

6-23-2021

Energy Management of Marine Current Power Generation System Based on Fuzzy Logical Control

Jingang Han

Institute of Electrical Drive and Control, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

Li Xu

Institute of Electrical Drive and Control, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Energy Management of Marine Current Power Generation System Based on Fuzzy Logical Control

Abstract

Abstract: The fluctuation of marine current velocity leads to the fluctuation of power generation. The hybrid energy storage system composed of vanadium redox flow battery and super capacitor is used to improve the power quality and smooth the marine current power generation. With the research and commercialization of large scale power marine current power generation system, the capacity of energy storage system has been increasing. To reduce the rated capacity of super capacitor banks in energy storage system, *an energy management strategy based on low-pass filter optimization algorithm of fuzzy control is proposed and the simulation model of 3 MW marine current generation system is built.* The simulation results show that the proposed energy management strategy can effectively reduce the rated capacity of the super capacitor banks, avoid the over charge and over discharge of the super capacitor, and keep the state of charge(SOC) of the super capacitor within a reasonable range.

Keywords

marine current power generation, hybrid energy storage, energy management strategy, fuzzy control, low pass filter

Recommended Citation

Han Jingang, Li Xu. Energy Management of Marine Current Power Generation System Based on Fuzzy Logical Control[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1406-1414.

基于模糊控制的海流发电系统能量管理

韩金刚, 李旭

(上海海事大学 电力传动与控制研究所, 上海 201306)

摘要: 海流流速的波动导致海流发电功率的波动, 采用钒电池和超级电容组成的混合储能系统改善电能质量, 平滑海流发电功率。随着大功率海流发电系统的研究和商用, 储能系统的容量也随之不断增大。为降低储能系统中超级电容组的额定容量, 提出了基于模糊控制的低通滤波优化算法的能量管理策略, 并搭建了 3 MW 海流发电系统仿真模型。仿真结果表明: 所提出的能量管理策略可以有效降低超级电容组的额定容量, 同时能够避免超级电容的过充与过放, 使超级电容的荷电状态保持在合理范围内。

关键词: 海流发电; 混合储能; 能量管理策略; 模糊控制; 低通滤波

中图分类号: TK73; TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2021) 06-1406-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0125

Energy Management of Marine Current Power Generation System Based on Fuzzy Logical Control

Han Jingang, Li Xu

(Institute of Electrical Drive and Control, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The fluctuation of marine current velocity leads to the fluctuation of power generation. The hybrid energy storage system composed of vanadium redox flow battery and super capacitor is used to improve the power quality and smooth the marine current power generation. With the research and commercialization of large scale power marine current power generation system, the capacity of energy storage system has been increasing. To reduce the rated capacity of super capacitor banks in energy storage system, an energy management strategy based on low-pass filter optimization algorithm of fuzzy control is proposed and the simulation model of 3 MW marine current generation system is built. The simulation results show that the proposed energy management strategy can effectively reduce the rated capacity of the super capacitor banks, avoid the over charge and over discharge of the super capacitor, and keep the state of charge(SOC) of the super capacitor within a reasonable range.

Keywords: marine current power generation; hybrid energy storage; energy management strategy; fuzzy control; low pass filter

引言

近年来, 新能源技术得到迅速发展, 海流发电作为利用海洋能源的一种最有发展潜力的形式成为国内外广泛研究的对象。目前英国的 AR 公司 (Atkantis Resources) 研制的海流发电系统 AR1500

和 SeaGen U 单机容量可达到 1.5 MW, 苏格兰 Scotrenewables Tidal Power 公司研制了目前世界上最大的单机容量 2 MW 机组 SR2000 等^[1]。

基于混合储能的海流发电系统的研究是当下的一个热点课题, 海流流速的变化会引起海流发电功率的波动, 这种功率波动会对电力的并网和用户

收稿日期: 2020-03-17

修回日期: 2020-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(61673260)

第一作者: 韩金刚(1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电与电能变换。E-mail: jghan@shmtu.edu.cn

的使用产生负面影响,混合储能系统能够平滑波动功率,改善并网电能质量。针对浪涌效应引起的发电功率波动,文献[2]利用超级电容来补偿海流发电功率的变化,通过低通滤波算法获得超级电容补偿功率,但是低通滤波算法具有滞后性,且时间常数固定,难以适应复杂多变的海况。文献[3]研究了通过控制桨距角的变化来控制并网功率,但桨距角的检测,齿轮箱的应用等大大的增加了发电系统的机械重量和系统的复杂性,缩短机组寿命,不利于后期维护^[4]。文献[5]利用模型预测控制策略平滑风力发电功率,但运算的复杂度降低了系统的反应时间。文献[6]采用两组风力机发电,省去了储能系统,两组风力机配合使用,输出平滑功率,这种平滑功率方式投入成本较高,不利于后期维修。

本文基于 3 MW 混合储能的并网型海流发电系统,提出了基于模糊控制的能量管理策略对海流发电功率进行重新分配,旨在降低大功率海流发电系统中超级电容组的额定容量,避免出现多个超级电容电压均衡问题^[7],过充与过放问题,延长超级电容组的寿命。

1 基于混合储能的海流发电系统

如图 1 所示,海流发电系统主要由 4 个模块构

成:海流流速模型;永磁同步发电机(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)模型及最大功率追踪控制和 SVPWM 整流;储能侧超级电容组(Super Capacitor Bank, SCB)和钒氧化还原液流电池(Vanadium redox flow battery, VRB)模型以及双向 DC/DC 电路建模和控制;逆变并网侧建模和控制。

能量管理策略(Energy Management Strategy, EMS)输入变量为海流发电功率 P_{ger} ,并网参考功率 P_{ref} ,超级电容荷电状态 SOC_{SCB} ,钒电池功率 P_{VRB} ,经 SCB 补偿后直流母线功率 P_{SCB_com} ,并网功率 P_{grid} ,输出 VRB 和 SCB 的补偿参考功率,经过 PI 控制进而输出占空比 D_1 和 D_2 控制双向 DC/DC 电路,平滑海流发电并网功率,同时调节储能系统吸收和释放的能量,优化储能容量。

2 海流发电系统数学模型

2.1 海流机和永磁同步电机数学模型及控制

2.1.1 海流机(MCT)数学模型

水平轴海流机捕获的海流能计算公式如下:

$$P_{MCT} = \frac{1}{2} \rho C_p \pi R^2 V_{tiding}^3 \quad (1)$$

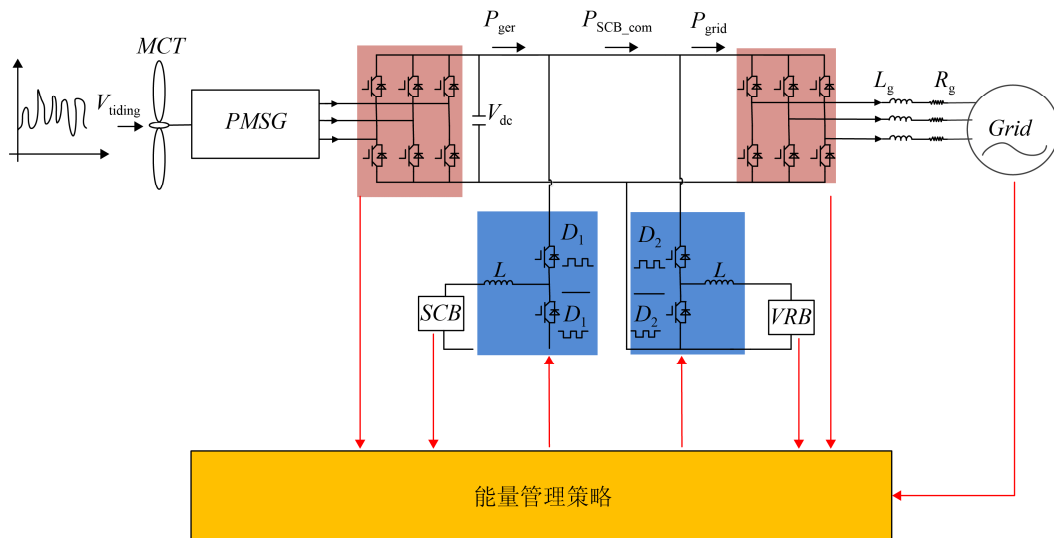


图 1 海流发电系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of marine current power generation system

式中： ρ 为海水密度，本文取值 $1\ 025\ \text{kg/m}^3$ ； C_p 为海流机捕能系数，对于常用的典型海流机，其值范围 $0.35\sim 0.50$ ^[2]； R 为海流机的叶轮半径； V_{tiding} 为叶轮处海流流速。由式(2)可知， C_p 为叶尖速比(λ)和桨距角(β)的函数：

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.22\left(\frac{116}{\gamma} - 0.4\beta - 5\right)e^{-12.5/\gamma} \\ \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (2)$$

本文仿真模型取 $\beta=0^\circ$ ，得到 $C_p-\lambda$ 曲线，如图 2 所示。

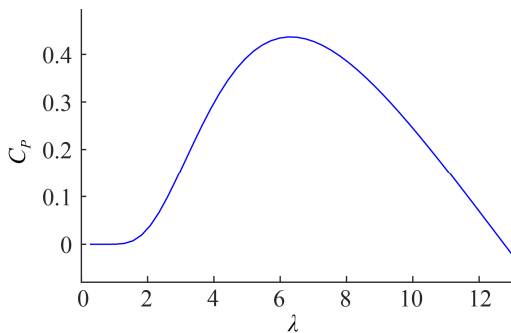


图 2 捕能系数(C_p)与叶尖速比(λ)曲线
Fig. 2 Curve of energy capture coefficient (C_p) and tip speed ratio (λ)

当叶尖速比 $\lambda=6.3$ 时，捕能系数 $C_p=0.44$ ，达到最大值，此时的叶尖速比 λ 称为最佳叶尖速比 λ_{opt} 。

根据式(3)，当发电机转速(ω_{ref})跟随海流流速(V_{tiding})变化而保持 λ_{opt} 为恒定值时，即可获得最大捕能系数 C_p ，该方法称为基于最佳叶尖速比的最大功率追踪^[8-9] (TSR-MPPT, Tip Speed Ratio-Maximum Power Point Tracking)。

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{\omega_{\text{ref}} R}{V_{\text{tiding}}} \quad (3)$$

2.1.2 永磁同步发电机(PMSG)数学模型

永磁同步发电机具有结构简单，效率高，调速范围广等优点^[10]，因此在海流发电系统中被广泛应用。在三相坐标系下，由于发电机模型的强耦合性和非线性，对 PMSG 的控制器设计带来很多困难。因此我们引入 Park 坐标变换^[11]，PMSG 的 d-q 坐

标下的电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Psi_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： R_s 为定子电阻； p 为微分算子； i_d 为 d 轴电流； i_q 为 q 轴电流； u_d ， u_q 分别为 d 轴和 q 轴电压； L_d ， L_q 分别为 d 轴和 q 轴电感； $\omega_e \Psi_f$ 为永磁体磁场在 q 轴电枢绕组中感应的旋转反电动势。

PMSG 的电磁转矩表达式为

$$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2} p_n \Psi_f i_q \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \end{cases} \quad (5)$$

式中： p_n 为电机磁极极对数； J 为 PMSG 的转动惯量； T_m ， T_e 分别为海流机和 PMSG 的转矩； ω_m 为电机机械转速。

2.1.3 机侧 MPPT 控制策略

发电机侧的控制目标是要对海流能进行最大功率跟踪，如图 3 所示，当海流流速变化时，总存在一个功率最大值点，考虑机械损耗及传动效率，MCT 捕获的机械能和 PMSG 产生的电能之间的转化效率为 96% ^[2]，当海流流速为 $3.7\ \text{m/s}$ 时，达到 $3\ \text{MW}$ 额定发电功率。由式(3)，通过调节发电机转速便可捕获最大海流发电功率。

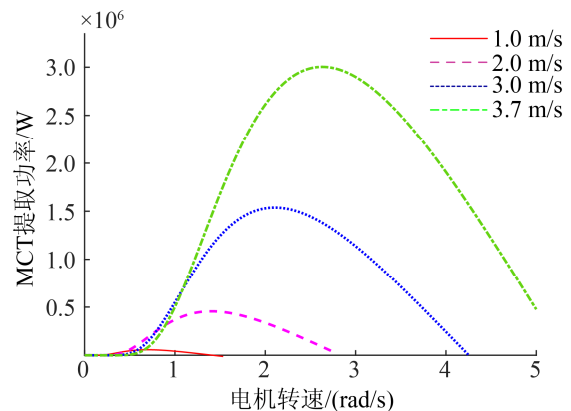


图 3 海流机捕获的海流功率
Fig. 3 Marine current power captured by MCT

在机侧 MPPT 策略中加入一个一阶低通滤波环节，对海流发电功率进行初步平滑^[2]。为缩短仿真时间，机侧 PWM 整流器使用了平均值模型^[12-13]，

为了使 PMSG 产生最大有功功率, d 轴电流参考值设置为零, q 轴为转速电流双闭环结构, 其电流参考值由转速环给定。

2.2 超级电容和钒电池数学模型

本文采用超级电容组(Super capacitor bank, SCB)和钒氧化还原液流电池^[14] (Vanadium redox flow battery, VRB)组成的混合储能系统来对海流发电功率进行补偿。超级电容具有高功率密度, 低能量密度特点, VRB 具有高能量密度, 功率和容量可独立设计, 寿命长, 高效率等特点^[15]。VRB 的结构如图 4。

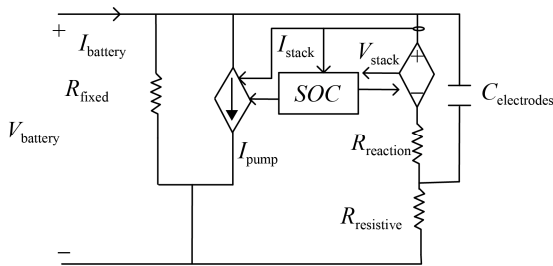


图 4 VRB 等效模型^[14]

Fig. 4 Equivalent model of VRB^[14]

VRB 等效电路模型中, V_{stack} , I_{stack} , $V_{battery}$, $I_{battery}$, $R_{reaction}$, $R_{resistive}$, R_{fixed} , $C_{electrodes}$ 分别表示电池电动势、内部电流、端电压、端电流、电池内部损耗、泵损及附加损耗和极间电容, 根据文献[14-17]建立钒液流电池的 MATLAB/SIMULINK 模型。根据式(6)确定本文 VRB 的额定功率 P_{VRB_rated} 为 1 MW。

$$P_{VRB_rated} = \max(P_{ref} - P_{SCB_com}) \quad (6)$$

式中: P_{ref} 为并网指令功率; P_{SCB_com} 是经过 SCB 平滑后海流发电功率。设定 VRB 额定充电电流为 855 A, VRB 在额定功率下可持续工作 3 h, 可得额定容量 3 MWh。

超级电容模型如图 5 所示, R_{series} 是 SCB 的等效串联电阻, $R_{parallel}$ 是等效并联电阻, C_{SC} 是 SCB 等效总容值^[18]。本文以 BMOD0094 P075 B02 (94 F, 75 V, 13 mΩ)为建模对象, 根据海流发电功率波动情况, 确定 SCB 额定电压 V_{rated} 为 750 V, 等效容

值 C_{SC} 为 37.6 F, 即 10 个单体电容串联为一组, 并联 4 组。根据式(7~9), SCB 额定容量为 2.94 kWh, 电容可吸收/可释放的最大能量为 2.35 kWh。

$$E_{rated} = \frac{1}{2} C_{SC} V_{rated}^2 \quad (7)$$

$$SOC_{SCB} = \frac{E_{SC}}{E_{rated}} = \left(\frac{V_{SC}}{V_{rated}} \right)^2 \quad (8)$$

$$E_r = \frac{1}{2} C_{series} (V_{max}^2 - V_{min}^2) \times 4 \quad (9)$$

SCB 荷电状态 SOC_{SCB} 为 0.2~1, 根据式(8)即可计算出电容电压最小值 V_{min} 和最大值 V_{max} 。式(9)中 C_{series} 为 10 个单体电容串联的总容值; E_r 为 SCB 可吸收/可释放的最大容量; E_{SC} , E_{rated} 分别表示 SCB 实时容量和额定容量; V_{SC} , V_{rated} 分别表示 SCB 实时端电压和额定端电压。

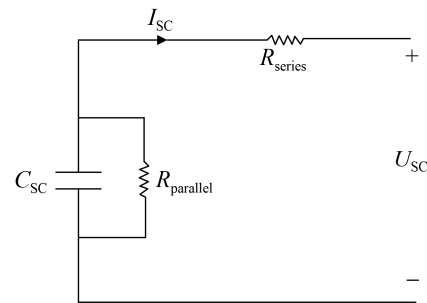


图 5 超级电容组等效模型

Fig. 5 Equivalent model of SCB

2.3 网侧数学模型及其控制

在 d-q 坐标系下, 电网侧数学模型可由式(10)表示:

$$\begin{cases} e_d = -R_g i_d - L_g \frac{di_d}{dt} + \omega_g L_g i_q + V_d \\ e_q = -R_g i_q - L_g \frac{di_q}{dt} + \omega_g L_g i_d + V_q \end{cases} \quad (10)$$

结构如图 1 所示, R_g 为网侧线路电阻, L_g 为网侧电感。本文中网侧 PWM 逆变器^[13]的主要作用是保持直流母线电压的稳定以及调节并网的有功功率和无功功率^[19]。

2.4 海流流速模型

文献[2,8-9]对海流流速模型作了详细分析, 海流流速波动原因主要是由风浪引起的涌流, 称为浪

涌效应(Swell Effect), 海流流速主要由潮汐运动(Tidal Phenomenon)决定。通过卫星观测, 海流流速传感器测量等方法, 一般认为在短时间内, 海流流速由两部分构成。

$$V_{\text{tiding}}(t) = C + \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (11)$$

式中: C 为常数, 表示海流流速的可预测值; A_i , ω_i , φ_i 分别为浪涌效应下海流流速幅值, 频率和初相角。

本文海流流速为舟山群岛摘箬山岛和小摘箬山岛之间海域的真实水流流速^[8], 如图6所示。

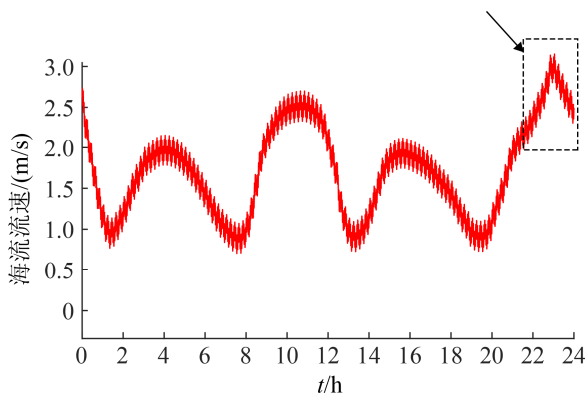


图6 摘箬岛海域24h海流流速波形

Fig. 6 Marine current velocity waveform in the sea area of Zhai Ruo Island in 24 hours

取图6虚线框中150s研究浪涌效应下的海流流速, 根据式(1), 得到海流流速波形如图7所示, 图中除了模拟浪涌干扰下海流流速($t > 22$ s)外, 还模拟了启动($t = 0 \sim 10$ s)和恒流($t = 10 \sim 22$ s)2个状态。

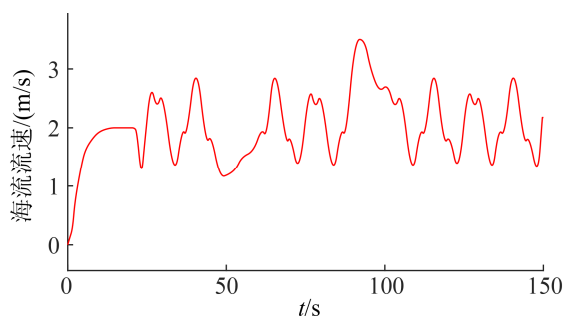


图7 海流流速波形模拟

Fig. 7 Waveform simulation of marine current velocity

3 能量管理策略

由于浪涌效应引起的海流流速波动是短暂性的, 难以预测的, 若因为暂态的过充问题而增大SCB额定容量, 将会增大系统的经济成本以及出现多个超级电容电压均衡问题, 为了减少SCB的额定容量, 延长SCB的寿命, 本文提出一种基于模糊控制的能量管理策略(Fuzzy Control Low Pass Filter-EMS, FCLPF-EMS)。模糊控制算法具有较强的鲁棒性, 可适应复杂多变的海况, 且模糊控制算法复杂度较低, 便于编程实现, 控制效果较好。

如图8所示, EMS将模糊控制器和低通滤波算法结合, 具有在线调节能力, 使SCB以较小的储能容量对浪涌干扰下海流发电波动功率产生较好的平滑效果。其中 D_1 控制SCB的双向DC/DC电路, D_2 控制VRB的双向DC/DC电路。双向DC/DC电路采用半桥非隔离型拓扑^[20], SCB主要补偿由浪涌效应引起的波动功率; VRB补偿由潮汐运动引起的低频波动功率, 同时协调并网功率需求曲线, 使海流发电并网功率 P_{grid} 跟踪并网指令功率 P_{ref} 。

对于前级模糊控制器, ΔP 的量化因子为12000, 基本论域 $[-1, 1]$, 模糊子集分为负大(NB), 负中(NM), 负小(NS), 零(ZE), 正小(PS), 正中(PM), 正大(PB)。隶属度函数为三角形, 输出 $SOC_{\text{SCB_ref}}$ 的基本论域 $[40, 80]$, 模糊子集为非常小(VS), 小(S), 中等偏小(SM), 中等(M), 中等偏大(BM), 大(B), 非常大(VB)。解模糊化方法为重心法。前级模糊控制器控制规则如表1所示。

后级模糊控制器输入为 ΔSOC , $\Delta SOC = SOC_{\text{SCB}} - SOC_{\text{SCB_ref}}$, SOC_{SCB} 为 $[0\%, 100\%]$, $SOC_{\text{SCB_ref}}$ 的参考设定范围是 $[40\%, 80\%]$, 因此 ΔSOC 输入范围 $[-80\%, 60\%]$, 即其基本论域为 $[-80, 60]$, 模糊子集为负大(NB), 负中(NM), 负小(NS), 零(ZE), 正小(PS), 正中(PM), 正大(PB)。充放电状态标志 $flag$ 表示SCB充电(P), 放电(N)2个状态。时间常数 T 输出范围 $[0, 12]$, 模糊子集为非常小(VS), 小(S), 中等偏小(SM), 中等(M), 中等偏大(BM), 大(B), 非常大(VB)。控制规则如表2所示。

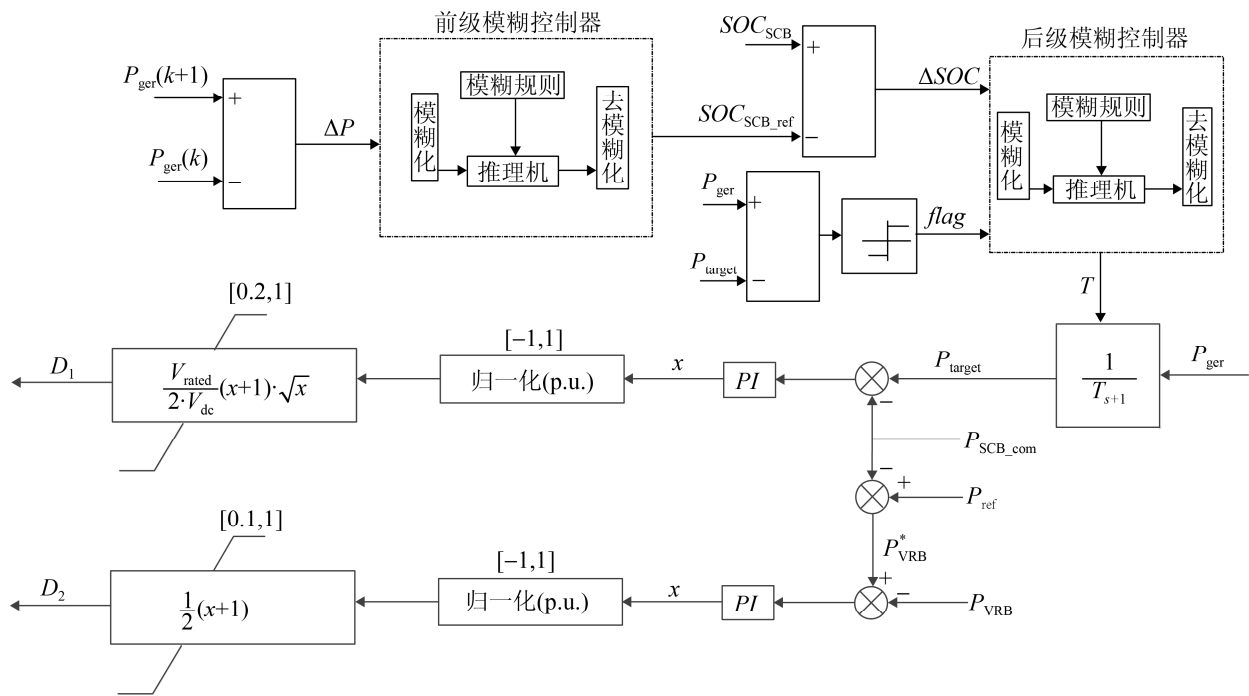


图 8 EMS 内部控制结构
Fig. 8 Internal control structure of EMS

表 1 前级控制规则
Tab. 1 Control rules

参数名	对应关系						
ΔP	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
SOC_{SCB_ref}	VB	B	BM	M	SM	S	VS

表 2 后级控制规则
Tab. 2 Control rules

参数名	对应关系						
ΔSOC	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
$flag P$	VB	B	BM	M	SM	S	VS
N	VS	S	SM	M	BM	B	VB

4 仿真结果和分析

将本文提出的 FCLPF-EMS 和低通滤波算法 EMS (LPF-EMS) 进行比较, 用功率平滑指数来表示功率平滑的效果^[21], 以图 9 中的 150 s 平滑后功率曲线为例, 本文仿真步长 0.1 ms, 设定功率波动阈值 ΔP_{set} ; 计算每个 5 s 内实时功率极大值 $P(i)_{max}$ 和极小值 $P(i)_{min}$ (i 为迭代次数, 每隔 0.1 ms 迭代一次), 则可得 5 s 内最大功率变化量 $\Delta P_{max}(i)$; 设定

评判函数:

$$\mu(i) = \begin{cases} 1, & \Delta P_{max}(i) \geq \Delta P_{set} \\ 0, & \Delta P_{max}(i) < \Delta P_{set} \end{cases} \quad (12)$$

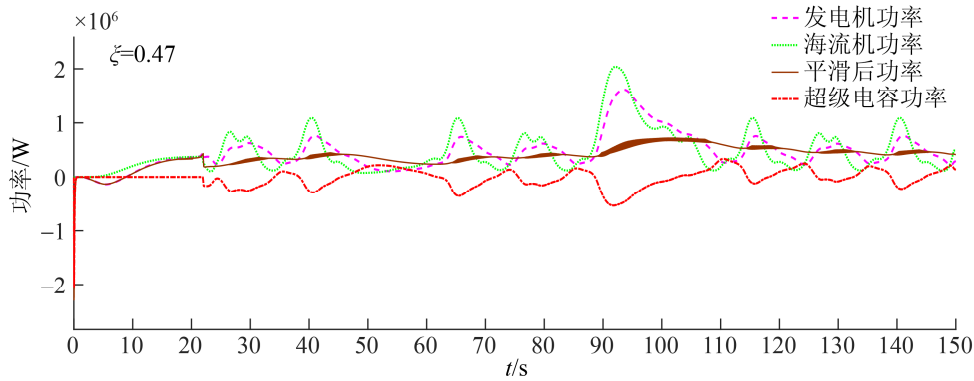
根据式(12), 定义平滑指数函数:

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^{30} \mu(i)}{30}, \quad 0 \leq \xi \leq 1 \quad (13)$$

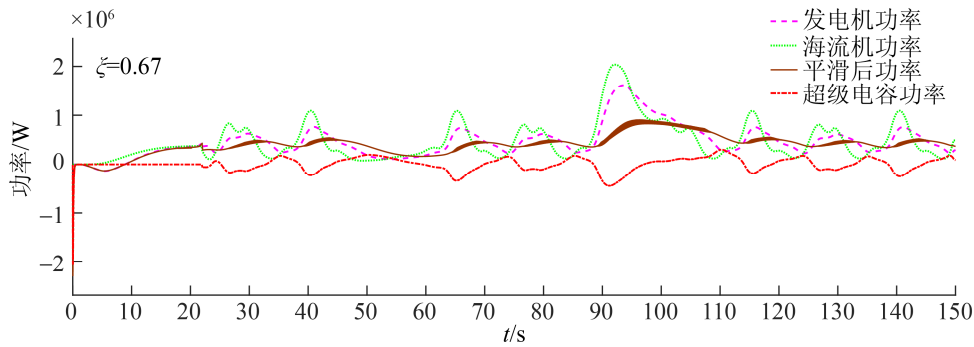
根据式(12~13)可知, 平滑指数 ξ 值越小, 说明功率曲线的平滑效果越好。

本文中取 $\Delta P_{set}=100$ kW, 在 LPF-EMS 和 FCLPF-EMS 2 种算法控制下, 仿真结果如图 9 所示, 在 LPF-EMS 控制下(图 9(a)所示), 得到 $\xi=0.47$, 说明经过 SCB 补偿, 能够对由浪涌效应引起的功率波动进行较好的平滑, 而在 FCLPF-EMS 控制下(图 9(b)所示) $\xi=0.67$ 。

从平滑效果对比, LPF-EMS 更有优势, 但是仅仅追求功率平滑效果, 如图 10 蓝色虚线所示, 在 LPF-EMS 控制下, SCB 系统荷电状态最大值为 95%, 会导致 SCB 超负荷工作, 缩短其寿命(SOC 初始值为 50%)。



(a) LPF-EMS



(b) FCLPF-EMS

图 9 系统各部分功率

Fig. 9 Power of each part of the system

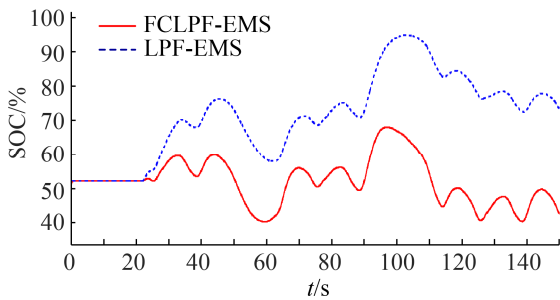


图 10 SCB 荷电状态(SOC)
Fig. 10 State of charge of SCB

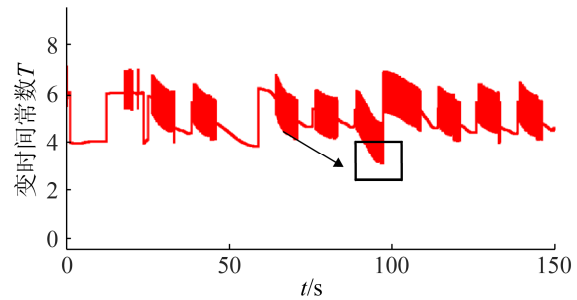


图 11 滤波时间常数 T
Fig. 11 Time constant T of LPF

在 FCLPF-EMS 控制下，对于同一个 SCB 系统，其荷电状态如图 10 红色实线所示，SCB 系统荷电状态最大值为 73%。在 FCLPF-EMS 控制下，当海流发电功率突然增大时($t=84\sim 92$ s)，为保护 SCB 系统，滤波时间常数 T 减小(如图 11 黑框所示)，使其荷电状态处于合理区间。

在 FCLPF-EMS 控制下，SCB 系统额定容量可

比固定时间常数低通滤波算法的降低 24.3%。计算公式如式(14)，其中 E_1 为 LPF-EMS 控制下的 SCB 容量值， E_2 为 FCLPF-EMS 控制下的 SCB 容量值。

$$\frac{E_1 - E_2}{E_1} = \frac{\Delta E_1 - \Delta E_2}{\Delta E_1} = \frac{\Delta SOC_1 - \Delta SOC_2}{\Delta SOC_1} \quad (14)$$

经过 SCB 对浪涌干扰下海流发电功率补偿后，VRB 对低频波动海流发电功率进行调控，同时兼顾并网功率参考指令，使最终的并网海流发电功率

跟随电网参考指令功率 P_{ref} 。上述 2 种算法下, 对低频海流波动影响甚微, 因此, 2 种算法下的 VRB 补偿功率不进行对比分析, 即在 FCLPF-EMS 控制下, SCB 额定容量为 2.23 kWh, VRB 额定容量仍保持 3 MWh。

如图 12 所示, 尽管在上午 8:00—9:00, 出现剧烈海况, 导致并网功率有些许波动, 但功率波动值在 200 kW 内, 满足行业标准要求^[22], 在 24 h 的仿真中, VRB 能够补偿海流发电功率和并网功率的差值, 使并网功率曲线跟踪并网参考指令 P_{ref} 。

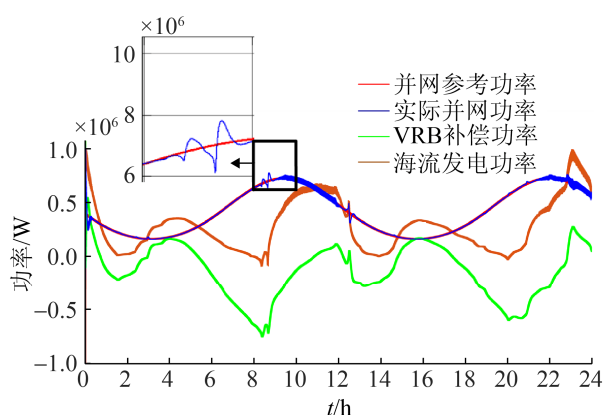


图 12 24 h 并网侧各部分功率
Fig. 12 Power of each part of grid side in 24 h

表 3 系统主要仿真参数

Tab. 3 Main simulation parameters of the system

序号	主要参数	量值
1	叶轮半径 R/m	9
2	电机定子电阻 R_s/Ω	0.008
3	电机 d 轴和 q 轴电感 $L_d=L_q/mH$	1.2
4	电机永磁磁通量 Ψ_f/Wb	2.46
5	电机磁极对数 P_n	125
6	电机转动惯量 $J/kg \cdot m^2$	1.3×10^6
7	VRB 的 R_{fixed}/Ω	54
8	VRB 的 $R_{reaction}/\Omega$	0.14
9	VRB 的 $R_{resistive}/\Omega$	0.09
10	VRB 的 $C_{electrodes}/mF$	5.6
11	网侧线路电阻 $R_g/m\Omega$	0.1
12	网侧电感 L_g/mH	1.5
13	电网角频率 $\omega_g/\pi Hz$	100

5 结论

针对混合储能海流发电系统, 本文提出了一种基于模糊控制的低通滤波能量管理策略, 用模糊控制来调节滤波时间常数 T , 该能量管理策略可将混合储能系统中 SCB 额定容量降低 24.3%, 同时避免由于浪涌效应的暂态性和难以预测性所引起的 SCB 过充问题, 一定程度上延长 SCB 使用寿命, 降低储能系统的成本, 在 MATLAB/SIMULINK 中建立了 3 MW 海流发电系统模型, 验证了该算法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] Chen H, Tang T, Ait-Ahmed N, et al. Attraction, Challenge and Current Status of Marine Current Energy[J]. IEEE Access (S2169-3536), 2018, 99(6): 12665-12685.
- [2] Zhou Z, Sculler F, Charpentier J F, et al. Power Smoothing Control in a Grid-Connected Marine Current Turbine System for Compensating Swell Effect[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy (S1949-3037), 2013, 4(3): 816-826.
- [3] Gu Y J, Lin Y G, Xu Q K, et al. Blade-pitch System for Tidal Current Turbines with Reduced Variation Pitch Control Strategy based on Tidal Current Velocity Preview[J]. Renewable Energy (S0960-1481), 2018, 115: 149-158.
- [4] Whitby B, Ugalde-Loo C E. Performance of Pitch and Stall Regulated Tidal Stream Turbines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy (S1949-3037), 2014, 5(1): 64-72.
- [5] Abedi M R, Lee K Y. Dynamic Model Analysis and Control of a Grid Connected Wind Energy System Integrated with a Super-capacitor Bank[C]// Power and Energy Society General Meeting, Vancouver, 2013: 1-5.
- [6] Zhu Y, Zhao R, Zhao J. Output Power Smoothing Control for the PMSG based Wind Farm by using the Allocation of the Wind Turbines[C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, Sydney, 2017: 1-6.
- [7] Wang G, Ciobotaru M, Agelidis V G. Power Smoothing of Large Solar PV Plant Using Hybrid Energy Storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy (S1949-3037), 2014, 5(3): 834-842.
- [8] 顾亚京. 并网型海流能发电机组控制系统关键技术研

- 究[D]. 浙江: 浙江大学, 2018.
- Gu Yajing. Study on the Key Technologies of the Grid-connected Marine Current Turbine's Control System[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2018.
- [9] Gaamouche R, Hasnaoui A E, Redouane A, et al. The Systematic Design Methodology of a Tidal Turbine Connected to the Electrical Grid[C]// 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference, Marrakech, 2016: 607-610.
- [10] 尹星, 袁登科, 甄永成, 等. 基于 SVPWM 的永磁同步电机 DTC 技术[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(11): 2535-2542.
- Yin Xing, Yuan Dengke, Zhen Yongcheng, et al. Direct Torque Control Technology for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on SVPWM[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2535-2542.
- [11] 侯利民, 任一夫, 刘恒飞, 等. 基于无速度传感器的永磁同步电机滑模自抗扰控制[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(5): 963-970.
- Hou Limin, Ren Yifu, Liu Hengfei, et al. Sliding Mode Auto Disturbance Rejection Control of PMSM without Speed Sensor[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(5): 963-970.
- [12] Tara E, Filizadeh S, Jatskevich J, et al. Dynamic Average-Value Modeling of Hybrid-Electric Vehicular Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery (S1944-9925), 2012, 27(1): 430-438.
- [13] Chiniforoosh S, Jatskevich J, Yazdani A, et al. Definitions and Applications of Dynamic Average Models for Analysis of Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery (S1937-4208), 2010, 25(4): 2655-2669.
- [14] 叶鹏, 胡耀宁, 孙铭徽. 风储孤网系统的建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 2236-2244.
- Ye Peng, Hu Yaoning, Sun Minghui. Modeling and Simulation of Islanded System with Wind and Storage Power[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2236-2244.
- [15] Li W, Joos G, Belanger J. Real-Time Simulation of a Wind Turbine Generator Coupled with a Battery Supercapacitor Energy Storage System[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S1557-9948), 2010, 57(4): 1137-1145.
- [16] Chahwan J, Abbey C, Joos G. VRB Modelling for the Study of Output Terminal Voltages, Internal Losses and Performance[C]// Electrical Power Conference, Canada, 2007: 387-392.
- [17] 王湘明, 李庆磊, 郭雨梅. 基于 Matlab/Simulink 全钒液流电池的建模研究[J]. 电源技术, 2013, 37(2): 234-237.
- Wang Xiangming, Li Qinglei, Guo Yumei. Research on Modeling of All Vanadium Redox Flow Battery based on MATLAB/Simulink[J]. Power Technology, 2013, 37(2): 234-237.
- [18] Zhou Z, Benbouzid M, Charpentier J F, et al. Energy Storage Technologies for Smoothing Power Fluctuations in Marine Current Turbines[C]// 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Hangzhou, 2012: 1425-1430.
- [19] Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, et al. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S1557-9948), 2006, 53(5): 1398-1409.
- [20] Chen W, Ådnanses A K, Hansen J F, et al. Super-capacitors based Hybrid Converter in Marine Electric Propulsion System[C]// The XIX International Conference on Electrical Machines, Rome, 2010:1-6.
- [21] Zhang Kun, Mao Chengxiong, Xie Junwen, et al. Determination of Characteristic Parameters of Battery Energy Storage System for Wind Farm[J]. IET Renewable Power Generation (S1752-1424), 2014, 8(1): 22-32.
- [22] 国家电网公司. 国家电网风电场接入电网技术规定(试行)[J]. 能源与节能, 2009(5): 14-16.
- State Grid Corporation of China. Regulations on Accessing Power System Technology to Wind Electric Field in State Grid (for Trial Implementation)[J]. Energy and Energy Conservation, 2009(5): 14-16.