大功率缺失下频率响应负荷聚合建模与分散控制方法

陶苏朦¹,王 琦¹,赵 奇²,李亚平³,汤 突¹
(1.东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;
2.国网苏州供电公司,江苏 苏州 215004;
3.中国电力科学研究院有限公司南京分院,江苏 南京 210003)

摘要:为了充分利用海量分布的频率响应负荷资源,提出一种大功率缺失下频率响应负荷聚合建模与分散控制方法。首先,建立频率响应负荷聚合功率模型,对某省级电网典型场景下的负荷聚合潜力进行评估;在此基础上,基于离线典型场景和在线状态更新这2种方式,提出频率响应负荷分散动作策略制定方法,通过负荷分散动作响应阶段和恢复阶段的控制参数整定,实现频率响应负荷的快速响应和有序恢复;最后,通过某 省级电网算例进行仿真验证。仿真结果表明了大功率缺失下频率响应负荷分散控制策略的有效性。

关键词:频率稳定;频率响应负荷;聚合模型;分散动作策略;大功率缺失

中图分类号:TM 714

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202001032

0 引言

特高压直流工程能够实现大范围能源资源优化 配置^[1],但其单体设备输送容量巨大,一旦发生故障 将引起受端电网大功率缺失和频率快速下降。为应 对特高压直流大功率缺失故障,常优先采用加大发 电供应^[2]、多直流提升、抽蓄电站切泵等措施,在上 述措施不足以弥补缺额的情况下,则利用快速有效 但影响用户生产生活的紧急负荷控制手段进一步 弥补。

随着"源-网-荷"互动控制技术研究的深入以 及通信、量测技术的逐渐成熟,负荷可观性和可控性 增强,利用需求响应技术引导负荷快速主动响应参 与电网紧急控制成为可能。目前已有大量文献对智 能负荷侧资源如何快速参与电网调频进行了研究, 主要可以归纳为2类:需求响应资源特性建模和需 求响应资源控制策略制定。

需求响应资源特性建模主要通过了解并评估区 域电网需求响应资源的类型组成、运行特性、时空分 布特性等,建立需求响应资源单体运行特性模型和 聚合功率模型。需求响应资源研究对象主要是一些 具有灵活调节能力的负荷,能够根据系统需求短时 关断或改变控制参数,且最大限度保证用户的舒适 度体验,如文献[3]建立了空调、热水器和电动汽车 负荷的物理运行特性模型。然而,需求响应资源单 体容量较小但是数量众多,要想充分利用这些资源 参与电网调控,往往需要建立需求响应资源的聚合 功率模型,常见的聚合方法包括参数辨识法^[4]、蒙特

收稿日期:2019-05-13;修回日期:2019-12-05

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51707032) Project supported by the Youth Program of National Natural Science Foundation of China(51707032) 卡洛法^[5]、状态序列模型法^[6]、热力学等值模型数学 分析法^[7]等。此外,复杂的多时空耦合特性也是需 求响应资源参与电网调控分析的关键问题之一,文 献[8]总结了需求响应作用的日前、日内、实时等不 同时间尺度,以及单一用户、聚合商和虚拟电厂不同 空间尺度的需求响应资源模型。

需求响应资源控制策略制定主要考虑系统层级 和资源个体层级的控制方案。系统层级关注控制措 施响应容量和响应时间对全局量即频率的影响:一 方面,需要明确需求响应资源参与调频的作用范围、 调节目标和对需求响应资源的自身要求,如文献[9] 将所有发电机等效成一个频率中心,根据负荷与频 率中心的灵敏度关系设定切除阈值;另一方面,需要 保证负荷频率响应与其他频率控制措施相配合,如 文献[10]提出了一种考虑智能家电参与低频减载协 调配合方案,能够阻止频率大幅跌落并尽可能减少 切负荷代价。资源个体层级研究负荷控制架构和控 制信号的产生途径,文献[11]依据控制信号的决策 架构总结了集中式、分散式和分布式[12]这3类负荷 控制方式。集中式负荷控制[13]直接下发控制指令至 每个负荷控制终端,通信成本较高,且容易出现通信 延迟、丢包、误码等问题。分散式负荷控制[1416]通过 在负荷侧安装智能负荷控制终端,就地监测本地频 率或电压信号,依据设定的策略自主分散动作,有学 者将这种依据频率、电压信号主动响应的负荷分别 称为频率响应负荷和电压响应负荷[2]。分散式负荷 控制通信要求不如集中式负荷控制架构严苛,响应 速度快,可控性高,能辅助电力系统一次调频以及弥 补紧急故障下的功率缺额。但由于没有控制中心统 一决策,容易出现过响应或欠响应的情况。

基于上述研究背景,本文针对特高压直流闭锁 导致的大功率缺失故障场景,利用负荷分散式控制 的优点,引导可控负荷依据频率信号快速参与响应, 弥补其他控制手段在速度和控制量上的不足,重点 考虑2个关键问题:①区域电网内负荷海量分散分 布,运行参数迥异,负荷分散控制响应不确定性强, 如何通过聚合方法评估区域电网负荷的整体可调容 量是分散动作策略控制参数整定的依据:②频率响 应负荷有助于减少系统频率跌落幅度,但大量负荷 同时动作或无序动作会对电网频率造成额外冲击, 如何合理制定负荷响应和恢复阶段的控制参数实现 频率响应负荷多轮次响应是分散动作策略的关键。 为了解决上述问题,本文提出大功率缺失下频率响 应负荷聚合建模与分散控制方法,充分挖掘并利用 区域电网内频率响应负荷的聚合潜力,通过整定频 率响应负荷分散动作策略响应阶段和恢复阶段的动 作参数,实现频率响应负荷的快速响应和有序恢复, 以保证在电网出现大功率缺额时提供有效支撑。

1 频率响应负荷定义和动作条件

频率响应负荷^[2]是一类能够依据自身控制装置 (如智能插座)自动监测频率变化,通过比较系统频 率信号和设定的频率响应阈值,实现就地分散响应 参与系统频率调控的负荷。频率响应负荷和电网友 好负荷既有相关性又存在区别,两者都可以为电网 提供频率支撑。频率响应负荷主要用于解决电网的 频率问题,电网友好负荷能对电压、频率等多种问题 提供解决方案。

频率响应负荷动作条件示意图如图1所示,依 据频率信号和频率变化率信号确认大功率缺失故障 来临^[10]时,若频率响应负荷控制装置检测到系统频 率偏差 Δf 低于设定的响应阈值 Δf_{th} ,则关断与之相 连的频率响应负荷,帮助恢复电网频率,记录负荷响 应时刻为 t_{ro} 经过一段强制响应时间 t_{f} 使得频率恢 复到一次调频死区范围之内($\Delta f > \Delta f_{db}$)后,等待恢复 时延 t_{off} 结束,负荷控制装置将频率响应负荷打开,使 其继续工作。



Fig.1 Schematic diagram of action conditions of frequency response load

频率响应负荷参与调频的动作参数包括响应和 恢复2个阶段:响应阶段关注大功率缺失下调频的 快速性,在系统一次调频时间尺度范围内;恢复阶段 关注系统频率的稳定性,在系统二次调频的作用阶段,通过设置负荷恢复延时,使其在发电机的二次调频能力范围内依次有序恢复。

2 频率响应负荷聚合潜力评估

频率响应负荷单体容量较小,但是数量众多,响 应速度快,且短时间的关断对用户影响较小,因此, 其聚合功率是不容小觑的快速需求响应资源。本节 将首先建立频率响应负荷的聚合功率模型,并对某 省级电网典型场景下的聚合功率进行评估,为后续 实际电网控制策略的制定奠定基础。

2.1 频率响应负荷聚合功率模型

空调、热水器和电动汽车是典型的频率响应负荷,含空调、热水器和电动汽车的区域电网内频率响 应负荷聚合功率模型的数学描述如式(1)所示^[17]。

$$P_{\text{agg.}t} = \sum_{i=1}^{n_{\text{AC}}} S_{\text{AC},t}^{i} P_{\text{AC}}^{i} + \sum_{j=1}^{n_{\text{WH}}} S_{\text{WH},t}^{j} P_{\text{WH}}^{j} + \sum_{k=1}^{n_{\text{EV}}} S_{\text{EV},t}^{k} P_{\text{EV}}^{k} (1)$$

其中, n_{AC} 为空调数量; n_{WH} 为热水器数量; n_{EV} 为电动 汽车数量; P_{AC}^{i} 为第i台空调的响应功率; P_{WH}^{i} 为第j台热水器的响应功率; P_{EV}^{k} 为第k辆电动汽车的响应 功率; $S_{AC,i}^{i}$ 为第i台空调t时段运行状态; $S_{WH,i}^{i}$ 为第j台热水器t时段运行状态; $S_{EV,i}^{k}$ 为第k台电动汽车t时 段运行状态。

$$S_{AC,t}^{i} = \begin{cases} 0 & T_{AC,t}^{i} \leq T_{AC\min} \\ 1 & T_{AC,t}^{i} \geq T_{AC\max} \\ S_{AC,t}^{i} > T_{AC} \leq T_{AC\max} \end{cases}$$
(2)

$$S_{WH,t}^{j} = \begin{cases} 0 & T_{WH,t}^{j} \ge T_{WHmax} \\ 1 & T_{WH,t}^{j} \le T_{WHmin} \\ S_{i}^{j} & T_{WH,t}^{j} \le T_{WHmin} \end{cases}$$
(3)

$$S_{\text{EV},t}^{k} = \begin{cases} 0 \quad t < B_{\text{SOCEV}}^{k} \overrightarrow{\mathbb{D}} \quad B_{\text{SOC}}^{k} \ge B_{\text{SOCmax}} \\ 1 \quad t < B_{\text{EV},t}^{k} = B_{\text{SOC}}^{k} \overrightarrow{\mathbb{D}} \quad B_{\text{SOC}}^{k} \ge B_{\text{SOCmax}} \end{cases}$$
(4)

$$1 \quad t \ge B_{\text{SOCEV}}^k \coprod B_{\text{SOC}}^k < B_{\text{SOCmax}}$$

其中,Tⁱ_{AC,t}为第i台空调t时段室温;T_{ACmax}和T_{ACmin}分 别为空调舒适度区间最高温度和最低温度;Tⁱ_{WH,t}为 第j台热水器t时段水温;T_{WHmax}和T_{WHmin}分别为热水 器舒适度区间最高温度和最低温度;B^k_{SOCt}为第k辆电 动汽车t时段电池剩余容量;B^k_{SOCEV}为第k辆电动汽 车起始充电时间;B_{SOCmax}为预计充电结束时间时要求 达到的电池剩余容量。

2.2 典型场景下频率响应负荷聚合功率

空调、热水器和电动汽车是典型的频率响应负荷。以某省级电网为例,通过估计频率响应负荷数量及构成比例,依据所建负荷聚合功率模型,综合考虑负荷自身运行特性和用户用电习惯(负荷运行时段),对典型场景下的负荷可控容量及响应潜力进行评估。

基于某省电网公司营销和调度部门的负荷数 据以及某省2018年统计年鉴提供的人口数据,对 某实际省级电网负荷仿真数据进行如下估算。2018 年某省夏季空调负荷总量约为3000 GW,本文按中 央空调和居民空调数量1:1进行估算,通过调研 市场上商业中央空调的功率区间,假设其功率为 1500 kW/台,共1000万台。根据该省2018年统计 年鉴提供的人口数据,进而估算出该省的居民空调 负荷。已知截至2018年底该省城乡总的居民户数 大约为2400万户,城镇人口占65%,城镇家庭约有 1550万户,空调安装率约为120台/百户;农村家庭 约有850万户,空调安装率约为20台/百户。居民空 调约有2030万台,居民空调的额定功率假设为750 W/台,空调不同季节不同时刻具有不同的在线率; 热水器额定功率为3 kW/台,约1000万台,用户大 量用水起始时间和用水量符合正态分布;电动汽车 额定功率为4 kW,约250万辆,电动汽车初始充电时 间、荷电状态(SOC)值及充电目标符合正态分布。

根据聚合模型可得到某省级电网典型季节居民 负荷群体参与需求响应的聚合功率曲线,如图2所 示,以此为针对频率响应负荷在夏、冬和春秋季的 评估结果。由响应曲线可知:不同负荷群的响应能 力并非固定值,而是一个时变量;负荷聚合功率有一 定的季节特殊性;在晚高峰时段负荷响应潜力较大。 由于直流闭锁导致的短时大功率缺额故障发生时段 并不固定,分析典型场景下典型日的时变聚合功率 具有现实意义。





3 频率响应负荷分散动作策略

在完成频率响应负荷聚合功率建模的基础上, 本节将制定合理的频率响应负荷分散控制策略,通 过整定负荷控制器中的控制参数,引导频率响应负 荷快速有序参与调频,保证在电网大功率缺失故障 时提供有效支撑,减弱系统频率的跌落程度,同时避 免对系统频率造成二次冲击。

3.1 频率响应负荷分散动作策略总体思路

频率响应负荷分散动作策略考虑不同负荷控制 架构和控制信号传输通道建设情况,分为有负荷通 信通道下的混合控制策略和无负荷通信通道下的离 线控制策略。

当有负荷通信通道时,分散动作策略将包括控制中心和智能终端两层混合控制逻辑。控制中心可 以每隔一段时间(比如10 min)滚动采集智能终端信息,确定当前频率响应负荷初始状态以及额定功率, 评估当前整体的可响应负荷量以及每个负荷个体的 可响应功率;在完成信息采集和潜力评估的基础上, 控制中心统一计算负荷控制参数(包括响应阈值Δf_t和恢复时延t_{of})和控制优先级,并将指令提前下发到 智能终端,由智能终端依据本地检测到的频率值对 个体负荷进行执行控制。整个过程中,控制中心负 责信息采集、潜力评估和决策控制,智能终端负责执 行控制。

当无负荷通信通道时,分析电网典型运行状态, 综合考虑负荷的运行特性和用户用电习惯,通过蒙 特卡洛法仿真得到四季典型场景下的负荷聚合功 率。然后依据每一季节典型场景下各时刻点的聚合 功率值离线计算负荷控制参数,并将多个场景下的 负荷控制参数以时间触发的形式预先嵌入智能终端 控制模块,装置内的负荷控制参数将随时间灵活切 换,智能终端依据离线整定的负荷控制参数进行分 散响应。本文对某实际电网负荷参数(负荷数量、比 例构成等)进行估算,得出不同季节典型日的负荷聚 合曲线;以1h为时间间隔,则每个季节的每一天有 24 套离线阈值;负荷控制装置通过抓取当前时间句 柄,判断其所处的四季状态以及时刻状态,从而切换 频率阈值。若电网负荷分场景较为复杂,可通过聚 类算法进行场景筛选分类,减少离线阈值设置的总 套数。

3.2 响应 / 恢复阶段负荷控制参数计算方法

频率响应负荷控制参数计算主要包括如下 步骤。

(1)确定负荷参与一次调频的最大频率偏差量 Δf_{prmax} 。根据系统频率响应模型^[18],系统最大频率跌 落幅度 $\Delta \omega_{max}$ 与系统功率不平衡量阈值 $P_{threshold}$ 的关 系如式(5)—(11)所示。

$$P_{\text{threshold}} = \frac{\Delta\omega_{\text{max}}(DR + K_{\text{m}})}{R\left[1 + \alpha e^{-\zeta \omega_{n} t_{z}} \sin(\omega_{r} t_{z} + \phi)\right]}$$
(5)

$$\omega_{\rm n}^2 = \frac{DR + K_{\rm m}}{2HRT_{\rm R}} \tag{6}$$

$$\zeta = \frac{2HR + (DR + K_{\rm m}F_{\rm H})T_{\rm R}}{2(DR + K_{\rm m})}\omega_{\rm n}$$
(7)

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 - 2T_{\rm R}\zeta\omega_{\rm n} + T_{\rm R}^2\omega_{\rm n}^2}{1 - \zeta^2}} \tag{8}$$

$$\omega_{\rm r} = \omega_{\rm n} \sqrt{1 - \zeta^2} \tag{9}$$

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = \arctan \frac{\omega_r T_R}{1 - \zeta \omega_n T_R} - \arctan \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{-\zeta} (10)$$

$$t_{z} = \frac{n\pi - \phi_{1}}{\omega_{r}} = \frac{n\pi}{\omega_{r}} + \frac{1}{\omega_{r}} \arctan \frac{\omega_{r} T_{R}}{\zeta \omega_{n} T_{R} - 1} \quad (11)$$

其中,D为发电机等效阻尼系数;H为惯性常数;R为 转差系数;K_m为备用系数;F_H为原动机高压缸做功 比例;T_R为原动机再热时间常数; ω_n 为系统自然频 率; ζ 为系统阻尼比; ω_r 为系统阻尼振荡频率; t_z 为频 率最低点出现时间;n为整数。式(7)是计算考虑频 率响应负荷响应后系统频率跌落的最低点。

$$\Delta f_{\text{prmax}} = \frac{(P_{\text{threshold}} + P_{\text{DR}})R\left[1 + \alpha e^{-\zeta \omega_{n} t_{z}} \sin\left(\omega_{x} t_{z} + \phi\right)\right]}{DR + K_{\text{m}}}$$
(12)

其中,P_{DR}为参与电网调频的实际频率响应负荷量。

(2)确定需要频率响应负荷参与响应的负荷量 P_{DRN} 。由功率缺额 ΔP 和当前已有调节措施多直流 提升调整量 P_{D} 、抽蓄电站切泵调整量 P_{c} 、精准切负 荷调整量 P_{EL} (毫秒级)以及一次调频的调整量 P_{PF} 确 定 P_{DRN} 。

$$P_{\rm DRN} = \Delta P - P_{\rm D} - P_{\rm C} - P_{\rm EL} - P_{\rm PF}$$
(13)

(3)根据当前需要频率响应负荷参与响应的负荷量 P_{DRN} 和当前负荷最大可响应潜力 P_{DRmax} ,确定当前频率响应负荷参与响应的实际负荷量 P_{DR} 。若 $P_{DRN} \ge P_{DRmax}$,则令当前频率响应负荷参与响应的实际负荷量 $P_{DR} = P_{DRmax}$;若 $P_{DRN} < P_{DRmax}$,则令当前频率响应负荷参与响应的实际负荷量 $P_{DR} = P_{DRN}$ 。

(4)根据参与电网调频的实际频率响应负荷量确定参与电网调频的响应负荷,并使其停止运行。将电网中全部负荷组按其可响应功率的大小降序排列,依次确定序列中各负荷的频率阈值,并将频率阈值高于当前电网频率偏差的负荷作为参与电网调频的响应负荷。第τ组频率响应负荷频率动作阈值计算方法如下:

$$\Delta f_{\rm th}(\tau) = \Delta f_{\rm db} - \frac{(\Delta f_{\rm db} - \Delta f_{\rm prmax}) \sum_{\lambda=1}^{\kappa} P_{\lambda}}{P_{\rm DR}} \quad (14)$$

其中, Δf_{db} 为负荷参与一次调频的死区频率; $\lambda \in [1, \tau]$, P_{λ} 为第 λ 组负荷的可响应功率。

(5)当电网频率达到最低点时,参与电网调频的 响应负荷根据其对应的最小关断时间启动运行。将 参与电网调频的响应负荷按其可响应时间降序排 列,依次确定序列中各负荷组的最小关断时间,当电 网的当前频率恢复到一次调频死区之内,则将所述 参与电网调频的响应负荷在经过其对应的最小关断 时间后恢复工作。第σ组频率响应负荷最小关断时 间为:

$$t_{\rm off}(\sigma) = t_{\rm f} + \sum_{q=1}^{\sigma} P_q / k_{\rm re}$$
(15)

其中, t_{f} 为负荷强制响应时间,从该时间点后负荷依次恢复; $q \in [1,\sigma]$, P_{q} 为第q组参与调频的负荷可响应功率; k_{re} 为负荷梯度恢复系数,可依据发电机的二次调频能力设定。

需要说明的是,根据 P_{DR} 和 Δf_{pmax} 按梯度设定不同批次智能插座的响应启动频率和延时参数,可以 获得类似发电机一次调频的比例控制效果。不同批 次智能插座依据设定的频率阈值就地参与响应,逐 次累积弥补功率缺额,避免一次性全响应造成新的 频率扰动。当频率快速跌落时,达到动作阈值的负 荷批次均可参与响应;如果已响应批次的负荷响应 量已抬升频率,并且高于剩余批次的负荷动作阈值, 则剩余批次的负荷将不再动作。这种负荷分批次逐 次累积响应功率缺额的思路,类似于低频减载逻辑, 是保证负荷不过切的一种手段;并且频率响应负荷 能够快速响应,所以频率阈值之间的级差可以很小, 频率响应负荷可以分为更多批次,设定梯度动作 阈值。

3.3 分散动作策略整体思路及流程

频率响应负荷快速参与调频的分散动作策略, 整体思路流程图如附录中图A1所示。具体包括如 下步骤。

(1)电力系统调度控制中心离线仿真预想故障, 确定预想故障下的大功率缺额 ΔP_m 以及频率最大跌 落 Δf_m ,考虑多直流提升、抽蓄电站切泵、精准切负荷 等多种预调度措施,确定需要频率响应负荷抬升的 频率偏差 Δf_{DR} ,并基于系统频率响应模型,计算各预 想故障下需要参与响应的频率响应负荷总量。

(2)分析电网典型运行状态(四季运行方式、白 天夜晚、工作日、休息日等),依据典型场景离线计算 分散响应阈值,将多个场景下的阈值以时间触发的 形式预先嵌入智能终端控制模块,装置内的阈值将 随时间灵活切换。

(3)控制中心根据当前电网运行态势,确定当前 最可能出现的大功率缺失故障,并进行在线匹配,确 定当前需要频率响应负荷参与响应的负荷量PDBN。

(4)负荷智能终端依据实际运行工况,实时采集 负荷运行状态、温度、功率等信息,并将用户负荷信 息实时上传至控制中心(如10 min / 次),由控制中 心实时评估当前负荷响应潜力,即最大可响应功 率P_{DBmax}。

(5)通过比较预调度需要的 P_{DRN}和当前 P_{DRmax}, 确定当前频率响应负荷参与响应的实际负荷量 P_{DR},

第40卷

(6)结合 P_{DR} 以及每组负荷的响应潜力及可响应 功率,每10 min 计算一次 N 批智能终端的控制参数, 包括不同频率动作阈值 Δf_{th} 、动作延时 t_d (≥1 s)、负荷 恢复延时 t_{off} ,系统将数据送出安全区之后通过公网 下发到各个智能插座。

(7)智能终端确定频率响应负荷分散动作的频 率阈值,若控制中心在线更新频率阈值,则优先采用 在线频率阈值;若控制中心未下发频率阈值,则采用 默认的离线频率阈值。

(8)智能终端就地实时量测系统频率,并根据当前 在线或离线频率阈值,进行分散动作,当检测到本地频 率f小于响应启动频率f_s后,延时t_d,再反时限切除 所接负荷,待恢复延时t_d,可后,再依次有序恢复负荷。

4 算例仿真

4.1 基于典型场景的离线阈值设定

本文模拟某区域地区直流双极闭锁故障,损失 7.50 GW 功率后的频率变化过程,故障发生后频率 快速跌落至49.3 Hz以下。

已知锦苏直流所在区域电网相关参数数值^[2]为: D=1.5, R=0.165, H=150, $K_m=82$, $\alpha=1.213$, $\phi_1=50.5^\circ$, $\phi_2=-52.6^\circ$, $\phi=103.1^\circ$ 。上述参数通过实际电网参数 等值得到。

当 t_z =11.8 s、 $P_{threshold1}$ =-7.5 GW时,计算可得 $\Delta \omega_{maxl}$ = -0.75 与锦苏直流闭锁故障参数一致。假设现阶段, 负荷聚合潜力功率小于功率缺额 ΔP ,评估每一典型 场景下频率响应负荷的聚合潜力为 P_{DR} ;考虑总量为 P_{DR} 的频率响应负荷响应,依据频率响应负荷分散控 制策略,计算每一典型场景下10组负荷各自的频率 响应阈值。本算例中阈值基于2.2 节中夏、冬、春秋 季14:00 的聚合功率值设定。

依据功率比例分配法可计算全部可响应负荷参与响应后系统频率的最低点 Δf_{prmax} , 计算方法如式 (16)所示。

$$\Delta f_{\text{prmax}} = (P_{\text{loss}} - P_{\text{DR}}) \Delta f_{\text{max}} / P_{\text{loss}}$$
(16)
其中, Δf_{max} 为无负荷参与响应情况下系统频率最低

点;Ploss为系统功率缺额值。

4.2 频率响应负荷分散动作策略仿真验证

设置频率响应死区 Δf_{db} =-0.2 Hz,负荷参与响应 后的频率最大跌落值 Δf_{pmax} 依据不同场景下的频率 响应负荷响应量计算确定;频率响应负荷分为N=10 组参与频率响应,频率最大跌落值 Δf_{pmax} 和各组负荷 的启动阈值 Δf_{tb} 计算结果如附录中表A1所示,仿真 得到不同场景下的频率响应曲线和响应功率总量曲 线分别如图3所示。其中,虚线波形为未考虑频率 响应负荷参与的频率响应曲线,其余波形为不同典



Fig.3 Frequency and power curves with different load response capacity

型场景下考虑频率响应负荷参与的响应曲线。

由图3可知,在响应阶段,10s故障发生后频率 快速跌落,很快达到各组负荷的启动阈值;夏季时, 负荷响应总量为5GW,可以将频率最低点抬升到 49.6 Hz;冬季情况下,负荷响应总量为4GW,频 率最低点被抬升到49.5 Hz;春秋季负荷响应总量为 3GW时,频率最低点可以提升到49.4 Hz。根据负 荷依次恢复的时间和容量,在负荷恢复的时段,频率 波动很小。仿真结果表明,负荷分散动作策略可以 实现负荷的快速响应和有序平滑恢复。

4.3 单步响应与多步响应比较

为了进一步验证频率响应负荷分散动作策略的 有效性,设计负荷单步阶跃响应和负荷多轮次响应 的比较算例,仿真结果如图4所示。负荷响应总量 为4GW,多步响应的控制参数设定与夏季的参数相 同;单步响应的启动频率阈值为Δf_{th}=-0.4 Hz。仿真 结果表明,在响应阶段,采取多步响应策略时的频率 最低点高于单步响应策略;在恢复阶段,一次性恢复 所有的频率响应负荷,会对频率造成二次冲击,但梯 度依次恢复负荷可以实现频率平滑恢复。



Fig.4 Comparison of frequency curves between single step response and multi-step response

186

对于多步响应,进一步分析负荷控制参数(负荷恢复速率)设置对恢复效果的影响,对比试验参数设置如下:第一组负荷恢复速率k_e=0.01,其频率响应曲线如图3所示;第二组负荷恢复速率k_e=0.05,其频率响应曲线如图5所示。比较可知,2种负荷恢复速率下,频率响应负荷均呈现梯度恢复特性,但当k_e=0.01时,负荷恢复较为平稳;当k_e=0.05时,负荷恢复 产生了新的频率冲击。2种情况本质差别在于负荷恢复速率是否与发电机二次调频速率相匹配。



Fig.5 Frequency curves with different total load response capacity

4.4 负荷响应延时对系统频率响应的影响

为了进一步考虑负荷延时对频率响应特性的影响,本文设置了3组不同的负荷响应延时分布,并比较3种情况下频率响应特性曲线,如图6所示。当负荷响应延时服从分布 T_{delay}~N(0,100) ms 时,系统频率稳态值和无负荷响应延时的情况一致,但由于延时的存在导致负荷不能及时响应,从而导致系统频率最低点提升效果不及无负荷响应延时的情况;当负荷响应延时服从分布 T_{delay}~N(100,200) ms 时,负荷响应延时较大,有一部分负荷可能当系统频率已经达到最低点后尚未达到自身的响应阈值而错过响应,实际负荷响应总量小于计划负荷响应量,系统频率最低点和系统频率稳态值均低于无负荷响应延时的情况。





Fig.6 System frequency response characteristic curves under different load response delays

5 结论

本文提出了一种频率响应负荷聚合功率建模方 法和分散动作策略,通过聚合频率响应负荷资源,基 于离线场景分析和在线状态更新2种方法设定负荷 启动阈值和恢复时延控制参数,有效引导负荷快速 响应和有序恢复,为负荷主动快速响应应对大功率 缺失提供了灵活方案。本文得到的主要结论如下:

(1)通过聚合功率建模方法,可以对区域电网内 频率响应负荷的调节潜力进行评估;

(2)本文所提负荷分散控制策略可有效减少大 功率缺失下系统频率的跌落程度,作为现有电网频 率紧急控制措施的补充;

(3)在恢复阶段,需要依据电网发电机的二次调频能力设置合适的恢复速率,以保证不对电网频率 产生二次冲击。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- 刘振亚,张启平,董存,等.通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J].中国电机工程 学报,2014,34(16):2513-2522.
 LIU Zhenya,ZHANG Qiping,DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects
- [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2513-2522.
 [2] 韩冰,姚建国,於益军,等.负荷主动响应应对特高压受端电网 直流闭锁故障的探讨[J].电力系统自动化, 2016, 40(18): 1-6.
 HAN Bing, YAO Jianguo, YU Yijun, et al. Discussion on ac-

tive load response at receiving end power grid for mitigating UHVDC blocking fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18):1-6.

- [3] SHAO S,PIPATTANASOMPORN M,RAHMAN S. Development of physical-based demand response-enabled residential load models[J]. IEEE Transactions on Power System, 2013, 28(2): 607-614.
- ZHOU J,ZHANG J,YANG Y, et al. Dynamic aggregation method of induction motors based on coherent characteristics [J]. Advanced Materials Research, 2012,960-961(2):1214-1224.
- [5] NING J, TANG Y, GAO B. A time-varying potential-based demand response method for mitigating the impacts of wind power forecasting errors[J]. Applied Science, 2017, 7(12):1132-1152.
- [6] 高赐威,李倩玉,李扬. 基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和 控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(10):1546-1555.
 GAO Ciwei, LI Qianyu, YI Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(10):1546-1555.
- [7] 李亚平,姚建国,雍太有,等. 居民温控负荷聚合功率及响应潜 力评估方法研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(19):5519-5528,5829.

LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19):5519-5528, 5829.

- [8]杨旭英,周明,李庚银.智能电网下需求响应机理分析与建模 综述[J].电网技术,2016,40(1):220-226.
 YANG Xuying, ZHOU Ming, LI Gengyin. Survey on demand response mechanism and modeling in smart grid [J]. Power System Technology,2016,40(1):220-226.
- [9]杨德友,蔡国伟.减载控制灵敏度及其在广域低频保护中的应用[J].电力自动化设备,2016,36(3):124-128,135.
 YANG Deyou, CAI Guowei. Load shedding control sensitivity

and its applications in wide-area low-frequency protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 124-128, 135.

- [10] 汤奕,邓克愚,孙华东,等. 智能家电参与低频减载协调配合方案研究[J]. 电网技术,2013,37(10):2861-2867.
 TANG Yi,DENG Keyu,SUN Huadong, et al. Research on coordination scheme for smart household appliances participating under frequency load shedding[J]. Power System Technology, 2013,37(10):2861-2867.
- [11] VARDAKAS J S, ZORBA N, VERIKOUKIS C V. A survey on demand response programs in smart grids: pricing methods and optimization algorithms [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 152-178.
- [12] MALIK A, RAVISHANKAR J. A hybrid control approach for regulating frequency through demand response[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1347-1362.
- [13] 孙毅,李泽坤,刘迪,等.可控负荷参与低频减载的动态集群优 化控制策略[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1913-1921, 2207.

SUN Yi, LI Zekun, LIU Di, et al. An optimization control strategy for intelligent UFLS using dynamically aggregated controllable loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1913-1921, 2207.

- [14] 廖正海,李利娟,刘红良,等. 电网友好型多用电设备协调控制模型与策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):208-214.
 LIAO Zhenghai, LI Lijuan, LIU Hongliang, et al. Coordinated control model and strategy for grid friendly multi-household applications[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):208-214.
- [15] 杨健维,董鸿志,廖凯,等. 计及电动汽车辅助调频的负荷频率 控制联合优化[J]. 电力自动化设备,2019,39(3);200-206. YANG Jianwei,DONG Hongzhi,LIAO Kai,et al. Joint optimization of load frequency control considering auxiliary frequency regulation of electric vehicles [J]. Electric Power Automation

Equipment, 2019, 39(3): 200-206.

- [16] BENYSEK G, BOJARSKI J, SMOLENSKI R, et al. Application of stochastic Decentralized Active Demand Response (DADR) system for load frequency control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2):1055-1062.
- [17] TANG Y, CHEN Q, NING J, et al. Hierarchical control strategy for residential demand response considering time-varying aggregated capacity[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 97:165-173.
- [18] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3):720-729.

作者简介:



陶苏朦(1995—),女,江苏淮安人,硕 士研究生,主要研究方向为需求响应与频率 管理(E-mail:taosumeng@seu.edu.cn);

王 琦(1989—),男,江苏南通人,讲 师,博士,主要研究方向为电力系统稳定分 析与控制、电网信息物理系统等(E-mail: wangqi@seu.edu.cn);

陶苏朦

赵 奇(1989—),男,江苏苏州人,工 程师,主要研究方向为电力系统自动化

(**E-mail**:qzhao1989@163.com);

李亚平(1981—),女,江苏徐州人,高级工程师,博士,主 要研究方向为智能电网互动运行控制(E-mail:liyaping@epri. sgcc.com.cn);

汤 奕(1977—),男,江苏溧阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、新能源并网等(E-mail:tangyi@seu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Aggregation modeling and decentralized control method of frequency response load under severe power shortage

TAO Sumeng¹, WANG Qi¹, ZHAO Qi², LI Yaping³, TANG Yi¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China;

3. China Electric Power Research Institute(Nanjing), Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to make full use of the massively distributed frequency response load resources, a method of aggregation modeling and decentralized control of frequency response load under severe power shortage is proposed. Firstly, the load aggregation model is established and evaluated under typical scenarios of an actual district power grid. On this basis, a reasonable decentralized control strategy for frequency response load is formulated. The control parameters are preset based on the offline typical scenarios or online status update, to make frequency response loads response quickly and recover sequentially and provide effective support for severe power shortage. Finally, the effectiveness of proposed decentralized control strategy for frequency for frequency response loads under severe power shortage is verified by the simulation of actual district power grid.

Key words: frequency stability; frequency response load; aggregation model; decentralized action strategy; severe power shortage







图 A1 频率响应负荷快速参与调频的分散动作策略流程图



Table A1 Offline threshold setting for four different season scenarios (Δf_{db} =0.2, N=10)												
季节	$P_{\rm DR}$	Δf_{prmax}	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
		(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)
夏	5GW	-0.25	49.795	49.790	49.785	49.780	49.775	49.770	49.765	49.760	49.755	49.750
冬	4GW	-0.35	49.785	49.770	49.755	49.740	49.725	49.710	49.695	49.680	49.665	49.650
春秋	3GW	-0.45	49.775	49.750	49.725	49.700	49.675	49.650	49.625	49.600	49.575	49.550

表 A1 不同场景下(四季)的离线阈值设定($\Delta f_{db}=0.2$, N=10)