

# 船岸一体化系统中岸电无缝接入与功率优化方法

曹亮<sup>1</sup>, 房鑫炎<sup>1</sup>, 罗文斌<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240;

2. 上海国际港务集团, 上海 200080)

**摘要:**针对船舶岸电一体化系统岸电接入时, 船岸两侧电力系统的差异以及船舶负荷无缝切换的需求, 提出了基于并网过程多时段划分的船舶岸电并网功率波动平抑策略, 对合闸前、合闸时、合闸后、柴油发电机退出运行时间段分别提出针对性的控制策略, 并结合综合能量管理系统(IEMS)的协同管理条件抑制在并网及负荷转供过程中出现的功率波动值, 保护船岸两侧配、用电设备。仿真结果表明, 所提策略能够实现岸船两侧电力系统的跟踪控制, 并在保证负荷不间断供电的前提下完成变频电源分时段控制模式之间的平滑切换, 达到了并网功率波动平抑的目的。

**关键词:**船舶岸电; 功率波动; 多时段划分; IEMS

**中图分类号:** TM 761

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.027

## 0 引言

船舶岸电技术采用岸上电源代替船舶辅机, 为船舶提供在港停泊期间的所有用电, 从而控制港区大气污染<sup>[1-2]</sup>。

船舶岸电一体化供电系统以多端电源异步互联方式运行, 因此船舶电网与岸电的并网过程往往伴随着极大的冲击功率波动, 可能对岸船两侧的电气设备正常运行造成影响甚至损坏设备并导致并网失败。

在微电网系统并网/孤岛运行模式切换控制策略的研究方面, 文献[3]提出一种综合的分布式电源(DG)无缝控制策略来实现并离网切换过程中的电压和频率限幅; 文献[4]提出了岸电并网过程中的改进下垂控制法, 对逆变电源加入类似于船舶发电机的一阶惯性环节以模拟船舶发电系统的惯性特征, 这种方法虽能避免并网时刻的冲击功率波动, 但由于下垂控制的控制目标存在稳态静差, 在船舶柴油发电机组退出运行后, 无法保证不同工况下供电电压和频率的稳定。同时, 目前此类研究大多集中在多机主从控制方式<sup>[5]</sup>基础上: 文献[6]改进了主从控制策略下的电压环调节器结构, 较好地解决了并离网切换过程中微电网母线电压的振荡和电流冲击等问题; 文献[7]提出了一种满足微电网孤岛/并网切换的虚拟同步发电机(VSG)技术, 实现微电网孤岛/并网运行模式间的无缝切换; 文献[8]提出基于分层控制和电压频率恢复控制的微电网预同步控制方法, 实现了微电网系统由孤岛运行模式向联网运行模式的平滑切换。但这些研究大多建立在双运行模式下的单一控制算法上, 在岸电系统中应用存在局限性, 同时岸电接入过程涉及并、离网多个环节, 船舶柴油发电机组和岸基变频电源之间不是单一的对等或主从关系。

为了尽量降低并网瞬间产生的冲击功率, 保护变频电源和船体设备, 基于上述理论存在的不足和局限性, 本文提出了一种适用于船舶岸电系统的岸电无缝接入与功率优化方法, 根据对并网过程按时序的多时段划分, 分别形成适用于不同并网环节的变频电源控制方式和功率波动平抑策略。通过该多时段的针对性策略, 结合岸电综合能量管理系统 IEMS(Integrated Energy Management System)提供的关键功能硬件平台支撑作用, 在大幅降低并网合闸时刻冲击功率波动的同时, 保证了柴油发电机组退出运行后的岸电供电稳定性。

## 1 IEMS 在岸电并网过程中的功能构成

IEMS 可以认为是第四代能量管理系统 EMS(Energy Management System), 其能够解决多能流网络的最优控制问题, 即通过多能互补、源网荷协同实现安全供能前提下的效益最大化。船舶岸电系统是一个庞大的多层级电力系统网络, 其电力的发、输、配、用各环节将衍生划分出多个船舶岸电子系统, 而岸电并网作为其中的关键环节, 直接涉及多个子系统间的信息协调与调控决策优化需求。在船舶岸电并网过程中, 依托 IEMS 完整、高性能的准稳态实时数据采集和监控功能, 并利用系统软件支撑平台提供的相应服务, 将并网过程中涉及的多流通信数据(采样数据、调控指令、操作信息、智能分析等)进行统一调控处理, 并通过遥控/遥调信号下发给系统设备(主要是变频电源)执行。

IEMS 在岸电并网过程中的功能构成如附录中的图 A1 所示。在并网前通过感知岸船两侧相关电气量指导合闸控制时间, 并网时进行多端实时功率需求分析以制定变频电源控制与船舶柴油发电机组调度策略, 通过设备间数据通信与智能化分析软件形成相关运行参数调节手段, 在岸船并网与负

荷无缝转移过程中提供软硬件支撑平台,对于并网过程的顺利进行具有重要意义。

## 2 多时段控制的并网功率波动平抑策略

基于船舶岸电并网过程,将并网全过程根据时段划分为合闸前、合闸时、合闸后以及柴油发电机组退运后 4 个时段,在各时段对变频电源采取对应的控制策略,以实现并网时的功率波动平抑和供电回路的无缝切换。多时段控制的并网功率波动平抑策略具体思路如下:首先,在并网合闸前,通过带有幅相跟踪的预同步控制策略调节变频电源输出电压幅值、相位与船侧电网电压尽量一致;然后,在合闸时刻将变频电源由带有惯性环节的恒压恒频控制模式切换为阶跃补偿的下垂控制模式,弥补合闸瞬间控制模式的切换带来的反馈环节调节量突变;在合闸及变频电源控制模式切换后,采用功率逐级切换控制策略,逐级增加逆变电源输出功率设定量,这样既可以使岸电接入过程平滑过渡,又体现了船舶柴油发电机组逐级退出运行的实际工况;最后,在柴油发电机组退运后,变频电源控制模式切换为合闸前带有惯性环节的恒压恒频模式以维持岸电供电电压的电压、频率稳定性。

### 2.1 带有幅相跟踪的合闸前预同步控制

在船舶岸电并网前,船岸两侧电压量应满足幅值、相位和频率接近相等。普通的准同期并网准则为调节发电机并网条件,待其负荷有并网要求时并入电网,但在船舶岸电系统中往往采用调节岸侧电源输出与船侧电网一致来达到并网要求,采用这种“岸并船”并网方式的原因是当前变频电源的容量所限,码头供电方式往往采用“一对一”的供电方式,“岸并船”并网方式不仅可以提高并网速度和准确性,便于系统控制,也能够降低对船舶设备的要求,极大地提高了岸电码头的可连接船舶种类和并网冗余度。

本节提出一种能够在并网时刻前实现岸侧电压跟踪船侧电压幅值和相位信息以达到并网条件的预同步控制策略。首先采集船岸两侧电压信息量并进行对比,通过幅值锁存和锁相环(PLL)分别形成控制岸电变频电源输出电压的幅值控制器和相位控制器。基于 IEMS 实现变频电源输出电压对船侧电网电压的跟踪控制,在合闸点前尽可能减少两侧电压的幅值差和相位差,从而减少合闸时刻的冲击功率波动值。并网预同步策略控制框图如图 1 所示,具体实现方式和步骤分别阐述如下。

**a. 幅值控制器的实现。**在并网合闸前,采集变频电源侧空载电压  $U_{2a}$ 、 $U_{2b}$ 、 $U_{2c}$  中任一相的幅值和船舶电网侧运行电压  $U_{1a}$ 、 $U_{1b}$ 、 $U_{1c}$  中任一相的幅值,通过比例-积分(PI)控制器不断缩小两者的差值,并

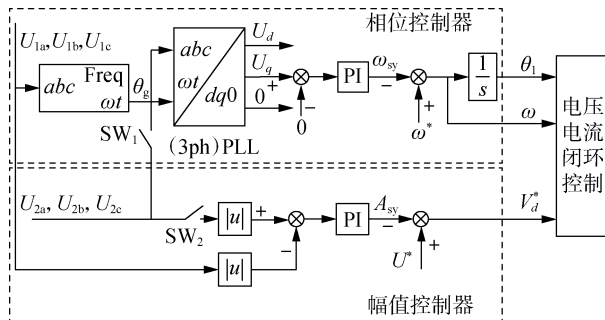


图 1 变频电源预同步过程中的相位控制器和幅值控制器

Fig.1 Phase-controller and amplitude-controller in presynchronization process of variable frequency power supply

将该差值计入设定的电压参考值  $U^*$  中,进而将该幅值误差的修正参考电压  $V_d^*$  作为后续电压电流双闭环的参考电压输入给定值,从而不断修正变频电源输出电压幅值。在进行合闸操作前,通过幅值控制器的幅值调节作用实现岸电侧变频电源输出电压幅值对船侧电网电压幅值的跟踪控制,尽可能降低合闸时刻两侧的幅值差。

**b. 相位控制器的实现。**在进行并网合闸前,基于锁相环技术,采集变频电源侧空载电压  $U_c$  和船舶电网侧运行电压相角  $\theta_g$ ,以  $\theta_g$  为输入角对  $U_c$  进行旋转坐标变换,电压相量关系见附录中的图 A2。为了达到缩小并网两侧电压相位差的目的,应控制  $\theta_g$  与变频电源空载电压  $U_c$  的运行相角  $\theta_c$  相等。由图 A2 可知,只需控制图中  $\Delta\theta=0$ ,即控制旋转坐标系中的  $U_c$  在  $q$  轴上的投影分量等于 0<sup>[9]</sup>,即可实现  $\theta_g = \theta_c$ 。故在图 1 中的相位控制器中,通过 PI 控制器持续将  $q$  轴分量  $U_{cq}$  向零参考调节。由于相位是角频率的积分,因此  $\theta_g$  和  $\theta_c$  的差值可以视作关于角频率的差值,并将该差值计入设定的角频率参考值中,进而将该误差的修正参考角频率作为后续电压电流双闭环的参考角频率给定值,从而不断修正变频电源输出电压相位值。值得注意的是,当  $\Delta\theta>0$  时,表示变频电源输出电压相位角超前于船侧电网电压相位,此时应该降低双闭环反馈的角频率给定值,因此该差值应作为削减量计入修正环节。在进行合闸操作前,通过相位控制器的相位调节作用可实现岸电侧变频电源输出电压相位对船侧电网电压相位的跟踪控制,尽可能降低合闸时刻的船岸两侧相位差。

### 2.2 合闸时的模式切换与阶跃补偿环节

#### 2.2.1 合闸前带有惯性环节的恒压恒频模式

在岸船并网前,变频电源处于空载状态下,此时调控目的为设定参考值的电压输出以等待预同步及合闸信号。为了增强系统惯性,使电压输入变化具有缓冲性,考虑在电压电流双闭环的电压输入参考值前加入一阶惯性环节。合闸前带有惯性环节的恒压恒频控制模式如图 2 所示。

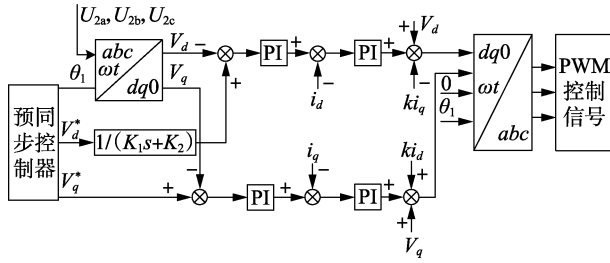


图2 合闸前的恒压恒频控制框图

Fig.2 Block diagram of constant voltage and constant frequency control before closing

### 2.2.2 合闸后的功率下垂模式

合闸后,变频电源调控的目的为输出给定参考功率值,为此通过推导船舶岸电系统功率控制模型,得到其下垂特性及参数设定方法<sup>[10-11]</sup>,船舶岸电系统等效电路及相应电气量如图3所示。图中,  $U_c$ 、 $U_g$  分别为岸侧变频电源输出电压和船侧船舶电网电压;  $Z_g$ 、 $\theta_z$  分别为两端连接线路阻抗的幅值和相角。

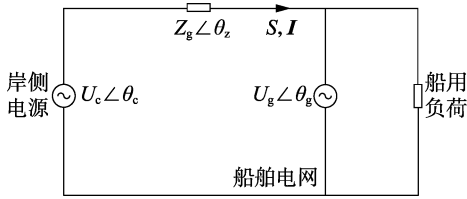


图3 船舶岸电系统等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of ship shore power system

$$I = \frac{U_c \angle \theta_c - U_g \angle \theta_g}{Z_g \angle \theta_z} \quad (1)$$

$$S = U_c I^* = P + jQ = \frac{U_c^2 \cos \theta_z - U_c U_g \cos(\theta_c + \theta_z - \theta_g)}{Z_g} + j \frac{U_c^2 \sin \theta_z - U_c U_g \sin(\theta_c + \theta_z - \theta_g)}{Z_g} \quad (2)$$

由于实际岸电系统中的连接线路主要呈感性且两侧电压相位差很小,故做如下近似处理:

$$\begin{cases} \theta_z \approx 90^\circ \\ \theta_c \approx \theta_g \end{cases} \quad (3)$$

则输出的有功、无功功率可表示为:

$$\begin{cases} P = \frac{U_c U_g (\theta_c - \theta_g)}{Z_g} \\ Q = \frac{U_c (U_c - U_g)}{Z_g} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知  $P$ 、 $Q$  分别主要受两侧电压相角差和电压幅值差的影响<sup>[10]</sup>,因此可以通过控制输出电压相角来控制变频电源输出的有功功率,通过控制输出电压幅值来控制输出无功功率,又因为输出电压相角是角频率的积分,因此可将输出电压相角的控制转化为对输出角频率的控制。由此形

成下垂特性如式(5)所示。

$$\begin{cases} \omega = \omega_n - m(P - P_n) \\ E = E_n - n(Q - Q_n) \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\omega_n$ 、 $E_n$ 、 $P_n$ 、 $Q_n$  分别为变频电源输出的额定角频率、额定电压、额定有功功率和额定无功功率;  $\omega$ 、 $E$ 、 $P$ 、 $Q$  分别为变频电源的实际输出角频率、电压、有功功率和无功功率;  $m$ 、 $n$  分别为有功-频率下垂系数和无功-电压下垂系数。

基于上述岸电系统功率控制的下垂特性,合闸后的下垂控制结构框图如图4所示。

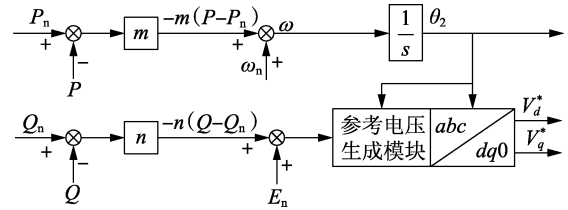


图4 合闸后的下垂控制框图

Fig.4 Block diagram of droop control after closing

### 2.2.3 合闸时的模式切换与阶跃补偿控制

合闸瞬间控制模式的切换引起电压电流双闭环反馈中旋转坐标变换参考相位输入的阶跃变化,这势必导致该时刻所采集的变频电源输出电压在旋转坐标变换后交直轴分量的突变,从而引起双闭环反馈环节的调节量突变,因此造成变频电源输出电压和电流的大幅波动,这也是合闸时刻冲击功率的主要来源。因此在合闸时刻,将变频电源运行方式由带有惯性环节的恒压恒频模式切换为计及阶跃补偿的下垂模式,切换思路与如图5所示。

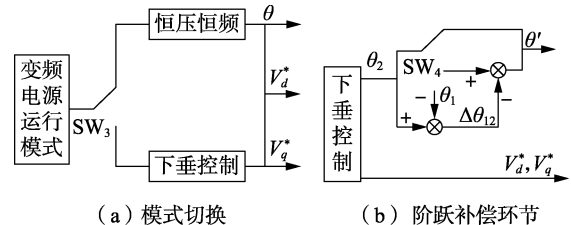


图5 合闸时的模式切换与阶跃补偿控制框图

Fig.5 Control block diagram of mode switching and step compensation when closing

图5(a)中,  $\theta$  为变频电源模式切换前后的输出相位参考值;  $V_d^*$ 、 $V_q^*$  分别为交、直轴电压参考值; 开关  $SW_3$  由合闸时刻的合闸信号控制。图5(b)中,  $\theta_1$  为预同步后逆变器输出电压相位,代表恒压恒频控制模式下输入到双闭环反馈中的参考相位值,  $\theta_2$  为下垂控制中的输出相位,  $\Delta\theta_{12}$  为合闸时刻两者之差  $\theta_2 - \theta_1$ , 即相位阶跃补偿值;  $\theta'$  为下垂控制中经过阶跃补偿修正后的相位参考值; 开关  $SW_4$  由合闸时刻的合闸信号控制。

### 2.3 合闸后的功率逐级切换控制

在变频电源输出侧与船舶电网侧成功并网后,

为了使岸电接入平滑过渡,同时考虑船舶柴油发电机组逐级退出运行的实际工况流程,本文采用合闸后变频电源功率逐级切换的控制模式。通过输入给定与时间进程的关联合,建立功率下垂控制模式中的功率目标值及下垂系数的动态选取模型,在功率级切换过渡期内保持控制参数最优,从而在并网合闸后,使岸电支撑功率从 0 开始逐级增加至设定目标值,平稳、可靠地实现负荷转移和供电回路切换。

下面以功率下垂控制模式中的  $P$ - $f$  下垂特性为例,构建变频电源有功功率目标值动态调整模型及相应的下垂系数选取模型。

#### a. 有功功率目标值动态调整。

$$P_i = \begin{cases} \frac{P_N}{N} & t_0 \leq t < t_1 \\ \vdots & \\ i \frac{P_N}{N} & t_{i-1} \leq t < t_i \\ \vdots & \\ P_N & t_{N-1} \leq t \leq t_N \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $t_0, t_1, \dots, t_N$  为将功率逐级切换控制周期按切换级数  $N$  分成的  $N+1$  个时刻点,共有  $N$  个切换子周期;  $P_i$  为第  $i$  个切换子周期内功率下垂控制中的有功功率目标值;  $P_N$  为船舶柴油发电机组退出运行后变频电源输出的有功功率额定值。

#### b. 下垂系数动态选取。

由式(6)及文献[12]推导的下垂系数方程可得在功率逐级切换中的动态下垂系数为:

$$m_i = \frac{\omega_n - \omega_{\min}}{P_{\max} - P_i} \quad (7)$$

其中,  $m_i$  为第  $i$  个切换子周期内的有功下垂系数;  $P_{\max}$  为在  $P$ - $f$  下垂特性中变频电源允许输出的最大有功功率值;  $\omega_{\min}$  为变频电源输出  $P_{\max}$  情况下允许的最小角频率。

### 2.4 柴油发电机退出运行后的控制模式切换

当功率逐级切换至一设定值后,船舶柴油发电机组可通过 IEMS 指令断开连接开关从而停止对负荷供电并退出运行。此时船上负荷仅由岸电通过变频电源进行供电,为了保证该微电网的电压和频率稳定性,变频电源的控制模式应从下垂控制模式切换为带惯性环节的恒压恒频控制模式,结合变频电源参数寻优法则,保证在不同工况及扰动下变频电源供电性能的稳定和可靠性。

## 3 仿真验证

为验证本文所提多时段并网功率波动平抑策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 平台上搭建岸电一体化仿真模型,通过对各时段仿真结果进行对比分析得出结论。具体仿真模型参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型具体参数

Table 1 Specific parameters of simulation model

| 参数       | 取值           | 参数     | 取值            |
|----------|--------------|--------|---------------|
| 变频电源输入电压 | 10 kV/50 Hz  | 额定负荷   | 3 MW/0.2 Mvar |
| 变频电源输出电压 | 6.6 kV/60 Hz | 载波频率   | 10 kHz        |
| 变频电源容量   | 16 MW        | 船舶电网电压 | 6.6 kV/60 Hz  |

仿真过程如下:0~0.2 s 时段为岸电变频电源启动及船舶电网单独供电运行;0.2~0.6 s 时段为带有幅相跟踪的并网预同步过程;0.6 s 时刻,岸电合闸与船侧并网,变频电源控制模式切换,初始第 1 级目标功率为 0.75 MW;1 s 时刻,进行第 2 级功率切换,变频电源输出功率目标值为 1.5 MW;1.5 s 时刻,进行第 3 级功率切换,变频电源输出功率目标值为 2.25 MW;2 s 时刻,进行第 4 级功率切换,变频电源输出功率目标值为 3 MW;4 s 时刻,柴油发电机切机退出运行,完全岸电供电。基于本文建立的多时段功率平抑策略的完整仿真波形图如图 6 所示。下文将具体阐述各时段的对比仿真结果。

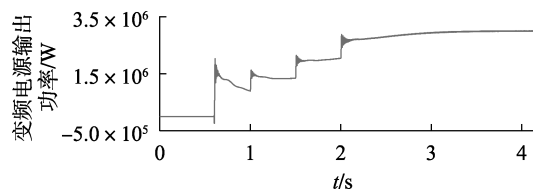


图 6 基于多时段功率平抑策略的仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms based on multi-period power stabilization strategy

### 3.1 合闸前预同步控制仿真分析

合闸前通过带有幅值控制器和相位控制器的并网预同步过程实现变频电源输出电压对船侧电网电压的跟踪控制。控制其他环节策略相同,分别在有、无并网预同步过程的情况下进行仿真模拟,合闸前后两侧 A 相电压波形及频谱分析如图 7 所示,功率波动情况如图 8 所示。

图 7(a)所示波形表明,在 0.6 s (合闸时刻)前,船舶电网电压和变频电源电压存在较大幅值差(约为 90 V)和相位差,在 0.6 s 合闸后并网点电压波动较大且不能回归至稳态设定值;由图 7(c)所示的频谱分析结果可知,电压总谐波失真度(THD)达到 31.86%。而由图 7(b)可见,经过预同步控制后,两侧电压在 0.6 s 时已经基本重合,远超并网要求,0.6 s 后的并网点电压基本无波动,无缝过渡到下一环节的设定目标值;由图 7(d)频谱分析可知,经过预同步控制后的电压总谐波失真度仅为 2.75%。

由图 8 可见,在 0.6 s 合闸后,无预同步控制的并网过程在合闸瞬间即出现较大功率波动,最大波动值超出变频电源额定输出功率的 200%,且在后续的模式切换调节过程中,输出功率波动值不断增加,无法收敛到稳态值;而有预同步控制的并网过程仅

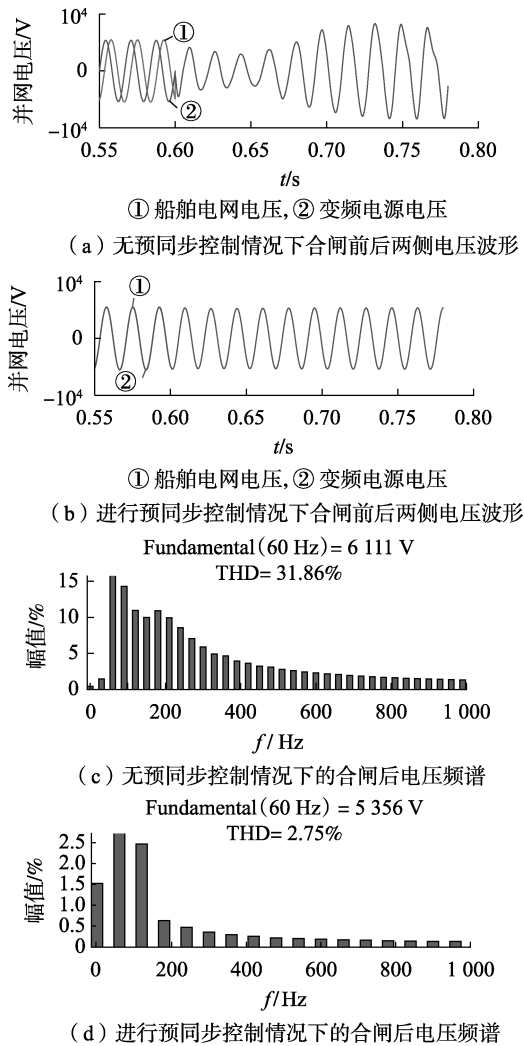


图7 合闸前后两侧 A 相电压波形及频谱分析

Fig.7 Voltage waveforms and spectrum analysis of phase A at both sides before and after closing, with and without presynchronization process

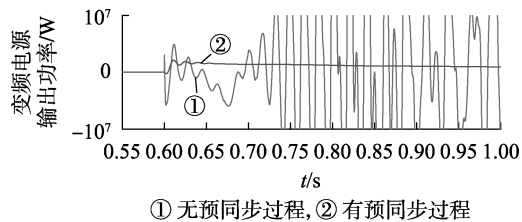


图8 合闸后的功率波动情况

Fig.8 Power fluctuation after closing

在并网初期由于变频电源控制模式的切换有较小波动,产生的最大波动值仅为额定功率值的8%。由此表明,带有幅相跟踪控制的并网预同步过程能起到抑制并网功率波动的作用。

### 3.2 合闸时模式切换与阶跃补偿仿真分析

在0.6 s时刻合闸的瞬间,变频电源控制模式由上文所述的恒压恒频模式切换为下垂模式,同时为了修正由模式切换带来的双闭环输入相位参考值突变问题,引入阶跃补偿参数。在合闸时刻,分别检测

恒压恒频模式的输出相位信号 $\theta_1$ 与下垂模式的输出相位信号 $\theta_2$ ,获得相位阶跃补偿参数 $\Delta\theta_{12}$ 。在本例仿真中,2种控制模式切换瞬间的输出相位信号如图9所示。

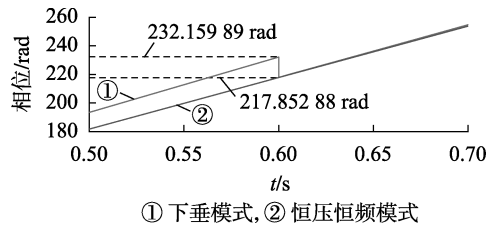


图9 控制模式切换瞬间输出相位信号

Fig.9 Phase signal output at moment of control mode switching

由图9所示输出相位波形可知:

$$\begin{cases} \theta_1 \approx 217.853 \text{ rad} \\ \theta_2 \approx 232.160 \text{ rad} \end{cases} \quad (8)$$

则阶跃补偿参数为:

$$\Delta\theta_{12} = \theta_2 - \theta_1 \approx 14.307 \text{ (rad)} \quad (9)$$

控制其他环节策略相同,分别对有、无该阶跃补偿值的情况进行仿真模拟,合闸后的并网点功率波形如图10所示。

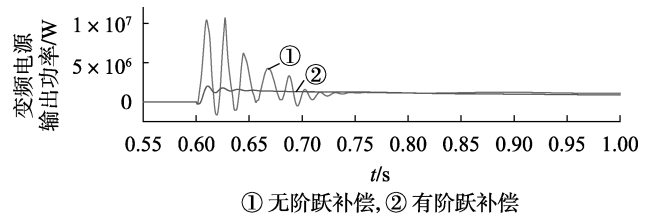


图10 合闸后的并网点功率波形

Fig.10 Waveforms of PCC power after closing

由图10可见,在0.6 s时刻进行合闸后,无阶跃补偿环节的并网过程在合闸后出现较大功率波动,最大波动值超出变频电源额定输出功率的350%,在后续的模式切换调节过程中输出功率波动值呈减小趋势,大约在0.75 s时刻(即波动周期为0.15 s)收敛至稳态目标值;而有阶跃补偿环节的并网过程波动值较小,并且大约在0.65 s时刻(即波动周期仅为0.05 s)即收敛到稳态目标值。由此表明,模式切换过程中加入阶跃补偿环节能起到抑制并网功率波动的作用。

### 3.3 合闸后功率逐级切换仿真分析

对进行合闸及模式切换后,变频电源输出功率目标值的逐级切换进行仿真。与直接设定额定输出功率值的仿真工况进行对比,保持其他环节控制策略相同,仿真结果如图11所示。

由图11可见,在直接设定额定输出功率值时,在0.6 s合闸瞬间即出现较大功率波动,最大波动值超出变频电源额定输出功率的50%;而采取功率逐

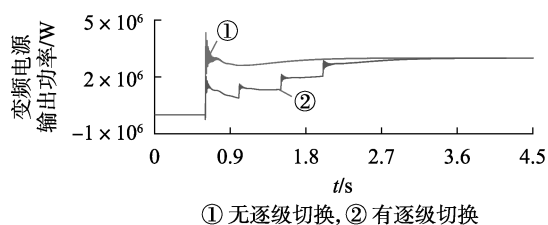


图11 合闸后功率逐级切换控制功率波形

Fig.11 Power waveforms of step-by-step power switching control after closing

级切换控制后,最大功率波动值为变频电源额定输出功率的8%,功率的逐级增加过程均匀平滑。需要指出的是,在岸电接入过程中,应对超调量与响应时间按优先级赋予不同权重进而对2种方式进行对比,为切合实际工况及柴油发电机分级退出运行需求,超调量因子具有更高的优先级,故功率逐级切换控制因其较小的超调量更具优势。

## 4 结论

传统的岸电接入过程往往伴随着极大的冲击功率波动导致并网失败、保护动作甚至损毁相关电气设备。考虑到实际船舶岸电系统多端异步互联特性和负荷供电需求,研究具有平滑功率波动的岸电并网策略将能产生重要的现实意义和价值。

根据本文所做工作,可以得出以下结论:

(1)并网预同步过程能降低合闸时刻岸船两侧电压差,从而减少并网波动功率;

(2)对参考相位的阶跃补偿环节能够实现并网后变频电源控制模式的无缝衔接,从而解决造成波动功率的最大源头;

(3)输出功率目标值的分段切换大幅减缓了单次额定值切换模式下的调节压力,不仅降低了合闸后的功率波动值,而且符合实际工况中的运行需求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] PAUL D, PETERSON K, CHAVDARIAN P. Designing cold ironing power systems: electrical safety during ship berthing[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2014(20): 24-32.
- [2] 吴振飞, 叶小松, 邢鸣. 浅谈船舶岸电关键技术[J]. 电气应用, 2013, 32(6): 22-26.  
WU Zhenfei, YE Xiaosong, XING Ming. Discussion on the key technology of ship shore power[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(6): 22-26.
- [3] 钟诚, 魏来, 严干贵, 等. 考虑非计划孤岛的分布式电源无缝切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 129-138.  
ZHONG Cheng, WEI Lai, YAN Gangui, et al. A seamless transfer control strategy of distributed generation with considering unintentional islands[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,

2017, 32(9): 129-138.

- [4] 侯珏. 船舶与岸电并网控制策略研究[J]. 船舶工程, 2017, 39(1): 86-90.  
HOU Jue. Research on grid connected control strategy of ship and shore power[J]. Ship Engineering, 2017, 39(1): 86-90.
- [5] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [6] 陈杰, 陈新, 冯志阳, 等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3089-3097.  
CHEN Jie, CHEN Xin, FENG Zhiyang, et al. A control strategy of seamless transfer between grid-connected and islanding operation for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3089-3097.
- [7] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 基于虚拟同步发电机的微网运行模式无缝切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 16-22.  
SHI Rongliang, ZHANG Xing, XU Haizhen, et al. Seamless switching control strategy for microgrid operation modes based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 16-22.
- [8] 施永, 赖纪东, 苏建徽, 等. 微网系统运行模式平滑切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 85-91.  
SHI Yong, LAI Jidong, SU Jianhui, et al. Control strategy of seamless transfer for microgrid operation mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 85-91.
- [9] 张中锋. 微网逆变器的下垂控制策略研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
ZHANG Zhongfeng. Research on droop control strategy for microgrid inverter[J]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [10] YANG M J, ZHUO F, WANG X W. Research of seamless transfer control strategy of microgrid system[C]//8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. Jeju, South Korea: IEEE, 2011: 2059-2066.
- [11] BORUP U, BLAABJERG F, ENJETI P N. Sharing of nonlinear load in parallel-connected three-phase converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(6): 1817-1823.
- [12] POGAKU N, PRODANOVIC M, GREEN T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.

## 作者简介:



曹亮

曹亮(1994—),男,浙江湖州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化(E-mail: 576033717@qq.com);

房鑫炎(1963—),男,浙江绍兴人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护及系统安全(E-mail: xyfang2000@sjtu.edu.cn);

罗文斌(1975—),男,上海人,教授级高级工程师,博士,长期从事港口航运领域的科技创新工作。

## Seamless connection and power optimization of shore power in ship-shore integrated system

CAO Liang<sup>1</sup>, FANG Xinyan<sup>1</sup>, LUO Wenbin<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai International Port( Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

**Abstract:** Aiming at the difference between electric power system of shore and ship sides and the demand of seamless switching of ship load in the process of shore electricity accessing in the ship-shore integrated system, a suppression strategy of grid-connected power fluctuation in shore-to-ship power system is proposed based on the multi-period division of the grid-connected process. The target control strategies are respectively proposed for the period before closing, the moment of closing, the period after closing and the moment that diesel generators quit operation. Combining with the cooperative management conditions of IEMS( Integrated Energy Management System), the power fluctuation in the process of grid connection and load transfer is suppressed, and the distribution and electrical equipment on shore and ship sides are protected. The simulative results show that the proposed strategy can realize the tracking control of the electric power system on shore and ship sides and the smooth switching between multi-period control modes of the variable frequency power supply under the premise of ensuring uninterrupted power supply, and achieve the goal of smoothing the grid-connected power fluctuation.

**Key words:** ship-shore power; power fluctuation; multi-period division; IEMS

(上接第 178 页 continued from page 178)

## Fault section location method for single-phase grounding fault in distribution network based on ESMD

YIN Zhihua<sup>1</sup>, SUN Guoqiang<sup>1</sup>, DING Jianzhong<sup>2</sup>, LÜ Feng<sup>2</sup>, YUAN Haixing<sup>2</sup>, WEI Zhinong<sup>1</sup>

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 2. State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214061, China)

**Abstract:** Single-phase grounding fault in distribution network generates abundant electrical transient quantities in the system. Based on the characteristic that the magnitude of transient zero-sequence current at upstream of the fault point is much larger than that at the downstream of the fault point and normal line, the fault section location method based on ESMD( Extreme-point Symmetric Mode Decomposition) is proposed for distribution network. Based on line parameters of actual distribution network, a typical cable-line hybrid simulation model is established, with which, the transient zero-sequence current is decomposed by ESMD and the transient energy function is constructed. The transient energy function is used as an index to evaluate the magnitude of the transient zero-sequence current of each measurement point for fault section location. The simulative results show that the proposed method can extract fault features effectively, and has strong adaptability to various fault conditions, and each measurement point only needs to upload one transient energy value, which can effectively reduce communication requirements and save hardware investment costs.

**Key words:** distribution network; single-phase grounding fault; ESMD; fault section location

附录

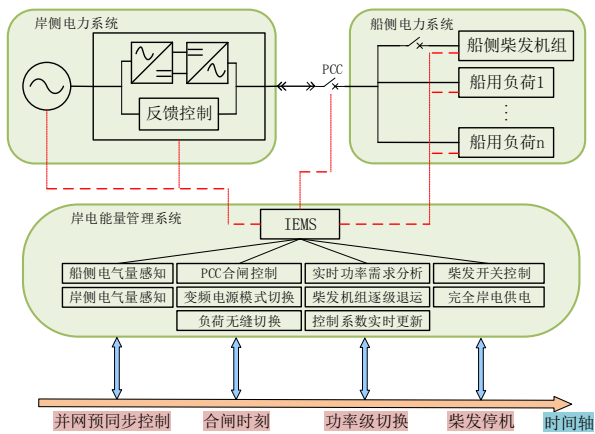


图 A1 IEMS 在岸电并网过程中的功能构成

Fig.A1 Functional composition of IEMS in process of shore power grid connection

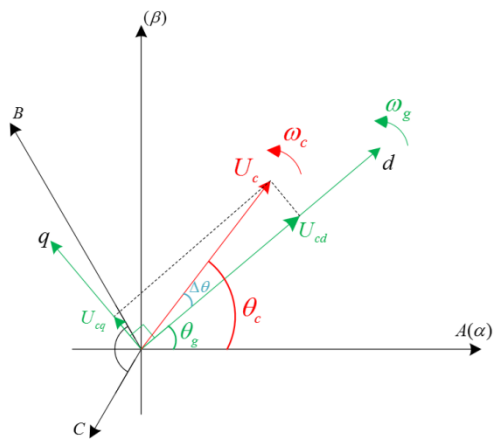


图 A2 预同步过程中的电压相量关系

Fig.A2 Phasor relationship among voltage in presynchronization process