文章编号：1674-0629(2026)09-0025-12 中图分类号：TM732 文献标志码：A
DOI：10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2026.09.003

# 构网型储能故障下维持电压源暂态同步稳定的参数可行域构建

李霞林[1]，罗宇轩[1]，项烨鋆[2]，孙景钌[2]，奚洪磊[2]，侯邦广[2]，王智[1]
（1. 智能配用电装备与系统全国重点实验室(天津大学)，天津 300072；2. 国网浙江省电力有限公司温州供电公司，浙江 温州 325000）

**摘要：**国标《电化学储能构网型变流器技术规范》(征求意见稿)对故障下构网型储能(grid-forming energy storage system，GFM-ESS)的长时间低电压耐受和暂态同步稳定能力提出了要求。为了量化表征该能力，提出了一种GFM-ESS长时间故障下保持电压源特性并维持同步稳定的参数可行域构建方法。首先设计了一种考虑电磁暂态过程的故障电流工程计算方法，提取电流暂态峰值和稳态交流分量作为电流约束。其次构造了计及GFM-ESS虚拟阻抗和等效阻尼系数的能量函数形成同步稳定约束，并结合有功功率参考可行范围构造了平衡点约束。在此基础上给出了GFM-ESS故障下维持电压源暂态同步稳定的参数集合表达式，进一步以有功功率参考和虚拟电抗为关键参数刻画可行域，实现了GFM-ESS稳定运行边界的量化表征。最后，从电网侧与设备侧定量分析了不同类型参数对可行域边界的影响与作用机理，并通过电磁暂态仿真验证了所构建可行域的有效性。

**关键词：**构网型储能；故障电流工程计算；能量函数；电压源暂态同步稳定；参数可行域

# Parameter Feasible Region Construction for Voltage-Source Transient Synchronization Stability of Grid-Forming Energy Storage System Under Faults

LI Xialin[1], LUO Yuxuan[1], XIANG Yeyun[2], SUN Jingliao[2], XI Honglei[2], HOU Bangguang[2], WANG Zhi[1]
(1. State Key Laboratory of Smart Power Distribution Equipment and System, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Wenzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000, China)

**Abstract:** The national standard "Technical Specification for Grid-Forming Converters in Electrochemical Energy Storage Systems" (draft for comments) requires grid-forming energy storage system (GFM-ESS) to achieve long-duration low-voltage ride-through and transient synchronization stability under faults. To quantify this capability, a parameter feasible region construction method is proposed for maintaining voltage-source characteristics and synchronization stability under GFM-ESS sustained faults. Firstly, a fault-current engineering calculation method considering electromagnetic transient process is developed to obtain the transient current peak and steady-state AC component as current constraints. Then, an energy function incorporating virtual impedance and equivalent damping coefficient is constructed as the synchronization stability constraint, while the feasible active-power reference range is used as the equilibrium-point constraint. On this basis, an expression is derived for the parameter set that enables the GFM-ESS to maintain voltage-source transient synchronization stability under faults. The feasible region is further characterized using the active-power reference and virtual reactance as key parameters, thereby quantitatively determining the stable operating boundary of the GFM-ESS. Finally, the effects of various grid-side and device-side parameters on the feasible region boundaries, together with their underlying mechanisms, are quantitatively analyzed, and electromagnetic transient simulations are conducted to verify the effectiveness of the constructed feasible region.

**Key words:** grid-forming energy storage; fault current engineering calculation; energy function; voltage-source transient synchronization stability; parameter feasible region

## 0 引言

高比例电力电子装备接入已成为新型电力系统的主要特征，为提升系统稳定性，构网型储能(grid-forming energy storage system，GFM-ESS)的接入规模不断提升[1-3]。受半导体器件过流能力约束，GFM-ESS在电网故障下需进行限流控制，通常有电流内环直接限流和基于虚拟阻抗的间接限流两类控制策略[4-5]。相较于直接限流，间接限流策略能够避免GFM-ESS控制模式切换引发的附加扰动，并减小设备阻抗特性变化对线路距离保护的影响[6-7]。

本文定义“电压源暂态同步稳定”是指故障期间GFM-ESS以电压源特性保持同步稳定运行的工作状态。故障期间，通过合理设置有功功率参考值和虚拟电抗取值[8-9]能够使GFM-ESS具备维持电压源暂态同步稳定的能力。国标《电化学储能构网型变流器技术规范》[10](征求意见稿)要求“交流端口电压降低至额定电压的20%~80%期间，不脱网连续运行10 s”，对GFM-ESS的长时间低压耐受和暂态同步稳定能力作了明确规范。为了量化GFM-ESS在间接限流策略下维持电压源暂态同步稳定的能力，亟须回答两个关键问题：1)如何确定GFM-ESS维持电压源暂态同步稳定的运行状态；2)如何确定此状态下系统的参数可行范围。

针对关键问题1)，现有研究主要从电流全过程解析计算角度判断故障期间是否触发限流，并从能量函数和相平面角度判断系统是否保持暂态同步稳定。限流触发方面，文献[11]通过控制结构和网络拓扑的数值积分与微分方程组混合求解方法得到构网型变流器故障电流的解析表达式，但未考虑虚拟阻抗对故障电流的影响。文献[12]基于变流器无功功率-电压电路方程与控制方程构建了含虚拟阻抗的微分方程，并获取了短路电流解析表达式，但未计及滤波器参数对短路电流的影响。文献[13]提出了一种基于控制与电磁暂态解耦的简化电流解析计算方法，考虑了虚拟阻抗对故障电流的影响，然而，该方法仍基于解析法求解故障全过程电流，无法满足高效计算的需求。暂态同步稳定方面，文献[14-15]构造了考虑变流器功率耦合作用的能量函数用于同步稳定分析，但未充分考虑虚拟阻抗对同步稳定的影响。文献[16-17]基于变流器故障期间的相平面轨迹判断同步稳定，但相平面法依赖时域仿真，同样存在计算效率较低的问题。

针对关键问题2)，现有研究主要聚焦于直接限流策略下的参数可行区间，对间接限流策略下的分析仍不充分；此外，针对间接限流策略的研究通常关注单一电流约束，缺乏对维持电压源与同步稳定状态下多约束耦合作用的参数分析。文献[18-20]分析了直接限流策略下构网变流器维持暂态稳定的参数取值区间，但未讨论间接限流策略下的参数取值区间。文献[13]明确了故障期间使变流器维持电压源外特性的虚拟电抗取值下限，但文献[21]指出过高的虚拟电抗取值会诱发暂态同步问题，说明虚拟阻抗取值还应存在上限，而文献[13]并未进一步分析此上限的可行范围。

针对现有研究存在的不足，本文提出了一种GFM-ESS故障下维持电压源暂态同步稳定的参数可行域构建方法，主要工作如下：1)设计了一种GFM-ESS故障电流工程计算方法，无需进行电流全过程解析计算即可求取故障电流峰值与稳态分量。2)构造了计及GFM-ESS虚拟电抗和等效阻尼系数的能量函数，并基于该能量函数设计同步稳定判据。3)定义了平衡点约束、暂态电流峰值约束、稳态电流约束和同步稳定约束共同作用下的参数集合，选取有功功率参考值和虚拟电抗取值作为关键参数，量化GFM-ESS维持电压源暂态同步稳定的能力。4)定量分析了电网侧与设备侧参数对可行域边界的影响与作用机理。

## 1 GFM-ESS并网系统建模与电压源暂态同步稳定参数集合定义

### 1.1 GFM-ESS并网系统建模

构网型储能并网系统拓扑与控制结构如图1所示。拓扑方面，GFM-ESS经滤波器后由升压变压器接入公共连接点(point of common coupling，PCC)并网，图1中$Z_f$、$C_f$分别为滤波阻抗与滤波电容，$X_t$、$Z_{line}$分别为升压变压器电抗和线路阻抗，

**基金项目**：国家重点研发计划资助项目(2023YFB2406700)；国家自然科学基金资助项目(52477118，525B2115)；国网浙江省电力有限公司科技项目(5211WZ26000G)。

**Foundation item**：Supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFB2406700)；the National Natural Science Foundation of China (52477118，525B2115)；the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (5211WZ26000G).

$U_g$为电网电压。

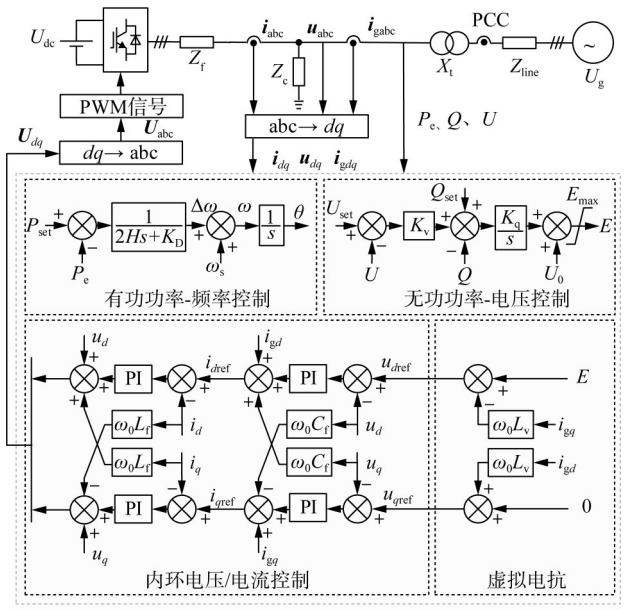



**图1　GFM-ESS并网系统拓扑结构及控制结构图**

Fig. 1　Topology and control structure of the GFM-ESS grid-connected system

控制结构方面，GFM-ESS主要包含有功功率-频率控制、无功功率-电压控制、虚拟电抗和内环电压与电流控制环节。有功功率-频率控制环节采用虚拟同步控制，数学表达式为：

$$\frac{2H}{\omega_0}\ddot{\theta}+K_D\dot{\theta}=P_{set}-P_e \tag{1}$$

式中：$\theta$为GFM-ESS内电势相对于电网电压的功角差；上标“··”表示$\theta$对时间的二阶导数；上标“·”表示$\theta$对时间的一阶导数；$H$为惯性常数；$\omega_0$为额定角速度；$K_D$为等效阻尼系数；$P_{set}$为有功功率设定值；$P_e$为有功功率输出。

无功功率-电压控制环节采用含积分的下垂控制，其数学表达式为：

$$\dot{E}=K_q\left[\left(Q_{set}-Q\right)+K_v\left(U_{set}-U\right)\right] \tag{2}$$

式中：$E$为GFM-ESS内电势参考；上标“·”表示$E$对时间的一阶导数；$K_v$与$K_q$分别为无功功率调压系数和积分系数；$Q$为无功功率输出；下标“set”表示设定值；$U$为端口电压。

虚拟电抗环节的数学表达式为：

$$\begin{cases}u_{d\mathrm{ref}}=E-\omega_0L_vi_{gq}\\u_{q\mathrm{ref}}=0+\omega_0L_vi_{gd}\end{cases} \tag{3}$$

式中：$u_{d\mathrm{ref}}$与$u_{q\mathrm{ref}}$分别为引入虚拟电抗后输出电压参考值的$d$、$q$轴分量；$\omega_0$为额定角速度；$L_v$为虚拟电感；$i_{gd}$与$i_{gq}$分别为GFM-ESS并网侧$d$、$q$轴电流。

电压与电流控制环节、PWM调制环节采用典型控制结构，此处不再赘述。

### 1.2　电压源暂态同步稳定参数集合定义

本文所研究的“电压源暂态同步稳定”是指故障期间GFM-ESS通过间接限流策略保持电压源特性的同时维持同步稳定运行。此状态需同时满足3类条件：一是故障期间存在平衡点，二是暂态和稳态电流均不触发限流，三是故障期间保持同步稳定。

从有功功率平衡关系出发将平衡点约束设置为：

$$\exists\theta_{eq}^{f},\ \mathrm{s.t.}P_{set}=P_e^{f}\left(\theta_{eq}^{f}\right) \tag{4}$$

式中：$\theta_{eq}^{f}$为故障期间的平衡点功角；$P_{set}$为有功功率设定值；$P_e^{f}$为故障期间输出的有功功率。

为使GFM-ESS在故障期间维持电压源外特性，需要在整个故障期间避免触发电流限幅。根据已有分析可知[11-13]，当故障电流的暂态峰值与稳态分量均小于限流值时，GFM-ESS能够维持电压源外特性，因此，限流约束设置为：

$$\begin{cases}I_{peak}^{tr}(\boldsymbol{\alpha})<I_{lim}\\I_{ss}(\boldsymbol{\alpha})<I_{lim}\end{cases} \tag{5}$$

式中：$I_{peak}^{tr}(\boldsymbol{\alpha})$为暂态电流峰值；$I_{ss}(\boldsymbol{\alpha})$为稳态电流分量；$I_{lim}$为限流值；$\boldsymbol{\alpha}\in\mathbb{R}^n$为GFM-ESS并网系统的参数向量，其中$\mathbb{R}^n$表示$n$维实数空间。

即使GFM-ESS故障期间未触发电流限幅，系统仍可能因功角运动越过不稳定平衡点而失去同步稳定。因此，需进一步引入同步稳定约束。基于能量函数判断GFM-ESS能否维持同步稳定时，通常以系统初始能量小于系统临界能量作为判据[14-15]，因此，同步稳定约束设置为：

$$V_0(\boldsymbol{\alpha})<V_{cr}(\boldsymbol{\alpha}) \tag{6}$$

式中$V_0(\boldsymbol{\alpha})$与$V_{cr}(\boldsymbol{\alpha})$分别为系统初始与临界能量。

基于式(4)—(6)，定义GFM-ESS维持电压源暂态同步稳定的参数集合。记满足式(4)—(6)约束的参数集合为$\Omega_{stab}$，则有：

$$\Omega_{stab}=\left\{\boldsymbol{\alpha}\in\mathbb{R}^n\left|\begin{array}{c}\exists\theta_{eq}^{f},\ \mathrm{s.t.}\ P_{set}=P_e^{f}\left(\theta_{eq}^{f}\right),\\I_{peak}^{tr}(\boldsymbol{\alpha})<I_{lim},I_{ss}(\boldsymbol{\alpha})<I_{lim},\\V_0(\boldsymbol{\alpha})<V_{cr}(\boldsymbol{\alpha})\end{array}\right.\right\} \tag{7}$$

## 2　GFM-ESS故障电流计算与能量函数构建

本节围绕式(7)定义的参数可行集合给出约束的具体计算方法。首先，推导故障期间平衡点存在

的参数可行范围；其次，提出了一种考虑电磁暂态过程的GFM-ESS故障电流的工程计算方法，在兼顾效率与精度的基础上求取电流的暂态峰值和稳态分量；最后，构造计及虚拟电抗和等效阻尼系数的能量函数用于建立GFM-ESS暂态同步稳定判据。

### 2.1 平衡点存在的参数可行范围

根据图1所示网络拓扑，GFM-ESS并网系统可视为内电势经等效阻抗接入电网的结构。其中，内电势$\overline{E}=E\angle\theta$，电网电压$\overline{U_{\mathrm{g}}}=U_{\mathrm{g}}\angle 0$，等效阻抗为：

$$Z_{\Sigma}=R_{\Sigma}+\mathrm{j}X_{\Sigma} \tag{8}$$

式中：$R_{\Sigma}=R_{\mathrm{f}}+R_{\mathrm{line}}$；$X_{\Sigma}=X_{\mathrm{f}}+X_{\mathrm{t}}+X_{\mathrm{line}}+X_{\mathrm{v}}$；$R_{\mathrm{f}}$、$X_{\mathrm{f}}$分别为串联滤波电阻和电抗；$R_{\mathrm{line}}$、$X_{\mathrm{line}}$分别为线路电阻和电抗；$X_{\mathrm{t}}$为变压器电抗；$X_{\mathrm{v}}$为虚拟电抗。

$Z_{\Sigma}$的幅值与辅助计算角分别为：

$$\begin{cases}\left|Z_{\Sigma}\right|=\sqrt{R_{\Sigma}^2+X_{\Sigma}^2}\\ \varphi=\arctan\dfrac{R_{\Sigma}}{X_{\Sigma}}\end{cases} \tag{9}$$

根据节点功率表达式可得GFM-ESS注入系统的有功功率$P_{\mathrm{e}}$为：

$$P_{\mathrm{e}}=\frac{E^2R_{\Sigma}-EU_{\mathrm{g}}R_{\Sigma}\cos\theta+EU_{\mathrm{g}}X_{\Sigma}\sin\theta}{R_{\Sigma}^2+X_{\Sigma}^2} \tag{10}$$

将式(9)代入式(10)，可将$P_{\mathrm{e}}$表达式整理为：

$$P_{\mathrm{e}}=P_{\mathrm{c}}+P_{\mathrm{m}}\sin\left(\theta-\varphi\right) \tag{11}$$

式中$P_{\mathrm{c}}$与$P_{\mathrm{m}}$分别为：

$$\begin{cases}P_{\mathrm{c}}=\dfrac{E^2R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}^2+X_{\Sigma}^2}\\ P_{\mathrm{m}}=\dfrac{EU_{\mathrm{g}}}{\sqrt{R_{\Sigma}^2+X_{\Sigma}^2}}\end{cases} \tag{12}$$

由式(11)可知，若使系统平衡点存在，则应满足：

$$\exists\theta_{\mathrm{eq}}^{\mathrm{f}},P_{\mathrm{set}}=P_{\mathrm{e}}^{\mathrm{f}}=P_{\mathrm{c}}+P_{\mathrm{m}}\sin\left(\theta_{\mathrm{eq}}^{\mathrm{f}}-\varphi\right) \tag{13}$$

由式(13)可得：

$$\frac{P_{\mathrm{set}}-P_{\mathrm{c}}}{P_{\mathrm{m}}}=\sin\left(\theta_{\mathrm{eq}}^{\mathrm{f}}-\varphi\right) \tag{14}$$

使式(14)有解，即平衡点存在的参数可行范围为：

$$P_{\mathrm{c}}-P_{\mathrm{m}}\leqslant P_{\mathrm{set}}\leqslant P_{\mathrm{c}}+P_{\mathrm{m}} \tag{15}$$

### 2.2 故障电流工程计算方法

区别于传统同步机故障电流，GFM-ESS故障电流不仅受传输线路参数影响，还与滤波器、虚拟阻抗密切相关。同时，为支撑可行域计算，要求电流计算方法兼顾精度与效率。为此，本文建立了考虑线路动态、滤波器动态和虚拟电抗作用的状态空间模型，并在此基础上计算电流暂态峰值和稳态分量。

线路侧等效电感的动态方程为：

$$\frac{X_{\mathrm{line}}+X_{\mathrm{t}}}{\omega_0}\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}t}+\left(R_{\mathrm{line}}+\mathrm{j}\left(X_{\mathrm{line}}+X_{\mathrm{t}}\right)\right)i_{\mathrm{g}}=v_{\mathrm{t}}-\overline{U_{\mathrm{g}}} \tag{16}$$

式中：$\omega_0$为额定角速度；$i_{\mathrm{g}}$为传输线路电流；$v_{\mathrm{t}}$为PCC电压；$\overline{U_{\mathrm{g}}}$为电网电压相量。

滤波电容的动态方程为：

$$\frac{X_{\mathrm{c}}}{\omega_0}\frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t}+\mathrm{j}X_{\mathrm{c}}v_{\mathrm{c}}=i_{\mathrm{c}} \tag{17}$$

式中：$X_{\mathrm{c}}$为并联滤波电抗；$v_{\mathrm{c}}$、$i_{\mathrm{c}}$分别为滤波电容的电压和电流。

滤波电感的动态方程为：

$$\frac{X_{\mathrm{f}}}{\omega_0}\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{L}}}{\mathrm{d}t}+\left(R_{\mathrm{f}}+\mathrm{j}X_{\mathrm{f}}\right)i_{\mathrm{L}}=\overline{E}-\mathrm{j}X_{\mathrm{v}}i_{\mathrm{g}}-v_{\mathrm{t}} \tag{18}$$

式中：$i_{\mathrm{L}}$为滤波电感电流；$\overline{E}$为内电势相量。特别地，由图1控制环节结构图可知，$X_{\mathrm{v}}$在控制策略中仅以代数形式出现，因此，式(18)中不考虑$X_{\mathrm{v}}$的动态过程。

滤波电感、滤波电容和传输线路电感之间的联络关系为：

$$\begin{cases}i_{\mathrm{c}}=i_{\mathrm{L}}-i_{\mathrm{g}}\\ v_{\mathrm{t}}=v_{\mathrm{c}}+R_{\mathrm{c}}(i_{\mathrm{L}}-i_{\mathrm{g}})\end{cases} \tag{19}$$

式中：$i_{\mathrm{c}}$为滤波电容电流；$R_{\mathrm{c}}$为并联滤波电阻。

选择状态变量$\boldsymbol{x}=[i_{\mathrm{L}},\ i_{\mathrm{g}},\ v_{\mathrm{c}}]^{\mathrm{T}}$，联立式(16)—(19)，可得描述GFM-ESS电流动态过程的状态方程如式(20)所示。

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{b} \tag{20}$$

其中，$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{b}$的具体表达式如式(21)所示。

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}-\dfrac{\omega_0}{X_{\mathrm{f}}}(R_{\mathrm{c}}+R_{\mathrm{f}}+\mathrm{j}X_{\mathrm{f}}) & \dfrac{\omega_0}{X_{\mathrm{f}}}(R_{\mathrm{c}}-\mathrm{j}X_{\mathrm{v}}) & -\dfrac{\omega_0}{X_{\mathrm{f}}}\\ \dfrac{\omega_0}{X_{\mathrm{g}}}R_{\mathrm{c}} & -\dfrac{\omega_0}{X_{\mathrm{g}}}(R_{\mathrm{c}}+R_{\mathrm{g}}+\mathrm{j}X_{\mathrm{g}}) & \dfrac{\omega_0}{X_{\mathrm{g}}}\\ \dfrac{\omega_0}{X_{\mathrm{c}}} & -\dfrac{\omega_0}{X_{\mathrm{c}}} & -\mathrm{j}\omega_0\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{b}=\begin{bmatrix}\dfrac{\omega_0}{X_{\mathrm{f}}}\overline{E}\\ -\dfrac{\omega_0}{X_{\mathrm{g}}}\overline{U_{\mathrm{g}}}\\ 0\end{bmatrix}\\ R_{\mathrm{g}}=R_{\mathrm{line}},X_{\mathrm{g}}=X_{\mathrm{line}}+X_{\mathrm{t}}\end{cases} \tag{21}$$

状态方程式（20）的时域解为：

$$\boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{x}_{\mathrm{ss}}+\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}(t-t_0)}\left[\boldsymbol{x}(t_0)-\boldsymbol{x}_{\mathrm{ss}}\right] \tag{22}$$

式中：$t_0$为故障发生时刻；$\boldsymbol{x}(t_0)$为故障发生瞬间的初始状态；$\boldsymbol{x}_{\mathrm{ss}}$为时域解的稳态分量。

由于限流环节的电流观测值为传输线路电流$i_{\mathrm{g}}$，因此，本文以$i_{\mathrm{g}}$的暂态峰值和稳态分量作为限流约束的判据。根据式(22)可得$i_{\mathrm{g}}$的时域表达式为：

$$i_{\mathrm{g}}(t)=i_{\mathrm{g,ss}}+\begin{bmatrix}0 & 1 & 0\end{bmatrix}\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}(t-t_0)}\left[\boldsymbol{x}(t_0)-\boldsymbol{x}_{\mathrm{ss}}\right] \tag{23}$$

式中$i_{\mathrm{g,ss}}$为故障后的稳态电流分量。

由于暂态峰值对应电流幅值的局部极大值，因此峰值时刻$t_{\mathrm{p}}$应满足：

$$\left.\frac{\mathrm{d}\left|i_{\mathrm{g}}(t)\right|^2}{\mathrm{d}t}\right|_{t=t_{\mathrm{p}}}=0 \tag{24}$$

式中$t_{\mathrm{p}}$的取值不唯一。考虑到故障电流暂态峰值通常出现在故障发生后的1—2个周波内，本文在该时间窗口内搜索满足式(24)的局部极大值点，并取其中最大值作为暂态电流峰值。

故障期间，外环的动态过程导致内电势幅值$E$和相角$\theta$时变，使电流表达式高度非线性化。为兼顾计算精度和效率，本文进行如下近似处理：1)由于电磁暂态过程的时间尺度远小于功率外环控制时间尺度，故障电流达到暂态峰值时可近似认为GFM-ESS内电势幅值和相角保持故障前初始状态；2)网侧电压跌落将导致无功功率-电压控制环节最终进入限幅，因此在计算电流稳态分量时认为GFM-ESS内电势进入限幅。

基于上述近似，本文所提GFM-ESS故障电流工程计算方法步骤如下：1)根据故障前参数向量$\boldsymbol{\alpha}_0$求取稳态状态$\boldsymbol{x}_{\mathrm{ss}}^0$，并将其作为初始状态；2)根据故障期间参数向量$\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{f}}$构造状态矩阵$\boldsymbol{A}^{\mathrm{f}}$和输入向量$\boldsymbol{b}^{\mathrm{f}}$，并求出稳态状态$\boldsymbol{x}_{\mathrm{ss}}^{\mathrm{f}}$；3)将$\boldsymbol{A}^{\mathrm{f}}$、$\boldsymbol{x}_{\mathrm{ss}}^0$和$\boldsymbol{x}_{\mathrm{ss}}^{\mathrm{f}}$代入式(23)得到$i_{\mathrm{g}}(t)$表达式；4)根据式(24)搜索电流幅值局部极大值，得到暂态峰值$I_{\mathrm{peak}}^{\mathrm{tr}}$；同时由稳态分量得到稳态电流幅值$I_{\mathrm{ss}}$。

基于PSCAD/EMTDC平台搭建详细电磁模型验证电流计算结果的有效性。GFM-ESS并网系统基准工况参数如表1所示。

令$P_{\mathrm{set}}=0.3$ p. u.，$X_{\mathrm{v}}=0.3$ p. u.，分别设置并网点短路比SCR值为10、5、1进行对比实验，结果如表2所示。

**表1　GFM-ESS并网系统基准工况参数**

Tab. 1　Basic operating conditions parameters of the GFM-ESS grid-connected system

| 参数类型 | 参数名称 | 数值 |
|---|---|---|
| 交流系统 | 有功功率基准值$P_{\mathrm{B}}$/MW | 1.25 |
| | 交流电压基准值$U_{\mathrm{acB}}$/kV | 35 |
| | 频率基准值$f_{\mathrm{B}}$/Hz | 50 |
| | 变压器等效电抗$X_{\mathrm{t}}$/p. u. | 0.1 |
| | GFM-ESS并网点SCR | 10 |
| | 网侧故障电压$U_{\mathrm{g}}$/p. u. | 0.2 |
| GFM-ESS | 额定容量$S_{\mathrm{B}}$/MVA | 1.25 |
| | 滤波器串联阻抗$R_{\mathrm{f}}$、$X_{\mathrm{f}}$/p. u. | 0.003 4，0.1 |
| | 滤波器并联阻抗$R_{\mathrm{c}}$、$X_{\mathrm{c}}$/p. u. | 0.44，0.018 2 |
| | 惯性常数$H$/s | 4 |
| | 阻尼系数$K_{\mathrm{D}}$/(W·s·rad$^{-1}$) | 20 |
| | 内电势限幅$E_{\mathrm{lim}}$/p. u. | 1.1 |
| | 电流限幅$I_{\mathrm{max}}$/p. u. | 3 |
| | 有功功率参考$P_{\mathrm{set}}$/p. u. | [0,1] |
| | 虚拟电抗$X_{\mathrm{v}}$/p. u. | [0,0.4] |

**表2　GFM-ESS故障电流理论值与仿真值对比**

Tab. 2　Comparison between calculated and simulated fault currents

| SCR值 | 暂态峰值 | | | 稳态分量 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 理论/p. u. | 实际/p. u. | 误差/% | 理论/p. u. | 实际/p. u. | 误差/% |
| 10 | 3.19 | 3.28 | 2.7 | 2.33 | 2.34 | 0.4 |
| 5 | 2.67 | 2.74 | 2.5 | 1.93 | 1.92 | 0.5 |
| 1 | 1.17 | 1.18 | 0.8 | 0.61 | 失稳 | / |

由表2可知：1)所提方法在故障电流暂态峰值和稳态分量计算方面均具有较高的精度；2)暂态峰值的理论计算值均略小于仿真值，分析原因为：理论计算中认为内电势$E$在故障发生瞬间至暂态电流峰值期间保持恒定，而实际内电势$E$在故障发生后会逐渐升高，从而导致计算误差。为避免该误差造成限流约束误判，后续暂态峰值计算结果均叠加5 %的裕度；3)SCR值=1时，理论值存在，但仿真中系统同步失稳。表明GFM-ESS存在“未触发限流但同步失稳”的运行形态，仅依赖电流约束无法完整评估其故障期间稳定运行能力。因此，还需进一步构造基于能量函数的同步稳定判据。

### 2.3　计及虚拟电抗和等效阻尼系数能量函数构建

GFM-ESS的能量函数由势能项、动能项和阻尼耗散项3部分组成。以故障期间稳定平衡点为势能参考点，定义GFM-ESS的势能项$V_{\mathrm{p}}(\theta)$为：

$$V_{\mathrm{p}}(\theta)=\int_{\theta_{\mathrm{s}}}^{\theta}\left[P_{\mathrm{e}}(\xi)-P_{\mathrm{set}}\right]\mathrm{d}\xi \tag{25}$$

式中：$\theta$为功角差；$\theta_{\mathrm{s}}$为故障期间稳定平衡点的功角差；$\xi$为积分变量。

将式(11)代入式(25)并求解积分可得：

$$\begin{aligned}V_{\mathrm{p}}(\theta)=&(P_{\mathrm{c}}-P_{\mathrm{set}})(\theta-\theta_{\mathrm{s}})-P_{\mathrm{m}}\cos(\theta-\varphi)+\\&P_{\mathrm{m}}\cos(\theta_{\mathrm{s}}-\varphi)\end{aligned} \tag{26}$$

式(26)表明，虚拟电抗$X_{\mathrm{v}}$将通过改变等效阻抗$X_{\Sigma}$进一步影响$P_{\mathrm{c}}$、$P_{\mathrm{m}}$和$\varphi$，从而改变势能函数形态和同步稳定裕度。

定义GFM-ESS的动能项$V_{\mathrm{k}}(\omega)$为：

$$V_{\mathrm{k}}(\omega)=H\omega^2 \tag{27}$$

式中：$\omega=\omega_{\mathrm{GFM}}-\omega_0$为角速度偏差，其中$\omega_{\mathrm{GFM}}$为GFM-ESS输出角速度；$H$为惯性常数。

对于GFM-ESS而言，有功功率-频率控制环节中的等效阻尼系数通常显著大于传统同步机阻尼系数[22-23]，因此，GFM-ESS的能量函数需要考虑阻尼的耗散作用[24-25]，以降低能量函数的保守性。定义阻尼耗散项$V_{\mathrm{d}}(t)$如下。

$$V_{\mathrm{d}}(t)=\int_{t_0}^{t}\frac{K_{\mathrm{D}}}{\omega_0}\omega^2(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{28}$$

式中：$K_{\mathrm{D}}$为等效阻尼系数；$\omega$为角速度；$\omega_0$为额定角速度；$t_0$为故障发生时刻；$t$为故障当前时刻；$\tau$为积分变量。

由功角和角速度偏差的定义可得：

$$\begin{cases}\dot{\theta}=\omega\\ \mathrm{d}\theta=\omega\mathrm{d}t\\ \omega^2\mathrm{d}t=\omega\mathrm{d}\theta\end{cases} \tag{29}$$

将式(29)代入式(28)，并以$\theta_{\mathrm{s}}$作为参考，可得：

$$V_{\mathrm{d}}(t)=\frac{K_{\mathrm{D}}}{\omega_0}\int_{\theta_{\mathrm{s}}}^{\theta}\omega(\xi)\mathrm{d}\xi \tag{30}$$

令$x=\theta-\theta_{\mathrm{s}}$，则有$\dot{x}=\dot{\theta}$。式(30)可改写为：

$$V_{\mathrm{d}}(t)=\frac{K_{\mathrm{D}}}{\omega_0}\int_{0}^{x}\omega(\eta)\mathrm{d}\eta \tag{31}$$

式中$\eta$为积分变量。对式(31)进行分步积分，得到：

$$V_{\mathrm{d}}(t)=\frac{K_{\mathrm{D}}}{\omega_0}\left[x\omega(x)-\int_{0}^{x}\eta\mathrm{d}\omega(\eta)\right] \tag{32}$$

为获得便于可行域计算的解析表达式，在稳定平衡点附近对转子运动方程作阻尼主导近似，得到：

$$2H\dot{\omega}\approx-K_{\mathrm{D}}\dot{\theta} \tag{33}$$

将$\dot{x}=\dot{\theta}$和式(33)代入式(32)中的积分项，并作积分，可得：

$$\int_0^x\eta\mathrm{d}\omega(\eta)\approx\int_0^x\eta\left(-\frac{K_{\mathrm{D}}}{2H}\right)\mathrm{d}\eta=-\frac{K_{\mathrm{D}}}{4H}x^2 \tag{34}$$

考虑到实际轨迹与基于稳定平衡点的局部线性轨迹之间的偏差，式(34)中引入修正系数$\lambda$，得到：

$$\int_0^x\eta\mathrm{d}\omega(\eta)=-\lambda\frac{K_{\mathrm{D}}}{4H}x^2 \tag{35}$$

式中$\lambda$取值越大意味着修正作用越强，本文后续分析中取$\lambda=1$，其有效性将在本节能量函数的合理性分析中证明。

将$x=\theta-\theta_{\mathrm{s}}$、$\lambda=1$和式(35)代入式(32)，得到：

$$V_{\mathrm{d}}(t)=\frac{K_{\mathrm{D}}(\theta-\theta_{\mathrm{s}})\omega}{\omega_0}+\frac{K_{\mathrm{D}}^2}{4H\omega_0}(\theta-\theta_{\mathrm{s}})^2 \tag{36}$$

综合式(26)—(27)和式(36)，可构造系统能量函数$V(\theta,\omega)$为：

$$\begin{aligned}V(\theta,\omega)=&\underbrace{H\omega^2}_{V_{\mathrm{k}}}+\underbrace{(P_{\mathrm{c}}-P_{\mathrm{set}})(\theta-\theta_{\mathrm{s}})-}_{V_{\mathrm{p1}}}\\&\underbrace{P_{\mathrm{m}}\cos(\theta-\varphi)+P_{\mathrm{m}}\cos(\theta_{\mathrm{s}}-\varphi)}_{V_{\mathrm{p2}}}+\\&\underbrace{\frac{K_{\mathrm{D}}(\theta-\theta_{\mathrm{s}})\omega}{\omega_0}+\frac{K_{\mathrm{D}}{}^2}{4H\omega_0}(\theta-\theta_{\mathrm{s}})^2}_{V_{\mathrm{d}}}\end{aligned} \tag{37}$$

式中$V_{\mathrm{p1}}$和$V_{\mathrm{p2}}$共同组成势能项$V_{\mathrm{p}}(\theta)$。

下面讨论能量函数的合理性。首先分析$V(\theta,\omega)$在$\theta_{\mathrm{s}}$邻域的正定性。由于动能项$V_{\mathrm{k}}(\omega)$非负，可知：

$$V_{\mathrm{k}}(\omega)=H\omega^2\geqslant 0 \tag{38}$$

对于势能项$V_{\mathrm{p}}(\theta)$，在$\theta=\theta_{\mathrm{s}}$处有：

$$\begin{cases}V_{\mathrm{p}}(\theta_{\mathrm{s}})=0\\ \left.\dfrac{\mathrm{d}V_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}\theta}\right|_{\theta=\theta_{\mathrm{s}}}=P_{\mathrm{e}}(\theta_{\mathrm{s}})-P_{\mathrm{set}}=0\end{cases} \tag{39}$$

式(39)对$\theta$求二阶导可得：

$$\left.\frac{\mathrm{d}^2V_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}\theta^2}\right|_{\theta=\theta_{\mathrm{s}}}=\left.\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{e}}}{\mathrm{d}\theta}\right|_{\theta=\theta_{\mathrm{s}}}=P_{\mathrm{m}}\cos(\theta_{\mathrm{s}}-\varphi)>0 \tag{40}$$

因此，$V_{\mathrm{p}}(\theta)$在$\theta_{\mathrm{s}}$邻域内为正定函数。而阻尼耗散能$V_{\mathrm{d}}(t)$非负，故能量函数$V(\theta,\omega)$在$\theta_{\mathrm{s}}$邻域内正定。

其次讨论$V(\theta,\omega)$对时间一阶导数的性质，对$V$进行时间求导可得：

$$\dot{V} = 2H\omega\dot{\omega} + \dot{V}_{\mathrm{p}} + \frac{K_{\mathrm{D}}}{\omega_0}(\dot{\theta}\omega + \Delta\theta\dot{\omega}) + \frac{K_{\mathrm{D}}^{\ 2}}{2H\omega_0}\Delta\theta\omega \tag{41}$$

式中 $\Delta\theta = (\theta - \theta_{\mathrm{s}})$，代入 $\dot{\theta} = \omega$ 和式(1)，并利用式(25)，整理可得：

$$\dot{V} = -\frac{K_{\mathrm{D}}}{2H}\Delta\theta\left(P_{\mathrm{e}} - P_{\mathrm{set}}\right) \tag{42}$$

由于 $\theta_s$ 为稳定平衡点的功角，在其邻域内满足：

$$\left(\theta - \theta_{\mathrm{s}}\right)\left(P_{\mathrm{e}} - P_{\mathrm{set}}\right) \geqslant 0 \tag{43}$$

等号仅在 $\theta = \theta_{\mathrm{s}}$ 处成立，由此可知 $\dot{V} \leqslant 0$，证明了能量函数沿系统轨迹的时间导数负半定。$V(\theta, \omega)$ 的正定性与 $\dot{V}(\theta, \omega)$ 的半负定性证明了此能量函数的合理性，能够用于 GFM-ESS 的同步稳定分析。

为确定系统临界能量，选取故障期间不稳定平衡点 $\theta_{\mathrm{u}}$ 对应的能量函数值作为临界能量。GFM-ESS 故障期间的加减速过程如图 2 所示。

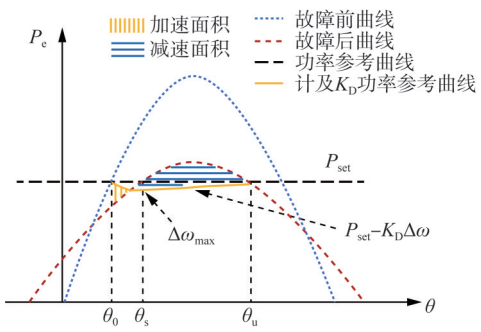



**图 2　GFM-ESS 加减速过程示意图**

Fig. 2　GFM-ESS acceleration and deceleration process diagram

故障瞬间，系统在初始功角 $\theta_0$ 处进入故障期间的功角特性曲线，系统在 $\theta_0$ 与 $\theta_{\mathrm{s}}$ 区间内积累动能；随后在 $\theta_{\mathrm{s}}$ 与 $\theta_{\mathrm{u}}$ 区间内耗散动能，若系统功角 $\theta$ 未越过 $\theta_{\mathrm{u}}$，则系统将逐渐回到 $\theta_{\mathrm{s}}$ 附近。相反，若功角 $\theta$ 越过 $\theta_{\mathrm{u}}$，此时系统将失去暂态同步稳定。因此，$\theta_{\mathrm{u}}$ 点对应的能量 $V_{\mathrm{cr}}(\theta_{\mathrm{u}}, \omega)$ 可作为系统临界能量。由此，构造同步稳定约束为：

$$V_{\mathrm{init}}\left(\theta_0, \omega\right) < V_{\mathrm{cr}}\left(\theta_{\mathrm{u}}, \omega\right) \tag{44}$$

## 3　GFM-ESS 电压源暂态同步稳定参数可行域构建与有效性验证

### 3.1　参数可行域构建

基于式(7)定义的参数向量集合，选择有功功率参考值 $P_{\mathrm{set}}$ 和虚拟电抗 $X_{\mathrm{v}}$ 作为关键参数构建可行域。具体构建过程为：给定 $P_{\mathrm{set}}$ 和 $X_{\mathrm{v}}$ 取值范围及遍历步长。对于任意一组参数点 $\left(P_{\mathrm{set}}, X_{\mathrm{v}}\right)$，固定其他参数为基准值并构造参数向量 $\boldsymbol{\alpha}$。将 $\boldsymbol{\alpha}$ 中的具体参数代入式(15)、式(23)—(44)，判断该组 $\left(P_{\mathrm{set}}, X_{\mathrm{v}}\right)$ 是否满足式(7)定义。遍历 $P_{\mathrm{set}}$ 和 $X_{\mathrm{v}}$ 的取值范围，获取全部参数可行点组成参数可行域。可行域构建流程如图 3 所示。

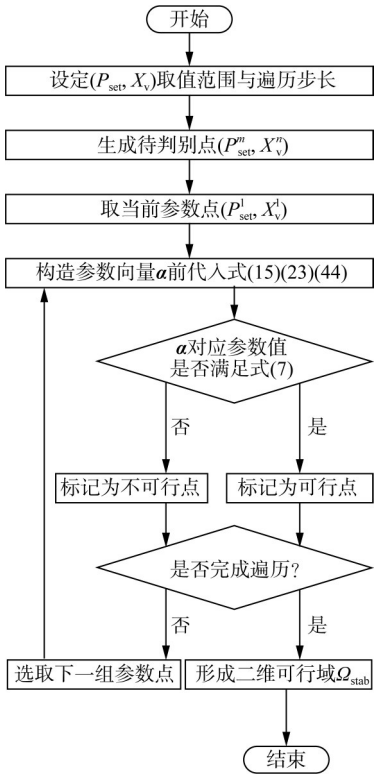



**图 3　参数可行域构建流程图**

Fig. 3　Flowchart for constructing the feasible region of parameters

根据表 1 基准工况参数，$P_{\mathrm{set}}$ 在 0~1 p. u. 之间设置 100 个采样点，$X_{\mathrm{v}}$ 在 0~0. 4 p. u. 之间设置 160 个采样点。构建的参数可行域如图 4 所示。

图 4 表明，参数可行域边界由暂态电流约束和同步稳定约束直接决定。同时，固定 $P_{\mathrm{set}}$，令 $X_{\mathrm{v}}$ 从 0~0. 4 p. u. 变化，平面上的参数点首先触发稳态电流越限，随后触发暂态电流越限，最后进入可行域。特别地，以基准工况下 $P_{\mathrm{set}}$ = 0. 4 p. u. 为例，参数点进入可行域后，随着 $X_{\mathrm{v}}$ 的增大，参数点将离开可行域并触发同步稳定约束和平衡点约束；固定 $X_{\mathrm{v}}$，令 $P_{\mathrm{set}}$ 从 0~1 p. u. 变化，参数点首先位于可行

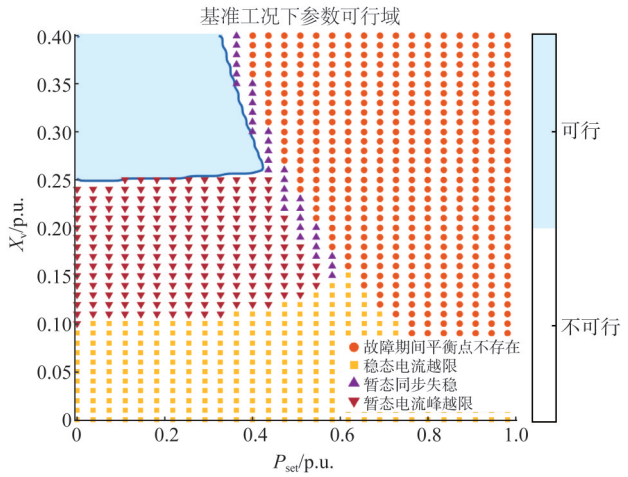



图 4 基准工况下参数可行域

Fig. 4 Feasible region under the base case

域，随后离开可行域并触发同步稳定约束和平衡点约束。

### 3.2 可行域有效性验证

基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建详细电磁模型验证可行域的有效性。选取图 5 中所示参数点进行仿真，其中，a2 与 a4 点位于可行域的边界上。选取 GFM-ESS 的输出频率和传输线路电流作为观测量验证理论可行域边界与电磁暂态仿真结果的一致性。

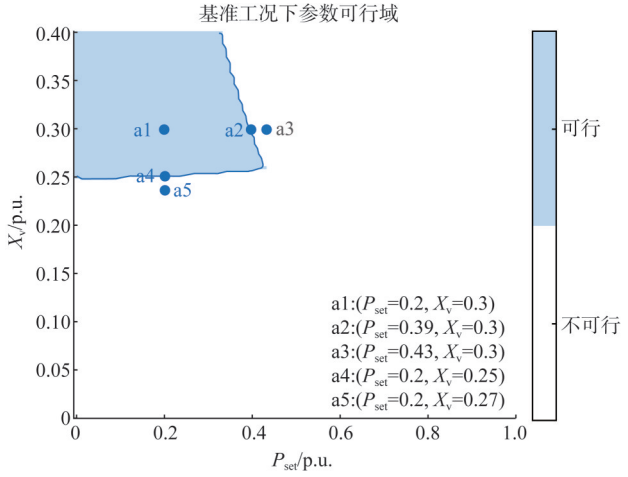



图 5 仿真验证参数点分布图

Fig. 5 Distribution diagram of selected parameter points for simulation verification

参数点沿 a1—a3 横向变化时，系统首先处于稳定未限流状态，随后发生同步失稳；参数点沿 a1—a5 纵向变化时，系统首先处于稳定未限流状态，随后触发限流。具体来看，a2 与 a3 参数点下系统运行状态的差异证明实际可行域边界位于 a2 与 a3 之间，同样可判断实际可行域边界位于 a4 与 a5 之间。理论判别结果与仿真现象具有较好一致性，验证了所构建参数可行域的有效性。同时，由于故障电流暂态峰值计算中引入了 5 %的裕度，且能量函数阻尼项采用工程化近似构建，故理论可行域相较实际可行域具有一定保守性。

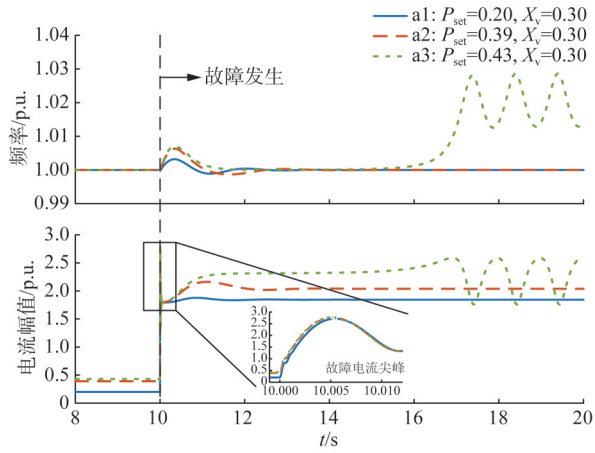



图 6 参数点 a1、a2、a3 对应的频率与电流响应

Fig. 6 Frequency and current responses at a1,a2 and a3

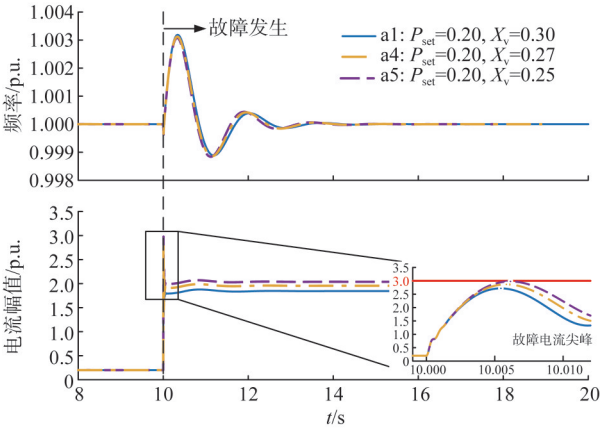



图 7 参数点 a1、a4、a5 对应的频率与电流响应

Fig. 7 Frequency and current responses at a1,a4 and a5

## 4 GFM-ESS 参数可行域影响因素分析

### 4.1 故障电压与网络强度对参数可行域影响分析

1）故障电压 $U_g$ 对参数可行域影响

保持其余参数为基准工况参数，令网侧故障电压 $U_g$ 分别等于 0.05 p.u.、0.2 p.u. 与 0.4 p.u.，得到的参数可行域如图 8 所示。

随着电压跌落程度加深，参数可行域的 $X_v$ 下限

不断提高，$P_{set}$可行范围明显收缩。分析原因为：1)随着故障加深，需不断加大$X_v$才能满足限流约束；2)同步稳定与平衡点约束制约了$P_{set}$的取值范围。由式(12)可知，$P_{set}$取值上下限中的$P_m$与网侧电压$U_g$正相关，随着$U_g$降低，$P_{set}$的可行上限与下限均将收缩。

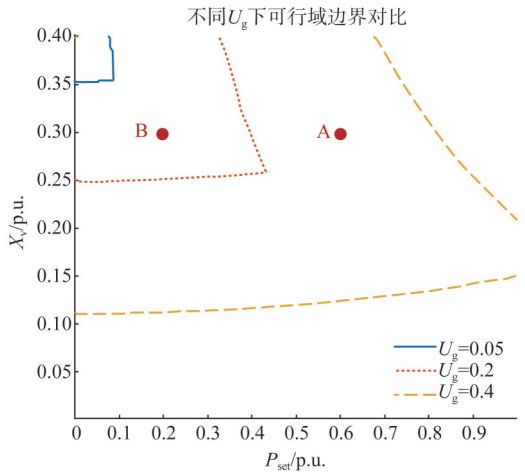



**图 8　不同网侧故障电压 $U_g$ 下的参数可行域**

Fig. 8　Feasible regions under different fault voltages

选取图 8 中点 $A(P_{set}=0.6\ \text{p.u.}, X_v=0.3\ \text{p.u.})$、$B(P_{set}=0.2\ \text{p.u.}, X_v=0.3\ \text{p.u.})$所对应的两组参数点进行仿真，得到 GFM-ESS 的输出频率与输出电流响应如图 9 所示。

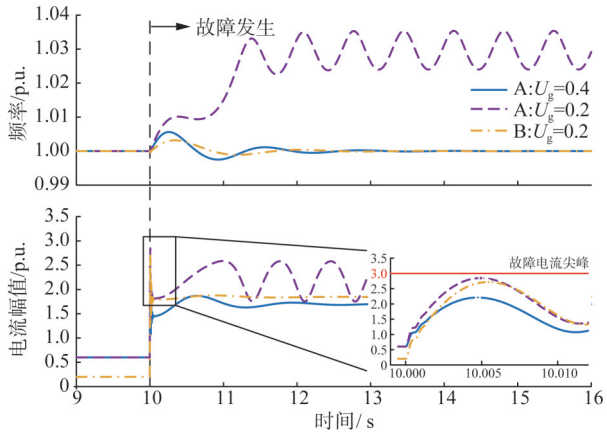



**图 9　A、B 对应参数点频率与电流响应对比**

Fig. 9　Comparison of frequency and current responses at parameter points *A* and *B*

图 8 表明 $A$ 点在 $U_g$ =0.2 p.u. 时位于可行域内，而当 $U_g$ =0.05 p.u. 时，$A$ 点会因不满足同步稳定与平衡点约束而离开可行域；将参数由 $A$ 点调整至 $B$ 点后，$B$ 点在 $U_g$ =0.05 p.u. 时重新落入可行域。图 9 所示电磁仿真结果与理论分析一致。

2) 网络强度 SCR 对参数可行域影响

保持其余参数为基准工况，令并网点 SCR 值分别等于 1、5 和 10，所得参数可行域如图 10 所示。

由图 10 可知，随着并网点 SCR 值提高，参数可行域的 $X_v$ 下限降低；$P_{set}$可行范围扩张。分析原因为：1)更大的 SCR 对过流的抑制作用更强，更易满足限流约束；2)线路电抗 $X_{line}$ 随 SCR 值提高而下降，结合式(12)可知，$P_m$、$P_c$ 将随着 SCR 值的提高而上升。因此，$P_{set}$ 的可行范围将随着 SCR 值提高而扩张。

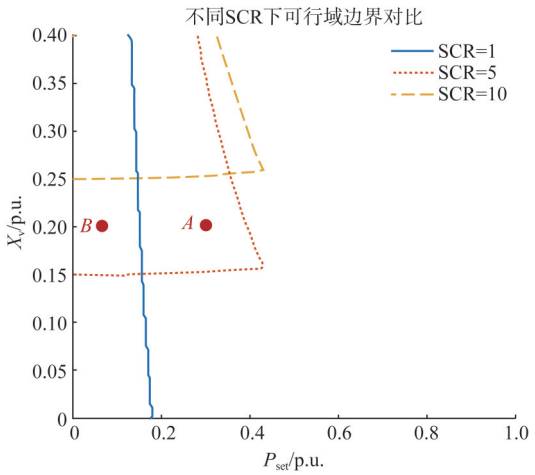



**图 10　不同并网点 SCR 值下的参数可行域**

Fig. 10　Feasible regions under different grid-connected SCR

选取图 10 中 $A(P_{set}=0.3\ \text{p.u.}, X_v=0.2\ \text{p.u.})$、$B(P_{set}=0.1\ \text{p.u.}, X_v=0.2\ \text{p.u.})$所对应的两组参数点，基于 PSCAD/EMTDC 平台进行仿真，得到 GFM-ESS 的输出频率与输出电流响应如图 11 所示。

仿真结果表明，$A$ 点在 SCR 值=5 时位于可行域，而 SCR 减小至 1 时，虽然此时满足限流约束，但系统会在平衡点约束与同步稳定约束的共同作用下失稳；由 $A$ 点调整至 $B$ 点后，$B$ 点重新进入可行域。仿真所得现象与理论分析结果保持一致。

### 4.2　设备控制参数对参数可行域影响分析

1) 有功功率-频率控制环节对参数可行域影响

改变 GFM-ESS 的惯性常数 $H$ 与等效阻尼系数 $K_D$，得到的参数可行域如图 12—13 所示。

可知不同惯性常数 $H$ 的取值对可行域无明显影

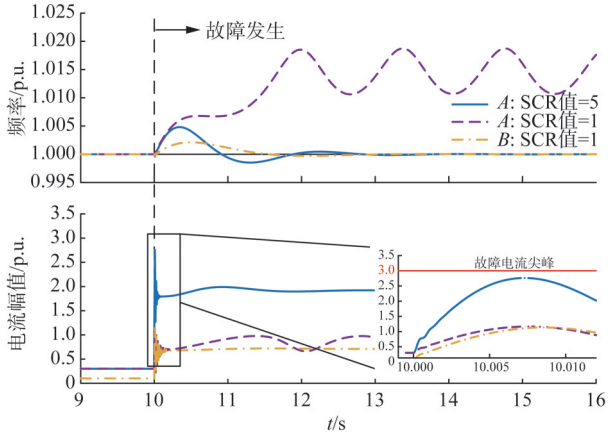



图 11 A、B对应参数点频率与电流响应对比

Fig. 11 Comparison of frequency and current responses at parameter points *A* and *B*

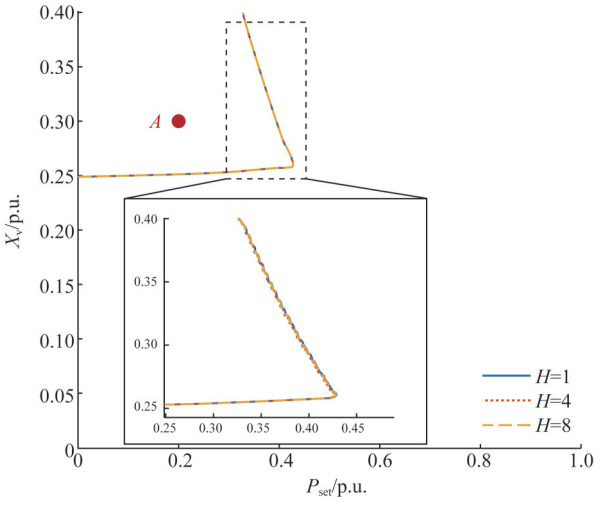



图 12 不同惯性常数 $H$ 下的参数可行域

Fig. 12 Parameter feasible regions under different $H$

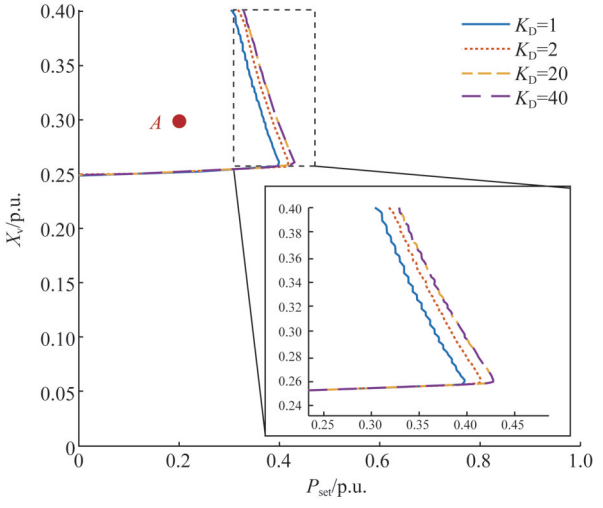



图 13 不同等效阻尼系数 $K_D$ 下的参数可行域

Fig. 13 Feasible regions under different $K_D$

响；等效阻尼系数 $K_D$ 对可行域的影响呈现边际递减特性，表现为 $K_D$ 由 1 增大至 2 时的可行域范围变化显著，随着 $K_D$ 的进一步增大，其对可行域边界的影响逐渐减弱。分析原因为：1)由式(37)可知，$K_D$ 对可行域的影响仅通过能量函数中的阻尼耗散项体现，对平衡点约束与限流约束没有影响，因此对可行域影响较小；2)由式(27)可知，动能项与相对同步角速度差相关，而系统初始状态与临界能量所处状态的 $\omega = 0$，即两种状态下的动能项相同。因此，$H$ 仅通过阻尼耗散项影响可行域，随着 $H$ 增大，阻尼耗散项的值会略有下降；而增大 $K_D$ 能通过增加阻尼耗散项来提高系统临界能量，从而扩大可行域。

选取基准工况下($P_{set}$ = 0. 2 p. u. ，$X_v$ = 0. 3 p. u. )所对应的参数点进行仿真，得到 GFM-ESS 的输出频率与输出电流响应如图 14 所示。

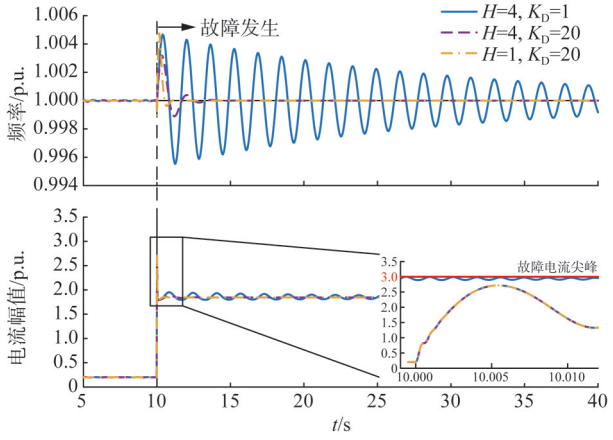



图 14 不同有功功率控制环节参数频率与电流响应对比

Fig. 14 Comparison of frequency and current responses under different active power control parameters

若 $K_D$ 取值较小，虽然故障期间 GFM-ESS 不会进入限流状态且未同步失稳，但会因等效阻尼较低而出现弱阻尼振荡。

2) 内电势限幅值对参数可行域影响

令内电势限幅值 $E_{lim}$ 分别为 1. 0 p. u. 、1. 1 p. u. 与 1. 5 p. u. ，得到的参数可行域如图 15 所示。

随着内电势限幅值的上升，参数可行域中 $X_v$ 的下限无显著变化；$P_{set}$ 的取值上限提高。分析原因为：1)暂态电流峰值时刻的内电势未达到上限，因此内电势限幅对可行域 $X_v$ 的下限无明显影响；2)限幅值上升使式(15)中 $P_c + P_m$ 的取值增大，因此相

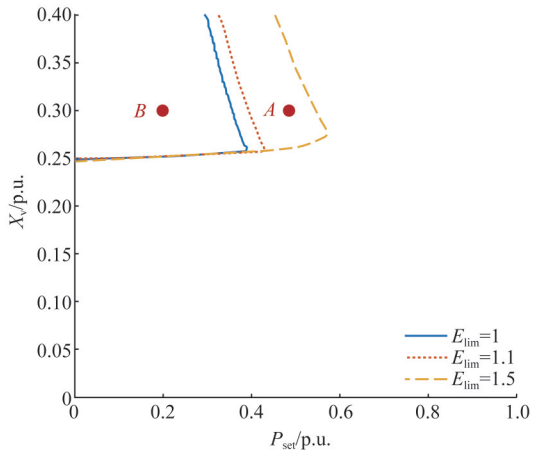



**图 15　不同内电势限幅值 $E_{lim}$ 下的参数可行域**

Fig. 15　Feasible regions under different $E_{lim}$

同 $X_v$ 取值下的 $P_{set}$ 可行范围更大。

选取图15中 $A$ 点（$P_{set}$ = 0. 5 p. u.，$X_v$ = 0. 3 p. u.）、$B$ 点（$P_{set}$ = 0. 2 p. u.，$X_v$ = 0. 3 p. u.）所对应的两组参数进行仿真，得到 GFM-ESS 的频率与电流响应如图 16 所示。

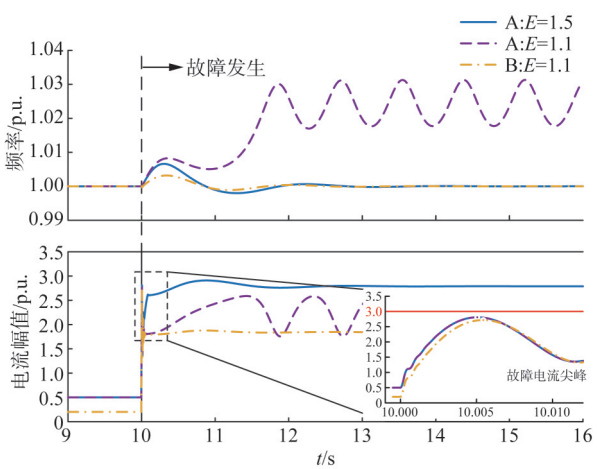



**图 16　不同内电势限幅值 $E_{lim}$ 频率与电流响应对比**

Fig. 16　Comparison of frequency and current responses under different $E_{lim}$

图中 $A$ 点和 $B$ 点参数在不同内电势下的仿真结果与理论分析一致，$A$ 点在 $E$=1. 5 时位于可行域，而 $E$ 减小至 1. 1 时将在平衡点约束与同步稳定约束的共同作用下离开可行域；由 $A$ 点调整至 $B$ 点后，$B$ 点重新进入可行域，系统恢复稳定。

## 5　结论

本文围绕量化 GFM-ESS 维持电压源暂态同步稳定的能力与构造参数可行域的问题开展研究。主要结论如下。

1）提出了一种 GFM-ESS 故障电流工程计算方法。该方法考虑线路阻抗、滤波器和虚拟阻抗的电磁暂态特性，构建了故障电流的三阶状态空间方程并基于故障前初始状态和故障期间稳定状态求取暂态峰值与稳态分量。电磁仿真结果证明了方法的准确性，可为限流约束判别提供依据。

2）构造了计及虚拟阻抗和等效阻尼系数的能量函数。通过在故障期间稳定平衡点附近对转子运动方程作阻尼主导近似处理，获得了阻尼耗散项的工程化解析表达式，并进一步建立了同步稳定判据。仿真验证结果表明所构造的同步稳定约束能够有效刻画 GFM-ESS 故障期间的同步稳定边界。

3）定义了平衡点约束、限流约束和同步稳定约束共同作用下的参数集合并刻画可行域。同时，定量揭示了网络侧与设备侧参数变化对 GFM-ESS 维持电压源暂态同步稳定能力的影响，并探究了其作用机理。

4）可行域边界影响因素的分析表明，故障电压跌落深度、网络强度 SCR 和内电势限幅值对可行域边界具有主导影响，有功功率-频率控制环节参数主要通过暂态稳定约束作用于边界刻画，对可行域的影响较小，但等效阻尼系数过小会导致 GFM-ESS 在故障后出现弱阻尼振荡，因此在实际应用中应同时考虑电压源暂态同步稳定及阻尼等因素。

后续将进一步分析多机间参数差异、线路耦合及场站级控制对单机结论推广边界的影响，并扩展本文方法以支撑构网型储能场站的参数设计与安全稳定运行。

## 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]　徐政. 高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战[J]. 南方电网技术，2020，14(2)：1－9.
XU Zheng. Three technical challenges faced by power grids with high proportion of non-synchronous machine sources[J]. Southern Power System Technology，2020，14(2)：1－9.

[3]　陈民权，康卓然，张谦，等. 电力系统大干扰稳定性分析方法综述[J]. 南方电网技术，2020，14(2)：10－24.
CHEN Minquan，KANG Zhuoran，ZHANG Qian，et al.

Review on large disturbance stability analysis methods in power system[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(2): 10 - 24.

[4] 罗树鑫, 韩应生, 余浩, 等. 构网型控制在提升高比例新能源并网系统振荡稳定性中的应用[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 39 - 48.
LUO Shuxin, HAN Yingsheng, YU Hao, et al. Application of grid-forming control in improving the oscillation stability of power systems with high proportion renewable energy integration[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 39 - 48.

[5] 谢华, 黄涛, 徐晓春, 等. 构网控制目标下系统故障特征及保护性能[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(11): 210 - 216,224.
XIE Hua, HUANG Tao, XU Xiaochun, et al. Fault characteristic and protection performance under grid-forming control objective[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(11): 210 - 216,224.

[6] 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.

[7] 吴超, 王尽颢, 王勇, 等. 考虑功率约束和电流保护的构网变流器统一化控制框架推演[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(23): 9376 - 9392.
WU Chao, WANG Jinhao, WANG Yong, et al. Derivation of a unified control framework for grid-forming converters considering power constraints and current protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(23): 9376 - 9392.

[8] 韩鹏, 徐式蕴, 汪乐天, 等. 考虑充放电模式的构网型储能变流器暂态同步稳定研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(24): 9680 - 9693.
HAN Peng, XU Shiyun, WANG Letian, et al. Research on transient synchronization stability of grid-forming power conversion system considering charge and discharge mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(24): 9680 - 9693.

[9] 李建林, 邹菲, 游洪灏, 等. 构网型储能变流器自适应低电压穿越控制策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(9): 2724 - 2737.
LI Jianlin, ZOU Fei, YOU Honghao, et al. Adaptive low-voltage ride-through control strategy for grid-forming energy storage converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(9): 2724 - 2737.

[10] 全国电力储能标准化技术委员会. 电化学储能构网型变流器技术规范: 20243219-T-524[S]. 征求意见稿, 2024.

[11] 马红月, 郑涛, 周昊, 等. 计及控制切换的逆变电源并网系统故障计算方法[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2985 - 2994.
MA Hongyue, ZHENG Tao, ZHOU Hao, et al. A fault calculation method of the inverter grid-connected system considering control strategies switching[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2985 - 2994.

[12] 郑涛, 王子鸣, 邹芃莖, 等. 电网对称短路故障时虚拟同步机电流解析计算及影响因素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1460 - 1475.
ZHENG Tao, WANG Ziming, ZOU Pengying, et al. Fault current calculation and influencing factors analysis of virtual synchronous generator under grid symmetrical short-circuit fault[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1460 - 1475.

[13] 李霞林, 贾昊琛, 禹海峰, 等. 构网变流器故障期间维持电压源特征的暂态电流解析计算及参数可行域分析[J/OL]. 中国电机工程学报, 2025 - 09 - 01. https://doi.org/10.13334/j.0258 - 8013.pcsee.251417.
LI Xialin, JIA Haochen, YU Haifeng, et al. Transient current analytical calculation and parameter feasible region analysis for grid-forming converters maintaining voltage source characteristics during faults[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025 - 09 - 01. https://doi.org/10.13334/j.0258 - 8013.pcsee.251417。

[14] 罗聪, 陈燕东, 谢志为, 等. 计及电压动态的构网型变流器多机并联系统暂态建模与稳定域估计[J]. 电工技术学报, 2025, 40(9): 2752 - 2765.
LUO Cong, CHEN Yandong, XIE Zhiwei, et al. Transient model and stability region estimation for multiple paralleled grid-forming inverter system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(9): 2752 - 2765.

[15] 付熙坤, 黄萌, 凌扬坚, 等. 功率耦合和电流限幅影响下构网型变流器的暂态同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2815 - 2825.
FU Xikun, HUANG Meng, LING Yangjian, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming converter influenced by power-coupling and current-limiting[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2815 - 2825.

[16] 彭子豪, 肖凡, 原宇腾, 等. 基于能量平衡机制的跟网-构网变流器并联系统暂态稳定性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2026, 50(6): 35 - 47.
PENG Zihao, XIAO Fan, YUAN Yuteng, et al. Transient stability enhancement strategy for paralleled grid-following and grid-forming converter based on energy balance mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2026, 50(6): 35 - 47.

[17] 赵正奎, 韩民晓, 陈来军. 主动支撑型储能变流器多机并联的暂态电压优化控制[J]. 电工技术学报, 2026, 41(9): 2991 - 3004.
ZHAO Zhengkui, HAN Minxiao, CHEN Laijun. Transient voltage optimization control for paralleled active support energy storage converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(9): 2991 - 3004.

[18] 王祺, 杨曼, 郑竞宏, 等. 构网型光储并网系统的储能参数设计与优化配置[J/OL]. 中国电机工程学报, 2026 - 01 - 26. https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20260123.1628.006.
WANG Qi, YANG Man, ZHENG Jinghong, et al. Design and optimization of energy storage parameters for grid-connected photovoltaic and energy storage systems with grid-forming control[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2026 - 01 - 26. https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20260123.1628.006.

[19] 颜湘武, 胡演, 蔡光, 等. 考虑同步环差异的并网设备故障过流水平及暂态边界分析[J/OL]. 中国电机工程学报, 2026 - 05 - 27. https://link. cnki. net/urlid/11.2107. TM. 20260527.1527.004.
YAN Xiangwu, HU Yan, CAI Guang, et al. Analysis of fault overcurrent level and transient boundary analysis of grid-connected equipment considering synchronization loop differences[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2026 - 05 - 27. https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20260527.1527.004.

[20] 杜毅, 孙华东, 郑超, 等. 计及直流动态的构网型VSC暂态稳定机理分析及改进方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(6): 2179 - 2193.

(下转第 78 页 Continued on Page 78)