

# 基于电力系统分区惯量估计的储能容量配置策略

米阳,王沛林,周杰,马思源,李东东

(上海电力大学 电气工程学院,上海 200090)

**摘要:**针对大规模新能源接入导致电力系统惯量水平下降,提出了一种基于分区惯量估计的储能容量配置策略。基于传统电力系统的惯量机理分析,建立了含新能源电力系统的等效惯量模型和风光储能虚拟惯量模型。运用谱聚类对电力系统进行分区解决惯量空间分布不均影响估计精度问题,并基于皮尔逊相关系数确定测量节点。运用差值法对分区后系统的各个区域进行惯量估计,进而利用分区惯量估计结果设计电力系统储能容量配置策略。在DIGSLIENT/PowerFactory中搭建含风机的IEEE 10机39节点模型进行仿真验证。仿真结果表明所提方法可以减小惯量估计误差,基于惯量估计结果可以对储能容量进行合理配置,保证储能系统实现快速调频和提供虚拟惯量支撑。

**关键词:**惯量估计;系统分区;谱聚类;差值法;储能容量配置策略

**中图分类号:**TM73

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202405015

## 0 引言

近年来,随着新能源大量接入电网<sup>[1]</sup>,电网中需要接入大量电力电子设备,但是高渗透率逆变器<sup>[2-3]</sup>等电力电子设备本质上无法提供惯量支持<sup>[2-3]</sup>,导致电力系统低惯量的问题愈发严峻。因此,对含新能源电力系统进行惯量估计,并合理配置一定容量的储能系统,有利于提高新能源渗透率和确保系统安全稳定运行。

目前,大多数惯量估计方法主要面向系统整体。文献[4]通过拟合扰动后的总发电曲线和频率曲线来估计系统惯量,但估计结果仅包括同步发电机提供的转动惯量。互联系统的惯量是通过与区域间振荡模式参数的关系来估计的<sup>[5]</sup>,但惯量估计所基于的摆动方程的状态变量是2个区域之间的频率差。然而,上述研究没有考虑区域之间的惯量分布。系统惯量可以通过区域惯量来计算,但区域惯量不能从系统惯量中获得。因此,区域惯量估计更灵活,可以提供更多信息,方便运维人员进行合理配置。

在系统发生扰动后,只有系统的总惯量满足最小临界值才能保证其稳定运行,否则会导致系统无法恢复到正常运行水平。文献[6]讨论了在一些具有低水平惯量配置的系统,运用频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)估计的系统惯量可能低于最小临界值进而导致保护继电器跳闸,这是

由于RoCoF估计系统惯量会有大量误差导致估计结果精确度不足。文献[7]在系统产生有功功率扰动的情况下,利用数值积分法估计区域惯量,但积分算法需要测量大量节点数据,导致计算量增加进而引起误差变大。因此有必要讨论在简化扰动功率项的情况下进一步提高惯量估计的精确度。

由于惯量在系统中的分布不均匀,扰动后频率响应的离散性更显著,大幅降低了惯量估计的准确性<sup>[8]</sup>。测量位置的确定是影响惯量估计误差的主要原因之一,不同测量位置的选择会造成随机误差现象的发生<sup>[9]</sup>。惯量中心频率的惯量估计计算方法需要每台发电机的频率和惯量,且利用惯量中心频率进行惯量估计会使测量过程更为繁琐<sup>[10]</sup>。因此,有必要找到能够取代惯量中心的频率测量位置。文献[11]提出了惯量图中心的定义来解决这个问题,但该方法也需要每台发电机的惯量,并且没有考虑区域惯量。如何有效地估计区域惯量、降低估计误差是系统惯量估计过程中需要解决的重要问题。

储能技术具有快速响应和调节能力,能够在低惯量电力系统中迅速提供大量有功功率,为电力系统提供频率支撑,成为频率调节的关键手段。随着储能频率调整控制方法的发展,从最初的下垂控制和虚拟惯量控制,逐渐演变为多种策略的协调控制<sup>[12]</sup>。文献[13]介绍了储能在高比例新能源接入系统中的调频性能,但并未针对储能容量配置问题进行进一步分析。文献[14]提出了一种在大规模风机接入的系统容量配置策略,但该策略未考虑惯量水平问题,导致大规模风机接入后可能会引发系统频率崩溃无法维持稳定。文献[15]基于风机与储能系统时空多维度上的耦合互动对其进行容量配置,但仅考虑长时间尺度,并未考虑短时间尺度的容量配置问题。文献[16]考虑了基于风机功率的不确

收稿日期:2024-03-11;修回日期:2024-05-15

在线出版日期:2024-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61873159);上海市自然科学基金资助项目(22ZR1425500)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (61873159) and the Natural Science Foundation of Shanghai (22ZR1425500)

定性的储能系统容量优化配置,但并未考虑风机系统容量确定的情况下通过惯量估计结果对储能功率以及容量进行配置。因此,为了更好地应对储能在含风机的电力系统的频率调整问题,提高系统运行效率以及可靠性,有必要对储能进行适当的容量配置研究。

基于上述问题分析,本文提出了一种针对含新能源的电力系统惯量估计方法,通过对系统惯量估计,进一步对储能容量进行合理配置。首先,运用谱聚类算法将电力系统进行分区;接着,考虑基于皮尔逊相关系数确定分区后各个区域的测量节点;然后,运用差值法估计含风机的电力系统区域惯量,并设计储能容量配置策略;最后,在改进的IEEE 10机39节点系统中进行仿真验证,根据估计结果确定储能容量配置策略,验证所提方法以及配置策略的有效性。

## 1 系统惯量估计理论

电力系统惯量是指电网中的同步发电机为了维持不平衡功率引起的频率偏差,能够为转子提供转动能量。一般而言,惯量通常用惯性时间常数来表征。

对于单台同步发电机 $k$ 而言,惯量理论值通常采用同步发电机在额定角速度下的转子动能表示,与自身参数有关但与操作状态无关。其表达式如下:

$$E_k = H_k S_k = \frac{1}{2} J_k \omega_n^2 \quad (1)$$

式中: $E_k$ 、 $H_k$ 、 $S_k$ 、 $J_k$ 和 $\omega_n$ 分别为同步发电机 $k$ 的惯量理论值、惯性时间常数、容量、转动惯量和额定角速度。

在传统的多机系统中,等效的电力系统惯量理论值 $E_G$ 为:

$$E_G = \sum_{i=1}^n H_i S_i \quad (2)$$

式中: $n$ 为系统中传统发电机总数; $H_i$ 、 $S_i$ 分别为多机系统中的传统发电机 $i$ 的惯性时间常数及其容量。

随着新型电力系统中新能源渗透率的逐渐提高,现代电力系统呈现出低惯量的特点。电网中的惯量源形式多种多样,如图1所示。

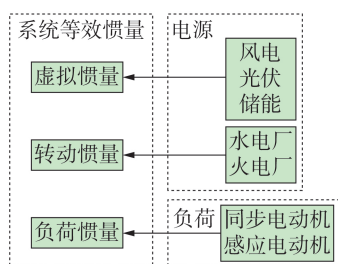


图1 新型电力系统惯量源

Fig.1 Inertia source in new power system

新能源发电设备与传统发电机存在一定的差异。风机等新能源设备需要通过电力电子器件连接到电网中,且大多数新能源设备无法提供惯量支撑,因此无法应对突发扰动所带来的频率变化率,惯性时间常数无限接近于0,导致含新能源的电力系统出现低惯量的现象。

含新能源的电力系统的等效惯量由传统同步发电机的旋转惯量、负荷侧提供的惯量、风光储通过控制手段提供的虚拟惯量3个部分组成。风机和光伏提供的虚拟惯量需要通过某些控制手段来实现,因此需要通过自主设定的参数为系统提供一定的有功功率支撑,来实现频率调整和功率支撑。一般而言,自主设定的参数需要通过不断地试验进行调整,否则过大或过小的系数均会对新能源调频产生十分严重的影响。具体表达式如式(3)所示。

$$\Delta P = M_w \frac{df}{dt} \quad (3)$$

式中: $\Delta P$ 为不平衡功率; $M_w$ 为风机或光伏的虚拟惯量控制系数; $f$ 为系统频率; $t$ 为时间。

虚拟惯性时间常数是通过对控制方法模拟的参数,而不是固有特性。虚拟惯性时间常数与不同的因素有关,包括控制方法、控制参数、能源种类及其转换过程,因此其大小是灵活、可变的。新能源并网后系统等效惯性时间常数如式(4)所示。

$$H'_{\text{sys}} = H_{\text{SG}} + H_{\text{ES}} + H_{\text{W}} + H_{\text{D}} + H_{\text{PV}} \quad (4)$$

$$H_{\text{SG}} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i S_i}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad (5)$$

式中: $H'_{\text{sys}}$ 为含新能源电力系统的等效惯量; $H_{\text{SG}}$ 、 $H_{\text{ES}}$ 、 $H_{\text{W}}$ 、 $H_{\text{D}}$ 、 $H_{\text{PV}}$ 分别为同步发电机、储能、风机、负荷以及光伏提供的虚拟惯量; $N$ 为含新能源电力系统中同步发电机的总数; $H_i$ 、 $S_i$ 分别为含新能源电力系统中同步发电机 $i$ 的惯性时间常数及其容量。

储能设备作为一种辅助调频手段可以在电力系统中快速响应。当系统中出现扰动时,储能设备通过某种控制手段改变有功功率的大小来弥补一定的有功缺额,以达到减小频率变化率和系统最大频率偏差的目的。其需要通过变流器或转换器等电力电子设备与电网相连,因此可以通过自主设定参数提供一定的惯量支撑<sup>[17]</sup>。

储能参与电力系统惯量响应的常规方法有下垂控制、虚拟惯量控制以及二者相结合等。储能的虚拟惯量控制与新能源电流源型惯量控制类似,通过模拟同步发电机的惯量响应来参与频率调整,如式(6)所示。

$$\Delta P = -M_E \frac{df}{dt} \quad (6)$$



式中: $M_E$ 为储能虚拟惯量系数。

由式(3)和式(6)可知,针对储能和新能源的虚拟惯量控制不仅通过频率变化率来弥补有功功率的缺额,还通过自主设定的系数(如 $M_w$ 、 $M_E$ 等)以达到调整频率的目的。

## 2 惯量估计方法及储能配置策略

### 2.1 基于谱聚类的电力系统分区方法

各地区的地理环境不同,发电资源受限,新能源在电力系统中分布不均。由于新能源渗透率随着电网和区域互联系统的发展不断增大,电力系统的频率响应特性受到惯量分布的影响会变得更加分散,导致各地区的惯量空间分布不均匀。因此,为了降低惯量分布不均和频率响应分散性对估计精度的影响,本文运用谱聚类算法对电力系统进行分区。

在大多数情况下,图聚类效果要比传统的聚类效果更有优势<sup>[18]</sup>,通过对图论的不断改进和发展,最终形成谱聚类算法。由于电网结构的复杂性,分区结果要求与电网内部结构一致。电网可以用图表示,系统中的节点表示为图的顶点,传输线路表示为图的边。在通过谱聚类算法进行划分之后,每个区域中的节点都是高度连接的,划分区域的结果可以反映网络的内部结构。

考虑到图的问题,边缘权重越大,其连接越紧密,而通过对阻抗的计算式分析可知,线路长度与阻抗的值有某种定量关系,考虑聚类结果的反复变化可能导致分区的不准确和估计误差增大,因此定义图边缘权重为 $1/|Z_L|$ ( $Z_L$ 为每条线路阻抗)。这样做的优点是该权重值可以反映两点之间的距离,对于电力系统而言即为电气距离。

首先,设每条线路阻抗的模值为 $|Z_L|$ ,且把每条线路作为图形的边并重新分配边缘权重:相邻的边缘权重为 $1/|Z_L|$ 而2条互不相邻的边定义为0。接着,通过对边缘权重的分配构建权重矩阵,并定义一个度矩阵,通过2个矩阵做差可以构造拉普拉斯矩阵。然后,针对标准化后的拉普拉斯矩阵计算其最小特征值对应的最小特征向量,将所有特征向量列向量构造成特征矩阵并对其归一化。最后,通过 $k$ -均值聚类算法将特征矩阵样本聚合为 $K$ 类,根据CH(Calinski-Harabaz)指数,选择 $k$ -均值聚类算法的最优分区数,输出结果为每个节点所属的区域<sup>[19]</sup>。

Calinski-Harabaz指数 $\zeta_{CH}$ 是评估聚类效果优劣的指标,其同时考虑了组内平方和 $\zeta_{WGSS}$ 和聚类组间平方和 $\zeta_{BGSS}$ ,可以评估聚类效果。 $\zeta_{CH}$ 越大,聚类的效果越好。因此,以分区数量为变量,根据 $\zeta_{CH}$ 曲线选择最佳分区数。

$$\zeta_{CH} = \frac{\zeta_{BGSS}}{\zeta_{WGSS}} \frac{n_d - K}{K - 1} \quad (7)$$

$$\zeta_{WGSS} = \frac{1}{2} \sum_{c=1}^K (n_c - 1) \bar{d}_c^2 \quad (8)$$

$$\zeta_{BGSS} = \frac{1}{2} \left[ (K-1) \bar{d}^2 + \sum_{c=1}^K (n_c - 1) (\bar{d}^2 - \bar{d}_c^2) \right] \quad (9)$$

式中: $n_d$ 为聚类样本的总数; $n_c$ 为第 $c$ 个聚类中的样本数量; $\bar{d}^2$ 、 $\bar{d}_c^2$ 分别为所有样本之间的平均距离以及第 $c$ 个聚类中样本的平均距离。聚类分区的流程图如附录A图A1所示。

### 2.2 测量节点以及主机组的选择

对于分区后的电力系统,区域内会存在很多节点,这些节点紧密耦合且频率较相似。尽管分区可以降低频率响应分散性对估计精度的影响,但任意选择区域内的测量节点会使估计误差具有随机性与波动性。为了方便计算以及提高精度,只能选择一个节点进行测量,估计区域的惯量水平。

在统计学中,皮尔逊相关系数 $\rho_{X,Y}$ 用于度量2个线性相关的变量 $X$ 和 $Y$ 之间的相关性,其值介于-1与1之间,相关系数越趋近于1,其相关性越强。表达式如式(10)所示。

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sum_{j=1}^M (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^M (X_j - \bar{X})^2 (Y_j - \bar{Y})^2}} \quad (10)$$

式中: $X_j$ 和 $Y_j$ 分别为任一区域中某2个节点变量 $X$ 、 $Y$ 第 $j$ 个频率数据样本; $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别为2个节点变量 $X$ 、 $Y$ 第 $j$ 个频率数据样本的平均值; $M$ 为频率数据样本总数。计算出皮尔逊相关系数后选择各区域中该值最趋近于1的节点,选择该节点作为本区域的测量节点。

### 2.3 差值法估计方法

目前,惯量估计方法均以系统整体为研究对象,但在实际系统中惯量又存在分布特性,导致估计时会产生不确定误差。以系统整体为研究对象时需要考虑所有发电机的相关参数以及状态监测来获得系统功率中存在的不平衡功率以及频率的波动情况。现阶段的估计方法所得结果为系统总的惯量,因此,本文基于系统分区和确定测量节点,采用差值法,通过扰动后联络线功率与选定的测量节点对各区域的惯量水平进行估计,通过区域惯量估计结果获得系统整体惯量估计水平<sup>[20]</sup>。本文研究的多区域电力系统拓扑图,如图2所示。图中: $P_1$ — $P_4$ 分别为同步发电机 $G_1$ — $G_4$ 发出的有功功率; $\Delta P_i$ 为各区域联络线上的扰动功率; $\Delta P_{T,1}$ — $\Delta P_{T,4}$ 分别为扰动发生前、后与区域1—4相连的所有联络线功率变化量之和。

当系统中存在扰动时,联络线上的扰动功率会因惯量响应存在互济的情况,所以在联络线上的扰动功率能体现惯量响应。当发生扰动后的第2秒系

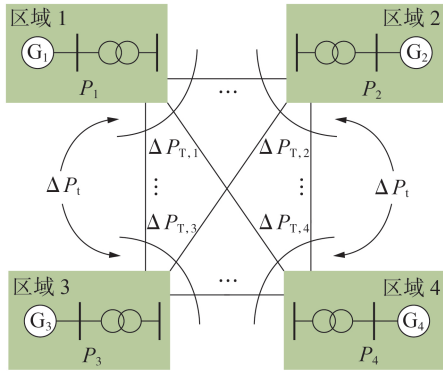


图2 多区域电力系统

Fig.2 Multi regional power system

统的惯量响应参与介入时,一次调频还未参与,发电机的调速器不介入,这导致系统中的机械功率不会发生变化。故区域内产生的不平衡功率主要由电磁功率决定,如式(11)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_{T,m} = P_{T,m0} - P_{T,m} \\ \Delta P_A = P_{T,A0} - P_{T,A} + \Delta P_t \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{T,m0}$ 和 $P_{T,m}$ 分别为扰动发生前、后非故障区域 $m$ 的联络线功率; $P_{T,A0}$ 和 $P_{T,A}$ 分别为扰动发生前、后故障区域 $A$ 的联络线功率; $\Delta P_A$ 为故障区域 $A$ 的不平衡功率。

非故障区域 $m$ 的惯性时间常数 $H_m$ 与不平衡功率以及频率的变化率遵循式(12)所示的转子运动方程。

$$2H_m \frac{df_m}{dt} = \Delta P_m \quad (12)$$

式中: $\Delta P_m$ 为非故障区域 $m$ 的不平衡功率; $f_m$ 为非故障区域 $m$ 的频率。根据式(11)和式(12)可得惯量计算的方法如式(13)所示。

$$\begin{cases} 2H_m = \frac{P_{T,m0} - P_{T,m}}{r_m} \\ 2H_A = \frac{P_{T,A0} - P_{T,A} + \Delta P_t}{r_A} \\ r_m = \frac{df_m}{dt}, r_A = \frac{df_A}{dt} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $H_A$ 为非故障区域 $A$ 的惯性时间常数; $r_m$ 和 $r_A$ 分别为非故障区域 $m$ 和故障区域 $A$ 的频率变化率。由式(13)可知,在测量节点确定后,测量节点上的频率变化率将代表该区域的频率变化率。各区域间联络线上的扰动功率大小、初始功率大小、扰动结束后的功率大小也可通过测量节点直接获取,这样便可以通过式(13)进行惯量估计。

然而在实际过程中,受限于扰动位置的随机性、故障发生是否严重等原因,难以清楚地了解扰动发生的位置以及扰动功率的大小。这会大幅增加式(13)的计算难度,导致估计精度下降,误差增大。因此,为了降低扰动功率的不确定性,防止误差增大干

扰惯量估计结果,选择扰动后某2个时刻进行计算如式(14)所示。

$$\begin{cases} 2H_m = \frac{P_{T,m0} - P_{T,m1}}{r_{m1}} \\ 2H_m = \frac{P_{T,m0} - P_{T,m2}}{r_{m2}} \\ 2H_A = \frac{P_{T,A0} - P_{T,A1} + \Delta P_t}{r_{A1}} \\ 2H_A = \frac{P_{T,A0} - P_{T,A2} + \Delta P_t}{r_{A2}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $r_{m1}$ 、 $r_{m2}$ 和 $r_{A1}$ 、 $r_{A2}$ 分别为故障区域 $m$ 和非故障区域 $A$ 发生扰动后某2个时刻的频率变化率; $P_{T,m1}$ 、 $P_{T,m2}$ 和 $P_{T,A1}$ 、 $P_{T,A2}$ 分别为故障区域 $m$ 和非故障区域 $A$ 发生扰动后某2个时刻的联络线功率。

对式(14)中同一区域的等号右侧分子分母分别做差,简化结果如式(15)所示。

$$\begin{cases} 2H_m = \frac{P_{T,m1} - P_{T,m2}}{r_{m2} - r_{m1}} \\ 2H_A = \frac{P_{T,A1} - P_{T,A2}}{r_{A2} - r_{A1}} \end{cases} \quad (15)$$

当系统中出现不平衡扰动时,一般而言均需要同步发电机进行惯量响应来应对有功缺额以及频率变化波动。当系统中存在新能源设备且负荷处存在感应电动机时,虚拟惯量和负荷惯量也会出现在惯量响应过程中。由式(15)可知,等效区域惯量估计涵盖了该区域中所有惯量源提供的惯量。在区域内存在其他惯量源且同步发电机的惯性时间常数已知的情况下,运用控制变量法即可求得其他惯量源为该区域贡献的惯量水平。

## 2.4 储能容量配置策略

储能系统具有响应速度快、能量密度高、功率和容量配置灵活等优点,是维持电力系统频率稳定的一种重要手段<sup>[21]</sup>。而储能安装成本高的问题又会制约储能的大规模接入,因此,合理的储能配置容量可以降低成本又能够维持电力系统频率稳定。

储能功率充放电与储能容量之间存在一定的比例关系,如式(16)所示<sup>[22]</sup>。

$$P_{s,(max)} = \mu E_s \quad (16)$$

式中: $P_{s,(max)}$ 为储能功率充放电的上限; $E_s$ 为储能容量上限; $\mu$ 为储能功率上限和容量上限的固定比例系数。

储能参与调频的成本 $C_s$ 主要包括功率成本以及容量成本,具体关系式如式(17)所示<sup>[23]</sup>。

$$C_s = C_{e1} P_s + C_{e2} E_s \quad (17)$$

式中: $C_{e1}$ 为储能的单位功率成本; $C_{e2}$ 为储能的单位容量成本; $P_s$ 为储能有功功率。

本文所提面向电力系统稳定运行的储能系统优化配置策略的具体步骤如下,流程图如附录A图A2

所示。

1) 根据给定的初始数据,确定储能的初始容量 $E_0$ 。

2) 确定容量增长值 $E_N$ 以及容量增长速度 $\delta$ ,同时给定收敛精度为 $\lambda_0$ (小数点后两位)。

3) 以 $E=E_0+\delta E_N$ ( $E_0$ 为储能容量初始值)作为系统的储能容量重新计算频率偏差,判断是否满足频率稳定要求。若不满足频率稳定要求,则重复步骤3);若满足,则执行步骤4)。

4) 判断 $\delta$ 是否小于 $\lambda_0$ ,若 $\delta$ 小于 $\lambda_0$ ,则进入步骤6);若 $\delta$ 大于或等于 $\lambda_0$ ,则进入步骤5)。

5) 退回上一次储能容量配置方案,并减小步长 $\delta_1$ ,使容量增长量 $\delta_1$ 变成 $\delta/3$ ,再返回步骤3)继续计算。

6) 满足误差条件的方案通过式(17)计算该方案的成本,计算后输出同时符合误差及成本的所有方案。

7) 综合考虑步骤6)给出的所有方案,并择优确定最佳储能容量配置策略。

### 3 算例分析

#### 3.1 仿真系统介绍

本文选用如附录B图B1所示的改进IEEE 10机39节点仿真系统来验证所提估计方法的有效性。该系统的电压水平为345 kV。发电机 $G_1$ 为等值外部电网,负荷采用恒功率模型。

#### 3.2 电力系统分区以及测量节点的选择

按照前文所述的谱聚类分区方法,设定电力系统网络图的权重为电力传输线路阻抗模的倒数,构建邻接矩阵,以表示系统任意2个节点间的内在联系紧密程度。构造CH指标曲线并取该曲线的极大值,可以求得特征矩阵样本聚合类别数 $K=4$ 。具体分区结果和区域内节点如附录B表B1所示。

将IEEE 10机39节点分区后,用皮尔逊相关系数决定各个区域的惯量中心测量节点,模拟30次发生不平衡功率的情况,主要包含有功负荷的突增以及发电机切机(有功功率缺额),选取每次扰动过程中皮尔逊相关系数最大概率的节点作为该区域的测量节点,测量节点的选择如附录B表B2所示。

根据表B1、B2,当电力系统网络结构不变且不论发生何种情况下的扰动时,各个区域中受影响程度最小的节点为:区域1节点39、区域2节点25、区域3节点23、区域4节点6。因此下文进行惯量估计仿真验证时选择以上4个节点的频率分别作为相应区域的频率。

#### 3.3 惯量估计分析

##### 3.3.1 不同场景下的惯量估计结果

在对电力系统区域惯量进行估计之前,首先对

3.2节选择的测量节点进行误差分析以及合理性验证。在改进的IEEE 10机39节点系统中节点15处设置突增有功负荷500 MW模拟扰动情况,测量节点39、节点25、节点23、节点6处频率与惯量中心频率的频率变化率,并对测量节点和惯量中心节点处的区域惯量进行估计,分析结果如图3所示。系统测量节点和惯量中心节点处的惯量估计值分别为4.28、4.36 s。

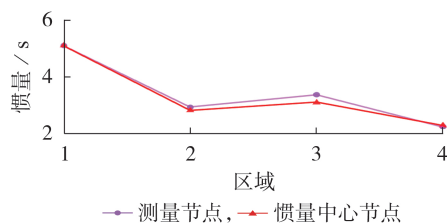


图3 测量节点选择的准确性检验

Fig.3 Accuracy verification of measurement node selection

由图3可知,在各区域中选择的测量节点和惯量中心节点处的惯量估计值误差很小,2条惯量曲线几乎完全重合。因此,选择测量节点估计惯量可以保证误差在合理水平范围内。

对IEEE 10机39节点系统进行了如下改进:发电机 $G_3$ 、 $G_4$ 、 $G_8$ 分别被130、108、120台单机容量为5.556 MV·A、输出功率为5 MW的风力发电机组代替,分别记为 $W_1$ — $W_3$ 。区域2中 $W_1$ 容量占比为26%,区域3中 $W_3$ 容量占比为21%,区域4中 $W_2$ 容量占比为51%,且所有风力发电机组均设置虚拟惯量控制环节为系统提供虚拟惯量。设置3种场景观察在3个不同区域内发生扰动情况下系统惯量估计结果:场景1,节点4处突增负荷300 MW;场景2,节点27处突减负荷300 MW;场景3,节点16处突增负荷400 MW。

定义惯量估计误差 $\lambda$ 为本文测得的惯量估计值和系统实际惯量之差与系统实际惯量的比值的绝对值,表达式如式(18)所示。

$$\lambda = \left| \frac{H_r - H_k}{H_r} \right| \times 100\% \quad (18)$$

式中: $H_r$ 为电力系统各区域实际惯量值; $H_k$ 为电力系统惯量估计值。

通过差值算法对各个区域惯量进行估计并与该区域实际值进行对比分析,所得估计结果及误差如表1所示。场景1—3中系统总惯量分别为8.763、9.637、9.059 s,电力系统惯量估计误差分别为4.34%、5.21%、1.01%。

由表1可知,在上述3种场景中,分区后惯量估计的误差范围控制在1.07%~5.89%,电力系统估计值的误差低于5.5%。误差结果可以反映本文提出



表1 各区域惯量估计结果及误差

Table 1 Inertia estimation results and errors in each region

区域	惯量 / s			误差 / %		
	场景1	场景2	场景3	场景1	场景2	场景3
1	9.497	10.058	9.814	5.03	5.89	1.86
2	7.321	7.709	7.122	2.03	3.19	4.66
3	7.506	7.819	7.895	5.94	4.67	1.07
4	8.631	9.081	8.516	1.66	3.08	3.34

的惯量估计方法准确度比较高。由于区域1中仅有发电机G<sub>1</sub>且与外部电网相连,该区域的惯量值较高。因此,在估计过程中其他3个区域(区域2—4)受该区域的影响比较大。风机参与的电力系统在发生扰动时可以提供虚拟惯量来维持电网的稳定性。

### 3.3.2 分区方法以及差值法的有效性验证

本文利用谱聚类分区算法对电力系统进行惯量估计,与系统不分区情况下的系统等效惯量估计结果进行对比分析。设在节点27处突增负荷300 MW,负荷均为恒功率负荷,不同分区方法下的惯量估计结果如附录B表B3所示。

本文提出的电力系统惯量估计差值算法在估计过程中可忽略扰动功率,与运用RoCoF的传统算法估计电力系统惯量相比,所提算法具有较高的精确度以及较小的误差。扰动下惯量估计结果如附录B表B4所示。

结合表B3、B4的分析可知,对于大型电力系统,分区方法可以将系统耦合成等值发电机,且等值发电机数等于系统分区数。系统分区的惯量估计误差为5.21%,系统不分区的惯量估计误差为9.09%,两者误差相差3.72%,可以看出本文所提分区估计方法具有较高的精确性;同时,本文提出的差值法估计电力系统惯量误差比传统的运用RoCoF估计电力系统惯量的误差低3%左右,故本文提出的惯量估计方法具有更高的精确性。

分区估计系统惯量的方法与传统方法相比可以仅选择区域内的最优频率测量节点,大幅降低所需频率数据量,减少工作量,提高精度,降低误差。

### 3.3.3 储能容量配置策略的确定及验证

首先给定误差值为10%,通过容量配置步骤不断改变误差最终确定容量配置方案如表2所示。初始容量百分比设置为5%,定义配置百分比 $\eta$ 为储能容量与该区域总容量的比值,如式(19)所示。

$$\eta = \frac{E_c}{E_{\text{area},z}} \times 100\% \quad (19)$$

式中: $E_c$ 为储能容量; $E_{\text{area},z}$ 为区域z的总容量。在节点27处设置扰动负荷突增500 MW,确定储能安装位置为风机所在的3个节点:节点32、节点33、节点37,设定储能初值为5%。通过2.4节所述的步骤进行配置,确定储能安装位置如附录B图B2所示,设

置不同情况确定最终储能容量。

表2 给定不同误差情况下的储能容量配置

Table 2 Energy storage capacity configuration under different error condition

区域	设备类型	设备在该区域内的容量占比 / %				
		配置方案1	配置方案2	配置方案3	配置方案4	配置方案5
2	风机	26	26	26	26	26
	储能	5	12	19	21	26
3	风机	21	21	21	21	21
	储能	5	9	13	17	21
4	风机	51	51	51	51	51
	储能	5	20	30	40	50

通过对不同配置情况进行惯量估计观测误差情况,确定在IEEE 10机39节点系统中最佳的储能容量配置策略,不同配置情况下误差的情况如表3所示。

表3 不同储能配置方案误差

Table 3 Error under different energy storage configuration schemes

区域	误差 / %				
	配置方案1	配置方案2	配置方案3	配置方案4	配置方案5
2	5.38	4.96	3.89	2.72	2.01
3	5.88	4.98	3.66	2.67	2.06
4	5.93	4.89	2.95	2.62	2.03

然后,测算不同方案的成本,储能的单位功率成本为1240元/kW,单位容量成本为686.7元/(kW·h)。通过式(17)计算得到配置方案1—5的成本分别为24 898.06、49 393.14、62 205.65、77 952.66、96 945.61万元。

综合表3和计算成本,在选择合理误差水平的前提下,通过测绘表2、3的二维坐标点线图并观察斜率可知,保证储能成本在合理区间范围内的情况下,可选择配置方案3。因此,在对含风机的电力系统进行惯量估计后,确定最佳储能容量配置策略,可以在配置方案3的基础上对储能容量进行调整和优化,确保误差和成本在合理范围内。

## 4 结论

本文提出了一种适用于含风机的电力系统的等效惯量估计方法,主要考虑储能具有快速调频的特点,对储能的容量进行合理配置。主要的研究结论如下。

1)通过皮尔逊相关性系数确定各区域中区域频率的最佳测量节点。当各个区域确定节点测量频率时,区域惯量的估计误差为1.07%~5.89%,系统惯量的估计误差为5.21%。

2)本文提出利用差值法的区域惯量估计公式代

替传统的RoCoF估计惯量方法,该方法的优点是在计算过程中可以忽略系统中扰动功率的大小,大幅提高了估计结果的精确度,同时,在IEEE 10机39节点系统中进行仿真,验证了所提方法的有效性。

3)基于所估计的结果,上述惯量估计方法可以在确保误差和成本合适的区间内对储能容量进行合理配置,确定储能最佳配置策略。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 李昭良,胥国毅,王程,等. 计及功率响应延时补偿的换流器接口电源等效惯量估计方法[J]. 电力系统自动化,2023,47(1):12-21.  
LI Zhaoliang, XU Guoyi, WANG Cheng, et al. Equivalent inertia estimation method for converter-interfaced generator considering power response delay compensation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 12-21.
- [2] BARTON J P, INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [3] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904, 2205.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [4] PHURAILATPAM C, RATHER Z H, BAHRANI B, et al. Measurement-based estimation of inertia in AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1975-1984.
- [5] YANG D Y, WANG B, MA J, et al. Ambient-data-driven modal-identification-based approach to estimate the inertia of an interconnected power system [J]. IEEE Access, 2020, 8: 118799-118807.
- [6] DOHENY D. Investigation into the local nature of rate of change of frequency in electrical power systems [C] // 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference. Heraklion, Greece: IEEE, 2017: 28-31.
- [7] 李东东,董楠,姚寅,等. 考虑频率响应分散性及系统分区的含风电系统等效惯量估计[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(3):36-45.  
LI Dongdong, DONG Nan, YAO Yin, et al. Equivalent inertia estimation of a power system containing wind power considering dispersion of frequency response and system partitioning [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 36-45.
- [8] ZENG F H, ZHANG J B, ZHOU Y, et al. Online identification of inertia distribution in normal operating power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3301-3304.
- [9] 李世春,徐松林,李惠子,等. 风电场等效虚拟惯量快速估计方法[J]. 电网技术,2021,45(12):4683-4692.  
LI Shichun, XU Songlin, LI Huizi, et al. Rapid estimation of equivalent virtual inertia of wind farm [J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4683-4692.
- [10] TUTTELBERG K, KILTER J, WILSON D, et al. Estimation of power system inertia from ambient wide area measurements [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 7249-7257.
- [11] 李东东,张佳乐,徐波,等. 考虑频率分布特性的新能源电力系统等效惯量评估[J]. 电网技术,2020,44(8):2913-2921.  
LI Dongdong, ZHANG Jiale, XU Bo, et al. Equivalent inertia assessment in renewable power system considering frequency distribution properties [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2913-2921.
- [12] 王凯丰,谢丽蓉,乔颖,等. 电池储能提高电力系统调频性能分析[J]. 电力系统自动化,2022,46(1):174-181.  
WANG Kaifeng, XIE Lirong, QIAO Ying, et al. Analysis of frequency regulation performance of power system improved by battery energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 174-181.
- [13] 李颜鑫,付强,肖先勇. 电池储能并网系统小干扰稳定性研究综述[J]. 电力自动化设备,2023,43(9):125-137.  
LI Yanxin, FU Qiang, XIAO Xianyong. Review of research on small-signal stability of grid-connected battery energy storage system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 125-137.
- [14] 齐晓光,姚福星,朱天瞳,等. 考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):11-19.  
QI Xiaoguang, YAO Fuxing, ZHU Tiantong, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage in power system considering large-scale wind power integration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 11-19.
- [15] 郭壮志,洪俊杰,孟安波. 基于多维度动态协调的大规模并网风电储能容量多指标优化配置策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):161-168.  
GUO Zhuangzhi, HONG Junjie, MENG Anbo. Multi-index optimization of energy storage capacity configuration based on multi-dimensional dynamic coordination for large-scale grid-connected wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 161-168.
- [16] 陈厚合,杜欢欢,张儒峰,等. 考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):174-182, 188.  
CHEN Houhe, DU Huanhuan, ZHANG Rufeng, et al. Optimal capacity configuration and operation strategy of hybrid energy storage considering uncertainty of wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 174-182, 188.
- [17] 叶林,王凯丰,赖业宁,等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J]. 电网技术,2023,47(2):446-464.  
YE Lin, WANG Kaifeng, LAI Yening, et al. Review of frequency characteristics analysis and battery energy storage frequency regulation control strategies in power system under low inertia level [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 446-464.
- [18] LI D D, DONG N, YAO Y, et al. Area inertia estimation of power system containing wind power considering dispersion of frequency response based on measured area frequency [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(22): 4640-4651.
- [19] SANCHEZ-GARCIA R J, FENNELLY M, NORRIS S, et al. Hierarchical spectral clustering of power grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2229-2237.
- [20] 刘方蕾,胥国毅,王凡,等. 基于差值计算法的系统分区惯量评估方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(20):46-53.  
LIU Fanglei, XU Guoyi, WANG Fan, et al. Assessment method of system partition inertia based on differential calculation method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44

- (20):46-53.
- [21] 张晋铭, 欧阳森, 吴晗, 等. 计及配电网可靠性和运行经济性的电网侧储能优化配置[J/OL]. 电力自动化设备. (2014-01-04)[2024-03-11]. <http://doi.org/10.16081/j.epae.202312044>.
- [22] 米阳, 李海鹏, 陈博洋, 等. 基于模糊场景聚类的微电网两阶段优化配置[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(9): 1137-1145.  
MI Yang, LI Haipeng, CHEN Boyang, et al. Two-stage optimal configuration of microgrid based on fuzzy scene clustering [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(9): 1137-1145.
- [23] 赵晶晶, 徐传琳, 吕雪, 等. 微电网一次调频备用容量与储能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4324-4332, 4572.

ZHAO Jingjing, XU Chuanlin, LÜ Xue, et al. Optimization of micro-grid primary frequency regulation reserve capacity and energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4324-4332, 4572.

#### 作者简介:

米阳(1976—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为微电网控制、电力系统稳定运行与控制等(**E-mail**: miyangmi@163.com);

王沛林(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定运行等(**E-mail**: wangpl98@163.com)。

(编辑 王欣竹)

## Energy storage capacity configuration strategy based on partitioned inertia estimation of power system

MI Yang, WANG Peilin, ZHOU Jie, MA Siyuan, LI Dongdong

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** An energy storage capacity configuration strategy based on partitioned inertia estimation is proposed to address the decrease in inertia level of power system caused by large-scale renewable energy integration. Based on the analysis of inertia mechanism in traditional power system, an equivalent inertia model and a virtual inertia model for wind power and energy storage are established for power system with renewable energy. The spectral clustering is used to partition the power system to solve the problem that the uneven spatial distribution of inertia affects the estimation accuracy, and the measurement nodes are determined based on Pearson correlation coefficient. The difference method is used to estimate the inertia of each region of the partitioned system, and the energy storage capacity configuration strategy of the power system is designed based on the results of the partition inertia estimation. The simulation of IEEE 10-machine 39-bus model with wind power is built in DIgSILENT/PowerFactory for verification. The simulative results show that the proposed method can reduce inertia estimation error, and the energy storage capacity can be reasonably configured based on the inertia estimation results to ensure fast frequency regulation and provide virtual inertia support for the energy storage system.

**Key words:** inertia estimation; system partitioning; spectral clustering; difference method; energy storage capacity configuration strategy



## 附录 A

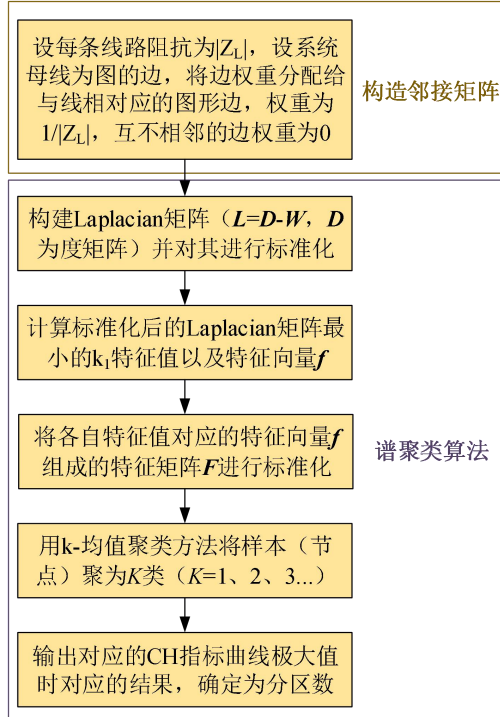


图 A1 谱聚类分区流程图

Fig.A1 Spectral clustering partition flow chart

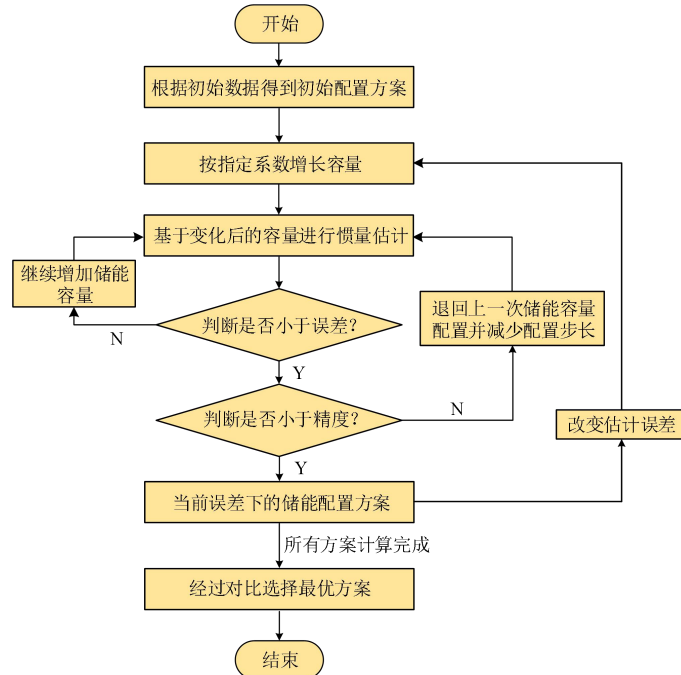


图 A2 储能容量配置流程

Fig.A2 Energy storage capacity configuration process

## 附录 B

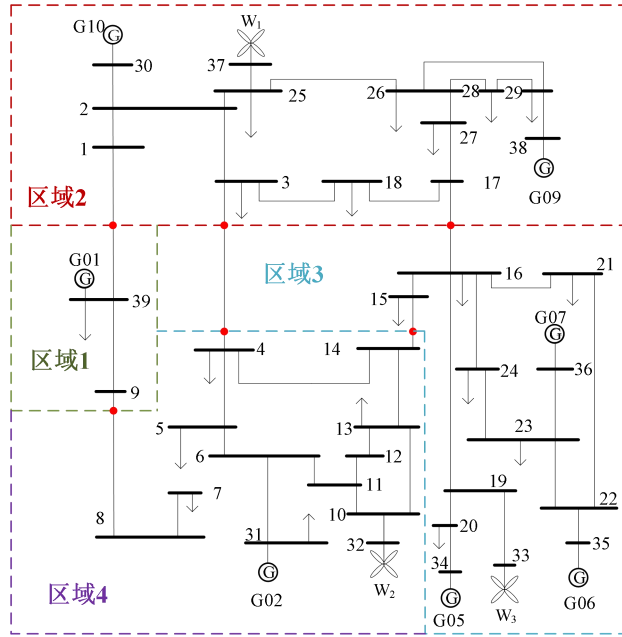


图 B1 改进的 IEEE10 机 39 节点系统图

Fig.B1 Improved IEEE 10 Machine 39 Node System Diagram

表 B1 电力系统分区结果

Table B1 Power system zoning results

区域号	区域内节点编号
1	9、39
2	1、2、3、17、18、25、26、27、28、29、30、37、38
3	15、16、19、20、21、22、23、24、33、34、35、36
4	4、5、6、7、8、10、11、12、13、14、31、32

表 B2 各区域测量节点的选择

Table B2 Selection of measurement nodes in each region

区域	测量节点的选择	30 次仿真中皮尔逊相关系数 $\rho$ 最大次数
1	节点 39	30/30
2	节点 25	27/30
3	节点 23	22/30
4	节点 06	24/30

表 B3 各区域惯量估计结果及误差

Table B3 Estimation results of system partition and non-partition inertia

系统是否分区	系统等效惯量实际值/s	系统等效惯量估计值/s	误差/%
是	9.16	9.637	5.21
否		9.993	9.09

表 B4 差值法惯量估计的精确度检验

Table B4 Accuracy testing of inertia estimation using difference method

估计方法	系统等效惯量实际值/s	系统等效惯量估计值/s	误差/%
差值法	9.16	9.637	5.21
传统 RoCoF 方法		9.962	8.76

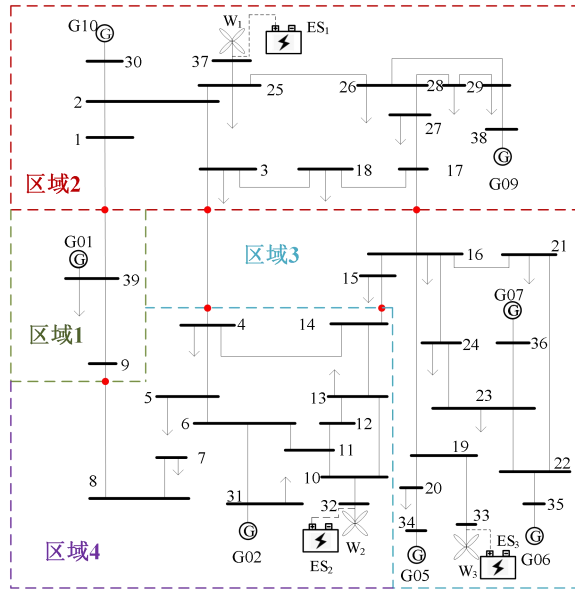


图 B2 储能安装位置的确定

Fig.B2 Determination of energy storage installation location