

Feasibility Analysis on Forecast of Cascading Failures Based on Steady Model and Hybrid Model

Yucheng Qian, Jingjing Zhang, Ming Ding

Anhui Provincial Laboratory of New Energy Utilization and Conservation (Hefei University of Technology),
Hefei Anhui

Email: 731214287@qq.com, dragonzjj@126.com, mingding56@126.com

Received: Mar. 10th, 2018; accepted: Apr. 1st, 2018; published: Apr. 8th, 2018

Abstract

The commonly used simulation models of cascading failure contain DC power flow steady model (DC-SM), AC power flow steady model (AC-SM), transient model (TM) and hybrid model (HM). Taken TM as a reference model, the consistency and difference of the models are compared in the simulation of cascading failures, and cascading failure propagation stage is divided into slow successive break stage and fast successive break stage, and the feasibility of SM and HM at different stages is analyzed. Firstly, taken the IEEE 39-bus system as an example, by comparing the simulation results of DC-SM, AC-SM and TM, the influence of the bus voltage and generator power angle on the simulation results is analyzed, and the effectiveness of SM in the slow successive break phase is verified. Finally, aiming at the problem of SM in the simulation of cascading failures, the simulation results of HM and TM in the fast successive break stage are compared, and the effectiveness of HM in the fast successive break phase is verified.

Keywords

Power System, Cascading Failure, Forecast, Steady Model, Transient Model, Hybrid Model, Feasibility Analysis

稳态模型和混合模型在连锁故障预测中的适用性分析

钱宇骋, 张晶晶, 丁明

安徽省新能源利用与节能省级实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥

Email: 731214287@qq.com, dragonzjj@126.com, mingding56@126.com

摘要

针对连锁故障仿真中常用的直流潮流稳态模型(DC-SM)、交流潮流稳态模型(AC-SM)、暂态模型(TM)和混合模型(HM)，以TM为参考模型，对比了模型在连锁故障预测时的一致性和差异性，将连锁故障传播阶段划分为关键线路开断前的缓慢相继开断阶段和关键线路开断后的快速相继开断阶段，对SM和HM在不同阶段的适用性进行分析。首先，采用IEEE10机39节点系统进行仿真计算，对比DC-SM、AC-SM与TM的仿真结果，分析节点电压和发电机功角等因素对仿真结果的影响，验证了SM在缓慢相继开断阶段预测的有效性；最后，针对SM在连锁故障快速相继开断阶段预测方面存在的问题，对比了HM和TM在快速相继开断阶段的仿真结果，验证了HM在快速相继开断阶段预测的有效性。

关键词

电力系统，连锁故障，预测，稳态模型，暂态模型，混合模型，适用性分析

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，国内外电力系统发生过多起连锁故障导致的大停电事故，造成了巨大的经济损失和灾难性后果[1] [2] [3]。因此开展对连锁故障的预测研究，加强对连锁故障的仿真分析，对防御大停电事故具有重要意义。

由于电力系统本身是复杂的高阶非线性动态系统，而连锁故障的成因和发展过程又复杂多变，导致使用传统的电力系统可靠性分析方法分析连锁故障的难度很大。针对这种情况，国内外学者进行了各种研究，提出不少行之有效的新理论、新模型。从电力系统仿真的角度出发，现有的连锁故障仿真模型大致可分为基于直流潮流的稳态模型(DC-steady model, 简称 DC-SM)、基于交流潮流的稳态模型(AC-steady model, 简称 AC-SM)、基于稳定计算的暂态模型(transient model, 简称 TM)以及基于稳定计算和潮流计算交替的混合模型(hybrid model, 简称 HM)。

基于稳态模型的连锁故障仿真，考虑电网潮流特性，将连锁故障视为离散的状态转移过程，重点考虑每级故障的暂态过程消失后的潮流变化情况，忽略故障发生后暂态过程和系统稳定性问题。其中基于交流潮流的稳态模型的数学模型是一组非线性方程，潮流计算准确度较高，在连锁故障分析中得到广泛应用：文献[4] [5]提出了基于交流潮流稳态模型的 Manchester 模型模拟电力系统连锁故障，文献[6] [7]提出了一种基于交流潮流稳态模型的 OPA 模型。文献[8] [9] [10]提出了基于 AC-SM 的连锁故障事故链模型。基于直流潮流的稳态模型在基于交流潮流的稳态模型的基础上对潮流方程进行简化处理，忽略了线路电阻和并联支路，不考虑无功和电压直接的关系，数学模型是一组线性方程，与交流潮流的计算结果相比存在一定误差[11]，但其有效降低了模型复杂度，计算速度快，且无收敛性问题，可用于快速模拟连锁故障。

相比稳态模型，暂态模型采用微分代数方程，通过时域仿真可以有效模拟连锁故障发展过程中的系统状态、元件动作以及控制措施之间的相互影响，提供准确的系统动态信息，仿真精度高，可用于连锁故障的全过程动态仿真，但由于模型复杂度较高，计算量也远大于稳态模型。文献[12]考虑了动态过程中

机组保护、变压器励磁保护、低频/低压减载、线路过载等因素，提出了一种基于长期动态仿真的电力系统连锁故障模型；文献[13]将电力系统的机电暂态过程、中期过程和长期过程进行有机地统一，提出了电力系统全过程动态仿真模型。

混合模型是对稳态模型和暂态模型的一种折中，其核心就是在稳态模型的基础上嵌入一个暂态模型，当系统发生扰动时，进入暂态模型，以模拟扰动发生后的暂态过程和系统稳定性问题，当系统到达平衡点时，暂态模型结束，返回稳态模型中更新系统状态并进行潮流计算，之后继续搜索下一级故障。文献[14][15]在搜索连锁故障过程中考虑保护动作和控制措施，并交替进行潮流计算和稳定计算；文献[16][17][18]将连锁故障过程分为电失稳前开断阶段和电失稳后开断阶段，电失稳前开断阶段考虑热稳定问题引起的元件开断，并使用稳态仿真模型进行模拟，电失稳后开断阶段考虑电稳定问题引起的元件开断，并使用暂态仿真模型进行模拟。

现有的连锁故障过程研究大多是采用上述某个模型，而很少对这些模型在连锁故障预测时的一致性和差异性进行对比。文献[19]从预测连锁故障路径的角度对比了 DC-SM 和 TM 的一致性和差异性，并从功角稳定和电压稳定的角度定义了临界时刻。

本文在文献[19]的基础上，定义了关键线路，将连锁故障传播阶段划分为关键线路开断前的缓慢相继开断阶段和关键线路开断后的快速相继开断阶段；以 TM 为参考模型，对比了 DC-SM、AC-SM 与 TM 的仿真结果，对线路负载率、节点电压、发电机功角等因素间的关系以及模型间的一致性 or 差异性进行详细分析，验证了 DC-SM 和 AC-SM 在缓慢相继开断阶段预测的有效性；针对 SM 在连锁故障快速相继开断阶段预测方面存在的问题，对比了 HM 和 TM 在快速相继开断阶段的仿真结果，验证了 HM 在快速相继开断阶段预测的有效性。

2. 基于稳态模型的连锁故障搜索流程

2.1. 预测初始故障的选取

线路故障是连锁故障中最常见的初始故障。根据不同的系统规模以及计算速度要求可以采取不同的初始故障选取方式，对于较大的系统，或对计算速度要求较高的搜索过程，可以定义线路的故障概率、故障后果或者故障风险等指标，根据指标筛选出潜在故障线路，形成初始故障集；而对于较小的系统，或对计算速度无较高要求的搜索过程，可以将系统中所有线路都列入初始故障集。

2.2. 基于过负荷保护的线路开断

伴随着潮流转移的线路连锁开断过程是连锁故障发展的常见模式。当线路 j 的潮流 F_j 超越其潮流极限值 C_j 时，过负荷保护会在一定时间后切除线路 j 。由于线路过负荷的严重程度不仅与线路过负荷量成正比，还与过负荷的持续时间成正比，因此本文定义过负荷累积函数 $O_j(t, \Delta t)$ 来表示线路 j 在 t 时刻和 $t + \Delta t$ 时刻之间的过负荷严重程度[20]，有：

$$O_j(t, \Delta t) = \begin{cases} \int_t^{t+\Delta t} (F_j(t) - C_j) dt & F_j(t) > C_j \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $F_j(t)$ 为线路 j 在时刻 t 的潮流值， Δt 为线路 j 从出现过负荷到过负荷保护动作的时间间隔。当累积值 O_j 经过 T_j 秒超过临界累积值 $O_{j,limit}$ 时，线路 j 过负荷保护动作，使线路 j 发生开断。

2.3. 功率平衡控制

当故障发生导致系统解列时，需要采取功率平衡控制以使各孤岛中的发电量和负荷量恢复平衡。功率平衡控制包括发电机调度控制和切机切负荷控制。

首先采取发电机调度控制，其中对于发电机出力大于负荷的孤岛，将孤岛内发电机按照有功功率的比例进行减小，直到发电机达到调节下限或孤岛恢复功率平衡；对于发电机出力小于负荷的孤岛，将孤岛内发电机按照有功功率的比例进行增加，直到发电机达到调节上限或孤岛恢复功率平衡。

当发电机调度控制无法使孤岛恢复功率平衡时，采取切机切负荷控制，其中对于发电机出力大于负荷的孤岛，将孤岛内发电机按照有功功率的比例进行切除；对于发电机出力小于负荷的孤岛，将孤岛内负荷按照有功功率的比例进行切除。

根据 1.1 到 1.3 的内容，可得到连锁故障搜索流程如图 1 所示，该流程图适用于基于 DC-SM 和 AC-SM 的连锁故障搜索，其中 DC-SM 的结束条件为无线路过载，而 AC-SM 的结束条件为无线路过载或潮流不收敛。

3. 不同仿真模型的对比分析

在 n 节点系统中，交流潮流方程中支路 ij 的有功潮流计算公式[11]为：

$$P_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ij} \quad (2)$$

式中： V_i 和 V_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压大小， G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的互电导和互电纳， θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 的电压相角差。

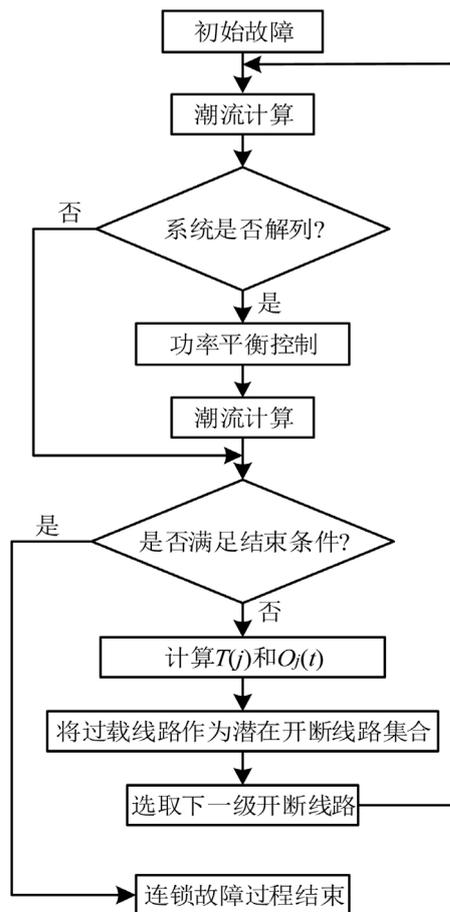


Figure 1. Flowchart of forecasting based on steady model

图 1. 基于稳态模型的连锁故障搜索流程

在交流潮流方程的基础上, 将节点电压近似为 1, 线路两端电压相角差近似为 0, 并忽略电阻 r_{ij} , 则直流潮流方程中支路 ij 的有功潮流计算公式为:

$$P_{ij} = \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad (3)$$

式中: x_{ij} 为支路 ij 的电抗。

从直流潮流计算和交流潮流计算方程可知, 在超高压网络中(阻抗比很小), DC-SM 和 AC-SM 之间的误差主要来自 DC-SM 对节点电压和线路两端相角差的简化处理。

在机电暂态过程中, 二阶经典发电机输出功率主要受到母线电压和功角的影响, 而支路潮流可以根据发电机输出功率以及相应的节点输入功率得到。由于母线电压和功角都是时变量, 因此 SM 和 TM 之间的误差主要是由于 SM 忽略了故障发生后的暂态过程, 无法反映暂态稳定性问题, 包括暂态电压、暂态功角等因素的影响。

为了分析 DC-SM、AC-SM 和 TM 在连锁故障预测中的一致性和差异性, 本章根据图 1 的流程图, 用 DC-SM 预测连锁故障路径并计算每级故障的发生时刻, 之后分别用 AC-SM 和 TM 仿真该连锁故障路径, 其中 TM 中每级故障的发生时刻参考 DC-SM, 并对比不同仿真模型下各级故障后的系统潮流分布以及潜在开断线路集合。当系统潮流分布或潜在开断线路集合差异较小时(比如潜在开断线路集合的差异小于等于两条线路), 认为各模型间保持一致性, 而当系统潮流分布或潜在开断线路集合出现较大差异时(比如潜在开断线路集合的差异大于两条线路), 则认为各模型间趋于不同。

为了对模型间的一致性阶段和差异性阶段进行划分, 本文将开断后造成各模型间趋于不同的线路称为关键线路。本文参考文献[19]中相关定义, 从功角稳定和电压稳定的角度定义关键线路判断准则, 并对判断标准进行了重新设定。则有, 关键线路判断准则: 1) 任意两个发电机的最大功角差大于 180° ; 2) 母线电压相比额定值的偏移量大于 25% 且持续时间超过 1 s。

根据上述定义, 关键线路就是满足判断准则时刚开断的线路。例如当系统线路 k 开断和线路 $k+1$ 开断之间某个时刻满足了关键线路判断准则, 则线路 k 是关键线路。

4. 算例

仿真计算以 IEEE39 节点系统为例, 该系统阻抗比的平均值为 0.073。仿真中临界累积值 $O_{j,limit}$ 为线路 j 的潮流值超过潮流极限值 50% 且持续 5 s 时的累计值[20], 发电机调节的上下限分别为发电机初始值的上下 10%。算例中初始故障集为系统所有线路。

4.1. 基于 SM 和 TM 的连锁故障仿真对比

选取线路 8 为初始故障, 根据图 1 所示的搜索流程, 可得到基于 DC-SM 的连锁故障演化路径, 如表 1 所示。

以表 1 中的路径 1 为例, 说明电压因素的影响。在 AC-SM 和 TM 中设置相同的线路故障和时间, 得到基于 DC-SM、AC-SM 和 TM 的系统潮流分布的变化图, 如图 2 所示(图中表格内第一列为线路编号, 第二列为负载率)。需要说明的是, 为了突出系统中重要线路的潮流分布, 图 2 中只显示过载线路集合。

从图 2 可以看出, 初始故障线路 8 开断后, 发电机 32 只能通过线路 12 向负荷 4 供电, 这导致线路 12 的有功潮流立即增加; 线路 12 在 22.64 s 开断后, 线路 21 成为发电机 32、33、34、35、36 向外传输功率的唯一路径, 其负载率达到最大; 线路 21 在 29.09 s 开断后, 系统解列为 2 个孤岛, 经过功率平衡控制后, 线路 3 上的有功潮流因发电机 30、37、38 有功功率的增加而增加, 并在 45.85 s 开断; 线路 3 的开断导致其并行输电线路 31 的潮流急剧增加, 并使线路 31 在 54.43 s 开断。直到此时, DC-SM、AC-SM

Table 1. Cascading failure paths based on DC-SM
表 1. 基于 DC-SM 的连锁故障演化路径

事件序号	路径 1		路径 2	
	线路	时间(s)	线路	时间(s)
1	L8	0.1	L8	0.1
2	L12	22.64	L12	22.64
3	L21	29.09	L25	41.32
4	L3	45.85	L4	43.51
5	L31	54.43	—	—
6	L7	57.44	—	—

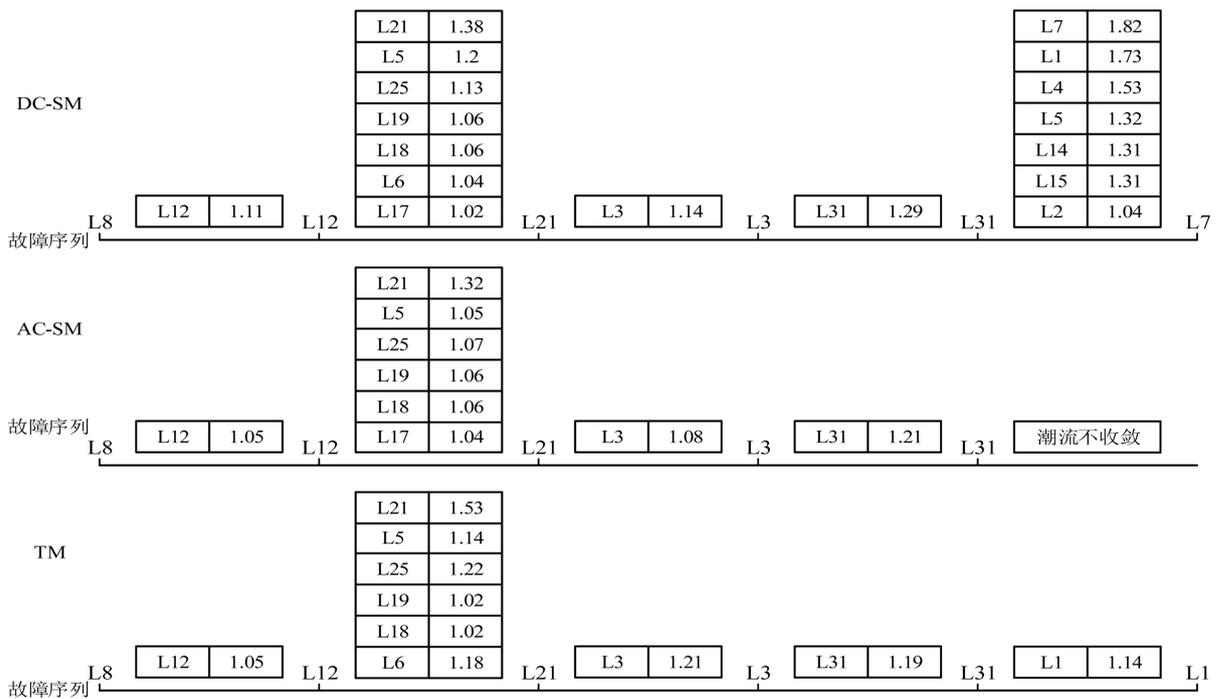


Figure 2. Distribution of power flow in different stages of cascading failure path1

图 2. 连锁故障路径 1 中各阶段的系统潮流分布

和 TM 间仍保持一致性。

图 3 为连锁故障路径 1 中节点 3、节点 4、节点 15、节点 18 等对应的节点电压。从图 3 可以看出，当线路 31 开断后，部分节点的电压急剧下降，系统出现电压崩溃，此时 DC-SM、AC-SM 和 TM 已经开始趋于不同。从图 2 可以看出，AC-SM 由于系统无功和电压的问题较为严重，潮流无法收敛；而 DC-SM 由于假设节点电压保持在额定电压附近，得到的系统潮流分布与 TM 相差很大，比如图 2 中 DC-SM 有多条线路过载，且过载最严重线路为线路 7，而 TM 只有线路 1 过载。综上所述，当线路 31 开断后，由于电压因素的影响，DC-SM 和 AC-SM 已经无法准确进行连锁故障路径的搜索，因此线路 31 是连锁故障路径 1 中的关键线路，DC-SM 和 AC-SM 适用于线路 31 开断前的连锁故障路径预测。

同理，以表 1 中的路径 2 为例，说明功角因素的影响。各仿真模型中线路 8 和线路 12 开断后的系统潮流分布如图 1 所示，线路 25 开断后的系统潮流分布如表 2 所示。

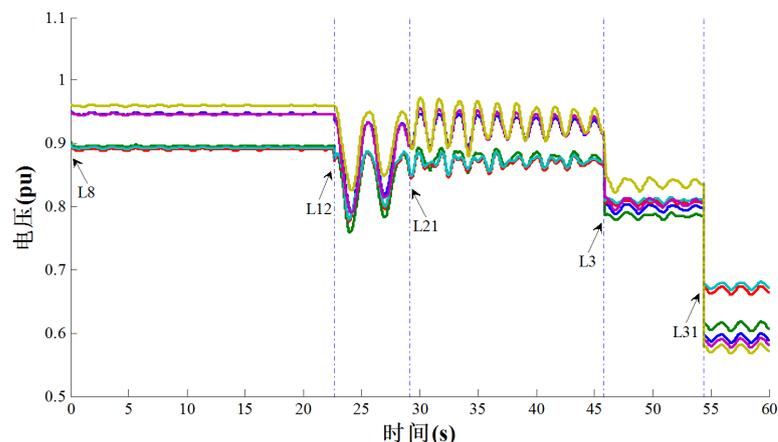


Figure 3. Bus voltage in cascading failure path 1

图 3. 连锁故障路径 1 中系统部分节点电压

Table 2. Distribution of power flow in cascading failure path2 after line 25 is outage

表 2. 连锁故障路径 2 中线路 25 开断后的系统潮流分布

DC-SM		AC-SM		TM	
线路序号	负载率	线路序号	负载率	线路序号	负载率
4	2.13	4	1.81	4	1.23
3	2.05	3	1.78	—	—
26	1.38	26	1.31	—	—
21	1.38	21	1.32	—	—
30	1.25	30	1.11	—	—
5	1.09	19	1.06	—	—
19	1.06	18	1.07	—	—
18	1.06	17	1.04	—	—
17	1.02	—	—	—	—

图 4 为连锁故障路径 2 中发电机最大功角差，图 5 为连锁故障路径 2 中 39 个节点对应的节点电压。

可以看出，当线路 25 开断后，部分发电机开始失步，并伴随着电压失稳，系统失去稳定。如果这种情况出现在实际系统中，调度人员将会采取切机等措施来防止系统稳定性被进一步破坏。上述原因导致 SM 和 TM 间出现较大差异，从表 2 可以看出，DC-SM 和 AC-SM 的潮流分布较为相似，但与 TM 却存在明显区别，这是因为 SM 忽略了故障后暂态过程的影响，当线路 25 开断后，系统被注入大量的暂态能量并过分汇集在线路 4，引起线路 4 失稳[21]，导致系统功角失稳。综上所述，当线路 25 开断后，由于功角因素的影响，DC-SM 和 AC-SM 已经无法准确进行连锁故障路径的搜索，因此线路 25 是连锁故障路径 2 中的关键线路，DC-SM 和 AC-SM 适用于线路 25 开断前的连锁故障路径预测。

从上述分析可以看出，SM 和 TM 在关键线路开断前的缓慢相继开断阶段能保持较高的一致性，而在关键线路开断后的快速相继开断阶段，系统发生功角失稳或电压失稳，SM 和 TM 开始趋于不同，此时忽略暂态过程的 SM 已经无法准确进行连锁故障路径的搜索。

4.2. 基于 HM 和 TM 的连锁故障仿真对比

从上文可以看出，关键线路开断后 SM 和 TM 趋于不同，此时 SM 不能准确反映系统运行状态，无法继

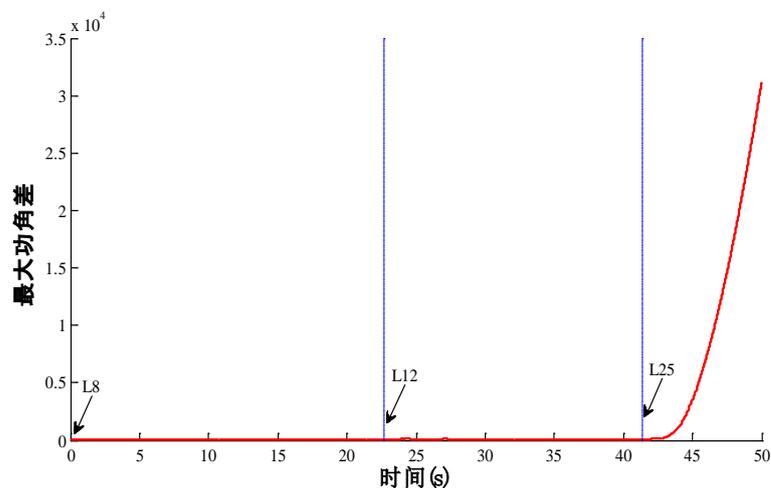


Figure 4. The maximum relative power angle in cascading failure path 2
图 4. 连锁故障路径 2 中系统发电机最大功角差

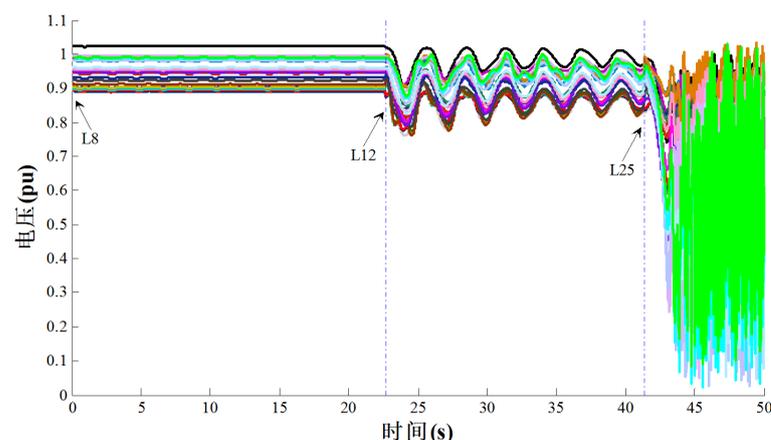


Figure 5. Bus voltage in cascading failure path 2
图 5. 连锁故障路径 2 中系统节点电压

续连锁故障路径的搜索。HM 是对 SM 和 TM 的一种折中方法，其核心就是在 SM 的基础上嵌入一个 TM，该 TM 主要作用是进行暂态稳定判断和控制，以消除系统暂态失稳，当系统到达平衡点时，TM 结束，返回 SM 中更新系统状态并进行潮流计算，继续搜索下一级故障。HM 与 TM、SM 在连锁故障搜索中的关系如图 6 所示。

为了分析 HM 在快速相继开断阶段中进行连锁故障搜索的有效性，本章先用 HM 仿真连锁故障路径。HM 仿真采用电力系统综合稳定程序(PASAP)，其中 HM 中的 SM 部分使用 PASAP 中的潮流计算模块，HM 中的 TM 部分使用 PASAP 中的暂态稳定计算模块。每一次故障发生后，首先运行暂态稳定计算模块，在暂态稳定计算模块中根据搜索路径设定开断线路，若系统暂态稳定，则直接返回潮流计算模块，在潮流计算模块中根据搜索路径设定开断线路，再进行潮流计算；若系统暂态失稳，则需要采取控制方案(切机切负荷等)使系统恢复稳定，然后返回潮流计算模块，在潮流计算模块中更新发电机负荷状态，根据搜索路径设定开断线路，再计算潮流。之后，用 TM 仿真与 HM 相同的连锁故障路径，并对比不同仿真模型下各级故障后的系统潮流分布以及潜在开断线路集合。需要说明的是，TM 仿真也需要在系统暂态失稳时加入控制方案使系统恢复稳定，以便与 HM 的仿真结果在同样条件下对比。

以表 1 中的连锁故障路径 2 为例，采用 HM 仿真连锁故障，可得到基于 HM 的系统潮流分布的变化图，如图 7 所示。

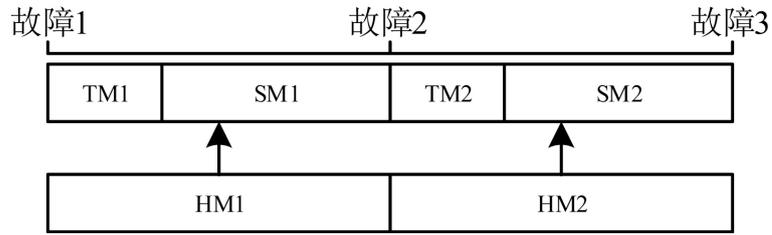


Figure 6. The relationship between HM and TM, SM
图 6. HM 与 TM、SM 的关系

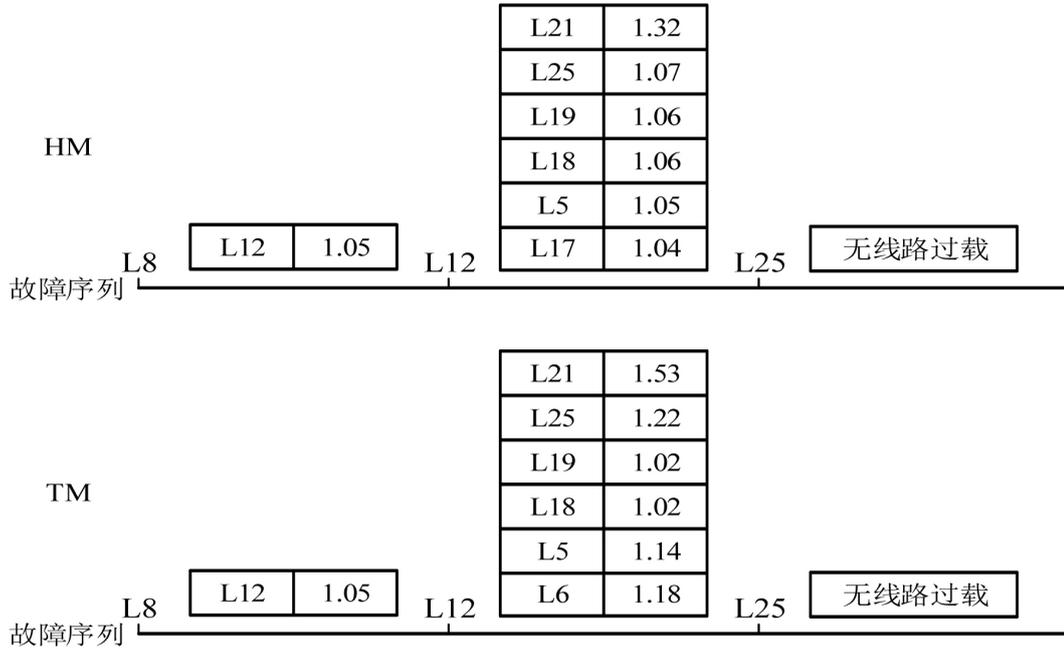


Figure 7. Distribution of power flow in different stages of cascading failure path based on HM and TM
图 7. 基于 HM 和 TM 的连锁故障路径在各阶段的潮流分布

从图 7 可以看出，在关键线路 25 开断前，系统保持暂态稳定，因此在 HM 的 TM 中只进行暂态稳定判断，然后通过 HM 的 SM 模块计算潮流并搜索下一级故障，此时的 HM 相当于 SM，而由于关键线路开断前 SM 和 TM 能够保持一致，因此 HM 也能够与 TM 保持一致；当关键线路 25 开断后，在 HM 的 TM 模块中判断系统功角失稳后，采取暂态稳定控制使系统恢复稳定，之后返回 HM 的 SM 模块中更新系统状态并计算潮流，从而得到新稳定运行点下的系统潮流分布。从图 7 可见，HM 和 TM 在关键线路开断前后都能保持较高的一致性，解决了 SM 在关键线路开断后与 TM 存在较大差异的问题。HM 可以解决 SM 忽略暂态过程，无法反映系统暂态稳定性的问题，当系统出现暂态失稳时，HM 可以先在 TM 中采取稳定控制使系统恢复稳定，再在新的稳定运行点下进行潮流计算，从而消除系统失稳带来的误差。

5. 结论

本文将连锁故障传播阶段划分为关键线路开断前的缓慢相继开断阶段和关键线路开断后的快速相继开断阶段，对 AC-SM、DC-SM 与 TM 的仿真结果进行对比，详细分析模型的一致性和差异性。算例分析表明，在关键线路开断前，AC-SM、DC-SM 与 TM 间具有较高的一致性，但在关键线路开断后，AC-SM、DC-SM 与 TM 间表现出明显的差异性，此时 DC-SM 和 AC-SM 已经不能准确反映系统运行状态，无法继续连锁故障路径的搜索。因此 AC-SM 和 DC-SM 模型更适合关键线路开断前，即系统发生暂态失稳前

的连锁故障仿真和路径搜索。

此外,针对 SM 模型存在的问题,本章将 HM 模型用于快速相继开断阶段的连锁故障仿真和路径搜索。通过算例分析可以看出, HM 可以解决 SM 忽略暂态过程,无法反映系统暂态稳定性的问题,消除系统暂态失稳带来的误差,从而与 TM 的仿真结果保持较高的一致性。因此 HM 既适用于关键线路开断前的缓慢相继开断阶段,也适用于关键线路开断后的快速相继开断阶段的连锁故障仿真和路径搜索。

参考文献

- [1] 印永华,郭剑波,赵建军,卜广全. 美加“8.14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-11.
- [2] 梁志峰,葛睿,董昱,陈刚. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及对我国电网调度运行工作的启示[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1841-1848.
- [3] 葛睿,董昱,吕跃春. 欧洲“11.4”大停电事故分析及对我国电网运行工作的启示[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 1-6.
- [4] Kirschen, D., Jayaweera, D., Nedic, D. and Allan, R. (2004) A Probabilistic Indicator of System Stress. *IEEE Transactions on Power Systems*, **19**, 1650-1657. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.831665>
- [5] Rios, M., Kirschen, D., Jayaweera, D., Nedic, D. and Allan, R. (2002) Value of Security: Modeling Time-Dependent Phenomena and Weather Conditions. *IEEE Transactions on Power Systems*, **17**, 543-548. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.800872>
- [6] Dobson, I., Carreras, B., Lynch, V. and Newman, D. (2001) An Initial Model of Complex Dynamics in Electric Power System Blackouts. *System Sciences*, 710-718.
- [7] Mei, S., He, F., Zhang, X., Wu, S. and Wang, G. (2009) An Improved Opa Model and Blackout Risk Assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, **24**, 814-823. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2016521>
- [8] 吴文可,文福栓,薛禹胜,等. 基于马尔科夫链的电力系统连锁故障预测[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 29-37.
- [9] 丁明,肖遥,张晶晶,何剑. 基于事故链及动态故障树的电网连锁故障风险评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 821-829.
- [10] 马志远,石立宝,姚良忠,倪以信. 电网连锁故障的事故链搜索模型及策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3292-3302.
- [11] 赵晋泉,叶君玲,邓勇. 直流潮流与交流潮流的对比分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 147-152.
- [12] 于洋,黄民翔,辛焕海,甘德强,等. 基于动态仿真的连锁故障分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 15-21.
- [13] 汤涌,宋新立,刘文焯,周孝信. 电力系统全过程动态仿真的数值方法——电力系统全过程动态仿真软件开发之一[J]. 电网技术, 2002, 26(9): 8-12.
- [14] 邓慧琼,艾欣,张东英,等. 基于不确定多属性决策理论的电网连锁故障模式搜索方法[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 50-55.
- [15] 李生虎,丁明,王敏,等. 考虑故障不确定性和保护动作性能的电网连锁故障模式搜索[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 27-31.
- [16] Henneaux, P., Labeau, P.E. and Maun, J.C. (2012) A Level-1 Probabilistic Risk Assessment to Blackout Hazard in Transmission Power Systems. *Reliability Engineering & System Safety*, **102**, 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.02.007>
- [17] Henneaux, P., Labeau, P.E. and Maun, J.C. (2013) Blackout Probabilistic Risk Assessment and Thermal Effects: Impacts of Changes in Generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**, 4722-4731. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2263851>
- [18] Henneaux, P., Labeau, P.E. and Maun, J.C., et al. (2016) A Two-Level Probabilistic Risk Assessment of Cascading Outages. *IEEE Transactions on Power Systems*, **31**, 2393-2403. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2439214>
- [19] Yan, J., Tang, Y., He, H. and Sun, Y. (2015) Cascading Failure Analysis with DC Power Flow Model and Transient Stability Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, **30**, 285-297. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2322082>
- [20] Eppstein, M. and Hines, P. (2012) A “Random Chemistry” Algorithm for Identifying Collections of Multiple Contingencies That Initiate Cascading Failure. *IEEE Transactions on Power Systems*, **27**, 1698-1705. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2183624>
- [21] 蔡伟国,穆钢, K. W. Chan, 卢芳. 基于网络信息的暂态稳定性定量分析——支路势能法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 1-6.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8763，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：sg@hanspub.org