

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210279

适用于镁海水电池的能量变换系统设计^{*}

陈继开, 逯成龙, 李浩茹, 钟 诚, 张利伟

(东北电力大学现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室 吉林 132012)

摘 要: 本文设计了一种适用于镁海水电池供电的能量变换系统, 针对镁海水电池输出特性软、电压低的问题, 对传统非隔离型三端口变换器进行优化, 使电压增益得到进一步提高。基于此变换器拓扑, 考虑镁海水电池输出特性和变换器载荷特性, 提出一种适用于载荷突变的 DC/DC 变换系统能量管理策略, 通过控制能量在系统内任意两个端口间的流动, 实现源、荷间功率动态平衡; 同时, 根据镁海水电池的输出特性, 在系统能量管理中引入一种基于改进灰狼算法的最大功率点追踪方法, 进一步提高了镁海水电池的能量转换效率。最后通过仿真和实验证明, 载荷功率在 0.36 和 1.2 W 跳变时, 变换器能相应完成模式间的切换, 在保证输出电压稳定在 12 V 的前提下, 实现了对输出电流 30 和 100 mA 的灵活控制, 验证了该能量变换系统软硬件设计合理性。

关键词: 镁海水电池; 能量管理; 三端口变换器; 最大功率点追踪

中图分类号: TM46 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

Design of energy conversion system for magnesium seawater batteries

Chen Jikai, Lu Chenglong, Li Haoru, Zhong Cheng, Zhang Liwei

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology of Northeast Electric Power University, Ministry of Education, Jilin 132012, China)

Abstract: In this article, an energy conversion system suitable for the magnesium seawater batteries is designed. To address the problems of soft output characteristics and low voltage of magnesium seawater batteries, the conventional non-isolated three-port converter is optimized to improve the voltage gain. Based on this converter topology. Considering the output characteristics of magnesium seawater batteries and the load characteristics, an energy management strategy for DC/DC converter system suitable for sudden load change is proposed. By controlling the flexible flow of energy between any two ports in the system, the dynamic power balance of source and load is achieved. Meanwhile, according to the output characteristics of magnesium seawater batteries, a maximum power point tracking method based on the improved grey wolf optimization is introduced into the system energy management, which further improves the energy conversion efficiency of the magnesium seawater batteries. Finally, simulations and experiments demonstrate that when the load power changes between 0.36 and 1.2 W, the converter can complete the mode switching accordingly. On the premise of ensuring the output voltage is stable at 12 V, the flexible control of the output current of 30 and 100 mA is realized, which verifies the rationality of the hardware and software design of the energy conversion system.

Keywords: magnesium seawater battery; energy management; three-port convert; maximum power point tracking

0 引 言

近年来,我国大力推进海洋水文、气象观测和海上通信相关技术的研究步伐,以提高我国海洋监测信息化程度^[1]。作为一种海洋探测、通讯设备的搭载平台,由于远

离大陆电网,海洋浮标需要具备为台上设备提供独立供电的能力^[2]。因此,如何实现对海洋浮标搭载设备的持续供电已经成为业内关注的焦点。镁海水电池作为一种新型电池,直接将海水作为电解液,利用金属镁和空气中氧气发生化学反应来产生电能,具有价格低廉、绿色环保、高比能量、可深海工作等优点^[3],适合装设于海洋浮

标,为搭载的监测和通讯设备提供电力。然而,实际研究发现,镁海水电池单体存在电压低,动态响应速度慢以及输出特性软等缺点^[4]。为了弥补镁海水电池的缺陷,需要为其设计一种科学的能量变换系统,以提高镁海水电池的实用性。

为了提高电池的能量转换效率,有学者提出一种三端口变换器拓扑(three port convert, TPC)^[5-12],TPC可分为隔离型^[5-6]和非隔离型^[7-12]两类,与前者相比,非隔离型 TPC 的体积更小、效率更高,适用于中低压或无需电气隔离要求的场合。文献[7-9]在设计非隔离型 TPC 时,通过减少开关器件(或电感),降低 TPC 电路损耗,实现了能量低压高效转换,但存在升压能力不足的问题。针对此情况,有学者对于变换器如何实现电压高增益进行了深入研究,发现采用耦合电感^[10-11]、开关电容^[12]等方式,有助于提高 TPC 电压增益。

关于 DC/DC 变换器的控制研究,通常集中在模糊控制^[13]、前馈控制^[14]、滑膜控制^[15]等方向。文献[16]以传统 PI 控制为基础,通过最小值竞争关系设计了 TPC 控制策略,能够有效的保证三端口之间的功率流动。但由于采用传统最大功率点追踪方法(maximum power point tracking, MPPT),在最大功率处存在明显震荡问题。与传统 MPPT 方法相比,文献[17]以 TPC 为基础,提出一种针对燃料电池的电阻匹配 MPPT 方法,能够有效提高追踪精度与速度,但此方法需要在燃料电池不同极化区采用不同步长,实现过程较为复杂。文献[18]首次将灰狼算法应用于 MPPT 控制,此方法具有算法简单,收敛速度快的优点,但存在初始种群多样性差,易于陷入局部最优的问题。在文献[18]的基础上,Mohanty 等^[19]结合扰动观察法,提出了一种混合 MPPT 控制,进一步提高了收敛速度,但仍未解决种群多样性差和易陷入局部最优的问题。

通过上述分析可知,目前已有非隔离型 TPC 拓扑及对应控制策略并不完全适用于镁海水电池的能量管理。因此,本文根据镁海水电池特性,以提高输出电压增益为目的,构建一种改进非隔离型 TPC,并以改进非隔离型 TPC 为基础,考虑镁海水电池工作特点和载荷突变规律,引入改进灰狼算法完成 MPPT 算法优化,继而提出一种系统能量优化控制策略,以保证系统各端口间能量灵活调配,最后通过 MATLAB/Simulink 仿真,验证了改进 MPPT 方法的优越性,并搭建了一台原理样机,以验证此系统设计的合理性。

1 镁海水电池工作原理及特性分析

1.1 镁海水电池工作原理

镁海水电池作为一种环保燃料电池,主要由镁阳极,空气阴极,海水电解液组成^[20],通过电化学反应将金属

镁的化学能转化为电能,反应原理图如图 1 所示。镁发生氧化反应失去电子,生成 Mg^{2+} ,与电解液中的 OH^- 结合,生成 $Mg(OH)_2$ 。电子通过外部回路,传输到电池正极,氧气获得电子后,与电解液中的水发生还原反应,生成 OH^- ,随着 Mg^{2+} 继续和 OH^- 进行反应,金属镁和氧气不断消耗,电子在外部线路持续流动,形成电流进行放电。

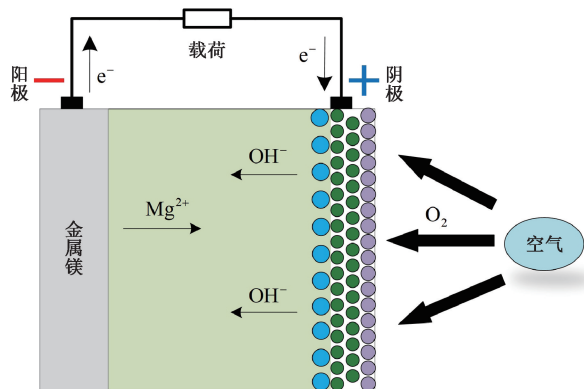
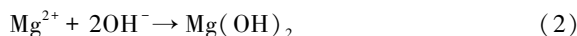


图1 镁海水电池反应原理图

Fig. 1 Reaction principle of magnesium seawater battery

镁海水电池的内部反应,具体如下:

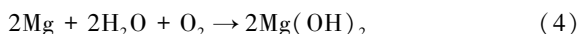
阳极反应:



阴极反应:



总反应为:



1.2 镁海水电池输出特性

氧气作为镁海水电池的反应物,其浓度直接影响电池的输出特性,如图 2 给出了电池阴极处于氧气和空气两种环境下的镁海水电池输出特性,氧气浓度升高会使最大功率点位置发生改变,输出功率响应增大。

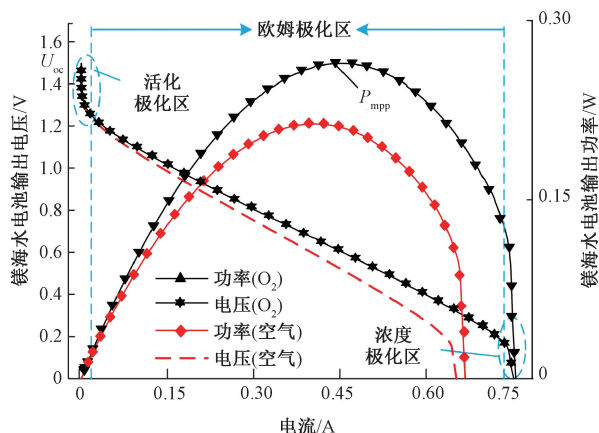


图2 镁海水电池电压及功率曲线

Fig. 2 Voltage and power curve of magnesium seawater battery

以氧气环境下镁海水电池输出特性曲线为例, U_{oc} 为电池的开路电压, P_{mpp} 为电池最大功率点功率。电压曲线分为 3 部分:活化极化区、欧姆极化区和浓度极化区。从空载到低电流阶段, 电池电压突然下降, 其原因是此阶段电荷传递速度缓慢引起活化极化, 导致电池内阻增大; 随着电流的增大, 进入欧姆极化阶段, 其内阻变化幅度不大, 因此该阶段电压曲线近似线性; 当输出电流逐渐趋近电池的极限电流时, 电极表面粒子浓度与电解液内部粒子浓度存在差异, 形成浓度极化, 导致电压快速下降。

分析图 2 可知, 镁海水电池不但存在单体电压低、输出特性软等缺点, 而且其电压电流之间体现出明显的非线性关系。当工作环境含氧量改变时, 电池将偏离最大功率点, 导致能量转换效率降低。因此, 需要从提升电压增益和保证电池能量转换效率两方面入手, 设计镁海水电池能量变换系统, 以满足载荷突变时系统供电电压稳定和功率平衡需求。

2 变换器设计

2.1 拓扑结构优化

针对传统非隔离型 TPC 升压困难的问题, 本文在文献[7]所提出 TPC 拓扑基础上, 引入倍压单元 (C_1 、 C_2 、 VD_2 、 VD_3), 改进后的拓扑结构如图 3 所示。改进 TPC 中电池不再直接向负载传输能量, 而是将能量分别传输给升压电容 C_1 、 C_2 , 随着开关管 S_3 的变化, 升压电容 C_1 、 C_2 串联共同向负载供电。

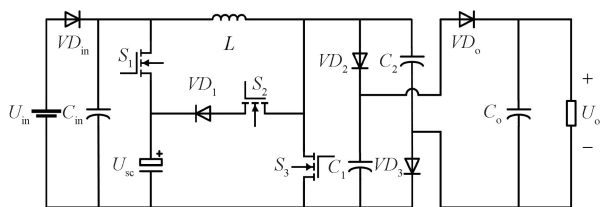


图 3 TPC 拓扑图

Fig. 3 TPC topology

2.2 工作模式分析

本文所提出的 TPC, 具有两种工作模式

1) 双输入单输出 (double input single output, DISO) 模式, 当 $P_{in} < P_o$ 时, 镁海水电池与超级电容同时向负载提供能量。 P_{in} 为镁海水电池输入功率, P_o 为负载所需功率。由开关管 S_1 、 S_3 进行功率传输控制。

开关模式 1: S_1 关断, S_3 导通, 等效电路如图 4(a), 此时 U_{in} 为电感 L 传递能量, 电容 C_1 、 C_2 串联向负载释放能量, 电感电流 i_L 线性上升。

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_{in}}{L} \quad (5)$$

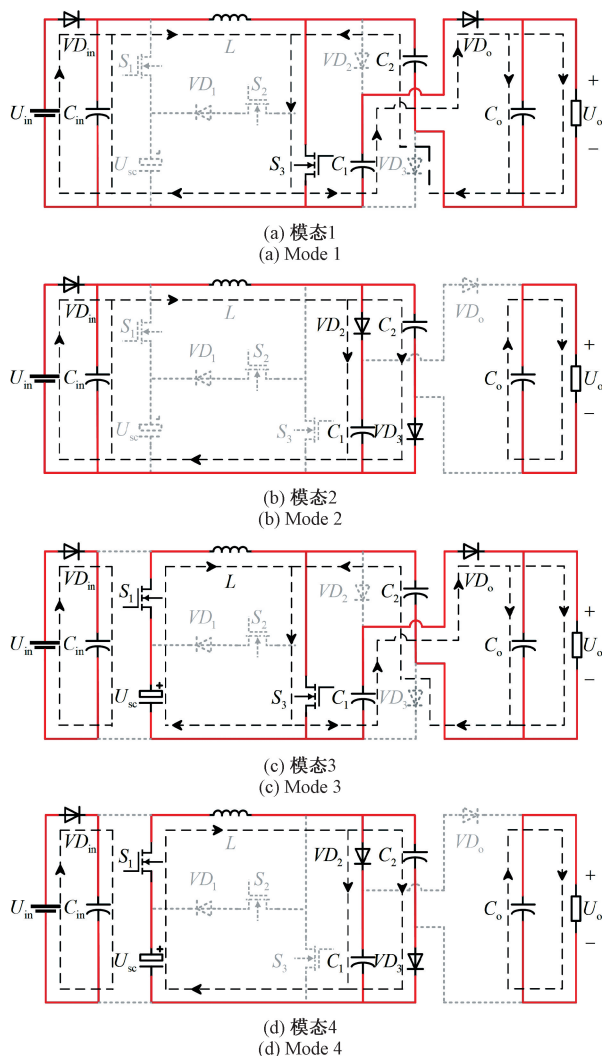


图 4 DISO 模式工作状态

Fig. 4 Working state of DISO mode

开关模式 2: S_1 、 S_3 关断, 等效电路如图 4(b), U_{in} 和电感 L 串联分别给 C_1 和 C_2 充电, C_0 保持负载电压稳定, 电感电流 i_L 线性下降。

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_{C1} - U_{in}}{L} = \frac{U_{C2} - U_{in}}{L} \quad (6)$$

开关模式 3: S_1 、 S_3 导通, 等效电路如图 4(c), 此时 U_{sc} 为电感 L 传递能量, 电容 C_1 、 C_2 串联向负载释放能量, 电感电流 i_L 线性上升。

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_{sc}}{L} \quad (7)$$

开关模式 4: S_1 导通, S_3 关断, 等效电路如图 4(d), U_{sc} 和电感 L 串联分别给 C_1 和 C_2 充电, C_0 保持负载电压稳定, 电感电流 i_L 线性下降。

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_{C1} - U_{sc}}{L} = \frac{U_{C2} - U_{sc}}{L} \quad (8)$$

2) 单输入双输出(single input double output, SIDO)模式,当 $P_{in} > P_o$ 时,镁海水电池向载荷端提供能量的同时,将剩余的能量传输给超级电容,进行储能。由开关管 S_2 、 S_3 进行功率传输控制。

开关模式1: S_2 关断, S_3 导通,等效电路如图5(a),此时 U_{in} 为电感 L 传递能量,电容 C_1 、 C_2 串联向载荷释放能量,电感电流 i_L 线性上升。

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_{in}}{L} \quad (9)$$

开关模式2: S_2 导通, S_3 关断,等效电路如图5(b)所示,此时 U_{in} 和电感 L 串联给超级电容充电, C_o 保持载荷电压稳定,电感电流 i_L 线性下降。

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_{sc} - U_{in}}{L} \quad (10)$$

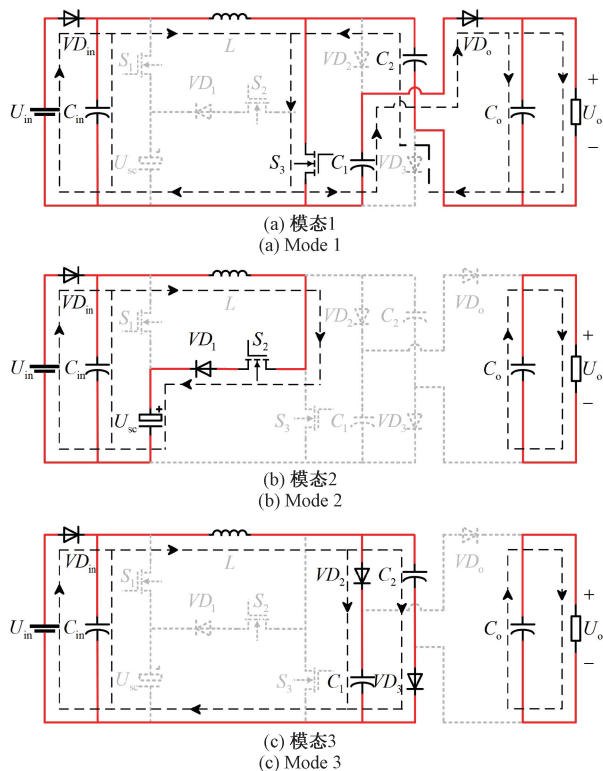


图5 SIDO 模式工作状态

Fig.5 Working state of SIDO mode

开关模式3: S_2 、 S_3 关断,等效电路如图5(c), U_{in} 和电感 L 串联分别给 C_1 和 C_2 充电, C_o 保持载荷电压稳定,电感电流 i_L 线性下降。

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_{C1} - U_{in}}{L} = \frac{U_{C2} - U_{in}}{L} \quad (11)$$

2.3 性能分析

1) DISO 模式电压增益分析

DISO 模式下, S_1 和 S_3 导通的占空比分别为 D_1 、 D_3 。

当 $D_1 < D_3$ 时,变换器工作于开关模式1、2、3,当 $D_1 > D_3$ 时,变换器工作于开关模式2、3、4。如图6为DISO模式变换器工作波形, u_{s1} 、 u_{s2} 、 u_{s3} 为3个开关管驱动电压, i_{s1} 、 i_{s2} 、 i_{s3} 为流过3个开关管的电流。

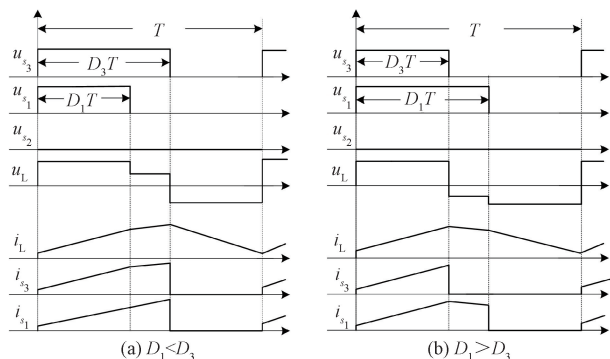


图6 DISO 模式变换器工作波形

Fig.6 Working waveform of converter in DISO mode

当 $D_1 < D_3$,变换器稳定工作时,根据电感伏秒平衡特性可得到:

$$U_{sc} D_1 + U_{in} (D_3 - D_1) = (U_{C1} - U_{in}) (1 - D_3) \quad (12)$$

根据图4可以得到,电容 C_1 、 C_2 电压相等,两者之和为输出电压 U_o :

$$\begin{cases} U_{C1} = U_{C2} \\ U_{C1} + U_{C2} = U_o \end{cases} \quad (13)$$

整理可得端口电压关系为:

$$\begin{cases} U_o = \frac{2(U_{sc} D_1 + U_{in} (1 - D_1))}{1 - D_3} \\ U_{in} = \frac{U_o (1 - D_3) - 2U_{sc} D_1}{2(1 - D_1)} \end{cases} \quad (14)$$

同理当 $D_1 > D_3$ 时端口电压关系为:

$$\begin{cases} U_o = \frac{2(U_{sc} D_1 + U_{in} (1 - D_1))}{1 - D_3} \\ U_{in} = \frac{U_o (1 - D_3) - 2U_{sc} D_1}{2(1 - D_1)} \end{cases} \quad (15)$$

2) SIDO 模式电压增益分析

SIDO 模式下,开关管 S_2 、 S_3 交替导通,导通占空比分别为 D_2 、 D_3 。如图7所示,为SIDO模式变换器工作波形。

SIDO 模式,变换器稳定工作时,根据伏秒特性可得到:

$$U_{in} D_3 = (U_{sc} - U_{in}) D_2 + (U_{C1} - U_{in}) (1 - D_2 - D_3) \quad (16)$$

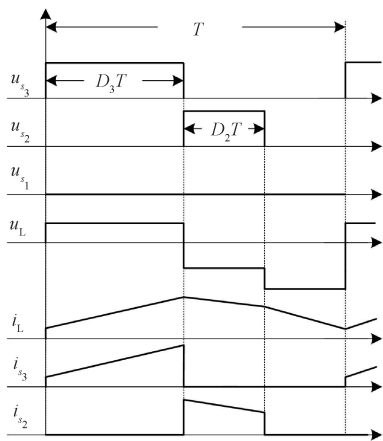


图 7 SIDO 模式变换器工作波形

Fig. 7 Working waveform of converter in SIDO mode

结合式(13)整理可得:

$$\begin{cases} U_o = \frac{2(U_{in} - U_{sc}D_2)}{1 - D_2 - D_3} \\ U_{in} = \frac{U_o(1 - D_2 - D_3) + 2U_{sc}D_2}{2} \end{cases} \quad (17)$$

观察式(14)、(15)和(17)可知,与常规非隔离型 TPC^[7]拓扑相比,理论上改进 TPC 的电压增益提升了两倍。

3 适用于载荷突变的系统能量管理策略

3.1 海洋浮标载荷运行功率分析

作为一种小型海洋观测仪器的载体,浮标除了搭载气象传感器、水质探测器和数据传输模块外,还配有无线定位仪及供电系统^[21]。以我国东海海域某典型海洋浮标为例,其有效载荷运行功率参数如表 1 所示。

表 1 海洋浮标载荷工作状态

Table 1 Working state of load on ocean buoy

载荷名称	工作功率/W	工作时间/s	待机功率/W	待机时间/s
数据采集器	0.35	全天	0	0
数据传输模块	0.94	60	0.20	1 740
北斗定位模块	5.21	1.8	1.25	3 598.2
水质检测仪	1.46	130	0	1 670
气象检测仪	0.08	180	0.02	1 620
海流计	1.56	180	0	3 420
波浪传感器	2.83	1 320	0	2 280
电子罗盘	0.03	180	0	1 620

根据表 1 可知,海洋浮标载荷存在两种运行模式:一种是待机模式,该模式下的设备均处于休眠状态,消耗功率极低;另一种是工作模式,有效载荷功率较大,可以达到待机模式的 3 倍以上,但工作时间远小于待机模式,且两种模式相互转换,呈周期性变化。

3.2 系统控制结构与能量调节策略

以改进 TPC 为基础,考虑输入源和输出载荷特性,构建一种适用于镁海水电池的能量变换系统控制策略,控制结构如图 8 所示。控制策略包含输入电压调节(input voltage regulator, IVR)和输出电压调节(output voltage regulator, OVR)两部分。当 $P_o > P_{in}$,变换器工作于 DISO 模式,输入端选择 IVR 调节器信号,保持最大功率输出,此时输入端不能提供载荷所需功率,输出端电压降低, $d_{OVR} > 0$,超级电容放电,协助电池完成对载荷供电,保持输出电压稳定;当 $P_o < P_{in}$,此时变换器工作于 SIDO 模式,输入端工作于最大功率点,输出端电压大于电压参考值, $d_{IVR} - d_{OVR} > 0$,将剩余的能量存储于超级电容,以实现载荷电压的恒压控制。

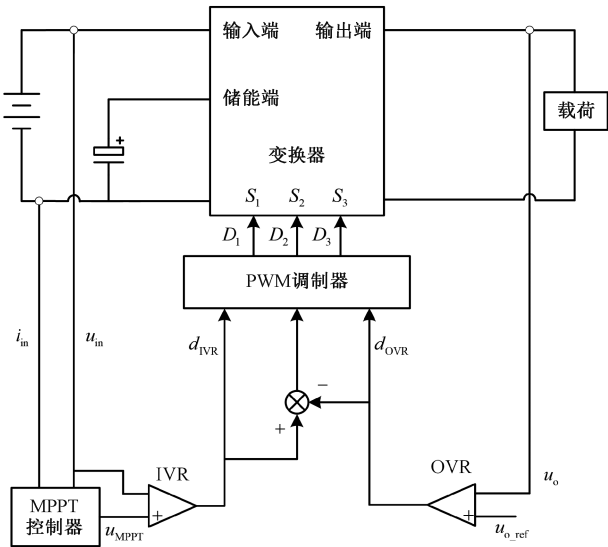


图 8 TPC 控制框图

Fig. 8 Control method of the TPC

3.3 海洋电池最大功率跟踪算法

根据 1.2 节对于镁海水电池的输出特性分析可知,随着氧气浓度的变化,镁海水电池最大功率点位置也将发生改变,为了提高镁海水电池能量转化效率和其输出功率稳定性,本文提出了一种基于改进灰狼算法的 MPPT 方法。

1) 灰狼优化算法原理

灰狼优化算法(grey wolf optimization, GWO)模仿了 Mirjalili 等^[22]提出的自然界中灰狼的领导阶层和狩猎机制。灰狼种群被认为处于食物链的顶端,存在 4 种类型

灰狼(α, β, δ 和 ω)。其中, α, β 和 δ 为领导阶层, α 等级最高,为最优解,次优解和第三优解分别为 β 和 δ ,其余解均为 ω 。灰狼在捕猎过程中向领导阶层靠近,包围和狩猎行为可通过以下方程式建模:

$$D_p = |C \cdot X_p(t) - X(t)| \quad (18)$$

$$X(t+1) = \frac{1}{3} \sum_{p=\alpha, \beta, \delta} X_p(t) - A \cdot D_p \quad (19)$$

其中, t 表示当前迭代次数, D_p 表示灰狼与猎物之间的距离, A 和 C 表示系数向量, X_p 表示猎物的当前位置向量, X 表示灰狼的位置向量。向量 A 和 C 的计算如下:

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (20)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (21)$$

其中, r_1, r_2 是 $[0, 1]$ 中的随机向量, a 为收敛因子,在迭代过程中从2线性减少到0,计算如下:

$$a = 2 \left(1 - \frac{t}{t_{\max}} \right) \quad (22)$$

2) 基于改进灰狼优化算法的MPPT方法

标准灰狼算法产生的初始灰狼种群具有随机性,当初始种群比较集中时,有可能造成局部最优,对全局搜索能力产生影响,因此,利用混沌序列的遍历性和随机性,采用 Tent 混沌映射方程初始灰狼种群,尽可能使初始灰狼种群均匀分布,提高寻优效率。Tent 映射方程如下:

$$x_{i+1} = \begin{cases} 2x_i, & 0 \leq x_i \leq 0.5 \\ 2(1 - x_i), & 0.5 \leq x_i \leq 1 \end{cases} \quad (23)$$

同时针对标准灰狼算法存在后期收敛速度慢、易陷入局部最优的缺点,将线性收敛因子改进为非线性,前期收敛因子衰减速度慢,灰狼更好的搜索全局最优解,后期收敛速度变快,精确寻找到局部最优解。

$$a = \frac{2}{\ln 2} \times \ln \left(2 - \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^2 \right) \quad (24)$$

改进后 a 的变化效果,如图9所示。

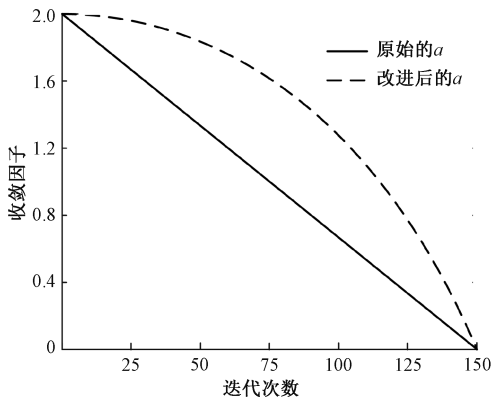


图9 收敛因子对比

Fig. 9 Comparison of convergence factors

将改进灰狼算法(improved grey wolf algorithm, IGWO)应用于MPPT控制,镁海水电池功率 P 为目标函数,电池输出电压 U 定义为灰狼位置,通过不断调整镁海水电池输出电压大小,追踪镁海水电池最大功率点,因此,式(19)修改为:

$$U(t+1) = \frac{1}{3} \sum_{p=\alpha, \beta, \delta} U_p(t) - A \cdot D_p \quad (25)$$

随着迭代进行,相邻电压标准差记为 ΔU ,当 ΔU 小于所设的临界值 ε ,或者迭代次数大于最大迭代次数时,认为此时已经处于最大功率点。镁海水电池随着氧气浓度的改变,最大功率点发生改变,为了实现最大功率点变化的快速辨识,设阈值功率 ΔP_{th} ,当满足式(26)时,认为最大功率点发生改变。具体算法流程如图10所示。

$$\Delta P = P_{\text{real}} - P_{\text{max}} \geq \Delta P_{th} \quad (26)$$

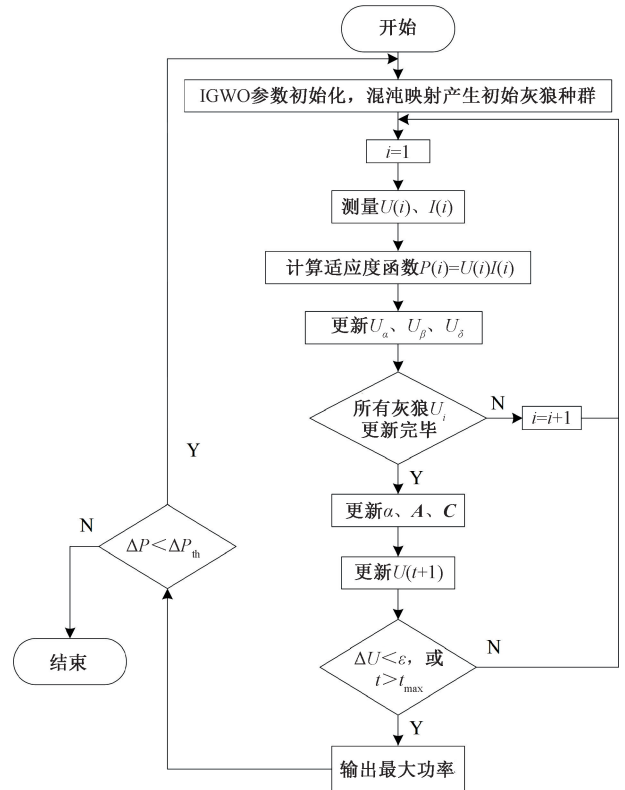


图10 改进灰狼算法MPPT流程图

Fig. 10 MPPT flow chart of IGWO

4 仿真与实验验证

4.1 MPPT 仿真实验

为验证所提改进MPPT方法对镁海水电池能量变换系统控制的有效性,采用MATLAB/Simulink,根据图3搭建TPC系统仿真模型(主要参数如表2所示),分别对改进灰狼算法MPPT、标准灰狼算法MPPT和粒子群算法MPPT方法下的变流系统功率控制效果进行对比。

表 2 仿真与实验参数

Table 2 Parameters of simulation and experiment

器件名称	参数值/型号
开关管 S_1, S_2, S_3	YJL3400A
二极管 $VD_{in} \sim VD_o$	SS13
电容 C_{in}, C_o	100 μ F/25 V
电容 C_1, C_2	10 μ F/25 V
电感 L	350 μ H
输入电压 U_{in}	2~4 V
超级电容标称电压 U_{sc}	5.4 V
载荷电压 U_o	12 V
载荷功率 P_o	0.36 W/1.2 W
频率 f	20 kHz

当镁海水电池阴极工作于氧气环境,设定最大功率为 1 W,图 11(a)为采用 3 种 MPPT 方法对应的变流系统功率控制曲线。由图 11(a)中可知,启动过程中,三种方法跟踪过渡时间分别为 0.098、0.132 和 0.147 s。在 0.25 s 时,镁海水电池阴极改为工作于空气环境,其他条件保持不变,最大功率由 1 W 降至 0.72 W,重新追踪最大功率点,图 11(b)为最大功率点重新追踪的过程,重新追踪的收敛时间分别为 0.027、0.040 和 0.090 s。分析仿真结果可知,改进后的灰狼算法与标准灰狼算法、粒子群算法相比,其收敛速度更快,系统控制过渡时间更短,且超调量更小。

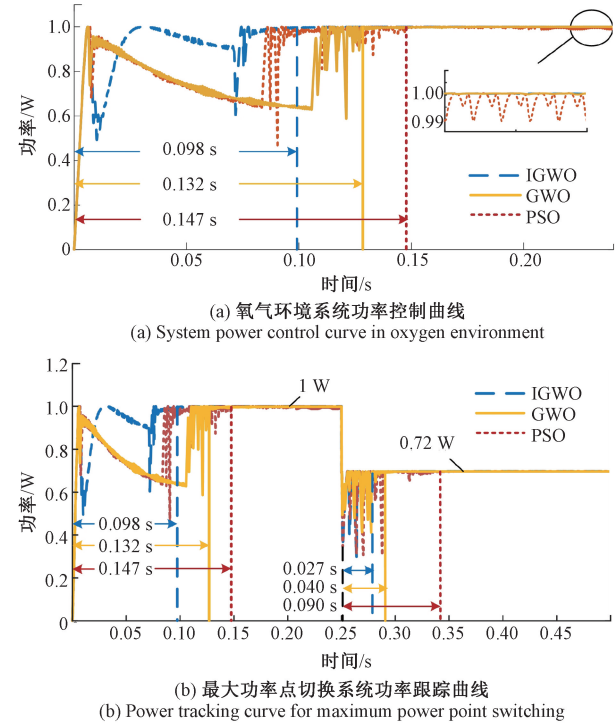


图 11 MPPT 曲线

Fig. 11 MPPT curves

4.2 TPC 实物实验

在实验室搭建了一台原理样机,采用 4 组镁海水电池串联供电,实验系统如图 12 所示,系统主要参数如表 2 所示。利用 400 Ω 电阻和 120 Ω 电阻的反复切换,模拟海洋浮标载荷间歇工作情况。

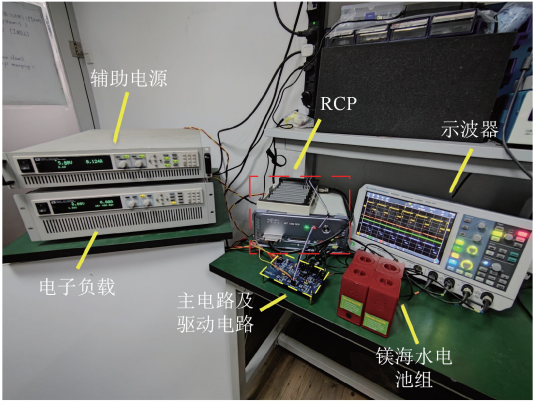


图 12 实验系统

Fig. 12 Experimental system

1) 稳态模式

变换器稳态实验波形如图 13,图 13(a)为 DISO 模式开关管 S_1, S_2, S_3 驱动电压和电感电压 u_L 波形,开关管 S_3 占空比大于开关管 S_1 占空比,开关管 S_2 保持关断,与图 6

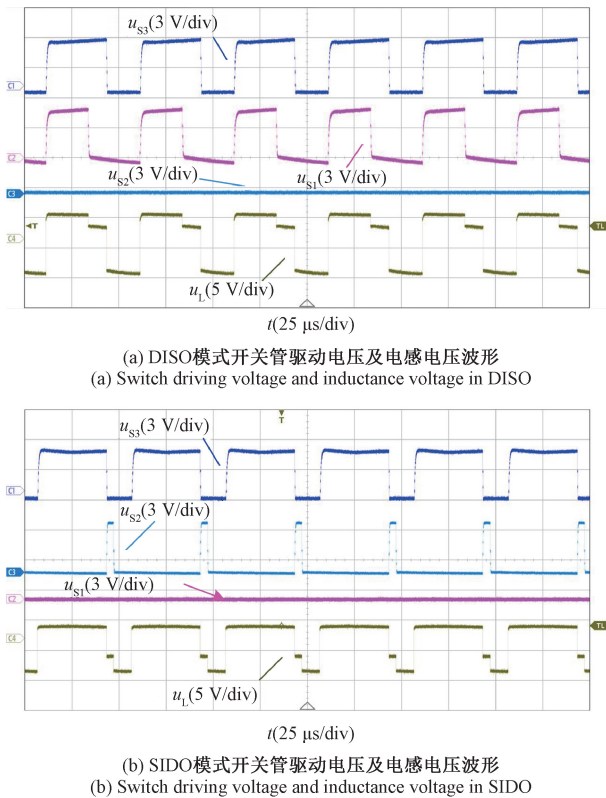


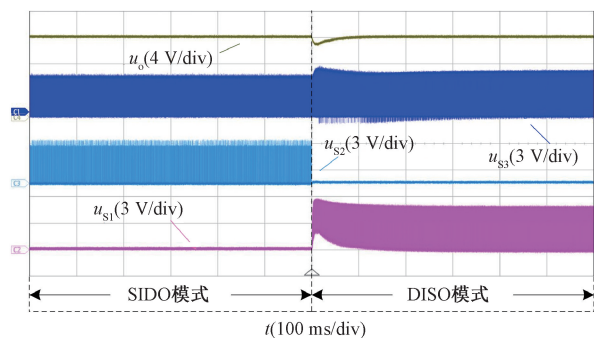
图 13 变换器稳态模式实验波形

Fig. 13 Steady state mode of converter

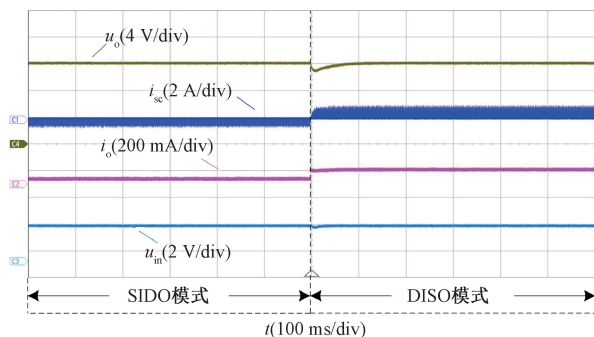
理论波形基本一致。图 13(b) 为 SIDO 模式开关管 S_1 、 S_2 、 S_3 驱动电压和电感电压 u_L 波形,与图 7 理论波形基本一致。

2) 模式切换

载荷由 $P_o = 0.36 \text{ W}$ 变为 $P_o = 1.2 \text{ W}$ 时变换器实验波形如图 14,分析图 14 可知,变换器由 SIDO 模式切换为 DISO 模式,开关管由 S_2 、 S_3 导通,转为 S_1 、 S_3 导通,输入电压 u_m 和输出电压 u_o 分别稳定在 2.56 和 12 V,超级电容由吸收能量转为释放能量(电流流出为正),载荷电流 i_o 从 30 mA 升高为 100 mA。



(a) 开关管驱动电压及输出电压波形
(a) Switch driving voltage and load voltage



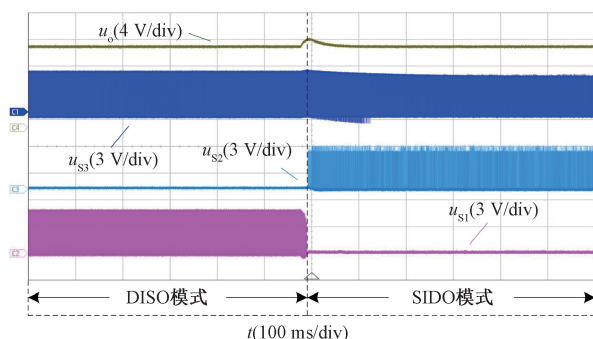
(b) 端口电压和电流
(b) Voltage and current of the port

图 14 SIDO 模式切换为 DISO 模式实验波形

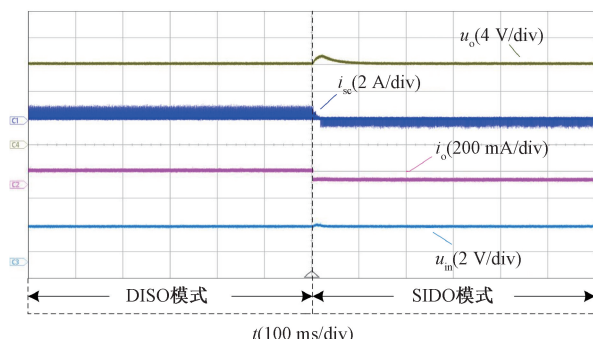
Fig. 14 Waveform of converting SIDO mode to DISO mode

载荷由 $P_o = 1.2 \text{ W}$ 变为 $P_o = 0.36 \text{ W}$ 时变换器实验波形如图 15,分析图 15 可知,变换器由 DISO 模式切换为 SIDO 模式,开关管由 S_1 、 S_3 导通,转为 S_2 、 S_3 导通,输入电压 u_m 和输出电压 u_o 分别稳定在 2.56 和 12 V,超级电容由释放能量转为吸收能量,输出电流 i_o 从 100 mA 降低为 30 mA。

上述实验表明,变换器在 DISO 和 SIDO 两种模式工作情况下,不但能保证对载荷的稳定供电而且实现了电池能量的充分利用;两种模式的平滑转换,能够满足载荷动态变化时的供电要求。



(a) 开关管驱动电压及输出电压波形
(a) Switch driving voltage and load voltage



(b) 端口电压和电流
(b) Voltage and current of the port

图 15 DISO 模式切换为 SIDO 模式实验波形

Fig. 15 Waveform of converting DISO mode to SIDO mode

5 结 论

针对镁海水电池电化学特性,从能量变换系统硬件拓扑和控制策略两方面,设计了一种适用于镁海水电池的能量变换系统,通过理论分析和实验验证得到如下结论:

1) 虽然镁海水电池具有成本低,无污染等优点,但是由于其受镁阳极腐蚀性放电速度的制约,输出电压电流之间呈强非线性关系,不但响应速度慢,而且输出特性软。

2) 通过引入倍压单元解决了传统非隔离型 TPC 升压困难的问题,并充分利用超级电容功率密度大、充放电速度快的特点,实现 TPC 内源荷间动态功率平衡,解决了低压镁海水电池无法直接为探测仪器和通讯设备供电的难题。

3) 本文构建的能量调控策略,充分发挥改进 TPC 源、荷、储三端口间能量灵活流动优势,在载荷功率切换保证持续供电的前提下,基于改进灰狼算法实现了对镁海水电池供电系统 MPPT 优化控制,提高了镁海水电池的能量转换效率。

参考文献

- [1] 李振宇, 王国玲, 杨宇生, 等. 一种海上平台直流微网系统复合型短路故障检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 157-164.
LI ZH Y, WANG G L, YANG Y SH, et al. A combined short-circuit fault detection method for DC microgrid system in an offshore platform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 57(12): 275-284.
- [2] 王波, 李民, 刘世萱, 等. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2401-2414.
WANG B, LI M, LIU SH X, et al. Current status and trend of ocean data buoy observation technology applications[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2401-2414.
- [3] ZHANG Y, HAN L, REN L, et al. Effect of yttrium and calcium additions on electrochemical behaviors and discharge performance of AZ80 anodes for Mg-air battery[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(8): 2510-2526.
- [4] 王玉娇, 江海涛, 张韵, 等. 镁合金海水电池阳极材料电化学性能研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9041-9048, 9076.
WANG Y J, JIANG H T, ZHANG Y, et al. Research progress on the electrochemical performance of anode materials for magnesium alloy seawater batteries [J]. Materials Reports, 2021, 35(9): 9041-9048, 9076.
- [5] DAO N D, LEE D C, PHAN Q D. High-efficiency sic-based isolated three-port DC/DC converters for hybrid charging stations [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10455-10465.
- [6] WANG K, LIU W, WU F. Topology-level power decoupling three-port isolated current-fed resonant DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 4859-4868.
- [7] WU H, SUN K, DING S, et al. Topology derivation of nonisolated three-port DC-DC converters from DIC and DOC [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7): 3297-3307.
- [8] 李芳, 游小杰, 李艳. 航天用非隔离集成三端口变换器的建模与控制系统设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 291-300.
LI F, YOU X J, LI Y. Modeling and control loop design of non-isolated three-port DC-DC converter for satellite applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 291-300.
- [9] CHENG T, LU D C, QIN L. Non-isolated single-inductor DC/DC converter with fully reconfigurable structure for renewable energy applications [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018 65(3): 351-355.
- [10] SAADATIZADEH Z, BABAEI E, BLAABJERG F, et al. Three-port high step-up and high step-down DC-DC converter with zero input current ripple [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 1804-1813.
- [11] FARAJI R, FARZANEHFARD H, KAMPITSIS G, et al. Fully soft-switched high step-up nonisolated three-port DC-DC converter using GaN HEMTs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(10): 8371-8380.
- [12] 刘俊峰, 胡仁俊, 曾君. 具备高增益的非隔离三端口变换器[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 529-538.
LIU J F, HU R J, ZENG J. A non-isolated three-port converter with high-voltage gain [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 529-538.
- [13] 史永胜, 刘博亲, 王凡, 等. 基于模糊控制的光储三端口变换器研究[J]. 电子器件, 2021, 44(4): 789-796.
SHI Y SH, LIU B Q, WANG F, et al. Research on optical storage three-port converter based on fuzzy control[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2021, 44(4): 789-796.
- [14] 范恩泽, 李耀华, 葛琼璇, 等. 基于优化移相的双有源串联谐振变换器前馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(20): 5324-5333.
FAN EN Z, LI Y H, GE Q X, et al. Feedforward control strategy of dual active bridge series resonant converter based on optimized phase shift[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(20): 5324-5333.
- [15] 崔楠, 许家群. Buck 变换器导通模式转换滑模 PI 混合控制策略[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 254-262.
CUI N, XU J Q. Hybrid control strategy with sliding mode and PI controller for Buck converter considering conduction mode [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 254-262.
- [16] 刘硕, 高莹, 辛迪熙, 等. 非隔离储能型三端口开关升压变换器在光伏系统中应用的研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(7): 139-145.

- LIU SH, GAO Y, XIN D X, et al. Research on non-isolated energy storage type three-port switching boost converter in photovoltaic system application [J]. *Acta Energae Solaris Sinica*, 2021, 42(7): 139-145.
- [17] 朱国荣, 卢家航, 黎沃铭. 燃料电池实时电阻匹配最大功率跟踪法 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(26): 44-52.
- ZHU G R, LU J H, LI W M. A maximum power point tracking method based on real-time resistance matching for fuel cells energy system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(26): 44-52.
- [18] MOHANTY S, SUBUDHI B, RAY P K. A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 7(1): 1-8.
- [19] MOHANTY S, SUBUDHI B, RAY P K. A grey wolf-assisted perturb & observe MPPT algorithm for a PV system [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(1): 340-347.
- [20] 谷亚啸, 江静华, 谢秋媛, 等. 海水电池用镁合金阳极的研究进展 [J]. *表面技术*, 2022, 51(4): 1-13.
- GU Y X, JIANG J H, XIE Q Y, et al. Advances in magnesium alloys as anodes of seawater battery [J]. *Surface Technology*, 2022, 51(4): 1-13.
- [21] ZHANG H, ZHANG D, ZHANG A. An innovative multifunctional buoy design for monitoring continuous environmental dynamics at tianjin port [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 171820-171833.
- [22] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. grey wolf optimizer [J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 69(3): 46-61.

作者简介



陈继开(通信作者), 2000 年于陕西科技大学获得学士学位, 2007 年于兰州理工大学获得硕士学位, 2011 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为东北电力大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量分析与控制、新能源变流器建模与控制、柔性直流输电技术等。

E-mail: chenjikai1977@163.com

Chen Jikai (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shaanxi University of Science & Technology in 2000, received his M. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 2007, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2011. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Northeast Electric Power University. His main research interests include power quality analysis and control, Modeling and control of new energy converter and MMC-HVDC.