

DOI:10.11784/tdxbz202411021

高比例新能源局域电网频率调节方法

徐 军^{1,2}, 何晋伟¹, 王程锦¹

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 2. 许昌许继软件技术有限公司, 许昌 461000)

摘要: 随着新型电力系统建设进程的快速推进, 电网形态正朝电力电子化方向发展, 高比例新能源局域电网是典型的代表. 本文首先分析了该局域电网的频率调节特性, 建立了功频数学模型; 然后提出了一种新型频率调节方法, 可准确计算出系统功率总扰动量, 实现频率的弹性恢复; 最后, 基于某高比例新能源局域电网示范工程, 搭建了 RTDS 硬件在环仿真平台, 通过接入所研制的调频系统对所提频率调节方法分别在负荷突增和新能源发电突增两种工况下进行了验证. 通过仿真数据分析, 在系统频率发生扰动后, 通过对发电机组的 2 次功率调整, 在准确估算系统总扰动量的前提下, 控制区内的系统频率可快速恢复至 50.000 Hz 附近. 仿真结果表明, 所提频率调节方法可准确计算出系统功率总扰动量, 有效提升系统频率稳定性, 验证了该方法的有效性与正确性.

关键词: 局域电网; 电力电子; 频率调节; 弹性恢复

中图分类号: TM734

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)11-1164-08

Frequency Regulation Method of Local Power Grid with a High Proportion of New Energy Sources

Xu Jun^{1,2}, He Jinwei¹, Wang Chengjin¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Xuchang Xuji Software Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: With the rapid advancement of the construction process of a new power system, the power grid form is developing in the direction of power electronics and the power grid with a high proportion of new energy sources is a typical representative. First, the frequency regulation characteristics of the local power grid are analyzed and a mathematical model of power frequency is established. Then, a new frequency regulation method, which can accurately calculate the total system power disturbance and realize the elastic recovery of frequency, is proposed. Finally, an RTDS hardware-in-the-loop simulation platform is built based on a demonstration project of the high proportion of new energy sources for the local power grid, and the proposed frequency regulation method is verified by accessing the developed frequency regulation system under two operating conditions: sudden increases in load and sudden increase in new energy generation. Through simulation data analysis, after the system frequency is disturbed, the system frequency in the control area can be rapidly restored to approximately 50.000 Hz by adjusting the power of the generator set twice and accurately estimating the total disturbance of the system. The simulation experiment results show that the proposed frequency regulation method can accurately calculate the total power disturbance of the system and effectively improve the frequency stability of the system, thus verifying its effectiveness and correctness.

Keywords: local power grid; power electronics; frequency regulation; elastic recovery

近年来, 全球均把实现“碳达峰、碳中和”双碳目标^[1-3]作为本国能源发展主线. 中国提出了建设新型电力系统的能源战略转型规划, 积极开发可再生能源以实现电力能源的清洁替代.

建设新型电力系统^[4-7]是实现碳达峰、碳中和的关键举措之一, 构建高比例新能源局域电网、率先实现“分布式”与“大电网”兼容并存是这一目标的重要实现路径. 解决高比例新能源局域电网发展瓶颈问

收稿日期: 2024-11-17; 修回日期: 2025-02-18.

作者简介: 徐 军 (1983—), 男, 博士, 高级工程师.

通信作者: 徐 军, xujun.xjgc@qq.com.

基金项目: 中原科技创新领军人才计划资助项目 (244200510042).

Supported by the Program for Leading Talents in Scientific and Technological Innovation in the Central Plains (No. 244200510042).

题,突破频率稳定控制等核心关键技术,对于高比例新能源局域电网发展具有重大意义。

目前国内文献鲜见针对高比例新能源局域电网频率调节方法的研究,仅有针对传统电力系统的新能源参与调频方法^[8-9]、微电网调频方法^[10-12]等方面的研究,这些方法大部分仅适用于以传统火电或者水电机组为主电源的电力系统,或者不考虑负荷频率调节效应系数等约束条件,不适用于具备供电范围广、电压层级多等特点的高比例新能源局域电网。

本文分析了高比例新能源局域电网调频特性,建立了功频数学模型,基于此提出了一种新型频率调节方法,并针对某高比例新能源局域电网示范工程进行了RTDS硬件在环仿真验证。

1 高比例新能源局域电网典型应用场景

高比例新能源局域电网具有更广的供电范围、更高的电压等级,供电线路可长达几十甚至数百公里,电压等级覆盖 380 V ~ 35 kV 甚至 110 kV,控制对象也涵盖变电站、新能源场站、储能电站等等,因此其运行控制更加复杂,应用场景基本可分为两类,如图 1 和图 2 所示。

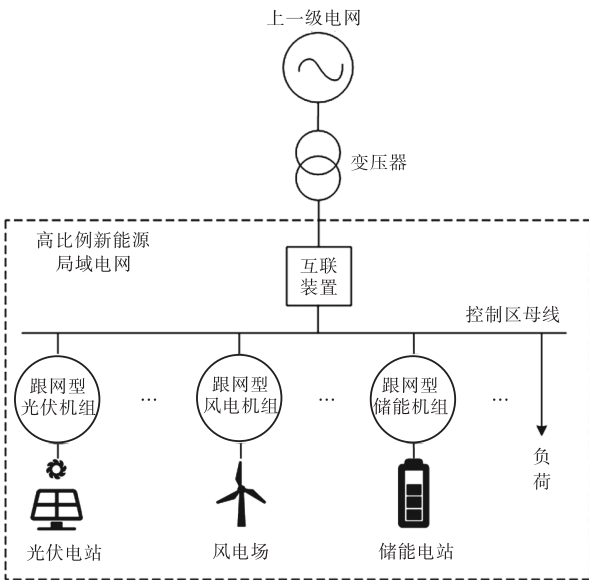


图 1 高比例新能源局域电网应用场景 1

Fig.1 Application scenario 1 of high proportion new energy local power grid

应用场景 1 中主体电源为功率可双向调节的电力电子互联装置,在上一级电网与控制区之间建立功率通道,并建立控制区母线频率与电压,风光机组与储能机组以跟网模式接入系统,控制区供电能力大于负荷时功率上行;反之功率下行。

应用场景 2 中主体电源由构网型风光储机组构成,主体电源通过群控构网建立控制区母线电压与频率,跟网型风/光机组与储能机组以电流源模式接入系统,当光伏/风电机组出力大于负荷时盈余功率被储能机组(含构网型储能与跟网型储能)吸收;反之,亏缺功率由储能机组(含构网型储能与跟网型储能)提供。

高比例新能源局域电网的主要特点是常规灵活性调节资源占比小,稳定调节能力不足,风光新能源占比高,日内功率波动大,难以维持电力电量平衡,尤其是频率稳定控制受诸多因素影响,难以套用常规调频方法,致使系统稳定运行受到威胁。

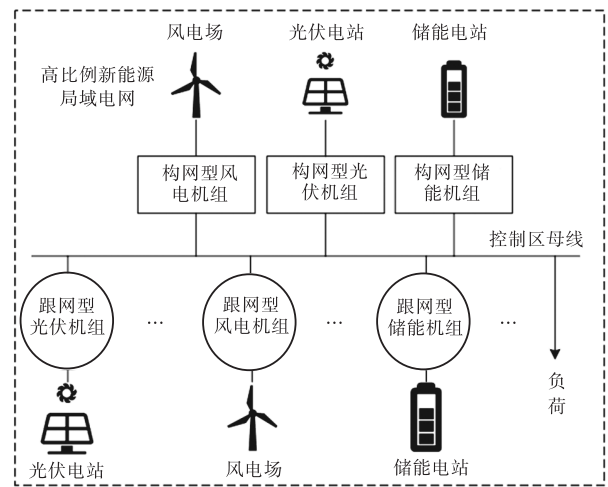


图 2 高比例新能源局域电网应用场景 2

Fig.2 Application scenario 2 of high proportion new energy local power grid

2 高比例新能源局域电网的功频数学模型

2.1 频率控制模式的选择

高比例新能源局域电网的频率控制模式可分为恒频控制^[13]模式与功频联动^[14-16]模式,从频率调节角度出发,功频联动模式更利于系统安全稳定运行,主要原因如下。

(1) 恒频控制^[13]模式下,有功功率与频率完全解耦,当有功功率超过系统容量限制时,功率紧急控制系统失去有效判据,无法实施稳定控制策略。

(2) 功频联动^[14-16]模式下,有功功率与频率基本呈线性关系,可作为就地可调节机组、频率调节系统进行频率调节的有效判据,且当频率处于极限状态时,亦可通过切机切负荷保障系统稳定运行。

高比例新能源局域电网可基于以虚拟同步发电机控制为主的构网控制技术实现功频联动,构建频率可弹性恢复的柔性供电网络,由于各类发电机组的下

垂参数、可调出力等差异性均会影响调频效果,因此需要建立高比例新能源局域电网功频数学模型,为系统频率调节策略的制定提供理论依据。

2.2 调频等值发电机的引入

调频等值发电机定义如下:为了表征系统有功-频率特性而建立的发电单元聚合体,其功频静特性为所有发电单元功频特性系数代数和。

引入调频等值发电机有以下优点:

(1) 可以将多类型异构发电机组单点调频影响因素过滤掉,从整体把握调频效果,利于调频策略的宏观调整;

(2) 可将数学模型等值解进行分解,从而对各个发电机组调频参数进行求解。

调频等值发电机功频静特性为

$$\left(\sum_{i=1}^m P_{v,i} + \sum_{j=1}^n P_{c,j} \right) - \left(\sum_{i=1}^m P_{0v,i} + \sum_{j=1}^n P_{0c,j} \right) - \left(\sum_{i=1}^m k_{v,i} + \sum_{j=1}^n k_{c,j} \right) (f - f_0) \quad (1)$$

式中: $P_{v,i}$ 为电压源有功功率; $P_{c,j}$ 为电流源有功功率; $P_{0v,i}$ 为电压源基准有功功率; $P_{0c,j}$ 为电流源基准有功功率; $k_{v,i}$ 为电压源下垂系数,恒为负数; $k_{c,j}$ 为电流源下垂系数,恒为负数; f 为系统频率; f_0 为基准频率; m 为电压源个数; n 为电流源个数。

2.3 功频数学模型

结合调频等值发电机功频静特性与负荷频率调节效应,可得高比例新能源局域电网功频数学模型如下。

1) 目标函数

$$\begin{cases} f = F(P, P_0, K, f_0) \\ f_{\text{Low}} < f < f_{\text{High}} \end{cases} \quad (2)$$

即保持频率维持在死区之内。

2) 等式约束条件

$$\begin{cases} \left(\sum_{i=1}^g P_{w,i} + \sum_{j=1}^l P_{v,j} + \sum_{k=1}^r P_{s,k} + \sum_{h=1}^q P_{y,h} \right) - \left(\sum_{i=1}^g P_{0w,i} + \sum_{j=1}^l P_{0v,j} + \sum_{k=1}^r P_{0s,k} + \sum_{h=1}^q P_{0y,h} \right) - \left(\sum_{i=1}^g k_{w,i} + \sum_{j=1}^l k_{v,j} + \sum_{k=1}^r k_{s,k} + \sum_{h=1}^q k_{y,h} \right) (f - f_0) \\ P_L - P_{0L} = k_L (f - f_0) \\ k_{w,i} = 0 \quad i = 0, 1, 2, \dots, g, P_{w,i} \geq P_{w,i}^{\max} \text{ 或 } P_{w,i} \leq P_{w,i}^{\min} \\ k_{v,j} = 0 \quad j = 0, 1, 2, \dots, l, P_{v,j} \geq P_{v,j}^{\max} \text{ 或 } P_{v,j} \leq P_{v,j}^{\min} \\ k_{s,k} = 0 \quad k = 0, 1, 2, \dots, r, P_{s,k} \geq P_{s,k}^{\max} \text{ 或 } P_{s,k} \leq P_{s,k}^{\min} \\ k_{y,h} = 0 \quad h = 0, 1, 2, \dots, q, P_{y,h} \geq P_{y,h}^{\max} \text{ 或 } P_{y,h} \leq P_{y,h}^{\min} \end{cases} \quad (3)$$

3) 不等式约束条件

$$\begin{cases} P_{w,i}^{\min} < P_{w,i} < P_{w,i}^{\max} & i = 0, 1, 2, \dots, g \\ P_{v,j}^{\min} < P_{v,j} < P_{v,j}^{\max} & j = 0, 1, 2, \dots, l \\ P_{s,k}^{\min} < P_{s,k} < P_{s,k}^{\max} & k = 0, 1, 2, \dots, r \\ P_{y,h}^{\min} < P_{y,h} < P_{y,h}^{\max} & h = 0, 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (4)$$

式(2)~式(4)各参数含义如表1所示。

表 1 功频数学模型参数含义

Tab.1 Meaning of the parameters of the power-frequency mathematical model

序号	名称	类别
1	$P_{w,i}$	风电有功功率
2	$P_{v,j}$	光伏有功功率
3	$P_{s,k}$	储能有功功率
4	$P_{y,h}$	互联装置有功功率
5	$P_{0w,i}$	风电基准有功功率
6	$P_{0v,j}$	光伏基准有功功率
7	$P_{0s,k}$	储能基准有功功率
8	$P_{0y,h}$	互联装置基准有功功率
9	$P_{w,i}^{\max}$	风电有功功率上限
10	$P_{w,i}^{\min}$	风电有功功率下限
11	$P_{v,j}^{\max}$	光伏有功功率上限
12	$P_{v,j}^{\min}$	光伏有功功率下限
13	$P_{s,k}^{\max}$	储能有功功率上限
14	$P_{s,k}^{\min}$	储能有功功率下限
15	$P_{y,h}^{\max}$	互联装置有功功率上限
16	$P_{y,h}^{\min}$	互联装置有功功率下限
17	$k_{w,i}$	风电调频系数
18	$k_{v,j}$	光伏调频系数
19	$k_{s,k}$	储能调频系数
20	$k_{y,h}$	互联装置调频系数
21	k_L	负荷频率调节效应系数
22	f_{High}	系统频率死区上限
23	f_{Low}	系统频率死区下限
24	f	系统频率
25	f_0	基准频率
26	g	局域电网内风电场站的个数
27	l	局域电网内光伏电站的个数
28	r	局域电网内储能电站的个数
29	q	局域电网内互联装置的个数

3 新型频率调节方法

基于功频数学模型,调节发电机组输出功率等于系统功率总扰动量即可实现频率恢复,关键点在于系统功率总扰动量的准确计算。

基于高比例新能源局域电网特点,本文提出一种新型频率调节方法如图3所示。其中: L 为负荷频率特性曲线; G 为发电机频率特性曲线; G_1 的曲线基准功率为 P_{G01} ; G_x 的曲线基准功率为 P_{G0x} ; G_2 的曲线基

准功率为 P_{G02} 。在逐次逼近频率额定值的同时生成二次功率扰动与频率变化,主动创造二元一次方程组,完成系统功率总扰动量与负荷频率调节系数求解,实现频率弹性恢复。

以图3所示工况为例阐述具体调节原理,为便于理解,将各发电机组合并为等值发电机且忽略调频死区。

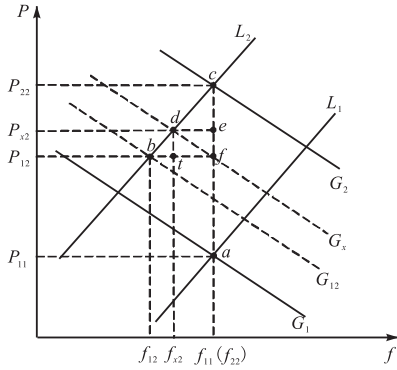


图3 频率调节方法原理

Fig.3 Principle of frequency regulation method

系统初始状态位于 a 点,负荷频率调节效应系数未知,根据功频数学模型此时有

$$\left(\sum_{i=1}^g P_{w,i} + \sum_{j=1}^l P_{v,j} + \sum_{k=1}^r P_{s,k} + \sum_{h=1}^q P_{y,h} - P_L \right) - \left(\sum_{i=1}^g P_{0w,i} + \sum_{j=1}^l P_{0v,j} + \sum_{k=1}^r P_{0s,k} + \sum_{h=1}^q P_{0y,h} - P_{0L} \right) = - \left(\sum_{i=1}^g k_{w,i} + \sum_{j=1}^l k_{v,j} + \sum_{k=1}^r k_{s,k} + \sum_{h=1}^q k_{y,h} + k_L \right) \cdot (f_{11} - f_0) \quad (5)$$

在某时刻,负荷与新能源有功均增加(负荷由 L_1 变为 L_2 ,新能源由 G_1 变为 G_{12}),系统功率总扰动量为 ΔP_L ,系统稳态点变更为 b 点,则有

$$\left(\sum_{i=1}^g P_{w,i} + \sum_{j=1}^l P_{v,j} + \sum_{k=1}^r P_{s,k} + \sum_{h=1}^q P_{y,h} - P_L \right) - \left(\sum_{i=1}^g P_{0w,i} + \sum_{j=1}^l P_{0v,j} + \sum_{k=1}^r P_{0s,k} + \sum_{h=1}^q P_{0y,h} - \Delta P_{0L} \right) = - \left(\sum_{i=1}^g k_{w,i} + \sum_{j=1}^l k_{v,j} + \sum_{k=1}^r k_{s,k} + \sum_{h=1}^q k_{y,h} + k_L \right) \cdot (f_{12} - f_0) \quad (6)$$

令 $P_{0w,i}$ 、 $P_{0v,j}$ 、 $P_{0s,k}$ 、 $P_{0y,h}$ 任一值增加,如增加 $\Delta P_{0y,h}$,系统稳态点变更为 d 点,则有

$$\left(\sum_{i=1}^g P_{w,i} + \sum_{j=1}^l P_{v,j} + \sum_{k=1}^r P_{s,k} + \sum_{h=1}^q P_{y,h} - P_L - \Delta P_L \right) - \left(\sum_{i=1}^g P_{0w,i} + \sum_{j=1}^l P_{0v,j} + \sum_{k=1}^r P_{0s,k} + \sum_{h=1}^q P_{0y,h} + \Delta P_{0y,h} - P_{0L} \right) =$$

$$- \left(\sum_{i=1}^g k_{w,i} + \sum_{j=1}^l k_{v,j} + \sum_{k=1}^r k_{s,k} + \sum_{h=1}^q k_{y,h} + k_L \right) \cdot (f_{x2} - f_0) \quad (7)$$

联立式(6)与式(7),只有 ΔP_L 与 k_L 是未知量,则可完成二元一次方程求解,从而得到系统功率总扰动量。

$\Delta P_{0y,h}$ 值的选取非常重要,不宜偏大或者偏小,偏大容易超调,偏小则削弱调频效果,考虑到负荷频率调节效应极小的情况,可选取计算式为

$$\Delta P_{0y,h} = \left(\sum_{i=1}^g k_{w,i} + \sum_{j=1}^l k_{v,j} + \sum_{k=1}^r k_{s,k} + \sum_{h=1}^q k_{y,h} \right) \cdot (f_{11} - f_{12}) = K (f_{11} - f_{12}) \quad (8)$$

式(8)可以在负荷频率调节效应极小的情况下,使频率恢复至新的稳态额定值 c 点。

具体调节步骤如图4所示。

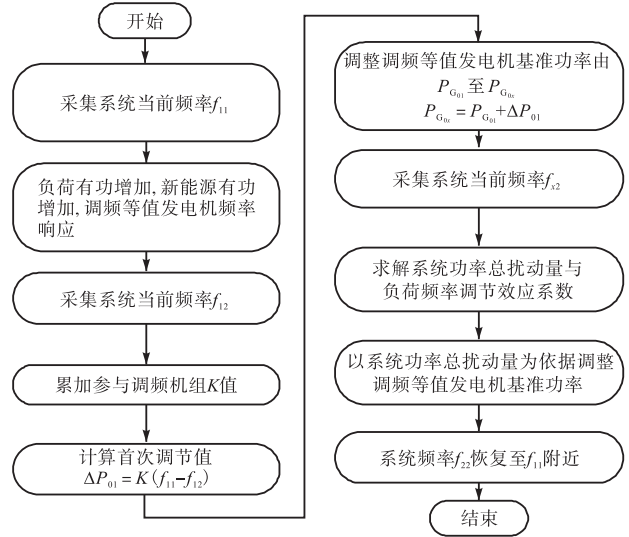


图4 频率调节方法实施步骤

Fig.4 Implementation steps of frequency regulation method

4 基于示范工程的仿真实验与分析

4.1 示范工程概况与仿真环境构建

为了验证所提新型频率调节方法的有效性,以某实际工程为例进行 RTDS 仿真分析。

如图5所示,该工程控制区域含2座110kV变电站,4座新能源场站,风电与光伏发电机组容量占系统总容量90%以上,仅有小容量水电机组作为备用电源,示范工程改造后将在2座变电站各接入1回储能系统,同时整个控制区与上一级电网断开,由具备构网能力的风光储发电机组独立组网,形成源网荷储协同互动^[17-18]、电力电量自平衡的高比例新能源局域电网。基于示范工程实际参数构建 RTDS 硬件在环

步骤 5 调整风电场 1#基准功率目标值至 21.120 MW, 执行后调频等值发电机功率调节至 27.907 MW.

步骤 6 系统频率恢复至 50.005 Hz (f_{22}).

图 7 为工况 1 仿真过程中系统频率的变化波形, 由图 7 可知, 系统负荷突增后, 系统频率迅速跌落, 最远至 49.784 Hz, 并在发电机组和负荷调节效应下, 达到新的稳态点 $f_{12} = 49.815$ Hz; 此时调整风电场 1#的基准功率, 系统频率恢复至 $f_{x2} = 49.972$ Hz; 结合两次频率稳态 f_{12} 和 f_{x2} , 估算出系统扰动量为 5.120 MW, 二次调节后最终使系统频率恢复到额定值附近 (50.005 Hz).

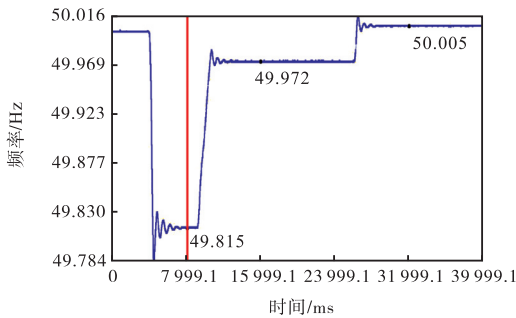


图 7 工况 1 的频率波形

Fig.7 Frequency waveform under operating condition 1

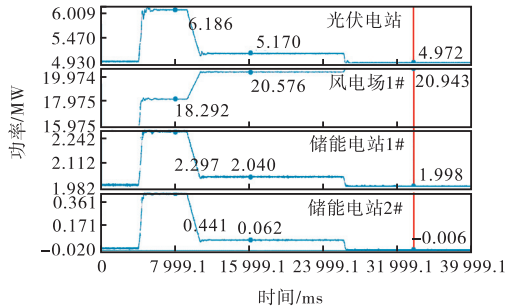


图 8 工况 1 的电压源机组有功功率波形

Fig.8 Active power waveforms of voltage source units under operating condition 1

图 8 为工况 1 仿真过程中 4 个电压源机组的有功功率波形. 电流源机组风电场 2#和风电场 3#的有功功率初值分别为 4.000 MW 和 6.000 MW, 在整个调节过程中, 有功功率输出保持不变. 由图 8 可知, 在系统负荷突增后系统频率下跌, 4 个电压源的出力同时增加, 达到稳态后, 频率稳定在 $f_{12} = 49.815$ Hz, 调频等值发电机有功功率为 27.216 MW. 为了估算系统总扰动量, 对风电场 1#的基准功率进行调整, 由 16.000 MW 升至 20.377 MW, 系统频率得到回升, 除风电场 1#外的其他电压源机组在各自功频特性下有功输出出现不同程度的回落, 风电场 1#的有功功率输出稳定在 20.576 MW, 调频等值发电机有功功率输

出为 27.848 MW, 系统频率稳定在 $f_{x2} = 49.972$ Hz; 根据总扰动量估算对风电场 1#的基准功率进行第 2 次调整, 由 20.377 MW 升至 21.120 MW, 其他电压源机组出力不同程度回落, 调频等值发电机有功功率输出为 27.907 MW, 最终系统频率恢复至 50.005 Hz.

工况 1 的详细仿真数据如表 6 所示.

仿真结果表明, 在负荷突增系统频率下跌后, 通过调频发电机组的一次调整, 同时结合两次频率稳态点 f_{12} 和 f_{x2} 可准确估算出系统总扰动量, 在已知总扰动量后通过再次调整即可实现系统频率的弹性恢复, 使系统频率最终稳定在额定值附近, 验证所提频率调节方法的有效性和正确性.

表 6 工况 1 的频率调节仿真数据

Tab.6 Simulation data of frequency regulation under operating condition 1

f_{11}/Hz	f_{12}/Hz	f_{x2}/Hz	f_{22}/Hz	$\Delta P_{01}/\text{MW}$	$\Sigma\Delta P_0/\text{MW}$
50.000	49.815	49.972	50.005	4.377	5.120

4.2.2 工况 2

图 9 和图 10 所示为工况 2 的频率和有功功率波形, 初始额定频率为 50.000 Hz (f_{11}), 风电场 3#功率增加 5.000 MW 后, 电网频率上升至 50.201 Hz (f_{12}), 以风电场 1#为调频发电机组, 具体过程如下.

步骤 1 计算有功功率首次调节值 $\Delta P_{01} = K(f_{11} - f_{12}) = -4.756$ MW.

步骤 2 调整风电场 1#基准有功功率目标值由 16.000 MW 至 11.245 MW, 执行后调频等值发电机有功功率调节至 17.857 MW.

步骤 3 采集当前频率 f_{x2} (50.040 Hz).

步骤 4 求解有功功率总调节值 $\Sigma\Delta P_0 = -5.440$ MW.

步骤 5 调整风电场 1#基准有功功率目标值至 10.550 MW, 执行后调频等值发电机有功功率调节至 17.673 MW.

步骤 6 系统频率恢复至 50.013 Hz (f_{22}).

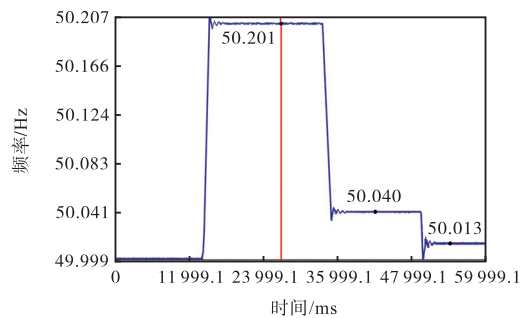


图 9 工况 2 的频率波形

Fig.9 Frequency waveform under operating condition 2

图 9 为工况 2 仿真过程中系统频率的变化波形, 由图 9 可知, 风电场 3#有功功率突增 5.000 MW, 由 6.000 MW 升至 11.000 MW, 系统频率迅速抬升, 稳定在稳态点 $f_{12} = 50.201$ Hz; 此时调整风电场 1#的基准功率, 系统频率恢复至 $f_{x2} = 50.040$ Hz; 结合 2 次频率稳态 f_{12} 和 f_{x2} , 估算出系统扰动量为 -5.440 MW, 二次调节后最终使系统频率恢复到额定值附近 (50.013 Hz).

图 10 为工况 2 仿真过程中 4 个电压源机组的有功功率波形. 电流源机组风电场 2#和风电场 3#的有功功率初值分别为 4.000 MW 和 6.000 MW. 由图 10 可知, 在风电场 3#出力突增后, 4 个电压源的有功功率同时减少, 达到稳态后, 频率稳定在 $f_{12} = 50.201$ Hz, 调频等值发电机有功功率为 18.420 MW. 为了估算系统总扰动量, 对风电场 1#的基准功率进行调整, 由 16.000 MW 降至 11.245 MW, 系统频率得到回落, 除风电场 1#外的其他电压源机组在各自功频特性下有有功功率输出出现不同程度的回升, 风电场 1#的有功功率输出稳定在 11.258 MW, 调频等值发电机有功功率输出为 17.857 MW, 系统频率稳定在 $f_{x2} = 50.040$ Hz; 根据总扰动量估算对风电场 1#的基准功率进行第 2 次调整, 由 11.245 MW 降至 10.560 MW, 其他电压源机组出力不同程度回升, 调频等值发电机有功输出为 17.673 MW, 频率恢复至 50.013 Hz.

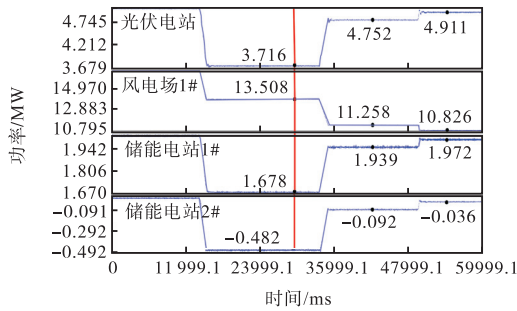


图 10 工况 2 的电压源机组有功功率波形

Fig.10 Active power waveforms of voltage source unit under operating condition 2

工况 2 的频率调节仿真数据如表 7 所示.

表 7 工况 2 的频率调节仿真数据

Tab.7 Simulation data of frequency regulation under operating condition 2

f_{11} /Hz	f_{12} /Hz	f_{x2} /Hz	f_{22} /Hz	ΔP_{01} /MW	$\Sigma \Delta P_0$ /MW
50.000	50.201	50.040	50.013	-4.750	-5.440

仿真结果表明, 在新能源发电突增系统频率抬升后, 虽然由于线损、电力电子器件的非线性控制导致系统功率总扰动量的计算结果有所偏差, 调频发电机组进行两次功率基准调整后, 最终频率没有恢复至

50.000 Hz, 但在正常范围之内, 控制区的调频规律符合功频数学模型, 验证所提调频方法在新能源发电突增工况下的有效性和正确性.

5 结论

本文提出了一种高比例新能源局域网新型频率调节方法, 可准确计算出系统功率总扰动量, 有效提升系统频率稳定性. 通过 RTDS 硬件在环仿真分析, 验证了所提方法的有效性与优势.

- (1) 无需频繁测定当地负荷频率调节效应系数, 便捷度更高.
- (2) 调频效果不受新能源与负荷波动影响, 可实施性更好.
- (3) 适应于新能源与负荷多重波动工况, 通用性更强.

未来随着可再生能源不断发展, 在传统同步发电机逐步被高比例新能源进一步替代的新型电力系统中, 本文所提出的新型频率调节方法对于高比例新能源局域网乃至新型电力系统的发展建设具有一定的借鉴意义.

参考文献:

- [1] 米剑峰, 马晓芳. 中国 CCUS 技术发展趋势分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2537-2544.
Mi Jianfeng, Ma Xiaofang. Development trend analysis of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2537-2544 (in Chinese).
- [2] 韩肖清, 李庭钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.
Han Xiaqing, Li Tingjun, Zhang Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046 (in Chinese).
- [3] 耿华, 何长军, 刘欲霜, 等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3367-3383.
Geng Hua, He Changjun, Liu Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367-3383 (in Chinese).
- [4] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
Xie Xiaorong, He Jingbo, Mao Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with

- high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475 (in Chinese).
- [5] 王冠中, 董 炜, 周瑀涵, 等. 电网强度视角下的新能源电力系统鲁棒稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8454-8465.
Wang Guanzhong, Dong Wei, Zhou Yuhan, et al. Robust stability analysis for renewable energy power systems from the perspective of grid strength[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8454-8465 (in Chinese).
- [6] 王新宝, 葛 景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.
Wang Xinbao, Ge Jing, Han Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179 (in Chinese).
- [7] 郭创新, 刘祝平, 冯 斌, 等. 新型电力系统风险评估研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3394-3404.
Guo Chuangxin, Liu Zhuping, Feng Bin, et al. Research status and prospect of new-type power system risk assessment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3394-3404 (in Chinese).
- [8] 杨 蕾, 李胜男, 黄 伟, 等. 考虑风光新能源参与二次调频的多源最优协同控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 44-49.
Yang Lei, Li Shengnan, Huang Wei, et al. Optimal coordinated control of multi-source for AGC with participation of wind and solar energy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 44-49 (in Chinese).
- [9] 吴罗兰, 张 闯, 陈俊慧, 等. 考虑大规模风电并网的电力系统二次调频容量实时计算方法[J]. 电工材料, 2019(5): 45-48.
Wu Luolan, Zhang Chuang, Chen Junhui, et al. Real-time calculation method of AGC frequency modulation capacity based on CPS standard and wind power grid-connected[J]. Electrical Engineering Materials, 2019(5): 45-48 (in Chinese).
- [10] 胡苏南, 施 永, 王新颖. 基于数据驱动的孤岛微网自适应调频策略[J]. 电源学报, 2020, 18(6): 5-11.
Hu Sunan, Shi Yong, Wang Xinying. Adaptive frequency regulation strategy for islanded microgrid based on data driven method[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(6): 5-11 (in Chinese).
- [11] 李凤祥, 汤 军, 贾军成. 基于VSG的多微网二次调频控制[J]. 电气自动化, 2021, 43(4): 71-73, 80.
Li Fengxiang, Tang Jun, Jia Juncheng. VSG-based secondary frequency modulation control for multi-microgrids[J]. Electrical Automation, 2021, 43(4): 71-73, 80 (in Chinese).
- [12] 杨向真, 杨秋强, 杜 燕, 等. 采用自适应在线模型辨识的微电网二次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 121-130.
Yang Xiangzhen, Yang Qiuqiang, Du Yan, et al. Secondary frequency regulation strategy for microgrid adopting adaptive online model identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 121-130 (in Chinese).
- [13] Ramasubramanian D, Farantatos E, Ziaieinejad S, et al. Operation paradigm of an all converter interfaced generation bulk power system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(19): 4240-4248.
- [14] 张 莹, 孟润泉, 王子昂, 等. 一种基于一致性算法的改进下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 104-111.
Zhang Ying, Meng Runquan, Wang Zi'ang, et al. An improved droop control strategy based on a consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 104-111 (in Chinese).
- [15] 吴中东, 丁石川, 郭小璇, 等. 一种并联逆变器自适应下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 84-94.
Wu Zhongdong, Ding Shichuan, Guo Xiaoxuan, et al. An adaptive droop control method for parallel inverters[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 84-94 (in Chinese).
- [16] 易文飞, 卜强生. 计及下垂控制的潮流计算研究综述[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 72-82.
Yi Wenfei, Bu Qiangsheng. Overview of research on power flow calculation with droop control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 72-82 (in Chinese).
- [17] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4330-4341.
Li Jianlin, Guo Zhaodong, Ma Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4341 (in Chinese).
- [18] 刘俊磊, 刘新苗, 卢 洵, 等. 高比例新能源系统供需平衡分析方法和对策[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2711-2724.
Liu Junlei, Liu Xinmiao, Lu Xun, et al. Analysis methods and countermeasures of supply and demand balance of high proportion new energy system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2711-2724 (in Chinese).

(责任编辑:孙立华)