

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

李崇涛¹, 张建新², 何劲捷¹, 刘宇明³, 李诗旻³, 高琴², 段超¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 中国南方电网电力调度控制中心, 510663, 广州;

3. 南方电网科学研究院, 510663, 广州)

摘要: 针对电力系统受扰后暂态失稳问题,提出了一种基于受扰后平衡点构造及延拓的控制策略。首先,基于所提平衡点求解数学模型,沿扰动方向构造并延拓该平衡点;然后,提出了鞍结分岔点求解—平衡点延拓—控制策略校验的三阶段控制策略求解流程,并基于灵敏度分析建立平衡点延拓与控制参数之间的解析关系,优化控制策略的求解;最后,基于 IEEE 39 节点标准算例和省级实际电网算例进行了仿真验证。结果表明:所提控制策略能够有效提升受扰后系统的稳定裕度,相比于传统的控制策略,所提策略给出了解析的控制依据,能够快速精准地确定控制参数的调整方向和幅度,具有更高的计算效率和准确性。该研究可为在线紧急控制提供兼具解析性与可靠性的解决方案。

关键词: 暂态稳定控制;鞍结分岔点;灵敏度分析;在线稳定控制

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202509003 **文章编号:** 0253-987X(2025)09-0022-11

An Online Transient Stability Control Strategy Based on Post-Disturbance Equilibrium Point Continuation: Stability Control Measure Solution

LI Chongtao¹, ZHANG Jianxin², HE Jingjie¹, LIU Yuming³,

LI Shiyang³, GAO Qin², DUAN Chao¹

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

2. Power Dispatching and Control Center, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;

3. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: To address transient instability in power systems following disturbances, a novel control strategy based on the construction and continuation of post-disturbance equilibrium points is proposed. First, a mathematical model is established to solve for the proposed equilibrium point, which is then constructed and extended along the direction of disturbance. A three-stage control solution process is introduced, which involves solving for the saddle-node bifurcation point, extending the equilibrium point, and validating the control strategy. Furthermore, sensitivity analysis is employed to establish an analytical relationship between the extended equilibrium points and control parameters, optimizing the determination of control strategies. Finally, simulations based on the IEEE 39-bus standard test case and provincial-level actual power grid case are conducted for validation. The results demonstrate that the proposed control strategy

effectively enhances the stability margin of the system following disturbances. Compared to traditional control strategies, the proposed strategy offers an analytical basis for control, enabling rapid and precise determination of the direction and magnitude of control parameter adjustments, thus achieving higher computational efficiency and accuracy. This study provides a solution for online emergency control that combines both analytical and reliable features.

Keywords: transient stability control; saddle-node bifurcation; sensitivity analysis; online stability control

电力系统安全稳定控制可依据时间尺度和控制目标划分为4个层级:预防控制、紧急控制、恢复控制和校正控制。不同的控制策略,可基于预想事件触发,也可基于响应触发。对于预想事件触发的控制,一般首先基于暂态仿真工具对系统进行稳定性分析,然后对于失稳的预想故障制定紧急控制策略^[1-5]。根据《电力系统安全稳定控制技术导则》,第二道防线为切机、切负荷等措施,以防系统失稳^[6]。

针对一个暂态功角失稳的预想事故,一般需要采用快速的发电机出力再调度方案,施加紧急控制措施^[7]。在线分析和控制策略制定中,在当前时刻针对下一个运行方式进行预想事故校验,并针对失稳案例制定控制策略,以确保下一个运行方式的安全稳定控制^[8]。这种在线(或称滚动离线)运行方式分析和控制策略制定的执行周期约为15 min,要求在较短的时间内完成系统对所有预想事故的分析。一般针对于失稳预想故障制定对应的策略表^[9],以实施“在线决策,实时匹配”的系统控制。

文献[10-13]基于扩展等面积准则量化了暂态稳定程度,提供稳定裕度对临界机群出力等各种控制量的灵敏度和识别故障失稳模式的能力,可用于制定紧急控制策略。该方法从临界群中切除一部分动能,并减少该群的输入机械功率,通过比较某种控制措施的不同控制量下的稳定裕度,避免切机负效应。在此基础上,文献[14]利用暂态稳定轨迹特征和稳态潮流特征量,建立了运行方式特征量匹配指标,匹配历史接近方式,实现紧急控制策略生成。文献[15]采用两机系统相对动能概念,提出紧急控制方案。

文献[16]基于相轨迹的凹凸性特征实现暂态稳定控制,分析轨迹的凹凸性以及角速度与功角的关系。通过控制策略,引导不稳定系统轨迹在其动态鞍点处(或前)角速度降至零,从而实现系统回摆。文献[17]提出关键支路受扰轨迹凹凸性的暂态稳定判别及紧急控制。

文献[18]采用稳定域的概念,引入主导不稳定

平衡点信息,通过系统平衡点位移在稳定域边界外法向量方向上的投影表征控制措施的效果,据此制定控制策略。但是,主导不稳定平衡点的计算较为困难。文献[19]在制定控制策略时基于仿真和修正暂态能量函数的混合法,主要考虑系统首摆不稳定和稳定情况下的稳定裕度。近年来,研究者在人工智能方面开展了关于暂态稳定性控制策略研究^[20-23],这些不再赘述。

实际电力系统中,受各种控制设施的影响,系统运行于较好的稳定性水平。这种情况下,一般认为受扰后系统如果存在平衡点,则平衡点是稳定平衡点。该假设同样是上述各种稳控措施制定的前提。另外,各种稳控措施的快速投入,能够使得受扰后系统的状态尽可能少地偏离稳态运行点。例如,在故障切除后,10个周波以内系统的控制措施实施到位,在施加控制措施之后,状态量尚远离稳定边界。如果要求平衡点对于系统的特定扰动具有较大的裕度,则可以合理认为状态量在平衡点的吸引域以内。从而将系统控制策略的求解问题,近似转化为平衡点的存在裕度问题。

基于这种考虑,本文提出基于受扰后平衡点在扰动参数域的延拓技术以制定稳定控制策略:将控制策略的有效求解问题,转化为延拓曲线上鞍结分岔点的延拓问题。鞍结分岔点的计算,采用同伦方法予以求解^[24],其延拓问题采用灵敏度给出严格的表达式。为了确保控制策略的可信性,论文采用了鞍结分岔点求解—平衡点延拓—控制策略验证的三阶段控制策略求解,使得基于该方法的稳控策略满足暂态稳定校验。

1 机电暂态分析数学模型与平衡点

电力系统的动态模型通常描述为如下微分代数方程组^[25]

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{\mathbf{x}}}{dt} = \mathbf{f}(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{y}}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{y}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\tilde{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^n$ 包含系统的状态变量; $\tilde{\mathbf{y}} \in \mathbb{R}^m$ 表示系统的代数变量; $\mathbf{f}$ 包含所有微分方程; $\mathbf{g}$ 包含所有代数方程。

假设系统的平衡点为 $(\tilde{\mathbf{x}}_0, \tilde{\mathbf{y}}_0)$ 满足

$$\begin{cases} \mathbf{0} = \mathbf{f}(\tilde{\mathbf{x}}_0, \tilde{\mathbf{y}}_0) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\tilde{\mathbf{x}}_0, \tilde{\mathbf{y}}_0) \end{cases} \quad (2)$$

在对系统的平衡点分析时,上述方程可以被简化为^[24]

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_0) \quad (3)$$

需要说明的是,式(3)中的状态量 $\mathbf{x}_0$ 和式(2)中的状态量 $\tilde{\mathbf{x}}_0$ 不完全相同。但在解得式(3)中的状态量后,可以反算得到式(2)中的平衡点。

2 受扰后系统与控制策略表征建模

在电力系统的动态分析中,构建合理的预设故障集是故障后控制研究的重要步骤。不同的故障导致不同的受扰后系统动态,进而导致不同的控制策略。这里首先说明对应的受扰后系统平衡点计算模型,详细建模过程见[24]。

2.1 受扰前后系统平衡点计算

在机电暂态稳定性分析中,一个合理的扰动包含故障及之后的控制和保护措施。一般的控制保护措施可能不止一项,通过对系统进行时域仿真,并检验最后一个措施实施后状态变量随时间变化的轨迹可以判断系统是否稳定。受扰前后系统暂态及平衡点如图1所示。其中 $\mathbf{f}$ 和 $\mathbf{g}$ 的下标表示式(1)在对应的时刻的表达形式,例如, k 表示 t_k 时刻式(1)的表达形式 $\mathbf{f}_k$ 和 $\mathbf{g}_k$,简写为 $\tilde{\boldsymbol{\varphi}}(\mathbf{x}_0)$ 。

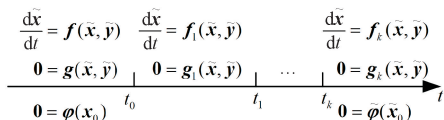


图1 受扰前后系统暂态过程及相关平衡点

Fig.1 Transient of pre-fault and post-fault system equilibrium point as well as the equilibrium points

在暂态稳定性分析中, t_0 时刻之前系统处于稳态。在获取系统潮流计算结果后,通过动态元件数学模型求解系统的平衡点 $\mathbf{x}_0$, 满足 $\mathbf{0} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_0)$ 。从 t_0 时刻开始,系统处于动态过程中。 t_k 时刻系统完成了最后一个控制和保护措施。

一般地,系统故障中不考虑其平衡态信息,这是由于故障过程较为快速,并且在该过程中即便平衡态存在也无意义。严格上说, t_k 时刻之后,在 t 趋于无穷时,一个稳定的系统将运行到新的平衡点 $\mathbf{0} = \tilde{\boldsymbol{\varphi}}(\mathbf{x}_0)$,

从而存在受扰前系统与受扰后系统两个平衡态。其数学模型可统一描述为

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \lambda) \quad (4)$$

式中: $\lambda = 0$ 表示原始系统, $\lambda = 1$ 表示最后一个控保措施之后的系统^[24]。虽然在实际中 λ 只有在 0 和 1 下才有意义,但 λ 构造出受扰前后系统的一个过渡轨迹。

2.2 稳控策略表征

在系统运行时,需要制定不同的稳定控制策略,以应对不同的受扰后失稳情况。一般的稳定控制策略包含切机、切负荷等。这里用变量 p 表征控制策略。

假设对第 k 台同步发电机施加控制策略,降低其出力实现紧急控制,则调整同步发电机水门 / 汽门开度 $Y_{\text{ref},k}$, 有

$$p = Y_{\text{ref},k} \quad (5)$$

若希望在该过程中通过调节发电机端电压施加紧急控制,则可以通过调节励磁参考电压 $V_{\text{ref},k}$ 实现

$$p = V_{\text{ref},k} \quad (6)$$

同样地,假设拟控制第 k 个风力发电场有功出力,则有 $p = P_{w,k}$;若拟控制第 k 个负荷,则 $p = P_{L0,k}$ 。其他情况类推。

3 扰动依赖的平衡点存在裕度指标

受扰后系统出现失稳可能有以下原因:受扰后系统不存在稳定平衡点;受扰后系统存在稳定平衡点,但最后一个控保措施动作后,状态量不在平衡点的吸引域以内。显然,受扰后系统存在稳定平衡点是系统稳定的必要条件。

虽然受扰后系统可能存在若干平衡点,但一般认为对应于受扰前系统仅有一个可运行点,该运行点由受扰前系统的稳定平衡点作为初值计算得到。由于继电保护的快速动作隔离故障,以及高放大倍数的励磁和电力系统稳定器(PSS)的作用,电力系统的稳定性水平不断提升。根据模型,当 λ 增加至 1 时,一般认为运行点存在,且运行点是稳定的。

针对一个特定故障,如图2中黑色曲线所示,随着 λ 的增加,式(4)在 $\lambda < 1$ 时首先到达鞍结分岔点。由于 $\lambda = 1$ 对应受扰后系统的平衡点,可认为系统在该故障下受扰后不存在稳定平衡点,则系统是不稳定的。一个稳定的系统必然在 $\lambda = 1$ 处有解,如图2中绿色曲线所示,此时对应于鞍结分岔点处 $\lambda_{\text{max}} > 1$ 。鞍结分岔点处对应的 λ_{max} 表明了受扰后系统在该扰动下运行点的充裕性。

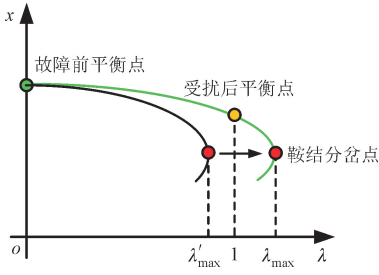


图2 受扰后系统稳态运行点与扰动参数关系

Fig. 2 The relationship of post-fault system equilibrium point and the parameter representing disturbance

当 $\lambda < 1$ 时,受扰后系统不存在平衡点,系统是不稳定的。当平衡点在鞍结分岔点处,该构造的系统平衡点是临界稳定平衡点。当 $\lambda > 1$ 时,受扰后系统的平衡点是稳定平衡点。因此,假设鞍结分岔点度量了所构造系统稳定平衡的边界,则使得平衡点($\lambda = 1$)存在,且远离鞍结分岔点($\lambda = \lambda_{\max}$),则可提高系统的稳定裕度。因此,可以近似将 $\lambda_{\max}$ 作为受扰后系统平衡点的稳定裕度指标。

不同的故障造成不同的受扰后系统运行轨迹,从而对应不同的 $\lambda_{\max}$ 。若在某个扰动下系统失稳,可以根据增加对应扰动下的 $\lambda_{\max}$ 来制定紧急控制策略以提高系统的稳定性。

必须指出的是,由于受暂态过程难以解析的约束,即便系统存在平衡点,确保最后一个控制保护动作后状态量在平衡点的吸引域以内的稳定条件也很难准确判断。由于该指标在建立中假设了系统的动态过程,依据该指标所制定的控制策略需要通过仿真校验以保证策略的可靠性。

4 基于平衡点存在裕度的控制策略

4.1 平衡点存在裕度关于控制参数的灵敏度

为了区别扰动参数和控制参数,在第2节中分别引入 λ 和 p 。若不考虑控制策略,则式(4)表征了受扰后系统的平衡点及存在裕度建模。若计及控制策略,假设系统中有 q 个可调参数,则受扰后系统的平衡点模型可表示为

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{p}) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^q$ 表示可调参数向量。

式(7)定义了状态量 $\mathbf{x}$ 关于 λ 和 $\mathbf{p}$ 的函数。在控制参数 $\mathbf{p}$ 确定的情况下,不断增加 λ ,可以求解得到 $\mathbf{x}$ 关于 λ 的关系。当 λ 增加至 $\lambda_{\max}$ 时,系统到达鞍结分岔点,从而式(7)有解条件暗含了一个 $\lambda_{\max}$ 关于向量 $\mathbf{p}$ 的隐函数

$$\lambda_{\max} = \varphi(\mathbf{p}) \quad (8)$$

第3节讨论了控制参数调整的目的是增加 $\lambda_{\max}$,则获取 $\lambda_{\max}$ 关于参数向量 $\mathbf{p}$ 的梯度信息,即可得到最优的控制方向。而式(8)的表达式难以显式得到,可以借助对式(7)的鞍结分岔点分析,得到其梯度信息。

令 $\mathbf{p} = \mathbf{0}$,可求解受控前的受扰后系统鞍结分岔点。系统鞍结分岔点处方程(7)有解 $\mathbf{x}_0$,满足

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_0, \lambda_{\max}, \mathbf{0}) \quad (9)$$

由于在鞍结分岔点处,Jacobian 矩阵发生奇异,令 $\lambda = \lambda_{\max}$ 处的 Jacobian 矩阵表示为

$$\mathbf{J} = \left. \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{(\mathbf{x}_0, \lambda_{\max}, \mathbf{0})} \quad (10)$$

由于 $\mathbf{J}$ 奇异,则必然存在 0 特征值。设 $\mathbf{J}$ 对应的左特征向量为 $\mathbf{u}$,有

$$\mathbf{u}^T \mathbf{J} = \mathbf{0} \quad (11)$$

即在鞍结分岔点 $(\mathbf{x}_0, \lambda_{\max}, \mathbf{0})$ 处式(9)和(11)同时满足。

为此,在 $(\mathbf{x}_0, \lambda_{\max}, \mathbf{0})$ 处对式(7)进行 Taylor 展开,并仅保留首次项,有

$$\mathbf{0} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{x} + \left. \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}}{\partial \lambda} \right|_{(\mathbf{x}_0, \lambda_{\max}, \mathbf{0})} \Delta \lambda + \left. \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}}{\partial \mathbf{p}} \right|_{(\mathbf{x}_0, \lambda_{\max}, \mathbf{0})} \Delta \mathbf{p} \quad (12)$$

为了方便,以下的推导中忽略下标 $(\mathbf{x}_0, \lambda_{\max}, \mathbf{0})$ 。考虑到式(11),对式(12)两边左乘 $\mathbf{u}^T$,有

$$\mathbf{0} = \mathbf{u}^T \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \mathbf{u}^T \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}}{\partial \mathbf{p}} \Delta \mathbf{p} \quad (13)$$

得

$$\Delta \lambda = \nabla \lambda_{\max} \Delta \mathbf{p} \quad (14)$$

其中 $\nabla \lambda_{\max} \in \mathbb{R}^q$ 表示 $\lambda_{\max}$ 关于控制参数向量 $\mathbf{p}$ 的梯度信息

$$\nabla \lambda_{\max} = - \left(\mathbf{u}^T \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}}{\partial \mathbf{p}} \right) / \left(\mathbf{u}^T \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}}{\partial \lambda} \right) \quad (15)$$

该梯度向量 $\nabla \lambda_{\max}$ 中,第 i ($1 \leq i \leq q$) 个元素表示了 $\lambda_{\max}$ 关于参数 p_i 的灵敏度 $\partial \lambda_{\max} / \partial p_i$ 。

4.2 控制策略的制定

当一个不稳定的扰动确定后,需要制定相应的控制策略,确定 q 个可调节参数求解调节量,使得施加控制的受控系统稳定。控制策略的目标是提高 $\lambda_{\max}$ 至某个大于1的合理门槛值,用 $\lambda_{\max}^c$ 表示,上标 c 表示受控后的扰动后系统。

在求解得到梯度向量之后,可以根据灵敏度信息假设参数有如下排序

$$\frac{\partial \lambda_{\max}}{\partial p_1} \geq \dots \geq \frac{\partial \lambda_{\max}}{\partial p_j} \geq 0 \geq \frac{\partial \lambda_{\max}}{\partial p_{j+1}} \geq \dots \geq \frac{\partial \lambda_{\max}}{\partial p_q} \quad (16)$$

显然增加参数 $p_1 \sim p_j$ 和减小参数 $p_{j+1} \sim p_q$ 能够提高 $\lambda_{\max}$ 。最有效的调整策略则为增加 p_1 , 减小 p_q 。

控制中需要选择代价最小的控制策略, 该代价需要由系统运行人员确定。在本文中选择不偏离原始参数最小的控制代价。

根据如上信息, 对受扰后的系统的控制策略制定, 可以采用如下的优化问题进行求解

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^q |\Delta p_i| \\ \text{s. t.} & \Delta \lambda \geq \lambda_{\max}^c - \lambda_{\max} \\ & \Delta p_{i,\min} \leq \Delta p_i \leq \Delta p_{i,\max}, i = 1, \dots, q \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\Delta p_{i,\min}$ 、 $\Delta p_{i,\max}$ 分别表示控制参数 p_i 增量的上下界。

由于 $\Delta \lambda$ 的准确解需要求取非线性方程, 在该问题中, 可以采用式(14)近似求解。

另外, 控制策略制定时, 如果控制方案为切机或者切负荷措施, 可以考虑约束条件中计及功率平衡信息, 以降低受控后系统的稳态频率偏差。功率控制信息表示如下

$$\sum_i p_i = 0, p_i \in \{Y_{\text{ref}}, P_{L0}, P_W\} \quad (18)$$

4.3 控制策略计算效率分析

根据上述控制策略制定方案, 在计算中需要首先获取鞍结分岔点。在该模型中, 鞍结分岔点可采用同伦法求解一系列代数方程式(9)求得。在计算过程中, 预估-校正策略能够大大提高计算效率。另外, 相对于暂态仿真, 由于受扰后系统平衡点计算模型阶数远小于实际的微分-代数方程个数, 因此计算速度相对于暂态仿真分析具有极大优势。

5 稳控策略制定流程

当通过暂态仿真或者其他稳定性评估方法得到某个失稳扰动, 在确定候选调整参数以及所考虑到的约束条件后, 按照本文方法构造稳定控制策略。为了确保策略的有效性, 该稳定策略的求解通过以下流程进行: 扰动依赖的鞍结分岔点求解, 基于分岔点延拓的控制措施制定, 控制效果的仿真校验三阶段模式进行。具体流程如下:

步骤1 读取系统信息以及失稳扰动信息;

步骤2 形成模型 $\mathbf{0} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{p})$;

步骤3 令 $\mathbf{p} = \mathbf{0}$, 通过同伦法延拓求解鞍结分岔点 $(\mathbf{x}_0, \lambda_{\max}, \mathbf{0})$;

步骤4 利用式(10)得到分岔点 Jacobian 矩阵;

步骤5 求解 $\mathbf{J}$ 的 0 特征值对应的特征向量 $\boldsymbol{\mu}$;

步骤6 代入 $(\mathbf{x}_0, \lambda_{\max})$ 得到 $\partial \boldsymbol{\varphi} / \partial \lambda$ 和 $\partial \boldsymbol{\varphi} / \partial \mathbf{p}$;

步骤7 利用式(15)求解梯度信息 $\nabla \lambda_{\max}$;

步骤8 给定 $\lambda_{\max}^c$ 和参数调节量上下界, 求解优化问题(17), 得控制策略 $\Delta \mathbf{p}$;

步骤9 将控制策略施加于暂态仿真校验, 若稳定, 结束;

步骤10 增加 $\lambda_{\max}^c$, 转到步骤8。

其中步骤3为鞍结分岔点求解, 具体方法见[24]; 步骤4~8为控制策略制定, 具体方法见第4节; 步骤9为暂态仿真校验, 以确保稳控措施的可信性。

需要说明的是, 门槛值 $\lambda_{\max}^c$ 与系统稳定性水平相关, 受动态元件的结构和参数约束, 对不同的系统和不同扰动, 最小的 $\lambda_{\max}^c$ 并不相同。

由于受系统的惯性作用, $\lambda_{\max}^c = 1$ 时系统必然是不稳定的, 它只是表示了平衡点存在, 但平衡点临界稳定。虽然 $\lambda_{\max}^c > 1$ 时平衡点存在并认为稳定, 但系统状态在控制措施实施到位时, 并不一定在平衡点的稳定邻域内, 从而需要一定合理的稳定性裕度, 可近似用 $\lambda_{\max}^c - 1$ 来表示。在控制措施实施到位时, 状态量偏离平衡点越远, 所需要的裕度 $\lambda_{\max}^c - 1$ 越大。

状态量偏离平衡点受控制策略实施到位的时间约束, 控制策略实施到位的时间越早, 状态量偏离平衡点越近; 反之偏离平衡点越远。因此, 控制策略的快速执行, 有利于系统的稳定和控制量的减小。在实际工程中, 一般按照如下的时刻校验预想事故以及实施紧急控制措施: 0 时刻发生故障; 5 个交流系统周期故障切除; 15 个交流系统周期控制策略实施到位, 对工频频率为 50 Hz 的系统而言, 故障切除后 0.2 s 控制措施实施到位。显然此时状态量尚远离稳定边界。为了确保受控系统的稳定, 根据该控制周期, 在本文中选择初始的 $\lambda_{\max}^c = 1.3$, 以预留合理的稳定裕度并减小控制代价。该值受动态元件特性影响, 需根据具体场景按照步骤9~10 进行调整。

该控制策略制定过程中, 没有严格刻画系统的动态过程, 而是采用平衡点存在性裕度构造控制策略。该假设建立于“实际电力系统中具有较好的稳定性水平”的前提下, 即存在受扰后平衡点, 平衡点是稳定的。对于控制器参数缺乏优化导致的低频振荡问题不在该策略的考虑范围内。对于控制器参数缺乏优化导致的低频振荡问题, 应该首先通过控制器参数优化和运行方式合理布置, 增加对应振荡模式的阻尼, 以确保系统正常运行并能够经受绝大多数的预想事故。

6 算例分析

为了验证本文提出策略的有效性和适用性,选取 IEEE 39 节点系统和省级电网系统作为测试平台进行仿真分析。所采用的算例见文献[24]。仿真采用 MATLAB R2022a 和 DSP 2.3.33.1 软件平台等工具实现,在配备 8.00 GB RAM 的 Intel(R) Core(TM) i5-7400@ 3.00 GHz 计算机上进行编程和仿真,针对不同故障情景,分析控制措施的灵敏度和系统恢复效果,进一步说明该策略的实际应用价值。

6.1 IEEE 39 节点系统算例验证

本算例中,同步发电机模型为转子 4 绕组模型,励磁采用可控硅整流励磁系统,水轮机及其调速系统采用 ZIP 负荷模型。本算例中提高受扰前系统负荷水平至原始潮流的 2 倍,以构造爬行失步案例。下面将基于鞍结分岔点灵敏度分析的策略,通过调整发电机出力,验证策略的有效性。

受扰前系统频率为 50 Hz,设置预想故障如下:重载支路 6~11 在 $t=0$ s 时在节点 6 侧发生了三相短路故障,并在 $t=0.1$ s 时切除。故障发生后,系统的时域仿真结果和同伦过程如图 3、图 4 所示。

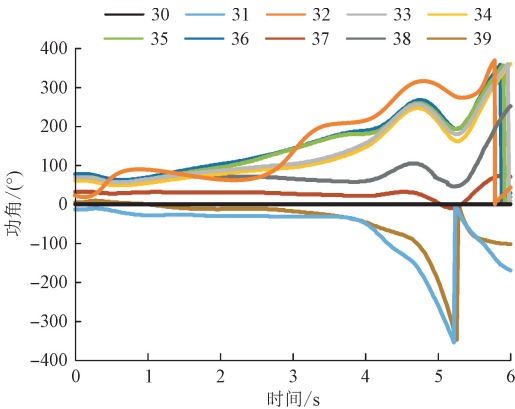


图 3 故障后全网发电机相对功角时域变化
Fig. 3 Time-domain variation of relative rotor angles of all generators in the power system after disturbance

以 30 节点处的发电机功角作为参考,故障发生后,系统近似分为 3 群,其中处于 30、37 号节点,31、39 号节点以及 32、33、34、35、36、38 号节点处之间的相对功角不断增大,系统呈现爬行失步。对受扰后系统进行稳态运行点分析时,采用牛顿法不能求得运行点。因此,采用式(4)构造模型,通过同伦法进行受扰后的稳态运行特性分析,结果如图 4 所示。在该算例中,鞍结分岔点处对应的故障参数 $\lambda_{\max} = 0.8429 < 1$,即受扰后系统不存在平衡点。

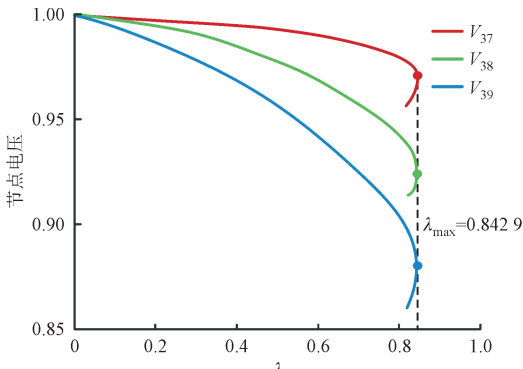


图 4 IEEE 39 节点系统 $V-\lambda$ 同伦曲线
Fig. 4 $V-\lambda$ curve of the IEEE 39-bus system derived via homotopy method

按照本文所提策略,通过联动调整发电机出力对系统施加强急控制。鞍结分岔点对所有发电机出力参考值的灵敏度如表 1 所示。计算表明,增加 30、31、37、38 和 39 节点的发电机出力,或者降低 32~36 节点发电机出力,能够提升平衡点的存在性裕度。这与暂态仿真的分群信息有所不同。在暂态仿真中,38 节点发电机处于超前群,而在控制策略中,提高其出力反而是有效的。其中,节点 37 和 32 的发电机控制效果最佳。

表 1 IEEE 39 节点系统鞍结分岔点对发电机出力的灵敏度
Table 1 Sensitivity of the saddle-node bifurcation point to generator active power of IEEE 39-bus system

节点 编号	灵敏度 计算值	扰动验证的 灵敏度	偏差/%
37	0.326 6	0.343 6	-4.94
30	0.263 0	0.276 4	-4.81
38	0.202 1	0.204 2	-1.01
39	0.207 6	0.199 4	4.10
31	0.138 4	0.144 6	-4.27
36	-0.088 7	-0.084 9	4.47
35	-0.112 8	-0.114 3	-1.31
33	-0.158 6	-0.162 8	-2.57
34	-0.190 3	-0.200 2	-4.94
32	-0.271 6	-0.285 7	-4.93

为了验证灵敏度结果的准确性,在受扰后系统的发电机处各增加 5 MW 的有功出力扰动,求解鞍结分岔点,灵敏度和偏差的数值结果如表 1 后两列所示。由表 1 可见,灵敏度结果与扰动验证误差均在 5% 以内,这是由于验证采用非线性模型,而灵敏度计算采用线性模型所导致。误差在很小的范围内,说明了策略的有效性。

假设所有发电机出力偏差的上限为 50 MW,求

解可得以下紧急控制措施:将 37、30 号节点处的发电机的出力分别增加 50、46 MW;将 32、34 号节点处的发电机的出力分别减少 50、46 MW。采取控制措施后,同伦曲线的鞍结分岔点处对应的 $\lambda_{\max}$ 约为 1.3,系统存在平衡点且具有较好的裕度。在 $t = 0.3$ s 控制策略施加到位,相对功角变化如图 5 所示。可以看出,在小范围波动后趋于定值,系统恢复稳定。

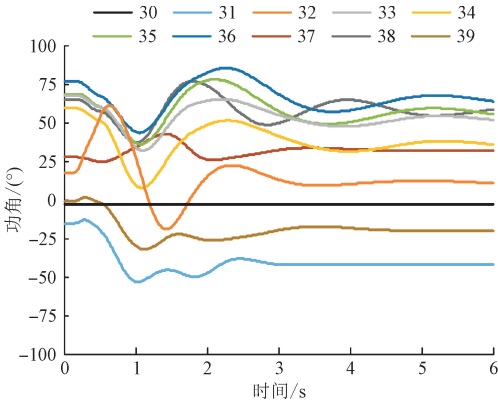


图 5 采取控制措施后全网发电机相对功角时域变化
Fig. 5 Time-domain variation of relative generator power angles across the network after control

上述策略计算过程只需要对 Jacobian 矩阵进行一次三角分解(LU 分解),然后分别进行前代和回代运算即可。计算完灵敏度后,控制策略的制定转化为线性约束下的优化问题。整个流程耗时仅 0.036 21 s,高效支撑了在线决策需求。

为了进一步验证灵敏度对策略有效性的影响,本文设计并实施了基于梯度信息的仿真验证流程,其基本思想为:若灵敏度计算结果准确,则沿梯度的反方向调整控制参数,系统应呈现出稳定性下降趋势,具体流程如下。

(1)系统初始化至临界稳定状态。将系统调节至临界稳定运行点,即系统运行状态接近稳定性边界。在该临界状态下,系统对微小扰动高度敏感,具备向稳定或失稳方向演化的可能性,为后续灵敏度验证提供合理初始条件。

(2)基于梯度信息实施反向调控。根据梯度信息,在 0.2 s(10 个交流系统周期)后向反方向分别调整各台发电机出力直至系统失稳,观察所需要调整的幅度是否与灵敏度结果相符,即灵敏度越大的控制参数需要调整的幅度越小。

按照上述步骤进行算例验证,受扰前 IEEE 39 节点系统频率为 50 Hz,设置如下扰动:节点 9~39 的线路在 $t = 0$ s(0 个交流系统周期)时在节点 9 侧发生三相短路故障并在 $t = 0.1$ s(5 个交流系统周

期)时切除,此时全网发电机相对功角时域变化如图 6 所示,处于临界稳定状态。

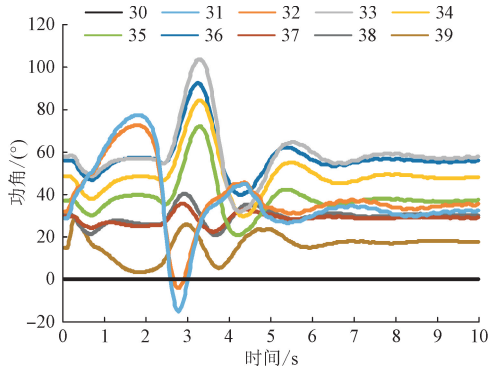


图 6 故障后全网发电机相对功角时域变化图
Fig. 6 Time-domain variation of relative rotor angles of all generators in the power system after disturbance

上述扰动条件下,按照同伦法求解鞍结分岔点处对应的故障参数 $\lambda_{\max} = 1.147$,计算鞍结分岔点对所有发电机出力参考值的灵敏度信息如表 2 所示。

表 2 IEEE 39 节点临界稳定系统鞍结分岔点对发电机出力的灵敏度

Table 2 Sensitivity of the saddle-node bifurcation point to generator active power of IEEE 39-bus system on a marginally stable operating point

节点编号	灵敏度	节点编号	灵敏度
39	0.395 6	35	0.197 8
30	0.351 7	36	0.175 5
38	0.333 2	33	0.137 6
37	0.263 9	32	-0.526 9
34	0.210 8	31	-0.567 4

根据表 2 的梯度信息,在 0.2 s(10 个交流系统周期)后向反方向分别单独调整各台发电机出力直至系统失稳,观察所需要调整的幅度,如表 3 所示。

表 3 使系统失稳各发电机出力所需调整的幅度
Table 3 Required adjustment magnitude of generator outputs for system instability

节点编号	出力调整量/MW	$\lambda_{\max}$
39	-9.0	1.118 6
30	-10.0	1.120 3
38	-10.5	1.121 5
37	-13.0	1.123 7
34	-16.0	1.124 9
35	-17.0	1.125 7
36	-19.0	1.127 8
33	-24.0	1.129 0
32	7.0	1.117 5
31	6.5	1.117 6

综合表 2 与表 3 可知,各发电机所需单独调整的幅度与其灵敏度值呈现良好的反相关性;鞍结分岔点处灵敏度越大的发电机使系统失稳所需调整的幅度越小,反之亦然。上述结果充分说明本文所提方法能够准确刻画控制参数对系统稳定性的影响,验证了灵敏度计算方法的正确性和控制策略制定的有效性。

6.2 省级电力系统算例验证

为进一步验证本文策略在复杂电力系统中的适用性,以我国某省级电网作为验证算例,该系统由 729 个节点信息组成,其中包含 282 个负荷节点以及 33 个发电机节点。考虑该电网系统运行过程中遭受以下故障:支路 26—30 在 $t=0$ s 时发生了三相短路故障,并在 5 个周波之后即 $t=0.1$ s 时切除。

图 7 为省级电网部分地理接线图,其中数字表示负荷节点, $G_A \sim G_P$ 表示发电机节点。上述故障发生后系统的时域仿真结果如图 8 所示,总体上系统左侧(图 7 绿框)的发电机群相对系统右侧(图 7 蓝框)的发电机群振荡直至失步。由暂态仿真曲线可见,在扰动发生之后,系统出现暂态功角失稳现象。注意到在该扰动后,受扰后系统首摆稳定,然而在第二摆之后出现了爬行失步情况。

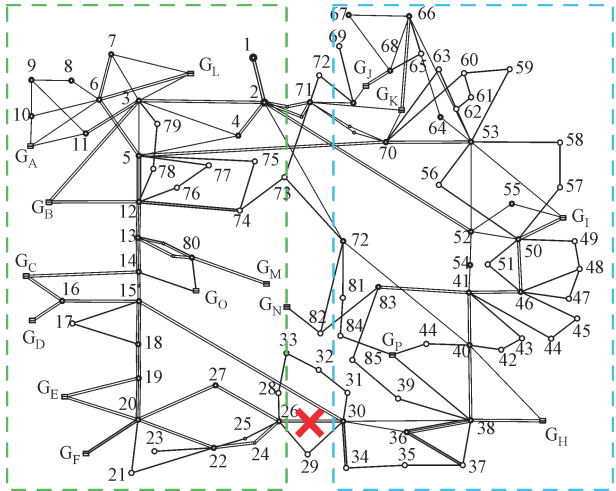


图 7 省级电网系统拓扑结构

Fig. 7 Topology of the provincial power grid system

对受扰后系统求解平衡点无法直接得出。采用同伦法延拓求解,得到节点电压关于 λ 曲线如图 9 所示,图中电压为标么值。由图可见,鞍结分岔点处对应的故障参数 $\lambda=0.930\ 7<1$,故障后系统平衡点不存在。

按照所提策略,计算鞍结分岔点处故障参数对各发电厂出力的灵敏度如表 4 所示。计算过程耗时 0.135 97 s,表明该方法在大型电力系统中仍能保持较高计算效率。考虑到实际工程中通常部署多台高

性能计算节点组成计算机集群,其计算能力显著优于本文采用的实验平台,因此上述结果充分说明本文的控制策略制定方法具有较高的计算效率,具备在线稳定控制应用中实时响应的潜力和可行性。

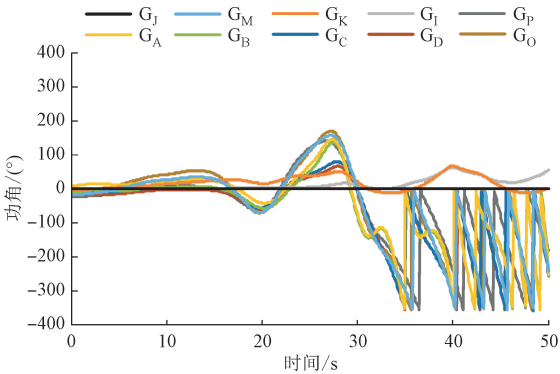


图 8 故障后部分发电机相对功角时域变化

Fig. 8 Time-domain variation of relative rotor angles of some generators in the power system after disturbance

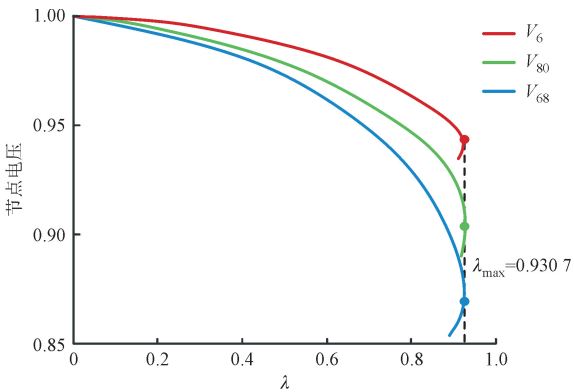


图 9 省级电网系统 $V-\lambda$ 同伦曲线

Fig. 9 $V-\lambda$ curve of the provincial power system derived via homotopy method

表 4 省级电网系统鞍结分岔点对发电机出力的灵敏度

Table 4 Sensitivity of the saddle-node bifurcation point to generator active power of the provincial power system

发电机 编号	灵敏度	发电机 编号	灵敏度
G_J	$6.698\ 7\times10^{-2}$	G_M	$-2.519\ 6\times10^{-2}$
G_K	$6.427\ 5\times10^{-2}$	G_A	$-2.762\ 5\times10^{-2}$
G_I	$6.104\ 3\times10^{-2}$	G_O	$-3.247\ 1\times10^{-2}$
G_B	$5.589\ 1\times10^{-2}$	G_E	$-4.086\ 4\times10^{-2}$
G_P	$-2.327\ 5\times10^{-2}$	G_C	$-4.287\ 6\times10^{-2}$

值得注意的是,在省级电网中,鞍结分岔点处故障参数对各可调参数的灵敏度相比前文基于 IEEE 39 节点系统的结果明显更小,这主要是因为省级电

网的规模更大、网架结构更复杂和功率分布更分散。在大电网中,由于节点数量多、拓扑复杂,单个可调参数的改变对全局潮流分布和动态行为的影响被削弱。同时,复杂的网架结构和广泛的负荷分布增加了系统的调节冗余,进一步降低了局部改变传递至全网的灵敏度。这一特性表明,随着系统规模和复杂性的增加,单参数的灵敏度逐步减小,对控制策略的精细化设计和全局性评估提出了更高要求。

结合灵敏度计算结果以及实际系统中的各发电机的出力上线,在 $t = 0.3 \text{ s}$ 时采取控制措施如下:将 G_K 、 G_J 、 G_I 带点处出力分别增加 200、200、194 MW;将 G_C 、 G_A 、 G_E 处的发电机的出力分别减少 200、200、194 MW。

施加控制策略后, $\lambda_{\max}^c$ 被提升至约 1.3, 满足要求。全网发电机相对功角变化如图 10 所示。观察可得,在采取措施后,系统的稳定性均得到了有效提升,证明了控制策略的有效性。

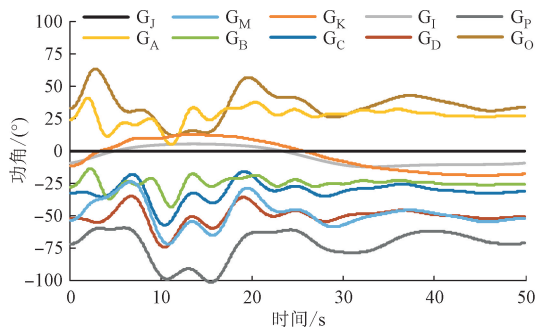


图 10 采取控制措施后全网发电机相对功角时域变化
Fig. 10 Time-domain variation of relative generator power angles across the network after control

需要指出的是,当系统状态改变时,灵敏度会发生相应的变化。但这种变化对最终控制效果的影响是有限的,主要原因如下:首先,灵敏度反映了系统在特定平衡点附近的局部特性,其变化具有连续性,在控制策略实施后的短时间内,系统状态通常不会发生剧烈变化,因此灵敏度的相对顺序或趋势一般保持不变;其次,本文所选控制变量均为高灵敏度参数,其正负号在状态变化时通常不会反转,从而确保了调整方向的正确性。这一特性进一步验证了本文所提控制策略的鲁棒性和实用性。

7 结 论

本文针对大规模电力系统暂态稳定控制问题,提出了一种基于受扰后平衡点构造及延拓的控制策略,主要结论如下。

(1) 本文构造了故障参数依赖和控制参数依赖的受扰后+受控后系统平衡点计算模型,用于准确反映故障和控制信息对受扰后平衡点的影响。

(2) 将受扰后系统同步稳定性问题,近似为平衡点存在性以及平衡点存在裕度问题。利用平衡点存在的故障参数边界刻画平衡点存在性裕度。

(3) 利用鞍结分岔点处 Jacobian 矩阵的奇异性,推导出平衡点裕度扩展与控制参数的灵敏度解析关系,设置模型求解控制策略。

(4) 提出故障依赖的鞍结分岔点求解—平衡点延拓—控制策略校验三阶段控制策略制定流程,以确保稳控策略的可信性。

将所提策略应用于标准系统和实际电力系统进行控制措施的校验,验证了策略的合理性。该策略基于代数方程构造,并给出解析过程,有助于实际系统的预防和紧急稳定控制策略的制定。

参考文献:

- [1] 顾卓远, 汤涌, 孙华东, 等. 基于响应的电力系统安全稳定综合防御技术 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 943-952.
GU Zhuoyuan, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Study on framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 943-952.
- [2] 姜涛, 谭洪强, 李雪, 等. 电力系统热稳定安全域边界快速搜索的优化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6533-6546.
JIANG Tao, TAN Hongqiang, LI Xue, et al. A general optimization model for exploring static thermal security region boundary in bulk power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6533-6546.
- [3] HUANG Qiuhua, HUANG Renke, HAO Weituo, et al. Adaptive power system emergency control using deep reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1171-1182.
- [4] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 振荡中心联络线大扰动轨迹特征及紧急控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1079-1087.
ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. Large disturbed trajectory characteristic of tie-line located in the oscillation center and emergency control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1079-1087.
- [5] 袁季修. 防御大停电的广域保护和紧急控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定控制技术导则: GB/T 26399—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [7] 江昌旭, 刘晨曦, 林铮, 等. 基于深度强化学习的电力系统暂态稳定控制策略研究综述 [J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 5171-5186.
- JIANG Changxu, LIU Chenxi, LIN Zheng, et al. Review of power system transient stability control strategies based on deep reinforcement learning [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5171-5186.
- [8] 李轻言, 林涛, 杜蕙, 等. 面向直流受端新型电力系统暂态电压稳定的紧急控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2024, 44(3): 195-202.
- LI Qingyan, LIN Tao, DU Hui, et al. Emergency control for transient voltage stability of HVDC receiving-end new power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(3): 195-202.
- [9] 周良松, 夏成军, 彭波, 等. 电力系统暂态稳定控制策略表的应用研究 [J]. 电网技术, 2000, 24(1): 13-15.
- ZHOU Liangsong, XIA Chengjun, PENG Bo, et al. Study on application of list of control schemes in power system transient stability control [J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 13-15.
- [10] 薛禹胜, 李威, HILL D J. 暂态稳定混合控制的优化(一)单一失稳模式的故障集 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 6-10.
- XUE Yusheng, LI Wei, HILL D J. Optimal hybrid control of transient stability: part one for cases with a unique unstable mode [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 6-10.
- [11] 李威, 薛禹胜, HILL D J. 暂态稳定混合控制的优化(二)不同失稳模式的故障集 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 7-10.
- LI Wei, XUE Yusheng, HILL D J. Optimal hybrid control of transient stability: part two for cases with different unstable modes [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 7-10.
- [12] 郑超, 孙华东. 功角稳定支路暂态输电能力与扩展等面积准则方法之关联评析与互补应用 [J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4844-4854.
- ZHENG Chao, SUN Huadong. Association analysis and complementary application of BTTC and EE AC method for rotor angle stability [J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4844-4854.
- [13] 方勇杰, 范又涛, 陈永红, 等. 在线预决策的暂态稳定控制系统 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 8-11.
- FANG Yongjie, FAN Youtao, CHEN Yonghong, et al. An on-line transient stability control system of large power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 8-11.
- [14] 孙仲卿, 刘福锁, 李威, 等. 基于特征匹配的暂态稳定紧急控制策略快速生成 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(2): 167-175.
- SUN Zhongqing, LIU Fusuo, LI Wei, et al. Rapid generation of transient stability emergency control strategy based on feature matching [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(2): 167-175.
- [15] 顾卓远, 汤涌, 张健, 等. 基于相对动能的电力系统暂态稳定实时紧急控制方案 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1095-1102.
- GU Zhuoyuan, TANG Yong, ZHANG Jian, et al. Real-time power system transient stability emergency control scheme based on the relative kinetic energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1095-1102.
- [16] 张保会, 王怀远, 杨松浩, 等. 电力系统暂态稳定性闭环控制(五): 控制量的实时计算 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12): 1-5.
- ZHANG Baohui, WANG Huaiyuan, YANG Songhao, et al. Closed-loop control of power system transient stability(5): calculation of control quantity [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 1-5.
- [17] 郑超, 苗田, 马世英. 基于关键支路受扰轨迹凹凸性的暂态稳定判别及紧急控制 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2600-2610.
- ZHENG Chao, MIAO Tian, MA Shiyong. Transient stability identification and emergency control based on the convex characteristic of the key branch's disturbed trajectory [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2600-2610.
- [18] 张瑞琪, 闵勇, 侯凯元. 电力系统切机/切负荷紧急控制方案的研究 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 6-12.
- ZHANG Ruiqi, MIN Yong, HOU Kaiyuan. A new method for generation shedding and load shedding in power system emergency control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 6-12.
- [19] 任伟, 房大中, 陈家荣, 等. 大电网暂态稳定紧急控制下切机量快速估计算法 [J]. 电网技术, 2008, 32(19): 10-15.
- REN Wei, FANG Dazhong, CHEN Jiarong, et al. A fast algorithm to estimate generation capacity tripped by emergency control for transient stability of large power system [J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 10-15.

- [20] 李宏浩, 张沛, 刘翌. 基于深度强化学习的暂态稳定紧急控制决策方法 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 144-152.
LI Honghao, ZHANG Pei, LIU Zhao. Decision-making method for transient stability emergency control based on deep reinforcement learning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 144-152.
- [21] 杨跃, 刘友波, 刘俊勇, 等. 基于神经网络预测校核的暂态稳定预防控制 [J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4076-4082.
YANG Yue, LIU Youbo, LIU Junyong, et al. Preventive transient stability control based on neural network security predictor [J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4076-4082.
- [22] 范士雄, 郭剑波, 马士聪, 等. 混合增强智能在电力系统中的应用研究 [J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4081-4091.
FAN Shixiong, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Application analysis and exploration of hybrid-augmented intelligence in power systems [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4081-4091.
- [23] 李志兵, 肖健梅, 王锡淮. 基于多粒度 NRS 和改进 Bi-LSTM 的电力系统暂态稳定评估 [J]. 电气工程学报, 2023, 18(3): 232-241.
LI Zhibing, XIAO Jianmei, WANG Xihuai. Transient stability assessment of power system based on multi-granularity neighborhood rough set and improved bi-directional long-short-term memory network [J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(3): 232-241.
- [24] 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/OL]. (2025-05-26) [2025-07-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.t.20250523.1633.004.html>.
LI Chongtao, ZHANG Jianxin, HE Jingjie, et al. An online transient stability control strategy based on extension of post-fault equilibrium point: part I solving of post-fault equilibrium point [J]. (2025-05-26) [2025-07-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.t.20250523.1633.004.html>.
- [25] 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.

(编辑 亢列梅)

(上接第 21 页)

- [18] 娄源媛, 蒋若蒙, 钱峰, 等. 考虑负荷特性的解列后受端电网频率控制策略 [J]. 电网技术, 2019, 43(1): 213-220.
LOU Yuanyuan, JIANG Ruomeng, QIAN Feng, et al. Frequency control strategy after receiving-end power grid splitting considering load characteristics [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 213-220.
- [19] BUTICCHI G, DE CARNE G, BARATER D, et al. Analysis of the frequency-based control of a master/slave micro-grid [J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(10): 1570-1576.
- [20] MAHDAVIAN A, GHADIMI A A, BAYAT M. Microgrid small-signal stability analysis considering dynamic load model [J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(13): 2799-2813.
- [21] 赵明权. 用于系统动态电压稳定性分析的内电势运动方程建模方法及装备动态特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [22] 汤涌, 卜广全, 印永华, 等. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册 [M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2020.
- [23] 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.
- [24] DINESHA D L, GURRALA G. Application of multi-stage homotopy analysis method for power system dynamic simulations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2251-2260.
- [25] 王晶, 骆旭伟, 陈骏宇, 等. 含微电网中压系统的 PQ-同伦全局潮流计算方法 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 15-20.
WANG Jing, LUO Xuwei, CHEN Junyu, et al. PQ-homotopy method for calculating global power flow of MV system with microgrids [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 15-20.

(编辑 亢列梅)