

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(1): 功角稳定 CSEE-RAS  
作者: 徐式蕴, 李宗翰, 赵兵, 孙华东  
DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.230534  
网络首发日期: 2023-08-31  
引用格式: 徐式蕴, 李宗翰, 赵兵, 孙华东. 新型电力系统标准算例(1): 功角稳定 CSEE-RAS[J/OL]. 中国电机工程学报.  
<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230534>



**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。

# 新型电力系统标准算例(1): 功角稳定 CEPRI-RAS

孙华东, 李宗翰, 徐式蕴, 赵兵

(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(1): Rotor Angle Stability CEPRI-RAS

SUN Huadong, LI Zonghan, XU Shiyun, ZHAO Bing

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

**ABSTRACT:** The stability characteristics of AC-DC hybrid power grids with high proportion of new energy have profound changes, and rotor angle stability remains a key issue that threatens the operation safety. Related studies have required higher demands on the authenticity, rationality and representativeness of benchmark test system. In this paper, the rotor angle stability benchmark test system aimed to utilize for electromagnetic transient simulation is constructed based on the practical topology and data by China Electric Power Research Institute(CEPRI-RAS). The main grid voltage level of aforementioned benchmark is 500kV and this benchmark includes 2 regions, 1 AC transmission channel and 1 DC transmission channel. Two basic operation modes are provided, corresponding to dynamic and transient rotor angle stability issue, respectively. The penetration level of new energy in the above operation modes is above 50%. To study the influence of different factors on the rotor angle stability level, the penetration of new energy, generator location and control strategy are used to obtain the quantitative analysis. Then, sensitivity analysis results show that this electromagnetic transient simulation benchmark is able to comprehensively reflects the characteristics of different rotor angle stability issues and has flexible extensibility. Sharing the benchmark test system can provide a basic platform for related research of rotor angle stability analysis and control, and contribute to the horizontal comparison of different conclusions and the improvement of research efficiency.

**KEY WORDS:** Rotor angle stability; new energy; AC/DC hybrid power grid; benchmark test system

**摘要:** 含高比例新能源交直流混联电网的稳定特性已发

基金项目: 国家自然科学基金项目 U21666601。

This paper is supported by National Natural Science Foundation of China under Grant U21666601.

生深刻变化, 功角稳定依然是威胁系统安全运行的关键问题, 相关研究对标准算例的真实性、合理性及代表性提出了更高的要求。本文根据实际电网拓扑和数据, 构建了适用于功角稳定特性研究的中国电科院功角稳定机电暂态仿真算例(China Electric Power Research Institute - Rotor Angle Stability, CEPRI-RAS), 该系统以 500kV 为主网架, 包含 2 个区域、1 个交流通道、1 个直流通道。提供了 2 种运行方式, 分别对应动态、暂态功角稳定场景, 上述场景新能源渗透率均在 50% 以上。考虑新能源渗透率、机组接入位置和控制策略等因素, 量化了不同因素对稳定水平的影响。敏感性分析结果表明, 该算例较为全面地反映了机电暂态尺度下的不同功角稳定特性, 且具有灵活的拓展能力, 可为功角稳定分析与控制的相关研究提供基础平台, 有助于不同结论的横向比较和研究人员科研效率的提升。

**关键词:** 功角稳定; 新能源; 交直流混联; 标准算例

## 0 引言

构建以新能源为主体的新型电力系统是实现“双碳”目标的重要举措<sup>[1-3]</sup>。随着新能源占比攀升, 系统转动惯量持续降低, 传统同步稳定将呈现新特性<sup>[4-6]</sup>。因此, 功角稳定问题仍需持续关切。

目前, 关于大规模新能源集中接入对功角稳定影响的研究, 已有学者开展探索并取得丰硕成果, 相关结论建立在自建算例<sup>[7-8]</sup>或改进算例<sup>[9]</sup>之上。文献[10]在扩展双机系统上总结风电对稳定水平影响的规律; 文献[11]分析了不同风电比例和直流控制方式下风火打捆交直流外送系统的暂态功角稳定特性, 探讨了风电、火电和直流系统间的交互作用; 文献[12]将 IEEE-9 节点系统的常规机组替换为光伏机组, 通过替换前后系统惯性变化定性分析新能源接入对功角稳定性的影响; 文献[13]基于风电替换常规电源后的 3 机系

统，揭示高比例新能源接入后功角稳定和电压稳定问题的演变现象及机理。

上述算例通过新增新能源或替换常规电源的方式体现电力电子设备动态特性与系统稳定特性的交互影响，在一定程度上满足了理论研究的需求<sup>[14-15]</sup>。然而，所用算例通常结合不同需求进行特殊设计，由此得到的结论局限于部分场景所暴露出的稳定问题，而不同结论之间也难以相互印证和总结归纳。此外，自建或改进算例中新能源的并网形式与实际电网存在差异，难以全面反映稳定特性及相关结论。

另有研究利用实际电网展开相关测试<sup>[16-18]</sup>。例如，文献[19]研究东北电网常规机组与风电机组对系统暂态稳定性的影响，并总结其内在规律性；文献[20]选取风火打捆经直流外送实际电网，验证了新能源控制参数优化方法的有效性；文献[21]探讨了青海电网不同地区风电装机容量对暂态功角稳定性的敏感性及其关键影响因素。上述实际算例侧重于理论结论的有效性验证，但因其拓扑结构复杂而难以开展机理分析与推导。

综上所述，当前缺乏适用于功角稳定研究的算例系统，此研究方向的理论分析对算例的需求极为迫切。在此背景下，为应对大规模新能源接入给电网功角稳定分析与控制带来的挑战，亟需构建广泛认可和贴近工程实际的测试算例。

本文根据实际电网拓扑和数据，构建了适用于功角稳定特性研究的机电暂态仿真算例 CEPRI-RAS，提供了 2 种新能源渗透率均为 50% 的基本运行方式，分别对应动态、暂态功角稳定场景。测试了新能源渗透率、机组接入位置、新能源低电压穿越策略等因素对稳定水平的敏感性，结果表明该算例能够较为全面地反映机电暂态尺度下大规模新能源接入对功角稳定水平的影响，算例具备良好的拓展能力，可为多种研究需求提供灵活的改进空间。作为功角稳定分析与控制研究的基础平台，CEPRI-RAS 对于不同结论的横向比较和科研效率的提升具有重要意义。

## 1 CEPRI-RAS 算例概况

### 1.1 系统概况

根据某区域实际电网拓扑和数据，搭建图 1 所示的两区域交直流混联电网 CEPRI-RAS，区域 A 为送端系统，区域 B 为受端系统，输电网架共有 68 个节点，如表 1 所示。

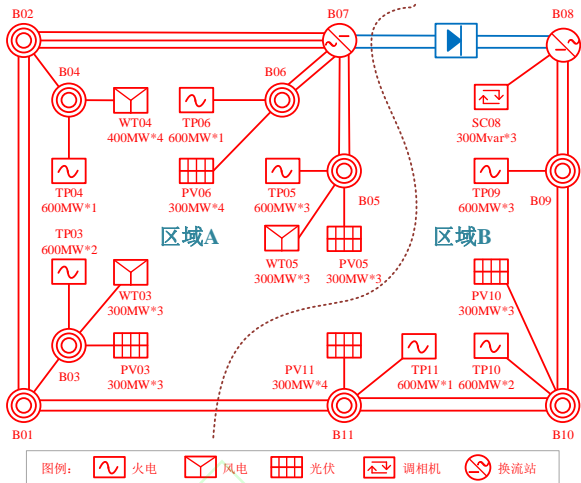


图 1 CEPRI-RAS 系统拓扑

Fig.1 System topology of CEPRI-RAS

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	11	交流主网架
220	16	变压器中/高压侧
210	2	直流整流侧
199	2	直流逆变侧
35	37	变压器低/高压侧
合计	68	/

### 1.2 拓扑与线路概况

两区域通过 1 回交流通道 BusA-1 至 BusB-1 及 1 回直流通道直接相连。系统共有交流线路 46 条，变压器 113 台，线路及变压器概况详见表 2，线路参数详见附录表 A1、表 A2 及表 A3。

表 2 线路及变压器概况

Tab.2 Overview of transmission lines and transformers

线路类型	数目	备注
交流联络线	46 条	500kV 19 条
		220kV 27 条
		300MVA 41 台
两绕组变压器	74 台	360MVA 16 台
		780MVA 13 台
		3000MVA 4 台
		容量/MVA 1000/1000/360
三绕组变压器	39 台	额定电压/kV ±500
		额定功率/MW 5000
直流线路	1 回	

### 1.3 电源概况

火电机组总装机 7800MW，其中区域 A 装机 4200MW，区域 B 装机 3600MW；风电、光伏 2 种新能源机组总装机 8100MW，其中区域 A 装机

6000MW，区域 B 装机 2100MW；新能源机组装机占比大于 50%；调相机总装机 900Mvar，均位于区域 B；系统装机概况如表 3 所示，火电机组参数、新能源机组参数、新能源控制策略及直流模型参数分别详见附录表 A4、表 A5、表 A6 及表 A7。另外，火电机组的励磁模型和 PSS 模型参数详见附录表 A8。

表 3 系统装机概况

Tab.3 Overview of system installed capacity

区域	接入母线	火电装机/MW	新能源装机/MW		调相机装机/Mvar
			风电	光伏	
送端 区域 A	B03	600*2	300*3	300*3	/
	B04	600*1	300*4	/	/
	B05	600*3	300*3	300*3	/
	B06	600*1	/	300*4	/
受端 区域 B	B08	/	/	/	300*3
	B09	600*3	/	/	/
	B10	600*2	/	300*3	/
	B11	600*1	/	300*4	/
	合计	/	7800	8100	900

1.4 负荷概况

全网总负荷 10537MW，其中区域 A 负荷 900MW，区域 B 负荷 9637MW，系统负荷概况详见表 4。区域 A 装机总量远大于区域负荷，是典型的资源丰富、大送出型电力系统。

表 4 系统负荷概况

Tab.4 Overview of system loads

区域	接入母线	有功负荷/MW	无功负荷/Mvar	负荷类型
送端 区域 A	B03	450	50	恒阻抗
	B04	450	50	
受端 区域 B	B09	4347	150	
	B10	3590	200	
	B11	1700	100	
合计	/	10537	550	/

2 动态功角稳定场景

动态功角稳定是指电力系统受到小扰动或大扰动后，在自动调节和控制装置的作用下，保持长过程功角稳定的能力。通过构建动态稳定场景反映高比例新能源接入对交直流混联电网动态功角稳定特性的影响。

2.1 场景构建

基本方式 DAS (Dynamic angle stability)：火电总出力 2272.63MW，其中区域 A 火电出力 1192.63MW，区域 B 火电出力 1080MW；风电、光伏 2 种新能源总出力 2300MW，均在区域 A，系统新能源渗透率为 50.30%，开机方式如表 5 所示；系统总负荷 4480MW，负荷分布如表 6 所示；直流通道外送功率 800MW；双回线交流通道 B01 至 B11 外送功率 2645.6MW。

表 5 动态稳定场景开机方式

Tab.5 Startup mode of dynamic stability scenario

区域	接入母线	火电/MW	台数	新能源/MW	台数
送端 区域 A	B03	400	1	500	2
	B04	400	1	500	2
	B05	/	/	800	3
	B06	392.63	1	500	2
	B09	480	2	/	/
受端 区域 B	B10	300	1	/	/
	B11	300	1	/	/
合计	/	2272.63	7	2300	9

表 6 动态稳定场景负荷分布

Tab.6 Load distribution of dynamic stability scenario

区域	接入母线	有功负荷/MW	无功负荷/Mvar	负荷类型
受端 区域 B	B09	3080	200	恒阻抗
	B10	1400	50	
合计	/	4480	250	/

故障描述：线路 B01 至 B11 在  $t=1.00s$  时发生三相永久性短路， $t=1.10s$  时故障线路切除，送、受端机组发生动态功角振荡（相对于受端机组 TP11-1）如图 2 所示。需要说明的是，本文新能源暂不设置高穿及过电压保护的相关参数。

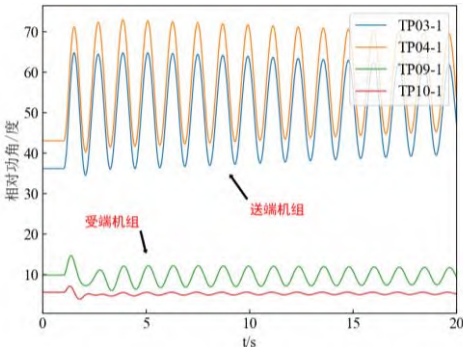


图 2 动态功角响应曲线

Fig.2 Response curve of rotor angle dynamic stability

阻尼比  $\zeta$  是衡量动态功角稳定性的关键指标。大扰动动态功角稳定一般利用 Prony 方法对时域仿真所得功角、功率等曲线进行拟合，获取



振荡模式的频率及阻尼比。阻尼比小于 0 为负阻尼，系统不能稳定运行；阻尼比介于 0~0.02 为弱阻尼；阻尼比介于 0.02~0.03 为较弱阻尼；阻尼比介于 0.03~0.05 为适宜阻尼；阻尼比大于 0.05 说明系统动态特性较好。安全稳定导则要求大扰动后系统动态过程的阻尼比不应小于 0.01<sup>[22]</sup>。

2.2 敏感性分析

含高比例新能源交直流混联系统的动态功角稳定水平与新能源渗透率、机组接入位置及新能源低电压穿越策略等因素联系紧密。为量化上述因素对稳定水平的影响，本文结合阻尼比指标，对基本方式 DAS 进行敏感性分析，以反映 CEPRI-RAS 系统的动态功角稳定特性。

2.2.1 新能源渗透率

在系统总出力、总负荷、机组接入位置、交直流通道功率均不变之前提下，通过火电与新能源的等量置换（置换量为 200MW），设置 2 种不同新能源渗透率的开机方式，具体如下：

方式 1：分别增加接入在 B03、B06 上的新能源各 100MW，同时降低接入在上述母线上的火电各 100MW；

方式 2：与方式 1 的调整方向相反，即分别增加 B03、B06 上的火电各 100MW，同时降低上述母线上的新能源各 100MW。

上述 2 种方式对应的稳定水平如表 7 所示，功角振荡曲线如图 3 所示。

表 7 不同新能源渗透率的阻尼比

Tab.7 Damping ratio of different penetration levels				
开机方式	火电/MW	新能源/MW	渗透率/%	阻尼比
基本方式 DAS	2272.63	2300	50.30	0.0040
方式 1	2074.79	2500	54.65	0.0272
方式 2	2470.93	2100	45.94	0.0014

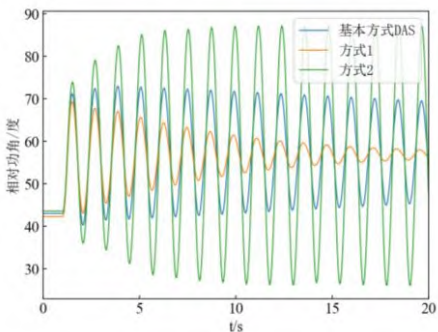


图 3 不同新能源渗透率的功角曲线

Fig.3 Rotor angle of different penetration levels

由表 7 及图 3 可知，当新能源（全部位于送端区域 A）渗透率由 50.30% 升至 54.65% 时，一方面，新能源出力增大，交流通道有功在新能源低穿结束后的恢复速率降低，另一方面，送端火电出力减少，其励磁系统呈现的负阻尼作用减弱，使得阻尼比由 0.0040 升至 0.0272，动态稳定水平提高；反之，当渗透率降至 45.94% 时，送端火电励磁系统呈现的负阻尼作用增强，阻尼比降至 0.0014，动态稳定水平降低。

2.2.2 火电机组接入位置

在系统总出力、总负荷、新能源渗透率、交直流通道功率均不变的前提下，通过改变送、受端火电机组的接入位置，设置 3 种不同开机方式如表 8 所示，稳定水平如表 9 所示。

表 8 不同火电机组接入位置的开机方式

Tab.8 Startup mode of different generator locations						
接入母线	方式 3 出力/MW		方式 4 出力/MW		方式 5 出力/MW	
	火电	新能源	火电	新能源	火电	新能源
B03	789.54	500	/	500	400	500
B04	400	500	400	500	400	500
B05	/	800	/	800	/	800
B06	/	500	797.46	500	394.69	500
B09	480	/	480	/	240	/
B10	300	/	300	/	300	/
B11	300	/	300	/	540	/

表 9 不同火电机组接入位置的阻尼比

Tab.9 Damping ratio of different generator locations				
开机方式	送端出力/MW		受端出力/MW	
	火电	新能源	火电	新能源
基本方式 DAS	1192.63			
方式 3	1189.54	2300	1080	
方式 4	1197.46			
方式 5	1194.69			

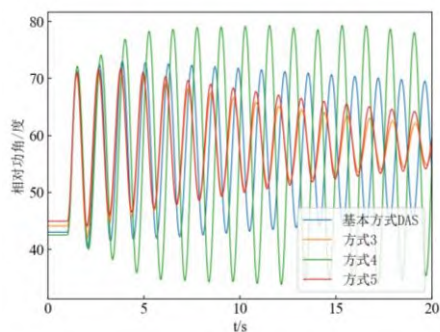


图 4 不同机组接入位置的功角曲线

Fig.4 Rotor angle of different generator locations

结合表 9 和图 4 可知，在交流通道附近增开火电，可有效提升输电通道的电压支撑能力，加强送、受端的电气联系；反之，互联系统联系减弱，动态稳定性降低。通道送、受端增开火电如方式 3、5，阻尼比分别升至 0.0154、0.0116，功角振幅显著减弱，动态稳定水平提高；通道送端关停火电如方式 4，阻尼比降至 0.0005，功角振幅增大，动态稳定水平降低。

2.2.3 线路串联补偿

在系统总出力、总负荷、新能源渗透率、交直流通道功率均不变之前提下，通过改变交流通道的线路串联补偿，设置 2 种不同运行方式，分析其对动态功角稳定性的影响，稳定水平如表 10 所示，功角振荡曲线如图 5 所示。

表 10 不同线路参数的阻尼比

Tab.10 Damping ratio of different line parameters

运行方式	线路电抗/pu	通道有功/MW	阻尼比
基本方式 DAS	0.0166	2645.6	0.0040
方式 6	0.0126	2644.8	0.0314
方式 7	0.0206	2646.8	0.0004

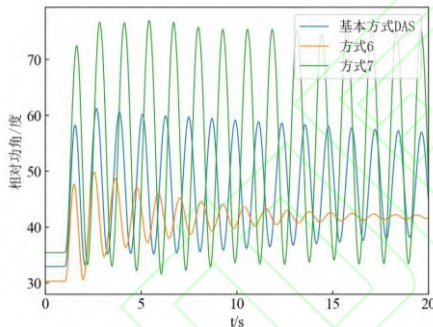


图 5 不同线路参数的功角曲线

Fig5 Rotor angle of different line parameters

结合表 10 和图 5 可知，减小线路电抗如方式 6，缩短交流通道电气距离，可增强送、受端系统电气联系，阻尼比升至 0.0314，功角曲线振荡收敛；反之，增加电抗如方式 7，互联系统电气联系减弱，阻尼比降至 0.0004，功角曲线近似等幅振荡。上述分析表明针对交流通道采取串联补偿措施，可有效抑制功角振荡，提升动态稳定水平。

2.2.4 新能源低电压穿越控制策略

为分析新能源低电压穿越期间的有功电流水平（占初始电流的百分比）对动态功角稳定水平的影响，在系统总出力、总负荷、新能源渗透率、机组接入位置、交直流通道功率均不变的前提下，

设置 2 种不同控制策略，稳定水平如表 11 所示，功角振荡曲线如图 6 所示。

表 11 不同有功电流水平的阻尼比

Tab.11 Damping ratio of different active current levels

控制策略	有功电流水平/%	阻尼比
初始策略	50	0.0040
策略 1	20	0.0049
策略 2	80	0.0038

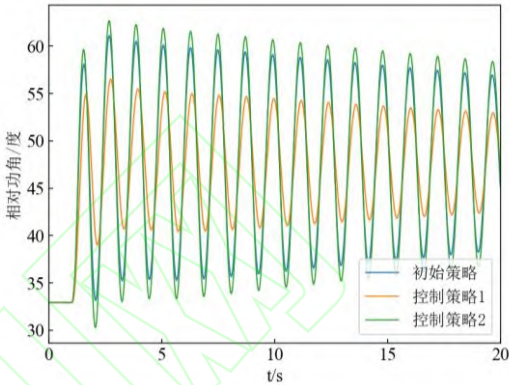


图 6 不同有功电流水平的功角曲线

Fig.6 Rotor angle of different active current levels

结合策略 1、2 可知，当有功电流水平由 50% 降至 20% 时，减少了新能源低穿期间发出的有功功率，降低了长链式交流通道的有功压力及送端机组的加速度，使得功角振幅减弱，阻尼比升至 0.0049，动态稳定水平提高；而当该参数升至 80% 时，提升了低穿期间新能源有功水平，增大了交流通道有功压力及送端机组加速度，此时功角振幅增大，阻尼比降至 0.0038，动态稳定水平降低。

3 暂态功角稳定场景

暂态功角稳定是指电力系统受到大扰动后，各同步发电机保持同步运行并过渡到新的或恢复到原来稳态运行方式的能力。通过构建暂态稳定场景反映高比例新能源接入对交直流混联电网暂态功角稳定特性的影响。

3.1 场景构建

基本方式 TAS (Transient angle stability)：在前文所述动态功角稳定场景基础上，分别增开 6 台火电和 14 台新能源机组以加重潮流水平，此时火电总出力 5373.84MW，其中区域 A 火电 3273.84MW，区域 B 火电 2100MW，并装有 3 台 300Mvar 调相机；风电、光伏 2 种新能源总出力 5390MW，区域 A 新能源 3890MW，区域 B 新能源 1500MW；新能源渗透率为 50.08%，开机方式如表 12 所示；系统总负荷 10537MW，负荷分布

同表 4；直流通道外送功率 3000MW；双回线交流通道 B01 至 B11 外送功率 3200MW。另外，通过改变 PSS 参数增强正阻尼以抑制动态功角振荡特性，进而凸显该场景的暂态功角稳定特性。

表 12 暂态稳定场景开机方式

Tab.12 Startup mode of transient stability scenario

区域	接入母线	火电 /MW	台数	新能源 /MW	台数	调相机 /Mvar	台数
送端区域 A	B03	1200	2	1230	5	/	/
	B04	500	1	800	4	/	/
	B05	1200	3	960	4	/	/
	B06	373.84	1	900	3	/	/
受端区域 B	B08	/	/	/	/	900	3
	B09	900	3	/	/	/	/
	B10	900	2	600	3	/	/
	B11	300	1	900	4	/	/
	合计	/	5373.84	13	5390	23	900

故障描述：线路 B01 至 B11 在  $t=1.00\text{s}$  时发生三相永久性短路， $t=1.16\text{s}$  时故障线路切除，送、受端机组呈现暂态功角失步（相对于受端机组 TP11-1）如图 7 所示。值得指出， $t=1.10\text{s}$  时故障线路切除，系统暂态功角稳定，此时满足安全稳定导则中“当任一回 500kV 交流联络线故障断开不重合（近故障点 0.09s 后切除，远故障点 0.10s 后切除）时，系统保持稳定运行和电网正常供电”这一要求，符合实际电网的第一级安全稳定标准。

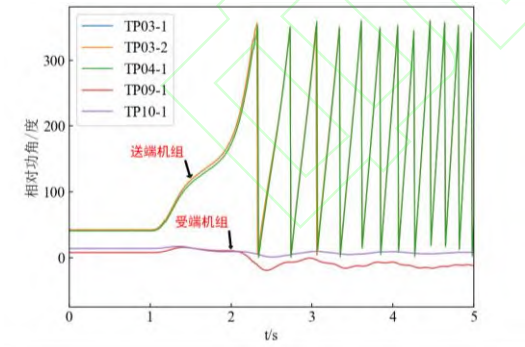


图 7 暂态功角响应曲线

**Fig.7 Response curve of rotor angle transient stability**  
故障冲击导致送、受端机组产生不平衡功率，驱动机组功角持续正向摆开以释放加速能量，恶化了暂态功角稳定态势；故障线路的切除使得其承载的有功功率转移至非故障线路，加剧了剩余通道功率传输压力，迫使通道两端相位差增大，电压支撑能力下降，进而削弱了剩余通道的输电能力，促使系统稳定水平持续恶化，最终导致暂态功角失稳。

3.2 敏感性分析

在高比例新能源交直流混联系统中，新能源渗透率、机组接入位置、低穿控制策略、直流控制策略等因素是系统稳定水平的关键约束，上述因素对功角摇摆特性的影响亦不可忽视。本文选用极限切除时间（critical clearing time, CCT）作为暂态稳定裕度指标，通过敏感性分析量化不同因素对系统稳定水平的影响，从而反映 CEPRI-RAS 系统的暂态功角稳定特性。

3.2.1 新能源渗透率

在系统总出力、总负荷、机组接入位置、交直流通道功率均不变之前提下，通过火电与新能源等量置换（置换量为 600MW），设置 4 种不同渗透率的开机方式，得到稳定水平如表 13 所示。

表 13 不同新能源渗透率的 CCT

Tab.13 CCT of different penetration levels				
开机方式	送端新能源 /MW	受端新能源 /MW	新能源渗透率 /%	CCT /s
基本方式 TAS	3890	1500	50.08	0.156
方式 1	4490	1500	55.62	0.200
方式 2	3290	1500	44.51	0.131
方式 3	3890	2100	55.67	0.133
方式 4	3890	900	44.46	0.190

由表 13 可知，增开送端或关停受端新能源均有助于提升功角稳定水平如方式 1、4；反之，关停送端或增开受端新能源将减小稳定裕度如方式 2、3。通过对比方式 1、3 的 CCT 可知，在送、受端分别增开新能源以提升整体渗透率的两种方式下，暂态稳定性能的提升效果截然相反，故仅凭新能源渗透率这一指标进行性能评判是绝对且片面的，需具体考察送、受端新能源的开机方式。

3.2.2 火电/新能源机组接入位置

在系统总出力、总负荷、新能源渗透率、交直流通道功率均不变之前提下，通过改变送、受端机组的接入位置，设置 3 种不同开机方式如表 14 所示，稳定水平如表 15 所示。

表 14 不同机组接入位置的开机方式

Tab.14 Startup mode of different generator locations						
接入母线	方式 5 出力/MW		方式 6 出力/MW		方式 7 出力/MW	
	火电	新能源	火电	新能源	火电	新能源
B03	1200	750	600	1500	1600	610
B04	1095	400	200	1490	1600	400
B05	1800	645	600	1200	1800	480
B06	366.82	900	375.81	1200	390.15	300



B09	450	0	1800	/	/	1200
B10	300	1495	1200	/	/	1200
B11	155	1200	600	/	/	1200

表 15 不同机组接入位置的 CCT

Tab.15 CCT of different generator locations

开机方式	送端出力/MW		受端出力/MW		CCT /s
	火电	新能源	火电	新能源	
基本方式 TAS	3273.84	3890	2100	1500	0.156
方式 5	4461.82	2695	905	2695	0.100
方式 6	1775.81	5390	3600	/	0.400
方式 7	5390.15	1790	/	3600	0.002

由表 15 可知,维持新能源渗透率 50.08% (对应新能源总出力 5390MW) 不变,送端新能源出力越多,暂态功角稳定水平越高;反之,稳定水平越低。火电/新能源机组的接入位置不同,对应开机方式下的 CCT 差别较大,表明机组接入位置是影响该系统暂态功角稳定性的重要因素。

### 3.2.3 系统潮流水平

在机组接入位置、新能源渗透率、直流通道功率均不变之前提下,设置 2 种不同潮流水平的运行方式,得到稳定裕度如表 16 所示。当总出力及总负荷降低 5% 时, CCT 提升至 0.180s, 暂态功角稳定裕度提高;反之,总出力及总负荷提高 5% 时, CCT 降低至 0.120s, 稳定裕度降低。

表 16 不同潮流水平的 CCT

Tab.16 CCT of different power flow levels

运行方式	火电出力/MW	新能源出力/MW	交流通道有功/MW	CCT /s
基本方式 TAS	5373.84	5390.0	3188.6	0.156
方式 8	5099.15	5120.5	2876.2	0.180
方式 9	5650.32	5659.5	3502.6	0.120

### 3.2.4 新能源低电压穿越控制策略

在系统总出力、总负荷、机组接入位置、新能源渗透率、交直流通道功率均不变之前提下,设置 4 种不同的新能源低穿控制策略,得到稳定水平如表 17 所示。

表 17 不同有功电流水平的 CCT

Tab.17 CCT of different active current levels

控制策略	送端有功电流水平/%	受端有功电流水平/%	CCT /s
初始策略	50	50	0.156
策略 1	20	50	0.199
策略 2	80	50	0.127
策略 3	50	20	0.138
策略 4	50	80	0.184

由表 17 可知,送端新能源的有功电流水平越高,送端火电的不平衡功率越大,暂态功角稳定裕度越小如策略 1、2;受端新能源的有功电流水平越高,受端有功支撑能力越强,稳定裕度越大如策略 3、4。

### 3.2.5 直流低压限流控制策略

在系统总出力、总负荷、机组接入位置、新能源渗透率、交直流通道功率均不变之前提下,通过改变直流低压限流环节 (voltage department current order limiter, VDCOL) 参数,设置不同控制策略,得到稳定水平如表 18 所示。其中  $I_{omin}$ 、 $U_{dlow}$ 、 $U_{dhigh}$  分别为直流电流指令最小值、VDCOL 启动电压阈值、VDCOL 退出电压阈值,实际工程中  $I_{omin}$  一般设置为 0.10pu。

表 18 不同直流 VDCOL 控制参数的 CCT

Tab.18 CCT of different VDCOL control parameters

在 $U_{dlow}=0.30pu$ 条件下		在 $U_{dhigh}=0.80pu$ 条件下	
$U_{dhigh}/pu$	CCT/s	$U_{dlow}/pu$	CCT/s
0.60	0.167	0.15	0.161
0.70	0.165	0.30	0.156
0.80	0.156	0.45	0.151

由表 18 可知,当  $U_{dlow}$  或  $U_{dhigh}$  降低时,可增大相同直流电压下的直流电流指令限值,加快故障恢复期间直流有功的恢复速率,进而缓解交流通道的有功阻塞,暂态功角稳定裕度提高;反之,当  $U_{dlow}$  或  $U_{dhigh}$  提高时,相同直流电压下的直流电流指令限值减小,直流有功的恢复速率减缓,稳定裕度降低。

## 4 结论

本文针对含高比例新能源交直流混联电网功角稳定分析与控制研究的算例需求,公开了一套兼顾工程实际性与理论科学性的机电暂态仿真标准算例 CEPRI-RAS,取得相关结论如下:

1) 依据实际电网拓扑和数据,搭建了未经等效处理的典型算例,形成了复合能源基地经交直流联合外送的系统格局,体现了算例的真实性、合理性以及代表性,适应未来电网发展趋势;

2) 所建算例的新能源装机占比在 50% 以上,依据算例结构,通过调整运行方式形成了动态、暂态功角稳定场景,且新能源渗透率均在 50% 以上,符合高比例新能源电力系统的主要特征。

3) 测试了新能源渗透率、机组接入位置、新能源及直流控制策略等因素对功角稳定水平的敏



感性,较为全面地展示了大规模新能源接入对动态、暂态功角稳定特性的影响;

4)具备了充足的拓展空间,便于研究人员灵活调整新能源渗透率、新能源及直流的模型及控制策略,满足新型电力系统不同功角稳定特性的研究需求,为研究结论的相互印证和总结归纳奠定了平台基础。

本算例全部数据及相关模型向社会公众公开,可通过 Github 网站或《CSEE Journal of Power and Energy Systems》、《中国电机工程学报》、《电网技术》的官网及微信公众号等平台下载,欢迎业界同仁测试使用,衷心期待以电子邮件或信函方式反馈意见和建议。

## 参考文献

- [1] 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. Definition and classification of power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7809(in Chinese).
- [2] 辛保安,陈梅,赵鹏,等.碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究[J].中国电机工程学报,2022,42(19): 6919-6931.  
XIN Baoan, Chen Mei, Zhao Peng, et al. Research on Coal Power Generation Reduction Path Considering Power Supply Adequacy Constraints Under Carbon Neutrality Target in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6919-6931.
- [3] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7): 1893-1904+2205.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [4] 国网能源研究院有限公司.中国能源电力发展展望(2021)[M].北京:中国电力出版社,2021.  
State Grid Energy Research Institute Co., Ltd. China energy & electricity outlook-2021[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021(in Chinese).
- [5] 崔晓丹,吴家龙,雷鸣,等.新能源高占比电力系统的连锁故障诱因及事故链搜索技术探讨[J].电力自动化设备,2021,41(7): 135-143.  
CUI Xiaodan, WU Jialong, LEI Ming, et al. Discussion on inducement and fault chain search technology of cascading failure in power system with high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 135-143.
- [6] H-D. Chiang, L. F. C. Alberto, Stability Regions of Nonlinear Dynamical Systems: Theory, Estimation, and Applications, Cambridge University Press[M]. Cambridge University Press, 2015.
- [7] Ye Z, Xiaofang S, Zaiwei Z, et al. Transient power angle stability analysis of emergency wind turbine tripping[C]//International Conference on Renewable Power Generation. Beijing: RPG, 2015: 1-6.
- [8] Wu L, Wang Z, Wang X, et al. Impact of high-proportion wind power integration on power angle stability of power system[C]//The 10th Renewable Power Generation Conference (RPG 2021). Online Conference, 2021: 52-58.
- [9] 石立宝,戴世强,徐政.大规模双馈型风电场并网的系统暂态稳定仿真[J].电力系统及其自动化学报,2009,21(4): 1-7.  
SHI Libao, DAI Shiqiang, XU Zheng. Transient stability simulation with large scale grid-connected wind farms of DFIG type[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(4): 1-7(in Chinese).
- [10] 汤蕾,沈沉,张雪敏.大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二):影响因素分析[J].中国电机工程学报,2015,35(16): 4043-4051.  
TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems—part II: factors affecting transient angle stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4043-4051(in Chinese).
- [11] 郭小江,赵丽莉,汤奕,等.风火打捆交直流外送系统功角暂态稳定研究[J].中国电机工程学报.2013,33(22): 19-25+6.  
GUO Xiaojiang, ZHAO Lili, TANG Yi, et al. Study on angle transient stability for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 19-25+6(in Chinese).
- [12] Jhumka A A, Ah King R T F and Ramasawmy C. Rotor angle and inertia analysis in presence of renewable energy Source[C]//Arusha Tanzania United Republic of 2021. 2021 AFRICON: IEEE, 2021: 1-6.
- [13] 毛安家,马静,蒯圣宇,等.高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J].中国电机工程学报,2020,40(9): 2745-2756.  
MAO Anjia, MA Jing, KUAI Shengyu, et al. Evolution

- mechanism of transient and voltage stability for power system with high renewable penetration level[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2745-2756(in Chinese).
- [14] 魏孝卿, 唐飞, 张童彦, 等. 高比例风电接入场景下失稳预判与关键支路初筛方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6740-6752.
- WEI Xiaoqing, TANG Fei, ZHANG Tongyan, et al. Study on instability prediction and key branch screening method in high proportion wind power access scenario[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6740-6752.
- [15] 刘信彤, 辛业春, 王长江, 等. 基于 Smo-PinSVM 的含新能源电力系统暂态稳定评估[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 98-104.
- Liu Xintong, Xin Yechun, Wang Changjiang, et al. Transient stability assessment in bulk power grid with renewable energy using Smo-PinSVM[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(5): 98-104.
- [16] Hossain M J, Pota H R, Mahmud M A, et al. Investigation of the impacts of large-scale wind power penetration on the angle and voltage stability of power systems[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1): 76-84.
- [17] Mchouachi, Abbas M, Chebbi S. Wind power penetration limit in large power system based on transient stability analysis[C]// 2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). Yasmine Hammamet, Tunisia, 2018: 1-6.
- [18] 刘岱, 庞松岭. 风电集中接入对电网影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 156-160.
- LIU Dai, PANG Songling. System impacts analysis for interconnection of wind farm and power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2011, 23(3): 156-160.
- [19] 张明理, 徐建源, 李佳珏. 含高渗透率风电的送端系统电网暂态稳定研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 740-745.
- ZHANG Mingli, XU Jianyuan, LI Jiayu. Research on transient stability of sending power grid containing high proportion of wind power[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 740-745(in Chinese).
- [20] 林伟芳, 任晓钰, 张桂红, 等. 考虑功角稳定和暂态过电压的新能源电压穿越控制参数优化[J/OL]. 电网技术: 1-9.
- LIN Weifang, REN Xiaoyu, ZHANG Guihong, et al. Optimization of new energy voltage crossing control parameters considering power Angle stability and transient overvoltage[J/OL]. Power System Technology: 1-9(in Chinese).
- [21] Huang T. Typical influence of wind power capacity expansion on the transient angle stability and feasible explanations[C]// 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Chengdu, China, 2020: 1052-1057.
- [22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB38755—2019 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 38755—2019 Code on security and stability for power system[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019(in Chinese).



徐式蕴

作者简介:

徐式蕴(1985), 女, 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, E-mail: xushiyun@epri.sgcc.com.cn;

李宗翰(1993), 男, 博士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制、人工智能在电力系统的应用, E-mail: lizonghan@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, E-mail: zhaobing@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, E-mail: sunhd@epri.sgcc.com.cn。

附录

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	电纳/pu	基准电压/kV	并列回路
1	B02	B01	0.0002	0.0067	0.3926	525	2
2	B03	B01	/	0.0001	/	525	1
3	B04	B02	/	0.0001	/	525	1
4	B05	B07	0.00089	0.02012	1.164	525	2
5	B06	B07	0.00023	0.0043	0.262	525	2
6	B07	B02	0.00013	0.00252	0.1643	525	3
7	B08	B09	0.00014	0.00197	0.10984	525	2
8	B09	B10	0.00014	0.00197	0.30984	525	2
9	B11	B10	0.00025	0.00921	0.5379	525	2
10	B11	B01	0.00045	0.0166	0.9682	525	2
11	B14	B15	0.00186	0.1307	0.2412	230	6
12	B16	B17	0.00186	0.1307	0.2412	230	4
13	B18	B19	0.00186	0.1307	0.2412	230	6
14	B20	B21	0.00186	0.1307	0.2412	230	4
15	B24	B25	0.00186	0.1307	0.2412	230	3
16	B26	B27	0.00186	0.1307	0.2412	230	4

表 A2 两绕组变压器参数

Table.A2 Parameters of two winding transformer							
序号	首端节点	末端节点	漏抗/pu	额定容量/MVA	基准电压/kV	变压器变比	台数
1	B07	DP01	0.006	3000	525/210	1	1
2	B07	DN01	0.006	3000	525/210	1	1
3	B08	DP02	0.006	3000	525/199	1	1
4	B08	DN02	0.006	3000	525/199	1	1
5	B08	SC08-1	0.023	360	525/20	1	1
6	B08	SC08-2	0.023	360	525/20	1	1
7	B08	SC08-3	0.023	360	525/20	1	1
8	B14	B30	0.035	300	230/37	1	6
9	B16	B37	0.035	300	230/37	1	4
10	B18	B42	0.035	300	230/37	1	6
11	B20	B49	0.035	300	230/37	1	4
12	B24	B56	0.035	300	230/37	1	3
13	B26	B60	0.035	300	230/37	1	4
14	WT03-1	B30	0.02167	300	0.69/37	1	1
15	WT03-2	B31	0.02167	300	0.69/37	1	1
16	WT03-3	B32	0.02167	300	0.69/37	1	1
17	PV03-1	B33	0.01806	360	0.4/37	1	1
18	PV03-2	B34	0.01806	360	0.4/37	1	1
19	PV03-3	B35	0.01806	360	0.4/37	1	1



20	WT04-1	B37	0.02167	300	0.69/37	1	1
21	WT04-2	B38	0.02167	300	0.69/37	1	1
22	WT04-3	B39	0.02167	300	0.69/37	1	1
23	WT04-4	B40	0.02167	300	0.69/37	1	1
24	WT05-1	B42	0.02167	300	0.69/37	1	1
25	WT05-2	B43	0.02167	300	0.69/37	1	1
26	WT05-3	B44	0.02167	300	0.69/37	1	1
27	PV05-1	B45	0.2167	360	0.4/37	1	1
28	PV05-2	B46	0.2167	360	0.4/37	1	1
29	PV05-3	B47	0.2167	360	0.4/37	1	1
30	PV06-1	B49	0.01806	360	0.4/37	1	1
31	PV06-2	B50	0.01806	360	0.4/37	1	1
32	PV06-3	B51	0.01806	360	0.4/37	1	1
33	PV06-4	B52	0.01806	360	0.4/37	1	1
34	PV10-1	B56	0.01806	360	0.4/37	1	1
35	PV10-2	B57	0.01806	360	0.4/37	1	1
36	PV10-3	B58	0.01806	360	0.4/37	1	1
37	PV11-1	B60	0.01806	360	0.4/37	1	1
38	PV11-2	B61	0.01806	360	0.4/37	1	1
39	PV11-3	B62	0.01806	360	0.4/37	1	1
40	PV11-4	B63	0.01806	360	0.4/37	1	1
41	TP03-1	B03	0.02264	780	20/525	1	1
42	TP03-2	B03	0.02264	780	20/525	1	1
43	TP04-1	B04	0.02264	780	20/525	1	1
44	TP05-1	B05	0.02264	780	20/525	1	1
45	TP05-2	B05	0.02264	780	20/525	1	1
46	TP05-3	B05	0.02264	780	20/525	1	1
47	TP06-1	B06	0.02264	780	20/525	1	1
48	TP09-1	B09	0.02264	780	20/525	1	1
49	TP09-2	B09	0.02264	780	20/525	1	1
50	TP09-3	B09	0.02264	780	20/525	1	1
51	TP10-1	B10	0.02264	780	20/525	1	1
52	TP10-2	B10	0.02264	780	20/525	1	1
53	TP11-1	B11	0.02264	780	20/525	1	1

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
1	T3-01	0.02143	-0.0021	0.04093	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
2	T3-02	0.02143	-0.0021	0.04093	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
3	T3-03	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
4	T3-04	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0

5	T3-05	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
6	T3-06	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
7	T3-07	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
8	T3-08	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
9	T3-09	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
10	T3-10	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
11	T3-11	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
12	T3-12	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
13	T3-13	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
14	T3-14	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
15	T3-15	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
16	T3-16	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
17	T3-17	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
18	T3-18	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
19	T3-19	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
20	T3-20	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
21	T3-21	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
22	T3-22	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
23	T3-23	0.02143	-0.0021	0.04093	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
24	T3-24	0.02143	-0.0021	0.04093	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
25	T3-25	0.02143	-0.0021	0.04093	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
26	T3-26	0.02143	-0.0021	0.04093	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
27	T3-27	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
28	T3-28	0.02143	-0.0021	0.04093	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
29	T3-29	0.02143	-0.0021	0.04093	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
30	T3-30	0.02143	-0.0021	0.04093	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
31	T3-31	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
32	T3-32	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
33	T3-33	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
34	T3-34	0.02143	-0.0021	0.04093	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
35	T3-35	0.02143	-0.0021	0.04093	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
36	T3-36	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
37	T3-37	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
38	T3-38	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0
39	T3-39	0.0157	-0.00158	0.02668	1000/1000/360	525/230/37	1.0/1.0/1.0

表 A4 火电机组参数

Table.A4 Parameters of thermal plants

序号	发电机名称	节点类型	额定容量/MVA	额定有功/MW
1	SC08-1	PV	300	/
2	SC08-2	PV	300	/
3	SC08-3	PV	300	/

4	TP03-1	PV	667	600
5	TP03-2	PV	667	600
6	TP04-1	PV	667	600
7	TP05-1	PV	667	600
8	TP05-2	PV	667	600
9	TP05-3	PV	667	600
10	TP06-1	Slack	667	600
11	TP09-1	PV	667	600
12	TP10-1	PV	667	600
13	TP10-2	PV	667	600
14	TP11-1	PV	667	600
15	TP11-2	PV	667	600
16	TP11-3	PV	667	600

表 A5 新能源参数

Table.A5 Parameters of new energy

序号	新能源机组名称	节点类型	额定容量/MVA
1	WT03-1	PQ	320
2	WT03-2	PQ	320
3	WT03-3	PQ	320
4	WT04-1	PQ	320
5	WT04-2	PQ	320
6	WT04-3	PQ	320
7	WT04-4	PQ	320
8	WT05-1	PQ	320
9	WT05-2	PQ	320
10	WT05-3	PQ	320
11	PV03-1	PQ	315
12	PV03-2	PQ	315
13	PV03-3	PQ	315
14	PV05-1	PQ	315
15	PV05-2	PQ	315
16	PV05-3	PQ	315
17	PV06-1	PQ	315
18	PV06-2	PQ	315
19	PV06-3	PQ	315
20	PV06-4	PQ	315
21	PV10-1	PQ	315
22	PV10-2	PQ	315
23	PV10-3	PQ	315
24	PV11-1	PQ	315
25	PV11-2	PQ	315



26	PV11-3	PQ	315
27	PV11-4	PQ	315

表 A6 新能源控制策略

Table.A6 Control strategy of new energy

类别	名称	参数
低电压穿越	进入低穿电压阈值	0.90 pu
状态判断	退出低穿电压阈值	0.90 pu
低穿期间的 功率控制	有功控制方式	指定电流百分比
		有功电流控制值 50%
	无功控制方式	电压控制无功电流
		无功调整系数 1.50
低穿结束后	有功爬坡方式	按照指定斜率 4.5MW/s
功率控制	无功恢复方式	立即恢复初始状态

表 A7 直流模型参数

Table.A7 Parameters of DC model

名称	参数
最大触发角控制增益 G_max	0.15
最大触发角控制时间常数 T_amax/ s	0.012
定电压控制比例增益 Kp_vca	10
定电流控制总增益	30
整流侧最小触发角控制电压阈值/ °	30
最小触发角控制角度下降速率/ %/s	0.37
VDCOL 启动电压阈值 U_dlow/ pu	0.30
VDCOL 退出电压阈值 U_dhigh/ pu	0.80
VDCOL 最小电流指令阈值 I_omin/ pu	0.10

表 A8 励磁模型和 PSS 模型参数

Table.A8 Parameters of excitation model and PSS model

励磁模型		PSS 模型	
名称	参数	名称	参数
励磁方式	自并励	PSS 类型	双输入型 PSS
调节器增益 K/ pu	500.00	KR	1.00
T1	1.00	KS	1.00
T2	8.33	KP	1.00
T3	0.10	T1	0.21
T4	0.10	T2	0.03
调压器增益 KA/ pu	1.00	T3	0.30
VRmax	7.88	T4	0.03
VRmin	-5.70	VSmax	0.10
/	/	VSmin	-0.10