参与无源网络虚拟调频的VSC-MTDC策略研究

罗兰',王渝红',宋瑞华²,毕经天²,陈诗昱',万良彬'

(1.四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065;2.中国电力科学研究院有限公司,北京 100192)

摘要:多端柔性直流输电系统中,采用柔直内外环控制无法为受端无源网络提供惯性支撑。传统的虚拟 同步发电机(TVSG)控制,可以为无源网络提供惯性支撑,但只能实现无源网络的一次调频。针对此问题,提 出一种虚拟调频器(virtual frequency regulator,VFR)控制。VFR控制引入角频率和直流电压偏差到TVSG控 制中,使连接无源网络的换流站具备无差调频性能,且依据直流电压的变化调节功率变化,实现功率平衡。在 PSCAD/EMTDC 中搭建含有无源网络的多端柔性直流系统模型,验证了 VFR 控制策略的有效性。 关键词:多端柔性直流;无源网络;虚拟同步发电机;虚拟调频器控制;无差调频

中图分类号:TM712 文献标识码:A **DOI**:10.19457/j.1001-2095.dqcd22979

Research on VSC-MTDC Strategy for Virtual Frequency Regulator in Passive Networks

LUO Lan¹, WANG Yuhong¹, SONG Ruihua², BI Jingtian², CHEN Shiyu¹, WAN Liangbin¹
(1.College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;
2.China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In the multi terminal flexible direct current(DC) transmission system, the flexible direct inner and outer loop control can not provide inertial support for the receiving end passive network. Traditional virtual synchronous generator (TVSG) control can provide inertia support for passive network, but it can only realize primary frequency regulator of passive network. To solve this problem, the virtual frequency regulator(VFR) control was proposed. In the VFR control, the angle frequency and DC voltage deviation were introduced into the TVSG control, so that the converter station connected to the passive network had unbiased frequency modulation performance, and the power change was adjusted according to the change of DC voltage to achieve power balance. In PSCAD/EMTDC, a multi terminal flexible DC system model with passive network was built for simulation, and the effectiveness of VFR control strategy was verified.

Key words: multi terminal flexible direct current(DC); passive network; virtual synchronous generator(VSG); virtual frequency regulator control; unbiased frequency regulator

电压源型换流器高压直流(voltage source converter-high voltage direct current, VSC-HVDC) 输电技术具有不存在换相失败、有功无功解耦 可以单独对其进行控制、不需要换流站提供换 相电压、设备占地面积小等优点^[1-2]。柔性直流 输电可以实现自换相,可工作在无源逆变的状 态,因此可实现柔性直流输电系统向无源网络 供电^[3]。但柔性直流的内外环控制不能响应无 源网络的频率变化,无法为无源网络提供频率 支撑。虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术^[4-5]能为系统提供阻尼和惯性 支撑,目前该技术在微电网逆变器以及分布式 并网发电等领域研究相对较多^[6]。VSG控制策 略具有一次调频和调压能力以及为无源网络提 供惯性支撑能力^[7]。

文献[8]推导VSG小信号模型,给出了有功环 和无功环解耦控制条件,给出了转动惯量和阻尼 系数整定方法。文献[9]探讨了转动惯量和阻尼系

基金项目:国家电网公司基础前瞻科技项目:含多电力电子装备电力系统宽频振荡稳定分析及量化评估研究(SGTYHT/18-JS-206); 四川省科技计划资助项目(2019YJ0114)

作者简介:罗兰(1945—),女,硕士,Email:1479169048@qq.com

数根据电网的实时运行状态,为了抑制频率偏离 额定频率的变化,其参数可以进行自适应调整。 文献[10]以直流电压相互协调控制为目标改进 VSG控制策略,提高了直流系统运行的稳定性。 以上控制策略主要是对VSG进行一次调频,系统 频率不能回到额定值。文献[11]通过替换阻尼环 节采用频率的PI反馈环节,解决孤网模式下频率 偏移问题,实现无差调节。文献[12]将交流网络频 率与直流电压相互的耦合关系考虑到 U-P的下 垂裕度控制策略中,可以实现直流电网的功率平 衡,该策略实现了电压源型换流器的多端直流 (voltage source converter multi-terminal DC, VSC-MTDC)输电系统的一次调频响应,属于有差调节。 文献[13]在逆变站引入下垂裕度控制,其输出的差 值作为VSG有功控制环节的输入机械转矩,当直 流电网中定电压控制站超出设定的电压裕度,该 VSG控制的换流站具有后备定电压能力。

本文根据VSC-MTDC换流站的电压下垂控 制策略,提出一种虚拟调频器(virtual frequency regulator,VFR)控制策略,在传统虚拟同步发电 机(traditional virtual synchronous generator,TVSG) 控制基础上,利用PI控制器可以实现频率跟踪调 节,将角速度差值进行PI调节,消除角速度差值 实现无差调频;其次引入直流电压的偏差,让换 流站参与直流电压的调整,并对该控制系统稳定 性进行分析得到合理的参数,最后对所提控制策 略进行验证。

1 VSC-MTDC系统描述及TVSG控 制原理

1.1 四端 VSC-MTDC 系统描述

四端的VSC-MTDC系统如图1所示,换流站 1、换流站3连接大电网,采用功率一电压下垂控 制^[14];换流站2经换流变压器与新能源并网连 接,作为新能源送出,采用定功率控制;换流站4 连接无源网络,采用虚拟同步发电机控制策略。



1.2 TVSG 控制原理

TVSG有功环节控制一般采用同步发电机的 二阶模型进行模拟^[15],其表达式如下:

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = J\theta = \frac{1}{\omega_{\mathrm{ref}}} \left(P_{\mathrm{ref}} - P_{\mathrm{e}}\right) - D(\omega - \omega_{\mathrm{ref}}) \quad (1)$$

式中:J为转动惯量; ω 为输出电压角速度; θ 为输 出电压相角, θ =d ω /dt; ω_{ref} 为电网同步角速度; P_e 为实际输出的瞬时有功功率; P_{ref} 为有功功率的给 定值;D为阻尼系数。

向无源网络供电的TVSG有功一频率控制原 理图如图2所示。



图2 TVSG有功一频率控制原理图

Fig.2 Schematic of TVSG with active power-frequency control

无功控制环节主要依据逆变站输出无功功 率偏差以及输出电压的偏差,经过PI控制环节得 到调制电压幅值参考值*E*_m,如下式所示:

 $E_{\rm m} = \Pr[K_{\rm q}(Q_{\rm ref} - Q_{\rm e}) + (U_{\rm acref} - U_{\rm ac})]$ (2) 式中: $K_{\rm q}$ 为无功—电压调节系数; $Q_{\rm e}, Q_{\rm ref}$ 分别为瞬 时无功测量值与无功参考值; $U_{\rm acref}, U_{\rm ac}$ 分别为交 流电压的参考值、测量值。

无功环节控制器如图3所示。





Fig.3 Schematic of reactive power voltage control

有功环节控制器输出相位θ作为调制波相 位,无功环节输出参考电压 E_m作为调制波的幅 值,可得脉冲宽度调制输入的三相调制波为

$$\begin{cases} e_{am} = E_{m} \sin\theta \\ e_{bm} = E_{m} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ e_{cm} = E_{m} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$
(3)

式中:e_{am},e_{bm},e_{cm}为三相调制信号。

2 基于频率和直流电压偏差的VFR 控制

无源网络中,频率差值为

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_{\rm e} - \Delta P_{\rm L}}{K} \tag{4}$$

式中:K为无源网络调频系数; ΔP_L 为无源网络负荷变化量; ΔP_e 为逆变站输出的功率改变量。

根据式(1)可知,TVSG频率调节主要是通过 改变功率进行调节,当系统进入稳态时,其关系 如下式所示:

 $\Delta P = P_{ref} - P_{e} = D\omega_{ref}(\omega - \omega_{ref}) = K_{0}\Delta\omega \quad (5)$ 式中:K_0为TVSG一次调频系数。

式(5)为TVSG控制模拟系统的一次频率调节,属于有差调节。

当无源网络负荷变化时,无源网络系统一次、二次功率一频率变化情况如图4所示。当负荷增加时,TVSG控制调整逆变站输出功率,系统从稳定运行点A点到C点,频率从额定频率f_{ref}到f₁ 不能回到额定频率值,属于一次调频。



Fig.4 Primary and secondary frequency regulator curves of the system

由式(4)可知,无源网络要实现无差控制,即 $\Delta f=0$,则功率变化量需要满足 $\Delta P_{e}=\Delta P_{L}$ 。本文引 入功率差和直流电压偏差,作为TVSG的前馈环 节,设计出一种VFR频率控制策略,让运行点从A 点移动到D点,系统就可以实现无差频率控制, 其表达式为

$$\Delta P_{\rm e} = (K_{\rm p} + \frac{K_{\rm i}}{s})(\omega_{\rm ref} - \omega) + k_{\rm u}(U_{\rm dcref} - U_{\rm dc}) \quad (6)$$

式中: K_p 为比例常数; K_i 为积分常数; k_u 为下垂系数; U_{deref} , U_{de} 分别为直流电压的参考值、测量值。

VFR控制将角频率、直流电压和功率变化量 关联在一起。通过PI控制器中的积分项可以消除 角频率的稳态误差,有效地跟踪电网的角频率;同 时引入直流电压偏差控制,加速换流站功率平衡。

VFR控制原理图如图5所示。

将式(6)代入式(1)中,得到VFR控制策略的 二阶数学模型为

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} + D(\omega - \omega_{\mathrm{ref}}) = \frac{1}{\omega_{\mathrm{ref}}} \left[(K_{\mathrm{p}} + \frac{K_{\mathrm{i}}}{s})(\omega_{\mathrm{ref}} - \omega) + k_{\mathrm{u}}(U_{\mathrm{deref}} - U_{\mathrm{de}}) \right]$$

$$(7)$$



Fig.5 Schematic diagram of the VFR control

3 VFR 无差调频特性以及调压特性 分析

根据图5得到系统ω-ω_{ref}的开环传递函数为

$$G(s)_{\omega-\omega_{nt}} = \left(K_{p} + \frac{K_{i}}{s}\right) \frac{1}{\omega_{ref}} \frac{1}{Js+D} \qquad (8)$$

当输入信号*R*(*s*)=*ω*_{ref}/*s*为阶跃信号时,系统 稳态误差的表达式为

$$e_{ss}(\infty)_{\omega} = \lim_{s \to 0} s \frac{1}{1 + G(s)} R(s) = 0$$
 (9)

因为 $\omega=2\pi f$,角频率和频率之间为线性关系,所以 $e_{ss}(\infty)_{f}=0$ 。由式(9)可知,该控制器可实现 ω 对 ω_{ref} 的良好跟踪,达到了频率的无差控制调节效果。

3.1 K_i和K_p参数对控制系统影响分析

根据图5得到控制器中ω到ω_{ref}闭环传递函数为

$$T(s)_{\omega - \omega_{st}} = \frac{K_{p}s + K_{i}}{\omega_{ref}Js^{2} + (\omega_{ref}D + K_{p})s + K_{i}} \quad (10)$$

由式(10)可得VFR控制环ω-ω_{ref}闭环特征方程为

$$s^{2} + \left(\frac{D}{J} + \frac{K_{\rm p}}{\omega_{\rm ref}J}\right)s + \frac{K_{\rm i}}{\omega_{\rm ref}J} = 0 \qquad (11)$$

虚拟同步控制器中转动惯量参数 J>0 且阻尼 系数 D>0时,通过劳斯稳定性判据对该闭环特征 方程进行稳定分析。根据劳斯判据,如果特征方 程的根都在左半平面属于稳定状态,则需要满足 特征方程各项系数均为正,因此 VFR 控制器参数 需要满足下列约束条件:

$$\begin{cases} K_{i} > 0\\ \omega_{ref}D + K_{p} > 0\\ 0 < J < (\omega_{ref}D + K_{p})^{2}/(4\omega_{ref}K_{i}) \end{cases}$$
(12)

该控制器引入了积分参数*K*_i,因此需要对*K*_i参数 对于控制系统的稳定性进行分析。

本文阻尼系数根据电网电压频率变化1Hz, 逆变器输出有功功率变化100%(即200 MW)选 取^[16],阻尼系数根据下式进行合理的选取:

$$D = \frac{\Delta T_{\text{max}}}{\Delta \omega_{\text{max}}} = \frac{\Delta P_{\text{max}}}{\omega_{\text{ref}} \Delta \omega_{\text{max}}} \approx 100 \,\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1} \quad (13)$$

因此本文选取阻尼系数 *D*=100 N·m·s·rad⁻¹、惯性 63 系数J=1 kg·m²以及PI环节比例系数 $K_p=50$ 。

根据式(11)可变换以*K*_i为增益的传递函数 如下:

$$G_{i}(s) = \frac{K_{i}}{\omega_{ref}Js^{2} + (\omega_{ref}D + K_{p})s}$$
(14)

 K_i 取值范围大于0时绘制根轨迹如图6所示。 分析 K_i 参数变化,控制系统的一对共轭特征根 λ_1, λ_2 一直在左半平面移动,所以 K_i 参数不影响控 制系统的稳定性,综合考虑本文 K_i 取值为1。



图 6 K_i 变化时系统的根轨迹图 Fig.6 Root locus of the system when K_i changes

根据式(11),得出等效开环传递函数式:

$$G_{\rm p}(s) = \frac{K_{\rm p}s}{\omega_{\rm ref}Js^2 + \omega_{\rm ref}Ds + K_{\rm i}}$$
(15)

以比例参数 K_p 为变量,绘制其根轨迹如图7 所示。



图7 K_p变化时系统的根轨迹图



控制系统的一对共轭特征根 λ_1, λ_2 一直在左 半平面移动,不影响原本控制系统的稳定性;当 K_p 取值越大的时候,根轨迹的特征根靠近零点,系统 的暂态稳定性变差。综合考虑本文 K_p 取值为50。

3.2 k_u参数对控制系统影响分析

对式(7)进行变换得到频率增量 $\Delta \omega$ 和直流 电压增量 ΔU_{de} 之间的传递函数为

$$G_{u}(s) = \frac{\Delta\omega}{\Delta U_{dc}} = \frac{k_{u}}{J\omega_{ref}s + \omega_{ref}D + K_{p} + \frac{K_{i}}{s}} \quad (16)$$

绘制以比例系数 k_u 为变量的控制系统根轨 迹。当 k_u >0时, $G_u(s)$ 的根轨迹如图8所示,控制 系统的特征根为非正,系统属于稳定状态;当 k_u < 0时, $G_u(s)$ 的根轨迹如图9所示,控制系统的特征 根含有正数,控制系统属于不稳定状态。



通过以上分析比例系数k_a应当取为正值,本 文k_a取值为0.08。

4 仿真验证

本文在仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建图 1 所 示的仿真模型。直流线路按照单位长度直流电 阻为 0.01 Ω /km,其中线路长度 L_1 =60 km, L_2 =80 km, L_3 =60 km, L_4 =100 km。换流站 1~4 的额定容 量分别为 400 MW,400 MW,500 MW,300 MW。

四端柔性直流输电系统的主要参数如下:直流电压 200 kV,换流站 1下垂系数 0.16,换流站 1 功率 220 MW,换流站 2定功率 280 MW,换流站 3 下垂系数 0.12,换流站 3 功率 300 MW;换流站 4 控制器参数如下:阻尼系数 *D* = 100 N·m·s/rad,转动惯量 *J* =1 kg·m²,下垂系数 *k*_u=0.08,频率无差

调节比例系数 K_p =50,频率无差调节积分系数 K_i =1。向无源网络供电的U—f控制,即定交流电压控制,其结构如图10所示,外环为定交流电压控制器,频率由压控振荡器给出。 U_{sdref} , U_{sqref} 分别为交流电压d,q轴参考值。外环 PI参数 K_{pl} =2, K_{il} =0.02;内环 PI参数 K_{p2} =60, K_{i2} =0.002。



为了验证所提出的虚拟同步机控制方法有效可行、能为受端无源网络系统提供必要的频率支撑、能加强系统动态稳定性能,本文针对图 1中的换流站4分别采用U—f控制、传统的虚拟同步机控制和本文提出的VFR控制方法进行对比验证。

4.1 负荷阶跃响应

在1.5 s时,换流站4连接的交流侧负荷功率 由200 MW 突增至220 MW,运行至3 s时负荷功率 突降至180 MW,系统响应仿真曲线如图11 所示。

从图 11a、图 11b可知,在 1.5 s时,VSC₄交流 侧负荷突增,直流系统出现功率缺额,导致直流 电压出现下降,无源孤岛系统交流频率出现下 降。在 3 s时,VSC₄交流侧负荷突减,直流系统出 现功率盈余,导致直流电压上升,无源孤岛系统 交流频率上升。通过 VSC₁和 VSC₃采用功率-电 压下垂控制来分担直流电网内不平衡功率。对 比图 11 a 的三种控制情况,当采用 U—f控制时, 负荷改变时频率出现大的波动,频率变化幅值 大;当采用 TVSG 控制时,由于转动惯量和阻尼系 数的存在,孤岛系统的频率与额定频率差值减 少,但属于一次调频;当采用 VFR 控制 VSC₄时, VFR 控制参与孤岛系统二次频率调节,在受到负 荷波动后可以恢复到额定频率。

从图 11c 可知,在 1.5 s时,VSC₄交流侧负荷 突增,导致孤岛系统的交流电压出现了短暂的下 降,采用 VFR 控制策略,交流电压波动最小,孤岛 系统电压更快恢复到额定电压值。从图 11c 可 知,在 3 s时,VSC₄交流侧负荷突减,导致孤岛系 统的交流电压出现了瞬时上升,采用 VFR 控制策 略,交流电压波动小,孤岛系统电压更快稳定恢





Fig.11 Simulation curves of load step response system

从图 11d 可以看出,在1.5 s时,负荷突增, VSC₄缓慢增加吸收的功率 VSC₃相应减小吸收的 功率;在3 s时,负荷突降,VSC₄缓慢减小吸收的 功率,VSC₃适当增加吸收的功率。采用 VFR 控 制各个换流站的有功功率更快恢复稳定性,体 现出了 VFR 控制策略为孤岛系统提供惯性支撑 作用。

4.2 三相瞬时故障

孤岛系统交流线路在2s时,发生0.1s的瞬时三相接地短路故障。系统的动态响应如图12 所示。从图12a可知,采用U—f控制时,故障后 孤岛系统的频率瞬间增大,出现频率尖峰;采用 TVSG控制方式下系统在发生故障的瞬间受端系 统频率波动幅度较大,稳态恢复时间较长;采用 VFR控制方式下系统发生故障瞬间受端系统频 率波动较小,稳态恢复过程较为平缓,快速回到 额定频率值。





从图 12b 可知,在2 s时,孤岛系统交流线 路发生三相接地短路,孤岛系统的电压瞬间 跌落到0,故障消失后,孤岛系统的电压瞬间 上升,在系统恢复的过程中,采用 VFR 控制策 略孤岛系统的交流电压更快的恢复到额定电 压值。

从图 12c 中可以看出,直流电压在故障后发 生波动,采用 VFR 控制比采用两外两种控制方 式,直流电压更快恢复稳定,由于 VFR 控制考虑 了直流电压与交流系统的相互关系。

从图 12d 中可以看出,受故障的影响,孤岛 系统的有功功率发生巨大的波动,采用 VFR 控制 有功功率恢复稳定的时间更短。

5 结论

本文对如何提高 VSC-MTDC 系统向无源网 络供电的频率质量和系统稳定性问题展开了研 究。提出 VFR 控制,实现无源网络无差调频,提 高系统稳定性,并进行仿真验证,得出以下结论:

1) VFR 控制是对 TVSG 控制的改进,因此 VFR具有与同步发电机相类似的一次调频特性, 同时由于转动惯量和阻尼参数的存在,系统的惯 性支撑等优点保留。同时,VFR控制通过检测控 制环的角频率偏差来实现频率控制,无需测量有 功功率。

2)本文VFR控制将角频率的偏差引入到积 分环节,消除控制系统角频率稳态误差,及消除 频率的稳态误差,实现无源网络的无差调频。

3)本文将TVSG与下垂控制相结合,在控制 器中加入了直流电压的偏差控制,让无源网络可 以参与直流电压的调节作用,使直流电压具有更 好的调节性能。

参考文献

- 李兴源,曾琦,王渝红,等.柔性直流输电系统控制研究综述[J].高电压技术,2016,42(10):3025-3037.
 Li Xingyuan, Zeng Qi, Wang Yuhong, *et al.* Review on control of flexible DC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2016,42 (10): 3025-3037.
- [2] 张志军,李帆,孟庆波.基于P-Q控制模式的VSC-HVDC小 干扰稳定性研究[J].电气传动,2020,50(8):53-58,64.
 Zhang Zhijun, Li Fan, Meng Qingbo. Research on small signal stability of VSC-HVDC based on P-Q control mode[J]. Electric Drive, 2020,50(8): 53-58,64.
- [3] Zhang L, Harnefors L, Nee H P. Modeling and control of VSC-HVDC links connected to island systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2):783–793.
- [4] 钟庆昌.虚拟同步机与自主电力系统[J].中国电机工程学报,2017,37(2):336-348.
 Zhong Qingchang. Virtual synchronous machine and independent power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (2):336-348.
- [5] 滕俊杰,李素敏.虚拟同步发电机功率耦合机理及解耦策 略研究[J].电气传动,2019,49(10):60-64,69.
 Teng Junjie, Li Sumin. Research on power coupling mechanism and decoupling strategy of virtual synchronous generator[J]. Electric Drive, 2019,49(10): 60-64,69.
- [6] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等.虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.

Lü Zhipeng, Sheng Wanxing, Zhong Qingchang, et al. Virtual

synchronous generator and its application in microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (16): 2591–2603.

- [7] Aouini R, Marinescu B, Kilani K B, et al. Synchronverterbased emulation and control of HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1):278-286.
- [8] 喻宙,苏白娜,徐世周.逆变器 VSG 小信号建模与参数设计
 [J].电气传动,2020,50(8):79-86.
 Yu Zhou, Su Baina, Xu Shizhou. Small signal modeling and parameter design of inverter VSG[J]. Electric Drive, 2020,50 (8):79-86.
- [9] 杨赟,梅飞,张宸宇,等.虚拟同步发电机转动惯量和阻尼
 系数协同自适应控制策略[J].电力自动化设备,2019,39
 (3):125-131.

Yang Yun, Mei Fei, Zhang Chenyu, *et al.* Cooperative adaptive control strategy of inertia and damping coefficient of virtual synchronous generator[J]. Electric power automation equipment, 2019,39 (3): 125–131.

[10] 姚为正,杨美娟,张海龙,等.VSC-HVDC 受端换流器参与 电网调频的 VSG 控制及其改进算法[J].中国电机工程学 报,2017,37(2):525-533.

Yao Weizheng, Yang Meijuan, Zhang Hailong, *et al.* VSG control of VSC-HVDC receiving converter participating in grid frequency modulation and its improved algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 525–533.

- [11] 张宇华,赵晓轲,方艺翔.独立微网中虚拟同步发电机的频率自恢复控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2125-2131.
 Zhang Yuhua, Zhao Xiaoke, Fang Yixiang. Frequency self recovery control strategy of VSG in independent microgrid[J].
 Power System Technology, 2019, 43(6): 2125-2131.
- [12] 王炜宇,李勇,曹一家,等.基于虚拟调速器的多端直流虚

拟同步机控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3461-3470, 5.

Wang Weiyu, Li Yong, Cao Yijia, *et al.* Control strategy of multi terminal DC virtual synchronous machine based on virtual governor[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3461–3470, 5.

[13] 宋冰倩,陆锋,赵成勇,等.计及直流电网潮流优化的新型 虚拟同步控制策略[J].华北电力大学学报(自然科学版), 2019,46(5):16-24.

Song Bingqian, Lu Feng, Zhao Chengyong *et al.* New virtual synchronous control strategy considering DC power flow optimization[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(5): 16–24.

- [14] 王伟, 徐燕芬. 适用于功率突变的 MTDC 系统改进下垂控 制[J]. 电气传动, 2020, 50(8): 59-64.
 Wang Wei, Xu Yanfen. Improved droop control of MTDC system for power mutation[J]. Electric Drive, 2020, 50 (8): 59-64.
- [15] Wu H, Ruan X, Yang D, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 1.
- [16] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模 与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6508-6518.

Wu Heng, Ruan Xinbo, Yang Dongsheng, *et al.* Modeling and parameter design of virtual synchronous generator power ring[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508–6518.

收稿日期:2021-01-18 修改稿日期:2021-03-29

(上接第22页)

学报(自然科学版), 2008, 38(S2): 23-26.

Peng Cheng, Wang Yong. A frequency domain identification algorithm for fractional order systems[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 38(S2): 23–26.

- [14] 刘学.基于智能优化算法的分数阶时滞混沌系统辨识研究[D].秦皇岛:燕山大学,2015.
 Liu Xue. Research on identification of fractional time-delay chaotic system based on intelligent optimization algorithm[D].
 Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [15] 孟丽.粒子群算法及其在分数阶系统辨识中的应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.

Meng Li. Particle swarm algorithm and its application in fractional-order system identification[D]. Beijing: North China Electric Power University ,2016.

- [16] 何庆,魏康园,徐钦帅.求解函数优化问题的改进鲸鱼优化 算法[J]. 微电子学与计算机, 2019,36(4):72-77,83.
 He Qing, Wei Kangyuan, Xu Qinshuai. Improved whale optimization algorithm for solving function optimization problems[J].
 Microelectronics and Computers, 2019,36(4):72-77,83.
- [17] 孔芝,杨青峰,赵杰,等.基于自适应调整权重和搜索策略的鲸鱼优化算法[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41
 (1):35-43.

Kong Zhi, Yang Qingfeng, Zhao Jie, *et al.* Whale optimization algorithm based on adaptive weight adjustment and search strategy[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2020,41(1): 35–43.

收稿日期:2020-12-23 修改稿日期:2021-02-07