



1 电力自动化设备 2
Electric Power Automation Equipment 3
ISSN 1006-6047, CN 32-1318/TM 4

《电力自动化设备》网络首发论文⁵

题目：考虑非线性环节的双高电力系统频率安全快速评估方法⁶
作者：郭威，郑文伟，文云峰，游广增，李鸿鑫，何烨⁷
DOI：10.16081/j.epae.202512010⁸
收稿日期：2025-03-29⁹
网络首发日期：2025-12-25¹⁰
引用格式：郭威，郑文伟，文云峰，游广增，李鸿鑫，何烨. 考虑非线性环节的双高电¹¹
力系统频率安全快速评估方法[J/OL]. 电力自动化设备.
<https://doi.org/10.16081/j.epae.202512010>¹²



13



14 中国知网 15
www.cnki.net 16

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶¹⁷段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国¹⁸学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

考虑非线性环节的双高电力系统频率安全快速评估方法¹

郭威¹, 郑文伟¹, 文云峰¹, 游广增², 李鸿鑫³, 何烨²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 云南电网有限责任公司规划建设研究中心, 云南 昆明 650011; 3. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 现有频率安全分析方法未考虑多元异质资源馈入后大量非线性环节的影响, 其评估精度和效率仍待提升。针对该问题, 提出了一种考虑非线性环节的双高电力系统频率安全快速评估方法。建立了适用于多元异质资源的系统频率响应模型, 并重点对频率死区、输出功率限幅等非线性环节进行修正处理, 构建了计及非线性环节的频率安全分析模型; 以此为基础, 提出了基于牛顿-拉夫逊法的扰动后极值频率偏差快速计算方法, 并构建了纳入同步机组关停指标和频率安全约束的新能源极限渗透率分析方法; 以改进的 IEEE-39 节点系统和某实际电网为例, 评估了预想故障下系统频率安全, 并分析了新能源承载极限, 验证了所提模型和方法的有效性。

关键词: 频率安全; 多元异质资源; 非线性环节; 极值频率偏差; 新能源极限渗透率

中图分类号: TM761⁶

文献标志码: A⁷

DOI: 10.16081/j.epae.202512010⁸

0 引言⁹

近年来, 中国新能源发电和直流输电接入规模高速发展, 部分省级电网正逐渐转变为以高比例新能源、高比例电力电子设备为特征的双高电力系统¹⁰[1-2]。在新能源和电力电子装备占比持续提升的情况下, 改变电力电子变流器接口电源(converter interfaced generator, CIG)的控制方式, 使其输出功率与系统频率发生耦合, 从而为双高电力系统提供一定的惯量支撑和快速调频能力的需求愈发迫切^[3-4]。最新发布的《电力系统安全稳定导则》^[5]、《风电场接入电力系统的技术规定》^[6]等国家标准已对新能源场站一次调频能力或惯量响应指标提出了明确要求。然而, 施加虚拟惯量和一次调频控制的 CIG 接入后将使得双高电力系统频率响应资源呈现多元化特征, 由于多元异质资源(水电、火电、太阳能发电、风电、储能、直流等)响应特性各异, 将改变传统电力系统“大惯量+慢调频”的动态频率响应特征, 使得双高电力系统频率响应机理变得愈加复杂。同步机组、直流、新能源、储能等各类型资源频率支撑能力存在明显差异, 各类慢速和快速响应资源对系统频率动态特征具有不同程度的影响, 用于描述频率响应特性的微分方程维度

大幅增加, 极大增加了频率安全评估的难度, 倔待研究一种适用于含多元异质资源的双高电力系统频率安全快速评估方法。

已有研究工作多以简化原动机-调速器模型为基础, 探究双高电力系统频率响应特性。文献[7]建立计及新能源渗透率的电力系统频率响应传递函数, 并提出了 2 个表征系统频率稳态性能的指标。文献[8]在[7]基础上, 通过设定机械功率出力限幅、系统有效调差比例系数和有效惯量比例系数对已有频率响应分析模型进行完善。文献[9]基于聚合系统频率响应(aggregated system frequency, ASFR)模型提出分别适用于水电和火电机组的调速系统通用简化模型, 解决不同调频特性机组共存下系统极值频率预测的问题。文献[10]从同步机组功率响应特性出发, 构建分别对应于转子惯量响应、阻尼功率响应和调速器功率响应的统一结构模型, 获得可简化表征各有功响应阶段的模型结构。文献[11]建立了计及储能的电力系统频率响应传递函数模型, 分析储能对低惯量电力系统频率响应特性的提升效果。文献[12]采用多项式拟合描述调速器响应特性, 降低了极值频率偏差预测的计算量。

以上研究通过简化频率响应模型进行了系统频率安全快速评估的有益尝试。但部分解析模型或数值计算方法处理过程忽略了实际频率响应模型中死区和输出功率限幅这类非线性环节, 在不同预想故障和运行方式下可能带来显著的计算误差。这将导致小故障场景下有功资源提前响应频率变化, 大故障场景下部分备用容量不足, 机组持续提供功

收稿日期: 2025-03-29; 修回日期: 2025-09-23

基金项目: 湖南省自然科学杰出青年基金资助项目(2024JJ2022); 国家自然科学基金资助项目(52077066)

Project Supported by the Hunan Provincial Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (2024JJ2022) and the National Natural Science Foundation of China(52077066)

率支撑^[13],使系统有功频率平衡提前到达,最终使极值频率偏差计算结果偏小。此外,部分研究进行频率安全分析时采用统一结构模型,使得频率分析模型表达更加简洁、计算更加快捷,但尚不能够反映多元异质资源在不同频率响应阶段对电力系统频率响应特性的影响。因此,现有研究成果在双高电力系统调频资源结构形态发生较大变化时,其模型的适用性还有待考究。

综上所述,目前频率安全快速评估方法存在2个主要问题:①忽略了实际频率响应模型中频率死区和输出功率限幅这类非线性环节;②多元异质资源参与下频率响应简化模型的有效性仍待商榷。针对以上问题,本文建立了适用于多元异质资源的系统频率响应(multi-source system frequency response, MS-SFR)模型,并重点对非线性环节进行修正处理,构建了考虑非线性环节的频率安全分析模型(nonlinear frequency security analysis model, NFSAM)。以此为基础,提出了基于牛顿-拉夫逊法(Newton-Raphson Iteration, NRI)法的扰动后极值频率偏差快速评估方法。该方法适用于不同故障容量下极值频率偏差指标的预测,有效解决了在不同工况和预想扰动下因非线性环节影响导致的简化模型求解精度低下问题。此外,结合所提方法构建了一种考虑同步机组关停指标的新能源极限渗透率分析方法。基于改进的 IEEE-39 节点系统和某实际电网验证了所提模型和方法的有效性。

1 多元异质资源参与的系统频率响应模型³

双高电力系统中,经电力电子接口接入的新能源发电和直流输电占较高比例,使得系统动力学特征发生改变。与传统电力系统相比,双高电力系统在“源-网-荷-储”各环节包含多元异质有功资源,各类资源之间在响应时间、调节速率、调频容量等频率响应特性方面存在较大差别。附录 A 图 A1 为低频故障下双高电力系统各调频资源的功率响应曲线。其中,新能源和储能引入了虚拟惯量和下垂控制构成的辅助调频策略,即 PD-VIC 控制^[14-15]。新能源和储能主动参与辅助调频之后,可以为故障后系统频率响应过程提供快速的有功支撑(输出有功功率可以响应频率变化率和频率偏差)。

相较而言,传统频率调节资源功率响应特性有所不同。当频率偏移较大时,火电机组锅炉蒸汽调压系统响应较慢,汽轮机调门开度变化引起锅炉主蒸汽压力下降,限制机组出力的进一步提高^[16]。水电机组存在初始反调现象,不利于初始频率稳定,

但由于水轮效应下水电机组一次调频效应相对稳定,在长时间尺度调频过程中具有较好的频率控制能力。直流频率限制控制(frequency limited control, FLC)通过监测频率变化,快速调整直流输送功率,可以作为抑制频率偏差的辅助措施^[17]。系统惯性响应在故障瞬间提供有功功率支撑最大,可以有效抑制频率变化速率,其他调频措施动作后惯量支撑功率明显减弱。系统阻尼效应与频率偏差呈正比例响应关系,可抑制系统极值频率偏差。⁶

根据以上分析可知,在双高电力系统多元异质资源参与下,各有功资源依靠自身频率响应特性共同维持系统频率稳定。此外,由于各调频资源之间频率响应特性相差较大,难以找到一个统一的数学模型进行描述。为便于系统频率安全快速分析,基于惯性中心理论(center of inertia, COI)建立如附录 A 图 A2 所示 MS-SFR 模型^[18]。图 A2 中: G_{WF} 、 G_{PV} 、 G_{ESS} 、 G_{TTF} 、 G_{HTF} 和 G_{DC} 分别为风电机组功率响应传递函数、光伏机组功率响应传递函数、储能功率响应传递函数、火电机组一次调频传递函数、水电机组一次调频传递函数和直流 FLC 有功响应传递函数,可以根据各调频资源详细数学模型分别进行建模; 频率响应资源 X 的出力系数^[7] K_X 如式(1)所示; 系统同步惯性常数 H 如式(2)所示。⁷

$$K_X = \frac{P_X}{P_{load}} \quad (1)$$

$$H = \sum_q^{N_G} \frac{S_q H_{syn-q}}{S_{base}} \quad (2)$$

式中: P_X 为频率响应资源 X 的出力; P_{load} 为系统负荷, 系统基准容量为负荷大小; S_q 为第 q 台同步机组的额定容量; H_{syn-q} 为第 q 台同步机组的惯量常数; S_{base} 为系统基准容量, N_G 为系统中同步机组的台数。⁸⁹¹⁰

基于电力系统 COI 理论,忽略网架和频率分布特性的影响,在如图 A2 所示的多元异质资源参与的频率响应模型中,根据各类型资源的频率响应特性建立详细的数学模型,可以进行电力系统全过程频率安全分析。然而,在大型电网中,由于调频资源数量众多,图 A2 所示多机频率响应模型建模难度较大且较为繁琐。此外,该模型中大量引入频率死区和输出功率限幅这类非线性环节,难以进行解析计算。因此,需要通过合理的模型降阶与化简获得便于进行频率安全快速分析的模型,以提升计算效率和结果精度。¹¹

在所构建的 MS-SFR 模型中,由 G_{WF} 、 G_{PV} 、 G_{ESS} 、 G_{TTF} 、 G_{HTF} 和 G_{DC} 表示的有功功率传递函¹²

数可以表示为如图 1 所示的通用模型。图中: Δf 为经采样环节滤波后的电网测量频率; Δf_{DB} 为频率死区; Δf_{in} 为经死区环节的输入频率; ϕ 为多元异质资源功率响应传递函数; P_{max} 、 P_{min} 分别为多元异质资源有功响应功率上、下限; ΔP_{out} 为多元异质资源输出有功响应功率增量。其中, 通用模型主要包含三部分: 频率死区、功率响应传递函数、功率限幅。

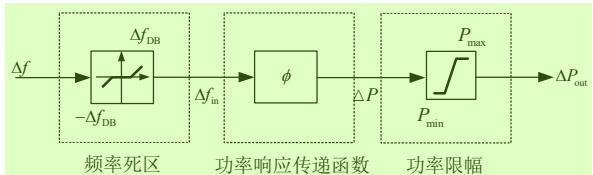


图 1 功率响应通用模型 3

Fig.1 Universal model for power response 4

1) 同步机组调速器通用低阶等值模型。⁵

水电机组和火电机组一次调频有功响应功率⁶在频率下降阶段逐渐增加,但是水电机组在一次调频初期会出现反调现象。在此,假设 1 个一阶传递函数(零点个数和极点个数各为 1)表示水电机组和火电机组在一次调频过程中的通用低阶模型,如式(3)所示。

$$\phi_{syn} = -\frac{b_0 s + b_1}{s + a_1} \quad (3)$$

式中: b_0 、 b_1 和 a_1 为一阶模型中的等值参数, 可以通过对发电机的小扰动实验和最小二乘参数辨识方法求得。此外, b_0 的正负决定着调速系统的种类: $b_0 > 0$ 时, 表示该机组调速器为汽轮机(火电机组); $b_0 < 0$ 时, 表示该机组调速器为水轮机(水电机组), 即能够反映一次调频初期水电机组的反调现象, 详细证明见附录 A 式(A1) — (A5)。需要指出的是, 若 $b_0=0$, 模型将退化为无零点惯性环节, 经测试其拟合度显著下降, 无法准确捕捉关键动态特性, 因此本文中 $b_0 \neq 0$ 。

大网模式下, 以 PSD-BPA 仿真软件中 GM-GA-TW 型水电机组调速器和 GS-TB 型火电机组调速器为例^[19], 其详细拓扑结构见附录 B 图 B1、B2。使用最小二乘法辨识, 其辨识结果如式(4)所示。

$$\begin{cases} \phi_{GM-GA-TW} = -\frac{-0.1612s + 0.1394}{s + 0.0293} \\ \phi_{GS-TB} = -\frac{0.1442s + 1.582}{s + 0.4475} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\phi_{GM-GA-TW}$ 和 ϕ_{GS-TB} 分别为 GM-GA-TW 型水电机组调速器和 GS-TB 型火电机组调速器的拟合度, 拟合结果分别为 97.6% 和 95.01%。

对辨识结果施加频率信号获得的功率响应曲线与实际调速器进行比较, 如附录 B 图 B3 所示。从图中可知, GM-GA-TW 型低阶辨识模型参数 $b_0=-0.1612$, 能够反映该水电机组在一次调频初期的反调特性。对于水电机组调速器在小网和孤网模式下的参数, 仍然可通过小信号实验和最小二乘参数辨识方法获得低阶辨识模型。

通过以上分析可知, 水电机组和火电机组调速器模型均可用相似的一阶传递函数表示, 这大大降低了搭建 MS-SFR 的复杂度。

2) 新能源和储能的频率响应通用低阶等值模型。¹⁴

采用微分控制环节和比例控制环节实现新能源机组和储能对频率变化的主动响应^[20-22]。其中, 微分环节模拟同步机组的惯性响应, 实现对系统频率变化率的响应。比例环节模拟同步机组的下垂控制, 实现对系统频率偏差的响应。实际电力系统中新能源和储能采用虚拟惯量控制和下垂控制的拓扑如附录 B 图 B4 所示。基于 COI 理论, 系统频率由惯性中心频率表示。因此, 可忽略电力电子接口电源的采样滤波环节, 构建新能源和储能的频率响应通用低阶等值模型表达式 ϕ_{renew} 为:

$$\phi_{renew} = -\left(\frac{2H_{vir}s}{1+T_f s} + D_{vir}\right) \quad (5)$$

式中: H_{vir} 为等效虚拟惯量时间常数; D_{vir} 为等效下垂系数; T_f 为滤波器时间常数。

尽管新能源与储能采用了统一结构模型, 但是¹⁸其调频特性差异能通过辨识参数差异性反映。

3) 直流 FLC 的通用低阶等值模型。¹⁹

直流输电系统具有快速有功调节能力, 响应时间为毫秒级。直流 FLC 主要采用的控制逻辑为反向频差复归型, 如附录 B 图 B5 所示, 其通用低阶等值模型表达式 ϕ_{FLC} 为:

$$\phi_{FLC} = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \quad (6)$$

式中: K_p 为直流 FLC 比例增益系数; K_i 为积分增益系数。

2 考虑非线性环节的频率安全分析模型和²³快速评估方法

为有效感知系统频率稳定态势, 防止大扰动后低频/高频保护动作, 本文主要围绕预想扰动极值频

率偏差的快速计算展开研究。¹

2.1 非线性环节的模型修正²

1) 频率死区环节修正。³

如图 1 所示, 系统发生有功扰动后, 经死区环节的输入频率 Δf_{in} 可表示为:

$$\Delta f_{in} = \begin{cases} \Delta f - \Delta f_{DB} & |\Delta f| > |\Delta f_{DB}| \\ 0 & |\Delta f| \leq |\Delta f_{DB}| \end{cases} \quad (7)$$

本文所考虑故障皆会引起一次调频动作, 因此 $|\Delta f| \leq |\Delta f_{DB}|$ 情景不在本文研究范围。在 $|\Delta f| > |\Delta f_{DB}|$ 场景下, 定义频率死区功率 ΔP_{DB} 为功率响应单元动作需要克服的功率大小, 表征频率死区对调频资源响应的阻碍程度, 表达式如式(8)所示。

$$\Delta P_{DB} = \phi \Delta f_{DB} \quad (8)$$

在各类型调频资源备用充足时, 忽略限幅环节, 图 1 所示功率响应通用环节可简化为图 2 所示频率死区环节修正的简化功率响应通用环节, 表达式如式(9)所示。

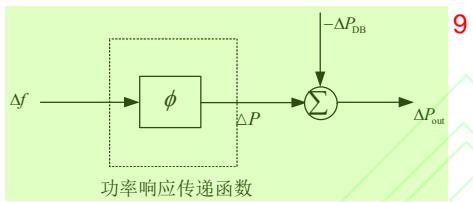


图 2 简化功率响应通用环节¹⁰

Fig.2 Simplified universal model for power response¹¹

$$\Delta P_{out} = \phi \Delta f - \Delta P_{DB} \quad (9)$$

在多元异质资源接入的双高电力系统中, 将式(3)、(5)、(6)、(8)代入转子运动方程, 可得到式(10)所示系统频率微分方程。

$$\begin{aligned} 2H \frac{d\Delta f}{dt} + D\Delta f &= \Delta P_{out_sys} + \Delta P_{out_renew} + \Delta P_{out_FLC} - \Delta P_d \\ &= (\phi_{syn} + \phi_{renew} + \phi_{FLC})\Delta f - (\phi_{syn}\Delta f_{DB_syn} + \phi_{renew}\Delta f_{DB_renew} + \phi_{FLC}\Delta f_{DB_FLC}) - \Delta P_d \end{aligned} \quad (10)$$

式中: ΔP_{out_syn} 、 ΔP_{out_renew} 、 ΔP_{out_FLC} 分别为同步机组、新能源、直流 FLC 这 3 类资源的响应功率; ΔP_d 为扰动大小。

2) 限幅环节模型修正。¹⁶

进一步, 考虑功率输出限幅环节的处理。在双高电力系统中, 不同类型调频资源由于其调频特性不同和最大调频容量不同, 在频率响应过程中进入有功限幅的时间也存在不同, 如附录 C 图 C1 所示。直流 FLC、新能源与储能的 PD-VIC 属于快速频率控制措施, 其功率响应速率快于同步机组机械功率响应。因此, 其往往先于同步机组进入功率限幅。

当部分调频资源响应功率达到功率限幅时, 电力系统整体功率响应速率将会逐渐降低。

系统发生较大有功故障时, 调频资源功率输出响应可近似用式(11)表示。

$$\begin{aligned} \Delta P_{out}(t) &= \frac{\Delta P_{limit}}{T} t [u(t) - u(t-T)] + \\ &\Delta P_{limit} u(t-T) \end{aligned} \quad (11)$$

式中: ΔP_{limit} 为该调频资源最大有功调整量; T 为该调频资源功率响应达到 ΔP_{limit} 的对应时间, 高频故障对应图 1 中 P_{min} , 低频故障对应图 1 中 P_{max} ; $u(t)$ 和 $u(t-T)$ 分别表示零时刻和 T 时刻阶跃函数。式(11)将调速器功率响应进入限幅环节近似等效成为 1 条分段曲线。

需要说明的是, NFSAM 主要针对频率死区与功率限幅两类主导非线性环节。其他非线性因素(如变流器控制延时等)因时间尺度分离或工程影响微弱而被合理忽略。通过第 4 章算例分析中极值频率偏差的误差也能看出其他非线性因素影响较小。

2.2 考虑非线性环节的频率安全分析模型²⁴

将多元异质资源频率响应低阶等值模型(ϕ_{syn} 、 ϕ_{renew} 和 ϕ_{FLC})替代 MS-SFR 模型中复杂的有功功率响应模型(G_{WF} 、 G_{PV} 、 G_{ESS} 、 G_{TTF} 、 G_{HTF} 和 G_{DC}), 并将频率死区环节和出力限幅环节的修正处理引入多元异质资源的功率响应分析中, 得到如附录 C 图 C2 所示的 NFSAM。其中, $\Delta P_d > 0$ 代表低频故障, $\Delta P_d < 0$ 为高频故障, α 为该资源出力系数, 其值为该资源额定容量与基准容量之比。

相比于传统 SFR 模型, 本文所提 NFSAM 在有效降低模型阶数的同时, 充分考虑频率死区环节和出力限幅环节在频率响应过程中的影响, 可较为准确地分析不同大小故障量下双高电力系统的极值频率偏差指标。

2.3 基于 NFSAM 的系统极值频率偏差快速评估方法²⁷

由于图 C2 所示 NFSAM 死区环节修正部分是闭环的, 且其中包含多个调频资源, 很难直接推导出系统极值频率偏差的解析表达式。为简化分析, 将功率响应输出近似等效为一次函数, 如式(12)所示, 进而频率响应曲线可近似表示为二次函数, 如式(13)所示^[12]。

$$\hat{\Delta P}_0(t) = \frac{P_d}{t_{n0}} t \quad (12)$$

$$\Delta \hat{f}_0(t) = -\frac{\Delta P_d}{2H} \left(-\frac{t^2}{2t_{n0}} + t \right) \quad (13)$$

式中: $\Delta \hat{P}_0$ 和 $\Delta \hat{f}_0$ 分别表示近似有功响应和近似频率响应; t_{n0} 为极值频率偏差对应时间。

将闭环模型做开环处理, 即将功率响应模型中频率输入与功率响应输出进行解耦^[23], 如附录 C 图 C3 所示。

发生较小故障时, 所有机组都未到达功率输出限幅。此时, 将式(13)代入式(10), 获得功率平衡高阶非线性方程。该方程可通过 NRI 法、二分法、割线法等进行求解。NRI 法利用函数的一阶导数来逼近方程的根, 直到满足预设的误差要求, 收敛速度更快。因此, 本文选择 NRI 法求解功率平衡高阶非线性方程 (下文式(18)), 进而根据式(13)求解得到极值频率偏差^[12]。

本节主要介绍在大扰动故障下, 电力系统中部分调频资源功率响应达到功率输出限幅时极值频率偏差的计算方法。所提基于 NFSAM 的系统极值频率偏差计算流程图如附录 C 图 C4 所示, 其计算流程具体思路如下。

步骤 1: 迭代次数索引 $i=0$ 时, 假设调频资源集合 S 中各资源有功响应为正比例函数, 则可将系统有功响应近似表示为式(12)所示正比例函数表达式, 频率响应可近似表示为式(13)所示二次函数表达式。 i 表示在当前迭代步骤中, 系统中已达到功率输出限幅的调频资源总数。

步骤 2: 根据式(8)计算调频资源的死区功率, 并依次代入式(9)、式(10)得到式(14), 然后通过 NRI 法求解极值频率偏差时间 t_{ni} 。

$$\Delta P_d = \sum_k^S \Delta P_{out}^k(t_{ni}) - D \Delta \hat{f}_0(t_{ni}) \quad (14)$$

式中: k 为索引变量, 表示调频资源集合 S 中的第 k 个资源; ΔP_{out}^k 为第 k 个调频资源的输出功率响应增量; D 为系统阻尼系数。

步骤 3: 在集合 S 中, 将 t_{ni} 代入式(9), 若集合 S 中皆未出现功率限幅, 则 t_{ni} 为预想故障后极值频率偏差时间, 将其代入式(13)中即可求得系统极值频率偏差。

步骤 4: 若集合 S 中某一资源出现功率限幅, 则 $i=i+1$, 并令式(9)等于 ΔP_{limit}^j (j 为调频资源索引, 表示集合 S 中第 j 个达到功率限幅的资源), 得式(15), 经 NRI 法求得该资源达到功率限幅的时间 T_j 。进一步地, 将式(12)表示为式(16)所示分段修正近似有功响应表达式, 同理求得分段近似频率响应表达

式, 如式(17)所示, 并依次代入式(9)、式(10)得到式(18), 经 NRI 法迭代求解得到极值频率偏差时间 t_{ni} 。

$$\Delta \hat{f}_{i-1} \phi^j(T_j) - \Delta P_{DB}^j(T_j) = \Delta P_{limit}^j \quad (15)$$

$$\Delta \hat{P}_i(t) = \frac{\Delta P_d}{t_{n0}} t - \sum_j^i \frac{\Delta P_{limit}^j}{t_{ni}} (t - t_{ni}) u(t - t_{ni}) \quad (16)$$

$$\Delta \hat{f}_i(t) = -\frac{\Delta P_d}{2H} \left(-\frac{t^2}{2t_{n0}} + t \right) - \frac{1}{4H} \sum_j^i \frac{\Delta P_{limit}^j}{t_{ni}} (t - t_{ni})^2 u(t - t_{ni}) \quad (17)$$

$$\Delta P_d = \sum_{j=1}^i \Delta P_{limit}^j + \sum_{k=i+1}^n \Delta P_{out}^k(t_{ni}) - D \Delta \hat{f}_i(t_{ni}) \quad (18)$$

式中: $\Delta \hat{f}_i$ 为第 i 次迭代时的近似频率响应函数; ϕ^j 为第 j 个达到功率限幅资源的功率响应传递函数; ΔP_{limit}^j 为第 j 个达到功率限幅资源的最大有功调整量; $\Delta \hat{P}_i$ 为第 i 次迭代时的系统总有功响应近似函数; n 为未限幅资源的集合。

步骤 5: 重复步骤 3、4, 直至未出现新的调频资源有功响应达到功率限幅的情况。此时 t_{ni} 即为系统极值频率偏差时间, 将其代入式(17)中即可求得扰动后系统极值频率偏差。

应当指出, 需要设置迭代初值 t_{n0} 为小干扰场景下系统频率响应的固有响应时间, 避免初值设置不合理导致的迭代发散问题。通过式(16)和式(17)的不断修正, 式(18)所示功率平衡方程在极值频率偏差时间 t_{ni} 处始终保持可导, 因此, 在使用 NRI 法求解过程中, 总能求得一个满足误差条件的解。

3 频率安全约束下新能源极限渗透率分析

为保证大规模新能源接入后系统频率安全, 需估算系统新能源极限渗透率。目前多通过频率安全指标表达式进行分析^[24], 存在以下不足: ①同步机组出力比例调整策略忽略实际关停机组与新能源出力提升对系统频率响应的耦合影响; ②频率安全指标计算过程对各环节进行简化或忽略, 未考虑资源自身调节能力和调频效果。为此, 本章提出一种基于同步机组关停量化指标(generator shutdown indicator, GSI)的频率安全约束下新能源极限渗透率估算方法。

3.1 同步机组关停量化指标

机组一次调频能力主要与机组出力限幅和机组频率响应快慢相关。机组出力限幅表征了机组最大可提供的有功功率支撑(maximum adjustable power, MAP)。机组频率响应快慢即调频过程中功

率完全释放所需时间，在此定义为机组频率响应固有时间 T_s ，其详细计算推导见附录 D。 T_s 越大说明该机组功率响应速度越慢，不利于频率恢复。而为提升新能源极限渗透率，应替换高出力水平 P_{out} 的大型同步机组。

在此，定义同步机组关停量化指标 I_{GS} ，如式(19)所示，其物理含义为对于具备相同功率支撑能力的机组，优先关闭功率响应速度慢和出力水平高的同步机组，以使新能源极限渗透率更高。

$$I_{GS} = \frac{P_{MA}}{T_s P_{out}} \quad (19)$$

式中： P_{MA} 为机组调频容量。

T_s 和 I_{GS} 的计算过程考虑了机组惯量水平的影响，根据 I_{GS} 所得的关停机组合为考虑系统惯量水平变化和各机组调频能力的组合，因而可以准确计算新能源极限渗透率。

3.2 基于关停机指标的新能源极限渗透率分析

本节对新能源渗透率(新能源机组出力总和与系统总负荷有功功率的比值)计算边界设定如下：电力系统发生最大 N-1 故障后，极值频率偏差不触发“第 3 道防线”低频减载保护装置动作^[7-9]，即低频故障下频率安全边界 $\Delta f_{max} = 0.8 \text{ Hz}$ ^[25]。基于关停机指标的频率安全约束下新能源极限渗透率分析流程如附录 D 图 D1 所示，具体如下。

步骤 1：根据机组低阶等值模型计算 I_{GS} ，并从小到大进行排序。

步骤 2：根据 GSI 从小到大依次关闭机组，计算和更新系统惯性水平，并利用基于 NFSAM 的极值频率偏差快速计算方法求解预想最大 N-1 故障后极值频率偏差指标，若极值频率偏差与计算边界的误差在设定范围之内，则可得计算新能源最大渗透率的最佳关停机组合 L_j 。

步骤 3：若误差不在设定范围之内，则按顺序遍历剩余机组后，寻找极值频率偏差最接近 1 Hz 的关停机组合，作为计算新能源最大渗透率的最佳关停机组合 L_j 。

步骤 4：根据最佳关停机组合将同步机组替换成为相同出力水平的新能源机组，求解得到系统可承载的新能源极限渗透率。

需要指出，新能源极限渗透率还受电压稳定、功角稳定等多重约束影响，本文主要聚焦频率安全这一制约当前双高系统承载能力提升的关键因素。所提 I_{GS} 综合考虑调频容量 P_{MA} 、响应速度 T_s 、惯量支撑 H 等核心要素，再结合基于 NFSAM 的极值频率偏差快速计算方法，可快速准确评估频率安全

约束下的新能源极限渗透率。

4 算例分析

本章首先基于改进的 IEEE-39 节点系统验证基于 NFSAM 的极值频率偏差计算方法的准确性，并基于所提 GSI 指标分析频率安全约束下新能源极限渗透率。最后，针对某省级电网开展应用分析。

4.1 系统频率安全分析

为模拟多元异质资源运行场景，本文通过 PSD-BPA 软件搭建改进的 IEEE-39 节点系统，并关停母线 32 和 34 的火电厂站，分别替换成具有相同出力水平、留有 10% 有功备用的光伏和风电厂站。此外，于母线 21 处馈入一条额定容量 1 000 MW 的直流线路，通过该直流向电网输送 900 MW 有功功率。系统初始总负荷水平为 6 131.3 MW，阻尼系数 D 为 1.2，新能源和直流馈入的有功功率占系统负荷的 33.47%。各资源具体位置如附录 D 图 D2 所示，包括 8 台同步发电机(G1、G2、G5、G7—G10 为火电机组，G4 为水电机组)、1 个光伏厂站 PV、1 个风电厂站 WF 和 1 个储能电站 ESS。各资源基础参数见附录 D 表 D1。

设置以下 3 个算例。

算例 1：在初始仿真时刻($t=0 \text{ s}$)发生 2.6% 负荷阶跃故障，所有机组参与频率响应(小扰动场景)。

算例 2：在初始仿真时刻($t=0 \text{ s}$)发生机组最大 N-1 故障(G6 机组切机)，所有机组参与频率响应(大扰动场景)。

算例 3：在初始仿真时刻($t=0 \text{ s}$)发生机组最大 N-1 故障(G6 机组切机)，新能源机组不参与频率响应。

为了验证所提方法在考虑非线性环节后频率计算结果的准确性，我们将算例结果与文献[12]所提未考虑频率死区和功率限幅环节的频率最低点预测(frequency nadir prediction, FNP)法、考虑死区或功率限幅环节的方法进行对比。

4.1.1 小扰动场景 NFSAM 精确度验证

应用 2.3 节提出的极值频率偏差计算方法对算例 1 进行分析。表 1 对比了所提方法与未考虑死区的 FNP 法和中国电力科学研究院电力系统仿真软件 PSD-BPA 仿真所得结果。

表 1 算例 1 对比结果

Table 1 Comparison results of Case 1

	极值频率偏差/ Hz	极值频率时间/ s	计算时间/ s
PSD-BPA	-0.12	1.32	2.50
NFSAM	-0.13	1.38	0.44
FNP	-0.08	0.82	0.59

基于 NFSAM 的极值频率偏差计算方法根据式(8)求得极值频率偏差点处各资源共需克服 198 MW 死区功率, 所得极值频率偏差指标与 PSD-BPA 结果相比误差较小(仅为 0.01 Hz, 主要由功率响应输出近似等效以及频率-功率开环处理导致), 且极值频率时间基本一致, 能够有效计及频率死区的影响, 提升了极值频率偏差指标的评估精度; 此外, NFSAM 方法运算耗时明显少于 PSD-BPA 仿真软件。FNP 法所得极值频率偏差的误差为 0.04 Hz, 极值频率时间偏差 0.5 s, 可见, FNP 法由于未考虑频率死区的影响, 调频资源提前进行有功响应, 使得功率平衡时间提前, 极值频率偏差计算结果偏小。

进一步地, 根据式(9)可得各调频资源在功率平衡点提供的有功支撑量。如图 3 所示、(DC 表示直流), 各调频资源支撑功率均与 PSD-BPA 仿真结果十分接近, 最大偏差不超过 1.5 MW, 可对各调频资源功率响应实现较好的跟踪。基于 NFSAM 的极值频率偏差快速计算方法虽然以一次函数近似实际调频资源功率响应曲线, 但通过如附录 D 图 D3 所示求解过程后, 可实现对各类型调频资源功率支撑量进行较准确的计算。

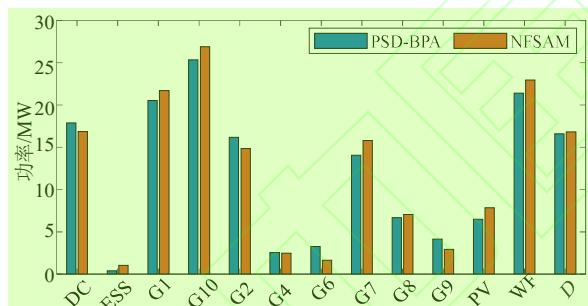


图 3 算例 1 调频资源功率响应量

Fig.3 Power response quantity of Case 1

通过以上分析可知, 在小扰动场景下, 基于 NFSAM 的极值频率偏差快速计算方法可充分考虑死区对频率响应的影响, 进行快速、准确的极值频率偏差评估。

4.1.2 大扰动场景 NFSAM 精确度验证

算例 1 场景中, 各调频资源并未达到功率输出限幅。在此, 考虑算例 2 所示大故障场景, 部分调频资源(如具备快速调频特性的直流 FLC、新能源虚拟惯量与下垂控制、部分调频容量有限的同步机组)将会在极值频率偏差之前达到调频功率输出极限。此时, 由于故障水平较高, 频率变化速率较快, 在极短时间内频率偏差越过频率死区, 故而频率死区对极值频率偏差影响较小。

算例 2 在经 PSD-BPA 仿真后, WF、PV、DC 和 G7 功率响应相继到达限幅, 如图 D3 所示。为验证大扰动场景下功率输出限幅对极值频率偏差计算精度的影响, 将所提方法与 FNP 法和 PSD-BPA 仿真结果进行对比, 结果如表 2 所示。

表 2 算例 2 对比结果

Table 2 Comparison results of case 2

方法	极值频率偏差/Hz	极值频率时间/s	计算时间/s
PSD-BPA	-0.57	1.68	3.07
NFSAM	-0.58	1.70	0.61
仅考虑限幅环节	-0.50	1.64	0.63
仅考虑频率死区环节	-0.39	1.28	0.61
FNP	-0.36	1.18	0.63

基于 NFSAM 的极值频率偏差评估方法所得结果与 PSD-BPA 相比误差较小(0.01 Hz), 且极值频率时间与 PSD-BPA 结果相比十分接近。而 FNP 法、仅考虑限幅环节的方法和仅考虑频率死区环节的方法所得结果与 PSD-BPA 仿真结果相比误差较大, 分别为 0.21 Hz、0.07 Hz 和 0.18 Hz, 且极值频率时间与 PSD-BPA 相比有所提前。这是由于这 3 类对比方法未考虑非线性环节的影响, 在计算过程中出现了调频资源过早响应或应停止响应而未停止的现象, 使得极值频率偏差值比实际值更小且对应时间有所提前。此外, 基于 NFSAM 的极值频率偏差计算方法在计算过程中判断部分调频机组达到功率输出限幅, 省略了部分机组对式(9)的计算过程, 保持了较高的计算效率。附录 D 图 D4 示意了各调频资源在极值频率偏差时的功率调整量, 与 PSD-BPA 仿真结果十分接近。

综合以上大小故障场景分析可知, 频率死区和功率限幅这类非线性环节在频率安全快速评估中具有显著影响, 不容忽视。本文所提基于 NFSAM 的极值频率偏差快速计算方法可以综合考虑频率响应过程中死区频率和出力限幅环节的影响, 在小扰动场景和大扰动场景均能对新能源高渗透电网极值频率偏差进行准确地计算。此外, 所提极值频率偏差快速计算方法所耗时间远短于 PSD-BPA 仿真软件, 可大大提升计算效率。

4.2 新能源极限渗透率分析

本节以极值频率偏差为边界条件进行新能源极限渗透率分析, 设置为: 电网发生机组最大 N-1 故障时, 新能源机组不参与频率调节, 且极值频率偏差指标不超过 0.8 Hz 时的新能源渗透率。

应用 3.2 节提出的新能源极限渗透率分析流程对算例 3 进行分析。首先, 计算各机组关停机指标

GSI, 结果如表 3 所示, P_{MA} 、 P_{out} 、 I_{GS} 均为标幺值。¹

表 3 各机组指标计算结果 ²

Table 3 Results of indicators for each unit ³

机组	T_s/s	P_{MA}	P_{out}	I_{GS}
G1	7.52	0.028	0.080	0.048
G2	8.17	0.077	0.086	0.111
G3	11.22	0.040	0.090	0.040
G4	31.50	0.017	0.085	0.006
G5	6.83	0.020	0.080	0.037
G7	5.74	0.010	0.091	0.019
G8	8.23	0.028	0.062	0.055
G9	7.28	0.077	0.086	0.123
G10	3.60	0.069	0.094	0.204

为充分验证本文所提方法分析新能源极限渗透率的有效性和优越性, 本节与传统的根据频率安全指标求解新能源极限渗透率的方法进行对比, 其求解过程^[23]如下。

1) 根据极值频率偏差指标表达式求解同步机组改造比 K , 如式(20)所示。

$$\Delta f_{\max} = -\frac{P_d}{4(1-K)H} t_{\text{nadir}} \quad (20)$$

式中: Δf_{\max} 为频率极值偏差; t_{nadir} 为频率极值点时刻。

2) 求解新能源极限渗透率, 如式(21)所示。

$$\eta = \frac{KP_{\text{out}}}{P_{\text{base}}} \quad (21)$$

根据图 D1 所示新能源极限渗透率计算流程, 先后关停 G4、G7、G5 和 G3 机组, 并将其替换成同等出力水平的新能源机组。此时, 新能源渗透率为 34.6%, 频率响应曲线如图 4 所示。而根据式(20)所示由极值频率偏差表达式计算所得新能源渗透率为 16.2%, 其方法有效性远低于本文所提基于 GSI 指标的新能源极限渗透率分析方法, 原因在于其未充分考虑系统频率响应的动态特性, 以出力系数的减小表征各同步机组出力水平和响应功率的减小存在较大不合理性, 无法全面评估电力系统承载大规模新能源的能力。

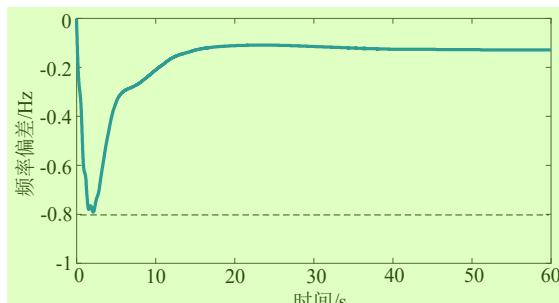


图 4 新能源极限渗透率下频率响应曲线 ¹³

Fig.4 Frequency response curve of ultimate penetration of ¹⁴

renewable sources ¹⁵

进一步, 在新能源极限渗透率计算分析中考虑新能源调频能力, 设置上调容量为额定容量的 6%^[5]。此时, 基于 GSI 指标关停 G4、G7、G5、G3 和 G1, 替换为具备 6% 上调空间的同等出力水平新能源机组, 计算得到新能源极限渗透率为 42.6%。在该算例场景下, 考虑新能源机组的调频作用后, 系统可承载的新能源极限渗透率提升了 8%。¹⁶

此外, 设置频率安全边界为 1 Hz, 其余基础数据保存不变, 分析频率安全约束变化时的新能源极限渗透率: 经所提方法计算, 需关停 G4、G7、G5、G1、G3、G2 和 G9 机组, 并将其替换成同等出力水平的新能源机组, 此时, 新能源极限渗透率达到 57.4%。可见, 若放宽电网频率偏差约束, 新能源极限渗透率将显著提升。¹⁷

需要指出的是, 当考虑新能源深度参与调频时, 风/光机组调频特性的差异将显著影响承载能力评估结果, 而本节简化分析未精细化区分风/光动态响应差异, 评估结果偏向保守, 但仍可有效验证调频功能的积极作用。¹⁸

4.3 实际电网应用分析 ¹⁹

为验证所提方法在实际电网中的有效性, 本节²⁰基于某省级电网 2024 年枯季腰方式 PSD-BPA 数据开展应用测试。该电网与南网主网通过多回直流异步互联, 且包含火电、水电、风电、光伏等多元异质资源, 截至 2023 年底, 水电装机达 82 020 MW, 新能源装机占比约 34 890 MW。在 2024 年枯腰方式下, 直流外送功率为 10 000 MW, 新能源出力占比约 28.5%, 共有 953 台机组或新能源场站开机运行(15 台火电、474 台水电和 464 座新能源场站), 且有六条直流具备 FLC 控制。由于位于同一母线下的机组型号、调频特性和开机方式往往相同, 可将这些机组聚合为一台机组进行处理, 减少运算量, 处理后场站/机组为 917 台。

目前, 同步机组和新能源/储能场站并网前一般均需做并网测试, 在该过程中可以基于小扰动实验辨识得到各类机组/场站的参数。此外, 亦可基于实际运行中各类机组/场站有功-频率响应实测数据, 动态辨识得到, 滚动更新各类资源的频率响应模型参数。通过读取并网测试数据或实测数据辨识得到多元异质资源模型参数, 以构建 MS-SFR 模型。故障功率可基于广域量测系统、同步相量测量装置等方法实时采集故障前后的功率差值获得。然后引入非线性环节处理方法构建 NFSAM, 通过 NRI 法求解得到频率极值偏差及其对应时间。将以上过程封

装为独立进程，输入数据格式与 PSD-BPA 兼容，¹
支撑跨平台调用。

设置如下 3 种不同类型和大小的预想故障。²

故障 I：零时刻发生负荷总量 4% 的低频故障。³

故障 II：零时刻某条传输功率为 2 000 MW 的
外送直流发生单极闭锁故障。⁴

故障 III：零时刻某条传输功率为 2 000 MW 的
外送直流发生双极闭锁故障。⁵

本文方法和 PSD-BPA 仿真所得指标结果对比⁶
如表 4 所示。

表 4 某省级电网算例结果对比⁷

Table 4 Results comparison of a provincial power grid⁸

故障类型	方法	Δf_{\max} /Hz	t_n /s	计算时间/s
故障 I	PSD-BPA	-0.18	3.20	58.00
	NFSAM	-0.21	3.10	0.60
故障 II	PSD-BPA	0.45	6.86	90.00
	NFSAM	0.49	7.01	0.73
故障 III	PSD-BPA	0.94	9.20	100.00
	NFSAM	1.00	8.91	0.73

在 3 种不同类型和大小的故障场景中，极值频率偏差误差为 0.06 Hz，极值频率偏差时间误差为 0.29 s，所提方法计算时间在 0.7 s 左右。表明本文方法可以较为精确且快速地计算故障后极值频率偏差，验证了在实际电网应用的有效性。¹⁰

将边界条件设置为某直流单极闭锁(最大 N-1 故障)时，改变极值频率偏差指标约束，可得该电网新能源极限渗透率与频率安全边界的关系如附录 D 图 D5 所示。其中，频率安全边界为 0.5 Hz、0.8 Hz 和 1.0 Hz 对应的新能源极限渗透率分别为 42.52%、58.22% 和 61.95%，可见，频率安全边界对于新能源极限接纳能力具有重要影响。¹¹

相较于 PSD-BPA 等成熟的电力系统仿真软件，基于 GSI 指标的新能源极限渗透率分析方法省去了繁杂的机组建模和运行方式调整过程，可为电网分析人员大大减轻计算压力。¹²

5 结论¹³

本文提出了一种考虑非线性环节的 双高电力系统频率安全快速评估方法，并拓展应用于新能源极限渗透率分析。结合本文理论与算例分析，主要结论如下。

1) 所构建的 NFSAM 与现有频率响应模型相比，在降低频率响应模型阶数的同时还计及频率死区环节和功率输出限幅这类非线性环节的影响，模型更为合理、准确。¹⁴

2) 所提基于 NFSAM 的极值频率偏差快速评
估方法与现有方法相比，充分考虑了非线性环节对
系统频率响应过程的影响，适用于海量运行方式和
预想故障下极值频率偏差指标的快速评估。¹⁵

估方法与现有方法相比，充分考虑了非线性环节对
系统频率响应过程的影响，适用于海量运行方式和
预想故障下极值频率偏差指标的快速评估。¹⁶

3) 相比已有的新能源极限渗透率估算方法，¹⁷
所提基于同步机组关停指标的新能源极限渗透率
分析方法考虑了新能源规划过程中同步机组的调
频特性和出力水平，有利于精确评判系统可承载的
新能源极限规模。

参考文献:¹⁸

- [1] 李卫东, 丁奇力. 大扰动下电力系统惯性时空分布特性的表征形式初探[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4601-4615.
- [2] 张武其, 文云峰, 迟方德, 等. 电力系统惯量评估研究框架与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20):6842-6856.
- [3] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1):1-25.
- [4] 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.
- [5] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [6] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第 1 部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021
- [7] 张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11):3498-3507.
- [8] 张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3498-3507.
- [9] GONG Haoyue, ZHOU Qinyong, GUO Qiang, et al. Improvement and application of frequency analysis modules for power system in high proportion of renewable energy situation[J]. Power System Technology, 2021, 45(12):4603-4612.
- [10] PENG Z F, PENG Q, ZHANG Y M, et al. Online inertia allocation for grid-connected renewable energy systems based on generic ASF model

- under frequency nadir constraint[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1615-1627.
- [10]高晖胜, 辛焕海, 黄林彬, 等. 新能源电力系统的共模频率分析及其特征量化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3):890-900.
- GAO Huisheng, XIN Huanhai, HUANG Linbin, et al. Characteristic analysis and quantification of common mode frequency in power systems with high penetration of renewable resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 890-900.
- [11]赵强, 张玉琼, 陈紫薇, 等. 计及储能的低惯量电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3):904-914.
- ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong, CHEN Ziwei, et al. Frequency characteristic analysis of low-inertia power system considering energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 904-914.
- [12] LIU L, LI W D, BA Y, et al. An analytical model for frequency nadir prediction following a major disturbance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2527-2536.
- [13] ZHANG Y Q, GUO Q L, ZHOU Y Z, et al. Online frequency security assessment based on analytical model considering limiting modules[J], CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(5): 1363-1372.
- [14] SHI Q M, WANG G, MA W M, et al. Coordinated virtual inertia control strategy for D-PMSG considering frequency regulation ability[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2016, 11(6): 1556-1570.
- [15]张祥宇, 朱永健, 付媛. 基于系统惯量需求的风储协同快速频率响应技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14):5415-5429.
- ZHANG Xiangyu, ZHU Yongjian, FU Yuan. Wind-storage cooperative fast frequency response technology based on system inertia demand[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14):5415-5429.
- [16]谢宇峰, 李常刚, 张恒旭, 等. 火电厂给水系统功频约束对电力系统频率特性的影响[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7):132-139.
- XIE Yuzheng, LI Changgang, ZHANG Hengxu, et al. Impact of power-frequency constraint of feedwater system in thermal power plant on frequency characteristics of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 132-139.
- [17] KUNDUR P. Power System Stability and Control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994: 83-89.
- [18] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [19]卜广全, 印永华. PSD-BPA 稳定程序使用手册[M]. 3. 07 版. 北京: 中国电力科学研究院, 2005: 130-132.
- [20]杨伟峰, 文云峰, 张武其, 等. 基于风-储联合的双层频率响应控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12):184-193.
- YANG Weifeng, WEN Yunfeng, ZHANG Wuqi, et al. Bi-level frequency response control strategy based on wind power and energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 184-193.
- [21]石鹏,王永灿,王曦,等.考虑光伏调频作用的电力系统频率动态特性分析[J].电力自动化设备,2025,45(5):110-117, 184.
- SHI Peng, WANG Yongcan, WANG Xi, et al. Frequency dynamic characteristic analysis of power system considering frequency regulation effect of photovoltaic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(5): 110-117, 184.
- [22]班潇璇,李少林,李庆,等.基于秒级风速预测的风电频率主动支撑能力动态评估[J].电力自动化设备, 2025, 45(7): 54-60, 70.
- BAN Xiaoxuan, LI Shaolin, LI Qing, et al. Dynamic evaluation of wind power active frequency support capability based on second-level wind speed prediction [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(7): 54-60, 70.
- [23] EGIDO I, FERNANDEZ-BERNAL F, CENTENO P, et al. Maximum frequency deviation calculation in small isolated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(4): 1731-1738.
- [24]张英敏, 彭泽峰, 彭乔, 等. 预测新能源接入电网受扰后频率最低点的通用 ASF 模型[J]. 电网技术, 2023, 47(5):1788-1799.
- ZHANG Yingmin, PENG Zefeng, PENG Qiao, et al. Generic ASF model of new-energy-integrated power grid for frequency nadir estimation under disturbance[J]. Power System Technology, 2023 , 47(5):1788-1799.
- [25] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. 电力系统自动低频减负荷技术规定: GB/T 40596-2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

作者简介: 3

郭威(1999—), 男, 硕士, 主要研究方向为低惯量电力系统频率安全分析 (E-mail: gw0717@hnu.edu.cn);

郑文伟 (2000—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为低惯量电力系统频率安全分析与控制 (E-mail: zhengww@hnu.edu.cn);

文云峰(1986—), 男, 教授, 博士生研究生导师, 通信作者, 主要研究方向为低惯量电力系统规划、运行与控制 (E-mail: yunfeng.8681@163.com)。

Fast frequency security calculation method for double-high power system¹ considering nonlinear elements

GUO Wei¹, ZHENG Wenwei¹, WEN Yunfeng¹, YOU Guangzeng², LI Hongxin³, HE Ye²²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Planning and Construction Research Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650011, China; 3. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Existing frequency security analysis methods have not considered the impact of numerous nonlinear elements introduced by the integration of diversified and heterogeneous resources, and their evaluation accuracy and efficiency still need to be improved. To address this issue, a fast frequency security calculation method for double-high power system considering nonlinear elements is proposed. A system frequency response model applied to diversified and heterogeneous resources is established with a particular focus on modifying nonlinear elements such as frequency deadbands and output power limits, and the frequency security analysis model considering the nonlinear components is constructed. Based on this, a fast calculation method based on Newton-Raphson iteration method for the maximum frequency deviation after disturbances is proposed, an analysis method for the ultimate penetration rate of renewable energy is developed by incorporating the shutdown indicators of synchronous units and frequency safety constraints. Taken the modified IEEE-39 bus system and a specific practical power grid as examples, the system frequency safety under anticipated faults is assessed, and the ultimate capacity limits of renewable energy is analyzed. The effectiveness of the proposed model and methodology is validated.

Key words: frequency security; diversified and heterogeneous resources; nonlinear elements; extreme frequency deviation; ultimate renewable energy penetration

附录 A⁶

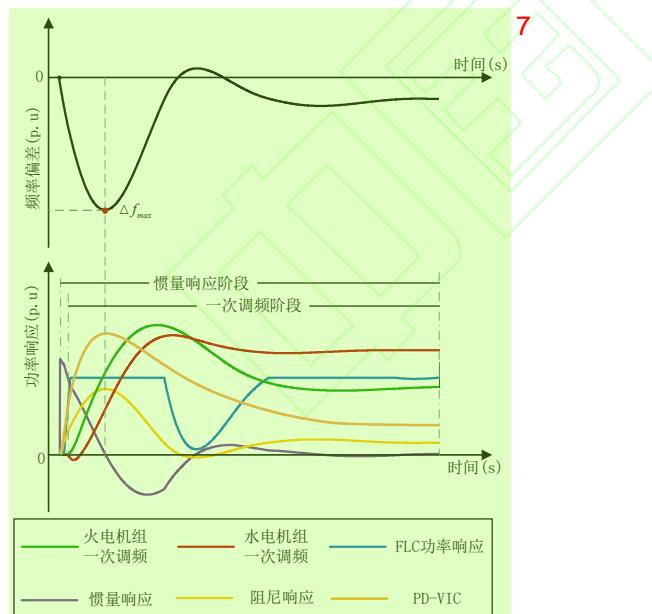


图 A1 不同调频资源在频率响应过程中的特性比较⁸
Fig.A1 Different types comparison of frequency character-⁹
istics

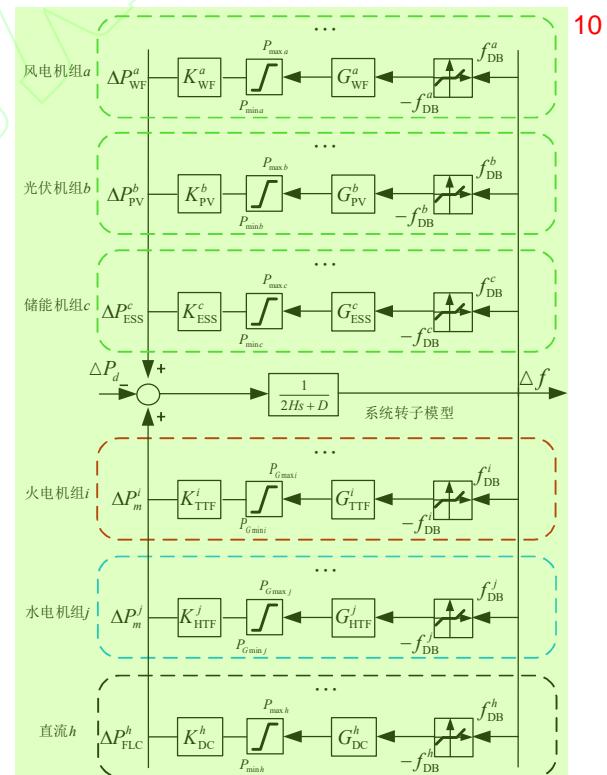


图 A2 MS-SFR 模型¹¹

Fig.A2 Model of multi-sources system frequency re-¹²
sponse

图 A2 中: G_{WF} 、 G_{PV} 、 G_{ESS} 、 G_{TTF} 、 G_{HTF} ¹³

和 G_{DC} 分别表示风电机组功率响应传递函数、光伏机组功率响应传递函数、储能功率响应传递函数、火电机组一次调频传递函数、水电机组一次调频传递函数和直流 FLC 有功响应传递函数，可以根据各调频资源详细数学模型分别进行建模； K_X 为频率响应资源 X 的出力系数^[7]； P_X 为频率响应资源 X 的出力； P_{load} 为系统负荷，系统基准容量为负荷大小。

为充分模拟各资源在功率响应过程中克服频率死区和达到功率限幅的行为，在该模型中引入频率死区和功率限幅环节， f_{DB} 为频率死区参数， P_{max} 为功率响应上限值， P_{min} 为功率响应下限值。在系统转子模型中， H 为系统同步惯性常数， D 为系统阻尼系数。

根据本文假设的调速器低阶模型，式(3)中 a_1 、 b_1 皆为正数，根据 b_0 小于 0 表征水电机组初始反调效应，具体证明如下：

假设低频扰动后机组功率响应随时间线性变化，如式(A1)所示。

$$\Delta P_{out}(t) = \frac{\Delta P_d}{t_n} t \quad (A1)$$

式中： $\Delta P_{out}(t)$ 为扰动后机组的功率响应增量； t_n 为频率到达极值频率偏差点时间； ΔP_d 为扰动值，低频故障下 $\Delta P_d > 0$ 。忽略机组阻尼效应，频率偏差表达式可近似表示为式(A2)所示：

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta P_d}{2H} \left(-\frac{t^2}{2t_n} + t \right) \quad (A2)$$

则故障后机组功率响应表达式如式(A3)所示：

$$\begin{cases} \Delta P_{out}(t) = \frac{\Delta P_d}{2Ht_n} \left(\frac{A}{2} t^2 + Bt + C + De^{-a_1 t} \right) \\ A = -\frac{b_1}{a_1} \\ B = \frac{b_1 t_n - b_0 - A}{a_1} \\ C = \frac{b_0 t_n - B}{a_1} \\ D = -C \end{cases} \quad (A3)$$

由式(A3)可得其导数为：

$$\Delta P_{out}'(t) = \frac{\Delta P_d}{2Ht_n} (At + B - a_1 De^{-a_1 t}) \quad (A4)$$

水电机组初始反调即低频故障后输出功率降低，即零时刻 $\Delta P_{out}'(0)$ 小于 0，即

$$\begin{aligned} \Delta P_{out}'(0) &= \frac{\Delta P_d}{2Ht_n} (B - a_1 D) = \\ &\frac{\Delta P_d}{2Ht_n} (B + a_1 \frac{b_0 t_n - B}{a_1}) = \\ &\frac{\Delta P_d}{2H} b_0 < 0 \end{aligned} \quad (A5) \quad 13$$

由(A5)解得 $b_0 < 0$ ，由此证得本文假设的调速器低阶等值模型中 $b_0 < 0$ 表征水电机组初始反调效应。
14

附录 B 15

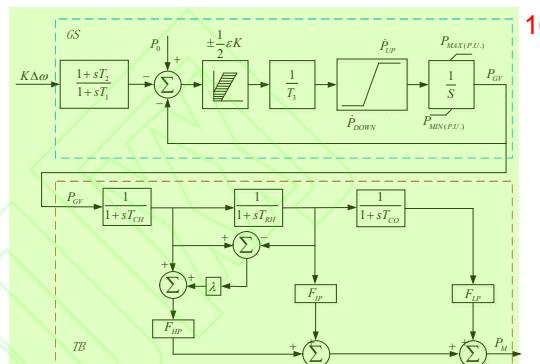


图 B1 GS-TB 型调速器-原动机拓扑 17

Fig. B1 GS-TB type governor-prime mover topology 18

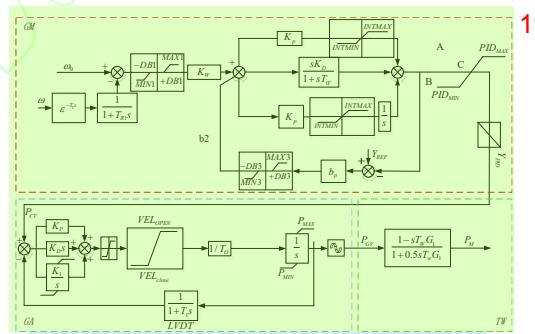


图 B2 GM-GA-TW 型调速器-原动机拓扑 20

Fig. B2 GM-GA-TW type governor prime mover topology 21

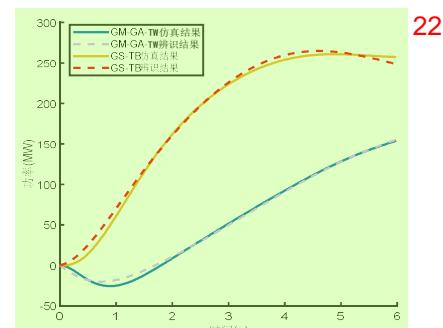


图 B3 水电和火电机组调速器仿真结果与辨识结果对比 23

Fig. B3 Comparison of simulation results and identification results for hydro and thermal power plant governors 24

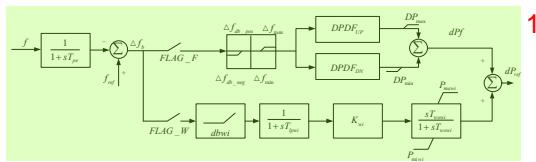


图 B4 虚拟惯量和下垂控制拓扑 2

Fig. B4 Virtual inertia and droop control topology 3

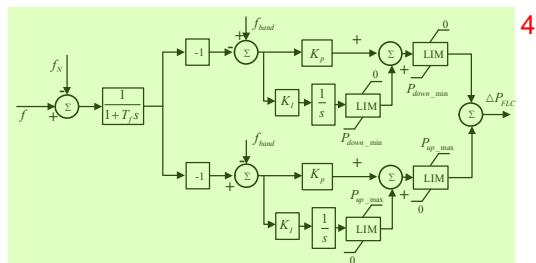


图 B5 FLC 控制拓扑 5

Fig. B5 FLC Control Topology 6

附录 C 7

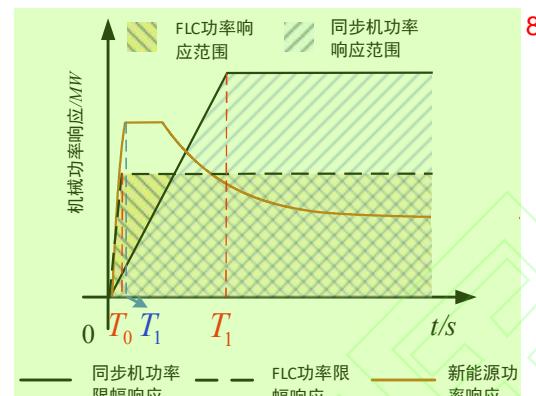


图 C1 功率限幅响应曲线 9

Fig.C1 Power limiting response curve 10

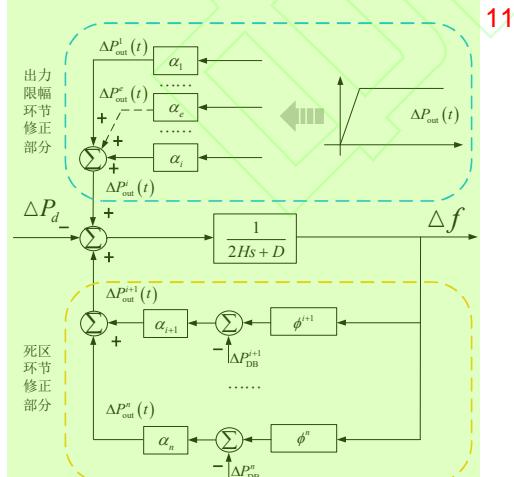


图 C2 考虑非线性环节的频率安全分析模型 12

Fig.C2 Nonlinear frequency security analysis model 13

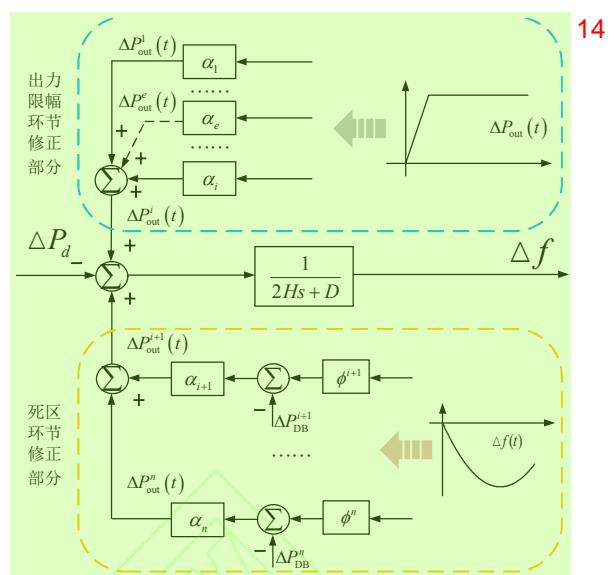


图 C3 考虑非线性环节的频率安全分析开环模型 15

Fig.C3 Open-loop nonlinear frequency security analysis model 16

17

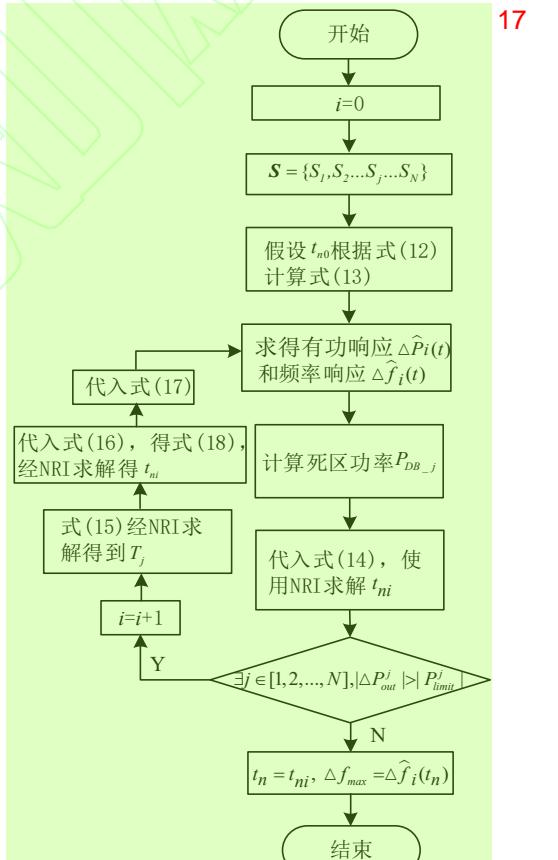


图 C4 基于 NFSAM 的系统极值频率偏差评估流程 18

Fig.C4 Maximum frequency deviation evaluation process based on the NFSAM 19

附录 D 20

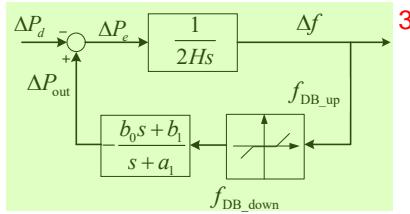
机组频率响应固有时间 T_s 推导如下：21

假设一个单机系统如下单机系统 SFR 模型图 22 所示，忽略机组阻尼效应，并以频率跌落故障为

所示，忽略机组阻尼效应，并以频率跌落故障为

例推导 T_s ，且故障后机组功率响应 $\Delta P_{\text{out}}(t)$ 小于功率限幅值。与本文 2.3 节同理，假设扰动后机组功率响应随时间线性变化，如式(D1)所示：

$$\Delta P_{\text{out}}(t) = \frac{\Delta P_d}{t_n} t \quad (D1)$$



单机系统 SFR 模型

式中： $\Delta P_{\text{out}}(t)$ 为扰动后机组的功率响应增量； t_n 为频率到达极值频率偏差点时间； ΔP_d 为扰动值。

频率偏差表达式可近似表示为式(D2)所示：

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta P_d}{2H} \left(-\frac{t^2}{2t_n} + t \right) \quad (D2)$$

根据 2.1 节中对于频率死区环节修正处理可得极值频率偏差点处功率平衡时域表达式如式(D3)所示：

$$\begin{cases} \Delta P_d = \frac{\Delta P_d}{2Ht_n} \left(\frac{A}{2} t^2 + Bt + C + D e^{-a_1 t} \right) - \\ f_{\text{DB_down}} (a_1 b_0 - b_1) e^{-a_1 t} \\ A = -\frac{b_1}{a_1} \\ B = \frac{b_1 t_n - b_0 - A}{a_1} \\ C = \frac{b_0 t_n - B}{a_1} \\ D = -C \end{cases} \quad (D3)$$

式中： a_1 、 b_0 和 b_1 为调速器低阶等值模型参数； $f_{\text{DB_down}}$ 为极值频率偏差。

式(D3)为高阶非线性方程，一般使用 NRI 法进行迭代求解。式(D3)两边同时除以 ΔP_d 得：

$$g(t) = \frac{1}{2Ht_n} \left(\frac{A}{2} t^2 + Bt + C + D e^{-a_1 t} \right) - \quad (D4)$$

$$\frac{f_{\text{DB_down}}}{\Delta P_d} (a_1 b_0 - b_1) e^{-a_1 t} - 1 \quad (13)$$

本文所定义机组频率响应固有时间 T_s 表征机组完全释放调频功率所用时间，此时有功扰动较大，且 $e^{-a_1 t}$ 项较为接近 0，因此 $\frac{f_{\text{DB_down}}}{\Delta P_d} (a_1 b_0 - b_1) e^{-a_1 t}$ 项可近似忽略，则可得：

$$g(t) \approx \frac{1}{2Ht_n} \left(\frac{A}{2} t^2 + Bt + C + D e^{-a_1 t} \right) - 1 \quad (D5)$$

NRI 迭代表达式为：

$$t_n(k+1) = t_n(k) - \frac{g(t_n(k))}{g'(t_n(k))} \quad (D6)$$

将式(D5)代入式(D6)并进行迭代求解可求得极值频率偏差点对应时间 t_n ，即本文所定义机组频率响应固有时间 T_s 。由以上分析可知， T_s 与功率扰动大小无关，仅表示故障后机组释放调频功率至极值频率偏差点时有功平衡的时间，反映机组进行频率调节的速度。

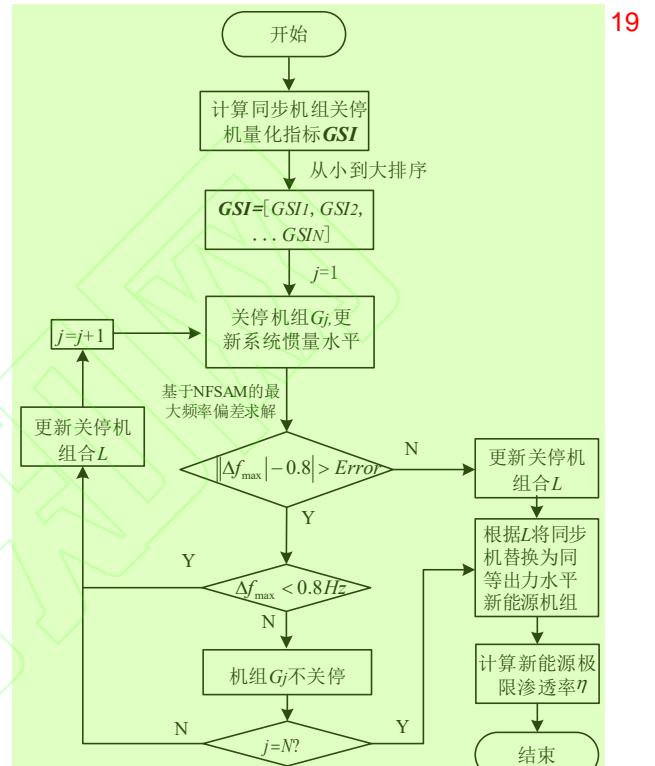


图 D1 基于关停机指标的新能源极限渗透率分析流程

Fig.D1 Analysis flowchart of renewable energy penetration based on GSI

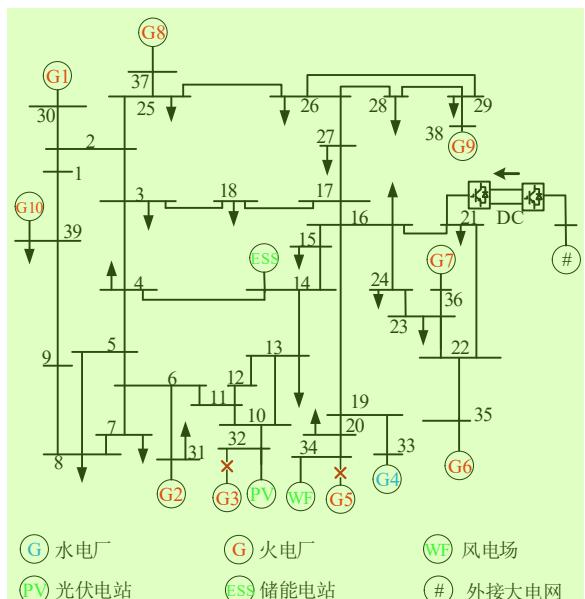


图 D2 改进的 IEEE-39 节点系统

Fig.D2 Topology diagram of the modified IEEE 39-bus system 4

表 D1 多元异质调频资源基础参数 1

Table D1 Basic parameters of frequency regulation resources. 2

编号	资源类型	额定容量 /MW	出力水平 /MW
G1		667	590
G2		1000	525
G3		750	530
G5		600	508
G6	火电	800	700
G7		620	560
G8		550	378
G9		1000	528
G10		1000	576
G4	水电	630	522
WF	风电	564	508
PV	光伏	588	530
ESS	储能	90	50
DC	直流	1000	900

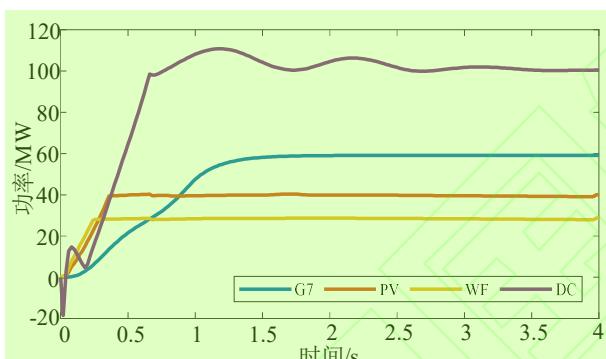


图 D3 部分调频资源功率响应曲线 6

Fig.D3 Partial power response curve 7

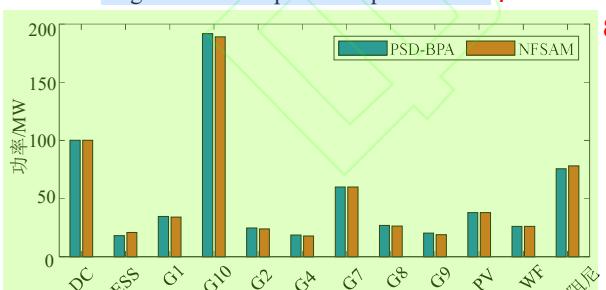


图 D4 G9 切机故障下各指标的准确性 9

Fig.D4 Accuracy of various indicators 11

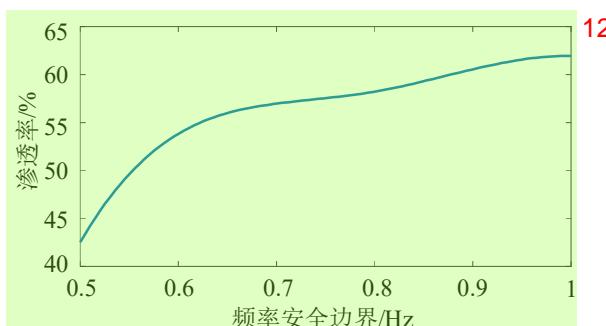


图 D5 新能源极限渗透率曲线 13

Fig.D5 Maximum penetration proportion of new energy 10