

引用格式:俞晓峰,谭荣昊,唐彬彬,等.提升地区电网暂态电压安全的构网型逆变器和 STATCOM 协调优化配置[J].电力科学与技术学报,2026,41(2):64-78.

Citation: YU Xiaofeng, TAN Ronghao, TANG Binbin, et al. Coordinated optimal configuration of grid-forming inverters and STATCOMs for enhancing transient voltage security of regional power grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(2): 64-78.

# 提升地区电网暂态电压安全的构网型逆变器和 STATCOM 协调优化配置

俞晓峰<sup>1</sup>, 谭荣昊<sup>2</sup>, 唐彬彬<sup>1</sup>, 林舜江<sup>2</sup>, 程 晔<sup>1</sup>, 梁炜焜<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司河源供电局, 广东 广州 517000; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 目前, 接入地区电网中的新能源场站主要采用跟网型控制, 由于其为电流源控制特性, 不具有和传统同步发电机类似的电压支撑能力, 这会降低地区电网的暂态电压安全性, 使系统在发生短路故障或冲击负荷频繁启动时更易发生暂态电压失稳, 影响用户的安全可靠供电。基于此, 建立提升地区电网暂态电压安全的构网型逆变器和静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM) 协调优化配置模型。首先, 以最小化投资成本为目标函数, 要求系统在发生短路故障或冲击负荷启动时满足暂态安全约束, 并确保在暂态过程中新能源场站构网型逆变器的输出电流不越限, 实现低电压穿越。其次, 为快速、准确地求解此含微分方程约束的优化模型, 提出基于快速启动的四阶隐式 Adams 法, 减少传统四阶隐式 Adams 法启动时的差分时段数量, 将微分方程约束转化为少量的代数方程约束, 使模型能够被快速、准确求解。最后, 以中国某地的电网数据为例, 验证所提出优化配置模型和求解算法的有效性。

**关键词:** 暂态电压安全; 低电压穿越; 构网型逆变器; STATCOM; 四阶隐式 Adams 法

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.02.006 **中图分类号:** TM732 **文章编号:** 1673-9140(2026)02-0064-15

## Coordinated optimal configuration of grid-forming inverters and STATCOMs for enhancing transient voltage security of regional power grid

YU Xiaofeng<sup>1</sup>, TAN Ronghao<sup>2</sup>, TANG Binbin<sup>1</sup>, LIN Shunjiang<sup>2</sup>, CHENG Ye<sup>1</sup>, LIANG Weikun<sup>2</sup>

(1. Heyuan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 517000, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** At present, renewable energy stations in a regional power grid mainly adopt grid-following control. Since it has the current source control characteristic and does not have the voltage support capability similar to that of traditional synchronous generators, it will reduce the transient voltage security of the regional power grid. When short circuit faults occur or the impact loads start up frequently in the regional power grid, it is more likely to result in the transient voltage instability and thus affect the secure and reliable power supply to users. In response, a coordinated optimal configuration model of grid-forming inverters and static synchronous compensators (STATCOMs) is established to enhance the transient voltage security of regional power grids. The objective function is to minimize the investment costs, and transient safety constraints are required to be satisfied when the system is subjected to a short circuit fault or impact load startup. It is also required to ensure that the output current of the grid-forming inverters in renewable energy stations does not exceed the secure limit during the transient process, thereby achieving low voltage ride through. To solve the optimization model with differential equation constraints quickly and accurately, a fourth-order implicit Adams method based on fast startup is proposed, which reduces the number of differential periods in the startup of the traditional fourth-order implicit Adams method, and transforms the differential equation constraints into a smaller number of algebraic

收稿日期: 2025-03-21; 修回日期: 2025-07-15

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (2023A1515240075), 广东电网有限责任公司科技项目 (GDKJXM20231013)

通信作者: 林舜江 (1980—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事电力能源系统优化与控制等方面的研究; E-mail: linsjh@scut.edu.cn

equation constraints, so that the optimization model can be solved quickly and accurately. Finally, a case study on an actual regional power grid verifies the effectiveness of the proposed optimal configuration model and solution algorithm.

**Key words:** transient voltage security; low voltage ride through; grid-forming inverters; STATCOM; fourth-order implicit Adams method

随着风电和光伏等新能源发电的大量开发和并网运行,新能源发电容量在地区电网中的占比越来越高<sup>[1-3]</sup>。目前,新能源场站的并网逆变器主要采用跟网型控制方式。跟网型逆变器为等效电流源控制特性,缺乏类似传统同步发电机的动态电压支撑能力,会降低地区电网运行中的暂态电压安全性<sup>[4-6]</sup>。因此,当电网中发生的短路故障或冲击负荷频繁启动时,其可能造成暂态电压失稳,影响用户的安全可靠供电。在此背景下,亟待开展在地区电网中配置新能源构网型逆变器和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM),提供动态电压支撑。

目前,提升电网的暂态电压安全性主要通过配置 STATCOM 等动态无功支撑设备来实现。文献[7]以配置容量之和最小为目标,建立了考虑多故障暂态电压安全约束的 STATCOM 选址定容优化模型,提高了电网暂态电压安全性。文献[8]先基于暂态电压严重性的灵敏度指标进行 STATCOM 选址,再以配置成本最小化为目标进行优化定容,获得了较好的效果。文献[9]通过建立并求解 STATCOM 选址定容和发电机励磁系数调整的多目标优化模型,较好地解决了电网的暂态电压不稳定问题。针对大量新能源接入电网的暂态电压安全问题,文献[10]通过在光伏场站接入 STATCOM 来控制有功和无功功率,提高了系统故障后的电压恢复速度,提升电网的暂态电压安全性。文献[11-12]建立了考虑多新能源场站短路比约束的构网型储能及分布式调相机优化配置模型,该模型能较好地满足系统故障后的暂态电压安全要求。但这种在电网中配置 STATCOM 以提升电网暂态电压安全性的方法,在多站点配置时,会带来很高的经济成本。目前,中国很多地区电网均含有大量新能源场站,如果将其中部分新能源场站逆变器从跟网型控制改造为构网型控制,为其附近的电网提供动态电压支撑,就能有效降低大量配置 STATCOM 带来的高额经济成本。目前,针对提升地区电网暂态电压安全性的构网型逆变器和 STATCOM 协调优化配置的研究鲜见。

电网的暂态电压不安全事故可导致新能源场

站的低压脱网,影响电网的安全性。因此,应保证在暂态电压跌落过程中新能源场站的低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)。已有学者对新能源场站构网型逆变器的 LVRT 控制开展了研究。文献[13]采用直接限流方式,在电压与电流环之间设置限幅模块,使电流不超限,实现了 LVRT。文献[14-15]采用在构网逆变器输出电流越限时切换为跟网型控制的方式,实现了 LVRT。文献[16]提出了在故障期间在构网型逆变器的有功控制环中引入功角动态补偿的故障电流的控制策略,成功地抑制了故障过电流。文献[17-18]在主动支撑型构网型机组控制策略的基础上建立了虚拟控制模型,并完成了虚拟阻抗的参数设计,成功限制了短路电流,实现了 LVRT。因此,须研究如何确定构网型逆变器的虚拟阻抗参数值,使接入电网不同位置的构网型逆变器在暂态过程中的输出电流始终不超限。

协调优化配置模型中含有反映电网暂态过程的微分方程约束,求解难度大。须先将微分方程约束转化为代数方程约束。已有的转化方法有轨迹灵敏度法、能量函数法与数值积分法。文献[7]采用轨迹灵敏度法,将微分方程约束转化为线性代数约束,能快速得到优化配置结果,但其精度较低。文献[19]采用暂态能量函数法,将含微分方程约束的优化模型转化为非线性规划模型,实现模型的高效求解。但其形式复杂,且目前对含新能源场站逆变器的电网的能量函数建模还在探索阶段。文献[20]采用隐式梯形积分法,将微分方程约束转化成一系代数方程约束,将含微分方程约束优化模型转化为可以直接求解的非线性规划模型。但由于隐式梯形积分法的精度较低,只能采用小步长差分。对规模较大的电力系统而言,这可能导致转化后优化模型的模型规模巨大,求解速度慢。文献[21]针对隐式梯形积分法计算效率低的问题,提出了新的二阶正交配置法,较好地提高了求解效率,但该算法只适用同步发电机的二阶模型。文献[22-23]采用四阶隐式 Adams 法,实现对微分方程约束的大步长差分,能快速求解含微分方程约束优化模型,既保证了计算精度,又提高了计算效率。但该算法在 Adams 算法启动环节中,采用了耗时的 4 阶龙格库

塔算法,计算速度较慢,且该算法启动时的阶段是故障刚切除,状态变量变化较大的阶段,直接采用大步长计算会使计算精度变差。因此,亟需一种提升启动速度和精度的差分算法,更高效、准确地求解含微分方程约束的优化模型。

本文先建立提升地区电网暂态电压安全的构网型逆变器和 STATCOM 协调优化配置模型,以构网型逆变器改造位置、虚拟阻抗值、STATCOM 配置位置和容量为决策变量,以最小化协调配置构网型逆变器和 STATCOM 的投资成本为目标,保证电网在暂态过程中满足暂态电压安全约束和构网型逆变器输出电流不超限,实现 LVRT。然后,提出一种快速启动四阶隐式 Adams 算法,将微分方程约束转化为代数约束,提升模型求解的计算效率和精度。最后,以中国某地区电网数据作为算例,验证所提模型和算法的有效性。

## 1 构网型逆变器和 STATCOM 的动态模型

### 1.1 构网型逆变器

构网型逆变器与同步机类似,对外表现为电压源特性,具备自主构建电压的能力。

#### 1.1.1 低电压穿越特性及控制策略

根据中国在 2013 年发布的光伏发电站 LVRT 检测技术规程<sup>[24]</sup>,光伏电站的 LVRT 标准如图 1 所示。

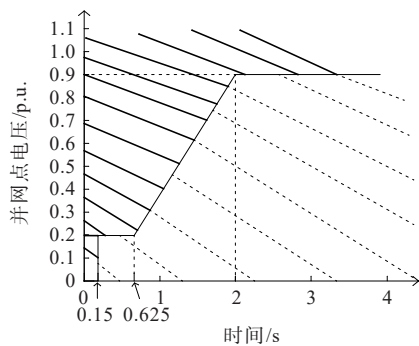


图 1 光伏电站的 LVRT 标准

Figure 1 Low voltage ride-through standard for photovoltaic power station

在图 1 中,实线区域表示该光伏电站处于 LVRT 时可不脱网继续运行,虚线区域当 LVRT 时光伏电站允许脱网。LVRT 本质是逆变器在一定的时间内承受一定的并网节点电压骤降而不脱网的能力<sup>[25]</sup>。若不考虑任何控制策略,当并网节点电压降低时,构网型逆变器的电压源控制特性可在短时间内维持内部电压稳定,故此时对电网的输出电流急剧

增大。受电力电子器件自身耐流能力所限,构网型逆变器所能承受的短路电流仅为 1.2~2.0 p.u.,这将导致逆变器内部的电力电子器件过流损坏<sup>[26]</sup>。因此,应采用一定的控制策略来限制构网型逆变器的输出电流,保护逆变器内部的电力电子器件,实现 LVRT。

在原电压环控制的基础上,级联虚拟阻抗控制可有效降低构网型逆变器在并网点电压骤降时的输出电流,实现 LVRT。虚拟阻抗控制方程为<sup>[27-28]</sup>

$$\begin{cases} E_{k0} - I_{vGdk} R_{vk} + I_{vGqk} X_{vk} = V_{vdrefk} \\ -I_{vGdk} X_{vk} - I_{vGqk} R_{vk} = V_{vqrefk} \\ E_{k0} \angle \theta_{vk0} = \dot{V}_{k0} + j\dot{I}_{vGk0} X_m \end{cases} \quad (1)$$

式中, $I_{vGdk}$ 和 $I_{vGqk}$ 分别为采用构网型控制节点 $k$ 的新能源场站注入电网电流的 $d$ 、 $q$ 轴分量; $V_{vdrefk}$ 和 $V_{vqrefk}$ 分别为采用构网型控制节点 $k$ 的新能源场站并网点电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量 $V_{vdk}$ 和 $V_{vqk}$ 的参考值; $E_{k0}$ 、 $\theta_{vk0}$ 、 $\dot{I}_{vGk0}$ 和 $\dot{V}_{k0}$ 分别为稳态时构网型逆变器的节点 $k$ 的内电势、功角、注入电网电流相量电压相量; $X_m$ 为等效电抗; $R_{vk}$ 和 $X_{vk}$ 分别为节点 $k$ 的虚拟阻抗控制环节的虚拟电阻和电抗,其取值范围为 $0 \leq R_{vk} \leq 10$ 和 $0 \leq X_{vk} \leq 10$ <sup>[17]</sup>。

#### 1.1.2 虚拟同步机控制的构网型逆变器动态模型

虚拟同步机控制的含电压控制环的构网型逆变器的动态模型为<sup>[27]</sup>

$$\begin{cases} \frac{d\theta_{vk}}{dt} = (\omega_{vk} - 1)\omega_N \\ \frac{Jd\omega_{vk}}{dt} = \frac{P_{Tk}}{\omega_s} \\ -\left(E_k^2 G_m + E_k B_m V_{vqk} - E_k G_m V_{vdk}\right) / \omega_s - D_n (\omega_{vk} - 1) \\ Q_{Tk} = -E_k^2 B_m + E_k B_m V_{vdk} + E_k G_m V_{vqk} + D_q (E_k - E_k^*) \\ V_{vdk} = V_{xk} \cos \theta_{vk} + V_{yk} \sin \theta_{vk} \\ V_{vqk} = -V_{xk} \sin \theta_{vk} + V_{yk} \cos \theta_{vk} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_{dk}}{dt} = V_{vdrefk} - V_{vdk} \\ \frac{dx_{qk}}{dt} = V_{vqrefk} - V_{vqk} \\ K_{pvd}(V_{vdrefk} - V_{vdk}) + K_{ivd} x_{dk} - V_{vqk} / X_{vi} + I_{vGdk} = I_{vgdk} \\ K_{pvq}(V_{vqrefk} - V_{vqk}) + K_{ivq} x_{qk} + V_{vdk} / X_{vi} + I_{vGqk} = I_{vgqk} \\ E_{dk} = V_{vdk} - I_{vgqk} X_m \\ E_{qk} = V_{vqk} + I_{vgdk} X_m \\ I_{vGdk} = I_{vGdk} \cos \theta_{vk} - I_{vGqk} \sin \theta_{vk} \\ I_{vGqk} = I_{vGdk} \sin \theta_{vk} + I_{vGqk} \cos \theta_{vk} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $t$  为时间;  $\theta_{vk}$  和  $\omega_{vk}$  分别为节点  $k$  的构网型逆变器的功角和角速度;  $\omega_N$  和  $\omega_s$  是同步角速度和参考角速度;  $E_k$ 、 $E_{dk}$  和  $E_{qk}$  为节点  $k$  的构网型逆变器的内电势和其  $d$ 、 $q$  轴分量;  $V_{xk}$  和  $V_{yk}$  分别为节点  $k$  电压的实部和虚部;  $D_n$  和  $D_q$  分别为阻尼系数和放大器放大系数的倒数;  $G_m$  和  $B_m$  分别为等效电导和电纳;  $X_{vt}$  为补偿电容的等效电抗;  $J$  为控制环节的惯性时间常数;  $P_{Tk}$ 、 $Q_{Tk}$  和  $E_k^*$  分别为节点  $k$  构网型逆变器的有功功率、无功功率和电势参考值;  $x_{dk}$  和  $x_{qk}$  分别为控制节点  $k$  新能源场站并网点电压的  $d$ 、 $q$  轴分量而引入的状态量;  $I_{vGxk}$  和  $I_{vGyk}$  分别为采用构网型控制节点  $k$  的新能源场站注入电网电流的实部和虚部;  $K_{pvd}$  和  $K_{ivd}$  分别为  $d$  轴电流 PI 控制环的参数;  $K_{pvq}$  和  $K_{ivq}$  均为  $q$  轴电流 PI 控制环的参数;  $I_{vGdk}$  和  $I_{vGqk}$  分别为采用构网型控制节点  $k$  的新能源场站内部输出电流的  $d$ 、 $q$  轴分量, 具体参数取值可参见文献<sup>[29]</sup>。

式(2)、(3)分别表征虚拟同步机控制环节与电压控制环节。

## 1.2 STATCOM 的动态模型

当电网母线电压跌落时, STATCOM 给其提供动态无功支撑, 促进电压恢复, 提高系统的暂态电压安全。STATCOM 的动态模型为<sup>[7]</sup>

$$\begin{cases} \frac{T_s dI_{sk}}{dt} = -I_{sk} + \frac{K_{sp}(U_{srefk} - V_k)}{X_T} \\ S_{stk} = k_{stk} S_b, S_{stk} \geq \max\{V_k | I_{sk}\} \\ I_{sxx} = \frac{V_{yk} I_{sk}}{V_k} \\ I_{syk} = -\frac{V_{xk} I_{sk}}{V_k} \\ V_k = \sqrt{V_{xk}^2 + V_{yk}^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $I_{sk}$  为 STATCOM 控制节点  $k$  的注入电流幅值;  $V_k$  为控制节点  $k$  的电压;  $U_{srefk}$  为  $V_k$  的参考值;  $S_{stk}$  为节点  $k$  的 STATCOM 的安装容量;  $K_{sp}$ 、 $X_T$  和  $T_s$  分别为 STATCOM 控制器的放大系数、等效电抗和时间常数;  $S_b$  为 STATCOM 配置容量的基值;  $k_{stk}$  为整数变量, 表示节点  $k$  的 STATCOM 配置容量基值的倍数;  $I_{sxx}$  和  $I_{syk}$  分别为控制节点  $k$  注入电流的实部和虚部, 具体参数取值可参见文献<sup>[7]</sup>。

## 2 协调优化配置模型

本节建立提升地区电网暂态电压安全的构网

型逆变器和 STATCOM 协调优化配置模型, 确保电网在发生短路故障或冲击负荷启动时保持暂态安全, 确保在暂态过程中新能源场站构网型逆变器的输出电流不越限, 实现 LVRT。

### 2.1 目标函数

以 STATCOM 的安装成本与新能源场站跟网型逆变器改造为构网型的成本之和为目标函数。决策变量为构网型逆变器改造节点、虚拟阻抗值、STATCOM 的配置节点及其容量, 即

$$\min_u \sum_{k \in \Omega_s} \mu_{sk} (C_{s0} + C_{s1} S_{stk}) + \sum_{k \in \Omega_v} \mu_{vk} (C_{v0} + C_{v1} P_{ek}) \quad (5)$$

式中, 决策向量  $u = (\mu_{sk}, \mu_{vk}, R_{vk}, X_{vk}, S_{stk})^T$ ;  $\mu_{sk}$  为 0-1 变量 (当  $\mu_{sk}=1$  时, 节点  $k$  接入 STATCOM; 当  $\mu_{sk}=0$  时, 节点  $k$  不接入 STATCOM);  $\mu_{vk}$  为 0-1 变量 (当  $\mu_{vk}=1$  时, 节点  $k$  新能源场站改造为构网型逆变器; 当  $\mu_{vk}=0$  时, 节点  $k$  新能源场站不改造为构网型逆变器);  $\Omega_s$  和  $\Omega_v$  分别为 STATCOM 的候选接入节点和构网型逆变器的候选改造节点集合;  $C_{s0}$  和  $C_{s1}$  分别为 STATCOM 的固定安装成本和与单位容量成本;  $C_{v0}$  和  $C_{v1}$  分别为构网型逆变器的固定改造成本和单位有功功率成本;  $P_{ek}$  为节点  $k$  新能源场站的额定有功功率。

### 2.2 跟网型逆变器的动态模型约束

电网中多数新能源场站逆变器采用跟网型控制, 通过锁相环获取并网点电压相量信息, 维持与电网的同步运行。其动态模型包括锁相环控制方程和外环功率控制方程分别为<sup>[27]</sup>

$$\begin{cases} \frac{d\theta_{ik}}{dt} = (\omega_{ik} - 1) \omega_N \\ \frac{d\omega_{ik}}{dt} = k_{1k} - k_{2k} (V_{xk} \sin \theta_{ik} - V_{yk} \cos \theta_{ik}) \\ - k_{3k} (\omega_{ik} - 1) - k_{4k} (V_{xk} \cos \theta_{ik} + V_{yk} \sin \theta_{ik}) (\omega_{ik} - 1) \\ k_{1k} = \frac{K_i (\omega_N L_g I_{ldk} + R_g I_{lqk})}{M_k} \\ k_{2k} = \frac{K_i}{M_k} \\ k_{3k} = -\frac{K_i L_g I_{ldk}}{M_k} \\ k_{4k} = \frac{K_p}{M_k} \\ M_k = 1 - K_p L_g I_{ldk} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases}
\frac{dx_{Pk}}{dt} = P_{\text{fre}ik} - P_{\text{fm}k} \\
\frac{dx_{Qk}}{dt} = Q_{\text{fre}ik} - Q_{\text{fm}k} \\
I_{dk} = K_{\text{pg}d}(P_{\text{fre}ik} - P_{\text{fm}k}) + K_{\text{ig}d}x_{Pk} \\
I_{qk} = K_{\text{pg}q}(Q_{\text{fre}ik} - Q_{\text{fm}k}) + K_{\text{ig}q}x_{Qk} \\
P_{\text{fm}k} = (V_{xk} \cos \theta_{ik} + V_{yk} \sin \theta_{ik}) I_{dk} \\
- (V_{xk} \sin \theta_{ik} - V_{yk} \cos \theta_{ik}) I_{qk} + (I_{dk}^2 + I_{qk}^2) R_{\text{f}} \\
Q_{\text{fm}k} = - (V_{xk} \sin \theta_{ik} - V_{yk} \cos \theta_{ik}) I_{dk} \\
- (V_{xk} \cos \theta_{ik} + V_{yk} \sin \theta_{ik}) I_{qk} + (I_{dk}^2 + I_{qk}^2) X_{\text{f}} \\
I_{xk} = I_{dk} \cos \theta_{ik} - I_{qk} \sin \theta_{ik}, I_{yk} = I_{dk} \sin \theta_{ik} + I_{qk} \cos \theta_{ik}
\end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\theta_{ik}$  和  $\omega_{ik}$  分别为跟网型控制新能源节点  $k$  的锁相环输出功角和角速度;  $I_{dk}$  和  $I_{qk}$  分别为锁相环输出电流的  $d$  轴和  $q$  轴分量;  $K_p$  和  $K_i$  分别为锁相环中 PI 控制环的参数;  $R_{\text{f}}$  和  $X_{\text{f}}$  分别为跟网型逆变器内部的等效电阻和电抗;  $k_{1k}$ 、 $k_{2k}$ 、 $k_{3k}$ 、 $k_{4k}$  和  $M_k$  分别为跟网型控制新能源节点  $k$  的中间参数;  $x_{Pk}$  和  $x_{Qk}$  分别为节点  $k$  控制新能源输出有功和无功功率而引入的状态量;  $L_g$  与  $R_g$  分别为跟网型逆变器内部的等效电感和电阻;  $P_{\text{fm}k}$  和  $Q_{\text{fm}k}$  分别为锁相环控制下节点  $k$  新能源变流器输出的有功和无功功率;  $P_{\text{fre}ik}$  和  $Q_{\text{fre}ik}$  分别为  $P_{\text{fm}k}$  和  $Q_{\text{fm}k}$  的参考设定值;  $K_{\text{pg}d}$  和  $K_{\text{ig}d}$  均为有功功率 PI 控制环中的参数;  $K_{\text{pg}q}$  和  $K_{\text{ig}q}$  均为无功功率 PI 控制环中的参数;  $I_{xk}$  和  $I_{yk}$  分别为跟网型控制节点  $k$  的新能源场站注入电网电流的实部和虚部。具体参数取值可参见文献[30]。

### 2.3 同步发电机的动态模型约束

同步发电机采用三阶动态模型和一阶励磁动态模型, 即

$$\begin{cases}
\frac{d\delta_k}{dt} = (\omega_k - 1)\omega_N \\
T_{\text{JK}} \frac{d\omega_k}{dt} = P_{\text{Tk}} - [E'_{qk} i_{qk} - (X'_{dk} - X_{qk}) i_{dk} i_{qk}] - D_k(\omega_k - 1) \\
T'_{\text{d}0k} \frac{dE'_{qk}}{dt} = E_{\text{tk}} - E'_{qk} - (X_{dk} - X'_{dk}) i_{dk} \\
T_{\text{Ek}} \frac{dE_{\text{tk}}}{dt} = -E_{\text{tk}} + K_{\text{Ak}} (V_{\text{re}ik} - \sqrt{V_{xk}^2 + V_{yk}^2}) \\
i_{dk} = \frac{(E'_{qk} - V_{qk}) X_{qk} - V_{dk} R_{\text{ak}}}{R_{\text{ak}}^2 + X'_{dk} X_{qk}} \\
i_{qk} = \frac{R_{\text{ak}}^2 + X'_{dk} X_{qk}}{R_{\text{ak}}^2 + X'_{dk} X_{qk}} \\
V_{dk} = V_{xk} \sin \delta_k - V_{yk} \cos \delta_k \\
V_{qk} = V_{xk} \cos \delta_k + V_{yk} \sin \delta_k \\
I_{xk} = E'_{qk} (G_{xk} \cos \delta_k + B_{xk} \sin \delta_k) \\
I_{yk} = E'_{qk} (B_{yk} \cos \delta_k + G_{yk} \sin \delta_k)
\end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\delta_k$ 、 $\omega_k$ 、 $E'_{qk}$  和  $E_{\text{tk}}$  分别为节点  $k$  的同步发电机的功角、角速度、暂态电势和励磁电势;  $i_{dk}$  和  $i_{qk}$  分别为发电机的  $d$  轴和  $q$  轴电流;  $X_{qk}$  为节点  $k$  发电机的  $q$  轴同步电抗;  $V_{dk}$  和  $V_{qk}$  分别为发电机的  $d$  轴和  $q$  轴电压幅值;  $D_k$ 、 $P_{\text{Tk}}$ 、 $X_{dk}$  和  $X'_{dk}$  分别为节点  $k$  发电机的阻尼系数、机械功率、 $d$  轴同步电抗和暂态电抗;  $T_{\text{JK}}$ 、 $T'_{\text{d}0k}$ 、 $T_{\text{Ek}}$  和  $K_{\text{Ak}}$  分别为节点  $k$  的发电机的惯性时间常数、暂态开路时间常数、励磁绕组时间常数和放大系数;  $V_{\text{re}ik}$  为节点  $k$  的参考电压;  $X_{qk}$  和  $R_{\text{ak}}$  为节点  $k$  同步发电机的  $q$  轴同步电抗和电枢电阻;  $I_{xk}$  和  $I_{yk}$  分别为节点  $k$  的注入电网电流的实部和虚部;  $G_{xk}$ 、 $B_{xk}$ 、 $B_{yk}$ 、 $G_{yk}$  分别为节点  $k$  发电机计及凸极效应后并入网络的导纳, 具体表达式和该动态模型中的参数可参见文献[7]。

### 2.4 负荷的动态模型约束

#### 2.4.1 常规负荷动态模型的约束

常规负荷采用三阶机电暂态感应电动机并联恒阻抗动态模型, 即<sup>[31]</sup>

$$\begin{cases}
\frac{de'_{xk}}{dt} = s_k \omega_N e'_{yk} - \frac{e'_{xk}}{T_{\text{d}01}} \\
- (x_k - x'_k) \frac{r_{1k}(V_{yk} - e'_{yk}) - x'_k(V_{xk} - e'_{xk})}{T_{\text{d}01}(r_{1k}^2 + x_k'^2)} \\
\frac{de'_{yk}}{dt} = -s_k \omega_N e'_{xk} - \frac{e'_{yk}}{T_{\text{d}01}} \\
+ (x_k - x'_k) \frac{r_{1k}(V_{xk} - e'_{xk}) + x'_k(V_{yk} - e'_{yk})}{T_{\text{d}01}(r_{1k}^2 + x_k'^2)} \\
T_{\text{JL}} \frac{ds_k}{dt} = K_{\text{L}} [a + (1-a)(1-s_k)^{n_p}] - \\
\frac{(r_{1k} e'_{yk} + x'_k e'_{xk})(V_{yk} - e'_{yk}) + (r_{1k} e'_{xk} - x'_k e'_{yk})(V_{xk} - e'_{xk})}{(r_{1k}^2 + x_k'^2)} \\
I_{xk} = \frac{r_{1k} e'_{yk} + x'_k e'_{xk}}{K_{\text{Hk}}(r_{1k}^2 + x_k'^2)}, I_{yk} = \frac{r_{1k} e'_{xk} - x'_k e'_{yk}}{K_{\text{Hk}}(r_{1k}^2 + x_k'^2)}
\end{cases} \quad (9)$$

式中,  $e'_{xk}$  和  $e'_{yk}$  分别为节点  $k$  感应电动机的暂态电势的实部和虚部;  $s_k$  为节点  $k$  的转差率;  $T_{\text{d}01}$  分别为暂态电势的衰减时间常数;  $r_{1k}$ 、 $x_k$ 、 $x'_k$  和  $T_{\text{JL}}$  分别为节点  $k$  的感应电动机的定子电阻、同步电抗、暂态电抗和转子惯性时间常数;  $K_{\text{L}}$  为负载率;  $a$  为机械负载中与转速无关部分所占的百分率;  $n_p$  为负载指数;  $K_{\text{Hk}}$  为节点  $k$  感应电动机的容量折算比, 即系统容量基值与电动机容量基值之比。具体参数取值参见文献[7]。

#### 2.4.2 冲击负荷动态模型的约束

地区电网中常见的冲击负荷有钢铁厂轧钢机和高铁牵引等负荷。这些都是典型的电动机负载

型冲击负荷,其启动瞬间的冲击电流可为额定值的数十倍,引起电力系统电压和频率的急剧波动。但传统的感应电动机并联恒阻抗动态模型无法准确描述电动机启动瞬间的冲击动态特性。本文在对冲击负荷采用三阶机电暂态感应电动机并联恒阻抗动态模型的基础上,采用最小二乘法辨识关键动态参数的时变值,即

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{K_{\text{Hk}}(t), r_{1k}(t), x'_k(t)} \sum_b \left( (z_{xk}^{(b)})^2 + (z_{yk}^{(b)})^2 \right) \\ \text{s.t.} \frac{r_{1k}(t)e^{i(b)} + x'_k(t)e^{i(b)}}{K_{\text{Hk}}(t)(r_{1k}^2(t) + x_k'^2(t))} - I_{xk}^{(b)} = z_{xk}^{(b)} \\ \frac{r_{1k}(t)e^{i(b)} - x'_k(t)e^{i(b)}}{K_{\text{Hk}}(t)(r_{1k}^2(t) + x_k'^2(t))} - I_{yk}^{(b)} = z_{yk}^{(b)} \end{array} \right. \quad (10)$$

式(9)

式中,  $z_{xk}^{(b)}$  和  $z_{yk}^{(b)}$  分别为测量电流与冲击负荷模型计算得到的电流之间的偏差的第  $b$  个样本;  $I_{xk}^{(b)}$  和  $I_{yk}^{(b)}$  分别为  $I_{xk}$  和  $I_{yk}$  的第  $b$  个样本;  $e_{xk}^{i(b)}$  和  $e_{yk}^{i(b)}$  分别为  $e_{xk}'$  和  $e_{yk}'$  的第  $b$  个样本;  $K_{\text{Hk}}(t)$ 、 $r_{1k}(t)$  和  $x'_k(t)$  分别为  $K_{\text{Hk}}$ 、 $r_{1k}$  和  $x'_k$  的时变值。

先根据历史实测数据样本中冲击负荷启动过程的节点电压和注入电流  $V_{xk}$ 、 $V_{yk}$  和  $I_{xk}$ 、 $I_{yk}$ , 并基于最小二乘法求解优化模型(即式(10));再辨识出冲击负荷启动过程的时变动态参数  $K_{\text{Hk}}(t)$ 、 $r_{1k}(t)$  和  $x'_k(t)$  值,并将其代入式(9),得到准确的冲击负荷启动过程的动态模型;然后,当冲击负荷启动,电流回到相对稳定状态后,动态参数取值改为普通负荷的参数值;最后用式(9)去描述其正常运行动态过程。

另外,协调优化配置模型还包括式(1)~(3)构网型逆变器动态模型、式(4)的 STATCOM 动态模型。其中,式(1)为关于虚拟阻抗的约束条件,式(2)、(3)为含电压控制环的虚拟同步机的控制动态模型。

## 2.5 网络运行约束

网络运行约束包括故障前稳态潮流方程约束和暂态过程中各个节点电压和电流关系的代数方程组约束。

故障前稳态潮流方程约束为<sup>[32-33]</sup>

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Gk} + P_{ek} - P_{Lk} = \\ V_{xk0} \sum_{j=1}^n (G_{kj} V_{xj0} - B_{kj} V_{yj0}) + V_{yk0} \sum_{j=1}^n (G_{kj} V_{yj0} + B_{kj} V_{xj0}) \\ Q_{Gk} + Q_{ek} + \mu_{sk} V_{k0} I_{sk0} - Q_{Lk} = \\ V_{yk0} \sum_{j=1}^n (G_{kj} V_{xj0} - B_{kj} V_{yj0}) - V_{xk0} \sum_{j=1}^n (G_{kj} V_{yj0} + B_{kj} V_{xj0}) \end{array} \right. \quad (11)$$

式中,  $P_{Gk}$  和  $Q_{Gk}$  分别为节点  $k$  同步发电机稳态时输出的有功和无功功率;  $P_{ek}$  和  $Q_{ek}$  分别为节点  $k$  新能源场站稳态时输出的有功和无功功率;  $P_{Lk}$  和  $Q_{Lk}$  分别为节点  $k$  普通负荷和冲击负荷稳态时吸收的有功和无功功率;  $I_{sk0}$  为稳态时节点  $k$  STATCOM 注入节点的电流幅值;  $V_{k0}$ 、 $V_{xk0}$  和  $V_{yk0}$  分别为稳态时节点  $k$  电压的幅值、实部和虚部;  $G_{kj}$  和  $B_{kj}$  分别为节点  $k, j$  之间的互电导和互电纳;  $n$  为系统的总节点数。

暂态过程中各个节点电压和电流关系为

$$I + \mu_s I_s + \mu_v I_v + (1 - \mu_v) I_f = (Y_0 + Y') V \quad (12)$$

式中,  $V = (V_{x1}, V_{y1}, V_{x2}, V_{y2}, \dots, V_{xn}, V_{yn})^T$  为节点电压向量;  $Y_0$  为网络节点导纳矩阵;  $Y' = \text{diag}(Y'_1, Y'_2, \dots, Y'_n)$  为由发电机和负荷并入网络的导纳组成的矩阵,具体表达式可参见文献[7];  $I = (I_{x1}, I_{y1}, I_{x2}, I_{y2}, \dots, I_{xn}, I_{yn})^T$  为由同步发电机和负荷节点的注入电流组成的向量;  $I_s = (I_{sx1}, I_{sy1}, I_{sx2}, I_{sy2}, \dots, I_{sxn}, I_{syn})^T$  为由待选的 STATCOM 安装节点注入电流组成的向量;  $I_v = (I_{vGx1}, I_{vGy1}, I_{vGx2}, I_{vGy2}, \dots, I_{vGxn}, I_{vGyn})^T$  为由待选的改造为构网型逆变器的新能源场站节点注入电流组成的向量;  $I_f = (I_{fx1}, I_{fy1}, I_{fx2}, I_{fy2}, \dots, I_{fxn}, I_{fyn})^T$  为跟网型逆变器新能源场站节点注入电流组成的向量;  $\mu_s = \text{diag}(\mu_{s1}, \mu_{s2}, \dots, \mu_{sn})$  和  $\mu_v = \text{diag}(\mu_{v1}, \mu_{v2}, \dots, \mu_{vn})$  均为由二进制变量组成的对角矩阵。

## 2.6 暂态安全约束

当电力系统中发生故障时,按照中国目前的暂态电压安全性标准,故障清除 1 s 时的母线电压应恢复到 0.75 p.u. 以上:

$$V_k(t_c + t_{\text{lim}}) \geq V_{\text{lim}} \quad (13)$$

式中,  $V_k$  为母线  $k$  的电压幅值;  $t_c$  为故障清除时间;  $t_{\text{lim}}$  为暂态电压安全判据的电压恢复时间,其值为 1 s;  $V_{\text{lim}}$  为暂态电压安全判据的临界电压,其值为 0.75 p.u.。

在冲击负荷启动过程中,按照运行标准对系统暂态电压安全性的要求,母线电压跌落不超出电压安全运行范围,即

$$V_{k\text{min}} \leq V_k(t) \leq V_{k\text{max}} \quad (14)$$

式中,  $V_k(t)$  为母线  $k$  在  $t$  时刻的电压幅值;  $V_{k\text{min}}$ 、 $V_{k\text{max}}$  分别为  $V_k(t)$  下限和上限,  $V_{k\text{min}}$ 、 $V_{k\text{max}}$  分别取值为 0.9、1.1 p.u.。

当系统中发生故障或冲击负荷启动时,构网型逆变器并网点的电压骤降,为使构网型逆变器内部电力电子器件在LVRT时不会过流损坏,逆变器的输出电流应不超出允许最大值,即

$$\sqrt{I_{vGdk}^2(t) + I_{vGqk}^2(t)} \leq I_{vG \max k} \quad (15)$$

式中,  $I_{vGdk}(t)$ 、 $I_{vGqk}(t)$  分别为节点  $k$  的构网型逆变器在  $t$  时刻注入电网电流  $d$ 、 $q$  轴分量;  $I_{vG \max k}$  为节点  $k$  的构网型逆变器输出电流的允许最大值,取其值为额定值的 1.8 倍。

以平衡节点同步发电机功角为参考,其余发电机和新能源逆变器的相对功角不超过  $150^\circ$ 。其将作为暂态过程中系统保持功角稳定的判据,即

$$\begin{cases} |\delta_k(t) - \delta_{\text{ref}}(t)| \leq \delta_{\max} \\ |\theta_k(t) - \delta_{\text{ref}}(t)| \leq \delta_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\delta_{\text{ref}}(t)$  为  $t$  时刻平衡节点同步发电机的功角;  $\delta_k(t)$  为  $t$  时刻节点  $k$  的同步发电机的功角;  $\theta_k(t)$  为  $t$  时刻节点  $k$  新能源场站逆变器的功角;  $\delta_{\max}$  为各同步发电机或新能源场站逆变器功角与参考机组之差的最大值,取其值为  $150^\circ$ 。

综上所述,式(1)~(9), (11)~(16)构成了提升地区电网暂态电压安全的构网型逆变器和 STATCOM 的协调优化配置模型。其也可表示为紧凑形式:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{u}} f(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{g}(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ v_1(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \\ v_2(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

式中,  $\mathbf{u}$  为决策向量;  $\mathbf{x}$  为状态向量;  $\mathbf{y}$  为中间向量;  $f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  为目标函数;  $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  为模型中微分方程约束的右边;  $v_1(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  为模型中的等式约束;  $v_2(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  为模型中的不等式约束。

在本文提出的协调优化配置模型中,同时优化虚拟阻抗参数值  $R_{vk}$  和  $X_{vk}$ , 这能保证构网型逆变器在暂态低电压时的输出电流在给定的安全范围,减小构网型逆变器在电网故障和冲击负荷启动时提供给电网的输出电流,也会降低其对电网的无功支撑。因此,须配置更大容量的 STATCOM, 给电网提供足够的无功支撑。

### 3 协调优化配置模型的求解方法

文 2 建立的构网型逆变器和 STATCOM 的协

调优化配置模型中包含微分方程约束,无法采用目前的商用求解器简易分支定界(simple branch and bound, SBB)直接求解。本文提出一种快速启动的四阶隐式 Adams 法,对该微分方程约束进行差分化。

#### 3.1 基于快速启动的四阶隐式 Adams 法

采用四阶隐式 Adams 法对式(17)中的微分方程约束进行差分化处理:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \frac{1}{24} h_2 (9\mathbf{g}(\mathbf{x}_{i+1}, \mathbf{y}_{i+1}) + \\ 19\mathbf{g}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i) - 5\mathbf{g}(\mathbf{x}_{i-1}, \mathbf{y}_{i-1}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}_{i-2}, \mathbf{y}_{i-2})) \end{aligned} \quad (18)$$

式中,  $h_2$  为差分步长。

由式(18)可知,计算第  $i+1$  个时段状态向量值  $\mathbf{x}_{i+1}$  须已知第  $i$ 、 $i-1$  和  $i-2$  这 3 个时段的向量值。在初始计算时只有第 1 个时段的变量值,故此时的四阶隐式 Adams 法无法自启动递推计算,应借助其他算法先求得步长  $h_2$  下第 2 和 3 个时段的变量值后,才能根据式(18)进行后续时段的递推计算。

常用的可以自启动的差分算法有隐式梯形积分法、四阶龙格-库塔法等。当采用步长  $h_2$  的四阶隐式 Adams 法进行差分计算时,若采用步长为  $h_0$  的隐式梯形积分法进行启动运算,则须计算  $2h_2/h_0$  个时段。隐式梯形积分法是 2 阶精度的数值算法,  $h_0$  不能取太大,故采用隐式梯形积分法会使模型规模变大。若采用四阶龙格库塔法作为四阶隐式 Adams 法启动计算,须先计算的时段状态,如图 2 所示。从图 2 中可以看出,若采用四阶龙格-库塔法进行启动运算,则计算  $\mathbf{x}_{i+1}$  须额外计算  $\mathbf{x}_{i+0.25}$ 、 $\mathbf{x}_{i+0.5}$  和  $\mathbf{x}_{i+0.75}$ , 即启动时通过初始状态  $\mathbf{x}_0$  逐步迭代计算得到  $\mathbf{x}_{0.25}$ 、 $\mathbf{x}_{0.5}$  和  $\mathbf{x}_{0.75}$ , 将这 4 个时段的信息加权,得到  $\mathbf{x}_1$ 。同理可知,可由  $\mathbf{x}_1$  计算得到  $\mathbf{x}_{1.25}$ 、 $\mathbf{x}_{1.5}$  和  $\mathbf{x}_{1.75}$ , 再得到  $\mathbf{x}_2$ 。这样就得到 3 个间隔为  $h_2$  时段的变量值,即启动结束。所以,启动时须先计算如图 2 中所示的除了初始状态  $\mathbf{x}_0$  以外的 8 个时段变量值。因此,为使所建立的协调优化配置模型进行差分后的时段数较少,降低模型规模和提高求解速度,本文提出一种可减少启动时所需的计算时段数的快速启动方法。

引入隐式梯形积分法和三阶隐式 Adams 法进行启动计算,对应的差分表达式为

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \frac{h_0 (g(\mathbf{x}_{i+1}, \mathbf{y}_{i+1}) + g(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i))}{2} \quad (19)$$

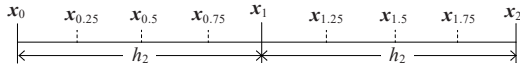


图 2 采用四阶龙格-库塔法作为四阶隐式 Adams 法启动计算需先计算的时段状态

Figure 2 Initial states required to be calculated at first when using the fourth-order Runge-Kutta method as the startup calculation of the fourth-order implicit Adams method

$$x_{i+1} = x_i + \frac{h_1(5g(x_{i+1}, y_{i+1}) + 8g(x_i, y_i) - g(x_{i-1}, y_{i-1}))}{12} \quad (20)$$

式中,  $h_1$  为三阶隐式 Adams 法的差分步长。

四阶隐式 Adams 法的步长  $h_2$  与隐式梯形积分法的步长  $h_0$  的关系为

$$h_2 = 2^\sigma h_0, \sigma \in \mathbb{Z}^+ \quad (21)$$

式中,  $\sigma$  为参数;  $\mathbb{Z}^+$  为自然数集合。

隐式梯形积分法的差分步长  $h_0$  也被称为所提算法的初始步长。

以  $\sigma=2$  为例, 所提出的快速启动算法得到的时间序列和使用的差分算法如图 3 所示。在图 3 中, 括号内的 2 个值分别表示时段和计算下一时段变量值所采用的差分算法,  $\sigma$  分别取 2、3、4 时所采用的差分算法式依次为 (19)、(20)、(18)。从初始时段开始, 先采用式 (19), 以步长为  $h_0$  计算得到  $t=h_0$  的变量值; 对间隔为  $h_0$  的 2 个时段的变量值, 根据式 (20) 以步长  $h_0$  计算得到  $t=2h_0$  的变量值; 对于有间隔为  $2h_0$  的 2 个时段的变量值, 可根据式 (20), 以步长  $2h_0$ , 计算得到  $t=4h_0$  的变量值; 类似地, 根据式 (20), 以步长为  $4h_0$  计算得到  $t=8h_0$  的变量值。这样就得到了步长为  $h_2=2^2h_0$  的 3 个时段  $t$  分别为 0、 $h_2$  和  $2h_2$  的变量值, 启动结束。从图 3 中可以看处, 相比于采用四阶龙格-库塔法进行启动计算所需的 8 个时段, 采用本文所提的快速启动算法在  $\sigma=2$  时只须先计算 4 个时段; 且在启动时采用了变步长方法对时间进行了细分, 计算精度也得到了提高。

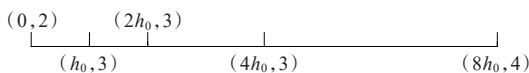


图 3  $\sigma=2$  时的启动计算时段

Figure 3 Startup calculation periods at  $\sigma=2$

所提出的快速启动算法的详细流程如图 4 所示。

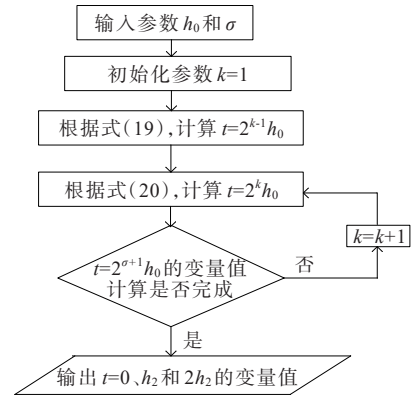


图 4 所提出的快速启动算法的流程

Figure 4 Flowchart of the proposed fast startup algorithm

### 3.2 协调优化配置模型的求解方法

采用所提出的基于快速启动的四阶隐式 Adams 法, 对协调优化配置模型式 (17) 中的微分方程约束进行差分转化求解。在故障发生和冲击负荷启动过程中, 系统状态变量快速变化, 故使用小步长进行计算, 令  $\sigma=0$ , 快速启动算法, 以故障发生时作为初始时刻, 即可得到小步长下的启动方式。在故障切除和冲击负荷启动完成后, 当系统状态变量变化相对平缓时, 可采用大步长进行迭代计算, 令  $\sigma=3$ , 快速启动算法, 以故障切除时作为初始时刻, 即可得到大步长下的启动方式。通过采用这种变步长策略, 既能保证较高的计算精度, 还能提高计算效率。

由此, 将所建立的优化配置模型的约束, 也就是式 (17) 中的微分方程约束通过采用所提出的基于快速启动的四阶隐式 Adams 法进行差分化后, 即可转化为混合整数非线性规划模型

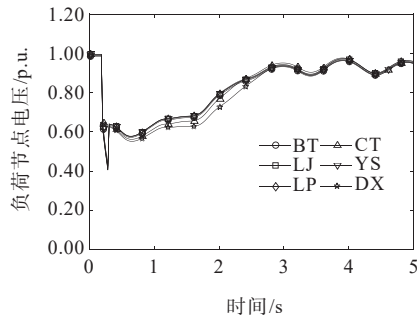
$$\begin{cases} \min_u f(u, x, y) \\ \text{s.t. 式(18)~(20)} \\ v_1(u, x, y) = 0, v_2(u, x, y) \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

可通过调用 SBB 直接求解之。

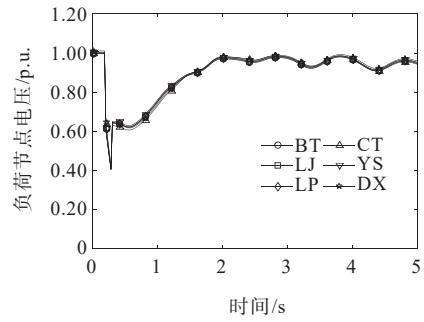
## 4 算例分析

为验证所提出模型和算法的有效性, 以中国某地区电网数据为实例, 进行仿真计算。该电网的拓扑连接如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 该电网包含 459 个节点, 572 条支路, 18 台同步发电机, 2 个风电场和 9 个光伏电站共 11 个跟网型控制的新能源站, 147 个负荷 (其中包括 14 个冲击负荷)。将发生短路故障的线路两端节点和冲击负荷所在的 6 个节点 SZ、KG、TL、RS、SY 和 XZ 设置为

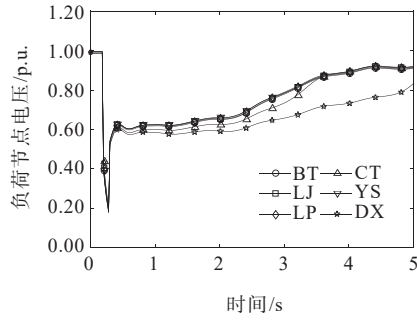




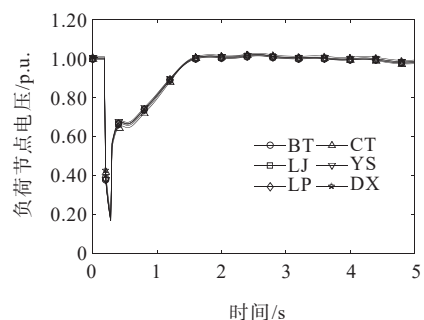
(a)故障 1



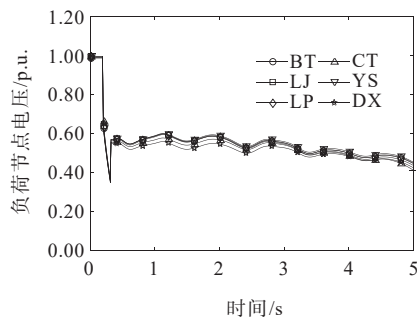
(a)故障 1



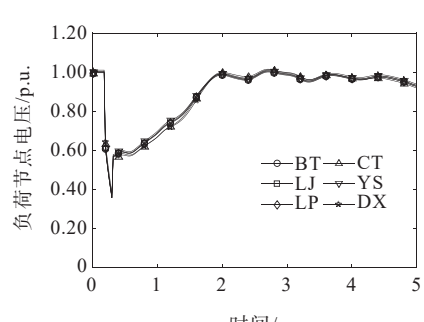
(b)故障 2



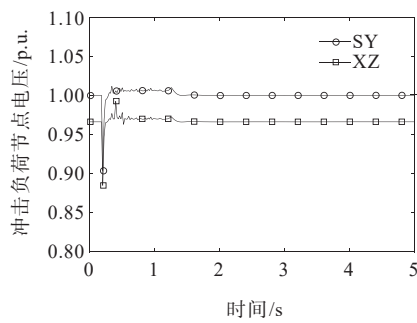
(b)故障 2



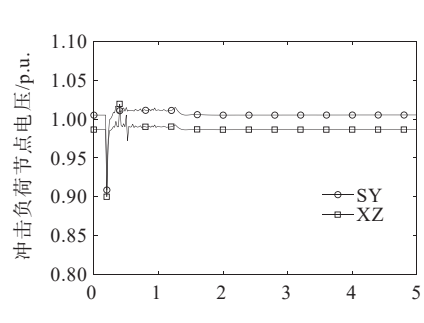
(c)故障 3



(c)故障 3



(d)冲击负荷启动



(d)冲击负荷启动

图 6 配置前的负荷电压变化曲线

Figure 6 Load voltage change curves before configuration

表 2 协调优化配置结果

Table 2 Solutions of coordinated optimal configuration

| STATCOM<br>配置节点 | 容量/<br>Mvar | 构网型逆变器<br>改造节点 | 虚拟阻抗值<br>( $R_v + jX_v$ ) |
|-----------------|-------------|----------------|---------------------------|
| SZ              | 410         | TH 光伏          | $9.73 + j10.00$           |
| TL              | 200         | MD 光伏          | $10.00 + j5.57$           |

图 7 协调优化配置后的负荷母线电压变化曲线

Figure 7 Load bus voltage change curves after coordinated optimal configuration

击负荷启动时的节点 XZ 提供动态无功支撑。这些措施得这些节点在短路故障后和冲击负荷启动后的电压得到快速恢复。由此可见,在此地区电网中配置构网型逆变器和 STATCOM 能有效提

升其暂态电压安全性,确保系统在发生短路故障或面对冲击负荷启动的情况下,仍能维持暂态电压安全。

为进一步验证本文所提出算法的准确性,对协调优化配置后系统的这4个暂态过程进行仿真。在暂态过程中,所提算法在暂态过程各阶段的平均误差见表3。在表3中,平均误差为故障中这6个电压跌落最严重节点或2个冲击负荷启动节点的暂态过程的电压与参考曲线电压在每个时刻的平均偏差的平均值,该参考曲线通过步长为0.002 s的隐式梯形积分法的时域仿真得到。

表3 所提算法在暂态过程各阶段的平均误差

Table 3 Average errors of the proposed algorithm in different stages during transient process

| 暂态事件   | 故障发生时或冲击负荷启动时/p.u.    | 故障切除后或冲击负荷启动后/p.u.    |
|--------|-----------------------|-----------------------|
| 故障1    | $1.57 \times 10^{-3}$ | $4.93 \times 10^{-3}$ |
| 故障2    | $1.32 \times 10^{-3}$ | $5.07 \times 10^{-3}$ |
| 故障3    | $2.16 \times 10^{-3}$ | $6.28 \times 10^{-3}$ |
| 冲击负荷启动 | $5.47 \times 10^{-4}$ | $8.91 \times 10^{-4}$ |

由表3可知,故障发生、冲击负荷启动时和故障切除后、冲击负荷启动后的平均误差均在 $10^{-3} \sim$

$10^{-4}$ 数量级;故障切除后和冲击负荷启动后,虽状态变量波动幅度较小,但平均误差较故障发生时和冲击负荷启动时的平均误差稍大。这是因为采用了大步长仿真降低了计算精度,但总体精度仍在可接受范围内。

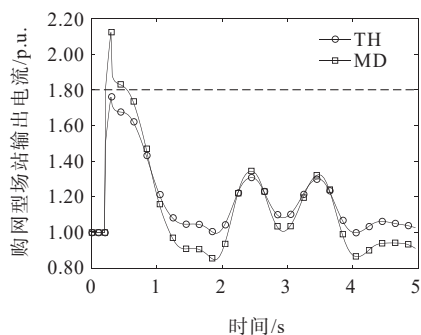
#### 4.2 虚拟阻抗参数优化前后的对比分析

优化虚拟阻抗参数前后的协调优化配置结果对比见表4。故障1的优化前、后的构网型逆变器输出电流变化对比如图8所示。由表4与图8可知,没有优化虚拟阻抗参数值时所需配置的STATCOM容量更少,成本更低。这是因为没有优化虚拟阻抗时,无法将构网型控制新能源场站在暂态过电压时的输出电流限制在给定的安全限值内。构网型控制的新能源场站在电网故障和冲击负荷启动时给电网提供更多输出电流,对电网的无功支撑作用更大,但其输出电流过大会使得电力电子器件损坏,造成光伏电站因低电压穿越失败而脱网,影响电网安全可靠供电。从图8中还可以看出,优化的虚拟阻抗参数值在暂态低电压时能有效将构网型新能源场站的输出电流控制在不超过给定的安全限值范围,保障光伏电站能在低电压条件下的成功穿越而不脱网,确保电网系统的安全、可靠供电。

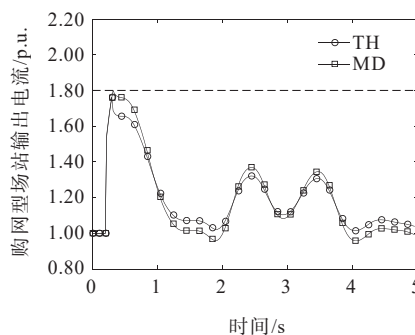
表4 优化虚拟阻抗参数前后的协调优化配置方案对比

Table 4 Comparison of the solutions of coordinated optimal configuration before and after optimizing virtual impedance parameters

| 虚拟阻抗环节 | STATCOM配置节点的容量/Mvar | 构网型逆变器改造节点 | 虚拟阻抗( $R_v+jX_v$ )值 | 成本/万元  | 计算时间/s   |
|--------|---------------------|------------|---------------------|--------|----------|
| 优化参数   | SZ:410              | TH光伏       | $9.73+j10.00$       | 18 500 | 1 737.02 |
| 优化参数   | TL:200              | MD光伏       | $10.00+j5.57$       | 18 500 | 1 737.02 |
| 未优化参数  | SZ:360              | TH光伏       | $6.76+j3.91$        | 18 100 | 1 899.86 |
| 未优化参数  | TL:230              | MD光伏       | $6.76+j3.91$        | 18 100 | 1 899.86 |



(a) 未优化参数



(b) 优化参数后

图8 故障1的优化前、后的构网型逆变器输出电流变化对比

Figure 8 Grid-forming inverter output currents under fault 1 before and after optimization

进一步分析虚拟阻抗的取值变化对构网型逆变器无功支撑能力影响。类似地,以故障 1 为例,对虚拟阻抗取值变化进行灵敏度分析,结果见表 5。由表 5 可知,随着虚拟阻抗取值的增大,各节点故障

切除后 1.00 s 的电压最低值会下降。这是因为虚拟阻抗值的增大使构网型逆变器的输出电流减小,其对电网的无功支撑能力也会降低。

表 5 虚拟阻抗参数的灵敏度分析

Table 5 Sensitivity analysis of virtual impedance parameters

| 虚拟阻抗取值                                       | 故障切除 1 s 后<br>最低电压/p.u. | 构网型逆变器<br>最大电流/p.u. |
|--|-------------------------|---------------------|
| TH:(9.73+j10.00)×1.10, MD:(10.00+j5.57)×1.10 | 0.831                   | 1.626               |
| TH:(9.73+j10.00)×1.05, MD:(10.00+j5.57)×1.05 | 0.836                   | 1.742               |
| TH:9.73+j10.00, MD:10.00+j5.57               | 0.840                   | 1.800               |
| TH:(9.73+j10.00)×0.95, MD:(10.00+j5.57)×0.95 | 0.843                   | 1.872               |
| TH:(9.73+j10.00)×0.90, MD:(10.00+j5.57)×0.90 | 0.845                   | 1.933               |

4.3 不同设备配置条件的结果对比分析

不同设备配置条件下的优化配置结果对比见表 6。由表 6 可知,单独配置 STATCOM 时对应的成本要比协调优化配置时的高。这是因为配置更大容量 STATCOM 能够提供更大的动态无功支

撑,促进节点电压的快速恢复。但多个故障地点和冲击负荷分布在电网中的不同位置将导致 STATCOM 的配置成本比较高,而改造容量小且分布广泛的新能源场站使其提供动态无功支撑,不仅能发挥同样效果,还更具经济性。

表 6 不同设备配置情况下的优化配置结果对比

Table 6 Comparison of the solutions of optimal configuration under different device configuration conditions

| 配置情况         | STATCOM 配置<br>节点和容量/Mvar | 构网型逆变器<br>节点 | 虚拟阻抗值<br>( $R_v+jX_v$ ) | 成本/<br>万元 | 计算时间/<br>s |
|--------------|--------------------------|--------------|-------------------------|-----------|------------|
| 协调优化配置       | SZ:410                   | TH 光伏        | 9.73+j10.00             | 18 500    | 1 737.02   |
|              | TL:200                   | MD 光伏        | 10.00+j5.57             |           |            |
| 单独配置 STATCOM | SZ:440<br>TL:350         | —            | —                       | 19 800    | 1 513.50   |

4.4 不同差分算法的对比分析

采用不同的微分方程差分算法得到的优化配置方案对比见表 7。在表 7 中,所提出算法故障时和

冲击负荷启动时采用的步长  $h_{2f}=h_0=0.02$  s,故障后和冲击负荷启动后采用的步长  $h_{2c}=2^r h_0$ 。由表 7 可知,当  $h_{2c}=0.02$  s 时,采用所提出算法进行差分计算

表 7 不同微分方程差分算法优化配置结果对比

Table 7 Comparison of the solutions of optimal configuration among different differential equation difference algorithms

| 差分算法                                       | STATCOM 配置节<br>点和容量/Mvar | 构网型逆变器<br>节点   | 虚拟阻抗值<br>( $R_v+jX_v$ ) | 成本/<br>万元 | 计算时间/<br>s |
|--|--------------------------|----------------|-------------------------|-----------|------------|
| 所提出算法( $h_{2c}=0.16$ s)                    | SZ:410<br>TL:200         | TH 光伏<br>MD 光伏 | 9.73+j10<br>10+j5.57    | 18 500    | 1 737.02   |
| 启动方法为四阶龙格—库塔法的 Adams<br>( $h_{2c}=0.16$ s) | SZ:410<br>TL:210         | TH 光伏<br>MD 光伏 | 9.73+j10<br>10+j5.57    | 18 700    | 3 087.98   |
| 启动方法为隐式梯形积分法的 Adams<br>( $h_{2c}=0.16$ s)  | SZ:410<br>TL:210         | TH 光伏<br>MD 光伏 | 9.73+j10<br>10+j5.57    | 18 900    | 3 622.18   |
| 所提出算法( $h_{2c}=0.08$ s)                    | SZ:410<br>TL:200         | TH 光伏<br>MD 光伏 | 9.73+j10<br>10+j5.57    | 18 500    | 8 516.27   |
| 所提出算法( $h_{2c}=0.04$ s)                    | SZ:400<br>TL:200         | TH 光伏<br>MD 光伏 | 9.73+j10<br>10+j5.57    | 18 300    | 44 774.09  |

续表7

| 差分算法                      | STATCOM配置节点和容量/Mvar | 构网型逆变器节点 | 虚拟阻抗值( $R_v+jX_v$ ) | 成本/万元  | 计算时间/s    |
|---------------------------|---------------------|----------|---------------------|--------|-----------|
| 所提出算法( $h_{2c}=0.02$ s)   | SZ:400              | TH光伏     | 9.73+j10            | 18 300 | 72 291.70 |
|                           | TL:200              | MD光伏     | 10+j5.57            |        |           |
| 隐式梯形积分法( $h_{2c}=0.02$ s) | SZ:430              | TH光伏     | 9.73+j10            | 19 100 | 68 549.38 |
|                           | TL:210              | MD光伏     | 10+j5.57            |        |           |

的计算时间比全过程步长均为0.02 s的隐式梯形积分法的计算时间略长,不过其优化结果的成本明显更低。这是由于所提出算法的计算精度比隐式梯形积分法的精度更高。当增加所提出算法的步长 $h_{2c}$ 变为0.16时,其对得到的优化配置结果影响也较小,且能显著降低计算时间。另外,从启动方法上来看,采用所提出的快速启动算法能有效减小转化后优化模型的规模,差分化后的约束数目分别由四阶龙格-库塔法的325 726和隐式梯形积分法的386 864减少为所提算法的305 420,变量数目分别由四阶龙格-库塔法的293 948和隐式梯形积分法的345 064减少为275 576,使得计算时间分别由四阶龙格-库塔法的3 087.98 s和隐式梯形积分法的3 622.18 s减少为所提算法的1 737.02 s;且通过采用变步长方法对时间进行了细分,有效提高计算精度,得到更优的优化配置方案。因此,所提出的快速启动四阶隐式Adams法不仅能提高优化模型的求解效率,还能有效提高启动时模型的计算精度。

## 5 结语

本文提出了一种提升地区电网暂态电压安全的构网型逆变器和STATCOM的协调优化配置方法,并通过某实际地区电网算例分析,得到如下结论:

1)所建立的构网型逆变器和STATCOM的协调优化配置模型得到的结果能有效提高地区电网在发生短路故障和冲击负荷频繁启动时的动态无功支撑能力,有效提升电网的暂态电压安全性。

2)所建立的模型能同时优化构网型逆变器的级联虚拟阻抗环节的参数值,能更好地限制故障发生时的构网型逆变器的输出电流,实现暂态低电压时的新能源场站的低电压穿越。

3)所提出的快速启动四阶隐式Adams法不仅能减小差分化后模型的规模,提高优化求解的效率,还能有效提高启动时的计算精度。

但本文研究仍然存在继续完善的地方:设计新

的算法处理构网型逆变器和STATCOM的协调优化配置模型中的二进制变量,提高混合整数优化模型求解的计算效率;将所提出算法获得的优化配置方案应用于硬件或实际工程应用,并研究降低仿真计算结果与实际工程偏差的方法,使仿真计算结果更可信。此外,本文结论的工程应用须考虑以下的现实限制与挑战:构网型逆变器在实际改造中须与电网协调停机,以更换电力电子模块和进行LVRT校验等调试,未来可考虑研究标准化接口和预装式设计来缩短工期;STATCOM的全生命周期运维成本较高,特别是电力电子器件的老化换新、定期清洗校验与突发故障的检修。这些都是将来的研究工作的重点。

## 参考文献:

- [1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.  
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [2] 齐郑,吉苏朋.水电机组调相运行与新能源发电协同优化技术研究[J].电力系统保护与控制,2025,53(3):108-119.  
QI Zheng, JI Supeng. Synergistic optimization of phase modulation operation of hydropower units and power generation of new energy units[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 108-119.
- [3] 陈波,斯琪,谌艳红,等.基于广义奈奎斯特判据的新能源多场站系统小信号稳定薄弱并网单元辨识[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):129-140.  
CHEN Bo, SI Qi, CHEN Yanhong, et al. Identification of grid-connected units with the weakest small-signal stability in multiple renewable energy stations based on generalized Nyquist criterion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 129-140.
- [4] 秦世耀,齐琛,李少林,等.电压源型构网风电机组研究现状及展望[J].中国电机工程学报,2023,43(4):

- 1314-1333.
- QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1333.
- [5] 曹炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207.
- CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [6] 夏向阳, 蒋戴宇, 曾小勇, 等. 基于虚拟振荡器控制的储能变流器控制策略研究[J]. 中国电力, 2024, 57(11): 70-77.
- XIA Xiangyang, JIANG Daiyu, ZENG Xiaoyong, et al. Research on control strategy of power conversion system based on virtual oscillator control[J]. Electric Power, 2024, 57(11): 70-77.
- [7] 李海琛, 刘明波, 林舜江. 考虑暂态电压安全的 STATCOM 安装地点选择和容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 69-76+80.
- LI Haichen, LIU Mingbo, LIN Shunjiang. Selection of STATCOM's installation site and capacity optimization considering transient voltage security[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 69-76+80.
- [8] 杨韵, 涂炼, 郭恒道, 等. 基于暂态电压严重性评估的受端电网 STATCOM 选址及容量优化[J]. 南方电网技术, 2025, 19(10): 68-75.
- YANG Yun, TU Lian, GUO Hengdao, et al. Location selection and capacity optimization of STATCOM for receiving-end power grid based on transient voltage severity assessment[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(10): 68-75.
- [9] DENG Z M, LIU M B, OUYANG Y F, et al. Multi-objective mixed-integer dynamic optimization method applied to optimal allocation of dynamic var sources of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1683-1697.
- [10] VARMA R K, MOHAN S. Mitigation of fault induced delayed voltage recovery (FIDVR) by PV-STATCOM[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4251-4262.
- [11] 马鑫, 薛飞, 顾文波, 等. 考虑多场站短路比约束的构网型储能及分布式调相机优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(5): 40-46+64.
- MA Xin, XUE Fei, GU Wenbo, et al. Optimal configuration method of grid-forming energy storage and distributed synchronous condenser considering constraints of MRSCR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(5): 40-46+64.
- [12] 任冲, 任景, 程林, 等. 基于构网型储能的直流近区新能源暂态过电压抑制方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(9): 1-9.
- REN Chong, REN Jing, CHENG Lin, et al. Transient overvoltage suppression method for renewable energy sources near DC transmission systems based on grid-forming energy storage[J]. Smart Power, 2025, 53(9): 1-9.
- [13] FAN B, LIU T, ZHAO F Z, et al. A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2022, 3: 955-969.
- [14] 陈祯怡, 杨黎晖, 史金柱, 等. 考虑暂态模式切换的构网型变换器并联跟网型变换器系统暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(15): 6025-6038.
- CHEN Zhenyi, YANG Lihui, SHI Jinzhu, et al. Transient stability analysis of system with paralleled grid-following converter and grid-forming converter considering transient mode switching[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(15): 6025-6038.
- [15] 赵玉静, 牟倩颖, 宾子君, 等. 考虑直流侧动态的跟网型变换器稳定性分析[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 12-22.
- ZHAO Yujing, MU Qianying, BIN Zijun, et al. Stability analysis of grid-following converter considering DC side dynamics[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2024, 43(3): 12-22.
- [16] 张余余, 赵晋斌, 李芬, 等. 基于功角动态补偿的 VSG 故障穿越方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3667-3673.
- ZHANG Yuyu, ZHAO Jinbin, LI Fen, et al. VSG fault crossing method based on dynamic compensation of power angle[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3667-3673.
- [17] 王雪梅, 王艺博, 刘雨桐, 等. 基于虚拟电抗的主动支撑型新能源机组低电压穿越控制方法[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4435-4444.
- WANG Xuemei, WANG Yibo, LIU Yutong, et al. Low voltage ride-through control of actively-supported new energy unit based on virtual reactance[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4435-4444.
- [18] 李建林, 宋莹莹, 游洪灏, 等. 低电压穿越场景下的构网型储能变换器功率协同控制策略[J]. 高压电器, 2025, 61(11): 1-10+21.
- LI Jianlin, SONG Yingying, YOU Honghao, et al. Coordinated power control strategy for grid-forming energy storage converters under low-voltage ride-through scenarios[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(11): 1-10+21.
- [19] CAI H R, CHUNG C Y, WONG K P. Application of differential evolution algorithm for transient stability

- constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 719-728.
- [20] 夏小琴, 徐伟. 考虑调整变化量和变步长的暂态稳定约束最优潮流模型[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 115-119.  
XIA Xiaoqin, XU Wei. Transient stability constrained optimal power flow model considering power adjustments and variable step size[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 115-119.
- [21] 杨健, 韦化, 覃秀君. 基于二阶正交配置法的暂态稳定约束最优潮流[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 64-72.  
YANG Jian, WEI Hua, QIN Xiujun. Transient stability constrained optimal power flow based on second-order orthogonal collocation method[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 64-72.
- [22] 夏小琴, 韦化. 基于三步隐式 Adams 法的暂态稳定约束最优潮流模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 55-61.  
XIA Xiaoqin, WEI Hua. Transient stability constrained optimal power flow model based on three-step implicit Adams method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 55-61.
- [23] 张祥龙, 袁兆祥, 董树锋, 等. 考虑节点碳排放强度的输配协同多目标最优潮流[J]. 电力建设, 2025, 46(7): 123-132.  
ZHANG Xianglong, YUAN Zhaoxiang, DONG Shufeng, et al. Multi-objective optimal power flow of integrated transmission and distribution network considering node carbon emission intensity[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(7): 123-132.
- [24] 国家能源局. 光伏发电站低电压穿越检测技术规程: NB/T 32005—2013[S]. 北京: 新华出版社, 2014.  
National Energy Administration. Testing code for low voltage ride through of photovoltaic power station: NB/T 32005—2013[S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2014.
- [25] 陈波, 张权旺, 刘柳, 等. 计及 LVRT 的光伏并网系统暂态稳定性分析与参数优化研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(6): 162-173.  
CHEN Bo, ZHANG Quanwang, LIU Liu, et al. Transient stability analysis and parameter optimization of PV grid-connected systems considering LVRT[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 162-173.
- [26] 彭放, 高厚磊, 郭一飞, 等. 构网逆变器电源故障穿越控制策略及其对保护影响的研究综述[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3673-3685.  
PENG Fang, GAO Houlei, GUO Yifei, et al. A review of fault ride-through control strategies of grid-forming inverter-based resources and the influence on protection[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3673-3685.
- [27] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 277-296.  
LIU Hui, YU Siqi, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-296.
- [28] 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.
- [29] SHUAI Z K, SHEN C, LIU X, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4648-4661.
- [30] XU C H, ZOU Z X, YANG J J, et al. Transient stability analysis and enhancement of grid-forming and grid-following converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2024, 5(4): 1396-1408.
- [31] 林舜江, 刘明波. 暂态电压安全预防控制优化的轨迹灵敏度法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 12-17.  
LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Using trajectory sensitivity method for transient voltage security preventive control optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 12-17.
- [32] 林舜江, 袁康龙, 刘明波, 等. 自动电压控制系统对广东电网静态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 102-107.  
LIN Shunjiang, YUAN Kanglong, LIU Mingbo, et al. Assessment on influence of AVC system on steady state voltage stability in Guangdong power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 102-107.
- [33] 吴任博, 黄奕俊. 高比例可再生能源接入下自愈性能的分布式配电网重构策略研究[J]. 发电技术, 2024, 45(5): 975-982.  
WU Renbo, HUANG Yijun. Research on reconfiguration strategy of distributed distribution network with self-healing performance under high-proportion renewable energy access[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(5): 975-982.