基于纵横交叉算法的新型电力系统调频参数协调优化策略

雷傲宇[1]，苏婷婷[2]，梅勇[1]，黄方能[1]，王裕[2]，吴为[3]
（1.中国南方电网电力调度中心，广东 广州 510663；
2.广东工业大学 自动化学院，广东 广州 510006；
3.南方电网 科学研究院，广东 广州 510663）

摘要：“碳中和，碳达峰”战略实施的关键期，新型电力系统频率特性呈现一系列新的特征（如节点惯量水平降低、分布差异明显等），维护频率稳定安全面临诸多挑战。新能源跟网型调频策略利用新能源系统内多样化调频资源，是提高新能源惯性响应及一次调频能力的有效手段。然而，新能源的间歇性波动，以及惯量控制与下垂控制参数间的相互影响，导致调频响应速度和稳定性矛盾，新能源机组调频参数的协调优化至关重要。因此，提出一种基于纵横交叉算法的新型电力系统调频参数协调优化策略，利用纵横交叉算法有效规避陷入局部最优解的优势，对新能源跟网型虚拟惯量控制参数进行趋优协调，在改善新能源并网节点频率动态响应指标的同时抑制频率振荡。同时，首次将纵横交叉算法尝试应用到新型电力系统调频参数优化与控制中，也可有效扩展纵横交叉算法的理论内容和应用范围，具有一定的理论价值和工程意义。

关键词：新型电力系统；调频参数；纵横交叉算法
中图分类号：TM712 **文献标识码：**A **DOI：**10.19457/j.1001-2095.dqcd26115

A Novel Frequency Modulation Parameter Cooperative Optimization Strategy for Power System Based on Crossbar Algorithm

LEI Aoyu[1]，SU Tingting[2]，MEI Yong[1]，HUANG Fangneng[1]，WANG Yu[2]，WU Wei[3]
（1.*CSG Power Dispatching Control Center*，*Guangzhou* 510663，*Guangdong*，*China*；
2.*School of Automation*，*Guangdong University of Technology*，*Guangzhou* 510006，*Guangdong*，*China*；
3.*Electrical Power Research Institute*，*CSG*，*Guangzhou* 510663，*Guangdong*，*China*）

Abstract：In the critical period of the implementation of the strategy of "carbon neutrality，carbon peak"，the frequency characteristics of the new power system show a series of new characteristics，such as the reduction of node inertia level and obvious distribution difference，and the maintenance of frequency stability and security are faced with many challenges. Using the diversified frequency modulation（FM）resources in the new energy system is an effective means to improve the inertial response of new energy and the ability of primary FM. However，the intermittent volatility of new energy and the interaction between inertia control and sag control parameters lead to the contradiction between the frequency modulation response speed and stability，so the coordinated optimization of frequency modulation parameters of new energy units is very important. Therefore，a new power system frequency modulation parameter coordination optimization strategy based on crossbar algorithm was proposed. The crossbar algorithm was used to effectively avoid the advantage of falling into the local optimal solution，optimize and coordinate the control parameters of new energy and grid type virtual inertia，improve the frequency dynamic response index of new energy grid-connected nodes，and suppress frequency oscillation. Meanwhile，the crossbar algorithm was tried to apply to the optimization and control of frequency modulation parameters of new power

基金项目：中国南方电网公司科技项目(0000020220030101FK00007)；国家自然科学基金(62273107)；
广东省自然科学基金(2023A1515240082，2022A1515011079)
作者简介：雷傲宇（1990—），男，博士，高级工程师，Email: leiay@csg.cn
通讯作者：苏婷婷（1999—），女，硕士研究生，Email：tingting.su.2023@gmail.com

system for the first time，and also can effectively expand the theoretical content and application range of crossbar algorithm，which has certain theoretical value and engineering significance.

Key words：new power system；frequency modulation parameters；crossbar algorithm

2021年3月，习近平总书记主持召开中央财经委员会第九次会议，对“碳达峰、碳中和”作出进一步部署，首次提出“构建以新能源为主体的新型电力系统”[1-2]。为全面贯彻落实党的二十大精神，积极稳妥地推进“碳达峰、碳中和”工作，2023年1月6日国家能源局发布了《新型电力系统发展蓝皮书》。由此，构建以新能源为主体的新型电力系统，将成为未来中长期我国能源电力发展的重要方向[3]。在加快建设新型电力系统的背景下，随着光伏、风能等新能源的大规模接入和电力电子变流装置的广泛应用，新型电力系统高比例新能源、高比例电力电子设备的“双高”特征日益凸出，低惯量、低阻尼、弱支撑、低抗扰性、故障形态复杂等特征明显，需重新认知并掌握其动态特性和控制规律[4-5]。

新型电力系统与传统电力系统存在差异，也使得电力系统业已存在的问题更加凸显，频率稳定问题就是其中典型代表[6]。近年来，国内外新型电力系统均出现一些频率安全事故。2015年9月，锦苏特高压直流线路发生双极闭锁，3.55%发电功率损失造成频率最低跌落至49.56 Hz，经240 s调整后频率才恢复至50 Hz；2016年9月，南澳电网由于台风造成了长达10 h停电事故，事故前非同步发电功率接近80%，在极低惯量水平下电力系统频率快速跌落诱发系统解列；2019年8月，英国出现大规模停电事故，影响超过100万用户，最长停电时长1.5 h，非同步发电占比近40%，导致系统惯量明显偏低，频率快速跌落诱发后续连锁故障，最终导致英国损失约5%负荷[7-8]。这些频率安全事故与新型电力系统“双高”特性密切相关，造成巨大的经济损失和极大的社会影响。随着新能源占比不断提升，系统转动惯量、调频备用容量持续减小，系统频率支撑能力不断下降，频率失稳风险将逐渐增大[9]。而且，对新能源一般采取传统最大功率跟踪控制，随着新能源渗透率升高，可能导致系统惯量水平及一次调频能力持续下降，进一步恶化系统频率的动态特性[10]。

为避免高比例新能源并网对系统频率安全稳定造成不利后果，许多学者和电力从业人员提出了各种针对新能源的精细化频率调控措施，旨在充分利用高比例新能源系统内多样化的调频资源，提高新能源惯性响应及一次调频的能力[11]。其中，新能源跟网型调频策略是在逆变器中利用锁相环实时跟踪频率，分别将测量频率和频率变化率通过相应的下垂控制参数和虚拟惯量控制参数引入控制环节，其控制特性直接由控制参数决定[12-13]。新能源跟网型变流器基于锁相环的频率测量信号附加频率控制，其中增加惯性控制通过引入电网频率变化率模拟同步机的惯性响应；附加一次调频控制通过引入电网频率与额定值间的差值，响应电网频率的变化[14-15]。为了实现快速响应，当前基于虚拟惯性控制的附加频率控制策略应用较为广泛[16]。此外，控制方式上，增加频率控制可以在变流器有功电流、直流电压和参考功率上附加参考信号，通过输出功率的变化，实现对系统频率响应的支撑[17-18]。

然而，当新能源调频参数设置不合理时，一方面，可能会引起其调频响应速度与传统同步机组存在差异，进而导致系统频率引发如频率振荡等动态不稳定问题；另一方面，新能源出力间歇性波动导致其面临较大扰动时存在调频功率不足或过剩的问题，最终都可能对频率动态特性产生不利影响[19]。其次，在调频功率的限制性约束下，惯量控制参数与下垂控制参数间存在相互影响，当系统受到较大扰动时，对于采用虚拟惯量综合控制的新能源机组，其现有的调频功率需要在虚拟惯量控制和下垂控制间平衡分配[20]。再者，新能源虚拟惯量控制系数若大于系统常规机组等效惯性时间常数，将会造成系统失稳，其控制延时特性对系统稳定性的影响也限制了控制系数的选取[21-22]。因此，新能源机组调频参数的协调优化对于实现系统频率动态稳定至关重要。

纵横交叉算法在频率响应参数优化方面的应用主要有以下两点优势[23]：1）有效规避陷入局部最优解。有助于最终的调频参数组为全局最优而不仅是局部最优；2）收敛速度较快。纵横交叉算法在调频参数寻优过程中能实现较快的收敛速度，尤其是在复杂场景中的表现。由此，本文提出一种基于纵横交叉优化算法的新型电力系统调频参数协调优化策略。基于新能源控制

参数影响机理，利用纵横交叉算法的优势对新能源机组惯量系数、惯量延时、下垂系数进行协调趋优，趋优目标综合考虑频率响应极值及频率动态稳定，可在有效改善新能源并网节点频率动态响应指标的同时抑制频率振荡。此外，虽然纵横交叉算法在电力系统的潮流计算、负荷预测和最优调度等方面已有探讨[24-25]，但应用在新型电力系统调频控制和稳定运行的研究仍鲜有报道。因此，本文的研究不仅为新型电力系统调频参数优化与控制提供了新的理论基础与参考方案，也可有效扩展纵横交叉算法的理论内容和应用范围。

1　跟网型调频控制参数的影响机理

1.1　建立频率响应模型

同步机组可采用火电或水电，由于新能源电力电子器件控制的响应速度快且控制更灵活，本文着重关注新能源控制参数对频率特性的影响，简化了调速器的具体控制、涡轮机动态等非线性环节。简化频率响应模型/控制闭环如图1所示。

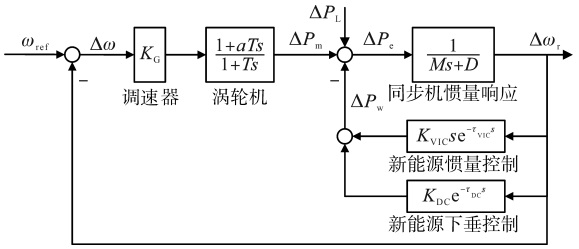

图1　频率响应模型

Fig.1　Frequency response model

只含带惯量响应与调速器的同步机系统频率响应传递函数为

$$G(s)=\frac{K_G}{MT}\frac{1+aTs}{s^2+\left(\frac{D}{M}+\frac{1}{T}\right)s+\frac{D}{MT}} \tag{1}$$

式中：M为同步机转子的惯性时间常数；D为同步机的阻尼系数；T为涡轮机的等值惯性时间常数；a为涡轮机特征系数，对于水轮机取$a=-2$；K_G为同步机调速器一次调频下垂系数。

新能源跟网型虚拟惯量控制和虚拟下垂控制的传递函数分别为

$$W_{VIC}(s)=K_{VIC}se^{-\tau_{VIC}s} \tag{2}$$

$$W_{DC}(s)=K_{DC}e^{-\tau_{DC}s} \tag{3}$$

式中：K_{VIC}为惯量系数；τ_{VIC}为惯量延时；K_{DC}为下垂系数；τ_{DC}为下垂延时。

控制延时表征相应控制启动延时。实际新能源系统的频率响应可能受到储能设备的影响，采用纯延时可以更好地反映系统中的能量交换特性，而不是简单地引入一阶惯性环节。因此本文新能源虚拟惯量和下垂响应都采用了纯延时表示响应滞后。

并入含附加跟网型虚拟惯量控制和下垂控制的新能源后，系统的开环传递函数为

$$GW(s)=\frac{K_G}{MT}\cdot(1+aTs)/\left[s^2+\left(\frac{D}{M}+\frac{1}{T}\right)s+\frac{D}{MT}\right]\cdot\left(K_{VIC}se^{-\tau_{VIC}s}+K_{DC}e^{-\tau_{DC}s}\right) \tag{4}$$

1.2　新能源系统稳定性分析

首先讨论电流源型新能源控制参数对系统扰动消失后靠自身恢复稳态能力的影响，电流源型新能源并网系统的特征方程为

$$\left(1+\frac{aK_GK_{VIC}e^{-\tau_{VIC}s}}{M}\right)s^2+\left(\frac{D}{M}+\frac{1}{T}+\frac{aK_GK_{DC}e^{-\tau_{DC}s}}{M}+\frac{K_GK_{VIC}e^{-\tau_{VIC}s}}{MT}\right)s+\frac{D}{MT}+\frac{K_GK_{DC}e^{-\tau_{DC}s}}{MT}=0 \tag{5}$$

根据劳斯判据，特征方程各项系数均为正数是满足系统稳定性的必要条件，即

$$\begin{cases}1+\dfrac{aK_GK_{VIC}e^{-\tau_{VIC}s}}{M}>0\\ \dfrac{D}{M}+\dfrac{1}{T}+\dfrac{aK_GK_{DC}e^{-\tau_{DC}s}}{M}+\dfrac{K_GK_{VIC}e^{-\tau_{VIC}s}}{MT}>0\\ \dfrac{D}{MT}+\dfrac{K_GK_{DC}e^{-\tau_{DC}s}}{MT}>0\end{cases} \tag{6}$$

其中，M，D，T，K_G，K_{VIC}，K_{DC}均为正数；$e^{-\tau_{VIC}s}$，$e^{-\tau_{DC}s}$大于0，即新能源的控制参数应满足：

$$\begin{cases}K_{VIC}e^{-\tau_{VIC}s}>-\dfrac{M}{aK_G}\\ K_{DC}e^{-\tau_{DC}s}>-\dfrac{DT+M}{aTK_G}+\dfrac{M}{a^2TK_G}\end{cases} \tag{7}$$

1.3　新能源系统稳态特性分析

在上述控制系统满足稳定性的前提下，运用稳态性能指标基于频域分析其稳态性能。

1）参考频率输入作用下的稳态误差。仅考虑频率输入信号引起频率偏差，即不考虑扰动作用时，误差传递函数为

$$\Phi_{ss}(s)=\frac{\Delta\omega(s)}{\omega_{ref}}=\frac{Ms+D+K_{VIC}se^{-\tau_{VIC}s}+K_{DC}e^{-\tau_{DC}s}}{Ms+D+K_{VIC}se^{-\tau_{VIC}s}+K_{DC}e^{-\tau_{DC}s}+K_G\frac{1+aTs}{1+Ts}} \tag{8}$$

假设输入为单位阶跃函数，应用由拉普拉斯变换的终值定理计算其稳态误差为

$$e_{ss}=\lim_{s\to 0}s\frac{1}{s}\Delta\omega(s)=\frac{D+K_{DC}}{D+K_{DC}+K_G}\omega_{ref}\tag{9}$$

e_{ss}表征系统频率跟踪给定参考频率的能力,能力大小与误差大小成正比。

2)扰动输入作用下的稳态误差传递函数为

$$\Phi_{sr}(s)=\frac{-\Delta\omega(s)}{\Delta P_L}=\frac{1}{Ms+D+K_{VIC}se^{-\tau_{VIC}s}+K_{DC}e^{-\tau_{DC}s}+K_G\dfrac{1+aTs}{1+Ts}}\tag{10}$$

假设输入为单位阶跃函数,应用由拉普拉斯变换的终值定理计算其稳态误差为

$$e_{sr}=\lim_{s\to 0}s\frac{1}{s}\Delta\omega(s)=-\frac{1}{D+K_{DC}+K_G}\Delta P_L\tag{11}$$

e_{sr}表征系统频率抗扰动的能力,能力大小与误差大小成反比。

根据式(9)、式(11)可知:1)在满足系统稳定性的前提要求下,对新能源施加虚拟惯量控制不影响系统的稳态特性;2)新能源采用虚拟下垂控制相较于常规控制,参考频率响应的稳态误差e_{ss}增大,即增强了系统频率与额定频率同步的能力;扰动功率响应的稳态误差e_{sr}减小,即增强了系统频率抗干扰的能力。

1.4　新能源系统动态特性分析

应用开环频率特性分析附加调频新能源并网系统的频率动态稳定性能。其频率特性为

$$\Phi(j\omega)=\frac{K_G}{D}\frac{1+jaT\omega}{(1-A\omega^2)+jB\omega}(j\omega K_{VIC}e^{-j\tau_{VIC}\omega}+K_{DC}e^{-j\tau_{DC}\omega})\tag{12}$$

其中

$$A=\frac{MT}{D}\qquad B=T+\frac{M}{D}$$

1)新能源附加虚拟惯量下垂综合控制。根据开环传递函数的频率特性,忽略延时环节的影响,得到系统的实频特性和虚频特性分别为

$$\begin{cases}P(\omega)=\dfrac{p_{VIC}(\omega)K_{VIC}+p_{DC}(\omega)K_{DC}}{(1-A\omega^2)^2+B^2\omega^2}\\[2ex] Q(\omega)=\dfrac{q_{VIC}(\omega)K_{VIC}+q_{DC}(\omega)K_{DC}}{(1-A\omega^2)^2+B^2\omega^2}\end{cases}\tag{13}$$

其中

$$\begin{aligned}p_{VIC}(\omega)&=B\omega^2-aT\omega^2+aTA\omega^4\\ p_{DC}(\omega)&=1-A\omega^2+aTB\omega^2\\ q_{VIC}(\omega)&=\omega-A\omega^3+aTB\omega^3\\ q_{DC}(\omega)&=aT\omega-aTA\omega^3-B\omega\end{aligned}$$

幅频特性为

$$A(\omega)=K_G/D\cdot\{[(p_{DC}^2+q_{DC}^2)K_{DC}^2+2(p_{DC}p_{VIC}+q_{DC}q_{VIC})K_{DC}K_{VIC}+(p_{VIC}^2+q_{VIC}^2)K_{VIC}^2]^{\frac{1}{2}}/[(1-A\omega^2)^2+B^2\omega^2]\}\tag{14}$$

相频特性为

$$\varphi(\omega)=\arctan\frac{q_{VIC}(\omega)K_{VIC}+q_{DC}(\omega)K_{DC}}{p_{VIC}(\omega)K_{VIC}+p_{DC}(\omega)K_{DC}}\tag{15}$$

2)新能源仅附加虚拟惯量控制。仅含虚拟惯量控制新能源系统的幅频特性为

$$A_{VIC}(\omega)=\frac{K_GK_{VIC}}{D}\frac{\sqrt{p_{VIC}(\omega)^2+q_{VIC}(\omega)^2}}{(1-A\omega^2)^2+B^2\omega^2}\tag{16}$$

相频特性为

$$\varphi_{VIC}(\omega)=\arctan\frac{\omega-A\omega^3+aTB\omega^3}{B\omega^2-aT\omega^2+aTA\omega^4}\tag{17}$$

3)新能源仅附加下垂控制。仅含虚拟下垂控制新能源系统的幅频特性为

$$A_{DC}(\omega)=\frac{K_GK_{DC}}{D}\frac{\sqrt{p_{DC}(\omega)^2+q_{DC}(\omega)^2}}{(1-A\omega^2)^2+B^2\omega^2}\tag{18}$$

相频特性为

$$\varphi_{DC}(\omega)=\arctan\frac{aT\omega-aTA\omega^3-B\omega}{1-A\omega^2+aTB\omega^2}\tag{19}$$

若新能源仅附加虚拟惯量控制或下垂控制,由式(16)、式(18)可知,惯量系数和下垂系数分别仅影响系统的幅频特性,结合典型延时环节的频率特性可知,系统相频特性分别仅受惯量延时或下垂延时影响;若同时采用两种控制,由式(14),相应的控制系数都对系统幅频特性有作用,且影响相角裕度,即惯量系数和下垂系数协同影响系统幅频特性,相频特性除了受控制延时影响,还与控制系数大小有关。

进一步在Matlab仿真平台上基于上述简化系统模型分析验证上述电流源型调频控制参数的影响机理。

同步机采用汽轮机,选取典型参数如下:K_G=20,M=12 s,T=6 s,a=0.33,D=0.01。

场景控制参数和频域性能指标如表1所示。表1中,G_m为增益裕度,ω_{cg}为相位穿越频率,P_m为相位裕度,ω_{cp}为增益交叉频率。

场景①:新能源仅附加虚拟惯量控制,固定惯量延时,改变惯量系数。

由式(16)结合幅值裕量稳定条件可知,K_{VIC}=M是该闭环系统的稳定界限,图2和图3分别为

场景①参数设置下的奈奎斯特图和伯德图，结合频域性能指标表1可以看出：$K_{VIC}=M$（同步机组等效惯性时间常数）时，增益裕量近似为0 dB，系统处于临界稳定；$K_{VIC}>M$时，增益裕量小于0 dB，阶跃功率频率响应表示系统失稳；$K_{VIC}<M$时，增益裕量大于0 dB且随K_{VIC}的增大而减小，稳定性变差。并且，固定惯量延时，改变惯量系数不影响系统的相频特性。需要说明的是，奈奎斯特曲线出现跳变表明系统存在不良的控制特性，可能新能源仅附加虚拟惯量控制本身并不利于系统的稳定性。

图4为场景①的阶跃功率频率偏差响应，可以看出，在稳定范围内，K_{VIC}值越大，最大频率偏差逐渐减小；K_{VIC}值在稳定界限内取任意值，准稳态频率偏差都趋于0.05 Hz，新能源虚拟惯量控制不影响系统的稳态性能。

表1　场景控制参数和频域性能指标

Tab.1　Frequency performance index of scenario

场景	K_{VIC}	τ_{VIC}	K_{DC}	τ_{DC}	G_m	ω_{cg}	P_m	ω_{cp}
①	4	0.1	—	—	9.54	31.6	—	—
	8	0.1	—	—	3.52	31.6	—	—
	12	0.1	—	—	0	31.6	—	—
	12.5	0.1	—	—	−0.355	31.6	—	—
②	6	0.1	—	—	6.02	31.6	—	—
	6	0.5	—	—	6.01	6.45	—	—
	6	0.9	—	—	6	3.66	—	—
	6	1.8	—	—	5.96	1.91	—	—
	12	0.1	—	—	—	—	−153	1.06
	12	0.5	—	—	—	—	−177	1.06
	12	0.9	—	—	—	—	158	1.06
	12	1.3	—	—	—	—	104	1.06
③	—	—	6	0.1	30.1	16	∞	—
	—	—	12	0.1	24.1	16	120	0.996
	—	—	18	0.1	20.6	16	103	1.51
④	—	—	18	0.1	20.6	16	103	1.51
	—	—	18	0.5	7.25	3.46	68.8	1.51
	—	—	18	0.9	2.67	2.05	34.2	1.51
	—	—	18	1.3	−0.031 1	1.51	−0.484	1.51

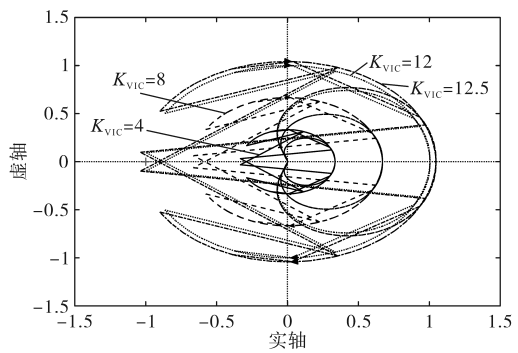

图2　场景①奈奎斯特图（$\tau_{VIC}=0.1$）

Fig.2　Nyquist diagram of scenario ①（$\tau_{VIC}=0.1$）

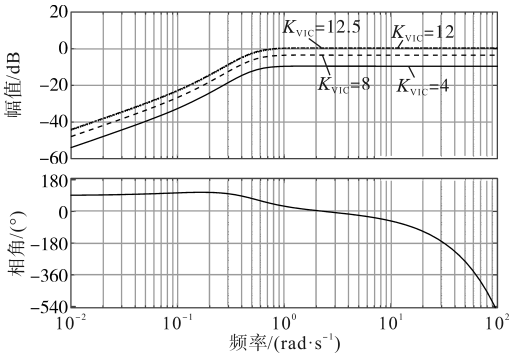

图3　场景①伯德图

Fig.3　Bode diagram of scenario ①

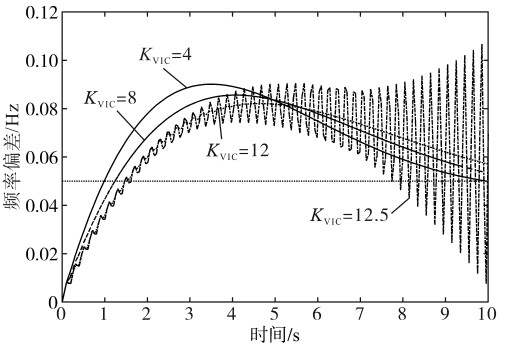

图4　场景①阶跃功率频率偏差响应

Fig.4　Step power frequency deviation response of scenario ①

场景②：新能源仅附加虚拟惯量控制，固定惯量系数，改变惯量延时。

图5和图6分别为场景②下的伯德图和频率偏差响应曲线图。可以看出，惯量系数距离界限值较大时（如$K_{VIC}=6$），对数幅频曲线与0 dB无交点，系统的相角裕度为无穷大，延时不会导致系统失稳。在一定范围内增大惯量延时有利于减小最大频率偏差，但频率响应曲线振荡增大了系统振荡稳定的风险，即使不会导致系统失稳，惯量延时也不宜过大。

惯量系数增大到其对数幅频曲线与0 dB有交点时（如K_{VIC}=12），存在相角裕度，随着延时的增大，相角裕度逐渐减小，频率偏差响应振荡越剧烈，系统稳定性变差甚至失稳。

因此，新能源仅虚拟惯量控制时，其惯量系数设置要低于常规机组的等效惯性时间常数，若注重改善频率变化率，延时应越小，若更注重改善系统频率最大偏差，延时可适当增大，但不宜设置过大，否则易引起频率振荡失稳。也就是说，惯量系数确定的情况下，存在最优延时平衡

系统的稳态性和动态性。

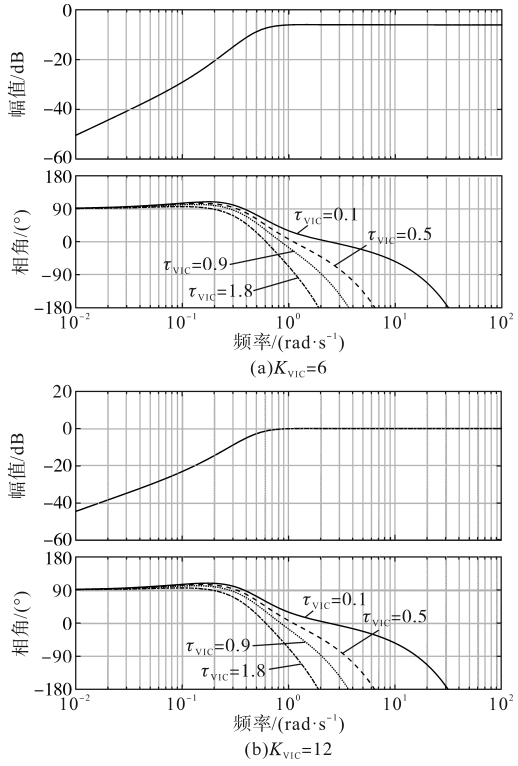

图5　场景②伯德图

Fig.5　Bode diagrams of scenario ②

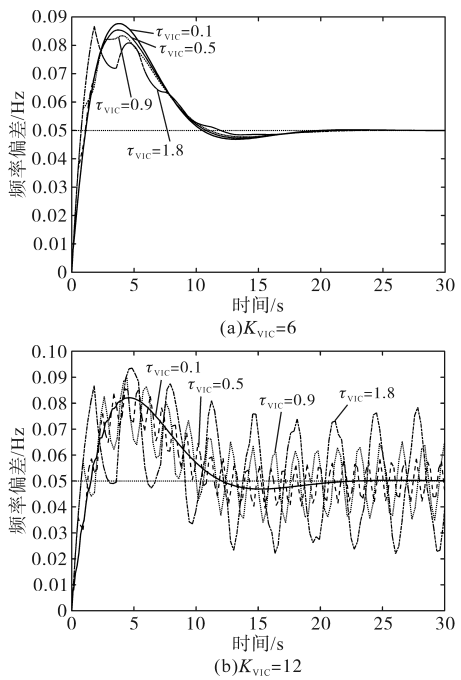

图6　场景②阶跃功率频率偏差响应

Fig.6　Step power frequency deviation response of scenario ②

场景③:新能源仅附加下垂控制,固定下垂延时,改变下垂系数。

图7~图9分别为场景③下的奈奎斯特图、伯德图和频率偏差响应曲线图。可以看出,下垂系数增大,系统幅值裕度减小,不影响系统相频特性,增大到其对数幅频曲线与0 dB有交点时,存在相角裕度随系数增大而减小。下垂系数越大对改善频率最大偏差和准稳态频率越有利,但不利于系统的稳定性。

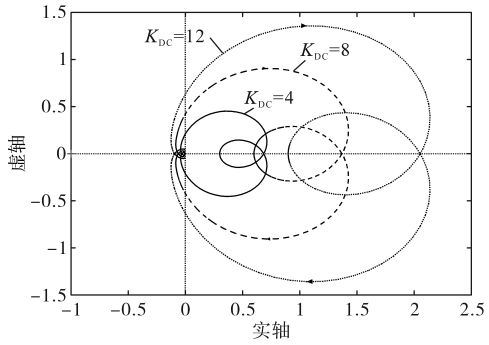

图7　场景③奈奎斯特图

Fig.7　Nyquist diagram of scenario ③

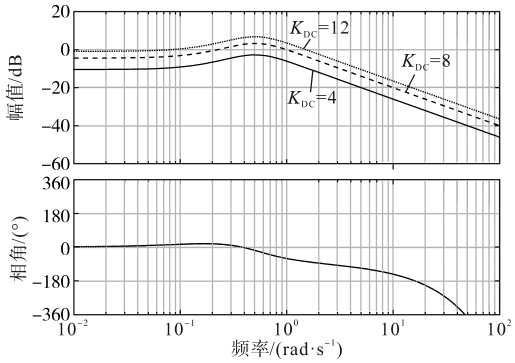

图8　场景③伯德图

Fig.8　Bode diagram of scenario ③

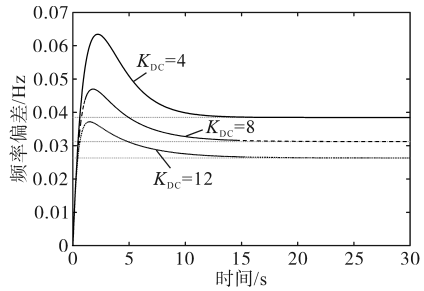

图9　场景③阶跃功率频率偏差响应

Fig.9　Step power frequency deviation response of scenario ③

场景④:新能源仅附加下垂控制,固定下垂系数,改变下垂延时。

图10~图12分别为场景④下的奈奎斯特图、伯德图和频率偏差响应曲线图。结合指标发现,下垂延时越大,系统幅值裕度和相角裕度都减小,奈奎斯特曲线越接近包围临界点,不利于系统稳定性,延时增大到某一界限,系统失稳。下垂延时增大除了威胁系统稳定性,还影响增大最大频差。因此,若新能源仅下垂控制,下垂系数应尽量大且延时越短越好。

新能源由于能量来源的波动性,其调频容量

存在一定限制，意味着当系统受较大扰动且新能源采用虚拟惯量下垂综合控制时，其现有的调频功率需要在虚拟惯量控制和下垂控制间进行分配，控制投入时间的安排也需要平衡。

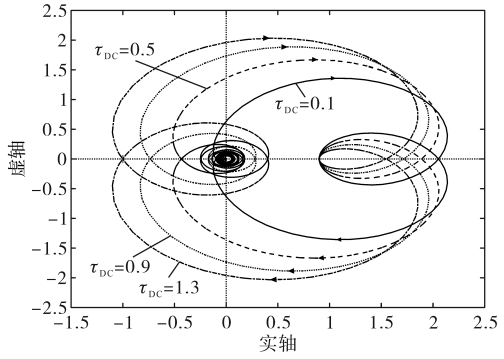

图10　场景④奈奎斯特图

Fig.10　Nyquist diagram of scenario ④

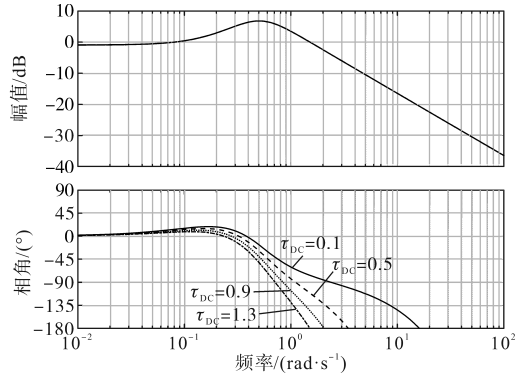

图11　场景④伯德图

Fig.11　Bode diagram of scenario ④

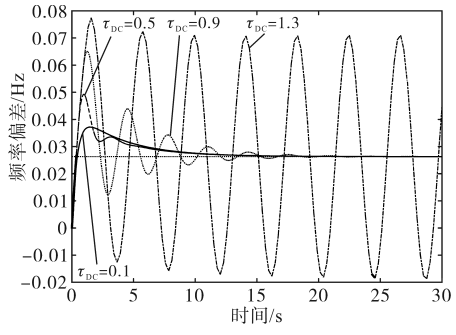

图12　场景④阶跃功率频率偏差响应

Fig.12　Step power frequency deviation response of scenario ④

2　基于纵横交叉调频参数的协调优化

纵横交叉算法结合了纵向搜索和横向搜索思想，其交叉操作选择趋优解作为最终的参数优化结果，具有有效防止陷入局部最优解的优势。

2.1　参数协调趋优目标函数及可行域

为了考虑系统的整体性能，参数协调优化目标为综合改善频率响应的最大频率偏差指标和频率振荡稳定，设计本策略的目标函数为

$$F(X)=\min\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\{\eta|\Delta f_{i,\max}|+(1-\eta)h^{-1}\cdot[f_i(t_p)-\frac{1}{2}f_i(t_p)]\}\tag{20}$$

其中　　$\Delta f_{i,\max}=\max(f_i-f_{ref})$

式中：η为改善最大频率偏差的控制权重系数；$(1-\eta)$为改善频率振荡稳定性的权重系数；$\Delta f_{i,\max}$为新能源并网节点i处频率的最大偏差；t_p为响应频率到达第1个峰值所需时间；$h^{-1}=[f(t_p)-0.5f(t_p)]$表示从频率峰值振幅下降到50%所需的振幅衰减时间。

调整η可达到调节控制目标的相对重要性以平衡不同目标对优化结果的影响。

基于上节的分析，调频参数设置不合理会直接导致系统频率振荡，甚至失稳。因此，调频参数的可行域应基于系统稳定形成约束取值范围。

2.2　参数协调趋优纵横交叉算法流程

1）设置纵横交叉算法参数初始化种群。明确系统新能源机组为n台，每台机组的趋优参数为惯量系数、惯量延时、下垂系数，则种群维度$Dim=3n$，考虑计算资源与算法搜索能力的矛盾，种群规模N可根据具体系统进行选择。

2）纵横交叉算法迭代过程。图13为纵横交叉趋优流程。

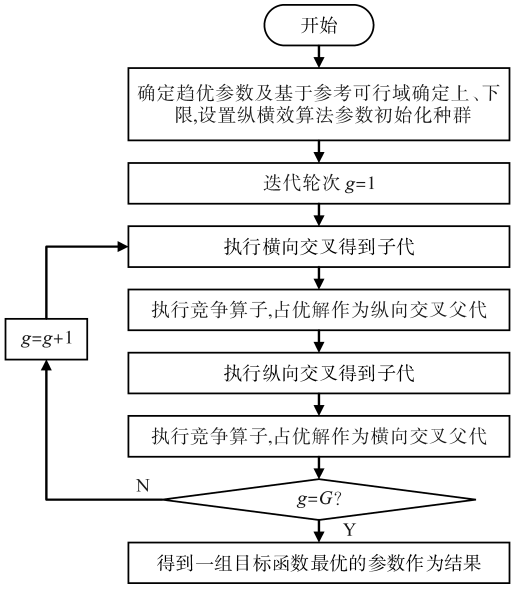

图13　纵横交叉算法趋优流程图

Fig.13　Flow chart of crossbar algorithm

执行横向交叉，在不同个体粒子的相同维之间进行算数运算，表达式为

$$\begin{cases} M_{\mathrm{hc}}(i,d)=r_1X(i,d)+(1-r_1)X(j,d)+ \\ \qquad c_1[X(i,d)-X(j,d)] \\ M_{\mathrm{hc}}(j,d)=r_2X(j,d)+(1-r_2)X(i,d)+ \\ \qquad c_2[X(j,d)-X(i,d)] \end{cases} \tag{21}$$

式中:$M_{\mathrm{hc}}(i,d)$,$M_{\mathrm{hc}}(j,d)$为横向交叉得到的第d维子代;r_1,r_2为[0,1]之间的随机值;c_1,c_2为[−1,1]之间的随机值;$X(i,d)$,$X(j,d)$分别为父代种群中个体$X(i)$,$X(j)$的第d维参数。

横向交叉只改变一组参数的一个,将得到的子代与其父代进行基于目标函数的适应度比较并保留占优解作为纵向交叉的父代。

执行纵向交叉,在个体粒子的不同维之间进行算数运算,表达式为

$$\begin{aligned} M_{\mathrm{vc}}(i,d_1)=&rX(i,d_1)+(1-r)X(i,d_2)+ \\ &c[X(i,d_1)-X(j,d_2)] \\ &i=1,2,\cdots,N;\ d_1,d_2=1,2,\cdots,D \end{aligned} \tag{22}$$

式中:$M_{\mathrm{vc}}(i,d_1)$是个体$X(i)$的第d_1维和第d_2维纵向交叉运算后的第d_1维子代趋优参数;r为[0,1]之间的随机值;c为[0,1]之间的随机值。

同样执行竞争算子,将子代$M_{\mathrm{vc}}(i,d_1)$与父代进行基于目标函数的适应度比较并保留占优解作为下一轮迭代横向交叉的父代。

竞争算子用于比较适应度保留占优值,本策略为了使系统频率动态特性和系统振荡稳定性呈现所期望的性能,保留并网节点频率偏差最大值和频率衰减50%振幅时间的加权综合值最低的对应参数组。

2.3　参数协调趋优联合仿真

1)Python仿真平台。应用Python3.7搭建如2.2节所述的纵横交叉算法模型,每次执行交叉操作更新趋优参数后,通过调用Pscad自动化库mhrc-automation传输模块将其送到Pscad4.6.3中,然后利用Pscad4.6.3传回来的相应个体参数计算其适应度。

2)Pscad仿真平台。应用Pscad4.6.3对新的趋优参数进行仿真,将基于测量仿真结果新能源并网节点的频率响应曲线得到的目标参数传送至Python3.7,以计算相应的适应度。

不断循环迭代以上步骤直至达到最大迭代次数。

3　算例验证

为验证所提策略的性能,基于前文所描述的Python + Pscad联合仿真平台,在Pscad仿真平台上搭建含详细双馈风场的3机9节点系统模型,如图14所示,在Python上建立纵横交叉算法模型。

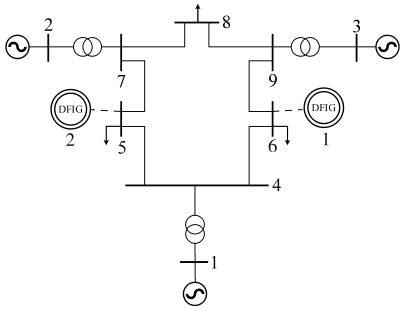

图14　并入双馈风场的3机9节点系统

Fig.14　Three-engine nine-node system incorporated into a doubly-fed wind farm

3.1　仿真设置

本策略的适应度函数根据扰动事件对风场并网节点的频率响应数据得到,可以优化系统所有并网风场在扰动事件下的调频参数和频率动态性能。设置风场的数量越多,纵横交叉算法粒子的维度越大,适应度函数也更复杂,更能凸显纵横交叉算法在多新能源并网调频参数趋优问题解决上的优势。算例设置如表2所示,其他如风场并网容量、风速、其余控制系统等设置相同,扰动仿真设置在1 s时突增负载150 MW。纵横交叉算法相关参数的设置如表3所示。

表2　仿真场景

Tab.2　Simulation scenarios

场景	风场数量	风场位置	扰动描述
1	1	Bus6	Bus6突增150 MW
2	2	Bus6,Bus5	Bus6突增150 MW

表3　纵横交叉算法相关参数

Tab.3　Crossbar algorithm related parameters

场景	粒子维度	迭代次数
1	3	100
2	6	200

不同并网风场数量的场景1和场景2的粒子维度设置突出区别,相关趋优参数的上、下限根据对不同场景多次仿真实验得到的经验设置,惯性系数取值范围为(300,1 500),惯性延时取值范围为(0.05,0.25),下垂系数取值范围为(0.67,4),种群规模设置为15,纵向交叉概率为0.7,横向交叉概率为0.3。

3.2　仿真结果与分析

使用上述参数分别对场景1和场景2进行仿真,得到的适应度函数收敛曲线如图15所示,相较于场景1,场景2的多个并网风场使其目标函

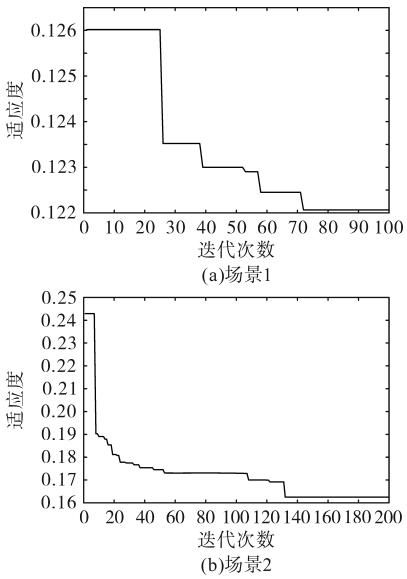

图15　适应度收敛曲线

Fig.15　Fitness convergence curves

数的复杂度增加，其适应度收敛曲线在迭代初期的时候下降速度很快，表明纵横交叉算法具有在探索空间中寻找更优解的能力，具有快速收敛的特征优势。随着迭代次数增加，算法可能更多地利用已知信息，导致收敛速度变慢，迭代至130代时基本收敛，适应度为0.162 469。相较于场景1下的收敛曲线，场景2的收敛过程更能体现纵横交叉算法对参数进行微小调整以更精确地定位最优解的寻优过程。经纵横交叉算法优化后的两组趋优参数如表4所示。

表4　纵横交叉优化后的调频参数组

Tab.4　Frequency modulation parameter set after crossbar algorithm

场景	K_{VIC1}	τ_{VIC1}	K_{DC1}	K_{VIC2}	τ_{VIC2}	K_{DC2}
1	1 396.2	0.096	6.13	—	—	—
2	484.5	0.05	5.23	516	0.051	6.41

使用优化前与优化后的调频参数在Pscad进行同一扰动条件下的暂态仿真，图16展示了风场并网节点频率响应曲线的对比结果。0.5 s之前的频率动态是由于同步机组和风机启动过程中的过渡效应引起的。在1 s时发生负荷突增扰动，扰动功率即时分配，各同步机惯量响应，导致1 s后短暂持续约0.1 s的频率暂态变化，不同节点空间上有明显差异，扰动节点Bus6最为剧烈。通过比较频率响应曲线和数据可以明显发现，使用纵横交叉优化后的调频参数明显比未优化的有利于降低频率极值偏差，观察节点Bus6的频率响应发现，未优化调频的扰动节点频率响应有频率振荡的风险，纵横交叉趋优调频参数可以降低这一风险。

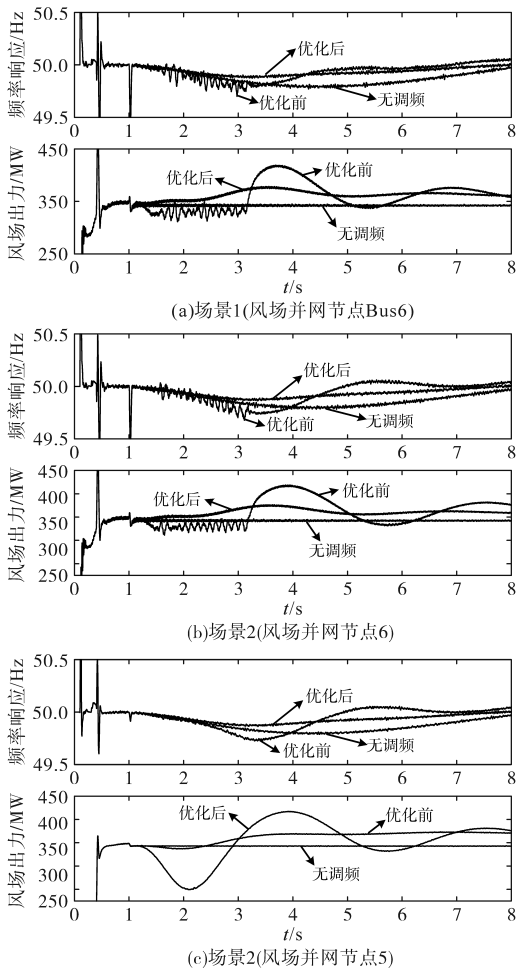

图16　风场并网节点频率响应对比

Fig.16　Comparison of frequency response of grid-connected nodes in wind farms

对比风场优化前、后的出力，两个场景面对同一扰动，扰动当地风机优化前的出力都在约1.5 s时开始振荡并持续一段时间，导致其并网节点频率振荡衰减，原因是风机惯量系数和惯量延时参数设置值过大使得频率稳定性变差，同时由于下垂系数的设置值也偏大，导致响应调频控制的有功曲线摇摆幅度大，频率动态特性比未调频时更差，为无效控制。表5为纵横交叉趋优结果对比，通过比较风场优化调频前、后的频率响应曲线和数据可以发现，使用纵横交叉优化后的调频参数明显比优化前更有利于降低频率极值偏差。对于场景1，风场并网节点6最大频率极值偏差减小了0.173 Hz，到达时间提早了0.279 s；对于场景2，风场并网节点6最大频率极值偏差减小了0.185 Hz，时间提前0.243 s；而距离扰动较远的风场并网点节5最大频率极值偏差减小了0.1374 Hz，时间提前0.065 s。场景2中，5号风场的有功控制性能优于6号风场，且受扰动影响较小。

对于风场数量更多的场景2,较于场景1,其趋优参数的维度更高,适应度函数更加复杂,求解最优值问题的过程用时更长,但其优化结果表明该策略可以有效降低风场并网节点的频率响应极值并且提高了频率稳定性,具有较好的收敛性。

综合仿真结果表明,纵横交叉算法在寻找调频控制器参数最优解的问题上具有明显的有效性,并且随着场景或求解问题复杂性的增加,除了增加求解时长外,并没有削弱最终的趋优参数调频效果。

表5　纵横交叉趋优结果对比

Tab.5　Comparison of optimization results of crossbar algorithm

		频率极值/Hz	出现时刻/s	振荡持续时间/s
场景1（节点6）	无调频	49.771	4.287	0
	优化前	49.7	2.976	1.629
	优化后	49.873	3.255	0
场景2（节点6）	无调频	49.78	4.229	0
	优化前	49.677	3.113	1.8
	优化后	49.862	3.356	0
场景2（节点5）	无调频	49.787 7	4.488	0
	优化前	49.725 6	3.296	0
	优化后	49.863	3.361	0

4　结论

为了在改善新能源并网节点频率动态响应的同时抑制频率振荡,本文提出一种基于纵横交叉算法的新型电力系统调频参数协调优化策略,本策略不但适用于含分布式能源的微网,同样适用于能源类型多样的复杂大型系统。首先,建立含附加虚拟惯量综合控制新能源的系统简化模型,基于频域分析法分析了调频参数对系统稳态性能的影响。基于开环频域性能指标分析了虚拟惯量系数及其延时、下垂系数及其延时对频率最大偏差和频率动态特性影响,并在Matlab上利用时域数字仿真方法验证其动态特性。基于上述分析所得新能源控制参数的影响机理,提出了基于纵横交叉算法对新能源机组惯量系数、惯量延时、下垂系数的协调趋优策略,趋优目标综合考虑改善频率响应极值及频率动态稳定,基于Pscad与Python的联合仿真平台,对比趋优策略与未优化的仿真暂态频率响应数据,仿真结果验证了所提策略的有效性和先进性,可为新型电力系统调频参数优化与控制提供新的理论基础与参考方案。

参考文献

[1] 肖先勇,郑子萱."双碳"目标下新能源为主体的新型电力系统:贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术,2022,54(1):47-59.
XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59.

[2] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报,2021,41(S1):28-51.
HUANG Yuhan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51.

[3] 康重庆,杜尔顺,李姚旺,等. 新型电力系统的"碳视角":科学问题与研究框架[J]. 电网技术,2022,46(3):821-833.
KANG Chungqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833.

[4] 武昭原,周明,王剑晓,等. 双碳目标下提升电力系统灵活性的市场机制综述[J]. 中国电机工程学报,2022,42(21):7746-7764.
WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, WANG Jianxiao, et al. Review on market mechanism to enhance the flexibility of power system under the dual-carbon target[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7746-7764.

[5] 蔡文斌,程晓磊,南家楠,等. 高比例新能源电力系统灵活性资源充裕性评估分析[J]. 电气传动,2022,52(20):57-62.
CAI Wenbin, CHENG Xiaolei, NAN Jianan, et al. Assessment and analysis of adequacy of flexibility resource of power system with high proportion new energy[J]. Electric Drive, 2022, 52(20): 57-62.

[6] ROINILA T, ABDOLLAHI H, SANTI E. Frequency-domain identification based on pseudorandom sequences in analysis and control of DC power distribution systems: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 3744-3756.

[7] YAN K, LI G, ZHANG R, et al. Frequency control and optimal operation of low-inertia power systems with HVDC and renewable energy: a review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 4279-4295.

[8] 汪梦军,郭剑波,马士聪,等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报,2023,43(5):1672-1694.
WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems[J]. Proceedings of

the CSEE，2023，43(5)：1672-1694.

[9] 文云峰，杨伟峰，林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备，2020，40(9)：211-222.
WEN Yunfeng，YANG Weifeng，LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40(9)：211-222.

[10] 李国庆，刘先超，辛业春，等. 含高比例新能源的电力系统频率稳定研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1165-1181.
LI Guoqing，LIU Xianchao，XIN Yechun，et al. Research on frequency stability of power system with high penetration renewable energy：a review[J]. High Voltage Engineering，2024，50(3)：1165-1181.

[11] 陈雪梅，陆超，韩英铎. 电力系统频率问题浅析与频率特性研究综述[J]. 电力工程技术，2020，39(1)：1-9.
CHEN Xuemei，LU Chao，HAN Yingduo. Review of power system frequency problems and frequency dynamic characteristics [J]. Electric Power Engineering Technology，2020，39(1)：1-9.

[12] 罗魁，郭剑波，王伟胜，等. 跟网型新能源附加频率控制对频率稳定及小扰动同步稳定影响分析综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(4)：1262-1281.
LUO Kui，GUO Jianbo，WANG Weisheng，et al. Review of impact of grid following variable renewable energy supplementary frequency control on frequency stability and small-disturbance synchronization stability[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(4)：1262-1281.

[13] 胡宇飞，田震，查晓明，等. 构网型与跟网型变流器主导孤岛微网阻抗稳定性分析及提升策略[J]. 电力系统自动化，2022，46(24)：121-131.
HU Yufei，TIAN Zhen，ZHA Xiaoming，et al. Impedance stability analysis and promotion strategy of islanded microgrid dominated by grid-connected and grid-following converters[J]. Automation of Electric Power Systems，2022，46(24)：121-131.

[14] 马文杰，张波，丘东元，等. 跟网型并网变换器的稳定域重塑控制策略研究综述[J]. 电气工程学报，2023，18(2)：34-51.
MA Wenjie，ZHANG Bo，QIU Dongyuan，et al. Control strategy to reshape the stable region for grid-following converter：an overview[J]. Journal of Electrical Engineering，2023，18(2)：34-51.

[15] KHAYAT Y，GOLESTAN S，GUERRERO J M，et al. DC-link voltage control aided for the inertial support during severe faults in weak grids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics，2021，9(6)：7296-7305.

[16] BARUWA M，FAZELI M. Impact of virtual synchronous machines on low-frequency oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2021，36(3)：1934-1946.

[17] 张兴，战祥对，吴孟泽，等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网混合模式控制综述[J]. 电力系统自动化，2024，48(21)：1-15.
ZHANG Xing，ZHAN Xiangdui，WU Mengze，et al. Review on grid-following/grid-forming hybrid mode control for grid-connected converter in high penetration rate of renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems，2024，48(21)：1-15.

[18] 贾焦心，沈钟毓，秦本双，等. 构网型和跟网型电力电子装备混联系统惯量响应的匹配问题综述[J]. 电力自动化设备，2024，44(6)：77-89.
JIA Jiaoxin，SHEN Zhongyu，QIN Benshuang，et al. Review on inertia response matching problem of hybrid power systems with grid forming and grid-following power electronic devices [J]. Electric Power Automation Equipment，2024，44(6)：77-89.

[19] 张怡，常鹏飞. 新能源电力系统分布式模型预测负荷频率控制[J]. 电气传动，2022，52(20)：70-75.
ZHANG Yi，CHANG Pengfei. Distributed model predictive load frequency control for power system with renewable energy [J]. Electric Drive，2022，52(20)：70-75.

[20] XIONG X，WU C，BLAABJERG F. An improved synchronization stability method of virtual synchronous generators based on frequency feedforward on reactive power control loop[J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2021，36(8)：9136-9148.

[21] KAZEMI M V，SADATI S J，GHOLAMIAN S A. Adaptive frequency control of microgrid based on fractional order control and a data-driven control with stability analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2022，13(1)：381-392.

[22] 蔡玮良，程海锋，潘智轩，等. 基于转子动能与分布式储能的双馈风机频率控制策略[J]. 电气传动，2023，53(11)：9-18.
CAI Weiliang，CHENG Haifeng，PAN Zhixuan，et al. Frequency control strategy of DFIG based on rotor kinetic energy and distributed energy storage[J]. Electric Drive，2023，53(11)：9-18.

[23] 任萱，陈通，董立志，等. 基于纵横交叉算法的储能系统自适应控制策略[J]. 电气传动，2024，54(4)：4-10.
REN Xuan，CHEN Tong，DONG Lizhi，et al. Adaptive control strategy for energy storage systems based on crisscross optimization algorithm[J]. Electric Drive，2024，54(4)：4-10.

[24] 孟安波，胡函武，刘向东. 基于纵横交叉算法优化神经网络的负荷预测模型[J]. 电力系统保护与控制，2016，44(7)：102-106.
MENG Anbo，HU Hanwu，LIU Xiangdong. Short-term load forecasting using neural network based on wavelets and crisscross optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control，2016，44(7)：102-106.

[25] 张展，殷豪，吴镇波，等. 基于分布式纵横交叉-正余弦算法的多区域综合能源系统日前经济调度[J]. 南方电网技术，2024，18(10)：73-85.
ZHANG Zhan，YIN Hao，WU Zhenbo，et al. Day-ahead economic dispatch of multi-area integrated energy system based on distributed crisscross optimization with sine cosine algorithm [J]. Southern Power System Technology，2024，18(10)：73-85.

收稿日期：2024-08-14
修改稿日期：2024-09-14