

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.1.173

中图分类号: TM464

文献标志码: A

# 电力电子化电力系统电压功角动态稳定性 建模分析方法

徐文林<sup>1</sup>, 肖湘晨<sup>2</sup>, 张璨辉<sup>3</sup>, 徐慧婷<sup>3</sup>, 卜龙敏<sup>3</sup>, 肖 英<sup>4</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司营销部, 长沙 410004; 2. 国网湖南省电力有限公司, 长沙 410000;  
3. 国网湖南供电服务中心计量中心营销运营部, 长沙 410007; 4. 中南林业科技大学国家公园  
与旅游学院, 长沙 410004)

**摘要:** 为了避免电力电子化电力系统在运行中因动、静态负荷引起的动态问题, 影响系统稳定性, 提出1种电压功角动态稳定性建模分析方法。首先使用延拓法追踪电力系统平衡解流形, 采用小扰动分析法计算电压功角状态矩阵, 对电压功角动态稳定性进行判断; 然后采用电力系统稳定模式判别方法, 对失稳状态中电压功角状态变量关联情况进行分析, 判定系统失稳类别, 实现电压功角动态稳定性模型的构建与分析。实验结果表明: 负荷模型直接关系着电子化环境下电力系统动态失稳类型, 静态负荷模型易造成功角失稳, 动态负荷模型易造成电压失稳, 时域仿真结果与状态变量参与因子判别结果相吻合; 通过功角失稳与电压失稳的测试对发电机角度与节点电压情况进行分析, 证明了所提方法在电压功角动态稳定性分析中具有较好的效果, 对电力系统工程领域的研究具有一定的参考价值。

**关键词:** 延拓法; 电压功角; 动态稳定性; 平衡解流形; 小扰动分析法; 失稳类别判定; 稳定性建模

## Modeling and Analysis Method for Voltage Power Angle Dynamic Stability of Power Electronic Power System

XU Wenlin<sup>1</sup>, XIAO Xiangchen<sup>2</sup>, ZHANG Canhui<sup>3</sup>, XU Huiting<sup>3</sup>, BU Longmin<sup>3</sup>, XIAO Ying<sup>4</sup>

(1. Marketing Department, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410000, China; 3. Marketing and Operation Department, State Grid Hunan Power Supply Service Center(Metrology Center), Changsha 410007, China; 4. National Park and Tourism College, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** To avoid the dynamic problems caused by dynamic and static loads in the operation of a power electronic power system, which affect the system stability, a modeling and analysis method for the voltage power angle dynamic stability is proposed. The continuation method is used to track the equilibrium solution manifold of the power system, and the small disturbance analysis method is used to calculate the voltage power angle state matrix to judge the dynamic stability of voltage power angle. By means of the power system stability mode discrimination method, the correlation between voltage and power angle state variables in the instability state is analyzed, the system instability category is determined, and the construction and analysis of voltage and power angle dynamic stability model is realized. Experimental results show that the load model is directly related to the category of dynamic instability of power system in an electronic environment. The static load model is easy to cause power angle instability, while the dynamic load model is easy to cause voltage instability. The time-domain simulation results are consistent with the discrimination results of state variable participation factor. Through the tests of power angle instability and voltage instability, the generator angle and node voltage are analyzed. It is proved that the proposed method has a good effect in the analysis of voltage and power angle dynamic stability, providing certain reference value for researches in the field of power system engineering.

**Keywords:** Continuation method; voltage power angle; dynamic stability; equilibrium solution manifold; small disturbance analysis method; instability category determination; stability modeling

收稿日期: 2022-03-02; 修回日期: 2022-05-12; 录用日期:  
2022-06-08; 网络首发日期: 2022-07-22

随着信息化社会的不断发展, 传统的化石能源  
电力系统已无法满足当前时代对环境保护的需求,

逐渐转变为可再生能源的电力系统。电力电子化已经成为现阶段电力系统发展的重要趋势。电能传输系统与信息系统共同构成非线性、繁杂的电子化环境,是能量生产、运输及使用的重要载体,其安全平稳运行对保障人们生产生活,以及提高国民经济发挥着不可估量的作用。电力电子化电力系统为人们带来便捷电力能源的同时,也由于其电力系统的复杂性,在进行电力运行过程中,其安全稳定容易发生变化,可能会由于线路故障而导致大规模停电,影响电力系统正常运行,同时对人们的日常生活造成一定的经济损失。电压功角动态稳定性直接关系到电力系统的正常运行,但因为电源、负荷装备等动态电子化特征十分繁杂,导致电压功角动态稳定性问题的研究发展相对缓慢<sup>[1]</sup>。电压稳定与功角稳定具有密切联系,如果电力系统承受的电子化扰动较大,两者的关联必定非常紧密,难以区分系统扰动产生的原因,因此研究能够精准判别电压失稳与功角失稳的方法甚为关键,对及时采取有效措施避免系统故障,以及提高电力电子化电力系统的安全具有重大意义。

电压功角动态稳定性是电力系统工程领域的研究热点,国内一些专家学者对其展开了研究。刘多禄等<sup>[2]</sup>针对风电并网引起潮流分布对电力系统小干扰功角稳定性的影响展开研究,通过线性化建模计算同步机与系统其余部分间动态交互的方法,认为由于平衡机动态交互发生较大改变,影响了机电振荡模式,使电力系统的稳定性受到较大影响;滕予非等<sup>[3]</sup>搭建与实际直流工程一致的直流输电模型,通过整流侧最小触发角限制(RAML)环节的特高压直流整流侧动态响应特性分析电压功角动态稳定性,直流电压与直流电流超调现象被有效消除,基于电力系统稳定与控制(EEAC)理论,实现对交流电网功角稳定性影响的分析,但在加入RAML环节后,系统稳定性出现一定程度的下降,虽然这种下降可以接受,但依旧会影响系统正常运行;刘晋等<sup>[4]</sup>通过附加频率控制作用分析电压功角动态稳定性,基于惯性中心等效理论分析附加频率控制系统内暂态特性与运行模式对系统动态行为

能力的影响,虽然能够以最大功率为追踪目标实现电压功角动态稳定性的分析,但是其分析不够量化和具体化;迟福建等<sup>[5]</sup>基于非线性坐标变换方法,构建励磁系统等价模型,并通过鲁棒自适应方法与参数自适应方法实现励磁系统的稳定控制。但是上述方法在电力系统的实际运行中,均会受到动、静态负荷的影响,存在电压失稳与功角失稳的情况,影响了电力系统的稳定运行。

综上所述,为了解决现有方法在电压功角动态稳定性分析中的不足,本文以电压失稳和功角失稳的现象作为切入点,分析两者的关联,并利用发电机负荷动态特征提出1种电力电子化电力系统电压功角动态稳定性建模分析方法,以期利用引发系统失稳的模式判别方法,促进电力电子化电力系统安全平稳运行。

## 1 电压功角动态稳定性建模

### 1.1 电力电子化电力系统平衡解流形的追踪

电力电子化电力系统平衡解流形是分析电压功角动态稳定性的重要依据,是在参数不断改变的过程中,系统平衡点也随之改变的函数曲线<sup>[6]</sup>。本文将通过延拓法实现电力电子化电力系统平衡解流形的追踪。

平衡解流形是指使方程等于0的全部点构成的集合,为了避免歧义,考虑采用单参数形式将达到系统平衡点状态方程的解进行一般形式的改写,即

$$M(x, y, \mu) = 0 \quad (1)$$

式中:  $x$  为状态变量;  $y$  为因变量;  $\mu$  为系统参数。

#### 1.1.1 弧长参数化过程

为提高分散参数的连续性,防止追踪中断,对弧长参数  $ds$  进行定义:表示平衡解流形上开始执行  $(d\delta, d\lambda)$  的弧长。弧长参数  $ds$  和原参数  $z$  之间的关系可表示为

$$ds = z(m) \sum_{i=1}^n (d\delta)^2 + (d\lambda)^2 \quad (2)$$

式中,  $m$  为可变参数。

### 1.1.2 预测过程

将已知解作为起始点, 使用切线法、割线法等搜索后续解的近似点, 即该过程的目标, 此近似点的质量对修正步骤的迭代次数起着决定性作用<sup>[7]</sup>。由于当曲线曲率较大时, 割线法的预测性能较差, 因此使用切线法完成预测过程, 具体描述如下。

如果想获得点  $(\delta, \lambda)$  的位置, 可通过隐函数  $f(\delta, \lambda) = 0$  求解切向量, 求得其对于  $z$  的一阶导数  $\left(\frac{d\delta}{ds}, \frac{d\lambda}{ds}\right)$ , 结果可描述为

$$f_{\delta} \frac{d\delta}{ds} + f_{\lambda} \frac{d\lambda}{ds} = 0 \quad (3)$$

以  $(x^{(j)}, \lambda^{(j)})$  作为判定依据,  $j$  为参数条件, 当满足收敛条件  $\begin{cases} \|f(\delta^{(j)}, \lambda^{(j)})\| < \varepsilon \\ \Delta\sigma^{(j)} < \varepsilon \end{cases}$  时, 停止计算<sup>[8]</sup>, 可得

$$D = \sigma^{2(j)} \sum_{i=1}^n (\delta^{(j)} - \delta^k)^2 + (\lambda^{(j)} - \lambda^k)^2 - |\sigma| \quad (4)$$

式中:  $\sigma$  为节点值;  $\varepsilon$  为常数。

若不符合收敛条件, 则继续执行后续过程, 即通过修正量  $(\Delta\delta^{(j)}, \Delta\lambda^{(j)})$  对其进行求解为

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta^{(j)} \\ \Delta\lambda^{(j)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_{\delta}(\delta^j, \lambda^j) & f_{\lambda}(\delta^j, \lambda^j) \\ 2(\delta_1^j - \delta_1^k) \cdots 2(\delta_n^j - \delta_n^k) & 2(\lambda^j, \lambda^k) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} f(\delta^{(j)}, \lambda^{(j)}) \\ \Delta\sigma^{2(j)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将  $j+1$  赋值给  $j$ , 实现  $\delta$  与  $\lambda$  的更新, 即

$$\begin{bmatrix} \delta^{j+1} \\ \lambda^{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^j \\ \lambda^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta^j \\ \Delta\lambda^j \end{bmatrix} \quad (6)$$

将更新后的  $\delta$  与  $\lambda$  代入式(3), 可得点  $(\delta, \lambda)$  更新后位置的切向量为

$$\bar{T} = f \left( \frac{d\delta}{ds} + \frac{d\lambda}{ds} \right) \quad (7)$$

## 1.2 构建电压功角动态稳定性分析模型

### 1.2.1 基于小扰动分析法的电压功角动态稳定性判据

电力电子化电力系统在利用式(1)所得平衡点

位置的稳定性时, 可通过微分代数方程组描述为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta\dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \\ J = \begin{bmatrix} f_x & f_y \\ g_x & g_y \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $J$  为系统状态变量。在  $g_y$  表现为可逆的情况下, 可将式(8)转化为

$$\Delta\dot{x} = A\Delta X \quad (9)$$

$$A = f_x - f_y g_y^{-1} g_x \quad (10)$$

式中:  $A$  为电压功角状态矩阵;  $X$  为电压功角状态变量<sup>[9]</sup>。可将式(10)作为参考, 依据每个元件及网络方程通过解析法获得  $A$ 。

求解电压功角状态矩阵  $A$  的数值计算方法为:

(1)第  $i$  个电压功角状态变量为  $x_i$ , 扰动为  $\Delta x_i$ , 设置  $x_i = x_0 + \Delta x_i$ , 用来指在平衡点位置将扰动作用于  $x_i$  之上, 其余电压功角状态变量不发生改变, 则可将式(9)转换为

$$\Delta\dot{X} = \Delta x_i a_i \quad (11)$$

式中:  $a_i$  为  $A$  的第  $i$  列向量;  $\Delta x_i$  为 1 个标量。根据  $\Delta\dot{X} = \dot{X}$ , 可得

$$a_i = f(X_0 + \Delta X, p) / \Delta x_i \quad (12)$$

式中:  $X_0$  为平衡点;  $p$  为分叉参数。

电压功角状态矩阵的构建步骤: 首先, 按顺序对每个电压功角状态变量施加扰动; 接着, 利用式(12)计算每次扰动后对应的列向量; 在所有扰动操作完成并收集到所有列向量之后, 基于这些扰动导致的代数变量最新值  $Y$ , 再应用式(10)来整合成最终的电压功角状态矩阵。过大的扰动容易溢出系统的线性化收敛区间, 而过小的扰动会降低计算精度<sup>[10-12]</sup>。

(2)分析电压功角状态矩阵  $A$  的特征值, 据此对电力电子化电力系统稳定性进行判定。分析发电机负荷动态特征, 属严格稳定性分析。图 1 为电力电子化电力系统发动机运行状态。系统稳定的判定, 需在全部特征根均为负或者包含负实部的条件

下进行;系统临界稳定的判定,需在含有 0 实部的虚根或者 0 特征值条件下进行;而系统失稳的判定,则需在包含正特征值或者正实部共轭复根的条件下进行<sup>[13]</sup>。

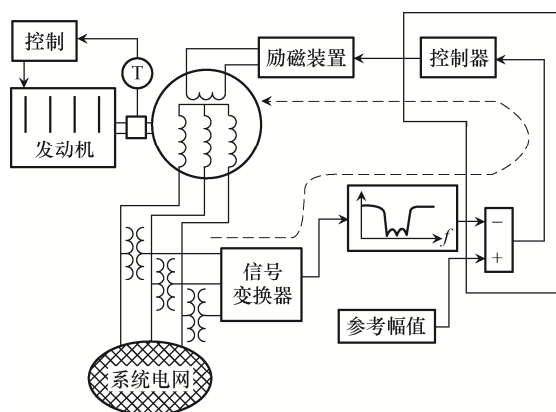


图 1 电力电子化电力系统发动机运行状态

Fig. 1 Engine running state of power electronic power system

### 1.2.2 电力电子化电力系统失稳类型的判别

由 1.2.1 节电压功角小扰动分析法可知,电力电子化电力系统稳定性可通过特征值的符号进行判断,如果该系统出现失稳现象,可使用稳定模式的判别方法通过分析电压功角动态稳定性来获取造成系统失稳的原因。

首先构建负荷模型,将电力电子化电力系统的稳定模式与电压功角状态矩阵的各特征值一一匹配<sup>[14-15]</sup>,并根据发电机负载特性分析得到电压与励磁电流之间的关系曲线,通过任意稳定模式的参与因子表征电压功角状态变量的影响,其表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{UA} = \mathbf{UA} \\ \mathbf{VA} = \mathbf{VA} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{V}$ 、 $\mathbf{U}$  分别为电压功角状态矩阵的左、右特征向量矩阵;  $\mathbf{A}$  为特征值对角阵。

利用模式参与因子将第  $i$  个特征值和第  $k$  个电压功角状态变量之间的关系描述为

$$p_{ki} = \frac{\mathbf{v}_{ki} \cdot \mathbf{u}_{ki}}{\mathbf{v}_i^T \cdot \mathbf{u}_i} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{v}_{ki}$  为矩阵  $\mathbf{V}$  的行列元素;  $\mathbf{u}_{ki}$  为矩阵  $\mathbf{U}$  的行列元素;  $\mathbf{v}_i$  为  $\mathbf{V}$  的列向量;  $\mathbf{u}_i$  为  $\mathbf{U}$  的列向量。给定

特征值  $\lambda_i$ , 模式  $i$  的主导状态变量是该特征值中最大参与因子的状态变量,其和模式  $i$  呈强关联关系。

功角的静态稳定性,是指系统在受到较小的干扰后,引起发电机之间同步能力减弱,产生失去同步运行的现象,并能够自动恢复到最初的状态;功角的动态稳定性,是指系统遭受干扰后,发电机之间的同步能力减弱,使系统发生振荡,但是可以通过自动调节和控制,保持较长过程运行稳定的能力。

在电力电子化电力系统的某一负荷区域中,如果出现了某点崩溃的情况,可判断为电压失稳;若区域外输电系统出现发电机之间的同步能力减弱,导致发电机出现失去同步运行现象,可判断为功角失稳。接着,需要判断产生的电压功角状态变量为静态负荷还是动态负荷,若电力电子化电力系统失稳模式和第 1 类状态变量呈现强关联,静态负荷易造成功角失稳,此时的失稳被判别为功角失稳;若电力电子化电力系统失稳模式和第 2 类状态变量呈现强关联,动态负荷易造成电压失稳,则失稳被判别为电压失稳。至此,完成电压功角动态稳定性分析模型的构建。

## 2 结果分析

将电力电子化电力系统作为实验对象,其包含 6 台额定电压为 10 kV、视在功率为 3.75 Mvar 的发电机和 30 个节点,分别使用 1~6 和 1~30 的数字对其进行标号,其拓扑结构如图 2 所示。

将动态无功补偿设备 SVC 安装于节点 10 上,使用 MATLAB 软件完成本文方法对该系统的电压功角动态稳定性建模分析,以验证本文方法的有效性。以每个节点负荷同比增长作为负荷的增长形式,对于每台发电机根据原比例对其间增长的有功负荷进行分配,且功率因数不发生改变。测试发电机不存在无功限制与存在 70% 无功限制时对电力电子化电力系统电压动态稳定性的影响,使用本文方法获取节点 15 的  $P$ - $V$  曲线如图 3 所示。

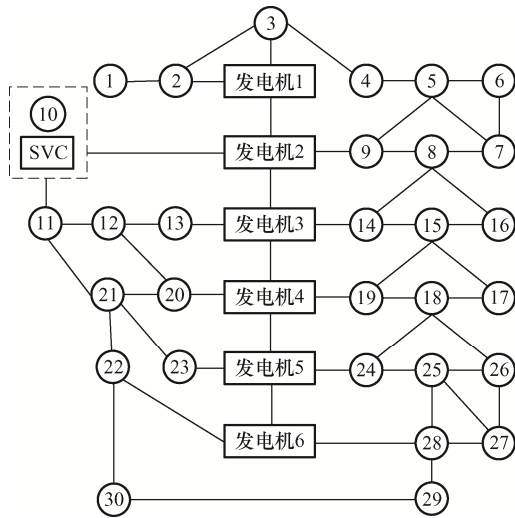


图 2 拓扑结构

Fig. 2 Topological structure

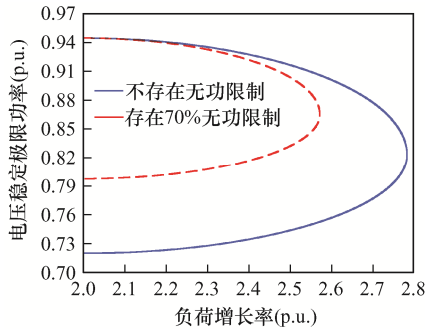


图 3 节点 15 的 P-V 曲线

Fig. 3 P-V curve at Node 15

分析图 3 可以看出: 当发电机不存在无功功率限制时, 获得的 P-V 曲线光滑平稳, 此时网络最大传输性能对电压稳定极限功率起着决定性作用; 当发电机存在 70% 无功功率限制时, 电压稳定极限功率下降幅度较大, 且存在明显的转折点。在分析电压动态稳定性过程中, 电压崩溃点通常为 P-V 曲线的顶点, 因此明显可见发电机的无功出力特性直接影响着电力电子化电力系统电压动态稳定性。

对于电力电子化电力系统稳定性, 本文通过对电压功角状态矩阵的特征值进行计算, 并根据主导特征值的趋势完成判定。判断时划分的 2 种情况: ①工况 1: 选择静态 ZIP 负荷作为负荷模型; ②工况 2: 选择动态负荷模型作为负荷模型。当电力电子化电力系统处于最易失稳模式时, 2 种工况的特征值趋势见表 1, 与失稳模式匹配的每个状态变量的参与因子分别如图 4 和图 5 所示。

表 1 不同工况的特征值趋势

Tab. 1 Trend of eigenvalues under different operating conditions

负荷(p.u.)	$\lambda$	
	工况 1	工况 2
1.000	$-0.626 \pm j9.01$	-1.984
1.293	$-0.608 \pm j8.26$	-2.056
1.312	$-0.563 \pm j8.17$	-2.164
1.328	$-0.498 \pm j8.09$	-2.198
1.407	$-0.435 \pm j8.01$	-2.266
1.215	$-0.359 \pm j7.68$	-1.967
1.103	$-0.324 \pm j7.05$	-1.863
1.028	$-0.205 \pm j6.37$	-1.654
1.016	$0.198 \pm j6.02$	-0.856
1.002	$0.099 \pm j5.38$	0.123

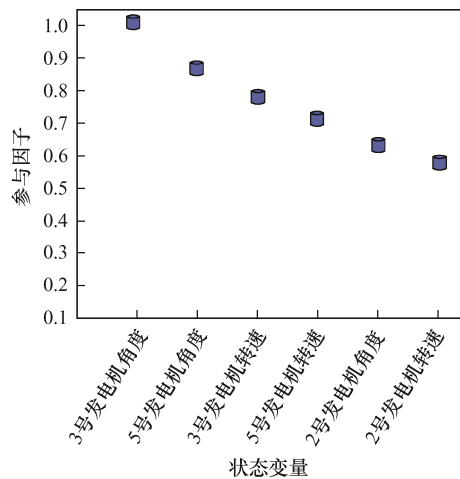


图 4 工况 1 失稳模式的参与因子

Fig. 4 Participation factors of instability mode in condition 1

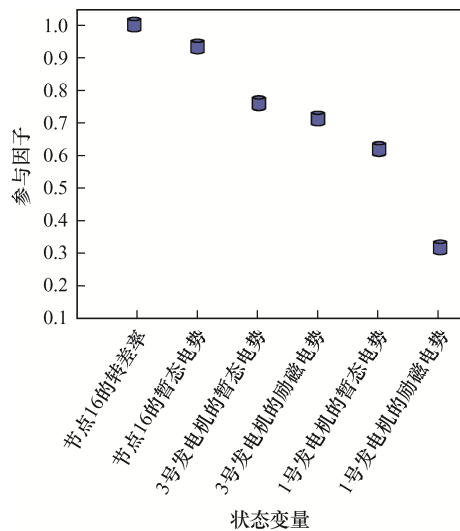


图 5 工况 2 失稳模式的参与因子

Fig. 5 Participation factors of instability mode in condition 2

由表 1 和图 4 可得: 工况 1 的特征值在负荷增长率上升到 1.016 情况下变为  $0.198 \pm j6.02$ , 实部转换为正数, 电力电子化电力系统在此时呈现出失稳状态; 该模式相应状态变量的参与因子最大值为 1.000, 其他数值均根据 1.000 完成折算。实验结果表明, 该失稳模式受发电机转速与角度影响较大, 将其判定为功角失稳。

由表 1 和图 5 发现: 在初始阶段, 工况 2 的特征值随着负荷上升呈缓慢变化, 在负荷上升到 1.407 情况下, 特征值的结果仍为负数, 在负荷逐渐下降至 1.002 时, 特征值变为正数, 电力电子化电力系统呈现出单调失稳状态, 表明在  $P-V$  曲线下半部分范围中该系统能平稳运行; 该模式相应状态变量的参与因子最大值为 1.000, 其他数值均根据 1.000 完成折算。实验结果表明, 该失稳模式受发电机转差率与暂态电势影响较大, 将其判定为电压失稳。

综上所述可见: 负荷模型直接关系着电力电子化电力系统动态失稳的类型, 静态 ZIP 负荷模型易造成功角失稳, 动态负荷模型易造成电压失稳; 本文方法表现出了较理想的电力电子化电力系统电压功角动态稳定性分析效果, 能有效辨识出系统失稳时所属的失稳模式。

为进一步验证上述实验结果的有效性, 对电力电子化电力系统施加小扰动, 设置工况 1 中电子系统总运行时间为 80 s, 且在运行的第 40 s 时产生动态失稳情况, 测试 3 号发电机在功角失稳期间角度的变化, 如图 6 所示。可知: 在电子系统正常运行

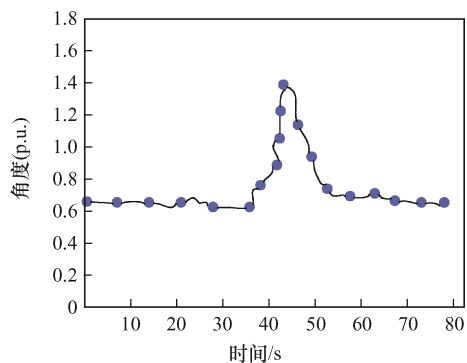


图 6 功角时域仿真曲线

Fig. 6 Time-domain simulation curve of power angle

期间, 3 号发电机的角度波动较小; 在第 40 s 出现系统动态失稳情况时, 3 号发电机的角度急速增大; 在经过自动调节和控制后, 逐渐恢复至失稳前的状态。

设置工况 2 中电子系统总运行时间为 80 s, 在运行的第 30 s 时产生失稳情况, 测试节点 16 在电压失稳区的变化如图 7 所示。可知: 在系统正常运行期间, 节点 16 的电压较为稳定; 当第 30 s 出现系统失稳状况后, 失稳区的电压处于较高数值, 经过一定时间后开始下降。因此可以得出, 时域仿真结果与上述实验结果吻合, 本文所提方法的电压功角动态稳定性分析性能良好。

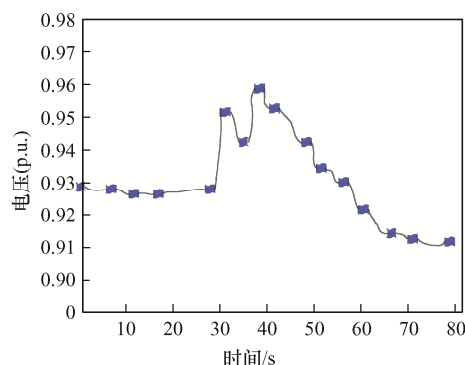


图 7 电压角时域仿真曲线

Fig. 7 Time-domain simulation curve of voltage angle

为了证明本文所提方法的优越性, 选取工况 1 作为实验环境, 将本文方法与文献[2]、文献[3]、文献[4]、文献[5]方法进行对比分析, 比较 5 种方法的稳定性判断耗时, 时间越短, 说明该方法越优越, 越能够提高工作效率, 结果如图 8 所示。可以

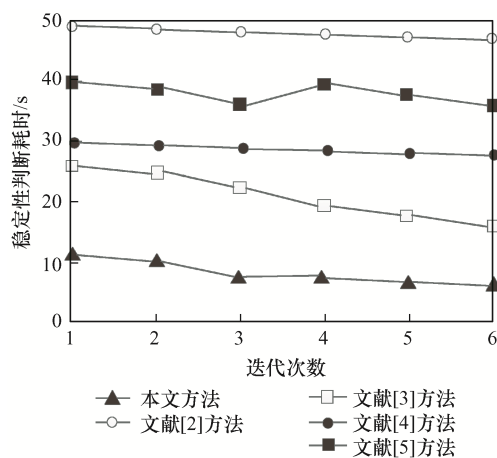


图 8 稳定性判断时间对比

Fig. 8 Comparison of stability judgment time

看出: 文献[2]方法的稳定性判断耗时最长, 为 47~49 s; 文献[3]方法的稳定性判断耗时为 17~27 s; 文献[4]方法的稳定性判断耗时约为 30 s, 波动较小; 文献[5]方法的稳定性判断耗时为 37~41 s; 而本文所提方法进行稳定性判断的耗时最短, 保持在 8~11 s, 最高不超过 11 s, 远低于其他方法的耗时, 说明本文方法具有一定优势, 能够提高工作效率。

### 3 结语

伴随电力电子化电力系统在生产生活中的影响逐渐扩大, 其安全稳定运行日益成为各界关注的焦点。本文提出了 1 种新型电力电子化电力系统电压功角动态稳定性建模分析方法, 能够在系统发生失稳现象时, 有效判别引起该问题的失稳模式, 以便及时采取对应措施保障系统的安全。经实验分析, 3 号发电机在第 40 s 出现系统动态失稳情况后, 其角度在急速增大后恢复至平稳; 工况 2 中节点 16 的电压在系统运行第 30 s 出现失稳状况后, 电压增高后下降。同时, 本文方法的稳定性判断的时间始终不超过 11 s, 能够提高工作效率。由此可以看出, 本文方法能够有效实现电力电子化电力系统的稳定性分析, 对电力系统工程领域的研究具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 姜惠兰, 吴玉璋, 周照清, 等. 含双馈风力发电场的多机系统暂态功角稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 999-1005, 1276.  
Jiang Huilan, Wu Yuzhang, Zhou Zhaoqing, et al. A method to analyze the transient angle stability of multi-machine system with DFIG-based wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 999-1005, 1276. (in Chinese)
- [2] 刘多禄, 马林, 王炳文. 风电并网引起潮流分布对电力系统小干扰功角稳定性的影响研究[J]. 中国测试, 2020, 46(10): 144-150.  
Liu Duolu, Ma Lin, Wang Bingwen. Research on the influence of power distribution variation caused by wind power integration on power system small signal power angle stability [J]. China Measurement & Test, 2020, 46(10): 144-150. (in Chinese)
- [3] 滕予非, 张鹏, 井实, 等. 考虑 RAML 环节的特高压直流整流侧动态响应特性及其对送端交流电网稳定性影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 75-82.  
Teng Yufei, Zhang Peng, Jing Shi, et al. Dynamic response characteristic of rectifier side of UHVDC considering RA-ML link and its influence on the power angle stability of sending side power grid [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 75-82. (in Chinese)
- [4] 刘晋, 王哲, 韩民晓, 等. 计及风电附加频率控制作用的电力系统暂态稳定性分析[J]. 现代电力, 2019, 36(2): 66-72.  
Liu Jin, Wang Zhe, Han Minxiao, et al. Power system transient stability analysis considering additional frequency control of wind turbines [J]. Modern Electric Power, 2019, 36(2): 66-72. (in Chinese)
- [5] 迟福建, 刘聪, 申刚, 等. 端电压及功角双重稳定约束鲁棒自适应励磁控制[J]. 中国测试, 2019, 45(4): 129-134.  
Chi Fujian, Liu Cong, Shen Gang, et al. Robust adaptive excitation control with terminal voltage and power angle stabilization double constraint [J]. China Measurement & Test, 2019, 45(4): 129-134. (in Chinese)
- [6] 邢光正, 吴琛, 陈磊, 等. 电压源变换器接入电网的小扰动稳定机理分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 42-52, 193.  
Xing Guangzheng, Wu Chen, Chen Lei, et al. Analysis of small disturbance stability mechanism for grid-connected voltage source converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 42-52, 193. (in Chinese)
- [7] 黄丹, 孙华东, 周勤勇, 等. 基于响应轨迹最大李雅普诺夫指数动态特征的暂态稳定在线监测[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 48-55.  
Huang Dan, Sun Huadong, Zhou Qinyong, et al. Online monitoring of transient stability based on largest Lyapunov exponent dynamic characteristics of response trajectory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 48-55. (in Chinese)
- [8] 刘欣博, 高卓. 考虑恒功率负载与储能单元动态特性的直流微电网系统大信号稳定性分析[J]. 电工技术学

- 报, 2019, 34(S1): 292-299.
- Liu Xinbo, Gao Zhuo. Large signal stability analysis of DC microgrid system considering dynamic characteristics of constant power load and energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 292-299. (in Chinese)
- [9] 吴蒙, 贺之渊, 阎发友, 等. 下垂控制对直流电网动态电压稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 8-15.
- Wu Meng, He Zhiyuan, Yan Fayou, et al. Influence of droop control on the dynamic voltage stability of DC grid analysis [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 8-15. (in Chinese)
- [10] 年珩, 胡彬, 陈亮, 等. 无锁相环直接功率控制双馈感应发电机系统阻抗建模和稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 951-962.
- Nian Heng, Hu Bin, Chen Liang, et al. Impedance modeling and stability analysis of direct power controlled doubly fed induction generator system without phase-locked loop [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 951-962. (in Chinese)
- [11] 马世乾, 张志君, 王梓, 等. 时滞诱导电力系统动态调频稳定性变化的原因探究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(1): 40-46.
- Ma Shiqian, Zhang Zhijun, Wang Zi, et al. Investigation on causes of time delay induced stability change for dynamic frequency regulation of power system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(1): 40-46. (in Chinese)
- [12] 王加强, 孙永辉, 翟苏巍, 等. 基于 Markov 理论的含风电电力系统随机建模及小干扰稳定性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 646-654.
- Wang Jiaqiang, Sun Yonghui, Zhai Suwei, et al. Stochastic modeling and small signal stability analysis of wind power system based on Markov theory [J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 646-654. (in Chinese)
- [13] 贾要勤, 何巧惠, 王兴国. 电压源型 VSG 动态建模及稳定性分析[J]. 电力电子技术, 2019, 53(2): 12-15.
- Jia Yaoqin, He Qiaohui, Wang Xingguo. Dynamic modeling and stability analysis of voltage source VSG [J]. Power Electronics, 2019, 53(2): 12-15. (in Chinese)
- [14] 高本锋, 江婷, 于弘洋, 等. H桥级联型 SSSC 的动态模型及小干扰稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 35-42.
- Gao Benfeng, Jiang Ting, Yu Hongyang, et al. Dynamic model and small interference stability analysis of H-bridge cascaded SSSC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 35-42. (in Chinese)
- [15] 付强, 杜文娟, 王海风. 小增益闭环系统稳定性分析方法及其在含并网 VSC 电力系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1551-1559, 1852.
- Fu Qiang, Du Wenjuan, Wang Haifeng. Stability analysis method of small gain closed loop system and application in power system connected with VSC [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1551-1559, 1852. (in Chinese)



徐文林

## 作者简介:

徐文林(1966—), 男, 本科, 高级工程师。研究方向: 电力系统及自动化。E-mail: sgcc\_tougao@126.com。

肖湘晨(1983—), 女, 本科, 高级工程师。研究方向: 电气工程及其自动化。E-mail: 80610587@qq.com。

张璨辉(1987—), 女, 通信作者, 本科, 工程师。研究方向: 测控技术与仪器。E-mail: 5417505@qq.com。

徐慧婷(1991—), 女, 硕士研究生, 工程师。研究方向: 计量采集。E-mail: 470780869@qq.com。

卜龙敏(1985—), 男, 本科, 高级工程师。研究方向: 电能计量。E-mail: 951278456@qq.com。

肖英(1978—), 女, 硕士, 副教授。研究方向: 电网规划与生态学。E-mail: 745517450@qq.com。