

基于等值频率响应模型的海上油田群电网 风电穿透功率极限分析方法

苏开元¹, 邱银锋², 谢小荣¹, 李国香², 董文凯¹, 车久玮²

(1. 清华大学 新型电力系统运行与控制全国重点实验室, 北京 100084; 2. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘要:提出了一种基于等值频率响应模型的海上油田群电网风电穿透功率极限分析方法。首先,构建了海上油田群电网的平均系统频率响应(ASFR)等值模型,基于单、分轴燃机确定电网原动机-调速器参数,根据 t location-scale 分布和差分变换方法刻画风电出力波动概率分布;然后,基于电网可承受的最大风电波动对应累积概率指标和最严重故障后电网最大频率变化指标,提出了考虑稳态频率偏差约束和暂态频率稳定约束的风电穿透功率极限分析方法;最后,以某实际海上油田群电网为例验证了所提方法的准确性与有效性,结果表明,原动机-调速器响应速度和暂态频率稳定约束对于海上油田群电网的风电穿透功率极限具有关键影响。

关键词:风电穿透功率极限;海上油田群电网;ASFR 等值模型;频率偏差;暂态频率稳定

中图分类号:TM614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202308012

0 引言

在碳达峰、碳中和背景下,海上油田群电网将逐步增加海上风电接入容量以降低碳排放、节约发电成本^[1-2]。然而,随着风电的穿透功率提升,其低惯性、波动性特点易导致电网频率大幅变动,以至于严重威胁电网的安全稳定运行^[3]。因此,研究并确定海上油田群电网的风电穿透功率极限具有重要的现实意义。

风电穿透功率极限定义为电网在满足安全稳定运行条件下可接入的最大风电容量与电网最大负荷之比^[4]。研究表明,当风电接入中小型电网时,应重点考虑频率对穿透功率极限的约束作用^[5]。油田群电网作为海上微电网,发电容量远小于一般的陆上电网且常运行于孤岛状态^[6],频率稳定更是其风电穿透功率极限的核心制约因素。

在计及频率稳定约束的风电穿透功率极限研究方面,文献[7]提出了一种考虑风电机组调频和稳态频率偏差约束、频率变化率约束的计算方法,并利用稳态频率偏差较小的特点对计算进行了简化;文献[8]针对风电波动引发的电网频率偏差问题,提出了计及储能系统的穿透功率极限计算方法;文献[9]通

过全时域仿真方法分析了海上油田群电网暂态频率稳定与风电穿透功率间的关系。

上述文献表明,已有学者从电能质量角度对计及频率偏差约束的风电穿透功率极限计算做了较多研究,而涉及电网严重故障后暂态频率稳定约束的研究较少且复杂,使用全时域仿真分析油田群电网多工况、多故障情况需耗费大量时间。然而,对于频率易发生大幅波动的小型电网,高风电穿透功率下的暂态稳定问题是不可忽视的^[6]。此种情况无法再以频率变化较小为前提进行近似,需要进一步研究其他分析方法。为此,文献[10]提出了黑启动过程中考虑系统暂态安全的动态风电穿透功率极限计算方法;文献[11-12]提出了基于等值频率响应模型的风电穿透功率极限求解方法,但该研究主要针对陆上电网,在考虑原动机-调速器时使用了再热式蒸汽轮机模型及参数。而海上油田群电网以微、小型燃气轮机为主体^[13],有必要重新确定其等值模型及参数,以保证响应速度和求解结果的准确性。

针对上述问题,本文提出了一种适用于海上油田群电网的风电穿透功率极限分析方法。首先确定燃气轮机响应速度的影响参数及取值,建立海上油田群电网等值平均系统频率响应(average system frequency response, ASFR)模型、风电出力波动概率分布模型;然后提出频率偏差和暂态频率稳定双约束下的穿透功率极限分析方法;最后使用某实际海上油田群电网验证了所提方法的有效性。

1 海上油田群电网风电穿透功率极限计算模型

本章构建海上油田群电网 ASFR 模型和风电出

收稿日期:2023-05-22;修回日期:2023-07-28

在线出版日期:2023-08-18

基金项目:中国海洋石油有限公司科技项目:海上风电场开发技术研究(KJZX-2022-12-XNY-0100);国家杰出青年科学基金资助项目(51925701)

Project supported by the CNOOC Limited Research Project: Research on Offshore Wind Farm Development Technology (KJZX-2022-12-XNY-0100) and the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China(51925701)

力波动概率分布模型,用以开展后续的风电穿透功率极限分析。

1.1 海上油田群电网 ASFR 模型

适用于小型电网的等值频率响应模型包括平均系统频率(average system frequency, ASF)模型、系统频率响应(system frequency response, SFR)模型和 ASFR 模型^[14-16]。ASF 模型保留了各原动机-调速器的独立响应,将全网发电机转子运动方程等值为单机模型。SFR 模型进一步将全系统等值为单机模型,但该模型未考虑各机组调速器参数不同的情况,在复杂电网中与实际结果偏差较大^[17]。ASFR 模型在 ASF 模型基础上,通过加权平均的方法确定单机模型等值参数,弥补了 SFR 模型在准确性上的不足。本文针对以微、小型燃气轮机为原动机-调速器的海上油田群电网,其系统相对较小,发输配用各部分紧密耦合^[18],近似忽略频率时空分布特性和接入点影响,建立风电接入前后的 ASFR 单机等值模型。

1.1.1 风电接入前的 ASFR 模型

油田群电网中的微型燃气轮机通常为单轴结构(single-shaft gas turbine, SG)^[19],其压气机、燃烧室和涡轮同属一轴系;容量为 3~30 MW 的小型燃气轮机除单轴结构外,还包括以航改型燃气轮机为代表的分轴燃机结构(twin-shaft gas turbine, TG)^[20],即负责输出有功功率的低压涡轮独属另一轴系。根据同步机转子运动方程,风电接入前功率-频率的频域关系满足式(1)。

$$(2H_{\text{sys}}s + D_{\text{sys}})\Delta f(s) = \Delta P_d(s) - \left(\sum_{i=1}^n \Delta P_{\text{mSi}}(s) + \sum_{j=1}^m \Delta P_{\text{mTj}}(s) \right) \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{\text{sys}} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{\text{Si}} S_{\text{Si}} + \sum_{j=1}^m H_{\text{Tj}} S_{\text{Tj}}}{\sum_{i=1}^n S_{\text{Si}} + \sum_{j=1}^m S_{\text{Tj}}} \\ D_{\text{sys}} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{\text{Si}} S_{\text{Si}} + \sum_{j=1}^m D_{\text{Tj}} S_{\text{Tj}}}{\sum_{i=1}^n S_{\text{Si}} + \sum_{j=1}^m S_{\text{Tj}}} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: ΔP_d 为扰动功率; Δf 为电网频率变化量; ΔP_{mSi} 、 ΔP_{mTj} 分别为第 i 台单轴、第 j 台分轴燃气轮机响应电网频率变化的机械功率变化量; n 、 m 分别为电网单轴燃机、分轴燃机数量; H_{sys} 和 D_{sys} 分别为电网的等值惯性时间常数和等值阻尼系数; H_{Si} 、 D_{Si} 、 S_{Si} 和 H_{Tj} 、 D_{Tj} 、 S_{Tj} 分别为第 i 台单轴和第 j 台分轴燃气轮机的惯性时间常数、阻尼系数、额定容量。

由于 ΔP_{mSi} 、 ΔP_{mTj} 均可表示为频率变化的函数,进一步扩展式(1),基于文献[8, 19-21]所述的燃气轮机简化数学表示,构建海上油田群电网 ASFR 模型

见图 1。对于单轴燃气轮机, R_s 为调差系数,其与 X_s 、 Y_s 、 Z_s 共同描述燃料进料动态过程; T_{FS} 为燃料系统时间常数, T_{CDs} 为压气机排气时间常数,代表燃机能量转换的动态过程; λ_s 为各机组额定容量与电网总装机容量之比。对于分轴燃气轮机, R_t 为调差系数; K_{PT} 、 K_{LT} 为进料量控制参数; T_{FT} 、 λ_t 分别为燃料系统时间常数、各机组额定容量与电网总装机容量之比;由于高压、低压涡轮分属不同轴系,分轴燃机另有 T_{HPT} 代表高压涡轮时间常数。单、分轴燃气轮机响应速度影响参数及其典型值^[8, 19-21]见附录 A 表 A1。

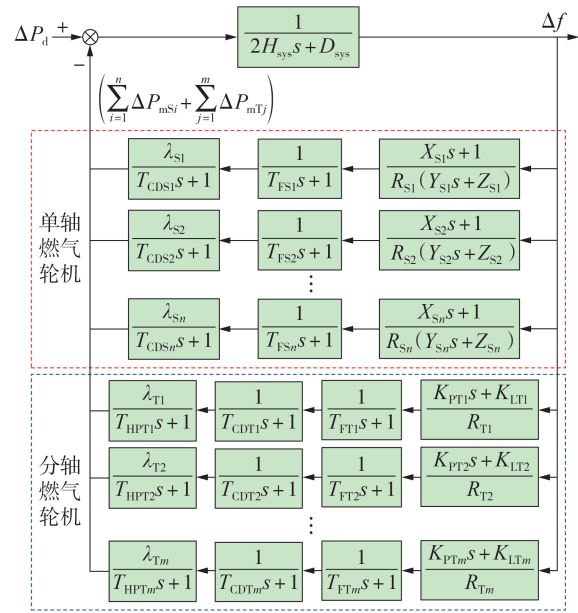


图1 海上油田群电网 ASF 模型

Fig.1 ASF model of offshore oilfield power system

对于图 1 中的各传递函数串联环节,忽略较小的时间常数对应 $Y_s s$ 、 $T_{\text{CDT}} s$ 项,代入 $Z_s = 1$,对其他参数进行等值,确定海上油田群电网 ASFR 模型如附录 B 图 B1 所示。各等值参数计算方法如式(3)所示,以机组额定容量占比和调差系数为权重进行加权平均^[16]。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{\text{Si}}}{R_{\text{Si}}} + \sum_{j=1}^m \frac{\lambda_{\text{Tj}}}{R_{\text{Tj}}} \\ X = R \left(\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{\text{Si}}}{R_{\text{Si}}} X_{\text{Si}} + \sum_{j=1}^m \frac{\lambda_{\text{Tj}}}{R_{\text{Tj}}} K_{\text{PTj}} \right) \\ K = R \left(\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{\text{Si}}}{R_{\text{Si}}} + \sum_{j=1}^m \frac{\lambda_{\text{Tj}}}{R_{\text{Tj}}} K_{\text{LTj}} \right) \\ T_1 = R \left(\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{\text{Si}}}{R_{\text{Si}}} T_{\text{CDSi}} + \sum_{j=1}^m \frac{\lambda_{\text{Tj}}}{R_{\text{Tj}}} T_{\text{FTj}} \right) \\ T_2 = R \left(\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{\text{Si}}}{R_{\text{Si}}} T_{\text{FSi}} + \sum_{j=1}^m \frac{\lambda_{\text{Tj}}}{R_{\text{Tj}}} T_{\text{HPTj}} \right) \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: R 为电网等值调差系数; X 、 K 为燃料控制环节等值参数; T_1 、 T_2 为能量转换环节等值时间常数。

1.1.2 风电接入后的 ASFR 模型

目前,海上油田群电网工程多采用跟网型海上直驱风电机组^[22]。相比于构网型控制,跟网型控制下的频率支撑能力相对有限^[23],加之附加频率控制的参数设计并非本文重点,此处作保守估计,暂不计及风电机组惯量响应和一次调频能力。该情况下,ASFR模型中的等值惯性时间常数和等值调差系数将在风电机组接入后变化。定义 λ_w 为风电接入容量与全网运行机组容量之比,则有^[24]:

$$\begin{cases} H_{\text{sysw}} = (1 - \lambda_w) H_{\text{sys}} \\ R_w = R / (1 - \lambda_w) \end{cases} \quad (4)$$

式中: H_{sysw} 和 R_w 分别为风电接入后电网的等值惯性时间常数和调差系数。

基于风电接入后的 ASFR 模型,可求得任意扰动功率 ΔP_d 对应的油田群电网频率响应表达式为:

$$\Delta f(s) = \frac{\Delta P_d(s)}{2H_{\text{sysw}}s + D_{\text{sys}} + \frac{Xs + K}{R_w(T_1s + 1)(T_2s + 1)}} \quad (5)$$

以负荷功率骤增为例,在此阶跃扰动下,电网的频率响应曲线如图2所示,通过求取最值即可确定最大频率变化 Δf_{max} 。

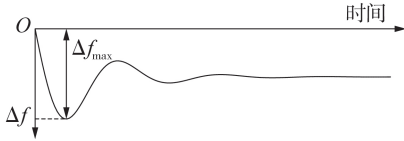


图2 阶跃扰动后电网的频率响应曲线

Fig.2 Frequency response curve after step disturbance

1.2 风电出力波动概率分布模型

本文使用概率密度函数(probability density function, PDF)描述风电出力波动的概率分布特性。研究表明, t location-scale模型^[25]可以较简单且准确地反映风电出力波动 ΔP_w 的概率特征。在该模型下, ΔP_w 的PDF $f_{\Delta P_w}$ 表示为:

$$f_{\Delta P_w}(x) = \frac{\Gamma((\nu+1)/2)}{\sigma \sqrt{\nu\pi} \Gamma(\nu/2)} \left[\frac{\nu + \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}{\nu} \right]^{\frac{\nu+1}{2}} \quad (6)$$

式中: ν 、 σ 、 μ 分别为形状、尺度和位置参数。

一般而言,各地区的风电出力波动数据不易直接获得,需要从实际风速与风电出力数据中分离得到。使用一阶差分变换方法^[26],在确定了波动时间间隔 ΔT 后,风电出力波动可表示为:

$$\Delta P_w(T) = (P_w(T + \Delta T) - P_w(T)) / (n_w P_N) \quad (7)$$

式中: $P_w(T)$ 为 T 时刻风电场总出力; n_w 为风电机组接入台数; P_N 为单台风电机组额定容量。由该式可知, ΔP_w 取值范围为 $[-1, 1]$ p.u.。

根据所得风电出力波动数据,将 $[-1, 1]$ p.u.均分

为若干波动区间,计算各区间概率密度,即可得到 ΔP_w 的概率密度直方图。对该直方图使用 t location-scale分布进行拟合,确定 ν 、 σ 、 μ 等参数,最终完成 ΔP_w 的PDF计算,结果见图3。图中 ΔP_w 为标么值。

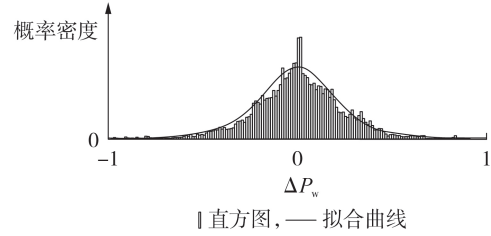


图3 风电出力波动PDF示意图

Fig.3 Schematic diagram of PDF of wind turbine output fluctuation

2 海上油田群电网风电穿透功率极限分析方法

基于上述计算模型,下面综合考虑稳态频率偏差约束和暂态频率稳定约束,提出海上油田群电网风电穿透功率极限分析方法。

2.1 受频率偏差约束的极限计算

海上油田群电网容量较小^[27],根据电能质量国家标准,其正常运行条件下的频率偏差限值设定为 ± 0.5 Hz^[28]。在此基础上,对于受频率偏差约束的海上油田群电网风电穿透功率极限计算,以电网可承受的最大风电波动对应累积概率是否满足要求为判据进行求解,具体步骤如下。

1)根据燃气轮发电机组、风电机组、负荷等元件参数,建立海上油田群电网 ASFR 模型,确定风电机组接入台数初值。

2)根据风况及风电机组出力数据,建立风电出力波动概率分布模型,完成PDF计算,并根据风电机组接入台数变化不断修正 H_{sysw} 和 R_w 。

3)基于 ASFR 模型和风电出力波动模型,改变电网扰动功率 ΔP_d ,计算频率偏差约束下电网可承受的最大风电波动 $\Delta P_{w\text{max}}$ 。 ΔP_d 可表示为实际扰动功率与系统中能够提供频率响应的总有功功率 P_B 之比,在模拟风电出力波动时,将出力随时间变化的过程近似为斜坡函数,如式(8)所示。

$$\Delta P_d = \begin{cases} 0 & T \leq 0 \\ \frac{n_w P_N \Delta P_w}{P_B \Delta T} T & 0 < T < \Delta T \\ \frac{n_w P_N \Delta P_w}{P_B} & T \geq \Delta T \end{cases} \quad (8)$$

4)根据式(9)判断电网可承受的最大风电波动对应累积概率 C_{devia} 是否满足要求。

$$C_{\text{devia}} = P_r(-\Delta P_{w\text{max}} < f_{\Delta P_w}(x) < \Delta P_{w\text{max}}) = \int_{-\Delta P_{w\text{max}}}^{\Delta P_{w\text{max}}} f_{\Delta P_w}(x) dx \geq \beta \quad (9)$$

式中: $P_r(\cdot)$ 表示概率; β 为累积概率最小值, 通常取为 0.8^[12]。若 $C_{\text{devia}} \geq 0.8$, 则说明在 80% 及以上的波动情况下, 电网满足频率偏差要求。

5) 不断增加风电机组接入台数, 重复上述过程, 确定满足频率偏差约束下的风电穿透功率极限。

2.2 受暂态频率稳定约束的极限计算

除正常运行状态下的频率偏差约束外, 故障后电网的暂态频率稳定同样制约着风电穿透功率极限。根据电力系统安全稳定计算规范, 应限制暂态频率不低于各电源低频保护的最低值^[29], 海上油田群电网中燃气轮机低频限制为 47 Hz, 即电网暂态频率变化不得超过 3 Hz。因此, 对于受暂态频率稳定约束的海上油田群电网风电穿透功率极限计算, 以最严重扰动下电网最大频率变化是否满足要求为判据进行求解, 具体步骤如下。

1) 与 2.1 节同理, 确定风电机组接入台数初值, 根据接入台数变化修正 ASFR 模型参数。

2) 确定电网最严重扰动及其对应功率 ΔP_d 。对于暂态稳定问题, 应根据元件产生或传输功率水平确定其扰动严重程度^[30]。针对风电接入海上油田群电网的场景, 海上风电场因送出系统故障整体切出可视为最严重扰动。此外, 海上风电易受极端天气影响^[31], 风速突增情况下, 其出力可能会因保护停转而直接下降为 0。由于上述过程动作时间短, 可使用阶跃函数描述其扰动, 将 ΔP_d 表示为:

$$\Delta P_d = \begin{cases} 0 & T \leq 0 \\ -n_w P_N / P_B & T > 0 \end{cases} \quad (10)$$

3) 根据 ΔP_d 求取电网频率响应, 根据式(11)判断电网最大频率变化 Δf_{max} 是否满足要求。

$$\Delta f_{\text{max}} = \max |\Delta f(T)| \leq \Delta f_s \quad (11)$$

式中: Δf_s 为频率变化允许值, 按照稳定要求取值 3 Hz。若电网满足暂态频率稳定要求, 则继续增加风电机组接入台数, 直至临界稳定状态, 确定穿透功率极限。

4) 为使计算结果更加准确, 对所得结果进行 $N-1$ 校核与限幅环节验证。对于 $N-1$ 校核, 可选取最大容量燃气轮发电机组切出故障, 验证所得风电机组接入台数下是否满足暂态频率稳定标准; 对于限幅环节验证, 在模型中加入燃料控制限幅环节(如附录 B 图 B2 所示), 对极限计算结果予以验证, 一般而言, 单轴燃气轮机限幅环节取值为 $-0.1 \sim 1.5$ p.u.^[20], 分轴燃气轮机限制下限为 0.19 p.u.^[22]。

2.3 风电穿透功率极限分析方法及其流程

综合 2.1、2.2 节的计算方法, 海上油田群电网风电穿透功率极限分析流程如图 4 所示。在确定海上油田群电网基本参数、等值 ASFR 模型和风电机组接入台数初值后, 对频率偏差约束条件和暂态频率稳定约束条件下的穿透功率极限进行并行计算, 取

两者计算结果的最小值, 从而确定电网可接入最大风电容量及极限计算结果。

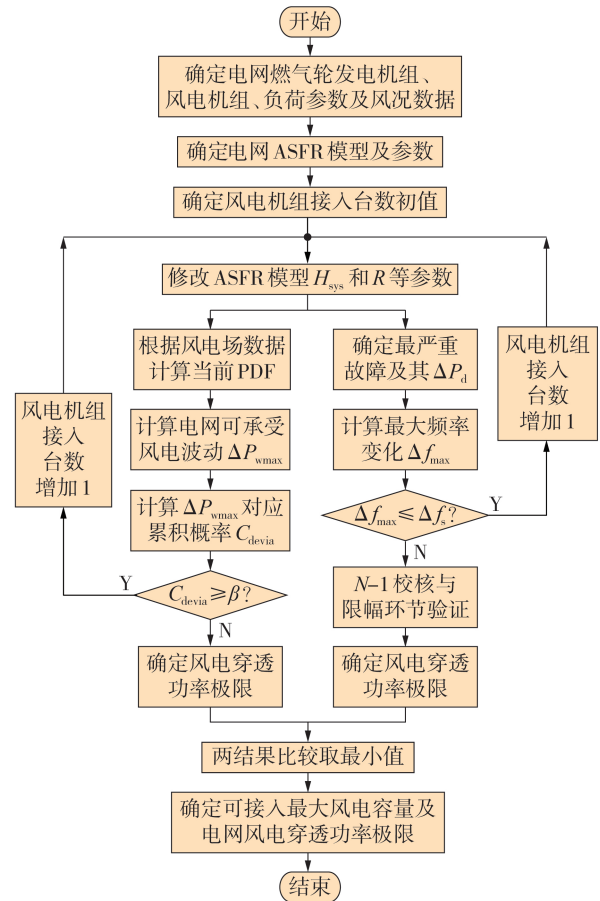


图 4 风电穿透率极限分析流程图

Fig.4 Flowchart of solving wind power penetration limit

3 仿真算例分析

以某实际海上油田群电网为例验证本文所提分析方法有效性, 其整体拓扑结构如附录 C 图 C1 所示。该油田群电网包含 4 个主要油田平台, 总装机容量为 185.224 MW, 最大方式下负荷为 103.83 MW。电网拟接入海上风电机组的单机容量为 6 MW。基于该油田群电网实际情况, 已知开机工况 1 如表 1 所示, 另有工况 2 作为研究过程中的校核对照工况。表中: 24.09、28.77、10、25、19.5 MW 为各机组额定容量。

表 1 油田群电网开机工况

Table 1 Actual working status of oilfield power system

工 况	平台 1 (24.09 MW)	平台 2 (28.77 MW)	平台 3 (10 MW)	平台 4 (25 MW 19.5 MW)	总容量 / MW
1	2 用	1 用 1 备	1 备	2 用 1 备	126.95
2	2 用	1 用 1 备	1 用	1 用 1 备	131.45

根据附录 C 表 C1、C2 所示的各发电机组及单、分轴燃气轮机参数, 确定风电机组接入前该油田群

电网 ASFR 模型初始等值参数,如附录 C 表 C3 所示。在穿透功率极限计算过程中,ASFR 模型等值参数按照风电机组接入容量不断修正。

通过对比分析明确原动机-调速器响应速度影响,验证本文所提穿透功率极限计算方法的有效性,具体为:①在频率偏差约束下,比较全时域仿真方法、本文所提基于油田群电网 ASFR 模型的分析方法、原基于文献[11-12,15]模型及参数的再热式蒸汽轮机 ASFR 模型的分析方法(原 ASFR 方法)三者的求解结果,验证本文所提方法准确性;②在暂态频率稳定约束下,比较三者求解结果,验证本文所提方法准确性;③比较仅考虑频率偏差约束与本文所提双约束下的求解结果,分析加入暂态频率稳定约束对结果的影响及特点。

3.1 受频率偏差约束的计算结果比较

该海上油田群电网实测风电出力曲线如附录 C 图 C2 所示,以此确定风电出力波动 PDF 及电网可承受的最大风电波动对应累积概率 C_{devia} 。

以工况 1 为例, C_{devia} 随风电机组接入台数及风电出力波动 ΔP_w 的变化关系见附录 C 图 C3。可以看出,随着风电机组接入台数的增加,电网可承受的最大风电波动 $\Delta P_{w\text{max}}$ 在逐步下降,进而使得 C_{devia} 逐步减小。当接入 10 台风电机组时, $\Delta P_{w\text{max}}$ 对应的 C_{devia} 小于最小累积概率 0.8,不再满足频率偏差要求。

使用全时域仿真方法、本文所提方法和原 ASFR 方法,计算得到频率偏差约束下的临界风电机组接入台数 n_w 、电网可承受最大波动 $\Delta P_{w\text{max}}$ 及累积概率 C_{devia} 如表 2 所示。各工况下,本文所提出的分析方法与全时域方法所得风电机组最大接入容量一致,且同条件下 $\Delta P_{w\text{max}}$ 和 C_{devia} 计算结果相对偏差均小于 2.88%,在频率偏差约束下具有相当的准确性。而由于原动机-调速器频率响应速度的显著差异,使用原 ASFR 方法所得结果误差较大,在工况 1 下风电机组最大接入容量相对误差达 80%。

表 2 频率偏差约束下的计算结果临界值

Table 2 Critical value of calculated results under constraint of frequency deviation

计算方法	开机工况 1 的结果			开机工况 2 的结果		
	n_w	$\Delta P_{w\text{max}}$	C_{devia}	n_w	$\Delta P_{w\text{max}}$	C_{devia}
全时域	9	0.208	0.824	10	0.202	0.812
仿真方法	10	0.178	0.764	11	0.183	0.775
本文所提	9	0.204	0.817	10	0.208	0.824
方法	10	0.175	0.754	11	0.180	0.768
原 ASFR	5	0.228	0.856	6	0.199	0.808
方法	6	0.187	0.784	7	0.168	0.740

3.2 受暂态频率稳定约束的计算结果比较

在海上风电场切出这一最严重故障下,使用上述 3 种方法分别计算不同风电机组接入台数对应的最大频率变化 Δf_{max} ,将其转换为频率最低值 f_{min} 曲

线如图 5 所示。

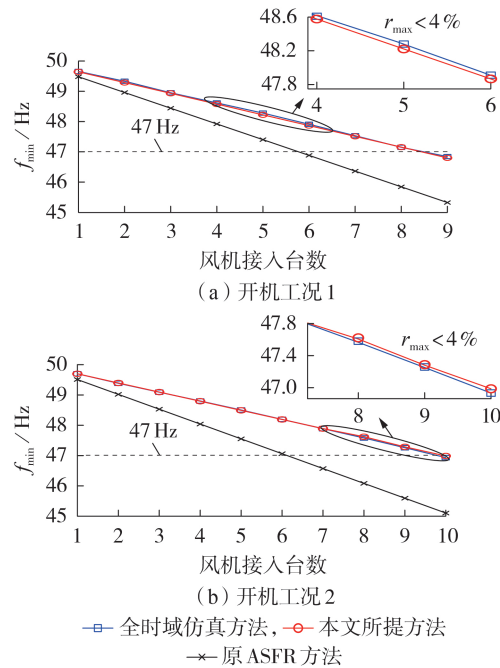


图 5 最严重故障下电网频率最低值与风机台数关系
Fig.5 Relationship between minimum frequency and number of wind turbines under most serious fault

由开机工况 1、2 下的结果可知,本文所提方法与全时域仿真所得风电机组最大接入容量相同。定义本文所提方法的结果 Δf_{camax} 相对全时域仿真方法的结果 Δf_{simax} 的误差 $r_{\text{max}} = |(\Delta f_{\text{camax}} - \Delta f_{\text{simax}}) / \Delta f_{\text{simax}}| \times 100\%$ 。相同故障条件下,图 5 中工况 1、2 下的 $r_{\text{max}} < 4\%$,能够在较准确地反映电网暂态频率变化的同时将求解时间从分钟级减少至秒级。而与 3.1 节同理,由于燃气轮机与蒸汽轮机响应速度的差别,原 ASFR 方法在工况 1、2 下的最大风机接入台数分别为 5、6 台,与全时域仿真方法所得的 8、9 台存在显著偏差。

3.3 不同约束下的计算结果比较

综合 3.1、3.2 节计算结果,整理得频率偏差与暂态频率稳定约束下,该海上油田群电网风电穿透功率极限的计算结果如表 3 所示。表中:①、②、③分别对应稳态频率偏差约束、暂态频率稳定约束的结果以及两者中的较小值。比较可知,考虑海上风电场切出的严重扰动,暂态频率稳定约束在计算结果

表 3 频率偏差与暂态频率稳定约束下的计算结果

Table 3 Calculated results under constraints of frequency deviation and transient frequency stability

计算方法	开机工况 1 下的 风电穿透功率极限 / %			开机工况 2 下的 风电穿透功率极限 / %		
	①	②	③	①	②	③
全时域仿真方法	52.0	46.2	46.2	57.8	52.0	52.0
本文所提方法	52.0	46.2	46.2	57.8	52.0	52.0
原 ASFR 方法	28.9	28.9	28.9	34.7	34.7	34.7

中起主导作用。仅考虑风电出力波动后的频率偏差约束会使计算结果相对乐观,使用频率偏差与暂态频率稳定双约束则可以更好地满足电网安全稳定运行需求。

4 结论

本文提出了一种基于等值频率响应模型的海上油田群电网风电穿透功率极限分析方法,主要结论如下。

1)所提出的风电穿透功率极限分析方法考虑了单、分轴燃气轮机动态响应过程和风电波动过程,能够在简化计算的同时保证准确性。

2)设定频率偏差与暂态频率稳定双约束,可使极限分析结果更好地满足电网安全稳定运行要求。考虑海上风电场切出的严重扰动,暂态频率稳定约束在极限计算中起主导作用,而单纯考虑风电波动下的频率偏差约束会导致偏乐观的结果。

3)原动机-调速器响应速度对海上油田群电网的风电穿透功率极限具有关键影响。使用燃气轮机与再热式蒸汽轮机等值模型所求解穿透功率极限具有显著差异,两者间误差最大可达80%。现有工程中风电不具备虚拟惯量或快速调频控制,未来需进一步探讨风电、储能采用惯量和快速调频控制对系统稳定性的影响。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 严伟,幸相渝,陈俊,等.海上油气工程微能系统的能效评估与优化运行[J].电力自动化设备,2022,42(9):203-210.
YAN Wei, XING Xiangyu, CHEN Jun, et al. Energy efficiency evaluation and optimal operation of micro integrated energy system in offshore oil and gas engineering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 203-210.
- [2] 徐政.海上风电送出主要方案及其关键技术问题[J].电力系统自动化,2022,46(21):1-10.
XU Zheng. Main schemes and key technical problems for grid integration of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 1-10.
- [3] 孟庆伟,李瑞阳,刘宽,等.基于多智能体的海上油气平台风-燃协调频率辅助控制策略[J].电力自动化设备,2023,48(8):105-111,140.
MENG Qingwei, LI Ruiyang, LIU Kuan, et al. Coordinated frequency auxiliary control strategy of wind farm and gas turbine on offshore oil and gas platform based on multi-agent[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 48(8): 105-111, 140.
- [4] 赵显宣,韩畅,林振智,等.含可再生能源的电力系统两阶段核心骨干网架优化策略[J].电网技术,2019,43(2):371-386.
ZHAO Yuxuan, HAN Chang, LIN Zhenzhi, et al. Two-stage core backbone network optimization strategy for power systems with renewable energy[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 371-386.
- [5] WANG Man, QIU Chendong. A multiobjective optimization-based calculation framework of maximum wind power penetration limit considering system transient stability[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(8): 1-17.
- [6] HU D, ZHAO X, CAI X, et al. Impact of wind power on stability of offshore platform power systems[C]//2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China: IEEE, 2008:1688-1692.
- [7] 李世春,唐红艳,邓长虹,等.考虑频率约束及风电机组调频的风电穿透功率极限计算[J].电力系统自动化,2019,43(4):33-39.
LI Shichun, TANG Hongyan, DENG Changhong, et al. Calculation of wind power penetration limit involving frequency constraints and frequency regulation of wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 33-39.
- [8] LIU Yi, DU Wenjuan, XIAO Liye, et al. A method for sizing energy storage system to increase wind penetration as limited by grid frequency deviations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1):729-737.
- [9] YU Qingguang, LIU Yuming, JIANG Zhicheng, et al. Study of offshore wind power penetration rate in gas turbine generator platform power grid[J]. Energy Reports, 2021, 7(1):141-146.
- [10] 叶茂,刘艳,顾雪平,等.大停电背景下考虑系统暂态安全的动态风电穿透功率极限计算[J].电力自动化设备,2018,38(11):167-173.
YE Mao, LIU Yan, GU Xueping, et al. Calculation of dynamic wind power penetration limit considering system transient safety under background of blackout[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 167-173.
- [11] 刘福锁,卿梦琪,唐飞,等.计及风电一次调频和频率约束的风电占比极限值计算[J].电网技术,2021,45(3):863-870.
LIU Fusuo, QING Mengqi, TANG Fei, et al. Limit proportion calculation of wind power considering primary frequency modulation and frequency constraints[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 863-870.
- [12] AHMADI H, GHASEMI H. Maximum penetration level of wind generation considering power system security limits[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(11):1164-1170.
- [13] 梅业伟,刘学敏,孟晓龙,等.海外油田小型燃气轮电站发电机电保护分析[J].电气技术,2020,21(11):76-78.
MEI Yewei, LIU Xuemin, MENG Xiaolong, et al. Analysis of generator relay protection for overseas oil field small gas turbine power plant[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(11): 76-78.
- [14] 韩泽雷,鞠平,秦川,等.面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望[J/OL].电力自动化设备.(2023-04-27)[2023-05-15]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202303007>.
- [15] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3):720-729.
- [16] SHI Q, LI F, CUI H. Analytical method to aggregate multi-machine SFR model with applications in power system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6):6355-6367.
- [17] DAI Jianfeng, TANG Yi, WANG Qi. Fast method to estimate maximum penetration level of wind power considering frequency cumulative effect[J]. IET Generation, Transmission Distribution, 2019, 13(9):1726-1733.
- [18] 张航,王秀丽,张启文,等.计及生产指标的海上油田群电力系统可靠性评估[J].电网技术,2021,45(2):649-656.
ZHANG Hang, WANG Xiuli, ZHANG Qiwen, et al. Reliability evaluation of offshore oil power system considering produc-

- tion indexes[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 649-656.
- [19] ROWEN W I. Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1983, 105(4): 865-869.
- [20] BOZZI L, CROSA G, TRUCCO A. Simplified simulation block diagram of twin-shaft gas turbines[C]//ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference. Atlanta, Georgia, USA: IEEE, 2003: 519-526.
- [21] HANNETT L N, JEE G. A governor/turbine model for a twin-shaft combustion turbine[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 133-140.
- [22] 张哲任, 陈晴, 金砚秋, 等. 跟网型海上风电中频汇集柔性直流送出系统的最优频率选择[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2881-2889.
- ZHANG Zheren, CHEN Qing, JIN Yanqiu, et al. Optimal operation frequency for medium frequency grid-following offshore wind farm integrated by MMC-HVDC[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2881-2889.
- [23] LU L, SABORÍO-ROMANO O, CUTULULIS N A. Frequency control in power systems with large share of wind energy[J]. Energies, 2022, 15(5): 1922.
- [24] 戴剑丰. 适应弱惯性大电网的风电场频率响应技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- DAI Jianfeng. Research on frequency response technology of wind farm for adapting to large power grid with weak inertial [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [25] 林卫星, 文劲宇, 艾小猛, 等. 风电功率波动特性的概率分布研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 38-46, 20.
- LIN Weixing, WEN Jinyu, AI Xiaomeng, et al. Probability density function of wind power variations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 38-46, 20.
- [26] 杨茂, 董骏城. 基于混合分布模型的风电功率波动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊): 69-78.
- YANG Mao, DONG Juncheng. Study on characteristics of wind power fluctuation based on mixed distribution model[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(Supplement): 69-78.
- [27] 杜伟, 罗先觉, 王秀丽, 等. 基于全系统可靠性评估方法的海上油田群电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 108-116.
- DU Wei, LUO Xianjue, WANG Xiuli, et al. Reliability evaluation on power system of offshore oilfield group based on system-wide reliability evaluation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 108-116.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量电力系统频率偏差: GB/T 15945—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [29] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定计算规范: GB/T 40581—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [30] SAJADI A, KOLACINSKI R M, CLARK K, et al. Transient stability analysis for offshore wind power plant integration planning studies—part I: short-term faults[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 182-192.
- [31] 罗魁, 郭剑波, 马士聪, 等. 海上风电并网可靠性分析及提升关键技术综述[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3691-3703.
- LUO Kui, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of key technologies of reliability analysis and improvement for offshore wind power grid integration[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3691-3703.

作者简介:

苏开元(2000—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析控制(E-mail: sky22@mails.tsinghua.edu.cn);
邱银锋(1983—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为海上平台电气方案设计(E-mail: qiuyf2@cnooc.com.cn);
谢小荣(1975—),男,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统振荡分析与抑制、柔性输电系统等(E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Equivalent frequency response model-based analysis of wind power penetration limit in offshore oilfield power systems

SU Kaiyuan¹, QIU Yinfeng², XIE Xiaorong¹, LI Guoxiang², DONG Wenkai¹, CHE Jiuwei²

(1. State Key Laboratory of Power System Operation and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: A method based on an equivalent frequency response model for analyzing the wind power penetration limit (WPPL) in offshore oilfield power systems is proposed. The average system frequency response (ASFR) equivalent model of offshore oilfield power systems is developed. The parameters of prime mover and governor are determined based on the single- and twin-shaft gas turbine. The probability model of wind power fluctuation is established according to the differential transformation and t location-scale distribution. Then, based on the indicator of allowing cumulative probability of wind power fluctuation and the indicator of maximum frequency variation after the most serious fault, the WPPL analyzing method considering frequency deviation constraints and transient frequency stability constraints is proposed. The accuracy and effectiveness of the proposed method are verified using the actual offshore oilfield power systems, and the results demonstrate that the response speed of prime mover and governor and the transient frequency stability constraints have critical impacts on the WPPL in offshore oilfield power systems.

Key words: wind power penetration limit; offshore oilfield power systems; ASFR equivalent model; frequency deviation; transient frequency stability

附录 A

表 A1 燃气轮机响应速度影响参数及典型值

Table A1 Influence parameters and typical values of gas turbine frequency response speed

参数	参数值	参数	参数值
R_S	0.05	R_T	0.05
X_S	0.60	K_{PT}	0.40
Y_S	0.05	K_{LT}	2.00
Z_S	1.00	T_{FT}	0.40
T_{FS}	0.40	T_{CDT}	0.05
T_{CDS}	0.20	T_{HPT}	1.00

附录 B

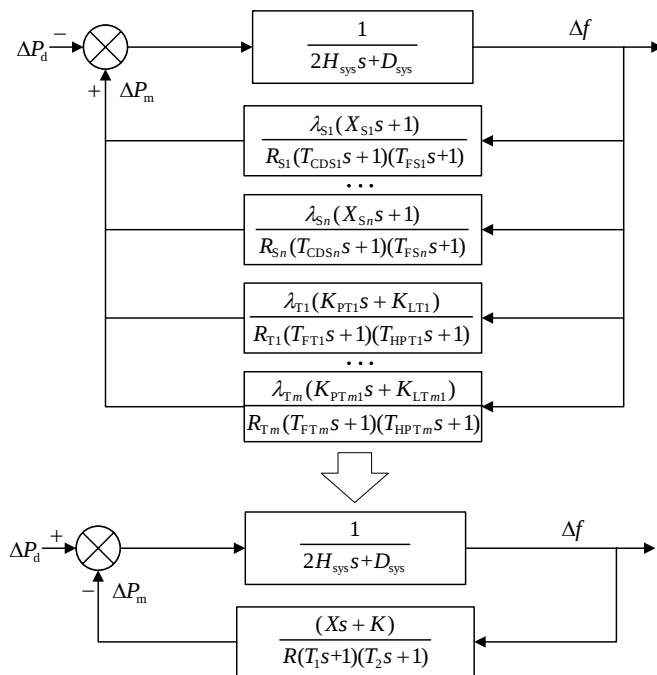
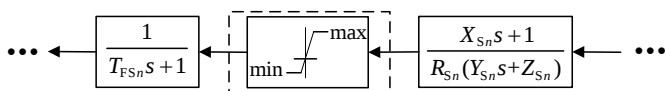
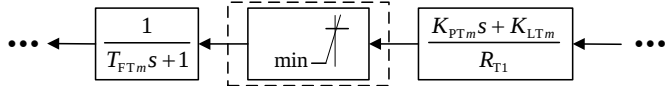


图 B1 海上油田群电网 ASFR 模型

Fig.B1 ASFR model of offshore oilfield power systems



(a) 单轴燃机限幅环节



(b) 分轴燃机限幅环节

图 B2 限幅环节示意图

Fig.B2 Schematic diagram of fuel limits

附录 C

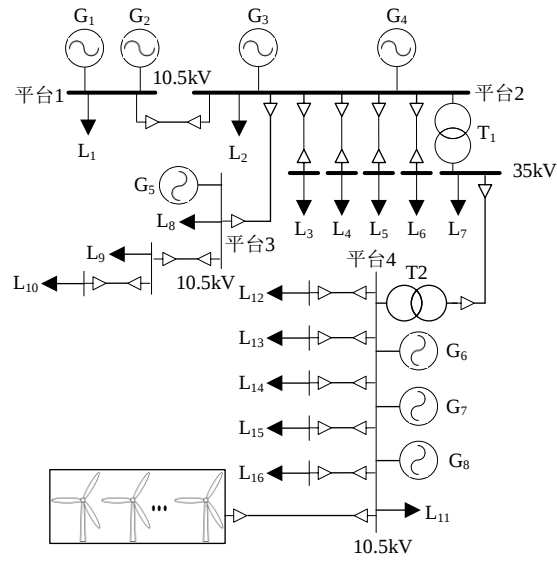


图 C1 某实际海上油田群电网拓扑结构

Fig.C1 Structure of an actual offshore oilfield power systems

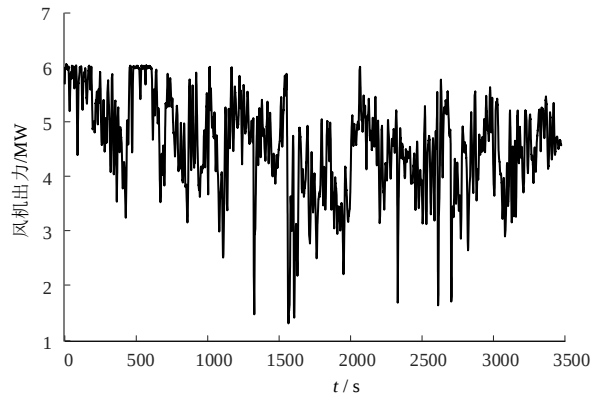


图 C2 油田群电网实测风电机组出力曲线

Fig.C2 Wind power output data of oilfield power systems

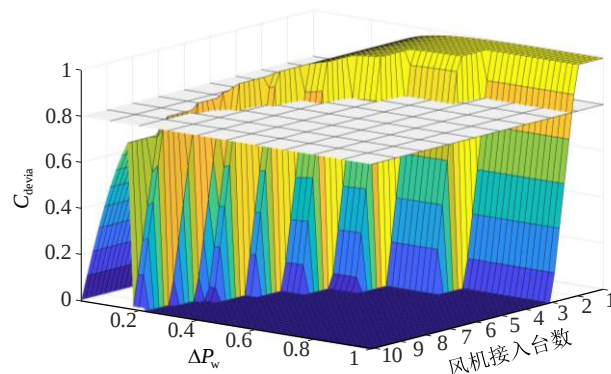


图 C3 C_{devia} 随风机台数与风电波动变化关系

Fig.C3 Relationship between C_{devia} and number of wind turbines as well as wind power fluctuations

表 C1 油田群电网单轴燃气轮机 ASFR 模型参数

Table C1 Parameters of ASFR model for single-shaft gas turbine in oilfield group grid

机组	H_s	D_s	R_s	X_s	T_{CDS}	T_{FS}
G ₁	2.50	0.80	0.04	0.60	0.20	0.60
G ₂	2.50	0.80	0.04	0.60	0.20	0.60
G ₅	2.00	0.50	0.04	0.65	0.10	0.30
G ₈	2.50	0.60	0.04	0.55	0.10	0.40

表 C2 油田群电网分轴燃气轮机 ASFR 模型参数

Table C2 Parameters of ASFR model for twin-shaft gas turbine in oilfield group grid

机组	H_T	D_T	R_T	K_{PT}	K_{LT}	T_{FT}	T_{HPT}
G ₃	4.00	1.00	0.05	0.40	1.00	0.30	1.20
G ₄	4.00	1.00	0.05	0.40	1.00	0.30	1.20
G ₆	3.00	0.80	0.05	0.50	1.00	0.20	1.00
G ₇	3.00	0.80	0.05	0.50	1.00	0.20	1.00

表 C3 油田群电网 ASFR 模型初始等值参数

Table C3 Equivalent parameters of ASFR model for oilfield power system

参数	参数值	
	工况 1	工况 2
H_{sys}	3.037	2.885
D_{sys}	0.845	0.791
R	0.046	0.044
X	0.523	0.541
K	1.000	1.000
T_1	0.221	0.195
T_2	0.868	0.724