

基于虚拟母线补偿的弱电网下岸电系统稳定性优化控制方法

钱宇轩¹, 杨佳¹, 刘丽敏¹, 黄云辉², 熊松², 熊斌宇²

(1. 国网江苏省电力有限公司常州供电分公司, 江苏 常州 213000; 2. 武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 当同步发电机或新能源通过较长的线路连接到岸电系统时, 会导致岸电系统并网点电网强度变弱, 使其稳定性面临重大挑战。为提升弱电网下岸电系统并网稳定性, 提出一种基于虚拟母线补偿控制的岸电系统稳定性优化方法。该方法通过控制的方式, 将锁相环采集信息的并网点往电网方向移动, 从数学上降低了输电线路距离, 相当于减小并网点的线路阻抗, 从而增加了岸电系统并网点的电网强度。结合特征根分析法, 分析了该优化策略及控制参数对系统稳定性的影响。发现虚拟母线补偿控制对提升弱电网下岸电系统稳定性具有较好的效果, 并且增大补偿因数 k 值以及减小时间常数 τ 有助于进一步提高系统稳定性。最后在时域仿真中验证了该控制方法的有效性。

关键词: 弱电网; 岸电系统; 虚拟母线; 稳定性分析; 优化控制

中图分类号: TP273; TM743

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)10-0027-06

Stability optimization method of the shore power system connected to weak grid based on virtual bus compensation control

QIAN Yuxuan¹, YANG Jia¹, LIU Limin¹, HUANG Yunhui², XIONG Song², XIONG Binyu²

(1. Changzhou Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Changzhou 213000, China;

2. Wuhan University of Technology, School of Automation, Wuhan 430070, China)

Abstract: When the synchronous generator or new energy is connected to the shore power system through a long line, it will lead to the weak strength of the shore power system and make its stability face a major challenge. In order to improve the stability of shore power system in weak network, an optimization method of shore power system stability based on virtual bus compensation control is proposed in this paper. By means of control, this method moves the junction point of PLL information collected towards the power grid, and reduces the distance of transmission lines mathematically, which is equivalent to reducing the line impedance of the junction point, thus increasing the power grid strength of the shore power system's junction point. Combined with eigenvalue analysis, the influence of the optimization strategy and control parameters on the stability of the system is analyzed. It is found that the virtual busbar compensation control has a good effect on improving the stability of shore power system under weak current network, and increasing the compensation factor k value and decreasing the time constant τ are helpful to further improve the stability of the system. Finally, the effectiveness of the proposed control method is verified in time domain simulation.

Keywords: weak grid; shore power system; virtual bus; stability analysis; optimization control

0 引言

在“双碳”目标下, 2022年4月国家发改委发布《关于进一步推进电能替代的指导意见》, 指出“电能替代”步入改革深水区。船舶电能替代势在必行, 国家交通运输部明确要求相关部门加快研究纯电动货船, 实现电动货船靠泊接用岸电并进行充电^[1]。目前采用电力推进的船舶, 占世界整个船舶的比例还是较小的^[2-3]。但是, 某些特殊工作船舶, 如破冰船、调查船、布缆船、拖船、挖泥船及火车渡船等都广泛采用电力推进^[4]。特别是潜水工作的船舶几乎都是采用电力推进^[5]。随着电力推进船舶的大规模推广, 以及电力电子装备在船舶电力系统中应用得越来越多^[6-7], 船舶接入岸电系统的稳定性问题逐渐凸显。

从电网层面来看, 船外常规电网的多样化和复杂环境可能导致岸电系统的稳定性问题。船舶电网系统具有高度多样化, 因为它具有不同电压等级的交流/直流线路^[8-9]。从设备层面来看, 岸电系统及船舶电力系统的电力电子设备快速的电磁动态及控制环路之间的耦合作用影响了岸电系统的稳定性。电力电子功率变换器越来越多地应用于岸电和船舶, 岸电和船舶电力系统的电力电子化特征更加明显^[10]。由于电力电子功率变换器响应速度快(几十毫秒), 这意味着轻微的扰动都会影响岸电系统的稳定性。

针对岸电系统连接交流电网的稳定性相关问题, 国内外也有少量的研究。在确保岸电电压稳定性上, 可采用有级调压方式, 在有载调压变压器的原边加上多抽头, 利用有载分接开关更改变压器的调压比, 以实现稳定调压^[11]。文献[12]针对老旧码头安装的不可调压变压器, 提出了一种简单可靠的岸电改造方案, 即加装原不可调压变压器

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52177221)

收稿日期: 2024-03-06

调压范围 20% 的自动调压补偿装置, 以实现稳定调压。文献[13-14]提出了一种基于虚拟同步发电机的岸电系统稳定控制策略, 以提高电能质量, 提高船舶电网的稳定性和可靠性。文献[8]针对船舶浪涌无功功率, 在虚拟同步发电机中嵌入无功惯性分量, 设计了电压电流双闭环同步控制系统的 $d-q$ 解耦控制方案, 研究了不同馈电电压对岸电电压特性的影响。同时, 动力管理系统广泛应用于大中型船舶, 通过运行参数来调整负载功率的需要。传统的岸电控制策略包括下垂控制、双环 $P-Q$ 控制等, 可以提高岸电系统的稳定性, 但这些控制策略不能更好地提高岸电频率的稳定性, 也不能直接由功率管理系统控制^[15]。综上, 早期文献针对弱电网下岸电系统的稳定分析及优化控制设计的研究非常少, 亟待开展相关工作。

本文针对岸电系统并网运行出现的实际问题, 将建立岸电系统及船舶负荷的小信号分析模型, 提出虚拟母线补偿控制的设计方法, 虚拟母线补偿控制参数进行优化设计, 最后结合特征根分析和时域仿真对所提出方法进行验证。

1 接入交流电网的岸电系统小信号分析模型

本文所研究的岸电系统及其陪试系统的主电路结构如图 1 所示。系统输入为 10 kV 的交流电, 后经过变压器降压得到 2.3 kV 交流电, 经过 AC-DC 变换装置整流成为 4 kV 的直流电。4 kV 的中压直流母线电压经过 DC-DC 变换装置得到 710 V 的直流电压, 为负载直流母线供电。滤波分系统采用有源电力滤波器对整流变压器输出的交流电压进行滤波。其中, AC-DC 变换装置主电路采用三电平 PWM 整流桥的结构, 控制方面采用最常用的电流矢量控制方法。负载主要包括阻感性负载、电动机负载和直流负载。负载总额定功率为 2 MW, 其中, 电动机负载额定功率为 1 MW, 阻感性负载额定功率为 0.6 MW, DC/DC 变换器直接带的直流负载额定功率为 0.4 MW。

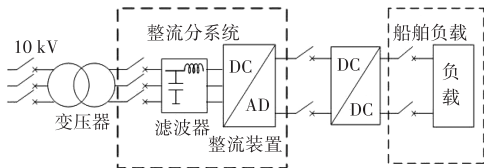


图 1 岸电系统接入交流电网的结构图

与 AC-DC 变换器直流电压控制动态有关的方程可表示为

$$P_e - P_m = U_{dc} C \frac{dU_{dc}}{dt} \quad (1)$$

$$i_{cd}^* = (U_{dc}^* - U_{dc}) \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \right) \quad (2)$$

与 AC-DC 变换器无功控制动态有关的方程可以表示为

$$i_{cq}^* = (U_t^* - U_t) \left(k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s} \right) \quad (3)$$

$$U_t^2 = u_{td}^2 + u_{tq}^2 \quad (4)$$

从岸电系统到船舶的有功功率传输公式可表示为

$$P_e = \frac{U_t U_g}{X_g} \sin(\theta_t - \theta_g) \quad (5)$$

与岸电系统主电路有关的方程可以表示为

$$U_t - U_g = jX_g I_c \quad (6)$$

对式(1)~(6)进行线性化和数学变换, 可以得到 AC-DC 变换器功率传输传递函数为

$$G_1(s) = \frac{P_m(s)}{P_e(s)} = \frac{C_{dc} U_{dc} G_{PI3}(s) (s^2 - K_4 s PI_2(s))}{K_6 PI_1(s) [(K_1 s + K_2 PI_2(s)) G_{PI3}(s) + K_3 K_5 PI_2(s)]} \quad (7)$$

其中,

$$\begin{cases} K_1 = \frac{U_{gd0}}{X_g} \\ K_2 = \frac{U_{td0} U_{gd0}}{X_g} \\ K_3 = -\frac{U_{gq0}}{X_g} \\ K_4 = -i_{cq0} X_g - U_{td0} \\ K_5 = -X_g i_{cd0} \\ K_6 = X_g \\ K_7 = -X_g \\ K_8 = \frac{U_{td0}}{U_{t0}} \end{cases} \quad (8)$$

$$G_{PI3}(s) = 1 + PI_3(s) K_7 K_8 \quad (9)$$

$$PI_1(s) = k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \quad (10)$$

$$PI_2(s) = k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} \quad (11)$$

$$PI_3(s) = k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s} \quad (12)$$

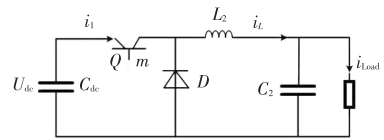


图 2 DC-DC 变换器的主电路原理图

岸电系统 DC-DC 变换器的主电路如图 2 所示, 其电压和电流平衡方程如下式。

$$\begin{cases} L_2 \frac{di_L}{dt} = U_{dc} - U_L \\ C_2 \frac{dU_L}{dt} = -\frac{U_L}{R} + i_L \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} L_2 \frac{di_L}{dt} = -U_L \\ C_2 \frac{dU_L}{dt} = -\frac{U_L}{R} + i_L \end{cases} \quad (14)$$

取平均值模型, 得到 DC-DC 变换器的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{U_L}{L_2} + \frac{mU_{dc}}{L_2} \\ \frac{dU_L}{dt} = -\frac{U_L}{C_2R} + \frac{i_L}{C_2} \end{cases} \quad (15)$$

对状态方程(15)进行线性化,可得

$$\begin{cases} \frac{d\Delta i_L}{dt} = -\frac{1}{L_2}\Delta U_L + \frac{U_{dc0}}{L_2}\Delta m + \frac{m_0}{L_2}\Delta U_{dc} \\ \frac{d\Delta U_L}{dt} = -\frac{1}{C_2R}\Delta U_L + \frac{1}{C_2}\Delta i_L \end{cases} \quad (16)$$

对方程(16)进行拉普拉斯变换,得到

$$\begin{cases} si_L(s) = -\frac{1}{L_2}U_L(s) + \frac{U_{dc0}}{L_2}m(s) + \frac{m_0}{L_2}U_{dc}(s) \\ sU_L(s) = -\frac{1}{C_2R}U_L(s) + \frac{1}{C_2}i_L(s) \end{cases} \quad (17)$$

DC-DC 变换器的注入功率为 P_m , 负载功率为 P_L , 可以得到

$$\begin{cases} P_m = U_{dc}i_L \\ P_L = U_Li_{load} \end{cases} \quad (18)$$

对式(18)线性化可得

$$\begin{cases} \Delta P_m = i_{L0}\Delta U_{dc} + U_{dc0}\Delta i_L \\ \Delta P_L = i_{load0}\Delta U_L + U_{L0}\Delta i_{load} \end{cases} \quad (19)$$

对式(19)进行拉普拉斯变换,得到

$$\begin{cases} P_m(s) = i_{L0}U_{dc}(s) + U_{dc0}i_L(s) \\ P_L(s) = i_{load0}U_L(s) + U_{L0}i_{load}(s) \end{cases} \quad (20)$$

负载电流 i_{load} 可以表示为

$$i_{load} = i_L - C_2 \frac{dU_L}{dt} \quad (21)$$

对式(21)进行线性化,然后两边进行拉普拉斯变换可得

$$i_{load}(s) = i_L(s) - C_2 s U_L(s) \quad (22)$$

将式(22)代入式(20)可得

$$\begin{cases} P_m(s) = i_{L0}U_{dc}(s) + U_{dc0}i_L(s) \\ P_L(s) = (i_{load0} - U_{L0}C_2s)U_L(s) + U_{L0}i_L(s) \end{cases} \quad (23)$$

根据方程(17)和方程(23),简化可得功率传输的传递函数为

$$G_2(s) = \frac{m_0 i_{load0} R + m_0 U_{L0}}{s^2 C_2 R (i_{L0} L_2 + U_{dc0} m_0) + s i_{L0} L_2 + R i_{L0} + U_{dc0} m_0} \quad (24)$$

因此,可以得到系统功率传输的传递函数 $F(s)$ 为

$$F(s) = \frac{P_L(s)}{P_e(s)} = G_1(s) G_2(s) \quad (25)$$

根据以上线性化方程,可以得到岸电系统接入交流电网的状态空间模型和小信号稳定性分析模型。

将表1中的岸电系统主电路及控制参数作为初始条件代入所建立的岸电系统状态空间模型和小信号稳定性分析模型,可以得到如图3所示的不同短路比(short-circuit ratio, SCR)下岸电系统主导特征根轨迹,并且根据系统功率传输的传递函数 $F(s)$, 得到对应的奈奎斯特图。

表1 岸电系统主电路及控制参数

参数	数值
额定输出有功功率/MW	2
交流电网电压/kV	10
变压器副边电压/kV	2.3
AC-DC 变换器直流电容/F	0.047
AC-DC 变换器直流电压/kV	4
DC-DC 变换器输出电压/V	710
滤波电感/mH	0.1
直流电压控制 PI 参数 (k_{p1}, k_{i1})	2, 100
锁相环 PI 参数 (k_{p2}, k_{i2})	60, 1 400
交流电压控制 PI 参数 (k_{p3}, k_{i3})	2, 80
电流环 PI 参数 (k_{p4}, k_{i4})	4, 200

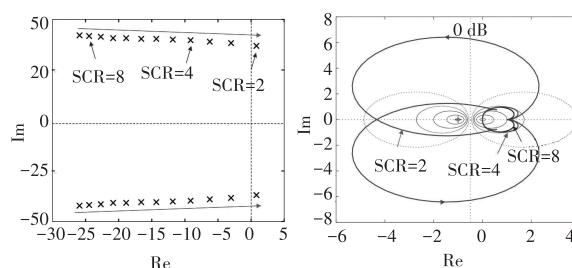
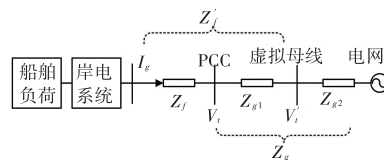


图3 不同短路比下岸电系统主导特征根轨迹图和奈奎斯特图

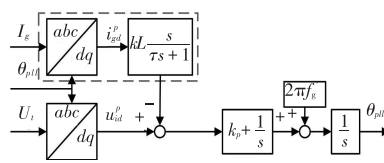
在图3中,用短路比来表示电网强度的大小。由图可见,随着电网强度变弱,主导特征根轨迹向右半平面移动,到短路比为2时,特征根就会进入右半平面,将导致岸电系统不稳定。并且奈奎斯特曲线包围范围随着电网强度变弱而扩大,到短路比为2时,奈奎斯特曲线包围点 $(-1, j0)$, 导致岸电系统不稳定。因此,岸电系统随着电网强度变弱而稳定性变差。

2 基于虚拟母线补偿的岸电系统优化控制方法

由上一节建模和分析可以发现,当电网强度较低时,岸电系统自身不同控制环路以及与电网间的交互作用很强,会使系统的稳定性变差。为此,本节从交流电网强度出发,关注系统的并网点信息,提出基于虚拟母线补偿控制的优化策略,其原理如图4(a)所示。



(a) 虚拟母线补偿控制总体框图



(b) 虚拟母线补偿控制策略

图4 虚拟母线补偿控制原理

图4中, V_i 为实际并网点电压; I_g 为岸电系统的输出电流; V_i' 为虚拟母线电压; Z_f 为滤波器阻抗; Z_g 为并网点到电网间的线路阻抗, 也就是电网阻抗。

在岸电系统的实际运行中, 一般通过锁相环跟踪端电压相位, 并将相位信息输出给控制系统, 从而实现与电网的同步。如果将锁相环采集信息的并网点往电网方向移动, 那么原来的电网阻抗会从 Z_g 减小到 Z_{g2} , 相当于减小了并网点的电网阻抗, 从而增加了岸电系统并网点的电网强度。将移动后的锁相环采集电压相位点称为虚拟母线, 对应点的电压称为虚拟母线电压。由于虚拟母线电压仅对岸电系统的控制系统做出来改变, 没有对电力系统产生实质的影响, 所以转子侧变换器依旧可以监测并控制岸电系统实际并网点处的端电压。虚拟母线电压的具体表达式为

$$V_i' = V_i - kL \frac{s}{\tau s + 1} I_g \quad (26)$$

式中, k 是补偿因数, 由于 V_i' 介于并网点电压和电网电压之间, 因此其取值为 $0 \sim 1$; L 是当短路比等于 1 时的电网阻抗; τ 是滤波环节的时间常数。虚拟母线补偿控制策略如图 4(b) 所示, 将岸电系统输出电流 I_g 经过坐标变换得到锁相环坐标系下的 d 轴电流, 经过补偿环节以及滤波环节后叠加到锁相环的输入 u_{iq}^p 上, 从而实现虚拟母线处的相位跟踪。

为了验证所提出的虚拟母线补偿控制在能提升弱电网下岸电系统并网的稳定性, 建立了接入交流电网的岸电系统状态空间模型, 并加入虚拟母线补偿控制并采用特征根分析法分析该优化控制方法对系统稳定性的影响。

首先, 设置岸电系统额定功率为 1 p.u., 在岸电系统中加入虚拟母线补偿控制, 改变短路比从 4 到 1.05, 观察系统加入虚拟母线补偿控制前后特征根轨迹图。图 5 为系统短路比变化时加入虚拟母线补偿控制前后特征根轨迹对比图。可见, 当系统短路比较大时, 系统的主导特征根为 $\lambda_{1,2}$, 随着短路比的不断减小, $\lambda_{1,2}$ 保持不变, $\lambda_{5,6}$ 不断右移, 逐渐变为系统的主导特征根。没加虚拟母线补偿控制之前, 系统在短路比为 1.1 时, 主导特征根 $\lambda_{5,6}$ 实部大于 0, 处在虚轴右边, 系统处在不稳定状态; 加入虚拟母线补偿控制之后, 系统在短路比为 1.1 时, 主导特征根实部小于 0, 处在虚轴左边, 此时系统为稳定状态。当短路比为 1.05 时, 主导特征根 $\lambda_{5,6}$ 才右移至虚轴右边, 系统处于失稳状态。可见加入虚拟母线补偿控制后, 系统从原来的短路比为 1.1 失稳变为现在短路比为 1.05 失稳。因此, 该虚拟母线补偿控制的加入可以使得系统在更弱的电网强度下保持稳定状态。

设置系统短路比为 1.1, 改变岸电系统输出有功功率, 使其从 0.5 p.u. 增大到 1.2 p.u.。在岸电系统中加

入虚拟母线补偿控制, 观察系统加入虚拟母线补偿控制前后特征根轨迹图。图 6 为岸电系统输出有功功率变化时加入虚拟母线补偿控制前后特征根轨迹对比图。可见, 系统的主导特征根 $\lambda_{5,6}$ 始终都随着岸电系统输出有功功率的增大而右移。没加虚拟母线补偿控制之前, 系统在岸电系统输出有功功率为 1 p.u. 时, 主导特征根实部大于 0, 处在虚轴右边, 系统处在不稳定状态; 加虚拟母线补偿控制之后, 系统在岸电系统输出有功功率为 1 p.u. 时, 主导特征根实部小于 0, 处在虚轴左边, 此时系统为稳定状态。当岸电系统输出有功功率为 1.2 p.u. 时, 主导特征根才右移至虚轴右边, 系统处于失稳状态。可见加入虚拟母线补偿控制后, 系统从原来的岸电系统输出有功功率为 1 p.u. 失稳变为现在输出有功功率为 1.2 p.u. 失稳。因此, 该虚拟母线补偿控制的加入可以使得系统在更高的输出有功功率下保持稳定状态。

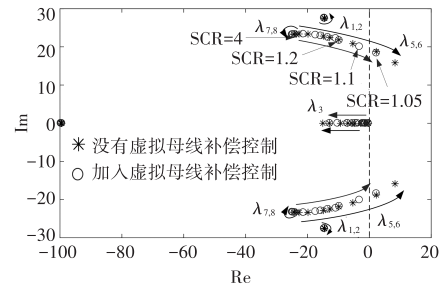


图 5 不同电网强度下加入虚拟母线补偿控制前后特征根轨迹对比

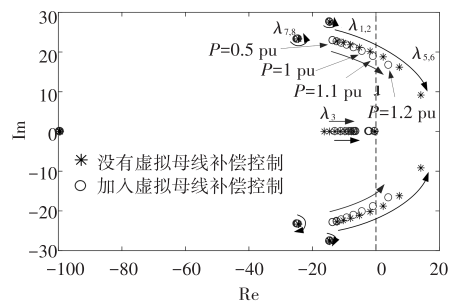


图 6 岸电系统不同输出有功功率下加入虚拟母线补偿控制前后特征根轨迹对比

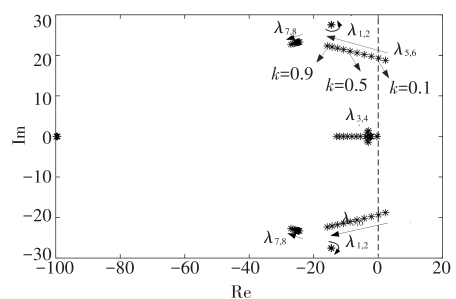


图 7 不同虚拟母线补偿因数下系统特征根轨迹

设置岸电系统工作在额定状态,系统短路比为1.1,在岸电系统中加入虚拟母线补偿控制。设定时间常数 $\tau = 0.5$,以0.1为调节步长,由0至0.9调节补偿因数 k ,可得到各特征根变化的根轨迹图如图7所示。其中,补偿因素 k 为0时,即不采用虚拟母线补偿控制,系统处于不稳定状态。可见,采用虚拟母线补偿控制后,主导特征根 $\lambda_{3,6}$ 由右半平面向左半平面移动,系统由不稳定状态到恢复稳定。随着补偿因数 k 的不断增大,稳定性越来越强。由直流电压环主要参与的振荡模态 $\lambda_{1,2}$ 改变较小。总体而言,当短路比设置为1.1,时间常数 τ 设置为0.5时,补偿因数 k 的取值越大,系统越稳定。

3 虚拟母线补偿控制与设计的时域仿真验证

在不同电网强度下,观察岸电系统加入虚拟母线补偿控制前后的输出有功功率、直流电压。图8为系统短路比为1.1时加入虚拟母线补偿控制前后系统有功功率和直流电压响应。可见,没加虚拟母线补偿控制前系统加入扰动后直接失稳。加入虚拟母线补偿控制后系统处于稳定状态,与特征根分析的结果相符。

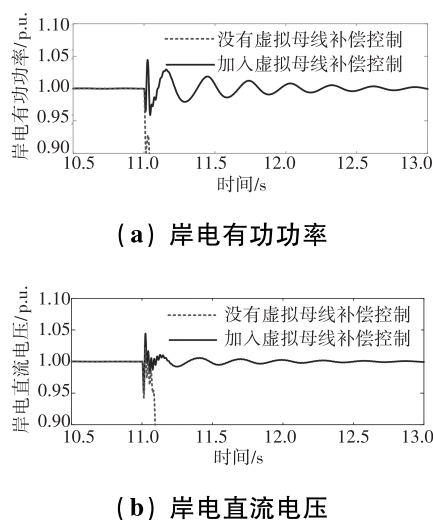


图8 短路比为1.1时加入虚拟母线补偿控制前后系统响应波形

图9为系统短路比为1.1时岸电系统不同输出有功功率下加入虚拟母线补偿控制前后系统有功功率和直流电压响应。可见,没加虚拟母线补偿控制前系统加入扰动后直接失稳。加入虚拟母线补偿控制后系统处于稳定状态,与特征根分析的结果相符。

在改变补偿因数 k 情况下,观察岸电系统加入虚拟母线补偿控制前后岸电系统的输出有功功率、直流电压。结果如图10所示。可以看出,补偿因数 k 为0.1时,系统在加入扰动后振荡发散;当补偿因数 k 为0.5和0.9时,系统在加入扰动后逐渐稳定下来且当 $k = 0.9$ 时系统恢复稳定的时间比 $k = 0.5$ 时系统恢复稳定的时间更短,系统更加稳定,与特征根分析的结果相符。

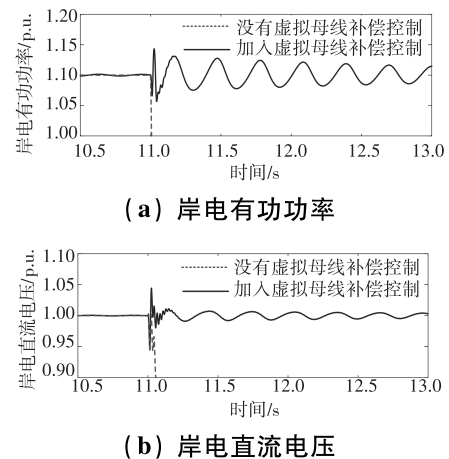


图9 有功功率为1.1 p.u.时加入虚拟母线补偿控制前后系统响应波形

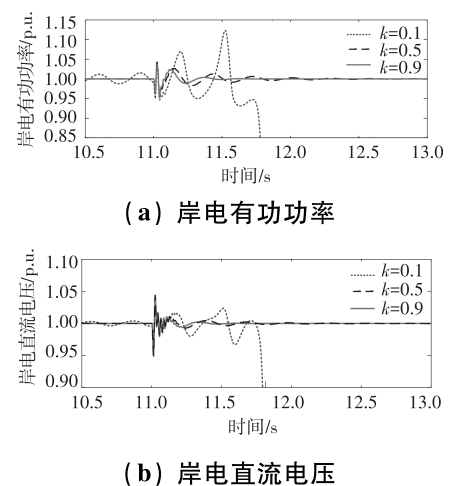


图10 不同虚拟母线补偿因数下岸电系统响应波形

4 结束语

本文提出一种能提升连接交流电网的岸电系统稳定性的虚拟母线补偿控制方法。研究了不同电网强度,不同输出有功功率下虚拟母线电压虚拟母线补偿控制法对岸电系统稳定性提升的效果以及相关系数的优化设计方法,研究结论如下:

- 1) 虚拟母线补偿控制对提升弱电网下岸电系统稳定性具有较好的效果。
- 2) 虚拟母线补偿控制有效提升了锁相环的动态特性,在系统容量更大的岸电系统加入虚拟母线补偿控制对于系统稳定性的提升有更好的效果。
- 3) 在合适的范围内,增大虚拟母线补偿控制补偿因数 k 值,减小时间常数 τ 有助于进一步提高连接弱电网的岸电系统稳定性。

参考文献

[1] 王力波. 我国电动船舶产业现状与发展对策研究[J]. 中国海事, 2022(8): 65-68.

(下转第46页)