含构网型储能的系统临界短路比指标构建及影响因素

刘彬[1]，张昊然[2]，黄宝莹[1]，孙黎[2]，潘思宇[1]，马成廉[2]，王乐天[3]
（1. 国网经济技术研究院有限公司，北京市 102209；2. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室（东北电力大学），吉林省吉林市 132012；3. 山东电力工程咨询院有限公司，济南市 250013）

摘　要：【目的】针对“沙戈荒”地区弱电网（短路比<1.5）与大规模新能源集中接入所引发的电力系统稳定性问题，提出一种能够体现构网型储能作用的新能源多场站临界短路比计算与判别方法。【方法】在分析新能源多场站短路比的基础上，引入虚拟阻抗、储能容量和连接电抗等关键参数，建立新能源多场站短路比修正公式；结合拓展雅可比矩阵特征值分析，提出临界短路比实时计算与稳定性判据，实现短路比指标与静态电压稳定理论的统一；并基于电磁暂态仿真平台PSCAD/EMTDC，构建3机9节点系统仿真模型。【结果】构网型储能接入后，系统短路比水平显著提高，临界短路比由1.07提高至1.52，风电极限渗透率由50%上升至54%，并且电压跌落幅度减小，支撑能力增强。进一步仿真分析发现，合理配置虚拟阻抗可提升电压稳定裕度，增加储能容量可增强系统强度，而增大连接电抗会削弱耦合作用降低临界短路比。【结论】所提方法能够准确判定系统临界稳定状态，量化构网型储能参数对电网强度的影响敏感性，弥补了当前短路比指标难以反映构网型储能作用的不足。

关键词：构网型储能；临界短路比；电压稳定性；虚拟阻抗；弱电网
中图分类号：TM71　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-7229（2026）03-0135-11
DOI：10.12204/j.issn.1000-7229.2026.03.011

Construction of a Critical Short-Circuit Ratio Index for Systems with Grid-Forming Energy Storage and Influencing Factors

LIU Bin[1], ZHANG Haoran[2], HUANG Baoying[1], SUN Li[2], PAN Siyu[1], MA Chenglian[2], WANG Letian[3]
（1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, Jilin Province, China; 3. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Ji'nan 250013, China）

ABSTRACT: [**Objective**] Aiming at the stability issues arising from weak grid conditions (short-circuit ratio < 1.5) and the large-scale centralized integration of renewable energy in desert, Gobi, and barren areas, this paper proposes a critical multiple renewable energy station short-circuit ratio calculation and discrimination method that reflects the role of grid-forming energy storage. [**Methods**] Based on the analysis of the multiple renewable energy station short-circuit ratio, key parameters such as virtual impedance, energy storage capacity, and connection reactance are introduced to establish a modified formula. By combining eigenvalue analysis of the extended Jacobian matrix, a real-time calculation method for the critical short-circuit ratio and stability criterion is proposed, thereby unifying the short-circuit ratio index with static voltage stability theory. Furthermore, a 3-machine 9-bus system simulation model is constructed on the electromagnetic transient simulation platform PSCAD/EMTDC. [**Results**] After connecting grid-forming energy storage, the system's short-circuit ratio level is significantly improved. The critical short-circuit ratio increases from 1.07 to 1.52, the wind power penetration limit rises from 50% to 54%, and the voltage sag amplitude is reduced, indicating enhanced support capability. Further simulation analysis reveals that rationally configuring the virtual impedance can improve the voltage stability margin, increasing the

基金项目：国家电网有限公司科技项目（5200-202456095A-1-1-ZN）；国家自然科学基金项目（52477178）

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

energy storage capacity can enhance system strength, whereas increasing the connection reactance weakens the coupling effect and reduces the critical short-circuit ratio. [**Conclusions**] The proposed method can accurately determine the critical stable state of the system and quantify the sensitivity of grid-forming energy storage parameters to grid strength. It addresses the deficiency of current short-circuit ratio indicators in reflecting the role of grid-forming energy storage.

This work is supported by SGCC Technology Program (No. 5200-202456095A-1-1-ZN) and National Natural Science Foundation of China (No. 52477178).

KEYWORDS: grid-forming energy storage; critical short-circuit ratio; voltage stability; virtual impedanc; weak grid

0 引 言

在全球气候治理加速推进与我国“双碳”目标实施的背景下,风电和光伏等新能源已成为能源转型的核心力量,正在深刻改变我国电力系统的发展方向[1-4]。随着新能源渗透率不断攀升,电力系统逐渐由传统同步发电机主导转向以电力电子设备为核心的新型格局。在这一过程中,系统惯量下降、短路比(short-circuit ratio,SCR)持续下降以及电压支撑能力不足等“弱网”特征日益突出[5]。尤其在电网基础薄弱或地理位置偏远的“沙戈荒”地区,低短路比现象更加严重,限制了新能源基地的稳定消纳和远距离输送[6-11]。在这种背景下,如何保障弱电网条件下的电压稳定与新能源大规模并网,已成为电力系统必须面对的核心问题。

短路比是衡量电网强度和新能源并网适应性的经典指标,已广泛应用于风电、光伏等新能源场站并网研究与工程实践。通过短路容量与装机容量的比值,传统的SCR指标能够反映并网点对电源的支撑能力,但仅适用于单馈入场景,在大规模集中接入和弱电网条件下难以准确表征系统整体强度[12-13]。针对这一局限,文献[14]提出了新能源多场站短路比(multiple renewable energy station short circuit ratio,MRSCR),在计算中引入节点阻抗矩阵、场站间电气耦合及无功支撑能力,能够更全面地反映多馈入系统的电气特性;在此基础上,文献[15-16]进一步从影响因素分析及高比例新能源电网强度评估与提升等角度,对MRSCR的定义及工程应用进行了拓展;进一步地,文献[17-18]提出了新能源多场站临界短路比的求取方法,实现了系统静态电压稳定性判别标准与临界短路比算法的统一。另外,广义短路比及运行短路比等短路比的扩展形式将交直流混联系统、电力电子多馈入电网及运行状态等因素纳入统一框架,为临界值判别和规划分析提供了新的工具[19-21]。然而,现有的短路比指标及其扩展形式大多集中于新能源本身的电气特性,尚未显式纳入构网型储能(grid-forming energy storage,GFMES)的作用机制,难以定量反映构网型储能对系统强度和临界稳定性的影响。

构网型储能因具备电压源特性和虚拟同步机功能而受到广泛关注[22-27]。与传统跟网型设备不同的是,GFMES能够在并网点提供电压基准,在弱电网条件下能够显著提升系统电压稳定性与惯量响应,对改善系统临界稳定裕度具有重要意义[28-30]。围绕弱电网条件下构网型储能的应用及其对系统强度与稳定性的影响机理,国内外学者已开展了大量研究工作,相关成果大致可从以下三个层面进行梳理:

1)系统稳定性层面。文献[31]面向含构网型电源接入的新能源场站,建立了稳定性评估模型,从电压支撑能力和动态响应特性来评价构网型电源对弱电网稳定性的影响;在此基础上,文献[32]针对构网型控制的新能源发电系统,基于广义奈奎斯特判据提出了临界稳定运行边界的判定方法,揭示了电网强度变化对系统稳定性的影响规律。

2)控制策略层面。文献[33]基于运行短路比提出了新能源场站中跟/构网控制可切换单元的优化配置方法,分析了控制模式切换对电压支撑特性的作用机理;文献[34]则针对“沙戈荒”地区低短路比特性,提出了计及构网型储能与调相机协同作用的优化配置策略,构建了基于多场站短路比约束的电压支撑模型。

3)动态响应与短路行为层面。文献[35]从多馈入新能源系统的暂态过程出发,引入虚拟阻抗限流机制以抑制构网设备接入引起的过电压,并构建了系统级电压响应评估框架;文献[36]基于机电暂态仿真模型研究了大规模构网型储能集中接入对系统短路电流的影响,揭示了不同限流策略与装机规模对短路电流特性的作用规律;文献[37]采用等值阻抗矩阵法建立了新能源多场站短路比模型,从短路比角度阐明了构网型储能提升系统支撑强度的机理,并通过算例验证了其对MRSCR的显著改善效果。

总体来看,现有研究在构网型储能稳定性分析、控制策略及短路比指标方面已取得一定进展,但在含构网型储能系统的临界短路比(critical short-circuit ratio,CSCR)指标构建及其关键参数影响规律的定量分析方面仍存在不足,尚未形成统一的理论分析与判定体系。在弱电网及高渗透率新能源条件下,系统临

界稳定状态的识别与运行强度评估仍存在偏差。

因此，本文针对现有短路比及其扩展形式难以体现构网型储能作用的不足，提出了计及构网型储能特性的临界短路比指标。该指标兼顾电网强度评估与静态电压稳定判据，能够更准确识别弱电网条件下的临界稳定状态。算例仿真进一步揭示了构网型储能参数对系统强度和系统电压稳定裕度的影响规律，为储能配置与新能源消纳的定量分析提供了新途径。

1　计及构网型储能的新能源多场站临界短路比

1.1　新能源多场站短路比的定义及分析

在新能源场站并网分析中，通常采用戴维南等值的方法对系统进行简化，将复杂的交流电网等效为由理想电压源和串联阻抗组成的模型。其中，理想电压源反映电网的基准电压，而串联阻抗则反映其等效阻抗特性。基于此，通过多端口戴维南等值的方法建立简化模型，用于描述多个新能源场站并行接入电网时的场景，如图 1 所示。图中：$\dot{S}_{\mathrm{RE}n}$、$\dot{P}_{\mathrm{RE}n}$、$\dot{Q}_{\mathrm{RE}n}$和$\dot{U}_{\mathrm{RE}n}$分别为新能源发电设备/场站的视在功率、有功功率、无功功率和并网母线电压；$\dot{Z}_n$为主网等值电源 n 与对应并网点间的系统侧折算等值阻抗。

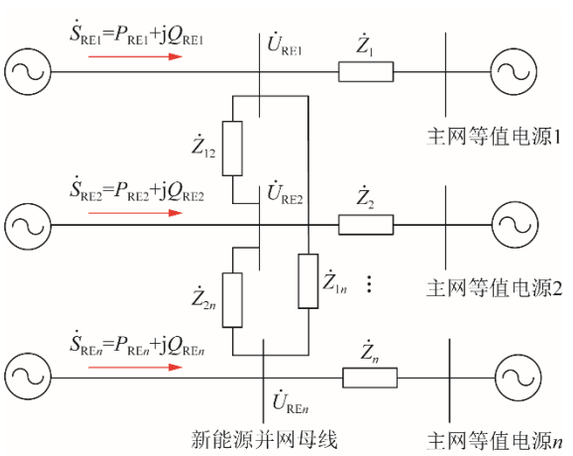

图 1　多个新能源场站接入电网的简化模型

Fig. 1　Simplified model of power grid for multi-new energy station access

在第 i 个新能源并网母线处定义 MRSCR，用以度量交流系统与所接入场站的相对强弱，其解析式为：

$$R_i^{\mathrm{MRSCR}}=\frac{\left|\dot{U}_i^{*}\dot{U}_{\mathrm{N}i}/\dot{Z}_{ii}\right|}{\left|\dot{U}_i^{*}\dot{I}_i+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{Z}_{ij}}{\dot{Z}_{ii}}\dot{U}_i^{*}\dot{I}_j\right|}=\frac{\left|\dot{U}_i^{*}\dot{U}_{\mathrm{N}i}/\dot{Z}_{ii}\right|}{\left|\frac{\dot{U}_i^{*}\dot{U}_{\mathrm{N}i}}{\dot{Z}_{ii}}\right|\left|\dot{S}_{\mathrm{RE}i}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\dot{\Pi}_{ij}\dot{S}_{\mathrm{RE}j}\right|^{-1}}\tag{1}$$

式中：$\dot{I}_i$为第 i 个风机提供的短路电流；$\dot{U}_i$为第 i 个风机并网母线的实际运行电压；$\dot{U}_{\mathrm{N}i}$为第 i 个风机并网母线的标称电压；$\dot{S}_{\mathrm{RE}i}$为第 i 个风机并网母线节点实际注入的视在功率；$\dot{Z}_{ii}$、$\dot{Z}_{ij}$为等值阻抗矩阵中 i 节点自阻抗和 i、j 节点互阻抗；$\dot{\Pi}_{ij}=\dot{Z}_{ij}\dot{U}_i^{*}/\dot{Z}_{ii}\dot{U}_j^{*}$为风机并网母线节点 i 和 j 之间的复数功率折算因子。

相比于其他短路比指标，MRSCR 的优势主要体现在以下三个方面：

其一，适用于多个新能源场站同时并网的情形，能够综合反映场站间的相互作用，突破了单场站指标仅能反映局部特性的限制；

其二，在推导中引入了场站之间的电气耦合关系，并同时考虑新能源设备的无功支撑作用，从而更全面地刻画并网点电压支撑水平与系统稳定特性；

其三，在多个新能源场站集中接入的情况下，阻抗差异与相位偏差会使低短路比特征更加突出，MRSCR 因而能够有效揭示此类弱网问题，在“沙戈荒”等区域的应用中将展现出更强的适用性。

综上，MRSCR 的引入拓展了传统短路比的适用范围，为多场站并网条件下的系统强弱评估提供了有效工具，尤其在“沙戈荒”等低短路比区域具有重要的工程价值。然而，MRSCR 未能充分体现构网型储能对电压支撑特性的影响，因而难以全面、准确地反映弱网条件下的系统稳定特性。因此，亟需在 MRSCR 指标中引入构网型储能的参数与控制特性，以建立能够反映其作用的修正指标，并进一步用于临界稳定性分析。

1.2　构网型储能模型及其对雅可比矩阵的修正

典型构网型储能变流器以虚拟同步机控制为核心，具备电压源外特性[36]，并可在弱网条件下建立局部电压与频率基准，其控制结构如图 2 所示，主要由

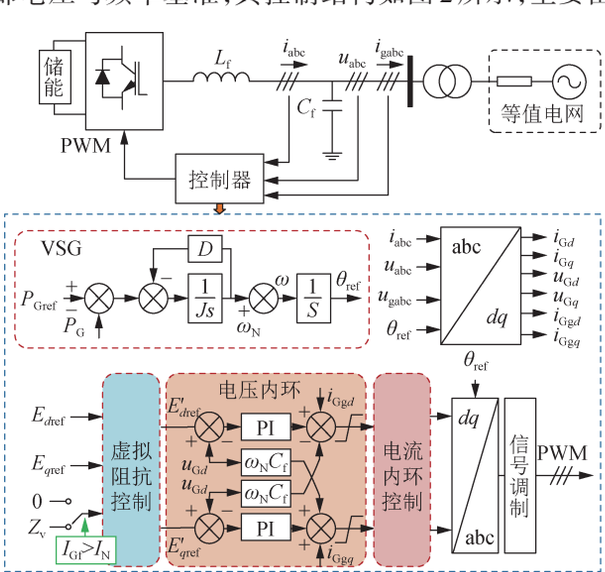

图 2　构网型储能控制结构图

Fig. 2　Control block diagram of GFMES

虚拟同步发电机(virtual synchronous generator,VSG)控制、虚拟阻抗控制、电压/电流双闭环及脉冲宽度调制(pulse width modulation,PWM)等模块构成。图中:L_f为滤波电感;C_f为滤波电容;u_{Gd}/u_{Gq}、i_{Gd}/i_{Gq}、i_{Ggd}/i_{Ggq}分别为并网点三相电压u_{abc}、设备阀侧输出三相电流i_{abc}、网侧输出三相电流i_{gabc}在θ_{ref}基准的同步坐标系下dq轴分量;P_{Gref}、P_G分别表示有功功率的参考值与实际值;D、J分别为阻尼系数及虚拟惯量;ω、ω_N分别为VSG实际和额定虚拟角频率;θ_{ref}表示参考相位;E_{dref}、E_{qref}分别表示d、q轴电压参考值;E'_{dref}、E'_{qref}为实际电压参考值。在电压跌落或故障场景下,结合电流限幅策略与虚拟阻抗对等效输出阻抗及注入相位进行整定,可提高并网点电压强度与短时短路电流供给能力。

由文献[38]可知,当某节点接入构网型储能后可等效为在该节点增加一条对地支路,系统网侧的节点导纳矩阵$\boldsymbol{Y}'$为:

$$\boldsymbol{Y}' = \boldsymbol{Y} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \dfrac{1}{\dot{Z}_v + x_m} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{Y}$为构网型储能并网前的节点导纳矩阵;$\dot{Z}_v$为虚拟阻抗;x_m为连接电抗。

系统节点阻抗矩阵变为[39]:

$$\widehat{\boldsymbol{Z}'} = \dot{\boldsymbol{Z}} - \frac{\dot{Z}^T \dot{Z}_i}{\dot{Z}_{hh} + \dot{Z}_v + x_m} \tag{3}$$

式中:$\widehat{\boldsymbol{Z}'}$为构网型储能并网后的节点阻抗矩阵;$\dot{\boldsymbol{Z}}$为构网型储能并网前的节点阻抗矩阵;$\dot{Z}^T$为系统节点阻抗转置阵;$\dot{Z}_i$为阻抗矩阵$\dot{Z}$的第$i$行;$\dot{Z}_{hh}$为节点$h$的自阻抗。

$\widehat{\dot{Z}}$的任意元素可表示为:

$$\widehat{Z'_{ij}} = \dot{Z}_{ij} - \frac{\dot{Z}_{ih}\dot{Z}_{hj}}{\dot{Z}_{hh} + \dot{Z}_v + x_m} \tag{4}$$

式中:$\widehat{Z'_{ij}}$为构网型储能并网后,$\widehat{Z'}$的第i行、第j列元素;$\dot{Z}_{ij}$为构网型储能并网前,$\dot{Z}$的第i行、第j列元素;$\dot{Z}_{ih}$为构网型储能并网前,$\dot{Z}$的第i行、第h列元素;$\dot{Z}_{hj}$为构网型储能并网前,$\dot{Z}$的第h行、第j列元素。

基于以上分析,构网型储能接入会导致系统节点导纳矩阵和阻抗矩阵发生变化,从而引起潮流分布的改变,系统的电压稳定性也会受到影响。静态电压稳定评估通常采用连续潮流法,拓展雅可比矩阵正是基于考虑新能源的连续潮流法。该方法在逐步调节系统参数时沿潮流解的轨迹连续跟踪数据变化,当雅可比矩阵趋于奇异时即判定达到临界稳定;计及新能源特性时,可据此构建拓展雅可比矩阵,其对应的牛顿-拉夫逊法(极坐标)修正方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \boldsymbol{J} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中:ΔP、ΔQ、$\Delta\theta$、ΔV分别为系统注入有功、无功和节点电压角度、幅值的不平衡量;$J_{P\theta}$为有功功率变化对电压相角的影响;J_{PV}为有功功率变化对电压幅值的影响;$J_{Q\theta}$为无功功率变化对电压相角的影响;J_{QV}为无功功率变化对电压幅值的影响;$\boldsymbol{J}$为雅可比矩阵。

在临界电压稳定处,雅可比矩阵奇异,等价于至少存在一个特征根为零,因此常用$\min|\lambda| = 0$作为临界电压稳定判据[40-42]。现将构网型储能的特性考虑进去进行潮流计算。首先,系统的节点导纳矩阵发生变化,即在原有导纳矩阵的基础上增广构网型储能接入节点的等效支路导纳,并将虚拟阻抗与连接电抗的影响引入节点自导纳和互导纳的修正。同时,在有功和无功功率不平衡量ΔP_i、ΔQ_i变化时,修正雅可比矩阵元素并计算拓展雅可比矩阵的多个特征根,判断是否满足临界稳定判据$\min|\lambda| = 0$,若满足,则系统达到临界电压稳定状态。得到新修正方程式为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J'_{P\theta} & J'_{PV} \\ J'_{Q\theta} & J'_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta' \\ \Delta V' \end{bmatrix} = \boldsymbol{J}' \begin{bmatrix} \Delta\theta' \\ \Delta V' \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{J}'$定义为拓展雅可比矩阵;$J'_{P\theta}$和J'_{PV}分别表示新能源系统电压相角和幅值变化对有功功率的影响;$J'_{Q\theta}$和J'_{QV}分别表示新能源系统电压相角和幅值变化对无功功率的影响,均为偏导数矩阵;$\Delta\theta'$、$\Delta V'$分别为新能源系统节点电压角度、幅值的不平衡量。

1.3 计及构网型储能的临界短路比求取

式(1)所定义的新能源多场站短路比在不含构网型储能的传统并网场景下,能够充分体现各场站间的相互影响。然而,结合1.2小节的分析可知,当构网型储能接入系统后,节点导纳矩阵和阻抗矩阵均会发生改变,进而引起潮流分布及雅可比矩阵特性的显著变化。在这种情况下,原有MRSCR已无法准确反映系统强弱度及其临界稳定特性。因此,有必要对MRSCR指标进行修正,并据此提出计及构网型储能的临界短路比,具体步骤如下:

1)对MRSCR指标进行修正,将式(4)代入MRSCR指标,推导得出修正后的综合考虑新能源和构网型储能特性的短路比指标;

2)基于修正后的导纳与阻抗矩阵,构建修正后的潮流雅可比矩阵,并得到当前运行点下的多个特

征根；

3）以雅可比矩阵最小特征值趋近于零作为临界判据，识别系统是否达到临界稳定状态，并确定对应的运行边界；

4）在临界运行点条件下，将系统电气量代入修正后的短路比指标中，得到计及构网型储能的临界短路比指标：

$$R_i^{\mathrm{CSCR}}=\left|\frac{\dot{U}_i^{*}\dot{U}_{\mathrm{N}i}}{\dot{Z}_{\mathrm{eq}ii}}\right|\left|\dot{S}_{\mathrm{RE}i}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\dot{H}_{ij}\dot{S}_{\mathrm{RE}j}-\alpha\right|^{-1} \tag{7}$$

式中：$\dot{Z}_{\mathrm{eq}ii}$为系统临界稳定状态时等值阻抗矩阵中i节点自阻抗；α是由于构网型储能引入而产生的耦合影响因子，其值越大表示构网型储能与新能源场站的耦合作用越强，反之耦合作用越弱。α表达式为：

$$\alpha=\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{U}_i^{*}\dot{S}_{\mathrm{RE}j}}{\dot{U}_j^{*}\dot{Z}_{ii}}\cdot\frac{\dot{Z}_{ih}\dot{Z}_{hj}}{\dot{Z}_{hh}+\dot{Z}_{\mathrm{v}}+x_{\mathrm{m}}} \tag{8}$$

式(7)与式(8)的详细推导过程见附录A。由式(1)和式(7)比较可知，构网型储能的接入使系统节点等效阻抗减小，从而提升新能源多场站短路比。本文所构建的计及构网型储能的临界短路比指标，为量化新能源多场站系统的电压支撑能力与失稳风险提供了一种新的短路比指标。该指标在MRSCR的基础上，考虑了构网型储能与新能源场站之间的耦合特性，使得系统强弱度的表征更加贴近实际运行。

2　构网型储能对CSCR的关键影响因素

2.1　虚拟阻抗

虚拟阻抗是构网型储能控制策略中的关键参数，其作用机理在于通过在电压外环引入等效电阻与电抗，对输出电流进行限幅并塑造等效阻抗特性。当发生故障或扰动导致电流趋于越限时，虚拟阻抗能够快速投入，从而改变并网点的等效阻抗形式，防止电流越限的发生（要求构网型储能需具备1~3倍的短时过流能力[43]）；构网型储能可被等效为一个包含恒定虚拟内电势$\dot{E}_{\mathrm{ref}}$和虚拟阻抗$\dot{Z}_{\mathrm{v}}$串联的电路模型。其等效电路模型如图3所示。图中：$\dot{E}_{\mathrm{ref}}$为构网型储能的参考电动势；$\dot{U}_{\mathrm{Gf}}$为构网型储能并网点电压；$\dot{I}_{\mathrm{Gf}}$表示构网型储能短路电流；X_{v}表示虚拟电抗；R_{v}表示虚拟电阻。

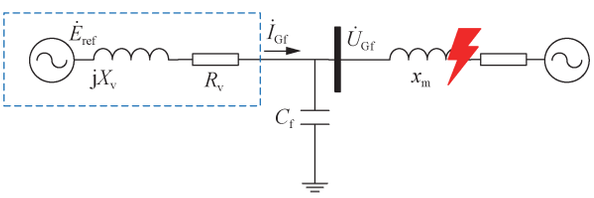

图3　含构网型储能的系统等效模型

Fig. 3　Equivalent system model with grid-forming energy storage

当电流达到限幅时，即$I_{\mathrm{Gf}}>I_{\mathrm{N}}$时，通过调节虚拟阻抗对输出电流进行限制，改变虚拟阻抗需要通过调节过流倍数k实现，过流倍数与短路过程中构网型设备端口电压幅值以及无功控制策略联系密切，k的取值具体为：

$$\begin{cases}k=1, & I_{\mathrm{Gf}}\leqslant I_{\mathrm{N}}\\ k>1, & I_{\mathrm{Gf}}>I_{\mathrm{N}}\end{cases} \tag{9}$$

对应的虚拟阻抗$\dot{Z}_{\mathrm{v}}$计算方法为：

$$\left|\dot{Z}_{\mathrm{v}}\right|=\frac{\left|\dot{E}_{\mathrm{ref}}-\dot{U}_{\mathrm{Gf}}\right|}{kI_{\mathrm{N}}} \tag{10}$$

式中：I_{N}为构网型储能的额定电流。

引入虚拟阻抗后，系统的电气特性发生改变：节点导纳矩阵与阻抗矩阵随$\dot{Z}_{\mathrm{v}}$调整而修正。由此，潮流雅可比矩阵$\boldsymbol{J}$的数值结构及其最小特征值$\lambda_{\min}$分布随之变化，直接影响CSCR的计算及临界稳定性判定。根据修正后的短路比式(7)可知，当$\dot{Z}_{\mathrm{v}}$减小时，构网型储能并网点自阻抗$\dot{Z}_{hh}$降低，耦合影响因子α增大，构网型储能与新能源场站的耦合作用增强，CSCR相应增大（短路比越大，表示此时系统越稳定，反之系统越不稳定）。

综上，虚拟阻抗$\dot{Z}_{\mathrm{v}}$的取值发生改变则构网型储能的过流倍数同样需要做出调整以应对不同工况，随着过流倍数的提高，设备所投入的虚拟阻抗减小，从而使CSCR提高，电压支撑能力也随之增强。

2.2　装机容量

构网型储能的装机容量是影响系统CSCR的关键因素。随着装机容量的增大，构网型储能可以提供更大的惯量支撑和额定电流I_{N}，根据仿真测试结果，$\dot{E}_{\mathrm{ref}}$和$\dot{U}_{\mathrm{Gf}}$的差值变化幅度较小，可近似认为保持不变，故而I_{N}为重要研究因素[44]。由于I_{N}改变，此时耦合影响因子α发生了改变，将式(10)代入式(8)得到α'的表达式：

$$\alpha'=\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{U}_i^{*}\dot{S}_{\mathrm{RE}j}}{\dot{U}_j^{*}\dot{Z}_{\mathrm{eq}ii}}\dot{Z}_{ih}\dot{Z}_{hj}\left(\dot{Z}_{hh}+\frac{\left|E_{\mathrm{ref}}-U_{\mathrm{Gf}}\right|}{kI_{\mathrm{N}}'}+x_{\mathrm{m}}\right)^{-1} \tag{11}$$

依据式(11)可知，装机容量增大使得额定电流I_{N}增大，最终将导致α增大，构网型储能与新能源场站的耦合特性增强，从而提升系统的短路比，增强电网的电压支撑和抗扰动能力并调整系统的稳定边界，有效提升系统的临界稳定裕度，确保系统在更高负荷或更复杂条件下仍能保持稳定运行。

综上，合理地增大装机容量有助于提升系统对外部扰动的抵抗能力，并提高电压调节能力，从而降低电压波动引发的失稳风险。

2.3 连接电抗

连接电抗是构网型储能并网环节中的重要参数。从系统等效分析的角度看，x_m的变化相当于改变储能并网点与主电网的电气距离，进而影响系统的强度与稳定性。增大x_m会导致更高的有功损耗和较低的负荷裕度，降低系统承载能力，进而影响静态电压稳定性。减小x_m则有助于减少功率损耗并增加负荷裕度，从而增强电压稳定性。根据式(11)分析可知，x_m增大时，α会减小，表征此时构网型储能与新能源场站的耦合作用减弱，依据式(7)进一步分析可知此时CSCR将会降低，系统稳定性下降。

综上，x_m的取值直接影响CSCR，改变x_m值会调整电网结构及其等效阻抗。因此，若想提高CSCR需适当减小x_m，从而降低传输损耗，提升系统的电压水平进而增强系统稳定性。

3 仿真验证

基于电磁暂态仿真软件(advanced digital power system simulator，PSCAD)，本文搭建了IEEE 3机9节点系统作为基准仿真系统。通过逐步增大风电渗透率，确定系统的临界稳定状态，并对比临界状态时构网型储能接入前后的电压曲线，以验证构网型储能对系统电压稳定性的支撑作用；与此同时，计算不同风电渗透率下的CSCR大小以验证构网型储能对短路比的提升作用。探讨构网型储能在不同装机容量、虚拟阻抗和连接电抗条件下的响应特性，分析这些因素对系统CSCR影响规律的变化。通过这些分析，进一步评估了系统的运行状态及电压支撑能力。

3.1 构网型储能对CSCR的作用验证

仿真系统的电网结构如图4所示。

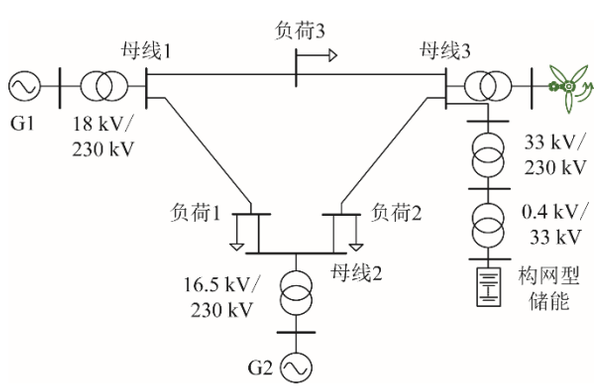

图4 含构网型储能的3机9节点系统

Fig. 4 Three-machine nine-bus system with grid-forming energy storage

在图4所示的系统中，在t=10 s时于负荷2处施加负荷阶跃。通过逐步提高系统风电渗透率，得到风电极限渗透率为50%。为验证构网型储能在扰动或故障工况下对电压稳定性的支撑作用，对比分析该极限渗透率场景下构网型储能接入前后的电压响应曲线，其中构网型储能容量设置为10 MVA，如图5所示。

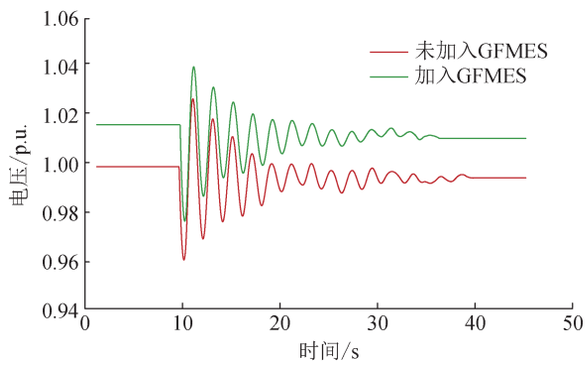

图5 构网型储能接入对系统电压稳定性的影响

Fig. 5 Effect of grid-forming energy storage integration on system voltage stability

由图5可知，在相同扰动工况下，接入构网型储能后系统电压的暂态电压跌落幅度显著减小，电压恢复至稳态的速度加快；相比未接入构网型储能的情形，其稳态电压水平有所提升，表明构网型储能在增强电压支撑和改善暂态动态特性方面具有积极作用。这进一步说明，在高风电渗透率条件下，构网型储能的引入能够有效提升系统的电压稳定裕度。

为进一步量化构网型储能对系统短路比水平的影响，图6给出了在不同风电渗透率下，系统MRSCR随渗透率变化的对比曲线。

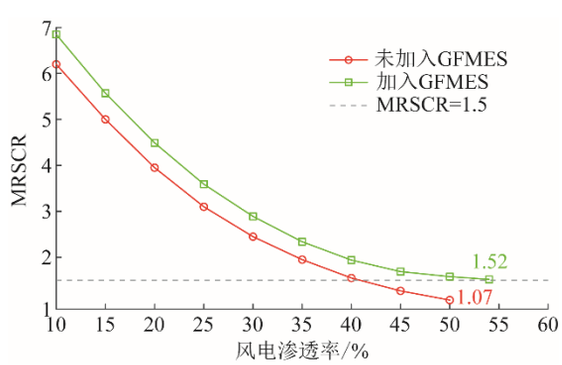

图6 不同风电渗透率下构网型储能接入对系统短路比的影响对比

Fig. 6 Comparison of system short-circuit ratio under different wind power penetration levels with and without GFMES integration

由图6可见，随着风电渗透率的提高，MRSCR呈逐步下降趋势；在相同风电渗透率条件下，接入GFMES的系统始终保持较高的短路比水平。根据本

文 1.3 节的方法计算得到未接入 GFMES 的系统临界短路比为 1.07，此时系统的风电极限渗透率为 50%；接入 GFMES 的系统对应的临界短路比为 1.52，且此时系统的极限渗透率提高至 54%，表明构网型储能能够显著提升系统的电气强度和临界短路比阈值。

3.2　虚拟阻抗对 CSCR 的影响验证

为考察虚拟阻抗参数对系统电压稳定性及 CSCR 的作用机理，固定风电渗透率为 50%。由于构网型储能需具备较高的短时过流能力，于是当 t=10 s 时在负荷 2 处施加较大的负荷扰动，并设置不同的虚拟阻抗参数对应的过流倍数 k 分别为 1、2 和 3。得到不同工况下的电压动态响应曲线如图 7 所示。

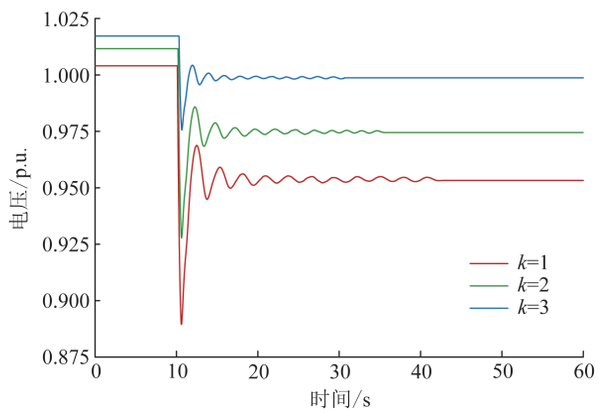

图 7　不同过流倍数下风电并网点电压响应曲线

Fig. 7　Voltage response curves at the wind power PCC under different overcurrent multiples

为进一步量化不同虚拟阻抗参数对系统稳定特性的影响，对各工况下的 CSCR 进行了对比与计算。相应计算结果如表 1 所示。

表 1　过流倍数 k 不同时的 CSCR

Table 1　CSCR under different overcurrent multiples k

k	虚拟阻抗/p.u.	CSCR
1	0.036+0.303j	1.69
2	0.024+0.202j	1.83
3	0.012+0.101j	1.95

由图 7 可以看出，引入虚拟阻抗后振荡分量迅速衰减，电压动态响应更平稳，系统的阻尼特性得到了增强。由表 1 可以看出，适度地减小虚拟阻抗提高过流倍数能够有效提升 CSCR，然而过流倍数过大，系统发生扰动或故障时将会产生较大的短路电流，因此，应合理配置虚拟阻抗参数，保证系统具有足够支撑能力的同时，限制过流幅值，避免因电流越限引发器件过热或失稳风险。

3.3　装机容量对 CSCR 的影响验证

为检验储能装机容量对系统电压稳定性及 CSCR 的影响，固定风电渗透率为 40%。在仿真过程中，于 t=10 s 时在负荷 2 处施加负荷阶跃扰动，并将构网型储能装机容量分别设置为 10、15 和 20 MVA。仿真得到不同容量下的电压响应曲线如图 8 所示。

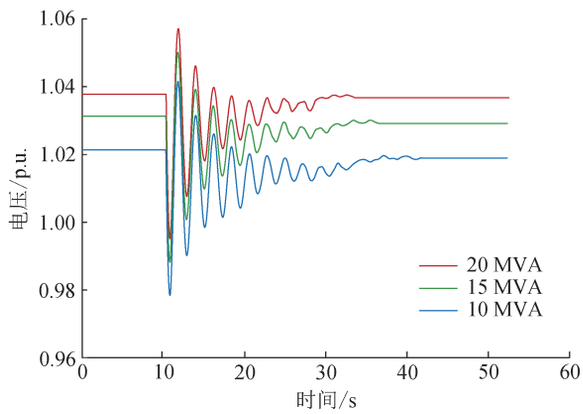

图 8　不同储能装机容量下风电并网点电压响应曲线

Fig. 8　Voltage response curves at the wind power PCC under different energy storage capacities

为更直观地比较不同储能装机容量对系统电压稳定性和 CSCR 的影响，对各工况下的仿真结果进行了对比与计算，计算结果如表 2 所示。

表 2　储能装机容量不同时的 CSCR

Table 2　CSCR under different energy storage capacities

构网型储能容量/MVA	新能源并网点电压/p.u.	CSCR
10	1.022	1.94
15	1.031	2.16
20	1.038	2.51

由图 8 可见，随着构网型储能容量的增加，系统在扰动工况下的电压响应得到明显改善：电压跌落幅度减小，稳态恢复速度加快。进一步地，由表 2 所示结果可知，当储能容量由 10 MVA 增加至 20 MVA 时，CSCR 相应提高，表明系统的电压稳定裕度有所提升。

3.4　连接电抗对 CSCR 的影响验证

为考察连接电抗对系统电压稳定性及 CSCR 的影响，固定风电渗透率为 50%。在仿真过程中，于 t=10 s 在负荷 2 处施加负荷阶跃，并设置 x_m 为 0.1、0.2 和 0.4 p.u.，得到不同连接电抗条件下的电压响应曲线如图 9 所示。

为进一步分析连接电抗对系统电压稳定性及 CSCR 的影响，对不同 x_m 条件下的仿真结果进行了对比与计算，结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出，当连接电抗增大时，发生扰动后的电压跌落幅度加大，电压恢复速度减慢，系统的电压支撑能力受到削弱，最终导致系统电压失稳。由表 3 进一步分析可知，x_m 的逐步增加导致 CSCR 呈

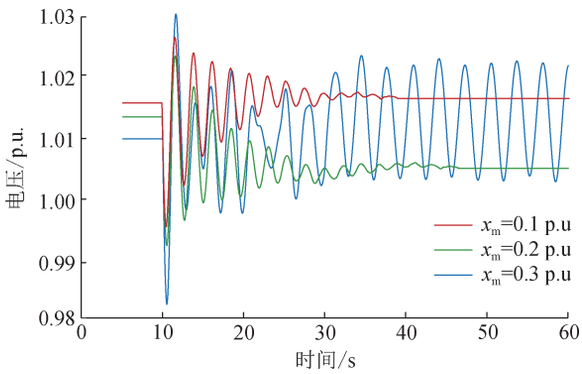

图9 不同连接电抗下风电并网点电压响应曲线

Fig. 9 Voltage response curves at the wind power PCC under different connection reactance

表3 连接电抗不同时的CSCR

Table 3 CSCR under different connection reactance

x_m/p.u.	新能源并网点电压/p.u.	CSCR
0.1	1.018	1.69
0.2	1.014	1.52
0.4	1.009	1.41

下降趋势，系统的稳定裕度随之减小。这表明较大的连接电抗会提高并网点的等效阻抗，相当于增大了构网型储能与系统的电气距离，削弱储能与电网之间的耦合程度，使系统更易接近失稳边界。

4 结 论

本文在分析构网型储能对新能源多场站短路比作用机制的基础上，提出了一种计及构网型储能特性的临界短路比计算方法，并结合拓展雅可比矩阵进行修正，实现了静态电压稳定判据与短路比指标的统一。基于电磁暂态仿真平台PSCAD/EMTDC对所提方法进行了验证，结果表明该方法能够有效识别系统临界稳定状态，定量反映构网型储能对系统电气强度的影响。主要结论如下：

1）建立了计及构网型储能的拓展雅可比矩阵模型，并结合新能源多场站短路比指标，提出了考虑构网型储能的CSCR实时计算方法，能够准确识别弱电网条件下的临界稳定状态。

2）仿真结果表明，构网型储能接入后系统短路比水平提高了42%，电压支撑能力显著增强，系统的风电极限渗透率由50%增大至54%，临界失稳点被有效推迟，验证了所提CSCR指标的准确性。

3）影响因素分析表明，增加储能容量与配置合理的虚拟阻抗能够有效提升CSCR并改善电压稳定裕度，增大连接电抗则会削弱储能与电网的耦合，导致CSCR下降，三者的综合作用决定了系统的电压稳定边界。

本文提出的CSCR指标能够有效刻画构网型储能对系统强度的作用，但仍需在更大规模、多馈入的实际电网中进一步评估其适用性，未来研究将面向更复杂的系统和多场站实际工程场景，进一步完善CSCR的动态扩展模型。

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）：

刘彬提出研究方向，设计论文框架；张昊然、黄宝莹、潘思宇设计研究思路，实施研究过程；马成廉、孙黎、王乐天负责论文写作和修订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

5 参考文献

[1] 张智刚，康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2819.
ZHANG Zhigang，KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(8)：2806-2819.

[2] 宋美琪，李洪全，肖赫，等. 面向高比例新能源接入主动配电网的多层模型预测电压控制[J]. 分布式能源，2025，10(1)：53-61.
SONG Meiqi，LI Hongquan，XIAO He，et al. Multilayer model predictive voltage control for high proportion new energy integrated active distribution network[J]. Distributed Energy，2025，10(1)：53-61.

[3] 冯小萍，陈启迪，赵青春，等. 构网型储能变流器控制策略下输电线路保护适应性分析[J]. 中国电力，2025，58(8)：176-184.
FENG Xiaoping，CHEN Qidi，ZHAO Qingchun，et al. Adaptability analysis of transmission line protection under the control strategy of grid-forming energy storage converter[J]. Electric Power，2025，58(8)：176-184.

[4] 李思能，刘志勇，曾庆彬. 高比例新能源接入的输电网外送通道与储能分布鲁棒优化协同规划方法[J]. 广东电力，2024，37(1)：49-59.
LI Sineng，LIU Zhiyong，ZENG Qingbin. Distributionally robust optimization collaborative planning method for transmission network external channel and energy storage with high proportion of renewable energy[J]. Guangdong Electric Power，2024，37(1)：49-59.

[5] 文云峰，杨伟峰，汪荣华，等. 构建100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报，2020，40(6)：1843-1856.
WEN Yunfeng，YANG Weifeng，WANG Ronghua，et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE，2020，40(6)：1843-1856.

[6] 刘哲，唐成鹏，周青，等. 新型电力系统建设环境下的“西电东送”发展研究[J]. 广东电力，2023，36(9)：26-33.
LIU Zhe，TANG Chengpeng，ZHOU Qing，et al. Research on development of west-to-east power transmission under the environment of new power system construction[J]. Guangdong Electric Power，2023，36(9)：26-33.

[7] 张艳，张旭，张静怡，等. 考虑风电不确定性的沙戈荒新能源基地交直流混合外送系统最大传输能力评估[J]. 电力建设，2024，

45(12)：174-186.
ZHANG Yan，ZHANG Xu，ZHANG Jingyi，et al. Evaluation of total transmission capacity of AC-DC hybrid delivery system in desert new energy base considering the uncertainty of wind power [J]. Electric Power Construction，2024，45(12)：174-186.

[8] 雷雨，李光辉，王伟胜，等. 跟网型和构网型新能源并网控制阻抗对比与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报，2025，45(1)：150-162.
LEI Yu，LI Guanghui，WANG Weisheng，et al. Comparison of impedance characteristics and oscillation mechanism for grid following and grid forming renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE，2025，45(1)：150-162.

[9] 张宸宇，喻建瑜，史明明，等. 基于构网型储能的新能源微电网电压动态控制性能分析与优化[J]. 中国电力，2025，58(9)：115-123.
ZHANG Chenyu，YU Jianyu，SHI Mingming，et al. Analysis and optimization of voltage dynamic control performance of renewable energy microgrid based on grid-forming energy storage [J]. Electric Power，2025，58(9)：115-123.

[10] 李建林，康靖悦，辛迪熙. 新型电力系统储能技术应用研究[J]. 分布式能源，2024，9(6)：1-8.
LI Jianlin，KANG Jingyue，XIN Dixi. Application research of new power system energy storage technology [J]. Distributed Energy，2024，9(6)：1-8.

[11] 谭玲玲，张文龙，康志豪，等. 计及惯量响应与一次调频参数优化的新能源基地构网型储能规划[J]. 中国电力，2025，58(7)：147-161.
TAN Lingling，ZHANG Wenlong，KANG Zhihao，et al. Grid-forming storage planning for renewable energy bases considering the co-optimization of inertia response and primary frequency regulation parameters[J]. Electric Power，2025，58(7)：147-161.

[12] IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities [EB/OL]. [2025-12-01]. https://ieeexplore.ieee.org/document/653230.

[13] STRACHAN N P W，JOVCIC D. Stability of a variable-speed permanent magnet wind generator with weak AC grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2010，25(4)：2779-2788.

[14] 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)：497-505.
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)：497-505.

[15] 张汉花，李宏强，周雷，等. 新能源多场站短路比影响因素分析[J]. 宁夏电力，2022(5)：27-34.
ZHANG Hanhua，LI Hongqiang，ZHOU Lei，et al. Influencing factors analysis of short circuit ratio for multiple renewable energy stations[J]. Ningxia Electric Power，2022(5)：27-34.

[16] 崔健. 基于新能源多场站短路比的高比例新能源电网强度评估与提升方法[D]. 吉林：东北电力大学，2024.
CUI Jian. Strength evaluation and improvement method of high proportion new energy power grid based on the multiple renewable energy stations short circuit ratio [D]. Jilin：Northeast Electric Power University，2024.

[17] 刘洪波，李倩倩，石鹏，等. 新能源多场站短路比的临界指标及影响因素[J]. 电网与清洁能源，2025，41(7)：94-101，106.
LIU Hongbo，LI Qianqian，SHI Peng，et al. Critical indicator and influencing factors of multiple renewable energy stations short circuit ratio[J]. Power System and Clean Energy，2025，41(7)：94-101，106.

[18] 于琳，孙华东，赵兵，等. 新能源并网系统短路比指标分析及临界短路比计算方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(3)：919-928.
YU Lin，SUN Huadong，ZHAO Bing，et al. Short circuit ratio index analysis and critical short circuit ratio calculation of renewable energy grid-connected system [J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(3)：919-928.

[19] 辛焕海，董炜，袁小明，等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报，2016，36(22)：6013-6027.
XIN Huanhai，DONG Wei，YUAN Xiaoming，et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems [J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(22)：6013-6027.

[20] 章枫. 基于广义短路比的交直流电力系统电压稳定性分析[D]. 杭州：浙江大学，2019.
ZHANG Feng. Voltage stability analysis of AC-DC power systems based on generalized short-circuit ratio [D]. Hangzhou：Zhejiang University，2019.

[21] HUANG L B，XIN H H，LI Z Y，et al. Identification of generalized short-circuit ratio for on-line stability monitoring of wind farms [J]. IEEE Transactions on Power Systems，2020，35(4)：3282-3285.

[22] 詹长江，吴恒，王雄飞，等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(6)：2339-2358.
ZHAN Changjiang，WU Heng，WANG Xiongfei，et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(6)：2339-2358.

[23] 杨本星，王伟，杨明轩，等. 辅助风电并网的构网型储能控制策略研究[J]. 高压电器，2023，59(7)：56-64.
YANG Benxing，WANG Wei，YANG Mingxuan，et al. Research on grid-forming energy storage control strategy for auxiliary wind power grid-connection [J]. High Voltage Apparatus，2023，59(7)：56-64.

[24] 王聪，葛景，汪莹，等. 构网型储能提升系统电压稳定作用研究[J]. 电工技术，2023(12)：183-185，189.
WANG Cong，GE Jing，WANG Ying，et al. Research on grid-forming BESS in improving voltage stability [J]. Electric Engineering，2023(12)：183-185，189.

[25] 闫志彬，李立，阳鹏，等. 考虑构网型储能支撑能力的微电网优化调度策略[J]. 中国电力，2025，58(2)：103-110.
YAN Zhibin，LI Li，YANG Peng，et al. Optimal scheduling strategy for microgrid considering the support capabilities of grid forming energy storage [J]. Electric Power，2025，58(2)：103-110.

[26] 段玉，陈军，刘震，等. 面向新型电力系统动态分析的多时间尺度构网型储能系统仿真建模方法[J]. 广东电力，2024，37(12)：27-38.
DUAN Yu，CHEN Jun，LIU Zhen，et al. Modelling of multi-time scale grid-forming energy storage systems for dynamic analysis of new power systems [J]. Guangdong Electric Power，2024，37(12)：27-38.

[27] 胡英杰，李强，李群. 考虑容量限制的构网型光储系统惯量与一次调频参数优化配置方法[J]. 中国电力，2024，57(10)：115-122.
HU Yingjie，LI Qiang，LI Qun. Co-optimization of inertia and droop control coefficient for grid-forming photovoltaic-storage

system considering capacity limits[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 115-122.

[28] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.

[29] 徐晨航, 邹志翔, 陈武, 等. 面向暂态稳定性提升的构网型储能系统自适应控制方法[J]. 电网技术, 2024, 48(11): 4658-4668.
XU Chenhang, ZOU Zhixiang, CHEN Wu, et al. Grid-forming based energy storage system adaptive control for transient stability enhancement [J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4658-4668.

[30] 伍双喜, 王晰, 刘洋, 等. 基于构网型储能的风电场-弱电网次同步振荡抑制方法[J]. 电力建设, 2024, 45(4): 147-155.
WU Shuangxi, WANG Xi, LIU Yang, et al. Subsynchronous damping control of grid-forming BESS in wind farms connected to a weak AC grid[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4): 147-155.

[31] 马子涵, 黄萌, 付熙坤, 等. 构网型电源接入下新能源场站的稳定运行能力评估[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 38-46.
MA Zihan, HUANG Meng, FU Xikun, et al. Stable operation capability evaluation for renewable energy station with grid-forming power sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 38-46.

[32] 康思伟, 董文凯, 郭诗然, 等. 基于虚拟同步机控制的新能源发电并网系统小干扰稳定临界短路比[J]. 电力建设, 2022, 43(3): 131-140.
KANG Siwei, DONG Wenkai, GUO Shiran, et al. Critical short-circuit ratio of small-signal stability for a grid-connected renewable power generation system based on virtual synchronous generator control[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 131-140.

[33] 周于清, 姚伟, 宗启航, 等. 基于运行短路比的新能源场站中跟构网可切换单元的最优配置方法[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1091-1102.
ZHOU Yuqing, YAO Wei, ZONG Qihang, et al. Optimal configuration of grid-following/grid-forming switchable units in new energy stations based on operating short-circuit ratio[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1091-1102.

[34] 林俐,刘岵林,虞睿雯,等. 面向沙戈荒新能源基地的构网型储能优化配置方法[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2025: 1-11. (2025-07-10)[2025-10-09]. https://link. cnki. net/urlid/10. 1999. TM. 20250710. 1020. 002.
LIN Li, LIU Kulin, YU Ruiwen, et al. Optimal configuration of grid-forming energy storage for renewable energy bases in desert-gobi-barren regions[J/OL]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2025: 1-11. (2025-07-10)[2025-10-09]. https://link. cnki. net/urlid/10. 1999. TM. 20250710. 1020. 002.

[35] 汪莹, 李鹏瀚, 崔伟, 等. 含虚拟阻抗限流构网设备的新能源多馈入系统过电压分析与评估[J]. 全球能源互联网, 2025, 8(4): 456-468.
WANG Ying, LI Penghan, CUI Wei, et al. Overvoltage analysis and evaluation of renewable energy multi-infeed system with virtual impedance current limiting grid-forming equipment[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2025, 8(4): 456-468.

[36] 马鑫, 李宏强, 吕思卓, 等. 大规模构网型储能集中接入对短路电流的影响分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(9): 58-66.
MA Xin, LI Hongqiang, LÜ Sizhuo, et al. Analysis of the impact of large-scale centralized integration of grid-forming energy storage system on short-circuit currents [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(9): 58-66.

[37] 郑如强, 高保皓. 构网型储能对新能源多场站短路比的影响分析[J]. 宁夏电力, 2023(4): 1-8.
ZHENG Ruqiang, GAO Baohao. Analysis of the impact of grid-forming energy storage on multiple renewable energy station short-circuit ratio[J]. Ningxia Electric Power, 2023(4): 1-8.

[38] MA F, XIN H, WU D, et al. Grid strength assessment for 100% inverter-based power systems via generalized short-circuit patio [J]. Authorea Preprints, 2024.

[39] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[40] PEI J H, WANG Z Y, WANG J Y, et al. Robust fast PMU measurement recovery enhanced by randomized singular value and sequential Tucker decomposition [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(16): 3267-3281.

[41] JEROSOLIMSKI M, LEVACHER L. A new method for fast calculation of Jacobian matrices: automatic differentiation for power system simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 700-706.

[42] 冯治鸿, 刘取, 周双喜, 等. 多机电力系统电压静态稳定性的特征结构分析法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1991, 31(4): 19-27.
FENG Zhihong, LIU Qu, ZHOU Shuangxi, et al. An eigen-structure analysis method of the steady-state voltage stability in multimachine systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1991, 31(4): 19-27.

[43] 李明, 常永康, 毛永涛, 等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 4773-4788.
LI Ming, CHANG Yongkang, MAO Yongtao, et al. Review and prospect of stability control techniques for grid-following/grid-forming converters in high-penetration renewable energy generation [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4773-4788.

[44] 景志滨,刘开欣,宋墩文,等. 构网型储能并网对新能源多场站短路比关键影响因素研究[J/OL]. 电网技术,2025:1-11.[2025-11-25]. https://doi. org/10. 13335/j. 1000-3673. pst. 2025. 0310
JING Zhibin, LIN Kaixin, SONG Dunwen, et al. Research on the key factors influencing the short circuit ratio of multiple new energy stations in grid-forming energy storage grid connection [J/OL]. Power System Technology, 2025: 1 - 11. [2025-11-25]. https://doi. org/10. 13335/j. 1000-3673. pst. 2025. 0310.

收稿日期: 2025-10-20 **修回日期**: 2025-11-28


刘彬

作者简介:

刘彬(1990),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化;

张昊然(2000),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

黄宝莹(1972),女,本科,正高级工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化;

孙黎(1983),女,博士,副教授,主要研究方向为高压电直流输电技术;

潘思宇(1997),女,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统及其

自动化；

马成廉（1983），男，博士，副教授，通信作者，主要研究方向为含直流输电的电力系统稳定与控制、能源互联网与柔性电网络、电力装备与智能运行控制，E-mail：machenglian@neepu.edu.cn；

王乐天（1982），男，硕士，正高级工程师，主要研究方向为电网变电站及换流站变电设计。

（编辑　孙静琳）

附录 A

计及构网型储能的临界短路比指标表达式与耦合影响因子α的推导过程如下：

$$R_i^{\mathrm{MRSCR}}=\frac{\left|\dot{U}_i^*\dot{U}_{\mathrm{N}i}/\dot{Z}_{ii}\right|}{\left|\dot{U}_i^*\dot{I}_i+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{Z}_{ij}}{\dot{Z}_{ii}}\dot{U}_i^*\dot{I}_j\right|}=\left|\frac{\dot{U}_i^*\dot{U}_{\mathrm{N}i}}{\dot{Z}_{ii}}\right|\Big/\left|\dot{S}_{\mathrm{RE}i}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\dot{\Pi}_{ij}\dot{S}_{\mathrm{RE}j}^*\right| \tag{A1}$$

分子分母同乘$\dot{Z}_{ii}$得到此时R_i^{MRSCR}的表达式：

$$R_i^{\mathrm{MRSCR}}=\frac{\left|\dot{U}_i^*\dot{U}_{\mathrm{N}i}\right|}{\left|\dot{U}_i^*\dot{I}_i\dot{Z}_{ii}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\dot{Z}_{ij}\dot{U}_i^*\dot{I}_j\right|}=\frac{\left|\dot{U}_i^*\dot{U}_{\mathrm{N}i}\right|}{\left|\dot{S}_{\mathrm{RE}i}\dot{Z}_{ii}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\dot{Z}_{ij}\dot{U}_i^*\dot{I}_j\right|} \tag{A2}$$

加入构网型储能后分母中的元素$\dot{Z}_{ij}$发生改变：

$$\widehat{Z_{ij}'}=\dot{Z}_{ij}-\frac{\dot{Z}_{ih}\dot{Z}_{hj}}{\dot{Z}_{hh}+\dot{Z}_{\mathrm{v}}+x_{\mathrm{m}}} \tag{A3}$$

为了方便后续的推导，定义：

$$\lambda=\frac{\dot{Z}_{ih}\dot{Z}_{hj}}{\dot{Z}_{hh}+\dot{Z}_{\mathrm{v}}+x_{\mathrm{m}}} \tag{A4}$$

将式（A3）代入式（A2）得到此时R_i^{MRSCR}的表达式：

$$R_i^{\mathrm{MRSCR}}=\frac{\left|\dot{U}_i^*\dot{U}_{\mathrm{N}i}\right|}{\left|\dot{S}_{\mathrm{RE}i}\cdot\dot{Z}_{ii}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}(\dot{Z}_{ij}-\lambda)\dot{U}_i^*\dot{I}_j\right|}=\frac{\left|\dot{U}_i^*\dot{U}_{\mathrm{N}i}\right|}{\left|\dot{S}_{\mathrm{RE}i}\dot{Z}_{ii}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\dot{Z}_{ij}\dot{U}_i^*\dot{I}_j-\lambda\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\dot{U}_i^*\dot{I}_j\right|} \tag{A5}$$

分子分母同乘$\dot{Z}_{ii}$得到：

$$R_i^{\mathrm{MRSCR}}=\frac{\left|\dot{U}_i^*\dot{U}_{\mathrm{N}i}/\dot{Z}_{ii}\right|}{\left|\dot{S}_{\mathrm{RE}i}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{Z}_{ij}}{\dot{Z}_{ii}}\dot{U}_i^*\dot{I}_j-\lambda\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{U}_i^*\dot{I}_j}{\dot{Z}_{ii}}\right|} \tag{A6}$$

对分母部分进行化简，过程如下：

$$\begin{aligned}R_i^{\mathrm{MRSCR}}&=\frac{\left|\frac{\dot{U}_i^*\dot{U}_{\mathrm{N}i}}{\dot{Z}_{ii}}\right|}{\left|\dot{S}_{\mathrm{RE}i}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{Z}_{ij}}{\dot{Z}_{ii}}\frac{\dot{U}_i^*}{\dot{U}_j^*}\dot{U}_j^*\dot{I}_j-\lambda\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{U}_i^*\dot{U}_j^*\dot{I}_j}{\dot{U}_j^*\dot{Z}_{ii}}\right|}=\\&\frac{\left|\frac{\dot{U}_i^*\dot{U}_{\mathrm{N}i}}{\dot{Z}_{ii}}\right|}{\left|\dot{S}_{\mathrm{RE}i}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{Z}_{ij}}{\dot{Z}_{ii}}\frac{\dot{U}_i^*}{\dot{U}^*{}_j}\dot{U}_j^*\dot{I}_j-\lambda\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{U}_i^*\dot{S}_{\mathrm{RE}j}}{\dot{U}_j^*\dot{Z}_{ii}}\right|}=\\&\frac{\left|\frac{\dot{U}_i^*\dot{U}_{\mathrm{N}i}}{\dot{Z}_{ii}}\right|}{\left|\dot{S}_{\mathrm{RE}i}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\dot{\Pi}_{ij}\dot{S}_{\mathrm{RE}j}-\lambda\cdot\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{U}_i^*\cdot\dot{S}_{\mathrm{RE}j}}{\dot{U}_j^*\cdot\dot{Z}_{ii}}\right|}\end{aligned} \tag{A7}$$

得到耦合影响因子α为：

$$\alpha=\lambda\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{U}_i^*\dot{S}_{\mathrm{RE}j}}{\dot{U}_j^*\dot{Z}_{ii}}=\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{\dot{U}_i^*\dot{S}_{\mathrm{RE}j}}{\dot{U}_j^*\dot{Z}_{ii}}\frac{\dot{Z}_{ih}\dot{Z}_{hj}}{\dot{Z}_{hh}+\dot{Z}_{\mathrm{v}}+x_{\mathrm{m}}} \tag{A8}$$

计及构网型储能的临界短路比指标表达式为：

$$R_i^{\mathrm{CSCR}}=\left|\frac{\dot{U}_i^*\dot{U}_{\mathrm{N}i}}{\dot{Z}_{ii}}\right|\left|\dot{S}_{\mathrm{RE}i}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\dot{\Pi}_{ij}\dot{S}_{\mathrm{RE}j}-\alpha\right|^{-1} \tag{A9}$$