

一种小型海流能独立发电系统的自供电直流变换器

杨林^{1,2}, 王海峰¹, 赵威¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文针对小功率海流能独立发电系统所处海域及其供电负载的特殊性,同时考虑发电系统自启动、低流速运行、间歇性发电和发电机输出电压低等问题,提出一种基于传统 Boost 电路和 Buck-Boost 电路复合结构的自供电直流变换器,并进行了能量收集电路系统设计。在对自供电直流变换器和发电系统进行分析的基础上,系统采用一种变步长爬山搜索的最大功率点跟踪控制方法;为延长电池的使用寿命,系统的总体控制策略根据电池荷电状态来调用相应的控制方法。最后搭建了一台额定输出功率为 60W 的实验样机,实验结果验证了理论分析的正确性,以及本文所提出的自供电直流变换器的可行性和有效性。

关键词: 小型海流能发电; 能量收集; 直流变换器; 自供电; Boost 电路; Buck-Boost 电路

DOI: 10.12067/ATEEE1801043 **文章编号:** 1003-3076(2018)07-0075-09 **中图分类号:** P743.1

1 引言

海流能指海底水道和海峡中较为稳定流动的海水所产生的能量,如因潮汐形成的潮流、海水浓度差形成的密度流、海风形成的风海流等^[1]。海流能发电作为海洋能发电其中的一个重要分支,近年来其发电技术已取得了巨大的进展,尤其是潮流能发电,已有成功的商业化运营^[2]。但是,当前对海流能发电的研究主要集中在大中型功率发电系统,而针对小功率独立发电系统,则研究较少。相较于应用前景更加广阔的大中型海流能发电系统,小型海流能独立发电系统仍存在着较高的研究价值,例如对一些远离海岸线需要供电的海洋设备,因地制宜地利用海洋可再生能源发电来解决其供电问题则最具现实意义。

虽然海流能具有一定的规律性,但是利用其发电却存在着一些不利的条件,而且受地域和气候的影响,各地的能源还有很大的差别。图 1 为我国浙江舟山某海域夏季某日大潮时的潮流流速曲线。从图 1 可以看出,潮流流速存在波动性、间歇性和随机性等特点,即使是在大潮时期,其最大流速也仅为

1.1m/s 左右,流速维持在 0.5m/s 以上的时间也只有 7h 左右,若在其他日期,还远没有这样的条件;另外潮流能的能量密度本身也较低。与潮流能一样,其他形式的海流能也存在着相似的特点,因而利用海流能发电有着功率波动大、电能稳定性差和间歇性发电的特点。为提高海流能的利用率,发电系统应具有低流速启动运行的能力,而提高捕获海流能并转化为电能的效率主要受能量捕获装置的功率特性和发电机负载匹配度的影响^[3]。

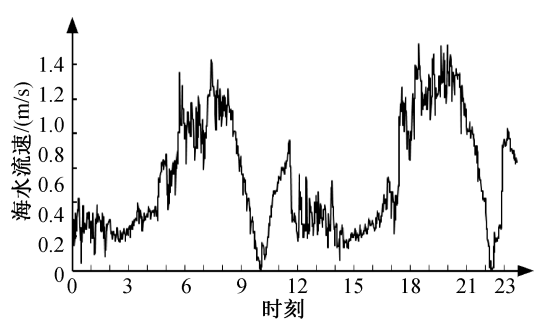


图 1 浙江舟山某海域某日大潮时的潮流流速
Fig. 1 Tidal current speed curve of spring tide day at sea area in Zhoushan, Zhejiang

小型海流能独立发电系统还存在着一些自身的特殊性。常规的海流能发电为了尽可能多地增加发电量,多选址在流速较高的海域,但小型海流能独立发电系统由于供电负载的特殊性,所处地域资源条件有限,其发电机常常在低流速条件下运行,发电机输出电压也较低,所以系统需要更多地考虑低流速下的启动能力和发电能力。

另外,系统长期可靠运行需要有一个有效的孤网能量管理控制系统,而对于小功率的独立发电系统,能量管理控制系统的供电电源及其耗能情况也应作为一个重要的考虑因素。通常在中大型功率发电系统中,这个能量管理控制子系统的供电电源可由系统内的储能装置持续不断地提供,但是对于一个小功率的独立发电系统,由于发电量和储能容量的限制,系统中的储能装置不能保证有足够的电能一直供给控制系统,所以小型海流能独立发电系统还应具有自启动能力,即能够不依赖于系统储能装置的剩余电能,自动地收集和存储电能。

在包括海流能发电在内的海洋能发电技术领域,当前对于发电系统中电力电子拓扑的研究,普遍采用“三相不控整流器(或全控整流器)-Boost 电路(或 Buck 电路)-直流负载”的结构,工作仍侧重于开发先进的控制算法,如开发快速精确的最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)算法^[1,4-6],而鲜有从改进系统的拓扑结构上考虑。本文针对小功率海流能独立发电系统的低流速启动运行和自启动问题,提出一种基于传统 Boost 电路和 Buck-Boost 电路复合结构的自供电直流变换器,并搭建了一台额定输出功率为 60W 的实验样机,实验结果验证了理论分析的正确性,以及该自供电直流变换器的可行性和有效性。

2 能量收集电路系统设计

本文所设计的小型海流能独立发电系统的拓扑如图 2 所示。该系统包括能量捕获装置、发电机、不控整流器、卸荷负载、自供电直流变换器、蓄电池、用电负载、MPPT 控制子系统和能量管理控制子系统。其中自供电直流变换器含有两个输出端,一个输出端(低压端)接蓄电池,另一个输出端(高压端)接 MPPT 控制子系统。MPPT 控制子系统从自供电直流变换器的高压输出端获得工作电源,并对发电机进行 MPPT 控制,同时也对蓄电池的充电进行控制。能量管理控制子系统的供电电源由蓄电池提供,且

其与 MPPT 控制子系统之间可进行相互通信,从而对蓄电池的充电和放电进行管理,保证蓄电池不过充和不过放,延长蓄电池使用寿命。

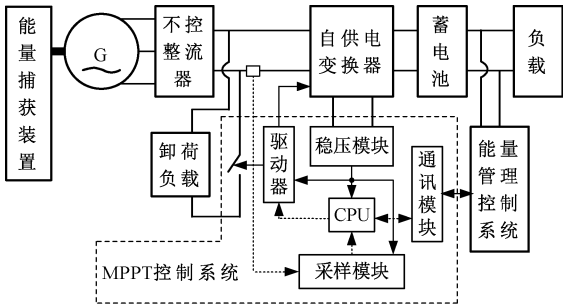


图 2 小型海流能独立发电系统拓扑
Fig. 2 Small-scale stand alone marine current power generation system topology

图 2 所对应的主电路结构原理图如图 3 所示。本文所提出的自供电直流变换器由电容 C_0 、 C_1 、 C_2 ，二极管 D_1 、 D_2 ，电感 L_1 和功率开关管 S_1 组成,其中 L_1 、 S_1 、 D_1 和 C_1 组成的电路结构为传统 Boost 结构的电路, L_1 、 S_1 、 D_2 和 C_2 组成的电路结构为传统 Buck-Boost 结构的电路。从图 3 可以看出,本文所提出的自供电电路既可以看作是在 Boost 电路电感的两端并联一个串联的二极管和电容,以形成 Buck-Boost 电路的输出结构(低压输出端),又可以看作是在 Buck-Boost 电路功率开关管的两端并联一个串联的二极管和电容,以形成 Boost 电路的输出结构(高压输出端)。通过改变功率开关管 S_1 的位置,本文所提出的自供电直流变换器的另一种电路结构如图 4 所示。与图 3 的电路结构相比,图 4 电路结构的高压输出端与低压输出端共地,可便于对这两个输出端进行功能扩展设计。

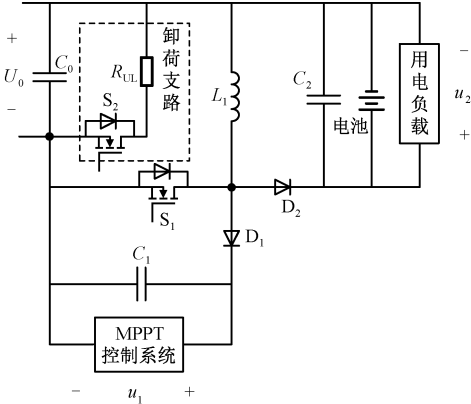


图 3 发电系统主电路原理图
Fig. 3 Main circuit diagram of power generation system

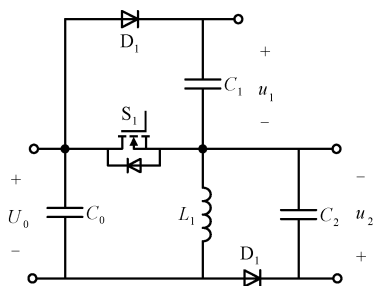


图4 自供电直流变换器的另一种电路结构
Fig. 4 Another circuit structure of self-powered DC/DC converter

当蓄电池充满电且发电机还在继续运行时,系统需将多余的电能消耗掉,为此本文设计了由开关管 S_2 与卸载电阻 R_{UL} 组成的卸荷支路。图3中,若功率开关管 S_1 和 S_2 选用 N 沟道增强型 MOSFET 或 IGBT,然后从 u_1 端获得驱动电源,则相对于单独采用 Buck-Boost 电路的系统,不需要隔离驱动电源,简化了驱动系统。当发电机启动运行时,其输出的电能先传输到 u_1 端,而不会传输到 u_2 端,通过设计可以使 MPPT 控制子系统的功率消耗很小,因而可认为发电机几乎是在空载下启动,从而提高了发电机的低速启动能力,避免“小马拉大车”的情况。

MPPT 控制子系统上电运行并驱动 S_1 以一定的占空比导通时,才能有电流流入蓄电池中。而 S_1 的驱动电源从 u_1 端获得,一方面相对于 U_0 ,当 S_1 工作时 u_1 为一升压输出,此时 MPPT 控制子系统可给予功率开关 S_1 一定等级的驱动电压;另一方面相对于从 U_0 端获得 MPPT 控制子系统的工作电源, u_1 端储能更多,电压也更稳定。

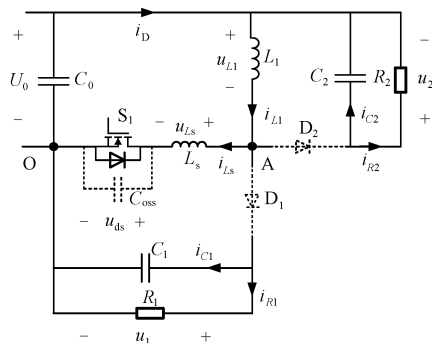
海流能具有间歇性的特点,如图1中的停潮期(0:00~5:00)和平潮期(12:00~17:00),这两段区间的流速较小,且所占的时间比重较大,这样条件下的流速不能带动水轮机转动,发电机无电能输出,但发电系统中的负载却需要消耗电能一直工作。采用本文所提出的自供电能量收集电路系统,可使 MPPT 控制子系统在发电机一直无电能输出时,不消耗系统的剩余电能,即“闲时不耗能”,只要发电机运行,MPPT 控制子系统就能获得工作电能,并将电能存储到蓄电池中。

3 自供电直流变换器的工作原理

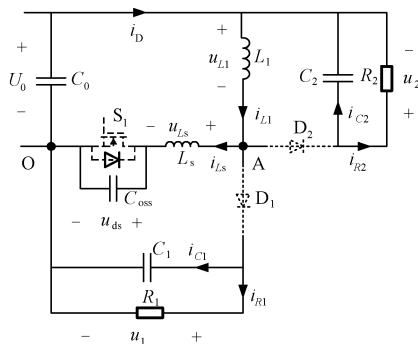
3.1 自供电直流变换器的工作模式分析

二极管为电压控制型开关器件,本文所提出的

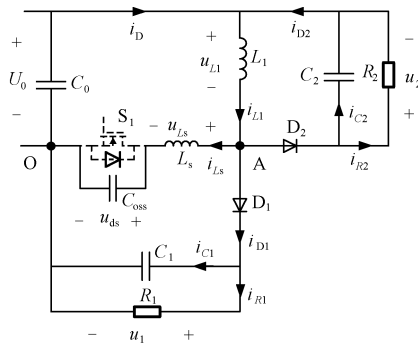
自供电直流变换器,在 S_1 断开瞬间,若 $u_1 > U_0 + u_2$,则 D_1 不导通, D_2 导通, L_1 的电压被 u_2 钳制,随着 u_1 的下降和 u_2 的上升,之后 D_1 和 D_2 同时导通;反之,若 $u_1 < U_0 + u_2$ 时,则 D_2 不导通, D_1 导通, L_1 的电压被 u_1 钳制,随着 u_1 的上升和 u_2 的下降,之后 D_1 和 D_2 同时导通。但在实际中,由于线路和器件寄生参数的存在, S_1 断开后, D_1 和 D_2 几乎同时导通。下面以图3电路结构的变换器为例进行说明,在电感电流连续模式(Continuous Current Mode, CCM)下,变换器有4种工作模式,如图5所示。为了简化分析,本文在电路分析过程中视 D_1 、 D_2 和 S_1 的开关过程接近理想状态,并考虑 S_1 支路的寄生参数 L_s 和 C_{oss} ,其中 L_s 为 S_1 支路的杂散电感, C_{oss} 为 MOSFET 的寄生输出电容。



(a) 模式1



(b) 模式2



(c) 模式3

由式(5)和式(6)可以看出,本文所提出的自供电电路高压输出端的电压 U_1 与其输入电压 U_0 的电压变比关系和 Boost 电路在 CCM 下的电压变比关系相同,自供电电路低压输出端的电压 U_2 与其输入电压 U_0 的电压变比关系和 Buck-Boost 电路在 CCM 下的电压变比关系相同,即本文所提出的自供电电路仍保持了 Boost 电路和 Buck-Boost 电路的输出电压特性。

稳态工作时,电容 C_1 和 C_2 各自的充电量等于其各自的放电量,通过 C_1 和 C_2 的平均电流均为 0,故通过二极管 D_1 的电流平均值就是电阻 R_1 电流的平均值 I_1 ,通过二极管 D_2 的电流平均值就是电阻 R_2 电流的平均值 I_2 ,根据功率平衡关系有:

$$U_0 I_D = U_1 I_1 + U_2 I_2 = \frac{U_1^2}{R_1} + \frac{U_2^2}{R_2} \quad (7)$$

联立式(5)~式(7)可得:

$$R_{eq} = \frac{U_0}{I_D} = \frac{R_1 R_2 (1-D)^2}{R_2 + R_1 D^2} \quad (8)$$

式中, R_{eq} 为自供电电路的输入等效电阻,当负载确定时 R_{eq} 与 S_1 的占空比 D 为反比关系。

4 发电系统控制策略

4.1 基于自供电直流变换器的发电系统分析

海流能发电中的发电机通常采用永磁发电机^[7-9],基于本文所提出的自供电变换器,采用三相永磁同步发电机和三相不控整流桥的发电系统等效电路如图 6 所示。自供电电路的输入端接整流器的输出端,而电压 U_0 的波动主要与海水流速和自供电电路的占空比有关。

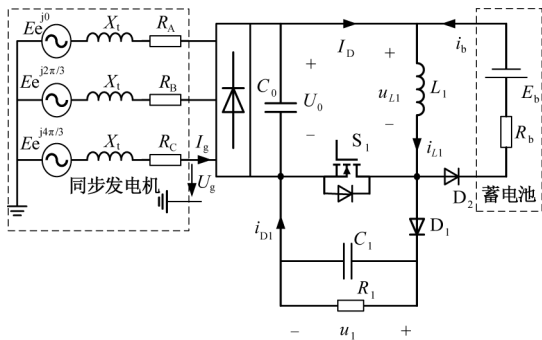


图 6 发电系统等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of power generation system

海流能发电中的能量捕获装置大部分为旋转类水轮机,水轮机将海水的动能转换为发电机转子轴上的机械能,其能吸收海水动能的最大功率与海水

流速的三次方成正比关系^[7]。MPPT 控制方法中的“爬山搜索法”的原理是通过不断地对发电机的等效负载添加扰动,调整负载所吸收的功率,使其等于当前流速下水轮机所对应的最大功率点的功率^[10]。

三相永磁同步发电机绕组的空载感应电动势有效值为:

$$E = \frac{4.44npN_1 k_{w1} \Phi_0}{60} \quad (9)$$

式中, n 为发电机转子的转速; p 为电机极对数; N_1 电枢相绕组串联匝数; k_{w1} 为基波电动势的绕组系数; Φ_0 为每极基波磁通。由式(9)可以看出, E 与 n 为成正比关系,而 n 又与海水的流速成正比关系。当海水流速较小时,发电机的空载感应电动势也较小,当发电机带载时,其电枢电流的大小 I_g 与其输出端等效阻抗的大小 R_g 成反比关系,因而发电机要能在低流速下启动运行, R_g 不能太小,这样水轮机才能克服由电枢电流中的有功分量引起的阻力转矩^[11]。

图 6 中,根据功率平衡关系有:

$$3U_g I_g \cos\varphi = U_0 I_D \quad (10)$$

式中, $\cos\varphi$ 为发电机的功率因数。对于三相不控整流器有:

$$U_0 = 3\sqrt{6}U_g/\pi \quad (11)$$

联立式(8)、式(10)和式(11)可得自供电直流变换器的占空比与发电机的负载关系为:

$$R_g = \frac{U_g}{I_g} = \frac{R_1 R_2 \pi^2 (1-D)^2 \cos\varphi}{18(R_2 + R_1 D^2)} \quad (12)$$

由式(12)可以看出,在负载确定的情况下,电路占空比 D 越小, R_g 越大,则由电枢电流中的有功分量引起的阻力转矩越小,发电机越能在低流速下运行; D 越大, R_g 越小,则发电机所带的负载越大。

蓄电池接在自供电电路的低压输出端,蓄电池的模型可简化为一个理想电压源 E_b 与其等效内阻 R_b 串联的结构^[12],且 R_b 非常小,通常为 $m\Omega$ 级。当 S_1 断开后,若 u_1 较小,且 L_1 的电压小于蓄电池电压,则自供电电路的工作仅相当于 Boost 电路;若某个时刻由于海水流速的变化和负载的扰动使 U_0 快速下降,而 u_1 由于其负载较小而下降缓慢时,则自供电电路的工作仅相当于 Buck-Boost 电路。 D_1 和 D_2 共同导通时,由于蓄电池电压的钳位作用,即使在较高的占空比下 u_1 也不会上升得太高,电感 L_1 的电流只能流入蓄电池中,蓄电池的充电电流 i_b 为:

$$i_b = \frac{u_1 - U_0 - E_b}{R_b} \quad (13)$$

由式(13)可知, D_1 和 D_2 共同导通时,即使 u_1 有一个很小的增量,也可能使 i_b 有较大的增加。根据式(5),占空比增大时, u_1 增大,进而 i_b 增大, i_b 的增大意味着发电机要输出更多的功率,但在海水流速一定的情况下,继续增大占空比,只能导致发电机在重载情况下运行,最终将拉停电机。

另一方面,MPPT 控制子系统接在自供电直流变换器的高压输出端上,实际中 MPPT 控制子系统为一恒功率性负载,而且其能耗很小。根据恒功率负载的负阻抗特性,当 u_1 增大时其吸收的电流减小,当 u_1 减小时其吸收的电流增加,因而增加 S_1 的占空比,电感不断存储的电感则更多地给电容 C_1 充电使 u_1 上升,当 u_1 上升到使其与 U_0 和 E_b 三者之间满足基尔霍夫电压定律时, D_1 和 D_2 共同导通,并且电感中的大部分电流将流入蓄电池。

4.2 系统控制策略

为延长蓄电池使用寿命,一般不希望蓄电池处于过充和过放状态,因而系统的总体控制策略根据蓄电池的剩余荷电状态(State Of Charge, SOC)进行划分。发电系统控制策略如图 7 所示。在蓄电池接近满充($SOC \geq 90\%$)时,只对其进行浮充,并切入卸荷负载;在 $SOC < 90\%$ 时,MPPT 运行;当蓄电池接近过放($SOC \leq 10\%$)时,必须停止其对用电负载继续放电,同时 MPPT 继续运行收集能量;当 $SOC = 20\%$ 时,蓄电池才开始放电,设置 SOC 在 $10\% \sim 20\%$ 的区间,可避免蓄电池刚超过过放保护条件时就放电,最终导致用电负载供电不正常。蓄电池的放电、浮充和卸荷负载的切入,均由能量管理控制子系统协调控制。

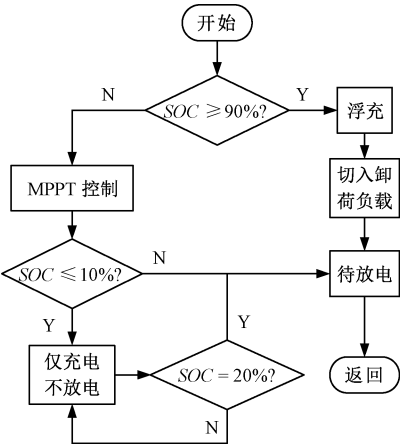


图 7 发电系统控制策略

Fig. 7 Control strategy of proposed system

本文的 MPPT 控制算法采用分区变步长的“爬山搜索法”,爬山法因其不需要测量流速、电机转速以及事先知道能量捕获装置的功率特性,所以具有较好的适应性和较低的成本。MPPT 控制策略如图 8 所示。根据第 3 节的分析,基于本文所提出的自供电直流变换器的发电系统,仅当电压 U_0 、 u_1 和 S_1 的占空比三者之间满足一定的关系时,才有电流流入蓄电池,因而应先通过检测整流桥输出的电压和蓄电池的电压,然后根据式(6)设定系统启动时的初始占空比。占空比扰动步长的大小通过判断发电机输出功率所在的区间划分为 ΔD_1 和 ΔD_2 ,且 $\Delta D_1 > \Delta D_2$, P_1 和 P_2 为设定功率值,并满足 $P_1 > P_2$, ΔP 为 $P(n)$ 和 $P(n-1)$ 两个相邻时刻的功率差值。当 $|\Delta P| \geq P_1$ 时,选择较大值的扰动步长 ΔD_1 ,加快搜索速度;当 $P_2 \leq |\Delta P| < P_1$ 时,选择较小值的扰动步长 ΔD_2 ;当 $|\Delta P| < P_2$ 时,此时认为系统工作在最大功率点附近,保持当前的占空比不变,使系统稳定运行。

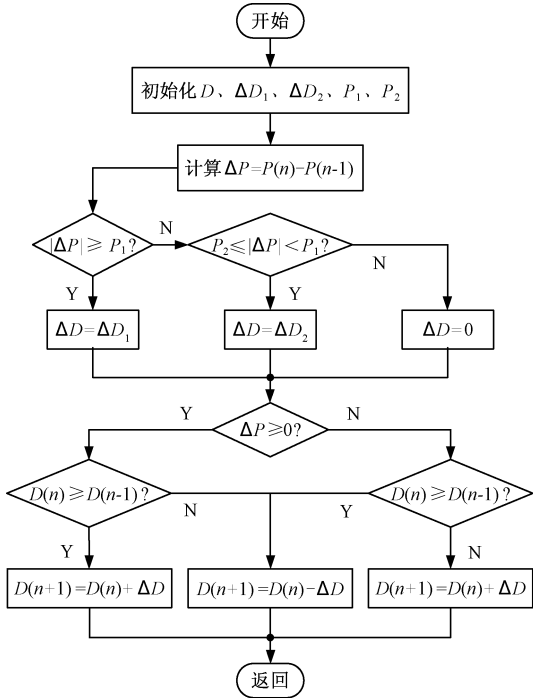


图 8 MPPT 控制策略

Fig. 8 Control strategy of MPPT

5 实验验证

为验证理论分析的正确性,本文设计并制作了一台额定功率为 60W 的实验样机,实验参数如下:开关频率 20kHz,电感 $L_1 = 2\text{mH}$,电容 $C_1 = 680\mu\text{F}$, $C_2 = 100\mu\text{F}$,电阻 $R_1 = 100\Omega$, $R_2 = 20\Omega$,开关管 S_1 型号为 IPP200N15N3,二极管 D_1 、 D_2 型号为 MUR420,

蓄电池标称电压 12V,其等效串联内阻 $R_b = 10\text{m}\Omega$,恒功率性负载为 5W。

自供电直流变换器的实验波形如图 9 所示。图 9 中, U_{gs} 为 S_1 栅源极电压,输入电压 U_0 为 10V,占空比 D 为 0.5。从图 9(a) 可以看出, u_1 和 u_2 分别为 19V 和 8.9V,考虑二极管导通压降后, U_0 、 u_1 和 u_2 三者之间能满足式(5)和式(6)的电压变比关系,即仍保持了 Boost 电路和 Buck-Boost 电路的输出电压特性。由于 C_2 和 R_2 的值比 C_1 和 R_1 的值要小,从图 9(a) 可以看出在 S_1 导通期间 u_1 几乎不变,而 u_2 有一个小幅度的下降,但从图 9(b) 可以看出, S_1 断开后,二极管 D_1 和 D_2 是同时导通的。将图 9(b) 中虚线包含的部分波形放大后可以看见, S_1 完全关断时, U_{A0} 上升至最大值 40V,为其稳定时的两倍,此时 D_1 和 D_2 同时导通, i_{D1} 和 i_{D2} 开始增大,并且随着 U_{A0} 的振荡一起振荡,但在 U_{A0} 振荡期间, i_{D1} 和 i_{D2} 并未下降到 0,即 i_{D1} 和 i_{D2} 的大部分电流为电感 L_1 的电流; D_1 和 D_2 开始导通后约 $3.2\mu\text{s}$ 时 U_{A0} 、 i_{D1} 和 i_{D2} 的振荡同时结束,此后 i_{D1} 和 i_{D2} 共同承担电感 L_1 的电流。在 U_{A0} 振荡结束时, u_2 已经上升到和 U_0 以及 u_1 三者之间满足基尔霍夫电压定律,因而 D_1 和 D_2 继续导通续流。

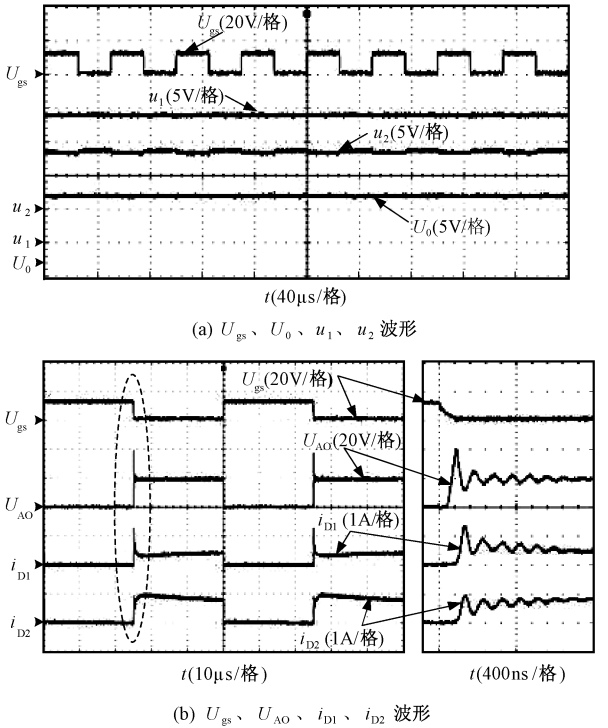


图 9 自供电直流变换器实验波形

Fig.9 Experimental waveforms of self-powered DC/DC converter

U_0 为 20V、占空比 D 分别为 0.41 和 0.42 时,自供电直流变换器带恒功率负载和蓄电池的实验波形如图 10 所示。其中 i_b 为蓄电池充电电流。可以看出,占空比 $D=0.42$ 时,蓄电池的平均充电电流比 $D=0.41$ 时的平均充电电流增加了近一倍,而 u_1 由于蓄电池电压的钳位,其平均值基本不变, i_{D1} 的平均值也不变,实际上 u_1 有一很小的增加, i_{D1} 在 D_1 续流的前期有一个较大的尖峰,而在 D_1 续流的后期,即由电路寄生参数引起的振荡结束后,也有一很小的下降, i_{D1} 的变化符合恒功率负载的负阻抗特性。 $D=0.42$ 时, i_{D1} 的尖峰电流由于变换器负载电流的增加,从而导致电感 L_1 的峰值电流也增大,故其在 A 点引起的峰值电压更大,并导致 D_1 在导通时有一个大于 $D=0.41$ 时的电流尖峰。

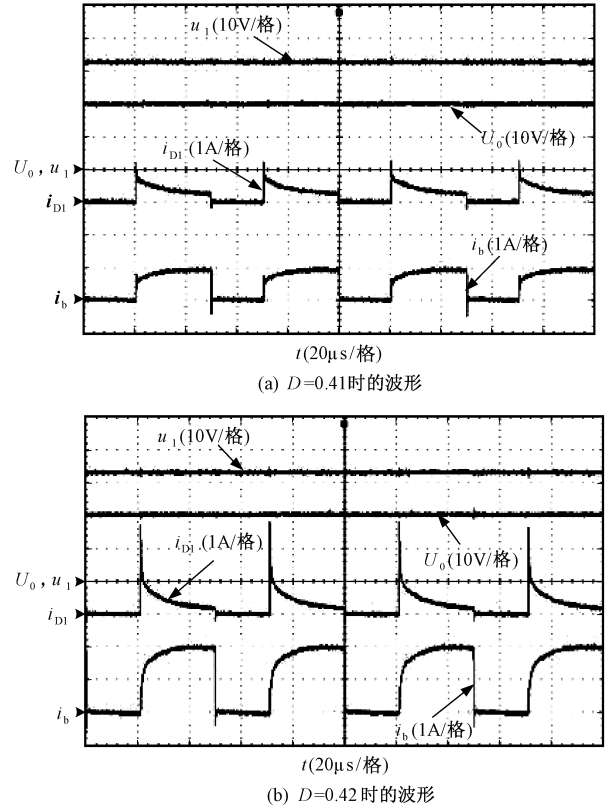


图 10 变换器带恒功率负载和蓄电池的实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms of converter with constant power load and battery

图 11 为自供电变换器效率随输出功率变化的曲线。其中横坐标为变换器的输出功率 P_o ,纵坐标为变换器的效率 η ,效率最大值为 95%。电路的损耗主要来自于 MOSFET 和二极管的开关损耗与导通损耗,因未对变换器参数进行相应的优化设计,其

效率还有可提升的空间。

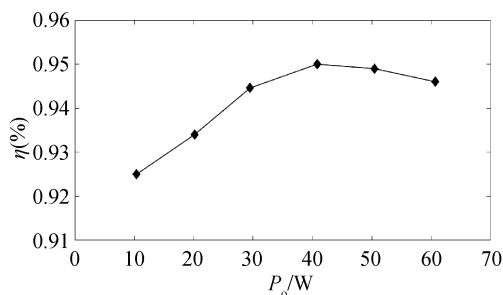


图 11 效率曲线

Fig. 11 Efficiency curve

6 结论

本文针对小型海流能独立发电系统进行研究,提出了一种 Boost 和 Buck-Boost 电路复合结构的自供电驱动工作的直流变换器。该拓扑相较于分别采用 Boost 电路和 Buck-Boost 电路的拓扑,减少了一个电感和一个功率开关管的数量,使得系统的总体效率提高,并且电路的结构、控制和驱动简单。基于该变换器,设计了一种小型海流能独立发电系统的拓扑及其控制策略,该拓扑一方面可使 MPPT 控制器在发电机停止发电时不消耗系统的剩余电能,另一方面也能使系统在其剩余电能完全消耗完的极端情况下继续收集和存储电能,从而使系统恢复正常工作。发电系统的总体控制策略根据蓄电池的 SOC 进行划分,保护蓄电池不过充和不过放,延长蓄电池使用寿命;MPPT 的控制策略采用分区变步长的“爬山搜索法”,以保证快速跟踪最大功率点,同时削弱工作在最大功率点附近的波动。本文详细分析了所提出自供电直流变换器的工作原理,并设计了一台额定功率为 60W 的实验样机,实验结果证明了理论分析的正确性,以及所提出变换器的可行性和有效性。

参考文献 (References):

[1] 王世明, 杨志乾, 杨倩雯, 等 (Wang Shiming, Yang Zhiqian, Yang Qianwen, et al.). 新型海流能发电控制系统设计 (Design of a novel power control system for marine current energy exploitation) [J]. 海洋技术学报 (Journal of Ocean Technology), 2017, 36 (4): 54-56.

[2] 游亚戈, 李伟, 刘伟民, 等 (You Yage, Li Wei, Liu Weimin, et al.). 海洋能发电技术的发展现状与前景 (Development status and perspective of marine energy conversion systems) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2010, 34 (14): 1-

12.

[3] 马舜 (Ma Shun). 水平轴潮流能转换系统能量转换率及功率控制研究 (Study on energy conversion efficiency and power control of horizontal axis tidal current energy conversion system) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2011.

[4] Jahromi M J, Maswood A I, Tseng K J. Design and evaluation of a new converter control strategy for near-shore tidal turbines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (12): 5648-5659.

[5] Amon E A, Brekken T K A, Schacher A A. Maximum power point tracking for ocean wave energy conversion [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (3): 1079-1086.

[6] Xie L, Tang T. Modeling and control of a small marine current power generation system [J]. World Journal of Surgical Oncology, 2012, 10 (1): 1438-1443.

[7] 石茂顺, 李伟, 刘宏伟, 等 (Shi Maoshun, Li Wei, Liu Hongwei, et al.). 基于最大功率跟踪控制的海流发电能量管理系统 (Tidal current power management system with MPPT) [J]. 浙江大学学报 (工学版) (Journal of Zhejiang University (Engineering Science)), 2013, 47 (5): 750-754.

[8] Ghafiri K, Bouallegue S, Garrido I, et al. Complementary power control for doubly fed induction generator-based tidal stream turbine generation plants [J]. Energies, 2017, 10 (7): 1-23.

[9] Khan M J, Iqbal M T, Quaicoe J E. Dynamics of a vertical axis hydrokinetic energy conversion system with a rectifier coupled multi-pole permanent magnet generator [J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4 (2): 116-127.

[10] 南晓强, 李群湛, 吴浩, 等 (Nan Xiaoqiang, Li Qunzhan, Wu Hao, et al.). 改进的最大功率跟踪算法在变速风力发电系统中的应用 (Improved maximum power point tracking algorithms used in variable-speed wind-power generation system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2013, 32 (2): 102-106.

[11] 汤蕴缪, 史乃 (Tang Yunmou, Shi Nai). 电机学 (Electric Machinery) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2005.

[12] 唐西胜, 齐智平 (Tang Xisheng, Qi Zhiping). 独立光伏系统中超级电容器蓄电池有源混合储能方案的研究 (Study on an actively controlled battery ultracapacitor hybrid in stand-alone PV system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2006, 25 (3): 37-42.

A self-powered DC/DC converter for small-scale stand alone marine current power generation system

YANG Lin^{1,2}, WANG Hai-feng¹, ZHAO Wei¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In view of the small-scale marine current power generation system's particularity of sea area environment and electricity load, this paper studies the low-power stand alone marine current power generation system with self-starting, low flow rate operation, intermittent power generation and low output voltage of generator. A self-powered DC/DC converter which is based on the traditional Boost circuit and Buck-Boost circuit is proposed. Moreover, a system of energy harvesting circuit is designed. By analyzing the proposed converter and power generation system, the MPPT control strategy adopts a variable step size hill-climbing searching method. In order to extend the life of battery, the overall control strategy of power generation system is adjusted according to the state-of-charge of the battery. Finally, the feasibility and validity of the proposed converter and the theoretical analysis are verified by a 60W prototype.

Key words: small-scale marine current power generation; energy harvesting; DC/DC converter; self-powered; Boost circuit; Buck-Boost circuit