

考虑复杂控制切换特性的高压直流输电 稳态建模及系统平衡点求解

吴佳泽¹, 范越², 牛拴保², 汪莹², 段超¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 国家电网有限公司西北分部, 710048, 西安)

摘要: 为解决高压直流输电系统在运行方式变化下因控制模式多样化所导致的机电暂态仿真初始化误差大及静态安全分析可靠性不足的问题, 构建了一种基于完整非线性切换代数方程组的直流系统稳态模型, 并提出一种交替迭代解耦计算方法。通过先更新直流注入电流, 再求解网络方程, 实现交直流系统的协同求解。在改进的 16 机 68 节点系统上进行仿真验证, 结果表明: 所提方法直接计算得到的故障后各节点电压与时域仿真结果高度一致, 误差控制在 1% 以内; 基于等面积法的临界切除时间计算值与时域仿真结果吻合良好, 验证了该模型对直流系统模式切换行为的有效捕捉能力。所提模型与方法能够精确求解故障后平衡点, 适用于含直流系统的电力系统安全稳定评估。

关键词: 高压直流; 稳态建模; 控制切换; 平衡点求解

中图分类号: TM721 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202609006 **文章编号:** 0253-987X(2026)09-0050-11

Steady-State Modeling of HVDC Transmission Considering Complex Control Switching Characteristics and Solution of System Equilibrium Points

WU Jiaze¹, FAN Yue², NIU Shuanbao², WANG Ying², DUAN Chao¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China)

Abstract: To address the large initialization errors in electromechanical transient simulation and the insufficient reliability of static security analysis caused by diverse control modes of high-voltage direct current (HVDC) systems under changing operating conditions, a steady-state model of the DC system based on a complete set of nonlinear switching algebraic equations is constructed, and an alternating iterative decoupled calculation method is proposed. By first updating the DC injection currents and then solving the network equations, coordinated solution of the AC/DC system is achieved. It is shown by simulation results on a modified 16-machine, 68-bus system that the post-fault bus voltages directly calculated using the proposed method are highly consistent with the time-domain simulation results, with errors controlled within 1%. Good agreement is obtained between the critical clearing time calculated using the equal-area criterion and the time-domain simulation result, verifying the effectiveness of the model in capturing the mode-switching behavior of the DC system. The post-fault equilibrium point can be

收稿日期: 2025-12-26。 作者简介: 吴佳泽(1997—), 男, 博士生; 段超(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目:

国家自然科学基金资助项目(52307135); 国家电网公司总部科技项目(5100-202406032A-1-1-ZN)。

网络出版时间: 2026-05-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260518.1822.002>

accurately determined using the proposed model and method, which are applicable to the security and stability assessment of power systems incorporating HVDC transmission.

Keywords: high-voltage direct current; steady-state modeling; control switching; equilibrium point calculation

高压直流输电(HVDC)因其大容量、长距离输电的独特优势,在现代电力系统中占据重要地位。随着跨区域输电需求的持续增长,我国电力系统呈现出大容量直流接入的显著特点^[1-2]。截至2025年,全国已建成并投运超过50条超高压直流输电线路^[3]。随着电网逐步演变为交直流混联系统,直流输电的复杂切换控制特性对电力系统安全稳定运行产生深远影响^[4-5]。

目前,常规直流输电仍是应用最广的直流输电技术,其整流侧与逆变侧换流站多样化的控制策略对系统运行特性影响显著^[6-8]。此外,运行方式变化和系统故障引发的模式切换进一步增加了系统的复杂性。在直流建模方面,针对不同的应用场景,常规直流输电系统通常采用以下4种等值模型:①电磁暂态模型^[9-12],通过求解微分方程实现高精度仿真,步长最小;②状态空间模型^[13-15],以差分方程模拟直流输电系统的暂态响应;③动态相量模型^[16-17],作为电磁暂态模型的低阶近似模型,仅聚焦主要频率分量;④准稳态模型^[18-20],基于平均值理论,计算时间尺度大,适用于机电暂态仿真和低频振荡分析。文献[21]给出了直流模型的稳态切换方程,但切换模式较为简单,难以满足实际工程需求,因此亟需构建更贴合实际直流的稳态模型。

在交直流混联电力系统分析中,直流输电系统稳态模型被广泛应用于机电暂态仿真的初始化、静态安全分析、小干扰稳定性分析以及电压稳定性分析等场景,是获取系统在扰动前、后稳态工作点信息的基本工具。然而,现有研究在多个方面仍存在局限性。在电力系统机电暂态仿真中,现有算法和软件假设直流换流站总是处于正常控制模式^[22-23];而实际运行中,直流系统在初始状态可能已处于其他控制模式。类似地,静态安全分析^[24-25]和小干扰稳定分析^[26-27]也局限于正常控制模式。当高压直流稳态模型无法准确描述控制模式的动态切换时,可能导致以下后果:机电暂态仿真初始化难以建立系统运行的稳态平衡点,静态安全分析所得到的运行平衡点偏离系统实际故障后的平衡点。此外,针对含直流系统的故障后平衡点计算,目前尚未形成直接适用的有效方法,亟

需进一步研究。

本文针对机电暂态仿真中高压直流输电模型的初始化精度问题及故障后平衡点难以直接求解的不足,建立了一种完全解析的直流系统切换代数方程模型。通过6组代数方程刻画直流控制侧所有控制模式及其切换逻辑,在不依赖暂态过程的前提下,直接求解出与机电暂态仿真一致的稳态解,进而实现系统精确初始化与故障后平衡点的快速求取。

1 高压直流输电系统机电暂态模型

1.1 一次系统模型

一次系统的机电暂态模型如图1所示。图中, U_{cr} 、 U_{ci} 为直流系统两侧交流母线线电压,下标r代表直流整流侧,下标i代表直流逆变侧; U_{dr} 、 U_{di} 为直流系统两侧直流电压; I_{dr} 、 I_{di} 为两侧直流电流; L_s 为直流线路电感; L_d 为两侧平波电抗器、接地引线电感之和; C 为直流线路电容; X_{cr} 、 X_{ci} 为折算到阀侧的换流变压器漏抗; R_d 为直流线路电阻; T_r 、 T_i 为直流系统两侧换流变压器电压比。在建模时,通过忽略换流器的快速开关过程及其非线性特性,转而采用准稳态代数方程描述其平均外特性,从而简化分析过程。

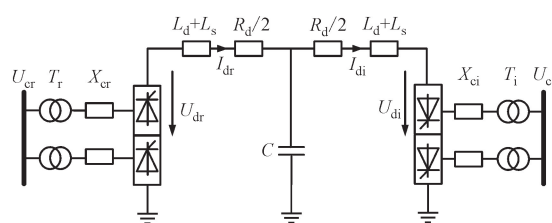


图1 一次系统机电暂态模型

Fig. 1 Electromechanical transient model of the primary system

该模型的导出基于以下假设:换流母线电压为纯正弦波且三相平衡对称;换流器处于对称运行状态;直流侧电流与电压波形平直无纹波;换流变压器的励磁电抗可忽略不计^[24]。

1.2 控制系统模型

国际大电网会议组织的直流输电标准测试系统

的直流控制系统(CIGRE HVDC bench-mark model), 可用于直流控制系统性能以及交直流混联电网特性分析。在该控制系统模型的基础上, 电力系统分析软件包(PSD-BPA)暂稳程序对其做了进一步改进, 得到直流 DM 模型^[28]。图 2 为 DM 模型示意图, 包含测量(惯性)环节、主控制环节、PI 控制环节及逻辑控制环节。图中, s 为拉普拉斯原子, α 为整流侧触发滞后角, β 为逆变侧触发超前角, $\alpha_{\min}$ 为整流侧最小触发角, I_{δ} 为逆变侧直流电流控制裕度, i_{δ} 为逆变侧定电流控制裕度, γ_i 为逆变侧熄弧角, P_d 为定功率, I_d 为定电流, T_u 为定电压控制环节的时间常数, T_{γ} 为熄弧角控制中的时间常数, 下标 ref 为各电气量参考值。直流一次侧电气量经测量环节进入控制侧, 随后进入主控制环节生成直流电流指令值。主控制包括两种方式: 定整流侧参考功率控制和低压限流环节(VDCOL)。电气量随后进入 PI 控制环节, 其目标是将实际测量值调节至指令值, 并将触发角信息反馈至一次侧。整流侧 PI 控制以定电流控制为主, 逆变侧则包括定熄弧角控制和定电流控制。为实现两者平滑切换并避免响应突变, 引入了电流偏差环节(CEC)。逻辑控制阶段负责各环节内部的控制策略选择与切换, 包括主控制中的定功率与 VDCOL 切换、整流侧 PI 控制中的定电流与定最小触发角切换, 以及逆变侧 PI 控制中的定熄弧角与定电流切换。

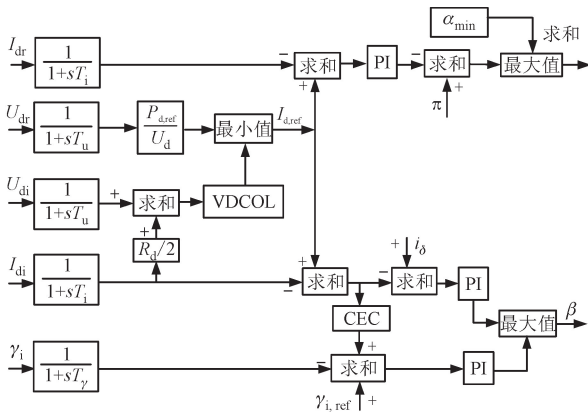


图 2 DM 模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the DM mode

VDCOL 与 CEC 环节内部控制参数的变化直接影响着直流系统的运行模式, 下面来对这两个控制环节进行介绍。在 DM 模型中, VDCOL 连接在直流线路的中点处, 仅与直流线路的中点电压相关。其根据两侧电压输出一个电流参考值, 模型表达

式为

$$I_d = \begin{cases} I_{dh}, & U_d > U_{dh} \\ \left[\frac{I_{dh} - I_{dl}}{U_{dh} - U_{dl}} (U_d - U_{dl}) + I_{dl} \right], & U_{dl} \leq U_d \leq U_{dh} \\ I_{dl}, & U_d < U_{dl} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_{dh} 为低压限流环节启动电压; U_{dl} 为低压限流斜率控制最低电压; I_{dh} 为低压限流最大电流值; I_{dl} 为低压限流最小电流值。

低压限流公式可简化为

$$I_d = \text{VDCOL}(U_d) = a_k U_d + b_k \quad (2)$$

式中: $k = 1, 2, 3$; a_k, b_k 为低压限流环节的三段式函数 VDCOL($\cdot$) 的系数。CEC 环节在整流侧定电流控制失效时发挥关键作用, 可根据电流指令值与测量值之间的差异反馈给 PI 控制一个角度。其特性表达式如下

$$\Delta\gamma = \begin{cases} k_{\gamma} \Delta I_d, & 0 \leq \Delta I_d < 0.1 \\ \Delta\gamma_{\max}, & \Delta I_d \geq 0.1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_{γ} 为电流偏差测量系数; ΔI_d 为电流标幺值测量值与指令值的差; $\Delta\gamma_{\max}$ 为最大偏差角; $\Delta\gamma$ 为实际电流偏差环节提供给定熄弧角控制角的裕度。

2 高压直流输电完全稳态模型的构建

2.1 一次系统的稳态建模

基于高压直流输电的机电暂态模型, 忽略直流线路的电容及电感, 直流一次侧模型如图 3 所示, 其整流与逆变侧电流值相同。因此, 定义直流电流为 I_d , 则一次系统的稳态公式如下

$$U_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi T_r} U_{cr} \cos \alpha - \frac{3X_{cr}}{\pi} I_d \quad (4)$$

$$U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi T_i} U_{ci} \cos \beta + \frac{3X_{ci}}{\pi} I_d \quad (5)$$

$$U_{dr} = U_{di} + R_d I_d \quad (6)$$

$$\gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2} I_d X_{ci} T_i}{U_{ci}} + \cos \beta \right) \quad (7)$$

式中: α, β 分别为整流侧、逆变侧的触发角。

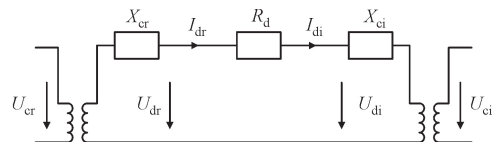


图 3 直流模型一次侧稳态模型

Fig. 3 DC model primary-side steady-state model

2.2 基于DM控制模型的稳态建模

由DM的机电暂态模型可以得知,其整流侧的控制方式包括定功率(电流)控制和定最小触发角控制,而逆变侧的控制方式涉及定熄弧角控制和含电流偏差环节的定电流控制。在主控制中,包括定功率控制以及VDCOL。通过不同的排列组合,DM模型共涵盖8种可能的控制模式。在稳态建模中,

由于忽略了直流线路上的电感与电容,整流侧和逆变侧的电流完全相同。然而,在控制侧的逆变侧定电流控制时,电流的整定值通常会设置一定裕度,因此整流侧无法同时采用定电流控制,故DM模型共有6种可行的控制模式。表1总结了可能的控制模式及其可行性。基于表1,下面介绍6种控制模式的求解方法。

表1 DM模型可能存在的控制策略与可行性

Table 1 Possible control strategies and feasibility of DM model

模式	主控制	整流侧		逆变侧		可行性
		条件	方程	条件	方程	
1	定功率	定电流	$I_d = P_{d,ref}/U_{dr}$	定熄弧角	$\gamma_i = \gamma_{i,ref}$	✓
2	低压限流	定电流	$I_d = VDCOL(U_{di} + 0.5I_d/R_d)$	定熄弧角	$\gamma_i = \gamma_{i,ref}$	✓
3	定功率	定 α_{min}	$\alpha = \alpha_{min}$	定熄弧角	$\gamma_i = \gamma_{i,ref} + CEC(I_{d,ref} - I_d)$	✓
4	低压限流	定 α_{min}	$\alpha = \alpha_{min}$	定熄弧角	$\gamma_i = \gamma_{i,ref} + CEC(I_{d,ref} - I_d)$	✓
5	定功率	定 α_{min}	$\alpha = \alpha_{min}$	定电流	$I_d = P_{d,ref}/U_{dr} - I_\delta$	✓
6	低压限流	定 α_{min}	$\alpha = \alpha_{min}$	定电流	$I_d = VDCOL(U_{di} + 0.5I_d/R_d) - I_\delta$	✓
7	定功率	定电流	$I_d = P_{d,ref}/U_{dr}$	定电流	$I_d = P_{d,ref}/U_{dr} - I_\delta$	×
8	低压限流	定电流	$I_d = CDCOL(U_{di} + 0.5I_d/R_d)$	定电流	$I_d = VDCOL(U_{di} + 0.5I_d/R_d) - I_\delta$	×

注:✓表示可行;×表示不可行。

模式1:整流侧定电流,逆变侧定熄弧角,主控制定功率。由式(5)~(7)得到关于 I_d 的解为

$$I_d = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi T_i} U_{ci} \cos \gamma_{i,ref} / \left[2 \left(R_d - \frac{3X_{ci}}{\pi} \right) \right] \pm \sqrt{\left[\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi T_i} U_{ci} \cos \gamma_{i,ref} \right)^2 + 4 \left(R_d - \frac{3X_{ci}}{\pi} \right) P_{d,ref} \right] / \left[2 \left(R_d - \frac{3X_{ci}}{\pi} \right) \right]} \quad (8)$$

在电力系统正常运行过程中,直流系统都是由整流侧向逆变侧传输功率,则电流 I_d 均为正值,所以解中的值要根据实际情况选取一个。

模式2:整流侧定电流,逆变侧定熄弧角,主控制低压限流环节。当整流侧交流节点电压下降时,DM模型会进入模型2的情况下运行,将式(5)代入 $I_d = VDCOL(U_{di} + 0.5I_d/R_d)$ 中,解得

$$I_d = \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi T_i} a_k U_{ci} \cos \gamma_{i,ref} + b_k \right) / \left(a_k \frac{3X_{ci}}{\pi} - \frac{1}{2} a_k R_d + 1 \right) \quad (9)$$

模式3:整流侧定 α_{min} ,逆变侧定熄弧角,主控制定功率。经分析可知,因在逆变侧定熄弧角控制中的电流偏差环节含有三角函数项(非线性项),因此无法解析计算各电气量。可采用不动点迭代法进行求解,具体迭代过程如下:给定电流初值 I_{d0} ,将 I_{d0} 代入式(4)中得到 U_{dr0} ,将 U_{dr0} 代入到式(6)中得到 U_{di0} ,将 U_{dr0} 代入 $I_{ref} = P_{ref}/U_{dr}$ 中得到 I_{ref0} ,将 U_{dr0} 代入到式(5)中得到 β_0 ,将 β_0 代入(7)中得到 γ_0 ,将 γ_0 代入 $\gamma_i = \gamma_{i,ref} + CEC(I_{ref} - I_d)$ 中得到 I_{d1} ,按此顺序迭代可以得到直流线路上的传输电流 I_d ,最终得出其余电气量。

模式4:整流侧定 α_{min} ,逆变侧定熄弧角,主控制低压限流。同模式3,迭代得到直流线路上的传输电流 I_d ,最终得出其余电气量。

模式5:整流侧定 α_{min} ,逆变侧定电流,主控制定功率。将 $\alpha = \alpha_{min}$ 代入式(4)中,由式(5)~(7)得到关于 I_d 的解为

$$I_d = \left(\frac{\sqrt{2}}{T_r} U_{cr} \cos \alpha_{min} - X_{cr} I_\delta \right) / 2X_{cr} + \sqrt{\left[\left(\frac{\sqrt{2}}{2T_r} U_{cr} \cos \alpha_{min} - \frac{X_{cr} I_\delta}{2} \right)^2 - X_{cr} \left(\frac{\sqrt{2}}{T_r} U_{cr} \cos \alpha_{min} I_\delta - \frac{\pi P_{d,ref}}{3} \right) \right] / X_{cr}} \quad (10)$$

模式6:整流侧定 α_{min} ,逆变侧定电流,主控制低压限流。将 $I_d = VDCOL(U_{di} + 0.5I_d/R_d) - I_\delta$ 代入式(4)和(6)中,得到

$$I_d = a_k \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi T_r} U_{cr} \cos \alpha_{min} - \frac{3X_{cr}}{\pi} I_d - \frac{I_d R_d}{2} \right) + b_k - I_\delta \quad (11)$$

综上所述,6 种控制模式最终都可以得出其两侧触发角 α 、 β 以及主控制电流参考值 $I_{d,ref}$ 。

2.3 高压直流输电稳态模型切换逻辑及验证

根据 2.2 节内容,可获取 6 种运行模式的电气量。DM 模型控制模式逻辑判断见图 4。图中,上标(1)~(6)代表直流的控制模式,(a)~(c)表示切换逻辑的中间量。首先,通过比较模式 1 与模式 2 的参考电流,判断系统是否处于低压限流状态,并比对整流侧触发角与最小触发角。若当前触发角大于最小触发角,则确定最终控制模式;否则进入下一步。随后,分别比较模式 3 与模式 4、模式 5 与模式 6 的参考电流,以识别系统是否处于低压限流状态,并进一步比较相应模式的逆变侧触发角,最终选取触发角最大的模式作为控制模式。

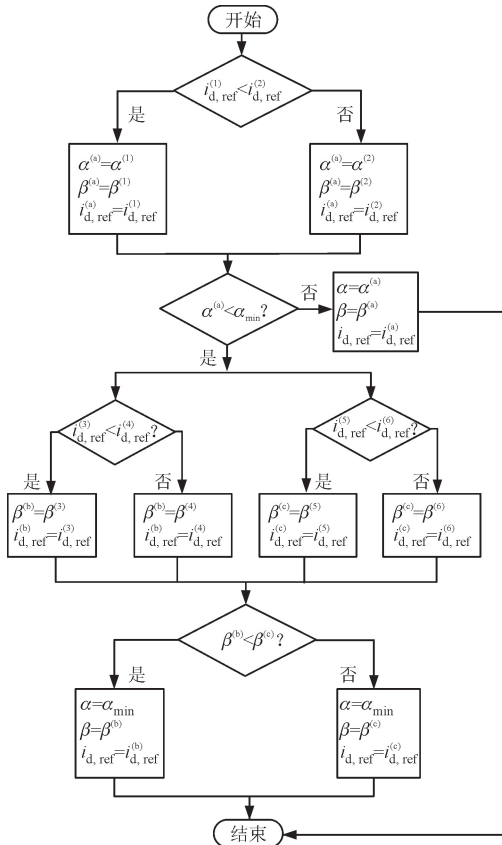


图 4 DM 模型控制模式逻辑判断图

Fig. 4 DM model control mode logic judgment diagram

为验证该切换逻辑的正确性,在 Simulink 软件中搭建了直流输电的机电暂态模型。将机电暂态模型在达到稳定状态后的输出电气量,与稳态模型计算结果展开对比分析,发现二者数值高度吻合。这一结果有力地验证了所提逻辑的正确性。模型对比的具体情况如图 5 所示,图中 I 为电流标幺值。从图中可以清晰看到,当直流整流侧或逆变侧的交流节点电压发生渐变时,基于时域仿真获取的电气量

结果,与利用直流稳态模型直接计算得出的结果基本保持一致。

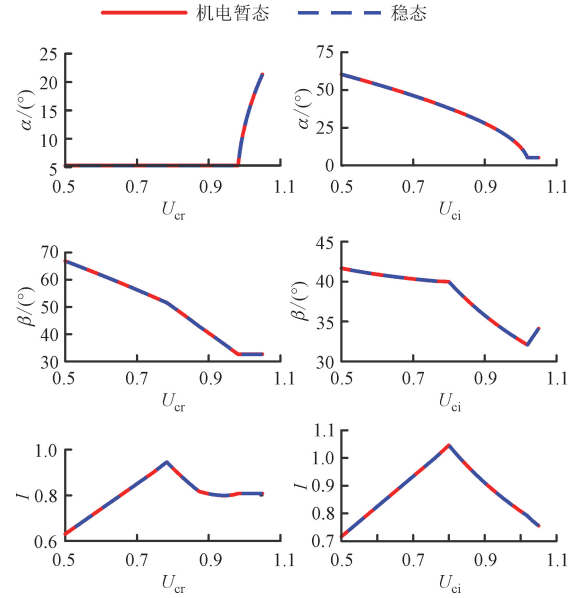


图 5 DM 各电气量对比图

Fig. 5 Comparison of DM electrical quantities

3 HVDC 稳态模型在电力系统故障前平衡点的应用

HVDC 稳态模型在故障前平衡点的应用主要体现在电力系统初始化中,即通过潮流计算为机电暂态仿真设定各元件的初始运行状态,为后续稳定性分析提供基础数据与起始条件^[29]。现有工业级机电暂态仿真软件(如 BPA、PSASP)在对直流控制侧初始化时,预先给定若干参数,并假设整流侧始终为定电流模式、逆变侧始终为定熄弧角模式。然而,实际系统中,用电需求波动会引起直流近区节点电压变化,进而触发控制模式切换。若沿用传统初始化方法,直流工作状态将固化为整流侧定电流、逆变侧定熄弧角,难以适应实际运行条件。

为分析含 HVDC 系统的稳态运行特性,本文采用交替迭代法进行交直流混联系统潮流计算,通过交流网络与直流系统间的功率与电压协调迭代,实现考虑控制模式切换的潮流求解。具体流程如图 6。

步骤 1 初始化。设定直流线路的传输功率目标值 P_{dr} 。给定直流线路两侧交流母线的电压初始值 U_{cr}^0 和 U_{ci}^0 ,并初始化整个交流系统的状态变量。设置收敛判断阈值 ϵ 和迭代次数 k ,令 $k = 0$ 。

步骤 2 求解直流子系统。基于第 k 次迭代得到的交流母线电压 U_{cr}^k 和 U_{ci}^k ,根据给定的传输功率 P_{dr} ,通过包含切换逻辑的 HVDC 稳态模型函数 $F(\cdot)$,判断直

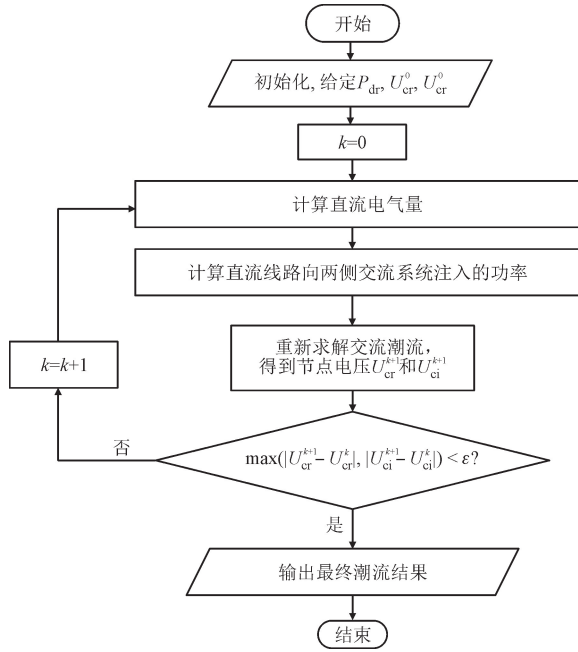


图6 含直流系统的初始化求解方法

Fig. 6 Initialization solving method for systems containing DC components

流系统的当前控制模式(如定功率、定电流、定熄弧角等),并计算出相应的内部电气量,包括直流电流 I_d^k 、整流侧直流电压 U_{dr}^k 、逆变侧直流电压 U_{di}^k , 公式为

$$(I_d^k, U_{dr}^k, U_{di}^k) = F(U_{cr}^k, U_{ci}^k) \quad (12)$$

进一步计算直流线路向两侧交流系统注入的有功功率 P 和无功功率 Q , 公式分别为

$$\begin{cases} P_r = -U_{dr} I_d \\ Q_r = -P_r \tan \varphi_r \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_i = U_{di} I_d \\ Q_i = -P_i \tan \varphi_i \end{cases} \quad (14)$$

式中: φ_r 和 φ_i 分别为整流侧和逆变侧功率因数角,

$$\text{并满足 } \cos \varphi_r = \frac{\pi T_r U_{dr}}{3 \sqrt{2} U_{cr}}, \cos \varphi_i = \frac{\pi T_i U_{di}}{3 \sqrt{2} U_{ci}}.$$

步骤3 求解交流子系统。将直流系统等效为注入交流节点的功率源。将步骤2计算得到的注入功率作为节点 s 和节点 r 的给定功率(即视为 PQ 节点),代入交流系统潮流方程中,进行一次完整的交流潮流计算,求解后,更新得到新的交流母线电压 U_{cr}^{k+1} 和 U_{ci}^{k+1} 以及整个交流网络的其他状态变量。

步骤4 判断收敛性。检查两侧交流母线电压的更新量是否满足收敛条件

$$\max(|U_{cr}^{k+1} - U_{cr}^k|, |U_{ci}^{k+1} - U_{ci}^k|) < \epsilon \quad (15)$$

若上述条件满足,则迭代收敛,转入步骤5;否则,令迭代计数器 $k=k+1$,并返回步骤2继续迭代。

步骤5 输出最终结果。迭代收敛后,输出最终计算结果,即直流系统关键电气量:确定的直流电流、直流电压以及系统最终所处的控制模式。注入交流系统功率,即直流系统向两侧交流节点注入的稳态有功功率和无功功率。

该方法通过交替求解直流子系统与交流子系统,有效处理了交直流系统之间的耦合关系,模型中的切换逻辑 $F(\cdot)$ 确保了能够准确模拟 HVDC 系统在不同工况下的控制行为,从而保证了潮流计算的准确性与实用性。

为验证上述结论的正确性,搭建了 IEEE 新英格兰系统(NETS)和纽约电力系统(NYPS)68 节点标准系统,并将 60~61 直流传输线路替换为 DM 直流模型,如图 7 所示。直流模型的部分参数如表 2 所示。

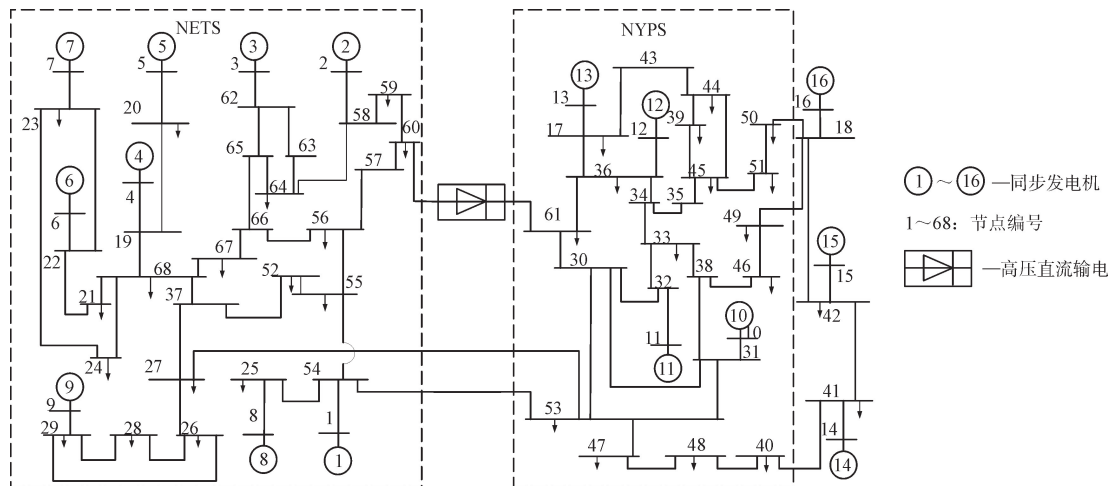


图7 16机68节点系统

Fig. 7 16-machine 68-bus node system

表 2 直流模型部分参数

Table 2 Parameters of the DC model

参数	数值
直流线路电阻 R/Ω	12.848
逆变侧熄弧角参考值 $\gamma_{\text{ref}}/(\circ)$	17
整流侧最小触发角 $\alpha_{\text{min}}/(\circ)$	5
逆变侧直流电流控制裕度标么值	0.1
低压限流环节电压标么值上限 U_{dh}	0.9
低压限流环节电压标么值下限 U_{dl}	0.3

将节点 60 的负荷设定为 $\lambda(P_{60} + jQ_{60})$, 通过调整 λ 可以改变系统的运行方式, $\lambda = 1$ 时直流系统处于模式 1 的工作状态。通过改变线路的负荷, 图 8 清晰展示了 DM 直流模型的切换过程。可以看出, 运行方式的改变(地区负荷量的增加)会导致直流模型模式的切换。

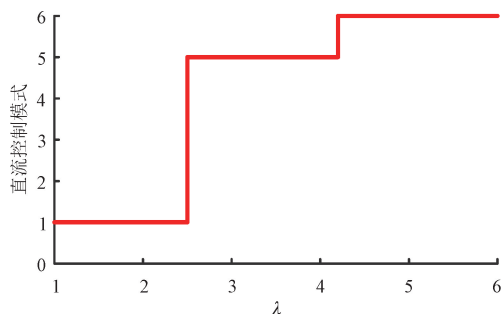
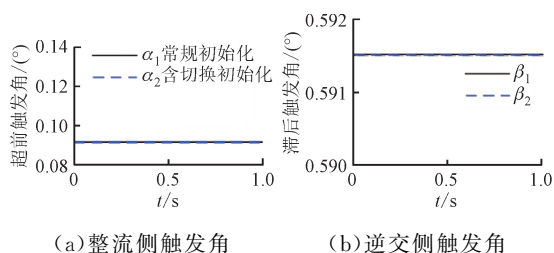


图 8 直流模式随负荷切换结果

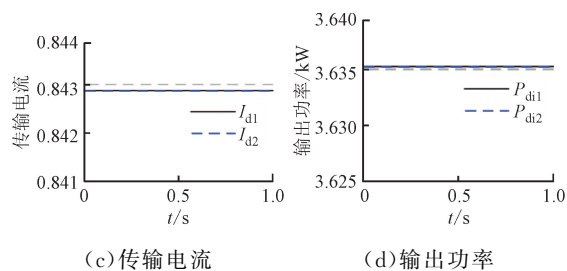
Fig. 8 Schematic diagram of DC mode switching with load

进一步地, 初始化方式的合理性会对系统的暂态稳定性产生显著影响, 在 16 机系统中, 系统在节点 59 处发生三相接地短路故障, 系统在模式切换的初始化以及无模式初始化情况下的机电暂态仿真曲线如图 9 和图 10 所示。调整系统的运行方式, 即修改系统节点 60 的负荷, 图 9、图 10 分别为 $\lambda = 1.0, 3.4$ 时直流内部的各个电气量的仿真曲线。可以看出, $\lambda = 3.4$ 时, 直流的模式已经发生切换, 采用原初始化方式已经不适用于电力系统仿真计算。



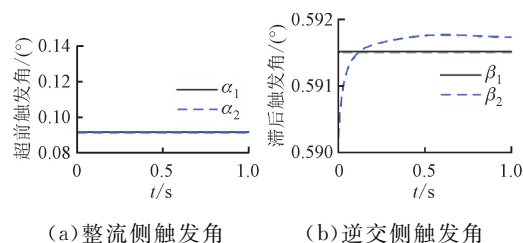
(a) 整流侧触发角

(b) 逆变侧触发角



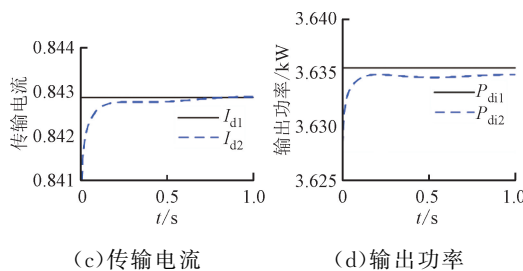
(c) 传输电流

(d) 输出功率

图 9 $\lambda = 1.0$ 时各电气量仿真结果对比Fig. 9 Comparison of simulated electrical quantities when $\lambda = 1.0$ 

(a) 整流侧触发角

(b) 逆变侧触发角



(c) 传输电流

(d) 输出功率

图 10 $\lambda = 3.4$ 时各电气量仿真结果对比Fig. 10 Comparison of simulated electrical quantities when $\lambda = 3.4$

基于文献[20]的分群理论, 将 16 机系统划分为两个机群并求得等效功角。图 11 对比了两种初始化方法的时域仿真曲线。可以看出, 传统初始化方法因无法准确识别直流系统的实际控制模式, 即使无故障情况下, 响应曲线也出现明显振荡, 难以稳定运行。图 12 为故障场景下的仿真结果, 此时直流系统实际运行于其他控制模式, 初始化方法的选取对仿真结果影响显著。传统初始化方法因与系统实际模式不匹配, 在故障扰动下仿真结果偏离真实动态,

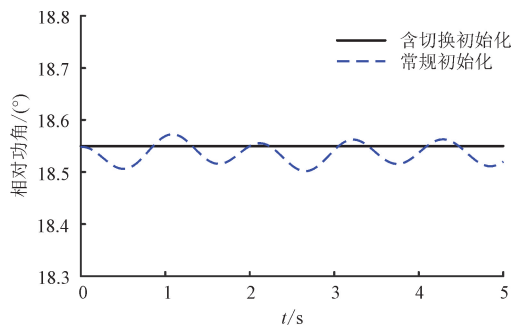


图 11 初始化后等效功角曲线

Fig. 11 Equivalent rotor angle curve after initialization

表现为波动幅度更大、偏离稳态更严重、恢复时间更长。若基于该方法进行暂态稳定评估,可能误判系统稳定性。相比之下,本文所提直流稳态初始化方法即使在非默认模式及故障扰动下,仿真曲线仍能紧密贴合真实动态,准确捕捉系统特性,为暂态分析提供可靠初始条件,确保稳定评估的准确性。这充分体现了该方法在电力系统仿真初始化中的优越性与重要价值。

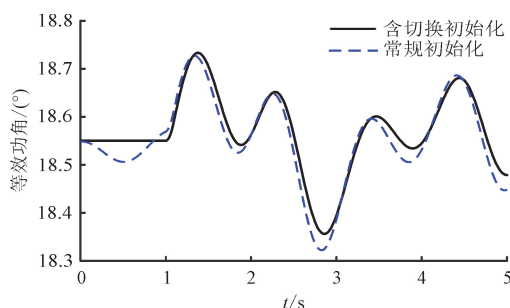


图12 切除故障后等效功角曲线

Fig. 12 Equivalent rotor angle curve after fault removal

4 HVDC 稳态模型在计算电力系统故障切除后平衡点的应用

在电力系统切除故障后,平衡点是指系统在受到大干扰(如短路故障、设备投切等)后,能够过渡到的新的或恢复到原来的稳定运行的状态点^[30]。此时系统中的所有微分方程变量(如发电机转子角度、转速等)的时间导数为0,系统变量不再随时间变化,处于一种暂态或稳态的平衡状态。一般情况下,根据时域仿真最终获取系统的故障后平衡点,但也可以利用交替迭代法^[31]直接计算系统故障后的平衡点,进而提升暂态稳定性评估的效率^[32]。

为保证系统故障后存在稳定平衡点,在发电机二阶模型基础上引入原动机及调速器动态,以模拟频率调节过程。当系统切除故障后,网络导纳矩阵发生变化,此时将直流系统等效为分别向两端连接交流母线注入电流的模型。给定系统初始运行状态后,首先根据直流系统内部动态方程求解其电气量,再通过式(12)~(14)计算直流系统向交流网络注入的有功功率与无功功率。进一步,由功率关系推导出直流系统向两侧交流母线注入的电流。

基于注入电流,将直流系统与交流网络的耦合问题转化为交替迭代求解过程:先更新直流注入电流,再求解网络方程,通过交替修正交流母线电压与直流注入量,直至系统收敛到故障后的平衡点。该

方法通过交替迭代实现了交直流系统的解耦计算,可用于求解暂态稳定平衡点。

为验证故障后平衡点的正确性,通过时域仿真,与直接计算过后的故障后平衡点进行对比。在16机68节点系统中,在节点37发生三相接地 $N-1$ (N 为电气设备的数量)故障,故障在0.1s后切除,进而计算系统故障后平衡点。如图13所示,各节点电压的计算值与仿真结果吻合良好,误差均处于可接受的阈值之内(图14)。综上,结合本文直流稳态模型与交替迭代法,能够直接、精确地求解系统的故障后平衡点。

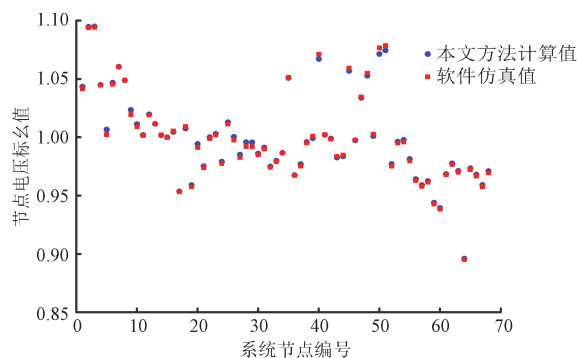


图13 切除故障后节点电压仿真值与计算值对比

Fig. 13 Comparison diagram between the simulated values and calculated values of voltages fault removal

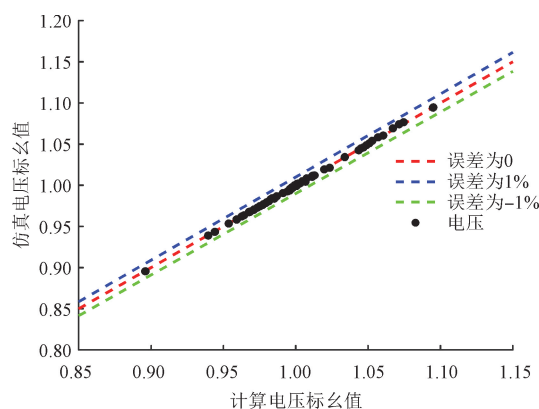


图14 切除故障后节点电压误差分析

Fig. 14 Error analysis of voltages after fault removal

同时,在含直流模型的16~68节点系统中,基于分群理论将其等值为两机系统,通过不断调整两台等效发电机的功角差,观察系统在故障前、中、后的功率曲线。含直流的等面积法(EAC)曲线见图15。图中,绿色阴影表示等面积法中的加速面积,紫色为减速面积。可以看出,当系统在节点37处发生三相短路故障、持续时间为0.1s时,功率曲线出现明显

切换现象,该切换部分由直流模型发生模式切换引起。经时域仿真与扩展 EAC 计算得到的临界切除时间分别为 0.190 0、0.214 7 s,两者存在差异。该误差主要源于多机系统等值为单机系统时,机群内部发电机并非完全同调,而非直流模型本身所致。因此,在允许误差范围内,含切换特性的直流稳态模型可用于含直流系统的电力系统安全稳定评估。

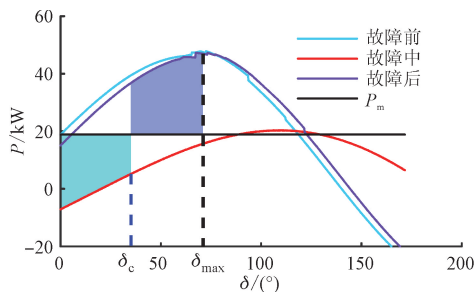


图 15 含直流的 EAC 曲线

Fig. 15 EAC curve incorporating HVDC

5 结 论

(1) 本文提出了一种 HVDC 系统稳态建模与求解方法,无需暂态过程即可精确计算稳态运行状态,显著提升计算效率。

(2) 本文模型克服了传统仿真中 HVDC 始终运行于正常控制模式的局限,在极端运行条件下具有更高的可靠性与精度。

(3) 本文方法实现了故障切除后稳定平衡点的直接求解,在改进的 16 机 68 节点系统上的仿真结果表明,所提方法直接计算得到的故障后各节点电压与时域仿真结果高度一致,电压误差控制在 1% 以内。

(4) 本文方法提升了交直流混联系统在静态安全分析、电压稳定评估及电网强度分析等应用中的准确性与可靠性,为系统安全运行提供了坚实的理论支撑。

参考文献:

- [1] 辛保安,郭铭群,王绍武,等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1-8.
Xin Baoan, Guo Mingqun, Wang Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [2] 王永平,赵文强,杨建明,等. 混合直流输电技术及

发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 156-167.

Wang Yongping, Zhao Wenqiang, Yang Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167.

- [3] 宋智强,黄耀辉,赵化时,等. 含多类型直流的交直流混联电网潮流计算方法适用性分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 190-196.

Song Zhiqiang, Huang Yaohui, Zhao Huashi, et al. Applicability analysis of power flow calculation methods for AC/DC hybrid connected power grid with multi-type DC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 190-196.

- [4] Sessa S D, Chiarelli A, L'Abbate A, et al. Availability assessment methods for HVDC systems: a review [C]// 2019 AEIT HVDC International Conference (AEIT HVDC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 1-6.

- [5] 董新洲,汤涌,卜广全,等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3107-3118.

Dong Xinzhou, Tang Yong, Bu Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3118.

- [6] 孟沛戡,向往,潘尔生,等. 分址建设直流输电系统拓扑方案与运行特性研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 4808-4822.

Meng Peiyu, Xiang Wang, Pan Ersheng, et al. Research on topology and operation characteristics of HVDC transmission system based on site-division construction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 4808-4822.

- [7] 王学奎,彭春华,孙惠娟. 考虑 VSC 控制策略的交直流混合电网潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3731-3741.

Wang Xuekui, Peng Chunhua, Sun Huijuan. Power flow calculation of AC/DC hybrid power grid considering VSC control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3731-3741.

- [8] 郭春义,吕乃航,张加卿. 提高 LCC-HVDC 在弱交流系统下的稳定性和动态性能的控制参数优化方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1751-1764.

Guo Chunyi, Lü Naihang, Zhang Jiaqing. Optimization of control parameters to enhance stability and dynamic performance of LCC-HVDC under weak AC condition[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2023, 38(7): 1751-1764.
- [9] 李崇涛, 林啸, 赵勇, 等. 高压直流输电系统暂态过程的解析解法: (一) 数学模型 [J]. 电网技术, 2017, 41(1): 1-8.
Li Chongtao, Lin Xiao, Zhao Yong, et al. An analytical solution for transient process of HVDC transmission system: part 1 mathematical model [J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 1-8.
- [10] 曹虹, 周泽昕, 吕鹏飞, 等. 高压直流输电线路故障初始阶段解析方法研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 137-147.
Cao Hong, Zhou Zexin, Lü Pengfei, et al. Study on analysis method for HVDC transmission line faults at initial stage [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(7): 137-147.
- [11] Payri R, Salvador F J, Gimeno J, et al. Study of cavitation phenomenon using different fuels in a transparent nozzle by hydraulic characterization and visualization [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 44: 235-244.
- [12] 李威, 牛拴保, 吕亚洲, 等. 直流机电暂态仿真建模及与电磁暂态仿真的对比 [J]. 高压电器, 2018, 54(8): 155-160.
Li wei, Niu Shuanbao, Lü Yazhou, et al. HVDC electromechanical transient model and comparison with HVDC electromagnetic transient model [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 155-160.
- [13] 程佩芬, 李崇涛, 傅闯, 等. 基于状态空间法的高压直流输电系统电磁暂态简化模型的解析算法 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1230-1239.
Cheng Peifen, Li Chongtao, Fu Chuang, et al. An analytic solution for simplified electromagnetic transient model of HVDC transmission system based on state space method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1230-1239.
- [14] Beerten J, D'Arco S, Suul A J. Frequency-dependent cable modelling for small-signal stability analysis of VSC-HVDC systems [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(6): 1370-1381.
- [15] 李志显, 李欢, 刘崇茹, 等. 考虑缓冲回路的高压直流输电系统状态空间模型与求解算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 91-101.
Li Zhixian, Li Huan, Liu Chongru, et al. State-space model and solution algorithm of an HVDC system considering a snubber circuit [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 91-101.
- [16] 王宾, 李志中, 董新洲. 基于动态相量法的直流系统暂态响应实时快速仿真计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1608-1617.
Wang Bin, Li Zhizhong, Dong Xinzhou. Real-time rapid simulation method for transient response of LCC-HVDC based on dynamic phasor method [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1608-1617.
- [17] 王宾, 何小才. 经 LCC-HVDC 输电送出系统单端混合等值计算 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5441-5450.
Wang Bin, He Xiaocai. Single terminal mixed equivalence calculation of power transmission system via LCC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5441-5450.
- [18] 周长春, 徐政. 直流输电准稳态模型有效性的仿真验证 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 33-36.
Zhou Changchun, Xu Zheng. Simulation validity test of the HVDC quasi-steady-state model [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 33-36.
- [19] Fan Yue, Wu Jiaze, Niu Shuanbao, et al. Analyzing the impact of the fault ride-through strategies of renewable generation units on power system rotor-angle stability and voltage security [C]//2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 2669-2673.
- [20] Li Xiaoteng, Wu Jiaze, Duan Chao, et al. Analyzing the impact of renewable generation on power system rotor-angle stability [C]//2024 4th International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 284-288.
- [21] 翁华, 徐政, 许烽, 等. 直流系统紧急功率支援的限制因素分析 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1519-1527.
Weng Hua, Xu Zheng, Xu Feng, et al. Research on constraint factor of emergency power support of HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1519-1527.
- [22] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [23] 沙倩雨. 特高压交直流电网在线静态安全分析及辅助决策方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [24] 李岩, 滕云, 冷欧阳, 等. 含多端柔性直流互联的交流电力系统静态安全分析 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 155-161.
Li Yan, Teng Yun, Leng Ouyang, et al. Static security analysis of AC/DC power system with multi-terminal flexible DC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 155-161.

- [25] 刘昕宇, 单永鹏, 辛焕海, 等. 基于直流电压控制的新能源并网系统暂态电压稳定性分析 [J]. 电工技术学报, 2026, 41(9): 2978-2990.
- Liu Xinyu, Shan Yongpeng, Xin Huanhai, et al. Transient voltage stability analysis of voltage source converters integrated system under DC voltage control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(9): 2978-2990.
- [26] 秦玉文, 段超, 杨祺铭, 等. 输电网强度大幅变化下的主动配电网静态电压稳定约束 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(24): 9504-9517.
- Qin Yuwen, Duan Chao, Yang Qiming, et al. Research on steady-state voltage stability constraints for active distribution network under large variations in transmission grid strength [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(24): 9504-9517.
- [27] 李兴源. 高压直流输电系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 9-26.
- [28] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 122-123.
- [29] 连攀杰, 刘文焯, 孙华东, 等. 大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统的高效初始化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(10): 3775-3787.
- Lian Panjie, Liu Wenchao, Sun Huadong, et al. Efficient initialization method for electromagnetic transient simulation system of large-scale new energy connected to the power grid through VSC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(10): 3775-3787.
- [30] 李崇涛, 张建新, 何劲捷, 等. 基于受扰后平衡点延拓的在线暂态稳定控制策略: 受扰后平衡点计算 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(9): 11-21.
- Li Chongtao, Zhang Jianxin, He Jinjie, et al. An on-line transient stability control strategy based on post-disturbance equilibrium point continuation; calculation of post-disturbance equilibrium points [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(9): 11-21.
- [31] 李聪, 戴博伟, 段超, 等. 基于关键准稳态的新能源电力系统暂态频率安全快速评估 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(增刊1): 113-126.
- Li Cong, Dai Bowei, Duan Chao, et al. Rapid evaluation of transient frequency security for renewable energy power system based on critical quasi-steady-state [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(S1): 113-126.
- [32] 李崇涛, 张建新, 何劲捷, 等. 基于受扰后平衡点延拓的在线暂态稳定控制策略: 稳控措施求解 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(9): 22-32.
- Li Chongtao, Zhang Jianxin, He Jinjie, et al. An on-line transient stability control strategy based on post-disturbance equilibrium point continuation; stability control measure solution [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(9): 22-32.

(编辑 亢列梅)