

# 基于动态能量贡献度的机组调频能力评估方法

陆文安<sup>1</sup>,余一平<sup>1</sup>,吴迪<sup>2</sup>,刘辉<sup>2</sup>,彭伟<sup>2</sup>,鞠平<sup>1</sup>

(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;2. 国网安徽省电力有限公司,安徽 合肥 230022)

**摘要:**针对不同类型的同步机组缺乏统一、有效的调频能力评估方法的问题,从一次调频过程中的动态能量角度出发,在调频动态过程的不同阶段,构建机组一次调频能力评估指标,从能量贡献速度、深度、强度多维度评估机组一次调频的速动性、可靠性和重要性。基于改进的10机39节点系统,通过不同调频能力场景下各指标的计算情况以及和传统评估指标的对比,验证了该方法的合理性和有效性。在此基础上,量化研究了影响机组调频能力的关键因素,从能量的角度解释了各参数对调频动态指标的影响。该方法对于发现电网中存在的调频瓶颈以及提升电网的调频能力具有一定的参考价值。

**关键词:**动态能量;同步机组;能量贡献度;一次调频;调频能力评估

**中图分类号:**TM716

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202312011

## 0 引言

频率是电力系统安全稳定运行的重要指标,频率波动会给发电机组及系统造成严重的影响。随着新型电力系统的不断发展,作为调频主力的传统水火电机组被逐步替代,电力系统惯量逐渐降低,保持频率稳定的能力日益下降<sup>[1-2]</sup>。近年来,国内外发生多起频率安全事故:2015年9月19日,锦苏“9·19”直流闭锁故障导致华东电网频率大幅度降低至49.56 Hz,根本原因是火电机组一次调频能力不达标<sup>[3]</sup>;2016年9月28日,澳大利亚南部电网遭受台风导致新能源机组大面积脱网,系统频率快速跌落以致于系统发生解列<sup>[4-5]</sup>;2019年8月9日,英国由于系统功率缺额1691 MW,超过了电网所能承受的一次调频能力1000 MW,系统频率跌至48.8 Hz,从而引起低频减载动作,导致发生大面积停电事故<sup>[6-7]</sup>;2021年2月15日,美国得州遭受极端天气导致燃气机组停机及风机叶片结冰而脱网,造成停电事故<sup>[8]</sup>。可见,频率安全已成为制约新型电力系统发展的瓶颈问题。

新型电力系统存在的频率问题,根本原因在于系统的调频能力不足,这也重新引起了人们对电力系统调频能力的关注。目前,新能源机组参与调频实际应用尚不成熟,只在少数示范工程试点应用,系统中可以依赖的调频主力仍是传统水火电机组。同时,随着部分火电机组关停,可用于调频的同步发电机组减少,现有系统中水火电机组所承担的调频压

力增加,调频任务加重。同时,新能源发电的不确定性和随机性造成电力系统保持实时功率平衡的难度显著增加,水火电机组调频场景增多。因此,传统水火电机组面临的调频形势更加严峻,对水火电机组一次调频能力进行有效评估迫在眉睫。

目前,对于机组一次调频能力的评估主要集中于对发生扰动事故后监测的相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)数据进行事后分析。一方面研究基于系统的频率响应曲线,传统的评估指标主要包括频率下降速率、频率最大偏差、频率稳态偏差、频率最低值时间、频率稳态时间等<sup>[9]</sup>。文献[10]通过计算调速器的调差系数、一次调频死区和调频动作延迟时间来评估发电机组的一次调频能力。文献[11]提出了计及频率初始下降速率、频率最大偏差和频率稳态值的调频能力评估指标,通过熵权法加权求和获得最终的一次调频性能综合评价指标。另一方面研究基于机组的出力响应曲线,评估指标主要包括功率调整幅度、积分电量合格率等。文献[12]基于机组出力曲线,提出了调频响应速度、调整幅度、调整偏差、调频响应指数综合评估机组的一次调频性能。文献[13]在文献[11]的基础上,提出了基于熵权法-密切值法的一次调频性能评价指标,包含响应滞后时间、调频响应幅值、实际转速不等率、调频贡献度指数等。文献[14]利用均方差定义了考虑调频死区的一次调频能力评价指标,对一次调频能力进行全面评估。除此以外,诸多研究通过参数辨识的方法获得机组的调频参数,以此评估机组的调频能力。文献[15]通过辨识技术获得将转速和主汽压力作为输入、有功功率作为输出的一次调频模型,并基于该模型分析了响应时间、调节时间、调差系数等一次调频性能。文献[16]提出了锅炉动态模型的参数辨识方法,更加准确地模拟了火电机组一

收稿日期:2023-06-15;修回日期:2023-09-10

在线出版日期:2023-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077058);国网安徽省电力有限公司科技项目(B31200220005)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077058) and the Science and Technology Program of State Grid Anhui Electric Power Co.,Ltd.(B31200220005)

次调频的热力过程与调频能力变化。

综上所述,目前的一次调频能力评估指标大多针对于频率或功率的瞬时特征,而忽略了整个一次调频动态过程的累积效应,也难以综合反映各台机组对系统频率支撑的贡献大小。机组参数辨识虽然可以反映机组的调频能力,但上述研究未形成相应的评估指标体系,同时未采用评估方法对各指标的影响程度进行定量分析。电力系统频率波动实质上是偏离同步旋转坐标的动态过程,伴随着相对动态能量变化。扰动发生后频率变化意味着动态能量的产生,一次调频造成动态能量的衰减。因此,能量是一次调频的本源所在,本文从频率波动伴随动态能量的角度出发,分析调频响应过程中伴随能量的特性,构建机组调频能量贡献度指标,分别从能量贡献速度、深度、强度3个方面综合评估机组的一次调频能力。在此基础上,定量分析了机组关键参数对一次调频能力的影响。

## 1 一次调频动态过程及伴随能量分析

目前,电力系统的一次调频任务主要还是由传统水火电机组来承担,新能源机组参与调频尚处于起步阶段。因此,本文主要分析水火电机组的一次调频动态过程及其伴随能量变化。另外,频率上升和频率跌落情况下能量变化趋势相反,但变化规律相似,故而本文分析以频率跌落情况为例。

### 1.1 电力系统一次调频动态过程

当电力系统遭受功率扰动时,发电功率与负荷功率的不平衡会导致机组转速的变化,从而造成系统频率的变化。由于传统的同步机组具有调速器,能够自发地参与系统一次调频。在一次调频的过程中,传统水火电机组在系统频率恢复到准稳态前会经历以下3个阶段。

第一阶段,在系统发生功率扰动的初始时刻,系统存在不平衡功率。但由于发电机组存在惯性,机组功角不能突变,电网中各机组按照扰动发生地与各机组的电气距离、各机组扰动前的初始状态来分担系统中的不平衡功率,即按式(1)来调整功率 $\Delta P_i$ 。该阶段是在扰动发生瞬间完成的。

$$\Delta P_i = \Delta P_L \frac{dP_i/dX_i}{\sum dP_i/dX_i} \quad (1)$$

式中: $\Delta P_L$ 为不平衡功率; $P_i$ 为第*i*台机组的初始有功功率; $X_i$ 为第*i*台机组与扰动发生地之间的线路电抗。

第二阶段,扰动发生 $t_1$ 后,电网中各机组将按照各自惯性的大小重新分配功率不平衡量,如式(2)所示。这一过程中,发电机通过释放转子动能来抵消不平衡能量,从而减缓频率的变化速率,这是机组的自身特性,与外界条件无关。该阶段的典型时间尺

度为 $[0,10)$  s。

$$\Delta P_i = \Delta P_L \frac{T_{ji}}{\sum_{j=1}^n T_{ji}} \quad (2)$$

式中: $T_{ji}$ 为第*i*台机组的惯性时间常数; $n$ 为系统中机组总台数。

第三阶段,扰动发生 $t_2$ 后,频率偏差越过死区,各机组调速器开始动作,通过发出调门指令,改变水门/汽门开度进而改变原动机出力,按照各自的调差系数大小平衡系统中的不平衡功率,如式(3)所示。该阶段的典型时间尺度为 $[10,30]$  s。

$$\Delta P_i = \frac{\Delta f}{f_N} \frac{P_{Ni}}{\sigma_i} \quad (3)$$

式中: $\Delta f$ 为频率偏差; $f_N$ 为基准频率; $P_{Ni}$ 为第*i*台机组的额定有功功率; $\sigma_i$ 为第*i*台机组的调差系数。

由上述一次调频过程可以看出,影响电力系统频率稳定的主要是第三阶段,该阶段原动机及调速器性能的优劣直接决定了一次调频的总体效果。

第三阶段中,水火电机组的一次调频响应是原动机-调速器的自发调节特性,具体响应方式如图1所示。图中: $K_G$ 为机组一次调频系数; $T_G$ 为调速器时间常数; $F_H$ 为高压缸功率占比; $R$ 为调差系数; $T_R$ 为再热器时间常数; $T_i$ 为软反馈时间常数; $\beta$ 为软反馈系数; $0.5T_w$ 为水锤效应时间常数; $\Delta\mu$ 为水门/汽门开度; $\Delta P_m$ 为机械功率变化量。从机组在动态能量贡献的角度出发,水火电机组调频作用是相似的,即调速器根据系统频率偏差改变水门/汽门开度从而改变原动机输出的机械功率参与调频,进而改变系统由于扰动积累的动态能量。本文借助动态能量贡献这一综合指标计及不同机组调速器和原动机性能差异。在这一层面上,本文所关注的调频动态能量,即来自于调速器-原动机所注入的机械势能的形式具有一致性。因此,可以将水火电机组利用统一的调频指标进行评估。

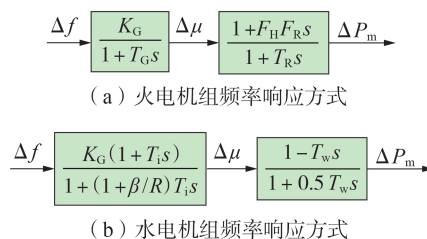


图1 同步机组频率响应方式

Fig.1 Frequency response mode of synchronous units

系统发生扰动时,新能源发电如风电,由于风机转速与系统频率解耦,风电的有功出力并不会随频率变化而变化,但是新能源机组可以附加虚拟惯量控制和下垂控制释放转子动能<sup>[17]</sup>,利用电力电子变

换器控制的快速性模拟同步机的惯性响应和一次调频阶段,新能源机组相较于同步机组能够在调频初始阶段更快地贡献调频能量,可以弥补调频初期火电机组能量贡献迟缓、水电机组能量负贡献的问题,但是转子动能无法长时间提供能量支撑,风电机组在调频后期需要从电网中吸收能量来恢复转速,这会导致频率的二次跌落问题。针对风电调频能力的评估,将在后续研究中开展。

## 1.2 一次调频过程中伴随能量分析

能量函数分析方法一直是电力系统暂态和动态评估的常用方法。大电网受到扰动后发生频率偏差,一次调频动作调整的动态过程伴随着机组及系统动态能量的变化。因此,可以从能量函数的角度量化机组一次调频过程中的作用。系统频率的变化反映的是机组转速的变化,本质而言是机组转子动能的变化。以单机系统负荷突增为例,分析电力系统在一次调频过程中系统能量的转化情况。

利用单机系统的转子运动方程可以描述一次调频过程中转子的运动特性,即转速的变化。若发电机采用二阶经典模型,采用转速偏差为状态变量的发电机转子运动方程可以表示为:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega \\ T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = (\Delta P_m - \Delta P_e - D\Delta\omega) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\omega$ 为机组转速; $\omega_0$ 为转速基准值; $\Delta\omega = \omega - 1$ ,为转速偏差; $\Delta\delta$ 为转子角位移; $T_J$ 为惯性时间常数; $\Delta P_e$ 为电磁功率变化量; $D$ 为阻尼系数。

一次调频过程中阻尼的影响可以忽略,在同步旋转坐标系下,将不平衡转矩对转子角位移进行首次积分,可得各转矩做功之和等于转子动能增加量,即:

$$\int_0^t T_J \Delta\dot{\omega} \Delta\omega \omega_0 d\tau = \int_0^t \Delta P_m \Delta\omega \omega_0 d\tau - \int_0^t \Delta P_e \Delta\omega \omega_0 d\tau \quad (5)$$

其中,动能变化函数 $\Delta V_{KE}$ 为:

$$\Delta V_{KE} = \int_0^t T_J \Delta\dot{\omega} \Delta\omega \omega_0 d\tau \quad (6)$$

电磁势能变化函数 $\Delta V_{PE}$ 为:

$$\Delta V_{PE} = \int_0^t \Delta P_e \Delta\omega \omega_0 d\tau \quad (7)$$

机械势能变化函数 $\Delta V_{PM}$ 为:

$$\Delta V_{PM} = \int_0^t \Delta P_m \Delta\omega \omega_0 d\tau \quad (8)$$

总势能变化函数 $\Delta V_P$ 为:

$$\Delta V_P = \Delta V_{PE} - \Delta V_{PM} = \int_0^t \Delta P_e \Delta\omega \omega_0 d\tau - \int_0^t \Delta P_m \Delta\omega \omega_0 d\tau \quad (9)$$

单机系统中发生负荷突增功率扰动时,机组的机械功率 $P_m$ 和电磁功率 $P_e$ 之差以及机组的转速曲

线分别如图2和图3所示。图中, $P_e$ 和 $P_m$ 的差值、 $\omega$ 均为标幺值。结合转子运动方程以及图2和图3可以看出:当电磁功率大于机械功率时,转速变化量小于0,转子减速;当电磁功率等于机械功率时,转速变化率等于0,转速到达最低值;当电磁功率小于机械功率时,转速变化率大于0,转子加速。

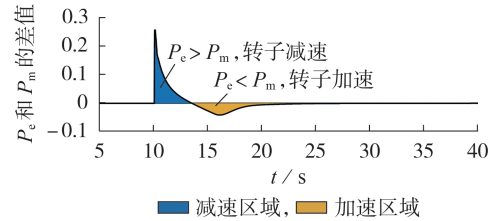


图2 单机系统电磁功率和机械功率之差

Fig.2 Difference between electromagnetic power and mechanical power of single-machine system

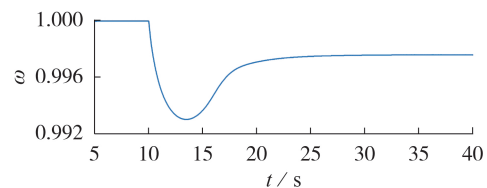


图3 单机系统转速响应曲线

Fig.3 Rotor speed response curve of single-machine system

从能量的角度分析上述过程,一次调频动态过程可以归结为动能和势能的相互转化。当机械势能变化量大于电磁势能变化量时,总势能变化量为负值,总势能减小,机组转速增大,势能转换为转子动能;当机械势能变化量小于电磁势能变化量时,总势能变化量为正值,总势能增大,转速减小,转子动能转化为势能。

在一次调频过程中(以频率下降为例),应使机组减速面积尽可能小,而加速面积尽可能大(在一定范围内),这可以使得频率最大偏差和稳态偏差越小,一次调频效果越好。反映到能量上,即让机械势能变化量和电磁势能的变化量之差最小。电磁势能变化量随着负荷突增而变化,可视为系统的不平衡能量。机械势能变化量是原动机-调速器动作所产生的能量,用于平衡系统中的不平衡能量,可以反映各类机组对系统频率稳定性的贡献。因此,可以将机组的机械势能变化量定义为机组一次调频的贡献能量。

## 2 一次调频能量贡献度指标构建

目前,一次调频能力评估指标主要集中在频率初始时刻( $t_0$ )、频率最大偏差时刻( $t_m$ )、频率稳态时刻( $t_s$ ),而忽略了机组在整个动态过程的累积效应,难以综合反映各台机组对系统频率支撑的贡献大

小。采用瞬时特征的指标对机组调频能力进行评估时,其对数据的精度要求较高,若数据在传输过程中产生畸变则会极大影响评估结果。而采用表征累积效应的能量贡献度指标是一个积分量,其对数据精度要求较低,评估结果的鲁棒性较强。

由于机组在调频不同阶段,对频率支撑的能力存在差异,因此下面将一次调频中频率的变化分成2个过程,即频率的下降过程( $[t_0, t_m]$ )和恢复过程( $[t_m, t_s]$ )。频率下降过程中,一次调频能量贡献得越多,频率最大偏差越小;频率恢复过程中,一次调频能量贡献得越多,频率稳态偏差越小。

本文分别从这2个动态过程出发,构建一次调频能量贡献度指标,包括能量贡献速度、能量贡献深度、能量贡献强度。根据上述指标,评估各机组在一次调频动态过程中的速动性、可靠性以及重要性。

不同类型机组的一次调频能量曲线差距较大,单机系统中水、火电机组的一次调频能量曲线分别如图4和图5所示,系统在 $t=10$  s时发生功率扰动,图中,调频能量为标么值。

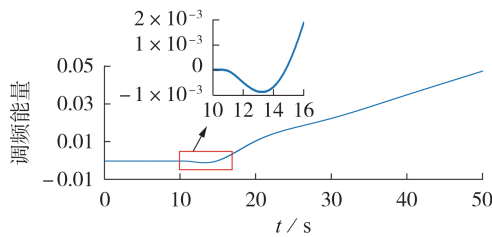


图4 水电机组调频能量曲线

Fig.4 Frequency regulation energy curve of hydropower unit

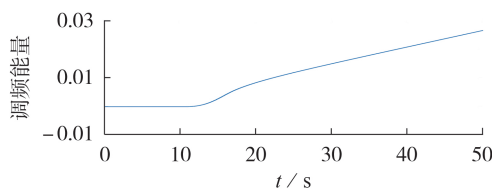


图5 火电机组调频能量曲线

Fig.5 Frequency regulation energy curve of thermal power unit

由图4和图5可以看出,水、火电机组在一次调频初期贡献能量差距比较明显。由于水电机组受到水锤效应的影响,调频指令发出后,机组机械功率会出现先减小后增大的现象,导致调频起始阶段调频能量为负,机组对系统频率做负贡献。火电机组在经过短暂的延时后,能够平稳持续地贡献能量。

### 2.1 调频能量贡献速度指标

机组一次调频的速动性是调频能力考核中至关重要的一环。机组速动性越好,机组出力响应频率变化的速度越快,频率跌落的程度越低。某些机组

虽然在调频末期可以提供较大的能量支撑,但是在调频初期,能量贡献的速度较慢,总体一次调频能力是不足的。因此,在一次调频的初始阶段,应重点关注机组的速动性。

定义 $[t_0, t_m]$ 内机械势能变化量与该段时间的比值为一次调频初期的能量贡献速度 $\varepsilon_{ECV,i}$ ,如式(10)所示。该指标越大,表明原动机-调速器系统速动性越好,机组能更快地响应频率变化,及时提供功率支撑,抑制频率的变化速率,减小最大频率偏差。

$$\varepsilon_{ECV,i} = \frac{\int_{t_0}^{t_m} \Delta P_{mi} \Delta \omega_i \omega_0 d\tau}{t_m - t_0} \quad (10)$$

式中: $\Delta P_{mi}$ 为第 $i$ 台机组的机械功率调整量; $\Delta \omega_i$ 为第 $i$ 台机组的转速偏差量。

影响一次调频速动性的因素有很多,如阀门动作限速、控制系统指令延时、执行机构延时、蒸汽容积效应、原动机再热时间常数等都会影响机组一次调频的响应速度。

### 2.2 调频能量贡献深度指标

在电网发生不平衡功率扰动时,电力系统按照各同步发电机的调差系数分配不平衡功率,以消纳系统中的不平衡能量。但是在实际情况下,各发电机组受运行方式、水锤效应、煤质状况、锅炉压力、控制系统精度、机组老化等因素影响,机组的一次调频出力并不能完全按照调差系数理想地参与一次调频。因此,定义能量贡献深度指标表征机组发挥出理想调频能力的百分比,其是一次调频动态过程的综合性评估指标。

分别定义 $[t_0, t_m]$ 、 $[t_m, t_s]$ 内实际调频能量与理论调频能量的比值为一次调频频率下降过程和恢复过程的能量贡献深度指标,它反映的是机组实际调频能力占理论调频能力的比例,即一次调频的可靠性。调频能量贡献深度指标越大,即调频潜力释放的程度越深,表明机组更充分地发挥了自身所具有的调频能力,有利于减小系统频率最大偏差和稳态偏差。

按照调差系数的定义,一次调频过程中机组理论出力 $\Delta P$ 可表示为:

$$\Delta P = \frac{P_N \Delta f}{\sigma f_N} = \frac{\Delta \omega P_N}{\sigma} \quad (11)$$

式中: $\sigma$ 为机组的调差系数; $P_N$ 为机组额定功率。

则理论调频能量 $E_{theory}$ 可以表示为:

$$E_{theory} = \int_{t_0}^{t_s} \Delta P \Delta \omega \omega_0 d\tau = \int_{t_0}^{t_s} \frac{1}{\sigma} P_N (\Delta \omega)^2 \omega_0 d\tau \quad (12)$$

频率下降过程中能量贡献深度指标 $\varepsilon_{ECD,mi}$ 为实际调频能量 $E_{actual}$ 与理论调频能量 $E_{theory}$ 的比值,即:

$$\varepsilon_{ECD,mi} = \frac{E_{actual}}{E_{theory}} = \frac{\int_{t_0}^{t_m} \Delta P_{mi} \Delta \omega_i \omega_0 d\tau}{\int_{t_0}^{t_m} \frac{1}{\sigma_i} P_{Ni} (\Delta \omega_i)^2 \omega_0 d\tau} \quad (13)$$

频率恢复过程中能量贡献深度指标  $\varepsilon_{\text{ECD},si}$  为:

$$\varepsilon_{\text{ECD},si} = \frac{E_{\text{actual}}}{E_{\text{theory}}} = \frac{\int_{t_m}^{t_s} \Delta P_{mi} \Delta \omega_i \omega_0 d\tau}{\int_{t_m}^{t_s} \frac{1}{\sigma_i} P_{Ni} (\Delta \omega_i)^2 \omega_0 d\tau} \quad (14)$$

### 2.3 调频能量贡献强度指标

在一次调频过程中,由于各台机组的调差系数、备用容量、调频限幅不同,各台机组对系统调频的贡献度不同。因此,定义能量贡献强度表征系统中每台机组对频率调整的能量贡献比例,其反映的是机组在调频过程中的重要程度。

分别定义  $[t_0, t_m)$ 、 $[t_m, t_s]$  内机组调频能量与系统内所有机组调频能量的比值为一次调频过程的能量贡献强度指标,它反映的是单台机组所贡献能量占总调频能量的比重,即机组相对的一次调频能力,该指标越大表明机组对系统的一次调频贡献越大,即一次调频的重要性越高。

频率下降过程中的能量贡献强度指标  $\varepsilon_{\text{ECL},mi}$  为:

$$\varepsilon_{\text{ECL},mi} = \frac{\int_{t_0}^{t_m} \Delta P_{mi} \Delta \omega_i \omega_0 d\tau}{\sum_{i=1}^n \int_{t_0}^{t_m} \Delta P_{mi} \Delta \omega_i \omega_0 d\tau} \quad (15)$$

频率恢复过程中的能量贡献强度指标  $\varepsilon_{\text{ECL},si}$  为:

$$\varepsilon_{\text{ECL},si} = \frac{\int_{t_m}^{t_s} \Delta P_{mi} \Delta \omega_i \omega_0 d\tau}{\sum_{i=1}^n \int_{t_m}^{t_s} \Delta P_{mi} \Delta \omega_i \omega_0 d\tau} \quad (16)$$

上述各指标分别从频率的下降过程和恢复过程考察机组的速动性、可靠性和重要性,3个指标相互协调、相互补充、相互配合,可以较为全面地评估机组一次调频综合能力。3个指标在频率响应过程中的贡献度比例应视调度人员所关注的侧重点而决定:若调度人员更关注频率变化的速率,则能量贡献速度的比例要更大;若更关注每台机组贡献的大小,则能量贡献强度的比例要更大。该指标对于发现机组在调频过程中存在的调频问题和瓶颈具有一定的参考价值。

## 3 调频能力评估指标可行性分析

### 3.1 调频指标计算流程及应用场景

在实际电力系统运行过程中,不同时刻机组所展现的调频能力往往是不同的。利用本文所提出的一次调频能量贡献度指标,在扰动事故后,通过PMU监测各机组的功率和频率曲线,通过式(10)~(16)计算能量贡献速度、深度、强度指标,评估机组的一次调频能力。

通过比较所得指标与历史数据或设定的参考值大小来评估机组调频能力是否合格。一方面,可以

通过实际频率扰动或者电网一次调频试验的PMU录波数据,离线计算各台机组的能量贡献度指标,并保存在历史数据库中,通过本次评估结果与历史故障情况下的计算结果进行对比,评估机组的一次调频能力是否合格,并分析调频能力在不同时期的变化情况;另一方面,可以通过实际电网的PSASP或BPA模型,通过设置不同的调频情况,计算调频能力合格时各机组的能量贡献度指标,以此作为各指标的参考值,通过本次评估结果与参考值的比较,评估机组的一次调频能力是否合格。

另外,在实际电网运行中发现给出的机组调频参数往往与真实参数存在偏差,仅借助已有参数仿真难以准确反映机组的真实调频能力。可以通过本文提出的能量贡献度评估方法,将通过理论调频参数仿真得到的能量贡献度指标与实测能量贡献度指标进行比较,分析机组理论调频能力与真实调频能力的差异性。且随着同步机组运行方式的变化以及灵活性改造,部分机组参数可能存在波动,通过能量贡献度指标可以分析出在不用运行方式下以及火电厂灵活性改造后调频能力的变化情况,给电网人员提供一些参考。

### 3.2 算例分析

为了验证本文所提调频指标的可行性和有效性,基于改进的10机39节点系统进行算例分析,并与传统的评估指标进行对比。改进的10机39节点系统将原系统中的G<sub>4</sub>、G<sub>6</sub>、G<sub>7</sub>这3台火电机组改为水电机组,如附录A图A1所示,且随机选取G<sub>3</sub>、G<sub>6</sub>、G<sub>8</sub>这3台机组为试验机组。

#### 3.2.1 不同调频能力情况下的参数设置

由于影响机组调频能力的主要是调速器-原动机的关键参数,本文按照试验机组调频参数的优劣设置了调频情况较好、一般、较差3种工况,参数设置如附录A表A1所示。系统在 $t=5$ s时发生负荷突增1000MW的扰动,分别计算不同工况下的调频指标,分析与所设参数的吻合度,从而验证所提指标的合理性和有效性。

#### 3.2.2 不同调频能力情况下的指标计算结果

根据上述3种不同调频情况,得到系统等效惯性中心频率响应曲线如图6所示,按照第2章调频能量贡献度计算方法,计算得到3种情况下各指标结果如图7所示(由于篇幅有限,只选取G<sub>3</sub>、G<sub>6</sub>、G<sub>8</sub>这3台机组的能量贡献速度及频率恢复过程的能量贡献深度进行展示,3台机组的能量贡献度指标的详细值如附录A表A2所示),图中能量贡献速度的单位为p.u./s,后同。

#### 3.2.3 调频指标可行性分析

根据3种情况下的调频指标计算结果可以得出

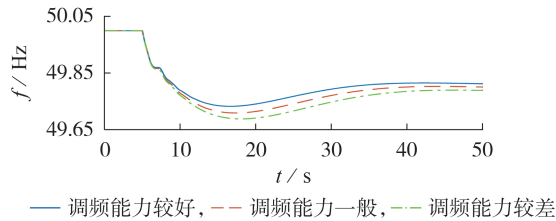


图6 系统等效惯性中心频率响应曲线

Fig.6 Frequency response curve of equivalent center of inertia for system

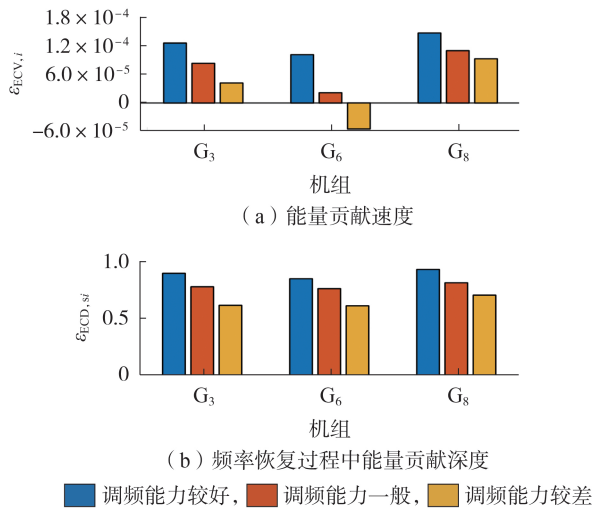


图7 不同调频能力下的机组能量贡献度指标

Fig.7 Energy contribution indexes of units under different frequency regulation capabilities

以下结论。

1)随着机组调频能力的降低,各机组能量贡献速度、深度、强度指标均随之明显减小。当调频参数设置得较好时,机组调频速动性较好,调频能力释放的程度较深,机组实际调频能力越接近于理论调频能力,机组对系统的贡献越大。

2)火电机组 $G_8$ 的各指标均优于其他2台机组,其一次调频的速动性最好,调频能力释放的程度最深,对系统一次调频的贡献力度最大。

3)水电机组 $G_6$ 由于在调频能力较差情况下水锤效应系数较大,能量贡献速度及频率下降过程的能量贡献深度和强度指标均变成负值。因此,水电机组在调频初期由于水锤效应会对一次调频起到负作用,降低频率的最大偏差。但频率恢复过程的能量贡献强度迅速上升甚至超越了火电机组 $G_3$ 和 $G_8$ 。可见,虽然在调频初期水电机组频率会加剧恶化,但是在频率恢复过程水电机组可以提供较大的能量支撑,加快频率的恢复速度,提高稳态频率。

4)不论是水电机组还是火电机组,在频率下降过程的能量贡献深度均低于频率恢复过程,即在调频初期机组调频的可靠性较低。这也是在某些频率

事故中,系统频率下降过大引发低频减载的原因之一。

综上所述,能量贡献度指标对于评估机组一次调频动态过程的调频能力具有较好的可行性。其不但能够反映水火电机组自身不同的调频特性,而且能反映机组在不同阶段的调频特性。且能量贡献度指标能够从调频的速动性、可靠性、有效性三方面综合评估机组的调频能力。

另外,如3.1节所述,在电网实际运行中给出的机组调频参数往往与真实参数存在偏差,例如将机组调差系数理论值设定为0.05,但在机组运行方式变化情况下该值可能发生改变(往往偏大),若按照原参数仿真,则得到的能量贡献度指标会与实际能量贡献度指标存在偏差,因此可以通过能量贡献度指标发现机组参数理论值与实际值的差异情况。本文在上述分析基础上,分别设置火电机组 $G_8$ 理论调差系数为0.05,实际调差系数为0.06,随后分别计算能量贡献度指标,发现火电机组能量贡献速度由 $1.65 \times 10^{-4}$  p.u./s减小为 $1.43 \times 10^{-4}$  p.u./s;频率下降过程能量贡献深度由0.522增大为0.531;频率下降过程能量贡献强度由0.103减小为0.091。可见,当机组调差系数比理论值大时,其调频能力将会下降。因此,可以通过能量贡献度指标对调频参数的仿真值与实际值进行差异性分析。关于各参数对能量贡献度指标的影响将在第4章中详细展开。

### 3.2.4 调频指标有效性分析

为了验证所提指标的有效性,选择“两个细则”中规定的一次调频能力评估指标,即15s出力响应指数 $\Delta P_{15}$ 和积分电量合格率 $Q$ 进行对比分析,指标计算公式如式(17)和式(18)所示。根据3.2.1节进行算例分析,计算得到各机组的指标如图8所示。

$$\Delta P_{15} = \frac{\Delta P_{15, \max}}{\Delta P_{\max}} \times 100\% \quad (17)$$

$$Q = \frac{\int_0^t (P(\tau) - P_0) d\tau}{\int_0^t \Delta P d\tau} \times 100\% \quad (18)$$

式中: $\Delta P_{15, \max}$ 为15s内机组实际最大出力调整量; $\Delta P_{\max}$ 为理论最大出力调整量,如式(19)所示; $\Delta f_{\max}$ 为频率最大偏差; $P(\tau)$ 为机组实际有功功率; $P_0$ 为机组初始有功功率。

$$\Delta P_{\max} = |\Delta f_{\max} P_N / (f_N \sigma)| \quad (19)$$

从传统指标分析结果可见,采用15s出力响应指数进行评估时,随着调频能力情况变差,火电机组 $G_3$ 和 $G_8$ 的指标均变小,与分析结果一致。而水电机组 $G_6$ 由于水锤效应系数增大,功率的超调量增大,导致出力响应指数增大,出现了水电机组评估结果不准确的现象,并且该指标只能反映功率的瞬时特

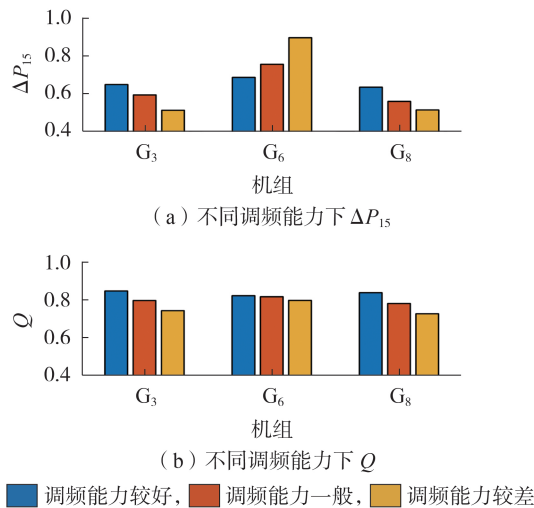


图8 不同调频能力下传统评估指标变化情况

Fig.8 Variation of traditional evaluation indexes under different frequency modulation capabilities

征,忽略了一次调频的动态累积效应。采用积分电量合格率进行评估时,虽然可以反映各台机组的累积作用,但无法反映各台机组在电网突发扰动或事故后的快速响应能力和贡献大小,而这往往是调度人员所关注的重点。采用动态能量贡献度指标可以综合评估机组一次调频的速动性、可靠性和重要性,与传统评估指标相比更具优势。

#### 4 调频能力影响因素分析

调频关键参数决定了机组的调频能力,分析调频关键参数对评估指标的影响对于电网选择合适的运行参数、提升电网调频能力具有重要意义。第3章验证了采用调频能量贡献度指标评估机组调频能力的可行性和有效性,本章将具体分析水火电机组原动机-调速器参数对各指标的影响情况,具体包括水锤效应系数、水门/汽门开启速度上限、调差系数、调速器时间常数、调速器死区,从能量的角度分析参数对频率响应的影响。

##### 4.1 原动机参数对调频能量贡献度指标的影响

###### 1) 水锤效应系数。

文献[18]对国内典型电站的水轮机组进行了参数统计,混流式、轴流式、冲击式水轮机水锤效应系数取值范围分别为0.38~1.24、0.6~1.75、0.39~1.95 s。因此本文设置水锤效应系数变化范围为0.5~1.7 s,各指标变化情况如图9所示。

由上述实验结果可知,水锤效应系数对能量贡献速度指标、频率下降过程的能量贡献深度和强度指标影响较大。随着水锤效应系数的增大,上述指标均随之减小,而对频率恢复过程的能量贡献深度和强度影响较小。因此,水锤效应系数越大,频率下降速率、频率最大偏差越大,而对频率稳态偏差影响

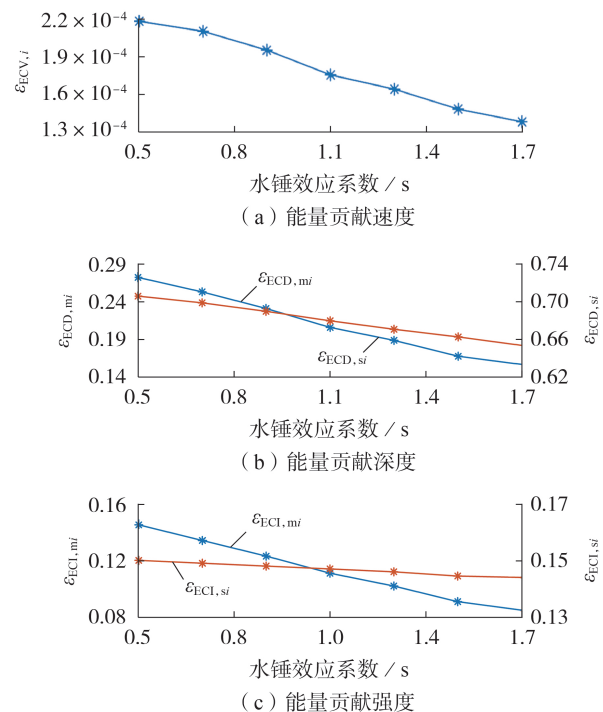


图9 水锤效应系数对能量贡献度指标的影响

Fig.9 Influence of water hammer effect coefficient on energy contribution indexes

很小。从能量的角度出发,水电机组由于自身的机械特性,在机组功率变化的初期(持续数秒)会出现功率反调,水电机组的机械势能为负值,对系统调频作负贡献,这一现象会加剧系统中的不平衡能量,且抵消部分火电机组的正确动作,减缓调频速度<sup>[19]</sup>。但水锤效应对功率支撑的后期影响较小,故对频率恢复阶段的能量贡献指标影响较小。

###### 2) 水门/汽门开启速度上限。

水门/汽门调节速度直接影响了机组进水/汽量的速度,从而影响机械功率的变化速度。为进一步分析其对调频能力的影响,设置水门/汽门开启速度上限变化范围为0.01~0.07 p.u./s,各指标变化情况如附录B图B1所示。

由上述实验结果可知,水门/汽门最大开启速度对能量贡献速度、深度、频率下降过程的能量贡献强度指标均有较大的影响,对频率恢复过程的能量贡献强度影响较小。随着该参数的增大,上述指标均随之增大,机组一次调频速动性、可靠性、重要性均随之增强。因此,水门/汽门最大开启速度越大,频率下降速率、频率最大偏差越小,对频率稳态偏差影响越小。从能量的角度出发,水门/汽门开启速度越大,机组注入机械势能的速度越快,同一时间内注入的调频能量越多。值得注意的是,随着参数的增大,其对指标的影响程度逐渐减小。通过进一步研究发现,当水门/汽门最大开启速度达到0.1 p.u./s

后,调频能量指标将不随其增大而增大。

#### 4.2 调速器参数对调频能量贡献度指标的影响

##### 1) 调差系数。

调差系数是机组一次调频的关键参数,诸多学者将调差系数作为机组调频能力的考查依据<sup>[20]</sup>。调差系数表示单位的频率变化所引起的功率变化量,调差系数越小,机组理论调频能力越强。设置调差系数变化范围为0.03~0.06,各指标变化情况如附录B图B2所示。

由上述实验结果可知,调差系数增大后,能量贡献速度和强度都呈下降趋势,机组调频能力减弱,导致频率下降速率、频率最大和稳态偏差增大。但从能量贡献深度的角度出发,在频率下降过程中,能量贡献深度随着调差系数的增大而略微增大,对频率恢复过程的能量贡献深度影响很小。从能量的角度出发,调频初期机组调频能量释放的程度较低,仅增大调差系数时,机组理论调频能力减弱,机组实际调频能力和理论调频能力间的差距减小,从而导致能量贡献深度增大。但随着调差系数增大,机组贡献的机械势能绝对值减小,导致能量贡献强度减小。

##### 2) 调速器时间常数。

调速器时间常数表征的是机组调速系统的速动性能,设置调速器时间常数变化范围为0.05~0.35 s,各指标计算结果如附录B图B3所示。

由上述实验结果可知,调速器时间常数对能量贡献速度指标、频率下降过程的能量贡献深度和强度指标有影响,且呈负相关,对频率恢复过程的能量贡献深度及强度影响很小。从能量的角度出发,调速器时间常数主要影响机组的速动性能,该参数越小,调速系统越灵敏,机组贡献的调频能量能够更快地响应频率变化,但对调频后期的能量注入影响较小。且该参数越小,调速器在调频初期响应速度越快,频率下降速率、频率最大偏差越小,对稳态偏差影响越小。

##### 3) 调速器死区。

为避免机组由于微小频率波动而频繁动作,加快机械设备的磨损老化,调速系统往往设置一定的死区。死区设置过小将起不到预期的效果,设置过大会导致机组故障时不动作。为了研究死区对调频能力的影响,设置其变化范围为0.001~0.013 p.u.,各指标计算结果如附录B图B4所示。

由上述实验结果可知,死区大小对于频率变化全过程的能量贡献速度、深度、强度均有影响,且呈负相关。因此,死区越大,机组的速动性、可靠性、重要性越低,频率下降速率、频率最大偏差和稳态偏差越大。从能量角度出发,死区增大会导致能量延迟释放,降低调频效果,在机组实际运行过程中要设置

合理的死区大小,既能起到避免误动作的效果也不致于过多地降低机组一次调频能力。

#### 4.3 参数影响灵敏度分析

为了量化研究原动机-调速器各参数对能量贡献度指标的影响,定义调频参数平均灵敏度 $S$ 如式(20)所示,所得计算结果如表1所示。

$$S = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\Delta Y_j / Y}{\Delta X_j / X} \times 100\% \quad (20)$$

式中: $\Delta Y_j$ 和 $\Delta X_j$ 分别为第 $j$ 次参数变化时各指标的变化量和各参数的变化量; $X$ 为参数的典型值, $Y$ 为典型参数值下的指标; $m$ 为实验次数。

表1 关键参数对指标的灵敏度分析结果

Table 1 Sensitivity analysis results of key parameters to indexes

参数	$\varepsilon_{ECV,i} / \%$	$\varepsilon_{ECD,mi} / \%$	$\varepsilon_{ECD,si} / \%$	$\varepsilon_{ECL,mi} / \%$	$\varepsilon_{ECL,si} / \%$
水锤效应系数	-41.89	-51.42	-7.02	-49.54	-3.70
水门/汽门开启速度上限	57.26	60.85	16.41	56.95	15.56
调差系数	-83.25	13.89	0.54	81.07	92.87
调速器时间常数	-10.23	-8.37	-0.66	-5.55	-0.82
调速器死区	-28.42	-29.51	-13.63	-30.24	-11.97

由上述灵敏度分析结果可知,原动机-调速器参数对调频能力的影响是多重且交互的,不同参数对调频能力不同方面影响程度是不同的,而且对频率动态过程不同阶段影响也不同。在电力系统实际运行过程中,可以根据各指标的变化情况针对性地调整一次调频参数值,提升电网一次调频能力。

## 5 结论

本文从调频本源能量的角度出发,定义了机组一次调频能量贡献速度、深度和强度指标,综合评估了机组的一次调频能力,包括速动性、可靠性和重要性。通过改进的10机39节点系统进行算例分析并与传统评估指标进行对比,验证了所提指标的有效性。研究发现,该指标不仅能够体现水火电机组调频性能的差异,也能够反映机组在一次调频不同阶段的调频特性。在此基础上,研究了调速器-原动机典型参数对调频能力的影响,从能量的角度解释了参数变化对频率偏差的影响。该方法弥补了目前调频能力评估指标准确度不高的问题,为电网调频能力评估提供了新的思路。

此外,目前该方法只针对于传统的水火电机组进行了研究,后续将会把新能源发电机组考虑在内并对能量贡献度指标进行修正和拓展,实现对新型电力系统调频能力的有效评估。



附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 张子扬,张宁,杜尔顺,等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报,2022,42(1):1-24.  
ZHANG Ziyang,ZHANG Ning,DU Ershun,et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(1):1-24.
- [2] 韩泽雷,鞠平,秦川,等. 面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望[J]. 电力自动化设备,2023,43(9):118-130.  
HAN Zelei,JU Ping,QIN Chuan,et al. Review and prospect of research on frequency security of new power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(9):118-130.
- [3] 李兆伟,吴雪莲,庄侃沁,等. “9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化,2017,41(7):149-155.  
LI Zhaowei,WU Xuelian,ZHUANG Kanqin,et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of East China Grid after bipolar locking of “9·19” Jinping-Sunan DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(7):149-155.
- [4] 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.
- [5] Australian Energy Market Operator. Preliminary report-black system event in South Australia on 28 September 2016[R]. New South Wales,Australia:Australian Energy Market Operator Limited,2016.
- [6] 孙华东,许涛,郭强,等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报,2019,39(21):6183-6192.  
SUN Huadong,XU Tao,GUO Qiang,et al. Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th,2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(21):6183-6192.
- [7] 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.
- [8] 钟海旺,张广伦,程通,等. 美国得州2021年极寒天气停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化,2022,46(6):1-9.  
ZHONG Haiwang,ZHANG Guanglun,CHENG Tong,et al. Analysis and enlightenment of extremely cold weather power outage in Texas,U.S. in 2021[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(6):1-9.
- [9] FRADLEY J,PREECE R,BARNES M. The influence of network factors on frequency stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2020,35(4):2826-2834.
- [10] 郑涛,高伏英. 基于PMU的机组一次调频特性参数在线监测[J]. 电力系统自动化,2009,33(11):57-61,71.  
ZHENG Tao,GAO Fuying. On-line monitoring and computing of unit PFR characteristic parameter based on PMU[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(11):57-61,71.
- [11] 王凡. 含高比例新能源的受端电网频率稳定控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2021.  
WANG Fan. Research on frequency stability control of receiving end power grid with large penetration of renewable energy[D]. Beijing:North China Electric Power University,2021.
- [12] 张艳军,高凯,曲祖义. 基于发电机组出力曲线特征的一次调频性能评价方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(7):99-103.  
ZHANG Yanjun,GAO Kai,QU Zuyi. An evaluation method of primary frequency modulation performance based on characteristics of unit output power curves[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(7):99-103.
- [13] 张江丰,孙坚栋,苏焯,等. 基于熵权-密切值法的机组一次调频性能综合评价方法[J]. 汽轮机技术,2020,62(4):309-313.  
ZHANG Jiangfeng,SUN Jiandong,SU Ye,et al. Comprehensive evaluation method for unit primary frequency regulation performance based on entropy weight-osculating value method [J]. Turbine Technology,2020,62(4):309-313.
- [14] 贺颖,潘杨,陶骞,等. 考虑调频死区的电网一次调频能力评价指标[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(19):85-90.  
HE Ying,PAN Yang,TAO Qian,et al. Evaluation index of power grid primary frequency modulation considering dead zone[J]. Power System Protection and Control,2016,44(19):85-90.
- [15] WANG J D,SU J J,ZHAO Y,et al. Performance assessment of primary frequency control responses for thermal power generation units using system identification techniques[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2018,100:81-90.
- [16] 郭越,徐飞,郝玲,等. 一次调频中的锅炉建模与参数在线确定[J]. 中国电机工程学报,2023,43(17):6551-6562.  
GUO Yue,XU Fei,HAO Ling,et al. Boiler modeling and on-line parameters identification for primary frequency regulation [J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(17):6551-6562.
- [17] 雷添翔,律方成,刘教民,等. 双馈风力发电机组惯量阻尼特性与改进附加频率控制策略[J]. 电力自动化设备,2022,42(4):190-196.  
LEI Tianxiang,LÜ Fangcheng,LIU Jiaomin,et al. Inertia and damping characteristics of DFIG and improved additional frequency control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(4):190-196.
- [18] 关欣. 大惯性比率水电机组对现代电力系统稳定性的影响[D]. 西安:西安理工大学,2018.  
GUAN Xin. The influence of large inertia ratio hydro-power unit on the stability of modern electric system[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology,2018.
- [19] 饶成骄,郭成,马宁宁,等. 考虑水轮机水锤效应的电网频率变化的解析方法[J]. 电网技术,2018,42(6):1892-1898.  
RAO Chengjiao,GUO Cheng,MA Ningning,et al. Analytical method of power grid frequency change considering water hammer effect of turbine[J]. Power System Technology,2018,42(6):1892-1898.
- [20] 王凡,李海峰,胥国毅,等. 调频关键参数对电网频率特性的影响及其灵敏度分析[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(20):1-8.  
WANG Fan,LI Haifeng,XU Guoyi,et al. Influence of key parameters of frequency control on frequency characteristics of power grid and sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control,2020,48(20):1-8.

## 作者简介:

陆文安(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统频率安全稳定分析与控制(**E-mail**:211306080026@hhu.edu.cn);

余一平(1977—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制(**E-mail**:yyiping@hhu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

## Evaluation method of unit frequency regulation ability based on dynamic energy contribution degree

LU Wenan<sup>1</sup>, YU Yiping<sup>1</sup>, WU Di<sup>2</sup>, LIU Hui<sup>2</sup>, PENG Wei<sup>2</sup>, JU Ping<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;  
2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China)

**Abstract:** Aiming at the lack of unified and effective frequency regulation capability evaluation methods for different types of synchronous generator units, the evaluation index of the unit primary frequency regulation capability is constructed from the perspective of dynamic energy during the primary frequency regulation process at different stages of the frequency regulation dynamic process, and the velocity, reliability, and importance of the unit primary frequency regulation are evaluated from multiple dimensions such as energy contribution speed, depth, and intensity. Based on the improved 10-machine 39-bus system, the reasonableness and effectiveness of this method are verified through the calculation of each index under different frequency regulation capability scenarios and the comparison with traditional evaluation indicators. On this basis, the key factors affecting the unit frequency regulation capability are quantitatively studied, and the impact of various parameters on frequency regulation dynamic indicators is explained from the perspective of energy. This method has certain reference value for discovering frequency regulation bottleneck in the power grid and improving the frequency regulation capability of the power grid.

**Key words:** dynamic energy; synchronous unit; energy contribution degree; primary frequency regulation; frequency regulation capability evaluation

(上接第 160 页 continued from page 160)

## Fast current protection based on fault first half-wave comparison under small stage difference demand

LI Zhenxing<sup>1</sup>, ZHU Yi<sup>1</sup>, WANG Yangze<sup>1</sup>, CHEN Yanxia<sup>2</sup>, PI Zhiyong<sup>3</sup>, WENG Hanli<sup>1</sup>

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid,  
China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
2. Electric Power Research Institute, State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100075, China;  
3. State Grid Hubei Jingmen Electric Power Supply Company, Jingmen 448000, China)

**Abstract:** The step current protection based on the stage time difference coordination is limited by the output line protection action time. To shorten the protection judgment time and improve the multi-level cooperation ability of the distribution network, a fast current protection based on fault first half-wave comparison under small stage difference demand is proposed. The action time of traditional current protection is analyzed. The template curve is then constructed based on the setting value, and the multi-point dynamic comparison with the fault current sampling value is carried out. Based on the root mean square value ramping effect and the sampling value over-limit effect, a new protection startup criterion is constructed, and a new action criterion is constructed considering the protection algorithm delay and the influence of interference points, which comprehensively speeds up the current protection judgment speed. The PSCAD/EMTDC software simulation is used to verify the effectiveness of the proposed method under the working conditions of different fault types, fault times, sudden load increases and interferences. The results show that the action time of the proposed method does not exceed 10 ms, it is conducive to more flexible and reliable setting of small stage difference.

**Key words:** multi-level distribution network; small stage difference; fast current protection; relay protection; template curve; current sampling value

## 附录 A

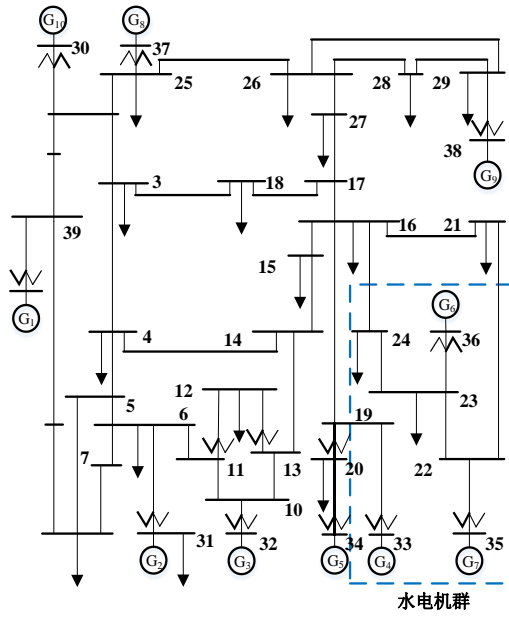


图 A1 改进的 10 机 39 节点系统

Fig.A1 Improved 10-machine 39-bus system

表 A1 试验机组调频参数

Table A1 Frequency regulation parameters of test unit

机组	调频情况	$T_R / s$	$F_H / \%$	$T_G / s$	$T_{CO} / s$	$V_{Gmax} / (p.u. \cdot s^{-1})$	$R$
$G_3$	较好	8	40	0.1	0.2	0.07	0.040
	一般	10	36	0.3	0.4	0.05	0.045
	较差	12	32	0.5	0.6	0.03	0.050
$G_6$	较好	1.0	0.2	0.1	2	0.07	0.040
	一般	3.0	0.3	0.3	5	0.05	0.045
	较差	5.0	0.4	0.5	8	0.03	0.050
$G_8$	较好	8	40	0.1	0.2	0.07	0.040
	一般	10	36	0.3	0.4	0.05	0.045
	较差	12	32	0.5	0.6	0.03	0.050

表 A2 不同调频能力下能量贡献度指标

Table A2 Energy contribution index under different frequency modulation capabilities

调频能力	机组	$\mathcal{E}_{ECV,i}$	$\mathcal{E}_{ECD,mi}$	$\mathcal{E}_{ECD,si}$	$\mathcal{E}_{ECL,mi}$	$\mathcal{E}_{ECL,si}$
较好	$G_3$	1.762	0.458	0.902	0.111	0.086
	$G_6$	1.682	0.279	0.904	0.106	0.138
	$G_8$	1.961	0.511	0.922	0.123	0.091
一般	$G_3$	1.227	0.337	0.853	0.078	0.068
	$G_6$	0.581	0.084	0.846	0.037	0.125
	$G_8$	1.695	0.429	0.861	0.108	0.075
较差	$G_3$	0.710	0.213	0.759	0.050	0.052
	$G_6$	-0.927	-0.143	0.819	-0.066	0.116
	$G_8$	1.394	0.384	0.795	0.098	0.060

## 附录 B

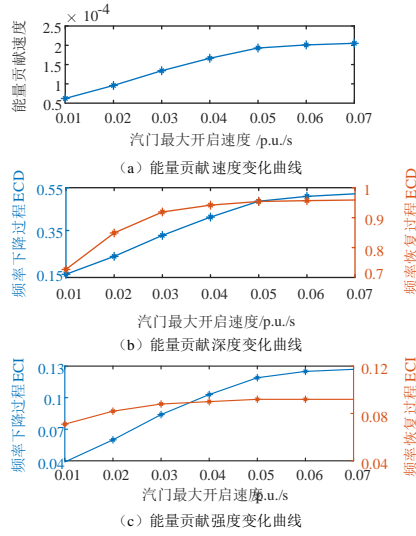


图 B1 汽门最大开启速度对能量贡献度指标的影响  
Fig.B1 Influence of maximum opening speed of valve on energy contribution index

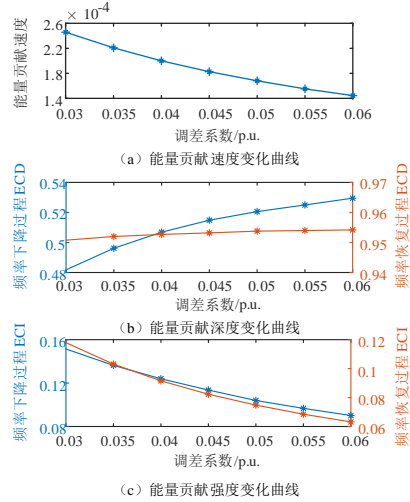


图 B2 调差系数对能量贡献度指标的影响  
Fig.B2 Influence of adjustment coefficient on energy contribution index

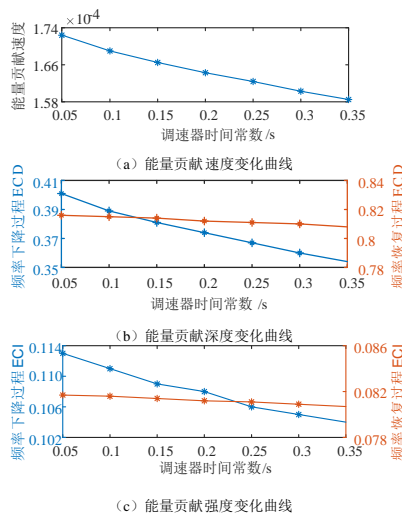


图 B3 调速器时间常数对能量贡献度指标的影响  
Fig.B3 Influence of governor time constant on energy contribution index

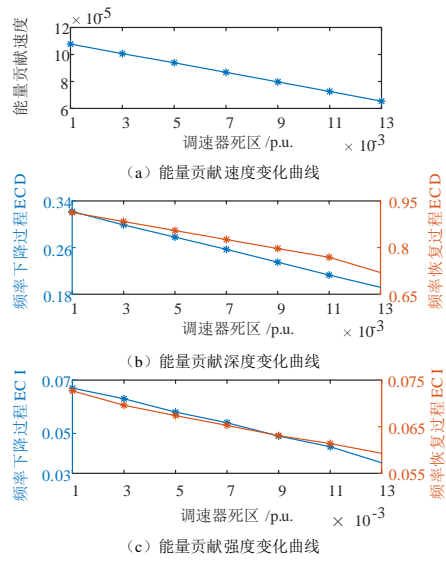


图 B4 调速器死区对能量贡献度指标的影响

Fig.B4 Influence of governor dead zone on energy contribution index