

引文格式:郭小龙,亢朋朋,宋鹏飞,等. 基于节点电磁暂态戴维南等值的风电并网点承载功率极限评估[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(2): 278-286.

GUO Xiaolong, KANG Pengpeng, SONG Pengfei, et al. Power transmission limits assessment on PCC of grid-connected wind power based on nodal electromagnetic transient thevenin equivalence [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(2): 278-286.

## 基于节点电磁暂态戴维南等值的风电并网点 承载功率极限评估

郭小龙<sup>1</sup>, 亢朋朋<sup>1</sup>, 宋鹏飞<sup>1</sup>, 陈武晖<sup>2</sup>, 康佳乐<sup>2</sup>

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐; 2. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原)

**摘 要:**【目的】风电并网点存在承载功率极限, 当风电并网功率超过并网点承载的功率极限, 可能导致电压失稳和宽频振荡问题, 威胁系统安全稳定运行。电压稳定属于机电暂态时间尺度, 而宽频振荡属于电磁暂态时间尺度, 涉及10到几百Hz的宽频动态。【方法】本文提出一种电磁暂态戴维南等值阻抗简化模型求解方法。【结果】该方法能够准确建模交流电网从10 Hz到几百Hz的宽频动态。应用风电并网点戴维南电磁暂态等值方法, 从电压稳定性和风电动态稳定性两个约束条件对并网点承载功率极限评估, 提出风电并网点承载功率极限评估方法。基于IEEE 39节点算例系统验证所提电磁暂态戴维南等值法和并网点承载功率极限评估方法的准确性。

**关键词:** 电磁暂态戴维南等值; 功率传输极限; 电压稳定; 风电并网点

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A

**DOI:** 10.16355/j.tyut.1007-9432.20250022

**文章编号:** 1007-9432(2026)02-0278-09

## Power Transmission Limits Assessment on PCC of Grid-connected Wind Power Based on Nodal Electromagnetic Transient Thevenin Equivalence

GUO Xiaolong<sup>1</sup>, KANG Pengpeng<sup>1</sup>, SONG Pengfei<sup>1</sup>, CHEN Wuhui<sup>2</sup>, KANG Jiale<sup>2</sup>

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, China; 2. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China)

**Abstract:** 【Purposes】Transmission power limit exists in point of common coupling (PCC) of grid-connected wind power, when the transmission power exceeds the limit, it may lead to voltage instability and broadband oscillation problems, threatening the safety and stability of power system. Voltage stability belongs to the electromechanical transient time scale, whereas broadband oscillations belong to the electromagnetic transient time scale, involving broadband dynamics from 10 Hz to several hundred hertz. 【Methods】In this work, a simplified model solution method for electromagnetic transient Thevenin equivalent impedanc was proposed. 【Results】With the proposed method, the wide frequency dynamics of grids from 10 Hz to several hundred hertz can be accurately modeled.

收稿日期: 2025-01-09; 修回日期: 2025-04-21

基金项目: 国网新疆电力有限公司科技项目(SGXJ0000TKJS2310211)

第一作者: 郭小龙, 博士, 正高级工程师, 主要从事电网运行控制研究, (E-mail)ncepugxl@sina.com

通信作者: 陈武晖, 博士, 教授, 主要从事电力系统稳定与控制研究, (E-mail)chenwuhui@tyut.edu.cn

Then, on the basis of Thevenin electromagnetic transient equivalence method, the transmission power limits on PCC of grid-connected wind power are evaluated with two constraints of voltage stability and wind power dynamic stability. Finally, the accuracy of the proposed electromagnetic transient Thevenin equivalence method and the transmission power limits assessment method on PCC is systematically verified by using the IEEE 39-bus system.

**Keywords:** electromagnetic transient Thevenin equivalence; transmission power limits; voltage stability; point of common coupling (PCC)

随着风电、光伏等新能源机组的大量接入,新能源并网稳定问题受到关注<sup>[1-5]</sup>。新能源并网点承载功率极限直接决定了新能源集群能够安全并网的最大功率水平,并网点风电功率超过承载极限,容易引起电压稳定和宽频振荡问题。因此,准确评估并网点承载功率极限,已成为电力系统运行和规划的关键技术。

目前,针对新能源并网传输功率极限评估问题,国内外学者开展了广泛的研究:司大军等<sup>[6]</sup>通过静态负荷与动态负荷模型,计算了云南电网主要断面的功率传输极限。许晓菲等<sup>[7]</sup>基于灵敏度分析方法,推导了预防风电汇集系统静态电压失稳的功率传输极限计算公式。康勇军等<sup>[8-9]</sup>研究了逆变器接入单机无穷大系统时的功率传输特性。黄海荣等<sup>[10]</sup>提出了新能源并网系统的功率传输极限分析模型,并研究了含无功补偿装置的新能源并网系统的功率传输极限以及静态稳定边界。ZHOU等<sup>[11]</sup>探讨了锁相环参数变化对逆变器并网极限功率传输能力的影响。上述研究为功率传输极限的静态评估提供了重要参考,但大多集中于从逆变器侧的静态分析,缺乏对电网侧动态特性的深入建模,也未充分考虑风电场集群的动态特性对并网功率传输的影响。

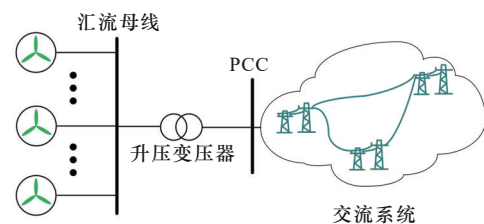
随着电网结构日益复杂,传统的单机无穷大系统已难以有效反映电网的动态特性。为解决这一问题,戴维南等值法凭借其将复杂多节点系统简化为单一节点的优势,显著简化了电网建模过程,并广泛应用于电压稳定性分析<sup>[12-14]</sup>。传统的戴维南等值法通常基于系统的网络拓扑结构及节点电压方程或潮流方程,进行工频下的电网简化建模<sup>[15-17]</sup>。然而,随着风电大规模接入电网,风电并网引发的宽频振荡问题愈发严重,电网的阻抗特性随频率发生显著变化,传统的戴维南等值法已无法表征风电并网系统电磁暂态特性的精确表征。

针对上述问题,本文提出一种电磁暂态戴维南等值法,旨在通过建立复阻抗模型来适应宽频范围

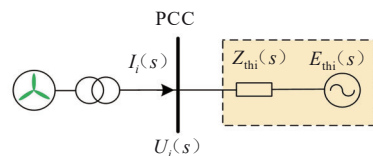
的电磁暂态动态分析。该方法通过精确建模电网的宽频动态特性,为风电并网系统提供更加细致的动力学描述。在此基础上,本文综合考虑系统的静态与动态特性,扩展传统静态电压稳定性约束,提出包含风电并网动态稳定性分析的功率承载极限评估方法。该方法充分考虑电网与风电场之间的交互作用,能够全面评估并网点的功率承载极限,并揭示静态与动态因素共同作用下的功率传输特性,为电力系统的安全稳定运行提供更为准确的理论依据。

## 1 问题提出

风电场/集群经PCC母线集中并入电网,如图1(a)所示。当风电接入电网的功率超过某一功率极限时,可能带来电压失稳和振荡失稳等问题,威胁到电力系统的安全与稳定运行。因此,正确评估风电并网点的承载功率极限,在电力系统规划和运行限制并网点风电输入功率小于能够承载的功率极限,是保证电力系统和风电场/集群安全稳定运行的关键技术。



(a) 风电并网系统电路图



(b) 风电场/集群并网系统等值电路图

图1 风电并网系统戴维南等值电路图

Fig. 1 Thevenin equivalent models of wind power grid-connected systems

风电场/集群并网点(PCC)可注入功率极限主要由电网的频率响应特性和风电场的动态特性决

定。风电场/集群内部和电网内部详细模型复杂,很难精细建模。风电场动态研究通常根据风机型号将风电场内部  $n$  台风机等值为单台或者多台风机<sup>[18]</sup>,这种建模通常能够满足研究分析风电场与电网相互作用动态的需求。

对于电网,传统电压稳定研究建立从 PCC 点向电网看进去的戴维南等值电路,其等值阻抗为工频下的恒定阻抗。但是,这种方法只能满足机电暂态时间尺度的电压稳定,无法满足风电场电磁暂态动态研究要求。电磁暂态时间尺度涉及从 10 Hz 到几百 Hz 的宽频动态,需要建模 PCC 点向电网看进去 10 Hz 到几百 Hz 的频率响应特性,电磁暂态时间尺度的频率响应特性是复阻抗  $Z_{thi}(s)$ ,随着频率变换阻抗值会变换。

等值后并网系统如图 1(b)所示,假设风电场/集群内都是同型风电机组,可等值为单台风电机组,交流系统通过戴维南等值法被简化为包含戴维南等值电势  $E_{thi}$  和戴维南等值阻抗  $Z_{thi}(s)$  的串联电路。 $Z_{thi}(s)$  包含系统的高频动态,可以通过解析方法建立,也可以通过频率扫描方法建立。

本文拟提出节点电磁暂态戴维南等值解析方法,然后提出基于多项式拟合的电磁暂态戴维南等值阻抗简化模型,应用所提戴维南等值方法提出计及电压稳定约束和宽频振荡稳定约束的风电并网的功率承载极限评估方法,为风电场并网规划和运行提供参考依据。

## 2 电磁暂态戴维南等值方法

### 2.1 节点导纳矩阵戴维南等值原理

戴维南等值模型的核心在于等值阻抗的确定,传统求解方法计算过程如式(1)所示,过程比较繁琐。

$$Z_{thi}(s) = \frac{E_{thi}(s) - U_i(s)}{I_i(s)}. \quad (1)$$

式中:  $U_i$ 、 $I_i$  分别为节点  $i$  的电压、电流;  $s = j\omega$ ,  $\omega$  为电气角速度。

下面介绍利用系统的节点导纳矩阵快速求取等值节点的戴维南等值阻抗的方法。

设原系统的节点导纳矩阵  $Y_0(s)$  如下:

$$Y_0(s) = \begin{pmatrix} Y_{11}(s) & \cdots & Y_{1i}(s) & \cdots & Y_{1n}(s) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1}(s) & \cdots & Y_{ii}(s) & \cdots & Y_{in}(s) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1}(s) & \cdots & Y_{ni}(s) & \cdots & Y_{nn}(s) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

对于 PQ 节点的负荷,可以按恒阻抗进行处理,负荷节点  $k$  的等效阻抗计算公式为:

$$Z_{Lk}(s) = \frac{U_k(s)}{I_k(s)} = \frac{U_k^2(s)}{P_k - jQ_k} = \frac{U_k^2(s)}{S_k^*}. \quad (3)$$

式中:  $U_k$ 、 $I_k$  和  $S_k$  分别为负荷节点  $k$  的电压、电流和复功率;上标“\*”表示共轭。

将负荷等效阻抗归并到原系统的节点导纳矩阵中,只需修改导纳矩阵中与负荷节点  $k$  所对应的对角元素。修改后的导纳矩阵  $Y_1(s)$  如下:

$$Y_1(s) = \begin{pmatrix} Y_{11}(s) & \cdots & Y_{1i}(s) & \cdots & Y_{1k}(s) & \cdots & Y_{1n}(s) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1}(s) & \cdots & Y_{ii}(s) & \cdots & Y_{ik}(s) & \cdots & Y_{in}(s) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{k1}(s) & \cdots & Y_{ki}(s) & \cdots & Y_{kk}(s) + \frac{1}{Z_{Lk}(s)} & \cdots & Y_{kn}(s) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1}(s) & \cdots & Y_{ni}(s) & \cdots & Y_{nk}(s) & \cdots & Y_{nn}(s) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

利用外加电流源法求解发电机节点  $i$  的戴维南参数时,相当于把发电机短路,此时需要将节点  $i$  的

自导纳减去发电机导纳  $\frac{1}{Z_{Gi}(s)}$ ,导纳矩阵中其他的值不会改变,导纳矩阵变为:

$$Y_2(s) = \begin{pmatrix} Y_{11}(s) & \cdots & Y_{1i}(s) & \cdots & Y_{1k}(s) & \cdots & Y_{1n}(s) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1}(s) & \cdots & Y_{ii}(s) - \frac{1}{Z_{Gi}(s)} & \cdots & Y_{ik}(s) & \cdots & Y_{in}(s) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{k1}(s) & \cdots & Y_{ki}(s) & \cdots & Y_{kk}(s) + \frac{1}{Z_{Lk}(s)} & \cdots & Y_{kn}(s) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1}(s) & \cdots & Y_{ni}(s) & \cdots & Y_{nk}(s) & \cdots & Y_{nn}(s) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

系统的导纳矩阵方程变为:

$$Y_2(s)U_2(s)=I_0(s). \quad (6)$$

此时向发电机节点*i*处单独注入单位电流,其余节点的注入电流都为0,即

$$I_0(s)=\begin{bmatrix} 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

↑  
第*i*行

将 $I_0(s)$ 代入到导纳矩阵方程式(6),即可推得节点*i*处的戴维南等值阻抗,即为注入单位电流后节点*i*的电压。

$$Z_{thi}(s)=U_i(s). \quad (8)$$

由上述参数计算可以看出,戴维南等值参数的求解仅与系统的导纳矩阵相关,即仅受被等值系统内部参数的影响。当被等值系统的内部参数保持不变时,系统的戴维南等值参数也不会发生变化。因此,风力发电机的参数或运行方式的变化,不会对系统的戴维南等值参数产生影响。本文所提戴维南等值方法基于系统节点导纳矩阵和预设负荷阻抗模型,适用于已知或典型负荷分布场景。对于动态负荷变化场景,需结合实时量测数据更新节点导纳矩阵并重新计算戴维南等值参数。

## 2.2 电磁暂态戴维南等值阻抗简化辨识方法

在电磁暂态时间尺度下,电网的等值阻抗呈现出频率依赖特性,直接应用于稳定性分析存在较高的计算复杂度。为简化这一过程,本节引入多项式数据拟合方法对电网等值阻抗进行简化辨识。通过构建一个多项式阻抗模型来近似电网等值阻抗依频特性,反映电网动态响应的关键特征。该方法为风电场与电网的相互作用动态研究提供了简洁而精准的等值电路描述,有效降低了计算难度,为电力系统的稳定性分析提供可靠的理论基础。

交流系统戴维南等值阻抗计算步骤如下:

Step1:求解接入系统的节点导纳矩阵 $Y_2(s)$ 。考虑负荷节点和接入点发电机自导纳的影响,根据式(5)对原节点导纳矩阵进行修正,得到接入系统的节点导纳矩阵。

Step2:求解电磁暂态时间尺度下的戴维南等值阻抗 $Z_{thi}(s)$ 。向接入节点注入单位电流,根据式(6)求取注入后的节点电压,所求电压即为交流系统戴维南等值阻抗。

Step3:求解接入系统多项式拟合后等值阻抗 $Z_{eq}(s)$ 。采用数据拟合算法分别将等值电阻 $R_{thi}$ 和等值电抗 $X_{thi}$ 拟合成多项式形式,合理选择拟合阶数,确保拟合多项式能够准确再现电网的宽频动态特性,拟合阻抗表示如下:

$$\begin{cases} Z_{eq}(s)=R_{eq}(\omega)+jX_{eq}(\omega) \\ R_{eq}(\omega)=m_2\omega^2+m_1\omega+m_0 \\ X_{eq}(\omega)=n_2\omega^2+n_1\omega+n_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $Z_{eq}(s)$ 为拟合后的等值阻抗; $R_{eq}(\omega)$ 和 $X_{eq}(\omega)$ 分别为 $Z_{eq}(s)$ 的实部和虚部,即拟合后的电阻和电抗; $m_2$ 、 $m_1$ 、 $m_0$ 和 $n_2$ 、 $n_1$ 、 $n_0$ 分别为拟合后的电阻和电抗的多项式系数。

## 3 风电场/集群并网点功率极限评估

### 3.1 电压稳定性对并网点功率极限约束

在新能源并网系统中,短路比 $K_{SCR}$ 用来衡量交流系统与新能源的相对强弱,定义如下:

$$K_{SCR}=\frac{S_{ac}}{P_{dN}}=\frac{U_N^2}{P_{dN}}\frac{1}{|Z(s_0)|}. \quad (10)$$

式中: $S_{ac}$ 为交流系统的短路容量; $P_{dN}$ 为新能源并网的额定容量; $U_N$ 为交流系统的额定电压; $Z(s_0)$ 为工频下交流系统的等值阻抗; $s_0=j\omega_0$ , $\omega_0$ 为工频电气角速度。

系统的短路比与系统的等值阻抗和并网容量密切相关。当系统运行方式或风电并网容量发生改变后,系统的短路比也会相应变化。将风电并网点电压处于临界稳定状态时的短路比定义为临界短路比 $K_{CSCR}$ :

$$K_{CSCR}=\frac{U_N^2}{P_{max}}\frac{1}{|Z(s_0)|}. \quad (11)$$

式中: $P_{max}$ 为PCC母线极限传输功率。

采用图2所示 $P$ - $V$ 曲线分析并网系统静态电压稳定性,当系统传输功率增加时,运行点从上半支过渡到下半支,在拐点处传输功率达到极限,此时,风电并网点电压处于临界稳定状态。

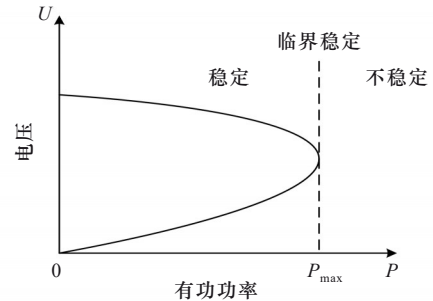


图2 等值系统 $P$ - $V$ 曲线

Fig.2  $P$ - $V$  curve of equivalent system

临界短路比建立了系统传输功率与静态电压稳定性的关系,反映了交流系统对电力电子设备的临界电压支撑强度,是“稳定”和“不稳定”运行区域之间的分界线。当系统的短路比达临界短路比时,

风电并网点电压处于临界电压,此时并网点功率为极限功率。

针对图 2 所示系统,并网点处潮流方程如下:

$$S_{\text{pcc}} = P_{\text{pcc}} + jQ_{\text{pcc}}. \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_{\text{pcc}} = \frac{U^2 R_2(\omega_0) + UE_{\text{thi}}(s_0)(X_2(\omega_0) \sin \theta - R_2(\omega_0) \cos \theta)}{Z_2^2(s_0)} \\ Q_{\text{pcc}} = \frac{U^2 X_2(\omega_0) + UE_{\text{thi}}(s_0)(R_2(\omega_0) \sin \theta - X_2(\omega_0) \cos \theta)}{Z_2^2(s_0)} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $U$  为风电并网点电压;  $\theta$  为并网点电压和戴维南等值电势间相位差;  $P_{\text{pcc}}$ 、 $Q_{\text{pcc}}$  和  $S_{\text{pcc}}$  分别为 PCC 母线有功功率、无功功率和复功率。

对式 (13-14) 进一步整理, 得到关于  $U^2$  的一元二次方程:

$$U^4 - 2(P_{\text{pcc}} R_2(\omega_0) + Q_{\text{pcc}} X_2(\omega_0) + E_{\text{thi}}^2(s_0))U^2 + Z_2^2(s_0)S_{\text{pcc}}^2 = 0. \quad (14)$$

对上式进行求解, 得到并网点电压:

$$U = E_{\text{thi}}(s_0) \left( \frac{1 + 2\lambda \pm \Delta^{0.5}}{2} \right)^{0.5}. \quad (15)$$

$$\Delta = 1 + 4(\lambda - \mu^2). \quad (16)$$

式中:  $\Delta$  为一元二次方程的判别式;

$$\lambda = \frac{P_{\text{pcc}} R_2(\omega_0) + Q_{\text{pcc}} X_2(\omega_0)}{E_{\text{thi}}^2(s_0)},$$

$$\mu = \frac{P_{\text{pcc}} X_2(\omega_0) - Q_{\text{pcc}} R_2(\omega_0)}{E_{\text{thi}}^2(s_0)}.$$

当  $\Delta=0$  时, 并网点电压有唯一物理解, 对应于系统临界稳定状态。此时, 对应的功率即为最大传输功率  $P_{\text{max1}}$ :

$$P_{\text{max1}} = [R_2(\omega_0)(E_{\text{thi}}^2(s_0) + 2Q_{\text{pcc}} X_2(\omega_0)) + E_{\text{thi}}(s_0) Z_2(s_0) \sqrt{E_{\text{thi}}^2(s_0) + 4Q_{\text{pcc}} X_2(\omega_0)}] / E_{\text{thi}}^2(s_0). \quad (17)$$

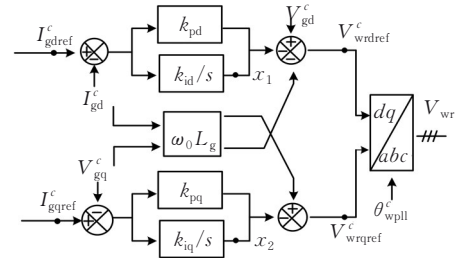
根据临界短路比定义, 当风电并网 PCC 母线功率小于  $P_{\text{max1}}$  时, 系统短路比大于临界短路比, 风电并网点电压处于稳定状态。

### 3.2 风电动态稳定性对并网点功率极限约束

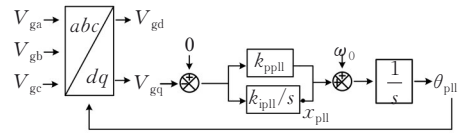
风机电流内环和锁相环的动态特性是研究风电并网稳定性问题的关键。

直驱风机网侧换流器控制结构如图 3 所示, 推得直驱风机状态空间模型如下:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta x_1 \\ \Delta I_q \\ \Delta x_2 \\ \Delta \theta_{\text{pll}} \\ \Delta x_{\text{pll}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & 0 & 0 & 0 \\ a_{51} & 0 & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & 0 & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta x_1 \\ \Delta I_q \\ \Delta x_2 \\ \Delta \theta_{\text{pll}} \\ \Delta x_{\text{pll}} \end{bmatrix}. \quad (18)$$



(a) 直驱风机网侧换流器电流内环控制



(b) 直驱风机网侧换流器锁相环控制

图 3 网侧变流器控制结构图

Fig. 3 Control structure diagrams of grid-side converters

式中,  $I_d$  和  $I_q$  分别为风机输出电流  $d$ 、 $q$  轴分量;  $x_1$  和  $x_2$  分别为电流内环  $d$ 、 $q$  轴相应控制变量;  $\theta_{\text{pll}}$  和  $x_{\text{pll}}$  分别为锁相环角度及相应控制变量, 状态矩阵各元素及变量含义见附录 A。

采用式 (9) 中  $Z_{\text{eq}}(s)$  表示交流系统等效阻抗, 以锁相环状态方程为例推得传递函数特征多项式如下:

$$a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0. \quad (19)$$

特征多项式系数见附录 A。根据劳斯-赫尔维茨判据, 系统稳定的充要条件为  $a_n > 0$ , 进一步化简得到:

$$P_{\text{pcc}} < \frac{U\omega_0 - K_{\text{ppll}} n_1 Q_{\text{pcc}} \omega_0 - K_{\text{ipll}} n_2 Q_{\text{pcc}} \omega_0}{K_{\text{ipll}} n_1 + K_{\text{ppll}} n_0} = P_{\text{max2}}. \quad (20)$$

### 3.3 风电场/集群对并网点功率极限评估

综上所述, 电压稳定性与宽频振荡稳定性分别表征系统在不同时间尺度下的承载能力: 前者反映电网静态强度对功率传输的物理限制, 后者体现电力电子设备与电网动态交互的稳定性边界。该风电并网系统 PCC 母线传输功率同时满足式 (17) 和式 (20) 时, 即  $P_{\text{max}} = \min[P_{\text{max1}}, P_{\text{max2}}]$ ,  $\min$  表示取最小值。满足上述条件的功率极限  $P_{\text{max}}$  可保证系统满足电压稳定和风电动态稳定。

## 4 算例分析

### 4.1 风电并网系统戴维南等值模型验证

本文算例采用如图 1 所示的包含 80 台容量为 5 MW 的直驱风力发电机组,设定风机以单位功率

因数运行,0.3 s 接入交流系统,交流系统为图 4 所示的 IEEE 10 机 39 节点系统,以节点 36 为参考将剩余系统进行戴维南等值,在 PSCAD/EMTDC 搭建相应的模型。

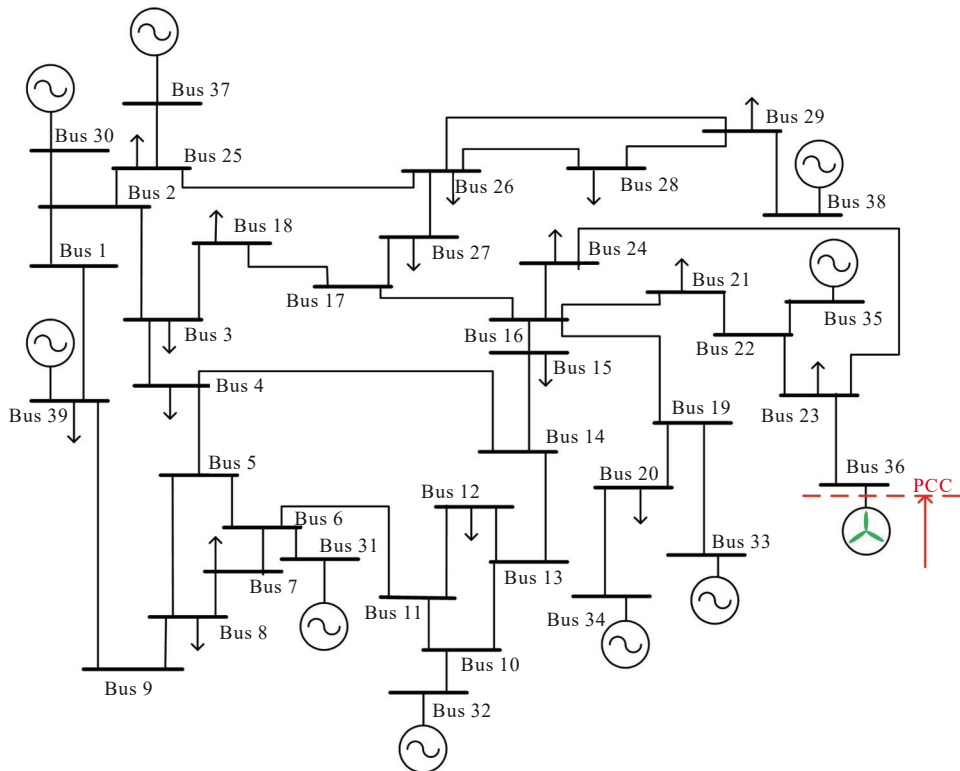


图 4 风电接入 IEEE 39 节点系统电路图  
Fig.4 Schematic diagram of IEEE 39-bus system connected to wind farm

图 5 为戴维南等值阻抗拟合前后对比图,可以看出,拟合后阻抗  $Z_{eq}(s)$  在较宽频率范围内能准确反映拟合前阻抗  $Z_{thi}(s)$  的频变特性。

拟合后阻抗  $Z_{eq}(s)$  表达式如下:

$$\begin{cases} R_{eq}(\omega)=0.000\ 231\ 3\omega^2+0.007\ 191\omega+0.991\ 2 \\ X_{eq}(\omega)=-0.000\ 154\ 7\omega^2+0.425\ 7\omega-0.070\ 9 \end{cases} \quad (21)$$

求出工频  $\omega_0$  时交流系统不同运行方式下的戴维南等值阻抗,与通过仿真数据计算得到的等值阻抗进行对比,结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,运用两种计算方法得到的戴维南等值阻抗基本一致,证实了拟合阻抗的合理性。

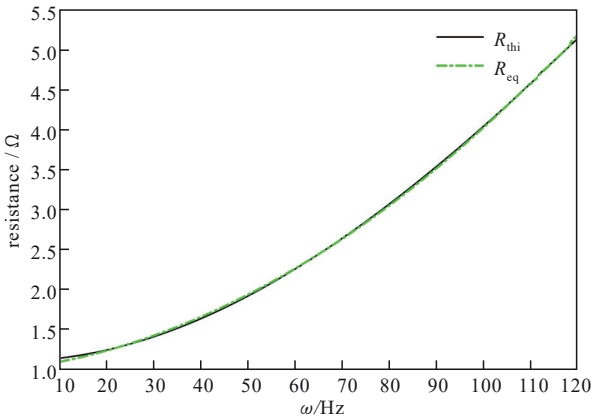
根据系统不同运行方式选取三种典型算例:算例 I)系统侧正常运行;算例 II)断开线路 23-24;算例 III)断开发电机 35 和线路 23-24。其中,算例 II 和算例 III 分别表示系统侧发生 N-1 和 N-2 故障后的运行方式。

表 1 系统不同运行方式下的戴维南等值阻抗  
Table 1 Thevenin equivalent impedance data for different operating modes of power system

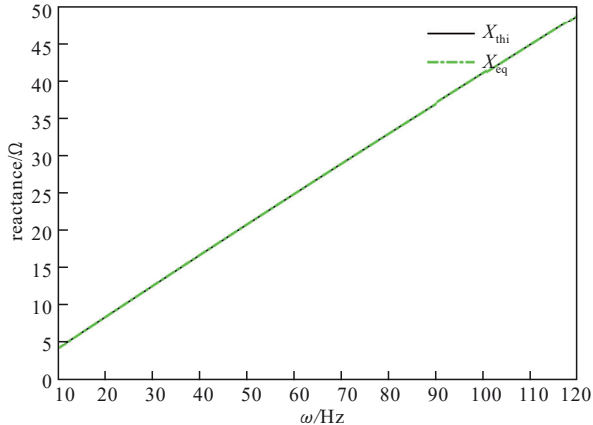
| 系统运行方式            | 仿真数据计算      | 导纳矩阵计算      |
|-------------------|-------------|-------------|
| 正常运行              | 25.35∠85.08 | 25.02∠84.83 |
| 断开线路 23-24        | 29.04∠84.74 | 28.58∠84.79 |
| 断开线路 22-23        | 40.75∠81.41 | 40.28∠81.67 |
| 断开发电机 33          | 25.79∠84.61 | 25.38∠84.67 |
| 断开发电机 35          | 31.36∠81.6  | 30.78∠82.02 |
| 断开线路 23-24、发电机 33 | 29.22∠84.51 | 28.76∠84.53 |
| 断开线路 23-24、发电机 35 | 39.63∠80.32 | 39.01∠80.73 |

三种算例的并网点有功功率和电压仿真波形如图 6-图 8 所示,其中  $V_x$  和  $P_x$  分别为详细模型并网点的电压和有功功率,  $V_d$  和  $P_d$  分别为等值模型并网点的电压和有功功率。

由图 6-图 8 可知,在 3 种不同运行方式下,风机接入详细模型和等值模型的并网点电压和有功功率仿真曲线基本吻合,充分说明了所提戴维南等值建模方法的正确性与合理性。



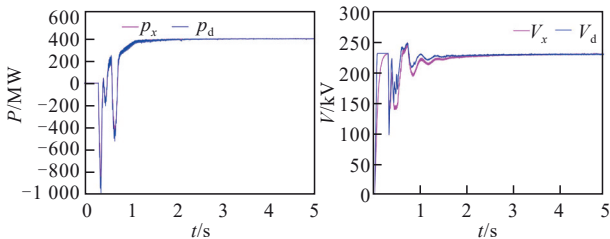
(a)电阻频变特性



(b)电抗频变特性

图 5 等值阻抗频变特性

Fig. 5 Equivalent impedance frequency variation characteristics

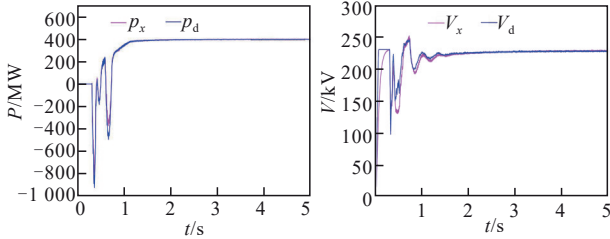


(a)并网点有功功率

(b)并网点电压

图 6 算例 I 并网点有功功率和电压波形

Fig.6 Active power and voltage waveform at PCC of Case I



(a)PCC点有功功率

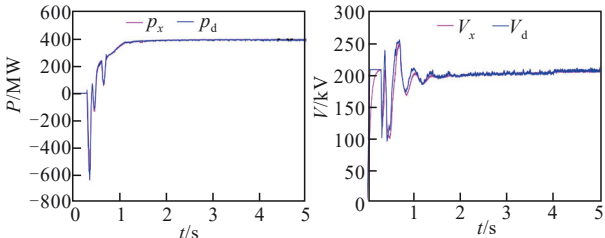
(b)PCC点电压

图 7 算例 II 并网点有功功率和电压波形

Fig.7 Active power and voltage waveform at PCC of Case II

4.2 并网点功率极限评估验证

增加风机出力,分别在电压稳定性约束和风电动态稳定性约束下求取PCC母线最大传输功率,并



(a)PCC点有功功率

(b)PCC点电压

图 8 算例 III 并网点有功功率和电压波形

Fig.8 Active power and voltage waveform at PCC of Case III

在仿真中测量系统处于临界稳定状态时 PCC 母线传输功率,结果如表 2 所示。

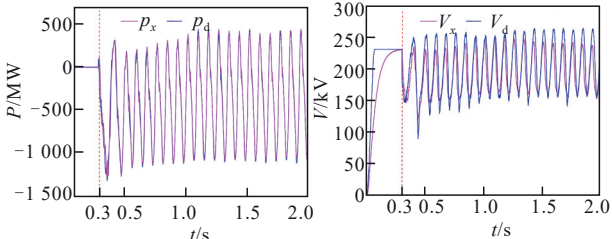
表 2 风电并网点最大传输功率数据对比(MW)

Table 2 Data comparison of the max imum active power at PCC of wind farm(MW)

| 不同<br>工况 | 电压稳定性约束下<br>理论计算 $P_{\max 1}$ | 风电动态稳定性约束下<br>理论计算 $P_{\max 2}$ | 仿真计算<br>$P_{\max 3}$ |
|----------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| 算例 I     | 1 203                         | 920                             | 900                  |
| 算例 II    | 1 049                         | 790                             | 775                  |
| 算例 III   | 709                           | 540                             | 525                  |

根据表 2 可以看出,由于风机动态特性的影响,导致风电并网系统在未达到电压稳定极限时便已达到临界状态,因此在电压稳定性约束计算得到的功率极限偏大。而不同工况下仿真测量和在风电动态稳定性约束下计算得到的功率极限相差不大。

图 9 为算例 I 系统仿真达临界稳定时,系统网点头有功功率和电压波形图,可以看出电压和有功率均出现失稳现象。



(a)PCC点有功功率

(b)PCC点电压

图 9 两种模型并网点达功率极限时仿真波形

Fig.9 Simulated waveforms with the max imum active power at PCC of two models

风电并网点传输功率达功率极限后,系统的电压支撑能力不足,但系统没有发生电压跌落,而是发生了振荡失稳现象,表明系统的振荡稳定裕度小于电压稳定裕度,也证实了表 2 中电压稳定性约束下计算得到的功率极限偏大的结果。

5 结语

本文基于节点电磁暂态戴维南等值模型和多项式数据拟合方法简化了电网等值阻抗分析,结合

电压稳定性和风电动态稳定性,提出一种风电并网点承载功率极限的评估方法。以IEEE 39节点系统为案例进行了仿真验证,主要结论如下:

1)本文建立的节点电磁暂态戴维南等值阻抗简化模型,能够高效计算电网等值阻抗,准确反映电网在电磁暂态时间尺度下的动态特性;

2)并网点功率极限主要受宽频振荡约束。并

网点功率在未达到电压稳定时,由于风机已经可能进入临界振荡状态,宽频振荡约束决定风电并网点功率承载能力;

3)所提的风电并网点功率极限评估方法,能够准确综合考虑电压稳定性与风电动态稳定性,为风电并网系统的安全稳定运行提供了有效的理论依据和技术支持。

## 参考文献:

- [1] 梁作放,孔令勃,潘华. 新型电力系统面临的挑战及关键技术[J]. 电力与能源, 2024,45(2):154-159.  
LIANG Z F, KONG L B, PAN H. Challenges and Key technologies of the new power system[J]. Power & Energy, 2024, 45(2):154-159.
- [2] 肖湘宁,罗超,廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报, 2017,32(6):85-97.  
XIAO X N, LUO C, LIAO K Y. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6):85-97.
- [3] 王伟胜. 新能源并网系统宽频振荡分析与抑制[M]. 北京:中国电力出版社, 2022.
- [4] 曲莹,韩肖清,刘新元,等. 基于多源数据驱动的电力系统暂态稳定性分析方法[J]. 太原理工大学学报, 2024,55(1):73-83.  
QU Y, HAN X Q, LIU X Y, et al. Transient stability analysis method of power system based on multi-source data drive [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2024, 55(1):73-83.
- [5] 刘红丽,张立伟,李佳,等. 大规模新能源并网的新能源消纳能力和消纳空间方法研究及应用[J]. 太原理工大学学报, 2024, 55(1):120-126.  
LIU H L, ZHANG L W, LI J, et al. Research and application of new energy absorption capacity and absorption space method of shanxi power grid based on large-scale new energy grid [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2024, 55(1):120-126.
- [6] 司大军,钱迎春,徐衍会,等. 基于负荷模型云南电网动态稳定与传输极限研究[J]. 南方电网技术, 2011,5(4):90-93.  
SI D J, QIAN Y C, XU Y H, et al. Load model based study on dynamic stability and transmission limit of yunnan power grid [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(4):90-93.
- [7] 许晓菲,牟涛,贾琳,等. 大规模风电汇集系统静态电压稳定实用判据与控制[J]. 电力系统自动化, 2014,38(9):15-19.  
XU X F, MOU T, JIA L, et al. Practical criteria of static voltage stability in power systems with high wind penetration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9):15-19.
- [8] 康勇,林新春,郑云,等. 新能源并网变换器单机无穷大系统的静态稳定极限及静态稳定工作区[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(14):4506-4515.  
KANG Y, LIN X C, ZHENG Y, et al. The static stable-limit and static stable-working zone for single-machine infinite-bus system of renewable-energy grid-connected converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14):4506-4515.
- [9] 康勇,林新春,潘辰,等. 弱电网下采用 SVC 与 SVG 补偿后新能源并网变换器的功率传输特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021,41(6):2115-2125.  
KANG Y, LIN X C, PAN C, et al. Analysis of power transmission characteristics of renewable energy grid-connected converter Considering SVC and SVG compensation under weak grid condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6):2115-2125.
- [10] 黄海荣,张旭,翁华,等. 新能源并网系统的功率传输极限分析研究[J]. 电工电能新技术, 2023,42(7):23-30.  
HUANG H R, ZHANG X, WENG H, et al. Power transfer limits analysis of renewable energy grid-connected system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(7):23-30.
- [11] ZHOU J Z, DING H, FAN S, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5), 2287-2296.
- [12] 汤涌,易俊,侯俊贤,等. 基于时域仿真的戴维南等值参数跟踪计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2010,30(34):63-68.  
TANG Y, YI J, HOU J X. Calculation method for thevenin equivalent parameters based on time domain simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34):63-68.
- [13] 李卫星,牟晓明,李志民. 电力系统戴维南等值参数的解析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2012,32(S1):28-34.  
LI W X, MOU X M, LI Z M. Analysis and thoughts on the thevenin equivalent parameters for powersystems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(S1):28-34.
- [14] 付正鑫,卢继平,乔梁,等. 基于戴维南参数等值的电压稳定性分析[J]. 中国电力, 2014,47(5):44-47.

- FU Z X, LU J P, QIAO L. Voltage stability analysis based on thevenin equivalent parameters[J]. Electric Power, 2014, 47(5):44-47.
- [15] WANG Y, PORDANJANI I R, LI W, et al. Voltage stability monitoring based on the concept of coupled single-port circuit [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4):2154-2163.
- [16] PORDANJANI I R, WANG Y, XU W. Identification of critical components for voltage stability assessment using channel components transform [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2):1122-1132.
- [17] KETTNER A M, PAOLONE M. A generalized index for static voltage stability of unbalanced polyphase power systems including Thévenin equivalents and polynomial models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6):4630-4639.
- [18] DU W J, WANG Y J, WANG H F, et al. Reduced-order method for detecting the risk and tracing the sources of small-signal oscillatory instability in a power system with a large number of wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2):1563-1582.

(编辑:万 佳)