

基于LMMHD波浪能发电机特性的高效实时输出功率控制系统

张庆贺^{1,2}, 赵峰^{1,2}, 刘保林¹, 李建¹, 李然¹, 彭爱武^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要:针对目前液态金属磁流体(LMMHD)波浪能发电机输出功率控制系统响应慢、精度差、变换效率低、低压下不能可靠换向的问题,在LMMHD波浪能发电机输出特性分析的基础上,提出一种通过实时调节LMMHD发电机等效负载来控制发电机输出功率的控制策略,该控制策略快速准确且多模块并联时不存在并联均流问题。通过对考虑寄生参数影响的主电路效率的理论分析,得到了所提输出功率控制策略下主电路效率的变化规律,进而提出了多模块并联的方案,提高了系统效率,降低了单模块的设计难度。并提出了一种滚动时域判断和双模块独立驱动的换向驱动方法,在实现低压下可靠换向的同时避免了电流从体二极管流通,降低了导通损耗。仿真和样机实验结果验证了所提策略的有效性。

关键词:波浪能发电;液态金属磁流体发电机;输出功率控制;全桥Boost电路;模块化

中图分类号:TM31;P743.2

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202307011

0 引言

与其他新能源相比,波浪能具有持续性强、分布广泛、能量密度高、储量大的特点,波浪能发电是波浪能的主要利用方式,波浪能发电系统可以为无人潜航器(autonomous underwater vehicle, AUV)水下充电平台、海底科学观测网、海洋牧场以及海岛用户提供持续的电力供应,解决海洋海岛用户的用电问题,还可以并网发电增加新能源发电在电力系统中的占比。不过目前波浪能发电系统中普遍存在波浪能转换效率低的问题,对波浪能发电机进行输出功率控制使发电机出力与波浪能出力实时匹配是解决该问题的有效手段^[1-9]。

另外,基于液态金属磁流体(liquid metal magneto-hydrodynamic, LMMHD)发电机阻尼特性和波浪特性相匹配的特点,中国科学院电工研究所在国内率先提出了将LMMHD发电机应用于波浪能发电的方案,研制了LMMHD波浪能发电装置,该装置几乎没有机械传动部件,具有可靠性高、结构紧凑、功率密度高的优点。但LMMHD波浪能发电机输出的是低压(10^0 V量级,最低1 V)、大电流(10^3 A量级)、低频(10^{-1} Hz量级)、波形随浪波动的交流电,实现该电能的高效变换也是提高波浪能转换效率的关键问题^[9-10]。

目前针对LMMHD波浪能发电机输出功率控制系统的研究相对较少。主电路拓扑方面,文献[10]针对LMMHD波浪能发电机输出低压、大电流、低频的特点提出了不控整流加超级电容滤波及同步整流Boost升压电路的两级电能变换方案。该方案前级采用不控整流,对任意波形交流电均可以实现自然换向,简单可靠;后级采用同步整流技术虽然可以降低导通损耗,但是每次同时导通的功率器件较多,在低压大电流的场合中导通损耗较大。文献[11]采用了全桥Boost功率因数校正(power factor correction, PFC)电路,该电路减少了同时导通的功率器件个数且功率器件全部为全控器件,降低了电路的导通损耗^[12-13],但是其驱动信号由单周期控制芯片和同步整流芯片共同产生,每个开关周期都有电流从体二极管流通,又增加了导通损耗,并且低压情况下不能可靠换向,而LMMHD波浪能发电机实际输出的电压较低,所以该换向驱动方案不适用于实际的LMMHD波浪能发电机。控制策略方面,文献[10]对Boost电路进行了双闭环的输出恒压控制,文献[11]对全桥Boost PFC电路进行了输入PFC控制和输出恒压控制,这2种控制策略都无法主动调节LMMHD波浪能发电机的输出功率,其输出功率都由用户负载决定;文献[14]采用爬山法对LMMHD波浪能发电机进行最大功率追踪控制,该方法可以实现LMMHD发电机的输出功率控制,但其功率追踪控制速度慢、精度低。

针对上述问题,本文首先建立了LMMHD波浪能发电机的模型,并在发电机输出特性分析的基础上,提出了一种快速准确的LMMHD波浪能发电机输出功率控制策略;接着通过对考虑了寄生参数影

收稿日期:2022-12-28;修回日期:2023-06-26

在线出版日期:2023-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U20A20106);海洋可再生能源资金资助项目(GHME2018SF02)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U20A20106) and Marine Renewable Energy Funds (GHME2018SF02)

响的主电路效率分析,得到了该控制策略下主电路效率的变化规律,并提出了相应的效率优化方法;然后提出一种全桥Boost电路的换向驱动策略,解决了低压下不能可靠换向以及电流从体二极管流通的问题;最后通过仿真和样机实验进行了验证。

1 LMMHD 波浪能发电机特性分析

1.1 发电系统介绍

直驱式LMMHD波浪能发电系统主要由浮子、双作用液压缸、LMMHD发电机、立柱、阻尼盘、锚泊系统以及功率控制系统组成。浮子套在立柱外面并和双作用液压缸的活塞杆相连,双作用液压缸和LMMHD发电机固定在立柱内部,阻尼盘固定在立柱的底部,立柱在阻尼盘和锚泊系统的作用下相对海底保持静止;浮子在波浪的激励下做上下往复运动,带动活塞杆驱动液压油在液压缸内往复运动,进而驱动液态金属在磁场中往复运动,切割磁力线,产生感应电动势,然后通过功率控制系统将LMMHD发电机的电能输出。系统示意图见附录A图A1。

1.2 LMMHD 波浪能发电机模型

由牛顿第二定律和微幅波浪理论可得在波浪和负载共同作用下浮子的运动方程为:

$$(m_f + A)\ddot{s} + (B + C_1)\dot{s} + C_2 s^2 + \rho_w g S_f s = f_e \quad (1)$$

式中: m_f 为浮体质量; A 为浮子附加质量; s 为浮子垂荡位移; \dot{s} 为浮子运动速度; \ddot{s} 为浮子运动加速度; B 为浮子辐射阻尼系数; C_1 为线性阻尼系数(与磁流体作用过程有关); C_2 为沿程非线性阻尼系数(与回路内沿程阻力和局部阻力相关); ρ_w 为海水密度; g 为重力加速度; S_f 为浮子湿周截面积; f_e 为波浪垂荡激励力。

由式(1)可得浮子的运动规律,认为液压油不可压缩,则LMMHD发电机内部液态金属的运动规律为:

$$v_{LM} = D\dot{s} \quad (2)$$

式中: v_{LM} 为液态金属的运动速度; D 为液压缸和LMMHD发电通道的截面比。

LMMHD波浪能发电机为霍尔型发电机,可等效为一个电压源与一个电阻的串联^[9-10],其物理模型如附录A图A2所示,其等效电路模型如图1所示。图中: \mathcal{E}_{MHD} 为霍尔电压; r_{MHD} 为LMMHD发电机内阻,可通过理论计算或实际测量获得; U_{ao} 为输出电压; I_{ao}

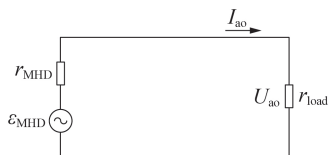


图1 LMMHD发电机等效电路模型

Fig.1 Equivalent circuit model of LMMHD generator

为输出电流; r_{load} 为LMMHD发电机负载电阻。

对于有 M 个通道串联 r_{load} 的LMMHD波浪能发电机,由霍尔效应可得其输出电压 U_{ao} 为:

$$U_{ao} = MB_0 v_{LM} b \frac{r_{load}}{r_{load} + r_{MHD}} = MB_0 D \dot{s} b \frac{r_{load}}{r_{load} + r_{MHD}} \quad (3)$$

式中: B_0 为磁场强度; v_{LM} 为液态金属切割磁力线速度; b 为电极间距。

输出电流 I_{ao} 为:

$$I_{ao} = MB_0 D \dot{s} b \frac{1}{r_{load} + r_{MHD}} \quad (4)$$

所以发电机的输出功率 P_{ao} 为:

$$P_{ao} = U_{ao} I_{ao} = M^2 B_0^2 D^2 \dot{s}^2 b^2 \frac{r_{load}}{(r_{load} + r_{MHD})^2} \quad (5)$$

发电机的内阻 r_{MHD} 为:

$$r_{MHD} = \frac{b}{\sigma_{LM} a L_{MHD}} \quad (6)$$

式中: σ_{LM} 为液态金属电导率; a 为电极宽度; L_{MHD} 为电极长度。

由式(3)可以看出,对于设计好的LMMHD波浪能发电机和确定的负载电阻,其输出电压 U_{ao} 与浮子运动速度 \dot{s} 呈正相关关系。另外由于液态金属的电导率较高(3.2×10^6 S/m),发电机的内阻很小(10^{-6} Ω 量级),由式(3)、(4)可以得到发电机的输出伏安特性较硬,当输出电流小范围变化时可认为输出电压基本不变。由式(5)可以看出,发电机输出功率 P_{ao} 由浮子运动速度 \dot{s} 和负载电阻 r_{load} 共同决定,其中 \dot{s} 与波况大小直接相关。所以对于某一固定波况,当 r_{load} 由小变大时,发电机的输出电压逐步增大,输出功率先增大后减小,存在一个最佳负载电阻 r'_{load} 使发电机输出功率最大。附录A图A3给出了某一设计好的LMMHD波浪能发电机在不同波况下输出功率随负载变化的曲线。

2 输出功率控制策略

根据1.2节分析,假设某一时刻的负载电阻为 r_{load0} ,当浮子运动速度变化时,LMMHD波浪能发电机的输出电压 U_{ao} 随之变化,先根据 U_{ao} 判定波况大小,然后将负载电阻调节到该波况下输出功率最大时对应的值,使发电机输出最大功率。

1)分析怎么通过输出电压判断波况大小。

由前面分析可知,输出电压与波况不是一一对应关系,输出电压除了与波况有关还与负载大小有关,为了消除负载对波况判断的影响,需要对输出电压进行修正得到空载电压,修正公式如下:

$$\mathcal{E}_{MHD1} = U_{ao1} + I_{ao1} r_{MHD} \quad (7)$$

式中: \mathcal{E}_{MHD1} 为发电机空载电压; U_{ao1} 、 I_{ao1} 分别为某一时刻输出电压和输出电流,通过实时测量获得; r_{MHD} 为发电机内阻,为已知量。

在此基础上,用空载电压幅值来对波况进行判断,但是空载电压幅值判断具有滞后性,由图A3可以看出不同波况下最大输出功率对应的负载阻值变化范围很小,所以可以将波况从小到大进行分段处理,认为最大输出功率对应的负载阻值变化不超过10%的处于同一段波况,空载电压处于哪一段就认为是哪种波况。

2)分析怎么调节LMMHD波浪能发电机的等效负载电阻。

由于LMMHD波浪能发电机输出伏安特性较硬,发电机等效负载可通过以输出电压作为参考信号采用查表法对输出电流进行调节来控制,输出电流的控制方程为:

$$I_{ao} = U_{ao} / r'_{load} \quad (8)$$

根据上述分析,可得输出功率的控制过程如下:首先,根据LMMHD发电机输出电压绝对值大小进行波况判断;接着,查表得到输出相应功率时对应的电流值大小,作为电流闭环控制的参考值;然后,将电流参考值和实测电流绝对值进行比较得到误差信号,并将误差信号送入比例积分控制器进行误差补偿,对补偿后的信号进行限幅后得到脉宽调制(pulse width modulation, PWM)的控制信号。

输出功率控制框图见附录A图A4,其中电流、电压关系表可以通过仿真计算或者实际测量获得。仿真和实际测量的步骤都是先固定波况,再改变LMMHD波浪能发电机的负载,获得该波况下不同负载对应的输出功率、电压、电流关系;然后改变波况,重复上述步骤,获得不同波况下不同负载对应的输出功率、电压、电流关系。电流、电压关系表可以根据不同需要进行设置。当需要发电机在不同波况都输出最大功率时,可以将电流、电压关系表设置成不同波况最大输出功率对应的电流、电压关系;当需要发电机输出某一固定功率时,可以将电流、电压关系表设置成该输出功率对应的电流、电压关系。

3 主电路和驱动电路优化研究

由于LMMHD波浪能发电机输出的是低压、大电流的交流电,为了在减小电路导通损耗的同时实现整流升压的目标,本系统主电路采用全桥Boost电路,如图2所示。图中: V_{in} 为输入交流电压; L 为输入电感; C 为输出滤波电容; V_{do} 为输出直流电压。

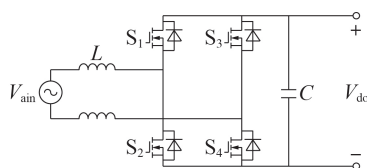


图2 全桥Boost电路原理图

Fig.2 Principle diagram of full bridge Boost circuit

全桥Boost电路中,每一时刻只有2个开关管处于同时导通状态。当输入交流电压 V_{in} 为正时,开关管 S_1 、 S_2 处于互补导通状态, S_3 处于恒关闭状态, S_4 处于恒导通状态,此时 L 、 S_1 、 S_2 、 S_4 和 C 组成同步整流Boost电路;当 V_{in} 为负时,开关管 S_3 、 S_4 处于互补导通状态, S_1 处于恒关闭状态, S_2 处于恒导通状态,此时 L 、 S_2 — S_4 和 C 组成同步整流Boost电路。相比不控整流加Boost升压电路,全桥Boost电路中同时导通的功率器件少且全部为低导通损耗的全控器件,所以效率较高。

3.1 主电路效率优化

为了进一步提高主电路效率,下面对主电路效率进行优化研究。主电路的损耗主要包括通态损耗和开关损耗,由于LMMHD波浪能发电机的输出电流很大,通态损耗是电路的主要损耗且寄生参数的影响不可忽略,下面对只考虑通态损耗和寄生参数影响的电路效率进行分析。

全桥Boost电路在输入电压正负半周都工作于Boost模式,可按Boost电路原理进行分析,Boost电路原理图如图3所示。图中: V_{din} 为输入直流电压; V_{do} 为输出直流电压; I_{do} 为输出直流电流; I_L 为电感电流平均值; R 为负载电阻。

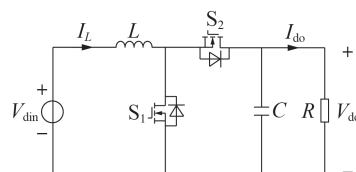


图3 Boost电路原理图

Fig.3 Principle diagram of Boost circuit

当 S_1 导通、 S_2 关断时,有:

$$L \frac{\Delta i_L}{DT} = V_{din} - (r_L + r_{on}) I_L \quad (9)$$

式中: Δi_L 为MOSFET导通期间电感电流的增加量; D 为占空比; T 为MOSFET的开关周期; r_L 为电感等效串联电阻; r_{on} 为MOSFET的导通电阻。

当 S_1 关断、 S_2 导通时,由伏秒平衡原理可得^[15]:

$$L \frac{-\Delta i_L}{(1-D)T} = V_{din} - V_{do} - (r_L + r_{on}) I_L \quad (10)$$

由式(9)、(10)可得考虑寄生参数影响的占空比表达式为:

$$D = \frac{V_{do} - V_{din} + (r_L + r_{on}) I_L}{V_{do}} \quad (11)$$

由式(11)可知,由于寄生参数的影响,要达到同样的升压比,实际的占空比要比理想占空比大。那么考虑寄生参数影响的输出电压和输入电压的关系为:

$$V_{do} = \frac{V_{din} - (r_L + r_{on}) I_L}{1-D} \quad (12)$$

由能量守恒定律可得输出电流和输入电流关系为:

$$I_{do}=(1-D)I_L \quad (13)$$

所以输出功率 P_{do} 的表达式为:

$$P_{do}=V_{do}I_{do}=V_{din}I_L-(r_{on}+r_L)I_L^2 \quad (14)$$

那么考虑通态损耗和寄生参数影响的电路效率 η 为:

$$\eta=1-\frac{(r_L+r_{on})I_L}{V_{din}} \quad (15)$$

由式(15)可知,电路的效率与输入电流电压比以及电路寄生参数有关,输入电流电压比和电路寄生参数越小则电路的效率越大。所以要提高电路的效率,首先要尽量减小器件和线路的寄生参数,然后要减小输入电流电压比。

要减小电路的寄生参数,一方面可选择导通电阻小的MOSFET,另一方面可将电感的等效串联电阻和线路的寄生电阻设计到一个合理的较小值。

输入电流电压比可通过多模块并联的方法降低,设有 n 个模块并联,那么单个模块的输入电流变为 I_L/n ,可以得到 n 个模块并联后单个模块的效率 η_0 以及 n 个并联模块的总效率 η_z 为:

$$\eta_z=\eta_0=1-\frac{(r_L+r_{on})I_L/n}{V_{din}} \quad (16)$$

由式(16)可以看出,并联模块个数越多则电路的效率越高,理论上当并联个数无穷大时电路效率可以接近于1,不过实际上并联个数的增加会增加整个系统的体积、重量、成本和复杂度,并且当并联个数增加到一定数量时系统效率不再会有明显提升,所以要综合考虑以上几方面来确定并联个数。

采用多模块并联除了可以提高系统效率,还具有以下优势:①减小了单个模块的输入电流,降低了单个模块的设计难度;②方便系统进行冗余设计,增加了系统的可靠性;③模块化设计方便对系统进行维修。此外,由于采用调节等效负载来控制输出功率的方法,模块并联相当于电阻并联,不存在并联均流问题。

3.2 换向驱动策略优化

对全桥 Boost 电路低压交流输入情况下的换向驱动策略进行了优化,提出了一种滚动时域换向控制和双模块独立驱动的方法。

首先需要对输入电压的方向进行判断,对输入电压进行连续采样存储,判断连续 $N(N>1)$ 个输入电压值大小。如果连续 N 个输入电压值大于或等于正向电压阈值 $V_p(V_p>0)$,那么判定此时输入电压为正向;如果连续 N 个输入电压值小于或等于负向电压阈值 $V_n(V_n<0)$,那么判定此时输入电压为负向;如果连续 N 个输入电压值大于 V_n 且小于 V_p ,那么判定

此时输入电压为0;其他情况,判定输入电压为原来的方向。接着再判断下一个连续 N 个输入电压数值大小,持续滚动判断进行换向控制。

通过调节 V_p 、 V_n 和 N ,可以调节换向的速度和准确性。这3个变量的绝对值越大,换向越迟钝但越稳定;反之,换向越灵敏但越容易出现振荡。

驱动电路由2个可以分别输出2路带死区的互补驱动信号的驱动模块组成,驱动模块的输出由输入信号控制,假设驱动模块1驱动 S_1 和 S_2 ,驱动模块2驱动 S_3 和 S_4 。当判断输入电压为正时,驱动模块1由调制的PWM信号控制输出2路带死区的互补PWM波控制 S_1 、 S_2 互补导通;驱动模块2由恒高电平控制输出1路恒高电平1路恒低电平,分别控制 S_4 恒导通及 S_3 恒关断。当判断输入电压为负时,驱动模块1由恒高电平控制输出1路恒高电平1路恒低电平,分别控制 S_2 恒导通及 S_1 恒关断;驱动模块2由调制的PWM信号控制输出2路带死区的互补PWM波控制 S_3 、 S_4 互补导通。全桥 Boost 电路的输入电压和驱动信号波形如附录A图A5所示。

4 仿真和样机实验

针对某一设计好的LMMHD波浪能发电机对其输出功率控制系统进行了仿真和样机实验。选取了3个LMMHD波浪能发电机典型运行波况,经过仿真计算可得到这3个波况下发电机的最大输出功率以及对应的输出电压和负载电阻。输出功率控制系统首先确定了满足电压电流要求且导通电阻最小的MOSFET型号为MM1000HF10T2NH,其导通电阻为0.62 m Ω ,电感的等效串联电阻设计为0.3 m Ω ;然后根据主电路效率分析结论可得到系统的理论效率,通过对系统效率优化,确定并联模块个数为12。LMMHD波浪能发电机和输出功率控制系统具体设计参数如附录A表A1所示。

4.1 仿真分析

仿真是基于理想波况进行的,整体仿真模型如附录A图A6所示。输出功率控制系统采用12个模块并联,系统输入端接LMMHD波浪能发电机输出端。LMMHD波浪能发电机的运行波况设置如下:[0,2]s为波况1,[2,4]s为波况2,[4,6]s为波况3。系统输出端接12V蓄电池,系统以电流源模式输出,输出电压被蓄电池箝位。

单模块的仿真模型如附录A图A7所示,输出功率控制和换向驱动仿真模型如附录A图A8所示,仿真参数设置和表A1系统设计参数一致。

图4为LMMHD波浪能发电机的输出电压、输出电流、输出功率曲线。可以看出,不管在开始时刻还是在波况变化时刻,输出功率控制系统都能够控制

LMMHD波浪能发电机的输出电流实时追踪输出电压变化,其相位和电压保持一致,输出电流、功率的大小都与理论值(见表A1)一致,实现了快速准确地控制LMMHD波浪能发电机的输出功率。而文献[14]中采用爬山法的功率追踪速度最快也在10 s以上,误差都在50%以上。

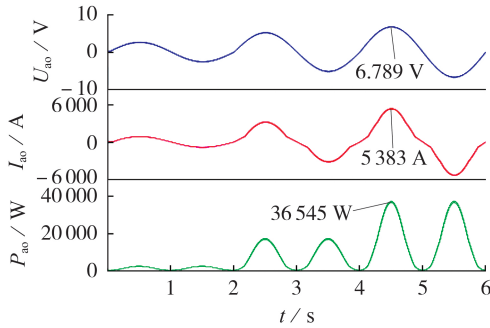


图4 LMMHD波浪能发电机的输出

Fig.4 Output of LMMHD wave energy generator

输出功率控制系统等效输入电阻如附录A图A9所示。可以看出,输出功率控制系统在各个波况输出功率最大时的等效输入阻抗和LMMHD波浪能发电机在各个波况的最佳负载电阻阻值(见表A1)基本一致,说明输出功率控制系统是通过调节等效负载电阻实现的LMMHD波浪能发电机输出功率控制。

换向驱动策略中换向标志位的设置为:输入电压为正时标志位为1,输入电压在换向阈值以内时标志位为2,输入为负时标志位为3。换向驱动波形如附录A图A10所示。可以看出,不管输入电压为低压还是高压,换向控制策略都能正确判断输入电压方向,各开关管的状态也与驱动策略中的一致,实现了全电压范围内的可靠换向,且换向过程中电流过渡平滑,电流全部从开关管主路流通。

输出功率控制系统的理论效率和仿真效率对比如图5所示。可以看出,不同输入电流电压比下输出功率控制系统的仿真效率和理论效率的趋势一致、大小基本相等,验证了效率分析的有效性。

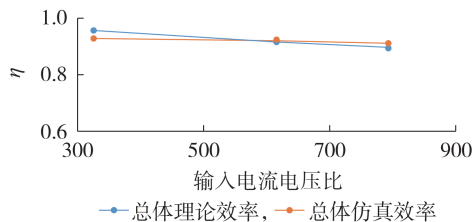


图5 输出功率控制系统理论和仿真效率对比

Fig.5 Comparison between theoretical and simulative efficiencies of output power control system

4.2 样机实验分析

本文研制了单模块样机,样机主电路参数和表

A1输出功率控制系统设计参数一致。由于输入电压既作为换向控制信号又作为电流控制信号且输入电压较低,所以输入电压采样不但要精度高、响应快而且要可靠性高,这里采用电压采样电路实现,输入电流采样由高精度快响应电流传感器实现;控制和驱动电路分别由数字信号处理器控制板和2个可以输出2路驱动信号的驱动模块实现,样机实物如附录A图A11所示。

由于无法找到类似LMMHD波浪能发电机低压、大电流、低频输出的交流电源,这里采用调压器和低压(0~50 V)、大电流(0~500 A)输出的直流源对样机进行测试,首先通过调压器对输出功率控制和换向驱动策略进行了测试,然后通过手动换向分别对输入电压为正和负向情况的样机效率进行了测试。调压器输出电压幅值为1.5 V AC,电流电压比设置为6,换向阈值设置为 ± 0.1 V,输出功率控制和换向驱动策略测试结果如图6所示,不同输入电流电压比情况下样机效率实测值和理论值对比结果如图7所示。图中: S_2 、 S_4 分别为开关管 S_2 、 S_4 的驱动信号。

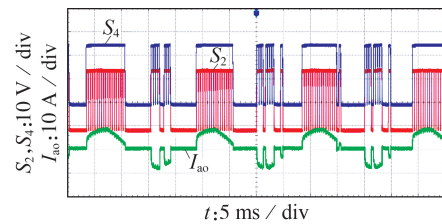


图6 输出功率控制和换向驱动策略测试结果

Fig.6 Test results of output power control and commutation drive strategy

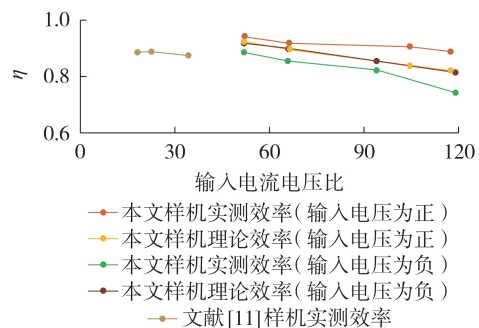


图7 样机实测和理论效率对比

Fig.7 Comparison between measured and theoretical efficiencies of prototype

从图6可以看出:当样机输入电压为正时,开关管 S_4 常开, S_2 由PWM波控制开关;当样机输入电压为负时,开关管 S_2 常开, S_4 由PWM波控制开关;当样机输入电压过零时,由于换向阈值的存在,开关管全部关闭,验证了换向驱动策略的有效性。在样机输入电压正负半周,输入电流均按设置的电流电压比

实时跟随输入电压变化,电流、电压相位以及电流电压比与设置值均一致,说明所提输出功率控制策略可以通过调节等效负载快速准确控制输出功率。此外,输入电压为负时出现了电流跌落的情况,这是由于调压器的输出特性较软,当调压器输出电流较大时输出电压跌落触发了换向条件,进而控制输出电流为0,输出电压恢复后输出电流又重新跟随输出电压变化,这进一步验证了输出功率控制和换向驱动策略的有效性。实际的LMMHD波浪能发电机的输出特性较硬,不会出现电压跌落的情况,输出电流为平滑的曲线。

图7中本文样机效率曲线测试点对应的直流源电压从左到右依次为6.9、5、2.5、2.98 V,可以看出本样机在低压大电流输入的情况下具有较高的效率,且实际效率和理论效率变化趋势一致,大小基本相等,由于理论效率没有考虑开关损耗,误差都在合理范围内,验证了效率分析设计的有效性。另外通过和文献[11]中的样机效率曲线进行对比可见,本文样机在输入电流电压比为52时的最低效率88.4%与文献[11]中样机输入电流电压比为18时的效率一致,说明本文样机经过主电路参数和换向驱动优化后效率更优,证明了本文样机效率优化的有效性。

5 结论

针对目前LMMHD波浪能发电机输出功率控制系统存在的问题,本文首先基于LMMHD波浪能发电机输出伏安特性较硬且和波况直接相关的特点,提出一种以输出电压为参考信号采用查表法对输出电流进行控制的输出功率控制策略。该策略不但可以自动追踪LMMHD波浪能发电机最大输出功率,还可以接受微电网调度控制发电机输出功率;此外该策略等效于实时调节负载阻值,所以快速准确,且多模块并联时不存在并联均流问题。通过对采用该控制策略并考虑寄生参数影响的全桥Boost电路效率进行理论分析,得到了电路效率与寄生参数以及输入电流电压比的关系,在此基础上提出了通过多模块并联降低输入电流电压比以提高系统效率的方案,该方案可以降低单模块设计难度并提高系统可靠性。提出了滚动时域判断和双模块独立驱动的全桥Boost换向驱动策略,实现了低压下的可靠换向,避免了电流从体二极管流通,提高了样机效率。仿真及样机实验对比分析结果表明,该输出功率控制系统的快速准确追踪控制,还可以实现低压、大电流、低频交流电的高效变换。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 秦川,管维亚,鞠平,等. 并网AWS波浪发电场等效建模[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):25-31.
QIN Chuan, GUAN Weiya, JU Ping, et al. Equivalent modeling of AWS-based wave farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 25-31.
- [2] 张庆贺,赵凌志,夏琦. UUV环境可再生能源供能方式概述[C]//第四届中国海洋可再生能源发展年会暨论坛论文集. 威海:国家海洋技术中心,2015:466-472.
- [3] 宁光涛,李琳玮,何礼鹏,等. 面向绿色海岛微型综合能源系统的储能系统容量规划方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(2):8-15.
NING Guangtao, LI Linwei, HE Lipeng, et al. Capacity planning method of energy storage system for micro integrated energy system in environmental friendly islands[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 8-15.
- [4] 刘延俊,武爽,王登帅,等. 海洋波浪能发电装置研究进展[J]. 山东大学学报(工学版),2021,51(5):63-75.
LIU Yanjun, WU Shuang, WANG Dengshuai, et al. Research progress of ocean wave energy converters[J]. Journal of Shandong University(Engineering Edition), 2021, 51(5): 63-75.
- [5] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化,2022,46(8):189-207.
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [6] 周能萍,吴峰. 基于风-浪和灰色模型的波浪能发电系统输出功率短期预测[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):58-63.
ZHOU Nengping, WU Feng. Wind-wave and grey model based short-term output power prediction of wave energy generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 58-63.
- [7] AMON E A, BREKKE T, SCHACHER A A. Maximum power point tracking for ocean wave energy conversion[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(3): 1079-1086.
- [8] LETTENMAIER T, JOUANNE A V, BREKKE T. A new maximum power point tracking algorithm for ocean wave energy converters[J]. International Journal of Marine Energy, 2017, 17: 40-55.
- [9] ZHANG Qinghe, XIA Qi, PENG Aiwu, ZHAO Lingzhi. Design of PCS for MHD wave energy underwater recharging platforms[C]//Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece: ISOPE, 2016: 484-490.
- [10] 张庆贺. 液态金属磁流体波浪能发电装置电能变换系统的设计与研究[D]. 北京:中国科学院大学,2016.
ZHANG Qinghe. Research and Design of the power conversion system for the LMMHD wave energy generator[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [11] 程朵朵. 波浪能磁流体发电机功率变换系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
CHENG Duoduo. Study on the power conversion system of wave energy MHD generator[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [12] CHOI W Y, KWON J M, KIM E H, et al. Bridgeless Boost rectifier with low conduction losses and reduced diode reverse-recovery problems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 769-780.
- [13] 李镇福,林维明. 一种改进的无桥Boost功率因数校正电路

- [J]. 电力电子技术,2012,46(2):96-98.
LI Zhenfu, LIN Weiming. An improved bridgeless Boost PFC converter[J]. Power Electronics Technology,2012,46(2):96-98.
- [14] 刘华兵,张庆贺,刘艳娇,等. 基于磁流体发电机的波浪能最大功率追踪策略研究[J]. 太阳能学报,2022,43(9):402-409.
LIU Huabing, ZHANG Qinghe, LIU Yanjiao, et al. Research on maximum power tracking strategy of wave energy based on MHD generator[J]. Journal of Solar Energy, 2022, 43(9): 402-409.
- [15] 陈坚,康勇. 电力电子学:电力电子变换和控制技术[M]. 3版.

北京:高等教育出版社,2011:65-76.

作者简介:

张庆贺(1989—),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为波浪能发电与控制技术(**E-mail**:zhangqinghe@mail.iece.ac.cn);

彭爱武(1964—),女,研究员,博士,主要研究方向为电工电能新技术(**E-mail**:pengyan@mail.iece.ac.cn)。

(编辑 李莉)

Efficient real-time output power control system based on LMMHD wave energy generator characteristics

ZHANG Qinghe^{1,2}, ZHAO Feng^{1,2}, LIU Baolin¹, LI Jian¹, LI Ran¹, PENG Aiwu^{1,2}

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

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the problems of slow response, poor accuracy, low conversion efficiency and unreliable commutation under low voltage in the current output power control system of liquid metal magneto-hydrodynamic(LMMHD) wave energy generators, a control strategy to control the generator output power by real-time adjusting the equivalent load of LMMHD generator is proposed based on the analysis of the output characteristics of LMMHD wave energy generators. This strategy is fast and accurate, and there is no parallel current sharing problem when multiple modules are connected in parallel. Through the theoretical analysis of the efficiency of the main circuit considering the influence of parasitic parameters, the variation rule of the main circuit efficiency under the proposed output power control strategy is obtained. Furthermore, a scheme of multi module parallel connection is proposed to improve the system efficiency and reduce the design difficulty of a single module. A commutation drive method of rolling time domain judgment and dual module independent drive is proposed, which can realize reliable commutation under low voltage while avoiding the current flow from the body diode and reducing the conduction loss. Results of simulative and prototype experiments verify the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: wave energy power generation; LMMHD generator; output power control; full bridge Boost circuit; modularization

附录 A

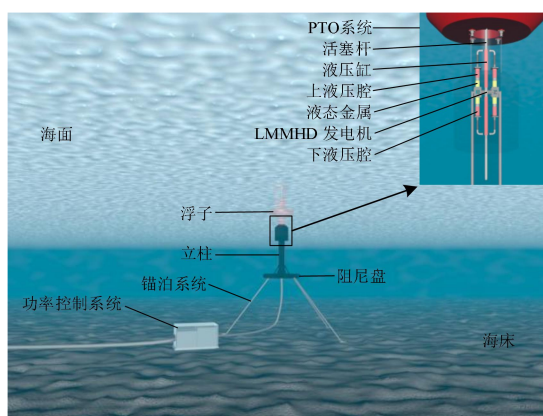


图 A1 LMMHD 波浪能发电系统示意图

Fig.A1 Schematic diagram of LMMHD wave energy power generation system

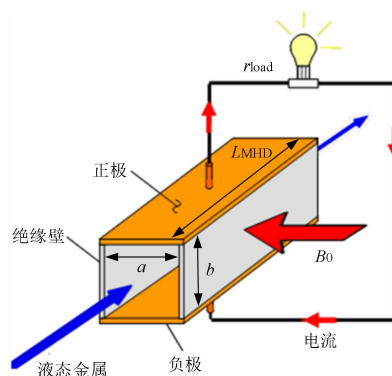


图 A2 LMMHD 发电机物理模型

Fig.A2 Physical model of LMMHD generator

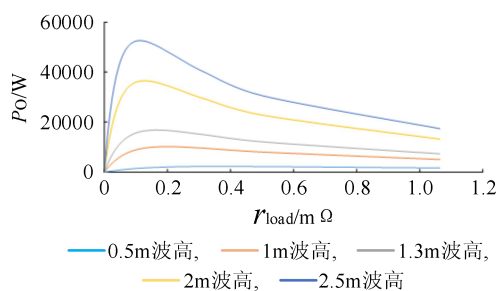


图 A3 不同波况下发电机输出功率-负载曲线

Fig.A3 Curves of generator output power-load under different wave conditions

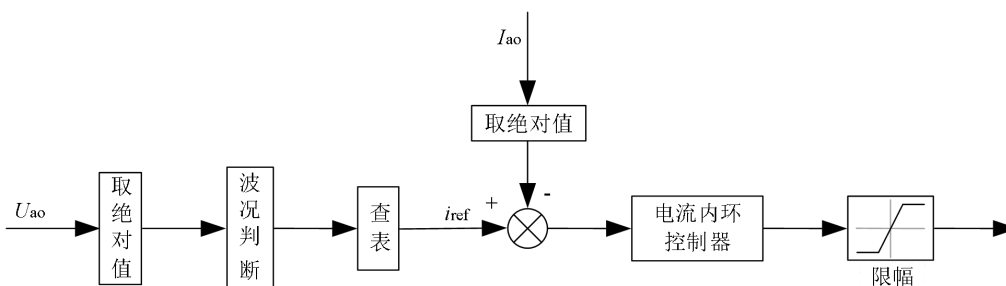


图 A4 LMMHD 发电机输出功率控制系统框图

Fig.A4 Block diagram of LMMHD generator output power control system

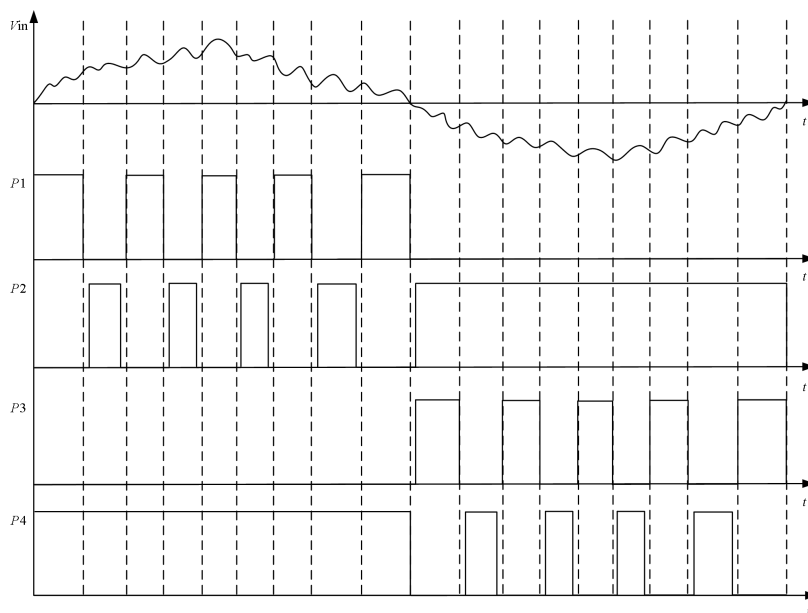


图 A5 输入电压和驱动信号波形

Fig.A5 Waveforms of input voltage and driving signal

表 A1 系统设计参数

Table A1 System design parameters

对象	参数	波况 1	波况 2	波况 3
LMMHD 波浪能发 电机	有效波高/m	0.5	1.3	2
	浮子直径/m	5.8	5.8	5.8
	磁感应强度/T	0.9	0.9	0.9
	电极长度/mm	130	130	130
	电极宽度/mm	4	4	4
	电极间距/mm	90	90	90
	电机内阻/ $\mu\Omega$	56	56	56
	最佳负载电阻/m Ω	3.0	1.6	1.2
	输出电压幅值/V	2.63	5.22	6.79
	输出电流幅值/A	859.2	3217.7	5382.0
	输出最大功率/kW	2.262	16.799	36.556
输出功率	并联模块数	12	12	12
	开关频率/Hz	2.5k	2.5k	2.5k
	输入电感/ μH	13	13	13
	电感串联电阻/m Ω	0.3	0.3	0.3
控制系统	MOSFET 导通电阻/m Ω	0.62	0.62	0.62
	输出电容/F	0.2727	0.2727	0.2727
	积分系数	0.3	0.3	0.3
	比例系数	56.06	56.06	56.06
	换向阈值/V	0.1	0.1	0.1
	理论效率/%	95.8	92.1	89.8

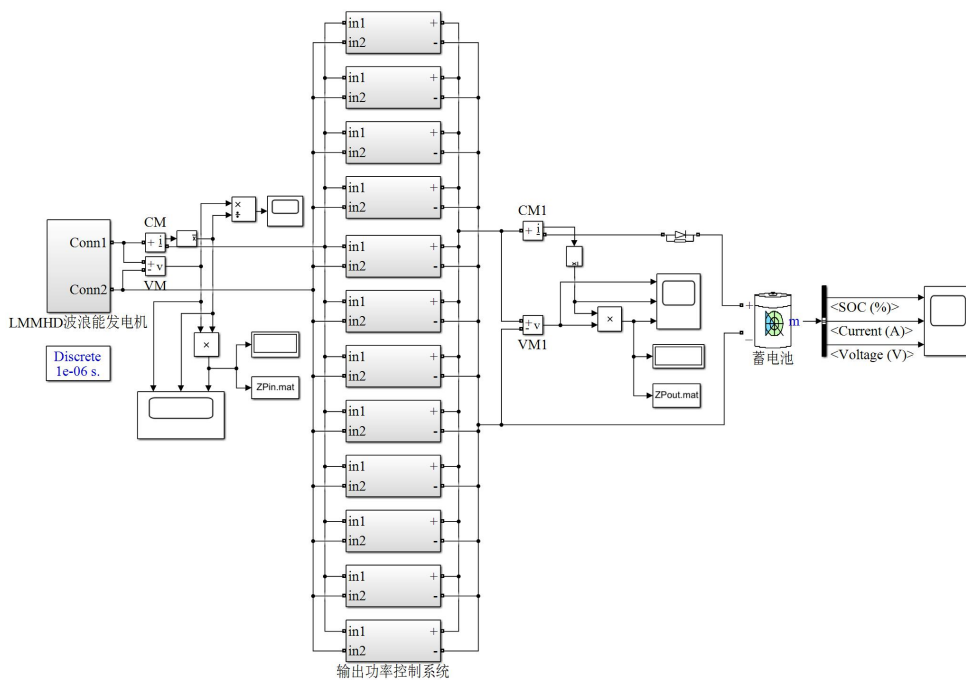


图 A6 整体仿真模型

Fig.A6 Overall simulation model

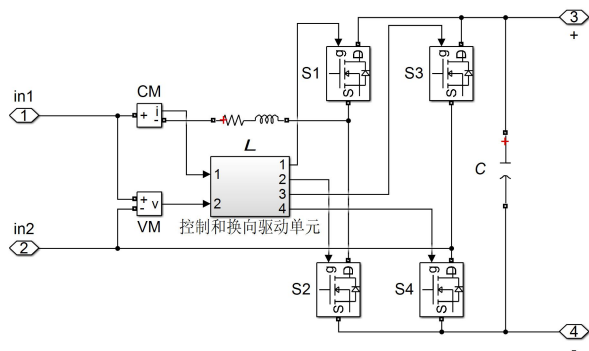


图 A7 单模块仿真模型

Fig.A7 Single module simulation model

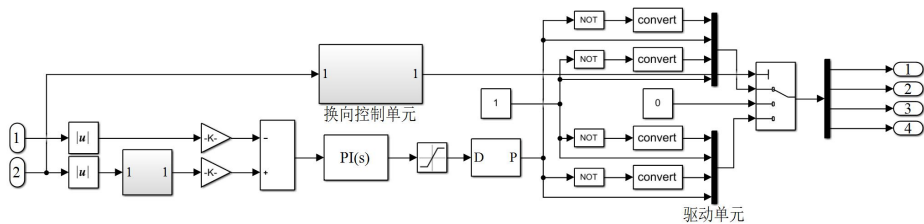
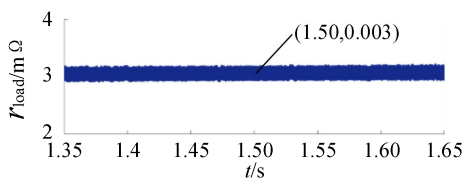
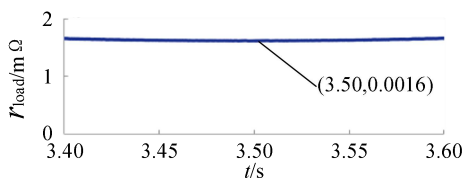


图 A8 输出功率控制和换向驱动仿真模型

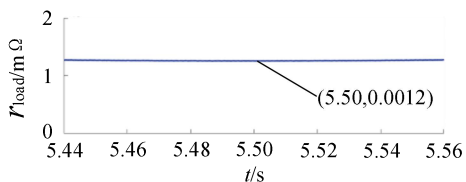
Fig.A8 Simulation model of output power control and commutation drive



(a) 波况 1



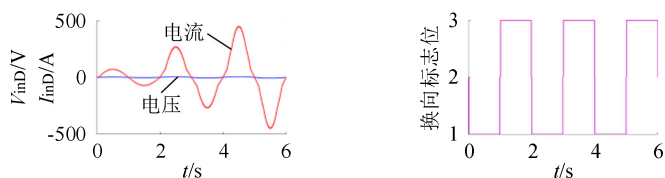
(b) 波况 2



(c) 波况 3

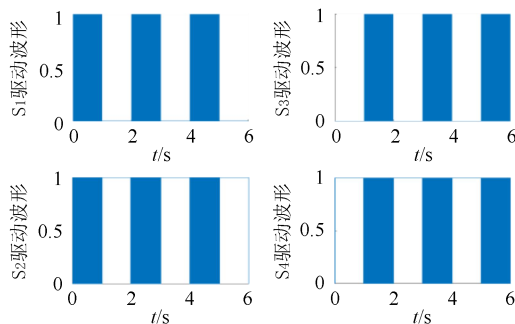
图 A9 输出功率控制系统等效输入电阻

Fig.A9 Equivalent input resistance of output power control system



(a) 单模块输入电压电流

(b) 换向标志位



(c) 驱动波形

图 A10 换向驱动波形

Fig.A10 Commutation drive waveforms

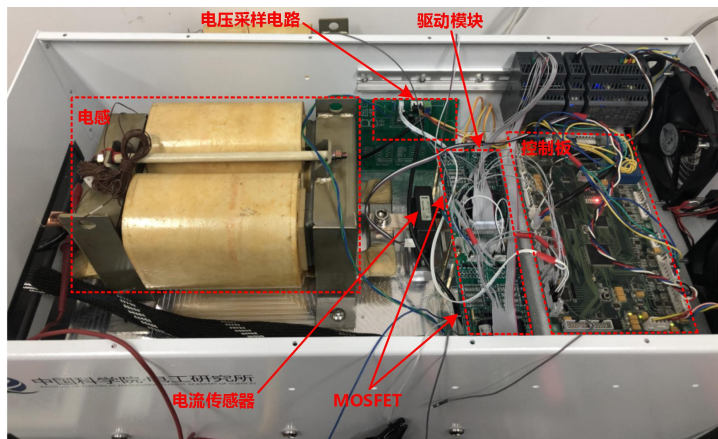


图 A11 单模块样机

Fig.A11 Single module prototype