

基于平均功率估算的直驱海浪发电最大功率点跟踪控制方法

黄宣睿^{1,2}, 孙 凯^{1,2}, 肖 曦^{1,2}

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084;

2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084)

摘要: 分析了规则海浪波激励下的直驱海浪发电装置的动力学模型, 在将直线发电机电磁力等效为速度和位移的线性组合的控制方法基础上, 分析了其输出平均功率和 2 个控制变量的关系和特性曲线, 在此基础上提出采取爬山法实现直驱海浪发电的最大功率点跟踪(MPPT)控制。针对其中关键的输出功率测量技术——直驱海浪发电装置的平均功率测量, 给出了一种包含周期判断的平均功率估算方法。为避免在暂态过程中估算方法的误差, 方法中还包含了系统是否处于稳态的判断。实验结果验证了该方法的有效性, 方法提升了 MPPT 控制方法对海浪变化的适应性和跟踪速度。

关键词: 直驱海浪发电; 功率控制; 最大功率点跟踪; 平均功率

0 引言

随着能源需求的逐渐增大和环境问题的日益突出, 清洁可再生能源受到的关注越来越大。海浪能指海洋表面海浪所具有的机械能, 是一种预测性好、能量密度高的清洁可再生能源^[1]。保守估计, 每年全球海岸线附近较容易转换的海浪能可为人类提供 2 500 GW·h 的电力, 解决全球 10% 的用电量^[2], 合理开发利用海浪能将为可再生能源的发展做出巨大贡献。

在早期的海浪发电装置中, 海浪能到电能的转换一般需要通过三级能量转换。一级能量转换为海浪机械能到载体机械能, 二级能量转换为载体机械能到旋转装置的动能, 三级能量转换通过发电机将旋转装置的动能转换成电能^[3-4]。这样的典型装置有振荡水柱式^[5]、摆式^[6]、聚波储能式^[7]等, 多级能量转换增加了系统成本, 降低了系统可靠性。

直驱海浪发电装置使用低速直线发电机, 采取海浪推动浮体直接驱动发电机的结构, 省去了二级能量转换, 降低了系统安装、维护的成本, 提高了系统的效率和可靠性, 是一种很有前景的海浪发电形式^[8], 由于直线发电机可以直接与海浪的起伏运动特点吻合, 能够直接将机械能转换成电能, 简化了海浪能的转化过程, 因此其功率密度与功率因数也较

高^[9]。典型的直驱海浪发电装置是阿基米德海浪发电系统(AWS), 该装置于 2004 年在葡萄牙近海岸进行了测试^[10]。

最大功率点跟踪(MPPT)是新能源研究的热点。MPPT 算法在光伏发电、风力发电中已有广泛应用^[11-12], 文献^[13]给出了一种应用于直驱海浪发电的 MPPT 控制策略, 通过控制逆变电路的开关状态来实现功率跟踪, 通过 MPPT 控制来提高直驱海浪发电装置的功率输出能力。

直驱海浪发电装置的瞬时输出功率随着海浪的波动而波动, 其瞬时功率并不能反映系统的能量输出能力, 研究一定时间内海浪发电输出的平均功率会更有价值。AWS 采集的数据显示, 海浪在一定时间内可以近似看做周期固定的规则正弦波, 文献^[14]也基于此条件给出一种通过调节系统阻尼和弹性来实现优化功率提取的方法。但实现此方法对海浪参数依赖较大, 当海浪周期发生变化时, 原有的系统参数设置必须更新, 以便在新的海浪周期下实现优化功率提取。直驱海浪发电装置的 MPPT 控制算法以直驱海浪发电装置的周期平均功率为目标, 自动调节系统的弹性和阻尼来优化最大功率跟踪。因此, 测量直驱海浪发电装置的周期平均功率成为直驱海浪发电 MPPT 控制的关键环节。

海浪周期是测量直驱海浪发电装置周期平均功率的关键数据。若海浪周期已知, 则设置一个时长为海浪周期的采样窗, 在该采样窗内等间隔地测量多组瞬时功率求取平均值, 即可得到平均功率。由

收稿日期: 2015-09-30; 修回日期: 2016-02-03。

上网日期: 2016-03-23。

国家自然科学基金资助项目(51177084)。

于实际中海浪周期很难直接测量,采用卫星高度计资料可以得到海浪有效周期,但这样计算复杂、成本高^[15],且海浪周期也会变化,若给定的采样窗长度同真实海浪周期不一致,那么平均功率的测量就会不准确,造成 MPPT 无法准确控制。因此,如何根据直驱海浪发电装置的物理特性自主地识别海浪周期,从而准确得到周期平均功率,是实现 MPPT 控制的难点问题。

常用的周期测量方法有直接测频法、测周期法等^[16]。直接测频法由基准信号形成闸门,通过对被测信号进行计数来得到周期。测周期法是用被测信号形成闸门,对基准信号进行计数来得到周期。这 2 种测量方法都会产生一个脉冲误差,直接测频率法的误差随着被测信号周期的增加而增加,测周期法的误差随着被测周期的增加而降低,海浪周期一般在数秒到数十秒,周期较长,采取测周期法更为合适,当测周期法时的基准信号频率为千赫兹级别时,测量误差将在 0.1% 以内,可以满足要求。

为此,本文建立了规则海浪激励下直驱海浪发电装置的动力学模型,给出了其输出周期平均功率同直线发电机控制量的特性曲线,提出了一种基于预测周期的平均功率估算方法,通过实验验证了该测量方法在直驱海浪发电装置 MPPT 控制中的有效性。

1 规则海浪模型

典型的直驱海浪发电装置一般由浮子、直线发电机和电力电子变换器三部分组成。浮子将海浪的波动转化为上下运动的动能,浮子与直线电机定子直接相连,驱动其在垂直方向上振荡,切割磁力线产生感应电动势发电。直驱海浪发电装置中直线发电机输出电压、频率以及输出电能都会随着海浪的变化而变化,因此,直驱海浪发电装置必须通过电力电子变换器才能与电网相连。为了提高直驱海浪发电装置并网的可靠性,直驱海浪发电装置通常带有储能单元来稳定电压和电能,常用的做法是采用电池储能来平抑直驱海浪发电的输出波动^[17],文献^[18]提出了一种使用超导储能来平抑波动的控制方法。

直驱海浪发电装置的发电特性主要由浮子在波浪中运动的力学特性所决定。自由浮子在受到海浪推动时,会在坐标系 xyz 这 3 个方向做直线和旋转运动,即有 6 个自由度,受力和运动特性都极为复杂。但在直驱海浪发电装置中,直线发电机定子被固定在竖直方向上,浮子只可能在竖直方向上做升降运动,因此在对直驱海浪发电进行动力学分析时,只需考虑其竖直方向上的直线运动,即单自由度。

根据牛顿第二定律可得:

$$m\ddot{z}(t) = f_e(t) + f_r(t) + f_b(t) + f_v(t) + f_i(t) + f_g(t) - mg \quad (1)$$

式中: m 为系统中垂直方向上做振荡运动部件的总质量; $\ddot{z}(t)$ 为加速度; g 为重力加速度; $f_e(t)$ 为海浪激励力,是入射海浪作用于浮体上产生的力; $f_r(t)$ 为辐射力,是浮子振荡与海水相互作用产生的力; $f_b(t)$ 为浮子在水中的静浮力; $f_v(t)$ 和 $f_i(t)$ 分别为流体黏性和摩擦产生的阻力,一般情况下可忽略; $f_g(t)$ 为直线电机的电磁力; t 为时刻。

若浮子为柱状,则其在水中受到浮力与其偏移平衡位置的位移成正比,不妨设浮子在无海浪水面静止时的位置为平衡位置,则有

$$f_b(t) = -Kz(t) + mg \quad (2)$$

式中: K 为静浮力系数; $z(t)$ 为浮体偏移平衡位置的位移。

在浮子振荡幅度较小的情况下,根据波浪理论,在规则海浪激励下,辐射力可以表示为:

$$f_r(t) = -m_a\dot{z}(t) - R_a z(t) \quad (3)$$

式中: $\dot{z}(t)$ 为浮体速度; m_a 和 R_a 分别为辐射力对系统等效的质量和阻尼,在水动力学中称为附加质量和附加阻尼,其数值是关于海浪频率的非线性函数^[19]。

忽略流体黏性和摩擦产生的阻力,结合式(1)一式(3),可以得到规则海浪激励下直驱海浪发电装置的动力学方程为:

$$(m + m_a)\ddot{z}(t) + R_a\dot{z}(t) + Kz(t) = f_e(t) + f_g(t) \quad (4)$$

2 MPPT 算法

在规则波驱动的直驱海浪发电系统中,直线发电机电磁力可以表示为速度和位移的线性组合^[20]:

$$f_g(t) = -R_g\dot{z}(t) - K_g z(t) \quad (5)$$

式中: R_g 为阻尼系数,反映了发电机吸收有功功率的能力; K_g 为弹性系数,反映了发电机吸收无功功率的能力。

将式(5)代入式(4),直驱海浪发电系统的动力学方程为:

$$(m + m_a)\ddot{z}(t) + (R_a + R_g)\dot{z}(t) + (K + K_g)z(t) = f_e(t) \quad (6)$$

忽略直线电机自身的电磁损耗,系统从海浪吸收的瞬时功率为:

$$p_g(t) = -f_g(t)\dot{z}(t) \quad (7)$$

海浪发电输出的功率并不恒定,在时间尺度上的变化很大,分析系统的瞬时功率并不能体现海浪发电的特性,研究在一定时间内海浪发电输出的平

均功率会更有价值。在规则海浪的激励下,海浪发电装置的周期平均功率能够反映其能量提取的能力,为达到这个目的,从频域来对系统进行分析可以获得更好的效果。

设海浪激励力角频率为 ω ,海浪激励力幅值为 F_c ,则式(6)在频域下的表达如下:

$$\left[j\omega(m + m_a) + R_a + R_g - \frac{K + K_g}{\omega} \right] z(\omega) = F_c(\omega) \quad (8)$$

直驱式海浪发电装置可从海浪中提取的周期平均功率为其复功率的实部,即

$$P_g(\omega) = -\operatorname{Re} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} F_g(\omega) \frac{1}{\sqrt{2}} z^*(\omega) \right) \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)后化简可得到直驱海浪发电装置从海浪中吸收的周期平均功率为:

$$P_g = \frac{F_c^2}{8R_a} \cdot \left\{ 1 - \frac{\left| R_a - R_g - j \left[\omega(m + m_a) - \frac{K + K_g}{\omega} \right] \right|^2}{\left| R_a + R_g + j \left[\omega(m + m_a) - \frac{K + K_g}{\omega} \right] \right|^2} \right\} \quad (10)$$

由式(10)可以看出,直驱海浪发电装置可从海浪中提取的最大平均功率为:

$$P_{g\max}(\omega) = \frac{|F_c(\omega)|^2}{8R_a(\omega)} \quad (11)$$

需满足的条件为:

$$\begin{cases} R_g = R_a \\ K_g = \omega^2(m + m_a) - K \end{cases} \quad (12)$$

在稳定的海域中,海浪在数小时内变化很小,可当做规则波来进行处理,并且具有较好的预测性,当海域内气象条件发生变化时,引起海浪周期发生变化使得直驱海浪发电装置的附加质量和附加阻尼发生变化。图1为通过WAMIT软件仿真得到的圆柱状浮子在不同频率海浪作用下附加质量和附加阻尼的变化曲线。

为实现最大功率提取,根据式(12)给出的条件可知,当海浪周期发生变化时,直线发电机的阻尼系数和弹性系数需随附加质量和附加阻尼的变化而变化,这就要求在安装直驱海浪发电装置前计算好在不同频率海浪作用下系统的附加质量和附加阻尼,当海浪频率发生变化时,直线发电机控制侧根据海浪频率选择对应的参数与之匹配。由于数值计算求得的水动力学系数会与实际的真实值存在误差,除此之外,实际的海浪发电系统中存在的摩擦力、黏性

力会使海浪对系统等效的附加质量附加阻尼发生变化,这些因素都会导致直接给定参数的控制方法的能量提取效率降低。如何控制直驱海浪发电能够适应参数与工作状态的变化,自动跟踪最大功率点是将直驱海浪发电技术推向应用的重要基础。

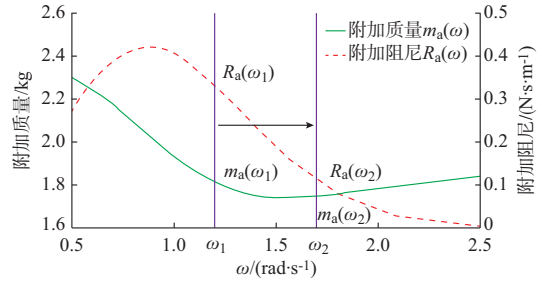


图1 水动力学系数频率特性曲线
Fig.1 Frequency characteristic curves of hydrodynamic coefficients

式(10)中 ω, F_c, R_a, m, K 这几个参数是由海浪发电系统自身物理特性和海浪周期决定的,在工况稳定时均为常数,可以对式(10)进行标么化处理来分析直驱海浪发电装置的能量吸收特性。

$$P_g = 1 - \frac{\left| 1 - R_g - j(1 - K_g) \right|^2}{\left| 1 + R_g + j(1 - K_g) \right|^2} \quad (13)$$

若 R_g 为负,说明发电机向海浪释放有功功率,这与实际不符,因此 $R_g \in [0, +\infty)$;若 K_g 为负,说明发电机发出无功功率,因此 $K_g \in (-\infty, \infty)$ 。系统输出平均功率随2个阻尼系数和弹性系数变化的曲线如图2所示。

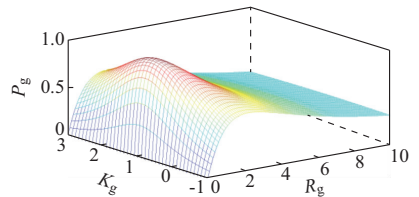


图2 直驱海浪发电装置功率特性曲线
Fig.2 Power characteristic curve of direct-drive wave energy converter

可以看出在控制变量的变化范围内, $P_g - (R_g, K_g)$ 函数的曲线是以最大功率点为极值的单峰值函数。爬山法是解决此类函数求极值的一个有效方法。爬山法在光伏发电MPPT控制中已有应用。基于直驱海浪发电系统的输出功率特性分析,本文提出一种双变量的爬山法优化方法,具体实现方案为:先保持变量1(R_g)不变,扰动变量2(K_g)确定变量2变化的方向以及步长,再下一个控制周期保持变量2不变来确定变量1的变化,这样2个变量交错变化直至寻找到最大功率点。

3 平均功率测量算法

根据式(13)和图2的分析可知,在直驱海浪发电装置中,其输出的周期平均功率是直线发电机等效阻尼系数和弹性系数的二元单峰值函数,参照光伏MPPT的控制思路,则需要根据直驱海浪发电装置平均输出功率的变化趋势来调节直线发电机等效阻尼系数和弹性系数来实现MPPT控制。如何准确测量直驱海浪发电装置的平均输出功率是MPPT控制中的重要环节。相对于光伏和风电等其他可再生能源发电,直驱海浪发电系统的平均功率准确测量是一个难点问题。在光伏发电装置中,光伏电池板的瞬时功率是光伏电池板端电压的一元单峰值函数,故可以根据光伏电池板的瞬时输出功率的变化趋势来调节光伏电池板端电压来实现MPPT控制。而在直驱海浪发电系统中,直驱海浪发电装置的瞬时输出功率随着海浪的波动而波动,与海浪的波高、周期和瞬时运动相位都密切相关,瞬时功率与平均功率的对应关系非常复杂。

在理想情况下,假设海浪周期已知并可测,则在一个完整的海浪周期内,等间隔地测量多组瞬时功率求取平均值即可得到平均功率,间隔越短,则测量的精度就越高。在直驱海浪发电装置的MPPT控制中,直线发电机的阻尼系数和弹性系数发生变化会导致系统机械参数改变,直驱海浪发电装置具有较大的惯性,在系统机械参数发生变化后系统的运行速度、位移、输出功率都会有一段时间的暂态,用给定周期等间隔的方法在暂态时测量得到的平均功率是不准确的,为避免在暂态时测量导致误差,在MPPT控制改变阻尼系数或是弹性系数后,需要等待一段时间后再开始测量平均功率,一般可以在等待2个完整海浪周期后再开始测量平均功率。

实际上海浪周期并不能够直接测量,且在长时间尺度下海浪周期还会发生变化。一旦给定的海浪周期和真实的海浪周期不准确,或是因为实际海浪周期发生改变,都会导致系统失稳产生振荡。除此之外,由于给定周期等间隔测量不能主动判断参数发生改变造成的机械暂态是否已经结束,因此系统只能靠增大MPPT控制的周期来避免暂态造成的误差而,这样会导致MPPT控制跟踪变慢。这些因素都导致给定周期的平均功率测量在实际应用中会有极大的局限。

在直驱海浪发电系统中,由式(8)可知,稳态时浮子振荡的周期同海浪周期一致。浮子的振荡速度可以通过编码器直接测量得到,这样对海浪周期的识别可以转化为对稳态时浮子振荡速度周期的识

别。最传统的周期信号周期测量方法是测周期法,即通过测量信号形成闸门通过基准信号进行计数来测量周期,虽然该方法有易受干扰且存在一个基准信号脉冲误差的缺点,但由于海浪周期一般在数秒到数十秒,基准信号的频率可以设置的远远高于海浪频率,从而大大降低干扰和误差。通过过零比较器将稳态的浮子速度信号转化为方波信号,方波信号相邻的两个上升沿形成闸门信号,利用基准信号对闸门信号进行计数即可得到海浪周期,利用基准信号对一个闸门信号内的瞬时功率进行采样累加求平均即可得到平均功率。基于以上原理,本文提出了一种基于测周期法的平均功率估算方法,其实现算法框图如图3所示。

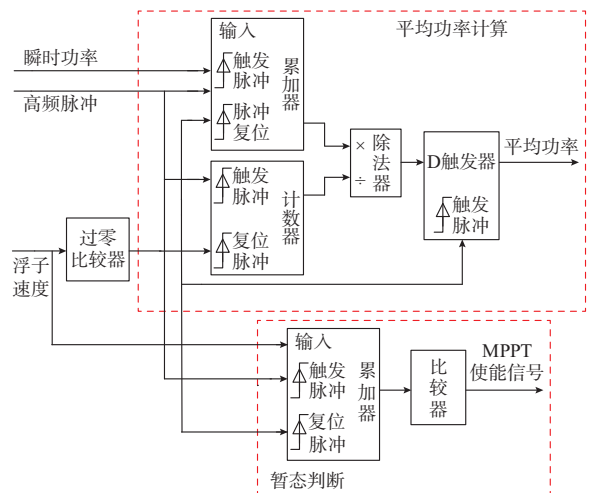


图3 平均功率测量算法

Fig.3 Average power measurement algorithm

通过过零比较器将浮子速度转化为方波信号,一个完整的方波信号即为一个完整的海浪周期。在一个完整的方波信号内,对瞬时功率进行高频的采样和累加,在下一个方波信号上升沿进行平均并对累加器和计数器清零,从而得到该完整周期内的平均功率。为确保得到的平均功率是在系统处在稳态时的测量结果,在平均功率测量算法中加入暂态判断环节,根据稳态下的正弦周期信号在一个周期内的积分应为零的特性,对浮子速度在方波信号的2次上升沿即一个完整的海浪周期内进行累加,对累加结果进行判断,由于实际系统测量存在误差,对稳态周期信号进行累加也不可能为零,因此在实际算法中将累加值与设定值进行比较,累加值在设定值范围内即认为系统已处在稳态,此时给出MPPT的使能信号,MPPT控制根据测出的平均功率进行功率控制,若累加值超出了设定值范围,则给出MPPT禁止信号,舍去该次计算得到的平均功率,

MPPT 控制保持原有状态不动作。

4 实验结果

实验平台由 2 台永磁同步直线电机组成。一台直线电机工作在发电状态,用来模拟直驱海浪发电机,另一台直线电机工作在电动状态,用来模拟直驱海浪发电机受到的外力。2 台电机均工作在推力模式下,其中用于模拟海浪推力的驱动电机在驱动器的控制下输出电机推力形式与海浪激励力一致,同时引入海浪辐射力以及实验平台阻力补偿来模拟海浪发电机在海浪中受到的外力;用于模拟海浪发电机的直线电机在驱动器的控制下其推力指令为其速度和位移的线性组合,其中速度系数对应于阻尼系数 R_g ,位移系数对应于弹性系数 K_g 。基于矢量控制算法,采集电机的电流以及位置信号可以实现电机推力控制,采集电机位置并计算速度可以实现 R_g 和 K_g 的控制,采集电机电压、电流可以得到瞬时功率。

4.1 给定周期法和测周期法的实验对比

实验设定的相关参数为 $F_e = 372.42 \text{ N}$; 海浪周期 $T = 3 \text{ s}$; $m = 45 \text{ kg}$; $m_a = 0 \text{ kg}$; $R_a = 300 \text{ N} \cdot \text{s/m}$; $K = 1\ 000 \text{ N/m}$ 。

根据式(11)和式(12)可以计算出理论的最大提取平均功率和对应的最优阻尼和弹性为:

$$\begin{cases} P_{g\text{-opt}} = 57.79 \text{ W} \\ R_{g\text{-opt}} = 300 \text{ N} \cdot \text{s/m} \\ K_{g\text{-opt}} = -803 \text{ N/m} \end{cases} \quad (14)$$

为验证测周期法在 MPPT 跟踪速度上比给定周期法有优势,在相同条件下分别采取给定周期法和测周期法进行 MPPT 控制,得到的实验曲线如图 4 所示。

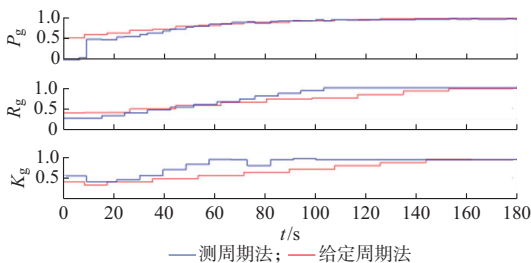


图 4 给定周期法与测周期法的对比实验

Fig.4 MPPT control experiment comparison between given period method and measuring period method

图中,平均功率、弹性系数和阻尼系数分别以式(14)给出的理论最优值为基准值进行标么化处理。如前文所分析,采用给定周期的方法来测量平均功率,为避免在系统暂态时测量数据导致误差,MPPT 控制必须等待 2 个完整海浪周期后再测量

平均功率从而导致跟踪速度变慢,而基于测周期的平均功率测量方法可以主动判断系统是否处在暂态,从而减少等待的时间,提高跟踪的速度。从图中实验结果可以看出,蓝色曲线进入稳态的时间快于红色曲线,从而表明了测周期法具有更好的动态性能。同时从图 4 可以看出,MPPT 算法在稳态时平均功率稳定在 1,即说明实验中提取的功率达到了理论计算的最大提取功率,从而实现了最大功率提取。

4.2 周期发生变化时的性能

为测试测周期法平均功率测量在海浪周期发生变化时的性能,控制实验平台起始状态海浪周期为 3 s,在系统进入稳态后一段时间控制海浪周期缓慢地线性变化至 4 s,不改变理论最大功率点的情况下得到实验平台的运行曲线如图 5 所示。

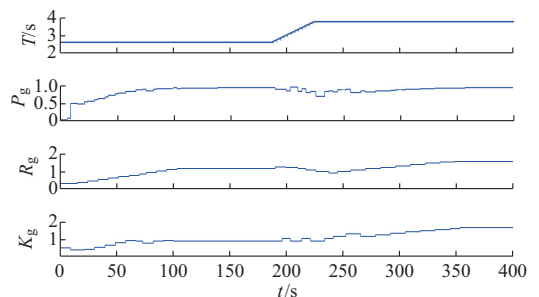


图 5 海浪周期变化下的 MPPT 实验曲线 1

Fig.5 Experimental curves 1 of MPPT for direct-drive wave energy converters when ocean wave period varies

可以看出海浪周期发生变化后,系统能重新自动调整参数进入另一个稳态,由于理论上直驱海浪发电装置能提取的最大功率并没有发生变化,因此两个稳态下的平均功率基本一致。

图 6 为同时改变海浪周期和最大功率点的实验结果,同时在功率测量环节加入误差扰动。

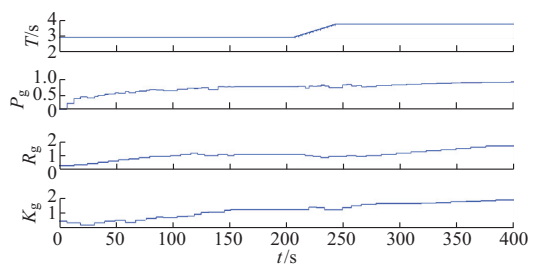


图 6 海浪周期变化下的 MPPT 实验曲线 2

Fig.6 Experimental curves 2 of MPPT for direct-drive wave energy converters when ocean wave period varies

测量的误差导致系统进入稳态时间变慢,但没有失去稳定,在海浪周期发生变化后系统依然能够重新工作在新的稳态,由于理论最大功率点增大,稳态下的平均功率也相应提高。

5 结论

本文对直驱型海浪发电系统的最大功率跟踪问题做了深入研究,结论如下。

1)分析并建立了直驱型海浪发电系统周期平均功率同发电机阻尼系数、弹性系数的模型,基于其单峰值特性提出了一种基于爬山法的MPPT控制策略。

2)基于测周期法的平均功率估算技术可以应用于爬山法MPPT控制算法,能够提高MPPT响应,减少算法对参数的依赖。

3)MPPT控制策略在波浪稳定以及波浪参数变化进入新的稳态下均能迅速响应,为直驱型海浪发电优化功率提取提供了有力的基础。

参考文献

- [1] MCARTHUR S, BREKKEN T K A. Ocean wave power data generation for grid integration studies[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, USA; 6p.
- [2] 李建心.一种用于海浪发电机的液压系统设计[J].液压与气动, 2008(4):25-26.
LI Jianxin. The hydraulic system design used in the ocean waves power generator [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2008(4): 25-26.
- [3] 游亚戈,李伟,刘伟民,等.海洋能发电技术的发展现状与前景[J].电力系统自动化,2010,34(14):1-12.
YOU Yage, LI Wei, LIU Weimin, et al. Development status and perspective of marine energy conversion systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 1-12.
- [4] 杨家武,辛玉超,杨帆.海浪发电的典型装置和发展趋势[J].科技创新导报,2015(9):72-73.
YANG Jiawu, XIN Yuchao, YANG Fan. Typical of wave power device and its development trend [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015(9): 72-73.
- [5] FALCAO A F O, JUSTINO P A P. OWC wave energy devices with air flow control[J]. Ocean Engineering, 1999, 26(12): 1275-1295.
- [6] HENDERSON R. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter[J]. Renewable Energy, 2006, 31(2): 271-283.
- [7] IAHNKE S L P, GOMES M N, ISOLDI L A, et al. Energy from the sea: computational modeling of an overtopping device [C]// Third Southern Conference on Computational Modeling (MCSUL), November 23-25, 2009, Rio Grande: 94-99.
- [8] 肖曦,摆念宗,康庆,等.波浪发电系统发展及直驱式波浪发电系统研究综述[J].电工技术学报,2014,29(3):1-11.
XIAO Xi, BAI Nianzong, KANG Qing, et al. A review of the development of wave power system and the research on direct-drive wave power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 1-11.
- [9] 方红伟,陈雅,胡孝利.波浪发电系统及其控制[J].沈阳大学学报(自然科学版),2015(5):376-384.
FANG Hongwei, CHEN Ya, HU Xiaoli. Wave power generation and its control[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2015(5): 376-384.
- [10] POLINDER H, DAMEN M E C, GARDNER F. Linear PM generator system for wave energy conversion in the AWS[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(3): 583-589.
- [11] 唐磊,曾成碧,苗虹,等.基于切线角的光伏变步长最大功率跟踪控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(20):28-33.
TANG Lei, ZENG Chengbi, MIAO Hong, et al. A new control strategy for MPP tracking in photovoltaic system based on contingency angle and variable step-size searching method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 28-33.
- [12] 田友飞,李啸骢,徐俊华,等.变速恒频双馈风电机组最大风能捕获非线性控制策略[J].电力系统自动化,2011,35(11):27-32.
TIAN Youfei, LI Xiacong, XU Junhua, et al. Nonlinear control strategy of variable-speed constant-frequency wind turbine driven doubly-fed induction generator for maximum wind energy capture [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 27-32.
- [13] AMON E A, BREKKEN T K A, SCHACHER A A. Maximum power point tracking for ocean wave energy conversion[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2012, 48(3): 1079-1086.
- [14] WU F, ZHANG X P, JU P, et al. Optimal control for AWS-based wave energy conversion system [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(4): 1747-1755.
- [15] 王喜风.基于卫星高度计资料的海浪周期反演研究[D].青岛:中国海洋大学,2006.
- [16] 杨霓清.用单片机实现精密测频的方法[J].山东大学学报(工学版),2003(5):534-537.
YANG Niqing. A way to realize precise frequency measure by single chip microcomputer[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2003(5): 534-537.
- [17] 吴峰,张小平,鞠平.电池储能 in 直接驱动式波浪能发电场并网运行中的应用[J].电力系统自动化,2010,34(14):31-36.
WU Feng, ZHANG Xiaoping, JU Ping. Application of battery energy storage in the direct-drive wave energy conversion farm integrated into power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 31-36.
- [18] NIE Z, XIAO X, KANG Q, et al. SMES-battery energy storage system for conditioning outputs from direct drive linear wave energy converters [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 5p.
- [19] FALNES J. Ocean waves and oscillating systems[M]. UK: Cambridge University Press, 2002.
- [20] 康庆,肖曦,裴贤相,等.直驱型海浪发电系统输出功率优化控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(3):24-29.
KANG Qing, XIAO Xi, NIE Zanxiang, et al. An optimal control strategy for output power of the directly driven wave power generation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 24-29.

发电功率控制、直线电机控制。E-mail: hxr503@gmail.com

孙 凯(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力电子与电力传动、新能源发电与电力储能、电力电子变换器。

E-mail: sun-kai@mail.tsinghua.edu.cn

肖 曦(1973—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:交流伺服电机控制、新能源发电与电力储能。E-mail: xiao_xi@mail.tsinghua.edu

(编辑 王梦岩)

Maximum Power Point-tracking Control Method for Direct-drive Wave Energy Generation Based on Average Power Estimation

HUANG Xuanrui^{1,2}, SUN Kai^{1,2}, XIAO Xi^{1,2}

1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper analyzes the mechanical model of direct-drive wave energy converters under the effect of regular sea waves. With the electromagnetic force of the linear generator equivalent to the linear combination of velocity and displacement as the control method, the characteristic curve of the average output power of the system under the control variables is obtained. The mountain-climbing method can achieve maximum power point-tracking (MPPT) control. For the key issue average power measurement, an average power measuring method based on period judgment is proposed. To avoid errors in estimation in the transient process, a method for judging whether the system is in a steady state is included. Experimental results have verified the validity of the proposed method that has improved its adaptability to the wave period variation and the tracking speed of the MPPT control.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177084).

Key words: direct-drive wave energy generation; power control; maximum power point-tracking (MPPT); average power