

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250476

计及无功支撑特性的新能源多馈入系统小干扰电压支撑强度评估

戴天辰, 刘云, 朱继忠, 赖翔

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 高比例新能源多馈入系统(简称多馈入系统)中, 电力电子变流器的大规模接入会引发一系列小干扰稳定问题, 而系统电压支撑强度(简称系统强度)评估是分析此类问题的重要手段。针对现有研究忽略变流器无功支撑特性及实际运行工况的不足, 提出一种面向多馈入系统的小干扰稳定性分析与强度评估方法。首先, 建立计及无功支撑特性及实际运行工况的多馈入系统小干扰模型。其次, 采用参与因子加权法构建等效同构多馈入系统。进而, 基于模态解耦理论推导等效单馈入系统, 以表征多馈入系统的小干扰稳定性。最后, 提出计及无功支撑特性的系统强度评估指标, 针对变流器控制结构和参数已知的白盒模型以及控制结构和参数未知的黑盒模型, 分别设计相应的系统强度评估量化流程。仿真算例结果表明, 所提出的方法能准确评估系统强度, 且具有较好的工程适用性。
关键词: 多馈入系统; 系统强度; 运行工况; 无功支撑; 黑盒模型

Small-signal voltage support strength assessment of renewable energy multi-infeed systems incorporating reactive power support characteristics

DAI Tianchen, LIU Yun, ZHU Jizhong, LAI Xiang

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In high-penetration renewable energy multi-infeed systems (multi-infeed systems), large-scale integration of power electronic converters may lead to small-signal stability issues. Assessing system voltage support strength (system strength) is a critical tool for analyzing such problems. To address the limitations of existing researches that often neglect the reactive power support characteristics of converters and actual operating conditions, this paper proposes a small-signal stability analysis and system strength evaluation method for multi-infeed systems. First, a small-signal model of the multi-infeed system is established, incorporating both reactive power support characteristics and actual operating conditions. Second, an equivalent homogeneous multi-infeed system is constructed using the participation factor weighting method. Furthermore, based on modal decoupling theory, an equivalent single-infeed system is derived to characterize the small-signal stability of the multi-infeed system. Finally, a system strength evaluation metric accounting for reactive power support is proposed, and quantitative evaluation procedures are designed for both white-box models (with known control structures and parameters) and black-box models (with unknown control structures and parameters). Simulation results demonstrate that the proposed method can accurately evaluate system strength and exhibits good engineering applicability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52577110).

Key words: multi-infeed systems; system strength; operating condition; reactive power support; black-box model

0 引言

为了响应“双碳”战略目标, 风光等新能源在

我国得到了大力发展^[1-3]。现阶段, 新能源大多采用跟网型电力电子变流器(简称跟网型变流器)以实现并网。该类型变流器的大规模接入带来了一系列小干扰稳定问题^[4-5], 其在系统电压支撑强度(本文简称系统强度)较弱的系统中尤为突出。为此, 亟需对多馈入系统强度进行合理评估, 以保证电力系统安

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52577110); 广东省自然科学基金项目资助(2025A1515010653)

全稳定运行。

系统强度评估是一种快速识别并指导解决小干扰稳定问题的重要手段^[6-7]。现有研究认为电网强度和设备对电网强度的耐受能力共同决定系统强度,为此分别定义了相关指标如短路比和设备临界短路比来量化评估系统强度^[8]。这些指标分为两类:一是基于系统静态潮流方程定义的多场站短路比^[9]、带交互因子的短路比^[10]等指标;二是基于系统灵敏度方程定义的广义短路比^[11-12]、综合短路比^[13]等指标。通过这些指标,可以快速评估多馈入系统在静态电压稳定及小干扰稳定等方面的稳定裕度。然而,上述指标通常假设变流器工作在单位功率因数及额定运行点(主要指并网点电压被假设为额定值)的场景,即忽略了无功支撑特性及交流潮流等因素对于系统稳定性的影响。

而在实际工程中,并网点电压通常在 0.90~1.10 p.u.范围变化^[14],且随着新能源装机容量的增大,变流器自身需要具备一定的无功支撑能力。例如,我国要求风电机组的功率因数在超前 0.95 到滞后 0.95 范围内可调,且需具备多种无功控制模式^[14]。这些因素一方面对变流器的动态特性造成了影响,另一方面也导致了并网点电压、注入电流等稳态平衡参数和控制参数间的耦合加剧,利用上述指标不能准确地评估多馈入系统强度。文献[15]提出了广义运行短路比(generalized operational short-circuit ratio, gOSCR),旨在评估跟网型变流器工作在非额定运行点时的系统强度,在此基础上,文献[16]提出了一种提升新能源基地电压支撑强度的跟网型变流器有功出力优化配置方法,说明了变流器的实际运行工况对于系统强度的影响不可忽略,但它们均未考虑变流器工作在非单位功率因数的场景。文献[17]通过开环传递函数的伯德图说明了跟网型变流器无功功率对于系统稳定裕度的影响,但分析的无功控制方法单一。进一步地,文献[18]总结了跟网型变流器 3 种常用的无功控制方法,说明了无功支撑特性对于系统小干扰稳定性的影响不可以忽略,但只分析了单机并网的场景,没有拓展至多馈入系统。文献[19]刻画了全运行工况下变流器的振荡安全域边界,分析了变流器有功和无功出力对于系统稳定性的影响,但它忽略了各变流器间运行工况的差异性和电力网络拓扑的影响。文献[20]从新能源最大允许容量规划的角度,说明了无功支撑可以在一定程度上提升系统强度,但其所用指标——考虑无功功率的等效短路比(reactive power considered

equivalent short-circuit ratio, QESCR)的定义依赖工程经验,且更侧重对系统静态电压稳定的研究,对于分析系统的小干扰稳定性可能产生误判。

为此,针对上述文献存在的不足,本文聚焦小干扰下的系统强度问题,提出了计及无功支撑特性的多馈入系统强度评估指标,可分析跟网型变流器工作在非单位功率因数及非额定运行点的场景。首先结合跟网型变流器常用的 3 种无功控制方法,建立计及无功支撑特性的多馈入系统小干扰模型。其次,通过参与因子加权构建等效同构多馈入系统,并基于模态解耦理论求解用于表征多馈入系统小干扰稳定性的等效单馈入系统。接着,设计适用于黑白盒模型的系统强度评估量化流程。其中,与常规黑盒辨识结果不同的是,本文基于所提出的强度评估指标并结合最小二乘拟合法,将黑盒模型的强度边界拟合为低阶的显式表达式,以便快速评估系统强度,并嵌入优化问题指导运行规划。最后,通过算例说明了跟网型变流器的无功支撑特性对多馈入系统强度评估的影响,并验证了所提强度评估指标和量化方法的准确性及适用性。

1 计及无功支撑特性的多馈入系统建模

考虑如图 1 所示的新能源多馈入系统,其中节点 1, ..., n 分别与跟网型变流器 1, ..., n 相连;节点 n+1, ..., n+m 为无源节点;节点 n+m+1 接入无穷大电网。利用阻抗分析法,在全局 xy 坐标系下建立该多馈入系统的小干扰模型。

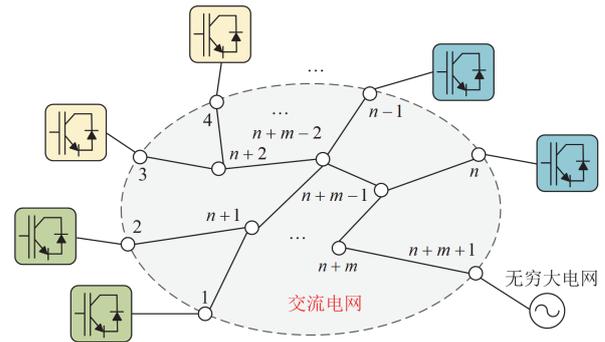


图 1 新能源多馈入系统

Fig. 1 Renewable energy multi-infeed system

首先,在全局 xy 坐标系下建立交流电网侧的频域导纳模型^[8]。

$$\begin{bmatrix} \Delta I_x \\ \Delta I_y \end{bmatrix} = \underbrace{\mathbf{B}_{\text{red}} \otimes \mathbf{F}(s)}_{\mathbf{Y}_{\text{net}}(s)} \begin{bmatrix} \Delta U_x \\ \Delta U_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$F(s) = \frac{\omega_0}{(s + \tau\omega_0)^2 + \omega_0^2} \begin{bmatrix} s + \tau\omega_0 & \omega_0 \\ -\omega_0 & s + \tau\omega_0 \end{bmatrix}$$

式中： ΔU_x 和 ΔU_y 分别为节点 i 的电压在全局坐标系下的微增量 ΔU_{xi} 和 ΔU_{yi} 组成的列向量； ΔI_x 和 ΔI_y 分别为节点 i 的电流在全局坐标系下的微增量 ΔI_{xi} 和 ΔI_{yi} 组成的列向量； B_{red} 为消去交流电网无源节点后的 Kron 简化导纳矩阵^[8]， $B_{red} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ ； s 表示拉普拉斯算子； $Y_{net}(s)$ 为仅保留跟网型变流器节点的交流电网导纳传递函数矩阵， $Y_{net}(s) = B_{red} \otimes F(s)$ ； \otimes 表示克罗内克积； τ 表示线路阻抗比； ω_0 表示同步角频率。

图 2 展示了跟网型变流器的控制结构。其中，控制电路部分主要包括了锁相环、电流内环、采用定有功功率控制的有功外环以及被描述成统一控制形式的无功外环。

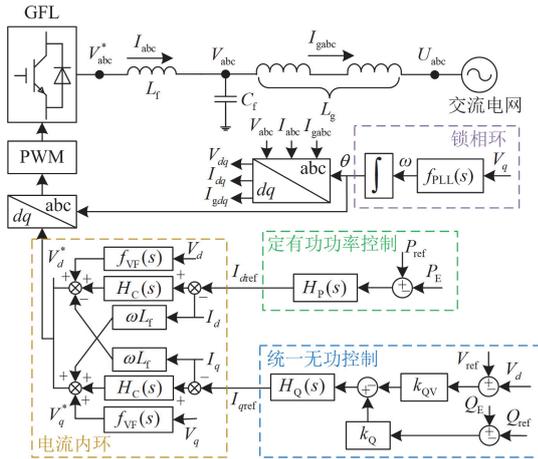


图 2 跟网型变流器控制结构

Fig. 2 Control structure of grid-following converter

据此，可建立变流器侧的频域导纳模型^[8]。

$$-\begin{bmatrix} \Delta I_x \\ \Delta I_y \end{bmatrix} = Y_{PED}(s) \begin{bmatrix} \Delta U_x \\ \Delta U_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $Y_{PED}(s) = \text{blkdiag}(S_i Y_{PED,i}(s))$ ， $\text{blkdiag}(\cdot)$ 表示对角矩阵， S_i 为第 i 个跟网型变流器的自身额定容量与系统基准容量的比值， $Y_{PED,i}(s)$ 为第 i 个跟网型变流器基于自身额定容量标么后，在全局 xy 坐标系下的导纳传递函数矩阵。

$$Y_{PED,i}(s) = \begin{bmatrix} Y_{11,i}(s, V_i, I_{di}, I_{qi}) & Y_{12,i}(s, V_i, I_{di}, I_{qi}) \\ Y_{21,i}(s, V_i, I_{di}, I_{qi}) & Y_{22,i}(s, V_i, I_{di}, I_{qi}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} Y_{11,i}(s, V_i, I_{di}, I_{qi}) = \frac{H_C(s)H_P(s)I_{di} + (1 - f_{VF}(s))}{sL_f + H_C(s) + H_C(s)H_P(s)V_i} \\ Y_{12,i}(s, V_i, I_{di}, I_{qi}) = \frac{H_C(s)H_P(s)I_{qi}}{(sL_f + H_C(s) + H_C(s)H_P(s)V_i)(1 + f_{PLL}(s)V_i) + \frac{f_{PLL}(s)I_{qi}}{1 + f_{PLL}(s)V_i}} \\ Y_{21,i}(s, V_i, I_{di}, I_{qi}) = \frac{k_Q H_C(s)H_Q(s)I_{qi}}{sL_f + H_C(s) + k_Q H_C(s)H_Q(s)V_i} - \frac{k_{QV} H_C(s)H_Q(s)}{sL_f + H_C(s) + k_Q H_C(s)H_Q(s)V_i} \\ Y_{22,i}(s, V_i, I_{di}, I_{qi}) = \frac{-k_Q H_C(s)H_Q(s)I_{di} + (1 - f_{VF}(s))}{(sL_f + H_C(s) + k_Q H_C(s)H_Q(s)V_i)(1 + f_{PLL}(s)V_i) + \frac{f_{PLL}(s)I_{di}}{1 + f_{PLL}(s)V_i}} \end{cases}$$

式中： $H_C(s) = k_{cp} + k_{ci}/s$ ， k_{cp} 和 k_{ci} 为电流内环的比例-积分 (proportional-integral, PI) 控制参数； $f_{PLL}(s) = (k_{pllP} + k_{pllI}/s)/s$ ， k_{pllP} 和 k_{pllI} 为锁相环的 PI 控制参数； $H_P(s) = k_{pp} + k_{pi}/s$ ， k_{pp} 和 k_{pi} 为有功外环的 PI 控制参数； $H_Q(s) = k_{qp} + k_{qi}/s$ ， k_{qp} 和 k_{qi} 为无功外环的 PI 控制参数； $f_{VF}(s)$ 为电压前馈环节； L_f 为滤波电感的标么值； $V_i = V_{di}$ 为 dq 坐标系下第 i 个跟网型变流器并网点电压的稳态标么值，取值为 0.90~1.10 p.u.； I_{di} 和 I_{qi} 分别为 dq 坐标系下第 i 个跟网型变流器 dq 轴电流基于自身额定容量的稳态标么值，分别表示为

$$\begin{cases} I_{di} = \frac{P_i}{S_i V_i} \in [0.86, 1.11] \\ I_{qi} = -\frac{Q_i}{S_i V_i} \in [-0.34, 0.34] \end{cases} \quad (4)$$

式中： P_i 和 Q_i 分别为第 i 个跟网型变流器输出的有功功率和无功功率。需要说明的是，本文假设各跟网型变流器的功率因数在超前 0.95 到滞后 0.95 范围内可调，且根据并网点电压 V_i 的标么范围可得 I_{di} 和 I_{qi} 的标么范围。

k_{QV} 和 k_Q 表示无功-电压下垂控制的系数，其取值决定了跟网型变流器所采用的无功控制方法：1) $k_Q \neq 0, k_{QV} = 0$ 为定无功功率控制；2) $k_Q = 0, k_{QV} \neq 0$ 为定交流电压控制；3) $k_Q \neq 0, k_{QV} \neq 0$ 为无功-电压下垂控制。

注: 下文涉及对无功控制方法的描述时, 分别用 PQ 表示定无功功率控制, PV 表示定交流电压控制, PQ-V 表示无功-电压下垂控制。

对于上述建模过程, 需要做以下两点说明。

1) 上述有关变流器侧频域导纳模型的建模参考了文献[18], 具体推导过程并不是本文讨论的重点, 因此不再赘述。本文的分析过程和仿真算例中假设各跟网型变流器的控制参数基于自身额定容量标么后均相同。

2) 变流器侧的频域导纳模型建立在局部 dq 坐标系下, 但由于不同的跟网型变流器与无穷大电网间的并网点电压相角差通常较小, 因此在建模过程中可将其忽略^[21-22]。所以, 将上述模型直接应用于全局 xy 坐标系下也不失准确性。

结合式(1)—式(3), 列写表征该多馈入系统动态特性的闭环特征方程为

$$\det\{\mathbf{Y}_{\text{PED}}(s) + \mathbf{Y}_{\text{net}}(s)\} = 0 \quad (5)$$

2 多馈入系统小干扰稳定分析

关于分析多馈入系统的小干扰稳定性, 目前存在以下两个问题。

1) 通常情况下新能源多馈入系统中跟网型变流器数量众多, 如果直接求解式(5)所示的闭环特征方程, 并通过分析其主导特征根来判断系统的稳定性, 会带来计算上的维数灾难问题。

2) 在实际工程中, 跟网型变流器并非都工作在单位功率因数的场景下, 其有功和无功出力也并非完全相同, 这使得各跟网型变流器的交流潮流稳态平衡参数(简称稳态平衡参数), 如并网点电压间以及 dq 轴电流间存在差异, 对外表现出不同的动态特性。已有研究如文献[8, 23-24], 采用特征根轨迹摄动理论来构造多馈入系统的近似等效单馈入系统, 忽略了无功支撑和稳态平衡参数的影响; 文献[15]对此做了相应的改进, 考虑了跟网型变流器并网点电压与额定值的偏差, 但同样假设跟网型变流器工作在单位功率因数的场景会带来较大的误差。

为解决上述问题并尽可能地保证分析的准确性,

根据各跟网型变流器的参与因子, 加权求取等效稳态平衡参数来构建等效同构多馈入系统。接着, 基于模态解耦的思路, 求解可以表征多馈入系统小干扰稳定性的等效单馈入系统。

2.1 等效同构多馈入系统构造

结合式(5), 多馈入系统动态特性的闭环特征方程可重构为

$$\begin{cases} \det\{\hat{\mathbf{Y}}_{\text{PED}}(s) + \hat{\mathbf{Y}}_{\text{net}}(s)\} = 0 \\ \hat{\mathbf{Y}}_{\text{PED}}(s) = \text{blkdiag}(\mathbf{Y}_{\text{PED},i}(s)\mathbf{F}^{-1}(s)) \\ \hat{\mathbf{Y}}_{\text{net}}(s) = \text{diag}\left(\frac{1}{S_i}\right)\mathbf{B}_{\text{red}} \otimes \mathbf{I}_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{F}^{-1}(s)$ 表示 $\mathbf{F}(s)$ 的逆矩阵; \mathbf{I}_2 表示 2 维单位矩阵。

在实际工程中, 各跟网型变流器对系统稳定性的影响权重, 即参与因子不完全相同, 其权重值与式(6)中矩阵 $\text{diag}(1/S_i)\mathbf{B}_{\text{red}}$ 相关联。各跟网型变流器的参与因子为

$$p_{li} = u_{li}v_{li}, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: p_{li} 表示第 i 个跟网型变流器的参与因子, 其值大小反映了跟网型变流器对于系统稳定性影响的强弱; u_{li} 和 v_{li} 分别为 \mathbf{u}_i^T 和 \mathbf{v}_i 的第 i 个元素, 其归一化后满足 $\sum_{i=1}^n p_{li} = \sum_{i=1}^n u_{li}v_{li} = 1$, \mathbf{u}_i^T 和 \mathbf{v}_i 分别表示矩阵

$\text{diag}(1/S_i)\mathbf{B}_{\text{red}}$ 最小特征值所对应的左、右特征向量。

如上所述, 本文假设各跟网型变流器的控制参数基于自身额定容量标么后相同, 因此其动态特性的差异主要体现在稳态平衡参数不同。可通过参与因子加权求取等效稳态平衡参数并对应替换原模型中的相关参数, 使得各跟网型变流器对外表现相同的动态特性, 等效同构导纳传递函数矩阵的表达式为

$$\mathbf{Y}_{\text{hom}}(s) = \begin{bmatrix} Y_{11}(s, V_{\text{hom}}, I_{d\text{hom}}, I_{q\text{hom}}) & Y_{12}(s, V_{\text{hom}}, I_{d\text{hom}}, I_{q\text{hom}}) \\ Y_{21}(s, V_{\text{hom}}, I_{d\text{hom}}, I_{q\text{hom}}) & Y_{22}(s, V_{\text{hom}}, I_{d\text{hom}}, I_{q\text{hom}}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} Y_{11}(s, V_{\text{hom}}, I_{d\text{hom}}, I_{q\text{hom}}) &= \frac{H_C(s)H_P(s)I_{d\text{hom}} + (1 - f_{\text{VF}}(s))}{sL_f + H_C(s) + H_C(s)H_P(s)V_{\text{hom}}} \\ Y_{12}(s, V_{\text{hom}}, I_{d\text{hom}}, I_{q\text{hom}}) &= \frac{H_C(s)H_P(s)I_{q\text{hom}}}{(sL_f + H_C(s) + H_C(s)H_P(s)V_{\text{hom}})(1 + f_{\text{PLL}}(s)V_{\text{hom}}} + \frac{f_{\text{PLL}}(s)I_{q\text{hom}}}{1 + f_{\text{PLL}}(s)V_{\text{hom}}} \\ Y_{21}(s, V_{\text{hom}}, I_{d\text{hom}}, I_{q\text{hom}}) &= \frac{k_Q H_C(s)H_Q(s)I_{q\text{hom}}}{sL_f + H_C(s) + k_Q H_C(s)H_Q(s)V_{\text{hom}}} - \frac{k_{\text{QV}} H_C(s)H_Q(s)}{sL_f + H_C(s) + k_Q H_C(s)H_Q(s)V_{\text{hom}}} \\ Y_{22}(s, V_{\text{hom}}, I_{d\text{hom}}, I_{q\text{hom}}) &= \frac{-k_Q H_C(s)H_Q(s)I_{d\text{hom}} + (1 - f_{\text{VF}}(s))}{(sL_f + H_C(s) + k_Q H_C(s)H_Q(s)V_{\text{hom}})(1 + f_{\text{PLL}}(s)V_{\text{hom}}} - \frac{f_{\text{PLL}}(s)I_{d\text{hom}}}{1 + f_{\text{PLL}}(s)V_{\text{hom}}} \end{aligned}$$

$$V_{\text{hom}} = \sum_{i=1}^n p_{li} V_i, I_{d\text{hom}} = \sum_{i=1}^n p_{li} I_{di}, I_{q\text{hom}} = \sum_{i=1}^n p_{li} I_{qi}$$

式中： V_{hom} 、 $I_{d\text{hom}}$ 和 $I_{q\text{hom}}$ 为等效稳态平衡参数，其由各跟网型变流器的稳态平衡参数经过参与因子加权而得到。

结合式(6)一式(8)，等效同构多馈入系统闭环特征方程可表示为

$$\begin{cases} \det \left\{ \mathbf{I}_n \otimes \mathbf{A}(s) + \text{diag} \left(\frac{1}{S_i} \right) \mathbf{B}_{\text{red}} \otimes \mathbf{I}_2 \right\} = 0 \\ \mathbf{A}(s) = \mathbf{Y}_{\text{hom}}(s) \mathbf{F}^{-1}(s) \end{cases} \quad (9)$$

式中： \mathbf{I}_n 表示 n 维单位矩阵。

上述有关等效同构多馈入系统的构造如图3所示，即参与因子计算、稳态平衡参数求解以及等效同构模型构造。

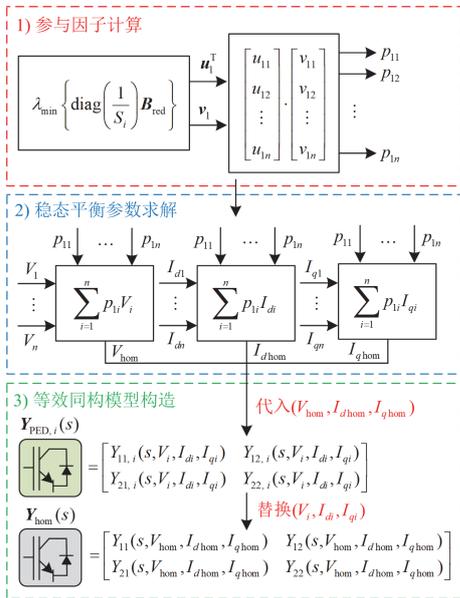


图3 等效同构多馈入系统构造流程

Fig. 3 Construction process of equivalent homogeneous multi-infeed system

值得一提的是，所构建的等效同构多馈入系统具有以下优势。

1) 相较于文献[15]，本节所构造的等效同构多馈入系统模型考虑了跟网型变流器无功支撑特性的影响，且没有化简或者忽略其他控制环节，保证了对系统小干扰稳定性分析的准确性。

2) 根据式(3)中 $\mathbf{Y}_{\text{PED},i}(s)$ 各元素的表达式可知，由于各跟网型变流器并网点电压 V_i 间存在差异，且 V_i 位于表达式的分母上，如果采用直接加权求解等效模型，如 $\sum_{i=1}^n p_{li} \mathbf{Y}_{\text{PED},i}(s)$ ，需对每一台跟网型变流

器的导纳模型 $\mathbf{Y}_{\text{PED},i}(s)$ 中的各元素进行通分，这将会导致分母产生高次项，从而增加了计算的复杂度。针对本文所假设的各变流器控制参数，基于自身容量标么后均相同的场景，仅需对各变流器的稳态平衡参数，即并网点电压和 dq 轴电流进行参与因子加权处理，并替换原模型位置中相对应的参数，即可构建等效同构多馈入系统。这种处理方法既保证了分析的准确性又简化了计算的复杂度，其优势在大规模新能源并网场景中尤为明显。

2.2 等效单馈入系统求解

根据文献[23-24]，等效同构多馈入系统可以解耦为 K 个具有不同短路比的单馈入系统。

$$\prod_{k=1}^K \det \{ \mathbf{A}(s) + \lambda_k \mathbf{I}_2 \} = 0 \quad (10)$$

式中： λ_k 表示第 k 个单馈入系统的等价短路比，其取值为矩阵 $\text{diag}(1/S_i) \mathbf{B}_{\text{red}}$ 的第 k 个特征值，满足 $0 \leq \lambda_1 \leq \dots \leq \lambda_k \leq \dots \leq \lambda_K$ ， K 值大小与系统中跟网型变流器的总数一致。

从式(10)中选取最薄弱的单馈入系统(即对应 λ_k 最小的系统)，用来表征原多馈入系统的稳定性。

$$\det \{ \mathbf{A}(s) + \lambda_1 \mathbf{I}_2 \} = 0 \quad (11)$$

式中： $\lambda_1 = \min \lambda(\text{diag}(1/S_i) \mathbf{B}_{\text{red}})$ ，表示该矩阵的最小特征值。

3 多馈入系统强度评估

本节聚焦小干扰下的系统强度问题，给出了评估多馈入系统强度的量化指标，并总结了适用于黑白盒模型的系统强度评估量化流程。

3.1 多馈入系统强度评估指标

根据2.2节可知，矩阵 $\text{diag}(1/S_i) \mathbf{B}_{\text{red}}$ 的最小特征值 λ_1 所对应的单馈入系统可用来表征多馈入系统的稳定性。因此，将 λ_1 定义为广义短路比 gSCR，可表示为

$$I_{\text{gSCR}} = \min \lambda \left\{ \text{diag} \left(\frac{1}{S_i} \right) \mathbf{B}_{\text{red}} \right\} \quad (12)$$

式中： $\min \lambda \{ \}$ 表示矩阵的最小特征值。需要说明的是，本文所定义的广义短路比指标并不局限于分析单位功率因数的场景。

为了维持最薄弱单馈入系统即整个多馈入系统的稳定性，还需计算保证系统稳定运行所需要的临界值，即设备临界短路比。根据等效单馈入系统的构造过程可知，经等效同构变换后的多馈入系统中所有设备的动态特性均相同，即所有设备的临界短路比均相同。因此，将这种经过等效处理之后的设备临界短路比定义为计及无功支撑特性的等效临界

短路比 Q_{gSCR_0} 。

具体的, Q_{gSCR_0} 表示最薄弱单馈入系统的主导特征根实部为 0 时所对应的短路比 λ_1 , 即 $gSCR$ 。此时闭环特征方程式(11)的主导特征根位于虚轴上, 可表示为

$$I_{Q_{gSCR_0}} = \arg \left\{ \det(A(s_c) + I_{gSCR} \cdot I_2) = 0 \right\} \quad (13)$$

式中: $\arg\{\}$ 表示求方程的根; $s_c = j\omega_c$ 表示主导特征根位于虚轴上, ω_c 为临界振荡角频率。

由式(12)可知, 广义短路比 $gSCR$ 与各变流器额定容量有关。由式(13)可知, 变流器的有功和无功出力会影响稳态平衡参数的大小, 从而改变 Q_{gSCR_0} 的值。因此, 在实际工程中, 需要综合考虑 $gSCR$ 和 Q_{gSCR_0} 的大小来评估多馈入系统强度。

多馈入系统强度评估指标表示为

$$\Delta = I_{gSCR} - I_{Q_{gSCR_0}} \quad (14)$$

当 $\Delta > 0$ 时, 多馈入系统是稳定的, 且 Δ 越大多馈入系统稳定裕度越大; 当 $\Delta = 0$ 时, 多馈入系统处于临界稳定状态; 当 $\Delta < 0$ 时, 多馈入系统不稳定。

进一步地, 为了更好地量化系统强度的稳定裕度, 定义稳定裕度指标 $\alpha\%$ 为

$$\alpha\% = \frac{I_{gSCR} - I_{Q_{gSCR_0}}}{I_{Q_{gSCR_0}}} \times 100\% \quad (15)$$

3.2 多馈入系统强度评估量化流程

在实际工程中, 变流器的具体细节可能是未知的。因此, 根据多馈入系统中各跟网型变流器的控制参数和结构是否已知, 可将其系统强度评估量化流程分为白盒模型量化流程和黑盒模型量化流程。

3.2.1 白盒模型量化流程

当采用白盒模型时, 各变流器的控制参数和结构已知, 其量化流程分为以下 3 个步骤。

1) 获取电网参数及各变流器的额定容量, 求得矩阵 $\text{diag}(1/S_i) \mathbf{B}_{red}$, 并根据式(12)计算指标 $gSCR$ 。

2) 对多馈入系统进行建模; 根据步骤 1) 求得每个变流器的参与因子, 计算等效稳态平衡参数 V_{hom} 、 $I_{d\text{hom}}$ 和 $I_{q\text{hom}}$ 并构建等效同构导纳模型 $\mathbf{Y}_{hom}(s)$; 基于模态解耦求得 $\mathbf{A}(s)$, 并结合式(13)求取 Q_{gSCR_0} 。

3) 结合前两步的结果和式(14)计算指标 Δ , 判断多馈入系统的稳定性, 以此评估系统强度。

3.2.2 黑盒模型量化流程

黑盒模型中跟网型变流器的控制参数和结构未知, 它与白盒模型的唯一区别在于有关 Q_{gSCR_0} 的求解过程不同。具体来说, 可以通过半实物实验或时域仿真等方法测量 Q_{gSCR_0} 。因此, 黑盒模型的量化流程也可分为 3 个步骤, 步骤 1) 和步骤 3) 与白

盒模型相同, 本节重点阐述步骤 2) 的具体过程。

首先, 在一个等效单机系统中测试多组临界数据, 并基于最小二乘拟合, 将该系统强度临界值, 即实际多馈入系统的 Q_{gSCR_0} 拟合成关于稳态平衡参数的显式表达式, 具体流程如图 4(a) 所示, 该流程可分为模型搭建、数据测量及数据拟合 3 个部分。

a) 根据式(11)搭建一个等效单机并网系统的仿真模型。该系统包括跟网型变流器、可调电感、理想交流源(无穷大电网)及控制信号(如有功、无功、交流电压等控制指令)。由于侧重点不同, 本节假设各变流器的无功控制方法已知。在实际工程中, 可通过稳态潮流测试、动态电压响应测试等方法判断变流器所采用的无功控制方法, 此处不再赘述。

b) 为保证测试数据丰富以提高拟合精度, 本节以 PQ 控制为例(PV 和 PQ-V 控制与其类似), 采用如图 4(a) 所示的三重嵌套循环结构, 对控制信号 P_{ref} 和 Q_{ref} 以及交流源设定值 E_{ref} 进行遍历测试。其中, P_{ref} 的遍历范围为 $[P_{min}, P_{max}]$, 迭代步长为 ΔP_{ref} ; Q_{ref} 的遍历范围为 $[Q_{min}, Q_{max}]$, 迭代步长为 ΔQ_{ref} ; E_{ref} 的遍历范围为 $[E_{min}, E_{max}]$, 迭代步长为 ΔE_{ref} 。迭代步长和区间由具体问题所需的效率和精度所决定。

在每次迭代中, 调节线路电感 B 使系统处于临界振荡, 记录此时电感值(即系统临界值)并计算并网点电压和 dq 轴电流的稳态值, 将其记录为一组测试数据 $(V^{(j)}, I_d^{(j)}, I_q^{(j)}, B^{(j)})$, $j=1, \dots, m$, m 表示测量的数据组数。

c) 当迭代结束, 对遍历测试的数据进行筛选, 筛除功率及电压越限的数据。基于最小二乘拟合, 将单机系统的临界值(即仿真实验中的电感值 B), 即实际多馈入系统的 Q_{gSCR_0} 拟合成关于稳态平衡参数的显式表达式, 可表示为

$$I'_{Q_{gSCR_0}} = B = aV + bI_d + cI_q + d \quad (16)$$

式中: a 、 b 、 c 和 d 为系数, 与跟网型变流器的控制结构和控制参数相关; V 、 I_d 和 I_q 为稳态平衡参数, 分别为并网点电压和 d 、 q 轴电流。

其次, 计算实际多馈入系统中各跟网型变流器的参与因子。测量各变流器的并网点电压和 d 、 q 轴电流, 加权计算变流器的等效稳态平衡参数 V_{hom} 、 $I_{d\text{hom}}$ 和 $I_{q\text{hom}}$, 并代入通过仿真测试拟合的显式表达式(16), 求得当前多馈入系统的 Q_{gSCR_0} 。

$$\begin{cases} I'_{Q_{gSCR_0}} = aV_{hom} + bI_{d\text{hom}} + cI_{q\text{hom}} + d \\ V_{hom} = \sum_{i=1}^n p_{1i} V_i, I_{d\text{hom}} = \sum_{i=1}^n p_{2i} I_{di}, I_{q\text{hom}} = \sum_{i=1}^n p_{3i} I_{qi} \end{cases} \quad (17)$$

黑白盒模型系统强度评估的量化流程如图 4(b) 所示。

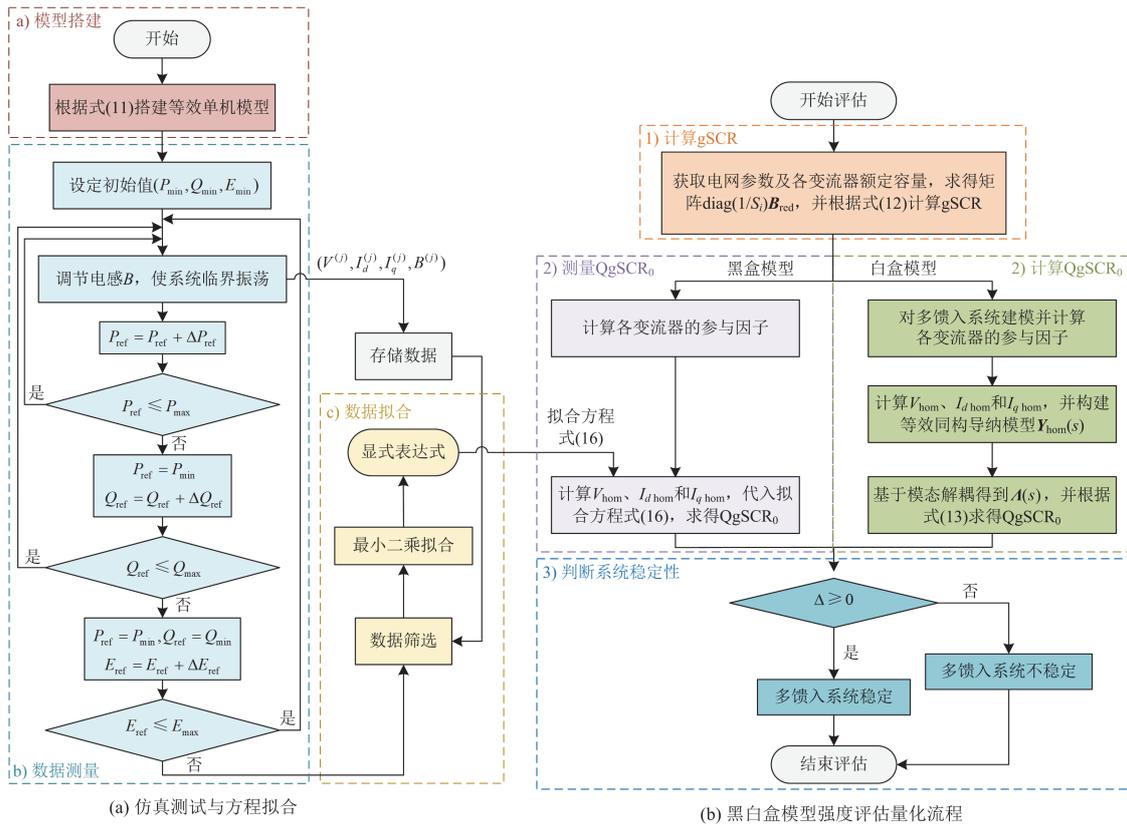


图 4 仿真测试与方程拟合过程以及黑白盒模型系统强度评估量化流程

Fig. 4 Simulation testing and equation fitting process and system strength evaluation process for white-box and black-box models

需要说明的是, 本节将临界指标 $QgSCR_0$ 拟合为稳态平衡参数的显式表达式, 其优势如下。

1) 当跟网型变流器的控制结构和参数不变时, 仅需测量各变流器的稳态平衡参数, 并计算其加权值 V_{hom} 、 $I_{d\ hom}$ 和 $I_{q\ hom}$, 然后代入拟合得到的线性方程式(16)即可快速求得 $QgSCR_0$, 无需重复测量 $QgSCR_0$, 提高了对多馈入系统强度评估的效率。

2) $QgSCR_0$ 可嵌入小干扰稳定约束条件中, 对新能源规划等优化问题有重要指导意义。将 $QgSCR_0$ 拟合成显式表达式可以降低优化模型约束条件的复杂度, 提高求解的效率和可行性。

4 算例分析

本节旨在说明以下 3 个问题: 1) 验证本文所提系统强度评估指标的准确性与适用性; 2) 说明变流器的无功支撑特性对于系统强度评估的影响; 3) 验证所提有关变流器黑盒模型量化评估方法的精度。

4.1 系统强度评估指标的准确性验证

本节在 MATLAB/Simulink 中搭建了 IEEE39 节点系统的仿真模型, 结合特征分析和时域仿真验证了所提指标的准确性和适用性。IEEE39 节点系统拓

扑如图 5 所示, 该模型具体线路参数详见文献[25]; 模型中跟网型变流器的相关参数如表 1 所示。

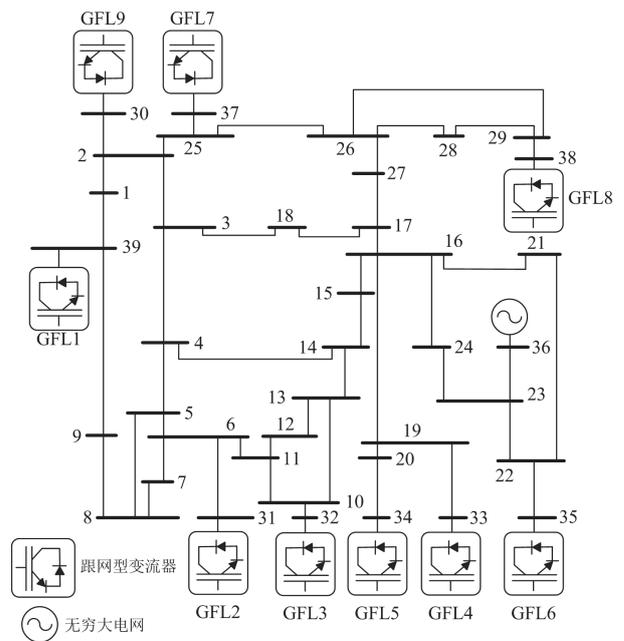


图 5 IEEE39 节点系统拓扑图

Fig. 5 Topology diagram of IEEE 39-bus system

表 1 跟网型变流器相关参数

Table 1 Related parameters of grid-following converter

控制环节相关参数及传递函数/p.u.	
电流内环: $0.3+10/s$	功率外环: $0.5+10/s$
锁相环: $12+10500/s$	电压前馈: $1/(1+0.0001s)$
滤波电感 L_f 、电容 C_f 参数: 0.15、0.05	
无功控制方法与下垂系数	
PQ 控制: $k_Q = 1, k_{QV} = 0$	
PV 控制: $k_Q = 0, k_{QV} = 3$	
PQ-V 控制: $k_Q = 1, k_{QV} = 3$	

本节共讨论了 9 个不同的算例, 算例中各变流器的额定容量均不变, 即 9 个算例的广义短路比 $I_{gSCR} = 2.27$ 。其中, 算例 1—3、算例 4—6 和算例 7—9 分别代表 3 种不同的运行工况。具体地, 算例 1—3 评估了当等效稳态电压 $V_{hom} = 0.91$ p.u., 各变流器分别采用 3 种无功控制方法时的系统强度; 算例 4—6 评估了当等效稳态电压 $V_{hom} = 1.01$ p.u. 时的系统强度; 算例 7—9 分析了当等效稳态电压 $V_{hom} = 1.05$ p.u. 时的系统强度。算例的工程场景涉及到不同的运行工况和不同的无功控制方法, 验证了本文所提指标和方法的适用性。上述算例中的具体参数如附录 A 表 A1 所示。

表 2 给出了所有算例的实际多馈入系统和等效单馈入系统的主导特征根, 并引入误差分析指标 δ 。

$$\delta = \left| \frac{s_{equ} - s_{real}}{s_{real}} \right| \times 100\% \quad (18)$$

表 3 IEEE39 节点系统强度评估指标 $gSCR$ 、 $QgSCR_0$ 、 $gOSCR$ 和 $OSCR$ 及系统稳定性分析结果Table 3 Strength assessment indices $gSCR$, $QgSCR_0$, $gOSCR$, $OSCR_0$ and stability determination for IEEE39-bus system

算例编号	控制方法	I_{gSCR}	I_{QgSCR_0}	稳定性判断	I_{gOSCR}	I_{OSCR_0}	稳定性判断
1	PQ	2.27	2.44	失稳	1.98	2.87	失稳
2	PV	2.27	2.00	稳定	1.98	2.87	失稳
3	PQ-V	2.27	1.60	稳定	1.98	2.87	失稳
4	PQ	2.27	2.23	稳定	2.41	2.88	失稳
5	PV	2.27	1.91	稳定	2.41	2.88	失稳
6	PQ-V	2.27	1.56	稳定	2.41	2.88	失稳
7	PQ	2.27	2.14	稳定	2.62	2.89	失稳
8	PV	2.27	1.85	稳定	2.62	2.89	失稳
9	PQ-V	2.27	1.52	稳定	2.62	2.89	失稳

分析表 3 中的算例结果可知, 文献[15]的系统强度评估指标分析得到的结果相较于本文要保守许多。具体地, 在算例 2—9 中, 多馈入系统实际上是稳定的, 但采用文献[15]的指标却判断为失稳。其原因在于, 文献[15]的简化分析过程仅保留了锁相环和有功控制外环的动态特性, 忽略了跟网型变流器无功支撑特性对于系统强度的提升作用, 这会导

致分析结果偏向于保守, 这也进一步佐证本文所提指标的适用场景更为广泛。

表 2 算例 1—9 误差分析

Table 2 Error analysis of cases 1—9

算例	s_{equ}	s_{real}	$\delta/\%$
1	$0.46 \pm j95.82$	$0.62 \pm j95.08$	0.80
2	$-0.47 \pm j96.13$	$-0.35 \pm j95.30$	0.88
3	$-1.43 \pm j96.62$	$-1.27 \pm j95.84$	0.83
4	$-0.12 \pm j98.29$	$-0.11 \pm j97.70$	0.60
5	$-0.74 \pm j98.58$	$-0.82 \pm j97.90$	0.70
6	$-1.74 \pm j98.93$	$-1.86 \pm j98.55$	0.40
7	$-0.42 \pm j99.73$	$-0.53 \pm j99.15$	0.60
8	$-0.93 \pm j100.01$	$-1.09 \pm j99.23$	0.80
9	$-1.95 \pm j100.30$	$-2.07 \pm j99.68$	0.71

上述 9 个算例中等效单馈入系统的主导特征根和实际多馈入系统的主导特征根之间的误差均很小, 均在 1% 以内。因此, 采用等效单馈入系统表征多馈入系统的小干扰稳定性是合理的, 这也是本文所提系统强度评估指标的前提。

为了更好地证明本文所提系统强度评估指标的准确性和适用性, 表 3 对比分析了文献[19]所提的指标并指出其存在的不足。其中 I_{gSCR} 和 I_{QgSCR_0} 是本文所提出的系统强度评估指标, I_{gOSCR} 和 I_{OSCR_0} 是文献[15]所提出的指标。

最后, 于时域仿真模型的无穷大母线处, 在 $t = 0.2$ s 时施加 2% 的端电压扰动并快速清除, 观测算例 1—9 并网点电压的时域波形, 如图 6 所示。

图 6(a)、图 6(b)和图 6(c)分别对应算例 1—3、算例 4—6 和算例 7—9 的结果。其物理意义为, 在

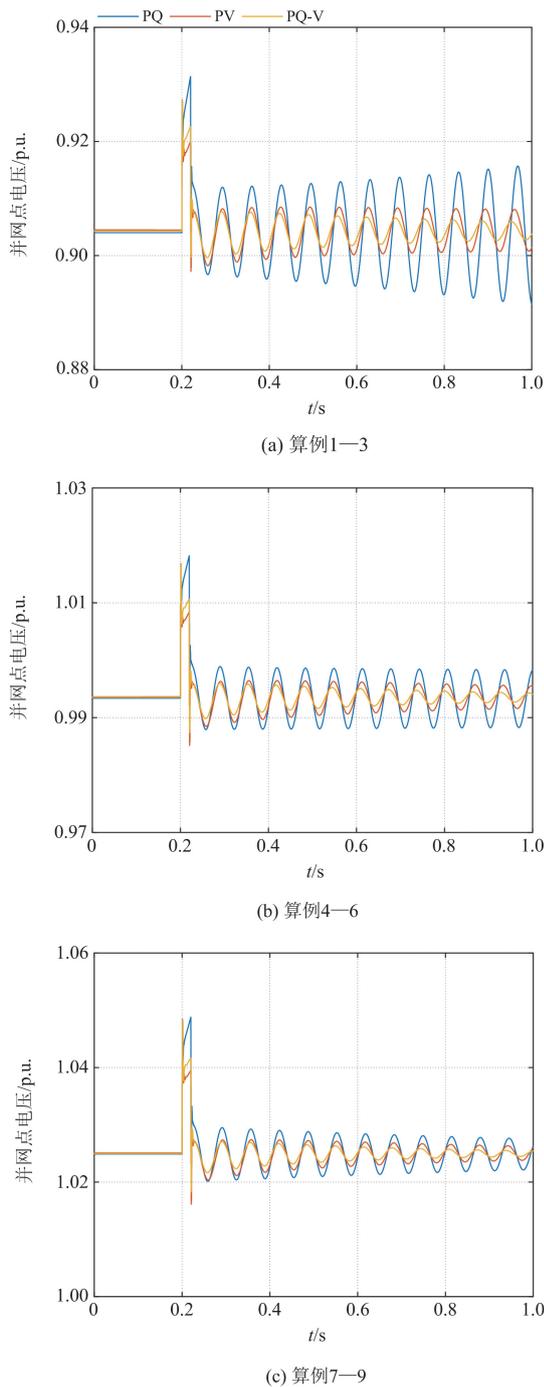


图 6 变流器 6 并网点电压时域仿真波形

Fig. 6 Time-domain simulation waveform of PCC voltage for converter 6

同一运行工况下，跟网型变流器分别采用 PQ、PV 和 PQ-V 控制时对应的并网点电压时域仿真波形。需要说明的是，由于 IEEE39 节点系统中的跟网型变流器较多，本节仅展示跟网型变流器 6(在所有算例中，该变流器的参与因子均最大，因此对系统小

干扰稳定性的影响也最大)的时域仿真结果。

分析图 6 的时域仿真结果，其并网点电压波形受扰动后发散或收敛的趋势与表 2 的特征分析结果及表 3 的强度评估结果对应一致，即这三者对于系统小干扰稳定性的判断是一致的，这也进一步验证了本文所提指标的准确性。

4.2 无功支撑特性对于系统强度评估的影响

本节旨在说明跟网型变流器的无功支撑特性对于系统强度评估的影响，所分析的算例与 4.1 节完全一致，即一共 9 个算例，其额定容量、运行工况、IEEE39 节点线路参数及跟网型变流器的控制结构和参数与表 3 对应相同，具体结果如表 4 所示。

表 4 无功支撑特性对于系统强度评估的影响

Table 4 Impact of reactive power support characteristics on system strength assessment

算例	控制方法	总无功出力/p.u.	$V_{hom}/p.u.$	稳定裕度/%
1	PQ	0.94	0.91	7.00
2	PV	0.94	0.91	13.50
3	PQ-V	0.94	0.91	41.88
4	PQ	3.56	1.01	1.79
5	PV	3.56	1.01	18.84
6	PQ-V	3.56	1.01	45.51
7	PQ	4.86	1.05	6.07
8	PV	4.86	1.05	22.70
9	PQ-V	4.86	1.05	49.34

需要说明的是，虽然表 3 和表 4 的算例一致，但由于侧重点不同，表 4 侧重分析跟网型变流器总无功出力、系统等效稳态平衡参数以及稳定裕度的变化。

跟网型变流器的无功支撑特性对于系统强度评估的影响主要分为两个方面：1) 无功出力的多少；2) 所采用的无功控制方法。因此可以从以下两个角度分析表 4 中的结果。

1) 算例 1—9 中各跟网型变流器的额定容量和有功出力始终保持不变，仅总的无功出力发生变化，因此广义短路比 $gSCR$ 不变，仅临界指标 $QgSCR_0$ 发生变化。对比分析算例 1、4 和 7，算例 2、5 和 8 以及算例 3、6 和 9 可知，当跟网型变流器采用相同的无功控制方法，且保证有功出力不变时，随着其总无功出力增大，系统的等效稳态电压逐渐升高，系统强度逐渐增大，即系统的稳定裕度也逐渐增大。

具体来说，当跟网型变流器采用 PQ 控制时，总无功出力由 0.94 p.u. 增大到 4.86 p.u.，系统的稳定裕度由 -7.00% 提高到 6.07%，提升了 13.07%，系统的稳定性也由失稳逐渐变为稳定；同样地，当跟网型变流器采用 PV 控制时，系统的稳定裕度由 13.50% 提高到 22.70%，提升了 9.20%；当跟网型变

流器采用 PQ-V 控制时, 系统的稳定裕度由 41.88% 提高到 49.34%, 提升了 7.46%。从数值上来看, 无功出力对 PQ 控制的影响相对较大, 对 PV 和 PQ-V 的影响相对较小。

因此, 跟网型变流器无功出力会对系统强度评估产生影响。结合算例结果可知, 对于多馈入系统而言, 当各跟网型变流器的无功出力发生变化时, 系统的交流潮流稳态平衡点(主要指变流器并网点电压和注入的 dq 轴电流)会改变, 从而修正临界指标 $QgSCR_0$ 的值, 改变系统稳定裕度。

2) 当跟网型变流器处于同一运行工况时, 如算例 1—3 之间、算例 4—6 之间以及算例 7—9 之间, 广义短路比 $gSCR$ 相同, 但采用不同的无功控制方法会导致对应的临界值 $QgSCR_0$ 相差较大。可以发现, 当采用 PQ-V 和 PV 控制方法时, 系统的临界值 $QgSCR_0$ 远小于 PQ 控制, 且采用 PQ-V 控制方法时系统稳定裕度最大。因此, 当参数设置合理时, 在本文所关注的频段范围内, 采用 PV 和 PQ-V 控制对于多馈入系统的强度有显著提升。

综上所述, 跟网型变流器无功出力以及所采用的无功控制方法都会影响系统强度评估, 且无功控制方法对系统的影响更大。

4.3 黑盒模型量化评估方法的精度

本节旨在验证黑盒模型量化评估方法的精度。所分析的算例与 4.1 节和 4.2 节保持一致。

根据 3.2.2 节的仿真测试与方程拟合过程, 当变流器采用 PQ、PV 和 PQ-V 控制时, 分别测量多组数据并对其进行筛选, 基于最小二乘拟合, 将 $QgSCR_0$ 拟合关于稳态平衡参数 V 、 I_d 和 I_q 的显示表达式。

$$I'_{QgSCR_0} = \begin{cases} -2.31V + 2.02I_d - 1.24I_q + 2.39, & \text{PQ控制} \\ -2.29V + 2.54I_d - 2.15I_q + 1.35, & \text{PV控制} \\ -1.86V + 1.83I_d - 1.80I_q + 1.31, & \text{PQ-V控制} \end{cases} \quad (19)$$

V 、 I_d 和 I_q 均在规定的标幺范围内。可以看出, 当变流器采用不同的无功控制方法时, $QgSCR_0$ 的表达式不同, 但同为一次线性方程。

本节采用 3 种无功控制方法分别测量并筛选出 100 组数据, 来拟合 $QgSCR_0$ 的表达式, 分析其拟合值与实际测量值之间的相对误差。

图 7 展示了 3 种无功控制方法拟合值与实际测量值的相对误差。当变流器采用 PQ 控制时, 拟合误差均在 3% 以内; 当采用 PV 和 PQ-V 控制时, 拟合误差均在 5% 以内。该结果表明, 无论采用哪种无功控制方法, $QgSCR_0$ 与稳态平衡参数之间均存

在近似线性的关系。通过计算每个算例相应的等效稳态平衡参数 V_{hom} 、 $I_{d,hom}$ 及 $I_{q,hom}$ 并代入式(19)的拟合方程, 求得当采用 3 种控制方法时实际多馈入系统的临界值 $QgSCR_0$, 结果如表 5 所示。

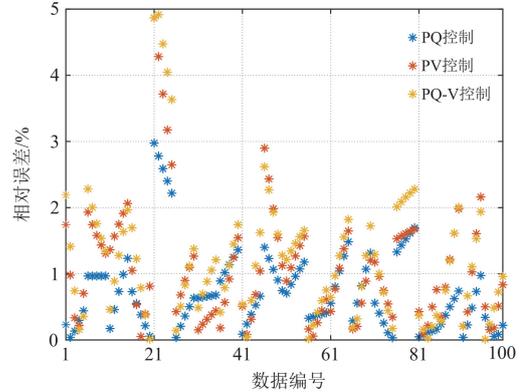


图 7 拟合值与实际测量值的相对误差

Fig. 7 Relative error between fitted values and measured values

表 5 黑盒模型拟合结果误差分析

Table 5 Error analysis of black-box model fitting results

算例	控制方法	I_{QgSCR_0} (白盒)	I'_{QgSCR_0} (黑盒)	相对误差/%
1	PQ	2.44	2.44	0
2	PV	2.00	1.99	-0.50
3	PQ-V	1.60	1.59	-0.63
4	PQ	2.23	2.26	1.34
5	PV	1.91	1.94	1.57
6	PQ-V	1.56	1.58	1.28
7	PQ	2.14	2.17	1.40
8	PV	1.85	1.88	1.62
9	PQ-V	1.52	1.55	1.97

表 5 对比分析了 9 个算例中黑白盒模型的临界值及其相对误差。需要说明的是, 白盒模型的结果主要指的是表 3 中的 $QgSCR_0$, 且该指标可以准确刻画系统的临界值, 因此选其为比较的基准值。可以看出, 上述算例中 3 种无功控制黑白盒模型所对应的 $QgSCR_0$ 相对误差都很小, 均在 $\pm 2\%$ 以内。

5 结论

本文聚焦小干扰下的系统强度问题, 给出了计及无功支撑特性的多馈入系统强度评估指标以及适用于黑白盒模型的系统强度评估量化流程。同时, 本文结合特征分析和时域仿真分析的结果, 说明了跟网型变流器无功支撑特性对于系统强度的影响, 并验证了所提指标、评估方法以及量化流程的准确性和适用性, 主要结论如下。

1) 本文所提强度评估指标为广义短路比 $gSCR$ 和计及无功支撑特性的等效临界短路比 $QgSCR_0$,

用于共同评估系统强度。其适用场景广泛，可以准确、有效地分析非单位功率因数、非额定运行点场景下的多馈入系统小干扰稳定性。

2) 黑白盒模型系统强度评估量化流程的唯一区别在于对临界指标 Q_gSCR_0 的求取过程。白盒模型的 Q_gSCR_0 可以通过建模及模态解耦计算求得，而黑盒模型需要通过搭建仿真模型进行测量。本文将黑盒模型的 Q_gSCR_0 拟合为关于稳态平衡参数的显式表达式，其准确性在本文算例中得以验证，与白盒模型的相对误差均在±2%以内。

3) 本文的算例结果表明，变流器无功出力 and 所采用的无功控制方法均会对系统强度造成影响。当采用相同的无功控制方法时，随着变流器无功出力的增加，系统强度提高；当无功出力相同时，变流器采用无功-电压下垂控制(PQ-V 控制)对于多馈入系统强度的提升效果最佳。

本文主要分析了跟网型变流器的无功支撑特性和稳态平衡参数(实际运行点)对多馈入系统强度的影响。后续工作将以本文所提出的系统强度评估指标为基础，将其应用至如新能源运行规划等优化问题中。

附录 A

表 A1 为第 4 节算例 1—9 中的具体参数，从左至右依次对应跟网型变流器 1—9。

表 A1 算例 1—9 各跟网型变流器额定容量与运行工况
Table A1 Rated capacities and operating conditions of grid-following converters in cases 1—9

算例	变流器额定容量与运行工况/p.u.
1—3	额定容量: 1.00, 3.00, 1.00, 1.00, 1.50, 4.00, 1.00, 1.50, 2.00 有功输出: 0.95, 2.85, 0.95, 0.95, 1.43, 3.80, 0.95, 1.43, 1.90 无功输出: 0.12, 0.48, 0.11, 0.12, 0.17, -0.43, 0.11, 0.04, 0.22 等效稳态平衡参数: $V_{hom} = 0.91, I_{d\text{hom}} = 1.04, I_{q\text{hom}} = -0.04$
4—6	额定容量: 与算例 1—3 相同 有功输出: 与算例 1—3 相同 无功输出: 0.21, 0.59, 0.22, 0.24, 0.34, 1.06, 0.21, 0.31, 0.39 等效稳态平衡参数: $V_{hom} = 1.01, I_{d\text{hom}} = 0.95, I_{q\text{hom}} = -0.23$
7—9	额定容量: 与算例 1—3 相同 有功输出: 与算例 1—3 相同 无功输出: 0.29, 0.93, 0.29, 0.28, 0.44, 1.29, 0.30, 0.46, 0.59 等效稳态平衡参数: $V_{hom} = 1.05, I_{d\text{hom}} = 0.91, I_{q\text{hom}} = -0.29$

参考文献

[1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018,

38(7): 1893-1904.
 ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
 [2] 杨可昕, 鲍颜红, 任先成, 等. 直接电压控制构网型变流器控制参数暂态稳定影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 20-30.
 YANG Kexin, BAO Yanhong, REN Xiancheng, et al. Analysis of transient stability effects of control parameters for direct voltage control grid-forming converters[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 20-30.
 [3] 李响, 武海潮, 王文雪, 等. 考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 178-187.
 LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Performance evaluation index system of a power grid considering large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 178-187.
 [4] 闫征, 赵清松, 徐建源. 考虑直流侧电源特性影响的跟网型变流器控制参数设计[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(5): 135-144.
 YAN Zheng, ZHAO Qingsong, XU Jianyuan. Control parameter design for a grid-following converter considering the influence of DC-side characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 135-144.
 [5] GUAN Lei, YAO Jun. Dynamic coupling and cooperative control for multi-paralleled doubly fed induction generator wind farms during symmetrical low voltage ride-through in a weak grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(3): 112-125.
 [6] 于琳, 孙华东, 徐式蕴, 等. 电力电子设备接入电压支撑强度量化评估指标综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 499-515.
 YU Lin, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Overview of strength quantification indexes of power system with power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 499-515.
 [7] ZHANG Feng, XIN Huanhai, WU Di, et al. Assessing strength of multi-infeed LCC-HVDC systems using generalized short-circuit ratio[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 467-480.
 [8] 周瑀涵, 辛焕海, 鞠平. 基于广义短路比的多馈入系统强度量化原理与方法: 回顾、探讨与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3794-3811.
 ZHOU Yuhan, XIN Huanhai, JU Ping. System strength quantification principle and method of multi-infeed systems based on generalized short-circuit ratio: reviews, discussions and outlooks[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3794- 3811.
 [9] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义

- 及指标[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 497-506.
- SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 497-506.
- [10] IEEE standard for interconnection and interoperability of inverter-based resources (IBRs) interconnecting with associated transmission electric power systems: IEEE Std 2800—2022[S]. New York: IEEE, 2022.
- [11] 马俊鹏, 李磊, 迟程缤, 等. 宽短路比工况下构网型逆变器功率自同步控制的稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 165-173.
- MA Junpeng, LI Lei, CHI Chengbin, et al. Stability analysis of power self-synchronization control of grid-forming converters in wide range of short-circuit ratio conditions[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 165-173.
- [12] DONG Wei, XIN Huanhai, WU Di, et al. Small signal stability analysis of multi-infeed power electronic systems based on grid strength assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1393-1403.
- [13] 肖浩, 李银红, 石东源, 等. 适用于多馈入直流系统静态电压稳定分析的综合短路比强度指标[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6471-6480, 6759.
- XIAO Hao, LI Yinhong, SHI Dongyuan, et al. Integrated short circuit ratio strength index for static voltage stability analysis of multi-infeed LCC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6471-6480, 6759.
- [14] 全国电力监管标准化技术委员会. 风电场接入电力系统技术规定第 1 部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- National Technical Committee for Standardization of Electric Power Supervision. Technical specification for connecting wind farm to power system—part 1: on shore wind power: GB/T 19963.1—2021[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.
- [15] 刘晨曦, 辛焕海. 考虑实际工况新能源多馈入系统广义运行短路比[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(8): 12-20.
- LIU Chenxi, XIN Huanhai. Generalized operational short-circuit ratio for multi-infeed renewable energy systems under actual operating conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(8): 12-20.
- [16] YUAN Hui, XIN Huanhai, LI Zhiyi, et al. Enhancing the small-signal stability of power grids via optimally coordinating inverter-based resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2025, 16(1): 17-31.
- [17] WU Guanglu, SUN Huadong, ZHANG Xi, et al. Parameter design oriented analysis of the current control stability of the weak-grid-tied VSC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1458-1470.
- [18] HUANG Linbin, XIN Huanhai, LI Zhiyi, et al. Grid-synchronization stability analysis and loop shaping for PLL-based power converters with different reactive power control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 501-516.
- [19] 刘朋印, 刘辉, 吴林林, 等. 满足全运行域振荡约束的跟网-构网组合控制及优化配置[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(12): 139-146.
- LIU Pengyin, LIU Hui, WU Linlin, et al. Hybrid grid-following and grid-forming control with optimal configuration under full operating region oscillation constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 139-146.
- [20] KIM Y, LEE G, YOON J, et al. Evaluation for maximum allowable capacity of renewable energy source considering AC system strength measures[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 1123-1134.
- [21] YIN Rui, SUN Yuanyuan, WANG Shanshan, et al. Stability analysis of the grid-tied VSC considering the influence of short circuit ratio and X/R[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(1): 129-133.
- [22] HUANG Linbin, WANG Dan, WANG Xiongfei, et al. Gain and phase: decentralized stability conditions for power electronics-dominated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(6): 7240-7256.
- [23] 辛焕海, 甘德强, 鞠平. 多馈入电力系统广义短路比: 多样化新能源场景[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5516-5527.
- XIN Huanhai, GAN Deqiang, JU Ping. Generalized short-circuit ratio in multi-infeed power systems: diverse renewable energy integration scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5516-5527.
- [24] ZHOU Yuhan, XIN Huanhai, WU Di, et al. Small-signal stability boundary of heterogeneous multi-converter power systems dominated by the phase-locked loops' dynamics[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2874-2888.
- [25] YANG Chaoran, HUANG Linbin, XIN Huanhai, et al. Placing grid-forming converters to enhance small signal stability of PLL-integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3563-3573.

收稿日期: 2025-05-06; 修回日期: 2025-08-24

作者简介:

戴天辰(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子化电力系统稳定、运行与控制; E-mail: 13382779675@163.com

刘云(1988—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子化电力系统稳定、运行与控制。E-mail: liuyun19881026@gmail.com

(编辑 许威)