

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201246

考虑主导不稳定平衡点变化的电力系统暂态 稳定切机控制策略

朱劭璇, 王彤, 王增平, 相禹维

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 在考虑不同切机措施导致的主导不稳定平衡点变化的前提下, 提出了一种基于切机灵敏度的电力系统暂态稳定切机控制策略。首先将切机后系统暂态稳定裕度表达式中与主导不稳定平衡点相关的部分提取出来, 通过建立切机量与主导不稳定平衡点的修正方程, 利用牛拉法确定主导不稳定平衡点的变化情况。在此基础上求取系统暂态稳定裕度对不同发电机组的切机灵敏度, 最终按照所求切机灵敏度大小制定切机策略。新英格兰 10 机 39 节点系统的仿真结果表明, 相比于不考虑主导不稳定平衡点变化的切机策略, 该策略所求灵敏度及切机量更加准确。同时, 该策略求解步骤直接、明确, 既考虑了切机控制导致的主导不稳定平衡点的变化情况, 又避免了反复求取主导不稳定平衡点时繁琐的计算过程, 节省了计算时间。

关键词: 暂态稳定; 切机策略; 主导不稳定平衡点; 灵敏度分析; 牛顿-拉夫逊法

Generator tripping strategy in transient stability control of a power system considering the change of the controlling unstable equilibrium point

ZHU Shaoxuan, WANG Tong, WANG Zengping, XIANG Yuwei

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Considering the change of the main unstable equilibrium point caused by different generator tripping measures, a generator tripping strategy based on sensitivity is proposed. First, the part of the transient stability margin related to the controlling unstable equilibrium point is extracted, and then the modified equation of the generator tripping amount and the controlling unstable equilibrium point is established, and the change of the controlling unstable equilibrium point is determined by the Newton-Raphson method. The sensitivity of the transient stability margin of the system to different generators is calculated, and finally the generator tripping strategy is formulated according to the sensitivity. The simulation results on the New England 10 machine 39 node system show that the sensitivity of this strategy is more accurate than that of the cutting strategy without considering the change of the controlling unstable equilibrium point. It can effectively reduce the total generator cutting amount. At the same time, the solution steps of the strategy are direct and clear, which avoids the tedious calculation process and saves calculation time.

This work is supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51637005).

Key words: transient stability; generator tripping strategy; controlling unstable equilibrium point; sensitivity analysis; Newton-Raphson method

0 引言

随着“西电东送”、“北电南供”战略的实施, 截至 2019 年 3 月我国已建成“八交十四直”共 22

条特高压输电线路, 我国电网已经成为世界上规模最大、电压等级最高的全国互联大电网^[1-5]。电压等级的升高、单条线路输电容量的增大, 导致元件故障对系统暂态稳定的影响更加巨大^[6-12]。当预测到系统暂态稳定即将遭到破坏时, 必须采取及时有效的控制措施抑制系统失稳, 其中切机控制可以改变

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(51637005)

被切节点的惯性和动能, 是电力系统暂态功角稳定控制的主要措施之一^[13-15]。

目前国内外广泛采用的暂态稳定控制方案是针对预想的运行方式和故障集, 对电力系统进行大量离线计算得到安全稳定控制策略表。但由于离线计算时运行方式和预想故障不可能穷举, 当实际故障场景与预想故障集偏差较大时, 可能导致控制策略失效^[16]。

随着计算机运算能力的提升及同步相量测量装置(Phasor Measurement Unit, PMU)等实时数据采集技术的应用, 适用于在线计算的暂态稳定切机策略逐渐成为研究的热点。文献[17-18]根据发电机受扰轨迹信息做同调机群等值聚合, 分别利用扩展等面积准则(Extend Equal Area Criterion, EEAC)和系统加速能量计算各机组切机量, 但对大系统而言同调机群的识别与划分仍是难点; 文献[19]提出一种紧急控制超前评估方法, 根据暂态偏差能量的正负及其与预期暂稳裕度间的大小关系, 实时评估紧急控制措施的控制效果并对可能发生失稳的情况进行追加控制; 文献[20-21]提出了修正势能边界曲面的概念, 利用曲面出口处势能的变化情况对切机量进行快速估计, 但当切机前后临界机群变化很大时, 该算法将可能失效; 文献[22-23]基于动态安全域临界面在切机切负荷控制下的迁移规律确定控制效果并给出了优化策略, 但将切机与切负荷的控制效果直接进行线性叠加可能导致计算误差较大。

以 Vittal 等为代表的专家学者通过构造暂态能量函数求取系统中各台机组的切机灵敏度并用于指导切机策略^[24-25], 取得了较好的效果。文献[26]以解析的形式推导了系统暂态能量裕度对切机量的灵敏度, 可以为系统切机提供快速计算。文献[27-28]提出了针对关键机组的分布能量函数的概念, 以此为基础推导了超前机组的切机灵敏度, 但该方法需要通过时域仿真来识别故障后的超前机群, 在应用于大系统时可能面临计算时间过长的风险。值得注意的是, 现有灵敏度方法在计算切机灵敏度时往往假设切机后系统主导不稳定平衡点不变, 这一假设将使计算结果出现偏差, 严重时甚至导致控制策略失效, 系统失稳。

基于以上背景, 本文在考虑不同切机措施导致的主导不稳定平衡点变化的前提下, 提出了一种基于切机灵敏度的电力系统暂态稳定切机控制策略。首先将切机后系统暂态稳定裕度中与主导不稳定平衡点相关的部分提取出来, 随后建立切机量与主导不稳定平衡点的修正方程, 利用牛拉法确定主导不稳定平衡点的变化情况, 以此为基础求取系统暂态

稳定裕度对不同发电机组的切机灵敏度, 最终按照所求切机灵敏度大小制定切机策略。新英格兰 10 机系统的仿真结果验证了该策略的有效性和可行性。

1 考虑主导不稳定平衡点的暂态稳定裕度灵敏度分析模型

n 机系统在惯性中心(Center of Inertia, COI)参考坐标下的转子运动方程为

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = \dot{\omega}_i \\ M_i \dot{\omega}_i = P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_i = P_{mi} - E_i^2 G_{ii}$, P_{mi} 为第 i 台发电机的机械

功率; $P_{ei} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [C_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + D_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)]$,

$C_{ij} = E_i E_j B_{ij}$, $D_{ij} = E_i E_j G_{ij}$; $P_{COI} = \sum_{i=1}^n (P_i - P_{ei})$;

$M_T = \sum_{i=1}^n M_i$, M_i 为发电机 i 的转动惯量; θ_i 和 $\dot{\omega}_i$ 分别为发电机 i 相对于惯性中心的功角和角速度。

由上述公式推得系统暂态能量函数 V 的表达式为

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \dot{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_i^s) - \\ & \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s) - B_{ij} D_{ij} (\sin \theta_{ij} - \sin \theta_{ij}^s)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $B_{ij} = \frac{\theta_i + \theta_j - \theta_i^s - \theta_j^s}{\theta_{ij} - \theta_{ij}^s}$; θ_i^s 为系统稳定平衡点

处发电机 i 相对于惯性中心的角度。

设系统在某故障场景下的主导不稳定平衡点为 θ^u , 则该故障场景下系统的暂态临界能量值 V_{cr} 可表示为

$$\begin{aligned} V_{cr} = & - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i^u - \theta_i^s) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij}^u - \cos \theta_{ij}^s) - \\ & B_{ij} D_{ij} (\sin \theta_{ij}^u - \sin \theta_{ij}^s)] \end{aligned} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)得到系统暂态稳定裕度 ΔV 为

$$\begin{aligned} \Delta V = & V_{cr} - V = \\ & - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \dot{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i^u - \theta_i) - \\ & \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij}^u - \cos \theta_{ij}) - B_{ij} D_{ij} (\sin \theta_{ij}^u - \sin \theta_{ij})] \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可以发现系统稳定平衡点 θ^s 在暂态稳定裕度 ΔV 的表达式中被消掉了,说明系统的暂态稳定裕度与 θ^s 无关,仅与主导不稳定平衡点 θ^u 有关。当系统遭受严重故障可能发生暂态失稳时宜采取切机控制,假设执行切机机组为发电机 i ,执行切机后转动惯量 M_i 、机械功率 P_{mi} 以及主导不稳定平衡点 θ^u 都将发生变化,进而导致 ΔV 也相应变化。为计入 θ^u 变化对 ΔV 的影响,将式(4)进一步分解为如式(5)的形式。

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{new}} &= V_{\text{cr}}^{\text{new}} - V^{\text{new}} = \\ &-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^n P_{i,\text{new}} (\theta_i^{\text{u,new}} - \theta_i) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \\ &[C_{ij} (\cos \theta_{ij}^{\text{u,new}} - \cos \theta_{ij}) - B_{ij} D_{ij} (\sin \theta_{ij}^{\text{u,new}} - \sin \theta_{ij})] = \\ &-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (M_{i,0} - \Delta M_i) \omega_i^2 - \sum_{i=1}^n (P_{i,0} - \Delta P_i) (\theta_i^{\text{u,new}} - \theta_i^{\text{u},0} + \\ &\theta_i^{\text{u},0} - \theta_i) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij}^{\text{u,new}} - \cos \theta_{ij}^{\text{u},0} + \\ &\cos \theta_{ij}^{\text{u},0} - \cos \theta_{ij}) - B_{ij} D_{ij} (\sin \theta_{ij}^{\text{u,new}} - \sin \theta_{ij}^{\text{u},0} + \\ &\sin \theta_{ij}^{\text{u},0} - \sin \theta_{ij})] = \\ &\Delta V_0 + \Delta V_{\text{ch}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta V_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_{i,0} \omega_i^2 - \sum_{i=1}^n P_{i,0} (\theta_i^{\text{u},0} - \theta_i) - \\ &\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij}^{\text{u},0} - \cos \theta_{ij}) - B_{ij} D_{ij} (\sin \theta_{ij}^{\text{u},0} - \sin \theta_{ij})] \\ \Delta V_{\text{ch}} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^n P_{i,0} (\theta_i^{\text{u,new}} - \theta_i^{\text{u},0}) + \\ &\sum_{i=1}^n \Delta P_i (\theta_i^{\text{u,new}} - \theta_i^{\text{u},0}) + \sum_{i=1}^n \Delta P_i (\theta_i^{\text{u},0} - \theta_i) - \\ &\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij}^{\text{u,new}} - \cos \theta_{ij}^{\text{u},0}) - \\ &B_{ij} D_{ij} (\sin \theta_{ij}^{\text{u,new}} - \sin \theta_{ij}^{\text{u},0})] \end{aligned}$$

$$P_{i,0} = P_{mi,0} - E_i^2 G_{ii}, \quad P_{i,\text{new}} = P_{mi,\text{new}} - E_i^2 G_{ii}$$

式中: ΔV_0 和 ΔV_{new} 分别为切机前、后系统的暂态稳定裕度; ΔV_{ch} 为切机前后由于主导不稳定平衡点变化导致的系统暂态稳定裕度变化量; V^{new} 和 $V_{\text{cr}}^{\text{new}}$ 分别为切机后系统的暂态能量和暂态稳定临界能量; $\theta_i^{\text{u},0}$ 和 $\theta_i^{\text{u,new}}$ 分别为切机前、后系统主导不稳定平衡点处发电机 i 相对于惯性中心的功角; $P_{mi,0}$ 和 $P_{mi,\text{new}}$ 分别为切机前、后发电机 i 的机械功率; ΔP_i 为发电机 i 的切机量; $M_{i,0}$ 为切机前发电机 i 的转动惯量;

ΔM_i 为发电机 i 切机导致的转动惯量变化量,为简化分析,假设 ΔM_i 随切机量 ΔP_i 线性变化。

$$\Delta M_i = \frac{\Delta P_i}{P_{i,0}} M_{i,0} \quad (6)$$

为达到以最小的控制代价保证系统暂态稳定的目的,需求取切机后系统暂态稳定裕度 ΔV_{new} 对切机量 ΔP_i 的灵敏度,因式(5)中 ΔV_{new} 的前半部分 ΔV_0 不随切机量变化,因此只需求取 ΔV_{ch} 对 ΔP_i 的灵敏度,如式(7)所示。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta V_{\text{new}}}{\partial \Delta P_i} &= \frac{\partial \Delta V_{\text{ch}}}{\partial \Delta P_i} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{M_{i,0}}{P_{i,0}} \omega_i^2 - \\ &\sum_{i=1}^n P_{i,0} \frac{\partial \theta_i^{\text{u,new}}}{\partial \Delta P_i} + \sum_{i=1}^n (\theta_i^{\text{u,new}} - \theta_i) + \sum_{i=1}^n \Delta P_i \frac{\partial \theta_i^{\text{u,new}}}{\partial \Delta P_i} - \\ &\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (-\sin \theta_{ij}^{\text{u,new}} \frac{\partial \theta_{ij}^{\text{u,new}}}{\partial \Delta P_i}) - \\ &B_{ij} D_{ij} \cos \theta_{ij}^{\text{u,new}} \frac{\partial \theta_{ij}^{\text{u,new}}}{\partial \Delta P_i} - \\ &D_{ij} (\sin \theta_{ij}^{\text{u,new}} - \sin \theta_{ij}^{\text{u},0}) \frac{\partial B_{ij}}{\partial \Delta P_i}] \end{aligned} \quad (7)$$

式中:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_{ij}}{\partial \Delta P_i} &= \left[\left(\frac{\partial \theta_i^{\text{u,new}}}{\partial \Delta P_i} + \frac{\partial \theta_j^{\text{u,new}}}{\partial \Delta P_i} \right) (\theta_{ij}^{\text{u,new}} - \theta_{ij}^s) - \right. \\ &(\theta_i^{\text{u,new}} + \theta_j^{\text{u,new}} - \theta_i^s - \theta_j^s) \left(\frac{\partial \theta_i^{\text{u,new}}}{\partial \Delta P_i} - \frac{\partial \theta_j^{\text{u,new}}}{\partial \Delta P_i} \right) \left. \right] / \\ &(\theta_{ij}^{\text{u,new}} - \theta_{ij}^s)^2 \end{aligned}$$

当切机量 ΔP_i 已知时,等式(7)右侧的未知量仅有 $\theta_i^{\text{u,new}}$ 及 $\frac{\partial \theta_i^{\text{u,new}}}{\partial \Delta P_i}$ ($i=1,2,\dots,n$),因此求取 ΔV_{new} 对 ΔP_i 的灵敏度的关键在于求 $\theta_i^{\text{u,new}}$ 和 $\frac{\partial \theta_i^{\text{u,new}}}{\partial \Delta P_i}$ 。

2 牛顿-拉夫逊法求解灵敏度

对式(1),在主导不稳定平衡点处有

$$M_i \dot{\omega}_i = P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{\text{Col}} = 0 \quad (8)$$

整理得到

$$P_i - \frac{M_i}{M_T} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{M_T - M_i}{M_T} P_{ei} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{ej} \quad (9)$$

当式(9)中 i 从1到 n 变化时,只有 $n-1$ 个方程

是独立的, 需要加入 COI 坐标约束进行联立求解, 如式(10)所示。

$$\begin{cases} P_i - \frac{M_i}{M_T} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{M_T - M_i}{M_T} P_{ei} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{ej}, i=1, 2, \dots, n-1 \\ \sum_{i=1}^n (M_i \theta_i) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

首先采用文献[29]中的方法对不采取切机控制时系统的主导不稳定平衡点进行求解:

1) 使用时域仿真方法计算故障中轨迹对应的逸出点;

2) 使用逸出点作为初值, 对故障后系统进行积分, 直到故障后轨迹末端的范数小于一个阈值 γ ;

3) 使用末端值作为初值, 采用牛拉法对式(10)进行求解, 最终得到主导不稳定平衡点 $\theta^{u.0}$ 。

接下来求取切机导致的主导不稳定平衡点的变化情况, 为避免反复求取主导不稳定平衡点带来的繁杂计算过程, 本文针对发电机功率偏差与功角偏差建立了如式(11)所示的修正方程, 采用牛拉法进行求解, 初值即为未采取切机措施时系统的主导不稳定平衡点 $\theta^{u.0}$ 。

$$\Delta P_T = J \Delta \theta \quad (11)$$

其中

$$\Delta P_T = \begin{bmatrix} \Delta P_{T,1} \\ \Delta P_{T,2} \\ \vdots \\ \Delta P_{T,n-1} \\ \Delta \theta_T \end{bmatrix} \quad \Delta \theta = \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_{n-1} \\ \Delta \theta_n \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{n-1,1} & H_{n-1,2} & \cdots & H_{n-1,n} \\ M_1 & M_2 & \cdots & M_n \end{bmatrix}$$

式中: ΔP_T 为式(10)中方程组左侧变量的计算值与真实值的偏差量组成的向量; $\Delta \theta$ 为各发电机功角的修正量组成的向量; J 为修正方程的雅可比矩阵, 其中

$$H_{ii} = \frac{2M_T - M_i}{M_T} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [C_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - D_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)]$$

$$H_{ij} = \frac{M_i}{M_T} [C_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - D_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)]$$

通过上述方法即可求得 $\theta_i^{u.new}$ ($i=1, 2, \dots, n$), 对另一个未知量 $\frac{\partial \theta_i^{u.new}}{\partial \Delta P_i}$, 可令切机量 ΔP_i 取一较小值 ε , 同样按牛拉法得到 $\theta_i^{u.new}$ 后根据式(12)进行近似求解。

$$\frac{\partial \theta_i^{u.new}}{\partial \Delta P_i} \approx \frac{\theta_i^{u.new} - \theta_i^{u.0}}{\varepsilon} \quad (12)$$

将 $\theta_i^{u.new}$ 及 $\frac{\partial \theta_i^{u.new}}{\partial \Delta P_i}$ ($i=1, 2, \dots, n$) 代入式(7), 最终

得到切机后系统暂态稳定裕度 ΔV_{new} 对切机量 ΔP_i 的灵敏度。

当控制中心制定切机策略时应按照切机灵敏度由大到小的顺序切除相应发电厂机组, 直至满足关系式(13)。

$$\sum_k \sum_j \frac{\partial \Delta V_{new}}{\partial \Delta P_k} \Delta P_{k,j} \geq |\Delta V_0| \quad (13)$$

式中, $\Delta P_{k,j}$ 为发电厂 k 的第 j 台可切机组。

本策略的求解流程如图 1 所示, 最终得到考虑主导不稳定平衡点变化的切机控制策略。

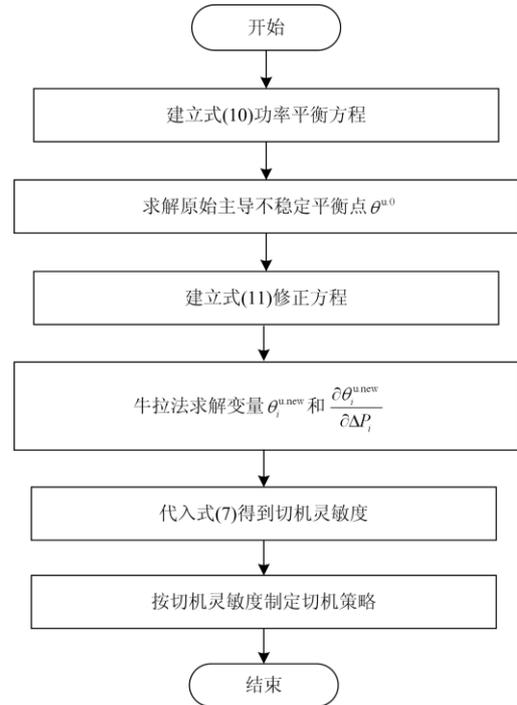


图 1 策略求解流程图

Fig. 1 Flow chart of strategy solving

3 算例仿真

为验证本文策略的有效性, 利用 Matlab 2016a 软件平台对图 2 所示的新英格兰 10 机 39 节点系统

进行了仿真计算,计算机处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ。由于现实中发电厂一般由参数一致的多台机组组成,因此假设系统中发电机 G1—G10 均由 5 台参数一致的发电机组成,每台发电机出力为该节点总出力的 1/5。考虑发电厂实际运行中一般不会切除全部机组,因此在制定切机策略时每个发电机节点至少保留一台发电机。本算例中切机时刻均设定为故障切除后 0.1 s。

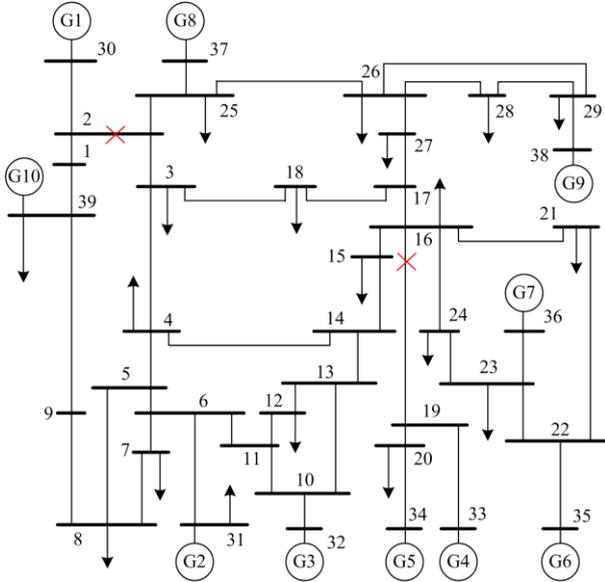


图 2 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig. 2 New England 10-machine 39-node system

3.1 场景一

设定 0 s 时母线 16 出口发生两相接地短路,故障持续时间 0.33 s,当不采取控制措施时,各发电机组在惯性中心坐标下的功角曲线如图 3 所示,可以看到此时系统将发生暂态失稳。

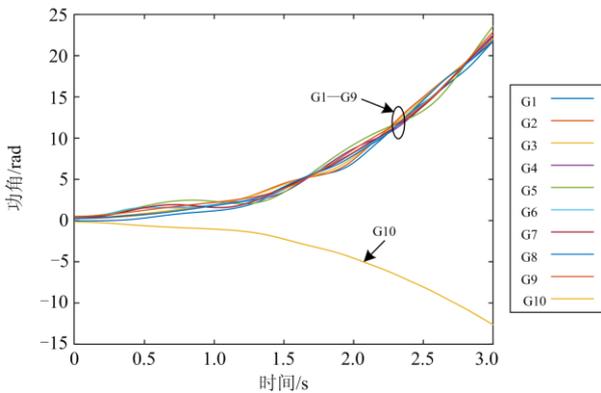


图 3 发电机功角仿真曲线

Fig. 3 Power-angle simulation curve of generators

为防止系统失稳,应采取切机控制,首先求得此时系统的主导不稳定平衡点为

$$\theta^{u,0} = [0.9819 \quad 1.6973 \quad 1.7824 \quad 1.6971 \quad 1.9089 \quad 1.7371 \quad 1.7150 \quad 1.4806 \quad 1.9260 \quad -0.9252]$$

由式(4)得到故障切除时刻系统的暂态稳定裕度 $\Delta V = -2.9309$ 。

接下来求系统暂态稳定裕度 ΔV_{new} 对各发电机组的切机灵敏度 $\frac{\partial \Delta V_{new}}{\partial \Delta P_i}$ ($i=1,2,\dots,10$)。以发电机

G5 为例,首先求切机后系统的主导不稳定平衡点 $\theta^{u,new}$ 。按式(11)计算雅各比矩阵 J 中元素 H_{ii} 和 H_{ij} 的值,得到矩阵 J 后解修正方程得到各发电机功角的修正量 $\Delta \theta$,进而求得切机后的主导不稳定平衡点 $\theta^{u,new}$ 为

$$\theta^{u,new} = \theta^{u,0} + \Delta \theta = [1.0286 \quad 1.7820 \quad 1.8551 \quad 1.6716 \quad 1.7112 \quad 1.7500 \quad 1.7293 \quad 1.5304 \quad 1.9744 \quad -0.9352]$$

$$\theta^{u,new} \text{ 确定后由式(12)可求得 } \frac{\partial \theta_i^{u,new}}{\partial \Delta P_5}$$

和 $\frac{\partial \theta_i^{u,new}}{\partial \Delta P_5}$ 代入式(7),最终得到切机后系统暂态稳定

裕度 ΔV_{new} 对发电机 G5 的切机灵敏度为 1.114 5。同样地,按上述方法计算得到其余机组的切机灵敏度,再由式(13)得到各机组切机量,为表明本文策略有效性,选取不计主导不稳定平衡点变化的灵敏度切机策略作为对比策略 1,此外利用时域仿真的方法找到切机量最少的控制策略作为对比策略 2,不同策略下各机组的切机灵敏度和切机量如表 1 所示。

表 1 不同策略下各机组切机灵敏度和切机量对比

Table 1 Comparison of cutting sensitivity and cutting capacity of each unit under different strategies

发电机编号	本策略切机灵敏度	对比策略 1 切机灵敏度	本策略切机量/MW	对比策略 1 切机量/MW	对比策略 2 切机量/MW
G1	0.100 6	0.155 7	—	—	—
G2	0.960 8	0.262 0	—	—	—
G3	0.348 4	0.317 0	—	—	—
G4	0.910 1	0.719 8	—	—	—
G5	1.114 5	0.622 3	101.6×3	—	101.6×3
G6	0.914 4	0.779 6	—	130×3	—
G7	0.926 2	0.615 7	—	—	—
G8	0.463 3	0.281 0	—	—	—
G9	0.941 3	0.414 1	—	—	—
G10	-0.148 2	-0.251 4	—	—	—

由表 1 可以看到本文策略在考虑了主导不稳定平衡点的变化后,各发电机的切机灵敏度较对比策

略 1 均有一定程度变化, 其中切机灵敏度最大的机组由对比策略 1 的发电机 G6 变为实际灵敏度更高的发电机 G5, 使得本策略下总切机量较对比策略减少了 85.2 MW, 占总切机量的 21.85%。此外本策略计算结果与时域仿真得到的对比策略 2 结果一致, 验证了本策略的正确性。经仿真验证, 在 0.43 s 时按照本文策略进行切机后各机组功角曲线如图 4 所示, 可以看到切机后系统可以保持暂态稳定。

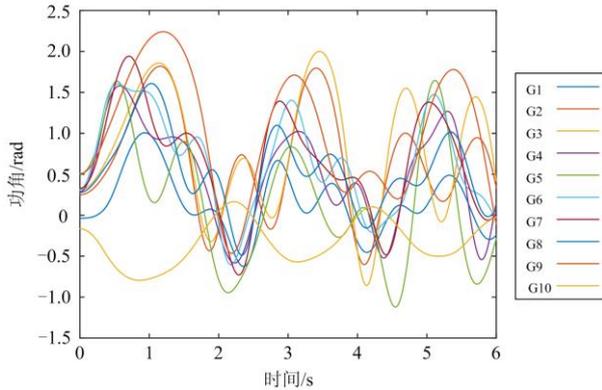


图 4 按本策略切机后发电机功角仿真曲线

Fig. 4 Power-angle simulation curve of generators after generator tripping

3.2 场景二

设定母线 2 处发生三相短路, 故障持续时间 0.28 s, 当不采取控制措施时, 各发电机组在惯性中心坐标下的功角曲线如图 5 所示, 系统发生暂态失稳。

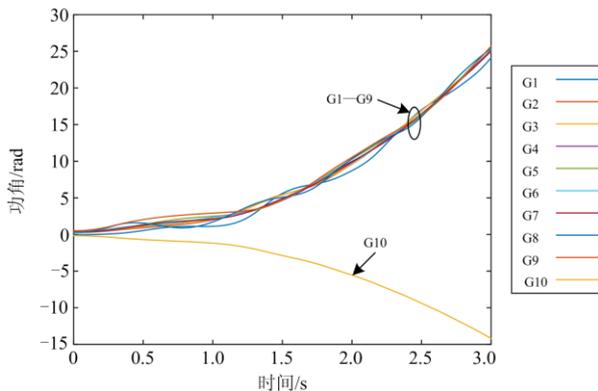


图 5 发电机功角仿真曲线

Fig. 5 Power-angle simulation curve of generators

与场景一相同, 先求得此时系统的主导不稳定平衡点 θ^{u^0} , 然后由式(7)一式(12)依次求得系统暂态稳定裕度 ΔV_{new} 对各发电机组的切机灵敏度 $\frac{\partial \Delta V_{\text{new}}}{\partial \Delta P_i}$ ($i=1,2,\dots,10$), 最终由式(13)得到各机组的

切机策略, 切机灵敏度与切机策略如表 2 所示, 同样地, 选取不计主导不稳定平衡点变化的灵敏度切机策略作为对比策略 1, 利用时域仿真的方法找到切机量最少的控制策略作为对比策略 2。

表 2 不同策略下各机组切机灵敏度和切机量对比

Table 2 Comparison of cutting sensitivity and cutting capacity of each unit under different strategies

发电机编号	本策略切机灵敏度	对比策略 1 切机灵敏度	本策略切机量/MW	对比策略 1 切机量/MW	对比策略 2 切机量/MW
G1	0.261 9	0.169 2	—	—	—
G2	0.342 9	0.299 3	—	—	—
G3	0.525 3	0.342 0	—	—	—
G4	0.778 2	0.449 4	—	—	—
G5	0.984 7	0.342 8	101.6×4	—	101.6×4
G6	0.789 2	0.488 4	—	—	—
G7	0.792 6	0.367 1	—	—	—
G8	0.855 5	0.810 0	—	108×4	—
G9	0.921 2	0.721 9	166×2	166×3	166×2
G10	-0.241 4	-0.240 9	—	—	—

由表 2 可以看到本策略下各发电机的切机灵敏度较对比策略 1 均有一定程度变化, 其中切机灵敏度最大的机组由策略 1 的发电机 G8 变为实际灵敏度更高的发电机 G5。由于三相短路下系统暂态稳定裕度较低, 需要在不同发电机节点进行组合切机。由表 2 可知本策略仍与时域仿真得到的最优切机策略即对比策略 2 结果一致, 而与策略 1 相比本策略的总切机量减少了 191.6 MW, 占策略 1 总切机量的 20.60%。经仿真验证, 按照本策略对发电机 G5 及 G9 进行切机后各机组功角曲线如图 6 所示, 可以看到按本策略切机后系统可以保持暂态稳定。

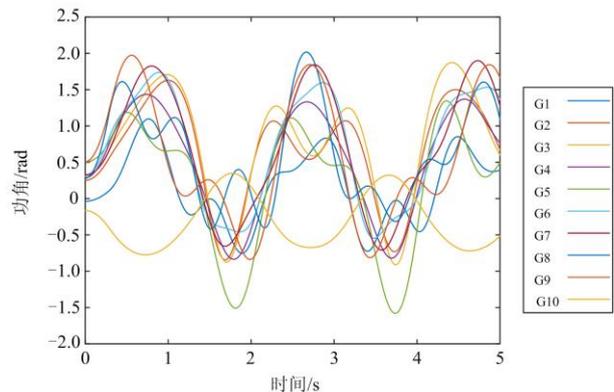


图 6 按本策略切机后发电机功角仿真曲线

Fig. 6 Power-angle simulation curve of generators after generator tripping

为验证本策略对系统拓扑变化的适应性, 将 10 机 39 节点系统的拓扑结构进行改变, 如图 7 所示, 假设线路 17-27 因检修而断开, 其余故障情况与文中场景二保持一致。

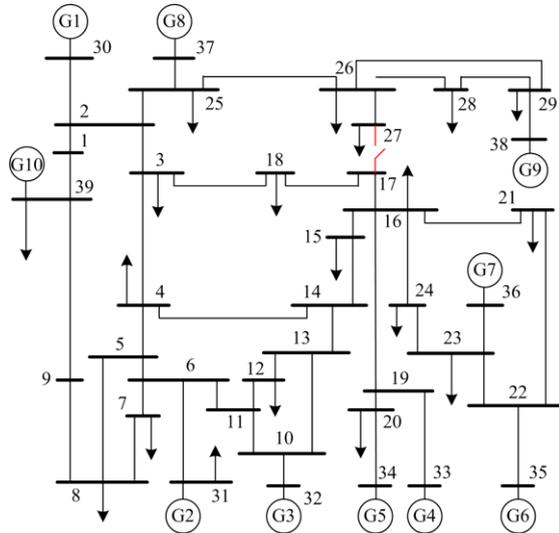


图 7 改变拓扑结构后的新英格兰 10 机 39 节点系统图

Fig. 7 New England 10-machine 39-node system after changing topology

此时采用本文策略计算得到的各机组切机灵敏度及切机策略如表 3 所示, 可以看到系统拓扑改变后本策略计算得到的各机组切机灵敏度较之前均有不同程度变化, 但灵敏度较大的机组仍然是发电机 5 和 9, 因此应优先对其进行切机控制。由表 3 还可发现发电机 5 和发电机 9 的切机灵敏度较系统拓扑改变前均略有减小, 因此本策略求得的切机总量较系统拓扑改变前增加了 166 MW。此外本策略计算结果仍与时域仿真法得到的切机量最少的最优控制策略一致, 按本文策略进行切机后各机组功角曲线如图 8 所示, 可以看到切机后系统能够保持暂态稳定, 从而说明本文方法可以有效适应系统拓扑结构的变化。

此外, 本文策略在考虑切机导致的系统主导不稳定平衡点变化时, 通过建立切机量与主导不稳定平衡点的修正方程, 利用牛拉法对主导不稳定平衡点的变化情况进行简化求解, 可以有效避免重新求取主导不稳定平衡点带来的复杂计算过程。在 Matlab2016a 仿真平台下, 本策略计算所用时间为 0.534 s, 而不考虑主导不稳定平衡点变化的对比策略用时 0.431 s, 可见本策略相较传统灵敏度切机策略在提高计算准确度的前提下并不会显著增加计算时间。

表 3 切机灵敏度及切机策略计算结果

Table 3 Calculation results of cutting sensitivity and cutting capacity

发电机编号	系统拓扑改变后本策略切机灵敏度	系统拓扑改变前本策略切机灵敏度	本策略切机量/MW	最优策略切机量/MW
G1	0.214 0	0.261 9	—	—
G2	0.285 7	0.342 9	—	—
G3	0.302 0	0.525 3	—	—
G4	0.616 6	0.778 2	—	—
G5	0.909 8	0.984 7	101.6×4	101.6×4
G6	0.630 9	0.789 2	—	—
G7	0.630 1	0.792 6	—	—
G8	0.806 7	0.855 5	—	—
G9	0.863 0	0.921 2	166×3	166×3
G10	-0.161 9	-0.241 4	—	—

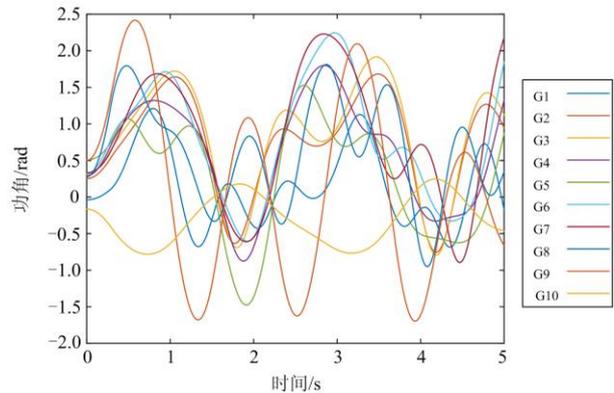


图 8 按本策略切机后发电机功角仿真曲线

Fig. 8 Power-angle simulation curve of generators after generator tripping

4 结论

本文在考虑不同切机措施导致的主导不稳定平衡点变化的前提下, 提出了一种基于切机灵敏度的电力系统暂态稳定切机控制策略。该策略具有以下特点:

- 1) 考虑了切机导致的主导不稳定平衡点变化对控制效果的影响, 因而相比于传统策略得到的切机灵敏度和切机量更加准确;
- 2) 通过建立切机量与主导不稳定平衡点的修正方程, 利用牛拉法对主导不稳定平衡点的变化情况进行简化求解, 避免了重新求取主导不稳定平衡点带来的复杂计算, 提高了计算效率;
- 3) 无论系统发生较轻微的不对称故障或是较严重的三相短路故障, 均能给出准确的切机策略, 适用性较强。

参考文献

- [1] 刘振亚. 深入学习贯彻习近平总书记重要指示精神推动我国能源电力转型与高质量发展[J]. 中国电力企业管理, 2019(10): 11-19.
LIU Zhenya. Deeply studying and implementing the spirit of general secretary Xi Jinping's important instructions to promote the transformation of energy and electric power and the development of high quality in China[J]. Management of Electric Power Enterprises in China, 2019(10): 11-19.
- [2] 王增平, 朱劭璇, 王彤, 等. 基于故障全景信息的电力系统暂态稳定分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 34-42.
WANG Zengping, ZHU Shaoxuan, WANG Tong, et al. Research of transient stability analysis for power system based on fault panoramic information[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 34-42.
- [3] 夏小琴, 鲍颜红, 任先成, 等. 计及静态和暂态安全稳定约束的调度计划辅助决策[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 24-30.
XIA Xiaoqin, BAO Yanhong, REN Xiancheng, et al. Auxiliary decision-making of dispatching plan considering static security and transient stability constrains[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 24-30.
- [4] 韩梯, 柯贤波, 霍超, 等. 多直流、高占比新能源电力系统应对严重扰动新技术研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 9-14, 27.
HAN Ti, KE Xianbo, HUO Chao, et al. New technology coping with serious disturbance in power system with multiple dc and high ratio new energy[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 9-14, 27.
- [5] 侯文捷, 武鸿鹏, 高峰亭, 等. 基于区块链智能合约的电力供应链利益分配研究[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2020, 33(1): 144-148.
HOU Wenjie, WU Hongpeng, GAO Fengting, et al. Research on profit allocation of power supply chain based on block chain smart contract[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 2020, 33(1): 144-148.
- [6] 辛建波, 王玉麟, 舒展, 等. 特高压交直流接入对江西电网暂态稳定的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 71-79.
XIN Jianbo, WANG Yulin, SHU Zhan, et al. Transient stability impact analysis of UHV AC/DC access to Jiangxi power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 71-79.
- [7] 石访, 张林林, 胡熊伟, 等. 基于多属性决策树的电网暂态稳定规则提取方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2364-2374.
SHI Fang, ZHANG Linlin, HU Xiongwei, et al. Power system transient stability rules extraction based on multi-attribute decision tree[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2364-2374.
- [8] 王亮, 韩冬, 王长江, 等. 基于MVEE和LSPTSVM的电力系统暂态稳定评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 45-54.
WANG Liang, HAN Dong, WANG Changjiang, et al. Power system transient stability assessment based on MVEE and LSPTSVM[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 45-54.
- [9] 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.
- [10] CHAO Ren, YAN Xu, ZHANG Yuchen. Post-disturbance transient stability assessment of power systems towards optimal accuracy-speed tradeoff[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 194-203. DOI: 10.1186/s41601-018-0091-3.
- [11] 刘俊, 孙惠文, 吴柳, 等. 电力系统暂态稳定性评估综述[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 44-53, 122.
LIU Jun, SUN Huiwen, WU Liu, et al. Overview of transient stability assessment of power systems[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 44-53, 122.
- [12] 蔡国伟, 张启蒙, 杨德友, 等. 基于改进深度置信网络的电力系统暂态稳定评估研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 61-68.
CAI Guowei, ZHANG Qimeng, YANG Deyou, et al. Research on power system transient stability assessment based on improved deep belief network[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 61-68.
- [13] 倪向萍, 张雪敏, 梅生伟. 基于复杂网络理论的切机控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 35-41.
NI Xiangping, ZHANG Xuemin, MEI Shengwei. Generator tripping strategy based on complex network theory[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 35-41.
- [14] YAO Ziwen. A control-oriented energy function for generation shedding determination for transient stability control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 413-421.
- [15] RUIZ V D, PAVELLA M. A comprehensive approach to transient stability control, I: near optimal preventive

control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1446-1453.

[16] 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.

[17] XUE Y, VAN C T, PAVELLA M. A simple direct method for fast transient stability assessment of large power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(2): 400-412.

[18] 吴为, 汤涌, 孙华东. 基于系统加速能量的切机控制措施量化研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6134-6140.
WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong. Quantitative research of generation capacity tripped based on acceleration energy of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6134-6140.

[19] 陈长胜, 马世英, 郑超, 等. 基于暂态偏差能量的紧急控制效果超前评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5118-5125, 5308.
CHEN Changsheng, MA Shiyong, ZHENG Chao, et al. The advance evaluation of emergency control based on transient deviation energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5118-5125, 5308.

[20] 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, 55.
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, 55.

[21] 任伟, 房大中, 吴烈鑫, 等. 基于修正能量函数的广东电网最佳稳措控制算法[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 184-189.
REN Wei, FANG Dazhong, WU Liexin, et al. Optimal emergency tripping and load shedding evaluation using CTEF approach on power system in Guangdong[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(2): 184-189.

[22] 姚光华, 陈允平, 赵武智, 等. 用动态安全域法决定暂态稳定紧急控制措施初探[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 21-29.
YAO Guanghua, CHEN Yunping, ZHAO Wuzhi, et al. Decision of emergency control for transient stability by dynamic security region method[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 21-29.

[23] 余贻鑫, 刘辉, 曾沅. 基于实用动态安全域的紧急控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(6): 6-10.
YU Yixin, LIU Hui, ZENG Yuan. A novel emergency control strategy based on practical dynamic security regions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(6): 6-10.

[24] VITTAL V, ZHOU E Z, HWANG C, et al. Derivation of stability limits using analytical sensitivity of the transient energy margin[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(4): 1363-1372.

[25] CHANG H C, CHEN H C. Fast determination of generation-shedding in transient-emergency state[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(2): 178-183.

[26] CHANG H C, CHEN H C. Applications of the energy based sensitivity method to fast transient control[J]. Electric Power Systems Research, 1994, 31: 87-95.

[27] CHEN H C, LI P C. Fast transient stability control of power system in deregulated environment[C] // 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, August 18-18, 2005, Dalian, China.

[28] MICHEL A, FOUAD A, VITTAL V. Power system transient stability using individual machine energy functions[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems, 1983, 30(5): 266-276.

[29] 江晓东, 江宁强, 吴浩, 等. 电力系统稳定分析直接法—理论基础、BCU 方法论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

收稿日期: 2020-10-15; 修回日期: 2020-12-24

作者简介:

朱劭璇(1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与安全防御; E-mail: 1024792840@qq.com

王彤(1985—), 女, 通信作者, 博士, 研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制, 暂态稳定分析; E-mail: hdwangtong@126.com

王增平(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为继电保护、变电站综合自动化、广域保护等; E-mail: wangzp1103@sina.com

(编辑 周金梅)