

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.015

计及节点及资源灵敏度的源网荷协同互动精准调控方法

钟永洁^{1,2}, 纪陵^{1,2}, 刘文彪^{1,2}, 杨乘胜^{1,2}, 余洋³, 王紫东^{1,2}

(1. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153; 2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032; 3. 华北电力大学(保定)(新能源电力系统全国重点实验室), 河北 保定 071003)

摘要:源网荷协同互动及高灵敏度的可调资源精准调控对提升新型电力系统调节能力及有效性,促进新型电力系统高效、可靠运行有重要作用。因此,文中提出计及节点及资源灵敏度的源网荷协同互动精准调控方法。首先,从电网应用需求和节点可调资源2个角度阐述双层灵敏度分析方法总体思路,构建区域源网荷协同互动精准调控平台分层逻辑架构,以实现和应用双层灵敏度模型和精准调控方法。其次,面向电网侧提出第一层电力支路灵敏度分析模型,获得电力支路灵敏度矩阵,进一步对电力节点下聚合的多元化可调资源建立细粒度的第二层可调资源灵敏度分析模型,完成对可调资源调控灵敏度量化排序。然后,详细设计双层灵敏度分析结果的应用流程,明确对源、荷的调控序列及调控量。最后,通过算例分析验证所提模型和方法的有效性、合理性。结果表明,所提精准调控方法在解决电网多场景应用需求时能够精确选出高灵敏度节点,并有效排序出高灵敏度可调资源。

关键词:新型电力系统;灵敏度;网荷互动;可调资源;线路过载;层次结构

中图分类号:TM73;TK01

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)05-0159-09

0 引言

随着“碳中和、碳达峰”目标的持续推进,新型电力系统建设及发展成为电力能源的主战场和主力军^[1-5],构建新型电力系统是建设新型能源体系的重要内容,源、网、荷、储协同优化调控是其中的关键要素^[3,6-11],深入研究多元化可调资源特性及源网、网荷、源网荷协同互动和精准调控已成为当前技术热点^[6,12-15]。

新型电力系统建设背景下,负荷侧蕴藏着大量多元化、分散式、可调节的灵活性资源,迫切需要调动负荷侧可调资源,实现区域源网荷协同友好互动^[8,16-20],将分布式多元化的可调资源动态精准地映射、匹配到区域电网拓扑中,打造源网荷深度耦合关系图,对增强源荷互补能力、实现荷随网动、源网荷协同互动、大幅提升新型电力系统运行弹性和快速有效调节能力等至关重要^[14,21-23]。传统电网调度主要从电源侧入手,执行“电源调度”,通过调度常规发电机组,跟踪电力负荷曲线,实现和维持系统发电功率与用电负荷的实时平衡,而这方面技术与资源一直在被挖掘,提升空间越来越小^[4,14,20]。传统调度运行方式已难以应对“双高”的新型电力系统建设带来的挑战,迫切需要转变现有运行调控

模式,突破相应的关键技术^[7,15,21]。新的调度技术重点从负荷侧着手,开展“负荷调度”,在电网发生故障时,实现电源、电网、负荷之间的快速协调和控制,从根本上解决应急状态下电力供需实时平衡和运行安全问题^[4,12-13,19]。

为支撑新型电力系统调度运营,需要研究源网荷协同互动的建模方法与调控方法^[16,24-28]。目前,国内外已开展一些基础性研究并取得部分研究成果。文献[5]以碳排放和成本为目标,提出计及多利益方博弈的源网荷储协同优化运行方法,实现源网荷储协同优化调度。文献[7]分析电力系统灵活性需求及源网荷储灵活性供给特性,提出一种计及源网荷储综合灵活性的电力系统日前优化调度方法。文献[14]为解决现有的负荷削减模型存在的问题,综合考虑负荷重要程度和计及设备电气耦合关系的临近原则,提出一种基于灵敏度分析的负荷削减模型。文献[20]为挖掘需求侧调节潜力,设计一种基于工业负荷需求响应的滚动调度方法框架,构建多时间尺度滚动调度优化模型。文献[22]剖析新能源高比例应用中电力调度实施电力电量平衡业务面临的新挑战及问题,提出一种采用时间维度逐次分层递进解耦优化的电力电量平衡优化调度分析方法。

综上,已有研究主要集中于源网荷、源网荷储协调互动在挖掘需求侧调节潜力、分析电量平衡等特定场景中的应用,缺乏对多类型负荷的综合性能禀赋的精确调控量化评估,缺乏从源网荷互动角度

收稿日期: 2025-02-14; 修回日期: 2025-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077078); 2023年度重点产品、工艺“一条龙”应用示范方向(全国产安全可控发电控制和一体化监管系统)

开展电力系统电力节点及节点下聚合的可调资源的灵敏度分析、网荷互动的高灵敏度精确调控方法的深入研究。基于此,文中提出:(1)从电网调控平台出发设计双层灵敏度分析应用流程,阐述双层灵敏度分析技术平台逻辑架构,解决源网荷协同互动精准调控方法在工程场景中应用实施的问题;(2)构建电力支路灵敏度分析模型和可调资源灵敏度分析模型,实现对电力节点和负荷资源的灵敏度精准量化评判;(3)阐述双层灵敏度分析结果的应用方法,并通过算例进行验证分析,表明所提模型和方法的有效性、合理性和实用性。

1 双层灵敏度分析总体思路

双层灵敏度分析总体思路如图1所示。第一层灵敏度分析从电网应用需求出发,根据节点灵敏度大小,排序出调用的节点顺序;第二层灵敏度分析从节点可调节资源出发,根据可调节资源灵敏度大小,排序出调用的可调节资源顺序。

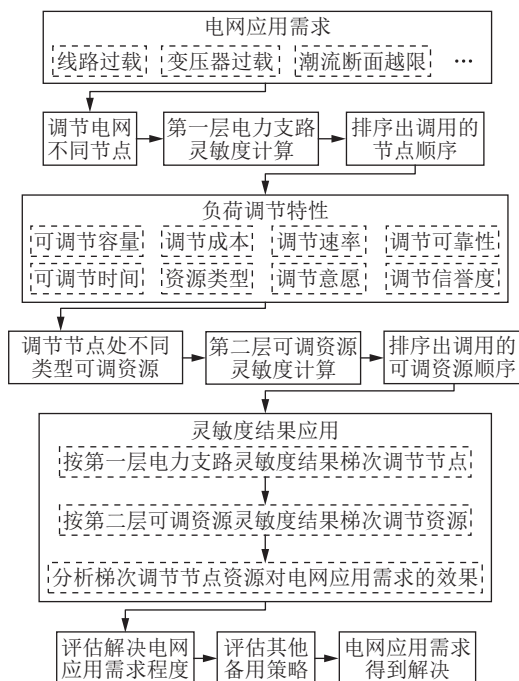


图1 双层灵敏度分析总体思路
Fig.1 Overall idea of double-layer sensitivity analysis

根据双层灵敏度分析结果进行节点资源调节,实现电网应用需求目标。开展双层灵敏度分析的主要驱动力为电网的实际应用需求场景,这些实际应用需求场景包括某条线路传输功率过载、某变压器带载过载、系统某潮流断面越限等。在明确双层灵敏度分析总体思路的基础上,构建区域源网荷协同互动精准调控平台,实现双层灵敏度分析。双层灵敏度分析技术平台逻辑架构如图2所示。

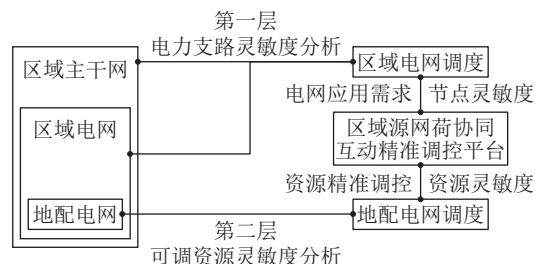


图2 双层灵敏度分析技术平台逻辑架构
Fig.2 Technology platform logic architecture of double-layer sensitivity analysis

区域电网调度分析区域主干网、区域电网的应用需求,并与区域源网荷协同互动精准调控平台进行信息交互;地配电网调度分析地配电网的资源特性、资源拓扑分布等,并与区域源网荷协同互动精准调控平台进行信息交互;区域源网荷协同互动精准调控平台支撑区域电网调度分析节点灵敏度,挖掘地配电网资源应用潜力及灵敏度,实现电网应用需求与调控资源的精准匹配。

区域调度根据电网潮流信息发出具体的线路过载、变压器过载、潮流断面越限等实际应用需求,在电网应用需求明确的基础上,进行第一层电力支路灵敏度分析。第一层电力支路灵敏度分析计算可以采用调度给定法和直接计算法,2种方式在不同的工程实践应用中根据需求可灵活选择使用。

2 第一层电力支路灵敏度分析模型

上述2种方式计算第一层电力支路灵敏度时均需要构建底层数学模型,文中从直接计算法的角度进行模型构建。对于中高压电力系统,有 n 个电力节点, b 条支路,采用直流潮流法求解电力系统潮流,则第一层电力支路灵敏度分析模型构建过程具体如下。

2.1 节点的注入功率

对于任意节点,节点的注入功率为:

$$P_i^{\text{sp}} = P_i^{\text{gen}} - P_i^{\text{load}} = \sum_{j \in \Omega} P_{i,j} = \sum_{j \in \Omega} \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{i,j}} \quad (1)$$

式中: P_i^{sp} 为电力系统中节点 i 的注入功率; P_i^{gen} 为电力系统中节点 i 上电源注入有功功率; P_i^{load} 为电力系统中节点 i 上负荷有功功率; $P_{i,j}$ 为首端节点为 i 、末端节点为 j 的支路的有功功率; $x_{i,j}$ 为支路电抗; θ_i 、 θ_j 分别为节点 i 、 j 电压相角; Ω 为所有与 i 直接相连的节点集合。

2.2 支路的有功功率

对于任意一条支路,支路的有功功率为:

$$P_{i,j} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{i,j}} \quad (2)$$

2.3 节点的注入功率矩阵化

对于一个电力系统,其节点的注入功率矩阵化形式为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}^{\text{sp}} = \mathbf{B}\boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\theta} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{P}^{\text{sp}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{P}^{\text{sp}}$ 为节点的注入功率矩阵; $\boldsymbol{\theta}$ 为电压相角矩阵; $\mathbf{B}$ 为改进型电纳矩阵, 其对角元素为正数, 非对角元素为负数。

2.4 支路的有功功率矩阵化

对于一个电力系统,其支路的有功功率矩阵化形式为:

$$\mathbf{P}_r = \mathbf{P}_{i,j} = \mathbf{J}_r \boldsymbol{\Phi} = \mathbf{J}_r \mathbf{C} \boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}_r \mathbf{C} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{P}^{\text{sp}} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{P}_r$ 为支路潮流矩阵; $\mathbf{P}_{i,j}$ 为支路有功功率矩阵; $\mathbf{J}_r$ 为支路电纳组成的对角矩阵; $\mathbf{C}$ 为支路-节点网络关联矩阵; $\boldsymbol{\Phi}$ 为线路支路两端相角差组成的矩阵。

2.5 支路功率对节点功率的灵敏度

对于一个电力系统,其支路功率/潮流断面对节点功率的灵敏度矩阵化形式为:

$$\mathbf{S}_{\text{sp}}^r = \frac{\partial \mathbf{P}_r}{\partial \mathbf{P}^{\text{sp}}} = \mathbf{J}_r \mathbf{C} \mathbf{B}^{-1} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{S}_{\text{sp}}^r$ 为任意节点的注入功率对支路/潮流断面的有功功率灵敏度矩阵, 简称支路灵敏度矩阵。

2.6 支路灵敏度算法归纳总结

根据以上分析, 支路灵敏度算法归纳总结为:

(1) 选定平衡节点, 作为电压相角参考点; (2) 根据电力网络及拓扑关系求得支路电纳组成的对角矩阵 $\mathbf{J}_r$ 、支路-节点网络关联矩阵 $\mathbf{C}$ 、改进型电纳矩阵 $\mathbf{B}$ 的逆矩阵 $\mathbf{B}^{-1}$; (3) 根据 $\mathbf{J}_r$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{B}^{-1}$, 求得支路灵敏度矩阵 $\mathbf{S}_{\text{sp}}^r$; (4) 根据 $\mathbf{S}_{\text{sp}}^r$, 对灵敏度进行排序, 选出资源优先调节的电力节点; (5) 进入第二层可调资源灵敏度计算。

3 第二层可调资源灵敏度分析模型

在电网应用需求场景确定且调节的具体节点排序已知的情况下, 对同一个节点下不同的可调负荷资源进行灵敏度分析。综合考虑可调负荷资源的负荷调节特性, 包括可调节容量、调节成本、历史调节信誉度、调节速率、可调节持续时间、资源类型、历史调节可靠性、可调节资源参与调节意愿、可调节控制程度等。

建立第二层可调资源灵敏度计算模型, 其结构如图3所示。考虑负荷调节特性, 对其进行规范化统一评估, 灵敏度计算模型形成每个可调资源对应的资源特有灵敏度, 根据可调资源灵敏度大小, 排序调用可调节负荷资源。

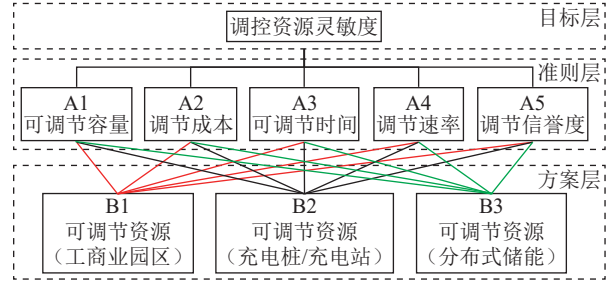


图3 灵敏度计算模型

Fig.3 Model of sensitivity calculation

开展第二层可调资源灵敏度分析前, 须先对模型中涉及的不同量纲和属性的数据进行数据预处理和数据归一化, 文中不再赘述。

3.1 构建层次结构模型

采用层次分析法进行应用剖析, 将所涉及的因素分组, 每一分组设置成一个层次, 将应用问题层次化、清晰化、条理化, 构造层次分析的结构模型。层次总体上有最高层(目标层)、中间层(准则层)、最底层(方案层)3类。

3.2 构造判断矩阵

在决定不同层次各因素之间的权重因子时, 如果仅是定性的结果, 则难以被其他方接受, 故SANTY提出一致矩阵法。即: 不将所有因素放在一起比较, 而是两两对比; 运用相对尺度, 以尽可能降低不同属性的因素相互比较的难度, 从而提高比较准确度。

层次分析法的信息基础的关键是评判方对各个层次各因素的相对重要性或重要程度的判断, 重要程度数值的矩阵表现形式就是判断矩阵。当上、下层之间关系确定后, 须确定与上层某因素(目标Z或某个准则A)相联系的下层各个因素在上层因素中所占的比重。

3.3 层次单排序及其一致性检验

3.3.1 层次单排序

层次单排序是指依据矩阵运算, 对于上一层某个因素而言, 本层次与之有关联的因素的重要性次序的权重或权值, 是本层次所有因素相对上一层而言的重要性进行排序的基础。

定理1: n 阶一致阵的唯一非零特征根为 n 。

定理2: n 阶正互反阵 $\mathbf{A}$ 的最大特征根为 n , 当且仅当特征根 $\lambda = n$ 时, $\mathbf{A}$ 为一致矩阵。

对于在允许范围内不一致的成对比较矩阵(正互反阵) $\mathbf{A}$, SANTY采用对应于判断矩阵最大特征根 $\lambda_{\max}$ 的特征向量作为权向量 $\mathbf{W}$, 即层次单排序可以归纳为计算判断矩阵的特征根和特征向量的问题。判断矩阵 $\mathbf{D}$ 应满足:

$$DW = \lambda_{\max} W \quad (6)$$

W 的分量即为相应因素单排序的权值,即该层次因素的灵敏度。

3.3.2 一致性检验

对应于判断矩阵最大特征根 $\lambda_{\max}$ 的特征向量,经归一化后记为 W 。 D 的元素为同一层次因素对于上一层次某个因素相对重要性的排序权重或权值,此过程为层次单排序过程。能否确认层次单排序,需要进一步开展一致性检验,所谓一致性检验是指对成对比较矩阵(正互反阵) A 确定不一致的允许范围。

为了检验矩阵的一致性,需要计算其一致性指标 C_1 。 C_1 的定义为:

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

显然,当判断矩阵具有完全一致性时, $C_1=0$,此时正互反阵 A 为一致矩阵,为最理想情况。 $\lambda_{\max}-n$ 越大, C_1 越大,判断矩阵的一致性越差。

需要注意的是,矩阵 D 的 n 个特征值之和恰好等于 n ,所以 C_1 相当于除 $\lambda_{\max}$ 外其余 $n-1$ 个特征根的平均值。为了检验判断矩阵是否具有满意的一致性,需要找出衡量矩阵 D 的一致性指标 C_1 的标准,引入随机一致性指标 R_1 , R_1 的选取如表1所示。

表1 3~7阶矩阵的随机一致性指标 R_1 和相应的临界最大特征根 $\lambda_{\max}^{CR}$

Table 1 Random consistency index R_1 and corresponding critical maximum eigen root $\lambda_{\max}^{CR}$ of 3-7-order matrix

参数	3阶	4阶	5阶	6阶	7阶
R_1	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32
$\lambda_{\max}^{CR}$	3.116	4.270	5.450	6.620	7.790

判断矩阵的一致性指标 C_1 与同阶平均随机一致性指标 R_1 之比为判断矩阵的随机一致性比率,记为 C_R 。

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (8)$$

当 $C_R < 0.1$ 或 $\lambda_{\max} \leq \lambda_{\max}^{CR}$ 时,判断矩阵具备满意的一致性,否则须对判断矩阵重新进行调整。

3.4 层次总排序及其一致性检验

基于同一层次中所有层次单排序的结果,即可计算针对上一层次而言本层次所有因素重要性的权值,即层次总排序。层次总排序需要从上往下逐层顺序进行,设已算出第 $k-1$ 层上 m 个因素相对于总目标的排序向量为:

$$w^{(k-1)} = [w_1^{(k-1)} \quad w_2^{(k-1)} \quad \cdots \quad w_m^{(k-1)}]^T \quad (9)$$

式中: $w_m^{(k-1)}$ 为第 $k-1$ 层上第 m 个因素相对于总目标的排序权值。

第 k 层 m_k 个因素对于第 $k-1$ 层上第 j 个因素为准则的单排序向量为:

$$u_j^{(k)} = [u_{1,j}^{(k)} \quad u_{2,j}^{(k)} \quad \cdots \quad u_{m_k,j}^{(k)}]^T \quad j = 1, 2, \cdots, m \quad (10)$$

式中: $u_{m_k,j}^{(k)}$ 为第 k 层 m_k 个因素对于第 $k-1$ 层上第 j 个因素的权值。

其中,不受第 j 个因素支配的因素权重取零,于是可得到 $m_k \times m$ 阶矩阵 $U^{(k)}$,即:

$$U^{(k)} = [u_1^{(k)} \quad u_2^{(k)} \quad \cdots \quad u_m^{(k)}] \quad (11)$$

式中: $U^{(k)}$ 为第 k 层 m_k 个因素对于第 $k-1$ 层上因素为准则的单排序向量。

记第 k 层上各因素对总目标的总排序为:

$$w^{(k)} = [w_1^{(k)} \quad w_2^{(k)} \quad \cdots \quad w_m^{(k)}]^T \quad (12)$$

则有:

$$w^{(k)} = U^{(k)} w^{(k-1)} \quad (13)$$

通过计算与单排序类似的检验量来评价层次总排序计算结果的一致性。由高层逐层进行检验。设第 k 层中某些因素对 $k-1$ 层的第 j 个因素单排序的一致性指标为 $C_{1,j}^{(k)}$,平均随机一致性指标为 $R_{1,j}^{(k)}$ (k 层中与 $k-1$ 层的第 j 个因素无关时,不必考虑),第 k 层对 $k-1$ 层的第 j 个因素的单排序一致性比率为:

$$C_{R,j}^{(k)} = \frac{C_{1,j}^{(k)}}{R_{1,j}^{(k)}} \quad (14)$$

当 $C_{R,j}^{(k)} \leq 0.1$ 或第 k 层判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}^{(k)} \leq \lambda_{\max}^{CR}$ 时,层次单排序的计算结果具有满意的一致性。

那么第 k 层的总排序的一致性比率为:

$$C_R^{(k)} = \frac{\sum_{j=1}^{m_k} w_j^{(k-1)} C_{1,j}^{(k)}}{\sum_{j=1}^{m_k} w_j^{(k-1)} R_{1,j}^{(k)}} \quad (15)$$

同样,当 $C_R^{(k)} \leq 0.1$ 时,层次总排序的计算结果具有满意的一致性。

3.5 计算各个可调资源灵敏度

对于各个可调资源,根据层次分析的结果,可计算资源灵敏度为:

$$S_{\text{load}}^{\text{type}} = w^{(k)} = [w_1^{(k)} \quad w_2^{(k)} \quad \cdots \quad w_{m_k}^{(k)}]^T \quad (16)$$

式中: $S_{\text{load}}^{\text{type}}$ 为可调资源灵敏度向量,其元素为各个可调资源灵敏度的具体数值。

根据可调资源灵敏度的大小,进行可调资源调控排序,实现对可调资源的精准调控。

当线路/变压器支路/潮流断面支路过载时,电网调度有调节需求,应用灵敏度分析法削减系统内的负荷或调节电力节点的有功功率注入,以消除电力支路过载,使电力系统运行状态恢复正常。

为了使系统削减/调节的负荷量最小,首先应通过调整发电机/发电厂出力尽量消除支路过载,在发电机/发电厂出力调节潜力用尽或受限情况下,再削减/调节系统的负荷量。应用双层灵敏度分析法调整节点功率的过程详见文献[25]。

4 算例分析

4.1 算例介绍

以一个7条支路5节点的电力系统和7类可调资源构成系统算例,其结构和系统参数见文献[25]。其中,节点4为4台发电机组,节点5为5台发电机组且作为调频机组,选取节点5为系统的功率平衡节点。系统正常稳定运行情况下,节点2和节点4属于区域A,区域A为送端区域;节点1、节点3和节点5属于区域B,区域B为受端区域;线路有功流向为节点4到节点2,节点2到节点1和节点3,节点5到节点3,节点3到节点1。

节点1、节点2、节点3聚合了不同类型的可调节负荷资源。节点1主要聚合工商业园区、充电桩/充电站、分布式储能等;节点2主要聚合居民负荷、充电桩/充电站、分布式储能等;节点3主要聚合集群楼宇空调、工业负荷、智慧照明负荷等。以电力系统支路编号2(节点1和节点3分别为起点和终点)的线路过载为电网应用需求场景进行双层灵敏度和区域源网荷协同互动精准调控分析。

4.2 第一层电力支路灵敏度计算与结果分析

根据前文所述总体思路及第一层电力支路灵敏度分析模型,可获取灵敏度矩阵 S_{sp}^r 如下:

$$S_{sp}^r = \begin{bmatrix} 0.389 & -0.333 & -0.333 & 0 & 0 \\ 0.611 & 0.333 & 0.333 & 0 & 0 \\ 0.389 & 0.667 & 0.667 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.500 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.500 & 0 & 0 \\ 0.500 & 0.500 & 0.500 & 0.500 & 0 \\ 0.500 & 0.500 & 0.500 & 0.500 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

灵敏度矩阵中第二行即为支路编号2的线路有功功率对各个节点功率的灵敏度,因为节点1的灵敏度为0.611且为同一行中最大的,可知节点1的节点功率调节对支路编号2的线路过载调节改善效果最明显,因此,优先调节节点1的可调节负荷资源。节点2和节点3的灵敏度均为0.333,说明调节这2个节点对支路编号2的线路过载调节改

善效果相同。可从节点下聚合的资源特性、节点与线路的电气距离等方面考虑,对节点2和节点3进行灵敏度大小再排序,文中根据节点与线路的电气距离,设置节点2的灵敏度高于节点3的灵敏度。

综上可知,根据灵敏度分析及灵敏度矩阵计算结果,由主到次排序电力系统电力节点的调节顺序为节点1、节点2、节点3。

4.3 第二层可调资源灵敏度计算与结果分析

由5.2节可知,对节点1的可调节负荷资源进行优先调节可以有效缓解支路编号2的线路过载程度,在节点1可调节资源调控受限的情况下,依次对节点2和节点3上的可调节资源进行调控。对节点1下聚合的资源进行负荷资源排序,以排序出同一节点下多类型资源的调控顺序。以节点1为例,开展第二层可调资源灵敏度计算与结果分析,节点2和节点3的多类型资源的调控顺序计算处理过程与节点1类似,不再赘述。

选取可调节容量、调节成本、可调节时间、调节速率、历史调节信誉度5个准则为可调资源的调节特性,进行第二层可调资源灵敏度计算。

4.3.1 构建层次结构模型及成对比较矩阵

建立节点1可调资源灵敏度层次结构模型,即图3。

方案层中可调节资源B1、可调节资源B2、可调节资源B3对准则层的成对比较矩阵 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 分别为

$$\begin{aligned} B_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 0.5 & 1 & 2 \\ 0.2 & 0.2 & 1 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.333 & 0.125 \\ 3 & 1 & 0.333 \\ 8 & 3 & 1 \end{bmatrix}, \\ B_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 3 \\ 0.333 & 0.333 & 1 \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 0.333 & 1 & 1 \\ 0.250 & 1 & 1 \end{bmatrix}, B_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.25 \\ 1 & 1 & 0.25 \\ 4 & 4 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

4.3.2 层次单排序及其一致性检验

(1) 成对比较矩阵A。成对比较矩阵A的最大特征值 $\lambda_{\max}=5.073$,特征向量为:

$$w^{(2)} = [0.263 \quad 0.475 \quad 0.055 \quad 0.099 \quad 0.110]^T \quad (18)$$

此层次特征向量的元素为准则层的各个因素对目标层调控资源灵敏度数值,因有 $\lambda_{\max} \leq 5.45$ 或 $C_R=0.016 < 0.1$,故A通过了一致性验证。

(2) 成对比较矩阵B。成对比较矩阵 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 的最大特征值分别为3.005、3.002、3、3.009、3,一致性指标分别为0.003、0.001、0、0.005、0。 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 的特征向量按列展开,用 $w^{(3)}$ 表示。

$$w^{(3)} = \begin{bmatrix} 0.595 & 0.082 & 0.429 & 0.633 & 0.166 \\ 0.277 & 0.236 & 0.429 & 0.193 & 0.166 \\ 0.129 & 0.682 & 0.142 & 0.175 & 0.668 \end{bmatrix} \quad (19)$$

因成对比较矩阵 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 的最大特征值均满足 $\lambda_{\max} \leq \lambda_{\max}^{C_R} = 3.116$ 或 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 均有 $C_R < 0.1$, 所以成对比较矩阵 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 均通过了一致性验证。

4.3.3 层次总排序及其一致性检验

层次总排序结果为:

$$w^{(1)} = w^{(3)}w^{(2)} = [0.300 \quad 0.246 \quad 0.456]^T \quad (20)$$

且有:

$$C_R^{(k)} = 0.003 \, 03 < 0.1$$

所以, 层次总排序通过一致性检验。

4.3.4 计算各个可调资源灵敏度

$$S_{load}^{type} = w^{(1)} = [0.300 \quad 0.246 \quad 0.456]^T \quad (21)$$

根据可调资源灵敏度的大小, 对节点 1 进行可调资源调控排序。通过式(21)可知, 节点 1 下聚合的可调节资源 B1 的灵敏度为 0.300、可调节资源 B2 的灵敏度为 0.246、可调节资源 B3 的灵敏度为 0.456。故节点 1 下聚合的可调节资源调控优先排序为: 可调节资源 B3>可调节资源 B1>可调节资源 B2。

4.4 区域源网荷协同互动精准调控效果

电力系统支路编号 2 的线路正向过载 12.6 MW, 通过发电机/发电厂功率调节最大限度实现线路减载 7.3 MW, 支路编号 2 的线路正向过载 5.3 MW 需要通过调节节点下的可调资源实现减载。

结合灵敏度矩阵结果, 可调节资源 B3 可调节量为 4.5 MW、可调节资源 B1 可调节量为 3.8 MW、可调节资源 B2 可调节量为 2.9 MW, 可知节点 1 可调节资源总可调节量为 11.2 MW, 可实现对支路编号 2 的线路正向总减载 6.843 2 MW, 满足支路编号 2 的线路正向过载 5.3 MW 的减载需求, 因此, 通过调节节点 1 的可调资源, 即可满足电网应用需求。若是调节节点 1 下的可调资源无法满足支路编号 2 的线路正向过载 5.3 MW 的减载需求, 可依次调节节点 2、节点 3 下的可调资源, 具体分析结果及调节效果如表 2 所示。

如表 2 所示, 节点 1 下聚合的可调节资源 B3(分布式储能)可实现对支路编号 2 的线路正向减载 2.749 5 MW; 节点 1 下聚合的可调节资源 B1(工商业园区)可实现对支路编号 2 的线路正向减载 2.321 8 MW; 节点 1 下聚合的可调节资源 B2(充电桩/充电站)可实现对支路编号 2 的线路正向减载 1.771 9 MW。其他节点的结果分析类似, 根据第一层电力支路灵敏度结果, 电力节点的调节顺序为节点 1、节点 2、节点 3。根据第二层可调资源灵敏度结果, 节点 1 下可调资源的调节顺序为分布式储能、工商业园区、充电桩/充电站; 节点 2 下可

表 2 精准调控效果

Table 2 Precision regulation effect

节点	第一层 电力支路 灵敏度	资源类型	第二层 可调资源 灵敏度	可调节 量/MW	减载效 果/MW	总减载效 果/MW
节点1	0.611	分布式储能	0.456	4.5	2.749 5	6.843 2
		工商业园区	0.300	3.8	2.321 8	
		充电桩/充电站	0.246	2.9	1.771 9	
节点2	0.333	分布式储能	0.410	3.1	1.032 3	2.331 0
		充电桩/充电站	0.305	1.8	0.599 4	
		居民负荷	0.212	2.1	0.699 3	
节点3	0.333	工业负荷	0.385	2.8	0.932 4	2.164 5
		集群楼宇空调	0.352	2.4	0.799 2	
		智慧照明负荷	0.285	1.3	0.432 9	

调资源的调节顺序为分布式储能、充电桩/充电站、居民负荷; 节点 3 下可调资源的调节顺序为工业负荷、集群楼宇空调、智慧照明负荷。

根据第一层电力支路灵敏度分析结果和第二层可调资源灵敏度分析结果顺次调节过程中, 可以在满足电网应用需求时, 不再开展进一步调节。如上述算例中, 调节节点 1 下的可调资源即可满足支路编号 2 的线路正向过载 5.3 MW 减载需求, 无须调节节点 2、节点 3 的可调资源。

将文中计及节点及资源灵敏度的源网荷协同互动精准调控方法(记为文中方法-考虑双层灵敏度)与只考虑第一层电力支路灵敏度分析模型的单层传统方法(记为传统方法-仅第一层灵敏度)、只考虑第二层可调资源灵敏度模型的单层传统方法(记为传统方法-仅第二层灵敏度)进行比较, 结果表明文中方法-考虑双层灵敏度具有精准调控的优势。

文中方法-考虑双层灵敏度与传统方法-仅第一层灵敏度的调控效果比较如图 4 所示。

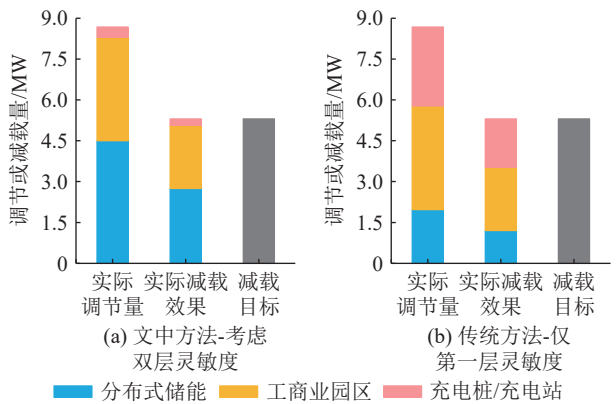


图 4 文中方法-考虑双层灵敏度与传统方法-仅第一层灵敏度的比较

Fig.4 Comparison between proposed method (considering double-layer sensitivity) and traditional method (only the first layer sensitivity)

可见, 2 种方法都能实现支路编号 2 的线路正向过载 5.3 MW 的减载目标, 实际总调节量均为 8.674 3 MW。然而, 文中方法-考虑双层灵敏度综合考虑了可调节资源的调节特性, 有效排序出高灵敏度可调资源, 按顺序梯次调节分布式储能 4.5 MW、工商业园区 3.8 MW、充电桩/充电站 0.374 3 MW, 实现优质资源优先参与调节。而传统方法-仅第一层灵敏度只能随机/无定量地挑选资源参与调节, 依次调节了充电桩/充电站 2.9 MW、工商业园区 3.8 MW、分布式储能 1.974 3 MW, 未能实现优质资源优先参与调节。

文中方法-考虑双层灵敏度与传统方法-仅第二层灵敏度的调控效果比较如图 5 所示。

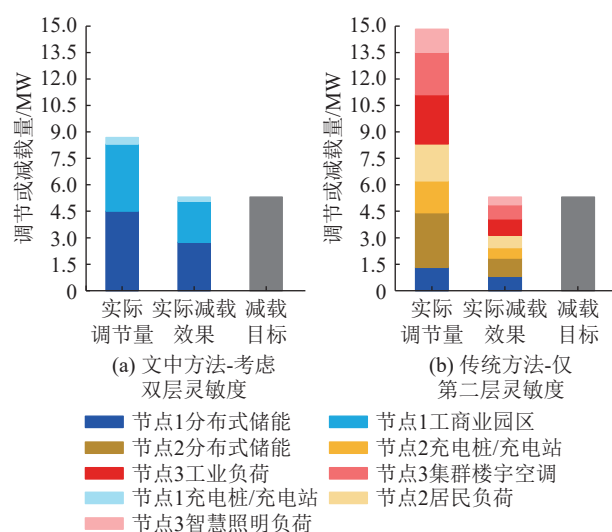


图 5 文中方法-考虑双层灵敏度与传统方法-仅第二层灵敏度的比较

Fig.5 Comparison between proposed method (considering double-layer sensitivity) and traditional method (only the second layer sensitivity)

可见, 2 种方法都能实现支路编号 2 的线路正向过载 5.3 MW 的减载目标。然而, 如图 5 所示, 2 种方法的实际总调节量差异较大, 文中方法-考虑双层灵敏度的实际总调节量为 8.674 3 MW, 相比传统方法-仅第二层灵敏度的实际总调节量 14.816 7 MW 降低 41.46%。文中方法-考虑双层灵敏度只需要调节节点 1 下聚合的 3 类资源即可实现减载目标, 而传统方法-仅第二层灵敏度需要调节节点 3、节点 2、节点 1 下总聚合的 7 类资源。显然, 文中方法-考虑双层灵敏度能够精确选出高灵敏度节点, 以最小的资源调节量、最少的节点调控实现减载目标, 解决电网应用需求。

5 结论

文中提出计及节点及资源灵敏度的源网荷协

同互动精准调控方法, 研究表明:

(1) 文中所提双层灵敏度分析模型和方法满足区域电网线路过载、变压器过载、潮流断面越限等场景的实际应用需求, 区域源网荷协同互动精准调控平台能够实现和应用所提模型和方法;

(2) 所提第一层电力支路灵敏度分析模型可精确选出解决区域电网应用需求最灵敏、有效的电力调节节点, 第二层可调资源灵敏度分析模型可对多类型可调资源进行统一量化、调控排序, 实现响应电网特定应用需求的可调资源精准、可量化调控;

(3) 基于建立的双层灵敏度分析模型, 区域源网荷协同互动精准调控平台将电源、电网、负荷协调统一, 进行有序、可观、可测、可控的源网荷协同互动精准调控。

在后续研究中, 将进一步研究多层电力网络及多层可调资源架构下的源网荷协同互动精准调控方法。

致 谢

本文得到中国华电集团有限公司项目“智慧能碳协同管理系统”(801554)资助, 谨此致谢!

参考文献:

- [1] 王放放, 杨鹏威, 赵光金, 等. 新型电力系统下火电机组灵活性运行技术发展及挑战[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 189-198.
WANG Fangfang, YANG Pengwei, ZHAO Guangjin, et al. Development and challenge of flexible operation technology of thermal power units under new power system[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 189-198.
- [2] 汤奕, 易俊, 薛峰. “双碳”目标下的新型电力系统规划与运行[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(3): 241-242.
TANG Yi, YI Jun, XUE Feng. Planning and operation of new power system under the goal of "dual carbon"[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(3): 241-242.
- [3] 谢大为, 王博欣, 王京景, 等. 基于正负综合灵敏度的输电断面双层优化潮流控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 107-115.
XIE Dawei, WANG Boxin, WANG Jingjing, et al. Double layer optimal power flow control strategy of transmission section based on positive and negative comprehensive sensitivity[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 107-115.
- [4] 钟海旺. 新型电力系统的源网荷储互动运行[R]. 北京: 清华大学, 2022.
ZHONG Haiwang. The interactive operation of source, network, load and storage of new power system[R]. Beijing: Tsinghua University, 2022.
- [5] 刘华伟, 李虎成, 袁宇波, 等. 大规模源网荷友好互动系统实试验技术[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 1-6.
LIU Huawei, LI Hucheng, YUAN Yubo, et al. The actual load shedding verification test technology of large-scale "source-grid-load" friendly interactive system introduction[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 1-6.

- [6] 黄慧, 李永刚, 刘华志. 基于改进 Nash-Q 均衡迁移算法的源网荷储协同优化策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(8): 71-77, 104.
HUANG Hui, LI Yonggang, LIU Huazhi. Collaborative optimization strategy of source-grid-load-energy storage based on improved Nash-Q equilibrium transfer algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(8): 71-77, 104.
- [7] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [8] 张高航, 李凤婷. 计及源荷储综合灵活性的电力系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 159-167.
ZHANG Gaochang, LI Fengting. Day-ahead optimal scheduling of power system considering comprehensive flexibility of source-load-storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 159-167.
- [9] 李华强. 面向新型电力系统的源网荷储规划技术探讨[R]. 四川: 四川大学, 2023.
LI Huaqiang. Discussion on source, network, load and storage planning technology for new power system[R]. Sichuan: Sichuan University, 2023.
- [10] 印欣, 张锋, 阿地利·巴拉提, 等. 新型电力系统背景下电热负荷参与实时调度研究[J]. 发电技术, 2023, 44(1): 115-124.
YIN Xin, ZHANG Feng, ADILI Balati, et al. Study on participation of electricity-driven thermal load in real-time scheduling of new power system[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 115-124.
- [11] 方必武, 范展滔, 王科, 等. 考虑储能荷电越限的高比例可再生能源系统的源荷储协调优化[J]. 供用电, 2024, 41(7): 92-98.
FANG Biwu, FAN Zhantao, WANG Ke, et al. Coordinated optimization of source-load-storage for a high-proportion renewable energy system considering the overcharge of energy storage[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(7): 92-98.
- [12] ZHENG S L, SUN Y, LI B, et al. Stochastic programming model for incentive-based demand response considering complex uncertainties of consumers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(20): 4488-4500.
- [13] 国网江苏省电力有限公司. 大规模源网荷友好互动系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Large-scale interactive system with source-grid-load friendly coordination[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [14] MONFARED H J, GHASEMI A, LONI A, et al. A hybrid price-based demand response program for the residential micro-grid[J]. Energy, 2019, 185: 274-285.
- [15] 张哲, 杨航, 尹项根, 等. 电网运行风险在线评估中基于灵敏度分析的负荷削减模型[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 90-95.
ZHANG Zhe, YANG Hang, YIN Xianggen, et al. Load shedding model based on sensitivity analysis in on-line power system operation risk assessment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 90-95.
- [16] 程瑜, 陈熙. 基于源-荷-储互动的储能对风电消纳能力影响分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 84-93.
CHENG Yu, CHEN Xi. Analysis on influence of energy storage on accommodation capability of wind power based on source-load-storage interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 84-93.
- [17] 鞠立伟, 吕硕硕, 李鹏. 新型电力系统需求侧灵活性资源时空协同优化与动态均衡机制研究综述[J]. 电力建设, 2024, 45(9): 142-163.
JU Liwei, LÜ Shuoshuo, LI Peng. Review of novel demand-side flexibility resource spatio-temporal co-optimization and dynamic equilibrium mechanism of power systems[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 142-163.
- [18] 尚亚彬, 王小君, 刘翌, 等. 考虑海量异质资源分区聚类的输电网协同调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 82-92.
SHANG Yabin, WANG Xiaojun, LIU Zhao, et al. Cooperative scheduling strategy for transmission and distribution networks considering partitioned clustering of massive heterogeneous resources[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 82-92.
- [19] 徐英. 大规模异构资源虚拟电厂调控技术[R]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2023.
XU Ying. Control technology of large-scale heterogeneous resource virtual power plant[R]. Hailongjiang: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [20] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LIU Dunnan, et al. "Generation-grid-load-storage" coordinative optimal operation mode of energy Internet and key technologies[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124.
- [21] 陈光宇, 杨锡勇, 江海洋, 等. 高比例新能源接入下计及工业负荷特性的电网需求响应调控策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 177-184.
CHEN Guangyu, YANG Xiyong, JIANG Haiyang, et al. Demand response regulation strategy for power grid accessed with high proportion of renewable energy considering industrial load characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 177-184.
- [22] 仇晨光, 程锦闽, 李新家, 等. 网荷互动用户可中断负荷选择与恢复策略研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 33-37, 70.
QIU Chengguang, CHENG Jinmin, LI Xinxia, et al. Intermittent load selection and recovery strategy for network load interactive user[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 33-37, 70.
- [23] 刘映尚, 马骞, 王子强, 等. 新型电力系统电力电量平衡调度问题的思考[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1694-1706.
LIU Yingshang, MA Qian, WANG Ziqiang, et al. Cogitation on power and electricity balance dispatching in new power

- system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1694-1706.
- [24] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 10-19.
WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 10-19.
- [25] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
WANG Xifan. Analysis of modern power system[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [26] 杨苹, 曾凯林, 余雁琳, 等. 电能量市场下负荷聚合商参与负荷削减投标策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 2-10.
YANG Ping, ZENG Kailin, YU Yanlin, et al. Strategy of load aggregator participating in load curtailment bidding under power market[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 2-10.
- [27] 李鹏, 崔荣喜, 卢京祥, 等. 基于数据驱动的源网荷储协同自治方法与理论研究[J]. 供用电, 2024, 41(3): 9-16.
LI Peng, CUI Rongxi, LU Jingxiang, et al. Research on method and theory of source-grid-load-storage collaborative autonomy based on data-driven[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(3): 9-16.
- [28] 范馨予, 黄媛, 吴疆, 等. 考虑源网荷储协同优化的配电网韧性提升策略[J]. 电力建设, 2023, 44(4): 63-73.
FAN Xinyu, HUANG Yuan, WU Jiang, et al. Resilience promotion strategy for distribution network considering source-network-load-storage coordination[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 63-73.

作者简介:



钟永洁

钟永洁(1990), 男, 硕士, 工程师, 从事虚拟电厂技术、源网荷储协同运行技术、综合能源系统建模与优化工作(E-mail: zhongyongjieemail@163.com);

纪陵(1982), 男, 硕士, 高级工程师, 从事虚拟电厂技术、多能互补协同技术、电力系统自动化技术、智能变电站工作;

刘文彪(1975), 男, 硕士, 高级工程师, 从事变电站自动化技术、电力系统自动化及信息安全工作。

Precision regulation method for source-grid-load collaborative interaction considering power node and resource sensitivity

ZHONG Yongjie^{1,2}, JI Ling^{1,2}, LIU Wenbiao^{1,2}, YANG Chengsheng^{1,2}, YU Yang³, WANG Zidong^{1,2}

(1. Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China; 2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China; 3. North China Electric Power University (Baoding) (State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources), Baoding 071003, China)

Abstract: The source-grid-load collaborative interaction and the precision regulation of adjustable resources with high sensitivity provide important support for improving the regulation ability and efficiency of new power system, and promoting the efficient and reliable operation of new power system. Therefore, precision regulation method for source-grid-load collaborative interaction considering power node and resource sensitivity is proposed in this paper. Firstly, from the two perspectives of power grid application requirements and node adjustable resources, the overall idea of double-layer sensitivity analysis method is described, and the layered logic architecture of the precision regulation platform for regional source-grid-load collaborative interaction is constructed, in order to realize and apply the proposed double-layer sensitivity model and precision regulation method. Secondly, the first layer power branch sensitivity analysis model is proposed for the power grid side to obtain the power branch sensitivity matrix. A fine-grained second layer adjustable resources sensitivity analysis model is further established for the diversified adjustable resources aggregated under the power node to complete the quantitative ranking of adjustable resources regulation sensitivity. Then, the application process of double-layer sensitivity analysis results is designed in detail. The regulation sequence and regulation quantity of source and load are defined. Finally, taking a power system as an example, the effectiveness and rationality of the proposed model and method are verified. The results indicate that the proposed precision regulation method can accurately select high sensitivity power nodes and effectively sort high sensitivity adjustable resources when solving the multiple scenarios application needs of power grids.

Keywords: new power system; sensitivity; grid-load interaction; adjustable resources; line overload; hierarchical structure

(编辑 方晶)