

考虑频率安全的电力系统规划与运行优化研究 综述与展望

张程铭¹, 柳璐¹, 程浩忠¹, 陆建忠², 张建平², 励刚²

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240;
2. 国家电网有限公司华东分部, 上海市 浦东新区 200120)

Review and Prospects of Planning and Operation Optimization for Electrical Power Systems Considering Frequency Security

ZHANG Chengming¹, LIU Lu¹, CHENG Haozhong¹, LU Jianzhong², ZHANG Jianping², LI Gang²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Shanghai Jiao Tong University), Ministry of Education, Minhang District, Shanghai 200240, China; 2. East China Branch of SGCC, Pudong New District, Shanghai 200120, China)

ABSTRACT: The gradual inertia decrease of a power system with larger-scale renewable energy weakens its frequency responses and leads to evident frequency accidents. Conducting frequency-constrained planning and operation optimization for the power system is an efficient method to enhance its frequency responses. This paper illustrates the frequency characteristics from the transient periods, frequency indexes, and analytics method. We tackle the theories as well as the applications of different response methods from the following links as sources, networks, demands, and storages. On this basis, the frequency-constrained optimization models for power systems are extracted. The construction of frequency constraints and their transformation methods are concluded. Also, the uncertainty treatments and solution algorithms are compared. Last, we point out the development direction in future frequency-constrained optimization research for power systems.

KEY WORDS: frequency security; frequency response; low-inertia power system; optimization

摘要: 随着可再生能源并网规模的增加, 电力系统惯性下降, 频率响应能力减弱, 频率安全事故凸显。考虑频率安全的电力系统规划与运行优化是提升系统频率响应能力的有效途径。从频率暂态过程、频率安全指标以及频率分析方法阐述电力系统频率安全特性, 从源-网-荷-储不同环节梳理各类型频率响应方式原理及在优化问题中的应用现状。在此基础上, 提炼考虑频率安全的电力系统规划与运行优化模型, 总结频率安全约束构造过程, 归纳线性转化类型, 对比分析不

确定性处理以及模型求解方法。最后, 对考虑频率安全的电力系统规划与运行优化的未来发展方向进行了展望。

关键词: 频率安全; 频率响应; 电力系统; 优化

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0844

0 引言

化石燃料等一次能源的大量开发和使用, 在造福人类的同时, 也造成了环境问题, 可再生能源是未来可持续发展的重大需求^[1]。中国提出力争在2030年前实现碳达峰, 争取2060年前实现碳中和, 并于2020年气候雄心峰会上设立2030年实现风电和光伏总容量超过1200GW的发展目标^[2]。可再生能源机组通过变流器接入电网, 有功调节与频率控制分离。虽然可引入虚拟惯性以及下垂控制等方式提供虚拟频率响应, 但实际调频能力受风速以及光照等不确定因素影响, 相较于同步机组, 风/光机组提供的惯量以及一次调频能力不稳定。未来大量同步机组被替代后, 系统惯性资源总体呈减少趋势, 频率响应能力减弱, 有功扰动下的系统频率波动增大, 给电力系统频率安全带来挑战。

与此同时, 特高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电技术发展迅速, 以华东电网为代表的我国东部地区多直流馈入受端电网特性日益突出, 导致受端电网直流群内、交直流间交互影响, 局部扰动导致全局故障的概率增加, 扰动下的动态响应更加复杂。虽然HVDC可实现送受端电网异步互联, 但是当其采用定功率控制运行时, 惯量不能共享, 也无法响应频率动态变化, 导致受端电网等效惯量和调频备用降低, 且潜在的有功功率缺

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900100); 国家自然科学基金青年基金项目(51807116)。

Project Supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900100); National Natural Science Foundation of China (51807116).

额扰动量也相应增加。

系统不平衡功率将直接影响系统频率，当功率过剩时频率上升，超过保护频率时易引起机组超频而自动切机。功率缺额会造成系统频率跌落，当频率过低时易发生低频减载动作，造成停电事故。在大规模可再生能源并网以及 HVDC 接入时，传统火电机组并网数量呈逐步下降趋势，电力系统可提供惯量响应的机组大幅减少，导致系统惯性水平逐渐降低，系统频率响应特性恶化，直接削弱了系统抵御功率差额的能力，使得不平衡功率情况下的系统频率波动进一步增大。

目前，频率安全研究大多集中于惯性以及各次调频控制。除常规同步机组调频外，充分挖掘源-网-荷-储不同环节的频率响应能力是研究热点。可再生能源机组通过添加频率控制环节，实现类似同步机组的惯性响应与一次调频能力^[3-4]。直流控制系统通过有功快速调节可获得一次调频能力^[5-6]。储能系统和灵活负荷分别通过快速充放电和需求侧管理技术实现快速频率响应^[7-8]。基于各类频率响应方式，考虑频率安全的电力系统优化研究集中于经济调度^[9-10]、机组组合^[11-12]等运行方面，通过改变机组开机方式以及优化调频备用应对频率安全事故，少部分研究涉及储能配置^[13-14]等规划问题。由于系统调频能力受限于电源结构、调频机组容量等因素，仍缺乏考虑频率安全的电源规划研究。此外，输电线路无转动惯量，但输电容量及网络拓扑结构限制电源开机方式，间接影响系统调频能力。因此，研究电力系统规划方法是提升系统频率响应能力的可行路径之一。

本文首先介绍了惯性响应、一至三次调频响应的暂态过程，总结了频率变化最大速率、频率跌落极值以及稳态频率等衡量指标，归纳了基于全状态仿真、等值模型计算和人工智能算法的频率分析方法。其次，针对电力系统不同环节，梳理了常规机组、可再生能源机组、直流系统、负荷以及储能系统的频率响应方式，分析了频率响应原理及应用情况。在此基础上，聚焦考虑频率安全的电力系统优化方法，总结频率安全约束构造过程，提炼规划与运行优化基本模型，分析不确定性因素和模型求解方法。最后，对考虑频率安全的电力系统优化方法未来可能的发展方向进行了展望。

1 电力系统频率安全特性分析

1.1 频率全阶段及指标分析

根据我国《电力系统安全稳定导则》规定，频

率稳定是指电力系统受到小扰动或大扰动后，系统频率能够保持或恢复到允许的范围内，不发生频率振荡或崩溃的能力，主要判据为频率不长期悬浮于某一过高或过低数值^[15]。

全阶段频率暂态过程可反映电力系统频率安全特性，按时间可分为惯性及一至三次调频响应，各阶段存在重叠且与响应触发、持续时间相关。惯性与一次调频均可在秒级时间依靠自控装置触发。二至三次调频反馈时间长，可在自动发电控制(auto generation control, AGC)或人工调度下消除频率控制偏差，实现系统频率恢复。以 t_0 时刻产生功率缺额为例，典型频率变化过程如图 1 所示。虽然在此将频率响应过程划分为 4 个阶段，但是各阶段之间存在时间上的重合，频率动态变化是惯量与各次调频响应共同作用的效果。图 1 中： f_{err} 表示一次调频稳态值； f_{nadir} 表示频率跌落最低值；ROCOF(rate-of-change-of-frequency)表示频率变化最大速率。在仅考虑同步发电机组调频的情况下，可由等值发电机组转子运动方程简化得到系统动态频率响应式(1)，表征由惯性响应功率、一次调频功率、负荷阻尼功率以及有功不平衡量影响下的频率动态轨迹。其中， $\Delta P_L = P_{m0} - P_{e0}$ 即不平衡功率大小，受该时刻机械功率 P_{m0} 与电磁功率 P_{e0} 影响。

$$\underbrace{\frac{M_{sys}}{f_0} \frac{d\Delta f(t)}{dt}}_{\text{惯性响应}} + \underbrace{\Delta P_G(t)}_{\text{一次调频响应}} + \underbrace{D\Delta f(t)}_{\text{负荷阻尼响应}} = \underbrace{P_{m0} - P_{e0}}_{\text{不平衡功率}} \quad (1)$$

式中： M_{sys} 为系统总惯量水平； f_0 、 $\Delta f(t)$ 分别为系统标称频率和频率波动量； D 为负荷频率响应系数； $\Delta P_G(t)$ 为系统一次频率响应功率。

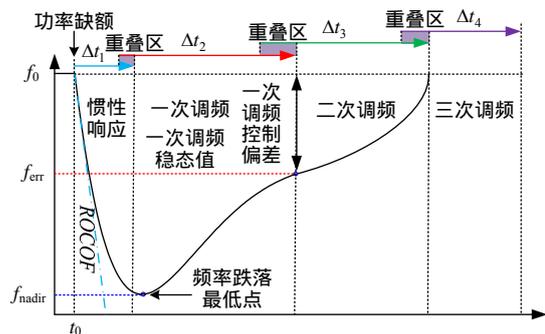


图 1 频率暂态过程

Fig. 1 Transient process of frequency

阶段：惯性响应可瞬时释放机组旋转动能，短时(约 0~5s)提供惯量支撑。当功率缺额发生瞬间，系统频率仍处于调频死区内，调速器未动作，此时机械功率 P_{m0} 无变化，电磁功率 P_{e0} 响应波动产生不平衡功率，该瞬间 $\Delta f(t_0^+) = 0$ ，可用 ROCOF 表征惯性响应强弱，如式(2)所示，该指标过大将影响机

组寿命并触发切机保护。当系统不平衡功率 ΔP_L 固定时,该指标仅受 M_{sys} 影响。由式(3)可知,除提升机组转动惯量及额定容量外,合理安排机组开停机以增加总惯量水平是减小ROCOF的有效途径。除同步机组转动惯量外,基于变流器惯性控制的虚拟惯量广泛应用于减小ROCOF。

$$I_{ROCOF} = \frac{d\Delta f(t)}{dt} = \frac{\Delta P_L f_0}{M_{sys}} \quad (2)$$

$$M_{sys} = 2 \sum_{i=1}^{N_s} H_i S_i u_i \quad (3)$$

式中: I_{ROCOF} 表示ROCOF指标值; H_i 为同步机组 i 的惯性时间常数; S_i 为机组 i 的额定容量; u_i 表示机组 i 的开停机状态; N_s 为同步机组数量。

阶段 :一次调频动作,调速器增加机械功率,从而减小功率偏差和抑制频率跌落。当机械功率与电磁功率瞬时相等,在 t_{nadir} 时刻出现频率跌落最低值 f_{nadire} 。一次调频为有差调节,频率提升终止于稳态值 f_{err} ,该阶段持续时间 Δt_2 约为 $5\sim 25s$ ^[16]。 f_{nadir} 为判定频率稳定关键指标,除频率仿真外,可将其数值化计算方法归纳为3种类型,优缺点及应用总结如表1。其中,爬坡模型假设响应功率按固定速率随时间逐步增长^[17];动态响应模型是借助系统频率响应(system frequency response, SFR)模型求取 f_{nadir} ,建立了频率与频率参数的耦合关系^[18];响应时间模型依据原则:一次调频响应越慢,频率最低点可能越低,因此要求设备快速做出响应,从而在最大频率时间到达之前停止频率跌落^[19]。各方法典型表达式可见附录A。

表1 频率最低值数值化计算方法
Table 1 Calculation methods of frequency nadir

方式	优点	缺点	应用
爬坡模型	固定频率响应速率;可嵌入死区频率等参数;计算效率高	无法体现控制环节非线性特性;精度低	机组组合、经济调度、调频备用配置
动态响应模型	保留频率响应元件非线性特征;精度高	计算效率低,通常采用线性化方法近似	机组组合
响应时间模型	可考虑频率最低值时刻并估算机组最大调频功率	忽略负荷阻尼响应;经济调度、机组无法考虑控制环节非线性特征	组合、调频备用配置

爬坡模型和响应时间模型均基于系统动态频率响应式(1),而动态响应模型则基于SFR模型,一次调频稳态值 f_{err} 的表达式分别如下。各参数含义已在附录A中给出。

$$f_{err} = \begin{cases} \frac{\Delta P_L - \Delta P_{G,max}}{D'} & (\text{爬坡及响应时间模型}) \\ \frac{R\Delta P_L}{DR+1} & (\text{动态响应模型}) \end{cases} \quad (4)$$

阶段 :二次调频阶段将启动AGC调节原动机出力改变输出功率,慢速消除区域频率控制偏差(area control error, ACE),其值一般设定为 $f_0 - f_{err}$,目的是恢复至额定频率下的功率平衡,持续时间 Δt_3 约为 $30s\sim 15min$ 。之后三次调频通过机组重新调度应对下一次频率安全事故, Δt_4 持续 $30min$ 以上。

1.2 频率分析方法

分析频率暂态过程是判断频率稳定的前提,为考虑频率安全的电力系统优化问题奠定基础。目前频率分析主要基于全状态仿真、等值模型计算以及人工智能技术3种方法。

1.2.1 全状态仿真法

频率相对电压、电流变化缓慢,可忽略扰动引起的电磁暂态过程,仅利用机电暂态程序计算^[20]。全状态时域仿真可实现对电力网络、发电机、负荷以及调速系统等动态设备的详细建模,并利用成熟算法求出全状态数值解。目前,机电暂态仿真工具均基于全状态模型,包括PSD电力系统分析软件包、PSASP电力系统分析综合程序、PSS/E、EUROSTAG、MATPOWER、POWER WORLD等。频率时空分布特性体现在大扰动发生后有功不平衡量在电网机组中的动态分配过程,表现为依据电气距离产生同一时刻不同位置的不同频率值^[21]。同时,通过联合仿真可考虑与电压稳定、功角稳定以及小干扰稳定等多类安全的综合影响。但是,电网规模扩大和仿真时段延长(几十秒至数分钟),导致该方法计算规模庞大,在预想事故分析以及在线应用中受到极大限制^[22]。

1.2.2 等值模型计算法

为快速计算系统频率,采用等值方法合理近似全状态模型已成为研究趋势。该方法设定统一的机组频率变化趋势,并采用单机或多机带集中负荷模型刻画频率响应曲线以降低模型阶数。平均系统频率(average system frequency, ASF)模型^[23]和系统频率响应(system frequency response, SFR)模型^[24]是两种主要方法。

ASF模型将全网所有发电机转子运动方程等值聚合为单机模型,但保留了各机组原动机-调速系统的独立响应^[23],具有高阶非线性特点。该模型仅提供平均频率,无法反映不同区域的频率动态差异^[20],其功-频关系仍可用式(1)表示。对ASF模型进一步简化,将原动机-调速系统等值为一次调频响应环节后,可得到SFR模型。图2(a)给出了基于火电机组的全阶SFR模型,包含惯性、负荷阻尼以及一次调频响应环节。图2(a)中: K 为增益系数;

T_C 为原动机时间常数； T_G 为调速器时间常数； T_R 为再热器时间常数； R 为机组调差系数； F 为高压缸做功比例系数； ΔP_G 为频率响应功率。由于 T_C 和 T_G 远小于 T_R ^[25]，仅保留再热器可得到低阶 SFR 模型^[24]。与全阶 SFR 模型相比，该低阶模型属于线性控制系统，可得到频率关于时间的解析表达式，具备快速频率估计能力，被广泛应用于考虑频率安全的电力系统优化问题中。

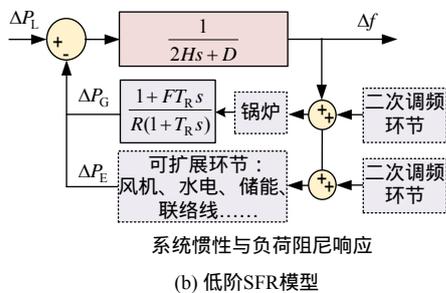
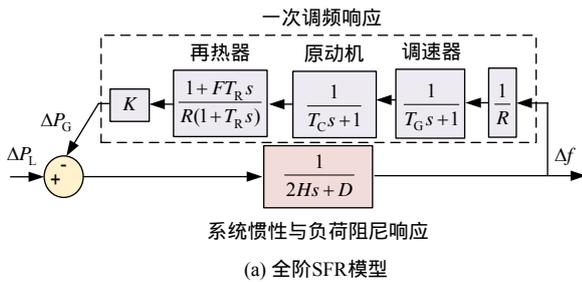


图 2 传统 SFR 频率响应模型
Fig. 2 Traditional SFR model

基于传统 SFR 模型，近年来学者进一步建立了考虑锅炉、可调速风机、水电调频系统、电池储能系统以及多区域互联系统的扩展 SFR 模型(示意如图 2(b))，为电力系统的综合频率评估与优化奠定了基础。锅炉 SFR 模型考虑锅炉热状态对一次调频容量的影响^[26]，推导了低阶频率响应传递函数。可调速风机 SFR 模型通过内嵌虚拟惯量与下垂控制^[27]模拟同步机组频率响应过程，并精细化研究了关联多风速(低、中、高)运行场景^[28-29]的分类频率响应表达式。水电系统 SFR 模型建立了水轮机、调速器、暂态补偿环节等值模型^[30]，考虑了水锤效应不利影响，并添加水轮机导水叶动作延时^[31]探究水电调频延时效应。电池储能系统 SFR 模型利用下垂控制实现一次调频^[32-33]。多区域 SFR 模型考虑联络线功率变化产生的频率波动，并探究二次调频对消除区域间频率控制偏差的关键作用^[34]。

虽然近年来 SFR 模型以其形式简单、计算迅速以及可扩展性强的优点得以发展和应用，但考虑多类型调频方式的综合 SFR 模型仍有待探究，如何协调安排多类型调频资源，平衡运行经济性与频率安全性是需要关注的重点问题。

1.2.3 基于人工智能的频率分析方法

全状态时域仿真计算缓慢，无法在线分析；简化的等值频率模型存在偏差，无法考虑网络结构影响和体现频率时空分布特性。近年来，基于人工智能技术和数据驱动方法的频率分析效果显著，已成为研究电力系统动态频率响应趋势之一。该方法特点及应用可归纳为图 3。首先通过量测装置或基于多种采样技术获取充足数据并筛选有效信息，然后通过神经网络^[35]、深度学习算法^[36]、人工蜂群算法^[37]、极限学习机^[38]以及多核支持向量机^[38]等方法构造映射关系，最后通过特征提取估计频率参数。该方法广泛应用于频率估计、紧急控制、扰动识别、负荷频率控制以及暂态频率稳定分析等方面^[39]。应用该方法时，样本数据决定逼近效果，精度依赖于仿真模型。

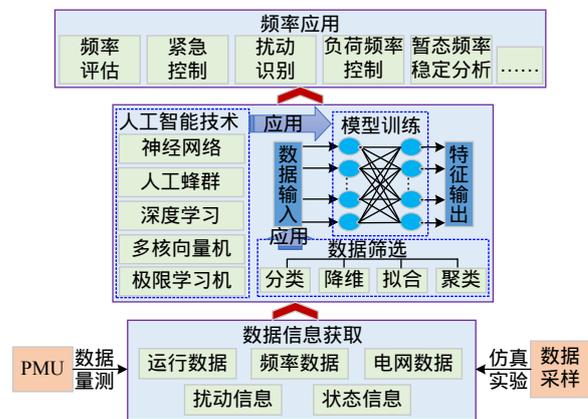


图 3 基于人工智能技术的频率分析方法
Fig. 3 Frequency analysis method based on artificial intelligence technology

2 多类型频率响应方式应用分析

本节对电力系统优化问题中的多类型频率响应方式的特征、实现机理及应用模型进行了系统总结。图 4 对比了不同频率响应的典型控制原理以及相关限制因素。

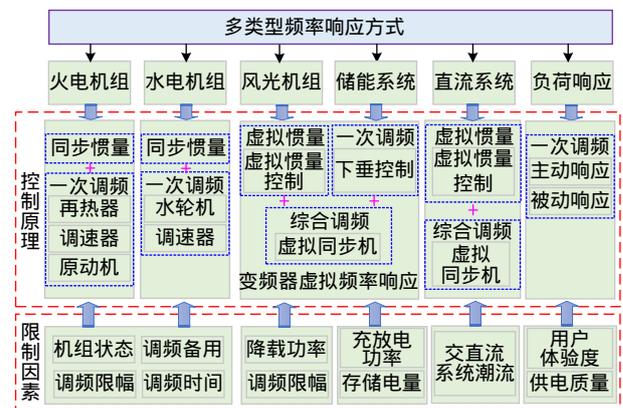


图 4 多类型频率响应方式
Fig. 4 Multi-type frequency response methods

2.1 常规机组频率响应方式

火电机组频率响应以汽轮机为主,除具备惯量支撑能力外,一次调频可由再热器、原动机和调速器协调配合实现,图2已经给出其频率响应示意图。火电机组一次调频能力与机组调差系数有关,调差系数越小表明该台机组的一次调频能力越强,但机组出力受频率变化的影响越大。增益系数 K 越大,频率响应越快,但过大时频率出现衰减振荡。

目前电力系统优化问题中,通过合理安排火电机组开停机发挥其频率响应最大效能,一般建立频率响应功率与机组调频状态、调频参数以及最大调频限制之间的关系式(如式(5)),其中 $f_T(\cdot)$ 表示频率响应函数; u 表示机组调频状态,受机组开停机状态影响; C_F 表示各类频率响应参数, v_F 为频率响应速率; $\Delta P_{G,max}$ 为最大频率响应功率,与正常运行状态下的调频备用容量紧密相关。火电调频优化研究中一般采用低阶 SFR 模型,忽略原动机与调速器影响,相较于全阶模型在判定频率稳定时保守性不足。同时,锅炉作为火电机组重要动态元件,在优化问题中因控制方式复杂而被忽略^[26]。在系统大功率缺额时,锅炉蓄热能力不足导致主蒸汽压力降低,机组一次调频能力下降,事实表明考虑锅炉模型后系统最低频率和稳态频率均较大程度降低^[40]。

$$\Delta P_G = f_T(u, C_F, v_F, \Delta P_{G,max}), C_F = \{F, T_R, R, \dots\} \quad (5)$$

此外,水电机组启动迅速,可快速投入运行且能在秒级时间内完成频率响应。水电机组调频结构如图5所示^[41],主要通过调速系统改变水轮机流量以改变输出功率, ΔP_H 即水电机组频率响应功率。目前,水电机组调频存在全参数和静态两种基本模型。其中,全参数模型通过在稳定工作点泰勒级数展开,保留了水力传递系数,但该系数需通过非线性手段求取,无法进行快速频率响应分析^[41]。静态模型假设水轮机运行于理想工作点且忽略水流波动效应和机械功率损耗,与实际工况存在偏差。为改善模型缺点,文献[42]基于水轮机广义基本方程推导了改进的水轮机非线性模型以提高模型精度。文献[30]基于水轮机调速器延时模型,合理简化水轮机-调速器系统,推导计及旋转备用及水锤效应的电网频率解析表达式。目前研究未见水电机组频率

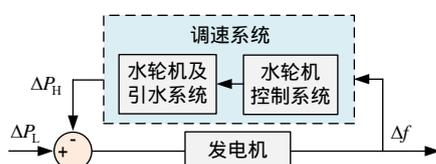


图5 水电机组 SFR 模型
Fig. 5 Hydraulic SFR model

响应相关报道,如何与其他类型频率响应方式协调配合以减弱水锤效应不利影响,对于高比例含水电力系统具有重要意义。

2.2 风电机组频率响应方式

随着恒速异步风机逐渐退出应用,变速型风机(如双馈异步、永磁直驱)已成为主要类型。变速型风机具有较大的控制灵活性,通过调整控制目标和控制策略,可以使机组主动响应系统频率变化,使其具备类似于同步机组的惯性响应和一次频率调节能力。目前,多类型频率控制方式被应用于实现风机虚拟频率响应^[3],并在电力系统优化中广为应用。

1) 虚拟惯性响应。

虚拟惯性控制可模拟同步机惯性响应能力,通过在风机控制部分增加与频率变化率相关的控制环节,可实现虚拟惯性响应,如式(6)所示。其中, M_w 是虚拟惯性时间常数, ΔP_w 为风机频率响应功率。文献[43]首次提出风机虚拟惯量的概念,文献[27]进一步提出惯性时间常数优化方法。

$$\Delta P_w = M_w \frac{d\Delta f(t)}{dt} \quad (6)$$

2) 虚拟一次频率响应。

下垂控制模拟同步发电机功率随系统频率下降而增加的特性,可实现风机一次频率响应,如式(7)所示。其中 D_w 为风机下垂系数,通常用来表征一次调频性能,与调差系数呈倒数关系。该控制方式的调频能力与风速相关,风速较低时,下垂系数过大使转子动能过度利用并使机组易切出,而高风速时下垂系数过小又使风机无法提供足够调频功率^[44]。因此,采用固定下垂系数不能充分协调二者之间的矛盾^[45]。

$$\Delta P_w = D_w \Delta f(t) \quad (7)$$

此外,转速控制也可实现风机一次调频,该方式可以克服下垂控制中转速无法调节而产生切机的缺点,为目前优化问题中的主要方式。由于风机处于最大功率追踪模式时无法进行调频,因此预先减载运行是必要条件,示意图以及一次调频响应实现过程可见附录 B。

3) 综合虚拟频率响应。

基于虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术,有学者提出综合虚拟频率响应方式,可结合惯性与一次调频响应特性。频率响应功率的时域和频域形式分别如式(8)(9)所示,其中 T_w 表示响应时间。由于采用主动减载实现风机一次调频,其本质是通过弃能提供一次调频备用,因此

需对弃能功率做出约束^[46],如式(10)所示。

$$\Delta P_w(t) = M_w \frac{d\Delta f(t)}{dt} + D_w \Delta f(t) \quad (8)$$

$$\frac{\Delta P_w(s)}{\Delta f(s)} = \frac{M_w s + D_w}{1 + T_w s} \quad (9)$$

$$P_w^c \geq D_w P_w^f \Delta f_{ss,max} \quad (10)$$

式中: P_w^c 表示弃能功率; P_w^f 为风电预测出力; $\Delta f_{ss,max}$ 为最大稳态频率偏差。

2.3 光伏机组频率响应方式

与风电调频不同,光伏机组无旋转部件,无法直接通过虚拟惯性控制提供惯性响应,但仍可利用虚拟同步机技术获得一定惯量和一次调频能力,其频率响应形式与风电频率响应形式(9)类似。同时,大规模光伏电站追踪最大功率甚至恒定功率运行,此时无法提供一次调频备用^[47]。光伏参与调频主要形式总结如下^[48]:1)基于下垂控制的光伏一次调频;2)基于虚拟同步发电机技术的光伏调频;3)光伏电站-储能联合频率响应。

通过电压控制,光伏机组的实际电压可以稍高或稍低于最大功率跟踪点,从而主动减载获得一次调频能力,如附录C所示,其中: V_1 、 V_2 均为减载运行点; ΔP 为光伏机组一次调频备用容量。光伏减载运行使并网光伏具备一次调频能力,但是光伏出力的不确定性,尤其是局部阴影下的光伏运行情况增加了光伏系统参与系统调频的难度。为减小光伏不确定性影响,一般配置储能进行辅助调频。光伏-储能联合系统可充分利用储能快速充放电提供频率响应,但配置储能会额外增加光伏电站成本。此外,光伏参与调频将引起弃能,兼顾光伏消纳与一次调频响应的协同优化方法有待进一步研究。

2.4 直流系统频率响应方式

高压直流输电替代区域间交流联络线使系统转动惯量被拆分,区域间惯量无法共享,并且大容量输电替代了受端系统部分同步机组,系统惯量响应能力相对减弱。受端换流器大多采用定有功功率控制方式,无法响应系统频率变化,使系统频率稳定性降低。

实际上,直流输电具备快速精确的频率响应能力,通过直流输电对交流电网进行频率控制,在故障时可以实现快速功率支援,保证交流电网的暂态安全^[49]。目前存在两种直流频率响应方式:一是通过引入交流电网频率变化率,实现虚拟惯性响应,存在延时且受电网频率噪声影响;二是通过引入VSG技术,在变流器的控制环节引入同步机转子运动及电磁暂态方程,使其具有同步机并网运行的外

特性,可提供无延时的频率支撑。

2.5 负荷侧频率响应方式

频率响应负荷是一类能够自动监测频率变化,比较系统频率信号和设定阈值,实现就地分散响应并参与系统频率调控的负荷^[50]。目前存在主动和被动两种负荷频率响应模式^[51],一般采用市场价格型、用户激励型等需求侧响应技术(demand response, DR),通过负荷聚集商或虚拟电厂等挖掘负荷侧调频潜力。两者区别在于被动负荷频率响应适用于高压电网,通过集中式调节实现大规模响应;而主动负荷频率响应适用于低压电网,通过分散控制实现。

1) 被动负荷频率响应。

被动负荷指非时序且能临时退出或接入电网的负荷,可用于恢复源荷平衡和消除可再生能源波动。可中断负荷与可平移负荷作为两种有效DR措施,可在频率安全事故发生时分别按照约定,在极端频率时刻自动切除或转移部分负荷以参与系统一次调频,但实施过程受调频时间、调频功率总量以及平移负荷等约束限制^[52]。

恒温负荷具有热惯性特征,可看作一种理想的频率响应资源,目前住宅区电热水器^[53]、空调^[54]、制冷设备^[55]等均可通过需求响应技术实现250~400ms的快速频率响应,可参与系统一次或二次调频。该方式基于热传递方程,通过热传递率建立热量与功率联系,并利用调温装置控制恒温负荷达到瞬时调频作用。其中,集群电热水器负荷取决于热水温度^[54,56],空调则受室外温度直接影响^[57],制冷设备由用户设定温度决定^[55],三者为满足用户体验度或者采用奖励措施情况下,均可紧急关闭或调节温度改变负荷功率以实现频率响应,但该方式需要关注负荷重新接入后对系统频率的再一次冲击。此外,近年来学者针对商业照明设备^[58]、电动机负荷(压缩机、风扇以及水泵)^[59]、数据中心^[60]以及综合能源站^[61]等都相继提出调频辅助服务策略,本质仍属于被动负荷响应范畴。

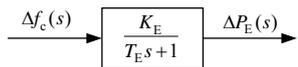
2) 主动负荷频率响应。

目前,主动频率响应主要指电动汽车(electric vehicles, EVs)等移动储能装置通过主动充放电实现频率响应功能。例如,文献[62]指出EVs慢速充电站由于连接时间更长,更适合于提供快速频率响应。文献[63]建立了EVs聚合调频模型,首次分析了聚合延迟对EVs调频能力的影响。文献[64]使用状态空间法进一步简化了稀疏数据情况下的EVs聚合器模型,并应用于频率响应中。该方面成果相比于被动负荷频率响应较为欠缺,有待进一步探究。

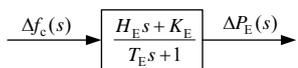
2.6 储能频率响应

储能系统参与电网调频必须具备快速充放电性能^[7],目前电池储能系统(锂电池、液流电池和铅酸电池)、飞轮储能、低温超导储能、超级电容器以及混合储能系统等都可作为调频储能加以配置,其响应速度满足惯性及一次调频的快速频率响应需求,同时长达小时级持续时间又能实现二次、三次调频功能。部分调频储能特性归纳可见附录 D。

储能频率控制模型一般由单体元件模型与 PCS(power conversion system)模型构成,通常采用基于下垂控制的一阶惯性环节与控制增益的乘积来描述电池储能调频特性,如图 6(a)所示。图 6(a)中: $\Delta f_c(s)$ 表示频率偏差或区域控制偏差;增益系数 K_E 表示储能出力值与频率偏差的关系; T_E 为时间常数,表示 PCS 控制的延时效应。此外,结合虚拟惯性控制和 VSG 技术,储能可以模拟同步机组实现惯性频率响应,通过引入虚拟惯性常数 H_E 缓解过高 ROCOF,示意如图 6(b)所示。



(a) 基于下垂控制的储能调频环节



(b) 基于VSG技术的储能调频环节

图 6 电池储能频率响应函数

Fig. 6 Transfer function of battery energy storage

在电力系统优化问题中,调频储能应用主要分为两类。方式 1:仅关注功率外特性的储能调频;方式 2:考虑具体控制环节的储能调频。

方式 1 不涉及具体控制方式,通过充放电操作实现快速频率响应,其重点是留有充足调频备用并满足调频前后的充放电功率以及电量限制,适用于精度要求不高的系统调频备用配置问题^[13,17,65]。该方式下的储能频率响应功率如式(11),频率响应过程中释放电量如式(14),需要满足正常运行状态下的充放电功率约束(12)(13)以及调频后的电量约束(15)。可知,将频率响应功率 ΔP_E 代入式(1)即可构成考虑储能调频的频率响应方程。

方式 2 考虑图 6 控制环节构成扩展 SFR 模型,形成不平衡功率下考虑储能的动态频率响应,通常用于等效虚拟惯量评估以及储能容量精细化配置^[11,66]。目前,储能技术在充放电效率、可靠性、响应时间、使用寿命以及成本价格方面均有了较大改进,容量限制仍然是制约储能参与电力系统调频的重要因素^[51]。

$$\Delta P_E = P_E^{\text{dis,max}} - P^{\text{dis}} + P^{\text{ch}} \quad (11)$$

$$P^{\text{dis,min}} \leq P^{\text{dis}} \leq P^{\text{dis,max}} \quad (12)$$

$$P^{\text{ch,min}} \leq P^{\text{ch}} \leq P^{\text{ch,max}} \quad (13)$$

$$\Delta E = P^{\text{dis,max}} (\Delta t_1 + \Delta t_2 + 0.5 \Delta t_3) \quad (14)$$

$$E_{\text{min}} \leq E_0 - \Delta E \leq E_{\text{max}} \quad (15)$$

式中: P^{ch} 、 P^{dis} 分别为储能充放电功率; Δt_1 、 Δt_2 和 Δt_3 分别表示惯性、一次以及二次调频持续时间; E_0 、 E_{min} 和 E_{max} 分别为储能电量初始值、最小值和最大值; $P^{\text{dis,min}}$ 、 $P^{\text{dis,max}}$ 分别为储能放电状态时的最小和最大功率; $P^{\text{ch,min}}$ 、 $P^{\text{ch,max}}$ 分别为储能充电状态时的最小和最大功率。

3 考虑频率安全的电力系统规划与运行优化方法

考虑频率安全的电力系统优化问题主要从事事故前预防、事故中调节以及事故后恢复三方面组成。现有研究集中于事故前预防与事故中调节,关注系统惯性响应和一次调频性能,基于频率指标构成优化问题目标或约束。恢复阶段则通过优化配置二次调频备用以及协调 AGC 动作,以消除区域频率控制偏差为目标达到二次调频需求,恢复频率至额定值附近。

3.1 频率安全约束构造方法

针对电力系统优化问题,频率安全约束构造是需要突破的关键和难点,其作用是连接频域分析与时域优化问题。全状态仿真进行确定状态下的频率分析,直接构造时域优化-频域仿真模型存在困难。人工智能方法基于数据拟合,本质是启发式策略,过程复杂且效率低。频率数值法推导系统频率、调频状态以及调频参数的解析关系,可构造凸规划模型保证全局最优性,更适用于电力系统优化模型。在此将其构造过程总结如下。

步骤 1:构造系统频率响应模型,计算不同功率扰动 $\Delta P_L(s)$ 下的频域传递函数 $G(s)=\Delta f(s)/\Delta P_L(s)$ 。

步骤 2:对 $G(s)$ 进行拉普拉斯逆变换得到时域表达式。对于低阶 SFR 模型,可通过拉普拉斯逆变换函数积分式(16)直接获得。对于高阶模型,一般由泰勒级数展开^[67]等方法对积分项间接估计。

$$\Delta f(t) = L^{-1} [G(s) \Delta P_L(s)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{\beta-j\infty}^{\beta+j\infty} G(s) \Delta P_L(s) e^{st} ds \quad (16)$$

式中: $L^{-1}[\cdot]$ 表示拉普拉斯逆变换,上述式主要通过傅利叶逆变换间接得到,详细推导可见[68]; $s=\beta+jw$; β 为足够大的数,主要使任何 $\Delta f(t)e^{-\beta t}$ 满足傅立叶变换条件; w 为角频率; e 为自然对数的底数。

步骤3:基于1.1节获取各频率指标表达式,形成频率安全约束 $I_{F,\min} \leq I_F \leq I_{F,\max}$,其中 $I_{F,\min}$ 、 $I_{F,\max}$ 为频率指标限值。 f_{nadir} 为高度非线性,为形成凸优化模型,许多学者致力于线性化该类约束,目前存在直接法^[17-18]和等效法^[11-12]两种方式,对比如表2。

类型	特点	具体方法	优点	缺点
直接法	针对频率本身	分段线性化、边界法、离散法	适用范围广,可构造任意变量关系式	存在估计误差;局部保守性不足
等效法	以等效变量范围代替频率安全约束	基于爬坡模型的单调函数法	避免复杂线性化;不存在估计误差;简化并加速求解	适用性较差;受特定频率函数形式限制

直接法针对频率本身,一般通过分段线性化^[17,69]、边界法^[70]以及离散法^[71]构造 f_{nadir} 线性表达式,可用 $I_{F,\min} \leq I_F(x) \leq I_{F,\max}$ 表示。其中, x 表示机组开停机状态、调频状态、调频备用容量以及不平衡功率等频率相关变量。离散法在微小时间内线性化关于频率偏差 $\Delta f(t)$ 的时域微分方程,精度与离散数量相关,需增加大量线性方程^[71]。边界法通过穷举频率值确定最差频率边界,并建立关联机组状态的频率参数约束条件^[70],兼具鲁棒性和零误差特点,但大规模多状态系统的完全穷举几乎不可能。分段线性化通过引入若干直线或平面逼近非线性函数,并构造与电力系统状态变量的函数关系式,如 $f_{nadir} = Ax + B$,其中 A 、 B 为线性拟合系数。与离散法类似,分段拟合误差与拟合数据、线段(平面)数量相关。此外,分段线性化和离散法在近似点易出现频率错误估计的情况,无法严格满足保守性要求^[70]。不同的是,分段线性化仅针对频率极值,忽略频率变化全过程,求解效率较高。

等效法利用频率极值 f_{nadir} 关于变量单调变化的特点,以等效转化的变量范围代替频率安全约束 $C_{\min} \leq \hat{G}(x) \leq C_{\max}$ 。其中, $\hat{G}(x)$ 为关于 x 的单调函数, C_{\max} 、 C_{\min} 为频率指标上下限,则频率安全要求变量满足式(17)。如针对本文1.1节的爬坡模型,文献[11-12]形成了 $\hat{G}(\Delta P_{G,\max} M_{sys})$ 表达式,该函数与系统最大调频功率、总体惯量水平的乘积呈单调递减关系,则 $\hat{G}^{-1}(C_{\max}) \leq \Delta P_{G,\max} M_{sys} \leq \hat{G}^{-1}(C_{\min})$ 满足时即可保证频率安全。

$$\begin{cases} \hat{G}^{-1}(C_{\min}) \leq x \leq \hat{G}^{-1}(C_{\max}), & \text{单调递增} \\ \hat{G}^{-1}(C_{\max}) \leq x \leq \hat{G}^{-1}(C_{\min}), & \text{单调递减} \end{cases} \quad (17)$$

3.2 考虑频率安全的电力系统优化模型

电力系统优化的目的是确定何时何地新建或

调用何种类型的调频资源应对频率安全事故。考虑频率安全约束后,合理调整原有规划模型,给出模拟运行方案,是应对电力系统频率安全问题的有效途径。尽管面向不同频率响应措施和不同频率指标的规划与运行优化模型有所差异,但仍可求同存异,提炼出基础模型,如式(18)所示。

$$\begin{cases} \min f(X,Y) \\ \text{s.t. } H(X,Y) = e_{eq} \\ G(X,Y) \leq e_{ineq} \\ I_F(X,Y) \leq e_F \end{cases} \quad (18)$$

式中: $f(X,Y)$ 为综合费用,除年投资成本外,还包括发电机运行成本,切负荷、弃能、频率超标惩罚成本以及机组开停机费用等; X 表示 0-1 整数变量,如调频设备投建、调频参与状态、机组运行状态以及开停机操作等标志位; Y 表示系统连续变量,如调频备用容量、发电机出力、切负荷量、弃能量、支路潮流以及电压相角等; e_{eq} 、 e_{ineq} 、 e_F 为常数向量; $H(X,Y)$ 表示正常运行状态下的等式约束,包括机组开停机逻辑、线路潮流、节点功率平衡等; $G(X,Y)$ 表示正常运行状态下的不等式约束,包括线路容量、发电机出力、机组最小开停机时间以及调频备用约束等; $I_F(X,Y)$ 表示频率安全约束,频率安全指标与变量 X 、 Y 存在一定关联,其构造过程已在上节详述。

考虑频率安全的电力系统优化框架如图7所示。

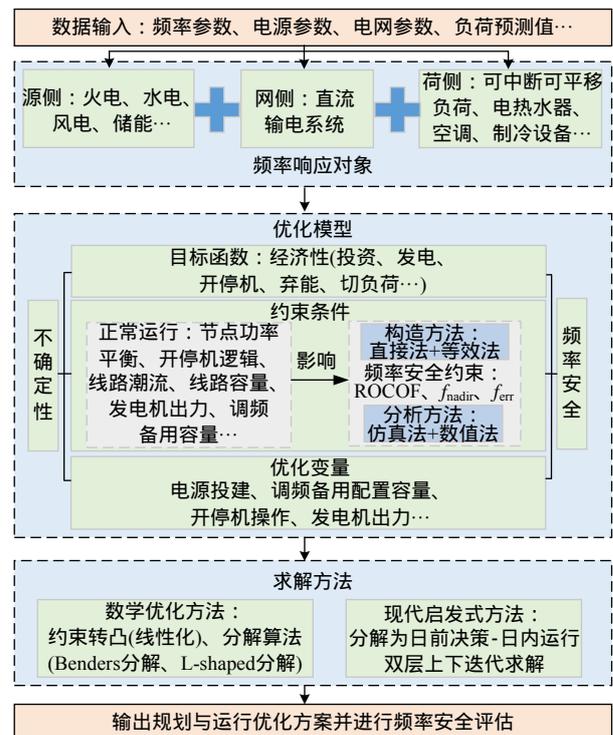


图7 考虑频率安全的电力系统优化框架

Fig. 7 Optimization framework of low-inertia power system considering frequency security

相比传统电力系统优化问题，考虑频率安全对模型的影响包括：1) 优化变量增多。为保障频率安全，需引入调频备用配置容量、调频设备状态等相关变量；2) 不确定因素影响更显著。可再生能源出力波动、负荷预测误差概率分布特性难以准确获取，运行设备故障无法提前预知，另外通信延迟、频率响应参数辨识困难等不确定因素进一步增加了建模难度；3) 模型性质改变，频域、时域问题无法直接耦合，频率控制复杂性改变了优化模型性质，引入偏微分方程、高度非线性函数导致优化模型非凸且难以求解。

目前，考虑频率安全的电力系统优化研究主要关注规划与运行优化两方面，总结如图 8。

3.2.1 考虑频率安全的电力系统运行优化

运行优化问题不考虑调频资源的投资决策，仅通过机组开停机操作、调频状态决策和调频备用配置优化频率响应过程，发挥系统最佳调频性能，该研究受系统调频资源结构限制较大。该类问题可分为多速率调频资源协调优化、可再生能源频率支撑以及电力市场环境下的调频备用配置三方面内容。

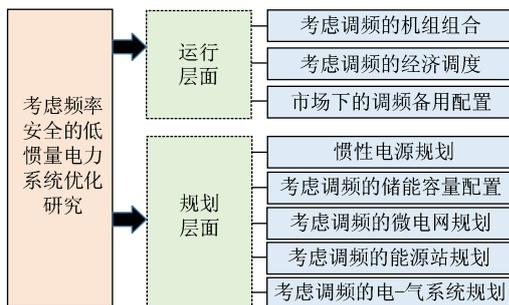


图 8 考虑频率安全的电力系统优化研究分类
Fig. 8 Classification of low-inertia power system optimization considering frequency security

调频资源协调优化通过不同响应速率、不同持续时间的频率响应相互配合，综合应对频率安全事故。文献[17]应用爬坡模型，提出了一种协同火电调频及储能快速频率响应的 UC 方法，优化配置同步(虚拟)惯量和一次调频，并对最大不平衡功率进行决策。文献[65]建立了储能频率响应模型，并基于响应时间约束提出了考虑频率安全的 UC 方法。文献[54]将火电机组与负荷被动频率响应结合。

基于可再生能源频率支撑的运行优化仅涉及风电机组，对光伏机组还未有研究。文献[12]和[46]引入风机虚拟惯性控制、下垂控制及主动减载操作，基于爬坡模型提出了考虑风机虚拟频率响应的 UC 方法。文献[72]进一步提出了考虑风电调频的机会约束模型。文献[46]提出了考虑火电机组与风电机组调频的 SFR 模型，推导了频率最低值表达

式，并基于分段线性化应用于混合整数线性 UC 模型。文献[73]提出了一种风电调频备用容量动态配置方法。

电力市场环境下，少部分研究已涉及一二次调频服务的电价制定策略。文献[19]首先提出了考虑惯性响应、一二次调频的备用优化配置方法，并建立了调频服务的边际电价计算式。类似地，文献[74]提出了针对不同速率调频资源的一次调频边际电价制定方法。

区别于传统电力系统优化问题，考虑频率安全的电力系统运行优化的耦合机理更为复杂，其难点在于：1) 多类型调频资源耦合方面，如何准确评估变工况下的调频资源惯量及调频性能，结合不同调频策略建立多调频资源协调配合的系统频率响应模型，并进一步寻求多机等效方法简化复杂调频环节以适用于大规模优化问题；2) 时域与频域耦合方面，基于频率分析与运行优化深度融合需求，如何提出有效的频域-时域转化方法，构造适用于凸优化问题的频率安全约束，保证优化方案全局最优性；3) 多时间尺度优化耦合方面，如何提出考虑惯量支撑及频率调节全过程的多时间尺度运行优化模型及高效求解方法，提出不同阶段的稳态和暂态运行要求，通过优化调用多时空调频资源，兼顾频率安全性与运行经济性。

3.2.2 考虑频率安全的电力系统规划

考虑频率安全的电力系统规划目前涉及储能选址定容、电源规划方法等研究，仍处于起步阶段。例如，文献[8]提出了考虑一次调频备用优化的两阶段电源、储能协同规划模型。文献[66]提出一种两阶段储能容量估计方法，首先基于 ROCOF 指标粗略估算储能容量，然后通过区域削减迭代算法进一步得到精细化的容量配置方案。然而上述研究均未计及具体的频率安全约束。文献[14]提出了一种考虑虚拟惯量与一次调频的储能容量估算方法，仅满足系统惯量需求，不涉及储能运行约束。文献[75]提出了一种考虑频率安全的孤岛电力系统调度策略，并建立了基于功率谱密度的储能容量配置模型。文献[13]基于储能多阶段频率响应过程，提出了一种考虑频率最低值和频率变化速率约束的储能规划方法。文献[76]首次建立了以实现调频辅助服务利益最大化为目标，协同考虑储能规划与频率控制策略的优化框架。此外，文献[77]首次通过电转气(P2G)技术利用弃风生产天然气，经储气罐存储并通过燃气机组发电参与调频，构建了 P2G、储气罐、燃气机组参与调频的成本-收益模型，以最

大化净收益为目标实现各装置的容量优化配置。文献[61]建立了包含电力设备的综合能源站的一次调频和经济运行模型,并进一步提出考虑一次调频服务以及市场交易机制的能源站优化规划模型。

电力系统规划属于优化范畴,可基于3.2节提炼出的电力系统优化模型对频率安全进行考虑,其关键仍然是建立关联规划变量的频率安全约束,主要作用是优化系统最大惯量分配以及提升频率响应功率上限。此外,考虑频率安全的规划与运行优化的主要区别在于增加了规划阶段的调频设备扩展配置,需额外加入规划变量与调频动作的逻辑约束,保证仅投建设备能参与调频。同时优化时间尺度从短期小时级提升至长时间尺度的多年级,需要另外考虑长时间尺度下的不确定性问题,例如调频设备检修与退役导致的调频电源容量不确定性等。目前,长期规划与短期运行结合是发展趋势,通过选取典型日场景在规划模型中考虑短期运行措施,通过规划提升最大调频能力,并引入机组启停以及调频动作切换等灵活调整系统实时频率响应能力。此方面,文献[78]已经建立了考虑风电场调频的系统频率响应模型,并提出频率安全约束下内嵌机组组合的源储联合规划方法。

3.2.3 不平衡功率分析

在电力系统优化问题中,确定扰动功率是基础和前提。目前功率扰动主要由元件状态变化和短时功率波动两种方式引起。其中,元件状态变化主要指发电机短时投切或因故障退出运行、多区域特高压联络线故障以及直流单双极闭锁故障等,其特点是能够引发较大幅度的功率扰动,频率瞬时变化较大,如果处理不及时易导致系统低频减载甚至系统崩溃。此情况需充分调用调频资源,通过事故前预防、事故中调节以及事故后恢复以保证系统频率安全。短时功率波动主要指可再生能源和负荷的随机波动,一般引起频率较小范围内连续变化,为了保证运行经济性,应尽量减少频率调节次数。已有分析一般针对单区域优化问题,为满足电力系统 $N-1$ 原则,考虑系统内最大容量机组故障引起的不平衡功率^[19,69-70]。同时,针对有多台相同最大容量机组的系统,存在决策最严重机组故障的过程。此外,有少部分研究设定部分负荷作为不平衡功率^[18,65],等效于提高负荷功率波动程度。对于多区域优化问题,未来可考虑由更大容量的特高压联络线以及直流单双极闭锁故障引起的功率扰动。

3.3 不确定性因素

不确定因素直接影响频率事件前后的场景设

置、不平衡功率波动以及调频设备状态。在考虑频率安全的电力系统优化问题中,已涉及可再生能源出力^[12,17,65]、负荷预测功率^[79-80]、设备状态^[11,81]以及通信测量^[65,82]等不确定因素。

在不确定性处理方面,电力系统优化问题通常采用区间、随机和鲁棒3种方法。区间优化描述不确定性时,除应用预测场景外,还需添加由变量取值区间上下限逐一组合的极端场景,保守性强且计算规模大^[65]。随机方法存在多场景和机会约束等模型^[83],针对单随机变量易建模和求解,对多类型随机变量则需要大量随机信息。其中,多场景技术是主要方法,例如场景树生成法针对连续多阶段不确定性问题,采用预测误差分布的分位数作为典型场景^[11-12,17],目前在运行优化问题中广泛应用。鲁棒方法则通过不确定集合描述不确定性因素,并寻找最差场景下的优化方案,求解难度低但保守性强,存在区间鲁棒^[65]、自适应鲁棒及分布鲁棒^[85]等方法。

需要指出,各类不确定性处理方法并非完全割裂,而是可以相互转化,如文献[65]和文献[72]分别通过多场景对区间优化和机会约束进行确定性转化。上述方法优缺点可总结如表3所示。

处理方法	优点	缺点
区间 ^[65]	无需数据采样,只需要变量区间范围	建模精度差,缺乏典型性
机会约束 ^[72]	允许部分越限,接近实际情况	置信度设置较主观
多场景 ^[11]	模型简单,利用典型场景可将不确定性问题转换为确定性问题的	海量场景削减、场景典型性要求高
鲁棒	能够考虑最恶劣场景	结果较为保守

3.4 求解算法

考虑频率安全的电力系统优化问题属于典型的混合整数优化问题,变量中包含用于决策的整数变量和用于控制的连续变量。本节从现代启发式算法和数学优化方法两大类总结已有算法。

3.4.1 现代启发式算法

现代启发式算法将原问题分解为日前决策(规划、日前调度或机组组合)-日内运行模拟。上层确定日前决策方案并传递给下层,而下层以此为基础进行运行模拟,并将结果返回给上层,上下层迭代直至满足收敛条件。该方法优点是适用性广,能应用于任意优化模型,缺点是无法得到全局最优解。当处理大规模问题时,计算速度缓慢且容易陷入局部最优。文献[9]采用遗传算法解决考虑频率安全的最优潮流问题。文献[77]采用粒子群算法求解弃风参与电网调频的电转气-储气-燃气轮机容量优化配置问题。

3.4.2 数学优化方法

通常将模型和约束转化为混合整数线性优化问题(mixed-integer linear programming, MILP)。当考虑电压、无功时,形成二阶锥或半正定等特殊形式^[85]。该问题属于凸优化范畴,全局最优性可严格保证,但由于不存在多项式时间复杂度的算法,因此求解时间不可控。该类问题通常采用 GUROBI、CPLEX、MOSEK、SDPT3 等优化求解器直接求解,相较于现代启发式算法,求解高效且精确度高。类似地,数学优化方法也将问题分为日前决策与日内运行模拟,并利用 Benders 分解法^[79,86-87]、列与约束生成(column-and-constraint generation, C&CG)算法以及 L-shaped 算法^[32,86]等进行有效连接。同时,该类方法可与频率仿真结合,避免复杂推导的频率数值计算。

4 展望

考虑频率安全的电力系统优化问题的关键是如何将频域中的频率分析与时域中的优化模型相结合,本质是建立各类调频功率与频率波动量的耦合关系,难点在于多机系统构造的频率响应模型高度非线性,无法直接嵌入优化问题。目前该领域仍处于起步阶段,未来可从以下几个方面进一步探究。

4.1 考虑调频服务的多主体电源规划方法

随着市场化改革,原来垂直一体化的运行管理模式不复存在。电源投资者可能是政府、电力公司以及用户等,投资主体的多样性直接决定了规划立场和目标的不同。基于各类型调频服务交易的电力市场是多主体电源的有效参与方式。

未来可将调频服务作为投建高惯性、快速响应电源的驱动力,建立考虑调频服务的多主体电源规划模型,在满足频率安全约束基础上,协同差异化的投资主体,平衡不同主体间的利益关系,刻画不同主体对调频服务价格的敏感性,激励多主体电源积极参与调频服务。可通过双层优化理论模拟规划和市场出清两阶段,上层以最大化收益为目标得到电源规划方案,下层则建立调频市场出清模型并返回出清价格。同时,可利用博弈论分析不同主体利益诉求以及可能达到的利益均衡点。此外,需充分模拟电力市场出现的电价波动、电源投资成本波动等不确定因素,通过随机、鲁棒方法加以刻画,从而寻求不确定环境下的多主体利益最大化。

4.2 不确定因素下考虑频率安全的发输电联合规划方法

考虑频率安全的运行优化问题中,系统调频能

力受调频电源数量、调频容量以及频率响应参数影响。从 SFR 模型来看,频率响应是源荷功率平衡问题,电源位置不会直接影响不平衡功率,但是机组需预留调频空间,且以牺牲经济出力为代价,产生位置影响下的差异化的机组最佳调频容量。此外,惯性响应和一次调频为短时过程,网络潮流允许过载,电源短时超发功率限制仅受线路热稳极限影响,而二至三次调频持续时间长,需严格满足潮流约束。网络拓扑结构及线路容量间接影响系统频率响应。目前,不确定因素对系统调频潜力和调频需求的作用和影响未明,调频电源投建、输电网络扩展配合成果较少,特别是发输电联合规划亟待探究。

未来可考虑两种建模思路:1) 纯数值方法。构造数值化的频率安全约束,通过随机、鲁棒等方法刻画不确定性,建立不确定环境下考虑频率安全的发输电联合规划模型。2) 数值和仿真结合。调用成熟频率仿真软件计算频率值,基于双层优化理论得到考虑频率安全的发输电规划方案。未来可设置上层为规划决策问题,下层基于规划方案进行频率暂态仿真和运行优化,并利用 Benders 分解、列与约束生成等算法形成对偶、原始割约束条件返回给上层问题,使上层问题得到满足频率安全的方案。

4.3 考虑频率安全的多区域协同规划方法

区域互联电网建设日趋成熟。目前,多区域研究主要集中于交流联络线调度^[88]、多区域协同规划^[89]、削减区域待选集^[90]等,以提升经济性和灵活性为主,鲜有研究关注多区域间的频率安全及惯性资源互济问题。一方面,联络线功率波动对相邻区域即不平衡功率,联络线故障引发的大功率扰动带来大范围潮流转移致使相邻区域频率反向恶化。另一方面,以交流联网的多区域同步电网间惯性资源可以共享,区域内惯性和调频响应均可利用交流联络线实现互济。但是,联络线一般存在特定输电方式,如恒定功率、区间可调节功率及全范围调节功率模式等,同时也需满足潮流反转次数、潮流爬坡等约束以避免频繁改变联络线潮流。联络线规划容量与架设位置影响传输功率,如何合理规划区域间联络线和选择最优输电方式,挖掘区域间的惯性互济能力,是未来值得探索的方向。

此外,特高压直流系统已广泛应用。与交流联络线不同,相邻直流系统间惯量无法共享,但由于控制方式及功率调节可实现快速响应,因此具备更加稳定、快速的一次调频能力^[5]。由于工程中直流

一般以定控制模式和计划功率运行,因此其频率响应能力受到限制。未来可适当选择不同灵活控制模式,提出考虑直流系统频率调节的多区域发输电联合规划方法,首先需要建立基于交直流混合潮流的发输电规划模型,其次选择直流控制模式并优化直流系统两端交流功率实现一次调频响应。

4.4 协同多类稳定问题的电力系统运行优化方法

目前考虑频率安全的运行优化均基于频率响应独立性原则,即把频率动态行为作为独立的分析过程^[91],假定频率仅由机组和负荷的功频特性决定,忽略电压与无功影响。实际上,频率响应与其他稳定问题存在高耦合性,不能完全割裂。例如系统无功问题使电压偏离故障前状态,进而影响负荷有功功率、机组发出有功功率以及线路传输有功功率,从而影响频率后续变化。同时,功角摆动同样会造成线路传输功率的变化和母线电压的变化,进而引起机组、负荷有功变化,对系统频率产生间接影响。基于此,需构建考虑频率安全、电压稳定以及暂态稳定等多类型稳定问题的电力系统运行优化模型,实现同步及虚拟惯量的合理分配,从运行优化角度综合协调各类稳定问题。该问题关键和难点是如何构建计及多类稳定问题的统一运行优化框架,可行思路为建立双层分解协调模型,上层为稳态运行优化场景,下层为基于仿真法或者数值法的各类稳定校验。下层产生相应稳定割约束返回给上层,从而促使上层向多类稳定运行点发展,最终获得满足多类稳定的运行方案。

4.5 考虑调频控制策略及控制器优化设计的电力系统运行优化方法

目前考虑频率安全的电力系统运行优化依赖于系统频率响应模型,对不同运行场景均采用相同控制模式,未计及变工况下的调频控制策略优化选择。实际上,各调频资源对不同运行场景可通过合理设置响应延时、调频死区以及不同控制方式改变响应顺序、优化频率响应功率。例如,双馈风机具有低风速、中风速以及高风速3种控制场景^[29],每个场景下的一次调频控制环节有所差异,其提供的虚拟惯量水平也不尽相同,简单采用一阶惯性环节误差较大,存在不同风速场景的调频模式优化选择潜力。同时,双馈风机存在多种主动减载运行模式^[92],不同模式获得的最大一次调频备用容量存在差异,如何在运行优化中选择最优控制模式并制定相应调频策略具有实际意义。此外,调频控制器直接决定调频能力,需根据不同运行场景优化设定不同调频参数以达到最优调频效果,采用固定参数方

式仍比较粗糙。

5 结语

本文对考虑频率安全的电力系统规划和运行优化研究进行了综述和展望。首先,在电力系统频率安全特性方面,总结了频率暂态过程、频率衡量指标和频率分析方法;然后,研究了电力系统源-网-荷-储不同环节频率响应方式的原理及应用情况;在此基础上,归纳了数值化的频率安全约束及其转化方法,提炼出考虑频率安全的电力系统优化模型一般形式及相关应用,阐述了不确定性处理方法,并对已有求解算法进行分类总结。最后,提出未来可能的研究方向,以期考虑频率安全的电力系统优化方法提供建议和指导。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):1-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 1-11(in Chinese).
- [2] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191(in Chinese).
- [3] 张旭,陈云龙,岳帅,等.风电参与电力系统调频技术研究的回顾与展望[J].电网技术,2018,42(6):1793-1803.
ZHANG Xu, CHEN Yunlong, YUE Shuai, et al. Retrospect and prospect of research on frequency regulation technology of power system by wind power[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1793-1803(in Chinese).
- [4] 张金平,汪宁渤,黄蓉,等.高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J].电力系统保护与控制,2019,47(15):179-186.
ZHANG Jinping, WANG Ningbo, HUANG Rong, et al. Survey on frequency regulation technology of power grid by high-penetration photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 179-186(in Chinese).
- [5] WEN Y, YE X. Enhancing frequency stability of asynchronous grids interconnected with HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1800-1810.
- [6] JIA Y, MENG K, SUN C, et al. Economic-driven frequency regulation in multi-terminal HVDC systems: a cooperative distributed approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(3): 2245-2255.
- [7] 李兆伟,方勇杰,李威.电化学储能应用于电网频率安全防御三道防线的探讨[J].电力系统自动化,2020,44(8):1-7.
LI Zhaowei, FANG Yongjie, LI Wei. Discussion on application of electrochemical energy storage in three defense lines of power grid frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8):

- 1-7(in Chinese) .
- [8] CARRION M , DVORKIN Y , PANDZIC H . Primary frequency response in capacity expansion with energy storage[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2018 , 33(2) : 1824-1835 .
- [9] NGUYEN N , ALMASABI S , BERA A , et al . Optimal power flow incorporating frequency security constraint[J] . IEEE Transactions on Industry Applications , 2020 , 55(6) : 6508-6516 .
- [10] GU H , YAN R , SAHA T K , et al . Zonal inertia constrained generator dispatch considering load frequency relief[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2020 , 35(4) : 3065-3077 .
- [11] TENG F , TROVATO V , STRBAC G . Stochastic scheduling with inertia-dependent fast frequency response requirements[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2016 , 31(2) : 1557-1566 .
- [12] TENG F , STRBAC G . Assessment of the role and value of frequency response support from wind plants[J] . IEEE Transactions on Sustainable Energy , 2016 , 7(2) : 586-595 .
- [13] YAN S , ZHENG Y , HILL D J . Frequency constrained optimal siting and sizing of energy storage[J] . IEEE Access , 2019 , 7 : 91785-91798 .
- [14] KNAP V , CHAUDHARY S K , STROE D , et al . Sizing of an energy storage system for grid inertial response and primary frequency reserve[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2016 , 31(5) : 3447-3456 .
- [15] 国家能源局 . 电力系统安全稳定导则：GB/T 38755—2019[S] . 北京：中国标准出版社，2020 .
- [16] 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(in Chinese) .
- [17] BADESA L , TENG F , STRBAC G . Simultaneous scheduling of multiple frequency services in stochastic unit commitment[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2019 , 34(5) : 3858-3868 .
- [18] AHMADI H , GHASEMI H . Security-constrained unit commitment with linearized system frequency limit constraints[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2014 , 29(4) : 1536-1545 .
- [19] ZHANG G , ELA E , WANG Q . Market scheduling and pricing for primary and secondary frequency reserve[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2019 , 34(4) : 2914-2924 .
- [20] 张恒旭，李常刚，刘玉田，等 . 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J] . 电工技术学报，2010，25(11)：169-176 .
ZHANG Hengxu , LI Changgang , LIU Yutian , et al . Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J] . Transactions of China Electrotechnical Society , 2010 , 25(11) : 169-176(in Chinese) .
- [21] 张恒旭，刘玉田 . 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J] . 中国电机工程学报，2009，29(7)：64-70 .
ZHANG Hengxu , LIU Yutian . Quantitative description of space-time distribution features of dynamic frequency responses[J] . Proceedings of the CSEE , 2009 , 29(7) : 64-70(in Chinese) .
- [22] 李常刚，刘玉田，张恒旭，等 . 基于直流潮流的电力系统频率响应分析方法[J] . 中国电机工程学报，2009，29(34)：36-41 .
LI Changgang , LIU Yutian , ZHANG Hengxu , et al . Power system frequency response analysis based on the direct current load flow[J] . Proceedings of the CSEE , 2009 , 29(34) : 36-41(in Chinese) .
- [23] CHAN M L , DUNLOP R D , SCHWEPPE F . Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major disturbances [J] . IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems , 1972 , 91(4) : 1637-1642 .
- [24] ANDERSON P M , MIRHEYDAR M . A low-order system frequency response model[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1990 , 5(3) : 720-729 .
- [25] 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 .
- [26] CAO Y , ZHANG H , ZHANG Y , et al . Extending SFR model to incorporate the influence of thermal states on primary frequency response[J] . IET Generation , Transmission & Distribution , 2020 , 14(19) : 4069-4078 .
- [27] YE H , PEI W , QI Z . Analytical modeling of inertial and droop responses from a wind farm for short-term frequency regulation in power systems[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2016 , 31(5) : 3414-3423 .
- [28] DAI J , TANG Y , WANG Q , et al . An extended SFR model with high penetration wind power considering operating regions and wind speed disturbance[J] . IEEE Access , 2019 , 7 : 103416-103426 .
- [29] KR PAN M , KUZLE I . Introducing low-order system frequency response modelling of a future power system with high penetration of wind power plants with frequency support capabilities[J] . IET Renewable Power Generation , 2018 , 12(13) : 1453-1461 .
- [30] 饶成骄，郭成，马宁宁，等 . 考虑水轮机水锤效应的电网频率变化的解析方法[J] . 电网技术，2018，42(6)：1892-1898 .
RAO Chengjiao , GUO Cheng , MA Ningning , et al . Analytical method of power grid frequency change considering water hammer effect of turbine[J] . Power System Technology , 2018 , 42(6) : 1892-1898(in Chinese) .
- [31] ULLAH N R , THIRINGER T , KARLSSON D . Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines-potential and applications[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2008 , 23(2) : 601-612 .
- [32] CHEN S , ZHANG T , GOOI H B , et al . Penetration rate and effectiveness studies of aggregated BESS for frequency regulation[J] . IEEE Transactions on Smart Grid , 2016 , 7(1) : 167-177 .
- [33] OSHNOEI A , KHERADMANDI M , MUYYEEN S M . Robust control scheme for distributed battery energy storage systems in load frequency control[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 35(6) : 4781-4791 .
- [34] BABAJANI P , SHAFIEE Q , BEVRANI H . Intelligent demand response contribution in frequency control of multi-area power systems[J] . IEEE Transactions on Smart Grid , 2018 , 9(2) : 1282-1291 .
- [35] BAI F , WANG X , LIU Y , et al . Measurement-based frequency dynamic response estimation using geometric template matching and recurrent artificial neural network[J] . CSEE Journal of Power and Energy Systems , 2016 , 2(3) : 10-18 .
- [36] YAN Z , XU Y . Data-driven load frequency control for stochastic power systems : a deep reinforcement learning method with continuous action search[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2019 , 34(2) : 1653-1656 .
- [37] MANUEL M , ELIAS E . Design of frequency response masking fir filter in the canonic signed digit space using modified artificial bee colony algorithm[J] . Engineering Applications of Artificial Intelligence , 2013 , 26(1) : 660-668 .
- [38] WANG Q , LI F , TANG Y , et al . Integrating model-driven and data-driven methods for power system frequency stability assessment and control[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2019 , 34(6) : 4557-4568 .
- [39] 张怡，张恒旭，李常刚，等 . 深度学习在电力系统频率分析与控制中的应用综述[J] . 中国电机工程学报，2020，44(3)：1-15 .
ZHANG Yi , ZHANG Hengxu , LI Changgang . Review on deep learning applications in power system frequency analysis and control[J] . Proceedings of the CSEE , 2020 , 44(3) : 1-15(in Chinese) .

- [40] 李兆伟, 吴雪莲, 庄侃沁, 等. “9-19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 149-155.
LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Qingkan, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of East China Grid after bipolar locking of “9-19” Jinping-Sunan DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155(in Chinese).
- [41] 田池. 面向快速频率响应的水电机组动态模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [42] 王曦, 李兴源, 刘俊敏, 等. 改进的水轮机非线性模型及其对电力系统仿真分析的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1606-1610.
WANG Xi, LI Xingyuan, LIU Junmin, et al. A modified nonlinear hydraulic turbine model and its impact on power system simulation [J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1606-1610(in Chinese).
- [43] MORREN J, HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 433-434.
- [44] 刘巨, 姚伟, 文劲宇, 等. 大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 638-646.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. Prospect of technology for large-scale wind farm participating into power grid frequency regulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 638-646(in Chinese).
- [45] VIDYANANDAN K V, SENROY N. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 837-846.
- [46] ZHANG Z, DU E, TENG F, et al. Modeling frequency dynamics in unit commitment with a high share of renewable energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4383-4395.
- [47] KARBOUJ H, RATHER Z H, FLYNN D, et al. Non-synchronous fast frequency reserves in renewable energy integrated power systems: a critical review[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 106: 488-501.
- [48] 张金平, 汪宁渤, 黄蓉, 等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 179-186.
ZHANG Jinping, WANG Ningbo, HUANG Rong, et al. Survey on frequency regulation technology of power grid by high-penetration photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 179-186(in Chinese).
- [49] 孙凯祺, 李可军, Lakshmi Sundaresh, 等. 基于直流互联的交流电网频率稳定控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 723-730.
SUN Kaiqi, LI Kejun, Lakshmi Sundaresh, et al. Frequency stability control research of AC grid based on HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 723-730(in Chinese).
- [50] 陶苏滕, 王琦, 赵奇, 等. 大功率缺失下频率响应负荷聚合建模与分散控制方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 182-188.
TAO Sumeng, WANG Qi, ZHAO Qi, et al. Aggregation modeling and decentralized control method of frequency response load under severe power shortage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 182-188(in Chinese).
- [51] KARBOUJ H, RATHER Z H, FLYNN D, et al. Non-synchronous fast frequency reserves in renewable energy integrated power systems: a critical review[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 106: 488-501.
- [52] KUSHWAHA P, PRAKASH V, BHAKAR R, et al. PFR constrained energy storage and interruptible load scheduling under high RE penetration[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(15): 3070-3077.
- [53] CLARKE T, SLAY T, EUSTIS C, et al. Aggregation of residential water heaters for peak shifting and frequency response services[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2020, 7: 22-30.
- [54] DALY P, QAZI H W, FLYNN D. ROCOF-constrained scheduling incorporating non-synchronous residential demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3372-3383.
- [55] AUNEDI M, KOUNTOURIOTIS P-A, CALDERON J E, et al. Economic and environmental benefits of dynamic demand in providing frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2036-2048.
- [56] WU X, HE J, XU Y, et al. Hierarchical control of residential HVAC units for primary frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3844-3856.
- [57] SHI Q, LI F, LIU G, ET AL. Both EWHS and HVACs: thermostatic load control for system frequency regulation considering daily demand profile and progressive recovery[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6259-6270.
- [58] LIU J, ZHANG W, LIU Y. Primary frequency response from the control of led lighting loads in commercial buildings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2880-2889.
- [59] CARMONA-SANCHEZ J, BARNES M, APSLEY J M. AC motors: virtual energy storage: converting an AC drive to a smart load[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(3): 1342-1353.
- [60] FU Y, HAN X, BAKER K, et al. Assessments of data centers for provision of frequency regulation[J]. Applied Energy, 2020, 277: 115621.
- [61] LI Cheng, LI Peng, YU Hao, et al. Optimal planning of community integrated energy station considering frequency regulation service[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(2): 264-273.
- [62] SANCHEZ G F, GONZALEZ L F, RUEDA J L. Multi-objective optimal provision of fast frequency response from EV clusters[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(23): 5580-5587.
- [63] DONG C, XIAO Q, WANG M, et al. Distorted stability space and instability triggering mechanism of EV aggregation delays in the secondary frequency regulation of electrical grid-electric vehicle system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5084-5098.
- [64] WANG M, MU Y, SHI Q, et al. Electric vehicle aggregator modeling and control for frequency regulation considering progressive state recovery[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4176-4189.
- [65] WEN Y, LI W, HUANG G, et al. Frequency dynamics constrained unit commitment with battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5115-5125.
- [66] AKRAM U, NADARAJAH M, RAZA M Q, et al. ROCOF restrictive planning framework and wind speed forecast informed operation strategy of energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 224-234.
- [67] PAYAM R, NIMA A. Frequency-constrained unit commitment using analytical solutions for system frequency responses considering generator contingencies[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(17): 3548-3560.
- [68] 苏变萍, 陈东立. 复变函数与积分变[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [69] TROVATO V, BIALECKI A, DALLAGI A. Unit commitment with inertia-dependent and multispeed allocation of frequency response services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1537-1548.
- [70] PATURET M, MARKOVIC U, DELIKARAOGLOU S, et al. Stochastic unit commitment in low-inertia grids[J]. IEEE Transactions

- on Power Systems . 2020 , 35(5) : 3448-3458 .
- [71] JAVADI M , AMRAEE T , CAPITANESCU F . Look ahead dynamic security-constrained economic dispatch considering frequency stability and smart loads[J] . International Journal of Electrical Power & Energy Systems , 2019 , 108 : 240-251 .
- [72] DING T , ZENG Z , MING Q , et al . Two-stage chance-constrained stochastic unit commitment for optimal provision of virtual inertia in wind-storage systems[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2021 , 36(4) : 3520-3530 .
- [73] 李世春 , 涂杰 , 舒征宇 , 等 . 促进调峰的大规模风电调频备用容量动态配置策略[J] . 电力系统自动化 . 2020 , 44(24) : 53-66 .
LI Shichun , TU Jie , SHU Zhengyu , et al . Dynamic configuration strategy for frequency regulation reserve capacity of large-scale wind power for promoting peak load regulation[J] . Automation of Electric Power Systems , 2020 , 44(24) : 53-66(in Chinese) .
- [74] LIU C , DU P . Participation of load resources in day-ahead market to provide primary-frequency response reserve[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2018 , 33(5) : 5041-5051 .
- [75] LIU Y , DU W , XIAO L , et al . Sizing energy storage based on a life-cycle saving dispatch strategy to support frequency stability of an isolated system with wind farms[J] . IEEE Access , 2019 , 7 : 166329-166336 .
- [76] ZHANG Y J , ZHAO C , TANG W , et al . Profit-maximizing planning and control of battery energy storage systems for primary frequency control[J] . IEEE Transactions on Smart Grid , 2018 , 9(2) : 712-723 .
- [77] 马亦耕 , 张峰 , 丁磊 . 弃风参与电网调频的电转气-储气-燃气轮机容量优化配置方法及[J] . 电力系统自动化 , 2020 , 44(7) : 79-86 .
MA Yigeng , ZHANG Feng , DING Lei . Optimal capacity configuration of power-to-gas , gas tank and natural gas generation unit with participation of curtailed wind power in frequency regulation of power grid[J] . Automation of Electric Power Systems , 2020 , 44(7) : 79-86(in Chinese) .
- [78] ZHANG C , LIU L , CHENG H , et al . Frequency-constrained generation expansion planning with frequency support from wind farm[C]//2020 IEEE IAS Industrial and Commercial Power System Asia Technical Conference . Shandong , China : IEEE , 2020 : 1-8 .
- [79] HAO L , JI J , XIE D , et al . Scenario-based unit commitment optimization for power system with large-scale wind power participating in primary frequency regulation[J] . Journal of Modern Power Systems and Clean Energy , 2020 , 8(6) : 1259-1267 .
- [80] CAI D , MALLADA E , WIEMAN A . Distributed optimization decomposition for joint economic dispatch and frequency regulation [J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2017 , 32(6) : 4370-4385 .
- [81] YIN Y , LIU T , WU L , et al . Frequency-constrained multi-source power system scheduling against $N-1$ contingency and renewable uncertainty[J] . Energy , 2021 , 216 : 119296 .
- [82] LI H , JU P , GAN C , et al . Analytic analysis for dynamic system frequency in power systems under uncertain variability[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2019 , 34(2) : 982-993 .
- [83] 张衡 , 程浩忠 , 曾平良 , 等 . 基于随机优化理论的输电网规划研究综述[J] . 电网技术 , 2017 , 41(10) : 3121-3129 .
ZHANG Heng , CHENG Haozhong , ZENG Pingliang , et al . Overview of transmission network expansion planning based on stochastic optimization[J] . Power System Technology , 2017 , 41(10) : 3121-3129(in Chinese) .
- [84] 葛晓琳 , 刘亚 , 符杨 , 等 . 考虑惯量支撑及频率调节全过程的分布鲁棒机组组合[J] . 中国电机工程学报 , 2021 , 41(12) : 4043-4058 .
GE Xiaolin , LIU Ya , FU Yang , et al . Distributed robust unit commitment considering the whole process of inertia support and frequency regulations[J] . Proceedings of the CSEE , 2021 , 41(12) : 4043-4058(in Chinese) .
- [85] MEHRTASH M , KARGARIAN A . Risk-based dynamic generation and transmission expansion planning with propagating effects of contingencies[J] . International Journal of Electrical Power & Energy Systems , 2020 , 118 : 105762 .
- [86] CUI Y , HU Z , LUO H . Optimal day-ahead charging and frequency reserve scheduling of electric vehicles considering the regulation signal uncertainty[J] . IEEE Transactions on Industry Applications , 2020 , 56(5) : 5824-5835 .
- [87] 王霞 , 应黎明 , 卢少平 . 考虑动态频率约束的一次调频和二次调频联合优化模型[J] . 电网技术 , 2020 , 44(8) : 2858-2867 .
WANG Xia , YING Liming , LU Shaoping . Joint optimization model for primary and secondary frequency regulation considering dynamic frequency constraint[J] . Power System Technology , 2020 , 44(8) : 2858-2867(in Chinese) .
- [88] GUO Y , BOSE S , TONG L . On robust tie-line scheduling in multi-area power systems[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2018 , 33(4) : 4144-4154 .
- [89] KHODAEI A , SHAHIDEPOUR M , WU L , et al . Coordination of short-term operation constraints in multi-area expansion planning[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2012 , 27(4) : 2242-2250 .
- [90] WU Z , DU X , GU W , et al . Automatic selection method for candidate lines in transmission expansion planning[J] . IEEE Access , 2018 , 6 : 11605-11613 .
- [91] 张怡 , 张恒旭 , 李常刚 , 等 . 电力系统频率响应模式及其量化描述[J] . 中国电机工程学报 , 2021 , 41(17) : 5877-5887 .
ZHANG Yi , ZHANG Hengxu , LI Changgang , et al . Power system frequency responses pattern and its quantitative analysis[J] . Proceedings of the CSEE , 2021 , 41(17) : 5877-5887(in Chinese) .
- [92] FLEMING P A , AHO J , BUCKSPAN A , et al . Effects of power reserve control on wind turbine structural loading[J] . Wind Energy , 2016 , 19(3) : 453-469 .



张程铭

在线出版日期：2021-12-06。

收稿日期：2021-05-11。

作者简介：

张程铭(1993)，男，博士研究生，研究方向为电力系统优化规划，E-mail：zcm_sjtu@sjtu.edu.cn；

柳璐(1983)，女，通信作者，博士，副研究员，研究方向为电力系统规划与评估、输配电网协同规划运行等，E-mail：liulu52@mail.sjtu.edu.cn；

程浩忠(1962)，男，博士，教授，中国电机工程学会会士，IET Fellow，研究方向为电力系统规划、综合能源规划、电能质量、电网运行与评估等，E-mail：hzcheng@sjtu.edu.cn。

(责任编辑 王金芝)

附录 A 频率跌落最低值参数表达式

爬坡模型^[17]：

$$\Delta P_G(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{DB} \\ \frac{\Delta P_{G,max}}{T_d}(t - t_{DB}), & t_{DB} \leq t < t_{DB} + T_d \\ \Delta P_{G,max}, & t \geq t_d \end{cases} \quad (19)$$

$$f_{nadir} = f_0 - \Delta f_{DB} - \frac{\Delta P'_L}{D'} - \frac{M_{sys} \cdot \Delta P_{G,max}}{T_d \cdot D'^2} \times \log\left(\frac{M_{sys} \cdot \Delta P_{G,max}}{T_d \cdot D' \Delta P'_L + M_{sys} \cdot \Delta P_{G,max}}\right) \quad (20)$$

动态响应模型^[18]：

$$f_{nadir} = f_0 - \frac{R \Delta P_L}{DR + 1} (1 + \sqrt{1 - \xi^2} \alpha e^{-\xi w_n t_{nadir}}) \quad (21)$$

响应时间模型^[19]：

$$f_{nadir} = f_0 - \Delta f_{DB} - \frac{f_0 \Delta P_L}{2M_{sys} S_{B,sys} r_p} \quad (22)$$

式中： t_{DB} 、 Δf_{DB} 分别为死区时间和死区频率； $\Delta P'_L = \Delta P_L - D' \Delta f_{DB}$ ， $D' = D \cdot L_D$ ，其中 L_D 为系统总负荷； R 为同步机组调差系数， $\{\xi, \alpha, w_n, t_{nadir}\}$ 均由频率参数决定； $\Delta P_{G,max}$ 为同步机组最大一次频率响应功率； T_d 为频率响应时间； $S_{B,sys}$ 为系统基准容量； r_p 为功率增长速率。

频率响应参数：

$$\begin{cases} w_n^2 = \frac{DR + 1}{2RH T_R} \\ \xi = \frac{RDT_R + 2RH + FT_R}{2(DR + 1)} w_n \end{cases} \quad (A1)$$

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{\frac{1 - 2T_R \xi w_n + T_R^2 w_n^2}{1 - \xi^2}} \\ w_r = w_n \sqrt{1 - \xi^2} \\ \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{w_r T_R}{1 - T_R \xi w_n}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{-\xi}\right) \end{cases} \quad (A2)$$

式中： T_R 为火电机组再热时间常数； F 为高压缸做功比例； w_n 为自然振荡角频率； ξ 为阻尼比； w_r 为阻尼角频率； α 和 φ 为相关系数。

附录 B 风机减载运行模式示意及调频实现过程

风电机组不追踪最大功率工况，而增加转速从 $w_{r,0}$ 到 $w_{r,1}$ 减载运行，此时相应的输出功率从最大功率 P_{max} 下降到 P_{delo} 。最大风机转速 $w_{r,2}$ 对应最小功率 P_{min} 。可知，当风机处于减载运行点 B，通过转速控制转换到运行点 A 或者 C 均可实现调频需求，其上下一次调频功率由功率差值 $P_{max} - P_{del}$ 和 $P_{del} - P_{min}$ 决定。该方式可提供快速频率响应功率，

但处于非最大功率追踪模式，将产生可再生能源弃能，需充分协调消纳与调频两者矛盾^[27]。

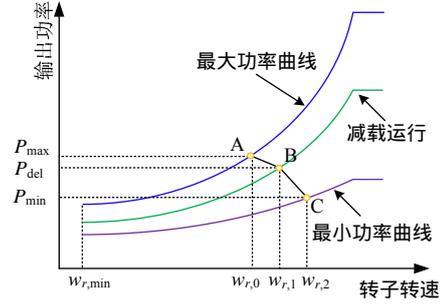


图 9 风电机组减载运行模式

Fig. 9 Deloading mode of wind turbine

附录 C 光伏机组减载运行模式示意

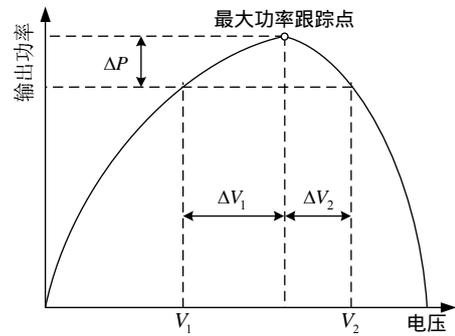


图 10 光伏减载运行模式

Fig. 10 Deloading mode of photovoltaic

附录 D 电池储能系统调频特性

表 4 电池储能系统调频特性总结

Table 4 Summary of frequency characteristics of battery energy systems

储能类型	功率/MW	容量/(MW·h)	响应时间/ms	持续时间
飞轮储能	0.1~400	≤5	≤4	≤15min
锂电池	≤50	≤20	≥40	分钟~小时
液流电池	≤50	≤60	≥40	秒~小时
铅酸电池	≤40	≤40	≥40	秒~小时
超级电容器	≤50	≤0.28	10~20	毫秒~小时