

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.03.026

# 负荷侧惯量估计的精细化统计修正方法

陈鑫宇<sup>1</sup>, 王琛洪<sup>1</sup>, 于晨阳<sup>2</sup>, 王鑫<sup>1</sup>, 许珈宁<sup>1</sup>, 李卫东<sup>2</sup>

(1. 国网辽宁省电力有限公司阜新供电公司, 辽宁 阜新 123000;

2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**随着新能源的发展,作为系统惯量主要来源的常规机组不断被替代,负荷侧惯量占比持续提升,其重要性日益凸显。而目前已有负荷侧惯量估计方法较为简单,其估计结果误差较大,不能满足系统运行管理的需求。基于惯性资源统计,文中提出一种负荷侧惯量估计的精细化统计修正方法。首先,从负荷侧基础元件的惯量分析入手,基于基本负荷单元的惯量建模,并给出各种典型负荷模式下的负荷侧惯量估计表达式。然后,面向负荷侧分布式电源接入场景,分析其对惯量估计的隐藏效应,针对表后电源具有与不具有惯性环节2种情形,给出负荷侧惯量估计的统一修正公式。最后,依据IEEE 9节点系统搭建仿真系统,分别对包含与不包含表后电源2种情形进行仿真分析。结果表明所得负荷侧惯量误差均不超过5%,验证了所提惯量估计方法的准确性和可靠性。

**关键词:**负荷侧惯量;惯性元件;表后电源;隐藏效应;统计修正;精细化方法

中图分类号:TM714

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)03-0244-10

## 0 引言

随着环境污染的加重和化石能源的枯竭,现代电力系统更加倾向于使用可再生能源代替传统的化石能源发电<sup>[1]</sup>。可再生能源机组往往通过逆变器装置并网,与系统频率解耦而难以提供惯量支撑<sup>[2-6]</sup>,这使得系统惯量不足问题日益严峻,由此引发一系列的频率安全事故<sup>[7-9]</sup>。同时,电源侧惯量的下降使得负荷侧惯量的重要性日益凸显<sup>[10]</sup>,迫切需要对负荷侧惯量实现精准估计。

当前的负荷侧惯量估计方法主要分为直接法与间接法2类。间接法的原理为根据系统受到扰动(自然发生或人为施加)影响后系统参量的变化,依据惯量作用原理辨识得到系统惯量,然后在所得到的系统整体惯量中去掉发电侧惯量进而得到负荷侧惯量<sup>[11-13]</sup>。该类方法可反应系统的实际频率响应能力,惯量估计值较为准确,但严重依赖于场景,在系统复杂运行状况下的泛化能力较差<sup>[14-16]</sup>。直接法是将各类负荷依据相关理论<sup>[17-18]</sup>等值综合为恒定负荷与电动机固定比例的模型(下文简称为固定比例模型),然后将所有负荷通过统计累加得到整个负荷侧的惯量,故还可被称为统计法。该类方法不依赖于运行场景且计算速度快,有较好的应用潜力。但负荷等值做法较为简单粗略,仅适用于负荷侧用电设备较为简单的情况。

表后电源是指在一次变电站电能计量表(下文

简称电表)后端接入的分布式电源,其会对统计类方法的估计结果造成影响。表后电源一方面自身存在惯性环节,可作为负荷侧惯量的一部分在频率响应时发挥作用;另一方面可通过就地供电,使得相应数量负荷不体现于电表,从而使得表计惯量估计结果不准,因此,利用统计法若要实现负荷侧惯量的精准估计,需要考虑表后电源的影响。

针对上述问题,基于统计法原理,文中提出了一种负荷侧惯量估计的精细化统计修正方法。由于无需系统受扰后参量,该方法可适用于任意工况下的惯量估计。首先,从分析惯性元件的惯量出发,实现各负荷单元的惯量估计建模;其次,划分负荷运行模式,累加各负荷单元惯量得到负荷侧整体惯量;然后,分析表后电源对惯量的影响,给出具有表后电源的负荷侧惯量估计的修正公式;最后,利用改进的IEEE 9节点系统进行仿真分析,验证了文中所提方法的准确性和可靠性。

## 1 惯量估计的统计修正方法框架

### 1.1 统计修正方法的具体阐述

负荷侧惯量水平的评估是确定系统频率响应能力的重要一环,目前主要有2种途径用于求取负荷侧惯量。其一,施加扰动后各参量辨识出惯量。该类方法估计较为准确,但只能在扰动事件后进行估计,具有惯量估计结果滞后的本质局限性,难以用于提前确定系统惯性响应能力的场景。其二,将负荷侧等效为固定比例模型,依据惯性元件惯量特性累加得到负荷侧惯量,但这类等效极为粗糙,惯

收稿日期:2023-12-13;修回日期:2024-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U22A20223)

量估计精度严重不足。

为提前获取负荷侧惯量、确定系统频率响应能力,对采用统计法进行惯量估计的粗糙模型进行修正,包括固定比例模型修正和表后电源修正两部分,如图1所示。

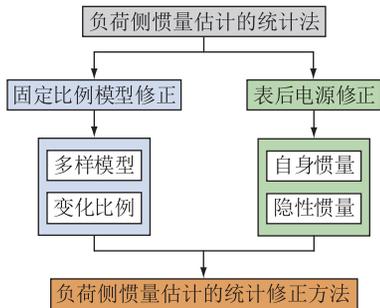


图1 负荷侧惯量统计法的修正  
Fig.1 Correction of the load-side inertia statistics method

固定比例模型修正包括电动机模型的补充和动静负荷占比的修正。随着负荷侧惯性资源的复杂性增加,尤其是异步电动机类型增多,单一的电动机模型难以表征多样化设备的惯量特性,而统计修正方法引入了多种类型电动机用于惯量估计;考虑到负荷时变性和负荷运行模式的多样性,固定比例模型难以准确表征全部的负荷模式,而统计修正方法根据负荷运行特点给出了不同运行模式下的不同负荷比例。

表后电源修正将表后电源对负荷侧惯量估计的影响考虑在内。随着表后电源容量占比的不断提升,其影响不容忽视。表后电源对负荷侧惯量估计精度的影响主要体现在2个方面:一方面,表后电源自身可能存在惯性环节,故可作为负荷侧惯量的一部分在频率响应时发挥作用,而现有方法并未计入该部分;另一方面,表后电源由于提供电能服务,降低了配电侧电量表的计数,此时继续通过电量表计数估计负荷侧惯量会产生较大的估计误差,需要进行修正。

## 1.2 统计修正方法流程

统计修正方法是对惯量估计统计法的延申,可参照统计法的具体估计流程,并引入特有的修正部分,整体的估计流程如图2所示。

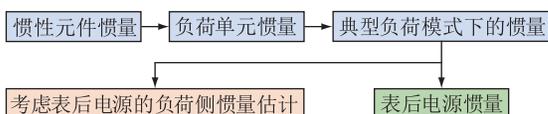


图2 负荷侧惯量统计修正方法流程  
Fig.2 Process of load-side inertia statistical correction method

完成负荷侧惯量的估计首先要从分析惯性元件的惯量出发,按照设备特性和负荷特点抽象出基本的惯性元件,并构建其模型,根据分类统计得到惯性资源数目以及负荷单元结构,实现负荷单元的惯量估计建模,在此步骤中引入多种电动机模型,完成对固定电机模型的修正;然后,在考虑行业和时段差异的基础上综合负荷单元形成典型负荷模式,通过各典型负荷模式下的惯量估计实现负荷侧惯量的准确估计,在此步骤中进行负荷运行模式聚类,实现对固定比例模型的修正;接下来,考虑表后电源的惯量作用并估计表后电源的惯量,修正表计电能数量;最后,估计得到精确的负荷侧惯量。

## 2 负荷侧惯量建模及惯量估计

系统受到扰动后,其自身会展现出一种保持频率稳定的能力,这种能力大小的衡量尺度就是惯量。惯量可通过惯量或惯性时间常数来进行衡量,其关系为:

$$E = HS \quad (1)$$

式中: $E$ 为惯量,其更倾向于从能量的角度进行阐述; $H$ 为惯性时间常数,其更倾向于从响应时间的角度进行阐述; $S$ 为系统容量。文中以惯性时间常数为衡量尺度,后续所提负荷侧惯量均指负荷侧惯性时间常数。

### 2.1 面向惯量的负荷抽象

惯量是一种集成量,为系统全部惯性资源呈现出的惯量总和。因此,求取负荷侧惯量首先需要研究负荷侧惯性资源的惯量。负荷侧的惯性资源种类多样,提供的惯量亦各不相同,对所有惯性资源的惯量都进行研究,操作繁琐而难以实现。

为此,可对各类惯性资源进行抽象,按照设备特性和负荷特点,将负荷侧惯性资源划分为异步电动机、同步电动机和静态负荷等3类惯性元件,高效实现对负荷侧海量惯性资源的惯量分析。异步电动机在扰动发生后可改变转速,释放转轴中的动能从而提供惯量<sup>[19-21]</sup>;同步电动机同样可以通过释放转轴中的能量提供惯量,其与异步电动机的区别在于同步电动机转速始终跟随系统频率变化;静态负荷在扰动时消耗功率会发生改变,其效果相当于提供了虚拟惯量<sup>[22-23]</sup>,但往往因其惯量值较小而被忽略。

### 2.2 惯性元件的惯量建模

#### 2.2.1 异步电动机的惯量估计

异步电动机提供惯量的方式有2种:一种是受扰后电动机转速发生变化,通过释放转子中的能量

提供惯量;另一种是受扰后电动机拖动的负载消耗功率改变,通过补偿功率缺额产生惯量的作用效果。

异步电动机的惯量特性可通过对异步电动机的等值电路进行分析获得,其等值电路如图3所示。图中, $U_s$ 为电动机定子端电压; $I_s$ 为定子侧电流; $I_r$ 为转子侧电流; $R_s$ 、 $X_s$ 分别为定子侧的电阻和电抗; $R_r$ 、 $X_r$ 分别为转子侧的电阻和电抗; $X_m$ 为励磁电抗; $s$ 为转差率。

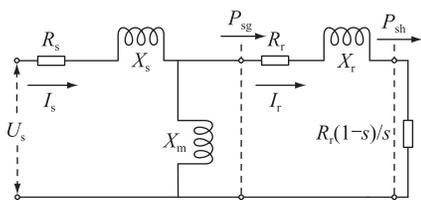


图3 异步电动机等值电路

Fig.3 Equivalent circuit of induction motor

由图3可知,通过气隙传递到转子的功率为:

$$P_{sg} = \frac{R_r}{s} I_r^2 \quad (2)$$

转子的电阻损耗为:

$$P_{lr} = R_r I_r^2 \quad (3)$$

因此,传递到电动机轴上的机械功率为:

$$P_{sh} = P_{sg} - P_{lr} = R_r \frac{1-s}{s} I_r^2 \quad (4)$$

则三相电动机的电磁转矩为:

$$T_e = 3 \frac{P_{sh}}{\omega_m} = 3 \frac{P_t}{2} \times \frac{R_r}{s \omega_s} I_r^2 \quad (5)$$

式中: $\omega_m$ 为转子的角速度; $\omega_s = 2\pi f$ , $f$ 为系统频率; $p_t$ 为电动机的级数。

为进一步得到转矩与转差率的关系,将图3左侧部分进行戴维南等效,得到简化后的等值电路,如图4所示。

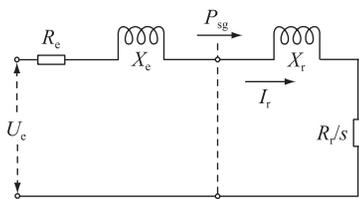


图4 异步电动机简化等值电路

Fig.4 Simplified equivalent circuit of induction motor

根据图4可得:

$$\begin{cases} U_e = \frac{U_s j X_m}{R_s + j(X_s + X_m)} \\ R_e + j X_e = \frac{(R_s + j X_m) j X_m}{R_s + j(X_s + X_m)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $U_e$ 为等效后定子端电压; $R_e$ 、 $X_e$ 分别为等效后

定子侧的电阻和电抗。

进一步,可得到电磁转矩为:

$$T_e = 3 \frac{p_t}{2} \times \frac{R_r}{s \omega_s} \times \frac{U_e^2}{(R_s + R_r/s)^2 + (X_e + X_r)^2} \quad (7)$$

而机械负载转矩为:

$$T_m = T_0(A\omega^2 + B\omega + C) \quad (8)$$

式中: $T_0$ 为电动机初始转矩; $\omega$ 为异步电动机转动角速度; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为机械负载转矩系数<sup>[24]</sup>, $C$ 可由式(9)确定。

$$\begin{cases} A\omega_0^2 + B\omega_0 + C = 1 \\ \omega_0 = 1 - s_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\omega_0$ 为电动机的初始转动角速度; $s_0$ 为对应的初始转差率。

根据电磁转矩和机械负载转矩,可计算出异步电动机及其负载的综合惯量为:

$$H_{asm} = \frac{T_e - T_m}{2d\omega/dt} \quad (10)$$

### 2.2.2 同步电动机的惯量估计

当系统发生扰动后,系统频率变化导致同步电动机转子转速同步变化,可向系统释放能量,为系统提供惯量。

同步电动机的负载转矩表达式为:

$$T_m = T_0 \omega_r^b \quad (11)$$

式中: $b$ 为负载特性相关的系数; $\omega_r$ 为同步电动机的转动角速度。

根据转子运动方程可以得到同步电动机及其负载的综合惯量为:

$$H_{sm} = \frac{T_e - T_m}{2d\omega_r/dt} \quad (12)$$

### 2.2.3 静态负荷的惯量估计

静态负荷由恒阻抗( $Z$ )、恒电流( $I$ )和恒功率( $P$ )等3类负荷组成,因此也被称为ZIP静态负荷。当系统受扰后,其电压发生变化导致负荷从系统中取用的功率发生变化,其效果相当于提供惯量。

ZIP静态负荷模型为:

$$P_L(t) = P_{L0}(p_1 \bar{U}^2 + p_2 \bar{U} + p_3)(1 + K_{pf} \Delta f) \quad (13)$$

式中: $P_L(t)$ 、 $P_{L0}$ 分别为扰动时刻和扰动发生前的负荷功率; $\bar{U}$ 为扰动前后负荷母线电压之比; $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 分别为恒阻抗负荷、恒电流负荷和恒功率负荷的比例系数,三者之和为1; $K_{pf}$ 为功率频率系数; $\Delta f$ 为频率变化量。

扰动发生后,ZIP静态负荷从系统中取用的功

率发生变化,其值为:

$$\Delta P(t) = P_{L0}[(p_1 \bar{U}^2 + p_2 \bar{U} + p_3)(1 + K_{pf} \Delta f) - 1] \quad (14)$$

根据系统受扰后的摇摆方程,可得 ZIP 静态负荷的惯量为:

$$H_{ZIP} = \frac{\Delta P(t)f}{2Sk_{\text{rocof}}} \quad (15)$$

式中: $k_{\text{rocof}}$ 为系统受扰后的频率变化率。

一般而言,大型电力系统中有功与无功耦合较弱,在系统发生小扰动并伴随有功功率缺失时,系统运行电压几乎不变,即式(14)中的 $\bar{U}$ 接近于1,同时功率频率系数 $K_{pf}$ 很小,使得 ZIP 静态负荷从系统中取用的功率几乎不发生变化。

ZIP 静态负荷消耗功率几乎不变,即式(15)中功率变化量趋近于0,使得 ZIP 静态负荷所能提供的虚拟惯量很有限,可以忽略不计。

### 2.3 负荷单元的惯量建模

基本负荷单元由不同种类的负荷构成,可利用上文所构建的3类惯性元件进行组合,实现各基本负荷单元的惯量建模。

系统在正常运行状态下,当母线电压低于阈值时,可将 ZIP 静态负荷中的恒电流分量与恒功率分量用恒阻抗等值描述。因此,在计算惯量时可将负荷单元模型等效为电动机与恒阻抗负荷并联。考虑各负荷单元的负荷构成及所用电动机类别,可将负荷单元划分为重工业负荷、轻工业负荷、农业负荷、商业负荷和民用综合负荷5类。

由2.2.3节分析可知,ZIP 静态负荷提供的惯量响应很小,可忽略不计,则负荷单元的惯量主要来源于异步电动机,进而可认为负荷单元惯量与异步电动机占比存在线性关系,即:

$$H_{\text{md}} = p\alpha + q \quad (16)$$

式中: $H_{\text{md}}$ 为负荷单元惯量; $p$ 、 $q$ 为负荷单元惯量与电动机占比之间的拟合系数; $\alpha$ 为电动机占比。

### 2.4 负荷侧惯量估计

负荷侧惯量是负荷侧全部负荷单元的惯量总和,其值取决于负荷单元的类型及其用电数量,即:

$$H_L = \sum_{i=1}^n k_i(p_i \alpha + q_i) \quad (17)$$

式中: $H_L$ 为负荷侧惯量; $n$ 为行业总数,包括重工业、轻工业、农业、商业与民用综合等5个行业; $k_i$ 为 $i$ 行业负荷侧惯性资源的数量; $p_i$ 、 $q_i$ 为 $i$ 行业负荷单元惯量与电动机占比之间的拟合系数。

可见,只要确定了负荷单元的类型及其用电数量,通过累加即可实现负荷侧惯量的估计。因此,

可按照负荷结构及数量进行面向惯量的负荷模式划分,然后通过惯性资源惯量的累加得到各模式下的负荷侧惯量。

#### 2.4.1 面向惯量的负荷模式聚类

不同类型的负荷元件所呈现的惯量不同,因此负荷侧惯量不仅取决于用户的负荷数量,还与其接入的设备类型密切相关。对稳定运行的电力系统而言,不同时刻的负荷数量、负荷设备类型在不断变化,因此理论上,若要准确估计负荷侧惯量,则要对每一时刻的负荷情况进行分析。显然,该做法的工作量极大,难以实现。

无论是工作还是生活中,用户用电习惯一般会呈现出规律性,如:取暖负荷只存在于冬季,工作时段电动机容量占比要高于休息时段,等等。因此,负荷的数量与结构会呈现出规律性。可利用该特点对负荷进行面向惯量的负荷模式聚类,得到可尽量覆盖所有运行状态的典型负荷模式,进而对每一类典型负荷模式进行惯量估计,以点带面,从而得到所有时间段负荷侧的惯量。该做法尽管会牺牲一定程度的估计精度,但可极大地提高分析效率。

根据用电特点进行面向惯量的负荷模式聚类,具体可按照2个维度进行:(1)考虑到一年内不同日期负荷单元类型不同(如农业负荷只存在于春秋季节),将一年划分为夏季、冬季和一般季节3类;(2)考虑到一天内不同时段负荷单元比例不同(如早晚高峰民用负荷居多、夜间重工业负荷比例更大),将一天划分为22:00—06:00、06:00—08:30、08:30—12:00、12:00—18:00和18:00—22:00等5个时段。综合考虑上述2个维度,将负荷划分为15种面向惯量的典型负荷模式。

#### 2.4.2 典型负荷模式下的惯量估计

对于得到的15种典型负荷模式,可根据负荷单元类型和电动机容量占比等参量,利用文中所提出的统计修正法计算负荷单元的惯量,然后对全部负荷单元的惯量进行累加,从而得到相应典型负荷模式下的惯量。

典型负荷模式下的负荷侧惯量计算公式为:

$$H_{Ld} = \sum_{i=1}^n H_{i,j} = \sum_{i=1}^n (H_{i,j,\text{asm}} + H_{i,j,\text{sm}} + H_{i,j,\text{ZIP}}) \quad (18)$$

式中: $H_{Ld}$ 为某一典型负荷模式下的负荷侧惯量; $H_{i,j}$ 为第 $j$ 个典型负荷模式下 $i$ 行业所提供的惯量; $H_{i,j,\text{asm}}$ 、 $H_{i,j,\text{sm}}$ 、 $H_{i,j,\text{ZIP}}$ 分别为第 $j$ 个典型负荷模式下 $i$ 行业中异步电动机、同步电动机和 ZIP 静态负荷惯量。

注意到,根据式(18)所得到的是某一特定典型负荷模式下的负荷侧惯量。若负荷的用电特点发生变化,则需要依据负荷结构以及数量的变化情况,对负荷模式重新进行聚类,从而得到新的典型负荷模式,然后利用所提方法再对所有典型负荷模式进行惯量估计。

同时,文中研究重点在于提出负荷侧惯量的统计修正方法,因此确定了一个前提,即认为通过负荷模式聚类获取的负荷类型及其比例是准确的,最终负荷侧惯量估计误差仅来自于统计修正方法的误差,而与负荷侧辨识结果无关。

### 3 包含表后电源的负荷侧惯量估计

#### 3.1 表后电源对惯量估计的影响分析

通过上述研究,可根据配电侧一次变电站电量表计数准确地估计负荷侧惯量,但当配电网中存在小型发电机组和分布式新能源(风电与光伏发电等)时,由于这些电源连接在一次变电站电量的后端,其输出电能数量会降低配电侧电量表计数。此时,若延用式(17)的惯量估计公式已不能得到准确结果,需要进行修正。

一次变电站的负荷构成如图5所示,其中图5(a)为不存在表后电源的一次变电站的负荷结构,此时电量表计数等于实际负荷用电量,即:

$$P_L = P_{RL} \quad (19)$$

式中: $P_L$ 为不存在表后电源时的电量表计数; $P_{RL}$ 为负荷侧的实际负荷用电量。此时通过式(17)的惯量估计方法可精确得到负荷侧惯量。

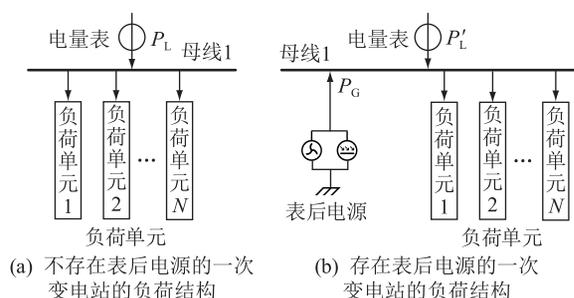


图5 一次变电站的负荷构成

Fig.5 Load composition of primary substation

图5(b)为存在表后电源的一次变电站的负荷结构,此时电量表计数不再为实际负荷用电量,而是其与表后电源提供电能数量之差,即:

$$P'_L = P_{RL} - P_{LG} \quad (20)$$

式中: $P'_L$ 为存在表后电源时的电量表计数; $P_{LG}$ 为表后电源提供电能数量。

根据表后电源对惯量估计的影响分析,需要对

式(17)进行修正,得到存在表后电源的负荷侧惯量与负荷关系,即:

$$H'_L = \sum_{i=1}^n k_i(p_i\alpha + q_i) + H_{DC} \quad (21)$$

式中: $H'_L$ 为计及表后电源的负荷侧惯量; $H_{DC}$ 为表后电源惯量。

表后电源对惯量估计的影响主要体现在2个方面。一方面,表后电源若存在转轴设备,或通过电力电子装置接入且设计了惯性响应控制逻辑,则在系统发生扰动后,设备通过功率改变提供惯量,这类似于同步发电机的惯性作用。另一方面,如图5(b)所示,表后电源为负荷侧设备就地供电,部分负荷的电能消耗不体现于电量表,使得表计数量减少进而导致惯量估计值减小;但实际上,这部分被隐藏的负荷若包含惯性环节,则其在受扰后同样会提供惯量。为叙述简洁,将该部分被表后电源就地供电的负荷所对应的电力设备提供的惯量定义为隐性惯量,而在电量表中显示的负荷所对应的惯量定义为显性惯量。

#### 3.2 表后电源惯量估计

表后电源根据自身是否存在转轴环节、是否可以提供惯性响应,可分为不具备惯性的表后电源和具备惯性的表后电源。表后电源的一部分是分布式光伏、分散式风电等可再生能源,其通过电力电子设备与配电网连接,若其控制系统不设计惯性响应,则尽管存在转轴装置(如风电机组叶片),其惯性响应还是会被电力电子装置隔绝,在实际运行中并不体现惯性;若其控制系统设计惯性响应逻辑,则分布式电源按照该逻辑在运行中会提供相应的惯性响应。表后电源的另外一部分是传统的化石能源机组,其可在系统发生扰动后通过转子转速变化释放储存在转子中的能量,相当于为系统提供惯量。该部分惯量的估计较为简单,其值等于表后电源自身惯量  $H_{RLG}$ 。

除了表后电源自身的惯量,还可以通过影响表计的负荷数量来间接影响负荷侧惯量估计结果。表后电源主要是指分布式能源机组,其输出电能数量一部分用于异地传输,通过一次变电站传输到相邻系统中,另一部分用于本地消纳,给本地负荷就地供电,这部分电能最终在惯性响应中发挥了隐性惯量的作用。

分布式能源机组异地传输的电能在一次变电站电量表中表现为反方向(负值),通过电量表计数即可准确得到异地传输的电能数量,从而得到本地消纳的电能数量为:

$$P_{LC} = P_{PV,WC} - P_{OT} \quad (22)$$

式中: $P_{LC}$ 为本地消纳的电能数量; $P_{PV,WC}$ 为分布式能源机组输出电能数量; $P_{OT}$ 为异地传输的电能数量。

从而可得到含有表后电源的一次变电站负荷侧惯量为:

$$H'_L = H_{ex} + H_{im} + mH_{RLC} \quad (23)$$

式中: $H_{ex}$ 为显性惯量; $H_{im}$ 为表后电源隐性惯量; $m$ 为0-1变量,0表示表后电源不具备惯量,1表示具备惯量。

#### 4 算例分析与验证

为验证所提出的负荷侧惯量精细化统计修正方法的准确性,利用改进的IEEE 9节点系统进行仿真分析。仿真系统拓扑如图6所示。其中,节点1处发电机由2台发电机组G1-1、G1-2构成,容量分别为300 MV·A、150 MV·A;节点2与3处分别接入发电机组G2、G3,容量均为300 MV·A;节点5、6与8处均接入综合负荷,电动机参数使用IEEE标准模型参数,负荷量均为200 MV·A;节点5、6与8分别无功补偿10 Mvar、20 Mvar与20 Mvar;T1、T2、T3为变比相同的变压器;系统中的线路、变压器、发电机组与负荷等元件的参数参见文献[25]。

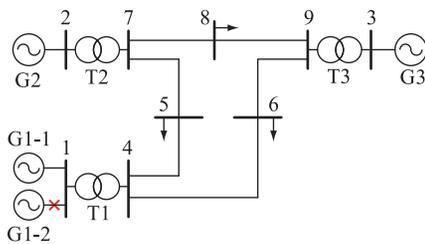


图6 改进的IEEE 9节点系统拓扑

Fig.6 Modified IEEE 9-bus system topology

仿真内容包括两部分,第一部分为求取负荷单元的拟合系数,从而实现各基本负荷单元的惯量建模,这是后续负荷侧惯量估计的基础;第二部分是对整个系统进行仿真分析,进行无表后电源与有表后电源2种情形中多种负荷模式下所提惯量估计方法的准确性验证,并对隐性惯量的表现和表后电源惯量的存在对负荷侧惯量的影响情况进行分析。

##### 4.1 惯量估计结果基准值的确定

为验证文中所提方法估计惯量的准确性,需要将估计对象的实际惯量作为基准值。但由于负荷侧设备数量庞大,采用实际测量的统计方法获取惯量可以说是不可能的。对于该问题,文中通过扰动法辨识得到系统惯量,进而得到负荷侧惯量,如式(24)所示。

$$H_d = H_s - H_g \quad (24)$$

式中: $H_d$ 为负荷侧实际惯量; $H_s$ 为利用扰动法辨识得到的系统惯量; $H_g$ 为利用统计法获得的发电侧惯量。

基于惯量作用原理辨识得到的系统惯量反映了系统实际的频率响应能力,较为准确,而发电侧元件数量较少,且铭牌均给出惯量参数,故利用统计法计算亦较为准确。因此,利用式(24)所得到的负荷侧惯量较为准确,将其作为验证所提方法准确性的基准值是恰当的。

##### 4.2 负荷单元拟合系数求取

利用电磁暂态仿真系统PSCAD搭建测试系统,系统总容量为600 MV·A,总负荷为200 MV·A,电动机参数使用IEEE 2标准模型,在 $t=60$  s时切除1台发电机组以模拟系统扰动,利用扰动法计算获取负荷单元惯量。

调整电动机容量在负荷中的占比,得到一组负荷单元惯量,利用该组数据进行回归分析可得到该负荷单元的电动机占比与惯量的关系:

$$H_{ld} = 0.683 + 0.327\alpha \quad (25)$$

式中: $H_{ld}$ 为重工业负荷单元惯量。

保持仿真条件不变,仅更改电动机参数<sup>[22]</sup>,对各类负荷单元分别进行分析,得到相应的电动机占比与惯量的关系,如图7所示。

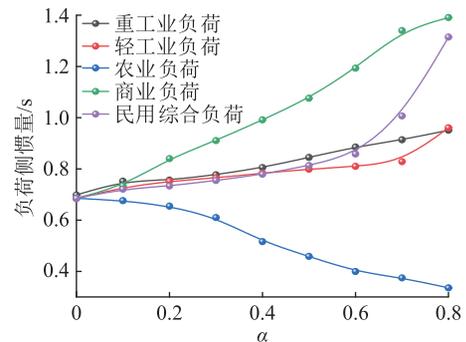


图7 典型负荷单元电动机占比与惯量关系

Fig.7 Relation between motor proportion and inertia of typical load units

基于图7所示各典型负荷单元的电动机占比与惯量关系,通过回归分析可得到各负荷单元的拟合系数,为4.3节负荷侧惯量估计准确性验证作铺垫。

##### 4.3 负荷侧惯量估计准确性验证

在得到典型负荷单元拟合系数的基础上,分别对不含表后电源、表后电源不具备惯性、表后电源具备惯性3种情形的负荷侧惯量进行估计,并对结果的准确性进行验证。

###### 4.3.1 不含表后电源的负荷侧惯量估计

在图6所示的系统中,将节点5所接负荷单元

设置为轻工业电动机负荷,节点6所接负荷单元设置为重工业电动机负荷,节点8所接负荷单元设置为民用综合电动机负荷;设置扰动为切除节点1处的1台发电机组,功率缺额30MW。

依据2.4节典型模式的负荷类型及其比例,在仿真系统中调整各负荷单元的电动机负荷与静态负荷的功率比例与之相符,选择其中6种典型模式进行算例验证,如表1所示。利用所提方法对6种典型负荷模式进行惯量估计,得到各典型模式下负荷侧惯量估计值与基准值的对比结果,如图8所示。图中, $H_{sys}$ 为系统惯量; $H_{ref}$ 为负荷侧惯量的基准值。

表1 典型负荷模式下负荷单元电动机占比情况  
Table 1 Motor proportion of load unit under typical load modes

模式	电动机占比/%		
	节点5	节点6	节点8
1	20	80	20
2	10	80	30
3	50	50	20
4	50	50	50
5	80	80	80
6	50	20	50

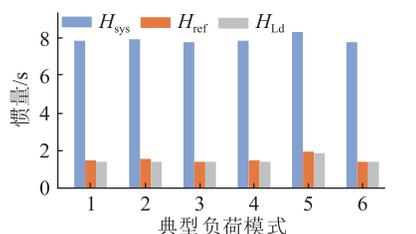


图8 不同负荷模式下的负荷侧惯量

Fig.8 The load-side inertia under different load modes

从图8可以看出,负荷侧惯量约占系统惯量的20%~25%,这与文献[26-27]的分析较为吻合;重工业电动机和民用综合电动机在惯性时间常数均为1.5s的情况下,呈现出的惯性作用相同,说明惯性大小只受到惯性时间常数 $H$ 影响。各典型模式下的负荷侧惯量估计值 $H_{Ld}$ 、统计法(50%异步电动机+50%恒阻抗负荷模型)所得惯量估计值 $H_{di}$ 与基准值 $H_{ref}$ 对比结果及误差如表2所示。其中,误差1为采用文中方法所得估计值与基准值之间的误差;误差2为统计法求得的惯量估计值与基准值之间的误差。

从表2可以看出,统计法求得的负荷侧惯量估计值受系统运行模式影响较大,在不同的负荷模式下,误差差异较大;利用文中方法得到的负荷侧惯量

表2 负荷侧惯量估计值与基准值对比

Table 2 Load-side inertia estimation value compared with reference value

模式	$H_{ref}$ /s	$H_{Ld}$ /s	$H_{di}$ /s	误差 1/%	误差 2/%
1	1.448	1.392	1.404	3.87	3.04
2	1.427	1.390	1.404	2.59	1.61
3	1.354	1.358	1.404	0.30	3.69
4	1.439	1.404	1.404	2.43	2.43
5	1.896	1.843	1.404	2.80	25.95
6	1.354	1.358	1.404	0.30	3.69

估计值与基准值的误差均在4%以下,小于统计法所求得平均误差6.74%,因此可认为负荷侧惯量统计修正方法准确可行。

#### 4.3.2 不具备惯性的表后电源的负荷侧惯量估计

在节点5和6分别接入不具备惯性环节的可调风力发电机组,在节点5、6和8处分别接入轻工业电动机并联恒阻抗模型的综合负荷,其电动机占比分别为50%、60%、70%,扰动设置同4.3.1节。

利用所提方法得到的负荷侧惯量估计结果如图9所示。

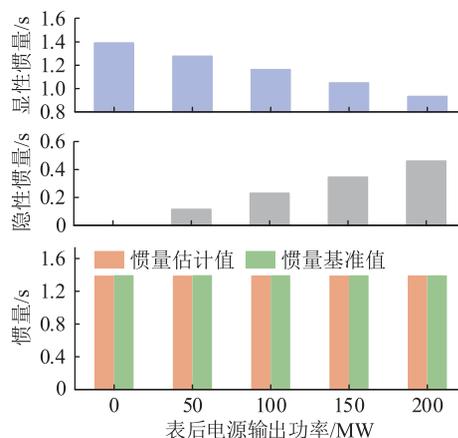


图9 表后电源不同输出功率的惯量估计结果

Fig.9 The inertia estimation results of different power output of behind-the-meter power supply

从图9可以看出,负荷侧表后电源的存在会对负荷侧惯量估计结果产生显著影响。随着表后电源输出功率的不断增大,利用不考虑表后电源的惯量估计方法所得到的显性惯量逐渐减小,而隐性惯量逐渐增大。这表明,随着表后电源直接供电数量的增加,隐藏负荷数量增加,导致隐性惯量逐渐增大。

将扰动法辨识得到的负荷侧惯量作为基准值,利用不考虑表后电源的负荷侧惯量估计方法进行估计,仅考虑表计显性惯量的惯量估计值与基准值误差较大;利用考虑表后电源的负荷侧惯量修正公式进行惯量估计,取隐性惯量与显性惯量之和得到

负荷侧惯量估计值,与基准值基本吻合,这表明利用不具备惯性的表后电源的负荷侧惯量修正公式得到的估计结果是准确的。

#### 4.3.3 具备惯性的表后电源的负荷侧惯量估计

在 4.3.2 节的系统条件设置下,将节点 5 和 6 上不具备惯性的风力发电机组修改为具备惯性的火电机组,机组容量为 150 MV·A,其余不变。

改变火电机组的惯性时间常数,利用具备惯性的表后电源的负荷侧惯量修正公式进行计算,得到在不同惯性时间常数下机组自身惯量、显性惯量和隐性惯量,其估计结果与惯量基准值的对比如图 10 所示。

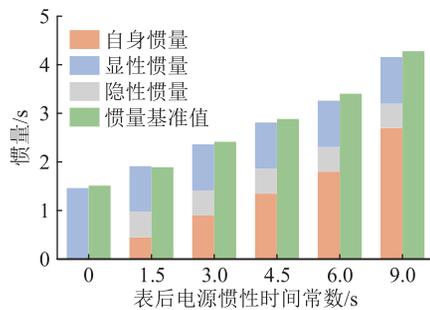


图 10 不同惯性时间常数下的惯量估计结果

Fig.10 The inertia estimation results under different inertial time constants

从图 10 可以看出,表后电源自身存在的惯量与惯性时间常数成正比;在表后电源提供功率不变的情况下,其所呈现出的隐性惯量保持不变;显性惯量与负荷侧惯量基准值相差较大。这说明表后电源的存在会显著影响惯量估计结果的准确性。

将显性惯量、隐性惯量和表后电源自身惯量累加得到负荷侧惯量估计值,其与基准值的定量对比结果如表 3 所示。

表 3 表后电源不同惯量情况下的负荷侧惯量估计值与基准值的对比

Table 3 Comparison of load-side inertia estimation values and reference values under different inertia conditions of behind-the-meter power supply

电源惯量/s	基准值/s	估计值/s	误差/%
0	1.439	1.392	3.27
1.5	1.800	1.821	1.17
3.0	2.301	2.249	2.26
4.5	2.747	2.678	2.51
6.0	3.242	3.107	4.16
9.0	4.076	3.964	2.75

从表 3 可以看出,基于修正公式得到的负荷侧惯量估计值与基准值的误差最大为 4.16%,最小为 1.17%,误差较小。这表明所提修正公式可应用于

包含表后电源的负荷侧惯量估计,估计精度可满足要求。

## 5 结论

面对已有负荷侧惯量估计方法存在的不足,基于不同运行模式下的负荷侧惯量分析,考虑表后电源对负荷侧惯量的影响,文中提出了一种负荷侧惯量估计的精细化统计修正方法。理论分析与仿真结果表明:

(1) 负荷侧惯量主要来源于异步电动机,其值不仅取决于负荷数量,也与异步电动机的容量占比密切相关,算例证明负荷单元惯量与电动机占比呈现近似线性相关的关系。

(2) 变电站用户侧的表后分布式电源数量对惯量估计的影响不容忽视。表后电源一方面可通过自身惯性环节提供惯量,另一方面,其就地供电本地负荷会造成表计供电数量降低,导致产生隐性惯量,进而显著降低负荷侧惯量的估计精度。

(3) 基于改进的 IEEE 9 节点系统进行仿真分析,结果表明,在负荷侧包含与不包含表后电源 2 种情况下,与基准值比较,所提估计方法的估计误差总体上不超过 5%,验证了所提统计修正法的可行性与准确性。

## 致谢

本文得到国家电网有限公司科技项目(2022-YF-34)资助,谨此致谢!

## 参考文献:

- [1] 文云峰,杨伟峰,汪荣华,等. 构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报,2020,40(6):1843-1855.  
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1855.
- [2] 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.
- [3] 王博,杨德友,蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术,2020,44(8):2998-3007.  
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3007.
- [4] 蒋小亮,李元臣,郝元钊,等. 计及新能源虚拟惯量的电力系统等效惯量评估[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(4):169-176.

- JIANG Xiaoliang, LI Yuanchen, HAO Yuanzhao, et al. Evaluation of power system equivalent inertia considering new energy virtual inertia[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 169-176.
- [5] 张军六, 李佳朋, 唐震, 等. 基于本地测量的高比例新能源电力系统不平衡功率估算与附加功率控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 50-60.
- ZHANG Junliu, LI Jiapeng, TANG Zhen, et al. Local measurement based unbalanced active power estimation and supplementary power modulation for power systems with high proportions of renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 50-60.
- [6] 韩如磊, 樊子铭, 王粟, 等. 新型电力系统惯量支撑和调频响应特性典型建模综述[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(11): 67-83.
- HAN Rulei, FAN Ziming, WANG Su, et al. Review of typical modeling for inertial support and frequency regulation response characteristics of new-type power system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(11): 67-83.
- [7] 朱超, 王蕾, 姚宇, 等. 新型电力系统背景下城市供电风险的传导推演与阻断方法[J]. 浙江电力, 2022, 41(7): 49-56.
- ZHU Chao, WANG Lei, YAO Yu, et al. Deduction of urban power supply risk transmission and blocking method in the context of the new power system[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(7): 49-56.
- [8] 方勇杰. 英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 1-5.
- FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 1-5.
- [9] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.
- ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.
- [10] BIAN Y K, WYMAN-PAIN H, LI F R, et al. Demand side contributions for system inertia in the GB power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3521-3530.
- [11] 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.
- [12] 易佩, 景志滨, 徐飞, 等. 考虑频率安全约束的电力系统临界惯量计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(10): 1721-1729.
- YI Pei, JING Zhibin, XU Fei, et al. Calculation of the critical inertia of a power system considering frequency security constraints[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(10): 1721-1729.
- [13] WALL P, GONZALEZ-LONGATT F, TERZIJA V. Estimation of generator inertia available during a disturbance [C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA. IEEE, 2012: 1-8.
- [14] AZIZIPANAH-ABARGHOEE R, MALEKPOUR M, PAOLONE M, et al. A new approach to the online estimation of the loss of generation size in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2103-2113.
- [15] PANDA R K, MOHAPATRA A, SRIVASTAVA S C. Online estimation of system inertia in a power network utilizing synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3122-3132.
- [16] 曾辉, 于晨阳, 李正文, 等. 一种区域电网惯量实用化快速估计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 180-187.
- ZENG Hui, YU Chenyang, LI Zhengwen, et al. A practical and fast estimation method of moment of inertia in a regional power network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 180-187.
- [17] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 258-260.
- JU Ping. Theory and method of power system modeling[M]. Beijing: Science Press, 2010: 258-260.
- [18] 吴峰, 戴小妹. 计及高渗透率光伏的配电网广义负荷一体化等值建模[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 1-7, 46.
- WU Feng, DAI Xiaomei. Integrated equivalent modeling for generalized loads of distribution network considering high-penetration photovoltaic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 1-7, 46.
- [19] 周涛, 刘子诚, 陈中, 等. 异步电机频率支撑能力分析及其等效惯量评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 18-24, 107.
- ZHOU Tao, LIU Zicheng, CHEN Zhong, et al. Frequency support capacity of asynchronous motor and its equivalent inertia evaluation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 18-24, 107.
- [20] 王玘, 袁小明. 异步电机机电时间尺度有效惯量评估及其对可再生能源并网系统频率动态的影响[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7258-7266.
- WANG Ding, YUAN Xiaoming. Available inertia estimation of induction machine in electromechanical timescale and its effects on frequency dynamics of power systems with renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7258-7266.
- [21] 周涛, 陈中, 王毅, 等. 计及异步电机频率响应的电力系统最低惯量评估[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 22-31.
- ZHOU Tao, CHEN Zhong, WANG Yi, et al. Evaluation of minimum inertia in power systems considering frequency response of induction machines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 22-31.
- [22] WILSON D, YU J, AL-ASHWAL N, et al. Measuring effective area inertia to determine fast-acting frequency response re-

- quirements [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 113: 1-8.
- [23] ZOGRAFOS D, GHANDHARI M. Power system inertia estimation by approaching load power change after a disturbance [C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, IL, USA. IEEE, 2017: 1-5.
- [24] PRICE W W, TAYLOR C W, ROGERS G J, et al. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1302-1313.
- [25] ANDERSON P M, FOUAD A A. 电力系统控制与稳定 [M]. 王奔, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012.  
ANDERSON P M, FOUAD A A. Power system control and stability [M]. WANG Ben, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [26] THIESEN H, JAUCH C. Determining the load inertia contribution from different power consumer groups [J]. Energies, 2020, 13(7): 1588.
- [27] BIAN Y K, WYMAN-PAIN H, LI F R, et al. Demand side contributions for system inertia in the GB power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3521-3530.

作者简介:



陈鑫宇

陈鑫宇 (1977), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电网调度运行工作 (E-mail: chenxinyu99@sohu.com);

王琛淇 (1990), 女, 硕士, 工程师, 从事电网调度运行工作;

于晨阳 (1996), 男, 硕士在读, 研究方向为电力系统频率响应。

### Refined statistically modified method for load-side inertia estimation

CHEN Xinyu<sup>1</sup>, WANG Chenqi<sup>1</sup>, YU Chenyang<sup>2</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, XU Jianing<sup>1</sup>, LI Weidong<sup>2</sup>

(1. Fuxin Power Supply Company of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Fuxin 123000, China;

2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** With the development of new energy, conventional units which are the main source of system inertia are constantly being replaced. Meanwhile, the load-side inertia becomes increasingly prominent with the increase of proportion. However, the existing load-side inertia estimation method is relatively simple, and the lower estimation accuracy cannot meet the needs of system operation management. Based on the principle of inertial quantitative statistics, a refined statistically modified method for load-side inertia estimation is proposed. Starting from the inertia analysis of the load-side basic elements and inertia modelling of the basic load units, an expression of load-side inertia estimation is given under typical load operating modes. Considering the scenario of distributed power supply access with hidden effect, the expression is modified in two cases of power supply with or without inertia equipment. According to IEEE 9-bus system, a simulation system is conducted, and simulation tests are carried out respectively with behind-the-meter power supply or not. The results show that the error of load-side inertia estimation is less than 5%, which verifies the accuracy and reliability of the proposed inertia estimation method.

**Keywords:** load-side inertia; inertia elements; behind-the-meter power supply; hidden effect; statistical modification; refinement method

(编辑 陆海霞)