**DOI**：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.100 **中图分类号**：TM615 **文献标志码**：A

# 基于 CRITIC 权重法的风光发电单元灵活性控制方法

宋朋飞[1]，亢朋朋[1]，孟铁强[2](中国电源学会学生会员)，翟文辉[1]，
张 兴[2](中国电源学会高级会员)，田晓煜[1]
(1.国网新疆电力有限公司，乌鲁木齐 830000；2.合肥工业大学电气与自动化工程学院，
合肥 230009)

**摘要**：当前的风光发电单元仍面临太阳能、风能等资源间歇性及电网实时波动双重作用下的灵活性不足问题。因此，研究风光发电单元的灵活性评估及提升策略至关重要。围绕灵活性评估量化及灵活性控制策略 2 方面问题，首先探索灵活性评估体系，从功率出力能力、稳定性、电压支撑能力等方面选取灵活性评估指标，基于 CRITIC 权重法量化风光发电单元在不同控制策略下的灵活性；其次根据灵活性评估结果，使风光发电单元选择具有灵活性优势的控制策略并进行无扰动切换，实现风光发电单元的灵活性控制；最后基于实际应用的大功率光伏并网变流器模型，通过仿真验证了所提方法的可行性。

**关键词**：风光发电单元；灵活性评估；CRITIC 权重法；无扰动切换；灵活性控制

# Flexibility Control Method for Wind and Photovoltaic Power Generation Units Based on CRITIC Weight Method

SONG Pengfei[1], KANG Pengpeng[1], MENG Tieqiang[2], *Student Member, CPSS*, ZHAI Wenhui[1],
ZHANG Xing[2], *Senior Member, CPSS*, TIAN Xiaoyu[1]
(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** At present, the wind and photovoltaic (PV) power generation units still face the problem of a lack of flexibility due to the dual roles of intermittency of resources such as solar and wind energy and real-time fluctuations in power grid. Therefore, the studies of the flexibility assessment of wind and PV power generation units and the corresponding enhancement strategy are critical. Aimed at both the quantification of flexibility assessment and the flexibility control strategies, a flexibility assessment system is explored at first, i.e., the flexibility assessment indexes are selected from the aspects of power output capability, stability, voltage support capability, etc., and the flexibility of wind and PV power generation units under different control strategies is quantified based on the CRITIC weight method. Second, based on the flexibility assessment results, a control strategy with an advantage in flexibility is selected for wind and PV power generation units, and non-perturbative switching is carried out, so as to realize the flexibility control of wind and PV power generation units. Finally, the feasibility of the proposed approach was verified by simulations conducted on a model of a high-power PV grid-connected converter applied in practice.

**Keywords:** Wind and photovoltaic (PV) power generation units; flexibility assessment; CRITIC weight method; non-perturbative switching; flexibility control

**收稿日期**：2024-11-28；**修回日期**：2025-01-08；**录用日期**：2025-02-05；**网络首发日期**：2025-03-06
**基金项目**：国网新疆电力有限公司科技资助项目(5230HQ23000F)
This work is supported by State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Technology Project under the grant 5230HQ23000F

近年来，我国持续推进与发展风能、太阳能等新能源技术，使新能源发电渗透率不断提高，电力

系统安全稳定性正面临挑战。同时，新能源发电系统面临的振荡问题因自然资源间歇性及电网实时波动而进一步恶化。风光发电单元作为新能源发电并网的重要组成部分，需具备在维持必要的小信号稳定与暂态稳定条件下，灵活调控其有功功率及无功功率输出的能力，以适应源侧与网侧的变化，即要求其具有一定的灵活性。因此，评估风光发电单元的灵活性及探索其灵活性提升的控制策略至关重要。

风光发电单元一般由光伏 PV(photovoltaic)阵列或风机经并网变流器接入发电单元接入点，多个发电单元经过变压器汇集至变电站接入公共电网[1]。其中并网变流器一般采用跟网型控制或构网型控制[2]，有大量研究表明二者特性互补，文献[3]提出了单机系统中基于电网阻抗自适应的跟/构网双模式控制。在此基础上，文献[4]提出了基于电网状态的并网逆变器多模型控制，以稳定裕度为切换依据，将控制策略个数由 2 个增至多个。上述研究存在控制策略切换边界重合问题，并且仅考虑了稳定性单方面指标，未考虑其他层面指标。本文在上述研究的基础上，进一步研究以不同控制下的发电单元的灵活性量化差异为切换依据，实现灵活性提升的多模式控制。

目前，针对风光发电单元的灵活性量化评估鲜有研究，但有文献从电力系统角度出发，揭示灵活性量化问题与影响机理。文献[5]计及风电出力相关性和条件价值风险，对电力系统概率可用输电能力进行评估；文献[6]基于量测数据开展新能源电力系统区域等效惯量评估；文献[7]考虑微电网中的灵活性资源，开展双层优化策略研究;文献[8]针对光伏发电单元，采用最小鉴别信息组合赋权法开展综合评价。由上述文献可知，电力系统灵活性评估与量化可以总结为刻画方法、评估指标与评估模型 3 个方面，其中将评估指标与实际问题相结合形成灵活性评估体系的方法逻辑概念清晰，因此本文借鉴此方法展开发电单元灵活性评估。

本文提出了一种发电单元灵活性评估方法与控制策略，建立了发电单元的灵活性评估体系，从功率出力能力、稳定性及电压支撑能力等方面选取灵活性指标，并针对不同控制策略的风光发电单元进行数据收集，基于 CRITIC 权重法实现各指标的权重计算，并通过线性加权法实现风光发电单元的灵活性量化。最后，依据各控制策略在灵活性评估中得到的分数进行排序，界定控制策略切换的临界点，使得风光发电单元实时选择具有灵活性优势的控制策略，从而实现灵活性最优的多模式控制。

## 1　评估对象概况

图 1 为风光发电单元的典型结构，其中光伏阵列或风机通过并网变流器接 LCL 滤波电路，然后经变压器接入公共电网[9]。图中：$L_1$ 为机侧滤波电感；$C_f$ 为滤波电容；$R_d$ 为滤波电路的无源阻尼电阻；$L_2$ 为网侧滤波电感。随着新能源机组高比例接入区域电网，输电网络因包含大量的变压器和本地负荷，其等效阻抗呈现显著的阻感特性。实际上，输电线路中的电阻较小，因此本文忽略电阻成分，假定电网阻抗状态为纯电感，以模拟最坏情况。

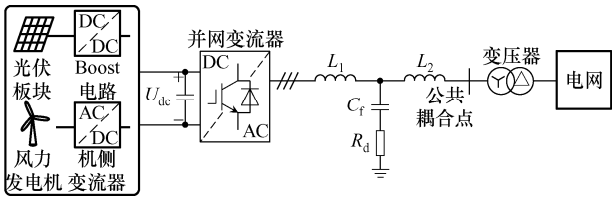



**图 1　风光发电单元结构示意**

**Fig. 1 Schematic of structure of wind and PV power generation units**

本文所讨论的控制方法均作用于图 1 中的并网变流器，在电网强度较强时，发电单元采用常规跟网型控制，其优点在于可以实现新能源利用率的最大化，同时能够获得高质量的并网电流[10]。然而随着新能源比例增大，电网强度变弱，常规跟网型控制下的系统稳定裕度降低，因此有学者着手于优化控制结构。文献[11]提出了一种对 $q$ 轴阻抗进行重塑的方法，该方法因在提高弱网下系统稳定裕度

的同时没有引入其他负面影响而被广泛使用，但其仍无法在极弱电网下稳定运行。而构网型控制下的发电单元在低短路比工况下表现出良好的稳定性，但其正序阻抗相位特性在低频段存在容性负阻区，可能导致强电网条件下发生次同步振荡，因此文献[12]提出了一种虚拟次同步电感构网型控制方法，以实现电网强度宽范围下的稳定控制。

本文的评估对象为上述采用 3 种典型控制策略的风光发电单元，即常规跟网型控制、$q$ 轴阻抗重塑跟网型控制与虚拟次同步电感构网型控制。

## 2 风光发电单元灵活性评估体系

风光发电单元灵活性评估体系的建立，主要包括灵活性评估维度的建立、灵活性评估指标的选取及灵活性评估方法的应用。

### 2.1 灵活性评估维度的建立

灵活性评估维度的建立需要考虑源侧与网侧的波动，其中源侧波动是指太阳能或风力等自然资源随机波动，网侧波动是指电网状态的变化。本文在探讨电网状态时，仅考察电网阻抗的变化。新能源发电呈现出间歇性特点，引起发电单元的输出功率随机变化，同时输电线路的延伸及本地负荷的接入导致等效电网阻抗增加，使得运行短路比 SCR (short circuit ratio)发生改变，其计算公式[13]为

$$\mathrm{SCR} = S_{\mathrm{PCC}} / S_{\mathrm{unit}} \tag{1}$$

式中：$S_{\mathrm{PCC}}$ 为公共耦合点的短路容量；$S_{\mathrm{unit}}$ 为发电单元实时输出功率。

根据 IEEE Standard 1204-1997[14]可知，当 SCR<2.0 时，电网被视为极弱电网；当 2.0<SCR<3.0 时，电网被视为弱电网；当 SCR>3.0 时，电网被视为强电网。

感性电网条件下，当新能源发电小容量接入、等效电网阻抗较小时，电网表现出强电网状态，源侧的波动对系统稳定性的影响较小；当新能源发电高比例接入、等效电网阻抗较大时，电网表现出弱电网状态，源侧波动条件下 SCR 发生显著改变，系统振荡问题加剧。因此，本文用 SCR 来综合表征源侧与网侧的波动。同时，风光发电单元的有功及无功输出受 SCR 变化的影响，从而直接导致其在该工况下的灵活性评估分数发生改变。图 2 为风光发电单元灵活性评估维度。

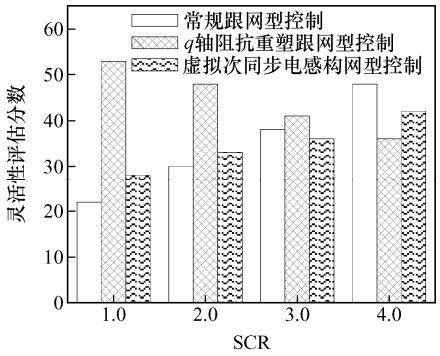



**图 2 风光发电单元灵活性评估维度**

**Fig. 2 Dimensions of flexibility assessment for wind and PV power generation units**

### 2.2 灵活性评估指标的选取

风光发电单元的灵活性评估需建立在系统稳定的基础上，需要考虑发电单元的小信号稳定性与暂态稳定性(大信号稳定性)，同时还需要考察发电单元有功功率与无功功率的出力能力以及电压支撑能力。因此，灵活性评估指标的选取涵盖 5 个方面：

(1)有功功率出力能力，即风光发电单元输出有功功率的能力，通过最大有功功率输出值与有功功率响应速度表征；

(2)无功功率出力能力，即保证风光发电单元工作在额定状态下的最小无功需求量，通过无功功率补偿量表征[15]；

(3)小信号稳定性，即新能源发电系统抵抗微小扰动而不失稳的能力，通过相位裕度表征[16]；

(4)暂态稳定性，即新能源发电系统具备在遭遇较大扰动时仍能维持稳定运行的能力，通过极限切除时间表征[17]；

(5)电压支撑能力，即电网扰动下新能源发电系统并网点电压保持稳定的能力，通过电压幅值波动百分比表征。

### 2.3 灵活性评估方法的应用

灵活性评估分数由不同工况下的多个灵活性评估指标数据，通过科学的评估方法计算得到。因此，

评估方法的选择直接决定了评估结果的合理性。

评估方法的本质是通过数据处理与公式计算得到各个指标权重，常见的评估方法分为 3 类：第 1 类为主观赋权法，它基于决策者个人对各因素重要性的主观判断来确定各项指标的权重，如专家评分法、模糊层次分析 FAHP(fuzzy analytic hierarchy process)法等，其缺点为方法的主观性会使评估结果存疑；第 2 类为客观赋权法，它依据客观的数据信息来分析和确定各项指标的权重分配，如变异系数法、主成分分析法等，其缺点为评估结果依赖于数据的准确性与样本数量；第 3 类为克服单一赋权方法局限性的主-客观结合赋权法[18]。

针对本文研究内容，主观见解的介入会直接影响权重大小，且结果可能因人而异。因此，考虑评估结果的可信度，本文选择第 2 类客观赋权法。相较于其他客观赋权方法，CRITIC 权重法对数据的分布没有严格要求，适用于各种类型的数据，当数据发生变化时，权重的变化也相对较小，其具有较好稳定性的同时，也能够充分利用数据中的波动性和相关性信息，从而更全面地反映各指标在评估体系中的作用[19]，因此本文使用 CRITIC 权重法进行评估。CRITIC 权重法计算步骤如下。

(1)数据获取。

假设有 $m$ 个指标，$n$ 个评估对象，构成原始数据矩阵 $\boldsymbol{X}$，具体为

$$\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \tag{2}$$

(2)数据标准化。

在应用 CRITIC 权重法来计算权重之前，有必要先通过标准化处理来消除量纲差异所带来的影响，以确保所有数据都能在同一标准下进行比较。对于正向指标(即数值增长表示评价提高的指标)，其计算公式为

$$z_{ij}=\frac{x_{ij}-\min\{x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj}\}-\min\{x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj}\}}$$
$$i=\{1, 2, \cdots, n\} \qquad j=\{1, 2, \cdots, m\} \tag{3}$$

对于负向指标(即数值增大表示评价降低的指标)，其计算公式为

$$z_{ij}=\frac{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj}\}-x_{ij}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj}\}-\min\{x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj}\}} \tag{4}$$

(3)标准差计算。

标准差用于衡量数据的离散程度，即对比强度，计算公式为

$$S_j=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(z_{ij}-\overline{z}_j)^2} \tag{5}$$

标准差越大，该指标所能反映的信息量越多，指标权重也随之越大。

(4)相关系数计算。

计算任意 2 个指标之间的相关系数，计算公式为

$$r_{j'j''}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(z_{ij'}-\overline{z}_{j'})(z_{ij''}-\overline{z}_{j''})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(z_{ij'}-\overline{z}_j)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(z_{ij''}-\overline{z})^2}}$$
$$j'=\{1, 2, \cdots, m\}, \quad j''=\{1, 2, \cdots, m\} \tag{6}$$

相关系数用来度量 2 个指标间的线性相关度，其取值范围为[−1, 1]，其中−1 表示这 2 个指标间有很强的负相关关系，1 则表示这 2 个指标间有很强的正相关关系。

(5)冲突度计算。

冲突度的计算公式为

$$R_j=\sum_{j'=1}^{m}(1-r_{jj'}) \tag{7}$$

如果 2 个指标的相关系数计算结果接近 1，则说明它们信息上的重叠部分较大，冲突性较小，其中一个指标可能会被另一个指标线性表征，因此其权重也就越低。

(6)信息承载量计算。

信息承载量结合了对比强度和冲突性，用于衡量指标在评估体系中的重要性，计算公式为

$$C_j=S_jR_j \tag{8}$$

(7)权重计算。

通过对信息承载量的标准化处理，求出各指标

权重值，其计算公式为

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{i=1}^{n} C_i} \tag{9}$$

(8)线性加权法。

通过将数据标准化后的值与所属权重相乘，可以得出评估对象在各指标上的得分；随后，将这些得分累加，即可得到最终评分，具体为

$$G_i = 100 \times \sum_{j=1}^{m} W_j z_{ij} \tag{10}$$

基于 CRITIC 权重法的权重计算依赖于所收集数据的有效性，即当某一个指标的数据出现缺失时，就会造成权重计算受阻。对于本文情况，当源侧与网侧波动时，可能会导致系统振荡，造成部分数据无法记录，使得权重计算困难，灵活性评估受阻。针对数据缺失问题，本文采用 0-1 填充方法，该方法适用于分类数据或具有明确取值范围的数据。若某个事件没有发生或某项属性不存在，则填充为 0；若某个事件确定发生，则填充为 1。就本文情况而言，缺失意味着系统失稳，即最恶劣的情况发生。而在权重计算过程中，数据标准化后的值在 0~1 之间，该值越小意味着情况越恶劣，因此本文对 CRITIC 权重法加以改进，将 0-1 填充方法应用于数据标准化阶段，对缺失数据赋 0 处理。

## 3 风光发电单元灵活性分析

本文从不同控制策略下的发电单元灵活性评估结果分析和基于CRITIC权重法的发电单元灵活性控制分析 2 方面展开讨论，参考实际应用的 3.125 MW 光伏并网变流器，利用 MATLAB/Simulink 平台构建了新能源并网发电系统模型并进行仿真分析，相关参数的具体数值见表 1。

**表 1 新能源并网发电系统仿真参数**

**Tab. 1 Simulation parameters of new energy grid-connected power generation system**

| 仿真参数 | 数值 |
|---|---|
| 电网相电压有效值/V | 346.42 |
| 有功额定值/kW | 3 125 |
| 直流侧电压额定值/kV | 1.5 |
| 额定电网频率/Hz | 50 |
| 无功额定值/kvar | 0 |
| 开关频率/kHz | 5.43 |

### 3.1 灵活性评估结果分析

本文针对不同电网状况，对发电单元在实施不同控制策略下的灵活性进行了评估分析。首先设定 SCR 为一系列特定值(1.0~4.0，步长为 0.2，共 16 种工况)，针对每个 SCR 值，进行了 3 种控制策略的仿真实验，收集并记录数据。本文详细列出了 3 个示例点，即 SCR 等于 1.4、2.4 和 3.4 的灵活性指标数据，见表 2。

**表 2 发电单元灵活性指标数据**

**Tab. 2 Data of flexibility indexes for power generation units**

| 灵活性指标 | 常规跟网型控制 | | | $q$ 轴阻抗重塑跟网型控制 | | | 虚拟次同步电感构网型控制 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SCR | 1.4 | 2.4 | 3.4 | 1.4 | 2.4 | 3.4 | 1.4 | 2.4 | 3.4 |
| 最大有功功率输出值/kW | 0 | 3 110 | 3 125 | 0 | 3 125 | 3 125 | 3 125 | 3 125 | 3 125 |
| 有功功率响应速度/(MW·s$^{-1}$) | 失稳 | 失稳 | 88.596 | 失稳 | 36.790 | 88.596 | 5.289 | 9.365 | 10.593 |
| 无功功率补偿量/kvar | 失稳 | 20 | 0 | 失稳 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 相位裕度/(°) | −22.12 | −0.01 | 14.5 | −21.18 | 0.74 | 14.97 | 48.93 | 58.59 | 61.66 |
| 极限切除时间/s | 失稳 | 0.007 | 0.015 | 失稳 | 0.007 | 0.014 | 0.013 | 0.014 | 0.011 |
| 电压幅值波动百分比/% | 失稳 | 失稳 | 11.24 | 失稳 | 12.93 | 11.27 | 2.40 | 1.96 | 2.30 |

基于 CRITIC 权重法计算得到 6 种指标的客观权重，见表 3。

最终计算得到不同 SCR 下的发电单元灵活性评估分数，见表 4。

将 3 种控制策略下的发电单元在不同 SCR 下的灵活性评估分数绘制成条状图，如图 3 所示。

由表 3 可知，有功功率响应速度与电压幅值波动百分比 2 个指标所占权重较大，而其余 4 个指标

**表 3　灵活性指标权重**

**Tab. 3 Weights of flexibility indexes**

| 指标性质 | 具体指标 | 客观权重 |
|---|---|---|
| 有功功率出力能力 | 最大有功功率输出值 | 0.120 23 |
| | 有功功率响应速度 | 0.300 63 |
| 无功功率出力能力 | 无功功率补偿量 | 0.127 55 |
| 小信号稳定性 | 相位裕度 | 0.111 28 |
| 暂态稳定性 | 极限切除时间 | 0.108 30 |
| 电压支撑能力 | 电压幅值波动百分比 | 0.232 01 |

**表 4　发电单元灵活性评估分数**

**Tab. 4 Flexibility assessment scores of power generation unit**

| 控制策略 | SCR=1.4 | SCR=2.4 | SCR=3.4 |
|---|---|---|---|
| 常规跟网型控制 | 2.265 0 | 23.567 4 | 67.719 0 |
| $q$ 轴阻抗重塑跟网型控制 | 2.329 5 | 37.296 7 | 67.221 2 |
| 虚拟次同步电感构网型控制 | 58.661 9 | 62.621 6 | 61.084 0 |

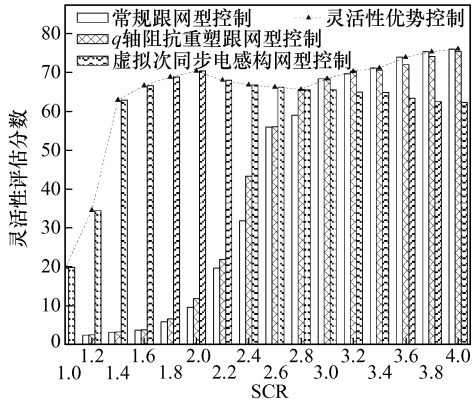



**图 3　风光发电单元灵活性评估结果条状图**

**Fig. 3 Bar chart of flexibility assessment results for wind and PV power generation units**

所占权重较小且接近。实际上，最大有功功率输出值、无功功率补偿量、相位裕度与极限切除时间 4 个指标都与系统稳定性有关，导致这 4 个指标存在较强的相关性，因此所占权重接近。

由图 3 可知，发电单元的灵活性根据其所采用的控制策略不同而异。具体而言，当 SCR 降至 2.4 以下时，基于常规跟网型控制或 $q$ 轴阻抗重塑跟网型控制的发电单元处于失稳状态，因此其灵活性评估分数较低。随着 SCR 的提升，2 种跟网型控制策略下的发电单元展现出了更高的灵活性。相比之下，采用虚拟次同步电感构网型控制下的发电单元在 SCR=1.0~4.0 时均可以稳定运行，可以始终保持高灵活性。然而在 SCR 较大时，发电单元在采用虚拟次同步电感构网型控制时的灵活性呈现出衰减的趋势。根据 3 种控制策略下发电单元的灵活性变化趋势，可得灵活性最优控制策略如下：

(1)SCR<2.6 时，发电单元在采用虚拟次同步电感构网型控制时的灵活性最优；

(2)2.6<SCR<3.2 时，发电单元在采用 $q$ 轴阻抗重塑跟网型控制时的灵活性最优；

(3)SCR>3.2 时，发电单元在采用常规跟网型控制时的灵活性最优。

### 3.2　基于 CRITIC 权重法的灵活性控制分析

灵活性评估结果揭示了每种控制策略都拥有其特定的灵活性优势区间。由此可以推断，如果发电单元仅依赖一种控制策略，那么将难以在 SCR 测试区间内始终保持较强的灵活性。若发电单元可以根据灵活性评估结果，在不同 SCR 下实时选择具有灵活性优势的控制策略，则可以实现源侧与网侧波动条件下的灵活控制。因此，本文根据以上分析结果与思路，提出基于 CRITIC 权重法的灵活性控制策略，控制结构如图 4 所示。

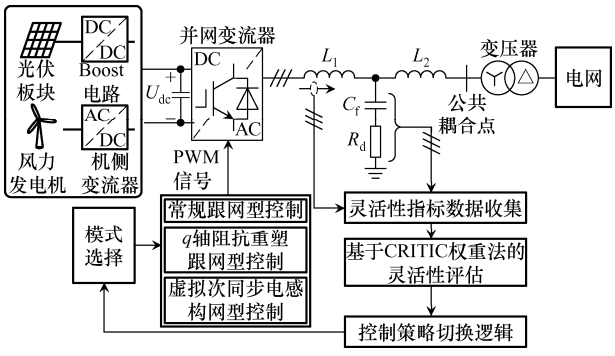



**图 4　基于 CRITIC 权重法的发电单元灵活性控制结构**

**Fig. 4 Flexibility control structure of power generation units based on CRITIC weight method**

首先，通过灵活性指标数据收集与评估确定控制策略的切换边界，具体为在 SCR<2.6 时，发电单元采用虚拟次同步电感构网型控制；当 2.6<SCR<3.2 时，发电单元采用 $q$ 轴阻抗重塑型跟网型控制；当 SCR>3.2 时，发电单元采用常规跟网型控制。

其次，灵活性控制的核心在于不同控制模式之间的切换。本文存在的切换包括：常规跟网型控制与 $q$ 轴阻抗重塑跟网型控制之间的切换；常规跟网型控制与虚拟次同步电感构网型控制之间的切换；$q$ 轴阻抗重塑跟网型控制与虚拟次同步电感构网型控制之间的切换。

控制切换技术的关键在于从一种模型切换为另一种模型时，需将上一个模型的最后一个控制周期的状态作为下一个模型的初始状态，切换结构如图 5 所示。由于控制环路的最终输出为调制波，调制波由电流环输出决定，同时 3 种控制策略的电流环结构相似，因此 3 种控制策略采用同一个电流环以实现切换时调制波不发生突变。电流环的指令值由控制模式决定，其中包括 2 种跟网型控制下的电流给定及虚拟次同步电感构网型控制的电压环输出。同时，3 种控制策略都是基于 $dq$ 坐标系进行控制，其关键在于旋转角度的无扰动变化。本文通过模式选择积分器进行叠加角度的方式使得角度不发生突变[4]，从而实现无扰动切换。

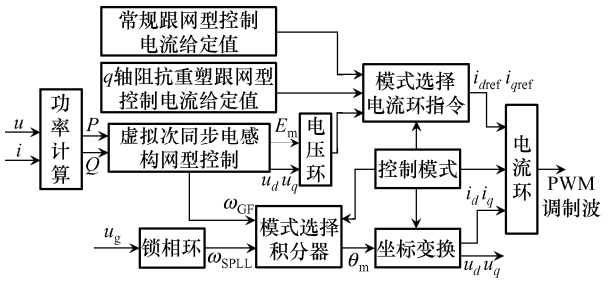



**图 5 控制切换结构**

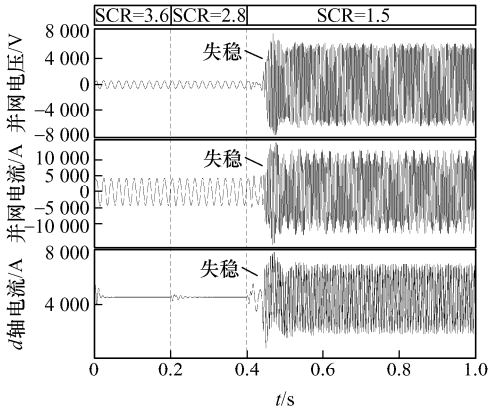
**Fig. 5 Structure of control switching**

## 4 发电单元灵活性控制仿真验证

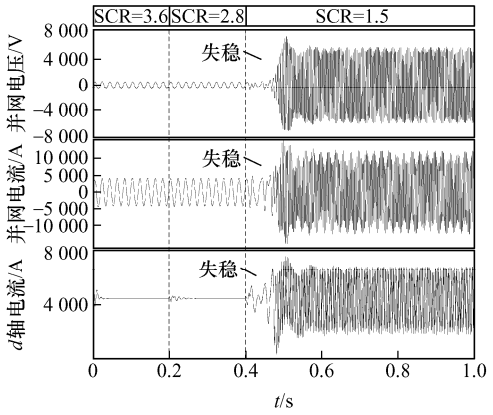
本文基于 MATLAB/Simulink 平台搭建新能源并网发电系统模型，验证所提出的基于 CRITIC 权重法的灵活性控制策略的合理性。

根据灵活性评估结果，SCR=2.6 与 SCR=3.2 为特殊切换点，为保证每种控制策略都可以被发电单元选择，仿真实验中的运行短路比需在 2.6 以下、2.6 与 3.2 之间、3.2 以上选择。本文选择的 SCR 在 1.5、2.8 与 3.6 3 种工况之间变化，当单独采用常规跟网型控制与 $q$ 轴重塑跟网型控制时，发电单元在 SCR=3.6 与 SCR=2.8 的电网条件下可以稳定运行，但在 SCR=1.5 的极弱电网条件下发生振荡，表现出低灵活性，仿真结果如图 6(a)、(b)所示。当单独采用虚拟次同步电感构网型控制时，发电单元在 3 种 SCR 条件下均能稳定运行，但从 $d$ 轴的电流波形可以看出，相较于跟网型控制，其动态响应能力较差，同样也表现出灵活性较差的情况，仿真结果如图 6(c)所示。因此，采用单一算法的发电单元表现出灵活性不足的问题。

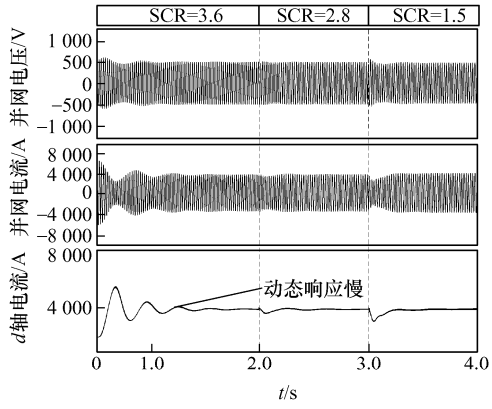
当采用基于 CRITIC 权重法的灵活性控制策略时，发电单元在 SCR=1.5 的极弱电网条件下选择虚拟次同步电感构网型控制来使系统保持稳定。随着



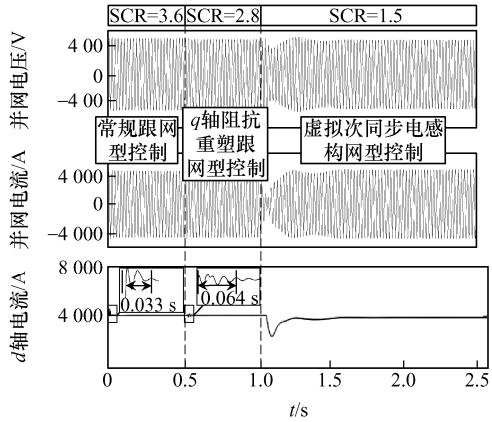

(a) 常规跟网型控制




(b) $q$ 轴阻抗重塑跟网型控制




(c) 虚拟次同步电感构网型控制




(d) 基于CRITIC权重法的灵活性控制

**图 6　采用不同控制的发电单元 A 相仿真波形**

**Fig. 6 Simulation waveforms of phase-A of power generation units obtained using different control methods**

电网强度变强，发电单元选择常规跟网型控制来提高系统发电效率与动态性能，其中发电单元在 SCR=2.8 的弱电网条件下选择 $q$ 轴阻抗重塑跟网型控制，在 SCR=3.6 的强电网条件下选择常规跟网型控制，同时控制模式切换期间无明显电流冲击，实现了无扰动切换，仿真结果如图 6(d)所示。

由表 3 可知，有功功率响应速度所占权重最高，因此强电网环境下的发电单元会选择动态性能占优的常规跟网型控制。而电压幅值波动百分比所占权重次之，在电网强度较低时，系统容易失稳，弱电网环境下的发电单元需要以保持电压频率稳定作为首要任务，因此选择支撑能力占优的虚拟次同步电感构网型控制方法。因此，基于以上的结果与分析可知，采用基于 CRITIC 权重法的灵活性控制策略，发电单元可实现更宽的 SCR 变化范围内的灵活运行。

## 5　结论

(1)本文建立了“短路比-灵活性评估分数”二维灵活性评估维度，选取了涵盖功率出力能力、稳定性、电压支撑能力等方面的灵活性评估指标，对比选择 CRITIC 权重法为本文的灵活性评估方法，从而完整建立了灵活性评估体系。

(2)本文量化评估了 3 种典型控制下发电单元的灵活性差异。其中，在低短路比的情况下，采用虚拟次同步电感构网型控制的发电单元展现出更高的灵活性；相反，在高短路比的情况下，常规跟网型控制下的发电单元灵活性更为突出。

(3)本文提出了基于CRITIC权重法的灵活性控制策略，根据灵活性评估结果界定控制策略切换的临界点，使得发电单元实时选择灵活性最优的控制策略并进行无扰动切换，从而使发电单元在更宽的 SCR 变化范围内灵活运行。

**参考文献：**

[1] 郭临洪, 夏仕伟, 李昇蔚, 等. 面向大规模光伏电站实时仿真的单元级精细化建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2024(8): 2978-2989.
Guo Linhong, Xia Shiwei, Li Shengwei, et al. Refined real-time simulation modeling at the unit level for large-scale PV power stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2024(8): 2978-2989. (in Chinese)

[2] 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. (in Chinese)

[3] Li Ming, Zhang Xing, Yang Ying, et al. The grid impedance adaptation dual mode control strategy in weak grid [C]// 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia). Niigata, Japan, 2018:

2973-2979.

[4] 王杨. 并网逆变器多模式运行稳定性分析及其多模型控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
Wang Yang. Stability analysis of grid-connected inverter under multi-control mode and research on its multi-mode control [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021. (in Chinese)

[5] 李雪, 李佳奇, 张儒峰, 等. 计及风电出力相关性和条件价值风险的电力系统概率可用输电能力评估[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4162-4177.
Li Xue, Li Jiaqi, Zhang Rufeng, et al. Probabilistic available transfer capability assessment in power system considering conditional value-at-risk and correlated wind power [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4162-4177. (in Chinese)

[6] 马燕峰, 李金媛, 王子建, 等. 基于量测数据的新能源电力系统区域等效惯量评估方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5406-5421.
Ma Yanfeng, Li Jinyuan, Wang Zijian, et al. Assessment method of regional equivalent inertia of new energy power system based on measured data [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5406-5421. (in Chinese)

[7] 余运俊, 杨林锋, 哈志蕊, 等. 考虑灵活性资源的微电网双层优化策略[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 115-124.
Yu Yunjun, Yang Linfeng, Ha Zhirui, et al. Two-layer optimal strategy for microgrid considering flexible resources [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 115-124. (in Chinese)

[8] 张建, 夏烈, 徐亮辉, 等. 基于最小鉴别信息组合赋权法的光伏发电单元综合评价技术研究[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 152-160.
Zhang Jian, Xia Lie, Xu Lianghui, et al. Research on comprehensive evaluation technology for photovoltaic power generation unit based on combined weighting method of minimum discriminant information [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 152-160. (in Chinese)

[9] 郭梓暄. 电网阻抗变化条件下并网变流器及系统稳定控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
Guo Zixuan. Research on grid-connected converter and system stability control under the condition of power grid impedance change [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022. (in Chinese)

[10] 李明. 高渗透率新能源发电并网逆变器阻抗自适应双模式控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
Li Ming. Research on impedance adaptive dual-mode control of the grid-connected inverter for high-penetration new energy generation [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020. (in Chinese)

[11] Fang Jingyang, Li Xiaoqiang, Li Hongchang, et al. Stability improvement for three-phase grid-connected converters through impedance reshaping in quadratureaxis [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8365-8375.

[12] Wang Xiongfei, Li Yunwei, Blaabjerg F, et al. Virtual-impedance-based control for voltage-source and current-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7019-7037.

[13] 潘海龙. 基于阻抗辨识的并网逆变器动态短路比估计技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
Pan Hailong. Research on dynamic short circuit ratio estimation technology of grid-connected inverter based on impedance identification [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021. (in Chinese)

[14] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities: IEEE Std 1204-1997 [S]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997.

[15] 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 Yong, Lin Xinchun, Pan Chen, 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. (in Chinese)

[16] Sun Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.

[17] 高凯, 肖凡, 葛平娟, 等. 计及电流限幅环节影响的虚拟同步发电机暂态稳定区间分析[J]. 电网技术, 2025,

49(5): 1951-1961.

Gao Kai, Xiao Fan, Ge Pingjuan, et al. Transient stability interval analysis of virtual synchronized generator considering fault current limitation [J]. Power System Technology, 2025, 49(5): 1951-1961. (in Chinese)

[18] 王晓男. 综合评价中若干理论方法的适用性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.

Wang Xiaonan. The applicability research of several theoretical methods in comprehensive evaluation [D]. Changsha: Hunan University, 2014. (in Chinese)

[19] 罗宁, 贺墨琳, 高华, 等. 基于改进的 AHP-CRITIC 组合赋权与可拓评估模型的配电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 86-96.

Luo Ning, He Molin, Gao Hua, et al. Comprehensive evaluation method for a distribution network based on improved AHP-CRITIC combination weighting and an extension evaluation model [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 86-96. (in Chinese)



宋朋飞

**作者简介：**

宋朋飞(1987— )，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统运行与控制。E-mail：spengfei09@163.com。

亢朋朋(1986— )，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统运行与控制。E-mail：598802537@qq.com。

孟铁强(1999— )，男，中国电源学会学生会员，通信作者，硕士研究生。研究方向：并网变流器稳定性与灵活性控制分析。E-mail：944781467@qq.com。

翟文辉(1996— )，男，本科，工程师。研究方向：电力系统运行。E-mail：1245370465@qq.com。

张兴(1963— )，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：新能源发电及其电力电子技术。E-mail：honglf@ustc.edu.cn。

田晓煜(1995— )，男，硕士，工程师。研究方向：电力系统及其自动化。E-mail：462509302@qq.com。

(责任编辑：孙美菊)