DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2311193

# 多芯电缆微弱磁场能量采集器的高效管理电路\*

李时博1,李 平1,文玉梅1,王国达1,鞠登峰2

(1.上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240; 2. 国网智能电网研究院 北京 102209)

**摘 要**:现有磁场能量采集器标准能量管理电路效率低、功耗高、输入阈值功率高,在换能器采集较弱磁场能量时,难以驱动多 芯电缆监测系统。针对上述问题,本文提出了一种间歇充放电的低功耗多芯电缆微弱磁场能量采集管理电路方案,设计了自供 电的低功耗间歇控制电路,大幅度降低功耗。该电路通过自供电变频匹配,提高管理电路的能量转换效率。实验结果表明,当 三芯电缆通过 40 A、50 Hz 的交流电时,磁场能量采集器输出功率为 3.3 mW,管理电路的最大输出功率可达 2.45 mW,最大效 率 74.24%,较标准能量采集管理电路提升了 6.9 倍。所提出的超低功耗自供电控制电路,满足启动阈值的最小平均功耗仅为 1.52 μW,仅为带辅助电源的控制电路功耗的 5.93%。该高效管理电路不仅可以用于多芯电缆微弱能量采集,还可以用于由于 铠装屏蔽导致的微弱电缆周边磁场、电磁振动能量采集器、反向散射传感器网络等微弱感性磁场能量管理。 关键词:多芯电缆;磁场能量采集;电源管理电路;阻抗匹配;上变频

中图分类号: TH89 TM619 TP212.9 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

# Efficient and low power consumption management circuit of energy harvester for weak magnetic field around multi-core cables

Li Shibo<sup>1</sup>, Li Ping<sup>1</sup>, Wen Yumei<sup>1</sup>, Wang Guoda<sup>1</sup>, Ju Dengfeng<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information and Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
 2. The State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The existing magnetic field energy collector standard energy management circuit has advantages of low efficiency, high power consumption, and high input threshold power. When the transformer collects weak magnetic field energy, it is difficult to drive the multi-core cable monitoring system. To address the above issues, this article proposes a low-power and multi-core cable weak magnetic field energy collection management circuit principle of intermittently charging discharge. A low-power intermittent control circuit for self-powered power supply is designed to greatly reduce power consumption. This circuit is comparable to the energy conversion efficiency of the management circuit through self-power supply variable frequency matching. The experimental results show that when the three-core cable passes the AC power of 40 A and 50 Hz, the output power of the magnetic field energy collector is 3.3 mW, the maximum output power of the management circuit 6.9 times. The proposed high-power self-power supply control circuit to meet the minimum average power consumption of the startup threshold is only 1.52  $\mu$ W, which is only 5.93% of the control circuit power consumption with auxiliary power supply. This high-efficiency management circuit can be used not only for the weak energy collection of multi-core cables, but also for weak emotional magnetic field energy management such as the weak cable peripheral magnetic field, electromagnetic vibration energy collector, and reverse scattering sensor network caused by armor shielding.

Keywords: multi-core cables; magnetic energy harvesting; power management circuit; impedance matching; frequency up-conversion

收稿日期:2023-03-20 Received Date: 2023-03-20

<sup>\*</sup>基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3205703)、国家自然科学基金(61973217)项目资助

# 0 引 言

在智能电网电缆在线监测中,以采集电缆周边电磁 能为系统供电的自供能无线传感器网络为主要解决方 案<sup>[1-7]</sup>。由于在电气、机械等方面的优异特性,以交联聚 乙烯为主的多芯电缆已逐渐取代架空线,在 10~110 kV 的城市配电网中得到了广泛的运用<sup>[8]</sup>。而相比于单芯电 缆监测,多芯电缆的测量除了电流、温度、漏电等基本信 息,还有电缆位置、电流相位平衡等耦合信息。对于这些 多芯电缆间耦合状态的信息,即使对于同一个传感量,也 一般需要使用多传感器阵列。然而,多芯电缆周边磁场 交叠、相互抵消,能量采集器能得到的功率有限<sup>[9-13]</sup>,这 给电源管理电路提出了较高的要求。

目前,国内外对磁场能量采集的管理电路进行了深 入研究。Moon 等<sup>[14]</sup>建模分析了针对感性能量源的标准 管理电路,并通过增加磁通整形电容、负载与磁芯相连以 对齐传输窗口、有源栅极控制整流器等方式以提升传输 效率。Di 等<sup>[15]</sup>提出了一种基于升降压斩波器的新型非 隔离式三端口转换电路,将电路转换效率提升到60%。 上述改进标准管理电路由于没有考虑换能器微弱功率时 与电路的匹配,效率较低。此外,还有学者加入开关控制 原理,并设计相应的控制电路,实现磁场能量的采集管 理。Huang 等<sup>[16]</sup>提出将针对磁场能量信号的特点,设计 的控制电路参考了传统用于容性能量源的最大功率点跟 踪(maximum power point tracking, MPPT)算法,通过持续 跟踪 CT 的最大功率,在相同的 CT 感应电流下实现了约 20%的效率提升;Li等<sup>[17]</sup>提出了一种非线性接口电路模 型,使用升降压直流-直流(direct current-direct current, DC-DC)转换器来匹配非线性接口电路的负载电阻,利用 旁线圈设计了稳压与方波生成控制电路; Qian 等<sup>[18]</sup>提出 了一种具有综合控制功能的功率调节电路,通过补偿电 容器、阻抗匹配和短路角调节的协调实现全电流范围内 的功率最大化。然而,上述改进后的控制电路仅在较高 输入功率下才能启动、并且需要较高功率的稳定电源供 电,这导致了上述控制电路只能在单芯电缆等具有较强 的磁场能量情况下工作。综上所述,在微弱磁场能量采 集时,现有的电源管理电路能量转换效率低、控制电路功 耗高,启动阈值高。

针对上述问题,本文对电源管理电路进行了建模与 分析,提出了一种多芯电缆微弱磁场能量采集的低损耗 管理电路方案。通过变频匹配,减少了无功损耗,提高了 电路效率。提出了间歇性充放电的工作模式,该模式下 的自供电控制电路大幅降低了功耗与输入功率阈值。该 电路能够高效管理三芯电缆微弱磁场能量,为监测系统 供电。

# 1 电源管理电路原理

# 1.1 传统标准能量采集电路

在磁场取能管理电路中,标准的整流储能模块如 图1所示。其中等效电压源的输出可以表示为:



该标准能量采集电路结构简单,在当前感性能量采 集器管理电路中使用最为广泛。其中,电容 C<sub>s</sub>主要用于 能量的储存。在工作频率不变,换能器不变,输入条件不 变的情况下,也可将该电容作为阻抗匹配电容。最佳的 匹配电容取值如式(2)所示。

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_m}$$
(2)

其中, f<sub>0</sub> 是工频 50 Hz。

然而,由于多传感器系统与无线节点收发需要较大 功率,需要较大的电容用于储能。仅由工作频率和线圈 内参数决定的匹配电容值很有可能无法满足需求。例如 在工作频率 50 Hz 时使用一个内感为 1.5 H 的线圈,由 式(2)可以得到匹配电容值仅为 6.7 μF,远远达不到在 弱磁场下工作的大电容(如 1 mF)的储能要求。并且,随 着输入频率或者电路环境参数改变,很难维持匹配。

为解决上述问题,本文提出上变频匹配管理电路,对 线圈输出加入了开关控制,通过变频匹配,使电路高效输 出,最大化提高能量转换效率。同时,引入了中间电容。 利用中间电容实现阻抗匹配,并将中间电容能量转移至 大的储能电容中。

# 1.2 上变频匹配电路原理

改进后的电源管理电路由上变频匹配电路、整流电路、能量存储电路、控制电路组成,如图2所示。在设置了一个双向开关S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>,控制电路控制开关的导通和关断,控制电路工作频率(即上变频),使得回路中电感、电容回路实现并维持谐振匹配,然后通过整流输出,把电能高效存储在超级电容中。

上变频匹配部分各阶段的电路工作方式及等效电路 如图 3 所示。其中主电路由等效电压源  $V_s$ 、内电感  $L_m$ 、 内阻  $R_m$ 、双开关  $S_1$ 、 $S_2$ (由场效应管 N-mos 构成)、由 4 个



图 2 上变频匹配电源管理电路原理

Fig. 2 Schematic of up-conversion matching power management circuit

二极管  $D_{3} \sim D_{6}$  构成的全桥整流器、匹配电容  $C_{im1} < C_{im2}$  储 能电容  $C_{st}$  组成。另有用于生成参考信号和控制信号的 二极管  $D_{1} < D_{2}$ 。

设 0~*T*/2 为信号的半个周期,其中有开关控制相关的 t<sub>0</sub>, t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub> 这 3 个时间点。

管理电路开始工作后,在 0~t<sub>0</sub> 阶段,电路与传统的 整流电路相似,以较低的效率向储能电容转移能量;t<sub>0</sub>~ T/2 阶段,线圈内能量几乎完全释放,此时几乎不向储能 电容内充电。

本文提出的管理电路原理,引入了开关控制,使得在  $t_0 \sim t_2$ 时刻内,电路能以远高于标准管理电路的效率转移 能量。具体分析如下: $t_0 \sim t_2$ 时刻内,根据开关的导通和 关断的状态,可分为两个阶段,取能线圈电流上升阶段  $(t_0 \sim t_1)$ 、匹配电容储能阶段 $(t_1 \sim t_2)$ 。简化的不同阶段 的电路工作模式如图 3 所示。





Fig. 3 The working mode of the up-conversion matching circuit in different stages

在 $t_0 < t \le t_1$ 阶段,如图3(a)所示,开关S闭合。环路方程为:

$$V_{\rm S}(t) - V_{\rm R}(t) - V_{\rm L}(t) = 0$$
(3)

由微分关系解得:

$$i_{s}(t) = I_{m} \sin(\omega_{0}t - \varphi_{0}) + I_{m} \sin(\varphi_{0}) e^{-\frac{M}{L_{M}}t}$$
(4)  

$$\ddagger \psi, \varphi_{0} = \arctan \frac{\omega_{0}L}{R} \circ$$

$$t_1 < t \le t_2$$
 阶段时的环路方程为:  
 $V_L(t) + V_R(t) - 2V_D - V_C(t) = 0$  (5)  
其中,  $V_D$  是选用二极管的压降。

由微分关系,可求解得,在 $t_1 < t \le t_2$ 时间内,线圈输出的电流为:

$$i_{s}(t) = I'_{m} \sin(\omega_{0}t - \varphi'_{0}) + I'_{m} \sin(\omega_{1}(t - t_{1}) + e^{-\alpha(t - t_{1})})$$
(6)

充电电压为:

φ

$$V_{out}(t) = I_s(t_1) \sin [\omega_1(t - t_1)] e^{-\alpha(t - t_1)} +$$

$$Ksin(\omega_1(t - t_1) + \varphi_V)e^{-\alpha(t - t_1)} + V'_m sin(\omega_0 t - \varphi'_0)$$
(7)  
其中, I、V'、K、ω、, φ\_V 是由线圈参数与电容值共

同决定的常量。且 $\omega_1^2 = \frac{1}{L_M C_{IM}} - \left(\frac{R_M}{2L_M}\right)^2 > \omega_0$ 

由式(6)、(7)可知,在 $t_1 < t \le t_2$ 期间,电容充电电 压是低频 $\omega_0$ 和高频 $\omega_1$ 两个频率信号的叠加,式中高频信 号分解为与电路参数和 $I_s(t_1)$ 有关的两部分。在电路其 他参数保持不变的情况下,输出电压的大小与断开开关 时的供能支路电流 $I_s(t_1)$ 正相关,即达到峰值时断开开 关可以使阻尼谐振从最大点开始,充电电压提升最大。 在开关闭合期间,换能器电感与匹配电容产生谐振,且谐 振频率是由线圈参数与电路参数确定的常量,避免了输 入频率或者环境参数改变导致的谐振频率变化,使得电 路始终工作在谐振状态。由于稳定谐振,此过程中电路 大大提高了能量转换效率。

电路在一个输入信号周期内的工作状态如图 4 所 示。在0~t。时刻,电路在换能器原有感应电压的作用下 缓慢充电,此过程中电压与电流存在一定相位差,且峰值 均较小,充电功率小。在to时刻,电感输出电流降为0,若 此时继续保持传统充电模式,则直至下一次电流相位零 点的过程中实际充电功率为0。若在 to 时刻 Ver 输出高 电平,开关闭合,则线圈感应电流开始上升,线圈输出电 流 I。近似正弦上升,此时电感处于充电储能状态,且此时 满足阻抗匹配条件,电流值将高于原电流值。在 t, 时刻 开关断开,由于电感的续流特性,电感中的电流将全部从 开关支路转移至电容充电支路。之后,线圈输出电压 Vau 迅速升高,1.迅速下降,电感进入放电状态,储能电容开 始快速充电。在 $t_2$ 时刻, $I_s$ 衰减至零点附近, $V_{out}$ 产生高 频震荡,此时电感内能量几乎完全释放,电容的充电功率 再次减至0。至T/2,此时换能器上开始产生负半周期的 感应电压。负半周期的电路工作逻辑与正半周期一致。

直至感应电压再次归 0,即 T 时刻,电路进入下一个 周期。





由对充电过程的分析可知,对 t<sub>0</sub> 和 t<sub>1</sub> 的选择将是影响充电电流、电压,最终影响充电功率的重要因素。t<sub>0</sub>~ t<sub>1</sub> 时刻内,若选择在电感电流最大时断开开关,则充电电 压提升最大。控制开关在电感电流峰值点断开,才能使 得在每个开关周期内管理电路能量提取效率最高。

#### 1.3 低功耗自供电控制电路

1) 常规的自供电控制电路

要形成一个完整的自供电能量管理电路,开关的控制与供电必须是完全自主的。由于在弱磁场条件下,输入有限,控制电路必须消耗最少的功率,才能实现整个系统的微弱能量高效转换和储存。

常规的自供电控制电路,为实现稳定供电和控制逻 辑自洽,一般使用辅助整流电源。将换能器的输出经过 整流对辅助电源,当辅助电源电压充电至控制电路的额 定供电电压,如3.3 V/5.5 V,而后控制电路才开始工作。 在实际使用过程中,该类电路首先需要花费较长的对辅 助电源的充电时间,启动速度慢。辅助电源的充电效率 低。同时对辅助电源充电消耗大量电能,导致注入主电 路的电能减少,使得整个电路的转换效率大大降低。例 如,使用 1  $\mu$ F 的辅助电源,在输入电压 5 V 的情况下,将 辅助电源充电至控制电路工作电压 3.3 V,带辅助电源的 控制电路总功耗就高达 25.63  $\mu$ W,且控制电路的充电效 率仅为 3.2%。并且,由于需要稳定辅助电源的电压,使 得控制电路始终工作在高电压水平下,这同样大幅增加 了功耗。针对上述问题,有文章通过线圈组的方式,分别 对主电路与控制电路供能,这大大增大了系统体积,且并 未实际解决在微弱能量条件下的供电问题。

针对上述问题,本文提出了适用于微弱输入条件下 的单输入自供电超低功耗控制原理。

2) 低功耗间歇控制电路原理

根据对主电路的控制方法分析,控制开关在电感电流最小点闭合,又在峰值点断开,才能使得在每个开关周期内管理电路能量提取效率最高。控制电路输入的比较信号是线圈两端的输出,根据相位三角形与线圈的内部参数分析可知,线圈的输出电压与电流存在相位差。开关需要在电流较小时导通,由于相位差存在,导通期间电压处于较大值,恰可用于比较器供电。而当电流升高至峰值点,此时电压下降至较小值,控制电路输出低电平,此时开关断开,符合控制逻辑。因此,在该原理下设计的控制电路,只需要输入电压峰值大于比较器的工作电压,即可满足启动阈值条件;且工作时间较短,仅在峰值点附近工作。

每个开关周期内,提出的自供能控制电路的平均功 耗可以通过式(8)计算。

$$P_{all} = \frac{\int_{0}^{T} V_{in}(t) \times I_{w}(t) dt}{T}$$
(8)

其中,  $V_{in}(t)$  是经整流后的控制电路输入电压,  $I_w(t)$  是控制电路的工作电流。在实际电路中, 可以通过使用 采样电阻的  $R_s$  方式得到  $I_w(t)$ , 即:

$$_{w}(t) = \frac{R_{\rm s}}{V_{\rm s}(t)} \tag{9}$$

在 $0 \sim t_0$ 时间之内,控制电路处于静态,此时的能量 损耗主要由比较器的静态功耗产生。在 $t_0 \sim t_1$ 时间之内, 开关闭合,则此时控制电路产生动态工作功耗。

设比较器静态电流 *I*<sub>0</sub> 为常量,则控制电路总的平均 功耗为:

$$P_{all} = P_{static} + P_{dynamic} =$$

$$2 \times \int_{0}^{t_0} V_{in}(t) \times I_Q dt + \int_{t_0}^{t_1} V_{in}(t) \times I_w(t) dt$$

$$T$$
(10)

提出的间歇控制电路,供电电压长时间处于低电压 水平,静态电流也较小,总静态功耗很低;高电压水平时 电路工作,功率较大,然而由于工作时间较短,仅在峰值 点附近工作,所以总动态工作平均功耗也大大降低。由 式(10)可知,输入电压越低,控制电路的总功耗就越低。 在低输入的条件下,更适合用于设计自供电控制电路。

根据上述自供电间歇启动超低功耗控制电路原理, 本文设计电路如图 5 所示,是由双模拟比较 TLV3691 构 成的二级控制电路,分别实现相位控制与占空比控制。 该电路完全由线圈输出作为辅助电源以及参考输入。所 选用比较器的静态电流 75 nA,工作供电电流 150 nA,在 前文所述的小占空比条件下,控制电路的功耗也相应 较小。



Fig. 5 Schematic of control circuit

3) 低功耗间歇控制电路工作模式

首先是先信号相位的控制,如图 6(a)所示。一个周 期开始, $V_A$ 和  $V_B$ 以相近的斜率升至峰值,在此过程中,  $V_A$ 始终大于  $V_B$ ,此时比较器输出低电平;峰值之后,电压 开始下降, $V_B$ 的下降速度受  $C_1$ 、 $R_1$ 的影响,远小于  $V_A$ ,因 此两条曲线将产生交点,设为  $t_0$ 时刻,此时相位控制信号 由低电平转为高电平。 $V_A$ 降至 0 以后重新上升的过程 中,两条曲线又将产生交点,相位控制信号从高电平变为 低电平。这个过程中比较器工作产生的能耗较小,且可 通过调整  $C_1$ 、 $R_1$ 实现相位的控制。

将相位控制得到的信号输出至下一级,如图 6(b)所示。 $V_c$  分别经过积分电路与分压电路产生两路信 号。在 $t_1$ 时刻,两路信号产生交点,此时控制信号  $V_{errl}$ 由高电平转为低电平。 $t_0 \sim t_1$ 即为控制电路在一个周期 内工作的时间,在这个过程中控制电路产生的能耗较 小。且可通过调整积分电路与分压电路的参数实现相 位的控制。

图 6(c)是由外部电路供电的控制电路产生的脉冲 控制信号。而在实际情况中,主电路的输入电压同时作 为控制电路的供电和比较信号,控制信号又直接导致输 入电压的变化。由此反馈产生的振荡将导致的电路工作 逻辑混乱,通过较低功耗的 RC 延时电路将其消除。

所提出的自供电控制电路,使用线圈输入作为电源, 在工作点以外长时间处于低电压状态,大幅缩短了控制 电路的动态工作时间,降低了控制电路的总功耗。

# 2 实验验证及分析

搭建实验平台,对多芯电缆磁场能量采集电源管理 电路的工作特性进行实验测试。实验平台如图7(a)所 示,实验电路参数如表1所示。利用大电流发生器产生 50 Hz 的三相交流电,使用三芯电缆 YJV 0.6/1 kV



Fig. 6 Logic of control circuit

3×70 mm<sup>2</sup>。根据多芯电缆的磁场分布规律,本文采用了 经磁通汇聚优化的分裂式线圈用以采集能量,如图 7(b) 所示。该结构在现有的分裂线圈的基础上,增加了磁芯 优化的结构设计,减少了漏磁,改进了对微弱磁场的取能 效果。

选取高频导磁性能好的铁氧体磁芯,其相对磁导率  $\mu_r$ =2400,磁芯横截面积63mm×25mm,磁芯内径D= 38mm,使用磁场汇聚的磁芯结构得到感应信号。选用 线圈匝数5000匝,阻抗分析仪测量得线圈内阻770Ω, 励磁电感1.7H,旁路电容50pF。利用辅助线圈产生控 制信号。



(a) Experiment platform



(b) Energy-harvesting coil 图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental device

Table 1	Circuit	components	and	parameters
---------	---------	------------	-----	------------

元器件编号	型号	参数
$\mathbf{D}_1 \sim \mathbf{D}_6$	1n60p	$V_{\rm d} = 0.3 {\rm V}$
$C_{ m st}$		1 mF
N-mos	2N7002	$V_{\rm th} = 2$ V, $C_{\rm iss} < 50$ pF

#### 2.1 变频匹配实验测试

设定电流 40 A,此时感应电压峰峰值 5 V。经计算 50 Hz 实验条件下的匹配电容值为 5.96 μF。考虑到工 作逻辑,本文提出的电路采用了对称双电容构成谐振。 由图 8 所展示的实验结果可知,当等效谐振电容为 5 μF 时,线圈电磁能量采集器输出 30 s 内平均功率最大,约 6.1 mW。此时系统最接近阻抗匹配条件,线圈以最大功 率输出,符合理论推导。

# 2.2 控制电路实验测试

对本文设计的管理电路与控制电路进行自供能实验。实验过程中各电路参数波形变化如图9所示。通过 实验,观察控制信号与线圈输入的关系。图5电路中的 A点电压可看作是线圈输入信号整流后的波形。如图9 是控制信号与A点电压波形间的关系。从图中可以看 出,在开关断开期间,输出电压逐渐上升,此时输入电压 来自于线圈感应电压。而后开关闭合,线圈进入电感储 能阶段,在t<sub>1</sub>时刻断开开关,输出支路由短路状态转换成



电容充电。由于电感电流不能突变,此时以较大的电流 向电容内充电,产生了过冲电压,后回落至零点。观察电 压波形可以看出,开关再次断开时,输入信号产生了与理 论分析相符的高频振荡。



图 9 控制信号与线圈输出电压波形 Fig. 9 Waveform of control signal and coil output voltage

同时可以观察到在开关闭合的过程中,输出信号 与控制信号就已出现振荡现象,这是由于在实际电路 中,控制电路的供电与比较信号均来自于电路的输入 信号,当开关闭合时,输入端短路;此时控制电路失去 供电和比较信号,停止工作,这将使 $V_{ett}$ 再次突变至低 电平,从而开关断开;而后重新工作的控制电路再次使 得主电路短路。这将产生较大的振荡并使得电源管理 电路无法按照设计的充放方式向电容充电。为解决这 个问题,本文在控制电路的设计中加入了电感 $L_1$ 、电阻  $R_5$ 、电容 $C_3$ 以消除振荡。其中 $L_1$ 利用电感的续流特 性,用以平滑波形;电阻 $R_5$ 与电容 $C_3$ 构成了 RC 时延 电路,使控制信号在控制电路因反馈不工作时仍能在 一段时间内保持电平,从而尽可能地消除因耦合产生 的振荡,实现控制逻辑。 实验充电的过程,电流与电压均呈现出与理论推导 结果相符的变化趋势。

#### 2.3 控制电路功耗测试

主电路选取的 N-mos 开关的启动电压  $V_{GSth}$  最小值 为 1.1 V,标准值为 1.75 V。选取的比较器供电电压范 固在 0.9~6.5 V。结合理论分析,只需要满足开关启动 时控制电路的输出  $V_{ett}(t_0) > V_{GSth}$ ,电路即可正常工作。 因此,本文所提出的控制电路的启动阈值电压较小。设 定实验范围为换能器输出电压峰峰值 4~8 V,其中 4 V 是经整流桥压降后仍满足控制电路启动阈值的电压值, 使用串联在控制电路输入端的参考电阻得到控制电路的 动态工作电流,结合实验数据,由式(10)可得到不同的 输入条件下控制电路的功耗。如图 10 所示。



输入电压越低,控制电路的功耗越低。满足启动阈 值的控制电路,其产生的最小平均功耗仅为 1.52 μW,仅 为带辅助电源的控制电路功耗的 5.93%。

#### 2.4 电源管理电路充电效果对比

为检验本文提出的电源管理电路的充电效果,现分 别使用传统管理电路、外部供电管理电路与上述电路作 为电源管理电路,在电缆电流 40 A 条件下进行实验。此 时感应换能器输出为 50 Hz、Vpp=7.2 V。此时控制电路 产生的功耗为 2.99 μW。对 1 mF 的储能电容充电。储 能电容电压随时间变化情况如图 11(a)所示。

充电 25 s 后,传统变频匹配电路中储能电容最终电 压仅为 2.1 V;使用外接电源的变频管理电路最终充电 电压为 5.5 V,充电电压较传统管理电路提高 163%;而 使用自供能控制电路的上变频匹配电路储能电容进行充 电,电压为 5.1 V。对比图 11(b)所示充电功率可以看 出,变频匹配管理电路最大充电功率仅为 0.8 mW,而本 文提出的管理电路最大充电功率可达 2.5 mW,相比提高 212%。经检验,该实验条件下电路输入电压均值约





Fig. 11 Comparison of low-loss management circuit and standard circuit charging capacitor energy



2.55 V,输入电流 1.3 mA,输入功率约为 3.3 mW。电源 管理电路的最大工作效率为 74.24%,能量传输效率提高 了 6.9 倍。 为更全面地观测本文设计电路的充电效果,改变电 缆电流值,实验在换能器不同输出电压的条件下,对电路 的最大充电功率进行了对比,结果如图 12 所示。可以看 出使用本文提出的电路能够显著地提高电源管理电路的 充电功率。

# 3 结 论

针对现有自供电管理电路在多芯电缆微弱磁场能量 条件下的功耗大、效率低的问题,本文分析了感性能量源 管理电路的特性,根据其续流的特点,结合匹配与电压电 流峰值关系,提出了间歇充放电的低功耗多芯电缆微弱 磁场能量采集管理电路原理,在提升主电路能量转换效 率的同时,大幅降低了电路启动所需的功耗。理论分析 和实验表明,根据该原理所设计的间歇充放电变频匹配 管理电路,在较低输入的情况下,每个周期均可实现高效 自启动与稳定充能。所提出的超低功耗自供电控制电 路,满足启动阈值的最小平均功耗仅为1.52 μW,仅为带 辅助电源的控制电路功耗的5.93%在40 A、50 Hz 的电 缆电流实验条件下,换能器感应电压峰值约3.6 V,能量 转换效率高达74.74%,较标准能量管理电路提升了 6.9 倍。

# 参考文献

- AHOLA J, AHONEN T, SARKIMAKI V, et al. Design considerations for current transformer based energy harvesting for electronics attached to electric motor [C].
   2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008: 901-905.
- [2] TAN C, ZHAO Y, TANG Z. Study on energy harvesting of open-close current transformer [C]. 2020 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD), 2020: 567-571.
- [3] WANG J, KIM J, HA D S. Powerline energy harvesting circuit with a desaturation controller for a magnetic core[C]. 2021 IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 2021:220-223.
- [4] ZHOU W, LIU Z, HUANG Q, et al. Design of magnetic cores for current transformer energy harvesting devices [C]. 2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2019;1-5.
- [5] 岳天琛, 刘亚东, 何志苠, 等. 感应取能电源磁芯功率输出特性研究[J]. 高压电器, 2015, 51(1):18-23, 29.

YUE T CH, LIU Y D, HE Z M, et al. Power output characteristics of magnetic core in CT energy harvesting devices [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51 (1): 18-23,29.

- [6] GAIKWAD A A, KULKARNI S B. Evaluation of dimensional effect on electromagnetic energy harvesting[J]. Procedia Computer Science, 2018, 143: 58-65.
- [7] ZHUANG Y, XU C, SONG C, et al. Improving current transformer-based energy extraction from AC power lines by manipulating magnetic field[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(11):9471-9479.
- [8] 韩立奎,王海涛,韩晓冰. 35 kV 电缆设计中三芯与 单芯电缆的选择与比较[J]. 电线电缆, 2011 (5): 15-16,22.
  HAN L K,WANG H T,HAN X B. Selection and compare design 35 kV three-core cable with single-core cables[J]. Electric Wire & Cable,2011(5):15-16,22.
- [9] SUN T, ZENG X, LU Y, et al. Research on energy harvesting and its application in thermal condition monitoring of three-core power cables [C]. The International Symposium on High Voltage Engineering, 2019:684-696.
- [10] ZENG X, LI B, LI H, et al. Non-invasive energy harvesting for wireless sensors from electromagnetic fields around 10 kV three-core power cables [C]. 2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), 2017:536-539.
- [11] KHAN F U. Energy harvesting from the stray electromagnetic field around the electrical power cable for smart grid applications [J]. The Scientific World Journal, 2016, 2016;3934289.
- ZHAO Z, WANG D F, HOU Y, et al. Noninvasive passive measurement of multiphase currents in IoT[J].
   IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12):12860-12870.
- [13] ZHU K, HAN W, LEE W K, et al. On-site non-invasive current monitoring of multi-core underground power cables with a magnetic-field sensing platform at a substation[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(6): 1837-1848.
- [14] MOON J, LEEB S B. Power electronic circuits for magnetic energy harvesters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1):270-279.
- [15] DI Y, GAO Y, WANG Y, et al. Design of draw-out

power supply for on-line monitoring system of three-core power cables [C]. 2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), 2021:616-620.

- [16] HUANG T C, DU M J, KANG Y C, et al. 120% harvesting energy improvement by maximum power extracting control for high sustainability magnetic power monitoring and harvesting system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(4):2262-2274.
- [17] LI K, HE X, WANG X, et al. A nonlinear electromagnetic energy harvesting system for self-powered wireless sensor nodes[J]. Journal of Sensor and Actuator Networks, 2019, DOI:10.3390/ jsan8010018.
- [18] QIAN Z, WU J, HE X, et al. Power maximised and anti-saturation power conditioning circuit for current transformer harvester on overhead lines [J]. IET Power Electronics, 2018, 11(14):2271-2278.

作者简介



**李时博**,2020年于上海交通大学获得学 士学位,现为上海交通大学在读硕士研究 生,主要研究方向为磁场能量采集。

E-mail: fj-qz-dh-lsb@ sjtu. edu. cn

Li Shibo received his B. Sc. degree from

Shanghai Jiao Tong University in 2020. He is currently pursuing his M. Sc. degree in Electronic and Information Engineering at Shanghai Jiao Tong University. His research interest is magnetic energy-harvesting.



**李平**(通信作者),1984 年于重庆大学 获得学士学位,1995 年于重庆大学获得硕士 学位,2003 年于重庆大学获得博士学位,现 为上海交通大学教授,主要研究方向为传感 器技术、仪器和测量、能量采集和自供电

E-mail: liping\_sh@ sjtu. edu. cn

Li Ping (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Chongqing University in 1984, 1995, and 2003, respectively. He is currently a professor at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include sensors and actuators, measurement and instrumentation, energy-harvesting and self-powered technology.



**鞠登峰**,1996年于山东工业大学获得学 士学位,1999年于西安交通大学获得硕士学 位,现为国网智能电网研究院正高级工程 师,主要研究方向为电力智能传感技术。

E-mail: judf321@163.com

**Ju Dengfeng** received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 1996 and M. Sc. degree from Xi' an Jiaotong University in 1999. He is currently a professorate senior engineer at the State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd. His main research direction is electric power intelligent sensing technology.