

中国电机工程学报  
Proceedings of the CSEE  
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

## 《中国电机工程学报》网络首发论文

题目: 新型电力系统标准算例(2): 频率稳定 CSEE-FS  
作者: 吴萍, 赵兵, 程奕, 孙华东  
网络首发日期: 2023-09-04  
引用格式: 吴萍, 赵兵, 程奕, 孙华东. 新型电力系统标准算例(2): 频率稳定 CSEE-FS[J/OL]. 中国电机工程学报.  
<https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20230901.2141.004>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

中图分类号：TM 721

# 新型电力系统标准算例(2)：频率稳定 CSEE-FS

吴萍，赵兵，程奕，孙华东\*

(电网安全全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司)，北京市 海淀区 100192)

## Benchmark for AC-DC Hybrid System with High Penetration of Renewables (2): Frequency Stability CSEE-FS

WU Ping, ZHAO Bing, CHENG Yi, SUN Huadong\*

(National Key Laboratory of Grid Security (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** The proportion of clean energy such as new energy and hydropower in the new power system increases continuously. The frequency beyond the limit brought by high proportion of new energy and the ultra-low frequency oscillation risk caused by high proportion of hydropower are becoming increasingly prominent. In order to support the research needs of frequency safety and stability analysis and control under different scenarios of the new power system, this paper constructs the frequency stability benchmark test system. For the traditional frequency stability problem, high-frequency and low-frequency scenarios with new energy installation and output ratios both above 50% are constructed to analyze the influence of disturbance intensity, new energy output and control strategy on the maximum frequency deviation and its corresponding occurrence time as well as steady-state frequency deviation. For the ultra-low frequency oscillation problem, a scenario with hydropower output ratio reaching 89% is constructed to analyze the influence of different AC/DC disturbance types, key parameters of governor and system inertia on oscillation frequency and amplitude. The sensitivity analysis results show that the benchmark test system constructed in this paper can accurately reflect the characteristics of different frequency stability scenarios and has respectable scalability, which can meet the verification needs of frequency safety and stability analysis and control methodologies for new power systems.

**KEY WORDS:** benchmark test system; high proportion rate new energy; high proportion hydropower; high frequency; low frequency; ultra-low frequency oscillation

**摘要：**新型电力系统中新能源、水电等清洁能源占比不断提升，高比例新能源带来的频率越限和高比例水电带

基金项目：国家自然科学基金项目(U21666601,51977197)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U21666601,51977197).

来的超低频振荡风险日益突出。为支撑新型电力系统不同场景下频率安全稳定分析与控制研究需求，本文构建了频率稳定标准算例(Chinese Society for Electrical Engineering - Frequency Stability, CSEE-FS)。针对传统频率稳定问题，构建了新能源装机及出力占比均在 50% 以上的高频、低频场景，分析了故障强度、新能源出力及控制策略等对频率偏差最大值及其出现时间、稳态频率偏差的影响；针对超低频振荡问题，构建了水电出力占比达 89% 场景，分析了交直流不同故障形态、调速器关键参数、系统惯量等对振荡频率、振荡幅值的影响。敏感性分析结果表明，本文所建算例系统可准确反映不同频率稳定场景特性，且具备良好的扩展性，能满足新型电力系统频率安全稳定分析与控制方法验证需求。

**关键词：**标准算例；高比例新能源；高比例水电；高频；低频；超低频振荡

## 0 引言

在全球资源紧张、碳排放问题亟待解决的背景下，我国提出在 2030 年实现碳达峰，并争取在 2060 年前实现碳中和的宏伟目标。大力发展新能源、水电等清洁能源，构建新型电力系统，是实现碳达峰、碳中和目标的重要手段之一<sup>[1-2]</sup>。

新能源大规模接入后，由于其电力电子解耦特性及其最大功率跟踪模式，使系统惯量水平逐渐相对减小且调频能力相对减弱，受扰后系统频率指标趋于恶化<sup>[3-5]</sup>。近年来，高比例新能源电力系统频率崩溃引发的大停电事故频发。如 2016 年南澳“9.28”大停电，事故前燃煤燃气机组大量退出运行，新能源占比 48.36%，系统惯量低至历史最低水平 3000MW·s，极端天气诱发新能源大规模脱网，系统频率变化率高达 6.1Hz/s，导致低频减载功能闭锁，系统频率进一步跌至 47Hz 以下<sup>[6]</sup>。2019 年英国“8.9”大停电中，霍恩海上风电场出力下降以及分布式电源大量脱网，导致

了事故中三分之二的总功率缺额，最终触发低频减载动作，引发大停电事故的发生<sup>[7]</sup>。

我国 70% 以上的水力资源位于西部和中南部，通过超特高压直流跨区送往负荷中心。在高比例水电外送系统中，由于大量水轮机调速器在一次调频环节中带来的负阻尼效应，引发了多起超低频振荡事件，如天广直流、锦苏直流孤岛试验时分别出现振荡周期 0.1Hz 和 0.07Hz 的超低频振荡；藏中电网于 2015 年出现振荡周期为 0.07Hz 的频率波动事件，振荡过程中系统最高频率 52.24Hz，最低频率 47.63Hz，导致 220MW 机组脱网，最终安控装置下达切负荷 210MW 的指令<sup>[8]</sup>。国外土耳其、哥伦比亚等电网也发生过超低频振荡现象<sup>[9]</sup>。研究发现，超低频振荡（振荡频率一般低于 0.1Hz，显著低于 0.2~2.0Hz 低频振荡的频率范围）不是低频振荡问题中振荡频率的简单下降，其表现形式为全网频率的振荡，而非网内机群之间的相对运动，因此，强制性国家标准 GB 38755—2019《电力系统安全稳定导则》将这种超低频振荡定义为小干扰频率稳定。

目前，针对高比例新能源电力系统的频率稳定问题，已有众多学者开展相关机理研究并进行仿真验证。文献[10]考虑负荷电压特性、频率空间分布特征和新能源接入对频率响应模型的影响，基于频率变化率和频率偏差约束，对系统所需最小惯量进行评估，并分别基于改动的 WSCC 3 机 9 节点小系统和实际电网进行了仿真验证。文献[11]根据风速将风机分为四个运行区域，建立考虑风机参与调频的频率响应模型，并基于改进的 IEEE 39 节点系统验证了模型的可靠性。文献[12]研究了风机低惯量性、出力波动性对系统惯量和频率指标的影响，基于改进的 IEEE RTS-79 系统进行了验证。在超低频振荡方面，国内外众多学者研究了超低频振荡产生原因和抑制方法<sup>[13-15]</sup>。

上述研究采用的实际电网模型主要用于理论方法的有效性验证，但由于网架结构复杂、节点数量庞大，难以支撑频率稳定的机理分析与推导；采用的改进 IEEE 等算例主要基于传统交流同步电网，难以精确模拟新型电力系统不同场景下频率安全稳定问题。因此，本文基于中国实际电网结构与数据，建立了频率稳定标准算例，包含水电、火电、风电和光伏不同类型电源，以 500kV

交流和 ±500kV 直流为主网架，构建了含高比例新能源的高频、低频场景，以及含高比例水电的超低频振荡场景，分析了故障强度及类型、常规机组调速器参数、新能源出力及控制策略等对系统频率稳定水平影响的敏感性，可有效支撑新型电力系统频率分析机理研究与控制方法的正确性验证。

## 1 频率评估指标

### 1.1 传统频率稳定场景

传统频率稳定主要针对大扰动频率稳定，是指系统受到大扰动后，系统频率能够保持或恢复到允许的范围内，不发生频率崩溃的能力。传统频率稳定按照过渡时间的长短，可以划分为短期过程和长期过程<sup>[16]</sup>，含低频和高频两大场景。

发电机转子运动方程<sup>[17]</sup>如式（1）所示：

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_N \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta M}{T_J} \approx \frac{\Delta P_m - \Delta P_e}{T_J} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $T_J$  表示发电机组的惯性时间常数， $\delta$  表示发电机组转子交轴与同步坐标实轴之间的夹角， $\Delta P_m$  为机械功率不平衡量， $\Delta P_e$  为电磁功率不平衡量， $\omega = 2\pi f$  表示角速度， $\omega_N$  为额定角速度。

当系统发生功率盈余时，不平衡功率在各机组间分配，使发电机承受电磁功率突减， $\Delta P_e$  为负值。此时调速器尚未响应， $\Delta P_m$  为零，其差值为正，将产生正的频率变化率，导致高频问题。随着频率偏差增大，发电机调速器启动，发电机机械功率随之改变。当机械功率减小至与电磁功率平衡时，频率偏差出现最大值。之后机械功率小于电磁功率，发电机减速。由于发电机功率调节惯性作用，经过一系列振荡后最终到达稳态频率。

低频场景原理类似，当系统发生功率缺额时，发电机承受电磁功率突增， $\Delta P_e$  为正值，产生负的频率变化率，使频率下降，导致低频问题。

频率安全稳定主要关注频率最大偏差及其出现时间、稳态频率偏差和频率变化率。

#### 1) 频率偏差最大值及其出现时间

频率偏差最大值是当系统出现功率不平衡量后，在发电机调速器、负荷调频等作用下，产生的最大暂态频率差，其出现时间是系统发电功率和负荷功率第一次平衡时刻。预测扰动后系统暂

态频率偏差最大值及其出现时间对保证系统安全稳定运行有重要意义。

2) 稳态频率偏差

稳态频率偏差是在发电机和负荷调频作用下，完全补偿扰动功率后，频率稳态值与额定频率的差值。电力系统正常运行条件下稳态频率偏差限值为±0.2Hz。

3) 频率变化率

频率变化率是频率对时间的导数，反映了频率变化速率。相同扰动下，惯量越小，系统频率变化率越大。国外使用频率变化率指标作为分布式新能源防孤岛保护的手段之一，在频率变化率超过约束值时，新能源将脱网，国内目前对频率变化率没有要求。

1.2 超低频振荡场景

文献[11]分析了超低频振荡的产生机理。通过阻尼转矩分析法，推导了水轮机在考虑调速器简化模型时，系统传递函数的特征值实部表达式：

$$\sigma = -\zeta\omega_n \approx -\frac{D + K_{mD}}{2T_j} \quad (2)$$

式中，σ为调速器方程的特征根实部， $K_{mD} \approx (B_p T_j - T_w)/0.5 T_w B_p$ ，代表原动机阻尼转矩系数，与机组惯性时间常数 $T_j$ 、调差系数 $B_p$ 、水锤系数 $T_w$ 有关， $D$ 为表征负荷和发电机阻尼共同作用的系数，其值恒为正。

若原动机提供的负阻尼大于负荷和发电机提供的正阻尼，将导致系统阻尼为负，特征值实部大于零，引发超低频振荡。

在高比例水电经直流外送系统中，直流相当于恒功率负荷，频率调节系数为零，降低了负荷提供的正阻尼， $D$ 减小；且由于水轮机存在水锤效应，与汽轮机相比，相位滞后更大， $K_{mD}$ 更小，原动机更易产生负阻尼特性，超低频振荡发生风险更高。

超低频振荡的关键指标为振荡频率及振荡幅值。振荡频率为识别超低频振荡的关键特征，与低频振荡不同，通常表现为振荡周期在10s以上的频率波动。超低频振荡可根据振荡幅值的变化分为三类：增幅振荡、等幅振荡和减幅振荡。通过优化调速器的PID参数、增加附加阻尼控制器、降低水电机组的备用容量、增加直流调制等方法可以增大超低频振荡模式的阻尼比，将增幅振荡、等幅振荡变为小扰动稳定的减幅振荡，从而降低

超低频振荡的危害。

2 CSEE-FS 算例概况

2.1 系统概况

根据某实际电网数据，对网架结构进行简化后，搭建交直流混联系统频率稳定标准算例CSEE-FS，系统拓扑如图1所示，输电网架概况如表1所示，共有直流线路3回、关键节点47个。

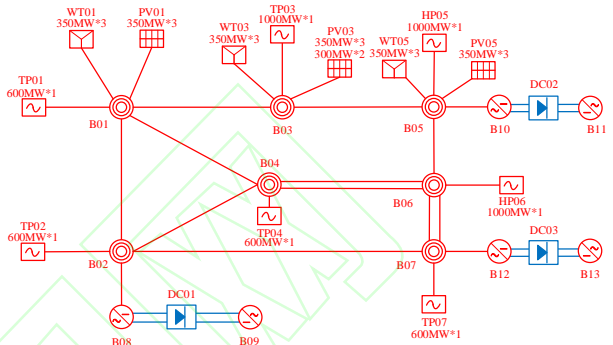


图1 CSEE-FS 系统拓扑

Fig. 1 System topology of CSEE-FS

表1 输电网架概况

Tab. 1 Overview of transmission network

电压等级/kV	节点数目	节点类型
500	16	交流输电网架
220	19	变压器中/高压侧
210	6	直流整流侧
199	6	直流逆变侧
合计	47	/

2.2 线路及变压器概况

系统共有交流输电线路31条，变压器62台，并通过3回±500kV直流输电通道与其它电网异步互联，线路及变压器概况如表2所示。各线路、变压器详细参数见附录表A1~A3。

表2 线路及变压器概况

Tab.2 Overview of transmission lines and transformers

类型	数目	备注
交流线路	31条	500kV 交流输电网架11条
		220kV 新能源送出线路20条
		20/525kV 常规机组升压变7台
		0.4/38.5kV 新能源箱变20台
两绕组变压器	47台	0.69/38.5kV 新能源箱变20台
		38.5/230kV 新能源场站升压变20台
三绕组变压器	15台	电压/kV 525/230/37
直流线路	3回	额定电压/kV ±500
		额定功率/MW 5000



2.3 电源概况

常规机组共 7 台，总装机 5400 MW，其中 5 台火电装机 3400 MW，2 台水电装机 2000 MW；风电、光伏 2 种新能源总装机 6900 MW，其中风电装机 3150 MW，光伏装机 3750 MW，新能源装机比例为 56.1%，装机概况如表 3 所示，各机组详细参数见附表 A4、A5。

表 3 电源装机概况

Tab.3 Overview of system installed capacity

接入母线	常规机组装机/MW		新能源装机/MW	
	火电	水电	风电	光伏
B01	600	/	1050	1050
B02	600	/	/	/
B03	1000	/	1050	1650
B04	600	/	/	/
B05	/	1000	1050	1050
B06	/	1000	/	/
B07	600	/	/	/
合计	3400	2000	3150	3750

2.4 负荷概况

系统总有功负荷 4852.1MW，总无功负荷 1528Mvar，负荷功率因数为 0.9538，各母线负荷水平详见表 4。

表 4 系统负荷情况

Tab. 4 Overview of system loads

母线	有功负荷/MW	无功负荷/Mvar
B01	1100	360
B02	700	220
B03	900	300
B04	429.1	78
B05	500	170
B07	1223	400
合计	4852.1	1528

3 高频场景

3.1 基础运行方式

系统运行方式如表 5 所示，新能源出力占比为 52.28%，负荷调频系数  $D=2.0$ ，系统等效惯量  $T_J=2.68s$ ，常规机组调速器关键参数见附表 A6。

表 5 高频场景基础运行方式

Tab. 5 Operation mode of high frequency scenario

电源出力/MW		负荷功率 /MW	直流外送功率 /MW	损耗 /MW
常规机组 /MW	新能源 /MW			
3478.2	3810	4852.1	2380.8	55.3

合计：7288.2MW

合计：7288.2MW

3.2 敏感性分析

3.2.1 直流功率影响

当直流发生闭锁故障时，系统将产生永久功率盈余。设置直流 DC01 外送功率分别为 800MW、900MW 和 1000MW，在  $t=1.0s$  发生双极闭锁故障，系统频率偏差如图 2 所示。

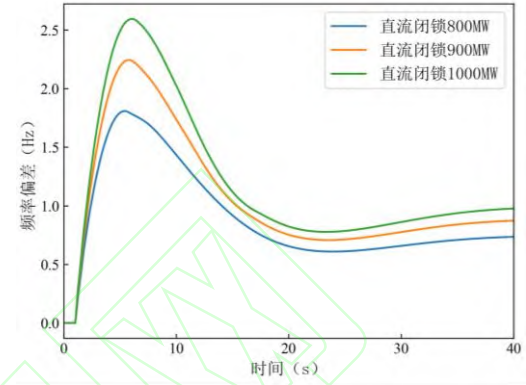


图 2 不同直流功率闭锁时系统频率偏差

Fig. 2 Frequency deviations under different amounts of DC power when happening DC blocks

频率偏差最大值及其出现时间、稳态频率偏差详见表 6。随着闭锁直流功率增加，系统频率偏差最大值和稳态频率偏差都随之变大。当发电机频率偏差超过 51.5Hz 时，火电机组将启动超速保护系统，关闭调节汽门，引发一系列连锁反应。

表 6 不同直流功率闭锁时系统频率指标

Tab. 6 Frequency indicators under different amounts of DC power when happening DC blocks

直流功率大小 /MW	频率偏差最大值 /Hz	出现时间 /s	稳态频率偏差 /Hz
800	1.83	5.99	0.74
900	2.22	6.34	0.87
1000	2.61	6.67	0.98

3.2.2 直流故障形态影响

换相失败是直流系统较常见的现象，大部分是由于交流电网故障引发，造成直流功率短时无法输送，存在单回直流一次或多次换相失败、多回直流同时换相失败等多种形态。当换相失败超过一定次数时，直流保护动作闭锁直流。

1) 换相失败次数影响。

设置在  $t=1.0s$  三回直流开始同时连续换相失败 2~4 次，系统出现短时功率盈余冲击。不同次数换相失败冲击下，直流 DC01 功率如图 3 所示，系统频率偏差如图 4 所示。

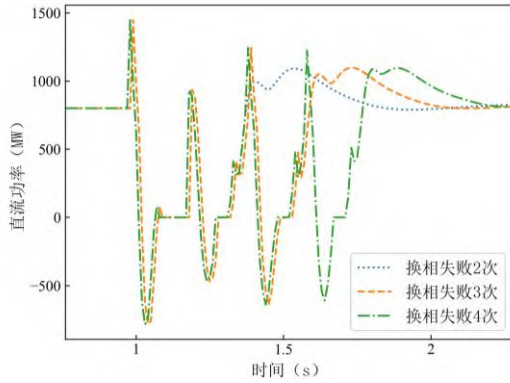


图 3 DC01 直流功率

Fig. 3 DC power of DC01

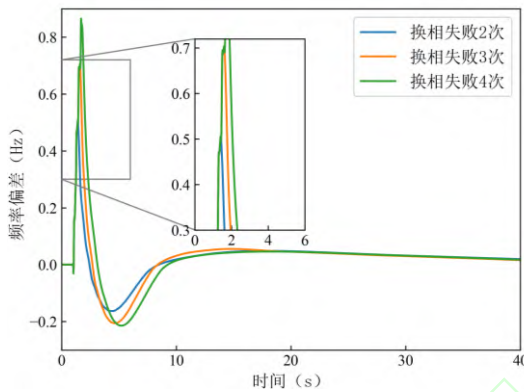


图 4 不同换相失败次数下系统频率偏差

Fig. 4 Frequency deviations under different commutation failure times

随着直流换相失败次数的增加，频率偏差最大值越大，出现时间越晚，详见表 7。随后在调速器动作下，频率偏差逐渐减小。由于系统不存在长期功率盈余，稳态频率偏差为 0Hz。

表 7 不同换相失败次数下系统频率指标

Tab. 7 Frequency indicators under different commutation failures times

扰动类型	频率偏差最大值/Hz	出现时间/s
三回直流连续换相失败 2 次	0.51	1.40
三回直流连续换相失败 3 次	0.71	1.59
三回直流连续换相失败 4 次	0.87	1.69

## 2) 故障类型影响。

设置在  $t=1.0s$  三回直流同时连续换相失败 3 次， $t=1.63s$  时其中一回直流 DC01 在发生第四次连续换相失败后双极闭锁，导致 800MW 的永久功率盈余。DC01 直流功率如图 5 所示，系统频率偏差如图 6 所示。

与只发生直流换相失败故障相比，直流换相失败后闭锁故障冲击下，系统频率偏差最大值为 1.55Hz，出现时刻为 7.31s，系统稳态频率偏差为

0.74Hz，系统频率偏差最大值及出现时间均增大，且出现稳态频率偏差。

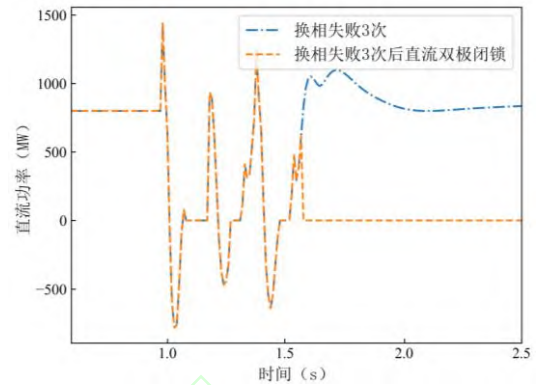


图 5 DC01 直流功率

Fig. 5 The DC power of DC01

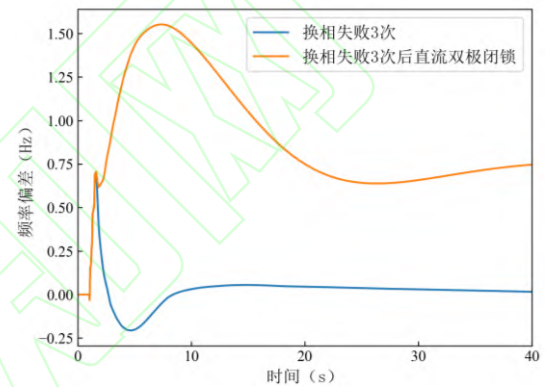


图 6 不同扰动类型下系统频率偏差

Fig. 6 Frequency deviations under different types of failure

## 3.2.3 新能源出力占比影响

新能源机组大量接入后，将替代部分常规机组，导致系统惯量水平降低和调频能力减弱，进而恶化各项频率指标。为研究新能源出力占比对系统频率的影响，通过增加新能源出力，同时减小常规机组开机台数及出力来改变系统运行方式，如表 8 所示。

表 8 不同方式下系统概况

Tab. 8 Overview of different system operation modes

运行方式	开机的常规机组 装机容量/MW	常规机组 出力/MW	新能源装机 容量/MW	新能源出力 /MW	系统惯量/s	出力占比/%
方式 1	5850	3478.2	6950	3810	2.68	52.28
方式 2	4650	2699.6	6950	4600	2.25	63.02
方式 3	3500	2101.7	6950	5200	1.94	71.13

设置在  $t=1.0s$  直流 DC01 单极闭锁，不同运行方式下系统频率偏差如图 7 所示。

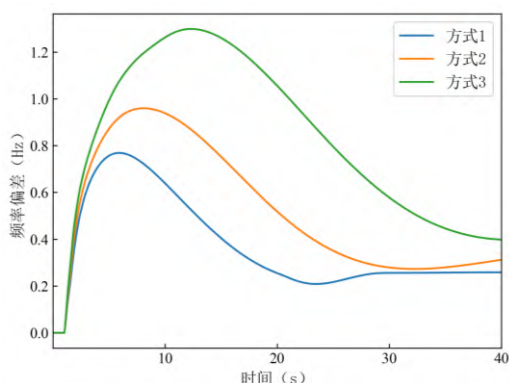


图 7 不同运行方式下系统频率偏差

Fig. 7 Frequency deviations under different operation modes

不同运行方式下系统频率指标如表 9 所示，随着新能源占比的提高，相同故障下系统频率偏差最大值和稳态频率偏差均将增大。

表 9 不同运行方式下系统频率指标

Tab. 9 Frequency indicators under different operation modes

运行方式	频率偏差最大值/Hz	最大值出现时间/s	稳态频率偏差/Hz
方式 1	0.77	5.92	0.26
方式 2	0.97	7.83	0.31
方式 3	1.30	12.28	0.40

## 4 低频场景

### 4.1 基础运行方式

低频场景基础运行方式和高频场景一致。

### 4.2 敏感性分析

#### 4.2.1 故障类型影响

分别设置系统发生切机故障和负荷突增扰动。当发生切机故障时，发电机机械功率减小，机械功率小于电磁功率；当发生负荷突增扰动时，发电机电磁功率突增，两种情况均使发电机加速功率为负，系统出现低频场景。

##### 1) 切机故障。

设置在  $t=1.0s$  发电机 TP04 切机 300MW、250MW、200MW。

不同切机故障下，系统频率偏差如图 8 所示。随着故障功率增加，系统频率偏差最大值和稳态频率偏差相应增大，频率指标如表 10 所示。

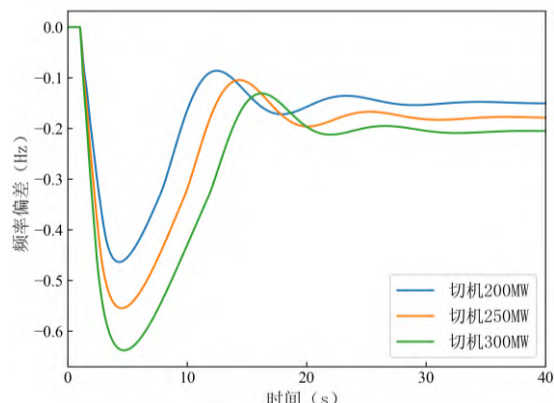


图 8 切机故障下系统频率

Fig. 8 Frequency deviations under different amounts of generation loss

表 10 不同切机量下系统频率指标

Tab. 10 Frequency indicators under different amounts of generation loss

切机量大小/MW	频率偏差最大值/Hz	偏差最大值出现时间 /s	稳态频率偏差/Hz
200	-0.46	4.28	-0.15
250	-0.56	4.56	-0.18
300	-0.64	4.79	-0.21

#### 2) 负荷突增扰动。

设置在  $t=1.0s$  母线 B01 负荷突增 350MW、400MW、450MW。不同负荷突增情况下，系统频率偏差如图 9 所示。系统各频率指标和切机故障呈现同样变化趋势。

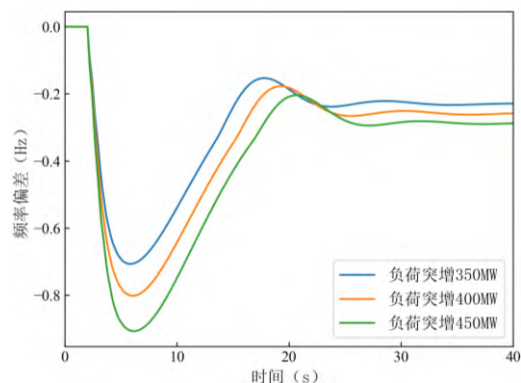


图 9 负荷突增扰动下系统频率

Fig. 9 Frequency deviations under different amounts of load increase

#### 4.2.2 新能源控制策略影响

新能源低电压穿越能力指当电力系统事故或扰动引起并网电压跌落时，在一定的电压跌落范围和时间间隔内，新能源能够保证不脱网连续运行。低电压穿越过程中，典型有功功率响应特性如图 10 所示，低电压穿越期间新能源出力受有功电流水平影响，出力将下降；低电压穿越后新



能源有功出力可按斜率恢复或按曲线恢复，恢复至扰动前水平。在低频场景下，新能源低电压穿越或脱网将使功率缺额进一步增大，导致频率偏差增大。

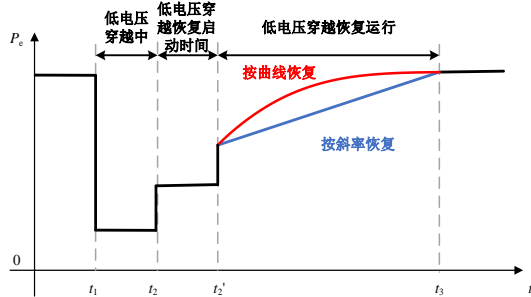


图 10 新能源低电压穿越有功功率响应

Fig. 10 The AC power of new energy when experiencing low voltage cross

在  $t=1.0s$  线路 B03-B05 发生三永 N-1 故障，设置新能源低电压穿越控制策略如表 11 所示，系统频率偏差和 WT03 单台机组有功功率如图 11、图 12 所示。

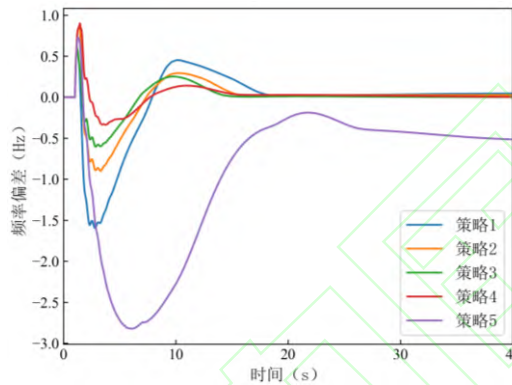


图 11 不同新能源低电压穿越控制策略下系统频率偏差

Fig. 11 Frequency deviations under different control strategies when experiencing low voltage cross

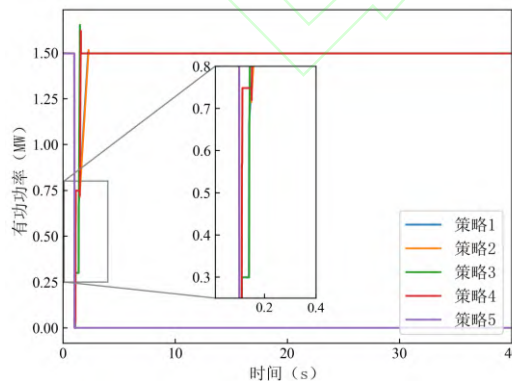


图 12 WT03 (单机) 有功功率

Fig. 12 Active power of WT03

系统频率偏差最大值如表 11 所示。

1) 通过策略 1 与策略 2、策略 3 与策略 4 对比可知，同样恢复速率下，随着低电压穿越期间

新能源有功功率水平增大，系统暂态频率偏差变小。

2) 通过策略 1 与策略 3、策略 2 与策略 4 对比可知，增大恢复速率对提升系统频率稳定性效果较明显，随着恢复速率的提高，频率偏差最大值减小。

3) 故障发生后，若新能源并网点电压持续小于整定值，将可能触发新能源低电压脱网保护。在策略 5 下，由于设定的脱网保护延时较短，部分新能源机组陆续脱网，导致永久功率缺额，系统频率偏差增大，进而出现稳态频率偏差。

表 11 不同新能源低电压穿越控制策略下频率指标

Tab. 11 Frequency indicators under different control strategies when experiencing low voltage cross

控制策略	恢复速率 /MW s <sup>-1</sup>	低穿期间有功功率水平/%	频率偏差最大值/Hz
策略 1	1	20	-1.59
策略 2	1	50	-0.90
策略 3	10	20	-0.60
策略 4	10	50	-0.34
策略 5	脱网	脱网	-2.82

## 5 超低频振荡场景

### 5.1 基础运行方式

基于高/低频基础运行方式，将常规机组全部设置为水电机组，同时修改水轮机调速器参数如附录表 A7 所示。负荷调频系数为  $D=1.0$ ，系统等效惯量为  $T_J=11.24s$ ，水电出力为 3811.0MW，占比达 89.4%，系统基础运行方式如表 12 所示。

表 12 超低频振荡基础运行方式

Tab. 12 Operation mode of ultra-low frequency oscillation scenario

电源出力/MW		负荷功率 /MW	直流外送功率 /MW	损耗 /MW
水电机组 /MW	新能源 /MW			
3811.0	450.0	1852.1	2380.8	28.1
合计：4261.0MW		合计：4261.0MW		

### 5.2 敏感性分析

#### 5.2.1 故障类型影响

在  $t=1.0s$ ，分别设置直流 DC01 连续换相失败三次、母线 B01 负荷突增 50MW、交流线路 B03-B05 三永 N-1 故障。

直流连续换相失败导致系统出现短时功率盈余；母线 B01 负荷突增使系统出现永久功率缺额；交流线路 B03-B05 三永 N-1 故障导致电压跌落，使得直流功率突减，造成系统出现短时功率盈余，



三种故障均导致系统出现超低频振荡，系统频率偏差如图 13 所示。

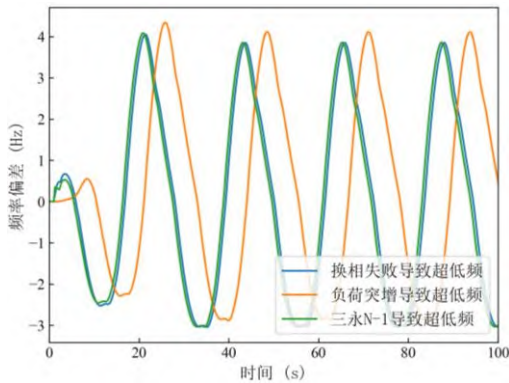


图 13 不同扰动类型下系统频率偏差

Fig. 13 Frequency deviations under different types of disturbance

不同故障类型下振荡频率和振荡幅度如表 13 所示。可见在高比例水电系统中，各种形式的功率盈余或缺额均易诱发超低频振荡，且振荡频率和振荡幅值基本一致，与扰动类型无关。

表 13 不同故障引起频率超低频振荡指标

Tab. 13 Indicators of ultra-low frequency oscillation under different types of disturbances

故障类型	振荡频率/Hz	最大振荡幅度/Hz
直流 DC01 连续	0.045	6.88
换相失败三次		
线路 B03-B05 三		
永 N-1 故障	0.045	6.82
母线 B01 负荷突		
增 50MW	0.044	6.92

5.2.2 水电机组参数影响

适当减小水锤系数  $T_w$ 、PID 环节比例系数  $K_P$  和积分系数  $K_I$  可以使调速系统呈现正阻尼特性，从而抑制超低频振荡的发生。依次减小水轮机各调速器参数如表 14 所示。

表 14 不同水轮机调速器参数

Tab. 14 Parameters of water turbine governor

调速器参数	水锤系数/s	PID 环节比例系数	PID 环节积分系数
参数 1	2.5	15	15
参数 2	2	10	10
参数 3	1	5	5
参数 4	0.5	1	1

不同调速器参数下，设置  $t=1.0s$  交流线路 B03-B05 发生三永 N-1 故障，系统频率偏差如图 14、图 15 所示。

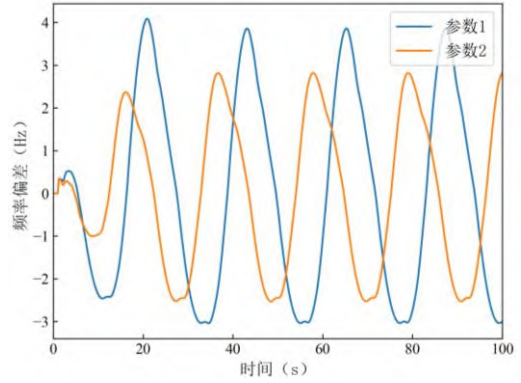


图 14 调速器参数 1、参数 2 对应系统频率偏差

Fig. 14 Frequency deviations under parameter 1 and 2

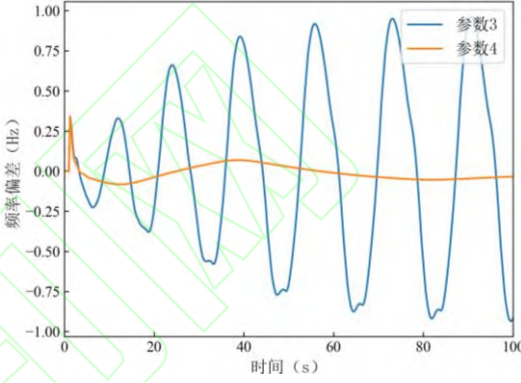


图 15 调速器参数 3、参数 4 对应系统频率偏差

Fig. 15 Frequency deviations under parameter 3 and 4

对频率曲线进行 Prony 分析，系统振荡频率、幅度和阻尼比如表 15 所示。随着各参数减小，振荡幅度逐步降低，超低频振荡得到抑制。

表 15 不同参数下频率超低频振荡指标

Tab. 15 Indicators of ultra-low frequency oscillation under different parameters of water turbine governors

调速器参数	振荡频率	最大振荡幅度	主导振荡模式
	/Hz	/Hz	阻尼比
参数 1	0.045	6.82	0
参数 2	0.042	4.28	0
参数 3	0.056	1.91	-0.006
参数 4	0.013	0.15	0.233

不同参数下，发电机 HP02 的机械功率如图 16 所示，当水锤系数和调速器比例、积分系数减小时，水锤效应反调效果明显变小，但功率支援作用较小，响应速度相对较慢。综上所述，较小的 PI 参数响应速度慢、调节时间长，不利于扰动后的频率快速恢复，但能有效防止超低频振荡的发生。

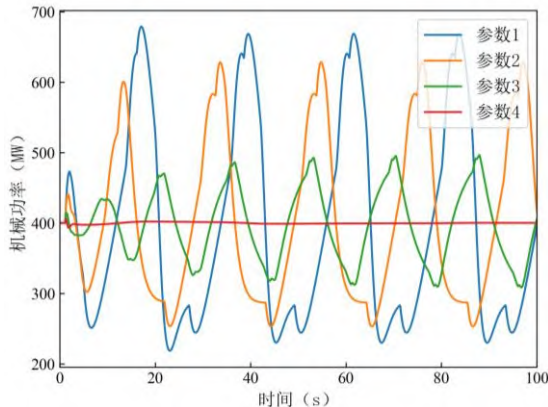


图 16 发电机 HP02 机械功率

Fig. 16 The mechanical power of HP02

### 5.2.3 系统惯量影响

为探究常规机组惯量水平对超低频振荡的影响，在  $T_W=1$ ,  $K_I$ 、 $K_P=5$  时，在不改变水电机组开机情况下，将系统惯量改为基础运行方式的 80%、60%、40%，设置在  $t=1.0s$  交流线路 B03-B05 发生三永 N-1 故障。系统频率偏差如图 17 所示。

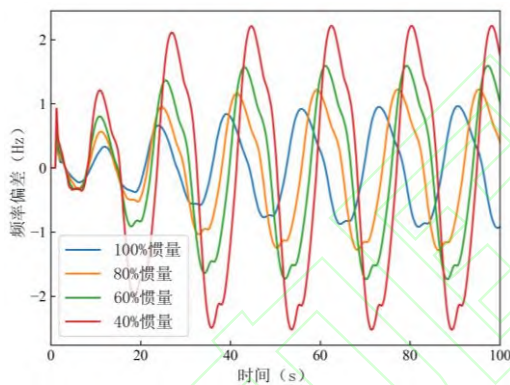


图 17 不同系统惯量水平下频率偏差

Fig. 17 Frequency deviations under different system inertia levels

随着系统惯量减小，超低频振荡频率基本不变，振荡幅值增大，如表 16 所示。因此，增大系统惯量可以减小超低频振荡幅度，但无法防止超低频振荡的发生。

表 16 不同惯量水平下系统超低频振荡频率指标

Tab. 16 Indicators of ultra-low frequency oscillation under different inertia levels

系统惯量/%	振荡频率/Hz	最大振荡幅度/Hz
100	0.056	1.61
80	0.055	2.43
60	0.055	3.06
40	0.056	4.62

## 6 结论

本文结合新型电力系统频率安全稳定分析需求，搭建了含高比例新能源和水电的交直流混联系统频率稳定标准算例 CSEE-FS，提供了完整的拓扑结构、相关元件模型参数，并进行了高低频和超低频振荡的仿真测试，相关结论如下：

1) 构建了新能源出力占比高于 50%、60%、70%等多样化场景，能满足未来新型电力系统新能源占比不断提升下频率安全稳定分析与控制研究需求。

2) 结合高频、低频和超低频振荡产生机理，分析了故障强度及类型、常规机组调速器参数、新能源出力及控制策略等对系统频率安全稳定水平影响的敏感性，验证了算例系统的有效性。

3) 算例系统具备较好的扩展性，电力行业科研工作者可根据研究需求修改网架结构、运行方式及控制参数，支撑频率分析机理研究与控制方法的正确性验证，为我国新型电力系统特性认知、规划和运行奠定基础。

### 参考文献

- [1] 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(07): 1893-1904.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(07): 1893-1904(in Chinese).
- [2] Thomas S, Filip A, Johannes K, et al. A Review of Architectures and Concepts for Intelligence in Future Electric Energy Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2424-2438.
- [3] G. Delille, B. Francois, G. Malarange. Dynamic Frequency Control Support by Energy Storage to Reduce the Impact of Wind and Solar Generation on Isolated Power System's Inertia[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 931-939.
- [4] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.  
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on Inertia System of Frequency Response for Power System With High Penetration Electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192 (in Chinese).
- [5] F. Milano, F. Dürfler, G. Hug, et al. Foundations and Challenges of Low-Inertia Systems[C]//2018 Power Systems Computation Conference (PSCC). Dublin,

Ireland: IEEE, 2018.

- [6] 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 (in Chinese).
- [7] 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 (in Chinese).
- [8] 岳雷, 薛安成, 李志强, 等. 水轮发电机调速系统对超低频振荡的影响及模型适用性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(01): 227-235.
- YUE Lei, XUE Ancheng, LI Zhiqiang, et al. Effects on Extra-Low Frequency Oscillation Caused by Hydro Generator Governor System and Model Suitability Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(01): 227-235 (in Chinese).
- [9] 李伟, 肖湘宁, 郭琦. 云广特高压直流送端孤岛运行超低频振荡与措施[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 161-166.
- LI Wei, XIAO Xiangning, GUO Qi, et al. Ultra-low-frequency Oscillation and Countermeasures in Yunnan-Guangdong UHVDC Sending-end System in Islanded Operating Mode [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 161-166 (in Chinese).
- [10] 王宝财, 孙华东, 李文锋, 等. 考虑动态频率约束的电力系统最小惯量评估[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(01): 114-127.
- WANG Baocai, SUN Huadong, LI Wenfeng, et al. Minimum Inertia Estimation of Power System Considering Dynamic Frequency Constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(01): 114-127 (in Chinese).
- [11] Matej K, Igor K. Introducing low-order system frequency response modelling of a future power system with high penetration of wind power plants with frequency support capabilities[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(13): 1453-1461.

- [12] N. Nguyen, J. Mitra, Reliability of Power System with High Wind Penetration Under Frequency Stability Constraint[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 985-994.
- [13] 史华勃, 陈刚, 丁理杰, 等. 兼顾一次调频性能和超低频振荡抑制的水轮机调速器PID参数优化[J]. 电网技术, 2019, 43(01): 221-226.
- SHI Huabo, CHEN Gang, DING Lijie, et al. PID Parameter Optimization of Hydro Turbine Governor Considering the Primary Frequency Regulation Performance and Ultra-Low Frequency Oscillation Suppression [J]. Power System Technology, 2019, 43(01): 221-226 (in Chinese).
- [14] Villegas H N. Electromechanical oscillations in hydro-dominant power systems: an application to the Colombian power system [D]. Ames, USA: Iowa State University, 2011.
- [15] Pico H V, McCalley J D, Angel A, et al. Analysis of very low frequency oscillations in hydro-dominant power systems using multi-unit modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1906-1915.
- [16] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7796-7809.
- SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Research on Definition and Classification of Power System Security and Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7809 (in Chinese).
- [17] Kundur P, Balu N J, Lauby M G. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-hill, 1994.

#### 作者简介:

吴萍(1987), 女, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, [wuping@epri.sgcc.com.cn](mailto:wuping@epri.sgcc.com.cn);

赵兵(1980), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, [zhaobing@epri.sgcc.com.cn](mailto:zhaobing@epri.sgcc.com.cn);

程奕(1992), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, [chengyi@epri.sgcc.com.cn](mailto:chengyi@epri.sgcc.com.cn);

\*通信作者: 孙华东(1975), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, [sunhd@epri.sgcc.com.cn](mailto:sunhd@epri.sgcc.com.cn)。



吴萍

表 A1 线路参数

Table A1 Parameters of transmission line							
序号	起始节点	末端节点	电阻/pu	电抗/pu	导纳/pu	基准电压/kV	并列回路
1	B01	B02	0.00005	0.00068	0.3788	525	1
2	B01	B03	0.00025	0.00358	0.1997	525	1
3	B01	B04	0.0007	0.0092	0.10159	525	1
4	B02	B04	0.00057	0.00799	0.44622	525	1
5	B04	B06	0.00011	0.00153	0.00287	525	2
6	B03	B05	0.00007	0.00095	0.00179	525	1
7	B05	B06	0.00005	0.00066	0.00125	525	1
8	B06	B07	0.0004	0.0055	0.0102	525	2
9	B02	B07	0.00025	0.00358	0.1997	525	1

表 A2 两绕组变压器参数

Table A2 Parameters of two winding transformer						
序号	变压器名称	漏抗/pu	额定容量/MVA	基准电压/kV	变压器变比	台数
1	T2-01/02/04/07	0.01064	780	20/525	1	4
2	T2-03/05/06	0.01064	1400	20/525	1	3
3	T2-08/09/10/11/12/13/14/15/16	0.01806	350	0.69/38.5	1	9
4	T2-17/18/19/20/21/22/23/24/25/26/27	0.02167	350	0.4/38.5	1	11
5	T2-28/29/30/31/32/33/34/35/36/37/38/ 39/40/41/42/43/44/45/46/47	0.035	350	38.5/230	1	20

表 A3 三绕组变压器参数

Table A3 Parameters of three winding transformer								
序号	变压器名称	电抗 1/pu	电抗 2/pu	电抗 3/pu	额定容量/MVA	基准电压/kV	变压器变比	台数
1	T3-01/02/03/04/05/06 /07/08/09	0.0157	-0.0158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0	9
2	T3-10/11/12/13/14/15	0.02143	-0.0021	0.04093	1000/1000/300	525/230/37	1.0/1.0/1.0	6

表 A4 发电机参数

Table A4 Parameters of generator				
序号	发电机名称	节点类型	额定容量/MVA	额定有功/MW
1	TP01	PV	667	600
2	TP02	SLCAK	667	600
3	TP03	PV	1150	1000
4	TP04	PV	667	600
5	HP05	PV	1150	1000
6	HP06	PV	1150	1000
7	TP07	PV	667	600

表 A5 新能源参数

Table A5 Parameters of new energy resources			
序号	新能源机组名称	节点类型	额定容量/MVA
1	WT01-1	PQ	350
2	WT01-2	PQ	350
3	WT01-3	PQ	350
4	WT03-1	PQ	350
5	WT03-2	PQ	350
6	WT03-3	PQ	350
7	WT05-1	PQ	350
8	WT05-2	PQ	350



9	WT05-3	PQ	350
10	PV01-1	PQ	350
11	PV01-2	PQ	350
12	PV01-3	PQ	350
13	PV03-1	PQ	350
14	PV03-2	PQ	350
15	PV03-3	PQ	350
16	PV03-4	PQ	300
17	PV03-5	PQ	300
18	PV05-1	PQ	350
19	PV05-2	PQ	350
20	PV05-3	PQ	350

表 A6 高低频场景机组调速器参数

Table A6 Parameters of governor on high frequency scenario

发电机	机组类型	转速转差放大倍数	高压缸比例	再热器时间常数/s	PID 环节比例系数	PID 环节积分系数	水锤系数/s
TP01	火电	10	0.3	10	0.1	0.03	/
TP02	火电	10	0.3	10	0.1	0.03	/
TP03	火电	10	0.3	10	0.1	0.03	/
TP04	火电	10	0.3	10	0.1	0.03	/
HP05	水电	/	/	/	6.25	1.25	2.5
HP06	水电	/	/	/	6.25	1.25	2.5
TP07	火电	10	0.3	10	0.1	0.03	/

表 A7 超低频振荡场景机组调速器参数

Table A7 Parameters of governor on ultra-low frequency oscillation scenario

发电机	机组类型	PID 环节比例系数	PID 环节积分系数	水锤系数/s
HP01	水电	15	15	2.5
HP02	水电	15	15	2.5
HP03	水电	15	15	2.5
HP04	水电	15	15	2.5
HP05	水电	15	15	2.5
HP06	水电	15	15	2.5
HP07	水电	15	15	2.5