

“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨

谢小荣¹, 贺静波², 毛航银³, 李浩志¹

(1. 电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;
2. 国家电力调度控制中心, 北京市 西城区 100031; 3. 国网浙江省电力有限公司, 浙江省 杭州市 310007)

New Issues and Classification of Power System Stability With High Shares of Renewables and Power Electronics

XIE Xiaorong¹, HE Jingbo², MAO Hangyin³, LI Haozhi¹

(1. State Key lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 2. National Power Dispatching and Control Center, Xicheng District, Beijing 100031, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Driven by energy transition and technological progress, power system industry is undergoing a rapid development with an important trend or key feature, i.e., high penetration of renewable energy plus high penetration of power electronic equipment (namely, “double high”), which, however, brings significant changes to the dynamic behavior of the system and causes new issues of stability. In this paper, the new features of “double high” power systems were summarized first. Next, their impacts on the various aspects of classical power system stability were briefly reviewed. Then, we surveyed the emerging stability issues in the context of “double high”. After an examination of applicability of the classical and extended classification of power system stability by IEEE/Cigre, a new classification framework was finally proposed to get with the new scenario of “double high”, while maintaining the classical logic of classification. Hopefully, this work helps to promote the researches on modeling, analysis and control of the stability of “double high” power systems.

KEY WORDS: renewable energy; power electronics; power system stability; classification

摘要: 在能源转型和科技进步的推动下, 高比例可再生能源和高比例电力电子设备(即“双高”)正成为电力系统发展的重要趋势和关键特征, 电力系统的动态行为随之发生重大变化, 产生了新的稳定性问题。该文从分析“双高”电力系统的特点出发, 先概述“双高”对经典稳定性各个侧面的影响, 然后简要归纳“双高”背景下的新型稳定性问题, 进一步探讨 IEEE 经典和扩展稳定性分类的适用性, 最后尝试提出一种新的分类方法和框架, 在维持经典分类逻辑的同时, 兼容

新的“双高”场景, 希望有利于推动“双高”电力系统稳定性建模、分析与控制研究。

关键词: 可再生能源; 电力电子; 电力系统稳定性; 分类

0 引言

进入 21 世纪以来, 电能需求的增长、环保压力的增大和科技进步的推动, 使得可再生能源和电力电子设备在电力系统的应用取得长足发展^[1]。世界范围内, 以风电、光伏为代表的新型可再生能源发电(不含水电, 下同)装机容量从 20 年前的 18.55GW, 增长约 77.5 倍, 达到 2019 年的 1437GW^[2](我国对应数据为 1999 年容量 344MW^[3]、增长 1203 倍、2019 年容量 414GW^[4]), 其占发电总装机容量的比例达到约 35%(我国约为 20.6%, 青海、宁夏等局部地区超 40%^[5])。全球 2014 年(我国 2016 年)开始, 新增电源中风电、光伏已超过传统的化石能源^[6], 成为满足日益增长的电力需求的主力军。绝大多数可再生能源通过电力电子接口并网, 推动了电力电子设备在电源侧的广泛应用。分别于 20 世纪 80 年代末和 21 世纪初兴起的柔性交流输电和柔性直流输电技术, 以及持续推广的超/特高压常规直流输电技术, 同时推动电力电子设备在输电系统中的占比不断上升。至 2019 年底, 我国常规和柔性直流输电规模超过 200GW^[7], 并仍在高速增长。配电侧, 基于电力电子技术的分布式发电、直流配网和微电网技术蓬勃发展。用电侧, 变频传动/调速、电能质量控制器和快速发展的电动汽车等新型负荷也大多采用电力电子接口; 保守估

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(SGZJ0000KXJS1900418)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (SGZJ0000KXJS1900418).

计,目前变频设备的容量已超过 40GW^[8]。美国电科院(EPRI)报告认为“21 世纪是电力电子技术应用的黄金时代,其作用将与计算、通信和信息技术一样重要”^[9]。总而言之,随着风、光等新能源发电的迅猛发展和源-网-荷核心设备的“电力电子化”变革^[10],电力系统正形成“高比例可再生能源”和“高比例电力电子设备”的“双高”发展趋势。预计到 2030 年,世界风电、光伏装机将达 3.8TW^[11-12](我国 2TW^[13-14]),占比超过 50%,煤电、水电等传统同步机电源的主导地位将被打破;同时,随着输电网中高压大容量变流装备的持续推广和配用电侧电力电子技术的广泛应用^[8]，“双高”特性将更为显著,成为新一代电力系统的重要技术特征^[15]。

“双高”背景下,新型可再生能源发电与传统同步发电机、柔性交直流输变电与传统交流输变电有本质的区别,导致系统动态特性发生深刻的变化,带来新的稳定性问题,比如电力电子设备之间及其与电网之间相互作用引起的宽频带振荡等。由于“双高”电力系统具有非线性、时变性、异构性、不确定性和复杂性等等特征,其稳定性的内在机理发生变化,因此需要针对“双高”电力系统稳定性的新问题开展基础理论研究,构建电力系统稳定性分析的新框架,为保障系统稳定运行提供支撑。

本文拟归纳“双高”电力系统的主要技术特点,分析“双高”对电力系统经典稳定性的影响,探讨其带来的新型稳定性问题,在回顾了 IEEE 经典和扩展的稳定性定义和分类基础上,尝试提出一种新的稳定性分类方法,作为开展进一步研究工作的基础。

1 “双高”电力系统的特点

“双高”电力系统的特点可从个体和整体两方面来分析。相对于传统同步发电机,新型可再生能源机组和电力电子设备的个体特征主要包括:

1) 电力电子控制主导。并网环节为多控制环(外环、内环、PWM)驱动的电力电子式能量变换装置,依赖 PLL 等锁相机制来实现同步,控制算法而非物理特性决定稳态、动态和故障时的响应特性和调控能力^[8,16-17],具有弱“致稳性”^[18]。

2) 多时间尺度(宽频带)动态响应特性^[19]。内部多级控制蕴含多时间尺度耦合动态,如双馈风电机组包含交流电流、直流电压、机械转速 3 个时间尺度的受控动态行为,对应时间常数分别约为 10ms、

100ms 和 1s 数量级^[8];对外可在非常宽广的频带内响应电网侧扰动,导致多尺度控制相互作用,引发新的稳定性问题。

3) 惯性相对低^[19-20]。新型可再生能源机组因采用电力电子变流器接口,原动机输入功率与电网侧输出电磁功率近乎解耦,不再具备传统同步机组基于转动动能的惯量响应特性。此外由于其储能元件(电感、电容)数值小,受扰后吸放能量响应功率偏差进而抵抗网侧频率变化的能力弱。定量来看,如 1000MW 火发电机组的惯性时间常数约为 8~10s,而并网光伏的等效惯性近乎为 0^[21]。虽然已有研究提出了诸多基于控制的频率支撑/虚拟惯量技术,但因缺乏持久的能量支持,其作用有限且可能影响设备的工作效率和灵活性^[17]。

4) 抗扰性弱^[19]、过载能力低,对频率和电压偏差的耐受能力不足。如,现有一般风电机组的频率和电压耐受上限分别为 50.2Hz 和 1.1pu,与常规火发电机组的 51.5Hz 和 1.3pu 相比有较大差距;使得风机在系统频率或电压大幅波动情况下容易脱网,给系统稳定带来不利影响^[17]。

5) 短路电流较小。电力电子装置短路时基本上没有类似于同步机组的次暂态过程,初始短路电流低,通常在 1.5pu 范围内^[22],稳态短路电流也因较高的内电抗和快速可控的参考电流而迅速降低^[23];短路电流幅值和时间跨度均小于传统同步机组,给基于短路电流工作的控保设备带来挑战。

6) 强非线性、切换性和离散性特征更显著。电力电子器件的高频离散式开关操作、变流设备因敏感于过载和应力而设置的强非线性环节(如限幅、饱和)以及不同控制模式(P/Q 、 V/f)或运行工况(低穿、高穿)下控制/保护策略的序贯切换^[10],使得新型可再生能源机组和柔性输配电设备呈现出较传统机组和输配电设备更复杂的非线性、切换性和离散性。

7) 输出波动性和工况不确定性增加。常规电源的出力取决于煤、水等可控的一次资源,是较为稳定和确定的;而风电、光伏等的出力取决于风资源、光照强度等环境、气候因素,是波动的,虽可预测但也存在较大的不确定性^[18]。

“双高”电力系统整体的新特点主要包括:

1) 多种能源并网、多种输配电网络(交、直流)互联、多种电能产销主体共存的发展趋势使得系统形态结构和稳定性特征发生重大变化,旋转式同步发电机比例下降,电力电子接口的电源和负荷占比

急剧上升,决定系统动态行为的因素增多,特别是复杂多样化数字控制间的相互作用,既改造经典稳定性特征,又引入新型稳定性问题。

2) 新型可再生能源机组容量较传统火电机组低两个数量级,同等容量下机组数量多两个数量级,导致机组组合与运行方式数剧增,给系统运行、调控带来重大挑战。

3) 常规和柔性直流输电规模持续增长,单个工程容量达到1200万kW新高,且送受端常规机组占比降低,直流系统故障导致的功率缺额巨大,导致频率稳定和暂态电压稳定问题凸显,对系统安全稳定产生重大影响,调控和保护难度显著增加^[24]。

4) 风、光等可再生能源机组的低惯性、弱致稳性、弱抗扰性及出力随机性等特征降低了电网抗扰动能力和调节能力,严重影响系统稳定性^[18,24],同时其数字式快速调控能力也给稳定控制带来新的机遇和选择,推动稳定性分析、控制理论与方法的变革^[19]。

5) 多样化变流器之间及其与传统电网元件之间的多尺度、宽频带电磁动态引发全新的稳定性问题,更兼系统维数增高、组合方式爆炸式增长,稳定分析与控制的难度激增。

值得一提的是,可再生能源发电和电力电子控制技术处在高速发展中,如并网变流器由“跟网型(Grid-following)”向“构网型(Grid-forming)”方向的转变;同时,涉网标准也被不断地修改完善,如我国《电力系统安全稳定导则》的修订^[25];这些变化将会持续影响设备个体和系统整体的动态行为,推动稳定性研究不断前行。

2 “双高”对电力系统经典稳定性的影响

新型可再生能源电源和电力电子变流器在电网中广泛应用,一方面,其与传统设备完全不同的动态响应特性会“重塑”系统整体的动态行为,引发新型稳定性问题^[26];另一方面,其向电网注入的功率和对电网参数的调节会改变系统运行方式、潮流分布和传统设备的工作点;从而影响经典稳定性的各个侧面^[27](功角、电压和频率^[28])。关于后者已开展了大量的研究,主要观点总结如下:

1) 对小扰动功角稳定性(低频振荡)的影响:低频振荡特性主要决定于电网结构(惯性分布)和运行方式(潮流大小),大容量可再生能源发电的接入会同时改变电网结构和潮流分布,从而给机电振荡特性带来影响^[29-30],而影响的大小和利弊则受制于渗

透率(Penetration)、机组类型(Type)、地理位置(Location)、接入电网强度(Strength)、运行工况(Operation)及控制策略与参数(Control)(以下简称PTLSOC)^[31],会改变振荡的频率、振型和阻尼,甚至引入新的振荡模式^[32],频率突破熟知的低频(0.01~2.5Hz)范畴^[33]。

2) 对暂态功角稳定性的影响:暂态功角稳定性主要决定于故障情况(类型、地点、时序)和故障前后的系统结构与潮流分布,而可再生能源发电和电力电子变流器的会改变电网结构与潮流分布,从而影响系统整体的暂态功角稳定性。已有大量研究表明^[34-39],影响大小和利弊取决于PTLSOC,其中高、低电压穿越作为特殊控制模式,也会对暂态功角稳定性产生一定的影响。

3) 对电压稳定性的影响:可再生能源发电和电力电子变流器在稳态和暂态过程中的电压-无功响应特性决定了其对电压稳定性的影响特征,除了前述PTLSOC因素外,无功-电压控制策略的影响尤为明显^[40],如控制设计适当,可改善电压稳定性^[41-42]。当风电、光伏的渗透率增大且接入相对较弱电网时,电压稳定控制极具挑战性。另外,因电力电子设备的快速响应特性,短期电压稳定性将包括暂态过/低电压和故障后恢复期过/低电压等新问题^[35]。

4) 对频率稳定性的影响。惯性、调速/调频控制性能是决定频率波动和最低点/谷点(Nadir)、亦即频率稳定性的关键因素。采用电力电子变流器接口的设备缺乏传统意义上的“惯性”,可提供更快的一次(primary)频率支撑和更小的调差特性,但受制于具体控制策略及经济性因素(如MPPT会导致发电效率降低)。多数研究表明^[41,43],风电、光伏等可再生能源发电会削弱系统的频率稳定性,导致稳态时频率波幅大,故障后频率变化率(rate-of-change-of-frequency, ROCOF)更大、谷点更低。发展趋势之一是通过升级入网规范(grid code),增加虚拟惯性和调频控制,或者采用“构网型”变流控制来改善频率稳定性;柔性直流因其控制灵活性,亦可附设调控功能来改善频率动态、降低频率波动和偏移^[44]。

综上,“双高”对电力系统经典稳定性的影响有一些共性特征:

1) 风电、光伏等可再生能源机组跟传统同步机组在物理结构、机械特性、能量转换机制和控制特性上均存在较大的差异,这是造成稳定性特征变化的主要原因。

2) 影响大小和利弊很大程度上取决于可再生

能源发电和电力电子变流器的 PTSLOC^[1,45-46]。

3) 与入网规范密切相关, 根据系统发展情况制定或更新入网规范, 进而引导并网技术的升级换代, 对于系统稳定性特征的演变具有重要的作用^[34]。

4) 可再生能源和电力电子设备的占比决定了其在系统稳定性中的地位: 占比较低时, 需重点关注其对传统设备主导之系统稳定性的影响; 占比相当时, 需研究协调两者动态以提高整体稳定性; 而将来如果占比较高, 则需反过来研究传统设备对其主导之系统稳定性的影响。

3 “双高”电力系统的新型稳定性问题

对文献中报道过但难以归到“经典”稳定性的问题进行总结如下:

1) 可再生能源机组或变流器引起的“类机电”低频振荡。采用电力电子接口的可再生能源机组或变流装备多采用“锁相同步”方式, 没有传统意义上的“转子角”, 不能直接研究其“功角稳定性”或“机电振荡”, 但这并不排除其输出的基波电流或参与形成的节点电压同样存在同步或角度稳定性问题。文献[47]分析表明, 可再生能源机组接入会增加新的低频振荡模式, 且频率可低可高; 文献[48]指出 3 型和 4 型风电机组 PLL 中包含类似于传统同步机组的角度及其微分的变量, 具有类似于摇摆方程的二阶动态, 进而可相应构建一种新的角度稳定性或机电振荡问题; 文献[49]提出了 PLL 振荡的概念, 阐明当变流器接入低短路比交流电网时, 会引发频率高于传统低频、可达 10 Hz 的振荡, 导致机组失去同步^[50]和直流电压波动^[47,51-52], 而一旦该振荡模式阻尼弱且落入传统机电振荡的频率范围, 将参与并影响后者的稳定性; 文献[53]发现风电机组和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)控制器参数不匹配时其相互作用会引发频率约为 5.5 Hz 的无功功率振荡; 文献[54-55]报道了美国 ERCOT(Electric Reliability Council of Texas)CREZ 输电项目研究中, 低短路比电网中出现 3~4 Hz 的弱/零阻尼低频(电压)振荡。综上, 反映这些振荡的物理量均为基波电压幅值或功率, 发生条件大多跟高功率传输和低短路比两个因素有关, 这跟传统的低频(机电)振荡类似, 但其机理显然不同于后者(即由机组质块之间的摇摆特性主导)。

2) 新型宽频带电磁谐振/振荡问题。“双高”电力系统的新特征(控制主导、宽频带动态、多样化设

备的复杂相互作用)使得系统稳定性不再局限于传统的工频和机电时间尺度, 电磁动态凸显, 导致频率范围扩展到 $10^{-1} \sim 10^3$ Hz 的电磁振荡现象, 按照频率所处区间可细分为次/超同步和谐波振荡两个子类:

① 次/超同步振荡(Sub/Super-Synchronous Oscillation, 以下 SSO 指超同步不明显的情况, S^3O 指次/超同步并存的情况)。这类振荡发生时, 电网电压/电流中将出现频率在数 Hz 至两倍工频范围的非特征分量, 不利条件下会持续增长乃至超过工频分量, 最终导致机组跳闸甚至损坏、危及系统的安全稳定运行。最早的案例出现在美国明尼苏达州中南部某双馈风电场^[56], 振荡频率为 9.44 Hz, 造成部分机组损坏。此后美国 ERCOT(2009 年、2017 年)^[57]、我国河北沽源(2012—2015 年)^[58-59]报道了类似双馈风电场—串补输场景下的 SSO 事件, 频率分别在 20~30 Hz 和 3~12 Hz 范围。2015 年 7 月 1 日, 我国新疆哈密风电基地出现了直驱风电机组与弱交流电网相互作用引发的 S^3O ^[60], 电流中出现高幅值的 27~33 Hz 及其互补频率 67~73 Hz 分量, 且与数百公里外的火电机组轴系扭振形成谐振, 导致某电厂三台机组被扭振保护切除而全停, 引发功率大幅缺额和系统频率骤降的系统性风险。文献[61]报道了国内某双馈风电场柔直送出工程中出现 20 Hz 左右的 SSO。不仅风电引发新型 S^3O ^[62-65], 光伏系统也被报道出现次同步频率的自激振荡^[66]或次谐波振荡^[67]。多 STATCOM 跟电网相互作用引发的 S^3O 也引起关注^[68]。上述新型 S^3O 与传统旋转机组轴系扭振主导的次同步谐振/振荡(subsynchronous resonance/oscillation, SSR/SSO)有本质的区别, 机理上涉及变流器、可再生能源机组和交直流电网间的动态相互作用; 振荡的频率、阻尼或稳定性受变流器和电网诸多参数乃至风、光等外部条件的制约, 具有影响因素复杂、频率大范围时变的特征。

② {间}谐波谐振/振荡/不稳定性({Inter-} Harmonic Oscillation/Resonance/Instability)。传统的同步机组由于其结构和参数特性(高质量机械转子、较大时间常数和较窄通频带)使得它对来自电网的高频动态不敏感; 而电力电子设备, 特别是具有高调制频率、宽频带耦合的风电、光伏变流器及近期柔直中广泛引用模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)则对包括中高频在内的宽频带动态反应灵敏, 更兼自身常配备中高频滤波电路, 它们及其与电网之间的相互作用可能导致频率从百 Hz 到超千 Hz 的非特征次谐波振荡、放大和

不稳定,造成谐波过压、过流乃至更严重的电能质量和系统稳定性问题^[67,69-70],如欧洲北海 Borwin1 海上风电项目中 100~1000Hz 范围的谐波不稳定(高频谐波振荡)^[71-72]、美国加州光伏电站故障后的谐波振荡问题^[73]、我国鲁西柔直输电工程中高达 1270Hz 的高频谐波振荡^[74]、海上直驱风电通过交流并网引起的 800Hz 左右谐波谐振^[75]、我国内蒙古塞罕坝和东山风电场出现的 20/21 次谐波放大、青海某 50MVA 光伏电站出现的 21~27 次谐波放大^[76]、光伏并网系统测量滤波器在弱电网条件下引发的中高频振荡(150~200Hz)^[77]、具有 LCL 滤波器的多光伏变流器并联接入电网时引发的谐波谐振和不稳定^[78-79]等。

S³O 和谐波振荡在频率范围和主导元件等方面有各自的特点,但均为机(组)/(变流)器与电网耦合互动的结果,在机理、分析与抑制上存在一定的相似性。如现场经验表明^[80],变流器在接入弱电网时可能产生从次/超同步到中高频的宽频带振荡^[81-82],在这些振荡中除了作为有源设备的变流器之外,电网无源设备,如长传输电缆^[83]、无源滤波器^[84]、变压器^[85]和串联补偿电容器^[86]都起到重要作用。这些新型电磁振荡严重威胁电网的设备安全、系统稳定和用电质量,已成为制约风、光等可再生能源高效消纳的瓶颈因素之一。

3) 新的大扰动稳定性问题。“双高”背景下故障等大扰动带来的稳定性问题报导不少,但较多仍可归为经典稳定性范畴,对于一些新问题,其机理是否与经典问题有本质性区别,尚有待于深入研究,以下两方面的问题值得关注:

① 可再生能源机组的大扰动同步稳定性。文献[51,87]指出,PLL 存在类似于同步发电机转子的动态行为,可参考后者暂态稳定性分析,采用等面积法则研究电网故障后 PLL 的大信号稳定性;在接入交流电网高阻抗比且故障后低电压穿越或电压深跌落条件下,PLL 与交流电流环的相互作用可能导致系统失去稳定。文献[50]指出,当严重故障造成电压很低(如 0.2pu 以下)而低电压穿越需要输出较大(如 1.0pu)无功电流较大时,可能存在输出电流与电网阻抗特性不匹配(即不存在稳态工作点)而使得 PLL 不能跟踪系统频率,进而导致失去同步,造成故障消失后机组也不能正常运行,被迫跳闸。以上两种情况均涉及到故障后变流器的同步运行问题,可类比但机理上又显然不同于传统同步机组的功角稳定性。文献[88]也提到,美国加州地区大

规模光伏电站因 PLL 和直流动态而导致脱网,但该情况未被传统的暂态稳定分析所预测到。

② 故障后电压的电磁暂态方面。文献[54]报道了美国 ERCOT CREZ 可再生能源输电项目研究中,低短路比电网导致的短时过电压;文献[89]也指出,当可再生能源采用大规模集中接入时,特别是接入低短路比交流电网时,可能引发诸如高动态过电压、电压失稳和不良电压闪变等问题。在美国加州电网,光伏电站运行中也出现过稳态过电压和故障后暂态过电压问题,甚至导致输电线路过载、过电压跳机乃至系统级的暂态不稳定^[73]。电力电子设备及其控制带来过电压问题也得到广泛关注,如:MMC 控制引发的过电压^[90],变流器 PWM 高频脉冲波经电缆传输后产生的过电压振荡^[91-92],光伏阵列对地电容引起逆变器直流与交流两侧间的串扰过电压^[93],牵引供电系统中变流器控制或变频调速引发的谐振过电压^[94-95],以及变流器直流侧过电压问题^[96]。这些过电压问题跟传统的电压稳定问题有较大差别,大多是电磁过程,但会影响设备的安全运行,不利条件下可能造成设备脱网乃至损坏,危及电网稳定性。

需要指出的是,在已有的“双高”电力系统稳定性研究中,较多是针对 PLL 并网型电源的小扰动、振荡等可线性化处理问题的,而对非 PLL 并网型电源和大扰动、暂态稳定性方面的研究相对较少。但风、光等可再生能源机组的弱抗扰性、短路电流小、离散性等个体特性恰好在大扰动下会呈现与传统同步机组完全不同的响应特性,从而对大扰动稳定性产生显著的影响,这方面的研究正被广泛关注和快速推进。

4 电力系统稳定性经典分类方法及适用性

4.1 简要回顾

定义和分类是电力系统稳定性研究的基础,历来受到电气工程领域权威机构的重点关注。

1937 年,美国电气工程师协会(American institute of electrical engineers, AIEE)发布关于电力系统稳定性的首份报告^[97],重点分析了当时工程界比较关注的并联交流机组同步问题,并将其作为一个稳定性问题提出来;该报告还引用了 AIEE 于 1932 年提出的电力系统稳定性定义,根据系统是否存在非周期扰动而将稳定性分为静态稳定性(Steady-state Stability)和暂态稳定性(Transient Stability)两大类。

国际大电网会议(Cigre)先后于 20 世纪 50、60 和 70 年代推出了电力系统稳定性定义与分类主题的系列技术报告^[98-100]。IEEE 于 1978 年出版的 IEEE standard 100 标准^[101]用词典的方式给出电力系统稳定性的定义。随后, IEEE 电力系统工程委员会成立了专门的“术语与定义”工作组, 并于 1982 年发表了“电力系统稳定性的推荐术语与定义”^[102], 提出了新的分类方法: 根据扰动大小分为小扰动稳定性(取代之前的静态稳定性)和暂态稳定性; 根据时间长短或是否对响应较慢的控制进行建模分为短期稳定性和长期稳定性; 对失稳(Instability)也做出分类, 根据失稳是由同步抑或阻尼转矩不够而引起的分为单调失稳和振荡失稳, 并提到因无功支撑不够而引发的电压失稳问题, 提出电压失稳和功角

失稳的分类方法。

2004 年, IEEE 和 CIGRE 共同组建的 IEEE/CIGRE 稳定性术语与定义联合工作组发布了“电力系统稳定性定义与分类”报告^[28], 提出了迄今为止广为引用的稳定性定义与分类, 也成为此后讨论稳定性概念拓展和分类的基础。该分类从 3 个侧面, 即: 表征不稳定模式物理本质并可在其中观察到失稳现象的系统变量、所关注扰动的大小和评估稳定性所需考虑的设备、过程 and 时间的跨度, 将稳定性按照系统变量分为 3 个主要分支, 分别为转子角/功角稳定性(Rotor Angle Stability)、电压稳定性(Voltage Stability)和频率稳定性(Frequency Stability), 每个主要分支再按照扰动大小和时间跨度再进行细分, 如图 1 所示。

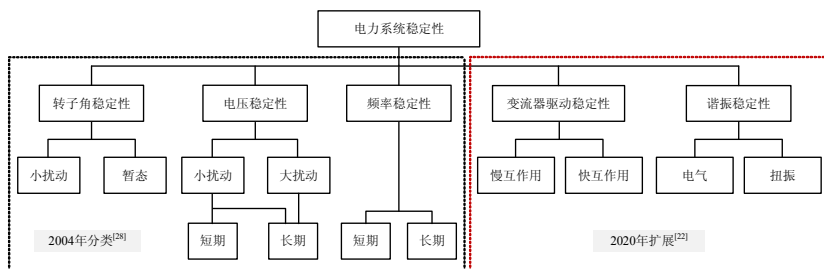


图 1 IEEE 电力系统稳定的分类(2004+2020 年)

Fig. 1 IEEE classification of power system stability(Year: 2004+2020)

前述稳定性定义和分类是针对大型电力系统的, 进入 21 世纪以来, 微电网技术的迅速发展带来了一些新稳定性问题, 为此 IEEE 成立了微电网稳定性定义、分析与建模工作组, 并于 2019 年发表了工作组报告, 对微电网稳定性进行了不同的定义和分类^[103]。这一工作表明, 针对不同形态电力系统, 稳定性的定义和分类可以采取不同的视角。

4.2 “双高”背景下经典稳定性分类的适用性讨论

对 IEEE/CIGRE 2004 年给出的稳定性经典定义和分类及其对“双高”的适应性, 有几点讨论如下:

1) 经典稳定性定义中的角度、电压和频率均指工频/基波分量的角度、电压和频率, 对应理想正弦信号的三要素, 隐含着经典稳定性范畴里没有对其他频率或模式的分量做出明确的定义。

2) 经典稳定性定义中的角度, 更严谨的表述是同步机组的转子角(Rotor Angle), 亦即对于没有物理转子/角度的发电机, 经典的“转子角稳定性”不再适用。

3) 经典稳定性定义中的电压, 虽然没有明示为有效值或相量的模, 但从信号定义(将其与角度和

频率分割)和稳定分析实践上来看, 隐含为基波电压分量的有效值。

4) 有些典型稳定性问题难以融入经典稳定性分类, 如 1970 年代初就出现并引起广泛关注的次同步谐振/振荡(SSR/SSO), 就在很多稳定性及其归类问题的讨论和文献中“不得不”被忽略, 或被“简单粗暴”地归到小扰动功角稳定性门类了^[104](声称引用文献[105]的结论); 但经不起推敲, 原因在于: ①功角稳定性长期作为机电稳定性, 而 SSR/SSO 是电磁稳定性, 一个采用机电模型, 一个采用电磁模型; ②功角稳定性考虑的是基波的角度, 或者说转子作为一个整体跟别的机组转子作为一个整体之间的相对运动, 而 SSR/SSO 考虑的是机组轴段之间的扭振及其引发的次/超同步电压、电流变化; ③SSR 包括暂态扭矩放大等非小扰动分析能涵盖的暂态过程。

经典稳定性分类是同步发电机主导的电力系统时代的产物, 随着电力系统“双高”趋势的发展, 如前所述, 出现很多不能被涵盖的新型稳定问题; 正如稳定性定义和分类的既往发展史一样, 当前又到重新审视并作出扩展定义和分类的关键时刻。

5 “双高”电力系统稳定性分类方法探讨

5.1 IEEE 最新分类的讨论

在上述背景下, IEEE 和 Cigre 成立了联合工作组, 并于 2020 年 4 月发布了“含高渗透率电力电子接口设备电力系统的动态行为特征与稳定性定义”的技术报告^[22], 保留 2004 年的稳定性定义^[28], 同时考虑到变流器接口发电(converter interfaced generation, CIG)设备接入后对系统动态的影响, 扩展出两种新的稳定性分支, 如图 1 所示。

1) 谐振稳定性(Resonance Stability): 包括电气谐振和扭振两个子类, 前者是指 CIG 设备与电网在纯电气意义上动态相互作用引发的电磁振荡, 典型的如早期被归为 SSR 的感应发电机效应(induction generator effect, IGE), 以及近期电力电子控制参与的次同步控制相互作用(subsynchronous control interaction, SSCI)。后者主要指旋转机组的机械系统与含交流串补、直流、SVC/STATCOM 等的电网之间相互作用引发的振荡稳定性, 包括经典的次同步谐振(SSR)和设备型(Device-dependent)SSO, 但不包含 IGE。

2) 变流器驱动稳定性(Converter-driven Stability)。CIG 设备的多时间尺度控制特性会导致机、网之间既有机电暂态又有电磁暂态的耦合互动, 从而引发宽频率范围的振荡现象, 基于频率大小, 划分为慢相互作用(Slow Interaction)和快相互作用(Fast Interaction)两个子类, 前者频率较低, 典型如小于 10Hz; 后者频率相对较高, 典型如数十到数百 Hz, 乃至上千 Hz。

IEEE 工作组报告^[22]反映了“双高”对电力系

统动态行为和对稳定性的影响, 通过“打补丁”方式扩展稳定性的分类, 涵盖了部分新的稳定性现象, 但仍存在一些有待深入探讨的问题, 如:

1) 经典分类方法(图 1 左)中“清晰的”逻辑和尺度被扩展分类(图 1 右)“打乱”了。前者按照系统变量、扰动大小和时间跨度 3 个侧面各自划分, 虽可并存, 但易于区分; 而后者没有依循经典的分类标准, 考虑了设备(变流器, 机组机械系统)、现象(如谐振)和动态快慢, 存在内涵杂糅、尺度不一和难以区分的问题, 譬如新增子类 2 “谐振稳定性”很可能变流器控制导致(驱动)的, 它和新增子类 1 “变流器驱动稳定性”很难在研究和实践中区分开来。

2) 扩展分类没能完全解决经典分类在“双高”背景下的“不适应”问题。如“转子角稳定性”不适用于变流器接口的可再生能源机组, 但后者参与和改变系统同步稳定性的特质使得将其排除在“转子角稳定性”之外“独立门户”不尽合理。

3) 扩展分类不能涵盖一些实际发生的稳定性现象。如文献[22]中提到了我国某电网发生的 2.5Hz+97.5Hz 振荡现象, 还有被大量报道的双高系统中故障引发的短时电磁暂态电压问题^[54,89-96], 很难被归到图 1 某个子类中。

5.2 推荐并供讨论的分类方法

基于上述讨论, 笔者尝试提出一种适用于“双高”电力系统的稳定性分类方法, 如图 2 所示。与图 1 的经典及其扩展分类相比, 主要变化体现在:

1) 增加了一个层次, 根据关注动态的频段, 将电力系统稳定性总体划分为机电动态主导的“工频稳定性(fundamental stability/electromechanical

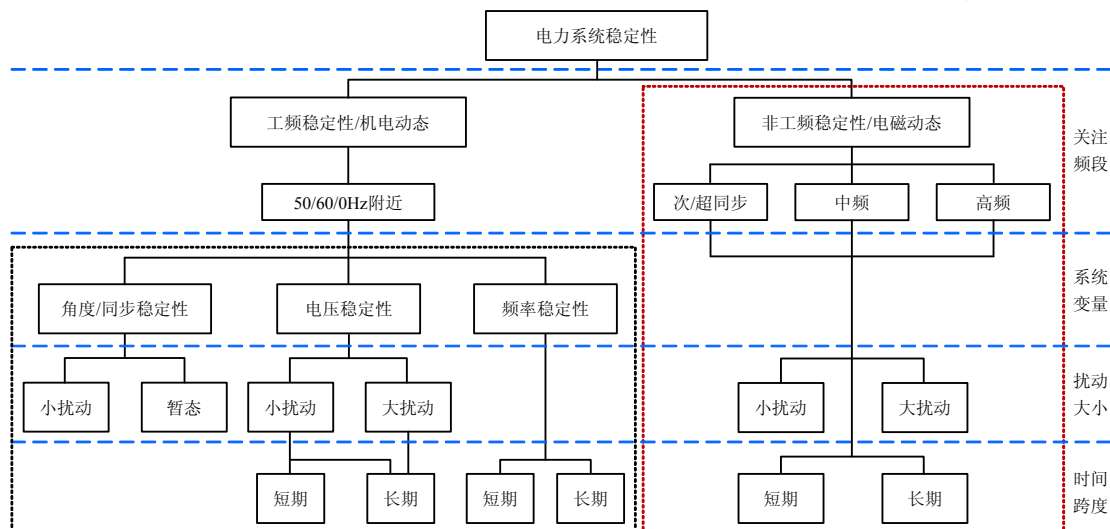


图 2 推荐的电力系统稳定性分类

Fig. 2 Proposed classification of power system stability

dynamics)”和电磁动态主导的“非工频稳定性(non-fundamental stability/electromagnetic dynamics)”两大类。顾名思义,前者是指系统保持在工频 50/60Hz(交流侧)和 0 Hz(直流侧)附近稳定运行并向用户提供高质量电功率的能力,其定义和分类与经典定义和分类基本一致;而后者则指系统避免或抑制不需要的非工频电磁分量的能力。在“双高”场景出现前,同步机组主导系统动态,除了机械扭振和 IGE 可能引发的 SSR/SSO 现象外,系统固有的各种电磁模式基本会快速收敛,不会导致稳定性问题;但电力电子变流器作为宽频、有源设备的普遍应用,可能因其定制化、灵活的控制策略而在宽频率范围上产生“负电阻”效应,从而导致复杂多变的非工频谐振/振荡问题。需要注意的是,这里的工频和非工频并非仅指“振荡”的频率而是指所关注的动态是机电的还是电磁的,因此非周期性失稳或受扰后没有稳定工作点的情况,仍然沿用此前做法^[105],被归为经典(工频)稳定性问题。

2) 将经典分类中的“转子角稳定性”修改为“角度/同步稳定性”,不仅限于同步机组的转子角,也可适用于 CIG 机组等效内电势^[8,10,106]或公共连接点(PCC)电压的角度^[107],以刻画后者与其他设备之间或整个系统保持同步运行的能力。

3) 非工频谐振/振荡按频率范围可划分为三段,即:①介于(不含)0 与 $2f_0$ 之间的次/超同步振荡,包括传统的 SSR、SSO 和新近广为关注的 SS(C)I;②介于(不含) $2f_0$ 与 1 kHz 之间中频振荡;以及③1 kHz 及以上的高频振荡。后两者也可统称为中高频或谐波谐振/振荡。三者特别是后二者的频段边界存在一定的模糊性,可根据实际情况调整。从扰动大小的角度来看,非工频的电磁动态可分为工作点附近小扰动特性和短路故障等大扰动激发的大扰动暂态过程。

本文推荐的分类方法,有如下特点:

1) 试图维持经典分类方法的内在逻辑,消除了“双高”场景下新型稳定性现象与原有稳定性分类之间的不一致性,具有良好的延续性和覆盖性。

2) 稳定的电力系统应可在各种实际工况和扰动下维持设定频率和电压、整体同步运行,尽量消除非工频分量的扰动,推荐的分类方法体现了该基本要求;工频分量是传递能量的载体,其稳定性或质量可细分为角度、电压和频率;而非工频分量是不需要的,其频率源于系统固有模式,而幅值和相位则取决于阻尼、扰动、相互作用关系等多重因素,

实践中只需整体消除其影响,而没有维持其变量(幅值、电压或角度)在特定范围的需求,因此也就没有必要按照不同变量划分子类了。

3) 将系统动态和稳定性从频段上进行分割处理,可有利于开展建模、分析和控制工作;工频可以沿用经典的基波相量(Fundamental Phasor)方法,而非工频可根据频率高低采用相应的电磁暂态或动态相量(Dynamic Phasor)方法,频率高低对模型阶数和分析难度有直接的影响。

4) 与 IEEE 2020 年扩展分类相比,没有凸显“变流器”设备的作用,一则是延续经典分类的理念(没有凸显同步机组),再则是考虑到电力系统中电能发生和变换技术及设备处在持续的升级换代中,突出电力系统动态的本质特征而隐去背后的主导设备,可望具有更好的可扩展性和未来适应性。

5.3 几点讨论

1) 关于非周期性失稳现象的归类。

在经典稳定性分类中,非周期性失稳是归为机电动态范畴的。如文献^[105]所述,小干扰或大干扰下由于同步转矩不足而引起的非周期性失稳属于功角稳定性范畴。换言之,前述工频和非工频的划分并非仅指“振荡”的频率,而是关注动态是机电的还是电磁的,因此非周期性失稳或受扰后没有稳定工作点的情况,仍然可归为经典(工频)稳定性。

2) 关于各个稳定性子类的界限和重叠问题。

电力系统稳定性在整体上是“一个”,只是在不同的场景下,某一个(些)变量或特性凸显,从而主要体现出某个(些)“侧面”的稳定性。稳定性分类只是将“一个整体”的系统稳定性从不同“侧面”来观察或表述,不同“侧面”或类别的稳定性之间是耦合、重叠和关联的,“分类”并非(实际上也不能)将系统稳定性“解耦”成互不关联的部分。正如文献^[105]中提到的“分类涉及的是稳定问题的不同方面,……,它们确实是相互扩展而没有清晰的确定界限”,“分析电力系统稳定现象的某种程度上的重叠实际上是所希望的”

所述重叠包括且不限于:

①基于变量划分子类之间的重叠。如,经典稳定性中的功角稳定性和电压稳定性本质上耦合的,机组之间功角的“拉开”,同时也可能造成电压幅值的下降;只是说在一些动态中,机组功角之间动态主导了稳定性,而电压动态是次要或从属性的,这时候称系统面临功角稳定性问题;而在其他一些场合(譬如故障后无功不平衡为主),电压动态则可

能处在主导地位,功角动态处在从属地位,则称系统面临电压稳定性问题。

②基于频率段划分子类之间的重叠。将稳定性在频段上划分为机电/工频(交流 50/60Hz 和直流 0Hz 附近)和电磁/非工频,但它们之间的边界也是模糊和重叠的。如,在经典功角/电压/频率失稳过程中,由于系统中固有的其他非工频模态被激发,在电压/电流动态中也能分解出一些非工频(如次/超同步)振荡分量,亦即存在非工频电磁动态。又如,低频振荡和次/超同步振荡在频率范围上存在一定的“模糊”地带。传统低频振荡是同步发电机作为单一质量块通过电网互联进而在多机组质块间形成的频率为 $f_L(<2.5\text{Hz})$ 的功率振荡,而工频电压/电流会受调制出现 $50\pm f_L$ 的分量,跟次/超同步频段重叠。另一方面,电力电子设备控制相互作用引发的电磁振荡频率范围非常宽广,在特定工况下会出现接近工频的固有次/超同步振荡模式,显然也会对工频信号产生调制作用,导致类似低频振荡的现象。针对这种频段重叠的稳定性问题,既要甄别其产生机理进而进行正确归类,又要充分认识到机电-电磁动态共存且相互作用的复杂性,需要兼顾两者进行建模、分析和控制。

③关于大/小扰动和短/长期稳定性子类的重叠问题在文献[105]中有论述,此处不再赘述。

3) 关于系统稳定性和设备稳定性。

在讨论电力系统稳定性这个概念时,一般关注“系统整体的稳定性”,而较少讨论“单个设备稳定性”。应该看到,系统稳定性和设备稳定性是密切相关、甚至难以区分的,譬如单机-无穷大系统(稳定分析的常用场景)中单个机组的设备稳定性就是该系统的稳定性;而在实际复杂系统中,单个设备失稳也可能引发连锁响应而导致系统失稳。但是有一点是明确的,即单个设备如果是因其自身问题(如参数设置不合理、控制失调等等)不能稳定运行而退出,且不会导致连锁反应、危及系统整体稳定性,则该设备稳定性问题可视为对整体系统的一个扰动而与系统稳定性区分开来。

系统稳定性和设备稳定性的区分在实践中往往没有“普适而明确”的规则,取决于电力系统的具体情况和运行要求。文献[102]定义的稳定性条件为“受扰后达到一个可接受的稳态运行点”,并指出,可否接受则取决于具体情况和运行标准。文献[28]的稳定性条件为“大多数系统变量在允许范围内,因此几乎整个系统能保持完整”,并指出,

需要关注特定发电机(群)和负荷(区)的稳定性。最新的稳定性定义^[22]中明确提出不考虑“局部不稳定性(local instability)”和控制环不稳定性(instability of a control loop)。这些表述中采用了“可接受”、“大多数”和“几乎”等“模糊”词汇,实则为不同电网及其技术管理部门根据各自实际情况制定可操作的细则提供了方便。

6 结论

高比例可再生能源发电和高比例电力电子设备(“双高”)电力系统具有宽频动态、低惯性、弱抗扰性、低过载能力等特点,不仅对传统稳定性产生重大影响,而且引发诸如次/超同步控制相互作用、谐波谐振等新型稳定性问题,经典稳定性分类在内涵和覆盖性上难以适应当前新情况。本文对IEEE 最新扩展的稳定性分类进行了讨论,并尝试提出一种不同的扩展分类方法,引入工频和非工频的划分思路,修订了转子角稳定性的内涵,并将非工频电磁振荡按照频率范围分成次/超同步、中频和高频3个子类。推荐的分类方法试图维持经典分类方法的内在逻辑,具有良好的覆盖性、可扩展性和未来适应性,希望有利于开展稳定性的建模、分析和控制工作。

致 谢

匿名审稿专家在该文修改过程中提出了极为中肯和富有启发的意见和建议,作者对此致以诚挚的敬意和衷心的感谢!

参考文献

- [1] YI Wenting, HILL D J, SONG Yue. Impact of high penetration of renewable resources on power system transient stability[C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting(PESGM). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2019.
- [2] REN21. Renewables 2020 global status report[R]. Paris: REN21, 2020.
- [3] 2000 年世界风电的发展情况[J]. 电器工业, 2001(12): 52.
World wind power generation development in 2000[J]. China Electrical Equipment Industry, 2001(12): 52(in Chinese).
- [4] 中国电力企业联合会. 2019 年全国电力工业统计快报数据一览表[EB/OL]. 北京: 中国电力企业联合会, (2020-01-21)[2020-05-20]. <https://www.cec.org.cn/upload/1/editor/1579576517375.pdf>.
- [5] 国家发展和改革委员会能源研究所. 2019 年度全国可再

- 生能源电力发展监测评价报告[R]. 北京: 国家能源局, 2020.
- [6] 中国电力企业联合会. 2016 年全国电力工业统计快报数据一览表[EB/OL]. 北京: 中国电力企业联合会, 2017[2020-05-20]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?1-126874>.
- [7] 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司. 高压直流输电工程运行技术研究专题报告[R]. 广州: 中国南方电网, 2019.
- [8] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154(in Chinese).
- [9] BOSE B K. Power electronics, smart grid, and renewable energy systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(11): 2011-2018.
- [10] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457-5467.
HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467(in Chinese).
- [11] GWEC. Global wind energy outlook 2016[EB/OL]. Bonn: GWEC, 2016[2020-05-20]. <https://gwec.net/publications/global-wind-energy-outlook/global-wind-energy-outlook-2016/>.
- [12] International Energy Agency. Technology roadmap-solar photovoltaic energy, 2014[R]. Paris: IEA, 2014.
- [13] 国家发展和改革委员会能源研究所. China renewable energy outlook 2019[EB/OL]. 北京: 可再生能源发展中心, 2019[2020-05-20]. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/CREO2019_-_Executive_Summary_2019.pdf.
- [14] 国家发展和改革委员会能源研究所, 隆基绿能科技股份有限公司, 陕西煤业化工集团有限责任公司. 中国 2050 年光伏发展展望(2019)[EB/OL]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2019[2020-05-20]. <https://www.longigroup.com/uploadfile/default/2019/12/20191212092001458.pdf>.
- [15] 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.
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).
- [16] FELTES C, ENGELHARDT S, KRETSCHMANN J, et al. Comparison of the grid support capability of DFIG-based wind farms and conventional power plants with synchronous generators[C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009.
- [17] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26(in Chinese).
- [18] 袁小明. 大规模风电并网问题基本框架[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(1): 16-18.
YUAN Xiaoming. Framework of problems in large scale wind integration[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(1): 16-18(in Chinese).
- [19] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11(in Chinese).
- [20] 鲁宗相, 汤海雁, 乔颖, 等. 电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 51-58.
LU Zongxiang, TANG Haiyan, QIAO Ying, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: a review[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 51-58(in Chinese).
- [21] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A, GÓMEZ-LÁZARO E, MULJADI E, et al. Power systems with high renewable energy sources: a review of inertia and frequency control strategies over time[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115: 109369.
- [22] HATZIARGYRIOU N D, MILANOVIĆ J V, RAHMANN C, et al. Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies [R]. PES-TR77, Piscataway: IEEE, 2020.
- [23] ELNAGGAR A K, RUEDA J L, ERLICH I. Comparison of short-circuit current contribution of Doubly-fed induction generator based wind turbines and synchronous generator[C]//2013 IEEE Grenoble Conference. Grenoble, France: IEEE, 2013.
- [24] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3095-3103.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids[J]. Power System

- Technology, 2017, 41(10): 3095-3103(in Chinese).
- [25] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB 38755-2019 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation, standardization administration. GB 38755-2019 Code on security and stability for power system[S]. Beijing: China Standard Press, 2019(in Chinese).
- [26] SEWDIEN V N, van der MEIJDEN M, BREITHAUPT T, et al. Effects of increasing power electronics on system stability: results from MIGRATE questionnaire[C]//International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development. Phuket: IEEE, 2018.
- [27] 迟永宁. 大型风电场接入电网的稳定性问题研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- CHI Yongning. Studies on the stability issues about large scale wind farm grid integration[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2006(in Chinese).
- [28] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1387-1401.
- [29] TAMIMI B, CAÑIZARES C, BHATTACHARYA K. System stability impact of large-scale and distributed solar photovoltaic generation: the case of Ontario, Canada[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 680-688.
- [30] KNÜPPEL T, NIELSEN J N, JENSEN K H, et al. Small-signal stability of wind power system with full-load converter interfaced wind turbines[J]. IET Renewable Power Generation, 2012, 6(2): 79-91.
- [31] MULJADI E, BUTTERFIELD C P, PARSONS B, et al. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 29-36.
- [32] DU Wenjuan, BI Jingtian, WANG Tong, et al. Impact of grid connection of large-scale wind farms on power system small-signal angular stability[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 83-89.
- [33] DAHAL S, MITHULANANTHAN N, SAHA T K. Assessment and enhancement of small signal stability of a renewable-energy-based electricity distribution system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 407-415.
- [34] ULLAH N R, THIRINGER T, KARLSSON D. Voltage and transient stability support by wind farms complying with the E. ON Netz grid code[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1647-1656.
- [35] SAJADI A, KOLACINSKI R M, CLARK K, et al. Transient stability analysis for offshore wind power plant integration planning studies—part I: short-term faults[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 182-192.
- [36] EDRAH M, LO K L, ANAYA-LARA O. Impacts of high penetration of DFIG wind turbines on rotor angle stability of power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 759-766.
- [37] VITTAL E, O'MALLEY M, KEANE A. Rotor angle stability with high penetrations of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 353-362.
- [38] BAQUEDANO-AGUILAR M D, COLOMÉ D G, AGÜERO E, et al. Impact of increased penetration of large-scale PV generation on short-term stability of power systems[C]//2016 IEEE 36th Central American and Panama Convention. San Jose, Costa Rica: IEEE, 2016.
- [39] MITSUGI Y, YOKOYAMA A. Phase angle and voltage stability assessment in multi-machine power system with massive integration of PV considering PV's FRT requirements and dynamic load characteristics[C]//2014 International Conference on Power System Technology. Chengdu, China: IEEE, 2014.
- [40] CHOMPOO-INWAI C, LEE W J, FUANGFOO P, et al. System impact study for the interconnection of wind generation and utility system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(1): 163-168.
- [41] BEVRANI H, GHOSH A, LEDWICH G. Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(5): 438-457.
- [42] LONDERO R R, de MATTOS Affonso C, VIEIRA J P A. Long-term voltage stability analysis of variable speed wind generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 439-447.
- [43] XIN Huanhai, LIU Yun, WANG Zhen, et al. A new frequency regulation strategy for photovoltaic systems without energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 985-993.
- [44] RAKHSHANI E, LUNA A, ROUZBEHI K, et al. Effect of VSC-HVDC on load frequency control in multi-area power system[C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Raleigh, NC, USA: IEEE, 2012.
- [45] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 893-901.
- [46] GAUTAM D, VITTAL V, HARBOUR T. Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power

- systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1426-1434.
- [47] HU Jiabing, HUANG Yunhui, WANG Dong, et al. Modeling of grid-connected DFIG-based wind turbines for DC-link voltage stability analysis[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1325-1336.
- [48] MA Shaokang, GENG Hua, LIU Lu, et al. Grid-synchronization stability improvement of large scale wind farm during severe grid fault[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 216-226.
- [49] LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. Impact of power grid strength and PLL parameters on stability of grid-connected DFIG wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 545-557.
- [50] GÖKSU Ö, TEODORESCU R, Bak C L, et al. Instability of wind turbine converters during current injection to low voltage grid faults and PLL frequency based stability solution[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1683-1691.
- [51] HU Jiabing, HU Qi, WANG Bo, et al. Small signal instability of PLL-synchronized type-4 wind turbines connected to high-impedance AC grid during LVRT[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(4): 1676-1687.
- [52] HUANG Y, YUAN X, HU J, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1193-1204.
- [53] GRYNING M P S, WU Qiuwei, KOCEWIAK Ł, et al. Stability boundaries for offshore wind park distributed voltage control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(4): 1496-1504.
- [54] HUANG S H, SCHMALL J, CONTO J, et al. Voltage control challenges on weak grids with high penetration of wind generation: ERCOT experience[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2012.
- [55] FAN Lingling. Modeling type-4 wind in weak grids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2): 853-864.
- [56] MULAWARMAN A, MYSORE P. Detection of undamped sub-synchronous oscillations of wind generators with series compensated lines[C]//Minnesota Power Systems Conference. Minnesota: 2011.
- [57] IRWIN G D, JINDAL A K, ISAACS A L. Sub-synchronous control interactions between type 3 wind turbines and series compensated AC transmission systems[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA: IEEE, 2011.
- [58] WANG Liang, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [59] XIE Xiaorong, ZHANG Xu, LIU Huakun, et al. Characteristic analysis of subsynchronous resonance in practical wind farms connected to series-compensated transmissions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1117-1126.
- [60] LIU Huakun, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708-4720.
- [61] 吕敬, 董鹏, 施刚, 等. 大型双馈风电场经 MMC-HVDC 并网的次同步振荡及其抑制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4852-4860.
- LV Jing, DONG Peng, SHI Gang, et al. Subsynchronous oscillation and its mitigation of MMC-Based HVDC with large doubly-fed induction generator-Based Wind Farm Integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4852-4860(in Chinese).
- [62] VARMA R K, MOHARANA A. SSR in double-cage induction generator-based wind farm connected to series-compensated transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2573-2583.
- [63] MOHAMMADPOUR H A, GHADERI A, SANTI E. Analysis of sub-synchronous resonance in doubly-fed induction generator-based wind farms interfaced with gate-controlled series capacitor[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(12): 1998-2011.
- [64] LEON A E, SOLSONA J A. Sub-synchronous interaction damping control for DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 419-428.
- [65] XU Yangkun, ZHANG Miao, FAN Lingling, et al. Small-signal stability analysis of type-4 wind in series-compensated networks[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 529-538.
- [66] LI Yue, XIA Yanghong, PENG Yonggang. Stability analysis of the PV Generator based on describing function method[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Baltimore, MD, USA: IEEE, 2019: 476-482.
- [67] El Aroudi A. Prediction of subharmonic oscillation in a PV-fed quadratic boost converter with nonlinear inductors[C]//2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems(ISCAS). Firenze, Italy: IEEE, 2018.
- [68] SHU Dewu, XIE Xiaorong, RAO Hong, et al. Sub-and super-synchronous interactions between STATCOMs and weak AC/DC transmissions with series compensations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7424-7437.
- [69] WANG Xiongfei, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept,

- modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858-2870.
- [70] XU Jinming, QIAN Qiang, ZHANG Binfeng, et al. Harmonics and stability analysis of single-phase grid-connected inverters in distributed power generation systems considering phase-locked loop impact[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1470-1480.
- [71] ABDALRAHMAN A, ISABEGOVIĆ E. DoWin1-challenges of connecting offshore wind farms[C]//2016 IEEE International Energy Conference(ENERGYCON). Leuven, Belgium: IEEE, 2016.
- [72] CHEAH-MANE M, SAINZ L, LIANG Jun, et al. Criterion for the electrical resonance stability of offshore wind power plants connected through HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4579-4589.
- [73] ZHANG Yi, ZHU Songzhe, SPARKS R, et al. Impacts of solar PV generators on power system stability and voltage performance[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2012.
- [74] ZOU Changyue, RAO Hong, XU Shukai, et al. Analysis of resonance between a VSC-HVDC converter and the AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10157-10168.
- [75] EBRAHIMZADEH E, BLAABJERG F, WANG Xiongfei, et al. Harmonic stability and resonance analysis in large PMSG-based wind power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 12-23.
- [76] 谢宁, 罗安, 马伏军, 等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 9-16.
- XIE Ning, LUO An, MA Fujun, et al. Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power stations and grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 9-16(in Chinese).
- [77] SUBRAMANIAN S B, VARMA R K, VANDERHEIDE T. Impact of grid voltage feed-forward filters on coupling between DC-link voltage and AC voltage controllers in smart PV solar systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 381-390.
- [78] XIE Bao, ZHOU Lin, ZHENG Chen, et al. Stability and resonance analysis and improved design of N-paralleled grid-connected PV inverters coupled due to grid impedance[C]//2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). San Antonio, TX, USA: IEEE, 2018: 362-367.
- [79] HANIF M, KHADKIKAR V, XIAO Weidong, et al. Two degrees of freedom active damping technique for LCL filter-based grid connected PV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2795-2803.
- [80] AMIN M, RYGG A, MOLINAS M. Self-synchronization of wind farm in an MMC-based HVDC system: a stability investigation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 458-470.
- [81] LV Jing, DONG Peng, SHI Gang, et al. Subsynchronous oscillation of large DFIG-based wind farms integration through MMC-based HVDC[C]//2014 International Conference on Power System Technology. Chengdu, China: IEEE, 2014: 2401-2408.
- [82] AMIN M, MOLINAS M. Understanding the origin of oscillatory phenomena observed between wind farms and HVDC systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 378-392.
- [83] ZHANG Shao, JIANG Shuai, LU Xi, et al. Resonance issues and damping techniques for grid-connected inverters with long transmission cable[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 110-120.
- [84] BRADT M, BADRZADEH B, CAMM E, et al. Harmonics and resonance issues in wind power plants[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA: IEEE, 2011.
- [85] SHUAI Zhikang, LIU Dingguo, SHEN J, et al. Series and parallel resonance problem of wideband frequency harmonic and its elimination strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1941-1952.
- [86] MIAO Zhixin. Impedance-model-based SSR analysis for type 3 wind generator and series-compensated network [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 984-991.
- [87] HU Jiabing, WANG Bo, WANG Weisheng, et al. Small signal dynamics of DFIG-based wind turbines during riding through symmetrical faults in weak AC grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 720-730.
- [88] PICO H N V, JOHNSON B B. Transient stability assessment of multi-machine multi-converter power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3504-3514.
- [89] HU Rui, HU Weihao, CHEN Zhe. Review of power system stability with high wind power penetration[C]//IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Yokohama, Japan: IEEE, 2015.
- [90] LI Yingbiao, GUO Jianbo, ZHANG Xi, et al. Over-voltage suppression methods for the MMC-VSC-HVDC wind farm integration system[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(2): 355-359.
- [91] 朱文婷. PWM 脉冲波在风力发电机绕组内部过电压研

- 究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- ZHU Wenting. Research on PWM pulse wave overvoltage in wind turbine winding[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2019(in Chinese).
- [92] 张兴, 张显立, 谢震, 等. 双馈风力发电变流器长缆驱动及其过电压抑制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 44-48.
- ZHANG Xing, ZHANG Xianli, XIE Zhen, et al. Drive of doubly-fed wind-energy generation converter through long cable and over voltage restrain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 44-48(in Chinese).
- [93] 尹天文, 蒋容兴, 叶蜚誉, 等. 新能源发电系统过电压保护标准的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2016(9): 1-7.
- YIN Tianwen, JIANG Rongxing, YE Feiyu, et al. Research on overvoltage protection standards of new energy generation system[J]. Low Voltage Apparatus, 2016(9): 1-7(in Chinese).
- [94] 李宗垒, 刘明光, 屈志坚, 等. 交直交机车谐波特性及其诱发过电压的治理[J]. 铁道学报, 2015, 37(10): 26-34.
- LI Zonglei, LIU Mingguang, QU Zhijian, et al. Harmonics characteristic of AC-DC-AC locomotive and the disposal of resonance overvoltage[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(10): 26-34(in Chinese).
- [95] 黄友聪, 周凯, 牟秋谷, 等. 高频谐波导致谐振过电压的分析与抑制[J]. 电力电子技术, 2013, 47(2): 95-97.
- HUANG Youcong, ZHOU Kai, MOU Qiugu, et al. Analysis and suppression of resonance over-voltage induced by high frequency harmonics[J]. Power Electronics, 2013, 47(2): 95-97(in Chinese).
- [96] 王佳蕊. 串并联风电场机组直流母线过电压控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- WANG Jiarui. Study on overvoltage control strategy for series-parallel topology based on wind farm[D]. Changsha: Hunan University, 2017(in Chinese).
- [97] EVANS R D, CRARY S B, HAYWARD A P, et al. First report of power system stability[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1937, 56(2): 261-282.
- [98] CRARY S B, HERLITZ I, FAVEZ B. System stability and voltage, power and frequency control[R]. Appendix 1, Report No. 347, France: CIGRE, 1948.
- [99] CIGRE. Definitions of general terms relating to the stability of interconnected synchronous machines[R]. Paper No. 334a, France: CIGRE, 1966.
- [100] BARBIER C, CARPENTIER L, SACCOMANNO F. CIGRE SC32 report: tentative classification and terminologies relating to stability problems of power systems[J]. Electra, 1978(56): 57-67.
- [101] JAY F. IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms[M]. 2nd ed. New York: IEEE Press, 1977.
- [102] BOSE A, CONCORDIA C, DUNLOP R, et al. Proposed terms & definitions for power system stability[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(7): 1894-1898.
- [103] FARROKHABADI M, CAÑIZARES C A, SIMPSON-PORCO J W, et al. Microgrid stability definitions, analysis, and examples[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 13-29.
- [104] EREMIYA M, SHAHIDEHPOUR M. Handbook of electrical power system dynamics: modeling, stability, and control[M]. Canada: John Wiley & Sons, 2013.
- [105] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [106] XIONG Liansong, ZHOU Fang, WANG Feng, et al. Static synchronous generator model: a new perspective to investigate dynamic characteristics and stability issues of grid-tied PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6264-6280.
- [107] 康勇, 林新春, 郑云, 等. 新能源并网变换器单机无穷大系统的静态稳定极限及静态稳定工作区[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4506-4515.
- KANG Yong, LIN Xinchun, ZHENG Yun, et al. The Static stable-limit and static stable-working zone for single-machine infinite-bus system of renewable-energy grid-connected converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4506-4515(in Chinese).



谢小荣

在线出版日期: 2020-11-18。

收稿日期: 2020-07-31。

作者简介:

谢小荣(1975), 男, 教授, 近期研究方向为电力系统振荡分析与抑制, 柔性输配电系统, xiexr@tsinghua.edu.cn;

贺静波(1983), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制等方面研究工作;

毛航银(1985), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化, 247477716@qq.com;

李浩志(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制, lih19@mails.tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

New Issues and Classification of Power System Stability With High Shares of Renewables and Power Electronics

XIE Xiaorong¹, HE Jingbo², Mao Hangyin³, LI Haozhi¹

(1. Tsinghua University 2. National Power Dispatching and Control Center 3. State Grid Zhejiang Electric Power Company)

KEY WORDS: renewable energy; power electronics; power system stability; classification

Driven by energy transition and technological progress, power system industry is undergoing a rapid development with an important trend or key feature, i.e., high penetration of renewable energy plus high penetration of power electronic equipment (namely, "double high"). It is estimated that by 2030, the world's (China's) installed wind power and photovoltaic power will reach 3.8TW (2 TW), accounting for more than 50% of power source. The "double high" trend, however, brings significant changes to the dynamic behavior of the system and causes new issues of stability.

In this paper, the new features of "double high" power systems are discussed first. Next, influence of renewable energy sources and power electronic converters on the various aspects of classical power system stability are briefly reviewed. And the emerging stability issues in the context of "double high" are summarized. For instance, renewable energy power generation will weaken the frequency stability of the system because of low inertia. Meanwhile, new issues such as wideband frequency oscillation are emerging in "double high" power system.

After an examination of applicability of the classical and extended classification of power system stability by IEEE in 2020, a new classification framework was finally proposed to comply with the new scenario of "double high", as shown in Fig.1, while maintaining the classical logic of classification. Compared with the existing method, the proposed classification framework has the following features: 1) Power system stability is generally grouped into two categories, namely fundamental- frequency stability/ electromechanical dynamics and non-fundamental-frequency stability/electromagnetic dynamics. 2) Rotor angle stability in the classical classification is modified to angle/ synchronous stability so as to describe the synchronization ability of convertor interfaced generators. 3) Non-fundamental-frequency stability is further categorized into sub/super- synchronous, intermediate frequency and high-frequency oscillations. Hopefully, this work helps to promote the researches on modeling, analysis and control of the stability of "double high" power systems.

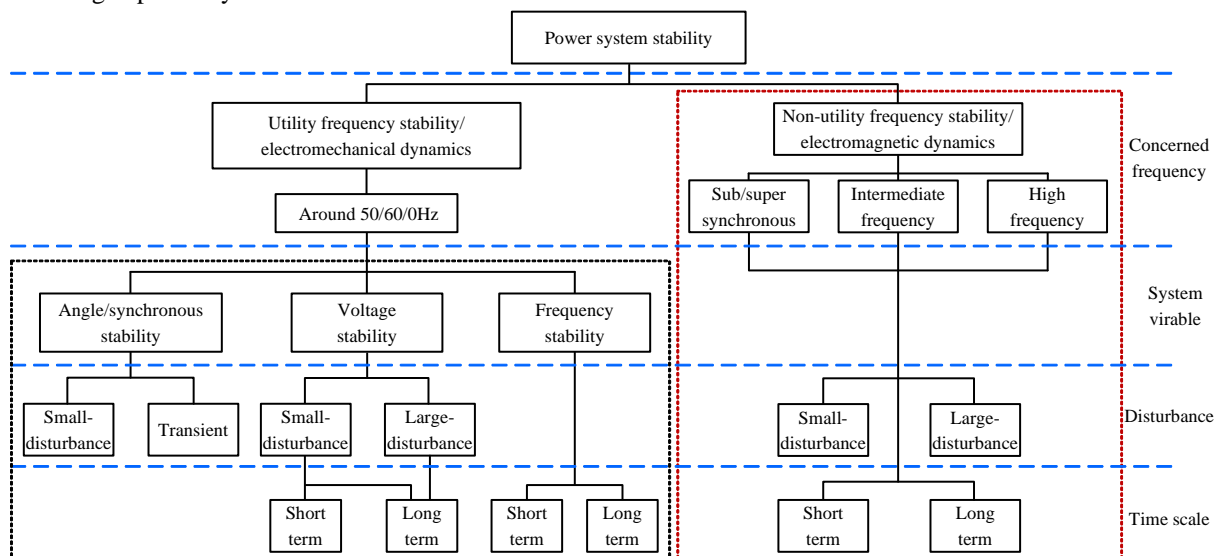


Fig. 1 Recommended classification of power system stability