

“双高”电力系统：一种新的稳定判据和 稳定性分类探讨

孙秋野, 李大双, 王睿, 隋政麒, 姚葭, 沈千翔, 于潇寒

(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁省 沈阳市 110819)

Power System With High Shares of Renewables and Power Electronics: A New Stability Criterion and Classification

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

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

ABSTRACT: With the energy reform and the development of power electronics technology, the trend of high proportion of new energy and high proportion of electronic and electronic equipment ("double high") in the power system is obvious, which brings new power system stability problems. This paper deeply analyzes the common instability factors and stability criteria of "double high" power systems, and explores the essential instability mechanism of system. The system impedance angular stability analysis method is proposed. Based on the proposed stability analysis method, the impedance angle stability criteria of "double high" power systems is constructed from the basic operation requirements of system active power and reactive power balance. The validity and correctness of the proposed stability criteria are verified by building a simulation model. Meanwhile, the stability classifications proposed by IEEE are further discussed. Based on the principle of maintaining the classical classification and the stability criteria constructed, a new stability classification system is proposed, which is helpful to clarify the "double high" power system stability problems and provide guidance for subsequent system planning and stability control.

KEY WORDS: "double high" power systems; impedance angle; stability criterion; stable classification

摘要: 随着能源变革和电力电子技术发展, 高比例新能源和高比例电力电子设备(简称“双高”)在电力系统中比例增高, 带来新的稳定问题。该文对“双高”电力系统的失稳影响因素和稳定判据进行深入剖析, 探索“双高”电力系统的失稳机理, 提出系统阻抗角稳定性分析方法。基于所提出的稳定

性分析方法, 从系统有功功率、无功功率平衡基本运行规则出发, 构建“双高”电力系统的阻抗角稳定判据, 通过搭建仿真模型验证所提稳定判据的有效性和正确性。同时, 对IEEE提出的稳定性分类进行探讨, 在遵循传统稳定性分类原则基础上, 基于所构建的稳定判据, 尝试提出一种新的稳定性分类方法, 希望有助于厘清“双高”电力系统稳定性问题, 为后续系统规划、稳定性控制提供指导。

关键词: “双高”电力系统; 阻抗角; 稳定判据; 稳定分类

0 引言

全球经济和工业的快速发展, 能源需求不断攀升。随着科技进步, 大规模可再生能源经电力电子设备并入电网。预计到2050年全球可再生能源发电量占总量的55%^[1], 中国可再生能源发电量占总量的85%以上^[2]。同时柔性交/直流输电技术的应用及负荷侧的再电气化过程, 促进电力电子设备在电力传输和用户侧的大量使用^[3-4]。总之, 随着风、光等可再生能源的快速发展和源-网-荷的核心设备“电力电子化”转变^[5], 使电力系统朝着“高比例可再生能源”和“高比例电力电子设备”(简称“双高”)的趋势发展^[6]。

相比于同步发电机主导的传统电力系统, 电力电子装置的低惯性、多时间尺度响应特性和弱抗扰性^[7], 使得“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动态特性^[8]。因此, “双高”电力系统的稳定机理与传统电力系统不再一致, 需要针对其新的稳定问题开展基础理论研究, 阐明新型稳定问题失稳机理, 构建稳定性判据, 对“双高”系统稳定性做出合理分类, 为保障系统

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0702200); 广东省基础与应用基础研究基金(2021A15110915)。

National Key R&D Program of China (2018YFA0702200); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2021A15110915).

安全稳定运行提供支持。

高比例新能源和大量电力电子设备在电网中的使用,使“双高”电力系统呈现出新型稳定性问题^[9],主要包括以下几个方面:1)“类机电”低频振荡^[10-11];2)新型宽频带电磁谐振/振荡^[12-13],振荡频率扩展到 $10^{-1}\sim 10^3$ Hz;3)新的大扰动稳定性,包括大扰动同步稳定及故障后电压电磁暂态稳定^[14-15]。

针对“双高”电力系统出现的新型稳定性问题,学者们对其失稳因素进行深入剖析,认为主要的失稳原因是逆变器表现出来的负电阻效应^[16-17],即系统阻抗(逆变器等效阻抗和网侧阻抗之和)的实部为负值,且超过一定值后,系统失稳。构网型变流器并网时产生的次同步谐振跟其和电网之间的联络阻抗有关,不同的控制方法会改变构网型变流器的输出阻抗特性^[18]。双馈风机在恒有功功率输出时,可等效为一个恒定负电阻,故障期间可等效为一个可变负电阻和可变负电抗并联,并且该阻抗值跟并网点的电压和有功无功关系密切^[19]。双馈风机的等值电阻在次同步谐振频率下为负值,并且该负值跟转子本身和控制参数有关^[20],其在次同步频带内的感性负电阻特性与电网容性特性相互作用引发振荡^[21]。直驱风机在次同步振荡频率下表现为“负电阻容抗”,同电网的感抗形成二阶负阻尼振荡回路引起振荡^[22]。文献[23]表明风电场产生振荡的原因是风机控制器呈现负的等值电导(电阻),当其值增加到一定值后系统失稳。

同时,学者们从不同建模角度提出了相应稳定判据,并基于稳定判据对系统稳定性及失稳机理等展开了多方面研究^[24],比较常用的是阻抗分析法。文献[25]通过判断电网阻抗与逆变器输出阻抗的比值是否满足奈奎斯特判据来判据并网系统是否稳定。文献[26]基于 dq 坐标系建立逆变器输出阻抗模型,研究逆变器与电网之间阻抗不匹配导致的失稳机理。文献[27]提出一种广义阻抗判据,认为变流器发生谐振的物理本质是变流器和电网各自的广义阻抗之间发生了串联谐振,是变流器与电网“相角阻抗”相互作用所引起的。文献[28]认为风电场的弱阻尼振荡模式及其稳定性可以通过构建其聚合阻抗的频率特性,由过零点处斜率与对应实部(虚部)的乘积来判断系统是否稳定。文献[29]针对含恒功率负载的弱电网,基于阻抗技术构建了线路阻抗稳定区间。上述研究对“双高”电力系统的失稳机

理进行分析,但仍存在一定的欠缺,未能给出一个能在系统中观察到失稳现象、可供稳定性监测的系统变量。但上述研究表明“双高”电力系统的稳定性跟逆变器等效阻抗和电网阻抗之间的关系密切相关,即系统阻抗蕴含系统稳定相关信息。

通过上述对“双高”电力系统的主要失稳影响因素和稳定判据的分析,系统的稳定性跟系统阻抗相关,特别是逆变器与电网之间阻抗匹配关系密切。表明从系统阻抗这一物理量在系统运行过程中的变化来分析“双高”电力系统的稳定性是可行的。同时,不管是逆变器等效阻抗的幅值或阻抗角发生变化还是网侧阻抗的幅值或阻抗角发生变化,系统阻抗的阻抗角都会反应这种变化,即系统阻抗的阻抗角可以反应“双高”电力系统运行情况,可以通过阻抗角的变化规律判断“双高”电力系统的稳定性。同时,系统动态过程本质上是装备间有功功率和无功功率交换的动态过程^[4],无论是转子角稳定、电压稳定或频率稳定都和系统有功功率平衡、无功功率平衡密切相关^[30]。因此,本文从“双高”电力系统的有功功率平衡、无功功率平衡的系统基本运行要求出发探寻系统保持稳定时系统阻抗的阻抗角应满足什么规律,研究系统失稳机理,构建“双高”电力系统稳定性的有效判据。进一步对IEEE提出的稳定性分类方法进行了探讨,剖析了目前的稳定性分类方法在“双高”电力系统上的不适应性。本文在遵循经典稳定性分类原则基础上,基于所构建的阻抗角稳定判据,尝试提出一种新的稳定性分类方法,有助于厘清“双高”电力系统稳定性问题,为后续系统规划、稳定性控制提供指导。

1 新能源接入弱电网系统拓扑

以风、光为主的新能源常处于偏远地区,使得供电线路阻抗增加,电网表现出弱电网特性^[31]。新能源接入弱电网易发生低频振荡和谐波振荡^[29],因此本文重点研究新能源接入弱电网系统时的失稳机理。采用构网型控制策略的新能源并网变换器接入弱电网的拓扑如图1所示^[32],其中,典型的构网型控制策略包括下垂控制和虚拟同步机控制等等。采用跟网型控制策略的新能源并网变换器接入弱电网的拓扑如图2所示^[33],其中,并网变换器采用锁相环(phase locked loop, PLL)实现电网同步,且认为变换器运行在单位功率因素下,即 $Q_{\text{ref}}=0$ 。

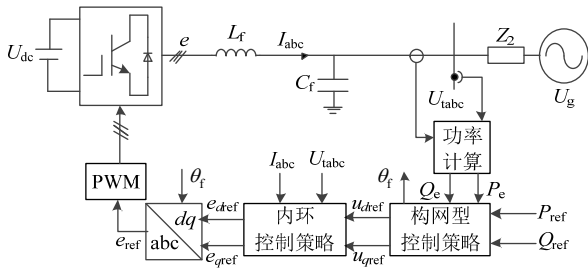


图1 构网型变换器接入弱电网的拓扑和控制策略

Fig. 1 Topology and control of grid-forming converter in weak grid

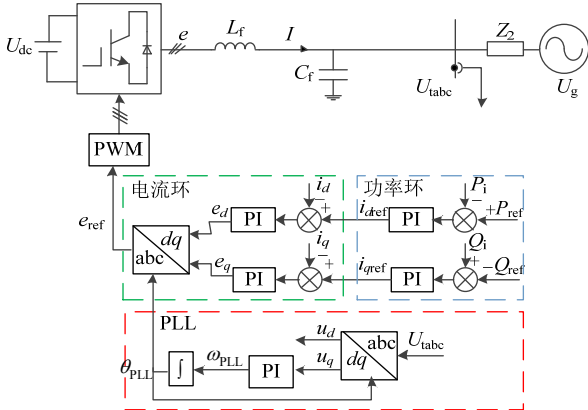


图2 跟网型变换器接入弱电网的拓扑和控制策略

Fig. 2 Topology and control of grid-following converter in weak grid

本文从新能源与电网交换有功功率、无功功率角度研究系统稳定时系统阻抗角变化趋势,更加关注新能源对外功率特性。构网型变换器(grid-forming converter, GFM)对外表现出电压源特性,常采用电压源串联等效阻抗的戴维南(Thevenin)电路表示^[34]。图1可用图3等效电路表示,其中, $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 为变换器输出电压和母线电压; U_1 和 U_2 为电压幅值; Z_1 为GFM等效阻抗, $|Z_1|$ 为其幅值, Z_2 为线路阻抗, $|Z_2|$ 为其幅值, Z 为系统阻抗, $Z=Z_1+Z_2$, $|Z|$ 为其幅值; $\theta_1 = \arctan(X_1 / R_1)$ 为GFM等效阻抗的阻抗角, $\theta_2 = \arctan(X_2 / R_2)$ 为线路阻抗的阻抗角, $\theta = \arctan(X / R)$ 为系统阻抗的阻抗角; δ 为GFM输出电压和母线电压的功角, $\delta = \delta_1 - \delta_g$ 。跟网型逆变器(grid-following converter, GFL)对外表现出电流源特性,常采用电流源并联等效阻抗的诺顿

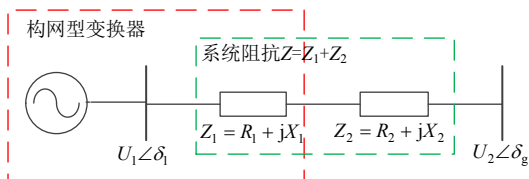


图3 构网型变换器接入弱电网等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of grid-forming converter in weak grid

电路表示^[31]。图2可用图4等效电路表示,其中 $I_c \angle \delta_{PLL}$ 是GFL电源电流, i 是GFL和弱电网间传输电流, Z_0 是GFL等效阻抗, $\theta_0 = \arctan(X_0 / R_0)$ 是GFL等效阻抗的阻抗角, GFL并网系统的系统阻抗为 $Z = (Z_0 Z_2) / (Z_0 + Z_2)$ 。

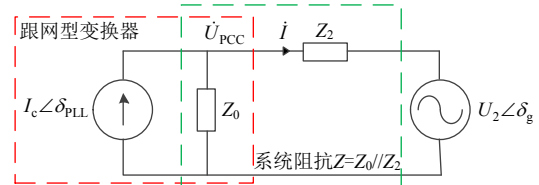


图4 跟网型变换器接入弱电网等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of grid-following converter in weak grid

2 构网型变换器接入弱电网稳定性分析

2.1 有功功率视角下系统稳定性分析

根据图3, GFM输出复功率如式(1)所示:

$$\tilde{S} = \dot{U}_1 I^* = \left(\frac{U_1 \cos \delta + j U_1 \sin \delta}{|Z|} \right) \left(\frac{U_1 \cos \delta + j U_1 \sin \delta - U_2}{\cos \theta + j \sin \theta} \right)^* \quad (1)$$

由式(1)可得 GFM 输出有功功率和无功功率分别如式(2)、(3)所示:

$$P = \frac{U_1}{|Z|} [U_1 \cos \theta - U_2 \cos(\theta + \delta)] \quad (2)$$

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

系统稳定运行时,各节点电压幅值相差较小,为简化分析,忽略 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 的幅值差, GFM 输出有功功率可由式(2)变换为式(4):

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

设系统稳定运行时功角为 δ_0 ,系统阻抗角为 θ_0 ,则负载有功功率 P_0 如式(5)所示:

$$P_0 = \frac{U_1 U_2}{|Z|} [-\cos(\delta_0 + \theta_0) + \cos \theta_0] \quad (5)$$

当阻抗角 θ 在 $[0, \pi]$ 区间变化时, GFM 输出有功功率 P 跟功角 δ 关系曲线(简称有功功率-功角曲线)如图5所示。由图5可知,当阻抗角 θ 增大时, GFM 输出有功功率-功角曲线向左下方移动。随着阻抗角 θ 的增大,使得 GFM 输出有功功率-功角曲线位于负载有功功率 P_0 曲线下方,即 GFM 输出有功功率最大值小于负载有功功率,此时系统有功功率无法达到平衡,系统失去稳定。因此,要使 GFM 并网

系统稳定，其有功功率-功角曲线与负载有功功率 P_0 曲线应有交点，系统有功功率才能平衡，即 GFM 输出有功功率-功角曲线的幅值应大于负载有功功率 P_0 。此时，系统阻抗角 θ 应满足式(6)：

$$\left(\frac{U_1 U_2}{|Z|} + \frac{U_1 U_2}{|Z|} \cos \theta\right) > P_0 \Rightarrow 0 < \theta < \arccos(P'_0 - 1) \quad (6)$$

式中 $P'_0 = -\cos(\delta_0 + \theta_0) + \cos \theta_0$ ， P'_0 是当以 GFM 输出有功功率幅值为基准值时的负载功率标么值。

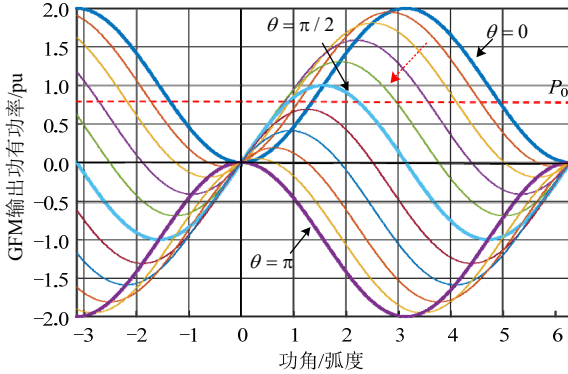


图 5 $\theta \in [0, \pi]$ 时，GFM 有功功率-功角曲线

Fig. 5 Curve of output active power and power angle under $\theta \in 0-\pi$ for GFM

当阻抗角 θ 在 $[\pi, -2\pi]$ 区间变化时，GFM 输出有功功率-功角曲线如图 6 所示。由图 6 可知，当阻抗角 θ 增大时，GFM 输出有功功率-功角曲线向右上方移动。随着阻抗角 θ 的增大，使得 GFM 有功功率-功角曲线再一次与负载有功功率 P_0 曲线存在交点，系统有功功率可达到平衡，系统稳定运行。此时，系统阻抗角 θ 应满足式(7)：

$$\begin{aligned} \left(\frac{U_1 U_2}{|Z|} + \frac{U_1 U_2}{|Z|} \cos \theta\right) &> P_0 \\ \Rightarrow 2\pi - \arccos(P'_0 - 1) &< \theta < 2\pi \end{aligned} \quad (7)$$

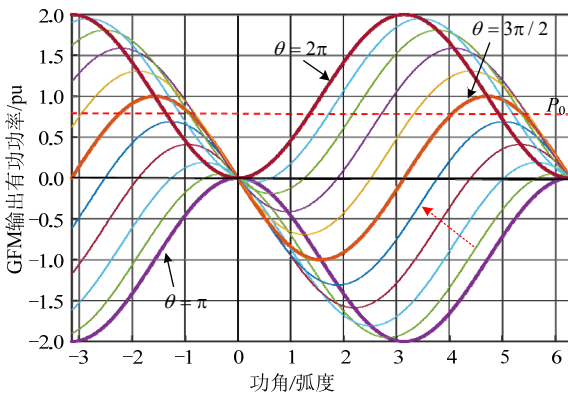


图 6 $\theta \in [\pi, 2\pi]$ 时，GFM 有功功率-功角曲线

Fig. 6 Curve of output active power and power angle under $\theta \in \pi-2\pi$ for GFM

由系统有功功率平衡条件可知，GFM 并网系

统稳定运行时，系统阻抗角需满足式(8)：

$$\begin{cases} 0 < \theta \leq \arccos(P'_0 - 1) \\ 2\pi - \arccos(P'_0 - 1) < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (8)$$

2.2 无功功率视角下系统稳定性分析

2.2.1 阻抗角稳定区间及稳定条件

系统稳定运行时，各节点电压相角差很小，为简化分析，获得系统阻抗角稳定性一般判据，只考虑系统传输无功功率，即认为 $\delta=0$ ，此时 GFM 输出无功功率由式(3)变换为式(9)所示：

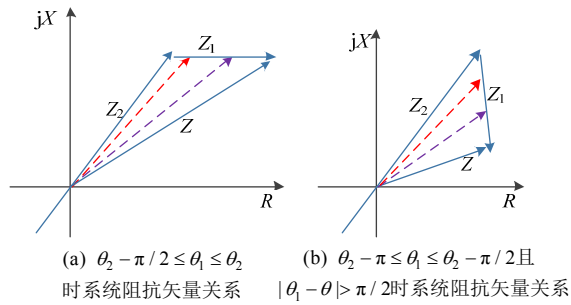
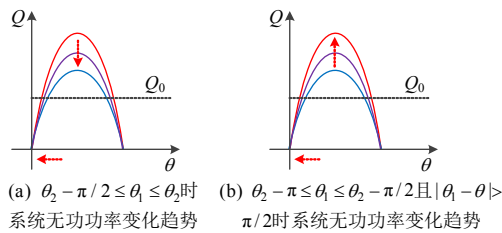
$$Q = \frac{U_1(U_1 - U_2)}{|Z|} \sin \theta \quad (9)$$

线路阻抗 Z_2 在本文分析过程中保持不变，先假设其为阻感性，位于第一象限。通过分析系统阻抗角在不同区间时，使得 GFM 并网系统无功功率发生振荡后回到平衡状态，系统各个阻抗的阻抗角应满足什么关系，从而获得无功功率视角下系统稳定时系统阻抗角区间及对应稳定条件。

1) 系统阻抗角 $0 \leq \theta \leq \theta_2$ 。

由矢量关系可知，此时 Z_1 的阻抗角可在 $\theta_2 - \pi < \theta_1 < \theta$ 区间变化，可以得到图 7 所示的系统阻抗矢量关系。由图 7(a)可知，当 $\theta_2 - \pi/2 \leq \theta_1 \leq \theta_2$ 时，随着 Z_1 幅值增加， Z 的幅值增加， Z 的阻抗角减小， Z 的幅值跟相位的变化方向相反，即 $d|Z|/d\theta < 0$ 。此时，GFM 输出的无功功率随其等效阻抗变化趋势如图 8(a)所示，即 GFM 等效阻抗幅值增加时，系统阻抗幅值增加，GFM 输出的无功功率最大值减小，波形如图中红色曲线往紫色和蓝色曲线变化，系统无功功率再次平衡时系统阻抗角需变大，与由 Z_1 幅值变化引起的系统阻抗角变化趋势相矛盾，系统无功功率不能再次平衡，系统失去稳定。由图 7(b)可知，当 $\theta_2 - \pi \leq \theta_1 \leq \theta_2 - \pi/2$ 且 $|\theta_1 - \theta| > \pi/2$ 时，即 Z_1 和 Z 的阻抗角差值大于 $\pi/2$ ，随着 Z_1 的幅值增加， Z 的幅值减小， Z 的阻抗角减小， Z 的幅值跟相位的变化方向相同，即 $d|Z|/d\theta > 0$ 。此时，GFM 输出的无功功率随其等效阻抗变化趋势如图 8(b)所示，即 GFM 等效阻抗幅值增加时，系统阻抗幅值减小，GFM 输出的无功功率最大值增加，波形如图中蓝色曲线往紫色和红色曲线变化，系统无功功率再次平衡时系统阻抗角需变小，与由 Z_1 幅值变化引起的系统阻抗角变化趋势一致，系统无功功率可以再次平衡，系统可以稳定运行。

根据上述分析可知，系统阻抗角在 $0 \leq \theta \leq \theta_2$ 区

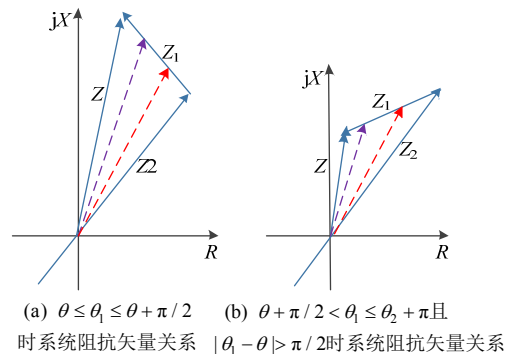
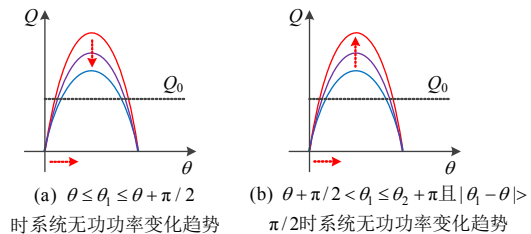
图7 $0 \leq \theta \leq \theta_2$ 时系统阻抗矢量关系Fig. 7 System impedance vector relationship under $0 \leq \theta \leq \theta_2$ 图8 $0 \leq \theta \leq \theta_2$ 时系统无功功率变化趋势Fig. 8 Change trend of system reactive power under $0 \leq \theta \leq \theta_2$

间时,系统稳定条件比失稳条件苛刻,即系统阻抗角落在该区间时,系统更容易失稳。只有满足 $\theta_2 - \pi \leq \theta_1 \leq \theta_2 - \pi/2$ 且 $|\theta_1 - \theta| > \pi/2$ 关系时,系统无功功率才能在发生振荡后回到平衡状态,系统稳定运行。

2) 系统阻抗角 $\theta_2 < \theta \leq \pi/2$ 。

由矢量关系可知,此时 Z_1 的阻抗角可在 $\theta < \theta_1 < \theta_2 + \pi$ 区间变化,可以得到图9所示的系统阻抗矢量关系图。由图9(a)可知,当 $\theta \leq \theta_1 \leq \theta_2 \leq \pi/2$ 时,随着 Z_1 幅值增加, Z 的幅值增加,阻抗角变大,即 $d|Z|/d\theta > 0$ 。此时, GFM 输出的无功功率随其等效阻抗变化趋势如图10(a)所示,即当 GFM 等效阻抗幅值增加时,系统阻抗幅值增加, GFM 输出的无功功率最大值减小,波形如图中红色曲线往紫色和蓝色曲线变化,系统无功功率再次平衡时系统阻抗角需变大,与由 Z_1 幅值变化引起的系统阻抗角变化趋势一致,系统无功可以再次平衡,系统可以稳定运行。由图9(b)可知,当 $\theta + \pi/2 < \theta_1 \leq \theta_2 + \pi$ 且 $|\theta_1 - \theta| > \pi/2$ 时, Z_1 幅值增加, Z 的幅值减小,阻抗角变大,即 $d|Z|/d\theta < 0$ 。此时, GFM 输出的无功功率随其等效阻抗变化趋势如图10(b)所示,当 GFM 等效阻抗幅值增加时,系统阻抗幅值减小,系统传输的无功功率最大值增加,波形如图中蓝色曲线往紫色和红色曲线变化,系统无功功率再次平衡时系统阻抗角

变小,与由 Z_1 幅值变化引起的系统阻抗角变化趋势相矛盾,系统无功功率不能再次平衡,系统失去稳定。

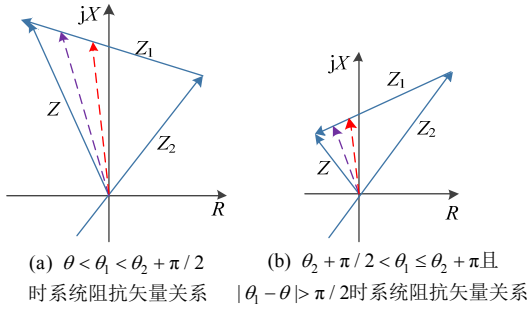
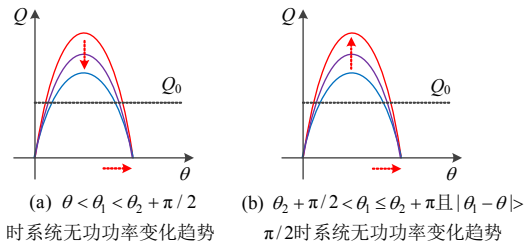
图9 $\theta_2 < \theta \leq \pi/2$ 时系统阻抗矢量关系Fig. 9 System impedance vector relationship under $\theta_2 < \theta \leq \pi/2$ 图10 $\theta_2 < \theta \leq \pi/2$ 时系统无功功率变化趋势Fig. 10 Change trend of system reactive power under $\theta_2 < \theta \leq \pi/2$

通过上述分析可知,当系统阻抗角在 $\theta_2 < \theta \leq \pi/2$ 区间时,系统失稳条件比稳定条件苛刻,即系统阻抗角落在该区间时,系统更容易稳定。只要满足 $|\theta_1 - \theta| > \pi/2$ 关系时,系统无功功率能在发生功率振荡后回到平衡状态,系统稳定运行。

3) 系统阻抗角 $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ 。

由矢量关系可知,此时 Z_1 阻抗角可在 $\theta < \theta_1 < \theta_2 + \pi$ 变化,可以得到图11所示的系统阻抗矢量关系图。由图11(a)可知,当 $\theta < \theta_1 < \theta_2 + \pi/2$ 时, Z_1 幅值增加, Z 的幅值增加,阻抗角增加,幅值跟相位的变化方向相同,即 $d|Z|/d\theta > 0$ 。此时, GFM 输出的无功功率随其等效阻抗变化趋势如图12(a)所示,即 GFM 等效阻抗幅值增加时,系统阻抗幅值增加, GFM 输出的无功功率最大值减小,波形如图中红色曲线往紫色和蓝色曲线变化,系统无功功率再次平衡时系统阻抗角变小,与由 Z_1 幅值变化引起的系统阻抗角变化趋势相矛盾,系统无功功率不能再次平衡,系统失去稳定。由图11(b)可知,当 $\theta_2 + \pi/2 < \theta_1 \leq \theta_2 + \pi$ 且 $|\theta_1 - \theta| > \pi/2$ 时,即 Z_1 和 Z 的阻抗角差值大于 $\pi/2$, Z_1 的幅值增加, Z 的幅值

减小, 阻抗角增加, 幅值跟相位的变化方向相反, 即 $d|Z|/d\theta < 0$ 。此时, GFM 输出的无功功率随其等效阻抗变化趋势如图 12(b), 即 GFM 等效阻抗幅值增加时, 系统阻抗幅值减小, GFM 输出的无功功率最大值增加, 波形如图中蓝色曲线往紫色和红色曲线变化, 系统无功功率再次平衡时系统阻抗角变大, 与由 Z_1 幅值变化引起的系统阻抗角变化趋势一致, 系统无功可以再次平衡, 系统稳定运行。

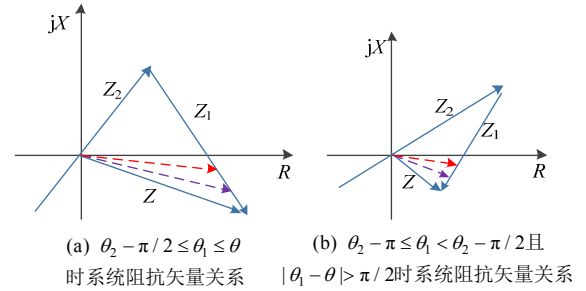
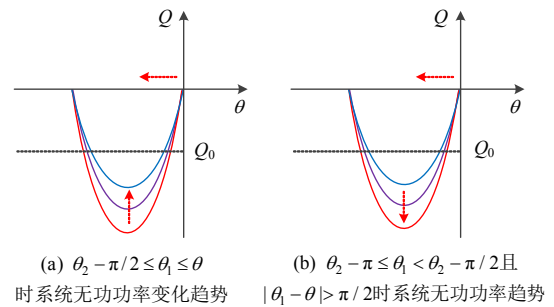
图 11 $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ 时系统阻抗矢量关系Fig. 11 System impedance vector relationship under $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ 图 12 $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ 时系统无功功率变化趋势Fig. 12 Change trend of system reactive power under $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$

通过上述分析可知, 当系统阻抗角在 $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ 区间时, 系统稳定条件比失稳条件苛刻, 即系统阻抗角落在该区间时, 系统更容易失稳。只有满足 $\theta_2 + \pi/2 < \theta_1 \leq \theta_2 + \pi$ 且 $|\theta_1 - \theta| > \pi/2$ 关系时, 系统无功功率才能在发生功率振荡后回到平衡状态, 系统稳定运行。

4) 系统阻抗角 $-\pi/2 \leq \theta < 0$ 。

当系统阻抗角在 $-\pi/2 \leq \theta < 0$ 区间时, 由式(9)可知, 此时无功功率表达式为负值, 表明 GFM 从系统吸收无功功率。由矢量关系可知, 此时 Z_1 阻抗角可在 $\theta_2 - \pi < \theta_1 < \theta$ 变化, 可以得到图 13 所示的系统阻抗矢量关系图。由图 13(a)可知, 当 $\theta_2 - \pi/2 \leq \theta_1 \leq \theta$ 时, Z_1 幅值增加, Z 的幅值增加, 阻抗角绝对值变大, 即 $d|Z|/d\theta > 0$ 。此时, GFM 吸收的无功功率随其等效阻抗变化趋势如图 14(a)所示, 此时 Q_0 为系统提供的恒定无功功率。当 GFM

等效阻抗幅值增加时, 系统阻抗幅值增加, GFM 吸收的无功功率最大值减小, 波形如图中红色曲线往紫色和蓝色曲线变化, 系统无功功率再次平衡时系统阻抗角绝对值变大, 与由 Z_1 幅值变化引起的系统阻抗角变化趋势一致, 系统无功可以再次平衡, 系统可以稳定运行。由图 13(b)可知, 当 $\theta_2 - \pi \leq \theta_1 < \theta_2 - \pi/2$ 且 $|\theta_1 - \theta| > \pi/2$ 时, Z_1 幅值增加, Z 的幅值减小, 阻抗角绝对值变大, 即 $d|Z|/d\theta < 0$ 。此时, GFM 吸收的无功功率随其等效阻抗变化趋势如图 14(b)所示, 当 GFM 等效阻抗幅值增加时, 系统阻抗幅值减小, GFM 吸收的无功功率最大值增加, 波形如图中蓝色曲线往紫色和红色曲线变化, 系统无功功率再次平衡时系统阻抗角绝对值变小, 与由 Z_1 幅值变化引起的系统阻抗角变化趋势相矛盾, 系统无功功率不能再次平衡, 系统失去稳定。

图 13 $-\pi/2 \leq \theta < 0$ 时系统阻抗矢量关系Fig. 13 System impedance vector relationship under $-\pi/2 \leq \theta < 0$ 图 14 $-\pi/2 \leq \theta < 0$ 时系统无功功率变化趋势Fig. 14 Change trend of system reactive power under $-\pi/2 \leq \theta < 0$

通过上述分析可知, 当系统阻抗角在 $-\pi/2 \leq \theta < 0$ 区间时, 系统失稳条件比稳定条件苛刻, 系统阻抗角落在该区间时, 系统更容易稳定。只要满足 $|\theta_1 - \theta| < \pi/2$ 关系时, 系统无功功率能在发生功率振荡后回到平衡状态, 系统稳定运行。

5) 系统阻抗角 $\theta_2 - \pi \leq \theta < -\pi/2$ 。

由矢量关系可知, 此时 Z_1 阻抗角可在 $\theta_2 - \pi < \theta_1 < \theta$ 变化, 可以得到图 15 所示的系统阻

抗矢量关系图。由图 15 可知, 当 Z_1 的幅值增加时, Z 的幅值增加, 阻抗角绝对值变大, 即 $d|Z|/d\theta > 0$ 。此时, GFM 吸收的无功功率随其等效阻抗变化趋势如图 16 所示, 当 GFM 等效阻抗幅值增加时, 系统阻抗幅值增加, GFM 吸收的无功功率最大值减小, 波形如图中红色曲线往紫色和蓝色曲线变化, 系统无功功率再次平衡时系统阻抗角绝对值变小, 与由 Z_1 幅值变化引起的系统阻抗角变化趋势相矛盾, 系统无功功率不能在发生振荡后回到平衡, 系统失去稳定。

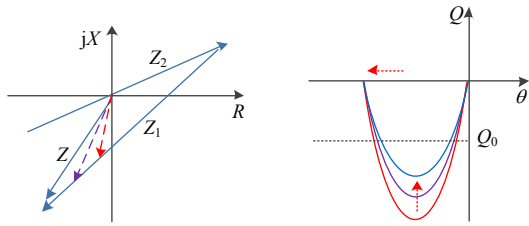


图 15 系统阻抗矢量关系 图 16 系统无功功率变化趋势
Fig. 15 System impedance vector relationship Fig. 16 Change trend of system reactive power

6) 系统阻抗角 $-\pi \leq \theta < \theta_2 - \pi$ 。

由矢量关系可知, 此时 Z_1 阻抗角可在 $\theta < \theta_1 < \theta_2 - \pi$ 变化, 可以得到图 17 所示的系统阻抗矢量关系图。由图 17 可知, 当 Z_1 的幅值增加时, Z 的幅值增加, 阻抗角绝对值变小, 即 $d|Z|/d\theta < 0$ 。此时, GFM 吸收的无功功率随其等效阻抗变化趋势如图 17 所示, 当 GFM 等效阻抗幅值增加时, 系统阻抗幅值增加, GFM 吸收的无功功率最大值减小, 波形如图中红色曲线往紫色和蓝色曲线变化, 系统无功功率再次平衡时系统阻抗角绝对值变小, 与由 Z_1 幅值变化引起的系统阻抗角变化趋势一致, 系统无功功率可以在发生振荡后回到平衡, 系统可以稳定运行。

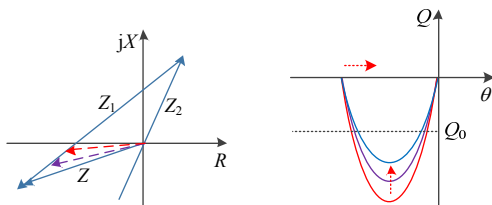


图 17 系统阻抗矢量关系 图 18 系统无功功率变化趋势
Fig. 17 System impedance vector relationship Fig. 18 Change trend of system reactive power

根据上述分析, 要使 GFM 并网系统无功功率发生振荡后可以回到平衡, 维持系统稳定运行, 系统阻抗角区间和对应稳定条件如式(10)和图 19 灰色区间所示。

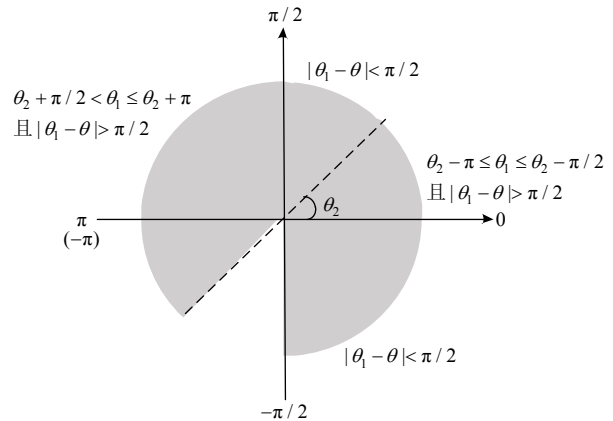


图 19 系统无功功率振荡稳定时, 系统阻抗角区间

Fig. 19 System impedance angle range under system reactive power oscillatory stability

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 < \theta < \theta_2, \theta_2 - \pi \leq \theta_1 \leq \theta_2 - \pi/2 \text{ 且 } |\theta_1 - \theta| > \pi/2 \\ \theta_2 < \theta \leq \pi/2, |\theta_1 - \theta| < \pi/2 \\ \pi/2 \leq \theta \leq \pi, \theta_2 + \pi/2 < \theta_1 \leq \theta_2 + \pi \text{ 且 } |\theta_1 - \theta| > \pi/2 \\ -\pi/2 \leq \theta < 0, |\theta_1 - \theta| < \pi/2 \\ -\pi \leq \theta < \theta_2 - \pi \end{array} \right. \quad (10)$$

2.2.2 GFM 并网系统阻抗角稳定性一般判据

由前文分析可知, 当系统阻抗角在 $0 \leq \theta \leq \theta_2$ 区间时, 满足 $\theta_2 - \pi \leq \theta_1 \leq \theta_2 - \pi/2$ 且 $|\theta_1 - \theta| > \pi/2$ 条件时, $d|Z|/d\theta > 0$; 当系统阻抗角在 $\theta_2 < \theta \leq \pi/2$ 区间时, 满足 $|\theta_1 - \theta| < \pi/2$ 条件时, $d|Z|/d\theta > 0$; 当系统阻抗角在 $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ 区间时, 满足 $\theta_2 + \pi/2 < \theta_1 \leq \theta_2 + \pi$ 且 $|\theta_1 - \theta| > \pi/2$ 条件时, $d|Z|/d\theta < 0$; 当系统阻抗角在 $-\pi/2 \leq \theta < 0$ 区间时, 满足 $|\theta_1 - \theta| < \pi/2$ 条件时, $d|Z|/d\theta > 0$; 当系统阻抗角在 $\theta_2 - \pi \leq \theta < -\pi/2$ 区间时, $d|Z|/d\theta > 0$; 当系统阻抗角在 $-\pi \leq \theta < \theta_2 - \pi$ 区间时, $d|Z|/d\theta < 0$ 。上述对应关系如图 20 所示。

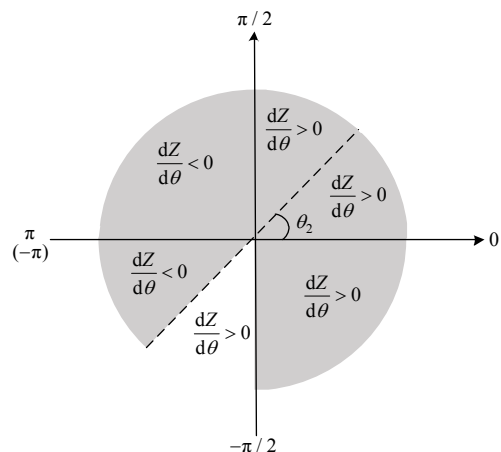


图 20 系统阻抗幅值和阻抗角变化关系

Fig. 20 Relation between system impedance amplitude and impedance angle

由式(9)GFM 输出无功功率跟系统阻抗角表达式可以得到如下关系：

$$\begin{cases} \frac{dQ}{d\theta} > 0, -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2 \\ \frac{dQ}{d\theta} < 0, \pi/2 \leq \theta < 3\pi/2 \end{cases} \quad (11)$$

结合 2.2.1 节系统阻抗角稳定区间和稳定条件分析过程，可以得到 GFM 并网系统阻抗角稳定性一般判据如式(12)所示。

$$\frac{dQ}{d\theta} \frac{d|Z|}{d\theta} > 0 \quad (12)$$

2.2.3 功角影响下阻抗角稳定区间及稳定条件

考虑功角对系统传输无功功率影响时，GFM 输出无功功率由式(3)变换为式(13)所示。

$$\begin{aligned} Q &= \frac{U_1 U_2}{|Z|} [\sin \theta - \sin(\theta + \delta_0)] = - \\ &\frac{2U_1 U_2}{|Z|} \sin\left(\frac{\delta_0}{2}\right) \cos\left(\theta + \frac{\delta_0}{2}\right) = \\ &\frac{2U_1 U_2}{|Z|} \sin\left(\frac{\delta_0}{2}\right) \sin\left(\theta + \frac{\delta_0}{2} - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

由于系统阻抗的幅值和阻抗角关系不受功角影响，即 $d|Z|/d\theta$ 的值不受功角的影响，当功角发生变化时，二者关系如图 20 所示。

当系统功角 δ_0 在 $0 < \delta_0 \leq \pi$ 区间取值时，GFM 输出无功功率和系统阻抗角的关系曲线如图 21 所示。由式(13)和图 21 可知，随着功角的增加 GFM 输出的无功功率幅值增加，波形往左上方移动，波形一个周期里与横轴交点的阻抗角值为 $\theta = (\pi/2 - \delta_0/2), (3\pi/2 - \delta_0/2)$ ，幅值处的阻抗角值为 $\theta = -\delta_0/2, \pi - \delta_0/2$ 。在 $-\delta_0/2 + \pi < \theta < -\delta_0/2 + 2\pi$ 区间，GFM 向系统输出无功功率，在 $-\delta_0/2 + 2\pi <$

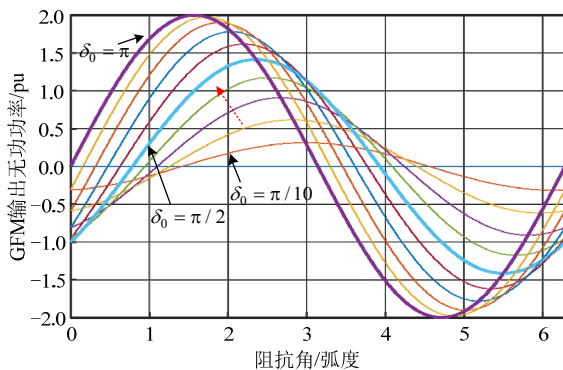


图 21 功角取不同值时，
GFM 输出无功功率和系统阻抗角关系曲线

Fig. 21 Curve of reactive power output of GFM with impedance angle under power angle taking different values

$\theta < -\delta_0/2 + 3\pi$ 区间，GFM 从系统吸收无功功率。

在 $0 \leq \theta \leq 2\pi$ 区间，GFM 输出的无功功率跟系统阻抗角的变化趋势 $dQ/d\theta$ 取值不同。由 GFM 并网系统阻抗角稳定性一般判据(12)可知，系统运行状态不同，即功角不同，系统无功功率振荡稳定时的阻抗角区间不同。

由图 21 可知，当系统阻抗角在 $[-\delta_0/2, \pi - \delta_0/2]$ 区间时， $dQ/d\theta > 0$ ；当系统阻抗角在 $[\pi - \delta_0/2, 2\pi - \delta_0/2]$ 区间时， $dQ/d\theta < 0$ 。上述关系如图 22 所示。

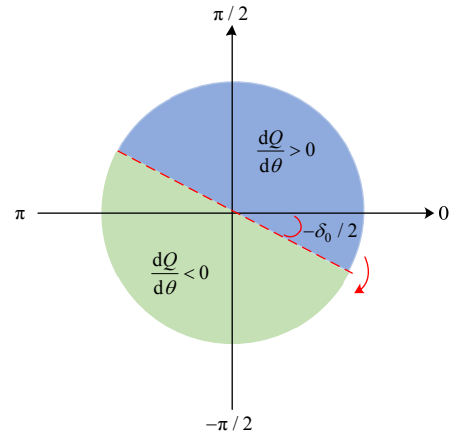


图 22 GFM 输出无功功率和系统阻抗角变化趋势

Fig. 22 Change trend of reactive power output of GFM with impedance angle

由图 20、22 和式(12)得到，GFM 并网系统无功功率振荡稳定时的系统阻抗角区间及相应的稳定条件如式(14)和图 23 中橙色区间所示。

$$\begin{cases} -\pi/2 \leq \theta < -\delta_0/2, \theta_2 - \pi \leq \theta_1 < \theta_2 - \pi/2 \text{ 且 } |\theta_1 - \theta| > \pi/2 \\ -\delta_0/2 \leq \theta < 0, |\theta_1 - \theta| < \pi/2 \\ 0 < \theta < \theta_2, \theta_2 - \pi \leq \theta_1 \leq \theta_2 - \pi/2 \text{ 且 } |\theta_1 - \theta| > \pi/2 \\ \theta_2 < \theta \leq \pi/2, |\theta_1 - \theta| < \pi/2 \\ \pi/2 \leq \theta < -\delta_0/2 + \pi, |\theta_1 - \theta| < \pi/2 \\ -\delta_0/2 + \pi \leq \theta \leq \pi, \theta_2 + \pi/2 < \theta_1 \leq \theta_2 + \pi \text{ 且 } |\theta_1 - \theta| > \pi/2 \\ -\pi \leq \theta < \theta_2 - \pi \end{cases} \quad (14)$$

图 23 中的阻抗角稳定区间可以划分为 7 个区间，但是每个区间的稳定条件及达到该稳定条件的难易程度不同。由式(9)和式(14)及 2.2.1 分析过程可知，区间 I、III 和 VI 的稳定条件达成度最难，即相较于稳定，当系统阻抗角落在该区间时更容易失稳；区间 II、IV 和 V 的稳定条件达成度容易，即相较于失稳，系统更容易稳定；区间 VII 没有附加的稳定条件，即当系统阻抗角落在该区间时，系统稳定。

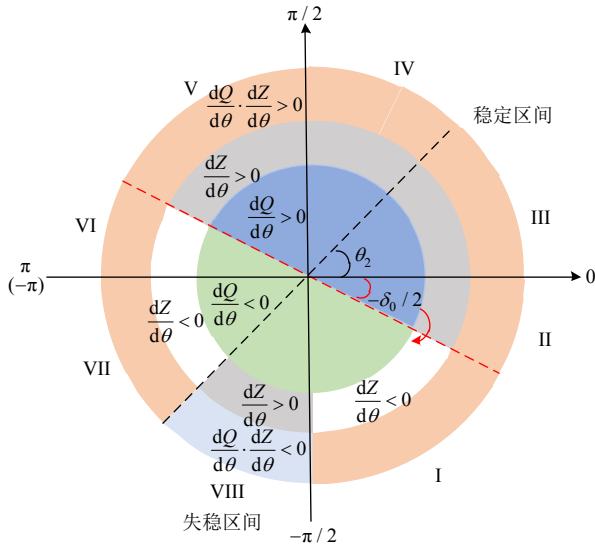


图 23 系统无功功率振荡稳定时阻抗角区间

Fig. 23 Impedance angle range under system reactive power balance oscillatory stability

2.3 系统阻抗角稳定区间及稳定条件

由 2.1 节有功功率视角下系统稳定域分析可知, 系统有功功率平衡时系统阻抗角需满足式(8), 结合图 23, 可得到综合考虑系统有功功率维持平衡和无功功率振荡稳定, GFM 接入弱电网系统的阻抗角稳定区间和相应稳定条件如图 24 所示。

GFM 接入弱电网系统的阻抗角稳定区间和相应稳定条件详细描述如表 1 所示。其中, 角度 $(\theta_2 + \pi)$ 为系统无功功率振荡稳定时系统阻抗角区间在第三象限的边界, $2\pi - \arccos(P'_0 - 1)$ 为系统有功功率平

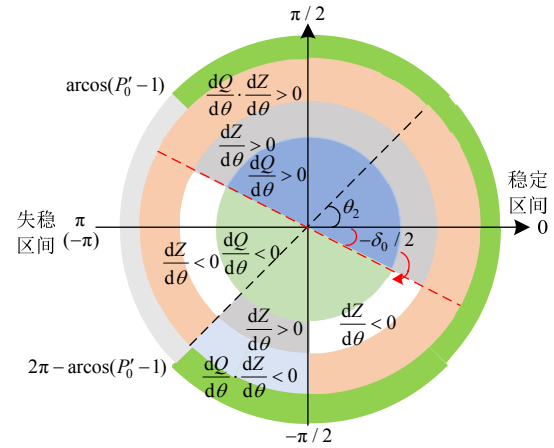


图 24 GFM 接入系统稳定时阻抗角区间

Fig. 24 Impedance angle range of GFM in weak grid system stability

衡时系统阻抗角区间在第三象限的边界。 $\theta_2 + \pi > 2\pi - \arccos(P'_0 - 1)$ 表示系统在第三象限存在系统阻抗角稳定区间, 对应区间为 $[2\pi - \arccos(P'_0 - 1), \theta_2 + \pi]$ 。 $\theta_2 + \pi \leq 2\pi - \arccos(P'_0 - 1)$ 表示系统在第三象限不存在系统阻抗角稳定区间。

表 1 中系统稳定时系统阻抗角区间和相应稳定条件是在线路阻抗呈阻感性状态时获得。当线路阻抗呈容性时, 依据前文分析过程, 可以得到该状态下系统稳定时系统阻抗角区间和相应稳定条件如表 2 所示。其中, 角度 $(\theta_2 + \pi)$ 为系统无功功率振荡稳定时系统阻抗角区间在第二象限的边界, $\arccos(P'_0 - 1)$ 为系统有功功率平衡时系统阻抗角区

表 1 线路阻抗呈阻感性时, 系统阻抗角稳定区间及稳定条件

Table 1 Impedance angle stability range and stability conditions under the line impedance is resistor-inductance

$\theta_2 + \pi > 2\pi - \arccos(P'_0 - 1)$			$\theta_2 + \pi \leq 2\pi - \arccos(P'_0 - 1)$		
区间序号	系统阻抗角区间	稳定条件	区间序号	系统阻抗角区间	稳定条件
I	$[-\pi/2, -\delta_0/2]$	$\theta_2 - \pi \leq \theta_1 < \theta_2 - \pi/2$ 且 $ \theta_1 - \theta > \pi/2$	I	$[-\pi/2, -\delta_0/2]$	$\theta_2 - \pi \leq \theta_1 < \theta_2 - \pi/2$ 且 $ \theta_1 - \theta > \pi/2$
II	$[-\delta_0/2, 0]$	$ \theta_1 - \theta < \pi/2$	II	$[-\delta_0/2, 0]$	$ \theta_1 - \theta < \pi/2$
III	$[0, \theta_2]$	$\theta_2 - \pi \leq \theta_1 \leq \theta_2 - \pi/2$ 且 $ \theta_1 - \theta > \pi/2$	III	$[0, \theta_2]$	$\theta_2 - \pi \leq \theta_1 \leq \theta_2 - \pi/2$ 且 $ \theta_1 - \theta > \pi/2$
IV	$[\theta_2, \pi/2]$	$ \theta_1 - \theta < \pi/2$	IV	$[\theta_2, \pi/2]$	$ \theta_1 - \theta < \pi/2$
V	$[\pi/2, \arccos(P'_0 - 1)]$	$ \theta_1 - \theta < \pi/2$	V	$[\pi/2, \arccos(P'_0 - 1)]$	$ \theta_1 - \theta < \pi/2$
VI	$[2\pi - \arccos(P'_0 - 1), \theta_2 + \pi]$	—	—	—	—

表 2 线路阻抗呈容性时, 系统阻抗角稳定区间及稳定条件

Table 2 Impedance angle stability range and stability conditions under the line impedance is resistor-capacitive

$\theta_2 + \pi > \arccos(P'_0 - 1)$			$\theta_2 + \pi \leq \arccos(P'_0 - 1)$		
区间序号	系统阻抗角区间	稳定条件	区间序号	系统阻抗角区间	稳定条件
I	$[-\pi/2, \theta_2]$	$\theta_2 + \pi/2 \leq \theta_1 \leq \theta_2 + \pi$ 且 $ \theta_1 - \theta > \pi/2$	I	$[-\pi/2, \theta_2]$	$\theta_2 + \pi/2 \leq \theta_1 \leq \theta_2 + \pi$ 且 $ \theta_1 - \theta > \pi/2$
II	$[\theta_2, -\delta_0/2]$	$ \theta_1 - \theta < \pi/2$	II	$[\theta_2, -\delta_0/2]$	$ \theta_1 - \theta < \pi/2$
III	$[-\delta_0/2, 0]$	$\theta_2 + \pi/2 \leq \theta_1 \leq \theta_2 + \pi$ 且 $ \theta_1 - \theta > \pi/2$	III	$[-\delta_0/2, 0]$	$\theta_2 + \pi/2 \leq \theta_1 \leq \theta_2 + \pi$ 且 $ \theta_1 - \theta > \pi/2$
IV	$[0, \pi/2]$	$ \theta_1 - \theta < \pi/2$	IV	$[0, \pi/2]$	$ \theta_1 - \theta < \pi/2$
V	$[\pi/2, \arccos(P'_0 - 1)]$	—	V	$[\pi/2, \theta_2 + \pi]$	—
VI	$[2\pi - \arccos(P'_0 - 1), -\pi/2]$	$\theta_2 + \pi/2 \leq \theta_1 \leq \theta_2 + \pi$ 且 $ \theta_1 - \theta > \pi/2$	VI	$[2\pi - \arccos(P'_0 - 1), -\pi/2]$	$\theta_2 + \pi/2 \leq \theta_1 \leq \theta_2 + \pi$ 且 $ \theta_1 - \theta > \pi/2$

间在第二象限的边界。当 $\theta_2 + \pi > \arccos(P'_0 - 1)$ 时，系统在第二象限的系统阻抗角区间边界为 $\arccos(P'_0 - 1)$ 。当 $\theta_2 + \pi \leq \arccos(P'_0 - 1)$ 时，系统在第二象限的系统阻抗角区间边界为 $(\theta_2 + \pi)$ 。

3 跟网型变换器接入弱电网稳定性分析

由图 4 可以得到 GFL 并网点电压 $\dot{U}_{PCC}$ 的表达式，如式(15)所示：

$$\begin{aligned} \dot{U}_{PCC} &= \frac{Z_0(\omega_g)}{Z_0(\omega_g) + Z_2(\omega_g)} \dot{U}_2 + \frac{Z_0(\omega_{PLL})Z_2(\omega_{PLL})}{Z_0(\omega_{PLL}) + Z_2(\omega_{PLL})} \dot{I}_c \\ \dot{I}_c &= T_g U_2 e^{j(\delta_g + \theta_g)} + T_c I_c e^{j(\delta_{PLL} + \theta_{PLL})} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{cases} T_g = \left| \frac{Z_0(\omega_g)}{Z_0(\omega_g) + Z_2(\omega_g)} \right| \\ T_c = \left| \frac{Z_0(\omega_{PLL})Z_2(\omega_{PLL})}{Z_0(\omega_{PLL}) + Z_2(\omega_{PLL})} \right| \\ \theta_g = \text{phase} \left[\frac{Z_0(\omega_g)}{Z_0(\omega_g) + Z_2(\omega_g)} \right] \\ \theta_{PLL} = \text{phase} \left[\frac{Z_0(\omega_{PLL})Z_2(\omega_{PLL})}{Z_0(\omega_{PLL}) + Z_2(\omega_{PLL})} \right] \end{cases}$$

式中： ω_g 和 ω_{PLL} 分别是电网频率和 PLL 频率，在稳态时， $\omega_g = \omega_{PLL}$ ； θ_g 和 θ_{PLL} 分别是由阻抗 Z_0 和 Z_2 引起的相角偏移。

GFL 和弱电网间传输的电流 $\dot{I}$ 的表达式如式(16)所示：

$$\dot{I} = \frac{Z_0(\omega_{PLL})}{Z_0(\omega_{PLL}) + Z_2(\omega_{PLL})} \dot{I}_c = T_g I_c e^{j(\delta_{PLL} + \theta_g)} \quad (16)$$

GFL 输出复功率如式(17)所示：

$$\begin{aligned} \tilde{S} = \dot{U}_{PCC} \dot{I}^* &= T_g^2 U_2 I_c e^{j(\delta_g - \delta_{PLL})} + \\ &T_g^2 I_c^2 |Z_2(\omega_{PLL})| e^{j(\theta_{PLL} - \theta_g)} \end{aligned} \quad (17)$$

由式(17)可得 GFL 输出的有功功率大小如式(18)所示：

$$\begin{aligned} P &= \frac{|Z_0|^2}{|Z_0 + Z_2|^2} [U_2 I_c \cos(\delta_g - \delta_{PLL}) + I_c^2 |Z_2| \cos \theta_2] = \\ &T_g^2 [U_2 I_c \cos(\delta_g - \delta_{PLL}) + I_c^2 |Z_2| \cos \theta_2] \end{aligned} \quad (18)$$

式中 $\theta_2 = \text{phase}(Z_2)$ 。

当 GFL 并网系统运行在功率平衡点发生功率振荡引起输出功率增大(减小)时，GFL 等效阻抗会发生变化，如系统不能抑制功率振荡，使功率减小(增大)，趋于稳定，则系统发生振荡失稳。同时，本文通过对 GFL 等效阻抗进行实验仿真分析，GFL 的等效阻抗跟其输出电流变化如图 25 所示，即 GFL

等效阻抗的幅值随其输出电流的增大而减小，而其相角不受影响。

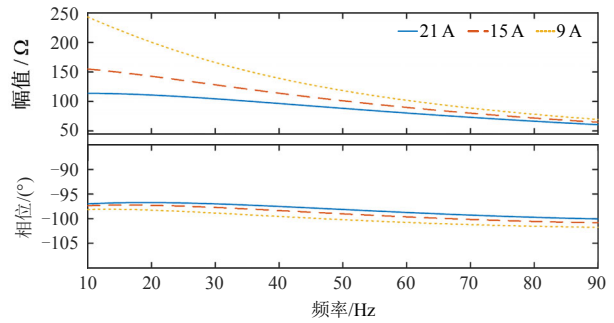


图 25 GFL 等效阻抗随电流的变化关系

Fig. 25 Relationship between GFL impedance and current

当系统发生功率振荡，引起 GFL 输出功率增大，根据图 2 中 GFL 的功率环控制策略可知，GFL 输出电流 I_c 将减小，根据 GFL 等效阻抗跟其输出电流关系，其等效阻抗 Z_0 幅值增大，如果 T_g 减小，由式(18)可知，GFL 输出功率将减小，抑制功率振荡，系统稳定；当系统发生功率振荡，引起 GFL 输出功率减小，根据图 2 中 GFL 的功率环控制策略可知，GFL 输出电流 I_c 将增大，根据 GFL 等效阻抗跟其输出电流关系，其等效阻抗 Z_0 幅值减小，如果 T_g 增大，由式(18)可知，GFL 输出功率将增大，抑制功率振荡，系统稳定。根据上述分析可知，GFL 并网系统发生功率振荡能维持稳定的判据如下：当 T_g 变化跟 GFL 等效阻抗 Z_0 幅值变化呈反比例关系时，系统发生功率振荡后能维持稳定，即 $dT_g / d|Z_0| < 0$ 时，系统功率振荡后能维持稳定。

定义 $Z_{eq} = Z_0 + Z_2$ 为 GFL 并网系统的系统等效阻抗， θ_{02} 为 GFL 等效阻抗 Z_0 和线路阻抗 Z_2 的夹角。GFL 并网系统各阻抗矢量关系如图 26 所示。

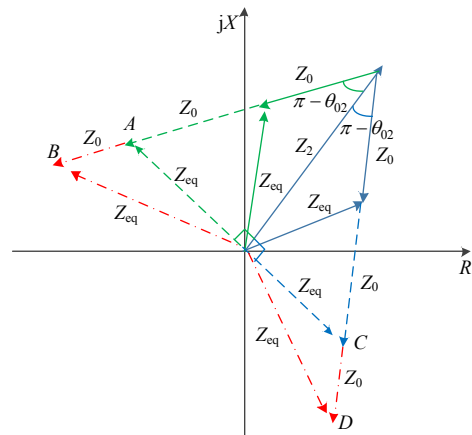


图 26 系统阻抗矢量关系

Fig. 26 System impedance vector relationship

根据图 26，可以得到系统等效阻抗 Z_{eq} 的幅值与 GFL 等效阻抗 Z_0 幅值和线路阻抗 Z_2 幅值的关系

如式(19)所示:

$$|Z_{eq}|^2 = |Z_0|^2 + |Z_2|^2 + 2|Z_0||Z_2|\cos\theta_{02} \quad (19)$$

T_g 与 $|Z_0|$ 的关系如式(20)所示:

$$T_g^2 = \frac{|Z_0|^2}{|Z_0|^2 + |Z_2|^2 + 2|Z_0||Z_2|\cos\theta_{02}} \quad (20)$$

对式(20)关于 $|Z_0|$ 求导如式(21)所示:

$$\frac{dT_g^2}{d|Z_0|} = \frac{2|Z_0||Z_2|(|Z_0|\cos\theta_{02} + |Z_2|)}{(|Z_0|^2 + |Z_2|^2 + 2|Z_0||Z_2|\cos\theta_{02})^2} \quad (21)$$

由式(21)可知, 当 $\pi/2 < \theta_{02} < \pi/2$ 时, $dT_g/d|Z_0| > 0$ 恒成立; 当 $\pi/2 < \theta_{02} < 3\pi/2$ 时, $|Z_0|$ 在 $[0, |Z_2|/\cos\theta_{02}]$ 区间, $dT_g/d|Z_0| > 0$, $|Z_0|$ 在 $[|Z_2|/\cos\theta_{02}, \infty]$ 区间, $dT_g/d|Z_0| < 0$ 。根据图 26 所示的系统各阻抗矢量关系可知, 当 GFL 等效阻抗 Z_0 幅值变化超过 A 点(B 点)时, $|Z_0| > |Z_2|/\cos\theta_{02}$, 此时系统发生功率振荡后能维持稳定, 即当系统等效阻抗 Z_{eq} 落在 $[\theta_2 + \pi/2, \theta_2 + 3\pi/2]$ 区间时, 系统发生功率振荡后能维持稳定。由于 GFL 并网系统的系统阻抗为 $Z = (Z_0 Z_2) / (Z_0 + Z_2) = (Z_0 Z_2) / Z_{eq}$, 则 GFL 并网系统发生功率振荡后能维持稳定, 系统阻抗 Z 的阻抗角区间为 $[\theta_0 + \pi/2, \theta_0 + 3\pi/2]$ 如图 27 橙色区域所示。

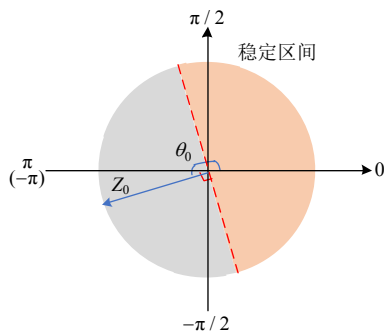


图 27 GFL 并网系统稳定时系统阻抗角区间

Fig. 27 Impedance angle range of GFL in weak grid system stability

4 “双高”电力系统失稳机理分析

4.1 基于阻抗角稳定判据的“双高”电力系统失稳机理分析

4.1.1 GFM 并网系统失稳机理分析

假设 GFM 等效阻抗 Z_1 的阻抗角 θ_1 大于线路和负载等效阻抗 Z_2 的阻抗角 θ_2 , 且 Z_1 的实部和虚部均为正值。系统稳定运行时, 系统阻抗 Z 落在图 23 的区间 IV, 即 $\theta_2 < \theta < \pi/2$ 。当系统出现扰动, GFM 运行状态发生变化, 其等效阻抗 Z_1 随之改变, 其实

部发生明显变化, 虚部保持感性或变化不大。当实部变为负值, 随着该负值的增加, Z_1 的阻抗角 θ_1 和系统阻抗 Z 的阻抗角 θ 的差值不断变大, 当 $\theta_1 - \theta > \pi/2$ 时, $d|Z|/d\theta < 0$, 根据 GFM 并网系统阻抗角稳定性一般判据式(12), 系统失稳。

4.1.2 GFL 并网系统失稳机理分析

当系统出现功率扰动, GFL 运行状态发生变化, 其等效阻抗 Z_0 的幅值随之改变。如图 26 所示, 如果 GFL 等效阻抗 Z_0 的幅值变化和 T_g 的变化满足如下关系时: $dT_g/d|Z_0| > 0$, 造成系统功率振荡持续发散, 系统失去稳定。

通过上述分析可知, 本文所提出的基于系统阻抗角的“双高”电力系统稳定判据可以正确阐释系统失稳过程。

4.2 常见失稳现象解释

本文所提出的“双高”电力系统稳定判据不仅可以对系统失稳机理进行合理解释, 同时对目前常见的失稳现象进行合理阐述。

1) 构网型变流器的稳定裕度随着电网强度的增强而变小^[35]。

使用阻抗角稳定判据解释如下: 电网强度越大, 则线路阻抗 Z_2 的幅值越小, 系统阻抗 Z 和 Z_1 的相角差就越小, 即 Z 越靠近 Z_1 。变流器在运行时, 表现为负阻抗特性, 所以在该情况下, Z 易落于图 23 中的 VI 区间。由前面分析可知, 当系统阻抗位于 VI 区间时, 相较于稳定, 系统更易失稳。然而, 当电网强度越弱, 意味着线路阻抗 Z_2 的幅值越大, 系统阻抗 Z 更靠近 Z_2 , 不易受 Z_1 变化的影响。此时, 系统阻抗更易落在图 23 中的 IV 区间。由前面分析可知, 当系统阻抗位于 IV 区间时, 系统更易稳定。

2) 跟网型变流器的稳定裕度随着电网强度的增强而变大^[27]。

使用阻抗角稳定判据解释如下: 电网强度越大, 线路阻抗 Z_2 的幅值越小, 则 $|Z_2|/\cos\theta_{02}$ 的值越小, $[|Z_2|/\cos\theta_{02}, \infty]$ 区间越大, 即系统阻抗 Z 更容易落入稳定区, 系统稳定性越强。

3) 纯感性电网中的稳定性最差^[36]。

使用阻抗角稳定判据解释如下: Z_1 和 Z_2 的相角差越小, Z 的幅值随阻抗角的增加, 其幅值增加越快, 新能源发出或者吸收的无功功率变化越大, 系统无功功率越容易失去平衡。当 Z_2 的感性分量越大时, Z_1 与 Z_2 的相角差越小, 根据上述分析, 系统越

容易失稳。并且由图 23 可知, 电网越偏感性, Z_2 的阻抗角 θ_2 越大, 即区间 III 越大, 失稳区间越大, 区间 IV 越小, 稳定区间越小。

4) 变流器并网的振荡问题随其输出有功功率的增加而增加^[37]。

使用阻抗角稳定判据解释如下: 由图 23 可知, 当新能源输出有功功率增加时, 功角 δ_0 增大, 则稳定区间 V 减小, “双高”电力系统发生振荡的风险增加。

4.3 结论推广到多机系统讨论

本文基于单变换器接入弱电网系统构建 “双高” 电力系统阻抗角稳定判据, 然而在多逆变电源构成的多机系统中, 可以通过将系统划分为源荷两部分子系统, 得到等效双端网络系统, 各子系统根据矢量关系获得各自等效阻抗, 将源荷子系统的等效阻抗合成得到系统阻抗, 依据本文在单变换器接入弱电网系统分析过程, 可以使用系统阻抗角分析多机系统的稳定性。

综上所述, 本文所提出的 “双高” 电力系统阻抗角稳定判据可以推广到多机系统中进行稳定性

分析, 但多机系统相比于单机系统要复杂的多, 各逆变器电源之间的相互作用如何影响阻抗角稳定性, 如何构建准确的源荷两端等效模型等是未来研究内容。

5 “双高” 电力系统稳定性分类探讨

5.1 经典稳定性分类

针对传统同步发电机主导的电力系统稳定问题, 2004 年 IEEE 和 CIGRE 共同组建 IEEE/CIGRE 稳定性术语与定义联合工作小组, 发布 “电力系统稳定性定义与分类” 报告^[38], 提出了经典的稳定性定义与分类。该分类将传统电力系统稳定性分为 3 大类, 即频率稳定性(frequency stability)、电压稳定性(voltage stability)和转子角稳定性(rotor angle stability), 同时每个稳定性大类下按照扰动大小分为小扰动稳定和大扰动稳定, 按时间跨度分为短期稳定和长期稳定, 如图 28 左侧虚线框所示。经典稳定性分类遵循以下原则: 1) 导致不稳定模式的物理性质, 可以观察到不稳定的主要系统变量; 2) 扰动大小; 3) 时间跨度。

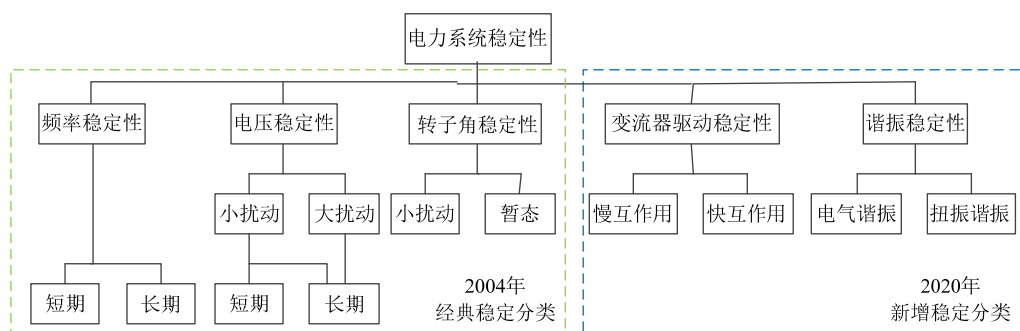


图 28 IEEE 电力系统稳定分类

Fig. 28 IEEE classification of power system stability

5.2 拓展的稳定性分类

随着高比例可再生能源和高比例电力电子设备的发展趋势, “双高” 电力系统呈现出不同于传统同步发电机主导的稳定问题, IEEE/CIGRE 于 2020 年发布了新的技术报告^[39], 在原有稳定性分类的基础上新增了变流器驱动稳定和谐振稳定, 对电力系统稳定性进行扩展, 涵盖了电力电子设备引发的稳定问题, 如图 28 右侧虚线框所示。变流器驱动稳定性主要是由变流器接口设备控制过程的多尺度引起的, 按振荡频率分为慢相互作用与快相互作用。谐振稳定性又分为电气谐振与扭振谐振, 前者主要指同步发电机与串补线路的感应发电机效应, 后者主要指同步发电机的轴系扭振。

然而, IEEE/CIGRE 提出的新稳定性分类存在以下值得探讨的问题: 1) 扩展的两类稳定性分类不再采用表征系统失稳的系统变量来区分, 而是使用引起失稳的设备或失稳原因来表示, 跟经典稳定性分类存在标准不统一, 内涵不清的问题^[9]; 2) 扩展的稳定性分类无法提供可测量、量化和稳定性判别依据的系统变量; 3) 部分稳定问题分类标准模糊, 例如 “逆变器等效阻抗与线路电容间谐振” 与 “风电场等效阻抗与串联电容之间谐振” 失稳本质一样, 但被分别归为 “换流器驱动稳定” 和 “谐振稳定” 中, 造成分类标准不明确^[40]。

针对 IEEE/CIGRE 提出的扩展稳定性分类, 已有学者进行了相关讨论, 并提出了相应的稳定性分

类方法。文献[9]深度剖析 IEEE/CIGRE 提出的稳定性分类问题，在经典分类的基础上增加一个稳定问题频段，分为工频稳定和非工频稳定，然而该分类侧重在稳定问题出现的频段，没有针对对象区分。文献[30]从系统基本运行机制出发，将电力系统稳定性分为电压的幅值稳定和频率稳定两类，然而该分类过于笼统，不利于根据稳定性分类采取对应的控制措施。文献[40]结合我国电网实际情况，提出电力系统安全稳定性的分类框架，该分类将同步发电机和换流器主导的稳定性完全分开，造成分类过于复杂，易产生稳定问题难以归类现象。文献[41]基于系统主导输出变量，将电力系统稳定性分为相位稳定、幅值稳定、等幅相稳定和频率稳定，然而“双高”电力系统的控制时间尺度范围大，各变量相互耦合严重，很难区分一种稳定问题是由哪个输

出变量主导。上述提出的电力系统稳定性分类方法，在针对“双高”电力系统出现的新型稳定问题，缺少可供稳定性监测的系统变量，无法提供稳定判别依据。由于对引起“双高”电力系统新型稳定问题机理认识不明，目前所提出的“双高”电力系统稳定性分类框架都无法令人信服。所以需要从“双高”电力系统新型稳定问题的失稳机理出发，在此基础上，对“双高”电力系统的稳定性做出合理的分类。

5.3 推荐的稳定性分类框架

根据上述讨论，结合所提出的阻抗角稳定性判据，本文尝试提出一种适合“双高”电力系统的稳定性分类框架，如图 29 所示。与 IEEE/CIGRE 提出的电力系统稳定性分类相比，主要有以下几个方面的变化：

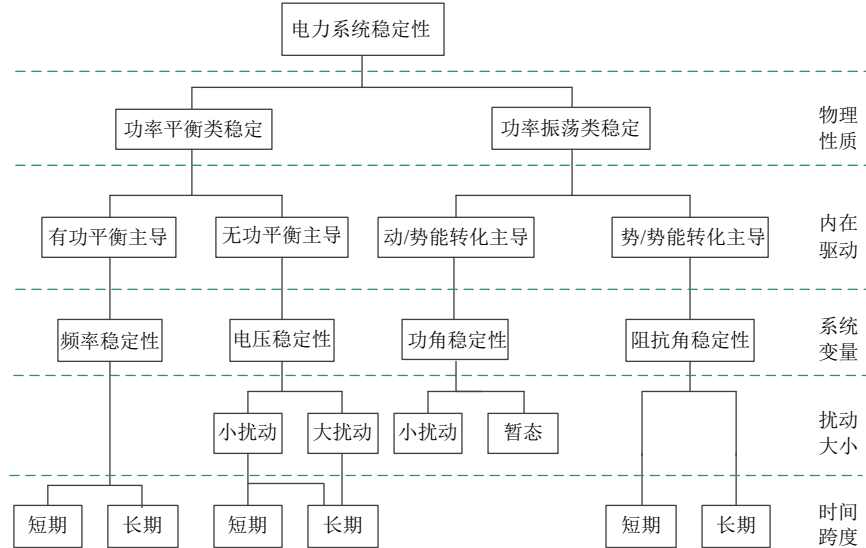


图 29 推荐的电力系统稳定性分类

Fig. 29 Proposed classification of power system stability

1) 增加了 2 个分层。一个分层是根据系统产生不稳定模式的物理性质，将电力系统稳定性分为功率平衡类稳定和功率振荡类稳定。功率平衡类稳定是指系统能保持功率平衡，并能有效地将需求功率分配给各个电源，使系统满足运行要求的能力。功率平衡类稳定强调的是电源端发出功率和负载端消耗功率能否维持平衡，反映系统功率供需平衡能力。功率振荡类稳定是指系统在功率平衡点发生波动或振荡时，依赖自身的控制调节及系统结构，使振荡能量在系统中相互转化，消纳不平衡能量，使系统功率回到平衡，持续稳定运行的能力。功率振荡类稳定强调的是系统能否消纳振荡能量，反映系统阻尼大小情况，如系统阻尼足够或者阻抗匹

配，则振荡越来越小，功率可恢复平衡，系统稳定运行；如系统阻尼不足或者阻抗不匹配，导致系统能量在交换过程中存在放大因素，则振荡越来越大，功率失去平衡，系统失稳。另一个分层是根据引起系统稳定问题的内在驱动力，分为有功功率平衡主导稳定、无功功率主导稳定、动/势能转化主导稳定和势/势能转化主导稳定。有功功率和无功功率的不平衡都将引起相关稳定问题，因此，功率平衡类稳定细分为有功功率平衡主导稳定和无功功率平衡主导稳定。电力系统中时动能和势能，以及势能和势能都在时刻相互转化，任何一方转化的失衡都将引起相应稳定问题。因此，本文将功率振荡类稳定细分为动能和势能相互转化的动/势能转化主

导稳定,及势能和势能相互转化的势/势能转化主导稳定。

2) “双高”电力系统中频率稳定和电压稳定耦合较严重,二者都受有功功率和无功功率平衡的影响,但在逆变器并网控制中,大量采用 P - f 和 Q - V 控制策略,频率稳定主要受系统有功功率平衡影响,电压稳定主要受系统无功功率平衡影响。考虑主要因素,忽略次要因素,本文将频率稳定视为受有功功率平衡主导,电压稳定视为受无功功率平衡主导。功角稳定性指电力系统的同步发电机(或变换器单元)在受到干扰后保持同步的能力,主要受转子机械动能(或变换器的控制器等效虚拟动能)和外部势能在动态过程中的转化影响。因此,将其归类为功率振荡类稳定。阻抗角稳定性主要受并网变换器等效阻抗和网侧阻抗共同影响,而并网变换器的等效阻抗和其内部电感、电容及控制参数相关,在动态过程中表现为内势能,网侧电感、电容参数在动态过程中表现为外势能。在动态过程中,阻抗角稳定性主要受变换器本身表现出的内势能和网侧外势能相互转化影响。阻抗角稳定性反映的是系统在功率平衡点的振荡稳定能力,因此将其归类为功率振荡类稳定。

3) 采用阻抗角稳定性替换 IEEE/CIGRE 2020 年提出的变流器驱动稳定和谐振稳定。根据 5.2 节讨论,扩展的两类稳定性分类跟经典稳定性分类不统一,没有采用具体系统变量进行区分,无法提供可进行稳定量化的指标。而系统阻抗角蕴含系统稳定信息,便于观测、量化,可用于稳定性判别依据。同时,阻抗角也是系统中可以测量的物理量,跟频率、电压、功角保持了统一。按时间跨度分为了短期和长期。该分类与传统稳定性分类保持高度一致,使得整个“双高”电力系统稳定性分类框架清晰,标准统一。

6 阻抗角稳定判据仿真验证

6.1 GFM 并网系统阻抗角稳定判据验证

为验证本文所提出的 GFM 并网系统阻抗角稳定判据的正确性,搭建了附图 A1 所示的仿真系统,参数如附表 B1 所示。该仿真模型为一个采用下垂控制的逆变单元经输电线路向恒有功功率负载供电系统。GFM 等效阻抗经测量为 $Z_1 = -1.4766 + j0.3416\Omega$, $\theta_1 = 2.90 \text{ rad}$ 。节点 1 和 2 的电压幅值为 220 V,系统稳定运行时的功角大小为 $\delta_0 = 0.11 \text{ rad}$ 。

通过改变输电线路参数,即改变 Z_2 的大小,使系统阻抗 Z 发生变化。观察系统稳定情况,验证所提阻抗角稳定判据的正确性。

1) 线路阻抗 $Z_2 = 1 + j0.0314\Omega$ 。

根据 2.3 节分析,此时系统稳定时阻抗角区间及稳定条件如式(22)和图 30 所示。根据 GFM 等效阻抗和线路阻抗参数可计算系统阻抗 $Z = -0.4766 + j0.373\Omega$, 阻抗角 $\theta = 2.48 \text{ rad}$, Z_1 和 Z 的阻抗角差值 $|\theta_1 - \theta| = 0.42 < \pi/2$ 。由图 30 可知,此时系统阻抗角位于稳定区间 V 且满足稳定条件,系统稳定。

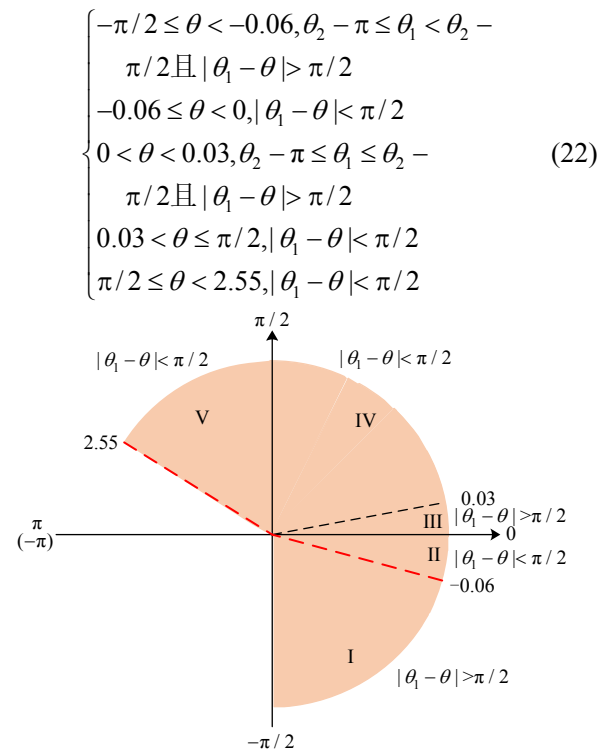


图 30 系统稳定时阻抗角区间及稳定条件

Fig. 30 Impedance angle range and stability conditions when the system is stable

图 31、32 为母线 2 的电压和电流波形。由图 31、32 可知,系统经过启动阶段后电压电流波形平稳,系统稳定运行。

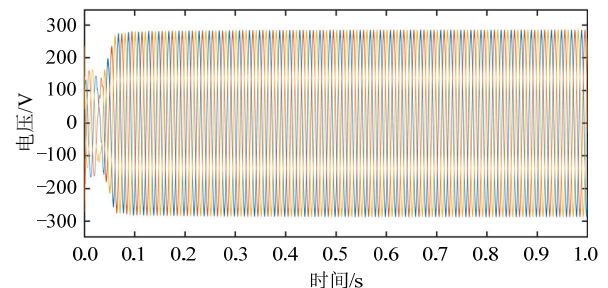


图 31 母线 2 的电压波形

Fig. 31 Voltage waveform of bus 2

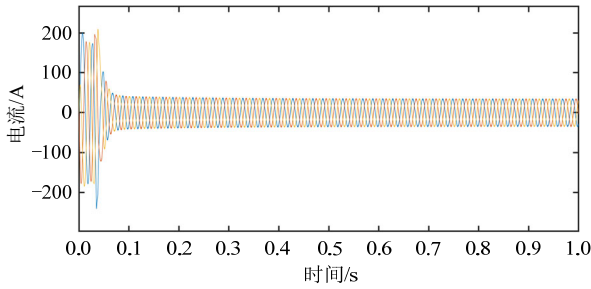
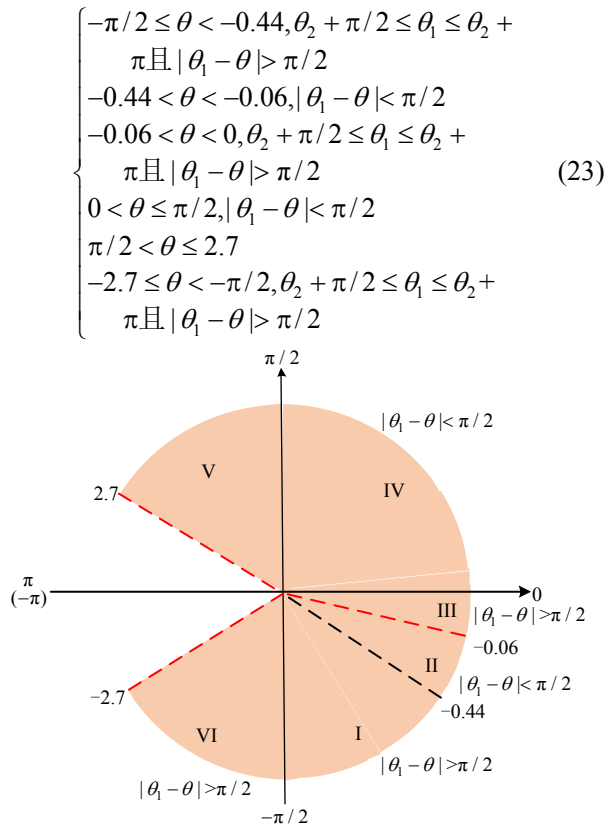


图 32 母线 2 的电流波形

Fig. 32 Current waveform of bus 2

2) 线路阻抗 $Z_2 = 1.3 - j0.6065 \Omega$ 。

根据 2.3 节分析, 此时系统稳定时阻抗角区间及稳定条件如式(23)和图 33 所示。根据 GFM 等效阻抗和线路阻抗参数可计算系统阻抗 $Z = -0.1766 - j0.2106 \Omega$, 阻抗角 $\theta = -2.16 \text{ rad}$, Z_1 和 Z 的阻抗角差值 $|\theta_1 - \theta| = 1.22 < \pi/2$ 。由图 33 可知, 此时系统阻抗角虽然位于稳定区间 VI, 但是不满足稳定条件 $|\theta_1 - \theta| > \pi/2$, 系统失稳。图 34、35 为母线 2 的电压和电流波形, 系统失稳。



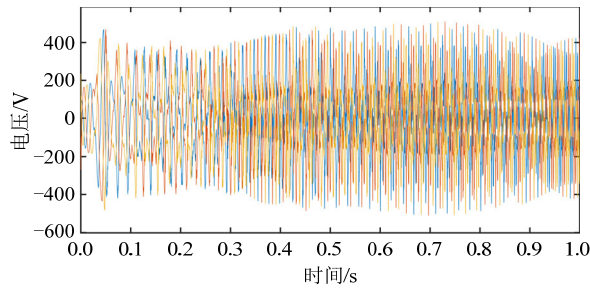


图 37 母线 2 的电压波形
Fig. 37 Voltage waveform of bus 2

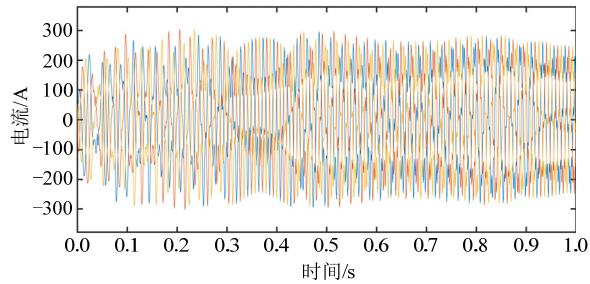


图 38 母线 2 的电流波形
Fig. 38 Current waveform of bus 2

表 3 对上述仿真结果进行了汇总,对比表 1 和表 2 总结的系统稳定时系统阻抗角区间和对应稳定条件,验证了所提出 GFM 并网系统阻抗角稳定判据的正确性。

表 3 阻抗角稳定判据仿真结果
Table 3 Simulation results of impedance angle stability criterion

线路阻抗	线路阻抗性质	系统阻抗角	阻抗角区间	稳定性	失稳原因
$1+j0.0314$	阻感	2.48 rad	V	稳定	—
$1.3-j0.6065$	阻容	-2.16 rad	VI	失稳	$ \theta_1 - \theta < \frac{\pi}{2}$
$1.5-j0.3370$	阻容	0.19 rad	IV	失稳	$ \theta_1 - \theta > \frac{\pi}{2}$

6.2 GFL 并网系统阻抗角稳定判据验证

为验证本文所提出的 GFL 并网系统阻抗角稳定判据的正确性,依据图 2 搭建仿真系统,参数如附表 B2 所示。GFL 等效阻抗经测量为 $Z_0=6.2574-j31.7536\Omega$, $\theta_0=4.52 \text{ rad}$ 。通过改变输电线路参数,即改变 Z_2 的大小,使系统阻抗 Z 发生变化。观察系统稳定情况,验证所提阻抗角稳定判据的正确性。

1) 线路阻抗 $Z_2 = 0.01 + j0.1256\Omega$ 。

此时 GFL 并网系统的系统阻抗 $Z=0.01+j0.1261\Omega$, 其阻抗角为 $\theta=1.48 \text{ rad}$, $\theta_0-\theta=3.04>\pi/2$ 。根据 3 节 GFL 并网系统阻抗角稳定判据及系统阻抗角稳定区间可知,此时系统阻抗位于稳定区间,系统稳定。图 39、40 为 GFL 并网点电压和系统电流,系统运行稳定。

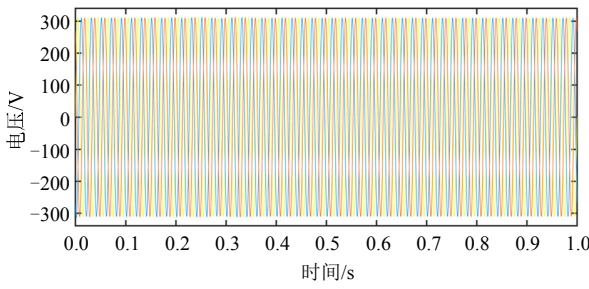


图 39 U_{PCC} 电压波形
Fig. 39 Voltage waveform of U_{PCC}

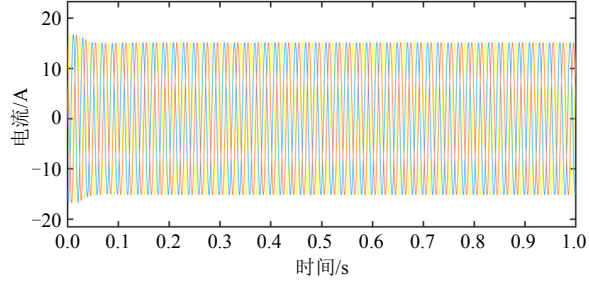


图 40 系统电流波形
Fig. 40 System current waveform

2) 线路阻抗 $Z_2 = 0.1 + j1.256\Omega$ 。

此时 GFL 并网系统的系统阻抗 $Z=0.09+j1.3069\Omega$, 其阻抗角为 $\theta=1.50 \text{ rad}$, $\theta_0-\theta=3.02>\pi/2$ 。根据 3 节 GFL 并网系统阻抗角稳定判据及系统阻抗角稳定区间可知,此时系统阻抗位于稳定区间,系统稳定。图 41、42 为 GFL 并网点电压和系统电流,系统运行稳定。

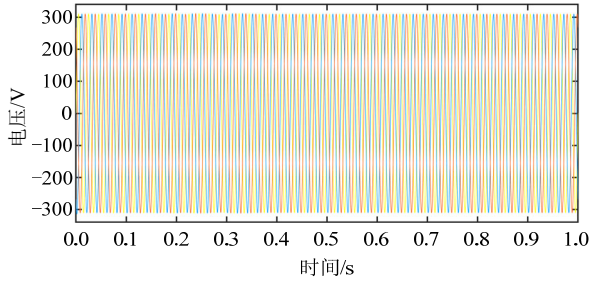


图 41 U_{PCC} 电压波形
Fig. 41 Voltage waveform of U_{PCC}

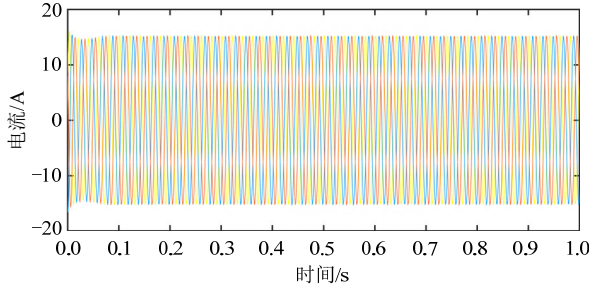


图 42 系统电流波形
Fig. 42 System current waveform

3) 线路阻抗 $Z_2 = 22.88 + j22.76\Omega$ 。

此时 GFL 并网系统的系统阻抗 $Z=49.05-j26.18\Omega$ ，其阻抗角为 $\theta=5.79\text{ rad}$ ， $\theta-\theta_0=1.27>\pi/2$ 。

根据 3 节 GFL 并网系统阻抗角稳定判据及系统阻抗角稳定区间可知，此时系统阻抗不在稳定区间，系统失稳。图 43、44 为 GFL 并网点电压和系统电流，系统失稳。

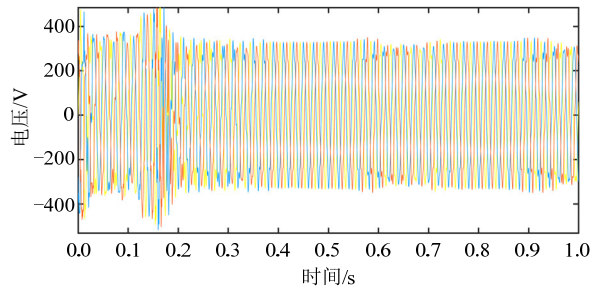


图 43 U_{PCC} 电压波形
Fig. 43 Voltage waveform of U_{PCC}

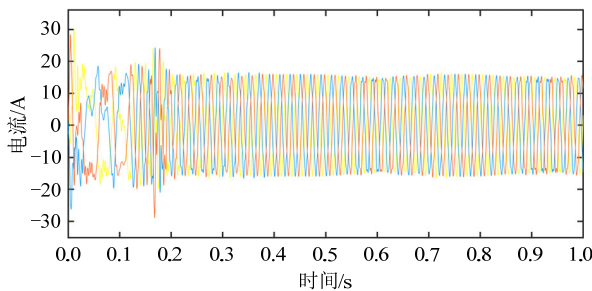


图 44 系统电流波形
Fig. 44 System current waveform

表 4 对上述仿真结果进行了汇总，依据 3 节 GFL 并网系统稳定时系统阻抗角区间，验证所提出 GFL 并网系统阻抗角稳定判据的正确性。

表 4 阻抗角稳定判据仿真结果
Table 4 Simulation results of impedance angle stability criterion

线路阻抗/ Ω	系统阻抗角/rad	$ \theta_0-\theta $	稳定性
$0.01+j0.1256$	1.48	3.04	稳定
$0.1+j1.256$	1.50	3.02	稳定
$22.88+j22.76$	5.79	1.27	失稳

7 结论

针对目前“双高”电力系统出现的新型稳定问题失稳机理不明，稳定判据不统一，稳定性分类不合理现状，本文深入分析“双高”系统失稳现象、失稳影响因素，从维持系统有功功率和无功功率平衡本质要求出发，提出有效判断“双高”电力系统稳定的阻抗角稳定判据，得到了系统稳定时的阻抗角区间，从本质上揭示“双高”系统失稳的机理。同时，对 IEEE 最新扩展的稳定

性分类方法进行探讨，提出一种新的分类方法，在原有的分类基础上，新增表征不稳定模式的物理性质分层和引起系统失稳的内在驱动力分层，同时使用阻抗角稳定性替代变流器驱动稳定性和谐振稳定性，维持了经典稳定性分类的原则，使得整个稳定性分类结构清晰，标准统一，为定位失稳原因、采取稳定控制策略提供帮助。

参考文献

[1] IRENA . Global renewables outlook : energy transformation 2050[R] . Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2020.

[2] 国家发展和改革委员会能源研究所，能源基金会. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究[R]. 北京：国家发展和改革委员会能源研究所，2015.

Energy Research Institute of National Development and Reform Commission, Energy Foundation. China 2050 high renewable energy penetration scenario and roadmap study[R]. Beijing: Energy Research Institute of National Development and Reform Commission , 2015(in Chinese).

[3] 董旭，张峻樑，王枫，等. 风电经架空柔性直流输电线路并网的交直流故障穿越技术[J]. 电力系统自动化，2016，40(18): 48-55.

DONG Xu, ZHANG Junjie, WANG Feng, et al. AC and DC Fault Ride-through Technology for Wind Power Integration via VSC-HVDC Overhead Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016，40(18): 48-55(in Chinese).

[4] 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).

[5] 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).

[6] 杨鹏，刘锋，姜齐荣，等. “双高”电力系统大扰动稳定性：问题、挑战与展望[J]. 清华大学学报：自然科学版，2021，61(5): 403-414.

YANG Peng, LIU Feng, JIANG Qirong, et al. Large-disturbance stability of power systems with high

- penetration of renewables and inverters: phenomena, challenges, and perspectives[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2021, 61(5): 403-414(in Chinese).
- [7] 肖先勇, 郑子萱. “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统: 贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 47-59.
XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59(in Chinese).
- [8] 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): 7185-7201.
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).
- [9] 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): 461-474.
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): 461-474(in Chinese).
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] TANG Wangqianyun, HU Jiabing, CHANG Yuanzhu, et al. Modeling of DFIG-based wind turbine for power system transient response analysis in rotor speed control timescale[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6795-6805.
- [17] 邢华栋, 张叔禹, 尹柏清, 等. 风电并网系统次同步振荡稳定性分析与控制方法研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(24): 13-21.
XING Huadong, ZHANG Shuyu, YIN Baiqing, et al. Review of sub-synchronous oscillation stability analysis and control method for grid-connected wind power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24): 13-21(in Chinese).
- [18] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2358.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2358(in Chinese).
- [19] 盛四清, 俞可, 张文朝, 等. 大规模风电并网对送端系统功角稳定的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 82-90.
SHENG Siqing, YU Ke, ZHANG Wenchao, et al. Influence of large-scale wind power grid connection on the power angle stability of the sending end system [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 82-90(in Chinese).
- [20] 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.
- [21] 李光辉, 王伟胜, 张兴, 等. 双馈风电场并网次/超同步振荡建模与机理分析(二): 阻抗特性与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3614-3626.
LI Guanghui, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Modeling and mechanism analysis of sub/super-synchronous oscillation of grid-connected DFIG wind farms(Part II): analysis of impedance characteristic and oscillation mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3614-3626(in Chinese).
- [22] 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.
- [23] 张剑云. 哈密并网风电场次同步振荡的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5447-5460.
ZHANG Jianyun. Research on the mechanism of subsynchronous oscillations of wind farms in HAMI[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5447-5460(in Chinese).

- [24] 刘芳, 刘威, 徐韞钰, 等. 弱电网条件下并网逆变器控制环路稳定判据及交互作用规律分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 466-481.
LIU Fang, LIU Wei, XU Yunyu, et al. Analysis on stability criterion and interaction law of grid-connected inverter control loop under weak grid condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 466-481(in Chinese).
- [25] SUN Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [26] 严干贵, 段双明, 叶德武, 等. 基于输出阻抗的三相 LCL 型光伏逆变器稳定性分析[J]. 太阳能学报, 2018, 39(2): 558-565.
YAN Gangui, DUAN Shuangming, YE Dewu, et al. Stability analysis of three-phase LCL-type photovoltaic inverter based on the output impedance[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(2): 558-566(in Chinese).
- [27] 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): 1277-1293.
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).
- [28] LIU Huakun, XIE Xiaorong, GAO Xiaodan, et al. Stability analysis of SSR in multiple wind farms connected to series-compensated systems using impedance network model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3118-3128.
- [29] 王睿, 孙秋野, 秦德豪, 等. 含恒功率负载的弱电网线路阻抗稳定区间辨识: 阻抗技术[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1284-1294.
WANG Rui, SUN Qiuye, QIN Dehao, et al. Stability-oriented line impedance domain assessment for weak grids with constant power loads: an impedance-based approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1284-1294(in Chinese).
- [30] 袁小明, 何维. 动态过程的幅频调制统一本质与系统稳定问题分类及新能源发电电网能力创新[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 1-9.
YUAN Xiaoming, HE Wei. Amplitude/Frequency as prerequisites of operation and thus classification of stability problems and capability opportunities for new generations[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 1-9(in Chinese).
- [31] 金国彬, 谢飞, 李国庆, 等. 弱电网且谐波畸变背景下分布式电源并网系统谐振抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 1-10.
JIN Guobin, XIE Fei, LI Guoqing, et al. Resonance suppression of a distributed power grid-connected system in a weak grid and with harmonic distortion background [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 1-10(in Chinese).
- [32] 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).
- [33] WANG Tong, JI Taipeng, JIAO Dian, et al. Transient synchronization stability analysis of PLL-based VSC using Lyapunov's direct method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 108135.
- [34] 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.
- [35] HARNEFORS L, RAHMAN F M M, HINKKANEN M, et al. Reference-feedforward power-synchronization control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 8878-8881.
- [36] 王赟程, 陈新, 张旻, 等. 三相并网逆变器锁相环频率特性分析及其稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3843-3853.
WANG Yuncheng, CHEN Xin, ZHANG Yang, et al. Frequency characteristics analysis and stability research of phase locked loop for three-phase grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3843-3853(in Chinese).
- [37] 谢震, 高翔, 张悬光, 等. 弱电网下功率同步构网型 DFIG 的阻尼分析及转矩振荡抑制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 29-38.
XIE Zhen, GAO Xiang, ZHANG Xuanguang, et al. Damping analysis and torque oscillation suppression of power synchronized grid-forming doubly-fed induction generator in weak grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 29-38(in Chinese).
- [38] 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.
- [39] N. Hatziargyriou, et al. Definition and classification of power system stability – revisited & extended[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3271-3281.
- [40] 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): 7796-7808.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Research on definition and classification of power system security and

stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7808(in Chinese).

[41] 宫泽旭, 艾力西尔·亚尔买买提, 辛焕海, 等. 新能源电力系统并网设备小扰动稳定分析(二): 导出机理与稳定性分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5126-5140.

附录 A 仿真测试系统

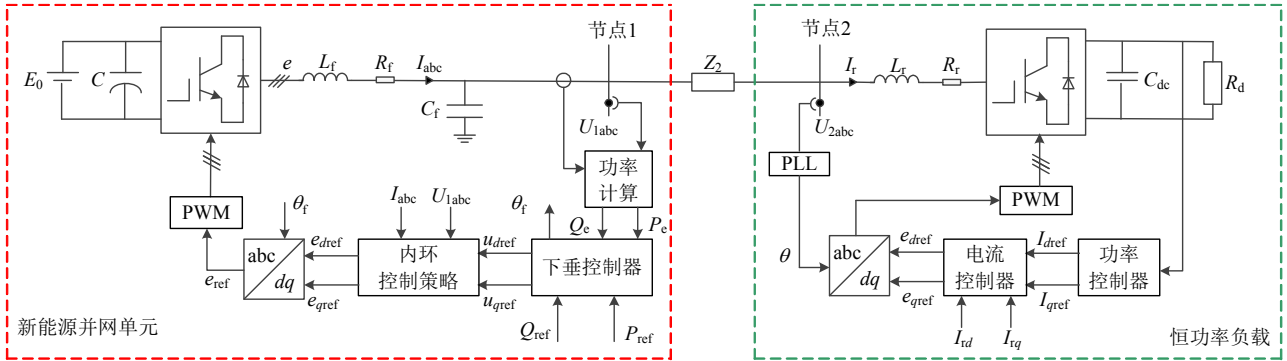


图 A1 仿真测试系统拓扑结构
Fig. A1 Simulation test system topology

附录 B 系统仿真参数

表 B1 GFM 并网系统参数
Table B1 Parameters of GFM in weak system

新能源并网单元参数			
参数	数值	参数	数值
直流电压源 E_0/V	700	滤波电感 L_f/mH	3
滤波电阻 $R_f/\text{m}\Omega$	0.01	滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	20
电压控制器比例系数	0.5	电压控制器积分系数	10
电流控制器比例系数	50	电流控制器积分系数	100
有功功率下垂控制系数	3.14×10^{-4}	无功功率下垂控制系数	1.5×10^{-3}

恒功率负载参数			
参数	数值	参数	数值
额定功率 P/kW	16	滤波电感 L_r/mH	3
电压控制器比例系数	0.6	电压控制器积分系数	3
电流控制器比例系数	41	电流控制器积分系数	40
锁相环比例系数	180	锁相环积分系数	3 200

表 B2 GFL 并网系统参数
Table B2 Parameters of GFL in weak system

参数	数值	参数	数值
直流电压源 E_0/V	700	滤波电感 L_f/mH	3
滤波电阻 R_f/Ω	1.5	滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	20
电流控制器比例系数	0.034 3	电流控制器积分系数	45.714 3



孙秋野

在线出版日期: 2024-01-17.

收稿日期: 2023-03-30.

作者简介:

孙秋野(1977), 男, 博士, 教授, 主要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、微电网中的应用等, sunqiuye@mail.neu.edu.cn;

李大双(1989), 男, 博士研究生, 主要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;

王睿(1993), 男, 博士, 讲师, 主要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;

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

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

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

(编辑 乔宝榆, 李新洁)

Power System With High Shares of Renewables and Power Electronics: A New Stability Criterion and Classification

SUN Qiuye, LI Dashuang, WANG Rui, SUI Zhengqi, YAO Jia, SHEN Qianxiang, YU Xiaohan
(School of Information Science and Engineering, Northeastern University)

KEY WORDS: "double high" power systems; impedance angle; stability criterion; stable classification

Compared to traditional power systems dominated by synchronous generators, the low inertia, multi time scale response characteristics, and weak immunity of power electronic devices make the "double high" power systems have dynamic characteristics such as nonlinearity, time-varying, heterogeneity, uncertainty, and complexity. Therefore, the stability mechanism of the "double high" power system is no longer consistent with traditional power systems. It is necessary to conduct basic theoretical research on its new stability problems, clarify the instability mechanism of the new stability problems, construct stability criteria, and make reasonable classifications of the stability of the "double high" system to provide support for ensuring the safe and stable operation of the system.

This paper deeply analyzes the common instability factors and stability criteria of "double high" power systems, explores the essential instability mechanism of system. The system impedance angular stability analysis method is proposed. Based on the proposed stability analysis method, the impedance angle stability criteria of "double high" power systems is constructed from the basic operation requirements of system active power and reactive power balance, shown in Fig. 1.

Meanwhile, the stability classifications proposed

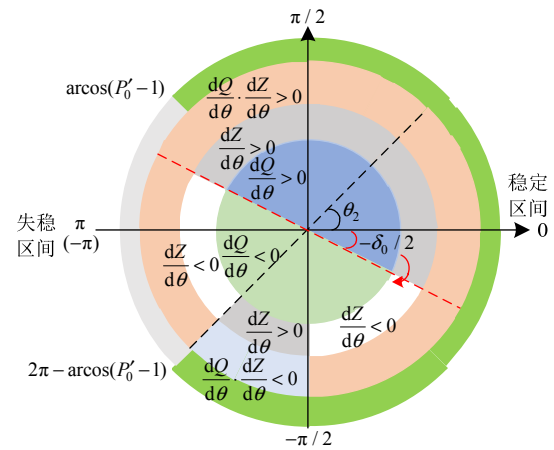


Fig. 1 Impedance angle range of GFM in weak grid system stability

by IEEE are further discussed. Based on the principle of maintaining the classical classification and the stability criteria constructed, a new stability classification system is proposed, as shown in Fig. 2. The proposed classification system has the following features: 1) Added two layers. 2) Frequency stability is considered to be dominated by active power balance, while voltage stability is considered to be dominated by reactive power balance. 3) Inverter drive stability and harmonic stability are replaced by impedance angle stability.

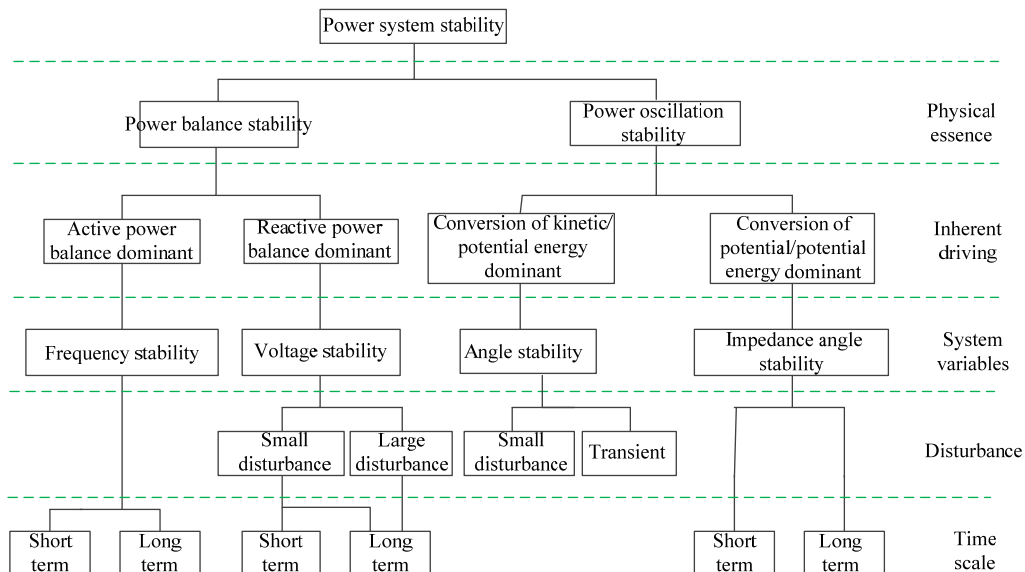


Fig. 2 Proposed classification of power system stability