

“双高”电力系统非经典稳定性分析

孙秋野, 隋政麒, 王睿, 沈千翔, 李大双, 姚葭, 孙城皓

(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁省 沈阳市 110819)

Non-classical Stability Analysis of Power System With High Shares of Renewables and Power Electronics

SUN Qiuye, SUI Zhengqi, WANG Rui, SHEN Qianxiang, LI Dashuang, YAO Jia, SUN Chenghao

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: The high penetration of renewable energy sources and a high proportion of power electronic devices (“double-high”) connected to the grid have effectively promoted the development of the “carbon peaking and carbon neutrality” strategy. However, this has also led to the emergence of broadband oscillation issues such as low-frequency or sub/super-synchronous oscillations. Although numerous analytical methods have been proposed both domestically and internationally to address these non-classical stability issues, there is still a lack of exploration into their fundamental causes. Therefore, this paper proposes an impedance angle stability analysis method, aiming to fundamentally explain the reasons behind the occurrence of non-classical stability issues in “double high” systems. Firstly, through actual testing of the system, this paper identifies for the first time that the equivalent impedance magnitude of inverters increases with the system current, while the phase remains essentially unchanged. Secondly, it introduces the impedance angle stability analysis method, analyzing the fundamental causes of instability in “double-high” system and further defining the impedance angle stability discrimination interval. The research shows that the broadband oscillation problem in “double-high” power systems is caused by disturbances affecting the system's reactive power, leading to changes in impedance angles and preventing the reactive power from returning to its original equilibrium point. Furthermore, based on the proposed impedance angle stability analysis method, the paper introduces a new classification for power system stability. Finally, the correctness of impedance angle stability analysis method is validated through simulation.

KEY WORDS: “double-high” power system; non-classical

stability; broadband oscillation; impedance angle stability; stability classification

摘要: 高比例可再生能源和高比例电力电子设备(即“双高”)并网有力推动了“双碳”战略发展,但同时也产生了低频及次/超同步宽频振荡等新的稳定问题。虽然国内外已有众多针对此类非经典稳定性问题的分析方法,但仍缺少对其失稳本质的探索。为此,该文提出一种阻抗角稳定性分析方法,试图从本质上解释“双高”系统产生非经典稳定问题的原因。首先,该文通过实际测试系统首次发现逆变器等效阻抗幅值会随系统电流增大而增大,而相位基本保持不变这一现象;其次,提出阻抗角稳定性分析方法,分析“双高”系统失稳的本质原因,并进一步得到阻抗角稳定判别区间。研究表明,“双高”电力系统的宽频振荡问题是由于系统无功功率受到扰动,导致阻抗角发生变化,使得无功功率无法恢复到原始平衡点所引发的。此外,该文基于所提出的阻抗角稳定性分析方法,提出了新的电力系统稳定性分类方式。最后,通过仿真验证了阻抗角稳定性分析方法的正确性。

关键词: “双高”电力系统; 非经典稳定性; 宽频振荡; 阻抗角稳定性; 稳定性分类

0 引言

随着电能需求量的增长以及环保理念的加深,高比例可再生能源通过高比例电力电子设备(即“双高”)并入大电网,成为当前电力系统发展的重要组成部分^[1]。

“双高”在电网中的渗透率不断提高,极大地改变了电力系统的动态特征,导致低频或次/超同步振荡等宽频振荡问题频发^[2-3],给电力系统的安全运行和人民的生命财产安全带来严重的威胁^[4-5]。2011年,河北沽源地区发生3~12Hz的低频振荡事故,导致上千台风机脱网,功率从大于200MW降至不足80MW^[6];2012年,青海某50MW光伏电

站发生了 1~1.05kHz 的高频振荡, 出现高次谐波放大, 造成大面积地区出现电压波动和闪变的情况^[5]; 2015 年, 新疆哈密风电系统与数百公里外的火电机组形成谐振, 发生 15~85Hz 的振荡, 导致某电厂的三台机组被切除全停, 引发功率缺额、系统频率骤降的风险^[6]; 2019 年, 英国霍恩海上风电场因发生

10Hz 的振荡导致大规模脱网, 造成英国发生大规模停电事故, 有约 100 万人受到停电影响, 损失负荷约 3.2%^[7]。近些年来, 在世界范围内检测到不同振荡频率的电力电子器件参与的振荡事故, 振荡范围为 2Hz~2kHz, 具有明显的宽频振荡特征。图 1 展示了近些年来发生的不同频率的宽频振荡事件^[3,5-8]。

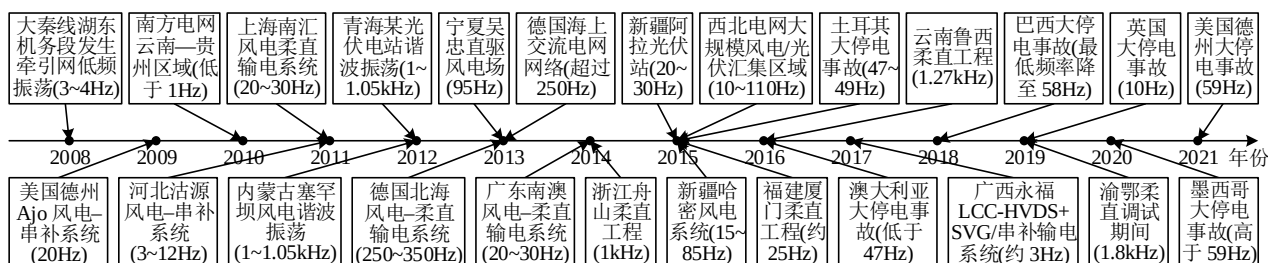


图1 宽频振荡事件

Fig. 1 Broadband oscillation events

2004 年, 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^[9], 提出了迄今为止广为引用的经典稳定性分类方法, 即功角稳定、电压稳定和频率稳定。经典稳定性主要处理相对缓慢的“机电”现象, 通常出现在由同步电机主导的电力系统; 经典稳定性问题主要是由于同步或阻尼转矩不够、功率支撑不足而引发的; 此外, 经典稳定性定义中的功角、电压和频率均指工频/基波分量的功角、电压和频率, 意味着其定义中并未对其他频率的分量做出明确的指示^[8]。

由于电力电子设备广泛接入, “双高”系统产生了宽频振荡这一新的稳定性问题, 该问题表现为“电磁”动态主导^[1], 主要是由于源荷间能量相互作用导致的, 所产生的振荡频率也不再局限于工频附近, 导致经典稳定性分析方法难以适用。因此, 为了将宽频振荡问题与经典稳定问题进行区分, 本文将其定义为非经典稳定性问题。

针对“双高”电力系统的非经典稳定性问题, 国内外学者进行了众多研究。常见的稳定性分析方法可以分为基于闭环传递函数的稳定性分析方法、基于状态方程的稳定性分析方法和基于阻抗技术的稳定性分析方法^[10]。基于闭环传递函数的稳定性分析方法兼具稳定判据简单和动态特性易于获取等优势^[11], E. A. A. Coelho 等^[12]提出简化的三阶传递函数模型以分析小型微网的稳定性; Josep M. Guerrero 等^[13]提出了基于动态矢量方程的五阶闭环传递函数模型, 通过特征根的位置实现对稳定性的判别; 孙秋野等^[14]提出了更为准确的七阶闭环传递函数模型, 并通过模型降阶技术将阶数降为二阶,

提高了模型的适用性。基于状态方程的稳定性分析方法是现代控制理论中最标准且常见的稳定性分析方法, Timothy C. Green 等^[15]建立了完整的下垂控制型微网的状态空间方程以分析系统的稳定性; Jonathan W. Kimball 等^[16]建立了精确的孤岛式运行多逆变器微网系统的精确小信号状态空间模型。但随着电力系统结构复杂度不断升高, 上述两种分析方法必然要面临维数灾的问题^[17]。基于阻抗技术的稳定性分析方法具有模型维度低、构建简单的特点, 受到了各国研究者的广泛关注^[11]。基于阻抗的稳定性分析方法主要是建立源输出阻抗和负载输入导纳之间的返回比矩阵, 进而利用奈奎斯特曲线^[18]、广义奈奎斯特曲线^[19]或广义逆奈奎斯特曲线^[20]判别系统的稳定性。Dushan Boroyevich 等建立了 PQ 控制型逆变器的 dq 阻抗模型并实现了阻抗测量^[21]; 徐殿国、阮新波等利用 dq 阻抗模型分析了在弱电网下系统失稳的主要影响因素^[22-23]; Sun Jian 等^[24]提出了基于序阻抗的建模方法; 罗安等^[25-26]利用阻抗仪实现了对并网逆变器等效序阻抗的测量; 罗安等利用阻抗仪实现了对并网逆变器等效序阻抗的测量; Marta Molinas 等^[27]发现交流电力电子系统的阻抗模型存在镜像频率耦合特性; Frede Blaabjerg 等^[28-29]在此基础上建立了修正序阻抗模型, 完善了序阻抗模型的不足; 年珩等^[30]实现了考虑频率耦合特性的并网逆变器序阻抗模型的测量。针对阻抗充要分析方法的复杂性, 也有大量充分不必要的简化稳定判据被提出, 孙秋野等^[31-32]提出一种新型的阻抗禁止区域判据, 保守性得到了有效降低; 刘进军等^[33-34]提出 Infinity 范数判据, 该判据

具备最低的保守性。但以上 3 种稳定性分析方法均是针对系统稳定性判别展开研究,难以揭示“双高”电力系统的失稳机理。

针对“双高”电力系统的非经典稳定机理,IEEE/CIGRE 稳定性术语与定义联合工作组于 2020 年发布了“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^[1],扩展了两种新的稳定性分支,即“谐振稳定性”和“变流器驱动稳定性”,如图 2 所示。新增分类中考虑到变流器接口发电设备接入后对系统动态的影响,但仍存在一些问题:相较于图 2 左侧在 2004 年提出的稳定性分类^[9],后者没有依循前者的分类标准,不能提供一个准确的致使系统不稳定的系统变量;同时,谐振稳定可能是由于变流器所导致的,无法与变流器驱动稳定进行区分,两者都未能说明“双高”电力系统失稳的本质原因^[8]。

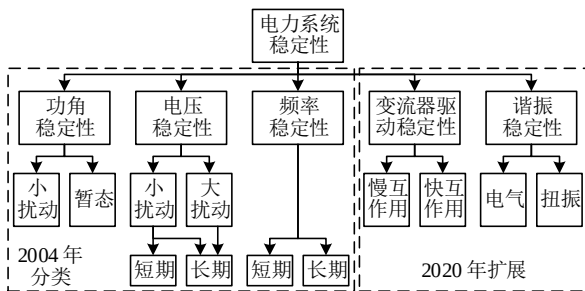


图 2 IEEE/CIGRE 稳定性术语与定义联合工作组于 2004 年和 2020 年提出的稳定性分类

Fig. 2 Stability classification proposed by IEEE/CIGRE joint working group on stability terms and definitions in 2004 and 2020

许多学者也从其他视角对“双高”电力系统的非经典稳定问题进行解释。Mauricio Cespedes 等^[35]提出负电阻与系统中的其他元件结合,在一定条件下可构成负电阻振荡器,是系统发生失稳的根源;James D. McCalley 等^[36]从负阻尼振荡角度对低频振荡展开研究;袁小明、胡家兵等^[37-38]提出了基于内电势的稳定性分析方法;谢小荣等^[6]提出在特定条件下,当 DFIG 机群呈现一个绝对值可以克服电网侧电阻的负电阻时,可能会使电网侧的电感与系统等效电容发生电气振荡,导致失稳现象的发生;辛焕海等^[39]建立了广义阻抗判据下的等效电路模型,发现系统发生串联谐振时,如果回路中广义阻抗的等效电阻小于零,系统可能会发生失稳。上述研究从多个角度对“双高”电力系统的失稳机理进行分析,但仍存在一定的欠缺,例如:负电阻的存

在将导致整个控制系统中存在负阻尼,而负阻尼必然导致系统发生振荡,并不需要系统产生串(并)联谐振。

因此,本文提出了一种适用于“双高”电力系统的阻抗角稳定性分析方法,从本质上解释了系统发生非经典稳定问题的原因。

本文的主要贡献如下:

1) 通过实际测试系统验证了构网型逆变器中存在负阻抗行为,并首次发现了电流和阻抗的映射关系,为分析“双高”电力系统非经典稳定机理提供了基础;

2) 基于构网型逆变器的物理特征,结合阻抗角-无功功率-电流三态相互作用律,从机理上解释了系统产生非经典失稳问题的原因,并首次利用阻抗角划分了系统的稳定区间和失稳区间;

3) 提出了阻抗角稳定性的基本定义,并基于此提出了新的电力系统稳定性分类方式,弥补了 IEEE/CIGRE 关于“双高”系统稳定分类的不足;

4) 通过 Matlab/Simulink 仿真验证了所提出的阻抗角稳定性分析方法的正确性。

1 构网型逆变器物理特征描述

“双高”电力系统通常包含构网型逆变器、跟网型逆变器和恒功率负载等电力电子设备。其中,构网型逆变器为系统提供频率和电压的支撑^[8],可以等效为系统的源侧;而跟网型逆变器的前端通常为风电、光伏等新能源,采用最大功率点跟踪技术,实现额定功率输出^[40],因此跟网型逆变器输出功率恒定,可以等效为负的恒功率负载,与恒功率负载统称为恒功率设备^[41],共同等效为系统的载侧。因此本文采用构网型逆变器串联恒功率负载这一拓扑结构对“双高”电力系统进行表征,如附录 A 所示。

本节将根据构网型逆变器阻抗特点和等效电路模型对其物理特征进行描述。

1.1 构网型逆变器等效阻抗变化规律

本文通过实际测试系统偶然发现:在“双高”电力系统发生宽频振荡的频段内,构网型逆变器的等效阻抗会随电流的变化而变化。本文结合大量的仿真和实验进行了验证。具体的阻抗测量结果如图 3 所示。测试系统如附录 A 所示,具体参数如附录 B 所示。

通过图 3 可知,在 48~49.4Hz 这一频段内,逆变器的等效阻抗为负电阻容性;当电流发生变化

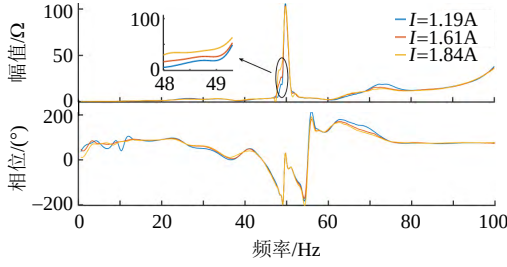


图3 阻抗随电流的变化关系

Fig. 3 The relationship between impedance and current

时,逆变器等效阻抗在该范围内呈现出相位基本保持不变,但幅值随电流增大而增大的现象。同时,经过仿真实验发现,系统的振荡频率也出现在48~49.4Hz这一频段内,如3节仿真结果所示。该结果表现为次同步振荡,属于“双高”电力系统的宽频振荡现象。

1.2 构网型逆变器等效模型描述

构网型逆变器系统等效结构图如图4所示。

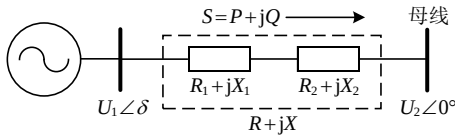


图4 构网型逆变器系统等效结构图

Fig. 4 Equivalent structure for grid-forming inverter system

图4中, U_1 和 U_2 是构网型逆变器的输出电压和母线电压; $Z=R+jX$ 是逆变器等效输出阻抗和线路阻抗之和; $Z=Z_1+Z_2$, $Z_1=R_1+jX_1$, $Z_2=R_2+jX_2$; R_1 和 X_1 分别为逆变器等效输出电阻和电抗; R_2 和 X_2 分别为线路的电阻和电抗; δ 为逆变器输出电压和母线电压之间的角度偏差。

根据图4, 逆变器输出视在功率 S 可以表示为

$$S = \frac{U_1 \cos \delta + jU_1 \sin \delta}{|Z|} \left(\frac{U_1 \cos \delta + jU_1 \sin \delta - U_2}{\cos \theta + j \sin \theta} \right)^* = \frac{P + jQ}{|Z|} \quad (1)$$

式中: P 为输出有功功率; Q 为输出无功功率。

$$\theta = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \quad (2)$$

式中: θ 为逆变器等效输出阻抗和线路阻抗之和 Z 的相位角, 也是2节中阻抗角稳定性分析过程中的阻抗角; R 为逆变器等效输出电阻与线路电阻之和; X 为逆变器等效输出电抗与线路电抗之和。

因此, 有功功率和无功功率可以表示为:

$$P = \frac{U_1}{|Z|} [U_1 \cos \theta - U_2 \cos(\theta + \delta)] \quad (3)$$

$$Q = \frac{U_1}{|Z|} [U_1 \sin \theta - U_2 \sin(\theta + \delta)] \quad (4)$$

在实际系统中, 由于功角值很小^[14], 因此本文假设功角约等于0, 那么式(4)可以等效为

$$Q = \frac{U_1(U_1 - U_2)}{|Z|} \sin \theta \quad (5)$$

由于逆变器等效负阻抗的存在, 那么合成阻抗角 θ 就会由常范围 $[-\pi/2, \pi/2]$ 扩展为 $[-\pi, \pi]$, 所以无功功率 Q 随阻抗角 θ 的变化规律如图5所示。本文假设该系统存在A、B、C和D 4个平衡点。

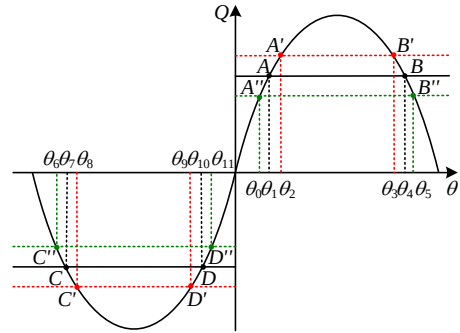


图5 无功功率随阻抗角变化曲线

Fig. 5 Varying curve of reactive power with impedance angle

由于系统中恒功率负载的存在, 在负载功率扰动下, 恒功率负载的有功功率和无功功率的关系为

$$P^2 + Q^2 = K_1 \quad (6)$$

式中 K_1 为任意常数。

逆变器输出的无功功率 Q 通过下垂控制器可以表示为

$$U_1 = U_0 - nQ \quad (7)$$

式中: n 为无功下垂系数; U_0 为逆变器空载时的电压。

综上, 本文发现了构网型逆变器等效阻抗的新规律, 并利用负阻抗的特点对构网型逆变器的物理特征进行了完整的描述。

注1: 本文为了简化分析过程, 类比功角稳定性分析方法中假设阻抗角约等于 90° , 在阻抗角稳定性分析过程中假设功角约等于 0° , 试图从机理上定性解释“双高”电力系统发生非经典稳定问题的原因, 获得系统阻抗角稳定性一般判据。

2 阻抗角稳定性分析

为了揭示“双高”电力系统失稳机理, 本节将

利用图 5 提供的无功功率随阻抗角变化的 $Q-\theta$ 曲线, 结合式(5)—(7)以及前文提到的电流和阻抗的关系, 推导系统稳定性和阻抗角之间的关系, 得到适用于“双高”电力系统的稳定性分析方法。

2.1 阻抗角稳定性分析过程

为了便于阻抗角稳定性分析, 假设逆变器等效阻抗取第三象限的某一固定值, 通过改变线路阻抗使合成阻抗位于不同的区间进行分析。

1) 假设系统运行在平衡点 A 时, 即合成的阻抗角 θ 位于 $[0, \pi/2]$ 范围内, 此时应该分为两种情况进行讨论, 即合成的阻抗角 θ 位于 $[0, \theta_1 + \pi]$ 和 $[\theta_1 + \pi, \pi/2]$ 两个区间。其中, θ_1 为逆变器等效阻抗 Z_1 的角度。

①当合成的阻抗角 θ 位于 $[0, \theta_1 + \pi]$ 时, 在负载扰动下, 系统输出有功功率上升 ($P \uparrow$)。由于 $P^2 + Q^2 = K_1$, 那么系统输出的无功功率将会下降 ($Q \downarrow$)。由式(7)可得, 逆变器输出电压将会上升 ($U_1 \uparrow$)。因为 $U \times I = K_2$, 其中 K_2 为恒定值, 逆变器输出电流则会下降 ($I_1 \downarrow$)。通过电流和等效阻抗 Z_1 的关系可以得到, 等效阻抗幅值将会减小 ($|Z_1| \downarrow$), 而线路阻抗 Z_2 保持不变, 如图 6(a) 所示, 系统合成阻抗角将会增大 ($\theta \uparrow$)。根据 $Q-\theta$ 曲线, 系统输出的无功功率平衡点将从 A 移动到 A' 。因此系统输出的无功功率将会增大 ($Q \uparrow$), 根据式(7), 逆变器输出电压将会下降 ($U_1 \downarrow$)。由于 $U \times I = K_2$, 逆变器输出电流则会上升 ($I_1 \uparrow$)。通过电流和等效阻抗 Z_1 的关系可以得到, 等效阻抗幅值将会增大 ($|Z_1| \uparrow$), 而线路阻抗 Z_2 保持不变, 如图 6(b) 所示, 系统合成阻抗角将会减小 ($\theta \downarrow$)。根据 $Q-\theta$ 曲线, 系统输出的无功功率平衡点将从 A' 重新移回到 A 。当 $Q-\theta$ 曲线的平衡点从 A 点移动到 A'' 时, 也可以得到类似的结果。根据上述分析过程, 当 θ 位于 $[0, \theta_1 + \pi]$ 时, 系统是稳定的。

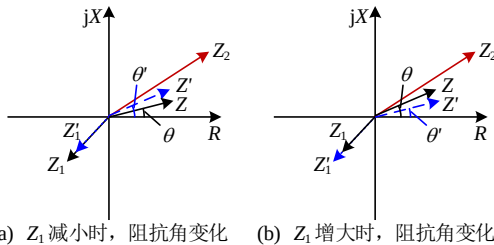


图 6 阻抗角位于 $[0, \theta_1 + \pi]$ 时, 阻抗角随阻抗变化示意图
Fig. 6 When the impedance angle is at $[0, \theta_1 + \pi]$, diagram of the impedance angle changes with the impedance

②当合成的阻抗角 θ 位于 $[\theta_1 + \pi, \pi/2]$ 时, 在负载的扰动下, 系统输出有功功率上升 ($P \uparrow$)。由于

$P^2 + Q^2 = K_1$, 那么系统输出的无功功率将会下降 ($Q \downarrow$)。由式(7)可得, 逆变器输出电压将会上升 ($U_1 \uparrow$)。因为 $U \times I = K_2$, 其中 K_2 为恒定值, 逆变器输出电流则会下降 ($I_1 \downarrow$)。通过电流和等效阻抗 Z_1 的关系可以得到, 等效阻抗幅值将会减小 ($|Z_1| \downarrow$), 而线路阻抗 Z_2 保持不变, 如图 7(a) 所示, 系统合成阻抗角将会减小 ($\theta \downarrow$)。根据 $Q-\theta$ 曲线, 系统输出的无功功率平衡点将从 A 移动到 A'' 。由此, 系统输出的无功功率将会进一步下降 ($Q \downarrow$), 如此恶性循环, 最后系统将会发生失稳。根据上述分析过程, 当 θ 位于 $[\theta_1 + \pi, \pi/2]$ 时, 系统是不稳定的。

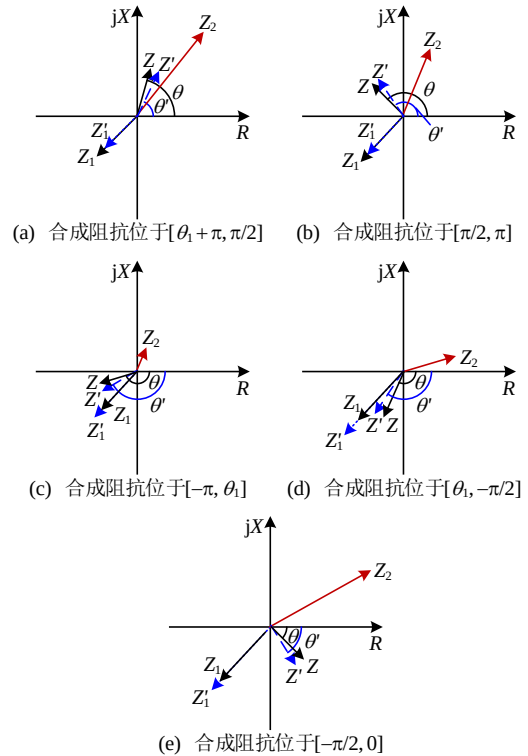


图 7 阻抗角变化示意图

Fig. 7 Diagram of the change in impedance angle

2) 假设系统运行在平衡点 B 时, 即合成的阻抗角 θ 位于 $[-\pi, -\pi/2]$ 范围内, 由于负载扰动导致系统的有功功率上升时, 有如下过程:

$$\begin{aligned} P \uparrow &\xrightarrow{P^2 + Q^2 = K_1} Q \downarrow \xrightarrow{U_1 = U_0 - nQ} U_1 \uparrow \xrightarrow{U \times I = K_2} \\ I_1 \downarrow &\xrightarrow{\text{阻抗与电流关系}} |Z_1| \downarrow \xrightarrow{\text{对应图 7(b)}} \\ \theta \downarrow &\xrightarrow{\text{对应图 5}} Q \uparrow \Rightarrow B \rightarrow B'' \rightarrow B \end{aligned}$$

此时, 系统将会保持稳定。当 $Q-\theta$ 曲线中平衡点从 B 点移动到 B' 时, 也可以得到类似的分析结果。根据上述分析过程, 当 θ 位于 $[\pi/2, \pi]$ 时, 系统是稳定的。

3) 假设系统运行在平衡点 C 时, 即合成的阻抗角 θ 位于 $[-\pi, -\pi/2]$ 范围内, 此时应该分为两种情

况进行讨论,即合成的阻抗角 θ 位于 $[-\pi, \theta_1]$ 和 $[\theta_1, -\pi/2]$ 两个区间。

①当合成的阻抗角 θ 位于 $[-\pi, \theta_1]$ 时,由于负载扰动导致系统的有功功率上升时,有如下过程:

$$\begin{aligned} P \uparrow &\xrightarrow{P^2+Q^2=K_1} Q \downarrow \xrightarrow{U_1=U_0-nQ} U_1 \downarrow \xrightarrow{U \times I=K_2} \\ I_1 \uparrow &\xrightarrow{\text{阻抗与电流关系}} |Z_1| \uparrow \xrightarrow{\text{对应图 7(c)}} \\ \theta \uparrow &\xrightarrow{\text{对应图 5}} Q \downarrow \Rightarrow \text{不稳定} \end{aligned}$$

如此恶性循环,最后系统将会发生失稳。根据上述分析过程,当 θ 位于 $[-\pi, \theta_1]$ 时,系统是不稳定的。

②当合成的阻抗角 θ 位于 $[\theta_1, -\pi/2]$ 时,由于负载扰动导致系统的有功功率上升时:

$$\begin{aligned} P \uparrow &\xrightarrow{P^2+Q^2=K_1} Q \downarrow \xrightarrow{U_1=U_0-nQ} U_1 \downarrow \xrightarrow{U \times I=K_2} \\ I_1 \uparrow &\xrightarrow{\text{阻抗与电流关系}} |Z_1| \uparrow \xrightarrow{\text{对应图 7(d)}} \\ \theta \downarrow &\xrightarrow{\text{对应图 5}} Q \uparrow \rightarrow C \rightarrow C'' \rightarrow C \end{aligned}$$

此时,系统将会保持稳定。当 $Q-\theta$ 曲线中平衡点从 C 点移动到 C' 时,也可以得到类似的分析结果。根据上述分析过程,当 θ 位于 $[\theta_1, -\pi/2]$ 时,系统是稳定的。

4) 假设系统运行在平衡点 D 时,即合成的阻抗角 θ 位于 $[-\pi/2, 0]$ 范围内,由于负载扰动导致系统的有功功率上升时,有如下过程:

$$\begin{aligned} P \uparrow &\xrightarrow{P^2+Q^2=K_1} Q \downarrow \xrightarrow{U_1=U_0-nQ} U_1 \downarrow \xrightarrow{U \times I=K_2} \\ I_1 \uparrow &\xrightarrow{\text{阻抗与电流关系}} |Z_1| \uparrow \xrightarrow{\text{对应图 7(e)}} \\ \theta \downarrow &\xrightarrow{\text{对应图 5}} Q \downarrow \Rightarrow \text{不稳定} \end{aligned}$$

如此恶性循环,最后系统将会发生失稳。根据上述分析过程,当 θ 位于 $[-\pi/2, 0]$ 时,系统是不稳定的。

基于上述分析,得到了阻抗角 θ 在 $[-\pi, \pi]$ 区间范围内的稳定域和失稳域,如图8所示。其中阴影

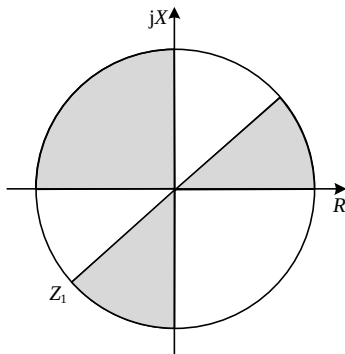


图8 阻抗角稳定判别区间

Fig. 8 Stable discriminant interval for impedance angle

区域为稳定区间,空白区域为失稳区间。当系统合成阻抗角位于失稳区间时,就会导致失稳问题的发生;而位于稳定区间时,系统则必然保持稳定。表1中总结了阻抗角稳定性分析的简要分析过程以及不同阻抗角区间的稳定性分析结果。

表1 阻抗角稳定性分析结果汇总

Table 1 Summary of impedance angle stability analysis results

合成阻抗角范围	阻抗角稳定性分析过程	分析结果
$[0, \theta_1 + \pi]$	$P \uparrow \rightarrow Q \downarrow \rightarrow U_1 \downarrow \rightarrow I_1 \downarrow \rightarrow \theta \uparrow \rightarrow Q \uparrow$; $P \downarrow \rightarrow Q \uparrow \rightarrow U_1 \uparrow \rightarrow I_1 \uparrow \rightarrow \theta \downarrow \rightarrow Q \downarrow$	稳定
$[\theta_1 + \pi, \pi/2]$	$P \uparrow \rightarrow Q \downarrow \rightarrow U_1 \downarrow \rightarrow I_1 \downarrow \rightarrow \theta \downarrow \rightarrow Q \downarrow$; $P \downarrow \rightarrow Q \uparrow \rightarrow U_1 \uparrow \rightarrow I_1 \uparrow \rightarrow \theta \uparrow \rightarrow Q \uparrow$	不稳定
$[\pi/2, \pi]$	$P \uparrow \rightarrow Q \downarrow \rightarrow U_1 \downarrow \rightarrow I_1 \downarrow \rightarrow \theta \downarrow \rightarrow Q \uparrow$; $P \downarrow \rightarrow Q \uparrow \rightarrow U_1 \uparrow \rightarrow I_1 \uparrow \rightarrow \theta \uparrow \rightarrow Q \downarrow$	稳定
$[-\pi, \theta_1]$	$P \uparrow \rightarrow Q \downarrow \rightarrow U_1 \downarrow \rightarrow I_1 \downarrow \rightarrow \theta \uparrow \rightarrow Q \downarrow$; $P \downarrow \rightarrow Q \uparrow \rightarrow U_1 \uparrow \rightarrow I_1 \uparrow \rightarrow \theta \downarrow \rightarrow Q \uparrow$	不稳定
$[\theta_1, -\pi/2]$	$P \uparrow \rightarrow Q \downarrow \rightarrow U_1 \downarrow \rightarrow I_1 \downarrow \rightarrow \theta \downarrow \rightarrow Q \uparrow$; $P \downarrow \rightarrow Q \uparrow \rightarrow U_1 \uparrow \rightarrow I_1 \uparrow \rightarrow \theta \uparrow \rightarrow Q \downarrow$	稳定
$[-\pi/2, 0]$	$P \uparrow \rightarrow Q \downarrow \rightarrow U_1 \downarrow \rightarrow I_1 \downarrow \rightarrow \theta \downarrow \rightarrow Q \downarrow$; $P \downarrow \rightarrow Q \uparrow \rightarrow U_1 \uparrow \rightarrow I_1 \uparrow \rightarrow \theta \uparrow \rightarrow Q \uparrow$	不稳定

注2:由式(5)可知,系统传输的无功功率由合成阻抗的幅值和相位同时决定,但在本文的研究过程中通过实际测试系统发现合成相位的变化要远大于合成幅值的变化。因此本文忽略了幅值变化对无功功率的影响。这将在以后的研究中,结合数学模型对幅值和相位的影响分别进行讨论。

综上,基于1.1节中首次发现的阻抗可变性以及上述分析,本文认为“双高”电力系统发生非经典失稳问题时存在两个条件:1)逆变器的等效负阻抗;2)逆变器等效阻抗随输出电流的可变性。其中,等效负阻抗是系统发生失稳的根本条件,而等效阻抗的可变性则是系统发生失稳的触发条件。即在逆变器等效阻抗为负阻抗的前提下,当系统输出有功功率受到扰动而发生变化后,会影响系统无功功率的大小,从而导致系统输出电流产生变化;电流变化则会导致系统的合成阻抗角发生变化,进一步对系统输出的无功功率产生影响。如果系统输出无功功率能恢复到原始平衡点,则系统是稳定的;反之,系统则是失稳的。由于阻抗角与频率具备函数关系,所以当发生阻抗角失稳时,就会产生对应的振荡频率或振荡频段,即宽频振荡行为。

结合上述分析,本文对阻抗角稳定性做出如下定义:阻抗角稳定性是指在逆变器等效阻抗为负的

前提下,当“双高”电力系统输出的无功功率受到干扰后,如果阻抗角经过变化使得系统输出无功功率能够恢复到原始平衡点,则系统是阻抗角稳定的;反之,系统就是阻抗角不稳定。

目前已有众多文章采用负阻抗的特点对“双高”电力系统非经典稳定性问题进行分析,如文献[19-22,35-36,39]所示。但现有的基于负阻抗的稳定性分析方式,仅从稳定工作点的角度进行考虑,无法说明系统失稳的动态过程,也难以准确地解析系统失稳的本质原因。本文基于首次发现的阻抗可变量,结合阻抗角-电流-无功功率三态相互作用规律,利用无功功率的变化情况表征系统的稳定性,从机理上解释了“双高”电力系统的失稳过程,突破了传统基于负阻抗理论的局限性。此外,传统的基于阻抗的稳定性判别方法不仅要考虑阻抗的相位也需要考虑阻抗的幅值,难以进行规范的度量,无法给出系统的稳定判别区间;而本文所提出的阻抗角稳定性分析方法,利用阻抗角可以准确地划分系统稳定域与失稳域,为“双高”电力系统的前期规划、中期调度和系统特性评估提供指导。

2.2 阻抗角稳定性分类方法

2.1 节中结合系统的物理特性,利用阻抗角对“双高”电力系统非经典稳定性问题从机理上进行了分析,通过阻抗角划分了系统的稳定区域和失稳区域。基于现有稳定性分类的不足以及上述研究发现,本文提出了针对“双高”电力系统的新稳定性分类方法,如图9所示。

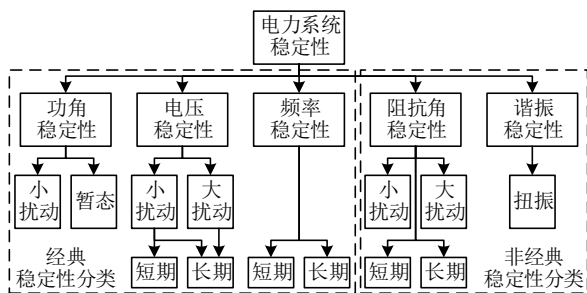


图9 本文提出的稳定性分类方法

Fig. 9 Stability classification method proposed in this paper

本文所提出的分类方法与图2的经典稳定性及其扩展分类方法相比,利用阻抗角稳定性替换了新增的“变流器驱动稳定性”以及“谐振稳定性”中的“电气”部分,并将其划分在非经典稳定性分类中。因为这两类稳定性都属于变流器设备间的相互作用所导致的。阻抗角作为“双高”电力系统中可

以观察到的一个系统变量,可以很好地解释经典稳定性难以分析的低频或次/超同步等的宽频振荡现象,从本质上说明了非经典稳定问题的失稳机理;并且,阻抗角可以与功角、电压和频率并列,弥补分类中前后不统一的问题。此外,“变流器驱动稳定性”和“谐振稳定性”中的“电气”部分均与系统等效的负阻抗有关,且该阻抗是不断变化的,阻抗角稳定性也正是基于这一现象以及本文发现的电流和阻抗的关系所推导得出。因此,阻抗角稳定性可以替代“变流器驱动稳定性”和“谐振稳定性”中的“电气”部分,成为继经典稳定性后的新一类稳定性。

本文主要分析了系统在发生小扰动后阻抗角变化,从而导致无功功率振荡的问题。当系统发生大扰动时,则可以根据相应的网络结构,结合矢量定理获得系统等效的网络阻抗和系统阻抗,构造系统传输功率和等效系统阻抗角的关系,分析暂态过程中系统稳定时系统阻抗角区间和相应条件。因此,在第二层,阻抗角稳定性具备小扰动和大扰动两种分类方式。第三层则维持了电压稳定性和频率稳定性的分类逻辑,因为阻抗角稳定可以是一种短期或长期现象。

“谐振稳定性”中的“扭振”部分主要由旋转机组的机械系统与电网间的相互作用所导致的,而旋转机组的等效阻抗与电流的变化并无关系,所以仍保留原始的分类方式。但因其也可能导致系统发生宽频振荡行为,所以将“扭振”部分保留在非经典稳定性分类中。

本文提出的稳定性分类方法遵循了经典稳定性分类方法的内在逻辑,消除了2020年新增的两类稳定性与经典稳定性之间的不一致性,突出了电力系统宽频振荡问题产生的本质特征,对于“双高”电力系统具有更好的适应性。

3 仿真实验

为了更好地验证阻抗角稳定分析方法的正确性,根据第1节中测量构网型逆变器得到的等效阻抗 Z_1 大小,调整线路阻抗 Z_2 ,使得合成阻抗 Z 位于不同的区间范围内。同时,本节将在系统稳定运行后的0.1s时接入线路阻抗 Z_2 ,这样将更加契合阻抗角稳定分析过程,可以更好地展示系统无功功率发生变化后系统稳定性的变化情况。此外,由于逆变器等效阻抗在48~49.4Hz频段内是不断变化的,

因此当合成阻抗角在 48~49.4Hz 频段内始终位于稳定区间, 系统才是稳定的; 如果合成阻抗角始终位于失稳区间或者跨越了失稳区间, 那么系统是不稳定的。本文通过附录 A 所示的拓扑结构对所得到的结论进行了测试。具体参数如附录 B 所示。

本节的仿真分为 6 个部分, 分别验证 2.1 节中推导得到的合成阻抗角所在的 6 个区间的稳定性结论。

1) 选取线路阻抗 Z_2 为 45Ω 、25mH, 通过图 10(a)可以发现, 此时合成的阻抗角 θ 在 48~49.4Hz 频段内始终位于逆变器等效阻抗 Z_1 反向延长线的下方, 即 $[0, \theta_1 + \pi]$ 内的稳定区间。在这种情况下, 系统必然是稳定的。如图 11 所示, 在 0.1s 接入线路阻抗后系统输出电压是稳定的。

2) 选取线路阻抗 Z_2 为 4.5Ω 、21mH, 通过

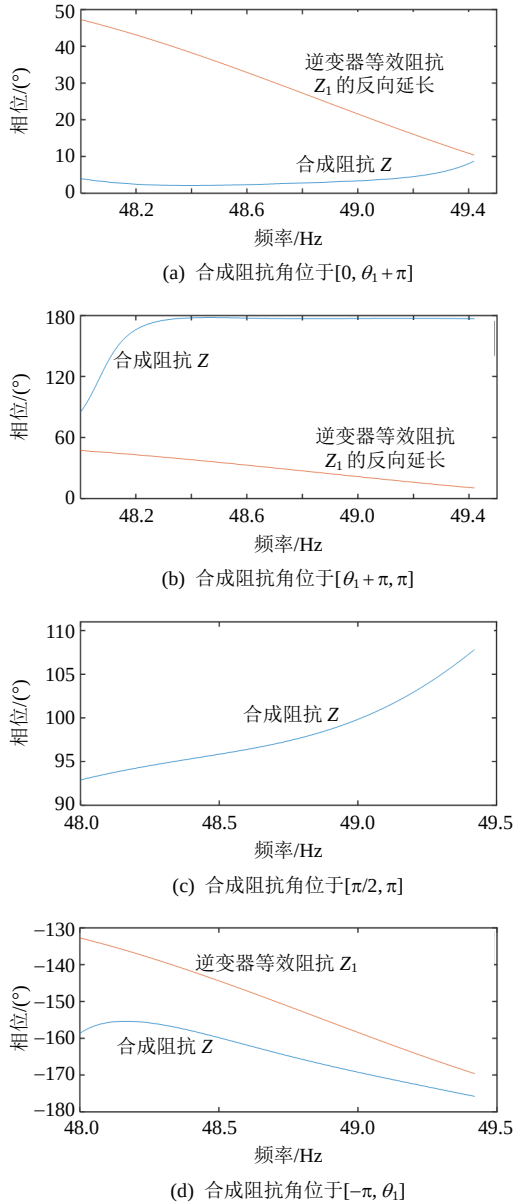
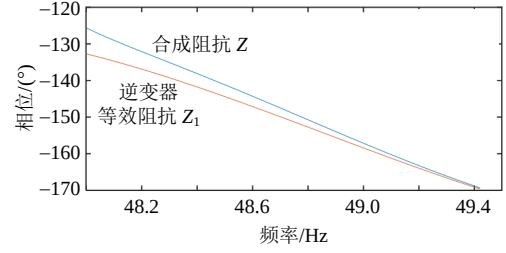
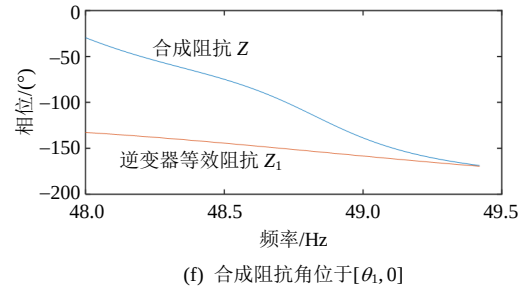


图 10 合成阻抗角所在区间示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the interval in which the synthetic impedance angle is located

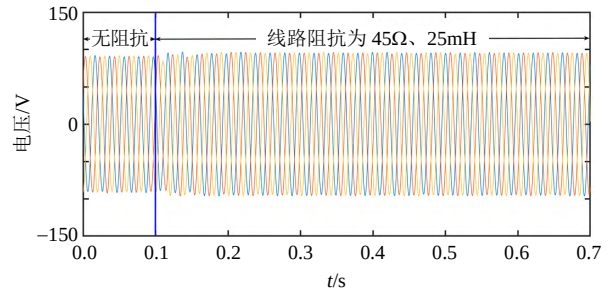


图 11 合成阻抗角位于 $[0, \theta_1 + \pi]$ 时的实时仿真波形

Fig. 11 Real time simulation waveform when the synthetic impedance angle is at $[0, \theta_1 + \pi]$

图 10(b)可以发现, 此时合成的阻抗角 θ 在 48~49.4Hz 频段内会位于第一象限和第二象限内, 在第一象限内, 其相位始终位于逆变器等效阻抗 Z_1 反向延长线的上方, 即合成的阻抗角 θ 跨越了第一象限的失稳区间 $[\theta_1 + \pi, \pi/2]$ 和第二象限的稳定区间。在这种情况下, 系统必然是失稳的。如图 12 所示,

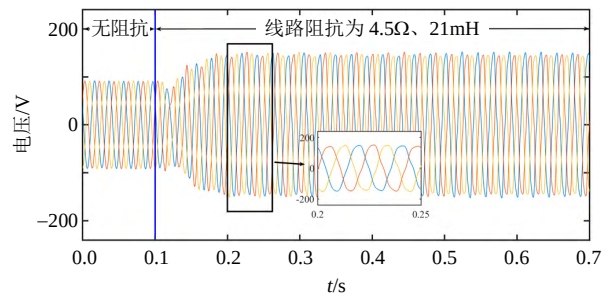


图 12 合成阻抗角位于 $[\theta_1 + \pi, \pi]$ 时的实时仿真波形

Fig. 12 Real time simulation waveform when the synthetic impedance angle is at $[\theta_1 + \pi, \pi]$

在 0.1s 接入线路阻抗后系统的输出电压发生了失稳现象。通过图 13(a) 的 FFT 分析结果知, 系统发生了 48.5714Hz 的次同步振荡现象, 该振荡频率属于 48~49.4Hz 范围。

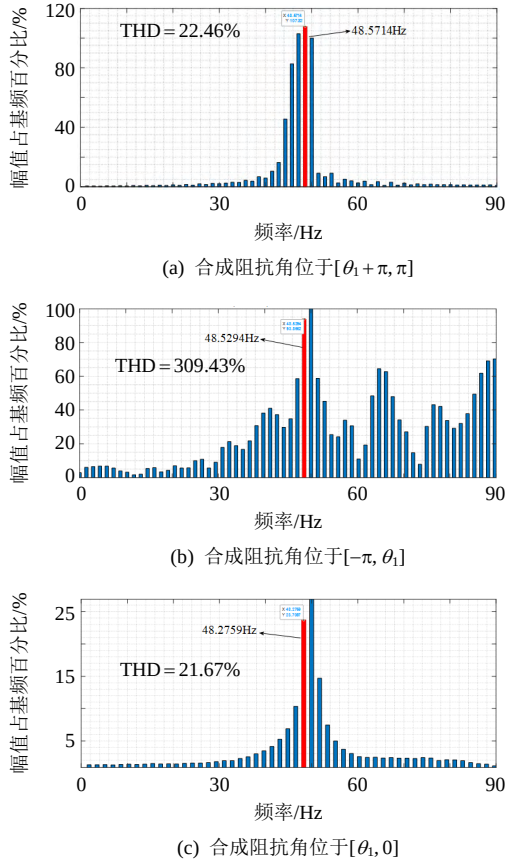


图 13 失稳系统 FFT 仿真分析图

Fig. 13 FFT simulation analysis of destabilised system

3) 选取线路阻抗 Z_2 为 0.01Ω 、 $0.3H$, 通过图 10(c) 可以发现, 此时合成的阻抗角 θ 始终位于第二象限内, 即 $[\pi/2, \pi]$ 范围内的稳定区间。在这种情况下, 系统必然是稳定的。如图 14 所示, 在 0.1s 接入线路阻抗后系统的输出电压是稳定的。

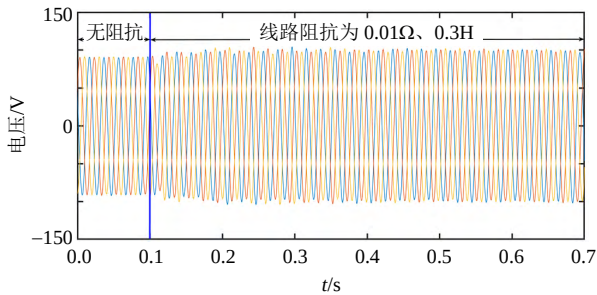


图 14 合成阻抗角位于 $[\pi/2, \pi]$ 时的实时仿真波形

Fig. 14 Real time simulation waveform when the synthetic impedance angle is at $[\pi/2, \pi]$

4) 选取线路阻抗 Z_2 为 0.01Ω 、 $10mH$, 通过

图 10(d) 可以发现, 此时合成的阻抗角 θ 在 48~49.4Hz 频段内始终位于第三象限内, 且其相位始终位于逆变器等效阻抗 Z_1 的上方, 即合成的阻抗角 θ 位于失稳区间 $[-\pi, \theta_1]$ 内。在这种情况下, 系统必然是失稳的。如图 15 所示, 在 0.1s 接入线路阻抗后系统的输出电压发生了失稳现象。通过图 13(b) 的 FFT 分析结果知, 系统发生了 48.5294Hz 的次同步振荡现象, 该频率属于 48~49.4Hz 范围。

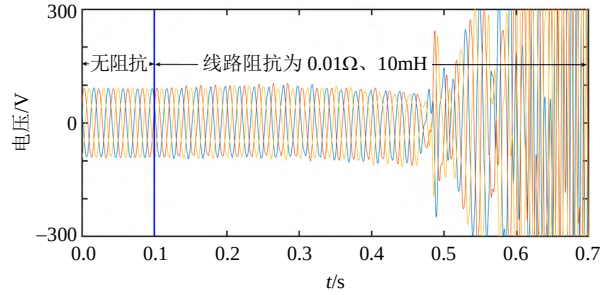


图 15 合成阻抗角位于 $[-\pi, \theta_1]$ 时的实时仿真波形

Fig. 15 Real time simulation waveform when the synthetic impedance angle is at $[-\pi, \theta_1]$

5) 选取线路阻抗 Z_2 为 1Ω 、 $0.1mH$, 通过图 10(e) 可以发现, 此时合成的阻抗角 θ 在 48~49.4Hz 频段内始终位于第三象限内, 且其相位始终位于逆变器等效阻抗 Z_1 的下方, 即合成的阻抗角 θ 位于稳定区间 $[\theta_1, -\pi/2]$ 内。在这种情况下, 系统必然是稳定的。如图 16 所示, 在 0.1s 接入线路阻抗后系统的输出电压是稳定的。

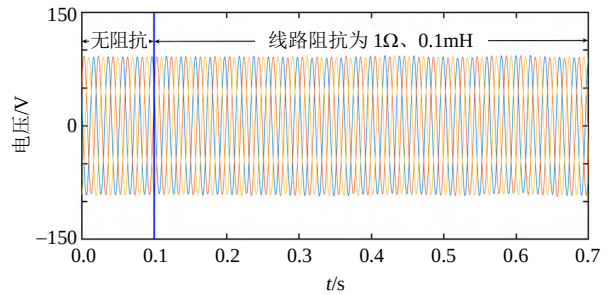
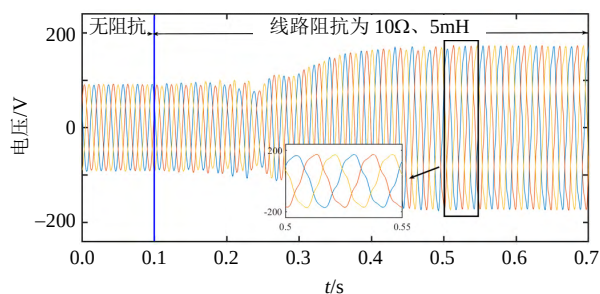


图 16 合成阻抗角位于 $[\theta_1, -\pi/2]$ 时的实时仿真波形

Fig. 16 Real time simulation waveform when the synthetic impedance angle is at $[\theta_1, -\pi/2]$

6) 选取线路阻抗 Z_2 为 10Ω 、 $5mH$, 通过图 10(f) 可以发现, 此时合成的阻抗角 θ 在 48~49.4Hz 频段内会位于第三象限和第四象限内。在第三象限内, 其相位始终位于逆变器等效阻抗 Z_1 的下方, 即合成的阻抗角 θ 跨越了第三象限的稳定区间 $[\theta_1, -\pi/2]$ 和第四象限的失稳区间。在这种情况下, 系统必然是失稳的。如图 17 所示, 在 0.1s 接入线路阻抗后系

图17 合成阻抗角位于 $[\theta_1, 0]$ 时的实时仿真波形Fig. 17 Real time simulation waveform when the synthetic impedance angle is at $[\theta_1, 0]$

统的输出电压发生了失稳现象。通过图13(c)的FFT分析结果可知,系统发生了48.2759Hz的次同步振荡现象,该振荡频率属于48~49.4Hz范围。

表2总结了上述6组仿真结果,通过对比表1,可以很好地验证2节中提出的阻抗角稳定性分析方法的正确性,从而为“双高”电力系统的前期规划、中期调度和系统特性评估提供指导。

表2 阻抗角稳定性仿真结果

Table 2 Simulation results of impedance angle stability

线路阻抗 Z_2	θ 所在区间	稳定性
45Ω、25mH	$[0, \theta_1 + \pi]$	稳定
4.5Ω、21mH	$[\theta_1 + \pi, \pi]$	不稳定
0.01Ω、0.3H	$[-\pi, -\pi/2]$	稳定
0.01Ω、10mH	$[-\pi, \theta_1]$	不稳定
1Ω、0.1mH	$[\theta_1, -\pi/2]$	稳定
10Ω、5mH	$[\theta_1, 0]$	不稳定

4 结论

“双高”电力系统稳定性问题主要体现在低频或次/超同步等宽频振荡这类非经典稳定性问题上,导致经典稳定性分析方法难以解决这一新的问题。而IEEE/CIGRE联合工作组最新扩展的稳定性分类方法也难以对该问题的产生机理进行合理的解释。本文基于实际测试系统首次发现了阻抗与电流的关系,结合理论推导提出了阻抗角稳定性分析方法。该方法利用阻抗角对系统的稳定区域和失稳区域进行划分,并成功地从机理上解释了“双高”电力系统产生非经典稳定性问题的本质原因。该问题主要是由于无功功率波动引起的,基于电流和逆变器等效阻抗的关系,导致系统等效阻抗角发生变化,使得无功功率无法恢复到平衡点。同时,本文还提出了新的稳定性分类方式,对IEEE/CIGRE最新的扩展分类进行了替代和总结,使得当前电力系统的稳定性分类方式更加完善。

本文探索利用阻抗角稳定性分析方法解释“双高”电力系统非经典稳定性问题,是为深入研究这一重要的稳定性问题提供一个思路和可能的途径。一个理论的完备提出很难通过一篇论文甚至一个团队完成,所以本文所提出的阻抗角稳定性分析方法希望能够提供一个可能的思路,为更多的研究者作为借鉴、参考甚至试错。

参考文献

- [1] HATZIARGYRIOU N, 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]. Technical Report PES-TR77, 2020.
- [2] 何湘宁, 宗升, 吴建德, 等. 配电网电力电子装备的互联与网络化技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5162-5170.
HE Xiangning, ZONG Sheng, WU Jiande, et al. Technologies of power electronic equipment interconnecting and networking in distribution grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5162-5170 (in Chinese).
- [3] 姜齐荣, 王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7185-7200.
JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7200 (in Chinese).
- [4] BUTLER J W, CONCORDIA C. Analysis of series capacitor application problems[J]. Electrical Engineering, 1937, 56(8): 975-988.
- [5] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-8.
LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8 (in Chinese).
- [6] 谢小荣, 王路平, 贺静波, 等. 电力系统次同步谐振/振荡的形态分析[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1043-1049.
XIE Xiaorong, WANG Luping, HE Jingbo, et al. Analysis of subsynchronous resonance/Oscillation types in power systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1043-1049 (in Chinese).
- [7] 樊陈, 姚建国, 张琦兵, 等. 英国“8·9”大停电事故振荡事件分析及思考[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 34-41.
FAN Chen, YAO Jianguo, ZHANG Qibing, et al. Reflection and analysis for oscillation of the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 34-41 (in Chinese).
- [8] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定

- 性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
- XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475 (in Chinese).
- [9] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1387-1401.
- [10] WANG Rui, SUN Qiuyue, MA Dazhong, et al. Line impedance cooperative stability region identification method for grid-tied inverters under weak grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2856-2866.
- [11] ADIB A, LAMB J, MIRAFZAL B. Ancillary services via VSIs in microgrids with maximum DC-bus voltage utilization[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 648-658.
- [12] COELHO E A A, CORTIZO P C, GARCIA P F D. Small signal stability for single phase inverter connected to stiff AC system[C]//Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat.No.99CH36370). Phoenix, AZ, USA: IEEE, 1999: 2180-2187.
- [13] GUO Xiaoqiang, LU Zhigang, WANG Baocheng, et al. Dynamic phasors-based modeling and stability analysis of droop-controlled inverters for microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2980-2987.
- [14] WANG Rui, SUN Qiuye, ZHANG Pinjia, et al. Reduced-order transfer function model of the droop-controlled inverter via Jordan continued-fraction expansion[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1585-1595.
- [15] POGAKU N, PRODANOVIC M, GREEN T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [16] RASHEDUZZAMAN M, MUELLER J A, KIMBALL J W. An accurate small-signal model of inverter-dominated islanded microgrids using dq reference frame[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1070-1080.
- [17] 王睿, 孙秋野, 马大中, 等. 微网中分布式电源锁相环建模及其稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7338-7348.
- WANG Rui, SUN Qiuye, MA Dazhong, et al. Modeling and stability analysis of distributed generation phase locked loop in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7338-7348 (in Chinese).
- [18] LI Xin, RUAN Xinbo, JIN Qian, et al. Small-signal models with extended frequency range for DC-DC converters with large modulation ripple amplitude[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 8151-8163.
- [19] 佟强, 张东来, 徐殿国. 分布式电源系统中变换器的输出阻抗与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 57-64.
- TONG Qiang, ZHANG Donglai, XU Dianguo. Output impedance and stability analysis of converters in distributed power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 57-64 (in Chinese).
- [20] WEN Bo, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Inverse Nyquist stability criterion for grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 1548-1556.
- [21] WEN Bo, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.
- [22] ZHANG Xueguang, XIA Danni, FU Zhichao, et al. An improved feedforward control method considering PLL dynamics to improve weak grid stability of grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5143-5151.
- [23] YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to the weak grid condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5795-5805.
- [24] CESPEDDES M, SUN Jian. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
- [25] WU Wenhua, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Sequence impedance modeling and stability comparative analysis of voltage-controlled VSGs and current-controlled VSGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6460-6472.
- [26] 伍文华, 周乐明, 陈燕东, 等. 序阻抗视角下虚拟同步发电机与传统并网逆变器的稳定性对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1411-1420.
- WU Wenhua, ZHOU Leming, CHEN Yandong, et al. Stability comparison and analysis between the virtual synchronous generator and the traditional Grid-connected inverter in the view of sequence impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1411-1420 (in Chinese).
- [27] RYGG A, MOLINAS M, ZHANG Chen, et al. A modified sequence-domain impedance definition and its equivalence to the dq -domain impedance definition for the stability analysis of AC power electronic systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1383-1396.
- [28] BAKHSHIZADEH M K, WANG Xiongfei, BLAABJERG F, et al. Couplings in phase domain impedance modeling of grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6792-6796.
- [29] WANG Xiongfei, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected

- voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.
- [30] 年珩, 李萌, 陈亮, 等. 采用多正弦信号注入的宽频带并网逆变器频率耦合特性测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7408-7419.
- NIAN Heng, LI Meng, CHEN Liang, et al. Measurement method for broadband frequency coupling characteristics of Grid-connected inverter using Multi-sine signal injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7408-7419 (in Chinese).
- [31] WANG Rui, SUN Qiuye, MA Dazhong, et al. Line inductance stability operation domain assessment for weak grids with multiple constant power loads[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(2): 1045-1055.
- [32] WANG Rui, SUN Qiuye, HU Wei, et al. SoC-based droop coefficients stability region analysis of the battery for stand-alone supply systems with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7866-7879.
- [33] LIU Zeng, LIU Jinjun, BAO Weihang, et al. Infinity-norm of impedance-based stability criterion for three-phase AC distributed power systems with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3030-3043.
- [34] 刘方诚, 刘进军, 张昊东, 等. 基于 G-范数和 sum-范数的三相交流级联系统稳定性判据[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4092-4100.
- LIU Fangcheng, LIU Jinjun, ZHANG Haodong, et al. G-norm and Sum-norm based stability criterion for Three-phase AC cascade systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4092-4100 (in Chinese).
- [35] CESPEDES M, XING Lei, SUN Jian. Constant-power load system stabilization by passive damping[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(7): 1832-1836.
- [36] 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.
- [37] 杨晖, 袁小明. 电力系统机电动态过程中时变幅频内电势激励下的功率特性[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3079-3089.
- YANG Hui, YUAN Xiaoming. Power characteristics with excitation of time-varying amplitude-frequency internal voltages during electromechanical dynamic process in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3079-3089 (in Chinese).
- [38] 龚轩, 袁小明, 胡家兵. 锁相环对锁相环型并网变换器有功/无功电流激励-内电势幅值/频率响应关系的影响机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3904-3916.
- GONG Xuan, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Influence mechanism of PLL on active/reactive current excitation and internal voltage amplitude/frequency response relationship of PLL-based VSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3904-3916 (in Chinese).
- [39] 辛焕海, 李子恒, 董炜, 等. 三相变流器并网系统的广义阻抗及稳定判据[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1277-1292.
- XIN Huanhai, LI Ziheng, DONG Wei, et al. Generalized-impedance and stability criterion for grid-connected converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1277-1292 (in Chinese).
- [40] KIM M, KWASINSKI A. Decentralized hierarchical control of active power distribution nodes[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 934-943.
- [41] 王垚鑫, 李萌, 年珩, 等. 基于 VSC 的功率双向交流直流互联系统直流侧阻抗特性分析及重塑[J/OL]. 中国电机工程学报, 2023: 1-13[2023-10-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230810.1458.005.html>.
- WANG Yaoxin, LI Meng, NIAN Heng, et al. Analysis and reshaping of DC-side impedance characteristic in VSCs-based bidirectional power AC/DC interconnected system[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-13 [2023-10-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230810.1458.005.html> (in Chinese).

附录 A 测试系统拓扑结构图

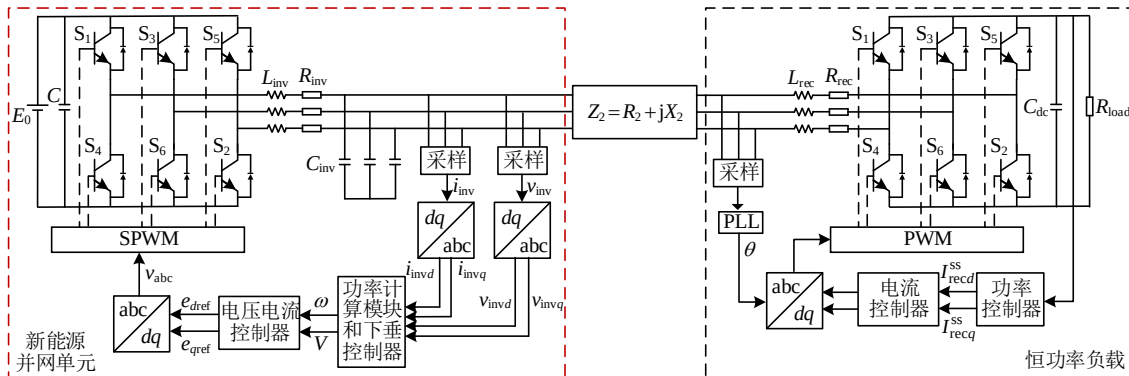


图 A1 测试系统拓扑结构

Fig. A1 Test system topology

附录 B 测试系统的所有仿真参数

表 B1 测试系统参数
Table B1 Parameters of test system

参数		数值
新能源 并网单元	直流电压源 E_0/V	250
	滤波电阻 $R_{inv}/m\Omega$	0.01
	电压控制器比例系数	0.1
	电流控制器比例系数	50
	有功功率下垂控制系数	0.02
	滤波电感 L_{inv}/mH	7.5
	滤波电容 $C_{inv}/\mu F$	100
	电压控制器积分系数	5000
	电流控制器积分系数	100
	无功功率下垂控制系数	0.1
恒功率 负载	额定功率 P/W	110
	电压控制器比例系数	1
	电流控制器比例系数	0.5
	滤波电感 L_{rec}/mH	10
	电压控制器积分系数	1
	电流控制器积分系数	0.5



孙秋野

收稿日期：2023-03-14。

作者简介：

孙秋野(1977)，男，博士，教授，研究方向为能源互联网的建模与优化运行、多能源综合互补优化、网络控制技术、分布式控制技术、分布式优化分析及其在能源互联网、微电网、配电网中的各种应用等，sunqiuye@mail.neu.edu.cn；

隋政麒(1999)，男，博士研究生，研究方向为新型电力系统建模、稳定性分析与控制，szq_neu@outlook.com；

王睿(1993)，男，博士，讲师，研究方向为能源互联网的建模与稳定运行、多能源综合互补优化、分布式发电系统的稳定性分析等，wangrui@mail.neu.edu.cn；

沈千翔(1997)，男，博士研究生，研究方向为电力电子技术及其优化控制，1970526@stu.neu.edu.cn；

李大双(1989)，男，博士研究生，研究方向为含高比例可再生能源的新型电力系统稳定性分析与控制，lidashuang520@126.com；

姚葭(1997)，女，博士研究生，研究方向为新型电力系统稳定性，yaojia_neu@foxmail.com；

孙城皓(1996)，男，博士研究生，研究方向为谐振变换器建模及同步整流控制，1910243@stu.neu.edu.cn。

(编辑 乔宝榆，李新洁)