{cases} L \frac{d\hat{i}(t)}{dt} = D\hat{u}_s(t) + U_s\hat{d}(t) - \hat{u}_o(t) \\ C \frac{d\hat{u}_o(t)}{dt} = \hat{i}(t) - \frac{\hat{u}_o(t)}{R} \end{cases} \quad (20)$$

对上式进行拉普拉斯变换并整理可得:

$$\begin{cases} G_{ud}(s) = \frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{d}(s)} \Big|_{\hat{u}_s(s)=0} = \frac{U_s}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \\ C_{ui}(s) = \frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{u}_s(s)} \Big|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{D}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \end{cases} \quad (21)$$

2.3 外电场变化下的调理主电路特性

因外部电场可能不断变化,集能拓扑两端的电压会随外电场的变化而波动,输入电压的大幅波动将会使得调理主电路产生丰富的非线性现象,即各种类型的分岔和混沌^[15],这将直接影响调理主电路的稳定性和可靠性。

根据式(17),分别单独列写 V_T 导通和关断时的状态方程,并对状态方程进行拉普拉斯变换,可分别得到 V_T 导通和关断时的方程为:

$$\begin{cases} U_o(s) = \frac{1}{Cs + \frac{1}{R}} I(s) \\ I(s) = -\frac{1}{L} \frac{1}{s} [U_o(s) - U_s(s)] \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} U_o(s) = \frac{1}{Cs + \frac{1}{R}} I(s) \\ I(s) = -\frac{1}{L} \frac{1}{s} U_s(s) \end{cases} \quad (23)$$

根据式(22)和(23),搭建调理主电路的 MATLAB/Simulink 仿真模型如图 4 所示。在该仿真模型中,设定主电路参数为: $U_s = 20$ V(等效输入电压), $L = 1$ mH, $C = 500$ μ F, $R = 1$ k Ω , $T = 10$ μ s, $R_x = 15$ k Ω , $R_y = 15$ k Ω , 仿真输出为 I - U 关系曲线。

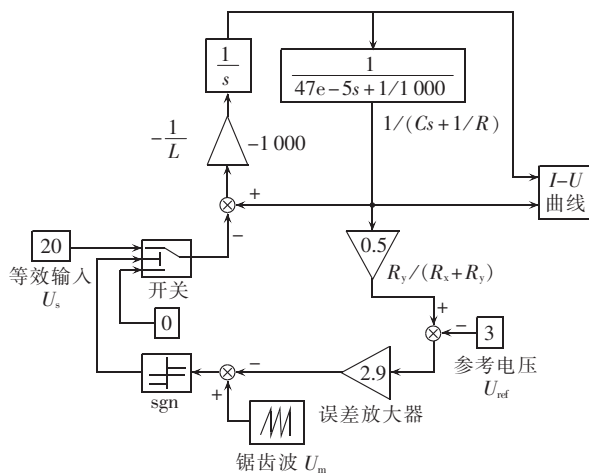


图 4 Simulink 仿真模型

Fig.4 Simulation model by Simulink

通过仿真发现,调理主电路的有效输入电压范围为 5~30 V,当等效输入电压 U_s 低于 5 V 或超过 30 V 时,电路工作在不稳定的周期状态,容易产生混沌,

影响主电路工作的稳定性。因此,为保证调理主电路输出电压的稳定性,一方面优化集能拓扑结构以尽量降低外电场变化对集能电压的影响,另一方面调理电路应增加稳压反馈回路,负反馈调节电压的稳定性,同时实验中可采用集成控制芯片以增大电路稳定运行下的输入电压范围。

2.4 仿真分析

反馈补偿网络是稳压调理电路的核心,本文采用超前-滞后补偿网络。图 5 所示的闭环系统框图是图 3 稳压调理电路的简化表示。其中, $G_c(s)$ 为补偿网络的传递函数, $G_m(s)$ 为 PWM 器的传递函数, $H(s)$ 表示反馈分压网络的传递函数,可用 α 表示。

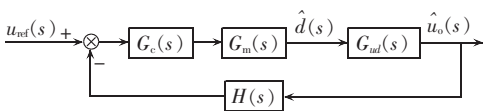


图 5 调理电路闭环系统框图
Fig.5 Block diagram of close-loop system of conditioning circuit

图 5 所示闭环系统的原始回路增益函数 $G_o(s)$ 可表示为式 (24), 其中, U_m 表示 PWM 器的锯齿波幅值。

$$G_o(s) = G_m(s)G_{ud}(s)H(s) = \frac{\alpha}{U_m}G_{ud}(s) \quad (24)$$

设 PWM 器的锯齿波幅值 U_m 为 2.5 V, 反馈分压网络的传递函数 α 为 1, 将调理主电路参数代入式 (24) 便得调理电路的原始回路增益。结合传递函数幅频特性的波特图, 设计得到调理电路补偿网络的传递函数 $G_c(s)$:

$$G_c(s) = \frac{(1+4.5 \times 10^{-4}s)(1+4.49 \times 10^{-4}s)}{1.60 \times 10^{-4}s(1+1.59 \times 10^{-6}s)(1+1.59s)} \quad (25)$$

根据主电路参数以及求得的补偿网络的传递函数 $G_c(s)$, 并按照图 3 搭建仿真电路。设电路在 0.5~0.52 s 期间, 输出电阻由 1 k Ω 突变为 100 Ω , 模拟无线传感器作为负载时, 由休眠转至信号发射的状态。调理电路输出电压仿真结果如图 6 所示。

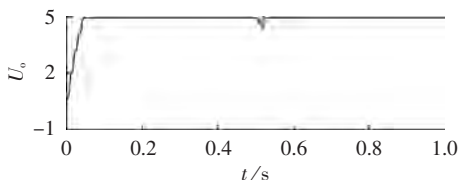


图 6 调理电路输出电压的仿真结果
Fig.6 Simulative results of output voltage of conditioning circuit

在 0.5~0.52 s 期间, 负载迅速减小, 输出功率瞬间增大, 从图 6 中可以看出, 调理单元输出电压在负载突然增加时, 会有短时间跌落, 随后又很快恢复到原来的电压水平。仿真结果表明, 该调理单元具有良

好的稳压特性。

3 实验研究

为对包含调理电路以及电容集能拓扑的完整的自供能系统进行研究, 搭建自供能实验平台。由于在外电场强度变化较大时, 球冠型集能拓扑的输出电压特性优于平板型, 因此实验中主要研究球冠型集能拓扑与调理电路配合的工作性能。

实验中稳压调理电路的开关选择型号为 IRF540 的 N 型场效应管。它具有极低的导通电阻 36 m Ω , 导通电压为 1.7 V, 上升沿时间和下降沿时间分别为 97 ns 和 52 ns, 当开关频率低于 1 kHz 时, 功率低于 100 mW, 适合低功耗应用。控制芯片采用 TI 公司生产的低功耗集成电压型 PWM 控制器 TL5001CP, 其工作的输入电压较宽, 在 3.6~40 V 之间。待机工作电流为 1 mA, 正常供电电流约为 1.4 mA, 总体功耗较低, 适合于低功耗场合应用。由于开关的控制端与输入端不共地, 因此还需光耦对驱动信号进行隔离。选用 TLP250 低功耗光耦芯片, 内部集成有 GaAlAs 发光二极管和光敏检测器, 功耗约为 100 mW。

本实验中稳压调理电路输入端采用的是高 20 cm、半径 15 cm 的球冠型集能拓扑, 输出端为一个超级电容器, 该电容的额定电压为 2.7 V, 大小为 5 F, 其主要作用是收集集能拓扑收集到的电能。实验时, 首先需要将稳压电路中的储能电容充电至 2.5 V, 为稳压电路提供初始能量, 以确保稳压电路中的开关及其控制电路在初始状态下动作。实验中, 若输出端的电容无法获得转换器收集到的能量, 则电路中开关及其控制电路在耗尽电容中的初始能量之后将停止动作。当稳压电路输出端的电容充电至 2.5 V 时, 其储能为 15.6 J。开关及其控制电路功耗以 300 mW 计算, 则开关及其控制电路耗尽初始能量约耗时 1 min。如果在施加工频电场之后, 稳压电路中电容两极板电压可以维持在一个较为稳定的数值, 则说明该自供能系统的“自持性”可以满足。

依上所述, 将稳压电路中的超级电容充电至 2.5 V 后, 施加工频电场, 电场强度为 10 kV/m, 5 min 后测量电容两极板间电压波形, 如图 7(a)所示。

由图 7(a)可知, 稳压电路中的电容在初始充电至 2.5 V 后, 两极板间电压稳定在 2.6 V 左右, 高于初始值, 因此该自供能装置可以实现电场能的收集。图 7(b)所示为外施工频电场强度由 5 kV/m 逐渐增加至 10 kV/m 时稳压电路中储能电容的电压波形, 从图中可以看出, 调理单元输出电压稳定且具有良好的稳压效果; 图 7(c)所示为外施工频电场强度由

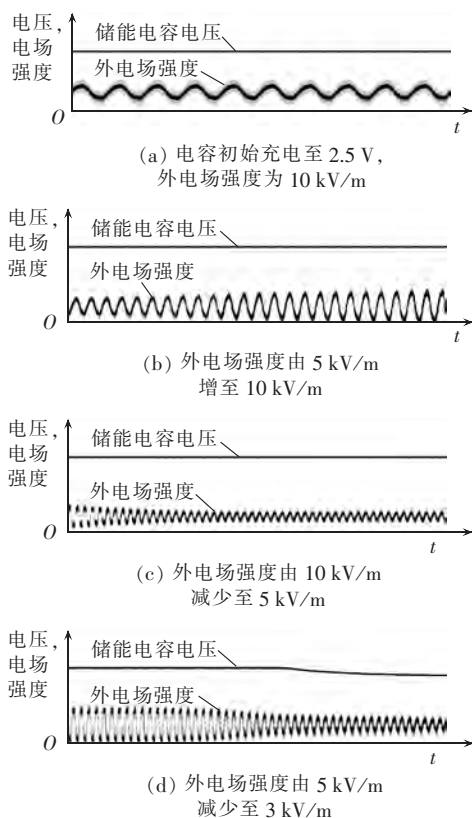


图 7 储能电容电压和外电场强度波形
Fig.7 Waveforms of storage capacitor voltage and external electric field intensity

10 kV/m 逐渐减小至 5 kV/m 时,储能电容的电压输出波形,电容电压随外电场场强的降低而减小,但最终稳定在 2.6 V。

但当外电场强度继续降低,由 5 kV/m 降低至 3 kV/m 时,储能电容的电压将无法维持在 2.6 V,而是随外电场强度的降低而减小,如图 7(d)所示。这是由于随着外施工频电场强度的降低,自供能装置收集到的能量也随之减少,由于调理单元的正常运行需要一定的能量,当自供能装置收集到的能量小于调理单元运行所需的能量时,储能电容将无法得到充足的电能,因此电容的电压降随着外电场强度的降低而下降。

4 结论

本文主要对空间电能集能转换器进行了理论和实验研究。针对平板型集能拓扑的集能缺点提出球型集能拓扑,并对其进行数学建模,确定了球型拓扑集能效果的影响因素。考虑实际变电站应用,对球型拓扑进行结构上的改进,提出球冠型拓扑结构。对稳压调理电路进行系统建模,包括大信号和动态小信号模型,并借此分析调理电路的工作特性和补偿网络的参数选择。考虑到外电场不断变化,仿真分析了调理主电路在外电场变化下的运行特性。最后,搭建

了电容式集能转换器实验平台,在实验模拟的工频均匀电场下验证自供能系统的整体运行性能。

空间电能集能转换器如要投入实际应用面临的最主要问题是解决集能转换器容性内阻抗过大的问题,解决方法主要有 2 种:一种方法是增大转换器两极板间的介电常数 ϵ ,比如采用油纸绝缘等;另一种方法是增加集能转换器的表面积。但这 2 种方法也会相应带来高压变电站内现场安装的困难与安全隐患。

参考文献:

- [1] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报,2009,29(34):1-8.
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [2] JOSEPH A P, THAD S. Energy scavenging for mobile and wireless electronics[J]. IEEE Transactions on Pervasive Computing, 2005, 4(1): 18-27.
- [3] LEE D S. Wireless and powerless sensing node system developed for monitoring motors[J]. Sensors, 2008, 8(8): 5005-5022.
- [4] JIANG B, JOSHUA R S, MATTHAI P. Energy scavenging for inductively coupled passive RFID systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(1): 118-125.
- [5] 孙玉国. 基于太阳能供电的无线振动传感器试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2007, 27(4): 132-133.
SUN Yuguang. Study on structure vibration wireless sensor based on solar cell[J]. Noise and Vibration Control, 2007, 27(4): 132-133.
- [6] SIMONE D, VITTORIO F, MICHELE G. Autonomous sensor system with power harvesting for telemetric temperature measurements of pipes[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(5): 1471-1478.
- [7] LEFEUVRE E, BADEL A, RICHARD C. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 126(2): 405-416.
- [8] 王婵, 周泽广, 区煜广. 温差发电器的研究进展[J]. 电测与仪表, 2010, 47(532): 40-44.
WANG Chan, ZHOU Zeguang, OU Yuguang. Research and development on thermoelectric generators[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2010, 47(532): 40-44.
- [9] 刘盼刚, 文玉梅, 李平, 等. 一种磁电自供电无线传感器电源管理电路研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(8): 1427-1431.
LIU Pangang, WEN Yumei, LI Ping, et al. Study on the power management circuit of a magnetoelectric self-powered wireless sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(8): 1427-1431.
- [10] ZHU M, BAKER P C, ROSCOE N M. Alternative power sources for autonomous sensors in high voltage plant[C]// 2009 IEEE Electrical Insulation Conference. [S.l.]: IEEE, 2009: 36-40.
- [11] 黄金鑫, 张黎, 李庆民. 智能监测用电容式集能转换器拓扑性能研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 78-81.
HUANG Jinxin, ZHANG Li, LI Qingmin. Research on capacitive topologies of the energy scavenging converters used for smart monitoring[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 78-81.
- [12] 王元明. 数学物理方程与特殊函数[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 84-99.
- [13] 周嘉农, 曾小平. DC-DC 开关变换器的建模与分析的动态评述[J].

华南理工大学学报,2000,28(8):112-116.

ZHOU Jianong,ZENG Xiaoping. A review of the modeling and analysis of DC-DC switching power converters[J]. Journal of South China University of Technology,2000,28(8):112-116.

[14] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社,2005:6-109.

[15] 张波. DC-DC 变换器非线性混沌现象研究[J]. 电源世界,2003(3):35-38.

ZHANG Bo. Research of non-linear chaotic phenomena in DC-DC converter[J]. The World of Power Supply,2003(3):35-38.

作者简介:



邹亮

邹亮(1983—),男,山东莱芜人,讲师,博士,主要从事高电压与绝缘技术、应用电磁学以及电力系统经济型故障限流技术方面的研究工作(E-mail: zouliang@sdu.edu.cn);

黄金鑫(1984—),女,山东济宁人,讲师,博士,通信作者,主要从事高电压与绝缘技术、应用电磁学方面的研究工作(E-mail: linbowhix@163.com)。

Spatial electric field energy scavenging converter used for smart grid

ZOU Liang¹,HUANG Jinxin²,LIU Mengqi¹,ZHAO Tong¹,ZHANG Li¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. State Grid of China Technology College, Ji'nan 250002, China)

Abstract: A spherical energy scavenging topology is proposed, its mathematically analytical model is built and its influencing factors are analyzed. For the practical applications, the spherical-cap topology is adopted. The large signal model and dynamic disturbance model of the conditioning circuit are built, the design principle of its feedback network is given, and its feasibility is verified by the simulative results. Since the variation of external electrical field may influence the operating characteristics of main conditioning circuit, a simulation model is built to study its operating characteristics under the equivalent variation of input voltage. An experiment platform of self-power system is established and the overall operating performance of the energy scavenging converter is verified by the experimental results.

Key words: smart grid; energy scavenging converter; spherical energy scavenging topology; conditioning circuit; design

(上接第153页 continued from page 153)

transformer insulation condition assessment method based on set pair analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010,34(21):55-60.

[13] 朱松青,史金飞. 状态监测与故障诊断中的主元分析法[J]. 机床与液压,2007,35(1):241-243.

ZHU Songqing,SHI Jinfei. PCA approach to condition monitoring and fault diagnosis[J]. Machine Tool & Hydraulics,2007,35(1):241-243.

[14] WANG Haiqing,ZHOU Hongliang,HANG Bailin. Number selection of principal components with optimized process monitoring performance[C]//43rd IEEE Conference on Decision and Control. Atlantis, Bahamas: IEEE,2004:4726-4731.

[15] JOLLIFFE I T. Principal component analysis[M]. New York, USA: Springer,2002:11-20.

[16] WANG Shengwei,FU Xiao. AHU sensor fault diagnosis using principal component analysis method[J]. Energy and Buildings,

2004,36(2):147-160.

[17] CHOI S W,LEE C,LEE J M. Fault detection and identification of nonlinear processes based on kernel PCA[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,2005,75(1):55-67.

作者简介:



杨廷方

杨廷方(1975—),男,湖南泸溪人,副教授,博士,主要研究方向为电气设备状态监测和故障诊断以及配电网技术的应用(E-mail: yangtingfang@126.com);

张航(1990—),男,湖南长沙人,硕士,主要研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: maji_3513@qq.com);

黄立滨(1974—),男,广东韶关人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统控制。

Incipient fault diagnosis based on improved principal component analysis for power transformer

YANG Tingfang¹,ZHANG Hang¹,HUANG Libin²,ZENG Xiangjun¹

(1. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology,

Changsha 410077, China; 2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Based on the transformer DGA(Dissolved Gas Analysis), an improved PCA(Principal Component Analysis) is proposed to diagnose the incipient fault of transformer. Different from the traditional PCA, it standardizes the sample indices with the sum of their absolute values, which eliminates the numeric magnitude difference between indices while keeps their information differences. The principal components are selected according to the cumulative contribution rate and the Euclidean distances between them are clustered to determine the fault state of transformer. Diagnosis instances show that, the proposed method effectively improves the diagnosis accuracy of transformer incipient faults.

Key words: power transformers; fault diagnosis; dissolved gas analysis; principal component; cluster analysis