

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

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: 针对传统潮流计算模型在电力系统受扰后平衡点计算中的局限性, 提出一种考虑动态元件稳态运行特性的受扰后系统平衡点计算方法。首先, 从代数方程角度出发, 构建了包含电源、负荷及网络的受扰后平衡点分析模型; 之后, 基于同伦法给出了受扰后系统平衡点的高效求解步骤, 解决了严重扰动下牛顿法收敛困难的问题; 最后, 采用 IEEE 39 节点标准算例及省级实际电网算例验证了所提方法。结果表明: 所建模型适用于包括新能源在内的动态元件, 具有较强的通用性; 所提计算方法与暂态仿真计算方法的收敛结果完全相符, 且收敛耗时减少了 95% 以上, 准确性相比传统的潮流方法提高了至少 3 个数量级, 为受扰后系统的快速在线稳定性评估提供了高效解析工具。

关键词: 电力系统; 受扰后平衡点; 暂态稳定; 同伦法

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202509002 **文章编号:** 0253-987X(2025)09-0011-12

An Online Transient Stability Control Strategy Based on Post-Disturbance Equilibrium Point Continuation: Calculation of Post-Disturbance Equilibrium Points

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 the limitations of traditional power flow models in calculating post-disturbance equilibrium points in power systems, a method for calculating post-disturbance system equilibrium points that accounts for the steady-state operating characteristics of dynamic components is proposed. First, from the perspective of algebraic equations, an analytical model for post-disturbance equilibrium points is constructed, incorporating power sources, loads, and the network. Subsequently, based on the homotopy method, an efficient solution procedure for post-disturbance system equilibrium points is presented, resolving the convergence challenges of the Newton method under severe disturbances. Finally, the proposed method is validated using the IEEE 39-bus standard test case and a provincial real-world grid case. The results demonstrate that the developed model is

applicable to dynamic components, including renewable energy sources, exhibiting strong generality. The proposed calculation method yields results fully consistent with transient simulation outcomes while reducing convergence time by over 95%. Compared to traditional power flow methods, its accuracy is improved by at least three orders of magnitude, providing an efficient analytical tool for rapid online stability assessment of post-disturbance systems.

Keywords: power system; post-fault equilibrium point; transient stability; homotopy method

在电力系统运行过程中,可能会受到各种扰动,如负荷变化、线路切除、新能源出力波动等。对受扰后系统的稳定性评估是目前电力系统的重要问题之一^[1-4]。

在频率、电压和同步稳定性的视角下,受扰后系统如果稳定,则必然存在一个稳定平衡点^[5];反之如果系统失稳,则会出现爬行失步或振荡失步^[6]。一般而言,爬行失步在以下情况出现:①受扰后系统不存在平衡点;②受扰后系统存在稳定平衡点,但受扰后系统的初值不在平衡点的吸引域以内。如果系统出现振荡失步,则可能因为受扰后系统平衡点处存在正实部的共轭特征值,导致系统在平衡点邻域内出现不稳定的发散振荡动态特性。平衡点与稳定性关系如图1所示。需要说明的是,本文受扰后系统为系统最后一个控制动作之后的系统。

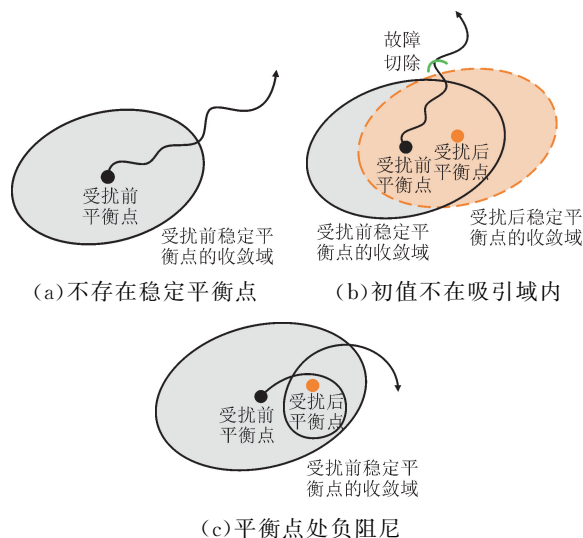


图1 平衡点与稳定性关系图

Fig.1 Graph of the relationship between equilibrium point and stability

在新能源大规模接入后,系统的频率和功角问题愈发严重。因此,基于受扰后系统的运行点对系统失稳原因的判断和定位^[7-8],以及控制策略的制定十分必要^[9]。文献[10]基于网络保持模型计算系统平衡点和解析特征值灵敏度,从而调整临界稳定状态下的发电机出力,抑制频率振荡;文献[11]提出了

保证系统存在稳态平衡点的静态安全域及其数值计算方法,避免系统突破安全边界而失步。

当前, $N-1$ (N 为系统中相关线路或元件数量)断面下的热稳评估依赖于传统潮流计算得到的断线前后的潮流信息。然而,传统潮流计算中计及平衡机,无法准确反映系统在受扰后各元件在控制器作用下的稳态特性^[12]。受扰后系统各个元件的稳态特性受其控制器影响,在严重受扰后,往往伴随网络拓扑变化、潮流转移,进而导致功率重新分配。在这种情况下,系统的功率平衡被破坏,系统需要根据各个元件的控制特性重新构造功率平衡条件,系统频率往往偏离额定频率^[13]。为了考虑潮流问题中频率变化的影响,文献[14]在动态潮流法基础上考虑了一次调频系数的不确定性以及自动发电控制(AGC)的调控作用,模拟了不平衡功率的分摊方式;文献[15]在常规潮流方程中计及了系统频率变量,从而使潮流模型不受平衡机选择的影响。但该类方法忽略了励磁系统控制特性导致的发电机节点电压变化,使得平衡点信息不够准确。

现阶段,对受扰后系统准确建模及稳定性评估主要依靠时域仿真^[16]。暂态仿真能计及所有动态元件的控制特性,通过数值计算评估系统稳定性。很显然,暂态仿真若稳定,各状态量将收敛到受扰后系统平衡点。值得说明的是,暂态仿真展示了系统受扰后的观测行为,对系统的失稳归因及控制策略制定难以给出较好的依据。另外,时域暂态仿真计算效率不高,进行系统稳定性快速评估显得不足。

若针对稳定性分析的微分代数方程进行处理,可以直接得到受扰后系统平衡点所满足的方程^[17]。文献[18]从负荷参数出发,建立了负荷-频率控制模型,考虑负荷的动态响应以维持系统发电机输出和负荷之间的平衡,从而保持系统频率在合理范围内。文献[19-20]考察了负荷参数对系统平衡点的影响,根据模型在稳态时的方程找出使得系统满足所有的动态约束并达到频率稳定的发电负荷分配。文献[21]建立了全系统动态元件的稳态方程并用于分析电压崩溃问题。

本文从稳定性分析的详细数学模型出发,将平衡点求解的建模问题抽象为建立电源、负荷和网络三者平衡的代数方程模型,用于直接求解受扰后系统的平衡点。在该模型中,以同步发电机组、直驱风电机组和综合负荷模型为例,详细阐述并推导了受扰后动态元件的建模过程;构造全局频率变量,形成了受扰后系统的平衡点求解数学模型。在该模型基础上,给出了基于同伦法的平衡点求解流程。在标准算例和省级实际算例上验证了求解方法的可行性和高效性,并分析了受扰后系统平衡点与系统动态行为之间的对应关系,说明了结果的正确性与合理性。

1 受扰后系统稳态分析建模

1.1 受扰前后系统的稳态运行点与频率

假设系统处于运行点 $\mathbf{x}$, 频率为 F , 对交流电力网络来说, $\mathbf{x}$ 包含但不仅限于各个节点的电压和电流, 标么值下, F 一般在 1 附近, 但不一定严格为工频频率。当实际系统受到扰动之后, 系统各个节点的电压和电流以及系统频率将发生变化。系统暂态过程在时间 t 断面上的快照刻画了这个动态过程在时刻 t 的潮流。

暂态稳定性分析中, 在起始时刻采用潮流计算反算系统平衡点, 此时系统运行于工频频率。假设系统在扰动之前的稳态运行点为 $\mathbf{x}_0$, 此时频率基准值为工频频率 F_N , 标么值下频率为 1。针对一个特定的扰动, 当暂态过程结束之后, 系统将运行到一个新的运行点, 在这个新的运行点上, 系统的状态量记为 $\tilde{\mathbf{x}}_0$ 和 F 。

由于在暂态过程中系统不存在平衡机, 因此系统将根据负荷和发电机等元件的动态特性运动。若系统稳定, 暂态过程结束后将到新的运行点。此时不考虑二次调频, 并没有平衡机的作用, 受扰后系统频率不一定维持在工频运行, 表现为在暂态仿真中能够明显看到绝对功角的变化。虽然看似系统不能到达稳态, 但事实上该现象由参考系导致, 因为所有的相对功角最终回归到恒定值。

在该现象中, 扰动前系统无论 xy 轴还是同步发电机 dq 轴都以工频角速度在空间中旋转, 整个系统变量相对于坐标系呈现相对静止。在扰动之后, 虽然所有电气量的 dq 分量和 xy 分量相对于坐标系旋转, 但各电气量以及发电机之间的相对功角之间保持相对静止。若以扰动后的同步角速度作为坐标系旋转角速度, 则整个系统的电气量相对坐标系同样相对静止。如图 2 所示, 其中图 2(a) 为 xy 坐标系采用扰动前的角频率, 图 2(b) 为采用扰动后的角频率。

图中, F_N 、 F 分别为工频频率的有名值、故障后系统频率, ω_s 、 $\tilde{\omega}_s$ 、 ω 分别为工频角速度、故障后参考系旋转角速度、故障后电气角速度; δ 为发电机功角。

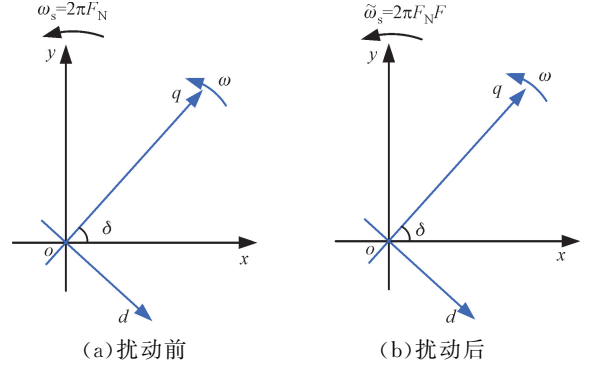


图 2 扰动前和受扰后系统相量参考系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reference frames for the system before and after disturbance

1.2 受扰前后系统的网络方程

在机电暂态稳定性分析模型中, 一个交流网络刻画为如下形式

$$\mathbf{I} = \mathbf{YV} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Y} \in \mathbf{C}^{n \times n}$ 为节点导纳矩阵; $\mathbf{V} \in \mathbf{C}^n$ 为节点电压向量; $\mathbf{I} \in \mathbf{C}^n$ 为节点注入电流向量; n 为节点的个数。由于本节考虑对受扰后系统建模, 因此 $\mathbf{Y}$ 为系统最后一个扰动之后的导纳矩阵。

节点 i 的注入电流为

$$\tilde{I}_i = \tilde{I}_{Gi} - \tilde{I}_{Li}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: $\tilde{I}_{Gi}$ 为电源的注入电流; $\tilde{I}_{Li}$ 为负荷注入电流。

考虑到系统频率变化较小, 现有机电暂态稳定性分析的模型中, 不考虑频率对 $\mathbf{Y}$ 的影响。

1.3 动态元件的稳态方程

电力系统中的动态元件, 无论电源和负荷, 一般采用分散的本地量控制。在其数学模型确定后, 其电压和电流动态满足模型约束。考虑到负荷和电源都有动态, 所以以电源为例, 模型一般描述为

$$\begin{cases} d\mathbf{x}_{Gi}/dt = \mathbf{f}_{Gi}(\mathbf{x}_{Gi}, F_i, \dot{\mathbf{V}}_{Gi}, \tilde{I}_{Gi}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}_{Gi}(\mathbf{x}_{Gi}, F_i, \dot{\mathbf{V}}_{Gi}, \tilde{I}_{Gi}) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: $\mathbf{x}_{Gi}$ 表示电源的状态量; F_i 表示电源节点的频率; $\dot{\mathbf{V}}_{Gi}$ 表示电源节点的电压, 包含于式(1)的电压向量中; $\tilde{I}_{Gi}$ 表示电源注入网络的电流, 对应式(2)的电源电流。

如果只考虑系统在稳态之后的运行点, 则动态过程结束, 满足

$$\begin{cases} \mathbf{0} = \mathbf{f}_{Gi}(\mathbf{x}_{Gi}, F_i, \dot{V}_{Gi}, \dot{I}_{Gi}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}_{Gi}(\mathbf{x}_{Gi}, F_i, \dot{V}_{Gi}, \dot{I}_{Gi}) \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

当系统过渡到稳态运行点之后,一个同步系统各个节点的频率相同,即

$$F_1 = F_2 = \dots = F_n = F \quad (5)$$

因此,式(4)进一步写为

$$\begin{cases} \mathbf{0} = \mathbf{f}_{Gi}(\mathbf{x}_{Gi}, F, \dot{V}_{Gi}, \dot{I}_{Gi}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}_{Gi}(\mathbf{x}_{Gi}, F, \dot{V}_{Gi}, \dot{I}_{Gi}) \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

通过式(6)可以得到一个关于 $\dot{V}_i, \dot{I}_{Gi}, F$ 和 $\mathbf{x}_{Gi}$ 的隐函数

$$\mathbf{0} = \mathbf{h}_{Gi}(F, \dot{V}_{Gi}, \dot{I}_{Gi}, \mathbf{x}_{Gi}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

同样地,对负荷有

$$\mathbf{0} = \mathbf{h}_{Li}(F, \dot{V}_{Li}, \dot{I}_{Li}, \mathbf{x}_{Li}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

与电源类似, $\dot{V}_{Li}, \dot{I}_{Li}$ 和 $\mathbf{x}_{Li}$ 分别表示了负荷节点的电压、负荷注入网络的电流以及负荷的状态量。

式(1)、(2)、(7)和(8)一起形成了扰动后运行点计算的数学模型。下面将根据不同元件的特性,以

$$\begin{cases} E_{iq} = V_{Gx} \cos \delta + V_{Gy} \sin \delta + R_a(I_{Gx} \cos \delta + I_{Gy} \sin \delta) + X_d(I_{Gx} \sin \delta - I_{Gy} \cos \delta) \\ 0 = V_{Gx} \sin \delta - V_{Gy} \cos \delta + R_a(I_{Gx} \sin \delta - I_{Gy} \cos \delta) - X_q(I_{Gx} \cos \delta + I_{Gy} \sin \delta) \end{cases} \quad (10)$$

式中: δ 为发电机转子角位置,由转子运动方程决定; E_{iq} 的稳态值由励磁系统的调节决定。

2.2 转子运动方程

考察同步发电机的转子运动方程

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_s(\omega - 1) \\ T_J \dot{\omega} = P_m - P_e - D(\omega - 1) \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_m, P_e, D 和 T_J 分别为发电机的机械功率、电磁功率、转子阻尼系数和转子惯性时间常数; $\omega_s = 2\pi F_N$ 为工频角速度。

受扰后每台发电机的角速度 ω 在标么值下不一定严格为 1,从而 $\dot{\delta}$ 可能不为 0。在这种情况下,以扰动后系统的频率重新定义频率基准,式(11)写为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \tilde{\omega}_s(\tilde{\omega} - 1) \\ T_J \dot{\tilde{\omega}} = P_m/F - P_e/F - D(\tilde{\omega} - 1/F) \end{cases} \quad (12)$$

在受扰后系统稳态下,有

$$\tilde{\omega} = 1 \quad (13)$$

$$0 = P_m - P_e - D(F - 1) \quad (14)$$

考虑同步发电机电磁功率表达式

$$P_e = V_{Gy}I_{Gx} + V_{Gx}I_{Gy} + R_a(I_{Gx}^2 + I_{Gy}^2) \quad (15)$$

代入式(14),可得同步电机功率方程

$$P_m = V_{Gy}I_{Gx} + V_{Gx}I_{Gy} + R_a(I_{Gx}^2 + I_{Gy}^2) + D(F - 1) \quad (16)$$

常用元件为例说明具体电源与负荷模型。

2 考虑控制特性的同步发电机组稳态模型

本节以同步发电机组为例介绍传统电源模型。基于建模通用性考虑,针对同步电机采用转子 4 绕组模型,励磁采用可控硅整流励磁系统,原动机采用水轮机来介绍具体模型的推导过程。为了表示简单,在推导中忽略第 i 个节点变量的下标。

2.1 同步电机模型

对同步电机模型,考虑以同步电抗描述的稳态方程满足

$$\begin{cases} E_{iq} = V_q + R_a I_q + X_d I_d \\ 0 = V_d + R_a I_d - X_q I_q \end{cases} \quad (9)$$

式中: E_{iq} 为励磁电势,由励磁系统输出; X_d 和 X_q 分别表示 d 轴和 q 轴同步电抗; V_d, V_q 分别表示 d 轴和 q 轴电压。

式(9)中的 dq 轴电压电流通过 $dq-xy$ 坐标变换与网络变量关联,可改写为

式中: P_m 的稳态值由原动机及其调速系统决定。

2.3 励磁系统模型

以常见某自并励静止励磁系统为例,其传递函数框图详见文献[22]。当系统达到稳态时,微分项输出为 0,从而励磁系统的稳态输出满足

$$E_{iq} = KK_A(V_{\text{ref}} + V_S - V_t)/K_V \quad (17)$$

式中: K, K_A, K_V 分别为调节器增益、调压器增益和比例积分; V_t, V_{ref}, V_S 分别为机端电压、调节器参考电压以及电力系统稳定器(PSS)附加励磁输入。机端电压 V_t 与发电机的端电压 V_{Gx} 和 V_{Gy} 之间的关系为

$$V_t = \sqrt{V_{Gx}^2 + V_{Gy}^2} \quad (18)$$

考虑 PSS 有隔直环节,在稳态下直流量被隔离,从而 V_S 在稳态下为 0,在考虑式(18)之后,式(17)变为

$$E_{iq} = KK_A(V_{\text{ref}} - \sqrt{V_{Gx}^2 + V_{Gy}^2})/K_V \quad (19)$$

2.4 原动机及其调速器模型

以水轮机及其调速系统为例^[22],说明原动机及其调速系统模型。考虑系统达到稳态后微分项输出为 0,代入角频率基准值,则原动机输出功率表达式为

$$P_m = Y_{\text{ref}} - K_{GW}(F - 1) \quad (20)$$

式中: K_{GW} 为转速放大倍数; Y_{ref} 为水轮机水门开度参考值,当不计及 AGC 的作用时, Y_{ref} 为常数。

2.5 受扰后系统同步发电机的模型

将式(19)代入式(10)、式(20)代入式(16),可得

$$\begin{cases} 0 = V_{Gx} \cos \delta + V_{Gy} \sin \delta + R_a (I_{Gx} \cos \delta + I_{Gy} \sin \delta) + X_d (I_{Gx} \sin \delta - I_{Gy} \cos \delta) - KK_A / K_V (V_{ref} - \sqrt{V_{Gx}^2 + V_{Gy}^2}) \\ 0 = V_{Gx} \sin \delta - V_{Gy} \cos \delta + R_a (I_{Gx} \sin \delta - I_{Gy} \cos \delta) - X_q (I_{Gx} \cos \delta + I_{Gy} \sin \delta) \\ 0 = V_{Gx} I_{Gx} + V_{Gy} I_{Gy} + R_a (I_{Gx}^2 + I_{Gy}^2) + D(F - 1) - Y_{ref} + K_{GW} (F - 1) \end{cases} \quad (21)$$

在该稳态方程中,仅需要增加一个变量 δ 即可。式(21)简写为

$$\mathbf{0} = \mathbf{h}_{Gi}(F, \dot{V}_{Gi}, \dot{I}_{Gi}, \delta_i) \quad (22)$$

对不同模型的同步发电机组,可基于类似推导获得相应方程。每台同步发电机模型中, $\dot{I}_{Gi}$ 和 δ_i 为其自有变量, $\dot{V}_i$ 包含在网络方程中, F 为全局变量。

3 新能源电源模型

由于篇幅限制,本节以跟网型控制的直驱风电机组为例介绍新能源电源模型的处理方法。直驱风机机组系统结构如图3所示,其中 P_w 表示风力机组风机捕获的风功率, I_{sa} 、 I_{sb} 、 I_{sc} 和 V_{sa} 、 V_{sb} 、 V_{sc} 分别表示定子侧三相电流和电压; I_{wa} 、 I_{wb} 、 I_{wc} 和 V_{wa} 、 V_{wb} 、 V_{wc} 分别表示网侧三相电流和电压; P_{out} 为定子侧换流器输出的有功功率; P 为网侧换流器注入系统的有功功率。

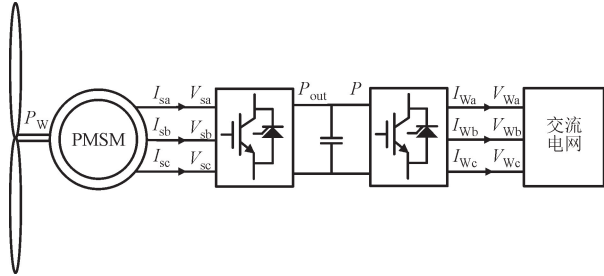


图3 直驱风机机组结构图

Fig. 3 Diagram of direct-drive wind turbine system

新能源发电模型取决于其控制特性。工业仿真中,网侧换流器采用定有功/无功控制,并考虑高低电压穿越等动态过程。稳态时,网侧电容电压恒定,确保机侧输出功率等于捕获风功率,后者由最大功

$$\begin{cases} 0 = P_{L0} (a_P (\sqrt{V_x^2 + V_y^2}/V_0)^2 + b_P \sqrt{V_x^2 + V_y^2}/V_0 + c_P) (1 + (F - 1)K_P) + V_x I_{Lx} + V_y I_{Ly} \\ 0 = Q_{L0} (a_Q (\sqrt{V_x^2 + V_y^2}/V_0)^2 + b_Q \sqrt{V_x^2 + V_y^2}/V_0 + c_Q) (1 + (F - 1)K_Q) + V_y I_{Lx} - V_x I_{Ly} \end{cases} \quad (30)$$

该稳态方程可简写为

$$\mathbf{0} = \mathbf{h}_{Lk}(F, \dot{V}_{Lk}, \dot{I}_{Lk}) \quad (31)$$

式中: $\dot{I}_{Lk}$ 为其自有变量,下标 k 表示负荷编号; $\dot{V}_{Li}$ 包含在网络方程中; F 为全局变量。

受扰之后同步发电机的稳态方程

率追踪等控制策略决定,其数学关系为

$$P_w = f(v_w, F) \quad (23)$$

式中: v_w 表示风速。现有的工业级仿真软件中,一般考虑故障恢复到稳态点之后 P_w 与受扰前保持一致^[22]。

受扰后稳态下网侧换流器注入系统有功满足

$$0 = V_{wx} I_{wx} + V_{wy} I_{wy} - P \quad (24)$$

网侧换流器采用定无功控制下,一般无功控制为0。则受扰前后稳态下,满足

$$0 = V_{wy} I_{wx} - V_{wx} I_{wy} \quad (25)$$

当计及风机的低(高)电压穿越控制,有

$$P = \begin{cases} 0, & \sqrt{V_{wx}^2 + V_{wy}^2} > V_{High} \text{ 或 } \sqrt{V_{wx}^2 + V_{wy}^2} < V_{Low} \\ P_w, & V_{Low} \leq \sqrt{V_{wx}^2 + V_{wy}^2} \leq V_{High} \end{cases} \quad (26)$$

从而受扰后,风机稳态方程为由式(23)~(26)联立形成,简写为

$$\mathbf{0} = \mathbf{h}_{wj}(F, \dot{V}_{wj}, \dot{I}_{wj}) \quad (27)$$

式中: j 表示风机编号。

4 负荷模型

负载母线采用电压频率相关的ZIP模型^[23],其有功功率 P_L 和无功功率 Q_L 由恒阻抗、恒电流、恒功率分量及频率相关系数共同决定。负荷节点电压 V 与节点电压 V_x 和 V_y 之间的关系为

$$V = \sqrt{V_{Lx}^2 + V_{Ly}^2} \quad (28)$$

负荷功率与注入电流的关系式为

$$\begin{cases} 0 = P_L + V_x I_{Lx} + V_y I_{Ly} \\ 0 = Q_L + V_y I_{Lx} - V_x I_{Ly} \end{cases} \quad (29)$$

将式(28)、式(29)代入式ZIP模型后,可得受扰之后负荷的稳态方程满足

5 受扰后系统的平衡点求解模型

在系统受扰之后,如短路、断线等,各控制措施将分时段动作。受扰后系统的平衡点分析中,只考虑系统最后一个动作之后的平衡点。根据最后一个动作

之后的系统拓扑、考虑电源与负荷运行特性,结合式(1)、(2)、(22)、(27)和(31),构造全系统方程如下

$$\begin{cases} \mathbf{0} = \dot{\mathbf{I}}_G - \dot{\mathbf{I}}_L - \mathbf{Y}\dot{\mathbf{V}} \\ \mathbf{0} = \mathbf{h}_{Gi}(F, \dot{\mathbf{V}}_{Gi}, \dot{\mathbf{I}}_{Gi}, \delta_i) \\ \mathbf{0} = \mathbf{h}_{Wj}(F, \dot{\mathbf{V}}_{Wj}, \dot{\mathbf{I}}_{Wj}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{h}_{Lk}(F, \dot{\mathbf{V}}_{Lk}, \dot{\mathbf{I}}_{Lk}) \end{cases} \quad (32)$$

该模型与增广坐标潮流模型相似,但针对电源和负荷的动态特性重构了受扰系统的电压-电流关系。

由于全局变量 F 的引入,式(32)尚未构成适定条件,需补足一个方程,该方程由参考相位给定。

假设指定节点 m 为相位参考节点,其相位为 θ_{m0} 。该节点的电压相位在扰动前后不发生变化,即

$$0 = V_{mx} - \sqrt{V_{mx}^2 + V_{my}^2} \cos \theta_{m0} \quad (33)$$

式(32)和式(33)一起构成了受扰后平衡点的计算模型,它在数学上是一组非线性的代数方程组

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) \quad (34)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为未知量,包括所有节点电压、电源与负荷注入网络电流、发电机功角以及系统频率等。

虽然式(34)同样适用于扰动前的平衡点计算,但对于扰动前的平衡点,电力系统分析中常常采用常规潮流反算得到,而不直接采用式(34)求出,这是因为给定的边界条件不同所导致^[24]。

6 基于同伦法的受扰后平衡点的求解

式(34)表示的系统是一组非线性的代数方程组,对其求解需要采用迭代方法,而初值选择与求解方法是迭代法求解的两个重要环节。

6.1 初值问题

假设已经得到扰动前的系统平衡点 $\mathbf{x}_0$,它满足式(34),那么在发生扰动之后,系统中各节点电压和相位会因为扰动的形式、位置和大小而变化,但受扰后的平衡点,这里记为 $\tilde{\mathbf{x}}_0$,一般和扰动前平衡点 $\mathbf{x}_0$ 较为接近,因此对受扰后系统的稳定平衡点求解时,可选择扰动前的平衡点作为初值。

6.2 平衡节点的选择

当系统的扰动或者操作发生后,扰动节点及其附近节点在扰动前后相位差变化较大,远离扰动位置的节点扰动前后相位差变化较小。因此,在选择参考节点时,建议选择远离故障位置的节点为受扰后系统的参考相位节点,其参考相位为受扰前该节点的相位。

6.3 受扰后系统平衡点计算方法

由于式(34)为非线性方程组,因此在电力系统分析中,常规的方法会选择扰动前的平衡点 $\tilde{\mathbf{x}}_0$ 作为初值,并选择牛顿法直接计算扰动后的平衡点。牛顿法的收敛性强烈依赖于初始点与真实解的邻近程度,

尤其在系统发生重大扰动时,例如重负载线路切除导致潮流大范围转移,牛顿法往往难以收敛。为此,本文采用同伦法对模型进行重构与求解。同伦法通过构造从已知解到目标问题的连续路径,以小步长逐步迭代,显著降低了对初值的敏感性,有效提升了收敛性。

以切除线路为例说明模型改写的思路。假设节点 p 和 r 之间有一回联络线被切除,该线路阻抗为 z_{pr} ,对地支路导纳为 y_{pr} 。根据同步稳定性问题中对网络方程的建模可知,受扰前后的导纳矩阵差异在于 Y_{pp} 、 Y_{rr} 、 Y_{pq} 和 Y_{rp} 发生变化。假设扰动前的节点导纳矩阵为 $\mathbf{Y}$,受扰后系统的节点导纳矩阵为 $\tilde{\mathbf{Y}}$,则令 $\Delta\mathbf{Y}$ 为仅包含如下4个元素的稀疏矩阵

$$\begin{cases} \Delta Y_{pp} = -(1/z_{pq} + y_{pq}/2) \\ \Delta Y_{qq} = -(1/z_{pq} + y_{pq}/2) \\ \Delta Y_{pq} = 1/z_{pq} \\ \Delta Y_{qp} = 1/z_{pq} \end{cases} \quad (35)$$

有

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} + \Delta\mathbf{Y} \quad (36)$$

引入参数 λ 表征扰动前系统和受扰后系统之间的联系^[25],从而将导纳矩阵描述为

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} + \lambda\Delta\mathbf{Y} \quad (37)$$

则 $\lambda = 0$ 和 $\lambda = 1$ 分别对应扰动前和受扰后系统导纳矩阵。类似于式(32),受扰前和受扰后系统平衡点求解模型统一改写为如下函数

$$\begin{cases} \mathbf{0} = \dot{\mathbf{I}}_G - \dot{\mathbf{I}}_L - (\mathbf{Y} + \lambda\Delta\mathbf{Y})\dot{\mathbf{V}} \\ \mathbf{0} = \mathbf{h}_{Gi}(F, \dot{\mathbf{V}}_{Gi}, \dot{\mathbf{I}}_{Gi}, \delta_i) \\ \mathbf{0} = \mathbf{h}_{Wj}(F, \dot{\mathbf{V}}_{Wj}, \dot{\mathbf{I}}_{Wj}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{h}_{Lk}(F, \dot{\mathbf{V}}_{Lk}, \dot{\mathbf{I}}_{Lk}) \end{cases} \quad (38)$$

简写为

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \lambda) \quad (39)$$

则 $\lambda = 0$ 和 $\lambda = 1$ 分别对应受扰前后系统的平衡点计算模型。对其他扰动,同样可以采用该方法进行改写。

6.4 基于同伦法的扰动后系统平衡点计算流程

式(39)表征的系统仅在 $\lambda = 0$ 和 $\lambda = 1$ 处具有实际物理意义。如果以扰动前的平衡点 $\mathbf{x}_0$ 作为初值,直接求解 $\lambda = 1$ 对应的解,则为常规的处理方法。

若该方法不收敛时,可以从 $0 \sim 1$ 小步长增加 λ ,以上一步的结果作为下一步的初值,求解到 $\lambda = 1$ 处的 $\mathbf{x}$,这种方法类似于延拓潮流求解过程。不同之处在于,延拓潮流计算的中间过程具有实际物理意义,而在本方法中,中间过程仅表示计算结果的过渡。

同样地,采用同伦法求解扰动后平衡点包括参数化、预估、校正和步长控制4个基本要素,对应迭代流程见图4。需要特别强调的是,虽然不同扰动下采用的迭代步长不同,但是求解的均为 $\lambda = 1$ 处的值,所以

步长选择一般不会影响结果的准确性,只会影响迭代速度。为了提高计算效率,步长控制至关重要。此处给出一种选择策略,对所有的变量 x_i , 设定一个上限 $\mu_{\max,i}$, 在每一次迭代中步长的选择策略为

$$h \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} = \mu_{\max,i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (40)$$

同时,通过曲率梯度控制步长,定义曲线弯曲度为

$$\gamma = |\cos \alpha| = \left| \frac{\Delta \lambda}{\sqrt{|\Delta x|^2 + (\Delta \lambda)^2}} \right| \quad (41)$$

若 γ_{grad} 为梯度参考值,当 $\gamma > \gamma_{\text{grad}}$ 时,步长上限 $\mu_{\max,i}$ 保持不变;当 $\gamma \leq \gamma_{\text{grad}}$ 时,曲线距离电压崩溃点较近,对步长上限进行调整,有

$$\mu_{\max,i} = \beta \mu_{\max0,i}, \quad 0 < \beta < 1, i = 1, 2, \dots, N \quad (42)$$

式中: β 为步长调整参数,可控制延拓过程整体的预测点和修正点分布疏密。

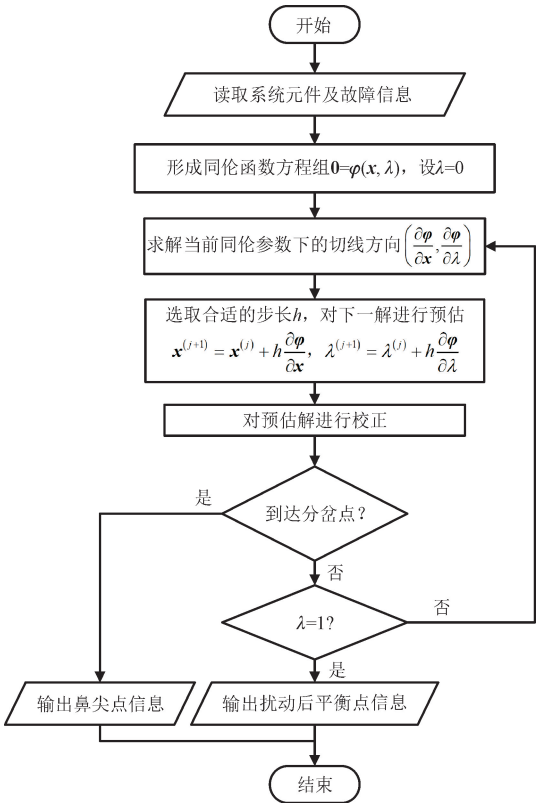


图 4 同伦法求解扰动后平衡点的迭代流程图
Fig. 4 Flowchart of the homotopy method for iteratively solving the equilibrium point after disturbance

7 受扰后系统平衡点的存在性

从同伦法的角度出发可以给出一个基于迭代算法的平衡点存在的充分条件: 对于曲线 $\varphi(x, \lambda) = 0$, 如果能够得到 $\lambda = 1$ 处的平衡点, 那么对应的受扰后系统平衡点存在。在同伦法求解过程中, 随着参数

λ 缓慢增加, 当鞍结分岔出现时, 对应的出现两组解结合并消失, 如图 5 所示。图中, 虚线箭头表示在求解鞍结分岔点过程中的预测和校正方向。如果鞍结分岔处 $\lambda < 1$, 可认为曲线 $\varphi(x_0, \lambda) = 0$ 与 $\lambda = 1$ 没有交点, 即故障后平衡点不存在。

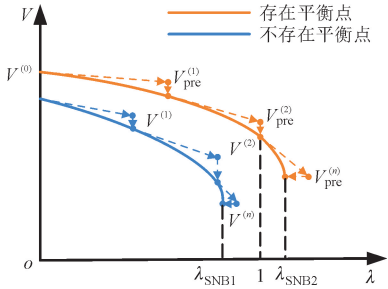


图 5 鞍结分岔与平衡点存在性示意图
Fig. 5 Diagram of saddle node bifurcation and existence of equilibrium point

需要指出的是,平衡点存在并不意味着平衡点是稳定的,平衡点的稳定性仍需通过对微分代数(DAE)方程状态矩阵进行特征值分析。如果受扰后系统平衡点不存在,则系统必然呈现非周期失稳。如果平衡点存在,系统可能是稳定的,可能是振荡失步的,也可能是爬行失步的,而基于扰动后平衡点的分析,可以对系统的失稳原因进行准确判断,这将在算例验证中讨论。

8 算例分析

基于 MATLAB R2022a 和 DSP 2. 3. 33. 1 平台, 分别在 IEEE 39 节点系统以及我国某省级电力系统中对本文方法加以验证, 并与传统方法进行对比。

8.1 扰动后系统平衡点的直接求解

图 6 为 IEEE 39 节点系统拓扑图, 用风电机组替换 IEEE 39 节点系统中 36 号节点处的同步发电机,

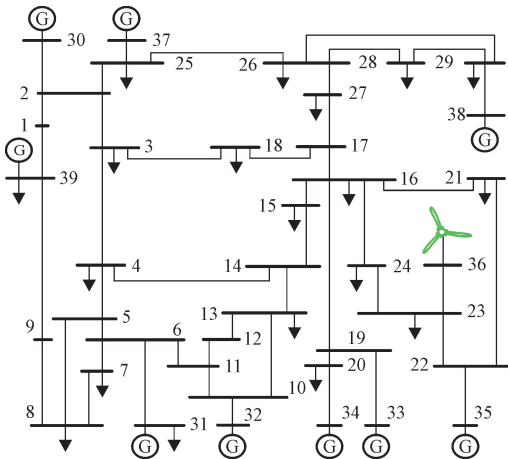


图 6 IEEE 39 节点系统拓扑图
Fig. 6 Topology diagram of IEEE 39-bus system

其中 G 表示发电机,数字表示节点编号。在扰动前,系统频率为 50 Hz。考虑多种扰动类型,具体说明见表 1。平衡点的迭代初值采用受扰前系统平衡点,用牛顿法求解,迭代收敛误差均选择 $\epsilon=10^{-5}$ 。

表 1 扰动信息说明

Table 1 Disturbance information description		
编号	类型	扰动说明
1	切负荷	节点 7 处负荷减载 30%
2	切负荷	节点 29 处负荷减载 20%
3	切机	节点 30 处电源有功功率降低 100 MW
4	切机	节点 36 处风机出力降低 50%
5	三相短路	线路 6—11 三相短路, 5 周波后故障线路切除
6	三相短路	线路 14—4 三相短路, 5 周波后故障线路切除
7	多重故障	节点 7、8 处负荷减载 30%
8	多重故障	线路 3—18 三相短路 5 周波后切除, 节点 31 处电源有功功率降低 100 MW

表 2 基于 IEEE 39 节点系统扰动 4 后系统平衡点的电压结果对比

Table 2 Comparison of voltage for post-fault equilibrium point after disturbance 4 based on IEEE 39-bus system						
节点	本文方法		时域仿真		潮流方法	
	电压幅值	电压相角/(°)	电压幅值	电压相角/(°)	电压幅值	电压相角/(°)
30	1.046 32	−18.140 7	1.046 32	−18.142 1	1.049 90	−20.578 3
31	0.970 19	0	0.970 18	0	0.982 00	0
32	0.981 42	1.368 2	0.981 42	1.367 1	0.984 10	−6.393 0
33	0.995 63	−1.000 8	0.995 63	−1.000 5	0.997 00	−13.854 6
34	1.0115 8	−4.410 1	1.0115 8	−4.409 7	1.012 00	−20.982 2
35	1.049 48	5.322 8	1.049 48	5.322 3	1.049 00	−7.529 0
36	1.061 73	11.707 2	1.061 73	11.708 9	1.063 00	−3.337 0
37	1.026 85	−5.597 6	1.026 85	−5.598 4	1.027 00	−11.843 8
38	1.025 86	8.114 3	1.025 86	8.114 6	1.026 00	−3.572 4
39	1.029 90	−33.264 5	1.029 90	−33.264 6	1.030 00	−30.780 6

表 3 IEEE 39 节点系统计算与仿真结果对比
Table 3 Comparison of calculation and simulation for IEEE 39

编号	系统频率/Hz		计算时长/s
	仿真结果	本文方法	
1	50.031 96	50.031 92	0.028
2	50.026 45	50.026 40	0.025
3	49.973 48	49.973 43	0.022
4	49.907 82	49.907 76	0.029
5	50.029 73	50.029 70	0.038
6	49.988 41	49.988 37	0.034
7	50.093 86	50.093 84	0.042
8	49.914 97	49.914 95	0.048

8.2 严重扰动后系统平衡点的同伦法求解

当遭受严重扰动时,可能会出现牛顿法无法直接收敛的情况,此时需要采用同伦法求解。以图 7 所示的我国南方某省级电网作为算例进行说明,其

以扰动 4 为例,采用本文方法、时域仿真以及传统潮流方法的计算结果对比如表 2 所示,其中电压幅值为标么值。可以看出,本文提出的扰动后平衡点计算模型在计算受扰后平衡点时与暂态仿真结果完全一致。而采用潮流计算^[23]时,由于未充分考虑电力系统中动态元件对系统受扰后行为的影响,与仿真结果相比,各电压幅值最大偏差为 1.181%,最大相角偏差可达 16.572 5°。尤其是在复杂工况或系统扰动较大的情况下,通过传统潮流计算方法求取平衡点受到较大限制。

表 1 中各类扰动后的系统频率计算结果与时域仿真的对照结果见表 3。本文计算方法在 4~5 次迭代后精度即可达到 10^{-5} ,全过程耗时可控制在 0.05 s 内。仿真软件要得到相同精度下的平衡点需要仿真约 800~1 000 个周波,实际运行时长约为 1.6~2.1 s。由此可见,本文的平衡点计算方法在时间和精度上满足对系统的稳态特性实时监控的要求。

中数字表示节点编号,G 及下标表示发电机及编号。

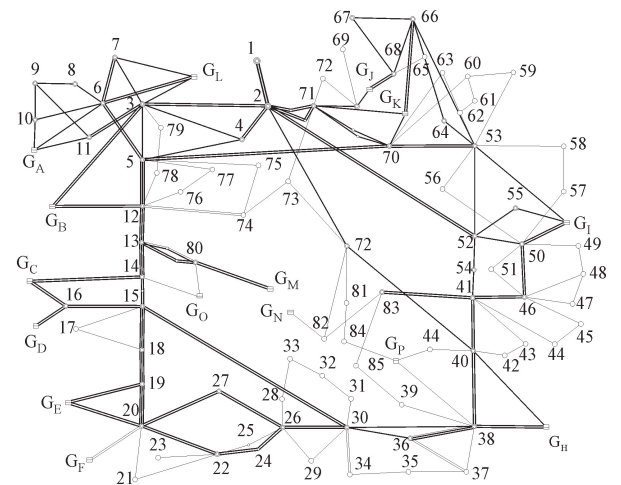


图 7 省级电网系统拓扑结构(部分)
Fig. 7 Topology of a provincial power grid system (partial)

考虑多种稳定裕度变化较大的严重扰动类型,扰动信息说明见表 4,其中 G、L 和 B 后面的数字分别代表切机扰动的节点数、三相短路后切除的线路数以及发生切负荷扰动的节点数。平衡点的同伦法计算结果与仿真结果对比见表 5。

表 4 严重扰动信息说明

Table 4 Severe disturbance information description	
故障编号	故障条目
9	G1B2
10	G1L1
11	G2L3
12	G2L2B1
13	G4L2
14	G1L1B1

表 5 实际电网计算结果与仿真结果对比
Table 5 Comparison of calculation and simulation for provincial power system

扰动编号	系统频率/Hz		计算时长/s
	仿真结果	计算结果	
9	50.104 71	50.104 52	0.707
10	49.920 85	49.920 97	0.738
11	振荡发散	49.896 78	0.863
12	振荡发散	49.885 83	0.912
13	爬行失步	不存在	0.581
14	爬行失步	不存在	0.596

扰动 9、10 的系统的行为特性相似,扰动 10 的同伦法收敛过程与暂态仿真如图 8 所示,其中,相对功角取自与相位参考节点的功角差,节点电压为标么值。从曲线图可以看出,经多次预测校正环节后,最终扰动参数 $\lambda = 1$,同伦过程结束。系统的平衡点的存在性与时域仿真的稳定性在此刻达成一致,且与仿真结果相对照,平衡点的计算偏差能够满足 10^{-5} 的精度要求。尽管由于系统规模的增大,在计算时长上略有增加,但选取合适的步长后 1~3 次预测校正过程即可得到扰动后的稳定平衡点结果,整个过程耗时均在 0.92 s 内,显著低于传统仿真软件约 17~20 s 的仿真运行时间。

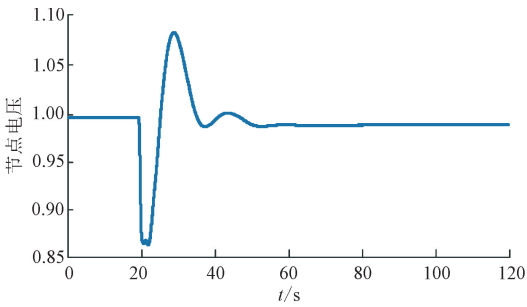
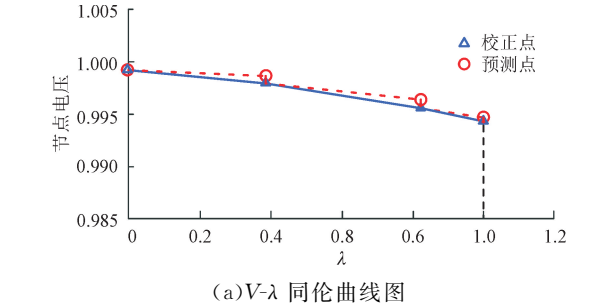


图 8 扰动 10 同伦曲线与暂态仿真
Fig. 8 Transient simulation and tracking of fault 10

扰动 11 和扰动 12 代表着受扰后系统不稳定的一种情况。扰动 12 的同伦法收敛过程与暂态仿真图如图 9 所示。可以看出,经过多次预测校正环节最终得到了 $\lambda = 1$ 时系统的平衡点信息,但在时域仿真中测量节点的电压(标么值)以及与参考节点的相对功角均呈振荡状态。此处扰动后系统呈负阻尼,电压和功率变量长时间处于缓慢地增幅振荡。同样地,选取恰当的步长后 4~5 次预测校正过程即可得到扰动后的稳定平衡点结果。

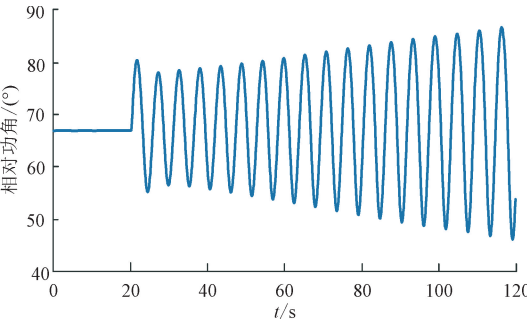
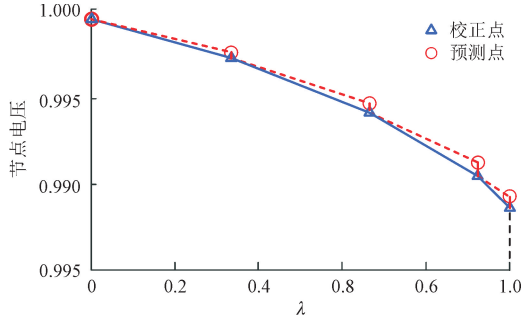
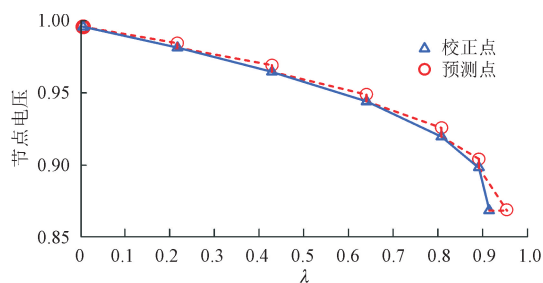
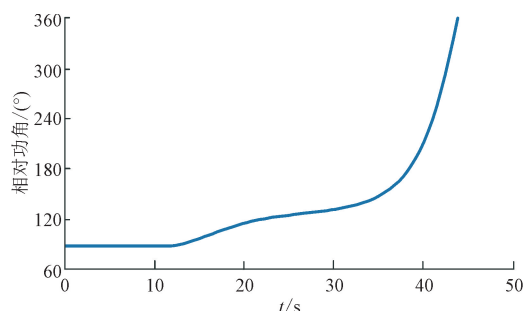
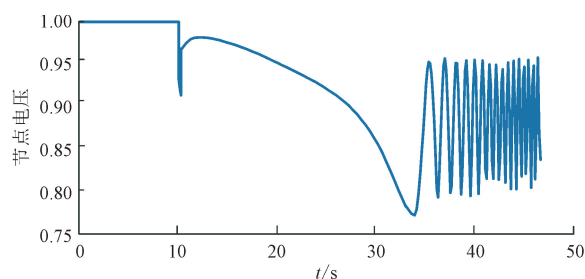


图 9 扰动 12 同伦曲线与暂态仿真
Fig. 9 Transient simulation and tracking of fault 12

对于扰动 13 和扰动 14,其代表着扰动后系统不稳定的另一种情况。扰动 14 的同伦法收敛过程与暂态仿真图如图 10 所示。

(a) $V-\lambda$ 同伦曲线图

(b) 扰动后节点相对功角图



(c) 扰动后节点电压变化图

图 10 扰动 14 同伦曲线与暂态仿真

Fig. 10 Transient simulation and tracking of fault 14

结合同伦曲线图进行分析,鞍结分岔点处对应的 $\lambda \approx 0.9253 < 1$,认为平衡点不存在。从时域仿真可以看出,扰动发生后节点电压单调下降至电压失稳,相对功角单调增加,在 42.6 s 时功角差超过 360° ,这与同伦曲线分析的结果一致。

通过对以上平衡点计算与时域仿真过程分析可知,基于同伦法的求解平衡点求解过程高效准确,能够为受扰系统的失稳原因判断提供可靠的依据。由于受扰后系统平衡点的存在是系统保持稳定性的前提,因此,针对暂态仿真中已经失稳的系统,如果根据本文方法计算出对应的鞍结分岔点处 $\lambda < 1$,则其失稳原因是受扰后系统不存在平衡点,如扰动 13、14;如果对应的 $\lambda \geq 1$,说明失稳原因是存在平衡点但稳定裕度或阻尼不足,如扰动 11、12,此时系统的节点电压、频率等长时间维持在振荡状态甚至发生失步;而平衡点存在时若系统有足够的阻尼,就能使系统扰动产生的变量波动幅值逐渐减小,最终达到

稳定,如扰动 9、10 即为这种情况。

9 结 论

本文建立了考虑动态元件稳态运行特性的受扰后系统平衡点计算模型,并基于同伦法的求解方法,用于受扰后系统的同步稳定性分析,主要结论如下。

(1)在建模方面,本文提出了一种通用的建模方法,将平衡点求解的建模问题抽象为建立电源、负荷和网络的稳态分析模型。该模型中各动态元件的特性由运行方式的变化以及自身的稳态运行特性决定,并构造了全局频率信息使得受扰后系统的模型适定可解。本文的建模方法适用于包括新能源在内的动态元件建模,具有较强的通用性。

(2)在计算方法上,当受扰后系统的平衡点与受扰前平衡点偏差较大时,本文基于同伦法对受扰后系统平衡点予以求解,在提高收敛速度和准确性的同时,还可用于判断解的存在性。

论文所提模型与方法在标准算例和实际算例中进行了验证,其平衡点计算结果与暂态仿真结果完全一致,收敛耗时减少了 95% 以上,准确性相比传统的潮流方法提高了至少 3 个数量级,验证了建模和方法选择的准确性和高效性。本文所提受扰系统平衡点分析从代数方程角度出发,对扰动后系统快速分析与失稳原因判断带来较大的帮助。鉴于分析是控制的基础,受扰后系统平衡点的快速准确求解可为后续的控制方案制定提供解析依据。

参考文献:

- [1] 韩民晓,赵正奎,郑竞宏,等. 新能源场站电网暂态电压支撑技术发展动态 [J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1309-1322.
HAN Minxiao, ZHAO Zhengkui, ZHENG Jinghong, et al. Development of dynamic voltage support for power grid with large-scale renewable energy generation [J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1309-1322.
- [2] 陈典,陆润钊,张松涛,等. 新型电力系统电力电量平衡计算分析技术综述 [J]. 电网技术, 2023, 47(10): 3952-3970.
CHEN Dian, LU Runzhao, ZHANG Songtao, et al. Review of new power system power balance calculation and analysis techniques [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 3952-3970.
- [3] 张恒旭,曹永吉,张怡,等. 电力系统频率动态行为衍变与分析方法需求综述 [J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 42-52.

- ZHANG Hengxu, CAO Yongji, ZHANG Yi, et al. Review of frequency dynamic behavior evolution and analysis method requirements of power system [J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2021, 51(5): 42-52.
- [4] 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.
- [5] 薛安成, 王嘉伟, 刘晓博. 增强型死区大小对单机简化系统超低频频率振荡的非光滑分岔影响研究 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6160-6168.
- XUE Ancheng, WANG Jiawei, LIU Xiaobo. Influence of the enhanced dead zone on the non-smooth bifurcation of ultra-low frequency oscillations in single machine simplified systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6160-6168.
- [6] LI Zihao, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Analytical reliability assessment method for complex distribution networks considering post-fault network reconfiguration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1457-1467.
- [7] 解治军, 张东霞, 韩肖清, 等. 基于改进长短期记忆网络的电力系统暂态稳定评估方法研究 [J]. 电网技术, 2024, 48(3): 998-1007.
- XIE Zhijun, ZHANG Dongxia, HAN Xiaoqing, et al. Research on transient stability assessment method of power system based on improved long short term memory network [J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 998-1007.
- [8] SHU Yinbiao, TANG Yong. Analysis and recommendations for the adaptability of China's power system security and stability relevant standards [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 334-339.
- [9] 杨京, 王彤, 毕经天, 等. 含直驱风电机组的电力系统次同步振荡鲁棒阻尼控制 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 56-65.
- YANG Jing, WANG Tong, BI Jingtian, et al. Robust damping control of subsynchronous oscillation in power system with direct-drive wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 56-65.
- [10] LI Chongtao, CHIANG H D, DU Zhengchun. Network-preserving sensitivity-based generation rescheduling for suppressing power system oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3824-3832.
- [11] YU Yixin, LIU Yanli, QIN Chao, et al. Theory and method of power system integrated security region irrelevant to operation states: an introduction [J]. Engineering, 2020, 6(7): 754-777.
- [12] PRADHAN C, BHENDE C N, SRIVASTAVA A K. Frequency sensitivity analysis of dynamic demand response in wind farm integrated power system [J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(6): 905-919.
- [13] 韩泽雷, 鞠平, 秦川, 等. 面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 112-124.
- HAN Zelei, JU Ping, QIN Chuan, et al. Review and prospect of research on frequency security of new power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 112-124.
- [14] 陈道君, 梁柏松, 周年光, 等. 计及一二次调频协调优化的动态潮流模型 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(2): 154-161.
- CHEN Daojun, LIANG Baisong, ZHOU Nianguang, et al. A dynamic power flow model considering the optimal coordination of primary and secondary frequency regulation of system [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(2): 154-161.
- [15] 申家锴, 穆永强, 王春生, 等. 一种计算结果与平衡节点位置选择无关的动态潮流模型 [J]. 大连理工大学学报, 2019, 59(2): 179-185.
- SHEN Jiakai, MU Yongqiang, WANG Chunsheng, et al. A dynamic load flow model with results irrelevant to position selection of slack bus [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2019, 59(2): 179-185.
- [16] 刘九良, 王彤, 朱劭璇, 等. 计及保护信息的电力系统暂态稳定裕度解析算法 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 542-552.
- LIU Jiuliang, WANG Tong, ZHU Shaoxuan, et al. An analytic method for power system transient stability margin considering protection information [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 542-552.
- [17] 李文俏, 王振树, 李中强. 基于分岔理论的负荷模型对交直流混联系统电压稳定性的影响 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 144-149.
- LI Wenqiao, WANG Zhenshu, LI Zhongqiang. Influence of bifurcation theory based load model on voltage stability of AC/DC hybrid system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 144-149.

(下转第 32 页)

- [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)