分频输电系统静态电压稳定性分析

张海涛[1]，杨可俊[1]，李保全[1]，张思琪[2]，赵晨婷[1]，魏亦铭[1]，王秀丽[1]，王锡凡[1]
（1. 西安交通大学电气工程学院，西安市 710049；
2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院，北京市 100032）

摘　要：【目的】系统分析了分频输电系统（fractional frequency transmission system，FFTS）的静态电压稳定性及功率极限特性，探究其在不同频率、拓扑结构下的变化规律与内在机理。【方法】基于静态电压稳定性机理与连续潮流法，探索性发现FFTS的静态电压稳定性优势，以及不同拓扑下功率极限随频率下降呈现单调与非单调变化趋势，并基于戴维南等效电路推导有功功率极限表达式，揭示有功极限非单调变化致因。【结果】相同拓扑下，FFTS静态电压稳定性优于工频运行；而有功功率极限随频率降低在某些拓扑中呈现“先增后减”的非单调特性，该现象源于*PV*节点相角与系统电抗的耦合效应，当耦合效应不影响功率极限时，功率极限单调变化。【结论】FFTS的静态电压稳定性优势显著，但其功率极限受拓扑结构影响显著，需在系统设计中合理配置参数。

关键词：分频输电系统；静态电压稳定性；连续潮流法；功率极限
中图分类号：TM712　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-7229（2026）05-0039-10
DOI：10.12204/j.issn.1000-7229.2026.05.004

Analysis of Static Voltage Stability in Fractional Frequency Transmission Systems

ZHANG Haitao[1], YANG Kejun[1], LI Baoquan[1], ZHANG Siqi[2], ZHAO Chenting[1], WEI Yiming[1], WANG Xiuli[1], WANG Xifan[1]
（1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Electric Power Science Research Institute, Beijing 100032, China）

ABSTRACT: [**Objective**] This paper systematically analyzes the static voltage stability and power limit characteristics of the fractional frequency transmission system (FFTS), exploring the variation laws and intrinsic mechanisms under varying frequencies and topological structures. [**Methods**] Based on the mechanism of static voltage stability and the continuation power flow method, the advantages of FFTS in static voltage stability are identified. The investigation reveals that the power limit shows both monotonic and non-monotonic trends as frequency decreases, depending on the network topology. Furthermore, the active power limit expression is derived based on the Thevenin equivalent circuit to elucidate the causes of non-monotonic variations. [**Results**] For a given topology, the static voltage stability of an FFTS is superior to that of the power system operating at power frequency. However, in specific topologies, the active power limit presents a non-monotonic characteristic of "increase-then-decrease" as frequency declines. This phenomenon originates from the coupling effect between the phase angle of the *PV* node and the system reactance. When this coupling effect does not affect the power limit, the power limit varies monotonically. [**Conclusions**] While FFTS offers significant advantages for static voltage stability, its power limits are highly sensitive to topological configurations. Consequently, system parameters must be carefully configured during the design phase.

This work is supported by National Natural Science Foundation Youth Fund of China (No. 52207137) and the State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Science and Technology Project (No. B3018K25Z009).
KEYWORDS: fractional frequency transmission system; static voltage stability; continuation power flow method; power limit

0　引　言

在全球能源转型与“双碳”目标背景下，电力系统作为现代社会的重要基础设施，正面临深刻变革[1]。新型电力系统高比例电力电子设备与高比例可再生能源特征日益凸显[2]。随着我国对西北部“沙戈荒”风电、光伏以及深远海海上风电等可再生能源的开发，出现了送端近区电网支撑薄弱、受端电网“空心化”严重等问题，特别是随着系统中可再生能源比例的提高，输电安全稳定运行和高效利用面临

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（52207137）；国网冀北电力有限公司科技项目（B3018K25Z009）

© Editorial Department of Electric Power Construction. OA under CC BY-NC-ND 4.0.

多重挑战，对先进输电技术要求迫切[3]。

分频输电系统（fractional frequency transmission system，FFTS）在1994年由王锡凡院士提出，是一种新型输电系统[4]，FFTS又称低频输电系统，以低于工频50 Hz的系统频率运行，降低了线路的电感、电容，提高了输电容量。近年来，风电尤其是深远海海上风电得到大力开发，由于无需建设庞大而昂贵的换流站等设施，分频输电成为海上风电外送的优选方案，相比传统的直流输电方式，FFTS展现出了独特的优势[5-6]，且针对动态低频风电系统的有功功率控制已形成了成熟的机群协调策略[7]，为分频输电系统的稳定运行提供了控制层面的支撑。

自FFTS提出以来，围绕其可行性的研究持续展开，其中关于输电容量提升机理、输送功率极限等方面的理论研究不断深化。文献[4]建立了50/3 Hz的FFTS数学模型，数字仿真结果表明分频输电方式可以成倍提高输电容量；文献[8]首次搭建了以交-交变频器作为倍频器的分频输电系统实验装置，实验表明，分频输电方式与50 Hz交流输电相比，输送容量可提高2.5倍以上；文献[9]发现风电发电机低转速的特点与分频发电、输电十分契合，指出分频风电系统降低了输电频率，减少了整个输电系统的阻抗，因此可以成倍地提高线路的传输能力，平抑线路电压波动，增加电网吸纳风电的能力。

随着对FFTS研究的深入，大规模新能源低频汇集送出系统正逐渐推广落地[10-11]。面向FFTS推广应用的研究开始涉及系统规划设计、低频系统保护、故障穿越等方面。文献[12]计及系统谐振稳定性和运行可靠性的海上风电分频送出规划方法，验证了分频输电在远距离海上风电送出中的技术经济优势；文献[13]针对海上风电低频输电线路因双侧电力电子换流器控制导致传统电流差动保护易拒动的问题，提出一种基于差动正序分量波形相似度的新保护方法；文献[14]系统揭示了海上风电低频输电系统在低频侧故障穿越过程中面临的新问题，包括对称故障下的功率反转与恢复过电压、不对称故障下的桥臂电容电压不均衡与非故障相过电压等问题。

随着FFTS的推广，新能源低频汇集外送规模逐步增大，未来极大可能出现以低频率运行的大规模系统。与传统工频电力系统相比，FFTS在拓扑结构、运行机理及动态响应特性等方面均存在显著差异，亟需开展更为系统和深入的基础性与应用性研究。

针对FFTS稳定性的研究有谐振稳定性、电压稳定性等方面[12,15-17]。在电压稳定性研究方面，现有成果尚未形成体系。少量文献仅针对FFTS静态电压稳定性开展初步分析，静态电压稳定性不仅可表征系统静态运行时保持电压稳定运行的能力，还能够表征系统母线的功率极限[18-20]。文献[17]从电压稳定性分析的角度开展研究，借助*PV*和*VQ*特性曲线，同时运用模态分析方法，通过雅可比矩阵的特征值和自灵敏度值量化评估电压稳定性，并分析了2节点、5节点、6节点等简单FFTS，得出FFTS在功率传输能力及其电压稳定性方面的优势。但是该文献对系统电压稳定性的探讨直接从*PV*和*VQ*特性曲线入手，未对数学机理进行深究，结论普适性值得进一步探讨。

现有针对FFTS及其静态电压稳定性的研究，大多局限于结构相对简单的系统，缺乏对复杂FFTS的整体性、系统性分析。在简单FFTS中所验证的功率传输能力优势、电压稳定性改善效果等特性，是否能够在复杂FFTS中得以保持，还需进一步研究。

为解答上述关键问题，本文开展如下研究工作：与文献[17]从*PV*和*VQ*特性曲线入手不同，本文首先阐述静态电压稳定性的分析机理，并介绍连续潮流法的核心原理，从数学机理视角对FFTS系统电压稳定性进行分析。其次针对单机2节点FFTS、IEEE 14节点与IEEE 57节点的大规模FFTS，分析静态电压稳定规律与功率极限变化特征，研究发现，单机2节点系统的功率极限随频率降低呈单调递增趋势，而大规模FFTS的功率极限则表现为“先增大后减小”的非单调特性；为探究该非单调特性致因，本文在环网3节点系统中成功复现非单调现象。然后基于戴维南定理，推导得出戴维南等效电路下的有功功率极限表达式，代入单机2节点与环网3节点系统的参数进行分析，结果表明：环网3节点系统功率极限的非单调特性源于*PV*节点相角与系统电抗的耦合效应，表现为频率降低时，系统电抗减小，同时*PV*节点相角增大，二者对有功功率极限的影响方向相反，最终导致功率极限随频率降低呈现非单调变化。最后通过数值计算实现对功率极限非单调变化规律的定量分析，并基于上述研究推测：链式拓扑且*PQ*节点位于末端的系统，在低频运行场景下兼具静态电压稳定性与功率极限优势，并通过仿真进行验证。

1 静态电压稳定性分析机理

静态电压稳定性分析是沿时间轨迹捕捉不同时间断面上的系统状态。通过假设断面上的系统状态变量的微分为零，从而将描述非线性动态电力系统的微分-差分-代数方程组简化为纯代数方程组。在静态分析方法中，忽略了电力系统中动态元件的动力学特性，一般为稳态或准稳态模型[18,21-22]。

1.1　机理分析

下面从一个简单的单机2节点系统来分析，如图1所示。

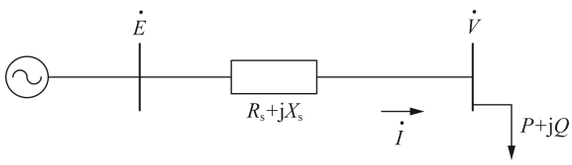


图1　单机2节点系统

Fig. 1　Single-machine two-bus system

系统共2个节点，发电机节点电压为$\dot{E}$；负荷节点电压为$\dot{V}$，复功率为$P+jQ$；线路阻抗为R_s+jX_s，流过线路的电流为$\dot{I}$。

负荷节点的电压如式(1)：

$$\dot{V}=\dot{E}-(R_s+jX_s)\dot{I} \tag{1}$$

式中：R_s、X_s分别为线路电阻和电抗。

做静态电压稳定性分析时只关注电压幅值即可，通过式(2)计算可消去电压相位的影响：

$$V=\sqrt{E^2/2-PR_s-QX_s\pm\sqrt{\left(PR_s+QX_s-E^2/2\right)^2-Z^2(P^2+Q^2)}} \tag{2}$$

式中：P、Q分别为母线吸收的有功功率和无功功率；Z为线路阻抗。

由式(2)可见，当线路参数一定时，电压幅值由母线吸收的有功功率和无功功率决定，如果发电机发出的功率输送到负荷节点后，无法满足负荷所需，电压幅值将会减小以至电压稳定性受到影响[23]。

从式(2)可得节点电压与负荷吸收的有功功率、无功功率的关系。当负荷无功功率不变时，节点电压随负荷有功功率变化而变化的曲线称作*PV*曲线，如图2所示。*PV*曲线反映了随负荷增加，系统电压逐渐降低直至崩溃的过程。

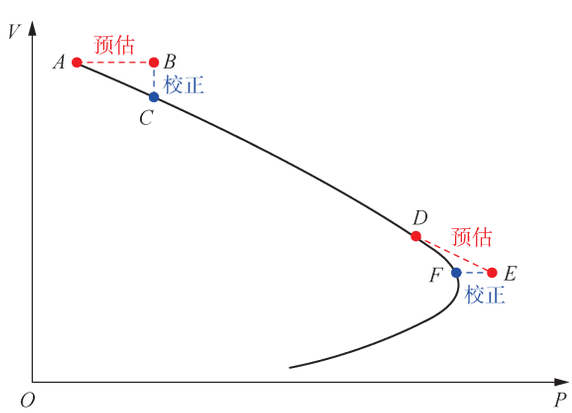


图2　*PV*曲线预估校正示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the *PV* curve prediction-correction process

当负荷有功功率不变时，节点电压随负荷无功功率变化而变化的曲线称作*VQ*曲线，如图3所示。它表示关键母线电压与该母线无功功率之间的关系。*VQ*曲线能够反映母线的无功裕度。如果曲线的最低点在$Q=0$上方，则表示系统的无功不足，若没有无功注入，则无法运行，需要附加无功补偿避免电压崩溃。

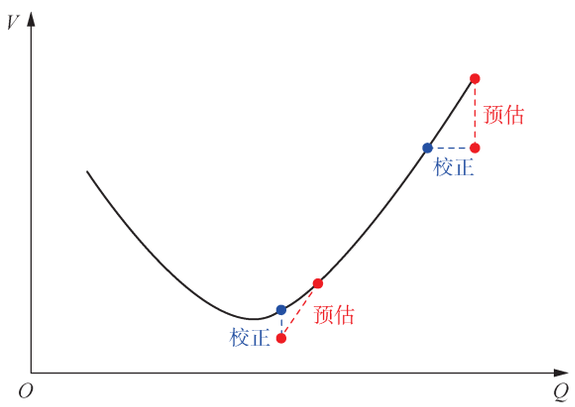


图3　*VQ*曲线预估校正示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the *VQ* curve prediction-correction process

1.2　连续潮流法

以*PV*曲线为例，从数学上看，同一负荷条件下，存在2个电压解时，潮流方程有解，系统潮流雅可比矩阵非奇异；同一负荷条件下，只存在一个电压解时，潮流方程无解，系统潮流雅可比矩阵奇异，因此，靠近电压稳定极限时，潮流难以收敛。

连续潮流法是求取*PV*曲线的有力工具[24]，它克服了接近稳定极限运行状态时潮流收敛性差的问题，其基本思想是预估与校正，如图2所示，从已知解*A*开始，以一个切线方向预估负荷增长后的解*B*，再以解*B*为初值，保持系统负荷不变，求出准确解*C*，重复上述步骤，直到靠近鼻端，常规潮流无法收敛，此时校正过程采用电压值固定的方法，可求出鼻端处的准确解*F*[25-29]。

2　FFTS静态电压稳定性及功率极限特性

本章基于分析机理与连续潮流法，从单机2节点系统展开FFTS静态电压稳定性及功率极限特性分析。

2.1　单机2节点FFTS静态电压稳定性及功率极限

对于单机2节点系统，在其他条件不变的情况下，系统频率降低运行，使得线路的电抗减小，下面分析线路电抗减小对负荷节点电压稳定性与功率极限的影响。

一般情况下，在电力系统的电力输送线路上，电阻远小于电抗，因此在此可忽略电阻，公式(2)可化

简为：

$$V=\sqrt{E^2/2-QX_s\pm\sqrt{E^4/4-X_s^2P^2-X_sE^2Q}} \quad (3)$$

由式(3)可知，如果电压幅值有2个解，那么一个为可行解，另一个则是不可行解，可行解写作式(4)：

$$V_1=\sqrt{E^2/2-QX_s+\sqrt{E^4/4-X_s^2P^2-X_sE^2Q}} \quad (4)$$

如果只有一个电压解，则该点对应负荷节点的静态稳定功率极限，此时满足式(5)：

$$E^4/4-X_s^2P_{max}{}^2-X_sE^2Q_{max}=0 \quad (5)$$

式中：P_{max}、Q_{max}分别为有功极限与无功极限。

不可行解对应系统的不稳定区域，因此只需关注可行解与静态稳定功率极限的变化[30]。

从式(4)来看，电抗下降，负荷节点的电压幅值增大，并且减小了负荷功率P、Q前的系数。负荷节点的负荷有功与无功功率发生波动时，电压幅值变化比频率降低前更小，从理论上证明了：在系统的稳定运行区域内，其他条件相同时，单机2节点系统低频运行时的静态电压稳定性更优越。

结合式(5)与有功、无功功率的关系，负荷节点的有功功率极限可由式(6)计算：

$$P_{max}^2+E^2\tan\theta P_{max}/X_s-E^4/4X_s^2=0 \quad (6)$$

式中：θ为节点电压与电流相位差。

解式(6)可得2个有功功率极限值，舍去负值，求得：

$$P_{max}=-E^2\tan\theta/2X_s+E^2\sqrt{\tan^2\theta+1}\,/2X_s=E^2/2X_s\left[\sqrt{\tan^2\theta+1}-\tan\theta\right] \quad (7)$$

假设功率因数恒定不变，由式(7)可知，电抗下降，有功功率极限增加，对于上述单机2节点系统，其他条件相同时，低频运行时的有功功率极限更大。

同样的道理，负荷节点的无功功率极限可由式(8)计算：

$$X_sQ^2/E^2\cot\theta+Q-E^2/4X_s=0 \quad (8)$$

求得：

$$Q=(\sqrt{1+\cot\theta}-1)E^2/2X_s\cot\theta \quad (9)$$

$$Q=(-\sqrt{1+\cot\theta}-1)E^2/2X_s\cot\theta \quad (10)$$

由式(9)和(10)可知，若节点存在一定的无功功率裕度，即所需无功功率为负，那么其他条件相同时，单机2节点系统低频运行时的无功裕度增大，无功功率极限得到提高。

理论分析结果表明，单机2节点FFTS无论是静态电压稳定性还是功率极限，均优于工频运行的系统。基于连续潮流法对该结论进行了仿真验证，仿真结果如图4所示，其中60 Hz为工频。

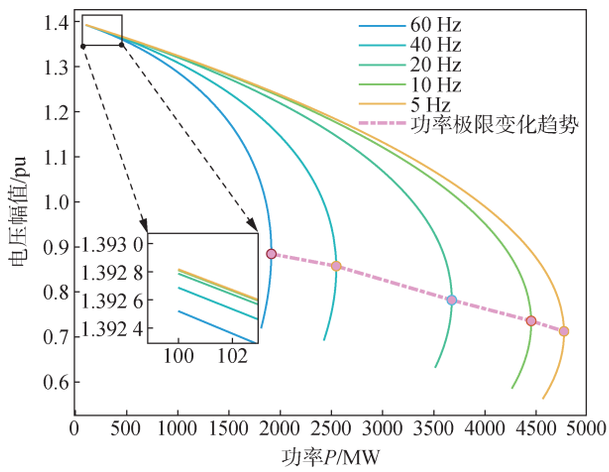


图4 单机2节点系统*PV*曲线

Fig. 4 PV Curve of the single-machine two-bus system

2.2 大规模FFTS静态电压稳定性及功率极限

恒定功率因数条件下，单机2节点系统低频运行时的静态电压稳定性及功率极限均优于工频运行。本节分析该结论在IEEE 14节点系统及IEEE 57节点系统等更大规模系统的适用性，大规模系统难以从数学机理分析静态电压稳定性，因此本文采用连续潮流法分析FFTS系统静态电压稳定性及功率极限。不同运行频率下，IEEE 14节点系统节点4及IEEE 57节点系统节点25的静态电压稳定性及功率极限变化如图5、6所示，系统结构见文献[31]和文献[32]。

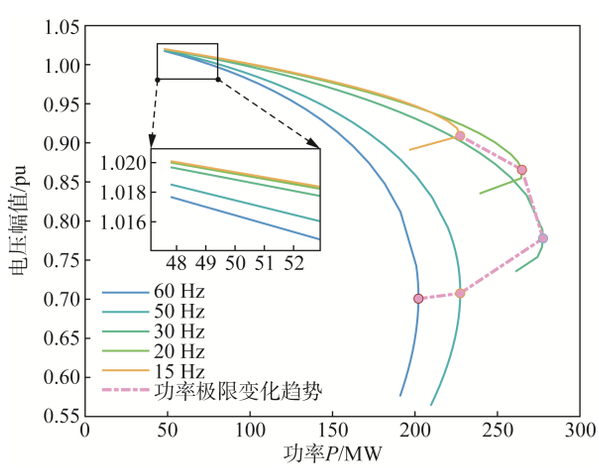


图5 IEEE 14系统节点4 *PV*曲线

Fig. 5 *PV* curve for bus 4 of the IEEE 14-bus system

在IEEE 14节点系统中，60 Hz为工频，由图5可知，增大相同负荷的情况下，频率越低，电压幅值下降越少，静态电压稳定性更优越；但是有功功率极限的变化却不是单调的，频率下降过程前期，较低频率有着更大的有功功率极限，但频率下降到一定程度后，有功功率极限出现下降的情况。类似的情况在IEEE 57节点系统中同样存在。

因此，低频率运行的单机2节点系统在功率极限

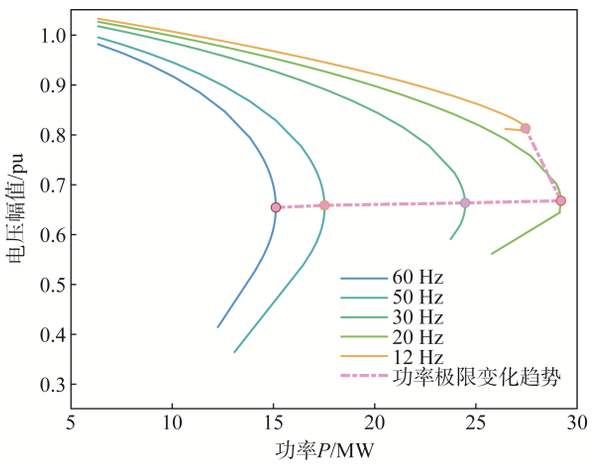


图6　IEEE 57 系统节点 25 *PV* 曲线

Fig. 6　*PV* curve for bus 25 of the IEEE 57-bus system

方面的优势并不能推广至大规模系统，功率极限随频率降低出现非单调变化，变化机理关乎分频输电系统能否发挥其大容量传输优势，亟需进一步探明。

2.3　简化系统复刻功率极限非单调特性

若大规模FFTS功率极限非单调变化的特性可在简单系统上复现，那么可基于简单系统从理论上分析随频率降低静态电压稳定性及功率极限的变化机理。

本节针对具有平衡节点、*PV*节点、*PQ*节点的环网3节点系统，分析频率降低对系统静态电压稳定性及功率极限带来的影响。3节点系统拓扑如图7所示，为简化计算分析，每条线路阻抗相等，均为(0.01+j0.04) pu，随运行频率下降，线路电抗的值减小，在电抗减小到一定程度时，节点功率极限出现“先增大后减小”的非单调现象，因此工频下电抗值较小，非单调现象更易出现，为在环网3节点系统中复刻出非单调现象，选择电抗仅为电阻的4倍。忽略对地电纳，节点3负荷功率因数恒定；节点1为平衡节点，节点2为*PV*节点，节点3为*PQ*节点，3个节点额定电压幅值均为1.0 pu，其中 $\dot{V}_1 = V_0\angle 0^\circ$，$\dot{V}_2 = V_0\angle\delta_2$，$\delta_2$为节点2相对于节点1的相角，$V_0$=1.0 pu。

在上述3节点系统中，频率降低对静态电压稳定性的影响，就是线路电抗下降对节点3电压幅值的影响，下面基于戴维南定理推导节点3的电压幅值表达式。

当节点3开路时，节点1(平衡节点)和节点2(*PV*节点)均为电压源。由于线路阻抗相等，节点3的开路电压幅值$|V_{th}|$为：

$$\left|V_{th}\right| = \left|(\dot{V}_1 + \dot{V}_2)/2\right| = V_0\cos(\delta_2/2) \tag{11}$$

将节点1和节点2短路后，从节点3看进去的等效阻抗Z_{th}为：

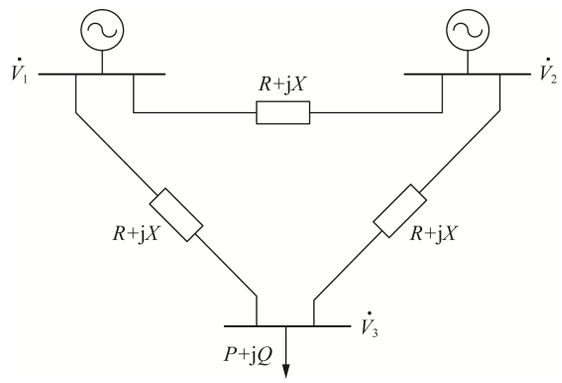


图7　3节点系统示意图

Fig. 7　Schematic diagram of a three-bus system

$$Z_{th} = (R + jX)/2 \tag{12}$$

式中：R、X分别为线路电阻和电抗。

节点3的负载功率为：

$$S_3 = P_3 + jQ_3 \tag{13}$$

式中：P_3、Q_3分别为节点3的负载有功功率和无功功率。

根据戴维南定理，节点3的电压满足：

$$V_3 = V_{th} - I_3 Z_{th} \tag{14}$$

其中节点3的注入电流I_3为：

$$I_3 = S_3^*/V_3^* \tag{15}$$

式中：S_3^*、V_3^*分别为节点3的负载功率和电压的共轭。

将式(11)—(13)及式(15)代入式(14)，取模平方，得到关于$|V_3|^2$的二次方程：

$$\left|V_3\right|^4 - \left[\left|V_{th}\right|^2 - (P_3R + Q_3X)\right]\left|V_3\right|^2 + S_3^2(R^2 + X^2)/4 = 0 \tag{16}$$

解得节点3的电压幅值为：

$$\begin{cases} \left|V_3\right| = \sqrt{(\left|V_{th}\right|^2 - (P_3R + Q_3X) \pm D)/2} \\ D = \sqrt{\left(\left|V_{th}\right|^2 - (P_3R + Q_3X)\right)^2 - S_3^2(R^2 + X^2)} \end{cases} \tag{17}$$

式中：$S_3^2 = P_3^2 + Q_3^2$，并且取“+”时，系统位于稳态运行区域。基于式(17)，可以分析系统频率下降对系统静态电压稳定性的影响。

当频率下降时，系统线路电抗降低，负荷节点的电压幅值增大，负荷节点的负荷有功与无功功率发生同样的波动时，在更小的电抗下，电压幅值变化更小，那么可以从理论上说明，在系统的稳定运行区域内，其他条件相同时，系统低频运行时的静态电压稳定性更优越。

环网3节点系统*PV*曲线如图8所示。随频率下降，静态电压稳定性提高，但功率极限却出现了非单调变化，大规模FFTS特性在环网3节点系统中复现。

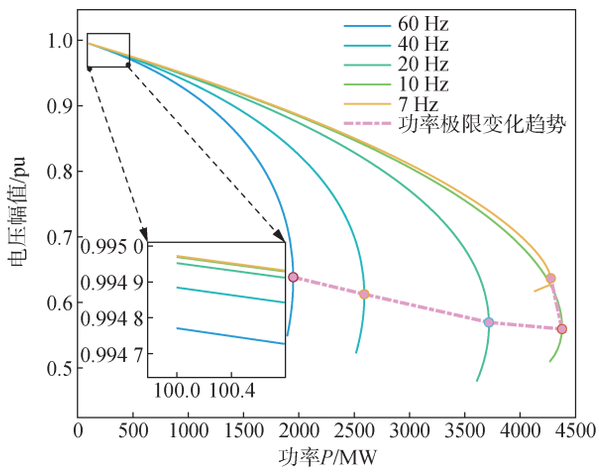


图8 环网3节点系统*PV*曲线

Fig. 8 *PV* curve of a three-bus ring system

3 功率极限非单调变化致因分析

无论是单机2节点系统、环网3节点系统，还是较大规模系统，低频运行时，静态电压稳定性都更加优越。但功率极限却呈现不同变化，本章通过对比单机2节点系统与环网3节点功率极限公式，分析功率极限非单调变化致因。

3.1 戴维南功率极限公式

本节基于戴维南电路推导出达到电压稳定极限时，负载的有功功率极限通用表达式，从理论上证明戴维南功率极限公式的合理性，为分析频率降低对电压稳定极限的影响奠定理论基础。戴维南电路如图9所示。

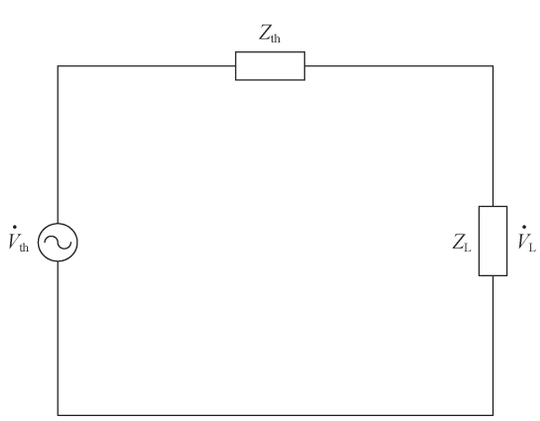


图9 戴维南电路示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the Thevenin circuit

在戴维南电路中，电流$\dot{I}$为：

$$\begin{cases}\dot{I}=\dot{V}_{th}/(Z_{th}+Z_L)\\ \dot{V}_{th}=\dot{I}\cdot Z_{th}+\dot{V}_L\\ Z_{th}=R_{th}+\mathrm{j}X_{th}\end{cases}\tag{18}$$

式中：Z_L为负载阻抗；$\dot{V}_L$为负载阻抗上的电压；R_{th}、X_{th}分别为等效电阻与等效电抗。

负载吸收的复功率为：

$$S=P+\mathrm{j}Q=\dot{V}_L\cdot\dot{I}^*=\dot{V}_L\cdot(\dot{V}_{th}^*-\dot{V}_L^*)/Z_{th}^*\tag{19}$$

式中：“*”表示共轭。

为简便计算，取坐标轴方向与电压$\dot{V}_{th}$相同使得$\dot{V}_{th}$为实数，电压$\dot{V}_L$相角为θ，则有：

$$S=(V_L\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta}|V_{th}|-V_L^2)(R_{th}+\mathrm{j}X_{th})/(R_{th}^2+X_{th}^2)\tag{20}$$

取实部得到有功功率为：

$$P=\left[V_L|V_{th}|(R_{th}\cos\theta-X_{th}\sin\theta)-V_L^2R_{th}\right]/(R_{th}^2+X_{th}^2)\tag{21}$$

当系统达到电压稳定极限时，有：

$$\mathrm{d}P/\mathrm{d}V_L=0\tag{22}$$

将式(21)代入式(22)中，可推得：

$$|Z_L|=\left[|V_{th}|(R_{th}\cos\theta-X_{th}\sin\theta)\cdot|Z_{th}|/2R_{th}\right]/\left[|V_{th}|\sqrt{(R_{th}\cos\theta+X_{th}\sin\theta)^2}/2R_{th}\right]\tag{23}$$

当负载满足式(23)时，负载有功功率达到电压稳定极限时的有功功率。

一般相角θ较小，可进一步将式(23)简化为：

$$|Z_L|=|Z_{th}|\tag{24}$$

因此，当相角θ较小时，电压稳定极限时的有功功率对应于阻抗匹配时的最大功率。

又因为：

$$P=\mathrm{Re}\{V_LI^*\}=|V_{th}/(Z_{th}+Z_L)|^2\mathrm{Re}\{Z_L\}\tag{25}$$

将式(24)代入式(25)，可得戴维南表示的有功功率极限为：

$$P_{max}=(|V_{th}|^2\cos\phi)/[2|Z_{th}|+2(R_{th}\cos\phi+X_{th}\sin\phi)]\tag{26}$$

式中：ϕ为功率因数角。

式(26)即为推导出的有功极限公式，该公式具有普适性，只要将系统等效为戴维南电路，即可按式(26)得到其有功功率极限。

3.2 致因分析

将图1所示单机2节点系统中的发电机节点看作平衡节点，负荷节点看作*PQ*节点，取*E*=1.0 pu代入式(26)，为简化分析，取功率因数为1，算得*PQ*节点达到电压稳定极限时对应的有功功率极限为：

$$P_{max}=1/(2\sqrt{R_s^2+X_s^2}+2R_s)\tag{27}$$

将环网3节点系统参数代入式(26)，为简化分析，取功率因数为1，算得节点3达到电压稳定极限时对应的有功功率极限为：

$$P_{max}=\left[\cos(\delta_2/2)\right]^2/(\sqrt{R^2+X^2}+R)\tag{28}$$

δ_2是关于电抗的函数，频率降低时，线路电抗减小，节点2为*PV*节点，电压幅值不变，为保持有功功率不变，相角δ_2要增大，$\cos(\delta_2/2)$减小。

对比两个系统的戴维南功率极限公式，可以分析

得到环网3节点系统随频率降低功率极限非单调变化的致因。对于式(27)而言，频率降低，电抗减小，功率极限单调增大。对于式(28)而言，分子减小，分母也减小，随频率降低，其变化有极大可能不是单调的。

因此，在频率降低时，环网3节点系统中，*PV*节点的相角与电抗变化耦合，导致功率极限随频率变化出现非单调的变化。

因此，对于如图7所示系统，低频运行时的有功功率极限可能并不优于工频运行。因此，大规模FFTS母线的有功功率极限对于工频系统并不一定具有优势，具体数值计算在第4章中给出。

4　算例分析

4.1　单机2节点系统有功功率极限数值计算

在第2章中，从静态电压稳定性分析机理和连续潮流仿真2个方面分析可知，对于单机2节点系统，低频运行时静态电压稳定性及功率极限均优于工频运行；按照第3章戴维南有功功率极限公式分析，可以得到同样的结论，但都只是定性分析。在此对式(27)进行定量计算，并对比连续潮流法计算结果，如图10所示。

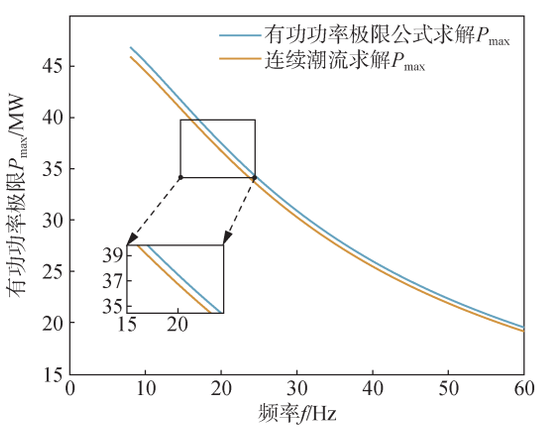


图10　单机2节点系统频率有功功率极限曲线

Fig. 10　Frequency-dependent active power limit curve for a single-machine two-bus system

对于单机2节点系统，戴维南有功功率极限公式计算结果与连续潮流法基本相同，有功功率极限随频率降低而单调上升，两者误差如图11所示。

4.2　环网3节点系统有功功率极限数值计算

在3.2节中，推导出了3节点系统节点3的戴维南有功功率极限公式式(28)，现在计算随频率降低节点3的有功极限如何变化，其中工频(60 Hz)时，线路电抗为0.04 pu，随频率降低，电抗减小，δ_2由潮流程序给出，计算结果如图12所示。在图中同样给出连续潮流法计算结果，并在图13中给出2种计算方法的误差，以此验证公式准确性。

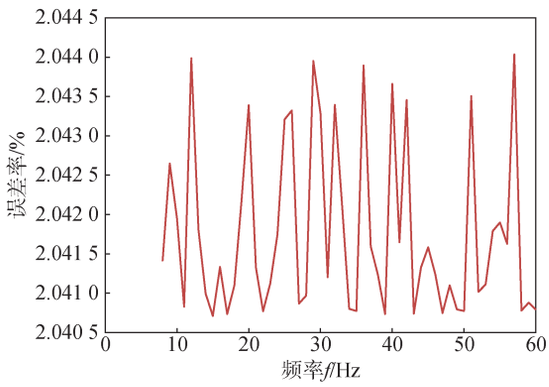


图11　单机2节点系统公式与连续潮流法误差

Fig. 11　Formulas and continuation power flow method errors in a single-machine two-bus system

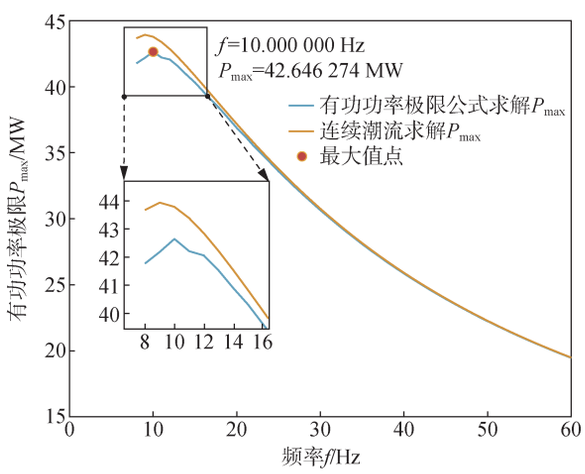


图12　环网3节点系统频率有功功率极限曲线

Fig. 12　Frequency-dependent active power limit curve for a three-bus ring system

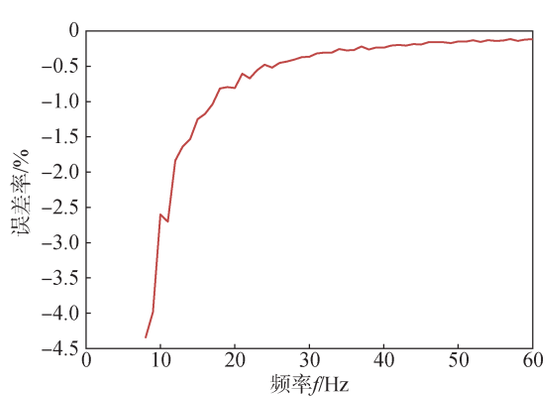


图13　环网3节点系统公式与连续潮流法误差

Fig. 13　Formulas and continuation power flow method errors in a three-bus ring system

通过计算发现，随频率下降，有功功率极限增大，直到10 Hz时达到最大值，频率再下降，有功功率极限减小，因此，对于图4所示的3节点系统，随频率下降有功功率极限并不会单调增大，而是呈现先增后减的趋势，这是因为频率下降，除了带来线路电抗的减小，还对*PV*节点的相角有影响，频率下降，*PV*节

点为了保持有功功率和电压幅值一定，选择增大相角，最终引发了有功功率极限非单调变化的现象。

具体而言，频率60 Hz时，线路电抗为0.04 pu，系统达到功率极限时，*PV*节点的相角大小约为-5.7°；频率20 Hz时，线路电抗为0.013 pu，系统达到功率极限时，*PV*节点的相角大小为-14.32°；频率7 Hz时，线路电抗为0.005 pu，系统达到功率极限时，*PV*节点的相角大小为-28.64°。

根据式(28)可知，频率引发电抗变化，不仅影响有功功率极限大小，还影响相角大小并间接影响有功功率极限，两者相互作用最终引发有功功率极限非单调变化。

4.3 链式FFTS静态电压稳定性及功率极限分析

在频率影响下，*PV*节点相角变化与电抗变化耦合，在环网中，两者对于有功功率极限的影响相反。可以推得，对于链式且*PQ*节点位于末端的系统，不会出现功率极限非单调变化的情况，FFTS的静态电压稳定性与功率极限均优于工频运行的情况。链式3节点、5节点、10节点FFTS仿真结果如图14—16所示，可知推论正确。

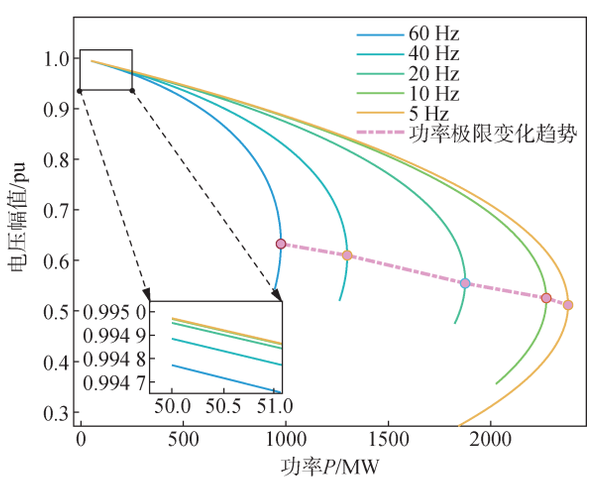


图14 链式3节点系统*PV*曲线

Fig. 14 *PV* curve of a three-bus series system

5 结 论

本文从静态电压稳定性机理展开，探究FFTS静态电压稳定性及功率极限特性。研究表明，在系统拓扑结构相同的条件下，当负荷水平等量增加时，FFTS的电压幅值下降幅度较小。这表明，在系统处于稳定运行区间内时，低频运行方式下的静态电压稳定性优于传统工频运行方式。

在功率极限方面，以有功功率极限为例，系统拓扑是关键，环网3节点系统*PV*节点相角与电抗的变化存在耦合，且随频率降低，相角与电抗的变化对有功功率极限影响呈现相反效果，频率降低到一定程度后，功率极限出现非单调变化。而对于链式且*PQ*节点位于末端的系统，随频率下降，*PQ*节点有功功率极限单调增加。类似环网3节点系统的拓扑在大规模系统中普遍存在，因此，在大规模FFTS中功率极限非单调变化的情况普遍存在。

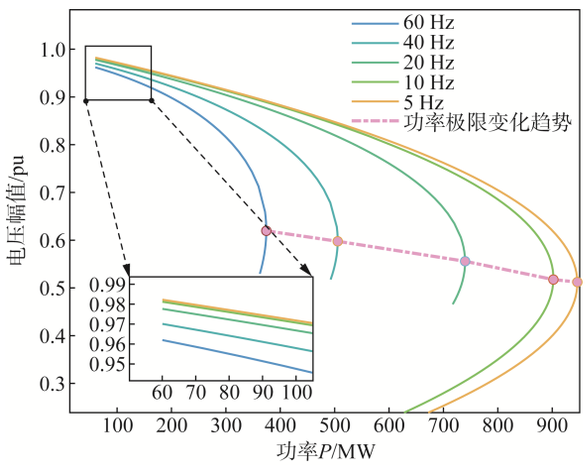


图15 链式5节点系统*PV*曲线

Fig. 15 *PV* curve of a five-bus series system

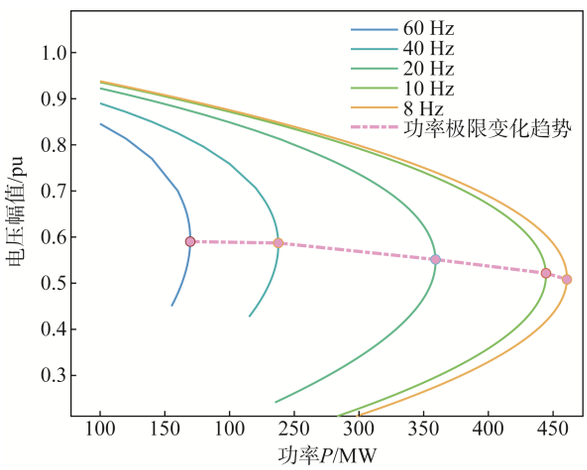


图16 链式10节点系统*PV*曲线

Fig. 16 *PV* curve of a ten-bus series system

通过静态电压稳定性分析，合理配置系统参数与拓扑，使得FFTS静态电压稳定性及大容量功率传输的优势充分发挥。如何合理配置系统参数避免上述情况，可作为下一步研究计划。

利益冲突声明(Conflict of Interests)：

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明(Authors' Contributions)：

张海涛主持项目研究，指导研究方向，提供理论指导；杨可俊承担研究方案设计、论证与优化；李保全、张思琪参与研究方案论证与优化；赵晨婷和魏亦

铭协助进行理论分析与仿真验证；王秀丽和王锡凡提供理论指导和实际工程案例支持。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6　参考文献

[1] 刘念，蒋凯．新型电力系统：清洁高效又智能[N]．光明日报，2024-09-19(16)．

[2]《新型电力系统发展蓝皮书》编写组．新型电力系统发展蓝皮书[M]．北京：中国电力出版社，2023：1-14．

[3] 汤广福．实施大规模高比例新能源外送攻坚行动 加快构建新型电力系统[EB/OL]．国家能源局，(2024-08-07)[2025-09-26]．https://www．ndrc．gov．cn/xxgk/jd/jd/202408/t20240807_1392273．html．

[4] WANG X F，WANG X L．Feasibility study of fractional frequency transmission system [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1996，11(2)：962-967．

[5] MENG Y Q，YAN S H，WU K，et al．Comparative economic analysis of low frequency AC transmission system for the integration of large offshore wind farms [J]．Renewable Energy，2021，179：1955-1968．

[6] GE J，YU H Y，ZHAO G L，et al．Research on low-frequency offshore wind power transmission and frequency conversion technology [C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)．IEEE，2021：464-468．

[7] 袁宁谦，郭灵瑜，贾锋，等．考虑机群主动升速的动态低频风电系统调度指令有功功率控制方法[J]．南方电网技术，2025，19(12)：158-168，178．
YUAN Ningqian，GUO Lingyu，JIA Feng，et al．Active power control method for dynamic low-frequency wind power systems under dispatch instructions considering active speed-up of turbine cluster [J]．Southern Power System Technology，2025，19(12)：158-168，178．

[8] WANG X F，CAO C J，ZHOU Z C．Experiment on fractional frequency transmission system [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2006，21(1)：372-377．

[9] 王锡凡，王秀丽，滕予非．分频输电系统及其应用[J]．中国电机工程学报，2012，32(13)：1-6．
WANG Xifan，WANG Xiuli，TENG Yufei．Fractional frequency transmission system and its applications [J]．Proceedings of the CSEE，2012，32(13)：1-6．

[10] 黄明煌，王秀丽，刘沈全，等．分频输电应用于深远海风电并网的技术经济性分析[J]．电力系统自动化，2019，43(5)：167-174．
HUANG Minghuang，WANG Xiuli，LIU Shenquan，et al．Technical and economic analysis on fractional frequency transmission system for integration of long-distance offshore wind farm [J]．Automation of Electric Power Systems，2019，43(5)：167-174．

[11] 刘宝．柔性低频交流输电从技术创新走向工程应用[N/OL]．国家电网报，2023-08-08[2025-09-18]．https://www．china5e．com/news/news-1156337-1．html．

[12] 蔡仲启，魏成骁，王秀丽，等．计及系统谐振稳定性和运行可靠性的海上风电分频送出规划[J]．电力系统自动化，2025，49(17)：34-43．
CAI Zhongqi，WEI Chengxiao，WANG Xiuli，et al．Fractional frequency transmission planning for offshore wind power considering resonance stability and operation reliability of system [J]．Automation of Electric Power Systems，2025，49(17)：34-43．

[13] 高淑萍，周永宁，王晨清，等．基于差动正序分量波形相似度的海上风电低频输电线路保护方法[J]．电力系统保护与控制，2025，53(11)：95-104．
GAO Shuping，ZHOU Yongning，WANG Chenqing，et al．Protection method for offshore wind power low-frequency transmission lines based on differential positive-sequence component waveform similarity [J]．Power System Protection and Control，2025，53(11)：95-104．

[14] 高晨景，陈武晖，张庚午，等．海上风电低频外送系统故障穿越分析[J]．电工技术学报，2026，41(5)：1637-1652．
GAO Chenjing，CHEN Wuhui，ZHANG Gengwu，et al．Fault ride-through analysis of offshore wind power low-frequency transmission system [J]．Transactions of China Electrotechnical Society，2026，41(5)：1637-1652．

[15] DUAN Z Y，MENG Y Q，YAN S H，et al．Multi-objective optimization and stable operation control strategy for fractional frequency transmission system based on large signal stability analysis [J]．IEEE Transactions on Sustainable Energy，2024，15(3)：2091-2102．

[16] DUAN Z Y，MENG Y Q，WANG T Y，et al．Large-signal stability analysis using Takagi-Sugeno fuzzy model theory for fractional frequency transmission system under grid faults [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2024，39(1)：2227-2238．

[17] NGO T，NGUYEN Q，SANTOSO S．Voltage stability of low frequency AC transmission systems [C]//2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)．IEEE，2016：1-5．

[18] HATZIARGYRIOU N，MILANOVIC J，RAHMANN C，et al．Definition and classification of power system stability – revisited & extended[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2021，36(4)：3271-3281．

[19] 仇晨光，张振华，李蓝青，等．计及DSSC的含新能源电网静态电压稳定性分析[J]．电力建设，2023，44(10)：33-40．
QIU Chenguang，ZHANG Zhenhua，LI Lanqing，et al．Static voltage stability analysis of a power grid with new energy sources considering DSSC [J]．Electric Power Construction，2023，44(10)：33-40．

[20] 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．

[21] SUN Y G，DING T，HAN O Z，et al．Static voltage stability analysis based on multi-dimensional holomorphic embedding method[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2023，38(4)：3748-3759．

[22] 梁修锐，刘道伟，杨红英，等．数据驱动的电力系统静态电压稳

定态势评估[J]. 电力建设, 2020, 41(1): 126-132.
LIANG Xiurui, LIU Daowei, YANG Hongying, et al. Data-driven situation assessment of power system static voltage stability [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(1): 126-132.

[23] 汤涌. 电力系统电压稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
TANG Yong. Voltage stability analysis of power system [M]. Beijing: Science Press, 2021.

[24] 刘宝柱, 李泽锴, 胡俊杰, 等. 考虑静态电压安全边界松弛的受端电网运行充裕性提升方法[J/OL]. 高电压技术, 2025: 1-12. (2025-09-19) [2025-09-26]. https://doi. org/10. 13336/j. 1003-6520. hve. 20250825.
LIU Baozhu, LI Zekai, HU Junjie, et al. An operational adequacy enhancement method for receiving-end grid considering static voltage security boundary relaxation [J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-12. (2025-09-19) [2025-09-26]. https://doi. org/10. 13336/j. 1003-6520. hve. 20250825.

[25] WANG T Z, WANG S S, MA S C, et al. An extended continuation power flow method for static voltage stability assessment of renewable power generation-penetrated power systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024, 71(2): 892-896.

[26] DOBSON I, LU L. Voltage collapse precipitated by the immediate change in stability when generator reactive power limits are encountered [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1992, 39(9): 762-766.

[27] SURESH A, HASAN M S, KAMALASADAN S, et al. A distributed energy resources integrated transmission and distribution continuation power flow model with sequence component approach [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61(4): 5637-5648.

[28] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压稳定分析的改进连续潮流法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 13-16.
GUO Ruipeng, HAN Zhenxiang. An improved continuation power flow method for voltage stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 13-16.

[29] LU J, LIU C W, THORP J S. New methods for computing a saddle-node bifurcation point for voltage stability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 978-989.

[30] HUANG R M, DU X Z, LAN L, et al. Static voltage stability margin calculation and characteristics of very large urban power grid [C]//2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, 2019: 1493-1497.

[31] 江雪辰, 袁越, 吴涵, 等. 基于分段Copula函数和高斯混合模型的多段线性化概率潮流计算[J]. 电力建设, 2018, 39(9): 120-128.
JIANG Xuechen, YUAN Yue, WU Han, et al. Multistage linearization probabilistic power flow calculation based on piecewise copula and Gaussian mixture model [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(9): 120-128.

[32] 李华取, 肖劲松, 舒展, 等. 一种基于点估计的风电并网位置和容量优化方法[J]. 电力建设, 2020, 41(4): 109-116.
LI Huaqu, XIAO Jinsong, SHU Zhan, et al. Point-estimation based method for optimizing both location and capacity of grid-connected wind farm [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4): 109-116.

收稿日期: 2025-10-20 **修回日期**: 2025-11-18


张海涛

作者简介:

张海涛(1991),男,博士,副教授,博士生导师,通信作者,主要研究方向为电力系统运行、控制与稳定性分析,E-mail:htzhangee@xjtu.edu.cn;

杨可俊(2002),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统电压稳定性分析;

李保全(2002),男,硕士研究生,主要研究方向为风电低频汇集送出系统暂态稳定性分析;

张思琪(1988),女,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统继电保护;

赵晨婷(2001),女,硕士研究生,主要研究方向为分频输电系统、换流器控制及稳定性分析;

魏亦铭(2002),男,硕士研究生,主要研究方向为交直流电力系统稳定性分析;

王秀丽(1961),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统规划、电力市场、电力系统分析等;

王锡凡(1936),男,教授,博士生导师,院士,主要研究方向为电力系统分析、电力系统规划和可靠性、新型输电方式等。

(编辑 曾文静)