

船舶岸电系统中变频电源控制参数辨识方法

曹亮¹, 房鑫炎¹, 罗文斌²

(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:从“岸侧主网—变频电源—船舶系统”三者一体化的角度出发,以变频电源控制技术为核心,提出了一种基于优先级排序和权重阈值的变频电源控制参数辨识方法,用于不同工况下的变频电源控制参数寻优。仿真结果表明,所提方法有利于寻找不同工况下的变频电源最优控制参数,实现对船舶岸电系统变频电源的灵活控制。

关键词:船舶岸电;变频电源;优先级排序;参数辨识

中图分类号:TM 91

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.024

0 引言

船舶岸电技术,即为靠港船舶在泊位期间停止使用船用柴油发电机,接入码头陆地侧电网,从岸上获得其水泵、通信、通风、照明和其他设施所需的电力,从而减少大气污染物排放,改善港口空气质量并降低船舶靠港成本^[1-2]的技术。

目前国内对船舶岸电供电技术的研究已有一定的基础,但大部分研究仅停留在对静止式岸电电源或船舶电气负荷的研究^[3-6],对岸侧主网、变频电源及船舶电力系统三者构成的岸电一体化供电系统各部分之间的耦合控制和相互影响的研究还很少。在基于大容量变频电源的船舶岸电并网问题方面,文献^[7-9]以变频电源作为核心控制环节,基于虚拟同步发电机 VSG (Virtual Synchronous Generator) 原理提出了相应的并网过程与无缝切换策略,但并未涉及在不同工况下变频电源的控制参数选取策略,因此在工程应用上仍有局限性。

本文首先对基于高压变频单元的船舶岸电供电方式进行对比分析;然后针对高压变频电源控制参数的优化问题,提出了一种基于权重阈值和优先级排序的变频电源控制参数辨识优化方法。该方法通过建立供电指标标么化规则,根据实际工况对各供电指标的不同要求赋予相应权值,并求得各指标偏离理想输出特性的加权均值,以此为寻优目标函数并构造可行域,以寻求不同工况下高压变频电源的最优控制参数,从而实现岸电系统在复杂工况下的控制参数自适应调节;最后针对岸电供电系统并网时容易出现的逆功率和低电压穿越现象,从岸船一体化与变频电源的角度给出了相应控制对策。

1 船舶岸电供电方式分析

传统的岸电电源主要由含有旋转部件的同步发电机组将陆上电网的 50 Hz 电能转换成相应 60 Hz 交流电,以供给靠港船舶所需电能,其存在成本高、噪音大、环境污染严重及发电效率低等问题^[5-6]。新一代的岸电供电电源为静止式岸电变频电源,其内部结构包含移相变压器、功率单元(包含整流、逆变)及输出滤波器,可以显著提高岸电电源的运行效率和减少环境污染。基于变频电源的岸电供电方式主要有“一对一”供电方式和“一对多”供电方式^[10] 2 种。下面分别对 2 种方式进行介绍。

1.1 “一对一”结构供电方式

“一对一”结构供电方式又称为“分布式”配置形式,其原理如附录中图 A1 所示。港口主变电站出线为 10 kV 母线,通过地下电缆连接到码头每个泊位分变电站(即图 A1 中的码头供电部分)安装的变频电源的高压输入端(有些分变电站需要再增设 1 个变压器将 10 kV 电压转换为变频电源需要的输入电压等级),变频电源对输入端电网电压进行变压变频后输出不同电压等级、不同频率的电能至岸电接线箱,再通过高压电缆上船供靠港船舶使用。在这种供电模式下,1 个变频电源只供应 1 艘船舶用电。

“一对一”供电方式的优点主要体现在 2 个方面:

- a. 每个码头泊位分变电站都相对独立,因此某个泊位变频电源出现故障时不会对其他泊位产生影响;
- b. 由于 1 个变频电源只供应 1 艘船舶,因此在并网时可采用“网并船”的控制策略,即调整岸侧变频电源输出电压以匹配船舶电压,从而船舶可不装设自动并网装置,降低了对船舶的装置要求。

“一对一”供电方式的缺点同样明显:供电可靠性依赖于变频电源可靠性,一旦变频电源故障,该泊位就失去了供电能力;由于变频电源输出电制多样(同时包含 50 Hz 和 60 Hz 电能),因而其控制模式

收稿日期:2017-12-21;修回日期:2018-10-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0205204)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFC0205204)

复杂;每个泊位都要装设变频电源和相应的变压器,占地面积较大、投资较高。

1.2 “一对多”结构供电方式

“一对多”结构供电方式又称为“集中式”配置形式,其原理如附录中图 A2 所示。在这种供电方式下,变频电源被安装在港口主变电站内(即图 A2 中的变频变电站部分),每段 10 kV 母线都连接一套变频电源设备和 1 台变压器,分别提供 60 Hz 和 50 Hz 电能,在码头侧形成 60 Hz 和 50 Hz 供电母线。供电母线采用单母分段配置方式,缩小了母线故障、检修时的停电范围。每个岸电接线箱都与 2 段供电母线相连,1 个岸电接线箱对应连接 1 艘船舶。正常运行时,分段断路器断开,且岸电接线箱根据船舶需求选择相应电制的供电母线,每段供电母线可连接多个岸电接线箱,形成“一对多”结构供电方式。

“一对多”结构供电方式将变频电源建设在港口主变电站侧,极大地降低了对码头侧泊位的改造需求,减少了泊位占地面积和建设成本;同时,由于设置了单母线分段配置,相较于“一对一”结构供电方式,大幅提高了供电可靠性。

“一对多”结构供电方式的缺点在于每个码头投入使用的变频电源为多艘船舶供给电能(虽有预先配置的备用变频电源,但不能与主电源同时投入使用),因此对变频电源容量要求高。目前国内能实现 10 MW 级别的变频电源案例不多,该方面的研究尚未取得突破性进展,因此“一对多”结构供电方式受技术的制约性大;另外,多艘船连接到同一供电母线,必须采用“船并网”的并网模式,因此船侧需安装自动并网装置,从而对靠港船舶提出了更高的装置建设要求。

2 变频电源控制参数辨识优化方法

本文采用的变频电源以 10 kV/50 Hz 交流电作为输入,主电路为功率单元串联叠加形成多电平变频电源,采用直接高-高结构,逆变器类型为电压源型。变频电源由移相整流变压器、功率单元、输出滤波器和控制部分组成,其控制部分为电压外环电流内环的双闭环控制模式,最终实现 6.6 kV/60 Hz 交流高压输出。

2.1 船用负荷功率变化对供电指标的要求与标么化规则

2.1.1 变频电源供电指标

在变频电源供电过程中,船舶负荷功率的变化会导致变频电源输出不稳定,如突加负荷会使变频电源电压跌落,而突卸负荷会使电压升高,因此有必要对岸电供电质量进行约束。岸电供电系统应满足 JTS155—2012《码头船舶岸电设施建设技术规范》

(以下简称《规范》)中所规定的供电质量标准,以电压指标为例,即船舶三相输出电压允许偏差应为 $\pm 5\%$,输出电压瞬变响应恢复时间不应超过 1.5 s。将这些指标对应到自动控制理论中的控制系统相关性能指标,可以得到变频电源供电性能指标,即峰值时间 T_p 、调节时间 T_s 以及超调量 M_p 。

a. 峰值时间 T_p 在本文中定义为输出电压达到第 1 个峰(谷)值所需要的时间。由于《规范》中并未对峰值时间进行要求,故文中采用经验值——约为《规范》中输出电压瞬变响应恢复时间的 1/4,即 0.4 s 作为峰值时间的允许值。

b. 调节时间 T_s 在本文中定义为电压响应曲线从突变开始重新回到稳态电压值的 98%~102% 误差时所需要的时间。

c. 超调量 M_p 为输出电压瞬态响应曲线偏离稳态电压值的最大程度,常以百分比表示,本文定义超调量表达式为:

$$M_p = \frac{|U(T_p) - U(\infty)|}{U(\infty)} \times 100\% \quad (1)$$

其中, $U(T_p)$ 为响应曲线最大值; $U(\infty)$ 为响应曲线稳态值。

根据《规范》中的上述规定, T_p 、 T_s 和 M_p 的允许值分别为 0.4 s、1.5 s 和 5%。

2.1.2 变频电源理想供电性能指标

理论上 3 项供电性能指标越小,则变频电源的输出电能质量就越好,当各项指标均为 0 时,达到最理想的输出状态。实际中,对变频参数的调节只能尽可能减小各项指标值,因此变频电源的控制参数寻优应在提前给定理想状态下进行,通过调节仿真参数逼近给定的理想指标,当两系统的输出偏差稳定在一个很小的范围内时,认为辨识结束,此时的仿真参数可以视作理想模型的控制参数^[11]。这种方法通常被称为模型参考自适应 MRAS (Model Reference Adaptive System) 辨识法,原理如图 1 所示。

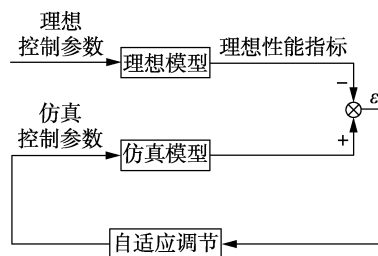


图 1 基于 MRAS 的控制参数辨识原理

Fig.1 Principle of control parameter identification based on MRAS

为寻求最合适的输出指标,根据《规范》及 2.1.1 节给出的供电性能指标允许值,设定性能指标理想值和允许偏差值如表 1 所示。

表 1 变频电源供电指标理想值及允许偏差值

Table 1 Ideal values and allowable deviation values of power supply indicators of variable frequency power supply

性能指标	理想值	允许偏差值
T_p	0.01 s	0.39 s
T_s	0.04 s	1.46 s
M_p	0.2%	4.8%

2.1.3 供电指标的标么化规则

在变频电源的实际控制过程中,前文所述的控制性能指标存在互相制约的关系,控制参数的选取应当有倾向地侧重不同指标。本文提出的参数辨识模型采用将 3 项性能指标偏差进行加权求和并寻找最小值以综合比较控制参数的辨识方法。由表 1 可知,3 项性能指标的量纲和数量级都有一定的差距,因此无法直接进行加权求和,为了简化计算和消除量纲的限制,文中采用了标么值的数值标记法,以理想输出指标值的理想偏差值 ε_{ib} 为基值,对供电性能指标进行标么化去量纲处理,得到变频电源供电性能指标偏差的标么值 ε_i^* ,其中 $i=1, i=2, i=3$ 分别对应峰值时间、调节时间和超调量。具体标么化过程如下。

峰值时间 ε_1^* 的标么化过程为:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = T_p - 0.01 \\ \varepsilon_1^* = \left| \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1b}} \right| \\ \varepsilon_{1b} = 0.39 \text{ s} \end{cases} \quad (2)$$

调节时间 ε_2^* 的标么化过程:

$$\begin{cases} \varepsilon_2 = T_s - 0.04 \\ \varepsilon_2^* = \left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{2b}} \right| \\ \varepsilon_{2b} = 1.46 \text{ s} \end{cases} \quad (3)$$

超调量 ε_3^* 的标么化过程为:

$$\begin{cases} \varepsilon_3 = M_p - 0.2\% \\ \varepsilon_3^* = \left| \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_{3b}} \right| \\ \varepsilon_{3b} = 4.8\% \end{cases} \quad (4)$$

其中, ε_1 和 ε_2 的单位均为 s; T_p, T_s, M_p 分别采用变频电源仿真输出的峰值时间、调节时间和超调量测量值。

经标么化处理后,岸电变频电源系统供电性能指标 T_p, T_s 和 M_p 的允许偏差值均为 1。

2.2 变频电源控制参数的自适应响应模型

2.2.1 电压电流双闭环控制模式

变频电源控制模型采用电压外环电流内环的双闭环控制模式。采取变频器输出滤波电容三相电压作为外环电压反馈量,经 Park 变换后与电压给定值

作差,经过 PI 调节器后其输出作为电流内环的给定值,内环电流反馈量为变频器输出滤波电感三相电流。内环输出经 Park 反变换后变为三相调制波,与给定的三角载波调节形成等幅而脉冲宽度正比于调制波函数值的矩形脉冲(PWM 脉冲)用于驱动各相 H 单元中的 IGBT。基于上述理论的变频电源电压电流双闭环控制结构图如图 2 所示。

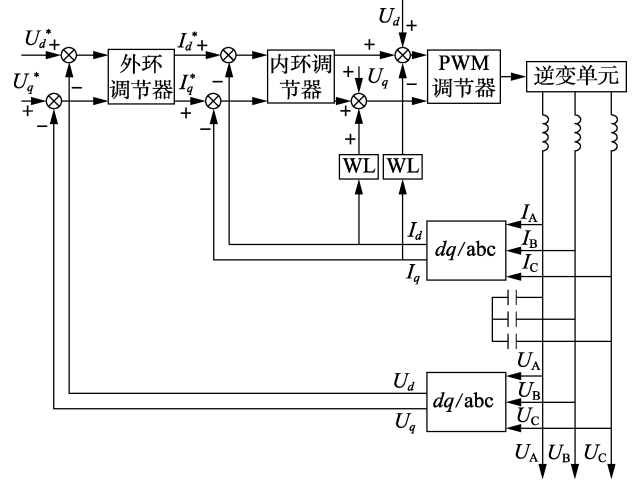


图 2 变频电源双闭环控制结构图

Fig.2 Structure diagram of double closed-loop controller of variable frequency power supply

2.2.2 基于权重阈值的变频电源控制参数辨识优化算法

变频电源供电性能指标反映了变频电源控制参数的选取是否得当。在岸电一体化供电系统中,当发生扰动导致变频电源输出波动时,峰值时间小表明系统响应速度快,超调量小表明调节平稳因而对船舶负荷的冲击小,调节时间短意味着调节过程短。因此在实际参数辨识过程中,应当根据系统运行时不同工况的实际调节要求,对 3 项供电性能指标赋予不同的权重阈值(权重越大则该性能指标在该种工况下越重要),进而求得以最小加权和为目标的控制参数取值。具体实现步骤如下。

a. 搭建变频电源仿真模型,设定不同工况及控制参数 θ 。根据前文所述的标么化规则,由每组控制参数计算得到相对应的供电性能指标偏差标么值 ε_i^* 。

b. 参照《规范》中的规定及表 1 的供电性能指标允许偏差值,供电性能指标允许偏差值应满足:

$$\varepsilon_i^* \in [0, 1] \quad (5)$$

选取符合条件的 ε_i^* 所对应的控制参数 θ ,构成寻优算法的可行域 AR (Allowable Range), 并且记为 θ_{AR} 。

c. 设定各指标的优先权重为 W_i , 其中 $i=1, i=2, i=3$ 分别对应峰值时间、调节时间和超调量。 W_i 越大表示该项指标具有越高的优先级,则供电性能

指标偏差的标么化加权均值 ε_w^* 为:

$$\begin{cases} \varepsilon_w^* = \sum_{i=1}^3 \varepsilon_i^* W_i \\ 0 \leq W_i \leq 1 \\ \sum_{i=1}^3 W_i = 1 \end{cases} \quad (6)$$

c. 每组控制参数 θ 都对应 1 个标么化加权均值 ε_w^* , 因此 ε_w^* 可以视作 θ 的函数。建立给定权重系数下最小化加权均值 ε_w^* 问题的数学优化模型如下:

$$\begin{cases} \min \varepsilon_w^* = f(\theta) \\ \theta \in \theta_{AR} \\ \varepsilon_{wmin}^* = \min \varepsilon_w^* \\ \theta_{opt} = f^{-1}(\varepsilon_{wmin}^*) \end{cases} \quad (7)$$

由此得到在给定工况及权重系数下的变频电源最优控制参数 θ_{opt} 。

2.2.3 仿真案例

基于图 2 所示的电压电流双闭环控制策略在 MATLAB/Simulink 中搭建岸电变频电源仿真模型, 如附录中图 A3 所示。岸电变频电源仿真参数为: 输入三相交流电压为 10 kV/50 Hz, 输出为三相交流电压 6.6 kV/60 Hz, 输出功率容量为 16 000 kW, 滤波电感为 50 mH, 滤波电容为 110 μ F, 输出频率为 50 Hz, 载波频率为 10 kHz。

变频电源控制参数选取为前文所述的电压外环 PI 调节参数 K_p 、 K_i , 供电性能指标由三相电压解耦到 $dq0$ 坐标系后的 d 轴电压分量 U_d 波形观察得到, 以 5 388.87 V 作为其稳态电压输出目标值。现考虑船舶突卸 300 kW 有功、10 kVar 感性无功、10 kVar 容性无功负荷的情景, 并根据系统运行时对供电指标调节侧重度的不同, 对供电指标设置 4 种优先级排序方式以模拟不同的实际工况, 具体优先级权重取值如表 2 所示。

表 2 不同工况下的优先级权重

Table 2 Priority weights of different operating conditions

运行工况	权重		
	峰值时间	调节时间	超调量
1. 优先考虑峰值时间	0.8	0.1	0.1
2. 优先考虑调节时间	0.1	0.8	0.1
3. 优先考虑超调量	0.1	0.1	0.8
4. 同时考虑 3 项指标	1/3	1/3	1/3

通过改变变频电源控制参数进行多次仿真运算, 每种运行工况下均得到多组供电性能指标偏差标么值, 根据加权法计算指标偏差权重均值, 并将该标么加权均值作为因变量, 控制参数 K_p 、 K_i 作为自变量绘制三维曲面图, 根据曲面走势缩小搜索范围

以更快逼近寻优结果。各运行工况下的三维曲面图如图 3 所示。

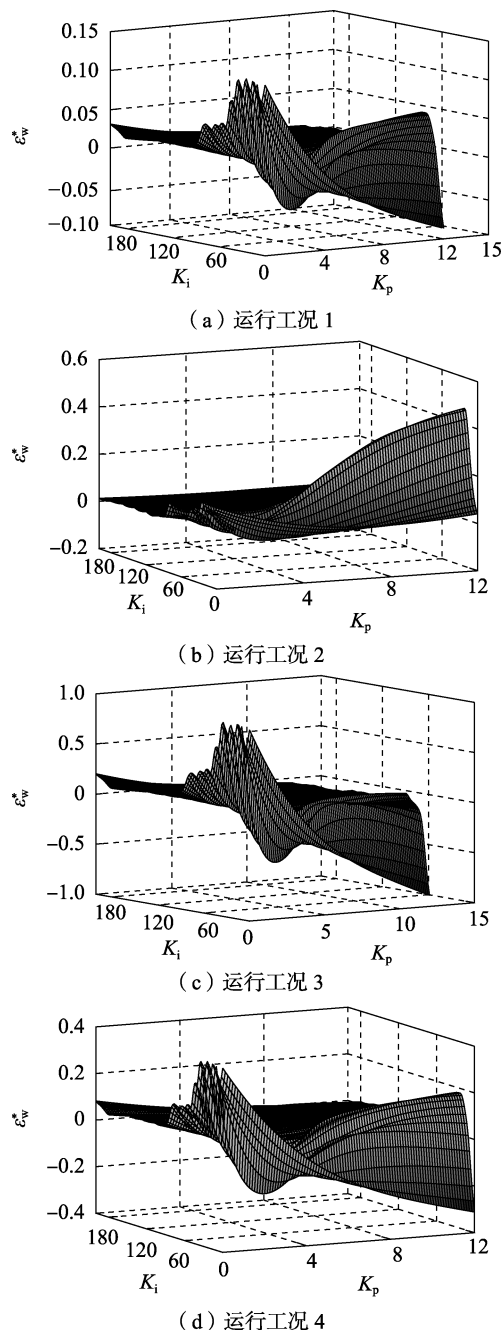


图 3 不同运行工况下性能指标偏差加权均值

Fig.3 Weighted average value of performance indicators deviation under different operating conditions

以运行工况 1 为例对寻优过程进行说明。图 3 (a) 所示为由大量实验仿真数据点得出的标么加权均值走势曲面, 为了更加直观地根据已有实验数据缩小控制参数搜寻范围, 绘出相应标么加权均值为 0 部分的等高线图, 如图 4 所示。从图 4 中可观察到, 共有 3 条加权均值为 0 的等高线 A、B 和 C, 且 A、B、C 3 个区域邻近, 在上述可行域范围内结合该等高线密集区域搜寻最优控制参数, 不断比较目标加权均值大小进而缩小搜寻范围, 最终确定图 4 中的

点 $P(3.011, 40.103)$ 为运行工况 1 下的最优控制参数点。

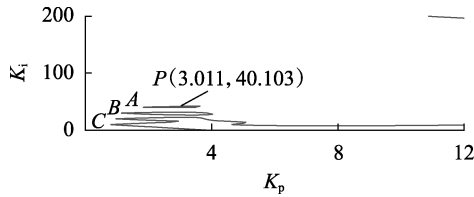


图 4 运行工况 1 下零加权值等高线图

Fig.4 Zero weighted value contour map of operating condition 1

同理根据运行工况 2、3、4 下的三维曲面及零等高线图,并结合可行域进行相应寻优搜索,经过反复调整比较目标加权均值确定最优控制参数,最终参数辨识寻优结果如表 3 所示。

表 3 不同工况下的最优参数辨识结果

Table 3 Parameter identification results for different operating conditions

参数	参数辨识结果				
	运行工况 1	运行工况 2	运行工况 3	运行工况 4	
控制参数	K_p	3.011	3.977	4.359	3.497
	K_i	40.103	78.357	91.135	72.533
实际值	T_s/ms	51.088	39.896	37.908	41.185
	T_p/ms	7.731	7.057	7.302	7.356
标么值	$M_p/\%$	0.205 4	0.185 75	0.203 2	0.195 6
	ε_1^*	0.005 82	0.007 55	0.006 9	0.006 8
标么值	ε_2^*	0.007 59	0.000 07	0.001 4	0.000 8
	ε_3^*	0.001 13	0.002 968	0.000 67	0.000 92
加权均值	ε_w^*	0.005 527	0.001 108	0.001 368	0.002 84

在表 3 中,运行工况 1,即优先考虑峰值时间时的变频电源最优控制参数时,峰值时间偏差标么值在加权均值的计算中比重最大,占比为 0.8,变频电源控制参数 $K_p = 3.011$ 、 $K_i = 40.103$,性能指标偏差加权均值为:

$$\varepsilon_w^* = 0.8 \times \varepsilon_1^* + 0.1 \times \varepsilon_2^* + 0.1 \times \varepsilon_3^* = 0.005 527 \quad (8)$$

该性能指标偏差加权均值为运行工况 1 下所有实验数据中的最小值,即运行工况 1 下的寻优结果。作为各工况试验数据中的最优控制参数,运行工况 1 下的系统响应峰值时间最接近理想特性,在运行工况 2 和运行工况 3 下,调整时间和超调量分别最接近理想特性。运行工况 4 为同时考虑 3 项指标并赋予相同权重时的最优参数,此时的性能指标偏差加权均值最小。

从本例结果分析得知,利用已有数据通过插值法画出的曲面图结合相应等高线图不断进行参数调整,可以逐步逼近并最终得到供电性能指标偏差加权均值最小值,进而获得变频电源控制系统最优 PI 调节参数。

2.3 变频电源对逆功率和低电压穿越问题的响应对策

2.3.1 逆功率问题

船舶岸电一体化系统中的逆功率主要来自船岸

并网及解列过程中,变频电源输出电压与船舶电力系统输出电压不匹配,进而导致逆功率的出现,具体倒送情况及功率性质如表 4 所示。

表 4 逆功率产生原因及功率性质

Table 4 Cause and power property of reverse power

运行工况	功率流向	功率性质
a. 船侧电压大于岸侧电压	船侧→岸侧	无功功率
b. 船侧频率大于岸侧频率	船侧→岸侧	有功功率
c. 岸侧电压大于船侧电压	岸侧→船侧	无功功率
d. 岸侧频率大于船侧频率	岸侧→船侧	有功功率

并网时,同期装置通常在检测到 2 个系统的电压幅值、频率和相位角符合并网条件时就发出合闸指令。然而此时两系统的电压、频率、相位并非完全一致,存在不可忽略的差别,从而导致并网瞬间产生两系统间的逆功率。船侧产生逆功率可能影响船舶柴油发电机组的正常运行;岸侧产生的逆功率会引起变频电源发热,影响其工作性能,缩短使用寿命。针对逆功率问题,可以在岸侧变频电源和船侧系统之间设置一逆功率保护装置,由于功能的相似性,该装置可以和同期并网装置整合为一整体功能单元,在同期合闸指令发出且两系统并网后,通过该逆功率保护装置探测实时电压、电流波形,计算潮流及判断逆功率是否达到阈值,进而根据逆功率种类以及并网方式的不同分别进行控制。逆功率保护装置结构如图 5 所示。

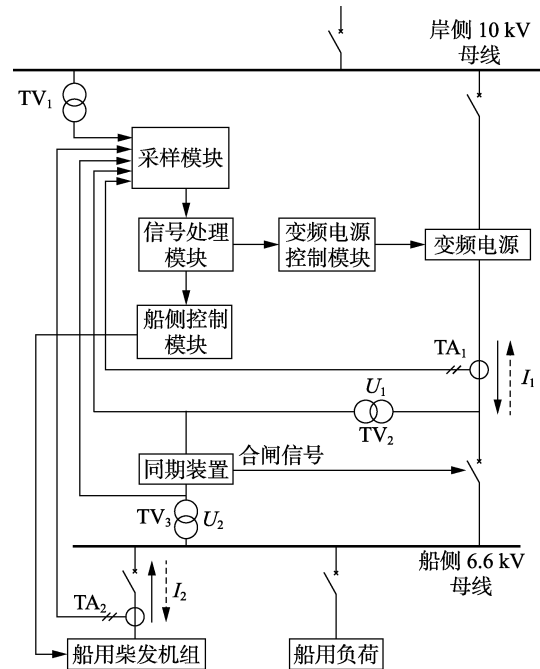


图 5 逆功率保护装置结构图

Fig.5 Structure diagram of reverse power protection device

对于船侧流向岸侧的逆功率,在“一对一”供电模式下,可以采用“网并船”的并网方式,因此逆功率发生后逆功率保护装置可以通过改变变频电源控

制参数以调整其输出电压和频率大小从而消除逆功率问题。此时逆功率保护装置具体逻辑关系为:电流互感器 TA_1 检测到图 5 中 I_1 流向为虚线箭头方向,判断产生由船侧流向岸侧的逆功率,此时采样模块将信号经信号处理模块传送到变频电源控制模块,变频电源控制模块调整控制参数及控制模式,改变输出电压及频率直至 I_1 流向变为实线箭头方向,表示逆功率消除;而在“一对多”供电模式下,并网时岸侧只能作为基侧,因此逆功率出现后逆功率保护装置需要调节船用柴发机组的转子转速以调整输出频率大小、调节励磁系统的输出以调整发电机输出电压的大小从而适应岸侧变频电源输出,最终消除逆功率。具体逻辑关系为:电流互感器 TA_1 检测到图 5 中 I_1 流向为虚线箭头方向,判断产生由船侧流向岸侧的逆功率,采样模块将信号经信号处理模块传送到船侧控制模块,进而调整船侧柴发机组输出直至检测到 I_1 变为实线箭头方向,表示逆功率消除。

对于岸侧流向船侧的逆功率,电流互感器 TA_2 检测到图 5 中 I_2 流向为虚线箭头方向,判断产生由岸侧流向船侧的逆功率,此时信号处理模块根据电压互感器 TV_3 采集的电气量 U_2 及电流互感器 TA_2 采集的电气量 I_2 计算逆功率大小,一般船用柴发机组自身配置有逆功率保护,当逆功率达到整定值时,保护动作断开发电机母线开关使发电机退出运行,此时若岸侧电源与船舶负荷仍处于并网状态,则并网成功,否则应重新并网。

2.3.2 低电压穿越控制策略

在船舶岸电一体化供电系统中,低电压穿越问题主要出现在并网状态下,当船舶电网故障时,并网点电压跌落,此时需要变频电源和船舶电网保持并网,并提供无功功率以支持船舶电网电压的恢复^[12-14]。德国的 E.ON 标准^[15]规定了低电压穿越期间所需无功电流与电压跌落深度的关系:当电压跌落深度大于 50%时需要逆变侧输出线性相关的无功电流;当电压跌落深度小于 50%时逆变侧应输出与额定电流相等的无功电流以提供给电网。

在本文搭建的变频电源模型中,整流侧采用三相不可控整流,逆变侧为可控部分。正常模式下逆变侧采用前文所述的电压外环电流内环控制结构,电压外环的输出作为电流内环解耦后的旋转坐标系下 i_d, i_q 的给定值;当出现船舶电网电压跌落时,控制模式应当变为无功电流控制优先,即将正常模式下 i_d, i_q 的给定值由电压外环输出改为给定的无功电流值 i_d^*, i_q^* 。根据 E.ON 标准以及逆变器输出电流一般不超过额定电流 1.1 倍的规定,该给定的 i_d^*, i_q^* 可由下列计算模型得到^[16]:

$$\begin{cases} \frac{i_q^*}{I_N} = 0, & \frac{U}{U_N} > 0.9 \\ \frac{i_q^*}{I_N} = -2 \frac{U}{U_N} + 2, & 0.5 < \frac{U}{U_N} \leq 0.9 \\ \frac{i_q^*}{I_N} = 1, & \frac{U}{U_N} \leq 0.5 \\ i_d^* \leq \sqrt{(1.1I_N)^2 - (i_q^*)^2} \end{cases} \quad (9)$$

其中, U_N, I_N 分别为额定电压和额定电流。

由此计算得到的 i_d^*, i_q^* 可作为电流内环的给定值,并且实现了变频电源逆变侧对并网点电压跌落的无功支撑,即变频电源的低电压穿越控制策略。

3 结论

本文从船舶岸电供电系统中的核心环节即变频电源出发,研究了变频电源的接线方式、控制模式及参数优化辨识问题;对比了 2 种岸电供电方式,分析其各自的优缺点,在实际建设过程中还应该按照码头容量、靠港船舶类型等因素进行统筹考虑;本文提出并通过仿真验证了一种基于优先级排序和权重阈值的控制参数辨识方法。仿真结果表明,该方法能在不同工况下寻找到变频电源最优控制参数,通过对控制参数的自适应调节实现对船舶岸电系统变频电源输出的灵活控制。本文进一步分析了逆功率与低电压穿越的产生机理,并从变频电源控制策略角度给出了相应的对策。目前国内船舶岸电建设刚刚起步,在规划阶段合理考虑上述问题对船舶岸电的建设与推广具有重要意义。

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(3): 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] 李学文, 孙可平. 船舶接用岸电技术研究[J]. 上海海事大学学报, 2006(3): 10-14.
LI Xuewen, SUN Keping. On shore side power for vessels in ports[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2006(3): 10-14.
- [4] 李加升, 杨金辉, 肖卫初. 基于神经网络内模的岸电电源波形控制[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3033-3040.
LI Jiasheng, YANG Jinhui, XIAO Weichu. Output wave form control of shore power supply based on neural network internal model[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3033-3040.
- [5] 王浚龙. 关于用大功率变频变压电源作为船舶岸电电站的研究和应用[J]. 中国修船, 2006, 19(S1): 16-18.

- WANG Junlong. Study and application about using high power frequency conversion as marine shore power station [J]. China Ship Repair, 2006, 19(S1): 16-18.
- [6] 祝亮亮. 船舶岸电电源系统的建模与仿真研究[D]. 大连:大连海事大学, 2016.
- ZHU Liangliang. Research on modeling and simulation of the shore power supply system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [7] 郜克存, 毕大强, 戴瑜兴. 基于虚拟同步发电机的船舶岸电电源控制策略[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(2): 45-52.
- GAO Kecun, BI Daqiang, DAI Yuxing. Novel control strategy of shore power supply based on virtual synchronous generator [J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(2): 45-52.
- [8] 陈枫, 应鸿, 徐鲲鹏, 等. 船舶岸电电源多机并联的并网无缝切换技术的研究[J]. 电气工程学报, 2017, 12(4): 33-37.
- CHEN Feng, YING Hong, XU Kunpeng, et al. Research on grid connected seamless switching technology of multi-level parallel connection of ship's shore power supply[J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(4): 33-37.
- [9] 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.
- [10] 田鑫, 赵国亮, 赵波, 等. 船用岸电供电主电气接线方式研究[J]. 电气技术, 2015(1): 56-59.
- TIAN Xin, ZHAO Guoliang, ZHAO Bo, et al. Main electrical connection mode research in cold ironing system[J]. Electrical Engineering, 2015(1): 56-59.
- [11] 王鸿山. 风力发电机控制中的参数辨识技术[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- WANG Hongshan. Technology of parameters identification for wind-driven generator control [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [12] 张明光, 陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 42(11): 28-33.
- ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 42(11): 28-33.
- [13] 顾浩瀚, 蔡旭, 李征. 基于改进型电网电压前馈的光伏电站低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 13-19.
- GU Haohan, CAI Xu, LI Zheng. LVRT control strategy based on improved grid-voltage feed-forward for photovoltaic station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 13-19.
- [14] 颜湘武, 赵佳乐. 变功率跟踪轨迹的光伏并网低电压穿越策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 214-219.
- YAN Xiangwu, ZHAO Jiale. LVRT strategy of grid-connected photovoltaic system with variable power point tracking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 214-219.
- [15] WU Yongshi, CHANG Chiahis, CHEN Yaowming, et al. The current control of PV inverter for low voltage ride through [C]//15th International Power Electronics and Motion Control Conference. Novi Sad, Serbia: IEEE, 2012; IS1d.4-1-LS1d.4-6.
- [16] 陈波, 朱晓东. 光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 8-11.
- CHEN Bo, ZHU Xiaodong. Strategy for reactive control in low voltage ride through of photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 8-11.

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,研究方向为港口航运。

Control parameter identification of variable frequency power supply in shore-to-ship power system

CAO Liang¹, FANG Xinyan¹, LUO Wenbin²

(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: From the perspective of integration of major network on shore side, variable frequency power supply and ship system and with the control technology of variable frequency power supply as the core, a control parameter identification method of variable frequency power supply is proposed based on priority ordering and weight threshold, which is used for control parameter optimization of variable frequency power supply under different operating conditions. The simulative results show that the proposed method is helpful for the control parameter optimization of variable frequency power supply under different operating conditions, so the flexible control of the variable frequency power supply in shore-to-ship power system can be realized.

Key words: shore-to-ship power; variable frequency power supply; priority ordering; parameter identification

附录

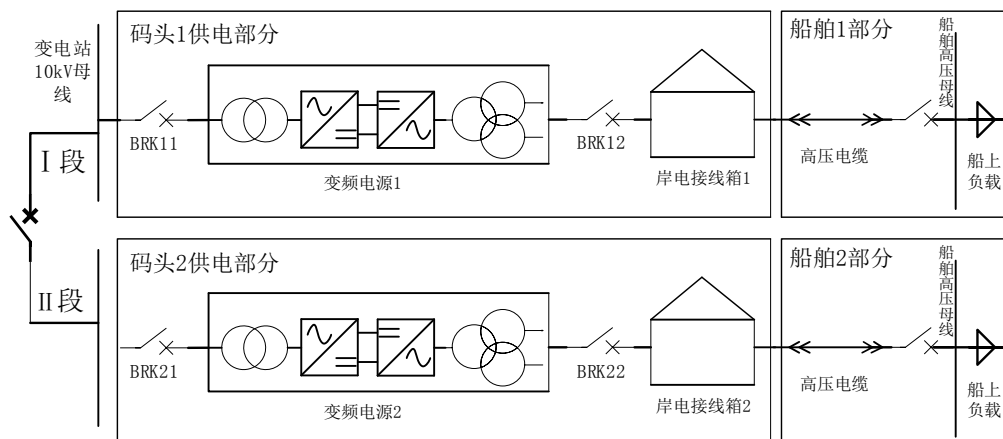


图 A1 “一对一” 供电方式接线图

Fig.A1 Wiring diagram of “one-to-one” power supply mode

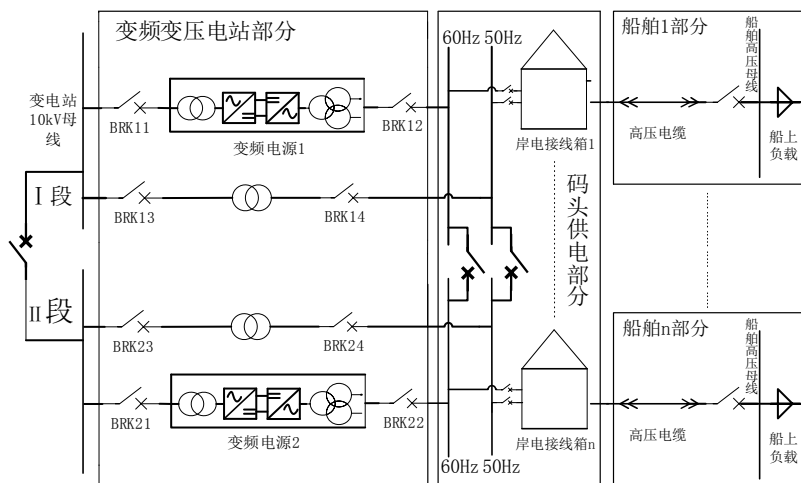


图 A2 “一对多” 供电方式接线图

Fig.A2 Wiring diagram of “one-to-many” power supply

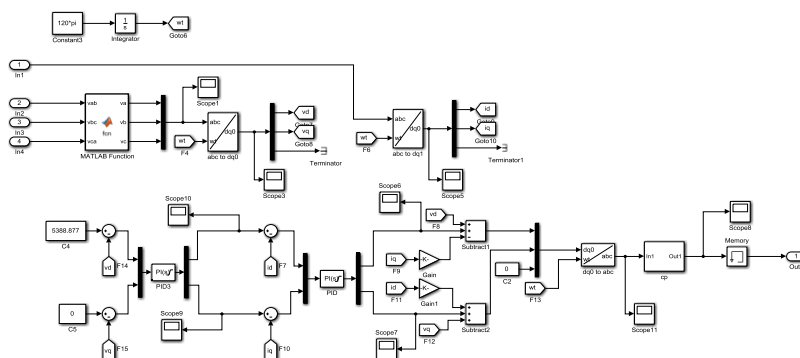


图 A3 变频电源双闭环控制仿真模型图

Fig. A3 Simulation model diagram of double loop controller of variable-frequency power source