

文章编号:0254-0096(2017)07-1877-08

## 直流纳电网技术在波能装置群中的应用

王坤林<sup>1,2</sup>, 游亚戈<sup>2</sup>, 王孝洪<sup>1</sup>, 田联房<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学自动化科学与工程学院, 广州 5106410; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640)

**摘要:** 根据波能装置液压发电系统的特性,提出由蓄电池组支撑的直流纳电网技术。波能装置群采用直流并网与传输,可以接受周期波动的波浪能功率,效率、可靠性、电能质量均较高。纳电网蓄电池可解除波能装置群发电功率与纳电网逆变器的馈网功率,各装置负载可简化为纳电网蓄电池,各装置分别向蓄电池充电,互不影响。纳电网逆变器为海岛居民提供稳定的高质量的可控电源。仿真和实践证明波能装置群应用直流纳电网技术的可行性和优势。

**关键词:** 直流纳电网; 微电网; 变换器; 波能装置(WECs); 海岛

**中图分类号:** TM711

**文献标识码:** A

### 0 引言

近年来,波浪能研究得到沿海各国的重视,有关波浪能发电装置的专利已有 1500 多项<sup>[1,2]</sup>,发展了各种各样的波能装置(WEC)。如 Salter<sup>[3]</sup>研制的点鸭式 WEC, McCabe Wave Pump 筏式 WEC<sup>[4]</sup>, 苏格兰 Ocean Power Delivery 公司设计的 Pelamis 筏式 WEC<sup>[5]</sup>, Falnes 等<sup>[6]</sup>研发的 Power Buoy 点吸收式 WEC 等。根据我国波浪资源状况<sup>[7]</sup>以及波能装置主要应用区域引起的生产因素,漂浮式波能装置<sup>[8]</sup>将是我国波浪能研究的主要方向,并已研究了多台漂浮式波能装置,如文献[9]中 8 和 30 kW 两座摆式 WEC,文献[10]中 50 kW 振荡浮子式 WEC,以及中国科学院广州能源研究所研究的 10 和 100 kW 鸭式 WEC,10 和 100 kW 鹰式 WEC 和 10 kW 点吸收式 WEC 等<sup>[11]</sup>。

波能装置的单机容量毕竟是有限的,为了大规模利用波浪能,采用波能装置群建立波浪能发电场或者测试场是必然选择。具有代表性的波浪能测试场包括位于英国的 EMEC、WaveHub 及西班牙的 BIMEP 波浪能试验场等<sup>[7,12]</sup>。EMEC 和 WaveHub 都采用交流并网技术,通过海底电缆连接至岸上 11 kV 变电站,再次升压至输送到英国国家电网,其中 WaveHub 的集线器安放在海底。BIMEP 同样采

用了交流并网技术,母线电压为 13 kV,通过岸上一台 13 kV/30 kV/20 MW 的升压变压器升压后送入西班牙国家电网。由于欧洲海域的波浪资源非常丰富,EMEC 的波浪能流密度年均值达到 40 kW/m<sup>[7]</sup>以上,其波能装置的单机装机容量可以达到 MW 级,输电电压等级比较高,负载一般为国家电网,常常引用海上风电场的并网输电技术。我国大部分海域的波浪能资源都在 10 kW/m 以下,相同体量的波能装置在我国海域的输出功率比在欧洲海域的输出功率将大大降低,波能装置单机容量一般只有几十千瓦,发电成本高,只能应用在柴油发电成本高昂的偏远的海岛。

漂浮式波能装置与海上风电机组的工作环境基本相同,同处在海洋环境,需要采用海底电缆传输,其并网方案可以借鉴海上风电场的方案,如大部分国外的波浪能发电场和测试场。但漂浮式波能装置却在较大海面范围内移动,其海底电缆必须与锚泊系统相结合,技术要求高,施工难度大,容易出现故障。我国的漂浮式波能装置并网的特殊性,还表现在如下几个方面:

1) 对海岛微电网的功率冲击。波浪能具有周期波动的特点,其稳定性比风能与太阳能差。波能装置群接入的电网往往是海岛微电网,采用常用的交流并网技术,将大周期波动的波浪能电力直接馈

收稿日期: 2015-6-19

基金项目: 海洋可再生能源专项(GHME2013ZB01; GHME2013GC01); 中国科学院可再生能源重点实验室 2013 年度基金(y407j71001)

通信作者: 王坤林(1980—), 男, 博士生、副研究员, 主要从事波能装置电力变换与监控、独立能源系统等方面的研究。cadonwkl@163.com

送到海岛微电网,其安全性是值得担忧的。

2)波能装置单机容量小。我国波浪能流密度较低,按波浪能流密度  $10 \text{ kW/m}$ ,波能装置的迎波宽度  $20 \text{ m}$ ,总转换效率  $15\%$ 估算,一台波能装置的平均输出功率也只有  $30 \text{ kW}$ 。

3)装置侧变换器可靠性要求高。漂浮式波能装置受风、浪、流的综合作用,位置变化很大,其基体的运动也很大,只有在风平浪静的时候维护人员才能登上装置,因此,装置内设备故障的检测与排除是非常困难的。另外,并网变换器出现故障时往往是在来波能量特别丰富的时段,等待维修时间少则三五天,多则几个月。对于贫乏的波浪资源是莫大的浪费。

4)若采用岸上并网,成本高,损耗大。为了提高波能装置的可维护性,可以将并网变换器安置在岸上。但是波浪能发电场中的每一台装置都需要独立海底电缆连接到岸上电力变换站,那么海底电缆长度将大大增加。同一片海域,布放多条海底电缆,工程施工更复杂。同时,海岛电缆传输的是交流电,无功损耗大。

5)装置侧变换器需要负载匹配功能,最高效率转化功能。根据波浪能的水动力学特性,发电机组的负载匹配相当重要,否则,轻载时可能会引起波浪能捕获浮子激烈运动,直至破坏,重载时,运行缓慢,一级能量转换效率低。因此,波能装置侧变换器需要负载匹配功能。同时,其能量转换系统需要具备最高效率转化的功能。

因此,必需发展适合我国波浪资源的海洋波浪能并网输电技术。本文针对波浪能发电并入脆弱的花岛微电网,提出了直流纳电网技术,波能装置群以直流方式并网,为海岛用户提供高品质、稳定的电能。

由于海岛微电网没有大电网的功率调节能力,采用蓄电池组作为电网的功率调节环节,可以解决波浪能发电功率周期波动与海岛微电网容量小的矛盾,同时提高波能装置侧变换器可靠性与电力传输效率。本研究表明,直流纳电网技术解决波能装置群电力合并与传输是可行、可靠和高效的。同时,为其他可再生能源并网方式提供新的技术方案,将在可再生能源发电领域发挥重要作用。

## 1 直流纳电网技术

微电网是分布式电源的重要并网方式,欧盟对

微电网定义是充分利用一次能源,将小的、模块化的分布式电源互联,能实现冷、热、电联供,配有储能装置,连接到低压配电网的系统<sup>[13]</sup>。直流纳电网技术是在微电网中建立一个直流电网,从本质上说属于微电网范畴。所谓直流纳电网,即在微电网结构中,由部分发电设备采用直流方式并网,与储能设备和直流用户等共同组成的相对独立的更小一级电网。一般情况,直流用户容量较小,直流纳电网并入交流微电网运行,当直流用户容量与发电设备容量相匹配时,直流纳电网完全可以独立运行。直流纳电网与上级交流微电网之间有唯一接口,为纳电网逆变器。直流纳电网结构如图1所示。

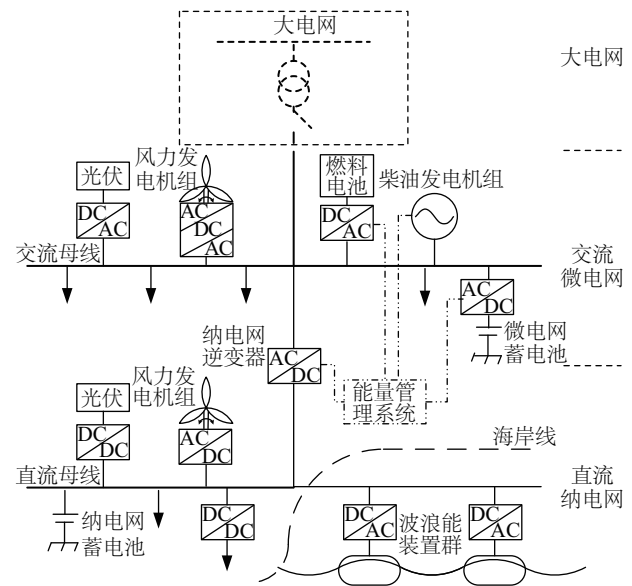


图1 直流纳电网结构图

Fig. 1 The schematics of the DC nano grid

图1中交流微电网部分是由常见的分布式电源组成,只是在纳电网逆变器以下又组成了一个新的直流电网——直流纳电网。直流纳电网中大部分设备是分布式电源,直流用户少,图中的用户一般是分布式发电设备的工作电源。由于我国波浪能的主要应用场合在偏远海岛,大部分海岛微电网都是离网型,没有图中虚线框中大电网的支撑。因此,蓄电池组便成为海岛可再生能源分布式系统的必配环节,用于解除可再生能源发电实时功率与用户用电实时功率的强耦合关系,提供海岛直流纳电网的直流母线电压。纳电网逆变器为双向逆变器,工作在电流模式,接受能量管理系统的管理和调度。纳电网中分布式可再生能源发电设备的负载

可以简化为蓄电池组,其输出功率与电能质量均不会传递到纳电网逆变器的交流侧,为具有周期波动特性的波浪能电力接入海岛微电网提供了可行、可靠和高效的解决方案。

由于现阶段大部分电力设备都是交流电源,所以直流纳电网寄存在于交流微电网中。当直流配电技术和配电设备完全普及以后,直流纳电网便可以独立存在,成为直流微电网,采用直流配电方式到所有用户。

## 2 直流纳电网的优势

### 2.1 波能装置群直流并网,共同出力,互不影响

众所周知,可再生能源交流并网需要满足三大基本条件:同频、同相位和同相序<sup>[14,15]</sup>。装置侧变换器结构复杂,工作环境要求高。波能装置群采用直流并网时,只需要在给定的纳电网直流电压下,输出电流即可,将会大大将低并网的难度。有些直流变换器结构简单,可靠性高,完全可以置留在装置内,将可实现波能装置群在海上先并联后输电上岸。

直流纳电网中,每台波能装置发电机负载均可简化为纳电网蓄电池。只要蓄电池容量足够前提下,波能装置和纳电网逆变器只能影响蓄电池组的端电压和荷电状态,由于蓄电池组端电压的变化,对波能装置发电机组的工作状态有一定影响,只要纳电网能量管理策略合适,这种影响非常小。直流纳电网中各波浪能发电装置共同出力,互不影响。

### 2.2 波能装置侧变换器可靠性高

波能装置采用直流并网,装置侧变换器是一台整流器。大部分波能装置采用了液压蓄能发电系统,根据文献[11]研究的液压发电系统的特性可知,一个三相不可控整流拓扑便可完成液压发电机组直流并网。液压发电系统的特性公式:

液压发电机组转速  $n$  (r/min) :

$$n = C_1 \Delta p R_l \quad (1)$$

液压发电系统永磁同步发电机电动势  $E$  (V) :

$$E = C_2 \Delta p R_l \quad (2)$$

式中,  $C_1$ 、 $C_2$  —— 液压发电机组系数;  $\Delta p$  —— 液压马达进出口压力差, Pa;  $R_l$  —— 发电机等效电阻负载,  $\Omega$ 。

文献[11]把液压发电机组工作模式分为恒电阻模式和恒转速模式,其中恒转速模式的负载为电

压负载。每一个直流母线电压都对应一个转速,三相不可控整流拓扑 Q 便可完成并网,如图 2a 所示,没有复杂的变换电路和控制电路,可靠性高。

变换器的可靠性高并不意味着其整流并网拓扑电路非不可控整流电路不可。为了提高能量转换效率,采用最高效率转化控制策略时,仍可采用可控整流拓扑结构,如 Boost 变换电路、PWM 整流电路等。当可控整流电路出现故障时,旁路的三相不可控整流电路仍可使波浪能发电装置直流并网继续运行,如图 2b 和图 2c 所示,只是能量转换效率有所降低,但不会出现停止运行故障。可见,直流纳电网下波能装置侧变换器的可靠性高。

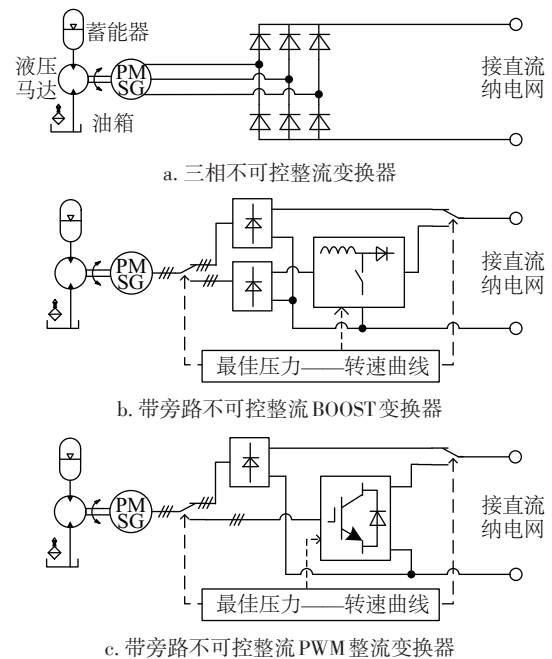


图2 波能装置整流变换器拓扑电路

Fig. 2 The topology circuit of the rectifiers in WECs

### 2.3 海底电缆直流传输效率高

海底电缆线外层具有钢丝铠装保护,甚至几层钢丝保护,交流电会在铠装层形成感应环流,除有功损耗外,增加了交流输电无功损耗。直流输电时,只有有功损耗,无无功损耗,传输显然效率更高。

### 2.4 海缆布放工艺要求较低,安全性高

波能装置群采用直流纳电网技术,由于装置侧变换器可靠性高,可以实现波能装置群并联后由一条海底电缆输送上岸,只需要布放一条海底电缆。若采用交流并网,往往将并网变换器安放在岸上的



变换站,需要布放多条海底电缆,布放工艺要求非常高,总线路长,成本高,安全性低。

## 2.5 允许直流纳电网内功率较大范围内周期波动

由于直流纳电网是在交流微电网的更小一级的电网,交流微电网一般都需要配置蓄电池等储能设备,因此,把交流微电网中的蓄电池安装在直流纳电网中并没有增加额外的费用。由于直流纳电网的直流电压是蓄电池组提供的,因此,在蓄电池允许的最大充放电功率范围内的功率波动,均不会影响直流纳电网逆变器的电能输出质量。直流纳电网逆变器的传输功率完全由交流微电网电力调度中心控制,其输入侧为蓄电池组,输出的电能质量高。直流纳电网功率的周期波动,完全不会影响交流微电网侧的电能质量、安全与稳定。

## 2.6 交流微电网故障不影响波能装置并网发电

由于海岛微电网电压源由逆变器提供,惯性小,容易因负载波动引起跳闸。海岛环境中,因潮湿和盐雾的侵蚀,电子元器件容易损坏,电力变换设备的可靠性大大降低。因此,海岛微电网故障频率是比较高的。若波能装置群采用交流并网,直接并入海岛交流微电网,那么微电网下所有分布式电源、各种变换器,或者用户引起微电网故障保护时,波能装置将无法并网发电。此时,如果波能装置不能切入内部电阻耗电模式,就会造成波能装置空载运行,危及到波能装置的安全。采用直流纳电网技术时,交流微电网中任何设备,包括纳电网逆变器,出现故障时,都不会引起纳电网蓄电池组电压消失,波能装置群仍然可以正常工作。只有在纳电网蓄电池组维护期间,波能装置群才切入内部负载运行。

## 2.7 直流纳电网路由效率高

在海岛微电网中,可再生能源所发电力可分为

两部分,一部分电力即时被用户直接消耗,称为即时消耗电力;另一部分多余电力储存到蓄电池组,直到发电功率小于用户用电功率时,才从蓄电池组逆变供电,称为延时消耗电力。

当可再生能源交流发电机组接入交流微电网时,即时消耗电力从发电机组出来后,经整流、逆变可到用户;延时消耗电力从发电机出来后,经整流、逆变、充电、储存、逆变才能到用户。当接入直流纳电网时,则完全不同,即时消耗电力的路由没有变化;延时消耗电力的路由则从发电机出来后,经整流、储存、逆变,便到用户。两种路由效率可计算如下:

1)交流微电网路由效率:

$$\eta_{im-AC} = \eta_r \cdot \eta_i \quad (3)$$

$$\eta_{de-AC} = \eta_r \cdot \eta_i \cdot \eta_{bc-MG} \cdot \eta_b \cdot \eta_{bi-MG} \quad (4)$$

2)直流纳电网路由效率:

$$\eta_{im-DC} = \eta_r \cdot \eta_i \quad (5)$$

$$\eta_{de-DC} = \eta_r \cdot \eta_b \cdot \eta_{bi-NG} \quad (6)$$

式中,  $\eta_{im-AC}$  ——即时消耗电力微电网路由效率;  
 $\eta_{de-DC}$  ——延时消耗电力微电网路由效率;  
 $\eta_{im-DC}$  ——即时消耗电力纳电网路由效率;  
 $\eta_{de-DC}$  ——延时消耗电力纳电网路由效率;  $\eta_r$  ——装置侧整流器效率;  $\eta_i$  ——装置侧逆变器效率;  
 $\eta_{bc-MG}$  ——微电网储能逆变器充电效率;  $\eta_b$  ——蓄电池组效率;  $\eta_{bi-MG}$  ——微电网储能逆变器逆变效率;  $\eta_{bi-NG}$  ——纳电网逆变器效率。

装置侧逆变器效率、纳电网逆变器效率、微电网中的储能逆变器的充电效率以及其逆变效率是基本相同的。根据各种变换器的实际效率,可以计算出即时消耗电力和延时消耗电力的路由效率,如表1所示。从表中可以看出,即时消耗电力的路由效率在两种电网中是一致的;延时消耗电力的路由

表1 交流微电网与直流纳电网路由效率比较

Table 1 The comparison in routing efficiency of AC micro grid and DC nano grid

项 目	路由环节	总效率/%
即时消耗电力	交流微电网	整流、逆变
	直流纳电网	整流、逆变
延时消耗电力	交流微电网	整流、逆变、充电、蓄电池、逆变
	直流纳电网	整流、蓄电池、逆变
附 注		
路由环节	装置侧整流器	并网、储能、纳电网逆变器
效率/%	97	92
		85

效率则大不一样,其中,交流微电网的路由效率仅为 64.2%,直流纳电网的路由效率则达到 75.9%,提高了 11.7%。在没有改进任何设备的前提下,只从并网接入方式的改进就提高了 10% 以上的效率。

### 3 仿真实验

#### 3.1 仿真模型

液压蓄能式能量转换系统具有惯性小、可靠性高和稳定输出等优势,在波能装置中得到广泛应用<sup>[16,17]</sup>。如文献[11]所述,蓄能器已解除了液压能量转换系统输入与输出的耦合关系,所以,液压蓄能式波能装置的发电系统输出功率主要由蓄能器压力和发电机负载决定,与实时波况无关。波况决定的是液压发电系统输出能量,而不是实时功率。因此,波能装置群应用直流纳电网的仿真研究时,可以忽略实时波况对纳电网的影响,波能装置的能量转换系统可简化为图 2 的蓄能器、液压马达、油箱、永磁同步发电机组(PMSG)及其液压自治控制器等组成的液压发电系统。

波能装置侧变换器采用图 2a 的不可控整流电路,建立波能装置群应用直流纳电网的仿真模型如图 3 所示。

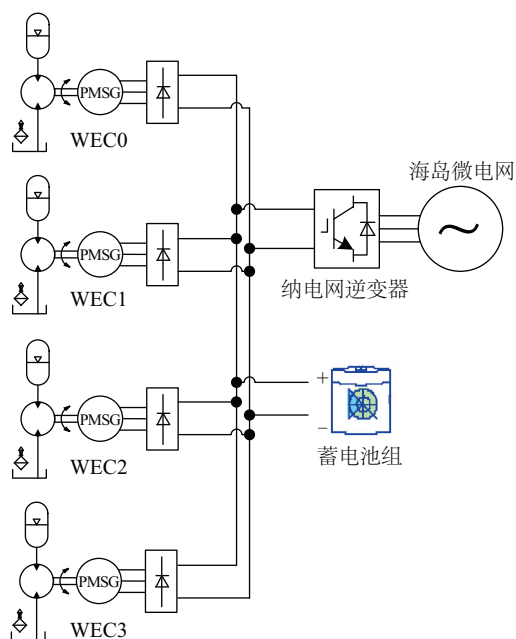


图3 波能装置群应用直流纳技术仿真模型

Fig. 3 The simulation model of WECs injecting to nano grid

系统参数为:蓄能器容积 400 L、初充压力 9 MPa、初充液压油 220 L、即液压发电机组启动压力为 20 MPa、液压马达排量 60 mL/r、永磁同步发电机组额定功率 30 kW、转速 1500 r/min、额定线电压 760 V、蓄电池容量 2400 Ah、额定电压 1000 V;纳电网逆变器外环为功率反馈控制;海岛微电网容量为 3 MVA、线电压为 380 V。

不同位置波况不完全相同,波能装置发电时间也不相同,因此,分别设定 4 台波能装置的发电机启动时间分别为 10、30、50 和 70 s,总仿真时长为 180 s。

#### 3.2 能量管理方式

文献[18,19]研究了微电网的能量管理系统通过对可控电源和可控负载的控制优化微电网的效率和成本。本文的纳电网逆变器相对于微电网而言就是一个可控电源,其向微电网输电功率由微电网的能量管理系统调度。仿真模型设定在第一台波浪能液压发电机组工作 10 s 后,微电网开始调度直流纳电网 40 kW 的电力,一直到 170 s 结束。直流纳电网技术将波能装置群周期波动的波浪能转化成可控电源,以近似平均功率向微电网馈电。

#### 3.3 仿真结果与分析

仿真结果如图 4 所示。波能装置群中 4 台发电机组在直流纳电网中均能正常工作,独立对蓄电池充电,共同出力,互不影响。每台发电机组中蓄能器压力下降时,其发电功率在减小,但转速基本不变,约为 1475 r/min。蓄电池组的充放电功率( $P_b$ )就是 4 台波能装置液压发电机组的输出功率之和装置群总功率( $P_{WECs}$ ),减去纳电网逆变器的输出功率( $P_{inv}$ )。波能装置发电功率的阶跃输入,不会引起纳电网交流侧电压的变化。同时,纳电网逆变器的阶跃输出未影响波能装置发电机组的工况。波能装置的电能输入与纳电网逆变器的电能输出只会引起蓄电池组电压的波动。

仿真模型中,波能装置的整流变换器只采用了不可控整流拓扑。实验表明,在直流纳电网技术中,采用不可控整流电路便可使各波能装置独立对蓄电池充电,互不影响,共同出力,解决了波能装置群的并网难题,该技术还具有可靠性高和效率高的特点,可以直接应用到实况波能装置中。

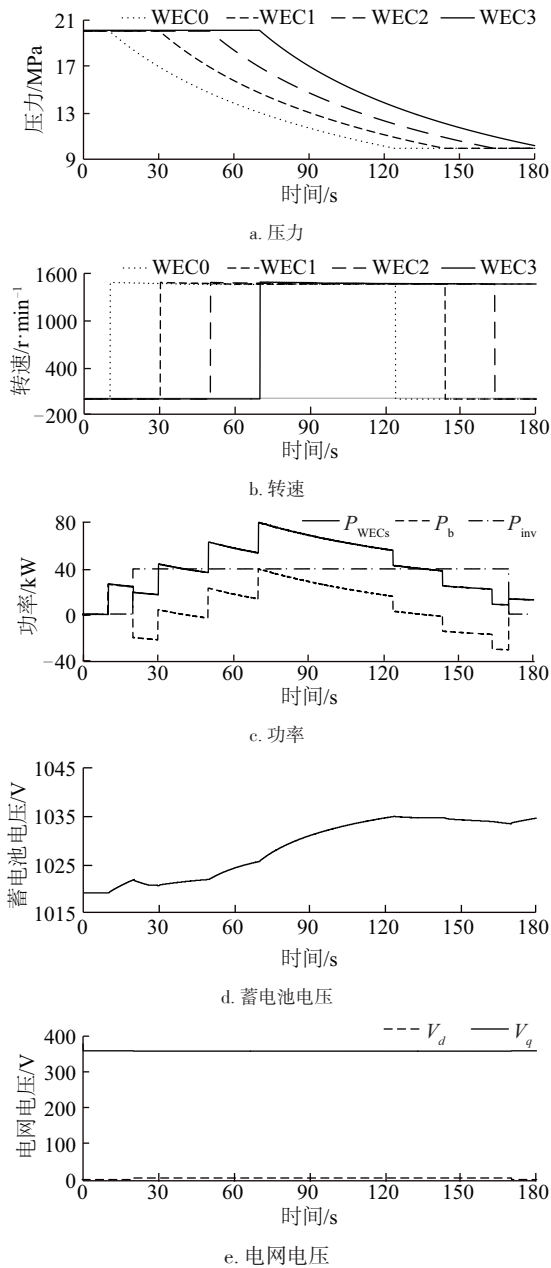


图4 仿真结果

Fig. 4 The simulation results

### 5 应用实例

2008年,中国科学院广州能源研究所在广东省担杆岛建立了海岛独立能源系统,采用9台风力发电机组与1台波能装置直流并网,蓄电池组容量为1800 Ah/246 V。通过1台三相组合式逆变器为全岛居民提供了稳定的、高质量电能。多年的运行结果展现了直流纳电网的可靠性和优势。

2013年,中国科学院广州能源研究所和珠海兴

业新能源科技有限公司共同研建了广东省大万山岛可再生能源分布式独立电力系统。该系统包括了8组分布式电源,组成共有300 kW的波浪能、100 kW的风能和560 kW的太阳能,如图5所示。其中,300 kW波能装置群与100 kW的风力发电机组在直流纳电网中并网。纳电网直流母线由2400 Ah/500 V防酸隔爆型铅酸蓄电池组提供。采用不可控整流设备将波能装置群的多台液压蓄能发电机组并联输出,由1条海底电缆送电上岸,直接并入直流纳电网中。该直流纳电网系统以2013年6月投入运行以来,稳定运行。尽管直流纳电网中发电功率波动较大,微电网始终能够为海岛居民提供高质量电能。截止2014年底,微电网累计发生过四次停电事故,但是纳电网仍然正常运行,纳电网中各分布式电源正常发电,此时全部电能储存在蓄电池,均为延时消耗电力。

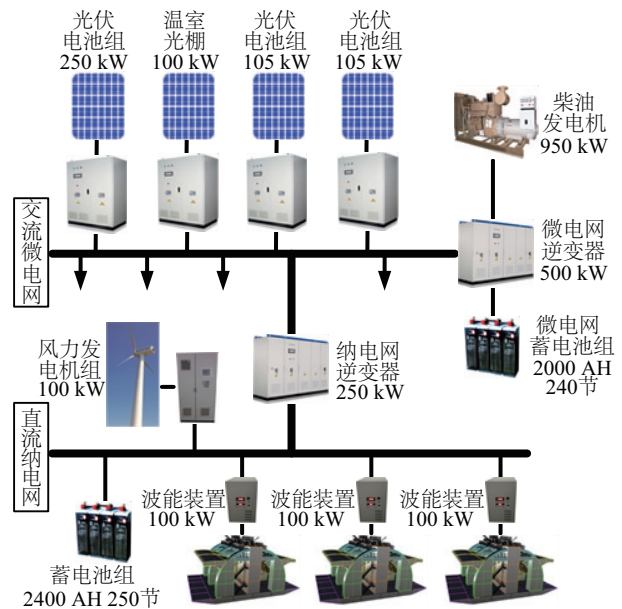


图5 大万山岛可再生能源分布式独立电力系统结构图

Fig. 5 The schematics of renewable energy distributed power generation system in Dawanshan island

### 6 结论

为了解决波能装置群的电力合并、电力输送和为海岛居民提供高质量电能等课题,提出了直流纳电网技术。波能装置群采用直流并网方式,装置侧变换器稳定可靠。实现波能装置群海上并联,由一条海底电缆送电上岸,电缆成本低,施工容易,直流

传输效率高。由于配置了纳电网蓄电池,提高了可再生能源发电效率,保证了海岛微电网的电能质量。直流纳电网技术在波能装置群并网中的应用,可以推广到其他可再生能源的开发应用中,特别是海岛离网型微电网设计。直流纳电网技术即将应用到大万山岛波浪能发电场的示范区和测试区。直流纳电网将在波浪能发电场、可再生能源分布式发电以及解决海岛微电网等领域中发挥作用。

### [参考文献]

- [1] Clément A, McCullen P, Falcão A, et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, 6(5): 405—431.
- [2] Rhinefrank K, Agamloh E B, Von Jouanne A, et al. Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy [J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(9): 1279—1298.
- [3] Salter S H. Wave power [J]. *Nature*, 1974, 249(5459): 720—724.
- [4] Kraemer D R B, McCormick M E, Ohl C O G. Comparison of experimental and theoretical results of the motions of a Mc Cabe wave pump [A]. 4th European Wave Energy Conference [C], Aalborg, Denmark, 2000, 56—62.
- [5] 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.
- [6] Falnes J, Lillebekken P M. Budal's latching controlled-buoy type wave-power plant [A]. 5th European Wave Energy Conference [C], Cork, Irish Munster, 2003, 17—20.
- [7] 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.
- [8] De O. Falcão A F. Wave energy utilization: A review of the technologies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(3): 899—918.
- [9] 张文喜, 叶家玮. 摆式波浪能发电技术研究 [J]. *广东造船*, 2011, (1): 20—22.
- [9] Zhang Wenxi, Ye Jiawei. Research overview on pendulum wave power generation technology [J]. *Guangdong Shipbuilding*, 2011, (1): 20—22.
- [10] You Yage, Sheng Songwei, Wu Bijun, et al. Wave energy technology in China [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2012, 370(A): 472—480.
- [11] 王坤林, 田联房, 王孝洪, 等. 液压蓄能式波浪能装置发电系统的特性 [J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2014, 42(6): 25—31.
- [11] Wang Kunlin, Tian Lianfang, Wang Xiaohong, et al. Characteristics of power generation system with hydraulic energy-storage wave energy converter [J]. *Journal of south China university of technology: Natural Science Edition*, 2014, 42(6): 25—31.
- [12] European Marine Energy Centre (EMEC). Provision of wave and tidal testing. [M/OL]. <http://www.emec.org.uk/services/provision-of-wave-and-tidal-testing/> last retrieved 2015/01.
- [13] Hatziargyriou N, Asano H, Irvani R, et al. Microgrids [J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2007, 5(4): 78—94.
- [14] 张炳达, 罗彬, 张洁华. 基于正序基波电压合成相量的发电机并网条件核算法 [J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(16): 52—56.
- [14] Zhang Bingda, Luo Bin, Zhang Jiehua. The condition verification of generator paralleling based on the synthetic phasor of positive sequence fundamental voltage [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(16): 52—56.
- [15] 曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(24): 1—12.
- [15] Zeng Zheng, Zhao Rongxiang, Tang Shengqing, et al. An overview on advanced grid-connected inverters used for decentralized renewable energy resources [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(24): 1—12.
- [16] 盛松伟, 游亚戈, 张亚群, 等. 漂浮式波浪能装置能量转换系统研究 [J]. *机械工程学报*, 2012, 48(24): 141—146.
- [16] Sheng Songwei, You Yage, Zhang Yaqun, et al. Research on power take-off system of floating wave power device [J]. *Journal of mechanical engineering*, 2012, 48(24): 141—146.
- [17] Zhang Dahai, Li Wei, Lin Yonggang, et al. An overview of hydraulic systems in wave energy application in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(7): 4522—4526.
- [18] 王坤林, 游亚戈, 张亚群. 海岛可再生独立能源电站能量管理系统 [J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(14):



- 1—5.
- [18] Wang Kunlin, You Yage, Zhang Yaqun. Energy management system of renewable stand-alone energy power generation system in an island[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 1—5.
- [19] Bracale A, Caramia P, Carpinelli G, et al. Optimal control strategy of a DC micro grid[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, 67: 25—38.

## THE APPLICATION OF DC NANO GRID FOR WECs

Wang Kunlin<sup>1,2</sup>, You Yage<sup>2</sup>, Wang Xiaohong<sup>1</sup>, Tian Lianfang<sup>1</sup>

(1. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China )

**Abstract:** Based on the research of the characteristics of hydraulic power take-off system, a DC nano grid supported by a group of batteries is proposed with the advantages of DC parallel connection and transmission, acceptance for the cycle fluctuating wave power, high efficiency, high reliability and high power quality. The nano grid batteries decouples the power of WECs and the power of nano grid inverter, and the generator load of WECs can be simplified by the nano grid batteries, and the nano grid batteries can be changed by WECs independently without influence to each other. The nano grid inverter provides stabilizing and high quality and controllable power for the users in island. The simulation and application results has proved the feasibility, the reliability and the advantages.

**Keywords:** DC nano grid; micro grid; converter; WECs; island