含大规模风电的高压直流送端系统多源协同调频策略

艾 青^{1,2},刘天琪¹,印 月¹,江 琴¹,陶 艳¹ (1. 四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065;2. 湖北民族大学 信息工程学院,湖北 恩施 445000)

摘要:针对含大规模风电的高压直流送端系统异步联网情况下频率易越限问题,提出了一种基于预测模型的 多源协同调频策略。分析风电渗透率及高压直流外送功率占比对频率调整的影响,对不同扰动下各种调频 措施的协调配合进行探讨。在长时间尺度上考虑高压直流输电的区域控制偏差约束,优化设置风电机组和 火电机组的旋转备用容量;在短时间尺度上考虑电力电子器件的快速可控性,动态调整风电机组及高压直流 输电的协同调频参数,使系统频率运行在合理水平。将预测模型得到的频率偏差根据大小进行分区,对不同 区域采用不同的调频策略,保证送端系统的旋转备用容量合理及频率动态响应指标合规。基于PSCAD/ EMTDC平台搭建含风电高压直流送端系统模型,仿真结果验证了所提策略的有效性及准确性。

关键词:高压直流输电;风电渗透率;旋转备用;协同调频;预测模型;功频特性

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009021

0 引言

为了实现我国到2050年非化石能源占一次能 源消费比重达到50%的目标^[1],电力系统中的电能 由传统化石能源转向风能、太阳能等新能源是大势 所趋。我国的新能源资源主要集中在三北地区,而 负荷中心集中在中东部地区,采用新能源集中开发 并通过大容量高压直流远距离输送实现异地消纳成 为我国能源消费的重要选择方式^[23]。

以风电为代表的新能源具有随机性和波动性, 大规模风电集中开发接入送端系统增加了频率调整 的不确定性。以变速恒频为主体的风电机组通过电 力电子变换器接入电网,发电机转子转速与系统频 率解耦,相比传统发电机组降低了系统的转动惯 量^[4]。当风电机组运行在最大功率点跟踪控制模式 时,风电出力不能响应系统频率变化,不参与系统频 率调整,减少了送端系统源侧的调频资源。

传统高压直流输电在定功率运行时,整流站相 当于整流负荷,与系统频率变化无关,从而降低了送 端系统综合负荷的频率调节效应。特别是送端系统 与其他区域电网异步互联时,调频资源较同步互联 电网要少。外送大容量功率的高压直流系统发生闭 锁故障会造成送端系统高比例负荷突减,系统不平 衡功率的冲击特性增强,导致频率的动态调整易 越限。

为了提高含风电高压直流送端系统的频率稳定

收稿日期:2019-09-26;修回日期:2020-07-23

基金项目:四川省科技厅重点研发项目(2017GZ0054);湖北 省自然科学基金资助项目(2017CFB501)

Project supported by the Key Research and Development Project of Science and Technology Department of Sichuan Province(2017GZ0054) and the Natural Science Foundation of Hubei Province(2017CFB501) 性,近年来有不少学者开展了相关研究。文献[5-7] 对风电参与调频的相关技术进行了综述,并且对今 后需要重点关注或研究的问题进行了展望。文献 [8-11]利用风电机组的虚拟惯量控制提升系统的转 动惯量,通过超速减载控制提高系统的一次调频能 力,采用变桨距角控制或配套储能单元提高系统的 旋转备用容量。文献[12]研究特高压直流与传统 发电机组构成孤岛系统的超低频振荡机理,分析高 压直流甩负荷情况下机组间相互作用的规律。文 献[13]基于二次最优型变结构控制理论设计高压直 流附加频率控制器并对控制参数进行优化。文献 [14-16]研究了高压直流输电系统与弱送端交流电 网耦合特性,不同故障扰动下的频率波动特性,不同 高压直流控制策略与传统调频措施的协调配合,以 及相关参数的优化取值范围等。已有的研究多侧重 风电机组或高压直流输电单独参与系统频率调整, 对如何协调风电机组与高压直流共同参与送端系统 的频率调整,以及如何主动应对风能不确定性的研 究较少。特别是在不同时间尺度上如何进一步有效 利用风电机组和高压直流输电的潜在调频能力的研 究亟待加强。

本文首先分析含风电的高压直流送端系统的频 率调整措施,重点分析了风电渗透率及高压直流外 送功率占比对系统调率的影响,并对大扰动情况下 风电及高压直流输电参与系统频率调整进行定性分 析;然后根据不同调频资源的频率响应特性,建立多 源协同调频的非线性数学预测模型;依据预测模型 的结果在不同的时间尺度上将频率偏差分成若干区 域,动态调整风电或高压直流输电参与送端系统调 频的启停阈值及相关参数,配合传统调频措施改善 系统的频率稳定性及动态响应特性。

1 多源协同调频的数学模型

1.1 含风电的高压直流送端系统

结合工程实际,考虑传统机组以火电机组为代 表、风电机组以变速恒频双馈机组为代表,采用传统 高压直流外送功率。假定在调频过程中各台发电机 组之间保持同步运行,各母线的电压保持在额定值。 异步互联时系统单机等值结构如图1所示。图中, *P*_m和*P*_{*}分别为火电机组和风电机组出力;*P*_{LD}和*P*_{de} 分别为送端系统网内负荷有功功率和高压直流外送 功率;*P*_{LD2}为受端系统负荷。



图1 含风电的高压直流送端系统

Fig.1 HVDC sending system with wind power

送端系统稳态运行时频率为额定值 f₀,有功功 率保持平衡,则有:

$$P_{\rm G} = P_{\rm m} + P_{\rm w} = P_{\rm D} = P_{\rm LD} + P_{\rm dc}$$
(1)
其中, *P*_c为发电机组出力; *P*_D为负荷有功需求。

在电力系统实际运行中,负荷波动是随机的、难 以测量的。系统不平衡有功功率影响系统频率值, 送端系统中可控的调频资源主要包括火电机组、风

电机组和高压直流输电系统等。

1.2 送端系统的调频资源

(1)转动惯量。

当系统受到扰动时,火电机组转子中的转动惯量自动参与系统调频,即利用转子的蓄能首先承担 电网负荷的变化,响应时间约为零点几秒。火电机 组转子储存的动能与角速度(频率)的平方成正比, 当频率变化 Δf 时,转子动能变化量 ΔW_k 如式(2) 所示。

$$\Delta W_{\rm k} = 2H_{\rm m}P_{\rm G}\frac{\Delta f}{f_0} \tag{2}$$

其中,H_m为火电机组的惯性时间常数。

当风电机组设置有虚拟惯量控制环节时,其能 响应系统的频率下降。设风电机组的等效惯性时间 常数为*H*_w,则送端系统总的惯性时间常数*H*_s如式 (3)所示。

$$H_{\Sigma} = (1 - k_1)H_{\rm m} + k_1H_{\rm w} \tag{3}$$

其中,k1=Pw/PG,为送端系统的风电渗透率。

(2)负荷频率调节效应。

对于送端系统,高压直流输电系统可看作可控 整流负荷,考虑到高压直流输电的频率限制控制环 节,则送端系统总负荷的频率调节效应系数K_n如式 (4)所示。

$$K_{\rm D} = (1 - k_2) K_{\rm LD} + k_2 K_{\rm DC} \tag{4}$$

其中, K_{LD} 、 K_{DC} 分别为送端系统网内负荷、高压直流 输电的功频特性系数; $k_2=P_{dc}/P_D$,为送端系统的高压 直流外送功率占比。则送端系统总负荷响应频率变 化的功率调整量 ΔP_D 如式(5)所示。

 $\Delta P_{\rm D} = (1 - k_2) K_{\rm LD} \Delta f + k_2 K_{\rm DC} (\Delta f - \Delta f_{\rm d-dc}) \quad (5)$ 其中, $\Delta f_{\rm d-dc}$ 为高压直流输电参与调频的动作阈值。

(3)一次调频。

一次调频依靠发电机组的原动机调速系统自动 完成,其响应时间约为几秒。一次调频量一般限幅 在额定负荷的6%以内。设火电机组的功频特性系 数为K_m,风电机组的功频特性系数为K_w,则送端系 统发电机组的功频特性系数K_c如式(6)所示。

$$K_{\rm G} = (1 - k_1)K_{\rm m} + k_1 K_{\rm w} \tag{6}$$

发电机组参与一次调频的功率调整量 $\Delta P_{\rm G}$ 如式 (7)所示。

 $\Delta P_{\rm G} = K_{\rm m} (\Delta f - \Delta f_{\rm d-m}) + K_{\rm w} (\Delta f - \Delta f_{\rm d-w})$ (7) 其中, $\Delta f_{\rm d-m} , \Delta f_{\rm d-w}$ 分别为火电机组、风电机组参与系 统一次调频的动作阈值。

(4)二次调频。

二次调频是指不平衡功率由预先指定的调频机 组来承担,消除一次调频过程留下的频率偏差,同时 非调频机组按其静态特性恢复到扰动前的状态。考 虑二次调频的情况下,频率偏差的稳态值 Δf_s 如式 (8)所示。

$$\Delta f_{\infty} = -\frac{\Delta P_{\rm D0} - \Delta P_{\rm G0}}{K_{\rm G} + K_{\rm D}} \tag{8}$$

其中, $\Delta P_{\rm D0}$ 为系统负荷的初始扰动量; $\Delta P_{\rm G0}$ 为发电机 组的二次调频出力变化量。

(5)直流紧急功率支援。

直流紧急功率支援属于直流调制中的开环控制 方式,其由事件或某种信号触发,根据事先制定的策 略表或预案迅速改变高压直流输电系统的外送功 率,包括紧急直流功率提升和功率回降。

常规高压直流输电系统具有1.1倍的长期过载 能力和3s的1.5倍短时过载能力,可以弥补暂态过 程中送受端系统的功率不平衡量。直流功率紧急回 降需要考虑高压直流输电系统最小运行功率的 限制。

1.3 大扰动下的多源协同调频

以单回双极性大容量高压直流单极闭锁故障为 例,除了非故障高压直流线路转送的一部分功率以 外,送端系统内将产生很大的不平衡功率,相当于网 内负荷突减。在短时间尺度上按照各发电机组的惯 性时间常数进行分配,系统频率快速上升,风电机组 及高压直流输电通过附加频率控制能够参与频率暂 态过程调整。在长时间尺度上仍然需要依靠火电机 组的原动机调速系统匹配负荷有功功率需求变化。

火电机组的输出功率及系统频率响应过程如附录中的图A1所示,图中abcd围成的红色部分对应负荷突减在转子上积累的不平衡转矩,def'围成的黑色部分对应各种调频资源响应频率变化积累的转矩。

系统初始稳定运行时, $P_{\rm TD} = P_{\rm DD}$ 。负荷突减后电 磁功率变化至点a,火电机组转子上的机械功率来 不及改变,故障开始时刻($t = t_0$)系统的不平衡功率 最大,发电机转子加速运行。通过协调各种短时间 尺度上能响应的调频资源,在 $t = t_3$ 时刻转子加速度 降为0,系统频率偏差达到最大,所需时间为 t_s ; $t = t_5$ 时刻频率偏差重新过零点。然后通过协调各种一次、 二次调频措施继续调整出力,最终稳定在 $P_{\rm TI} = P_{\rm DI}$,系 统新的稳定运行点为点d,系统频率运行在额定值。

为了提升暂态频率稳定特性,短时间尺度上的 调频资源主要是火电机组的转动惯量及电力电子接 口设备的附加频率控制。图A1中的绿色部分是风 电机组的功率调整量,蓝色部分是高压直流输电的 功率调整量,通过不同的附加频率控制参数尽可能 减小最大频率偏差值。为改善稳态频率响应特性, 在长时间尺度上需要在抑制不平衡功率的同时消除 积累的不平衡转矩,使稳态频率偏差平稳快速地降 低为0。

2 基于预测模型的多源协同调频策略

多源协同调频的关键是及时响应并有效降低系统的不平衡功率,防止频率动态过程越限及过度振荡。高压直流输电和风电机组的并网功率控制都是通过电力电子接口设备实现的,响应时间均为毫秒级,风电机组的变桨距控制响应时间也在1s左右,比传统火电机组的一次调频响应时间(一般在3s左右)要短。送端系统的频率实时检测所需时间仅为几个工频周期,有足够的时间完成预测控制。

2.1 多源协同调频目标

多源协同调频的首要目标是确保频率响应过程 中的特性指标满足相关要求,在此基础上结合风能 的短期预测尽可能提高风能利用率,同时减小分区 控制偏差,提高送端系统外送功率的平稳性。

2.1.1 旋转备用容量

合理的旋转备用容量是保证电力系统安全经济运行的基础,旋转备用容量过高会降低机组运行的经济性^[17]。根据GB/T 38969—2020《电力系统技术导则》的要求,旋转备用容量一般取系统最大负荷的10%。

风能不确定性的影响随着预测时间的减少而

减小,当前风电场输出功率1h前预测的误差约为 10%~15%^[18],旋转备用系数容量一般取最大负荷的 20%~25%。考虑异步互联情况,在送端系统*k*,的取 值不小于25%,则有:

 $k_{\rm r} = (1 - k_1)k_{\rm m} + k_1k_{\rm w} \ge 25\%$ ⁽⁹⁾

其中, k_m、k_w分别为火电机组和风电机组的旋转备用系数。

2.1.2 频率响应特性

频率响应过程中的特性指标主要包括频率偏差变化率、最大频率偏差、稳态频率偏差等。

送端系统的稳态频率偏差反映了长时间尺度上的一次调频能力,如式(10)所示。

$$\begin{cases} \Delta f_{\infty}^{m} = -\frac{\Delta P_{D0}}{K_{m} + K_{LD}} \\ \Delta f_{\infty}^{m+w} = -\frac{\Delta P_{D0}}{(1 - k_{1})K_{m} + k_{1}K_{w} + K_{D}} \end{cases}$$
(10)

其中, Δf_{x}^{m} 为仅含火电机组的稳态频率偏差; Δf_{x}^{m+w} 为含风电及火电机组的稳态频率偏差。

以传统发电机组为主体的系统为参考,大规模 风电集中接入下送端系统的稳态频率偏差满足:

$$\left|\Delta f_{\infty}^{m+w}\right| \leq \left|\Delta f_{\infty}^{m}\right| \tag{11}$$

则有:

 $k_1(K_{\rm w} - K_{\rm m}) + k_2(K_{\rm DC} - K_{\rm LD}) \ge 0 \tag{12}$

负荷突增时,突增起始时刻t₀的频率偏差变化 率最大,如式(13)所示。

$$\left. \frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}t} \right|_{\max} = -\frac{\Delta P_{\mathrm{D0}}}{2H_{\Sigma}} \right|_{t=t_0} \tag{13}$$

在频率偏差变化率首次变为0的时刻,频率偏差达到最大值 Δf_{max} 。

2.2 协同调频的预测模型

多源协同调频在长时间尺度上(短期调度层面) 根据不同风电渗透率调整送端系统的旋转备用容 量,在短时间尺度上(运行控制层面)根据动态频率 响应指标调整各调频资源的协同调频参数。

采用预测模型进行多源协同调频控制,首先通 过实时检测的频率变化量 $\Delta f_n(t_0 + nT_s)$ (其中 t_0 为扰 动起始时刻; T_s 为采样间隔周期;n为采样点数)及其 变化率根据式(13)估算系统的初始扰动量 ΔP_{D0} ,所 需时间仅为几个采样间隔周期;然后根据含风电高 压直流送端系统结构及各调频措施相关参数搭建简 化的频率响应模型如图2所示。图中, ΔP_m 、 ΔP_{dc} 分别为火电机组出力、风电机组出力、高压直流 输电外送功率的变化量; T_m 为火电机组调速器和原 动机的综合时间常数,通过一阶惯性环节表示其延 时; K_m 为风电机组虚拟惯量系数, T_i 为其控制延时。

假设系统正常运行时机组输出功率为P_{c0},送端



图2 简化的频率响应模型

Fig.2 Simplified frequency response model

系统总负荷功率为 P_{D0} ,系统频率为 f_0 ,显然有 P_{C0} = P_{D00} 。设 $P_C(t)$ 、 $P_D(t)$ 和f(t)分别为发电机组输出功 率、负荷有功需求和系统频率随时间变化的函数,相 应的增量定义为:

$$\begin{cases} \Delta P_{\rm G}(t) = P_{\rm m}(t) + P_{\rm w}(t) - P_{\rm G0} \\ \Delta P_{\rm D}(t) = P_{\rm LD}(t) + P_{\rm dc}(t) - P_{\rm D0} \\ \Delta f(t) = f(t) - f_{\rm 0} \end{cases}$$
(14)

则送端系统的不平衡功率 $\Delta P(t)$ 为:

$$\Delta P(t) = \Delta P_{\rm g}(t) - \Delta P_{\rm p}(t) \tag{15}$$

由图2所示的简化频率响应模型建立非线性数 学预测模型,通过模型预测在初始扰动量ΔP_m作用 下送端系统频率的动态响应过程,从而预测出最大 频率偏差、稳态频率偏差等参数。

预测模型及反馈校正环节是多源协同调频的重要组成部分。通过将式(9)、式(12)的结果作为判据,反馈校正稳态运行时的旋转备用容量及多源协同调频参数,实现闭环优化控制。预测模型为风电机组和高压直流输电的附加频率控制提供数据输入,配合火电机组实现调频的滚动优化。基于预测模型的协同调频优化流程如图3所示。图中,P_{m0}、







 P_{w0} 、 P_{de0} 分别为火电机组、风电机组、高压直流输电的初始输出功率; ΔK_w 、 ΔK_{DC} 分别为风电机组功频特性系数、高压直流输电功频特性系数的变化量。

2.3 多源协同调频

2.3.1 协同调频策略

多源协同调频首先对实时检测的频率偏差进行 分区,在不同时间尺度上含风电直流送端系统的多 源协同调频策略如附录中的表A1所示。

频率偏差较小时优先考虑风电机组在短时间尺 度上参与系统调频,频率偏差较大时考虑风电机组 及高压直流共同参与系统调频。在满足不同时间尺 度上的频率响应特性指标的基础上考虑风电利用率 及分区控制偏差的优化控制。

2.3.2 协同调频参数

(1)旋转备用系数。

考虑火电机组的最小技术出力并预留一次调频 容量(一般取最大负荷的10%)后火电机组最小出 力约为66%的额定出力,即火电机组的k_m最大可取 为(1-0.66)/0.66≈0.5。在满足式(9)的条件下,最大 功率跟踪运行时的风电渗透率k₁最大可取为0.5。

风电渗透率较高时,系统要求风电机组参与调频,需要预留一定容量作为旋转备用。因为风电机 组的输出功率位于 20%~80%的额定值区间时,功 率曲线运行于最陡部分,出力的调整控制较困难,同 时考虑到风能利用效率的要求,风电机组参与调频 的旋转备用系数 k_x 最大一般取为0.2,此时风电渗透 率 $k_1 \approx 0.8$,也能满足式(9)。

(2)风电机组参与调频参数。

当风电渗透率较低时,系统的旋转备用容量主要由火电机组提供。当系统负荷突增时,风电机组旋转备用较低,有效一次调频能力较弱,设置较大的 Δf_{dw} 。不平衡功率主要由火电机组承担,则 K_m 应设置为较大值(调差系数取为4%)。

当风电渗透率较高时,系统的旋转备用容量由 风电机组和火电机组共同提供。当系统负荷突增 时,风电机组旋转备用较高,有效一次调频能力较 强,不平衡功率由风电机组和火电机组共同承担。 为了充分利用风电机组的旋转备用,设置较小的 Δf_{dw} 及较大的一次调频系数 K_w ,同时将火电机组 K_m 设置为较小值(调差系数取为5%)。

(3)高压直流输电参与调频参数。

高压直流输电一般设置有频率限制控制环节,参与系统调频的动作阈值 Δf_{d-de} 一般取为0.1~0.15 Hz,依据高压直流输电参与送端系统调频的灵 敏程度进行设置。考虑跨区域输送功率的平稳性, 高压直流输电的等效功频特性系数 K_{DC} 的范围设为 0~15。直流紧急功率支援量为额定功率的0~50%。 综合以上分析,不同风电渗透率下发电机组及 高压直流输电的协同调频参数如表1所示。表中, "/"表示可根据不同风电渗透率*k*₁,选择"/"两侧 的数据作为*k*_n的初始值。

表1 发电机组及高压直流输电协同调频参数

 Table 1
 Coordinated frequency regulation parameters of generators and HVDC system

	k_1	$k_{\rm m}$	$k_{\rm w}$	$\Delta f_{\rm d\text{-}w}/{\rm Hz}$	$K_{_{\mathrm{w}}}$	$\Delta f_{\rm d\text{-}dc}/{\rm Hz}$	$K_{\rm DC}$
	0~0.3	0.2 / 0.3	0	0.08	10	0.14	5
C	0.3~0.5	0.3 / 0.4	0.1	0.07	15	0.12	10
0).5~0.8	0.4 / 0.5	0.2	0.06	20	0.10	15

将表1中所示的参数作为不同风电渗透率下稳态运行时协同调频参数的初始值,通过频率响应模型的预测在初始值的基础上对相关参数进行动态调整。

3 仿真分析

基于 PSCAD / EMTDC 平台搭建如图 1 所示的送 端系统仿真模型。常规机组由单机容量为 600 MW 的火电机组组成,风电机组由单机容量为 5 MW 的 双馈异步风机组成,采用±500 kV 传统高压直流输 电,额定输送功率为 3 000 MW。初始运行条件下火 电机组并网容量为 4 800 MW,风电出力为 400 MW, 高压直流输送功率为 2 400 MW,送端系统网内综合 负荷为 1 600 MW。

参考工程实际^[19],火电机组的一次调频死区 Δf_{4-m} 设置为0.033 Hz,功频特性系数 K_m 设置为25,惯 性时间常数 H_m 设置为3.75 s。网内综合负荷的功频 特性系数 K_{10} 取为1.5。

3.1 多源协同调频的预测

基于 MATLAB 平台搭建如图 2 所示的含风电高 压直流送端系统频率响应预测模型。不同扰动情况 下的频率响应如附录中的图 A2 所示,其中最大频率 偏差的预测值与仿真值的对比结果如表 2 所示。

表2	最大频率	「偏差的	的预	ī测值
Table 2	Predicting	value	of	maximum

frequency deviation

$\frac{\mathrm{d}\Delta f}{f}$ (Hang ⁻¹)	$\Delta f_{\rm max}$	偏差 / 0%		
dt (112.5)	仿真值	预测值	·····································	
0.069	0.260	0.282	8.5	
0.128	0.527	0.542	2.8	
0.248	1.087	1.050	-3.4	
0.306	1.350	1.299	-3.8	
0.384	1.656	1.626	-1.8	

从表2可见,以仿真值作为参考值时,预测值的偏 差大多在±5%以内,能够作为多源协同调频的依据。

不同风电渗透率下的预测模型初始参数如表1 所示,依据不同扰动下检测的频率偏差值按式(13) 得到初始扰动量,进而通过预测模型得到频率响应 指标,从而指导协同调频参数的动态调整。

3.2 送端系统的旋转备用容量

为保证送端系统安全稳定运行,在不同风电渗透率下需要调整火电机组的旋转备用容量。仿真中设置在*t*=1.5 s时负荷突增10% ΔP_{D0},不同火电机组旋转备用容量下系统的频率响应如图4所示。



图4 负荷突增时的频率响应

Fig.4 Frequency response to sudden load increase

由图4中的曲线③和曲线④可见,风电代替相同容量火电后,相同扰动下系统最大频率偏差从 0.44 Hz提高到0.52 Hz,并且下降到最大频率偏差的时间也在变长。通过预测模型判断到频率响应指标 越限时,应主动调整系统旋转备用容量设置,如图4 中的曲线①所示。

3.3 多源协同调频仿真

3.3.1 不同故障持续时间下的频率响应

不同故障类型下系统的不平衡功率及累积的不 平衡转矩有较大差别,直接影响协同调频参数的 选择。送端系统初始运行条件为火电并网容量为 1.2 p.u.,风电出力为0.1 p.u.,仿真设置在t₀=5 s时刻 发生直流单极闭锁故障,损失外送功率0.3 p.u.,当 风电机组不参与系统调频时,不同故障持续时间t_{dur} 下的频率响应如图5所示。



图 5 不同故障持续时间下的频率响应 Fig.5 Frequency response under different fault duration 从图5可以看出,在火电机组的调速系统响应 之前,故障持续的时间越长,送端系统中累积的不平 衡转矩越大,频率偏差也越大。依据表1中的协同 调频参数初始值进行频率响应指标预测,预测的频 率偏差不满足要求时应进行动态调整,并通过滚动 预测优化控制参数,从而改善频率响应特性。

3.3.2 风电机组参与调频

从图5中可以预测在5.5 s时故障恢复,此时的 频率偏差已经超过了0.5 Hz,首先调整风电机组参 与系统调频,发电机输出功率和送端系统的频率响 应如图6所示。



火电出力为1p.u.; ②火电出力为0.9 p.u., K_{G-w} = 10
 火电出力为0.9 p.u., K_{G-w} = 0; ④风电出力为0.1 p.u., K_{G-w} = 10; ⑤风电出力为0.1 p.u., K_{G-w} = 0

 (a)发电机组出力



① 火电容量为 1.2 p.u.,风电出力为 0
② 火电容量为 1.2 p.u.,风电出力为 0.1 p.u.,K_{Gw} = 0
③ 火电容量为 1.3 p.u.,风电出力为 0
④ 火电容量为 1.2 p.u.,风电出力为 0.1 p.u.,K_{Gw} = 10
⑤ 火电容量为 1.3 p.u.,风电出力为 0.1 p.u.,K_{Gw} = 10
⑥ 火电容量为 1.3 p.u.,风电出力为 0.1 p.u.,K_{Gw} = 10
(b)送端系统的频率响应

图 6 风电机组参与调频时的发电机组出力和 送端系统频率响应



从图6(b)中可以看出,风电机组参与系统调频 能够降低频率偏差。通过附加频率控制可以响应 系统频率上升,相比曲线⑤,曲线⑥的最大频率偏差 从0.46 Hz降到0.43 Hz,稳态频率偏差收敛得较快。 3.3.3 高压直流输电参与调频

从图6中可以发现,风电机组的调频能力有限, 当频率偏差越过高压直流参与调频启动阈值后,应 进一步利用高压直流输电参与频率调整。高压直流 输电参与系统调频时的发电机组出力、直流外送功 率和频率响应如图7所示。



图7 不同高压直流附加频率控制系数下的发电机组出力、 高压直流外送功率和送端系统的频率响应

Fig.7 Output of generators, HVDC power and frequency response of sending system under different values of K_{DC}

从图7(b)中可以看出,如果K_{bc}值设置得过小,则频率响应不满足要求,如果K_{bc}值设置得过大又会引起跨区域输送功率的变化过大。依据预测模型优化协同调频参数,图7(b)中曲线④、⑤频率呈现的响应特性较好。

3.4 与传统调频措施的比较

结合以上仿真结果,对比分析相同扰动下各种 调频措施的频率响应如附录中的图 A3 所示。参考 表2中的预测精度可得不同调频策略下的频率响应 指标如表3 所示,其中Δf_x取 20 s 时刻的值做近似 比较。

从表3可以发现,当风电和高压直流都不参与 系统调频时,频率响应特性较差;当风电和高压直流 按传统附加频率控制策略参与调频时,启停阈值及 调频参数较固定;而基于预测模型的多源协同调频 较其他传统调频措施有更好的频率响应特性。

表3 不同调频策略下的频率响应指标比较

 Table 3
 Comparison of frequency response indexes

 among different frequency regulation strategies

频率调整策略	$\Delta f_{\rm max}/{\rm Hz}$	$\Delta f_{\infty}/\mathrm{Hz}$
风电和高压直流不参与	0.51	-0.10
基于预测模型	0.25	0.01
仅风电参与调频	0.46	-0.02
传统高压直流参与调频	0.27	-0.01

4 结论

本文综合考虑送端系统频率调整的安全性和经济性,基于预测模型研究了风电机组及高压直流输 电的协同调频参数的动态调整策略。仿真结果表明,所提策略能够充分利用风电机组及高压直流输 电参与送端系统频率调整的潜力,在保证频率稳定 基础上提升系统接纳风电的能力。

基于送端系统频率响应模型的预测是实现多源 协同调频的关键,其预测的准确度与快速性需要深 入研究。另外,风能的不确定性对系统旋转备用容 量及调频能力的影响有待进一步研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904.
 ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China
 [J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(7):1893-1904.
- [2]朱红萍,罗隆福. 直流调制策略改善交直流混联系统的频率稳定性研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):36-43.
 ZHU Hongping,LUO Longfu. Improving frequency stability of parallel AC-DC hybrid systems by power modulation strategy of HVDC link[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(16): 36-43.
- [3] WU Ziping, GAO Wenzhong, GAO Tianqi, et al. State-of-the-art review on frequency response of wind power plants in power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(1):1-16.
- [4]姚良忠,朱凌志,周明,等.高比例可再生能源电力系统的协同 优化运行技术展望[J].电力系统自动化,2017,41(9):36-43.
 YAO Liangzhong,ZHU Lingzhi,ZHOU Ming, et al. Prospects of coordination and optimization for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(9):36-43.
- [5] 唐西胜, 苗福丰, 齐智平, 等.风力发电的调频技术研究综述
 [J].中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4304-4314.
 TANG Xisheng, MIAO Fufeng, QI Zhiping, et al. Survey on frequency control of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4304-4314.
- [6]赵嘉兴,高伟,上官明霞,等.风电参与电力系统调频综述[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(21):157-169.
 ZHAO Jiaxing,GAO Wei,SHANGGUAN Mingxia, et al. Review on frequency regulation technology of power grid by wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2017,45(21): 157-169.
- [7]黄伟,陈炜,吴军,等. 基于功率平衡控制原理的双馈风电机组

辅助调频方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):66-72.

HUANG Wei, CHEN Wei, WU Jun, et al. Auxiliary frequency modulation method of DFIG-based wind turbine based on principle of power balance control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):66-72.

- [8] WANG Ye, DELILLE G, BAYEM H, et al. High wind power penetration in isolated power systems assessment of wind inertial and primary frequency responses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2412-2420.
- [9] THIRINGER T. Integration of large sea-based wind parkshow much power electronic devices are needed in order to avoid power quality problems on the grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(6):1277-1279.
- [10] 付媛,王毅,张祥宇,等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性 分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(27):4706-4716.

FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27):4706-4716.

- [11] 刘世林,文劲宇,高文根,等. 基于飞轮储能的并网风电功率综 合调控策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):34-39.
 LIU Shilin,WEN Jinyu,GAO Wengen, et al. FESS-based comprehensive control of grid-connecting wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):34-39.
- [12] 李伟,肖湘宁,陶顺,等.特高压直流送端孤岛系统频率稳定控制[J].电力自动化设备,2018,38(11):197-203.
 LI Wei,XIAO Xiangning,TAO Shun, et al. Frequency stability control for islanded UHVDC sending end system[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(11):197-203.
- [13] 赵磊,刘天琪,李兴源,等. 基于变结构控制理论的高压直流 附加频率控制器设计[J]. 电力自动化设备,2017,37(11): 218-223.

ZHAO Lei, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Design of HVDC additional frequency controller based on variable structure control theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11):218-223.

[14] 吴萍,徐式蕴,赵兵,等.面向风火打捆的特高压直流输电工程 弱送端强直弱交耦合特性研究[J].电力自动化设备,2016,36 (1):60-66.

WU Ping, XU Shiyun, ZHAO Bing, et al. Research of weak sending-end coupling characteristics for bundled wind-thermal power transmission of UHVDC project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1):60-66.

- [15] 潘伟,李勇,曹一家,等.用于大规模集中式风电并网的VSC-HVDC频率控制方法[J].电力自动化设备,2015,35(5):94-99.
 PAN Wei,LI Yong,CAO Yijia,et al. Frequency control of grid-connection system based on VSC-HVDC for large-scale centralized wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(5):94-99.
- [16] 竺炜,钟鹏,巫晓云.直流接入后的多态频率稳定性及机组控制策略[J].中国电机工程学报,2016,36(22):6122-6130.
 ZHU Wei, ZHONG Peng, WU Xiaoyun. Multi-state frequency stability and power unit control strategy after DC access[J].
 Proceedings of the CSEE,2016,36(22):6122-6130.
- [17] 郑秀波,夏春,林勇,等.中国电网运行事故备用标准建议[J]. 电力系统自动化,2018,42(1):151-159.
 ZHENG Xiubo,XIA Chun,LIN Yong, et al. Suggestion on operation contingency reserve standards for power grid of China
 [J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(1):151-159.
- [18] 丁华杰,宋永华,胡泽春,等. 基于风电场功率特性的日前风电

预测误差概率分布研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33 (34):136-144.

DING Huajie, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Probability density function of day-ahead wind power forecast errors based on power curves of wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 136-144.

[19] 陈亦平,程哲,张昆,等. 高压直流输电系统孤岛运行调频策略
 [J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):96-102.
 CHEN Yiping, CHENG Zhe, ZHANG Kun, et al. Frequency regulation strategy for islanding operation of HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):96-102.

作者简介:



艾 青(1978—),男,湖北公安人,博 士研究生,主要研究方向为高压直流输电、 电力系统稳定与控制(E-mail:aqdtxz@163. com);

刘天琪(1962—),女,四川成都人,教 授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方 向为高压直流输电、电力系统稳定与控制 (E-mail:tqliu@scu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Multi-source coordinated frequency regulation strategy for HVDC sending system with large-scale wind power

AI Qing^{1,2}, LIU Tianqi¹, YIN Yue¹, JIANG Qin¹, TAO Yan¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Information Engineering, Hubei Minzu University, Enshi 445000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the frequency of asynchronous interconnection HVDC (High Voltage Direct Current) sending system with large-scale wind power is easy to exceed the limit, a multi-source coordinated frequency regulation strategy based on prediction model is proposed. The influence of wind power penetration and HVDC outgoing power ratio on frequency regulation is analyzed, and the coordination of various frequency regulation measures under large disturbances is discussed. Considering the regional control deviation constraints of HVDC power transmission on a long time scale, the rotating reserve capacity of wind turbine and thermal power unit is optimized. Considering the fast controllability of power transmission are dynamically adjusted to make the system frequency run at a reasonable level. The frequency deviation obtained from the prediction model is divided into different regions to ensure that the rotating reserve capacity of the sending system is reasonable and the frequency dynamic response index is compliant. The simulation model of the HVDC sending system with wind power is built on PSCAD / EMTDC platform. The simulative results verify the effectiveness and accuracy of the proposed strategy.

Key words: HVDC power transmission; wind power penetration; rotating reserve; coordinated frequency regulation; prediction model; power-frequency characteristic







TableA1 Frequency coordinated control strategy

$\Delta f(t)/\mathrm{Hz}$	火电机组	风电机组	直流输电
$<\Delta f_{d-m}$	转动惯量	最大功率控制	定功率运行
$\geq \Delta f_{d-m}$	一次调频	虚拟惯量控制	定功率运行
$\geq \Delta f_{d-w}$	一次调频	超速减载运行	附加频率控制
$\geq \Delta f_{d-dc}$	一次调频	变桨距角控制	紧急功率支援





Fig.A2 Frequency response of prediction model

附录



Fig.A3 Frequency response under different strategies