

「电动系统」

船舶光伏系统工作模式及稳定性研究

文/天津海运职业学院 王 皓 林海燕

阐述了船舶电力系统的特点,结合船舶进出港、恶劣海况、正常航行时的工况对船舶光伏系统的工作模式及并网稳定性进行了分析,提出了离并网混合型光伏系统在船舶上的应用方案,论证了此方案既能最大限度地利用太阳能,又可以满足不同工况下船舶负载的能量需求及并网稳定性的要求,达到节能减排的目的,为船舶光伏系统的深入研究提供思路。

海洋运输是国际间商品交换中最重要的运输方式之一。船舶运载量大、使用时间长、运输里程远,单位运输成本较低,为低值大宗货物的运输提供了有利条件。目前,海洋运输占国际贸易总运量中的2/3以上,我国进出口货运总量的90%都是利用海上运输。

作为海洋运输主要工具的船舶是一个大型耗能设备,船舶航运尾气排放对区域大气造成的污染是严重的,因此,船舶节能减排,发展绿色航运是事关国家船舶可持续发展的前瞻性课题。

太阳能是地球上资源最丰富、分布最广的清洁能源之一,随着光伏技术的发展,船舶之上应用节能、环保的光伏电能,正逐渐成为航运界解决节能、减排问题的重要突破点。

船舶耗电负载及船舶电力系统的特点

1. 船舶耗电负载

1) 主电力推进设备。主要包括调速装置、电动机、控制设备等。

2) 辅助机械设备。甲板上舵机、锚机、起货机等,舱室内油泵及水泵等,机修机械中的车床、钻床、电焊机、盘车机等。

3) 船舶电气照明设备。甲板、舱室照明设

备、航行灯、信号灯等。

4) 船舶通信导航设备。无线电通信、导航、船内通信设备等。

5) 生活用电设备。空调、电风扇、电视机、厨房电器等。

2. 船舶电力系统的特点

1) 船舶电力系统是个独立的电力系统,船舶电网与陆地电网相比具有容量小的特点,而某些船舶负载的容量可与船舶发电设备的容量相比,这些负载起动、停止时,将对船舶电网造成较大的冲击,因此船舶电力系统的稳定性至关重要。

2) 由于船舶容积有限,船舶电气设备摆放比较集中,并且输电线路都采用电缆,所以船舶电网具有输电线路短,线路阻抗低,短路电流大的特点,因此对发电设备和电网的保护要及时可靠。

3) 船舶电气设备的工作环境恶劣,比如:环境温度高、振动大、相对湿度高等,都可以造成电气设备的损坏,为了提高安全性,船舶一般会配置独立的应急配电系统,它可以在主电网发生故障时,保证船舶安全航行所需设备的用电。

船舶光伏系统的常规工作模式

应用于船舶上的太阳能光伏发电系统简称船

舶光伏系统,通过将零污染、零排放的太阳能光伏系统集成到船舶电力系统中的方式,最大程度地利用光伏电能,降低柴油发电机组的功率及燃油消耗量、温室气体排放量。

船舶光伏系统的常规工作模式分为离网型、并网型两种。

1. 离网型光伏系统

由于太阳能受不同地区不同时间气候、光照条件的影响,发电量存在波动现象,因此,离网型光伏系统需要配备蓄电池,当太阳能发电量充足时,发电量在提供给逆变器供负载使用的同时给蓄电池充电,当太阳能发电量不足时,由蓄电池放电,将储存的电量提供给逆变器,供负载使用。离网型光伏系统构成图如图1。

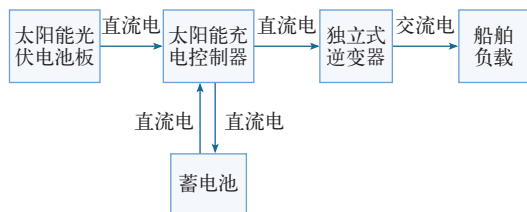


图1 离网型光伏系统构成图

蓄电池容量的选择应根据负载全天用电量要求及船舶光伏系统全天有效发电时间及发电量来决定,还要考虑留出一定天数全船负载用电量的电能,从而使光伏系统满足全船负载全天的用电量。

离网型光伏系统多适用于大中型船舶辅助供电或小型船舶的电力推进供电。

2. 并网型光伏系统

光伏并网光伏系统不直接向负载供电,而是将光伏并网系统输出的电能并入船舶主电网,由船舶综合管理系统统一管理及分配,具有较好的能源利用率。并网型光伏系统可分为不可调并网型光伏系统和可调并网型光伏系统。

(1) 不可调并网型光伏系统

不可调并网型光伏系统没有蓄电池储能环节,可作为分布式电源应用,其构成图如图2。

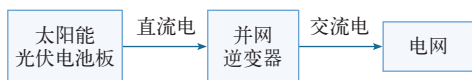


图2 不可调并网型光伏系统构成图

不可调光伏并网系统具有集成度高,安装和调试相对方便,系统设计和施工成本较低等优点。

点。由于没有蓄电池,不可调光伏并网系统不能够控制上网时间,使得电网调峰效果较差。

(2) 可调并网型光伏系统

可调并网型光伏系统在不可调并网型光伏系统基础上增加了太阳能充电控制器和蓄电池组,其构成图如图3。

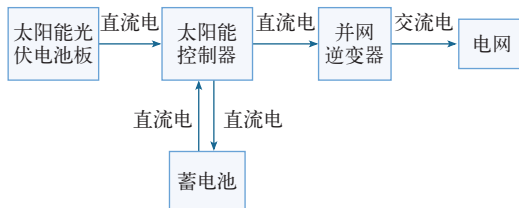


图3 可调并网型光伏系统构成图

当蓄电池电量不足时,太阳能控制器可以通过MPPT技术实时监测太阳能电池板的发电电压,并追踪最高功率点,使系统以最大功率输出对蓄电池充电,当蓄电池充电完成时,太阳能控制器切断充电回路,不再对蓄电池进行充电。由于蓄电池的存在,当船舶电网电能需求量大时,光伏系统可提供足够的电能,当船舶电网电能需求小的时候,光伏系统可将电能存储于蓄电池中,有益于船舶电网用电峰值的调节。

离并网混合型船舶光伏系统工作模式

离并网混合型光伏系统同时具有离网光伏系统和并网光伏系统的特点,可根据太阳照射强度、照射时间、船舶负载工况、配备的蓄电池容量以及船舶主电网运行状态,在离网运行和并网运行之间进行切换,具有较好的适用性。如图4所示。

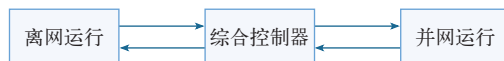


图4 离并网混合型光伏系统

1. 船舶离并网混合型光伏系统的工作模式

(1) 船舶工作在进出港等机动航行工况

当船舶进出港或者遇到恶劣海况时,船舶工作在机动航行工况,船舶电网波动越大,光伏并网难度越大,容易造成并网逆变器的并网失败,光伏逆变器应工作在离网运行模式,离网运行模式下船舶光伏系统可直接向部分负载供电,减少主电力推进系统起停对其他负载的影响,帮助船舶电力系统稳定运行。船舶离并网混合型系统可以很好地解决船舶电力系统工况复杂所带来的问题。

(2) 船舶正常航行

当船舶正常航行时,船舶电网较稳定,船舶光伏逆变器应工作在并网运行模式,且运用最大功率点跟踪技术,最大限度的将太阳能转换成电能传送给船舶电网,减少船舶柴油发电机的使用量,达到节能减排的目的。

(3) 船舶电网电压暂时跌落

当因为某种原因船舶电网电压暂时下降时,由于船舶光伏并网容量在船舶电网容量中所占的比例较大,船舶光伏系统脱网会进一步恶化船舶电网状态,因此船舶光伏逆变器应工作在并网运行模式,向电网输出无功功率,帮助抬升电网电压。

(4) 船舶电网故障

当船舶电网故障时,离并网光伏系统可以离网运行,实现应急电源的功能,为本地重要负载提供电源。

2. 船舶光伏系统离并网运行切换

船舶光伏发电系统不仅要有稳定的并网运行的能力、离网运行能力,还需要在并网运行和离网运行状态之间切换。如何在保障船舶负载稳定运行的情况下,实现离、并网运行间的可靠切换,是船舶光伏系统的关键问题。

离网运行与并网运行的切换条件:

离网运行切换到并网运行:当光伏发电量不足或者计划并网时。

并网运行切换到离网运行:当电网故障或者计划孤岛时。

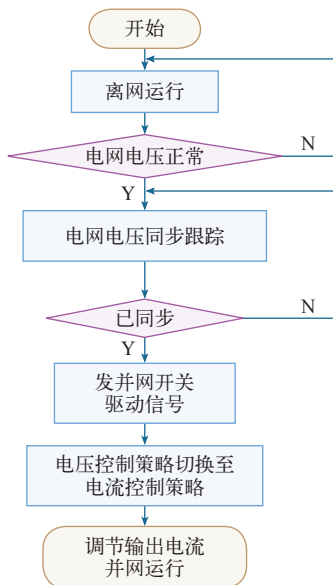
(1) 离网运行至并网运行的切换

当电网故障清除或计划并网时,为了防止出现较大的并网冲击电流,需重新检测船舶电网电压幅值、相位、频率,并通过电压闭环控制,使并网逆变器输出电压与船舶电网电压同步,然后闭合并网开关,并网成功后将电压闭环控制切换至电流闭环控制。离网运行至并网运行的控制过程如图5a。

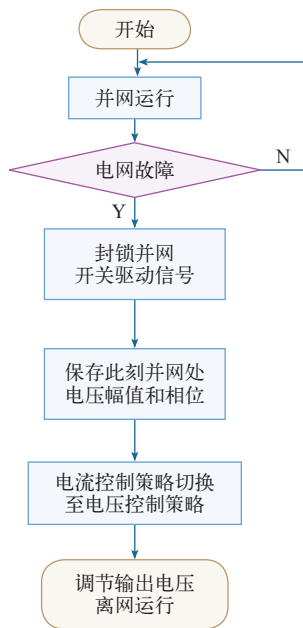
(2) 并网运行至离网运行的切换

当控制系统检测到船舶电网发生故障时,为避免更大的故障损失,立即断开并网开关,并网逆变器逆变侧从电流闭环控制切换至电压闭环控制,为避免切换瞬间因负载电压突变而产生电流冲击,先将离网前一时刻并网逆变器逆变侧的电压幅值和相位作为离网后逆变器逆变侧电压闭环控制中的参考值,然后逐步将逆变器输出电压升

至负载电压额定值。并网运行至离网运行的控制过程如图5b。



(a) 并网控制过程



(b) 离网控制过程

图 5

船舶光伏系统并网稳定性研究

船舶作为特殊载体,长期航行在海上,由于海上空气湿度大、盐分多,船上电气设备工作环境复杂且恶劣,且船期不确定,船用设备维护不方便,为确保航运安全,所以要求船舶光伏系统要有较高的稳定性。

1. 光伏发电随机性对船舶电网稳定性的影响

光伏发电具有随机性，主要体现在光伏发电量受气象条件限制，在不同光照条件下，光伏发电系统稳态、瞬态出力变化均较大，比如雾天、雨天、多云等天气，都将造成光伏发电量下降，将导致负载功率需求得不到满足。因此根据船舶实际航线的太阳光照情况及船舶的运力要求，合理设计船舶电网容量、船舶光伏系统容量、储能设备容量将极大地解决船舶光伏系统容量对船舶电网稳定性影响的问题。

2. 光伏系统离并网切换与船舶电网稳定性的关系

不同于陆地电网的近似无穷大电源，船舶电网容量有限，当船舶光伏系统的发电容量比例增大后，船舶光伏并网逆变器直接并入和脱离与船舶主电网的连接，将会引起船舶电网电压和电流的波形畸变，严重时将导致船舶电力系统失去稳定性。因此应采取软启动的方式实现船舶光伏系统安全并网及脱网，避免电流冲击造成的损失。

同样由于船舶电网容量有限，当船舶运行于不同工况时，船舶投入的负载不相同，船舶电网运行情况差异较大，船舶光伏发电系统的工作模式也应不同。当船舶负载变化不大，船舶电网运行稳定，船舶光伏系统工作在并网模式，向船舶电网输出功率；当船舶大功率负载投切，造成船舶电网电压波动大，超出并网允许范围时，船舶光伏系统应工作在离网工作模式，为部分负载供电或作为应急电源使用。

3. 船舶并网逆变器低电压穿越技术

虽然目前还没有针对船舶光伏并网系统的低电压穿越能力的相关规定。但为了提供船舶电网稳定性，船舶光伏并网系统也应具有低电压穿越能力，船舶光伏并网逆变器应具备输出无功功率的能力。因此，当船舶电网电压发生跌落时，船舶光伏并网逆变器应采用有功、无功解耦控制。

船舶光伏并网逆变器控制系统采用的是双闭环控制，即外环采用电压控制和内环采用电流控制。电压环主要作用是控制并网逆变器直流侧输出电压 U_{DC} 及计算有功、无功电流分量的参考值 i_{dref} 、 i_{qref} 。电流环主要作用是控制有功、无功电流，跟踪电流参考值。电流环的 dq 模型如式(1)。

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Lp + R & -\omega L \\ \omega L & sL + R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_d \\ e_q \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中， u_d 、 u_q 分别为船舶并网逆变器输出电压的 d 、 q 分量； i_d 、 i_q 分别为船舶并网逆变器输出电流矢量的 d 、 q 分量； e_d 、 e_q 分别为船舶电网电压 E_{dq} 的 d 、 q 分量； R 和 L 为船舶并网逆变器交流输出侧的电阻和电感。

船舶电网侧电压 d 、 q 分量的表达式为

$$\begin{cases} e_d = E_{gm} \\ e_q = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中， E_m 为船舶电网相电压幅值。

有功功率和无功功率表达式为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} u_d i_d \\ Q = \frac{3}{2} u_q i_q \end{cases} \quad (3)$$

式中， P 、 Q 的正负分别表示功率的发出与吸收。

有功、无功解耦控制框图如图6所示。

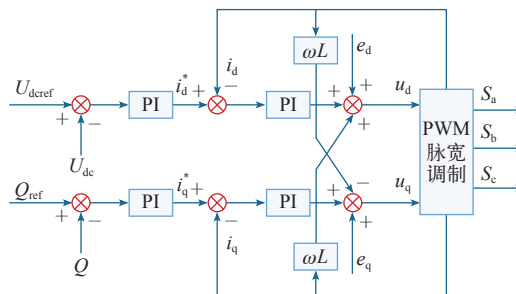


图6 有功、无功解耦控制框图

如上所示，通过控制 i_d 和 i_q 可以实现有功和无功的解耦控制，即控制并网逆变器输出的有功功率和无功功率。

在双闭环控制的基础上加入船舶电网电压前馈环节，实时检测电网电压跌落深度，计算船舶电网需要的无功电流大小，并由并网逆变器向船舶电网输出无功功率，维持船舶电网电压稳定。当船舶电网电压恢复正常后，并网逆变器逐步减小无功电流并增加有功电流，直到全部输出有功功率。

4. 光伏发电设备及电网的保护

当船舶电网输电线路短时，短路电流很大，危害性很大，所以平时要做到按时检修船舶电网，避免短路事故发，要实时快速检测短路电流过流情况，必要时采取措施，比如断开逆变器，设计保护回路，将光伏发电设备及电网的损失减

到最小。

算例仿真

本文使用Matlab搭建一个5 MW光伏系统并入船舶电网的仿真系统，通过负载突变试验来验证船舶光伏系统对船舶电网的无功补偿作用，仿真系统如图7所示。

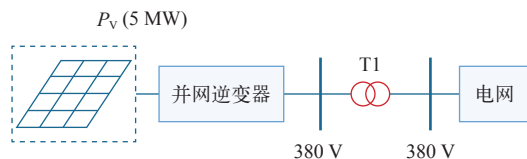


图7 仿真系统

首先假设0~0.5 s时光伏系统运行于功率因数为1的状态，在0.5 s时负载有功负荷突然增大到原来的2倍并一直保持，采用检测电压跌落深度，实施有功、无功解耦控制前后的电压及无功功率变化情况如图8、图9所示。

由图8、图9可知，在0.5 s时负载突增至原来的2倍，380 V母线电压跌落到0.972 pu；采用了有功、无功解耦控制后，母线电压从0.972 pu上升到约0.986 pu；无功功率从0 pu增加到0.19 pu。说明船舶光伏系统对船舶主电网起到了无功补偿作用，达到了帮助维持母线电压的目的。

本文是天津市高等学校科技发展基金计划项目“船舶光伏发电并网关键技术的MATLAB仿真研究”（项目编号20140422）研究成果

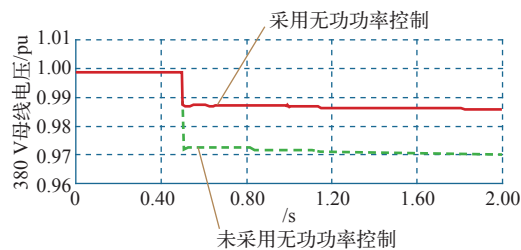


图8 母线电压情况对比

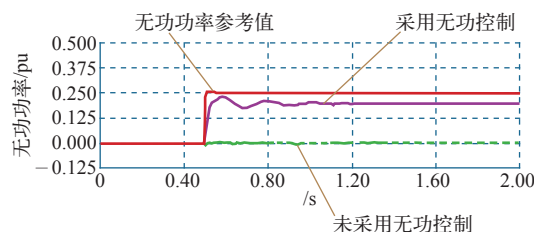


图9 无功功率情况对比

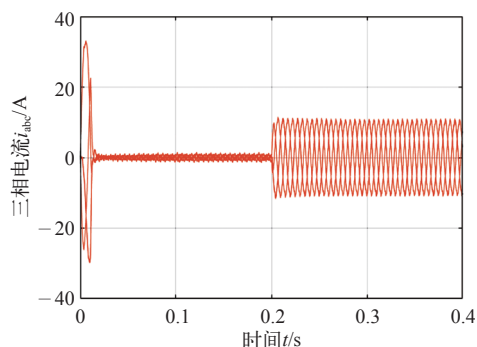
结束语

综上所述，由于多数船舶可摆放太阳能电池板的甲板空间有限，尤其是大中型船舶尚不能完全使用太阳能作为船舶电网能量的全部来源，根据船舶实际情况比如船舶的大小，形状、运力要求、航线的光照情况，选择配备一定比例的离并网混合光伏系统是最适合的方案，此方案既能最大限度的利用太阳能，又可以满足不同工况下船舶负载的能量需求及船舶电力系统稳定性的需求。EA

（收稿日期：2017.05.30）

（编辑：朱金凤）

（上接第67页）



（c）BIC控制下三相电流波形图

图9 PI、SMC和BIC控制的三相电流对比图

结束语

为提高PMSM的控制性能，基于睾丸性激素反馈调节原理，设计了一种基于生物智能控制算法的控制器，并在Matlab/Simulink仿真平台下分别搭建了实验模型，对比了PI、SMC和BIC控制算法的仿真结果。仿真结果表明，相对于传统的PI和SMC控制算法，生物智能控制算法（BIC）系统响应更快、超调量更小、稳定性更好。EA

（收稿日期：2017.05.30）

（编辑：白文亭）