

波浪能发电控制技术研究综述

陈佳, 兰飞, 郭昊霖, 黎静华

(广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要:开展波浪能发电技术控制方面的研究可有效平抑电力输出的波动性,显著提升电能质量,对充分利用波浪能具有积极意义。为了让研究人员全面了解当前的研究水平和未来研究方向,对近年来国内外波浪能发电系统控制技术的研究情况进行了梳理和总结。基于国内外波浪能发电控制技术的研究成果,对波浪能发电控制技术的分布情况及热点问题进行分析;以波浪能发电装置安装位置、波浪能能量转换方式、功率输出方式为分类依据,对波浪能发电系统进行介绍;以最大功率点跟踪控制和电能质量控制为线索对波浪能发电控制技术进行分类,对控制原理、技术特点和应用情况进行对比分析。最后,对该领域后续的研究方向进行探讨和展望。该研究成果能为波浪能发电的高效转换和稳定输出控制研究提供参考。

关键词:波浪能发电;控制技术;最大功率点跟踪控制;电能质量控制;海洋能利用

中图分类号:TM612

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202208025

0 引言

海洋波浪能作为一种优质的新型可再生能源,具有安全清洁、能量密度大、传播过程损失小等优点^[1]。有效利用波浪能的方式是发电,近年来已有诸多关于波浪能发电技术的研究报道。其中,英国、美国、日本等国家的波浪能发电技术水平较为领先,并已有一些商业化装置投入使用。我国的中科院广州能源所^[2-3]、中国海洋大学^[4-5]等单位也在这方面开展了大量的研究。但相较于潮汐能发电等其他海洋能利用形式,波浪能发电相关的研究还相对落后,仍然具有很大的研究空间和潜力^[2]。

目前,已有文献对波浪能发电技术原理及发展历史进行了归纳和总结。文献[6]侧重研究波浪能发电的原理,根据位置、大小和工作原理3个特点对波浪能转换器(wave energy converter, WEC)进行了分类,详细介绍了不同功率输出(power take-off, PTO)装置在不同转换阶段的能量转换机理。文献[7]对波浪能发电的WEC系统进行了分类,统计了研究控制技术相关文献的数量,但未详细分析具体的控制原理。文献[8]针对典型WEC实例中所采用的转换系统的不同控制拓扑,给出了相应的控制策略,但并未对控制策略的原理进行阐述。文献[9]主要介绍了幅值相位控制和复共轭控制,但未涉及改善电能质量控制的内容。文献[10]综述了不同类型的WEC,涉及无功控制和闭锁控制在波浪能发电系统中的应用。文献[11]介绍了波浪能转换的主要控制策略及其相应的PTO系统。文献[12]介绍了模型

预测控制、动态编程优化控制、闭锁控制等控制方法,但并未对这些控制方法的优缺点进行比较总结。文献[13]综述了包括滑模变结构控制、自适应控制、最优控制、智能算法等在内的先进控制在波浪能发电最大波浪能捕获方面的研究成果,但缺乏对电能质量控制的介绍。文献[14]是将发电原理与控制技术相结合的综合性文章,对振荡水柱式波浪能发电系统的发展历史、空气涡轮机的数学模型、应用于发电装置的控制方法进行了综述,这对研究振荡水柱技术具有很好的参考价值,但是缺乏对振荡浮子及越浪式波浪能发电相关控制技术的阐述。

通过大量调研分析可以看出,波浪能发电的关键技术众多,控制技术一直是工程应用的核心和专家学者们研究的热点。现有文献对于波浪能发电控制方法的研究多集中于单一的机械控制过程或电气控制过程,缺乏对波浪能发电系统整体的梳理和总结。而且由于波浪能发电控制方法较多,不同文献中对于这些控制技术的分类方案和理解认识不尽相同,存在同种控制方法命名不同的情况。此外,随着相关控制技术的快速发展,一些新的理论和应用场景出现在这一领域,需要及时地对新的研究成果进行梳理和完善。

为了更好地呈现当前波浪能发电控制技术的研究水平,本文开展了系统且深入的归纳总结工作:总结和统计了近10年来相关文献的研究成果,分析了国内外波浪能发电控制技术研究现状与进展,阐述了发展波浪能发电控制技术的必要性与重要性;详细介绍了波浪能发电系统组成部分及其分类,对比分析了不同类型波浪能发电装置的优缺点及当前的研究水平;从最大功率点跟踪和改善电能质量2个方面,归纳总结了不同控制在波浪能发电中的应用情况,深入探讨了各种控制技术的原理与控制

收稿日期:2022-01-13;修回日期:2022-07-04

在线出版日期:2022-08-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977042)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51977042)

效果。最后,针对当前研究存在的不足,对未来的研究方向进行了展望。

1 波浪能发电控制技术研究现状与发展趋势

为了分析波浪能发电系统控制技术的研究现状与发展趋势,本文对波浪能发电系统控制技术相关文献进行统计分析,其中波浪能发电控制技术研究成果分布情况见附录 A 图 A1,相关中英文文献数量对比见附录 A 图 A2。英文文献中,近 10 年来机侧控制(最大功率控制)研究占比 58%,明显高于电网侧控制(电能质量控制);中文文献中,机侧控制(最大功率控制)与电网侧控制(电能质量控制)研究占比相差不多。

分析显示,目前的研究主要集中于实现波浪能发电系统的最大功率捕获和改善电能质量问题^[15]。但目前波浪能发电仍处于初级发展阶段,对波浪能发电的控制研究仍处在技术收敛期。

2 波浪能发电系统概述

2.1 波浪能发电系统组成

波浪能发电系统是将海洋波浪的动能转化为电能,一般由 WEC 系统、PTO 系统以及锚泊系统、储能系统等辅助系统组成,其整体结构如图 1 所示。其中 PTO 系统包括中间转换系统(含水力透平、空气透平、液压马达、增速齿轮箱等)和发电机^[9]。

通常情况下,波浪能发电需要经过三级能量转换^[16]。第一级能量转换主要是通过浮子或摆动装置与波浪直接接触,达到波浪能捕获的效果。第二级

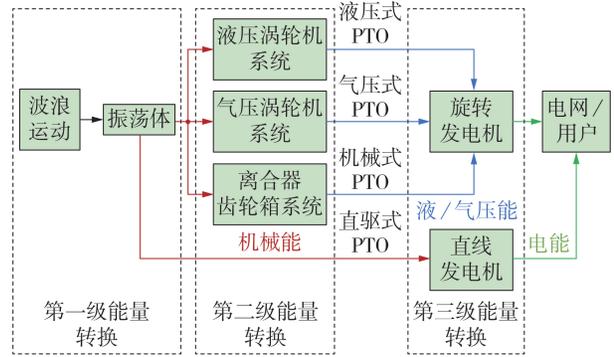


图 1 波浪能发电系统结构图

Fig.1 Structure diagram of wave energy power generation system

能量转换装置将来自第一级的机械能转换为液能、气能,或通过离合装置传递给下一级。最后通过第三级的发电装置将来自上一级的能量转化为电能^[17]。在众多波浪能发电技术中,直驱波浪发电技术利用直线电机将波浪能直接转换成电能,省去了第二级能量转换过程,大幅提高了波浪能转化为电能的转换效率^[18]。

2.2 波浪能发电系统分类

相较于其他能源发电形式而言,波浪能发电系统种类较多,目前的模型数量已经达到上千个。一般而言,波浪能发电系统主要可以根据如下 3 个标准进行分类^[19]:发电装置的安装位置、波浪能能量转换方式、PTO 方式。表 1 对其进行了总结,下面分别进行介绍。

表 1 波浪能发电系统种类汇总

Table 1 Summary of types of wave energy power generation system

分类依据	类型	优点	缺点	应用情况	
发电装置的安装位置	靠岸式	易于安装和维护,不需要系泊系统,并网方便	波浪能量少,可能出现环境问题	受地形约束,规模化发展受限	
	近岸式	通常靠海床,不需要系泊系统	波浪能量较少	难以大规模运用	
	离岸式	装置周围的波浪能流密度大	构建和维护难度大,管理和输电成本高	当今波浪能发电技术发展的主流	
波浪能能量转换方式	振荡水柱式	发电部分与海水隔离,不易腐蚀	投放位置局限,仅适合近海,转化效率极低	研究最多且较早发展起来的技术	
	振荡体式	振荡浮子式	体积小,效率高,成本低,可离岸	发电量小	具有较好的发展前景
		摆式	发电成本较低,转换效率较高	机械和液压机构的维护不方便	投放在波浪推力大且频率低的场合
	越浪式	具有较好的输出稳定性、效率及可靠性	规模较大,建造难度大	处于示范或试验阶段	
PTO 方式	齿轮箱式 PTO	结构简单	机械结构降低了能量转化效率和可靠性,增加了维护成本	在波浪能领域的应用还有待开发	
	液压式 PTO	抗浪性能较好,研发技术相对成熟	成本较高,部件易损,液压系统维护困难,对环境不友好	仅适用于岸边或浅海地区,主要应用于摆式和筏式	
	气动式 PTO	可靠性好	能量转化效率较低,噪声大,安装位置有限,对陆地影响较大	目前比较成熟的形式,应用于振荡水柱式和聚波围堰式	
	直驱式 PTO	单位体积功率高,转化效率高,制造成本低,维护较少	捕获波浪能有限	发展前景好,近 20 多年来研究较多,主要应用于振荡体式	

2.2.1 按发电装置的安装位置分类

根据发电装置的安装位置离岸距离和水深的不同,可将其分为靠岸式、近岸式和离岸式3种。

靠岸式装置通常安装在浅水区,一般集成在防波堤、大坝,或者固定在悬崖或者海床上。这些装置易于安装和维护,但海岸线波的能量比深水波要少,而且可能会造成海岸线的重塑。近岸式装置安装在离岸几百米或几千米的浅水或中等水深处,通常固定或停泊在海底,不需要系泊系统,因此部署和维护费用有限,同时也存在能量比离岸式少的问题。离岸式属于锚泊装置,不需要固定安装,通常安装在深水区或停泊在海底。离岸式安装具有对陆地影响小、安装位置不易受限等优势,是未来关注的重点,在深海处具有更大的能流密度。但是离岸式装置比靠岸式、近岸式装置的建设与维护难度更大,且发电需安装电缆,增加了成本。

2.2.2 按波浪能能量转换方式分类

根据波浪能能量转换方式的不同,波浪能发电系统大致可分为振荡水柱式、振荡体式、越浪式3种,在表1中,振荡体式选择振荡浮子式和摆式作为代表形式进行总结。

振荡水柱式波浪能发电装置由气室、空气涡轮机和发电机组成。利用波浪起伏形成的气室与外界的气压差迫使气室中的空气带动涡轮机旋转,进而带动发电机转动发电。它是目前研究最多且较早发展起来的技术,但其整体转换效率不高。振荡体式波浪能发电装置结构比振荡水柱式复杂,一般通过液压模块和发电机从波浪运动中获取能量^[10],捕获的波浪动能经液压蓄能器以液压能的形式存在,通过带动发电机来发电。这种设备体积小,能量转换效率较高,经济上有竞争力,并且易于安装和维护。振荡体式的主要形式有振荡浮子式、筏式、摆式、鸭式、阿基米德波浪式(Archimedes wave swing, AWS)^[20]等。AWS和振荡浮子式可以直接驱动永磁直线电机,转化效率较高,具有很好的发展前景。越浪式波浪能发电装置一般由导浪槽、高位水库与水轮机组成,它的原理与水力发电类似,利用水道将波浪引入高水位地段形成水位差驱动水轮发电机进行发电。这种发电装置要将大量波浪引入高水位,对建造要求比较高,且规模巨大。

2.2.3 按PTO方式分类

根据PTO方式的不同,波浪能发电系统可分为非直驱式和直驱式^[21]两大类。

非直驱式波浪能发电系统利用传统电机发电,由于波浪能的速度和频率比较低,中间必须要有一个提速的过程,即将波浪的动能转换成可以驱动旋转式电机的形式。这一中间提速过程可以通过齿轮箱系统、液压涡轮机系统或气压涡轮机系统来完成,

再由这些系统来驱动传统的旋转电机发电,分别对应齿轮箱式^[22]、液压式^[23]和气动式^[24]波浪能发电机。其中,齿轮箱式PTO系统通过一个额外的机械系统驱动旋转发电机,将运动浮子的机械能转换为电能^[25];液压式PTO系统通过液体来传递能量,一般采用液压缸和蓄能器作为波浪捕获装置与发电机的中间环节,由于液压系统的组成部件较多,随着时间的推移,会磨损活塞的密封件,这将大幅增加维护成本;气动式PTO系统通过海浪引起的振荡水位,在封闭室中驱动空气涡轮机,在封闭的腔室中振荡空气压力,从而驱动发电机发电。

直驱式PTO系统WEC捕获的机械能直接耦合到线性发电机的运动部分进行发电,在能量转换效率上具有优势,多应用于振荡浮子式波浪能发电。按照发电原理,目前应用于波浪能发电的直线发电机主要有如下3种:永磁同步发电机、感应发电机及开关磁阻发电机^[26]。其中,永磁同步发电机在波浪能发电领域中应用广泛,发电特性与其机械结构、永磁体材料、波浪的有效浪高和波浪周期密切相关;感应发电机能量转换效率比永磁同步发电机低;开关磁阻发电机的材料成本低,输出较为稳定。

对比水涡轮或空气涡轮发电,直线发电机实现了垂直方向上波浪能的直接捕获,无需机械转换装置或液压转置对波浪能进行转换,具有机械结构简单、紧凑、维护成本低等优势。然而在多变的海洋环境下,直驱式波浪发电系统由于中间没有液压或气压系统的隔离调节,所产生的电能具有不稳定的变幅变频特性,需要依靠外加储能装置实现电能瞬时平衡^[27],同时也需要对永磁直线电机定子运动方向进行判断。为提高波浪能发电系统功率因数以及实现稳定供电,直驱式发电系统对功率变换的控制能力要求也应相应提高。

2.3 波浪能发电系统示范工程

表2归纳总结了应用于国内外示范工程的典型发电装置,展示了波浪能发电系统的实际应用情况,主要涉及关键装置名称、研发机构、从属国家、投入时间、发电装置安装位置、转换方式、PTO类型以及额定功率。其中,“Pelamis”是海洋电力传输有限公司研发的摆式波浪能发电装置,由3台该装置组成的“Agucadoura Wave Farm”是世界上第一个商业型波浪能源项目,可产生2.25 MW的电能。中国科学院广州能源研究所研发设计的“舟山号”是典型的液压式振荡浮子式波浪能发电装置,该装置于2020年交付使用,额定功率为500 kW。葡萄牙的“Pico”项目和英国的“LIMPET”作为振荡水柱式发电的典型,均属于气动式PTO,可分别产生400、500 kW的电能。“Wave Dragon”是离岸运行的越浪式发电的典型,其额定功率为7 MW。

表2 应用于国内外示范工程的关键装置

Table 2 Critical devices applied in demonstration projects home and abroad

关键装置名称	研发机构	从属国家	投入时间	安装位置	转换方式	PTO类型	额定功率/kW
Pendulor	室兰工业大学	日本	1983年	靠岸	振荡水柱式	液压式	5
Pelamis	海洋电力传输有限公司	英国	2003年	离岸	摆式	液压式	750
舟山号	广州能源研究所	中国	2020年	近岸	振荡浮子式	液压式	500
LIMPET	Wavegen Ltd	英国	2001年	靠岸	振荡水柱式	气动式	500
Pico	Instituto Superior Tecnico	葡萄牙	2005年	近岸	振荡水柱式	气动式	400
AWS	AWS Ocean Energy	葡萄牙	2004年	离岸	振荡浮子式	直驱式	2000
StingRay	哥伦比亚电力技术	美国	2019年	离岸	振荡浮子式	直驱式	500
Wave Rider	Wave Rider Energy	澳大利亚	2011年	离岸	筏式	齿轮箱式	1000
Wave Dragon	Wave Dragon Aps	丹麦	2003年	离岸	越浪式	水轮机式	7000
Oyster	Aquamarine Power	英国	2012年	近岸	摆式	水轮机式	800

3 波浪能发电系统最大功率点跟踪控制技术

由第2节可以看出,波浪能发电系统可以通过多种方式实现由波浪能向电能的转换,然而由于波浪能具有随机性与不确定性且分布比较发散,这导致波浪发电系统的能量转换效率较低,制约了其进一步发展。因此,研究波浪能发电系统控制技术具有十分重要的意义^[28],可提高波浪能发电系统的能量吸收效率,从而降低波浪能发电的成本。

3.1 最大功率点跟踪控制技术概述

各种波浪能发电设备通过不同的机制来利用波浪能量,除了越浪式外,其他设备均可以归为通过摆动运动来利用海洋波浪能发电的类型^[29]。因此,本节先对越浪式波浪能转换装置最大功率点跟踪控制方法进行总结,再对基于摆动发电的其他波浪能转换装置的最大功率点跟踪控制基础进行推导。

3.1.1 越浪式波浪能转换装置最大功率点跟踪

越浪式的主要代表是Wave Dragon Aps研制的Wave Dragon波浪能发电装置^[30],其是一种浮动式WEC,主要通过波浪越过斜坡进入水库来提取能量,由水库内的几个涡轮机提取高水头处的水的势能,其功率 P 计算公式如下:

$$P = \rho g (q_a F_a + q_f F_f) \quad (1)$$

式中: ρ 为海水的密度,取 $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度,取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; q_a, q_f 分别为前、后水库的平均越浪率; F_a, F_f 分别为位于前、后水库中心的出水高度。

越浪式不需要任何主动控制就可以在极端海况下生存或吸收能量,根据时间跨度的不同,设备的控制方法可以分为以下3类^[31]。

1) 小时级,调整设备以适应海况。

将装置的浮动高度调节到当前海况的最佳水平,最大限度地提高坡道上的功率。海况可直接测量或根据天气预报进行预测,通过加注和排空浮箱来升高和降低平台以控制浮动液位。

2) 分钟级,控制水库水位。

通过使用圆筒闸门以级联方式打开和关闭低水

头涡轮机来保持水库内合适的水位。如果水位太高,则水库无法容纳大浪,会有大量泄漏;如果水位较低,则水轮机的水头较小,同样的水量漫过坡道时产生的功率也会较小。

3) 秒级,控制电力电子设备。

通过背靠背变换器控制同步永磁发电机的转速,确保涡轮机以最佳速度运行,并向电网输送高质量的电能。

3.1.2 其他波浪能转换装置最大功率点跟踪控制基础

振荡体式 and 振荡水柱式结构相似,在水动力分析时均需考虑辐射问题和激励问题^[32],图2是基于摆动发电的WEC简化模型。

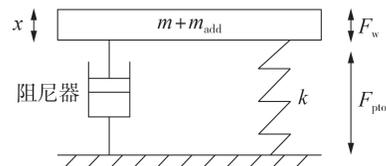


图2 基于摆动发电的WEC物理模型

Fig.2 Physical model of WEC based on oscillating power generation

根据文献^[33]可得波浪能转换装置水动力模型为:

$$(m + m_{add})a + cv + kx = F_w + F_{pto} \quad (2)$$

式中: m 为浮子和发电机动子质量之和; m_{add} 为附加质量; c 为辐射阻尼; k 为弹簧刚度力常数; a, v 和 x 分别为浮子运动加速度、速度和位移; F_w 为波浪产生的激励力; F_{pto} 为PTO系统反作用力。

从方程式(2)的结构特征可以看出,WEC水动力模型与电感-电容-电阻组成的谐振电路模型结构相似^[34]。波浪激励力 F_w 电气等效为电动势;浮子速度 v 电气等效为电流;质量 $m + m_{add}$ 电气等效为电感,弹簧刚度力常数 k 的倒数为电容,辐射阻尼 c 为电阻,PTO系统反作用力 F_{pto} 等效为可变阻抗 Z_{pto} 两端的电压值。具体的WEC系统等效电路图见附录B图B1。

由等效电路可得经傅里叶变换后波浪能发电系统等效电路的等效内阻抗 $Z_i(w)$ 的计算公式为:

$$Z_i(w) = c + j \left[w(m + m_{add}) - \frac{k}{w} \right] = R_i(w) + jX_i(w) \quad (3)$$

式中: w 为频域频率。根据电路原理,发电机输出功率 $P_{g,max}$ 可以表示为PTO系统反作用力和浮子速度的乘积:

$$P_{g,max} = F_{pto} v = Z_{pto} \left(\frac{F_w}{Z_{pto} + Z_i} \right)^2 \quad (4)$$

式中: Z_i 为时域内WEC系统等效内阻抗。由电路最大传输理论可知,当系统发生串联谐振时,激励力与浮标的速度相位一致^[35],此时可变阻抗 Z_{pto} 获得的功率达到最大值。当波浪能发电系统结构确定时,其固有频率是常数,而海洋中波浪的频率是时刻变化的。通过控制手段可以使波浪能转换装置的频率在一定范围内进行自适应调节^[36],波浪能发电系统最大功率捕获控制的关键是如何控制PTO系统的反作用力。

3.2 最大功率点跟踪控制经典控制方法

波浪能发电最大功率点跟踪控制方法从PTO系统反作用力的控制角度可分为2类经典控制方法:无源阻尼控制与无功控制^[15]。无源阻尼控制将反作用力近似为阻力进行控制,主要代表有闭锁控制和离合控制;无功控制则将反作用力近似为阻力与弹性力的结合,具体实现方法有近似复共轭控制、幅值相位控制、模型预测控制。

3.2.1 无源阻尼控制理论与方法

无源阻尼控制^[37],也被称为阻性负载控制或阻尼负载控制,该理论原理是PTO对WEC的反作用力与摆动体速度成线性比例,即PTO反作用力可近似为阻尼力,即:

$$F_{pto}(t) = -c_{pto} v(t) \quad (5)$$

式中: t 为时间; c_{pto} 为PTO系统的等效阻尼系数。

由于产生的PTO系统阻尼力与速度成正比,没有无功潮流,且要求 $c_{pto} > 0$,电机工作在发电模式下。无源阻尼控制的控制框图具体见附录B图B2,图中 $G(s)$ 为波浪能发电系统的传递函数。

推导可得波浪能最大捕获状态下PTO系统的等效阻尼系数理论值 c_{pto}^{opt} 为:

$$c_{pto}^{opt} = \sqrt{c^2 + \left[(m + m_{add})w - \frac{k}{w} \right]^2} \quad (6)$$

总体而言,无源阻尼控制不需要预测波浪激励力,实现简单^[33],成本较低,适用于振荡体式波浪能发电系统,应用于直驱式PTO时,可在很宽的速度范围内提高提取功率^[38]。对于规则波,采用无源阻尼控制可以达到较好的控制效果;然而,当入射波不规则时,需要对变化的阻尼值进行实时反馈控制,此时无源阻尼控制难以使波浪的驱动力与浮标的速度达

到谐振状态,不能满足最大功率获取条件^[39]。无源阻尼控制是一种相对简单的实现策略,下面详细描述由其发展而来的闭锁控制、离合控制。

1) 闭锁控制。

闭锁控制,也被称为箝位控制或锁存控制,属于高度非线性的离散控制,最早于1980年由Budal和Falnes提出^[40],通过将浮子闭锁适当的时间间隔,使速度的峰值与激励力的峰值相匹配,实现吸收功率的最大化。闭锁控制的原理如图3所示。在振荡体速度为0的情况下闭锁,开关控制信号会产生一个足够大的等效阻尼防止振荡体移动^[41],经一定的时长后释放,使振荡体速度与波浪激励力同相位。闭锁控制的关键在于确定闭锁时机,根据合适的规则闭锁或释放振荡体,使波浪能捕获效果得到改善^[42]。

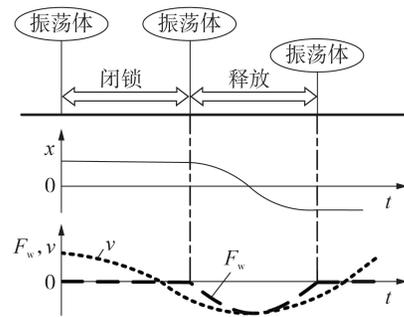


图3 闭锁控制原理图

Fig.3 Principle diagram of latching control

闭锁控制的实现存在2个难点:一是需要额外增加机械装置对浮子进行闭锁动作,会造成机械损耗,增加成本;二是对于不规则波,浮子在闭锁后的释放时刻难以确定。对于规则波而言,一般在振荡体达到零速度时,锁定振荡体,并在下一个预测的激励力峰值前约1/4周期释放振荡体^[43];然而不规则波的激励力周期是不断变化的,给控制带来了挑战。针对这一难题,文献[44]提出了实时闭锁控制算法,将闭锁控制与模型预测控制结合,显著地增大了捕获宽度,增加了涡轮机和发电机PTO的均值和标准差。文献[45]则提出一种实时闭锁控制,系统的输出功率相对于基础闭锁控制有一定幅度的提高。

2) 离合控制。

离合控制在2000年被考虑应用于葡萄牙的Pico振荡水柱式波浪能发电装置^[46]。在技术层面,其实现非常简单,只需要在液压缸回路中设置一个旁通阀。在一个周期内,浮子速度为0的时刻接入发电机,不为0时切除,使得波浪激励力与浮子速度相位一致,进而实现最大功率点跟踪控制。离合控制原理图具体见附录B图B3。

实现离合控制需要解决2个问题:一是离合结构的耐用性;二是闭锁时刻和解锁时刻的确定。离合控制适用于气压力式PTO和液压力式PTO^[47]波浪能捕

获装置,是目前最有前景的波浪能发电最大功率点跟踪控制技术^[45]。但是,离合控制不仅需要对波浪进行监测和预测,还需要对转换装置进行优化控制和行为预测^[48]。

3.2.2 无功控制理论与方法

无功控制通过PTO和WEC之间的双向功率流动实现控制过程,它将PTO力近似为一个与速度成比例的阻尼力和一个与位移成比例的弹簧力叠加组成的力,即:

$$F_{pto}(t) = -c_{pto}v(t) - k_{pto}x(t) \quad (7)$$

式中: k_{pto} 为弹簧系数。

此时,电机既可以工作在发电机状态又可以工作在电动状态。对式(7)进行傅里叶变换得:

$$F_{pto}(w) = -(c_{pto} + jwk_{pto})v(w) = Z_{pto}v(w) \quad (8)$$

控制 c_{pto} 和 k_{pto} 使浮子的速度与波浪激励力相位保持一致,以达到谐振状态,从而使系统提取的波浪能最大。

无功控制多应用于液压式PTO,对于气动式PTO,需要设计一种能够作为涡轮和压缩机有效交替运行的自整流涡轮机,因此无功控制不适合配备空气涡轮机的振荡水柱,文献[34]将其应用于AWS装置取得较好的控制效果,显著增加了提取的能量。理论上无功控制属于最优控制,然而在具体应用中需要通过一些近似方法达到有限条件下的最优,实质上为次优控制。近似复共轭控制、幅值相位控制、模型预测控制等方法^[37]都是常见的无功控制方法,下面分别进行介绍。

1) 近似复共轭控制。

对式(3)进行拉普拉斯变换可以得到复频域中波浪能发电系统等效电路的等效内阻抗为:

$$Z_i(s) = (m + m_{add})s + c + \frac{k}{s} = R_i(s) + jX_i(s) \quad (9)$$

当PTO系统阻抗 Z_{pto} 等于WEC系统内阻抗的共轭 $Z_i^*(s)$ 时,满足最大波浪能控制的条件,即:

$$Z_{pto}(s) = Z_i^*(s) = c - \left[(m + m_{add})s + \frac{k}{s} \right] \quad (10)$$

此时,PTO的等效机械阻抗与装置固有的机械阻抗形成共轭,系统实现谐振,因此这种控制理论被称为复共轭控制。传统复共轭控制的最优PTO反作用力取决于浮标速度的未来值,需要加速度反馈或精确项抵消,在实际中不能实现最优,必须用近似实现,因此复共轭控制多与比例-微分(proportional-differential, PD)控制器配合使用对WEC器件进行控制,以改善和优化吸收功率^[49],近似复共轭控制原理图具体见附录B图B4。

近似复共轭控制不受波浪频率带宽的影响,只要PTO系统的运动行程、作用力和输出功率允许,可以在任意波浪频率下达到共振,不需要额外的硬件

就能够显著增加捕获的波浪能^[38]。但当受到上述三者的硬约束时,在波浪能量密度较高、海况变化频繁的海域实用性较差。针对复杂海域,文献[50]将波输入分解为多个单频率波的总和,为每个通道设计一个PD反馈控制器,采用一种简单的最小二乘估计模型来逼近谐波序列的幅值,而不需要波形预测信息。

2) 幅值相位控制。

幅值相位控制既需要满足幅值条件,又需要满足相位条件。实现幅值相位控制过程需要通过对未来波浪力进行预测,预估主频率与幅值,从而进行功率优化达到PTO运动速度的最优值,幅值相位控制原理图具体见附录B图B5。

在波浪频率带宽变化较大的情况下,幅值相位控制方法的适用性较差,该方法适用于波浪主频率唯一且频率变化范围较小的海况。针对实际海浪中幅值相位控制适用性差的问题,Beirao对AWS的非线性模型采用了反馈线性化控制方法,同时引进内模控制来跟踪近似最优速度,将改进后的幅相控制用于AWS,取得了合理的系统性能^[51]。

3) 模型预测控制。

模型预测控制又称为滚动时域控制、后退时域控制,是一种针对幅值和相位的前馈策略^[12],它是利用预测模型和系统的历史数据、未来输入来预测系统的未来输出的控制,其基本结构具体见附录B图B6。

预测模块是模型预测控制的核心,它在每个采样时刻都要根据当前的预估误差重新计算控制作用的变化量,不断滚动计算^[52]。如果预测是完美的,则通过优化算法能够计算出对应于预测激励力的线性系统的理论上限。然而,模型预测性能受理论模型、预测范围、约束的规范等影响,难以实现完美预测,是一种次最优控制方法。

在模型预测控制中,如果不考虑直线电机的升沉位移、最大速度等约束条件,则可能会对物理和电气系统造成永久性损害。为提高控制可靠性,文献[53]考虑各种物理和电气约束,引入弱磁场和单向潮流约束,有效防止了直流线路出现波动时电网电能质量下降的问题。文献[54]提出一个包含基于约束函数的预测控制器以及局部补偿模型的新型鲁棒模型预测控制器,同时利用拉格朗日多项式缓解计算负担,能够兼顾计算效率与功率转换效率。

综上,最大功率点跟踪经典控制理论方法^[55-59]对比如表3所示。

3.3 融合先进算法的最大功率点跟踪控制

随着技术的发展,越来越多的现代控制方法被应用于波浪能发电,如滑模变结构控制、模糊控制、自适应控制、无源控制等^[13]。下面对这些控制方法

表 3 最大功率点跟踪经典控制理论方法对比

Table 3 Comparison of classical control theory methods for maximum power point tracking

控制类型	优点	缺点	适用范围	具体案例	控制效果衡量指标	
无源阻尼控制	闭锁控制	没有无功功率流	需要额外增加机械装置	机械装置固有频率大于波浪频率的场合,气动式 PTO、液压式 PTO	文献[40-42, 44, 48]	规则波情况下,年捕获功率与不控情况相比增加 1067%,非规则波情况下,增加 579% ^[54]
	离合控制	没有无功功率流	对离合结构的耐用性要求较高	机械装置固有频率小于波浪频率的场合,气动式 PTO、液压式 PTO	文献[47, 55]	对于线性负载,与电阻式控制相比,最大相对捕获宽度提高了 33% ^[55]
无功控制	近似复共轭控制	不需要额外的硬件,不受波浪频率带宽影响	在海况变化频繁的复杂海域实用性较差	经线性化处理的波浪发电系统,液压式 PTO	文献[34, 56]	规则波情况下,年捕获功率与不控情况相比增加 815%,非规则波情况下,增加 418% ^[37]
	幅值相位控制	可以使用简单的比例-积分-微分控制器达到最佳状态	在波浪频率带宽变化较大的情况下适用性较差	波浪主频率唯一且频率变化范围较小的场合	文献[14, 34]	规则波情况下,年捕获功率与不控情况相比增加 707%,非规则波情况下,增加 322% ^[37]
	模型预测控制	能够提供约束条件下的最优控制,对模型精度要求不高	对预测要求较高,计算量大	适用范围较广泛,直驱式 PTO、液压式 PTO、气动式 PTO	文献[53, 57-58]	与无源阻尼控制相比,输出功率峰值提高了 37% ^[59]

的控制原理、应用情况、技术瓶颈以及未来发展进行了分析总结。

3.3.1 滑模变结构控制

滑模变结构控制本质是一种不连续的开关型控制,可以根据系统当前状态不断变化,迫使系统沿预定“滑动模态”状态轨迹进行运动^[60]。滑模变结构控制的原理图具体见附录 B 图 B7。

根据控制原理构造一个不连续的控制函数如下:

$$u = \begin{cases} u^+(y) & s(y) > 0 \\ u^-(y) & s(y) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $u^+(y) \neq u^-(y)$; $s(y)$ 为切换函数, 设其如式(12)所示。

$$s(y) = y_1 + by_2 \quad b > 0 \quad (12)$$

式中: y_1 为系统状态变量误差; y_2 为系统状态变量误差的导数; b 为滑模设计参数。状态量 y 的运动轨迹如下: 当 y 的取值在满足 $s(y) > 0$ 的范围内时, 控制函数取 $u = u^+(y)$, 在其作用下, 状态量不断靠近滑模面并穿过滑模面到达 $s(y) < 0$ 范围, 通过不断调整参数, 可以使状态轨迹固定在滑模面 $s(y) = 0$ 上, 滑模变结构控制相轨迹图具体见附录 B 图 B8。

滑模变结构控制具有结构简单、响应快速、对参数变化及扰动不敏感、滑动模态可自行设计的优点, 适用于振荡水柱式、直驱式 PTO、点吸收式波浪能发电系统。文献[61]采用滑模变结构控制实时跟踪参考电流, 实现最大功率点跟踪, 然而, 滑模变结构控制的参数选择对控制器性能影响较大, 大增益控制会产生严重抖振现象^[62], 小增益控制可能不满足稳定性条件。为削弱抖振现象, 文献[63]设计了一种快速终端滑模控制方法, 在线性滑模中加入非线性项, 保证系统误差在有限的时间内收敛; 文献[64]提

出了自适应滑模控制, 能提高系统在扰动存在时的鲁棒性。

3.3.2 自适应控制

自适应控制系统能够实时调整控制器参数, 以适应波浪激励的变化, 有效跟踪期望值, 其控制原理具体见附录 B 图 B9。

自适应控制可用于具有不确定参数的线性或非线性系统, 具有普适性。然而, 传统自适应控制的学习能力非常有限, 需要与其他控制手段配合使用。文献[59]提出的直驱式 PTO 自适应反推全局快速终端滑模控制方法能够使系统快速收敛, 且具有良好的跟踪性和系统鲁棒性。文献[62]提出了基于扩张状态观测器的自适应滑模控制方法, 能够对滑模控制器的参数进行自适应调整, 同时具有很强的抗扰动能力, 提升了系统的鲁棒性。文献[65]采用自适应快速终端滑模控制方法, 对系统的切换增益参数进行估计, 提高了系统跟踪性能。

3.3.3 模糊控制

模糊控制以模糊集理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础, 可从行为上模仿人的模糊推理和决策过程^[13, 66-67]。作为非线性控制技术, 模糊控制不依赖被控对象数学模型的精确性, 可以克服非线性的影响, 具有设计语言简单、鲁棒性强的特点。

模糊控制并不是一种实时控制方法, 其控制效果很大程度上取决于控制器的参数设置^[68]。模糊控制既可以单独使用, 也可以与其他常规控制技术一起使用, 以提高整体性能。附录 B 图 B10 给出了一种应用于波浪能发电系统的结合遗传算法的模糊逻辑控制原理框图, 该控制系统将遗传算法与模糊逻辑控制相结合, 以波浪能转换装置的结构阻尼为控制参数, 然后通过模糊控制器对控制参数进行调节, 进而使系统达到最优运行状态。

采用模糊逻辑控制算法的系统能够对功率点的

变化方向进行相对准确判断并快速跟踪,维持平均输出功率稳定^[65]。模糊控制既可以实现最大功率点跟踪,又可以改善电能质量,其中模糊最大功率点跟踪控制策略可以实现不规则波下的最大功率捕获;而模糊神经元比例-积分-微分控制则可以提高波浪发电系统稳定性,改善电能质量。文献[67]提出采用粒子群优化算法对模糊隶属函数进行优化调整的控制策略,减轻了与执行在线优化相关的计算负担。

3.3.4 无源控制

无源控制的控制对象是能量,根据系统控制需求,按照最优工作方式安排能量函数分布,进而实现控制目的,其控制原理具体见附录B图B11。应用无源控制能够很好地处理系统动态性能问题。实际运用过程中无源控制器控制效果往往受限于波浪能装置建模的精确度。在保证系统无源的情况下,增加控制器鲁棒性,能够极大地提高系统的稳定性,实现波浪能最大捕获,并保持复杂波浪能工况下波浪能发电机组运行平稳。

无源控制方法具有很强的普适性,可应用于各类PTO。文献[69]提出了一种基于Hilbert-Huang变换的实时无源控制,与阻尼控制相比,在能量吸收方面的性能提高了21%。

综上,融合先进算法的现代控制方法对比如表4所示。

4 波浪能发电系统电能质量改善控制技术

由于波浪变化易受极端天气影响,具有随机性与不确定性,这导致波浪能发电系统的输出功率、电压不稳定。随着波浪能并网的需求日益迫切,WEC通过电力电子变换装置与电网连接,并网运行时,不稳定输出功率可能会对电网造成冲击,甚至威胁电网正常运行造成系统崩溃。因此对波浪能发电系统的输出功率波动进行平抑控制、改善其电能质量对提高波浪能发电系统供电可靠性具有积极意义。

4.1 波浪能发电系统电能质量改善控制技术概述

为了向负载提供电能或将产生的电能并入电

网,需要进行一些电力转换。在为直流负载供电或连接直流母线的情况下,使用AC/DC整流器,有时还需要DC/DC转换来升压或降压;在并网的情况下,需要将不稳定的交流电源转换为输出稳定的交流电能,以满足电网规范的要求,这种变换器控制在风能变换器中得到了广泛的研究^[70]。通过控制电力电子变换器开关的快速通断可以实现调节电压、电流等参考信号的目的。目前,变流器的控制方法已经比较成熟,其在波浪能发电领域的应用以基础的比例-积分控制为主^[71],除此之外还有闭环控制、遗传算法、人工神经网络算法、模糊预测控制等,由于这些控制方法和算法存在计算量大、原理复杂且理论模型和实际工况难以一致等不足^[72],因此本文不再赘述。

目前实现输出功率稳定的思路主要有2种:一种是设计波浪能发电系统,通过调整液压蓄能器的比例阀开口度,实现发电功率和发电电压稳定;另一种是附加储能装置,通过控制储能系统快速充放电平抑输出功率波动,提高电能质量。文献[73]利用蓄能器对液压马达输出能量进行调节,进而控制发电机转速,实现输出电能的分配和电压调节。文献[74]通过蓄电池与DC/DC换流器配合,实现对AWS系统的电能质量改善和功率平滑处理。

综上所述,波浪能发电系统的电能质量控制主要从液压蓄能装置和储能装置的应用2个方面入手。下面对液压蓄能压差反馈控制和储能系统变换器控制2种经典控制方法的原理及优缺点进行介绍。

4.2 常见电能质量改善控制技术原理及特点

4.2.1 液压蓄能压差反馈控制

从液压式波浪能发电的理论模型可知,只要保证液压马达输入流量稳定,就能控制液压马达的转速稳定,进而实现发电机输出功率稳定。

通过比例流量阀的流量与液压节流口两端的压力差、过流面积和节流口的形式有关,此处认为节流口为孔状,则流量-压力特性方程为:

表4 融合先进算法的现代控制方法对比

Table 4 Comparison of modern control methods combined with advanced algorithms

控制方法	优点	缺点	适用范围	具体案例	控制效果衡量指标
滑模变结构控制	结构简单、响应快速、对参数变化及扰动不敏感,滑动模式与系统参数和扰动无关	控制参数的选择对控制器性能影响较大	振荡水柱气动式PTO,直驱式PTO,点吸收液压式PTO发电系统	文献[13,61,63]	平均捕获功率是不控情况下的60倍 ^[61]
自适应控制	能够实时调整控制器参数,以适应波浪激励的变化,有效跟踪期望值	传统自适应控制的学习能力实际上是非常有限的	具有不确定参数的线性或非线性系统,直驱式PTO、气动式PTO	文献[59,62,64-65]	与滑模变结构控制结合,有效解决抖振问题 ^[62]
模糊控制	设计语言简单、鲁棒性强	系统的动态性能取决于模糊规则的制定和模糊隶属度的选取	不规则波下的最大功率捕获,直驱式PTO	文献[46,66-67]	系统响应速度较传统扰动观察法提升了1.25倍 ^[65]
无源控制	鲁棒性好、运算简单,能够很好地处理系统动态性能问题	控制效果往往受限于波浪能装置建模的精确度	具有普适性,适用于各类PTO	文献[39,69]	平均捕获功率比阻尼控制提高了21% ^[69]

$$q = C_d A \sqrt{\frac{2}{\rho_Y}} (p_1 - p_2)^\alpha \quad (13)$$

式中: q 为进入液压马达的流量; C_d 为节流口流量系数; A 为比例流量阀的开口面积; ρ_Y 为液压油密度; p_1 为蓄能器的当前压力; p_2 为液压马达的进口压力; α 为节流指数。

从式(13)可以看出,通过改变比例流量阀节流口的开口面积可以实现液压马达输入流量稳定。具体控制原理如下:通过压力传感器和流量传感器得到压差和流量数据,将数据传输给可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC),通过对象链接与嵌入的过程控制实现 LabVIEW 与 PLC 的通信,记录压差和流量值的一一对应关系,并绘制出压差和流量的图像,从图像上选取发电机的额定电压对应的流量值,读取对应的压差值,根据式(13)计算得到发电机在额定条件下工作的比例电磁阀的开口度。对于不同的压差,有合适的比例电磁阀开口大小与其对应,以理想压差与开口度的图像作为比例流量阀的控制曲线,并以此为依据进行 PLC 编程,实现波浪能液压蓄能实验装置的平稳发电,其控制框图具体见附录 B 图 B12。

4.2.2 储能系统变换器控制

储能设备具有输出功率平滑、短时波动抑制、频率和电压调节等功能,将储能设备应用于波浪能发电并网系统中,可以减轻电源波动对电网的影响,提高波浪能的利用效率^[75]。目前应用于波浪能发电系统的储能方式主要有飞轮储能、蓄电池、超级电容等储能方式^[70]。

通过低通滤波器将波动量分为高频和低频两部分,其中低频部分由功率型储能装置超级电容提供,高频部分由容量型储能装置电池提供,利用模糊控制实现功率分配,二者相互配合,可以降低电池的充放电次数,延长其使用寿命。结合低通滤波器的混合储能充放电控制策略具体见附录 B 图 B13。

背靠背变换器电网侧变流器的控制目标是维持终端电压和输出有功功率稳定。附加直流链路电压控制策略原理是将直流链路电压控制的参考值设置为直流链路的额定电压,以直流母线电压在一个周期的平均作为控制输入的直流电压,直流链路的平均电压在每个采样周期内更新,电网侧输出有功功率参考值为发电机在每个周期内的平均输出有功功率,并随波动的变化动态更新,计算得到输出功率的参考值。以直流环节电压平均值的偏差为输入,得到恢复直流环节电压所需的额外有功功率,并补充到电网侧有功功率参考值,这既可以维持直流链路电压稳定,又能维持电网侧输出有功功率稳定。附加直流链路电压控制原理图具体见附录 B 图 B14。

液压蓄能压差反馈控制和储能系统变换器控制的原理与优缺点对比如表 5 所示。

表 5 电能质量改善控制方法对比

Table 5 Comparison of control methods for power quality improvement

控制方法	原理	优点	缺点
液压蓄能压差反馈控制	基于实验数据,对比例电磁阀的开口度进行控制,使液压马达输入流量恒定	原理简单,易于实现	需要实验数据,不具备普适性
储能系统变换器控制	控制储能系统快速充放电,平抑波浪能发电输出波动	适用于各种波浪能发电系统	需要增加额外的储能装置

5 总结与展望

5.1 总结

本文综述了近 10 年来波浪能发电系统控制技术的研究成果与进展,通过分析国内外相关文献分布情况,探索波浪能控制技术研究中的热点问题。在按照安装位置、能量捕获方式、能量转换方式的不同对波浪能发电系统进行分类的基础上,分析控制技术对系统的作用。根据最大功率点跟踪控制和电能质量控制 2 种不同的控制方法,对现有控制技术进行了系统阐述。首先在研究波浪能发电装置实现最大功率点跟踪的控制中,分别对无源阻尼控制与无功控制 2 种经典控制理论以及基于经典理论发展而来的 5 种控制方法(闭锁控制、离合控制、幅值相位控制、近似复共轭控制、模型预测控制)的原理、优缺点、应用情况、发展前景等方面进行了综合的评述,并介绍了现代控制技术(滑模变结构控制、自适应控制、模糊控制、无源控制)的原理,对它们的优缺点及适用范围进行了总结;在改善电能质量的控制方法研究中,对液压蓄能压差反馈控制和储能系统变换器控制原理进行了介绍,并对 2 种控制方法的优缺点进行了评估。

5.2 展望

总体而言,波浪能发电控制技术的发展目前仍处在一个比较初期的阶段,还存在以下方向值得研究探索。

1) 开展可再生海洋能捕获、转换效率提升的研究。波浪能发电系统是一个较为复杂的系统,各个部分之间都存在着十分紧密的联系,当前的研究着重分析波浪能发电整体转换效率,较少分析关键因素对能量捕获与转换效率的影响。围绕可再生波浪能环境动力条件与功率密度高时变的强非线性变化特征,针对波浪能发电多级能量转换过程,以提升波浪能到电能等的整体转换效率为目标,开展能量高效捕获、传递及转换的新装备、新方法、新策略等研究,可有效突破制约可再生海洋能高效利用的关键技术瓶颈。

2)开展应用于波浪能发电系统的发电机优化设计相关研究。目前应用于波浪能发电系统的传统旋转电机与直线电机都存在其局限性,或转换效率低,或输出波动大。在未来波浪能发电系统研究中,从电机本体入手,优化设计电机结构,从而提高发电机的功率密度,将其更好地应用于波浪发电系统中。

3)推进大容量、智能化直驱波浪发电技术研究。当前的波浪能发电装置规模较小,运行成本高。面向复杂环境动力条件下海洋能源高效捕获与稳定转换的关键科学问题,在未来波浪能发电厂参与并网的研究中,研究高功率密度、高效、低噪声永磁同步电机及其驱动器的优化设计方法,深入探索阵列布局技术,可有效提升波浪能发电系统的可靠性,有利于推动波浪能发电装置规模化产业开发,实现更高的商业利用价值,是未来发展的重要研究方向。

4)推进风-光-浪-潮流等多能互补耦合发电、海洋波浪能发电装置阵列布局技术等应用研究。当前限制波浪能发电推广一大的技术瓶颈就是其成本较风能发电与光伏发电高,分析不同可再生能源的资源分布特性,结合其特性进行多能互补耦合发电,不仅有助于充分发挥可再生能源发电潜力,显著降低发电成本,同时也能提高电能输出稳定性。

5)开展新技术、新材料在波浪能发电中的研究。高效收集是一个未来研究方向,将海洋能源开发与新材料相结合,面向波浪资源开发需求,围绕海洋能源开发的巨大潜力与需求,研究高性能纳米发电机网络收集波浪能的关键基础问题,开展纳米发电机阵列电能管理策略和方法的相关研究具有重要意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 任思敏. 基于LabVIEW的波浪能量采集控制系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
REN Simin. Research on wave energy harvesting control system based on LabVIEW[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [2] 吴明东,盛松伟,张亚群,等. 海洋波浪能浮标发展现状及前景[J]. 新能源进展,2021,9(1):42-47.
WU Mingdong, SHENG Songwei, ZHANG Yaqun, et al. Development status and prospect of ocean wave energy buoy[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2021, 9(1): 42-47.
- [3] 谭美秀,盛松伟,王振鹏,等. 冲击水轮机式小型波浪能转换系统研究[J]. 太阳能学报,2021,42(9):446-451.
TAN Meixiu, SHENG Songwei, WANG Zhenpeng, et al. Research on small wave energy converter system of pelton turbine[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(9): 446-451.
- [4] 史宏达,刘臻. 海洋波浪能研究进展及发展趋势[J]. 科技导报,2021,39(6):22-28.
SHI Hongda, LIU Zhen. Research status and development tendency of ocean wave energy[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(6): 22-28.
- [5] 史宏达,曲娜,曹飞飞,等. 振荡浮子波能发电装置浮子运动性能的试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2017,47(6):124-130,145.
SHI Hongda, QU Na, CAO Feifei, et al. Experimental study on movement performance of oscillating buoys WEC[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(6): 124-130, 145.
- [6] LÓPEZ I, ANDREU J, CEBALLOS S, et al. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 413-434.
- [7] OZKOP E, ALTAS I H. Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: a review of the technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 106-115.
- [8] HONG Y, WATERS R, BOSTRÖM C, et al. Review on electrical control strategies for wave energy converting systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 31: 329-342.
- [9] 刘华兵,彭爱武,赵凌志. 波浪发电系统功率控制方法综述[J]. 电工电能新技术,2020,39(5):49-58.
LIU Huabing, PENG Aiwu, ZHAO Lingzhi. Summary of power control methods for wave power generation system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(5): 49-58.
- [10] SABZEHGAR R, MOALLEM M. A review of ocean wave energy conversion systems[C]//2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2009: 1-6.
- [11] MARIA-ARENAS A, GARRIDO A, RUSU E, et al. Control strategies applied to wave energy converters: state of the art[J]. Energies, 2019, 12(16): 3115.
- [12] WILSON D, BACELLI G, COE R, et al. A comparison of WEC control strategies[R]. Albuquerque, NM, USA: Sandia National Laboratories, 2016.
- [13] 邱孟,杨俊华,林汇金,等. 先进控制技术在波浪发电系统中的应用[J]. 电机与控制应用,2021,48(2):13-21.
QIU Meng, YANG Junhua, LIN Huijin, et al. Application of modern control technology in wave energy conversion system[J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(2): 13-21.
- [14] FALCÃO A F O, HENRIQUES J C C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: a review[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 1391-1424.
- [15] WANG L, ISBERG J, TEDESCHI E. Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: the wave-to-wire approach[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 366-379.
- [16] 王鑫. 波浪能装置阵列布设相关理论方法及其应用研究[D]. 天津:天津大学,2019.
WANG Xin. A study on the theory of wave energy converter array layout and its application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [17] 阎耀保. 海洋波浪能综合利用:发电原理与装置[M]. 上海:上海科学技术出版社,2013:21-24.
- [18] 张静,余海涛,施振川. 一种波浪发电装置用低速双转子永磁直线电机运行机理研究[J]. 电工技术学报,2018,33(19):4553-4562.
- [19] ZHANG Jing, YU Haitao, SHI Zhenchuan. Research on a tubular linear permanent magnet machines with dual translators for low speed wave energy conversion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(19): 4553-4562.
- [19] 顾煜炯,谢典,耿直. 波浪能发电技术研究进展[J]. 电网与清洁能源,2016,32(5):83-87.
GU Yujiong, XIE Dian, GENG Zhi. Progress of research on wave energy generation technology[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(5): 83-87.

- [20] LI W, CHAU K. Simulation of a linear permanent magnet vernier machine for direct-drive wave power generation[C]//2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China: IEEE, 2011: 1-6.
- [21] 瞿丹丹. 直驱式浪流发电装置结构设计[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
ZI Dandan. Structure design of direct drive wave-current power generation device[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [22] 封宁君. 磁齿轮及磁场调制永磁电机在海洋能发电系统的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
FENG Ningjun. Application of magnetic gear and field-modulated permanent magnet generator in ocean energy generation [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [23] GASPAR J F, CALVÁRIO M, KAMARLOUEI M, et al. Power take-off concept for wave energy converters based on oil-hydraulic transformer units [J]. *Renewable Energy*, 2016, 86: 1232-1246.
- [24] TÊTU A. Power take-off systems for WECs[C]//Handbook of Ocean Wave Energy. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2017: 203-220.
- [25] AHAMED R, MCKEE K, HOWARD I. Advancements of wave energy converters based on Power Take Off (PTO) systems: a review [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 204: 107248.
- [26] 洪岳, 潘剑飞, 刘云, 等. 直驱波浪能发电系统综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(7): 1886-1900.
HONG Yue, PAN Jianfei, LIU Yun, et al. A review on linear generator based wave energy conversion systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(7): 1886-1900.
- [27] 杨健, 黄磊, 仲伟波, 等. 直驱式波浪发电系统能量跟踪控制 [J]. *电工技术学报*, 2017, 32(增刊1): 21-29.
YANG Jian, HUANG Lei, ZHONG Weibo, et al. The energy tracking control strategy for direct drive wave energy generation [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(Supplement 1): 21-29.
- [28] XIE J J, ZUO L. Dynamics and control of ocean wave energy converters [J]. *International Journal of Dynamics and Control*, 2013, 1(3): 262-276.
- [29] RINGWOOD J V, BACELLI G, FUSCO F. Energy-maximizing control of wave-energy converters: the development of control system technology to optimize their operation [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2014, 34(5): 30-55.
- [30] 李永国, 汪振, 王世明, 等. 国外波浪能开发利用技术进展 [J]. *工程研究——跨学科视野中的工程*, 2014, 6(4): 371-382.
LI Yongguo, WANG Zhen, WANG Shiming, et al. Progress in the development and utilization of wave energy technology abroad [J]. *Journal of Engineering Studies*, 2014, 6(4): 371-382.
- [31] TEDD J, KOFOED J P, JASINSKI M, et al. Advanced control techniques for WEC Wave Dragon [C]//Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference. Porto, Portugal: European Ocean Energy Association, 2007: 1-7.
- [32] FALNES J. Ocean waves and oscillating systems [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002: 225-262.
- [33] 黄秀秀. 振荡浮子式波浪发电系统的功率控制 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
HUANG Xiuxiu. Power control of oscillating float wave power generation system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [34] VALÉRIO D, BEIRÃO P, DA COSTA J S. Reactive control and phase and amplitude control applied to the Archimedes Wave Swing [C]//The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Lisbon, Portugal: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2007: 505-512.
- [35] PARK J S, GU B G, KIM J R, et al. Active phase control for maximum power point tracking of a linear wave generator [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(10): 7651-7662.
- [36] 陈仁文, 刘川, 张宇翔. 直接式波浪能采集的研究现状与展望 [J]. *数据采集与处理*, 2019, 34(2): 195-204.
CHEN Renwen, LIU Chuan, ZHANG Yuxiang. Research status and perspective of direct ocean wave energy harvesters [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2019, 34(2): 195-204.
- [37] 巩冰. 振荡浮子式波浪能发电系统关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
GONG Bing. Research on the key technologies of oscillating buoy wave power generation system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [38] OH Y J, PARK J S, HYON B J, et al. Novel control strategy of wave energy converter using linear permanent magnet synchronous generator [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(3): 1-5.
- [39] JIN S, PATTON R J, GUO B. Enhancement of wave energy absorption efficiency via geometry and power take-off damping tuning [J]. *Energy*, 2019, 169: 819-832.
- [40] BUDAL K, FALNES J. Interacting point absorbers with controlled motion [C]//Conference on Power From Sea Waves. London, UK: Academic Press, 1980: 381-399.
- [41] HARDY P, CAZZOLATO B S, DING B, et al. A maximum capture width tracking controller for ocean wave energy converters in irregular waves [J]. *Ocean Engineering*, 2016, 121: 516-529.
- [42] WU J, YAO Y, ZHOU L, et al. Real-time latching control strategies for the solo duck wave energy converter in irregular waves [J]. *Applied Energy*, 2018, 222: 717-728.
- [43] FALNES J, HALS J. Heaving buoys, point absorbers and arrays [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, 370: 246-277.
- [44] HENRIQUES J, GATO L, FALCAO A, et al. Latching control of a floating oscillating-water-column wave energy converter [J]. *Renewable Energy*, 2016, 90: 229-241.
- [45] LI L, GAO Y, YUAN Z. Real-time latching control of wave energy converter with consideration of wave force prediction [C]//2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean. Kobe, Japan: IEEE, 2018: 1-6.
- [46] JUSTINO P, FALCAO A. Active relief-valve of an OWC wave energy device [C]//Proceedings of the Fourth European Wave Energy Conference. Aalborg, Denmark: Energy Centre Denmark, 2000: 295-300.
- [47] BABARIT A, GUGLIELMI M, CLÉMENT A H. Declutching control of a wave energy converter [J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(12/13): 1015-1024.
- [48] SARKAR D, CONTAL E, VAYATIS N, et al. Prediction and optimization of wave energy converter arrays using a machine learning approach [J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 504-517.
- [49] WILSON D G, ROBINETT R, BACELLI G, et al. Extending complex conjugate control to nonlinear wave energy converters [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(2): 84-105.
- [50] WILSON D, BACELLI G, ROBINETT III R, et al. Order of magnitude power increase from multi-resonance wave energy converters [C]//OCEANS 2016 MTS. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2017: 1-7.

- [51] BEIRAO P. Modelling and control of a wave energy converter: archimedes wave swing[D]. Lisbon, Portugal: Technical Superior Institute of Lisbon University, 2007.
- [52] 余洋, 权丽, 贾雨龙, 等. 平抑新能源功率波动的聚合温控负荷改进模型预测控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 92-99.
YU Yang, QUAN Li, JIA Yulong, et al. Improved model predictive control of aggregated thermostatically controlled load for power fluctuation suppression of new energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 92-99.
- [53] O'SULLIVAN A C M, LIGHTBODY G. Co-design of a wave energy converter using constrained predictive control[J]. Renewable Energy, 2017, 102: 142-156.
- [54] JAMA M, WAHYUDIE A, NOURA H. Robust predictive control for heaving wave energy converters[J]. Control Engineering Practice, 2018, 77: 138-149.
- [55] WU J, YAO Y, ZHOU L, et al. Latching and declutching control of the solo Duck wave-energy converter with different load types[J]. Energies, 2017, 10(12): 2070.
- [56] BACELLI G, NEVAREZ V, COE R G, et al. Feedback resonating control for a wave energy converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 56(2): 1862-1868.
- [57] 陈雅. 浮子式波浪发电系统的模型预测控制[D]. 天津: 天津大学, 2016.
CHEN Ya. Model predictive control of point absorbed wave power generation system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [58] ZHAN S, NA J, LI G, et al. Adaptive model predictive control of wave energy converters[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 2201-2209.
- [59] 付东学, 赵希梅. 永磁直线同步电机自适应反推全局快速终端滑模控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1634-1641.
FU Dongxue, ZHAO Ximei. Adaptive backstepping global fast terminal sliding mode control for permanent magnet linear synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1634-1641.
- [60] 柏欣欣. 基于滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
BAI Xinxin. Research on sensorless control strategy for permanent magnet synchronous motor based on sliding mode observer[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [61] 林巧梅, 杨俊华, 蔡浩然, 等. 基于滑模控制的直驱式波浪发电系统 MPPT 控制策略[J]. 电测与仪表, 2018, 55(10): 90-95.
LIN Qiaomei, YANG Junhua, CAI Haoran, et al. MPPT algorithm for direct-drive wave power generation system based on sliding mode control[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2018, 55(10): 90-95.
- [62] 胡凯. 自适应滑模控制原理及其应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
HU Kai. Research on adaptive sliding mode control theory and its application[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2016.
- [63] PARVAT B J, PATRE B M. Fast terminal sliding mode controller for square multivariable processes with experimental application[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2017, 5(4): 1139-1146.
- [64] BARAMBONES O, GONZALEZ DE DURANA J, CALVO I. Adaptive sliding mode control for a double fed induction generator used in an oscillating water column system[J]. Energies, 2018, 11(11): 2939.
- [65] BOONSATIT N, PUKDEBOON C. Adaptive fast terminal sliding mode control of magnetic levitation system[J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2016, 27(4): 359-367.
- [66] 潘海鹏, 丁海波, 雷美珍, 等. 基于模糊逻辑的直驱式海浪发电系统最大功率跟踪控制[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 21-28.
PAN Haipeng, DING Haibo, LEI Meizhen, et al. Maximum power tracking control of direct-drive ocean wave power generation system based on fuzzy logic[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(6): 21-28.
- [67] JAMA M, WAHYUDIE A, ASSI A, et al. An intelligent fuzzy logic controller for maximum power capture of point absorbers[J]. Energies, 2014, 7(6): 4033-4053.
- [68] 林凯东. 点吸收式波浪发电系统结构优化与最大波浪能捕获控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
LIN Kaidong. Optimization of point absorber wave energy converter and the control of absorbing maximum wave energy[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [69] GARCIA-ROSA P B, KULIA G, RINGWOOD J V, et al. Real-time passive control of wave energy converters using the Hilbert-Huang transform[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 14705-14710.
- [70] 叶寅, 王坤林, 张亚群, 等. 波浪能装置蓄能稳压系统数值模拟研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(8): 30-35.
YE Yin, WANG Kunlin, ZHANG Yaqun, et al. Numerical simulation research on energy storage system of wave energy converter[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(8): 30-35.
- [71] NIE Z, XIAO X, MCMAHON R, et al. Emulation and control methods for direct drive linear wave energy converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 790-798.
- [72] 宋瑞银, 李越, 陈俊华, 等. 间歇性波浪能发电系统恒功率控制实验研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(7): 99-105.
SONG Ruiyin, LI Yue, CHEN Junhua, et al. Experimental study on power stabilization control of intermittent wave energy generators[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(7): 99-105.
- [73] 鲍经纬, 李伟, 张大海, 等. 基于液压传动的蓄能稳压浮力摆式波浪能发电系统分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 205-209.
BAO Jingwei, LI Wei, ZHANG Dahai, et al. Analysis of an inverse pendulum wave power generation system with pressure-maintaining storage based on hydraulic transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 205-209.
- [74] 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.
- [75] 王冰冰, 刘忠, 梅军, 等. 基于储能内置式换流器的柔性直流配电网故障快速恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 17-23, 39.
WANG Bingbing, LIU Zhong, MEI Jun, et al. Fast recovery strategy of flexible DC distribution network based on energy storage built-in converter after fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 17-23, 39.

作者简介:



陈佳

陈佳(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与控制(E-mail: chenjia_gxu@126.com);

兰飞(1974—),男,高级工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为电力系统优化运行与控制(E-mail: lanfeigxu@163.com);

郭昊霖(1993—),男,博士研究生,研究方向为电力系统优化运行与控制、综合能源系统优化运行(E-mail: guohaolin421@163.com)。

(编辑 李玮)

Review on wave energy power generation control technology

CHEN Jia, LAN Fei, GUO Haolin, LI Jinghua

(Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy-Saving Technology,
Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The control of wave energy power generation can effectively suppress the volatility of power output and significantly improve power quality, which is beneficial for the full utilization of wave energy. To provide researchers with a comprehensive understanding of the current research level and future research directions, the current study on wave energy power generation system control technology home and abroad in recent years is summarized. The distribution and hot issues of wave energy power generation control technology are analyzed. Based on the classification of the installation location of wave energy power generation devices, wave energy converter method, and power take-off mode, the wave energy power generation system is introduced. The wave energy power generation control technology is classified with the clues of maximum power tracking control and power quality control, the control principle, technical characteristics, and application situation are compared. Finally, the future research directions in this area are discussed and prospected. These results can provide references for further study on efficient conversion and stable output control of wave energy power generation.

Key words: wave energy power generation; control technology; maximum power point tracking control; power quality control; ocean energy utilization

(上接第77页 continued from page 77)

Distributed continuous power flow calculation of microgrid group based on local geometric parameterization and JFNG algorithm

JU Yuntao^{1,2}, LI Jiawei², CHEN Hao³, LIN Yi^{3,4}, WANG Jie²

(1. School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

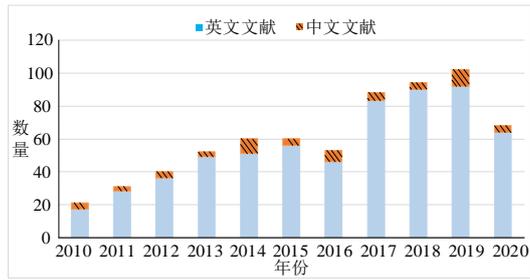
3. Economic and Technology Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350012, China;

4. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

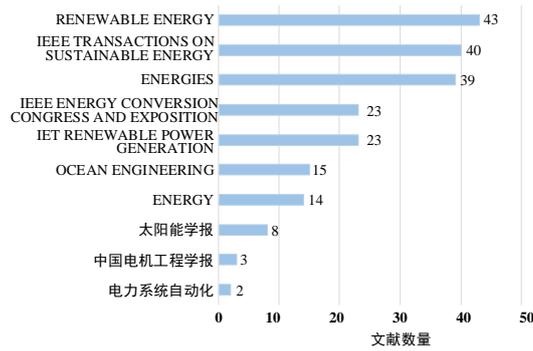
Abstract: Since the reactive power amplitude limiting constraints is existed in the new electrification loads such as distributed generation and electric vehicles, the phenomenon of calculation failure caused by wrong identification of node types is existed when the load capacity of microgrid and connection ability between microgrids are analyzed by the traditional continuous power flow, which is not suitable for the distributed management mode of microgrid group. A local geometric parametric continuous power flow algorithm is proposed, it has the advantages such as easy decoupling of parametric equation and high calculation accuracy of bifurcation point compared with the arc length parameterization. Fischer-Burmeister complementary function is adopted to deal with the non-smooth reactive power amplitude limiting characteristics, and the frequent switching of node types is avoided. Based on the continuous power flow model and distributed framework of Jacobian-free Newton-generalized minimum residual (JFNG) algorithm, a distributed continuous power flow algorithm of microgrid group is proposed, which can converge only by exchanging boundary information. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by the example results.

Key words: microgrid group; distributed computation; non-smooth amplitude limiting; continuous power flow calculation; local geometric parameterization; JFNG algorithm

附录 A



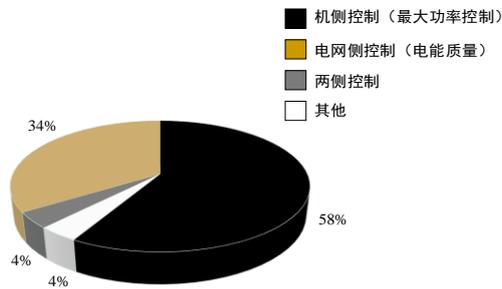
(a)不同年份的论文数量分布 (2010-2020 年)



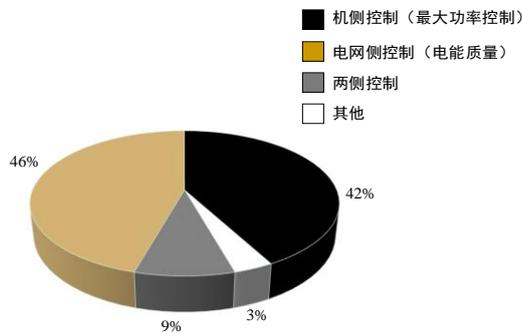
(b)研究成果发表期刊分布情况

图 A1 波浪能发电控制技术研究成果分布情况

Fig.A1 Distribution of research results on wave energy system control strategy



(a)英文文献



(b)中文文献

图 A2 波浪能发电控制技术论文数量对比

Fig.A2 Comparison of number of publications with wave energy system control strategy

附录 B

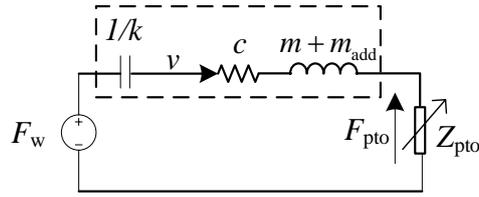


图 B1 WEC 系统等效电路图

Fig.B1 Equivalent circuit diagram of WEC

等效电路图中，电动势值等于波浪激励力 F_w ；电流值对应浮子速度 v ；电感值等于浮子的质量 $m + m_{add}$ ，电容值等于弹簧刚度力常数 k 的倒数，电阻值对应辐射阻尼 c ；可变阻抗 Z_g 两端的电压值对应 PTO 系统反作用力 F_{pto} 。

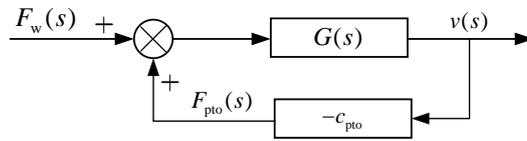


图 B2 无源阻尼控制

Fig.B2 Passive loading control

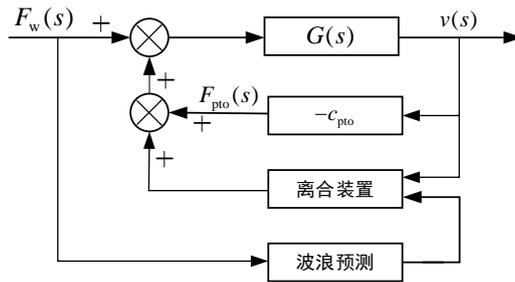


图 B3 离合控制原理图

Fig.B3 Schematic diagram of clutching control

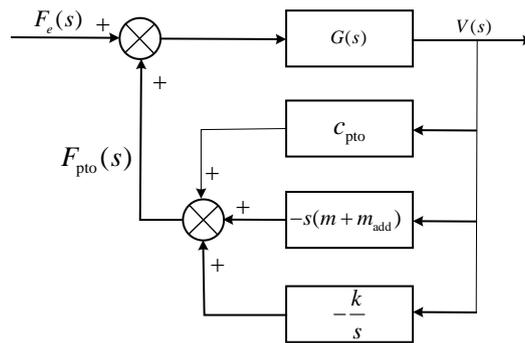


图 B4 近似复共轭控制原理图

Fig.B4 Schematic diagram of approximate complex conjugate control

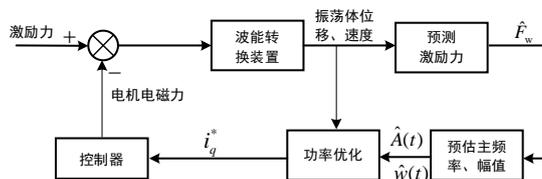


图 B5 幅值相位控制原理图

Fig.B5 Schematic diagram of amplitude and phase control

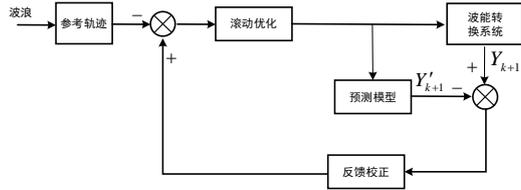


图 B6 模型预测控制基本结构

Fig.B6 Basic structure of model predictive control

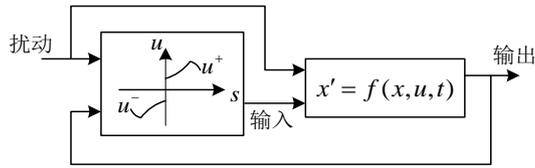


图 B7 滑模变结构控制

Fig.B7 Sliding mode variable structure control

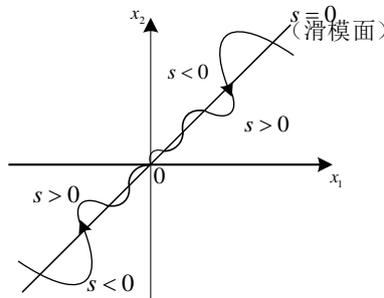


图 B8 滑模变结构控制相轨迹图

Fig.B8 Phase trajectory diagram of sliding mode variable structure control

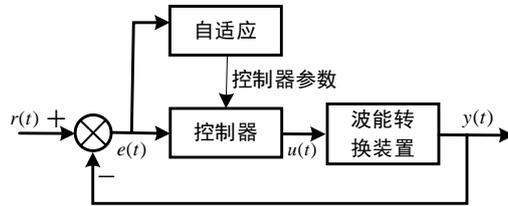


图 B9 自适应控制原理图

Fig.B9 Schematic diagram of adaptive control

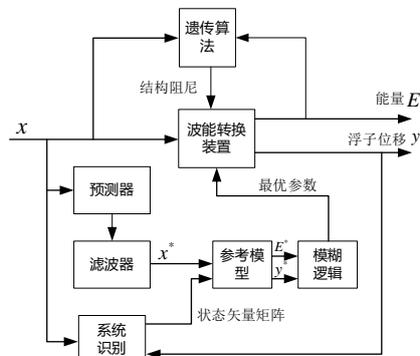


图 B10 波浪发电模糊控制系统

Fig.B10 Fuzzy control system for wave power generation

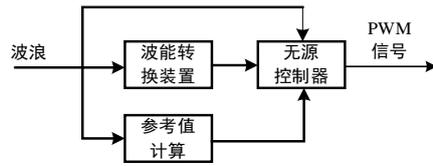


图 B11 无源控制原理图

Fig.B11 Schematic diagram of passive control

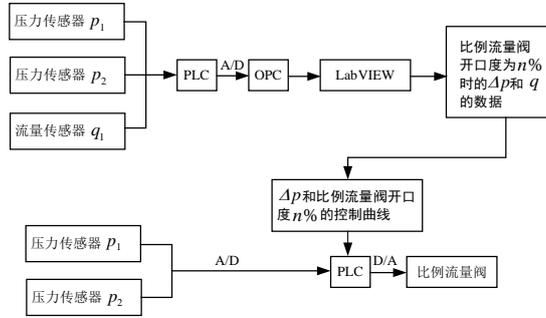


图 B12 液压蓄能压差反馈控制

Fig.B12 Hydraulic accumulating differential pressure feedback control

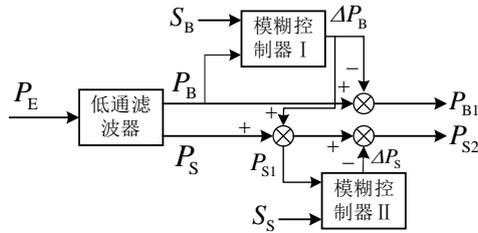


图 B13 混合储能充放电控制策略

Fig.B13 Charging/discharging strategy diagram of hybrid energy storage system

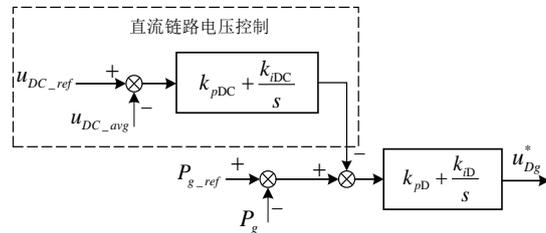


图 B14 附加直流链路电压控制

Fig.B14 Supplementary DC-Link voltage control